

断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气差异富集的影响

——以川中地区侏罗系沙溪庙组为例

刘明洁¹,刘恒宇²,肖尧³,宋林珂³,曹脊翔³,李唐律³,王锦西³,梁晨¹

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院,四川 成都 610500;2. 中国石油 西南油气田分公司 勘探事业部,四川 成都 610041;
3. 中国石油 西南油气田分公司 致密油气勘探开发项目部,四川 成都 610056)

摘要:为明确川中地区侏罗系沙溪庙组远源型致密砂岩气差异富集规律,基于气源断层解释、砂体刻画与成藏期古构造恢复,分析了沙溪庙组成藏期与现今断层-砂体配置关系,明确了成藏期至今断层-砂体配置演化模式及分布规律,进而结合现今产气井分布特征探讨了该演化模式对天然气差异富集的影响。研究表明:沙溪庙组断层-砂体配置关系存在断层与近水平砂体对接(①类)、断层与倾向一致的缓倾角砂体对接(②类)以及断层与倾向相反的缓倾角砂体对接(③类)3类;成藏期至今断层-砂体配置演化模式分为继承型(I型,其中成藏期与现今均呈③类,即I₁型;均呈①类,即I₂型)、调整型(II型,成藏期呈①类,演化至现今呈③类)和反转型(III型,即成藏期呈③类、演化至现今呈②类)。这3种断层-砂体配置演化模式对天然气富集可产生不同影响:I₁继承型演化模式导致天然气主要在断层上盘富集并继承保存至今,气井多表现为高产和中产;断层下盘仅聚集少量天然气并继承保存至今,气井多表现为低产。I₂继承型演化模式导致天然气主要在断层两盘聚集并继承保存至今,断层两盘气井多表现为中产和低产。调整型演化模式导致天然气在断层两盘聚集并调整改造至今,其中上盘经调整可进一步聚集或富集天然气,气井可表现为高产、中产或低产;断层下盘经调整可使天然气逸散,气井多表现为低产和特低产。反转型演化模式导致天然气在上盘富集并经反转散失至今,而在下盘少量聚集并经反转调整再次聚集至今,断层两盘气井多表现为低产和特低产。川中地区北部金秋区块I₁继承型演化模式产生的上盘继承保存富集型天然气、调整型演化模式产生的上盘调整改造富集型天然气,可作为下一阶段沙溪庙组远源型致密砂岩气勘探的重点。

关键词:差异富集;断层-砂体配置;远源型;致密砂岩气;沙溪庙组;川中地区

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Effects of the fault-sandbody configuration evolution model on differential enrichment of far-source tight sand gas: A case study of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

LIU Mingjie¹, LIU Hengyu², XIAO Yao³, SONG Linke³, CAO Jixiang³, LI Tanglyu³, WANG Jinxi³, LIANG Chen¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Exploration Division, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Tight Oil and Gas Exploration and Development Project Department, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610056, China)

Abstract: This study aims to determine the differential enrichment patterns of far-source tight sand gas in the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin. By conducting seismic interpretation of source rock-rooted faults, characterizing sand bodies, and reconstructing paleostructures during hydrocarbon accumulation, we analyze the fault-sandbody configuration modes in the Shaximiao Formation both during the hydrocarbon accumulation period and in the present day. Furthermore, the evolutionary model and spatial distribution of the configuration from the hydrocarbon accumulation period to the present are identified. Based on these, as well as the distribution characteristics of current gas producers, we explore the influence of the evolutionary model on differential natural gas enrichment. The results

收稿日期:2025-03-28;修回日期:2025-09-08。

第一作者简介:刘明洁(1985—),男,博士,副教授,储层地质学、油气成藏机理与富集规律。E-mail: mjliu@swpu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872154);中国石油西南油气田分公司科技项目(20210303-24,XNS致密JS2021-152)。

reveal the presence of three distinct modes of fault-sandbody configuration in the Shaximiao Formation, that is, juxtaposition of fault against near-horizontal sandbodies (mode 1); juxtaposition of fault against gently dipping sandbodies with consistent dip directions (mode 2); and juxtaposition of fault against gently dipping sandbodies with opposite dip directions (mode 3). From the hydrocarbon accumulation period to the present, the fault-sandbody configuration modes have experienced three types of evolutionary patterns: inherited (type I), adjusted (type II), and reversed (type III). Specifically, type I can be further divided into type I₁ (mode 3 persisting both during the hydrocarbon accumulation period and in the present day) and type I₂ (mode 1 persisting during both periods). Type II is characterized by a transition from mode 1 during the hydrocarbon accumulation period to mode 3 at present, while type III represents a shift from mode 3 during the hydrocarbon accumulation period to mode 2 in the present day. These three types of evolutionary patterns exert different influences on natural gas enrichment. Specifically, the type I₁ inherited evolutionary pattern enables natural gas to accumulate primarily in the hanging wall blocks of faults and remain preserved to the present day. Consequently, most gas producers located in these blocks show high or moderate productivity. In this evolutionary pattern, only a small amount of natural gas accumulates in the footwall blocks of faults and remains preserved to date, leading to low productivity in most wells in these blocks. The type I₂ inherited evolutionary pattern allows natural gas to accumulate and remain preserved to date primarily in both the hanging wall and footwall blocks, with most gas producers in these blocks showing moderate or low productivity. The type II adjusted evolutionary pattern facilitates the accumulation, adjustment, and modification of natural gas in both the hanging wall and footwall blocks. Consequently, natural gas may further accumulate or get enriched in the hanging wall blocks, where gas producers show high, moderate, or low productivity. In contrast, natural gas may escape from the footwall blocks after adjustment, resulting in low or ultra-low productivity in most gas producers in the footwall blocks. The type III reversed evolutionary pattern leads to natural gas enrichment in the hanging wall blocks but dissipation to date due to reversal, with only a small amount of natural gas accumulating in the footwall blocks and reaccumulating there to date after reversal. In this pattern, most gas producers in the hanging wall and footwall blocks show low or ultra-low productivity. The Jinqiu block, located in the northern part of the central Sichuan Basin, contains two types of natural gas accumulation: (1) natural gas accumulation in the hanging wall blocks, characterized by inherited preservation and enrichment, under the type I₁ inherited evolutionary pattern; and (2) natural gas accumulation in the hanging wall blocks, featuring adjustment, modification, and enrichment, under the type II adjusted evolutionary pattern. Therefore, this block be prioritized as a key target area for future exploration of far-source tight sand gas in the Shaximiao Formation.

Key words: differential enrichment, fault-sandbody configuration, far-source, tight sand gas, Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

引用格式:刘明洁,刘恒宇,肖尧,等. 断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气差异富集的影响——以川中地区侏罗系沙溪庙组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1630–1645. DOI: 10. 11743/ogg20250515.

LIU Mingjie, LIU Hengyu, XIAO Yao, et al. Effects of the fault-sandbody configuration evolution model on differential enrichment of far-source tight sand gas: A case study of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1630–1645. DOI: 10. 11743/ogg20250515.

近年来,随着油气勘探领域的拓展及开发技术的突破,中国致密砂岩气勘探开发进入快速发展的阶段,在四川、鄂尔多斯、渤海湾以及松辽等含油气盆地均有规模产出,成为提高能源自给能力、保障国家能源安全的重要组成部分^[1-5]。四川盆地致密砂岩气资源丰富,主要分布在上三叠统与侏罗系^[6]。其中,川中地区侏罗系沙溪庙组为典型的远源型致密砂岩气藏^[7-9],其天然气主要来源于上三叠统须家河组(以须五段为主)及下侏罗统自流井组

大安寨段烃源岩^[4,10-13],具有“双源多期充注、断-砂复合输导、环源规模聚集、河道差异富集”的成藏模式^[14]。

对于远源型致密砂岩气藏,烃源岩生成的油气主要通过断层和输导层等运移通道完成油气运移,进而在有利层位的有效圈闭中聚集成藏。因此,气源断层和砂体在空间上有效配置构成的输导体系,起着承前启后的关键作用^[15-19],成为影响远源型致密砂岩气成藏富集的核心要素。不同类型的断层-砂体配置样式,

其成藏期油气输导效率存在一定差异,进而影响油气的聚集成藏和富集程度;而在成藏之后的构造调整期,圈闭前期所聚集的油气受到差异调整,不同样式的断层-砂体配置演化模式可存在较大差异,进而可对油气藏产生继承、调整甚至散失等不同影响。因此,基于油气成藏富集动态演化过程,探讨断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气富集的控制,对预测远源型致密砂岩气有利区带具有重要的理论与生产意义。

前人针对断层-砂体配置的研究主要从断裂与砂体不同产状配置形态^[20-21]、分布^[22-23]及性质^[24-25]出发,探讨断层-砂体空间对接样式的分类、不同性质断层与砂体组合输导体系及其对油气藏类型与分布的控制作用^[26-31],上述研究多基于现今气藏断层-砂体的静态配置关系进行分析,缺乏从油气成藏动态演化的角度,针对成藏期至今断层-砂体配置演化模式进行研究,因而难以深入阐明远源型致密砂岩气差异成藏富集规律。本次研究充分利用钻录井、测井及三维地震资料,在气源断层、构造解释、砂体形态刻画及成藏期古构造恢复的基础上,以成藏期与现今两个时间尺度为纽带,综合分析气源断层与砂体对接形态、组合样式及成藏期至现今演化特征,归纳总结断层-砂体配置关系及演化模式,同时结合气藏生产测试资料,探讨断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气差异富集的影响,进而为川中地区沙溪庙组远源型致密砂岩气高效立体勘探开发提供理论指导。

1 研究区地质概况

四川盆地位于古扬子板块的西北缘,为上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地,盆地周缘主要被龙门山褶皱带、大巴山褶皱带、米仓山隆起带、川湘断褶带、娄山断褶带和峨眉-瓦山断块带所环绕,盆地内部主要以断裂为界限分为6个一级构造带^[32-35],研究区隶属于川中古隆中斜平缓带与川北古中坳陷低缓带(图1a)。显生宙以来,四川盆地主要经历了新元古代—早古生代克拉通拗陷阶段、晚古生代—早、中三叠世克拉通裂陷阶段和晚三叠世—白垩纪前陆盆地演化阶段^[29]。其中,三叠纪末的印支运动晚幕使东北部的米仓山和大巴山迅速隆升,成为侏罗系沉积的主要物源区,四川盆地进入侏罗纪“红色盆地”演化阶段,此时川中地区为低缓斜坡带^[36]。在此构造背景下,中侏罗统沙溪庙组发育了一套厚度在600~2800 m的巨厚红色地层,以紫红色泥岩为主,间夹中-厚层块状砂岩^[37],为干旱、氧化环境下多物源供给的河流-三角洲-湖泊沉积体

系,暗色泥岩不发育,自身不具备生烃能力^[36],常以富含双壳类以及叶肢介等古生物化石的黑色、灰绿色以及黄绿色“叶肢介页岩”为界,自下而上划分为沙(沙溪庙组)一段和沙二段,且在纵向上可进一步划分为23期砂组,其中沙一段5期,沙二段18期^[38](图1b)。

川中地区沙溪庙组致密砂岩气整体表现为河流-三角洲沉积背景下的构造-岩性气藏,气藏平均甲烷含量多在90%以上,重烃组分含量低且不含硫;地温梯度为20.5~23.9℃/km,压力系数为0.38~1.20,属于常温、低压-常压气藏^[14]。研究区紧邻川西须家河组与川中北部大安寨段生烃中心,为“双源”供烃,生气强度高、运移动力足^[9,12-14,39](图1c)。其中,须家河组烃源岩为灰黑色泥岩与煤层,厚度介于100~800 m,总有机碳含量(TOC)介于0.6%~5.8%,生烃强度介于(30.0~100.0)×10⁸ m³/km²;大安寨段烃源岩为灰黑色泥页岩,厚度介于20~80 m,TOC介于0.6%~3.8%,生烃强度介于(1.0~2.5)×10⁸ m³/km²。沙溪庙组主要储集体为三角洲前缘与三角洲平原砂体,优质砂岩储层的孔隙度和渗透率分别可达12%和0.5×10⁻³ μm²以上^[8-9]。沙溪庙组内部间互发育的泥页岩可作为直接盖层,上覆遂宁组与蓬莱镇组紫红色-暗紫红色泥岩为一套区域性盖层;区域盖层形成垂向封堵,有利于天然气整体成藏;直接盖层可构成侧向封堵,有利于天然气局部富集^[39](图1c)。

研究区位于四川盆地隆-坳过渡的斜坡带,可进一步划分为简阳区块和金秋区块两个富气区,其中简阳区块包括TF井区,金秋区块包括JQ5、JQ8、QL16、BJC及ZQ1井区(图1a)。近年来,川中地区J23和QL16等多口沙溪庙组深层井(专门针对沙溪庙组所进行钻探的井)测试获高产工业气流,探明天然气储量达1349×10⁸ m³^[14],远源型致密砂岩气勘探开发效果显著,展现出广阔的资源潜力和勘探开发前景,成为目前四川盆地致密砂岩气勘探开发的重点层系和焦点领域。

2 断层-砂体配置关系划分

2.1 气源断层发育特征

前人研究发现,川西坳陷沙溪庙组煤成气二阶段分馏模式计算所得的镜质体反射率(R_o)与成都气田须(须家河组)五段烃源岩实测 R_o 值一致^[40];沙溪庙组天然气与须五段烃源岩轻烃参数之间有较高相似性,而与须三段烃源岩和小塘子组(须一段)烃源岩轻烃配对参数相关性较差^[41];中江气田沙溪庙组天然气乙烷碳同位素比值($\delta^{13}C_2$)定量计算结果表明,须五段烃源岩

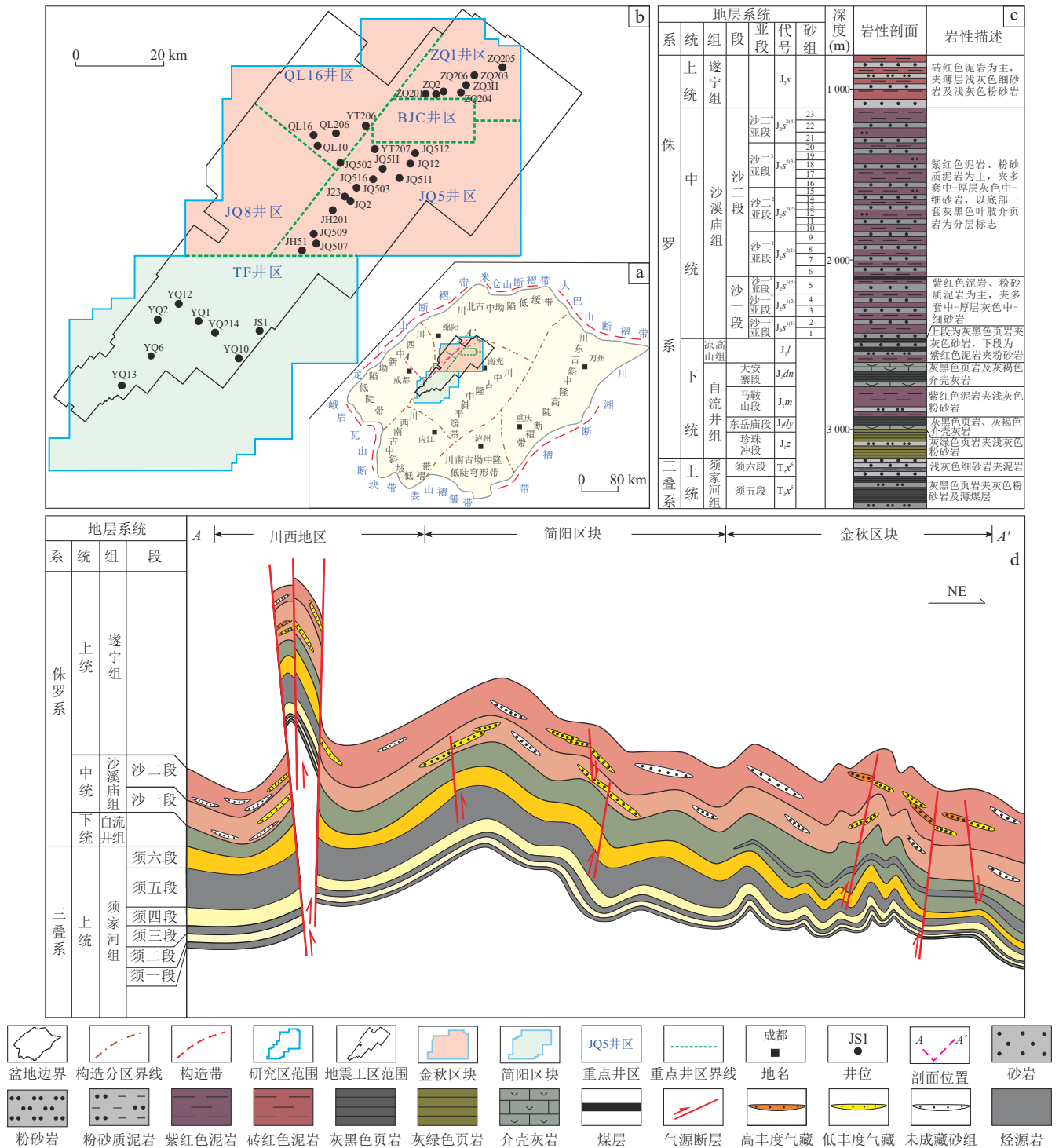


图1 四川盆地构造区划、沙溪庙组综合柱状图及天然气成藏模式

Fig. 1 Map showing the structural division (a), composite stratigraphic column (b), and the natural gas accumulation model (c) of the Shaximiao Formation, Sichuan Basin

a. 四川盆地构造区划(据文献[34],有修改)及研究区位置;b. 研究区井区及井位分布;c. 研究区中侏罗统沙溪庙组综合柱状图;d. 研究区沙溪庙组远源致密砂岩气成藏模式(剖面位置见图1a)

对沙溪庙组天然气的贡献可达60%~90%,普遍超过85%^[42]。与此同时,基于天然气组分、碳同位素和轻烃分析发现,邻近川西坳陷的川中地区沙溪庙组天然气与川西天然气特征相似,主要源于须家河组^[10]。

综上所述,川中地区沙溪庙组天然气主要来自于须五段煤系烃源岩,大安寨段油系烃源岩也有部分贡献^[4,10-13]。平面上,简阳区块天然气成因以煤型气为主,主要由须五段供烃,而金秋区块天然气成因

更为多样,煤型气、混合气以及油型气均有呈现,主要由须五段和大安寨段“双源”供烃^[9,43-44]。因此,川中地区沙溪庙组气源断层主要为向下断至须五段烃源岩和大安寨段烃源岩的气源断层。其中,须五段气源断层作为川中地区沙溪庙组致密砂岩气藏的主力气源通道,是天然气垂向高效运移的主要通道,而侏罗系内部

的大安寨段气源断层则发挥着沟通大安寨段烃源岩并接力输导须五段天然气的作用。

基于上述前人研究成果,本次利用地震资料对气源断层进行分析。断层在地震剖面上一般具有同相轴错断、同相轴变形、同相轴分叉或复波及反射振幅突变等特征(图2a),同时在最大似然属性剖面上,断层似

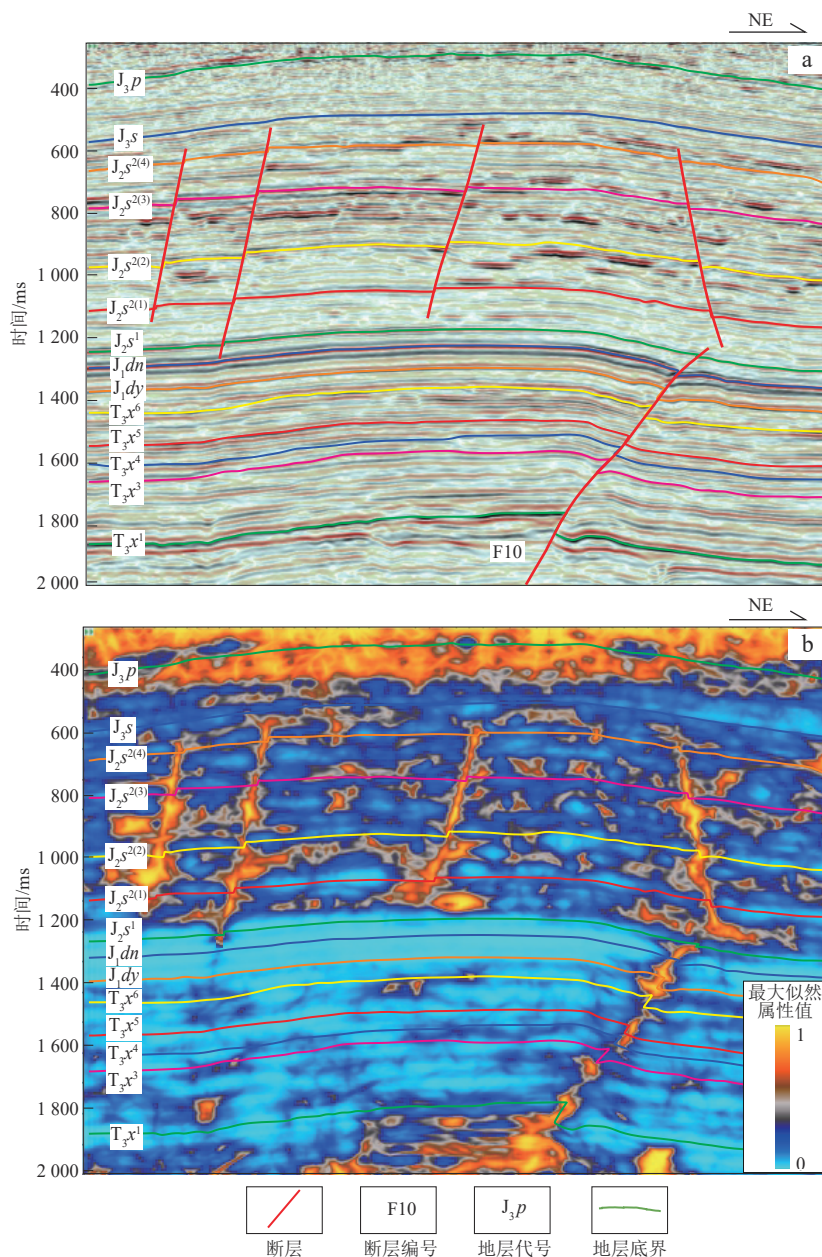


图2 川中地区中侏罗统沙溪庙组气源断层解释剖面(剖面位置见图3)

Fig. 2 Seismic interpretation sections of source rock-rooted faults in the Middle Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

(see Fig. 3 for the section line locations)

a. 断层地震解释剖面; b. 断层似然属性剖面

T_3x^1 . 上三叠统须家河组一段底界; T_3x^3 . 上三叠统须家河组三段底界; T_3x^4 . 上三叠统须家河组四段底界; T_3x^5 . 上三叠统须家河组五段底界; T_3x^6 . 上三叠统须家河组六段底界; J_1dy . 下侏罗统自流井组东岳庙段底界; J_1dn . 下侏罗统自流井组大安寨段底界; J_2s^1 . 中侏罗统沙溪庙组一段底界; $J_2s^{2(1)}$. 中侏罗统沙溪庙组二段1亚段底界; $J_2s^{2(2)}$. 中侏罗统沙溪庙组二段2亚段底界; $J_2s^{2(3)}$. 中侏罗统沙溪庙组二段3亚段底界; $J_2s^{2(4)}$. 中侏罗统沙溪庙组二段4亚段底界

然属性数值多接近1^[45](图2b)。

依据以上气源断层地震响应特征,精细刻画出研究区须五段“大型”气源逆断层12条,侏罗系内部的“小型”气源正断层28条,整体上气源断裂走向多表现为NE,NNE,NW及近WE向(图3)。其中须五段气源断层主要分布在简阳区块TF井区、金秋区块JQ5井区及BJC井区,延伸长度在2.48~15.98 km,断距在20~100 m;大安寨段气源断层主要分布在简阳区块TF井区和金秋区块JQ5,BJC及ZQ1井区,延伸长度在0.65~3.55 km,断距在10~80 m。

2.2 砂体展布特征

川中地区沙溪庙组主要发育河流-三角洲-湖泊沉积体系,物源主要来自盆地东北部的米仓山及大巴山,砂体多呈NE-SW向展布^[36,46]。研究区沙溪庙组纵向上富气砂组主要分布在沙一段1,3和5砂组以及沙二段6,8和9砂组^[43]。沙一段处于相对温暖潮湿的沉积环境,研究区湖泊分布范围相对稳定,砂体主要发育在三角洲前缘水下分流河道及河口砂坝,单期河道砂体规模较大^[46];1砂组宽度为0.7~7.0 km,砂体厚度为10~60 m,延伸长度为30~170 km;3砂组宽度为1.5~8.0 km,砂体厚度为5~60 m,延伸长度为25~130 km;5砂组宽度为

1.6~12.0 km,砂体厚度为5~30 m,延伸长度为32~165 km。沙二段处于相对干旱炎热的沉积环境,研究区湖泊水体发育不稳定,砂体主要发育在三角洲平原分流河道,单期河道砂体规模较小,河口砂坝不发育^[46];6砂组宽度为0.3~3.0 km,砂体厚度为50~70 m,延伸长度为70~175 km;8砂组宽度为0.2~1.5 km,砂体厚度为60~80 m,延伸长度为50~200 km;9砂组宽度为0.5~5.0 km,砂体厚度为30~50 m,延伸长度为80~200 km(图4)。整体上,研究区沙溪庙组河道砂体纵向上多期砂组叠置发育,平面上不同区块交错展布。

2.3 断层-砂体配置关系

本次研究基于川中地区沙溪庙组气源断层解释及多期河道砂体精细刻画成果,分析气源断层与砂体之间不同类型的对接组合样式,总结出川中地区沙溪庙组存在以下3类配置关系。①类配置关系:砂体平面上走向与构造线走向一致,剖面上表现为近水平展布(倾角<5°),气源断层与近水平砂体对接;②类配置关系:砂体平面上走向与构造线走向呈大角度相交,剖面上表现为缓倾角展布(倾角5°~30°),气源断裂与缓倾角砂体对接,且砂体倾向与断层倾向相同,断层面分别与上盘砂体的上倾方向和下盘砂体的下倾方向对接;③类配置关系:砂体平面上走向与构造线走向同样呈大角度相交,剖面上仍表现为缓倾角展布(倾角5°~30°),气源断裂与缓倾角砂体对接,但砂体倾向与断层倾向相反,断层面分别与上盘砂体的下倾方向和下盘砂体的上倾方向对接(图5)。

3 断层-砂体配置演化模式

3.1 成藏期古构造特征

基于沉积-沉降补偿原理,在沉降和沉积速度相对稳定的情况下,盆地的古地理环境保持不变,盆地内沉积物的堆积厚度与地壳沉降幅度大体相当^[47-48]。川中地区由于刚性基底的存在,所受挤压力弱,构造形变强度低^[32],因此,本次研究采用“厚度图”法对川中地区沙溪庙组成藏期古构造进行恢复,具体步骤为:①综合利用研究区内钻录井、测井及地震等资料,对重点层系进行精细标定和对比追踪;②选取成藏期全区可追踪对比的等时地层界面作为顶层,将目的层作为底层,用底层深度值减去顶层深度值,进而得到地层厚度平面图;③利用地质资料进行压实校正及剥蚀量校正等,使恢复的结果更加详尽准确^[49]。

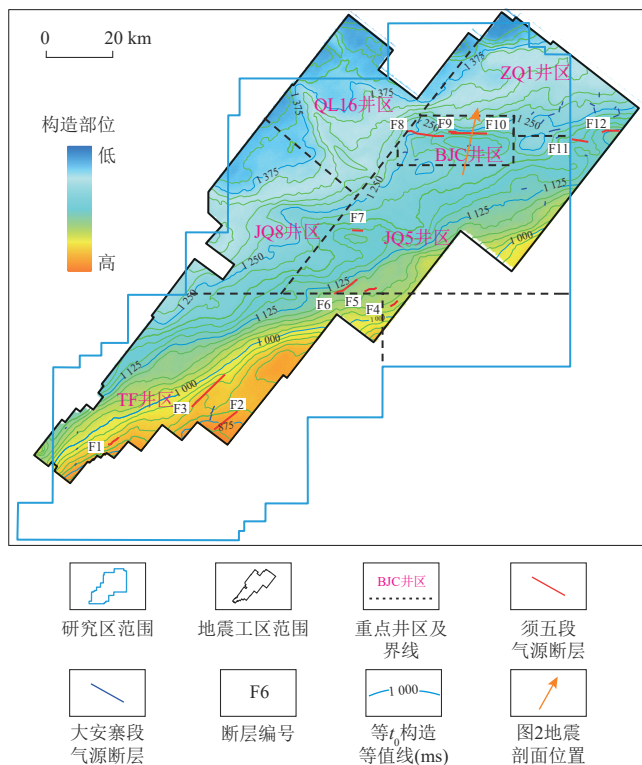


图3 川中地区沙溪庙组底界地震反射构造特征

Fig. 3 Seismic-derived structural contour map on the bottom of the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

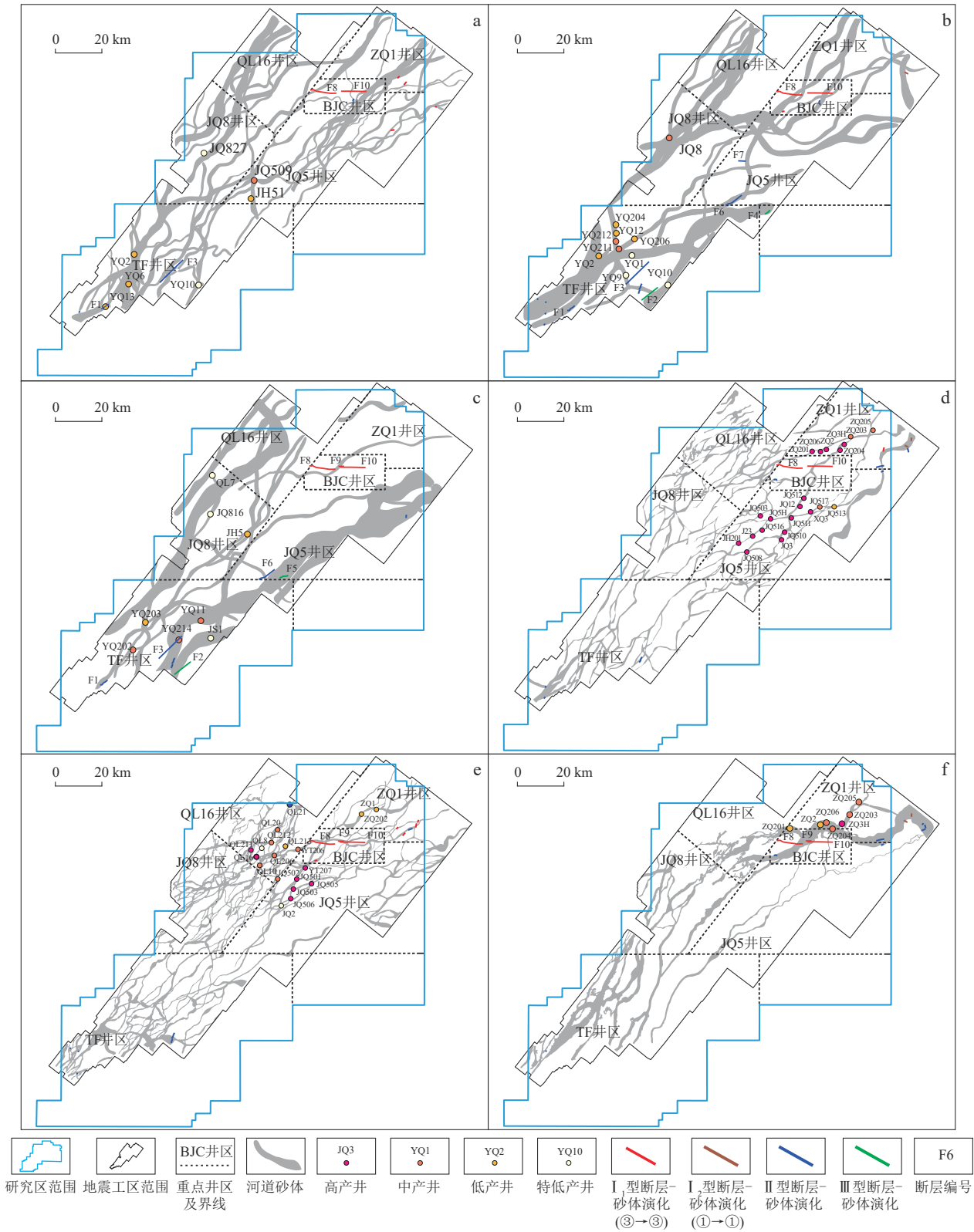


图4 川中地区沙溪庙组不同砂组、气源断层及产气井叠合图

Fig. 4 Superimposed maps of various sand groups, source rock-rooted faults, and gas-producing wells in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

a. 1砂组;b. 3砂组;c. 5砂组;d. 6砂组;e. 8砂组;f. 9砂组

依照上述方法,对川中地区沙溪庙组成藏关键期古构造进行恢复。前人研究认为,沙溪庙组储层烃

类气体充注始于晚侏罗世末期—早白垩世(中—晚燕山期)^[41]。本次研究基于三维地震数据,针对研究区

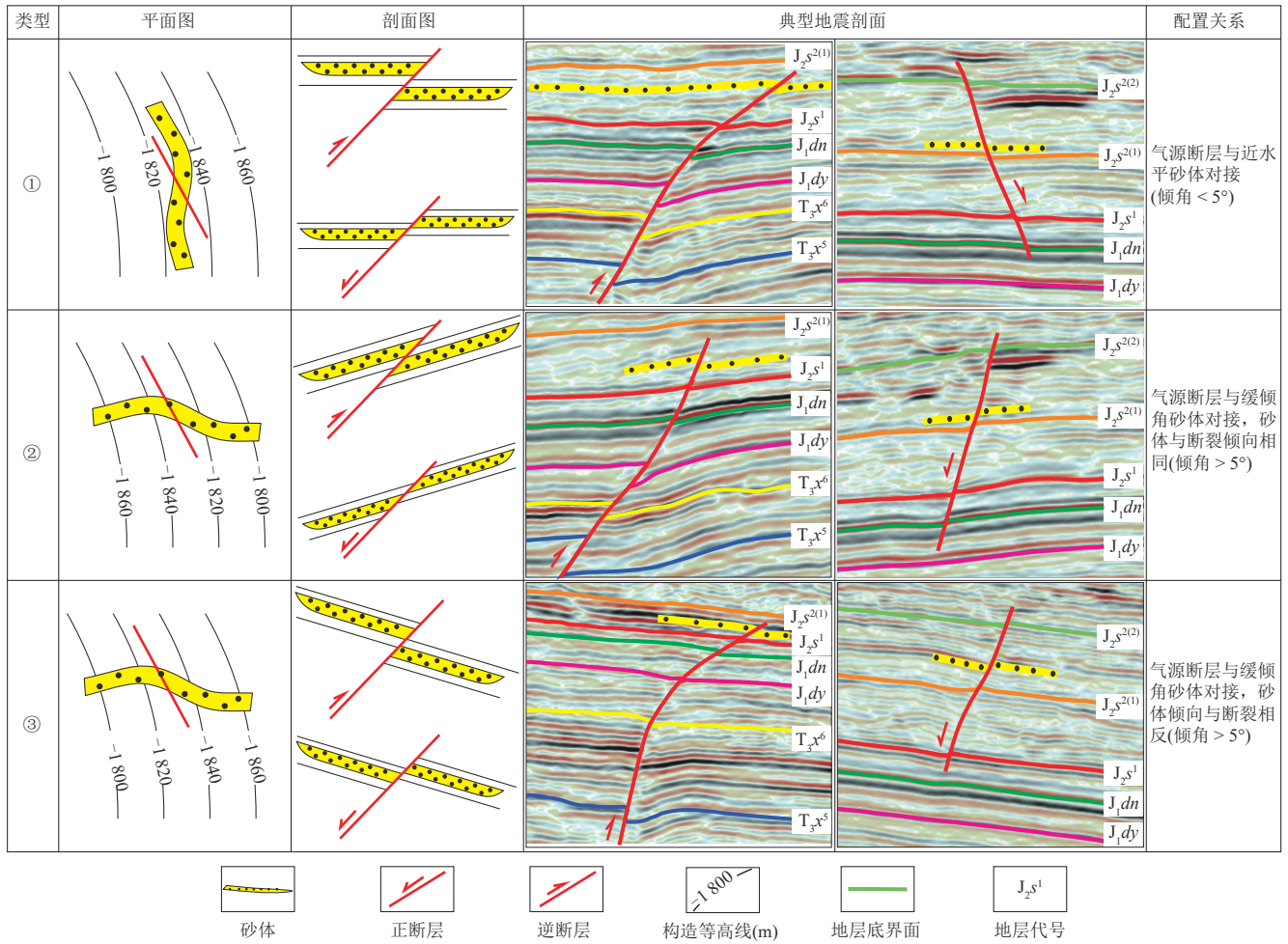


图5 川中地区沙溪庙组断层-砂体配置类型示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing the fault-sandbody configuration modes in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

(图中的地层代号说明见图2。)

上三叠统-侏罗系各重点地震反射层位进行解释,选取上侏罗统蓬莱镇组底界作为等时基准面顶层,以目的层沙溪庙组底界作为底层(图2),用底面深度值减去顶面深度值,二者的深度差在平面上的分布特征,即可反映沙溪庙组在晚侏罗世成藏关键期的古构造形态^[49]。深度差计算所得厚度较大的区域表明在成藏期处于相对构造低部位,而厚度小的区域则在成藏期处于相对构造高部位,据此可明确沙溪庙组顶界成藏期古构造分布特征。研究结果表明,川中地区沙溪庙组晚侏罗世成藏期古构造整体上呈南西高、北东低的格局,总体构造较为平缓,仅局部发育小型构造(图6)。

3.2 断层-砂体配置演化模式

本次研究基于前人研究成果及成藏期古构造恢复,将蓬莱镇组底界进行拉平,从而得到沙溪庙组在晚侏罗世成藏期的典型地震剖面。在此基础上,综

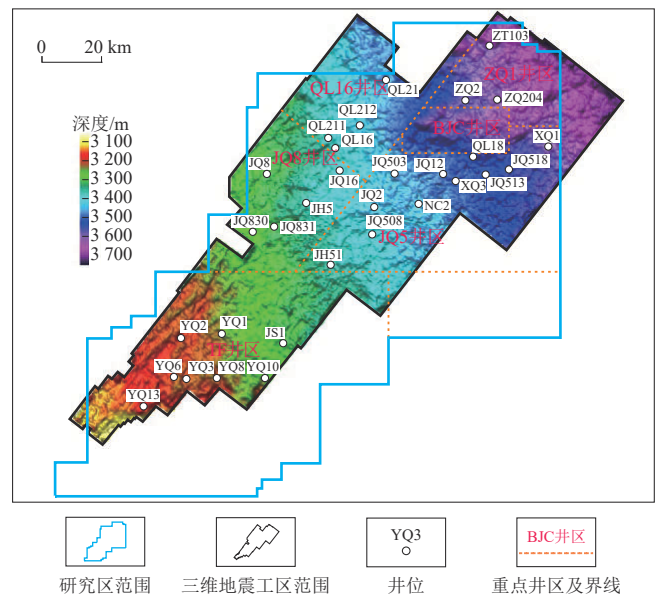


图6 川中地区晚侏罗世成藏期沙溪庙组古地貌

Fig. 6 Paleogeomorphology of the Shaximiao Formation during the Late Jurassic hydrocarbon accumulation in the central Sichuan Basin

合研究区气源断层解释与砂体展布刻画,深入分析成藏期和现今两个关键阶段气源断层与砂体的配置关系,阐明典型砂组气藏断层-砂体配置演化实例,进而总结出川中地区沙溪庙组远源型致密砂岩气成藏期至今断层-砂体配置演化模式存在以下3种类型。

I型:成藏期气源断层与缓倾角砂体对接,且断层倾向与砂体倾向相反,断层面分别与上盘砂体的下倾方向和下盘砂体的上倾方向对接,表现为③类配置关系,现今气源断层与砂体对接关系保持不变,仍为③类配置关系。例如,8砂组JQ501—YT207—ZQ202井区气藏砂体成藏期倾向为北东向,且砂体倾角较小,与之相对接的气源断层倾向为南西向,断层与砂体倾向呈相反的特征,现今断层与砂体对接关系不变,二者倾向仍保持相反,仅砂体倾角较成藏期略微变大(图7)。成藏期气源断层与近水平砂体对接,表现为①类配置关系,现今气源断层与砂体对接关系保持不变,仍为①类配置关系。例如,9砂组ZQ205Z—ZQ203井区气藏砂体成藏期倾向为北东向,且砂体倾角近水平状,与之相对接的气源断层倾向同样为北东向,断层与砂体倾向呈相同的特征,现今断层与砂体对接关系不变,二者倾向仍保持相同,且砂体倾角较成藏期无明显变化(图7)。因此,成藏期至今断层-砂体配置关系可表现为继承型演化模式,并将成藏期与现今均为③类配置关系的划分为I₁型,成藏期与现今均为①类配置关系的划分为I₂型(图7)。

II型:成藏期气源断层与近水平砂体对接,表现为①类配置关系,现今气源断层与砂体呈缓倾角对接关系,且断层倾向与砂体倾向相反,断层面分别与上盘砂体的下倾方向和下盘砂体的上倾方向对接,表现为③类配置关系。例如,1砂组YQ13—YQ6井区气藏砂体成藏期倾向呈南西向,且砂体倾角较小近水平状,与之相对接的气源断层倾向为北东向,断层与砂体倾向呈相反的特征,现今断层与砂体对接关系不变,二者倾向仍保持相反,且砂体倾角较成藏期明显变大(图7)。因此,成藏期至今断层-砂体配置关系表现为调整型演化模式(图7)。

III型:成藏期气源断层与砂体呈缓倾角对接关系,且断层倾向与砂体倾向相反,断层面分别与上盘砂体的下倾方向和下盘砂体的上倾方向对接,表现为③类配置关系,现今气源断层与砂体仍呈缓倾角对接关系,但断层倾向与砂体倾向相同,断层面分别与上盘砂体的上倾方向和下盘砂体的下倾方向对接,表现为②类配置关系。例如,3砂组YQ1—YQ10

井区气藏成藏期倾向呈南东向,且砂体倾角较小,与之相对接的气源断层倾向为北西向,断层与砂体倾向呈相反的特征,现今砂体倾向发生反转转变为北西向,与断层倾向相同,断层与砂体对接关系发生改变,且砂体倾角较成藏期无明显变化(图7)。因此,成藏期至今断层-砂体配置关系表现为反转型演化模式(图7)。

研究发现,川中地区沙溪庙组气源断层-砂体配置演化模式以调整型(II型)为主,在北部的金秋区块和南部的简阳区块均有分布;继承型(I型)气源断层-砂体配置演化模式主要表现为I₁型,集中分布在金秋区块BJC井区和ZQ1井区,少量I₂型主要分布在金秋区块ZQ1井区;反转型(III型)气源断层-砂体配置演化模式主要分布在简阳区块TF井区和金秋区块JQ5井区(图4)。

4 断层-砂体配置演化模式对致密砂岩气差异富集的影响

4.1 致密砂岩气差异富集特征

前人研究发现,四川盆地沙溪庙组致密砂岩气整体表现为“深源浅聚、相储密切、断裂输导、圈闭富集”的成藏规律^[50-51],表明该组致密砂岩气富集受断层和砂体的共同影响。为进一步探讨断层与砂体配置演化模式类型对沙溪庙组致密气富集的影响,本次研究在明确川中地区沙溪庙组气源断层-砂体成藏期至今演化模式类型及其平面分布规律的基础上,进一步结合气藏测试生产数据,分析断层-砂体配置演化模式对沙溪庙组远源型致密砂岩气平面差异富集的控制。

本次研究基于《矿产地质勘查规范》(DZ/T 0217—2020),并依据千米井深单井稳定天然气产量标准将气井划分为高产井(产气量 $>10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、中产井[产气量 $= (3.0 \sim 10.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$]、低产井[产气量 $= (0.3 \sim 3.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$]和特低产井(产气量 $<0.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)4类。通过统计纵向不同砂组气藏测试生产数据发现,研究区沙溪庙组1,3,和5砂组获气井均表现为以中-低产气井为主且无高产井的特征(图4a—c,图8a),其中1砂组平均测试产量为 $3.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,3砂组平均测试产量为 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,5砂组平均测试产量为 $13.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图8b);6砂组和8砂组获气井呈中-高产气井为主的特征(图4d,图4e,图8a),其中6砂组无特低产井且平均测试产量为 $40.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,8砂组平均测试产量为 $29.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图8b);9砂组获气井

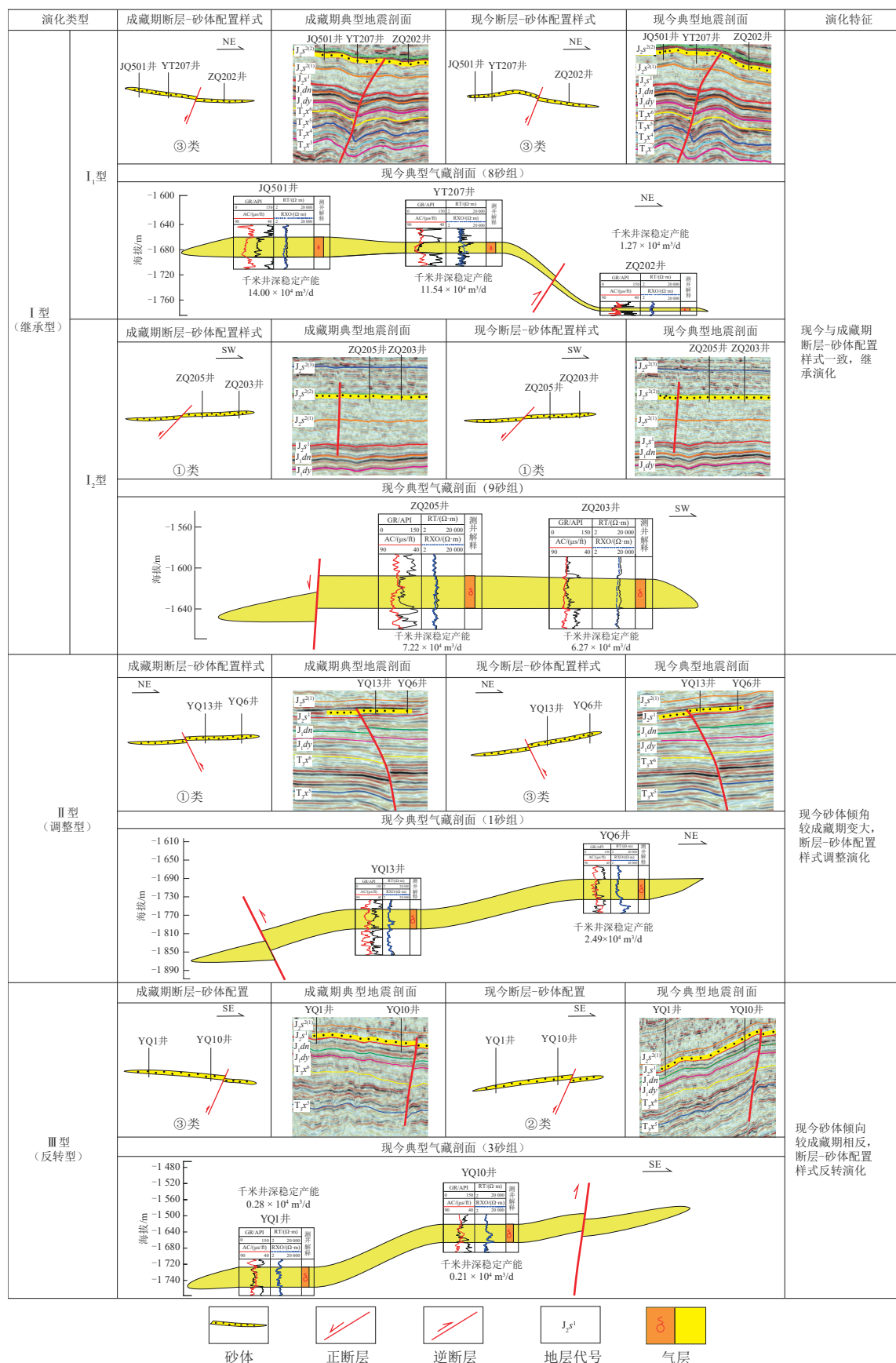


图7 川中地区沙溪庙组不同类型断层-砂体配置演化模式示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the various types of evolutionary patterns of fault-sandbody configuration in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin
(图中的地层代号说明见图2。)

以中产气井为主且无特低产井(图4f,图8a),平均测试产量为 $23.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图8b)。以上测试结果表明,川中地区沙溪庙组6,8和9砂组富气程度高于1,3和5砂组(图8a)。此外,研究区1,3和5砂组出气井主要分布在南部简阳区块,6,8和9砂组出气井主要分布在北部金秋区块(图4),因此简阳区块沙溪庙组气藏平均测试产量($9.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)显著低于金秋区块平均测试产量($33.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)(图8c),表明北部金秋区块富气程度较南部简阳区块高(图4)。

4.2 断层-砂体配置演化模式对致密砂岩气差异富集的影响

对比金秋区块与简阳区块断层-砂体配置演化模式发现,简阳区块沙溪庙组产气井主要表现为Ⅱ型和Ⅲ型模式,其中主要的中产井和低产井所在的砂体多与F1和F3须家河组气源断层对接表现为Ⅱ型模式;主要的特低产井所在的砂体与F3断层对接呈Ⅱ型模式,与F2须家河组气源断层对接表现为Ⅲ型模式(图4a—c)。金秋区块沙溪庙组产气井主要发育Ⅰ型

和Ⅱ型模式,其中主要的高产井和中产井所在的砂体多与F8和F10等须家河组气源断层对接呈Ⅰ型模式,个别高产井和中产井砂体与少量大安寨段气源断层对接表现为Ⅱ型模式;局部少量分布的低产井所在的砂体同样多与须家河组或大安寨段气源断层对接呈Ⅰ型和Ⅱ型模式(图4d—f)。整体上,研究区沙溪庙组天然气富集程度较高的砂组多表现为继承型(Ⅰ₁型)和调整型(Ⅱ型),富集程度较低的砂组多表现为继承型(Ⅰ₂型)、调整型(Ⅱ型)和反转型(Ⅲ型)。在此基础上假定天然气持续充注且断层上盘砂体与下盘砂体物性无显著差异,进一步探讨不同类型断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气差异富集的影响。

4.2.1 继承型断层-砂体配置演化模式(Ⅰ₁型)

成藏期气源断层与缓倾角砂体呈倾向相反的配置样式(③类),此时源于下伏须家河组和大安寨段的天然气沿气源断层向上运移至沙溪庙组,可优先聚集在处于砂体上倾方向的断层上盘,同时断层下盘也因断层与下盘砂体间存在压力差,可充注并聚集少量天

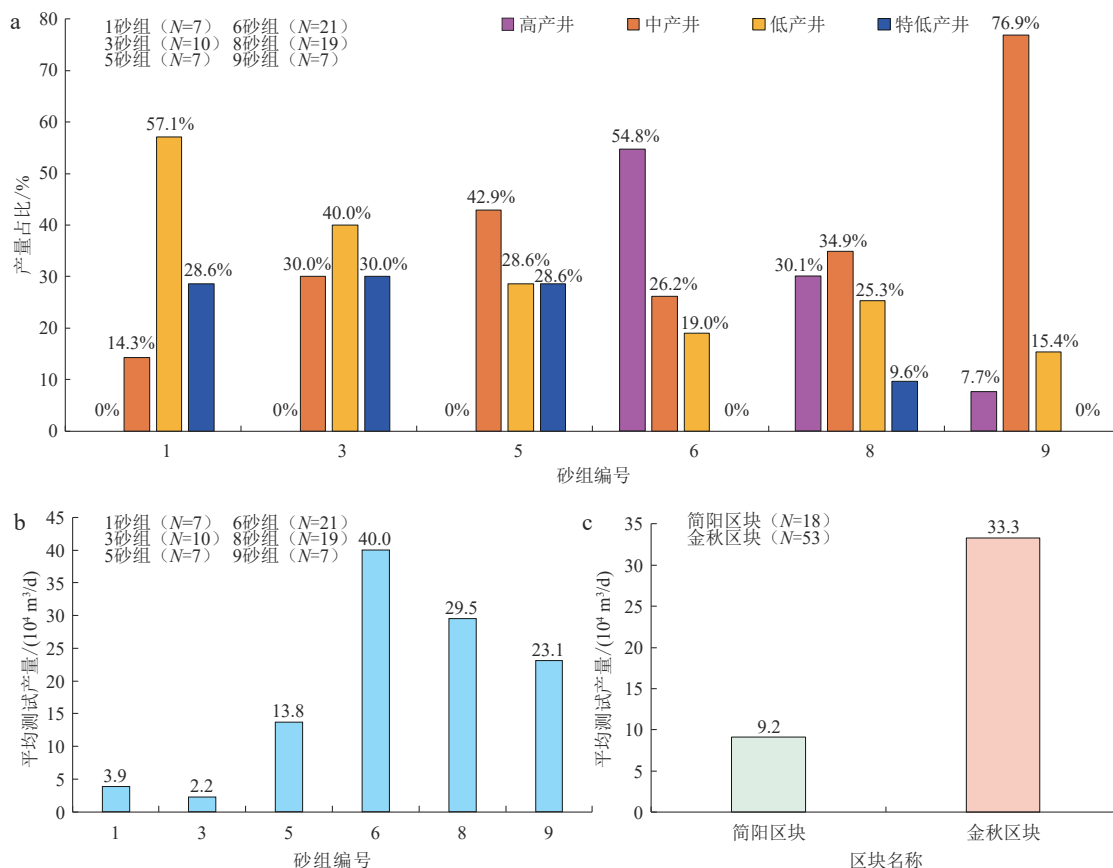


图8 川中地区沙溪庙组气藏测试产量特征统计柱状图

Fig. 8 Bar charts showing the tested daily gas production of gas reservoirs in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

a. 研究区沙溪庙组不同砂组气藏获气井测试产量分布; b. 研究区沙溪庙组不同砂组气藏平均测试产量; c. 研究区简阳区块和金秋区块沙溪庙组气藏平均测试产量

然气(图9a)。此后自成藏期至今的演化过程中,气源断层与砂体配置关系保持不变继承发育,即断层一直保持与缓倾角砂体呈倾向相反的配置样式(③类),因而现今断层两盘砂体所聚集的天然气较成藏期无明显变化(图9b)。总体上,断层上盘气藏表现为继承保存富集型天然气,且产气井主要为高产井和中产井(如6砂组JQ512—JQ508井区气藏、8砂组YT207—JQ506井区气藏;图4d,e),而断层下盘气藏则表现为继承保存聚集型天然气,且产气井主要为低产井(如8砂组ZQ202—ZQ1井区气藏;图4e)。

4.2.2 继承型断层-砂体配置演化模式(I₂型)

成藏期气源断层与近水平砂体对接的配置样式(①类),此时源于下伏须家河组和大安寨段的天然气

沿气源断层向上运移至沙溪庙组,由于砂体呈近水平状态,因而在断层面与相接砂体间压差的驱动下,天然气可同时向断层两盘充注并聚集,且断层两盘天然气聚集程度无明显差异(图9c)。此后自成藏期至今的演化过程中,气源断层与砂体配置关系保持不变继承发育,即断层一直保持与近水平砂体对接的配置样式(①类),因而现今断层两盘砂体所聚集的天然气较成藏期无明显变化(图9d)。总体上,断层两盘气藏均表现为继承保存聚集型天然气,且产气井主要为中产井和低产井(如9砂组ZQ205—ZQ201井区气藏;图4f)。

4.2.3 调整型断层-砂体配置演化模式(Ⅱ型)

成藏期气源断层与近水平砂体对接的配置样式(①类),此时源于下伏须家河组和大安寨段的天然气

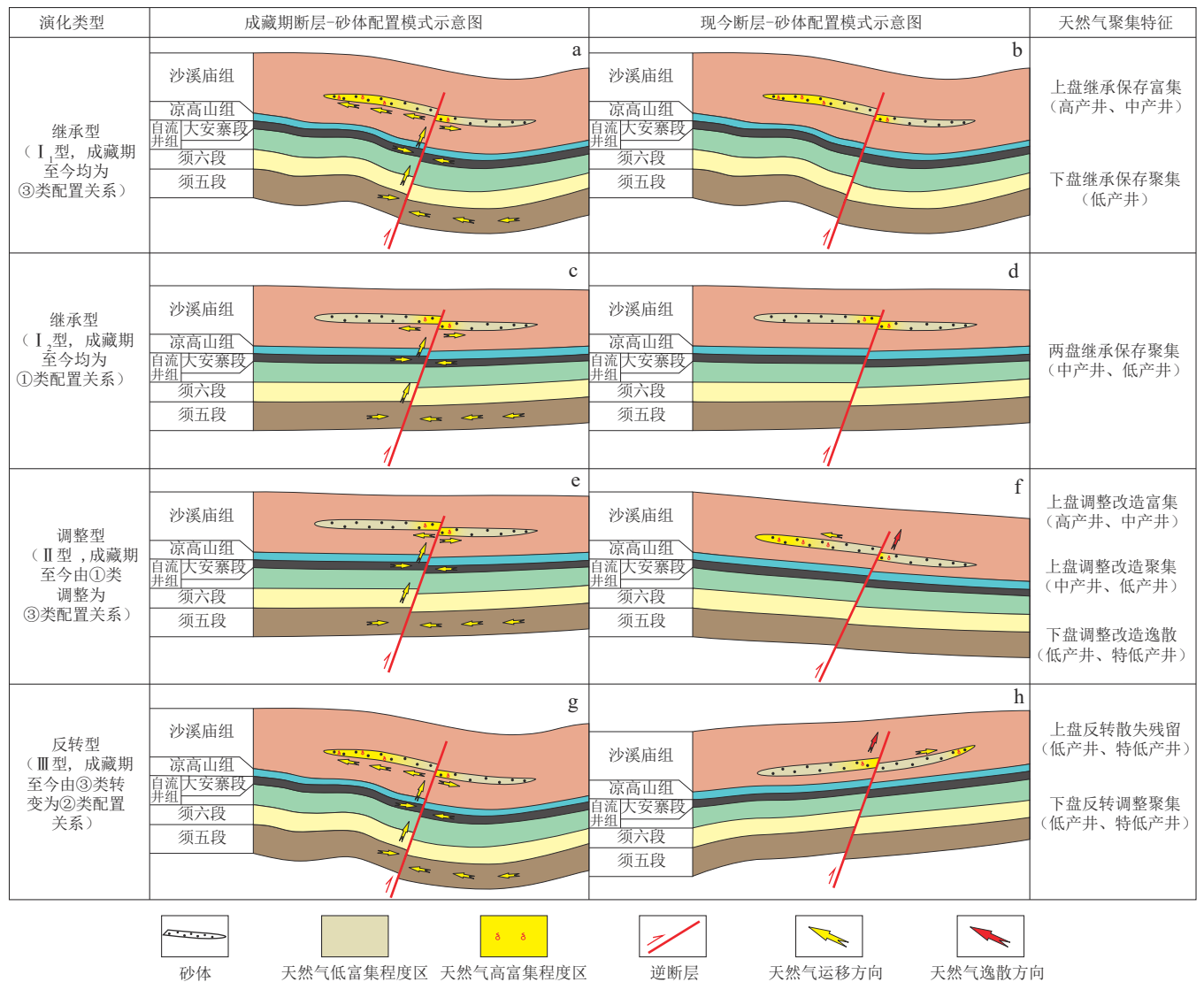


图9 川中地区沙溪庙组断层-砂体配置演化模式与远源型致密砂岩气差异富集关系

Fig. 9 Diagram showing the differential enrichment of far-source tight sand gas linked to the evolutionary patterns of fault-sandbody configuration and in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

沿气源断层向上运移至沙溪庙组,由于砂体呈近水平状态,因而在断层面与相接砂体间压差的驱动下,天然气可同时向断层两盘充注并聚集,且断层两盘天然气聚集程度无明显差异(图9e)。此后自成藏期至今的演化过程中,气源断层与砂体配置关系发生改变调整,表现为断层与缓倾角砂体呈倾向相反的配置样式(③类)。在此调整过程中,处于砂体下倾方向的下盘砂体聚集的天然气可沿断层部分逸散,因而下盘气藏表现为调整改造逸散型天然气(图9f),且产气井主要为低产井和特低产井(如1和3砂组YQ10气藏;图4a,b)。而处于砂体上倾方向的上盘砂体,其在成藏期所聚集的天然气基本无变化之外,还可进一步聚集从下盘砂体逸散出的天然气(图9f),当调整时自下盘砂体进入上盘砂体的天然气较少时,上盘气藏表现为调整改造聚集型天然气,且产气井主要为中产井和低产井(如1砂组YQ13—YQ2井区气藏、3砂组YQ204—YQ2井区气藏;图4a,b);当调整过程中自下盘砂体进入上盘砂体的天然气较多时,上盘气藏表现为调整改造富集型天然气,且产气井主要为高产井和中产井(如5砂组YQ214—YQ11井区气藏、9砂组ZQ204—ZQ205井区气藏;图4c,f)。

4.2.4 反转型断层-砂体配置演化模式(Ⅲ型)

成藏期气源断层与缓倾角砂体呈倾向相反的配置样式(③类),此时源于下伏须家河组和大安寨段的天然气沿气源断层向上运移至沙溪庙组,可优先聚集在处于砂体上倾方向的断层上盘,同时断层下盘也因断层面与下盘砂体间存在压力差,可充注并聚集少量天然气(图9g)。此后自成藏期至今的演化过程中,气源断层与砂体配置关系发生改变反转发育,表现为断层与缓倾角砂体呈倾向相同的配置样式(②类)。在此调整过程中,处于砂体下倾方向的上盘砂体聚集的天然气可沿断层大量逸散,因而上盘气藏表现为反转散失残留型天然气(图9h),且主要为低产井和特低产井(如3砂组YQ10—YQ1井区气藏;图4b)。而处于砂体上倾方向的断层下盘砂体,其在成藏期聚集的少量天然气在反转构造背景下向砂体高部位运移,并再次聚集成藏(图9h),因而下盘气藏表现为反转调整聚集型天然气,且主要发育低产井和特低产井(如5砂组JS1气藏;图4c)。

5 结论

1) 川中地区现今沙溪庙组断层-砂体配置关系发育3类。①类:气源断层与近水平砂体(倾角 $<5^{\circ}$)对

接;②类:气源断裂与缓倾角砂体(倾角 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$)对接,且砂体倾向与断层相同;③类:气源断裂与缓倾角砂体(倾角 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$)对接,且砂体倾向与断层相反。

2) 川中地区成藏期至今沙溪庙组断层-砂体配置存在3种演化模式:继承型(I型,成藏期至今断层-砂体配置关系继承不变,其中成藏期至今均为③类配置关系的为I₁型,成藏期至今均为①类配置关系的为I₂型)、调整型(Ⅱ型,成藏期至今断层-砂体配置关系调整,由①类配置关系调整为③类配置关系)和反转型(Ⅲ型,成藏期至今断层-砂体配置关系反转突变,由③类配置关系转变为②类配置关系)。

3) 川中地区沙溪庙组不同类型的断层-砂体配置演化模式,可对远源型致密砂岩气富集程度产生差异性影响:继承型(I₁型)演化模式有利于断层上盘在成藏期富集天然气,并在此后演化中继承保存,产气井主要为高产井和中产井,而断层下盘仅少量天然气聚集,并在演化过程中继承保存,产气井主要为低产井;继承型(I₂型)演化模式在成藏期可使天然气在断层两盘聚集,随后在演化中继承保存,断层两盘产气井多为中产井和低产井;调整型(Ⅱ型)演化模式在成藏期天然气可在断层两盘聚集,并在随后的演化过程中差异调整,断层上盘气藏可表现为调整改造聚集,产气井主要为中产井和低产井,也可表现为调整改造富集,产气井主要为高产井和中产井,断层下盘气藏则表现为调整改造逸散,产气井主要为低产井和特低产井;反转型(Ⅲ型)演化模式在成藏期有利于天然气在断层上盘富集、断层下盘少量聚集,并在随后演化过程中断层上盘气藏表现为反转散失残留、下盘气藏则表现为反转调整聚集,两盘产气井均为低产井和特低产井。

4) 川中地区北部金秋区块继承型(I₁型)演化模式产生的上盘继承保存富集型天然气,以及调整型演化模式产生的上盘调整改造富集型天然气,可作为下一阶段沙溪庙组远源型致密砂岩气勘探的重点。

参 考 文 献

- [1] 魏国齐,张福东,李君,等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 199-210.
WEI Guoqi, ZHANG Fudong, LI Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 199-210.
- [2] 孙龙德,邹才能,贾爱林,等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015-1026.
SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015-1026.

- [3] 曹江骏,王继平,张道锋,等. 深层致密砂岩储层成岩演化对含气性的影响——以鄂尔多斯盆地西南部庆阳气田二叠系山1段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 169–184.
CAO Jiangjun, WANG Jiping, ZHANG Daofeng, et al. Effects of diagenetic evolution on gas-bearing properties of deep tight sandstone reservoirs: A case study of reservoirs in the 1st member of the Permian Shanxi Formation in the Qingyang Gas Field, southwestern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 169–184.
- [4] 张道伟,杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 1–11.
ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1–11.
- [5] 李军亮,王鑫,王伟庆,等. 致密砂岩砂-泥结构发育特征及其对储集空间的控制作用——以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1173–1187.
LI Junliang, WANG Xin, WANG Weiqing, et al. Influence of sand-mud assemblages in tight sandstones on reservoir storage spaces: A case study of the lower submember of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1173–1187.
- [6] 张道伟. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 34–45.
ZHANG Daowei. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 34–45.
- [7] 王茂云,曾溅辉,王小娟,等. 源-储分离型致密砂岩气藏中气水分布控制因素——以四川盆地中部地区沙溪庙组致密砂岩气为例[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1187–1201, 1218.
WANG Maoyun, ZENG Jianhui, WANG Xiaojuan, et al. Controlling factors of gas-water distribution in source-reservoir separated tight sandstone gas reservoirs: A case study of Shaximiao Formation tight sandstone gas in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(8): 1187–1201, 1218.
- [8] 潘辉,蒋裕强,朱讯,等. 河流相致密砂岩气地质甜点评价——以四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组二段1亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 471–485.
PAN Hui, JIANG Yuqiang, ZHU Xun, et al. Evaluation of geological sweet spots in fluvial tight sandstone gas: A case study of the first submember of the second member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 471–485.
- [9] 宋林珂,刘四兵,曾青高,等. 四川盆地川中—川西过渡带中侏罗统沙溪庙组致密砂岩相对优质储层成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 371–388.
SONG Linke, LIU Sibing, ZENG Qinggao, et al. Genetic mechanism of relatively high-quality reservoirs of middle Jurassic Shaximiao Formation tight sandstone in transition zone between central and western Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 371–388.
- [10] 卢晓林,刘君龙,王小娟,等. 四川盆地中部沙溪庙组天然气成因来源与启示[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(5): 831–845.
LU Xiaolin, LIU Junlong, WANG Xiaojuan, et al. The origin of natural gas and exploration implication in the Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(5): 831–845.
- [11] 张吉振,唐友军,洪海涛,等. 川中油气区金华地区大安寨段及须五段烃源岩生物标志物特征和生源构成[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2021, 18(5): 1–12.
ZHANG Jizhen, TANG Youjun, HONG Haitao, et al. Biomarker characteristics and biogenetic composition of source rocks of Da'anzhai member and Xujiahe 5 member in Jinhua area of central Sichuan oil and gas region[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2021, 18(5): 1–12.
- [12] 肖富森,黄东,张本健,等. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 568–576, 586.
XIAO Fusen, HUANG Dong, ZHANG Benjian, et al. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 568–576, 586.
- [13] 杨春龙,谢增业,李剑,等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1117–1126.
YANG Chunlong, XIE Zengye, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in Shaximiao Formation of Middle Jurassic in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1117–1126.
- [14] 杨雨,谢继容,曹正林,等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917–932.
YANG Yu, XIE Jirong, CAO Zhenglin, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917–932.
- [15] 张照录,王华,杨红. 含油气盆地的输导体系研究[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 133–135.
ZHANG Zhaolu, WANG Hua, YANG Hong. Study on passage system of petroliferous basins[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 133–135.
- [16] 付广,薛永超,付晓飞. 油气运移输导系统及其对成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(1): 24–26.
FU Guang, XUE Yongchao, FU Xiaofei. On oil-gas migration systems and their control over the formation of reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(1): 24–26.
- [17] 张善文,王永诗,石砥石,等. 网毯式油气成藏体系——以济阳坳陷新近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 1–10.
ZHANG Shanwen, WANG Yongshi, SHI Dishu, et al. Meshwork-carpet type oil and gas pool-forming system-Taking Neogene of Jiyang Depression as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 1–10.
- [18] 周广胜,彭仕宓,张秀丽,等. 中国大中型气田断裂和砂体输导特征对比[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6): 653–657.
ZHOU Guangsheng, PENG Shimu, ZHANG Xiuli, et al. Contrast of transporting characteristics between faults and sandbodies of

- medium and large gas fields in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(6): 653-657.
- [19] 严焕榕, 詹泽东, 李亚晶, 等. 致密砂岩气藏高产富集规律研究——以川西坳陷新场—合兴场须家河组二段气藏为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 541-548, 576.
YAN Huanrong, ZHAN Zedong, LI Yajing, et al. High yield enrichment law for tight sandstone gas reservoir: A case study of the second member of Xujiahe Formation gas reservoir in Xinchang-Hexinchang gas field of western Sichuan Depression [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 541-548, 576.
- [20] 刘震, 张善文, 赵阳, 等. 东营凹陷南斜坡输导体系发育特征[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 84-86.
LIU Zhen, ZHANG Shanwen, ZHAO Yang, et al. Development of carrying bed systems in the South slope of Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 84-86.
- [21] 熊伟. 断陷盆地输导体系宏观格架及构成特征——以东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(4): 474-478.
XIONG Wei. Macroscopic framework and constitution characteristics of the transportation system in down faulted basin—An example from Dongying Sag, Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(4): 474-478.
- [22] 朱筱敏, 刘成林, 曾庆猛, 等. 我国典型天然气藏输导体系研究——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 724-729.
ZHU Xiaomin, LIU Chenglin, ZENG Qingmeng, et al. Study of carrier system of typical gas reservoirs in China-taking Sulige Gas Field in Ordos Basin as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(6): 724-729.
- [23] 付晓飞, 董晶, 吕延防, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷断裂构造特征及控藏机理[J]. *地质学报*, 2012, 86(6): 877-889.
FU Xiaofei, DONG Jing, LYU Yanfang, et al. Fault structural characteristics of Wuerxun-Beier Depression in the Hailar Basin and their reservoir-controlling mechanism [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6): 877-889.
- [24] 李运振, 刘震, 赵阳, 等. 济阳坳陷断陷湖盆类型与输导体系发育特征的关系分析[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 22(4): 47-52.
LI Yunzhen, LIU Zhen, ZHAO Yang, et al. Relationship between the characteristics of passage systems and the types of faulted lake basins in Jiyang Depression [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2007, 22(4): 47-52.
- [25] 宋国奇. 陆相断陷盆地断—拗转换体系与地层超覆油藏“T-S”控藏模式——以济阳坳陷第三系为例[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1208-1214.
SONG Guoqi. Fault-depression transformation system and “T-S” control reservoir mode of stratigraphic overlap pool—an example from Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9): 1208-1214.
- [26] 付晓飞, 王朋岩, 申家年, 等. 简单斜坡油气富集规律——以松辽盆地西部斜坡北段为例[J]. *地质论评*, 2006, 52(4): 522-531.
FU Xiaofei, WANG Pengyan, SHEN Jianian, et al. Migration and accumulation of oil and gas in a simple slope area: A case study on the western slope of the northern Songliao Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(4): 522-531.
- [27] 梁春秀, 魏志平, 李本才, 等. 伊兰—伊通盆地输导体系与油气运聚[J]. *天然气工业*, 2002, 22(1): 31-32.
LIANG Chunxiu, WEI Zhiping, LI Bencai, et al. Carrying bed systems and oil & gas migration in Yilan-Yitong Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(1): 31-32.
- [28] 赵贤正, 金凤鸣, 李玉帮, 等. 断陷盆地斜坡带类型与油气运聚成藏机制[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 841-849.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, LI Yubang, et al. Slope belt types and hydrocarbon migration and accumulation mechanisms in rift basins [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 841-849.
- [29] 周立宏, 韩国猛, 董越崎, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断鼻断—砂组合模式与油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 869-882.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, DONG Yueqi, et al. Fault-sand combination modes and hydrocarbon accumulation in Binhai fault nose of Qikou Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 869-882.
- [30] 郑超, 邱玉超, 文龙, 等. 川中中台山地区致密砂岩储层层序特征及有利区优选[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(2): 84-92.
ZHENG Chao, QIU Yuchao, WEN Long, et al. Sequence characteristics of dense sandstone reservoirs and favorable zone preference in Zhongtaishan area, central Sichuan [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(2): 84-92.
- [31] 马晓强, 邹婧芸, 祝彦贺. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴东区断阶带致密气富集规律研究[J]. *非常规油气*, 2023, 10(3): 1-7.
MA Xiaoliang, ZOU Jingyun, ZHU Yanhe. Study on enrichment law of tight gas in the fault step zone of Linxing east block, Northeast margin of Ordos Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(3): 1-7.
- [32] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [33] 汪泽成, 赵文智, 彭红雨. 四川盆地复合含油气系统特征[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 26-28.
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, PENG Hongyu. Characteristics of multi-source petroleum systems in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 26-28.
- [34] 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.
- [35] 刘树根, 邓宾, 李智武, 等. 盆地结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 621-635.
LIU Shugen, DENG Bin, LI Zhiwu, et al. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 621-635.

- [36] 韦腾强, 吴长江, 黄亚浩, 等. 流体包裹体拉曼定量技术在致密砂岩气藏研究中的应用——以四川盆地中部侏罗系沙溪庙组为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 164-173.
- WEI Tengqiang, WU Changjiang, HUANG Yahao, et al. Application of fluid inclusion Raman quantitative technique to the study of tight sandstone gas reservoirs: Case study of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 164-173.
- [37] 唐大海, 谭秀成, 涂罗乐, 等. 川中-川西过渡带沙溪庙组第二段致密砂岩储层物性控制因素及孔隙演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 460-471.
- TANG Dahai, TAN Xiucheng, TU Luole, et al. Control factors and pore evolution of tight sandstone reservoir of the Second Member of Shaximiao Formation in the transition zone between central and western Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(4): 460-471.
- [38] 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 等. 四川盆地川中—川西地区沙溪庙组层序地层特征[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1216-1224.
- XIAO Fusen, WEI Tengqiang, WANG Xiaojuan, et al. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuanzhong-Chuanxi area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1216-1224.
- [39] 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.
- [40] 吴小奇, 陈迎宾, 王彦青, 等. 四川盆地川西坳陷成都大气田致密砂岩气地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1107-1116.
- WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, WANG Yanqing, et al. Geochemical characteristics of natural gas in tight sandstone of the Chengdu large gas field, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1107-1116.
- [41] 王玲辉, 赵虎, 沈忠民, 等. 四川中江气田沙溪庙组天然气成因类型及气源对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 158-163.
- WANG Linghui, ZHAO Hu, SHEN Zhongmin, et al. Correlation of gas sources and genetic types of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation of Zhongjiang Gas Field, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(2): 158-163.
- [42] 郭彤楼, 王勇飞, 叶素娟, 等. 四川盆地中江气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 141-155.
- GUO Tonglou, WANG Yongfei, YE Sujuan, et al. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Zhongjiang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 141-155.
- [43] 刘恒宇, 刘明洁, 肖尧, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩气差异成藏特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(6): 1014-1030.
- LIU Hengyu, LIU Mingjie, XIAO Yao, et al. Differential accumulation characteristics and main controlling factors of the Jurassic Shaximiao Formation tight sandstone gas in the central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(6): 1014-1030.
- [44] 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 Jinqu Gas Field of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 51-61.
- [45] HALE D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images [J]. Geophysics, 2013, 78(2): O33-O43.
- [46] 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.
- [47] 马如辉, 王安志. 利用构造恢复原理制作古构造演化图[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 34-36.
- MA Ruhui, WANG Anzhi. Mapping palaeostructural evolution with tectonic reconstruction theory [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 34-36.
- [48] 久凯, 丁文龙, 李春燕, 等. 含油气盆地古构造恢复方法研究及进展[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 13-19.
- JIU Kai, DING Wenlong, LI Chunyan, et al. Advances of paleostructure restoration methods for petroliferous basin [J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 2012, 24(1): 13-19.
- [49] 荆克尧, 陈霞, 金晓辉. 古构造定量恢复的地球物理方法研究及应用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 354-359.
- JING Keyao, CHEN Xia, JIN Xiaohui. Geophysical methods for quantitative resumption of paleo-structures and its application [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(2): 354-359.
- [50] 李军, 王世谦. 四川盆地平昌—阆中地区侏罗系油气成藏主控因素与勘探对策[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 16-21.
- LI Jun, WANG Shiqian. The main factors controlling hydrocarbon accumulation in the Jurassic of Pingchang-Langzhong area in the Sichuan Basin and its exploration strategies [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 16-21.
- [51] 张庄, 杨映涛, 朱丽, 等. 成都凹陷中侏罗统沙溪庙组天然气运移机制[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2017, 14(7): 1-7.
- ZHANG Zhuang, YANG Yingtao, ZHU Li, et al. Gas migration mechanism of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Chengdu Sag [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(7): 1-7.