

文章编号: 0253-2697(2024)08-1174-13 DOI:10.7623/syxb202408002

四川盆地川中地区深层碳酸盐岩走滑断层控藏作用

江同文^{1,2} 田威振¹ 唐青松³ 徐 伟³ 鄧光辉^{1,4}

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院 四川成都 610500; 2. 中国石油天然气股份有限公司 北京 100007;
3. 中国石油西南油气田公司 四川成都 610051; 4. 西南石油大学羌塘盆地研究院 四川成都 610500)

摘要:四川盆地川中地区走滑断层控藏作用研究对深层(>4500 m)致密碳酸盐岩气藏高效勘探开发具有重要意义。通过气藏解剖结合地震与地球化学资料分析,开展了走滑断层与成藏时空配置关系及其控运、控圈、控富作用研究。研究结果表明,川中地区广泛发育弥散性分布的前中生界走滑断层系统,对加里东期成藏具有破坏性作用,印支期—燕山期则成藏配置优越,形成了前中生界多层系复式走滑断控成藏系统。走滑断层构成了遍及全区的前中生界垂向—侧向组合的输导体系,形成了上震旦统—下寒武统近源侧向、中二叠统远源垂向的不同运聚成藏模式,并造成了分层、分区的成藏差异性。在致密碳酸盐岩中,高能相带叠加走滑断层作用形成相—断共控的构造—岩性圈闭,并控制了圈闭的有效性,组成沿走滑断层带分布的“小藏大气田”气藏模式。走滑断层控制了高孔高渗裂缝—孔洞型“甜点”储层与高产井的分布,具有增储与控富作用,并形成多种差异富集模式。研究结果揭示四川盆地存在深层前中生界碳酸盐岩走滑断控富气系统,受控于“源—断—储”三元耦合控藏,走滑断层具有控运、控圈与控富作用的差异性,走滑断控“甜点”气藏是深层碳酸盐岩高效勘探开发的有利新领域。

关键词:四川盆地;走滑断层;碳酸盐岩;气藏;运移;富集;勘探开发

中图分类号:TE122

文献标识码:A

The strike-slip fault effect on deep carbonate gas accumulation in the central Sichuan Basin

Jiang Tongwen^{1,2} Tian Weizhen¹ Tang Qingsong³ Xu Wei³ Wu Guanghui^{1,4}

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China;
2. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China; 3. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Chengdu 610051, China; 4. Qiangtang Basin Research Institute, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China)

Abstract: A study is performed on the reservoir-controlling of strike-slip faults in deep marine carbonate rocks (>4500 m) in Sichuan Basin, which is of important significance for the efficient exploration and development of gas reservoirs in tight carbonate rocks. Through the analyses of gas reservoirs as well as static and seismic data, investigations are carried out on the temporal and spatial relationship between strike-slip fault and hydrocarbon accumulation, as well as the controlling effects of strike-slip fault on the gas migration, trap and enrichment. The results show that the pre-Mesozoic strike-slip fault system is dispersively distributed and widely developed in the central Sichuan Basin, which had destructive effect on hydrocarbon accumulation in the Caledonian period. However, the petroleum accumulation conditions were superior in the Indonian-Yanshanian period, thus forming the pre-Mesozoic multi-layer superimposed hydrocarbon accumulation system controlled by strike-slip faults. The strike-slip faults constitute the pre-Mesozoic vertical-lateral oil/gas transport system throughout the central Sichuan Basin. The strike-slip fault system has formed two kinds of migration modes, including the near-source lateral fault-controlled petroleum migration in the Upper Sinian-Lower Cambrian carbonate reservoirs, and the far-source vertical petroleum migration of the Middle Permian carbonate reservoirs. This has led to subsequent differentiation in stratified and zonal oil/gas accumulation. In the tight carbonate rocks, the effective structural-lithologic traps are developed under the joint action of high energy microfacies and strike-slip faults, and the both also play a role of controlling the effectiveness of traps, thus forming the gas reservoiring mode of “small gas reservoir but large field” along the strike-slip fault zones. The strike-slip faults control the distribution of the high porosity and high permeability “sweet spots” fracture-vug reservoirs and high-yield wells, which can increase the reserves, and control the hydrocarbon enrichment. The results reveal that there is a pre-Mesozoic deep carbonate strike-slip fault-controlled gas-rich system in the central Sichuan Basin, with the ternary coupling factors of “source-fault-reservoir” that control the gas accumulation; there are differences in controlling gas migration, trapping and enrichment

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司油藏评价项目(2022-8752)和中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010101)资助。

第一作者及通信作者: 江同文,男,1968年4月生,1996年获西南石油学院博士学位,现为中国石油天然气股份有限公司总地质师、教授级高级工程师、西南石油大学博士生导师,主要从事油气藏地质研究及油气田开发科研与生产管理。Email:jiangtw-tlm@petrochina.com.cn

by strike-slip faults; the strike-slip fault-controlled “sweet spot” gas reservoir is a new favorable field for exploration and development of deep carbonate rocks.

Key words: Sichuan Basin; strike-slip fault; carbonate; gas reservoir; migration; enrichment; exploration and development

引用:江同文,田威振,唐青松,徐伟,邬光辉. 四川盆地川中地区深层碳酸盐岩走滑断层控藏作用[J]. 石油学报,2024,45(8): 1174-1186.

Cite :JIANG Tongwen,TIAN Weizhen,TANG Qingsong,XU Wei,WU Guanghui. The strike-slip fault effect on deep carbonate gas accumulation in the central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(8):1174-1186.

四川盆地深层(大于 4 500 m)海相碳酸盐岩油气成藏条件优越,已在川中地区发现了中国最大的碳酸盐岩整装气田——安岳气田^[1-2],其中震旦系、寒武系与二叠系碳酸盐岩已探明天然气地质储量达 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,现已成为中国海相碳酸盐岩天然气勘探开发的重点领域。研究认为,川中地区深层古老碳酸盐岩中的天然气分布受控于古隆起、古裂陷与古高能相带^[1-5],通过建立大型相控碳酸盐岩气藏模式,指导了深层碳酸盐岩天然气资源的勘探开发。但深层古老碳酸盐岩储层趋向致密,天然气成藏与分布极为复杂,面临深层致密气藏“甜点”(高孔高渗)高产井位部署难的世界性勘探开发难题^[5-7]。

近期,在四川盆地川中地区震旦系—二叠系碳酸盐岩发现了走滑断层^[8-11]。研究认为,走滑断层可能提高寒武系储层的孔隙度与渗透率^[12],或控制震旦系优质储层的发育与分布^[13-15]。也有研究认为,走滑断层对碳酸盐岩孔隙度增加作用不明显^[16]。同时,一些研究提出走滑断层具有沟通气源、有利天然气垂向运聚的作用^[8,15,17-21],从而为四川盆地深层碳酸盐岩气藏的勘探开发提供了新思路。但是,走滑断层如何控藏的认识分歧较大,而且缺少走滑断层带天然气富集模式与主控因素的研究,制约了走滑断层相关气藏的勘探开发部署。

笔者在解剖四川盆地川中地区走滑断层及其相关气藏的基础上,结合分析近期不同类型走滑断层带的钻井动、静态资料,探讨了走滑断层与油气成藏的时空配置关系及其控运、控圈、控富作用,以期为深层走滑断层控气藏勘探开发提供地质理论依据。

1 地质背景

四川盆地是位于中国西南部的典型叠合盆地(图 1),震旦系—第四系发育齐全,纵向上构成震旦系—志留系、石炭系—中三叠统、上三叠统一白垩系、新生界等多套构造地层,经历多期构造—沉积演变^[22-23]。震旦纪晚期,四川盆地在震旦系变质基底基础上开始发育 NS 走向的德阳—安岳“裂陷槽”^[24](图 1),在海槽东西两侧发育震旦系灯影组台地边缘丘滩与台内滩。

震旦纪末期,川中地区发生构造隆升与不整合,出现川中古隆起雏形^[3-5,24]。随着早寒武世广泛海侵,海槽内与台地上广泛发育下寒武统筇竹寺组陆棚相页岩,随后形成遍及全盆地的寒武系—奥陶系碳酸盐台地^[1-5]。晚加里东期—海西期(晚奥陶世—早二叠世),宽缓的川中古隆起逐渐发育并定型^[3-5,22-25],自周缘向古隆起核部逐渐缺失奥陶系—石炭系。川中古隆起在晚二叠世—中生代稳定沉降,燕山期—喜马拉雅期再次隆升,是继承性发育的稳定古隆起^[22-23],具有平面分区、纵向分层的隆起构造特征。以德阳—安岳“海槽”下寒武统筇竹寺组巨厚页岩为主力烃源岩,与上震旦统灯影组、下寒武统龙王庙组及中二叠统栖霞组—茅口组碳酸盐岩储层及其上覆盖层组成了川中地区深层的生-储-盖组合[图 1(b)],印支期—燕山期是主要成藏期^[1-5],海相碳酸盐岩成藏条件优越。

川中地区海相碳酸盐岩勘探开发目的层主要为震旦系灯影组,以及下寒武统龙王庙组与二叠系栖霞组、茅口组,已发现川中古隆起中部的安岳气田与川中北斜坡的蓬莱气区^[3-5]。灯影组与龙王庙组发育高能丘滩微相,形成了广泛分布的丘滩相孔隙型、孔洞型基质储层,但具有低孔($<6\%$)低渗($<1 \text{ mD}$)特征,非均质性强^[1-5]。川中古隆起高部位发育构造圈闭,而斜坡区以丘滩岩性圈闭为主,气藏埋深达 5 000~8 000 m,属于深层—超深层高温常压气藏。气藏天然气产量变化大,低产气井占比达 70%,边/底水活跃,高效开发难度大。川中地区二叠系栖霞组与茅口组也发现了白云岩气藏^[5,25],但白云岩厚度仅在数米范围内、纵横向上变化大,处于气藏评价阶段。近期,川中地区发现 NWW 向走滑断层[图 1(a)]^[8-10],走滑断层及其溶蚀作用可能造成碳酸盐岩渗透率提高 1 个数量级以上,而且断裂相关的溶蚀孔隙度可提高 1 倍以上^[14-15],走滑断裂裂缝-孔洞型“甜点”储层成为重点钻探对象。但是,走滑断层带深层—超深层前中生界古老碳酸盐岩储层与气藏更加复杂,而且走滑断层控“甜点”储层规模小、边/底水复杂,现有技术难以精准识别与钻探,亟需通过走滑断层控气藏研究为“甜点”目标评价与钻探提供理论基础。

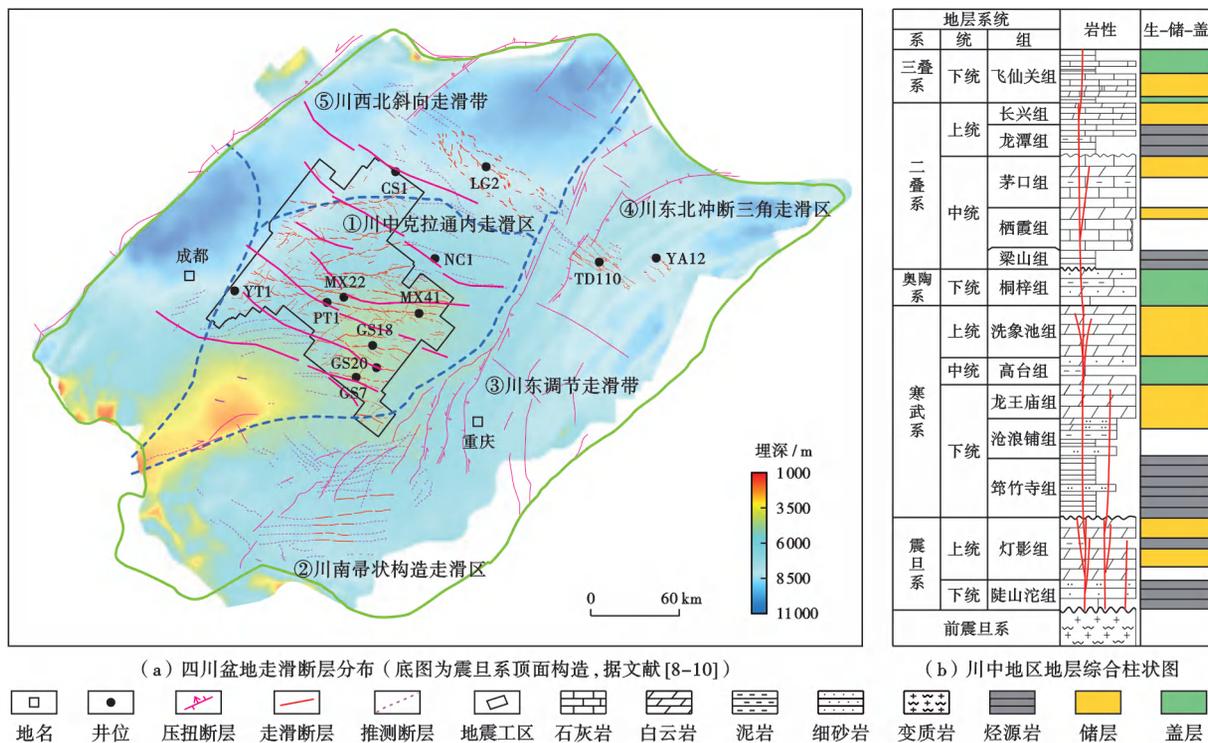


图1 四川盆地走滑断层分布与川中地区地层综合柱状图

Fig. 1 Distribution of strike-slip faults in Sichuan Basin and the stratigraphic column in the central Sichuan Basin

2 走滑断层与成藏演化

2.1 前中生界走滑断层弥散性广泛分布

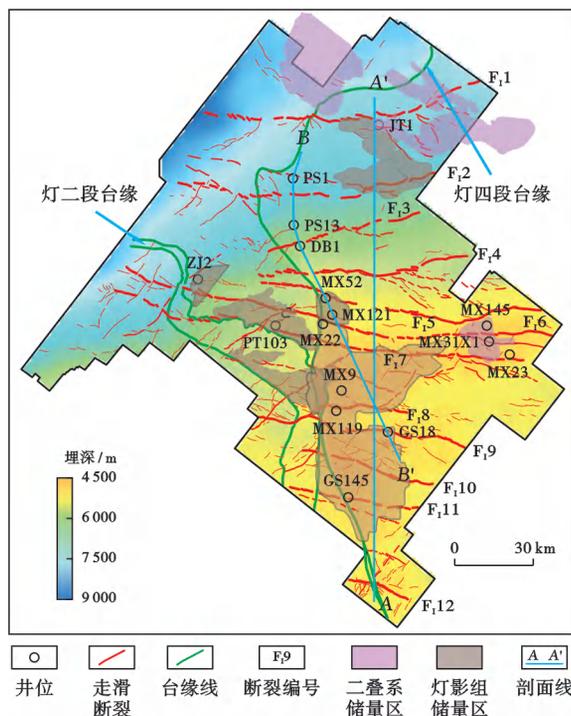
通过地震资料解释发现,川中地区广泛发育 NWW 向近平行弥散性分布的走滑断层系统^[9-15](图2、图3),具有走滑断层广泛发育的地质背景^[8-10]。

通过对走滑断层的地震识别与解释,发现川中地区 22 000 km² 的三维地震工区内走滑断层广泛分布(图2),进一步查明了 25 条主干走滑断层带^[9-10,15]。通过提高走滑断层分辨率的地震资料重新处理与地震精细解释,在安岳气田的 8 870 km² 三维地震工区内发现与落实了总长达 1 860 km 的走滑断层,并发现微小走滑断层广泛分布。NWW 向主干走滑断层的间距在 10~20 km,其间有次级断裂分布,呈近平行的弥散状分布,表明克拉通盆地内部走滑断层广泛发育、遍布全区[图1(a)]。

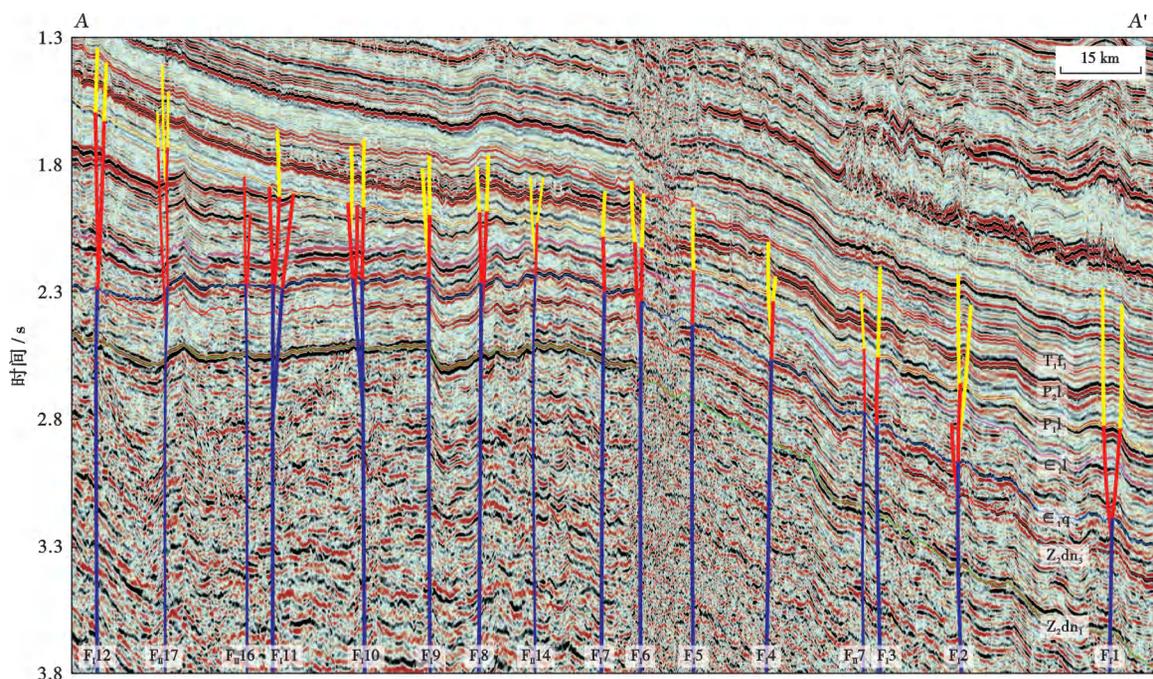
川中地区走滑断层延伸长度大(>50 km)、分布范围广,但走滑位移量小(一般水平位移<500 m,垂向位移<100 m),形成克拉通盆地内的小位移长走滑断层带,与塔里木克拉通盆地走滑断层相似^[26],但走滑断层的规模较小。

地震解释结果表明,剖面上走滑断层在震旦系、寒武系、二叠系 3 套构造层纵向叠加^[8-10](图3),呈现多期继承性的生长发育特征。震旦系以张扭走滑断层为

主,多为线性断层,部分为负花状断层。下寒武统发育继承性生长的张扭断层,寒武系顶面发育压扭断层,形成局部的断垒构造,发育正花状构造。二叠系走滑断



注:底图为震旦系顶面构造,走滑断层据文献^[9,15]修改。
图2 川中地区走滑断层与碳酸盐岩储层的天然气储量分布
Fig. 2 Distribution of strike-slip faults and the gas reserves of carbonate reservoir in the central Sichuan Basin



注:黄色、红色和蓝色线条代表不同层位走滑断层,具体位置见图 2。 Z_2dn_1 —上震旦统灯影组底; Z_2dn_3 —上震旦统灯影组三段底; ϵ_1q —寒武系筇竹寺组底; ϵ_1l —下寒武统龙王庙组底; P_2l —二叠系底; P_2l —上二叠统龙潭组底; T_1f_1 —下三叠统飞仙关组底。 F_{I1} — F_{I12} 、 F_{II7} 、 F_{II14} 、 F_{II16} 和 F_{II17} —断裂编号。

图 3 川中地区 NS 向地震剖面中的走滑断层分布(剖面位置见图 2)

Fig. 3 The typical N-S trike seismic section showing the strike-slip faults across the central Sichuan Basin

层的数量与规模减少,多为张扭线性断层,部分发展为负花状断层,向下切割并消失在寒武系顶面的正花状构造之上,揭示多期走滑断层的叠加与反转。平面上走滑断层具有分类与分段的差异性(图 2),以雁列/斜列的线性组合为主,分段特征明显,局部发育叠覆相互作用的微小断垒与断堑,东部出现尾段撒开的马尾构造,呈现出从西向东的发育特征。

研究表明,走滑断层具有多期活动^[10]。地震剖面显示一系列走滑断层终止于震旦系顶、下寒武统、二叠系之下与二叠系上部,而且 3 套构造层的断裂样式、性质均有差异(图 3),并不整合分隔,揭示存在震旦纪末、早寒武世、前二叠纪和中一晚二叠世的走滑断层活动。通过缝洞碳酸盐岩胶结物原位 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析^[10,27],获得了多期断裂胶结物沉淀年龄值(图 4),表明存在多个断裂开启期。由于断裂胶结多发生在断裂活动之后,结合地震走滑断层分期分析,指示至少存在震旦纪末至 560 Ma、早寒武世至 530 Ma、晚二叠世至 260 Ma 3 期走滑断层活动。综合分析可以看出,走滑断层在震旦纪晚期已开始发育,以右行运动为主,并继承性发育至早寒武世^[8-10]。在二叠系沉积前的古隆起形成过程中^[22-23],受区域构造挤压作用,发生至少一期走滑断层活动,并形成从压扭转向张扭的反转走滑断层,形成正花状断裂叠加在负花状断裂之上

的“花上花”构造(图 3)。中一晚二叠世在区域伸展构造作用下^[22-23],主干走滑断层再次激活,以左行运动为主^[10],张扭负花状构造叠加在二叠系之下的压扭正花状构造之上,走滑断层基本定型。

由此可见,川中地区发育多期、多类型前中生代弥散性分布的走滑断层系统,这是前中生界海相碳酸盐岩广泛性、差异性油气成藏与富集的重要地质条件。

2.2 走滑断层对油气成藏演化的影响

研究表明,川中地区主要发育下寒武统泥页岩烃源岩,并有震旦系烃源岩分布^[1-5]。德阳—安岳裂陷槽寒武系筇竹寺组优质烃源岩(总有机碳含量 $>2\%$)厚逾 200 m,但其厚度在台地上很快减薄至 50 m 以内,是安岳气田的主力烃源岩区。该烃源岩有机质成熟度高,等效镜质体反射率值高达 2.5% 以上,是高成熟—过成熟阶段的烃源岩。川中地区主要发育震旦系灯影组、下寒武统龙王庙组与中二叠统栖霞组—茅口组海相碳酸盐岩储层,形成期分别对应 3 期主要走滑断层活动期。研究表明,走滑断层活动期对碳酸盐岩储层的发育具有重要的建设性作用^[8,12-15]。同时,碳酸盐岩储层与上覆筇竹寺组泥页岩、中寒武统泥灰岩、中二叠统泥灰岩及上二叠统龙潭组泥页岩组成优质的储-盖组合^[1-5][图 1(b)]。

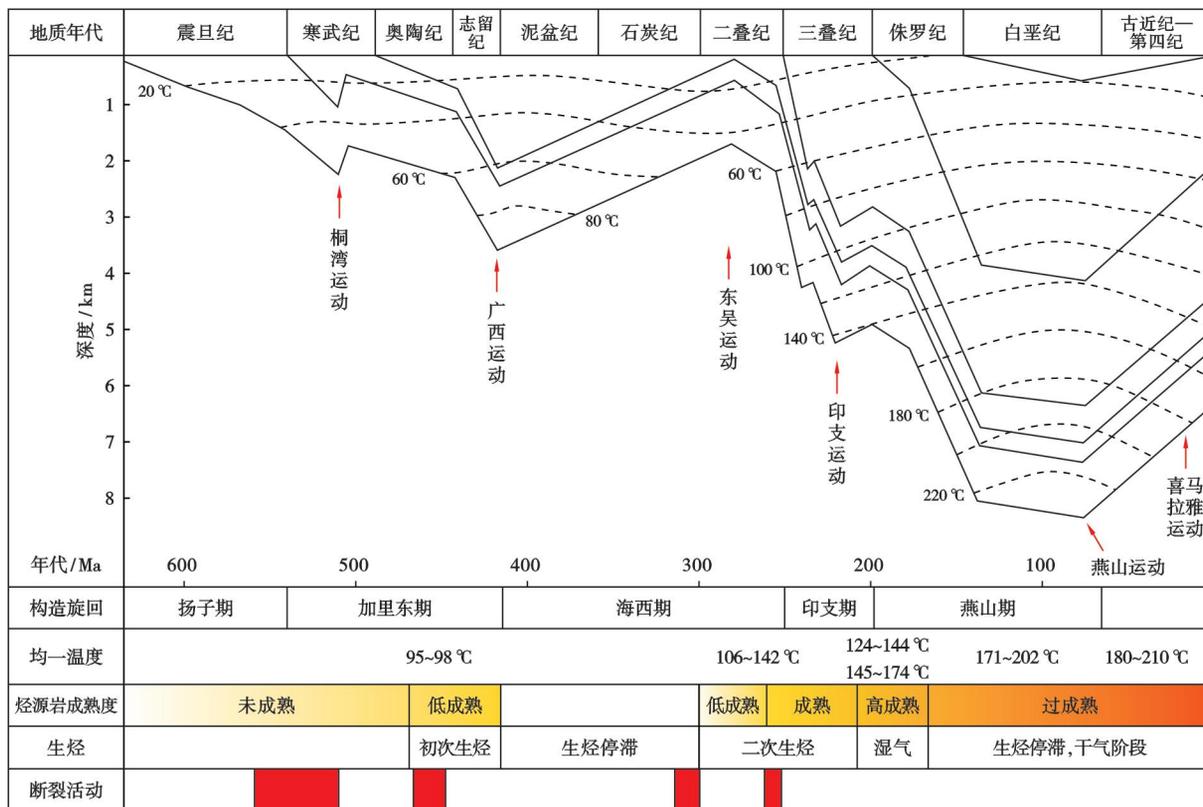


图4 川中地区油气成藏事件综合(据文献[27-28]修编)

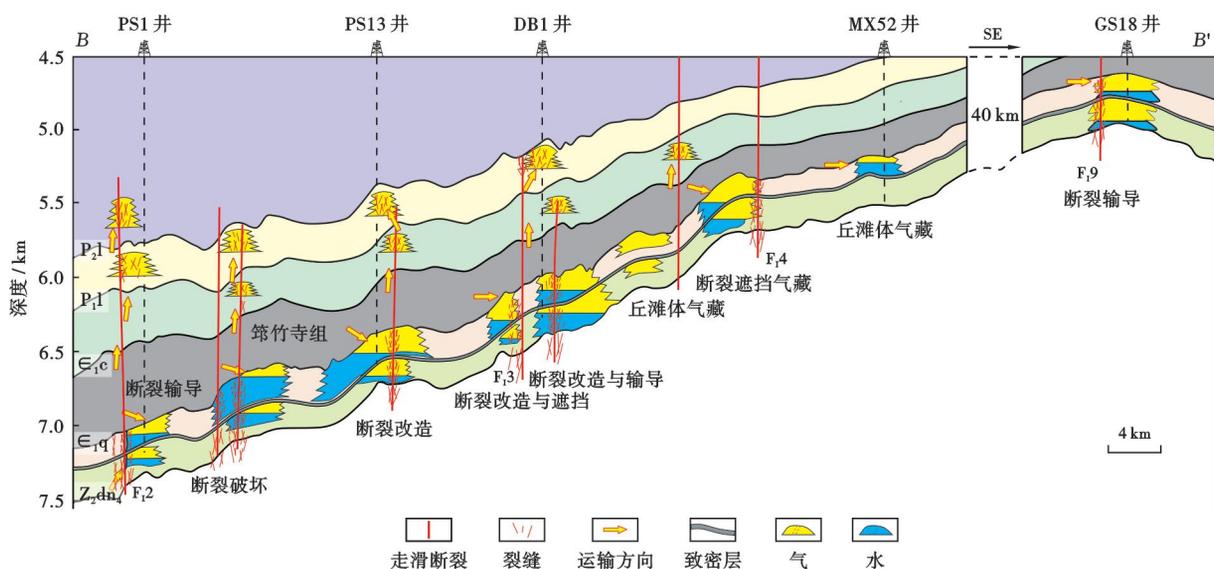
Fig. 4 Comprehensiveness of hydrocarbon accumulation events in the central Sichuan Basin

川中地区成藏期次研究存在分歧,一般认为寒武系筇竹寺组主力烃源岩在加里东晚期(奥陶纪—志留纪)进入生油窗,海西期(泥盆纪—早二叠世)古油藏遭受破坏与调整;晚海西末期—印支期(二叠纪末—三叠纪)进入生油高峰期,开始生成大量原油;而侏罗纪—白垩纪快速深埋期进入大量原油裂解与干气形成阶段,晚白垩世至今处于隆升调整改造期^[1-3,27-28]。由于含油气盆地中断裂是油气运移的优势通道^[29-32],川中地区弥散性分布的走滑断层系统构成了油气运移的关键输导网络,并受多期差异性断裂活动形成复杂的输导体系。其中早期古油藏成藏—破坏过程与走滑断层系统演化密切相关,但由于晚二叠世走滑断层停止活动,走滑断层对中生代以来的油气成藏提供了关键的运移通道(图4、图5)。

下寒武系筇竹寺组烃源岩在奥陶纪—志留纪进入生油期(图4),由于晚震旦世—早寒武世已形成川中地区走滑断层系统格局,弥散性广泛分布的走滑断层不仅是油气垂向运移的优势通道,而且有利于德阳—安岳海槽生烃中心的油气侧向运移,形成多层段碳酸盐岩复式成藏的古油藏。由于该时期进入生油窗的烃源岩少、生烃量较少^[27-28],主要在进入生油窗海槽烃源岩的附近圈闭成藏,其以近源成藏为主。

四川盆地在海西期发生区域性构造抬升与剥蚀,形成川中古隆起^[22-23],并造成生烃停滞(图4)。同时,该期产生压扭走滑断层^[8-10](图3),对走滑断层带油气具有直接破坏作用,可见古油藏破坏后残余干沥青^[27-28]。同时,走滑断层可能导致已形成的古油藏向东部古隆起高部位调整,部分古油藏散失或形成次生油藏。由于构造抬升剥蚀量大、走滑断层活动广泛,该期走滑断层以破坏性作用为主。由于以较弱的压扭走滑断层为主,断裂继承性强、规模较小,在远离走滑断层的斜坡区与深部也可能保存古油藏。

晚二叠世弱张扭走滑活动阶段,走滑断层的复活不仅形成二叠系垂向油气运移断裂,而且深部早期断裂重新开启,形成了川中地区广泛弥散分布的走滑断层输导系统(图2、图3)。由于走滑断层在二叠纪晚期停止活动并定型^[8-10],在三叠纪原油大量生油期^[1-3]有利于油气运聚成藏(图4)。经缝洞胶结物 U-Pb 测年,检测到其存在大量该时期年龄。大量流体包裹体测温数据^[27]也表明,该期运聚成藏配置条件优越,有利于沿走滑断层带的油气运移聚集。该期走滑断层也可能造成深部油气向上调整至二叠系,但缺少断至地表的破坏性断层,形成了震旦系—二叠系多层段含气的走滑断控复式成藏系统(图4、图5)。



注: Z_2dn_4 —上震旦统灯影组四段; E_1q —下寒武统筇竹寺组; E_1c —下寒武统沧浪铺组; P_1l —下二叠统梁山组; P_2l —上二叠统龙潭组。 F_9 、 F_4 、 F_3 、 F_2 —断裂编号。

图 5 川中地区走滑断层控含气系统气藏剖面(剖面位置见图 2)

Fig. 5 The gas reservoir section showing the strike-slip fault-controlled gas system in the central Sichuan Basin

同时,古隆起抬升造成德阳—安岳海槽低部位油气沿走滑断层带向东部古隆起高部位侧向运移,有利于沿走滑断层带的运聚成藏,奠定了安岳气田台内碳酸盐岩走滑断层带富气格局^[14]。相关数据统计分析表明,安岳气田震旦系油气具有从西部海槽烃源区向东部碳酸盐台地运移的趋势,这与西部台缘带天然气富集特征一致。同时,地球化学指标指示油气具有较弱的自北向南的运移趋势,这与安岳气田位于古隆起高部位有关^[1-5,27-28]。在油气自西向东的运移路径上,横穿台缘带的走滑断层是油气侧向运移的优势通道。

晚侏罗世—白垩纪快速沉降阶段是大量原油裂解与干气形成期^[8-10](图 4),形成了多层系广泛成藏的川中大气区。由于川中地区走滑断层已停止活动、开启断裂少,仅局部可能发生天然气向上调整,大量天然气分布在走滑断层断至的震旦系灯影组、寒武系龙王庙组与中二叠统栖霞组—茅口组,有利于气藏的形成与保存。川中古隆起天然气储量主要分布在震旦系—寒武系^[1-5],表明晚期走滑断层的破坏作用弱。在喜马拉雅构造运动期,川中地区整体隆升,普遍缺失侏罗系上覆地层,川中古隆起继承性发育^[22-23]。该期烃源岩生烃停滞,受古隆起构造向南抬升的影响,仅局部发生气藏调整,形成了现今中生界碳酸盐岩含气系统格局。

由此可见,川中地区上震旦统灯影组、下寒武统龙王庙组与中二叠统碳酸盐岩储层发育期均有走滑断层活动,有利于走滑断层“甜点”储层的发育与分布^[14-15];走滑断层对早期油气成藏既有控制运聚作用、更具有强烈破坏作用,而中生代关键油气成藏期走滑断层停

止生长,弥散性广泛分布的走滑断层输导网络体系通过沟通源—储,形成多层段、多类型走滑断层控气藏,构成源—断—储三元耦合复式成藏的前中生界走滑断层控含气系统(图 2、图 5)。

3 走滑断层差异控藏作用与模式

3.1 走滑断层控聚作用与模式

通过走滑断层带不同层位与不同井区气藏分析,形成沿走滑断层带发育断控近源成藏与断控远源成藏 2 类走滑断层控成藏模式(图 6)。

在安岳气田震旦系台缘带,台缘西侧海槽下寒武统主力烃源岩生成的油气向东侧高部位运移过程中,走滑断层相对致密岩层孔隙是更为优越的运移通道。在震旦系灯影组台缘带,高能相带与走滑断层带的叠合部位是油气侧向运聚的有利部位,形成断裂侧向输导的近源成藏模式[图 6(a)]。这种成藏模式沿台缘带与走滑断层带的叠合部位广泛分布,是油气成藏与富集的有利类型。如 MX22 井位于灯影组台缘带高能相带储集层发育部位,邻近的横穿台缘带与海槽烃源岩的主干走滑断层带是油气优势运移通道,为油气优势运聚成藏部位。

在震旦系灯影组碳酸盐台缘内侧与台地内部,走滑断层通过横穿台缘高能相带进行侧向运移,并通过分支断裂向外扩散,在走滑断层两侧储集层发育的圈闭中聚集成藏,构成走滑断层侧向输导的近源成藏模式[图 6(b)]。这种成藏模式沿台缘带内侧与台内走滑断层带广泛分布,不同走滑断层带的输导与圈闭条件差异大,形成的油气藏规模与富集程度也差异大。

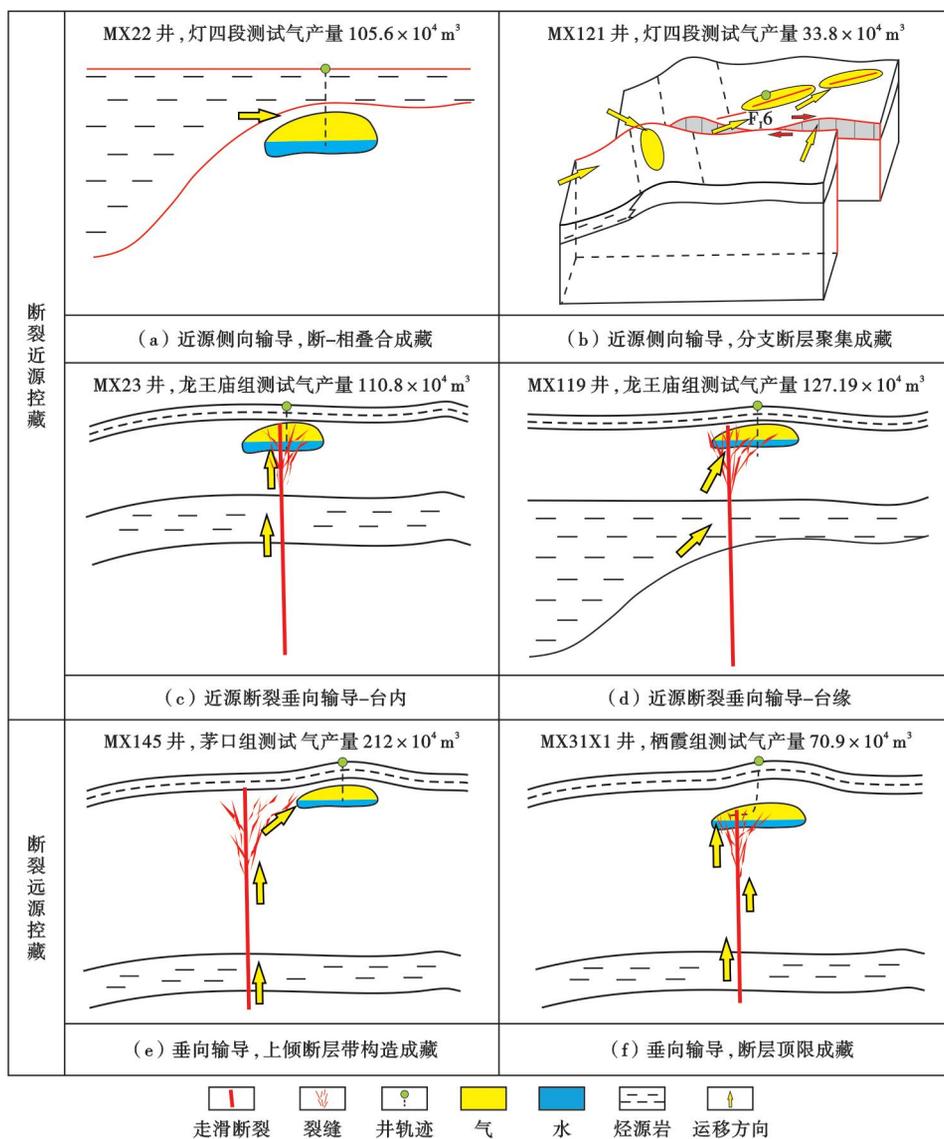


图6 川中地区走滑断层带运聚成藏模式

Fig. 6 Migration and accumulation models along the strike-slip fault zones in the central Sichuan Basin

在远离海槽烃源区的碳酸盐台地内,油气来源较少。灯影组与龙王庙组台内丘滩体发育,走滑断层可能沟通下伏均发育较薄的页岩烃源岩^[3,27-28],形成近源垂向输导成藏模式[图6(c)]。由于台内烃源岩厚度较薄,走滑断层控运作用更强。如MX23井位于主干走滑断层带,油气运移充注强度大,天然气产量高。而远离主干走滑断层带区域天然气充注程度较低、单井产量更低。下寒武统龙王庙组丘滩相低孔低渗储层位于筇竹寺组烃源岩之上,通过走滑断层的近源垂向输导,可能形成沿走滑断层带的运聚成藏[图6(d)]。由于海槽区烃源岩巨厚,沿该区走滑断层更有利于油气垂向运聚成藏,因而所发现的气藏的气柱高度更大。

二叠系栖霞组—茅口组碳酸盐岩远离寒武系底部烃源岩,走滑断层成为沟通源-储、垂向运移的优势通道,走滑断层通源控运作用更为显著[图6(e)、图6(f)]。

由于远离烃源岩,二叠系虽然有大面积分布的薄层白云岩储层,但并没有形成广泛的油气充注,发现的气藏也是局部分布,而且由于边/底水活跃,缺乏大面积成藏区。对比分析表明,二叠系已发现气藏分布在主干走滑断层带周缘构造高部位(图2、图5)。通过走滑断层的垂向运移,沿走滑断层带上倾方向的局部构造成藏是最主要的一种成藏模式[图6(e)]。如MX145井区发育局部构造圈闭,通过北部走滑断层带的垂向输导与侧向运聚形成局部构造气藏。

由于走滑断层大多断至二叠系顶面,而且以张扭断层为主,沿主干走滑断层带的破坏作用较强,成功钻探的井较少。但在局部构造发育、走滑断层未断穿储层的部位,也可能形成走滑断层输导构成的有效成藏模式[图6(f)]。这种成藏模式已为磨溪地区MX31-X1井等在栖霞组的钻探所证实,断层向上截止的层位

决定了气藏的最高层位。

综合分析表明,走滑断层是川中地区的优势运移通道,弥散性走滑断层构成了遍及全区的前中生界垂向-侧向运聚共存的输导体系,形成了上震旦统一下寒武统近源侧向、中二叠统远源垂向为主的不同运聚成藏模式,具有分层、分区与分类的运聚成藏差异性。

3.2 走滑断控圈闭与气藏模式

前期研究认为,川中地区海相碳酸盐岩发育大型

高能相带控制的大型丘滩/礁滩岩性圈闭,并在隆起高部位发育大型背斜圈闭^[2-5,25]。通过近期钻探结果分析,前中生界丘滩/礁滩体虽然叠置面积大,但纵/横向变化大,其间存在渗透率低于 0.2 mD 的低渗透致密层,可能形成独立的圈闭或气藏^[15](图 7)。虽然单个气藏规模变小,高部位出水,但低部位独立的圈闭仍能形成气藏。因此,川中北斜坡区难以形成高差逾 1500 m 的大型岩性圈闭^[15],近期北斜坡钻探的 PT1 井、DB1

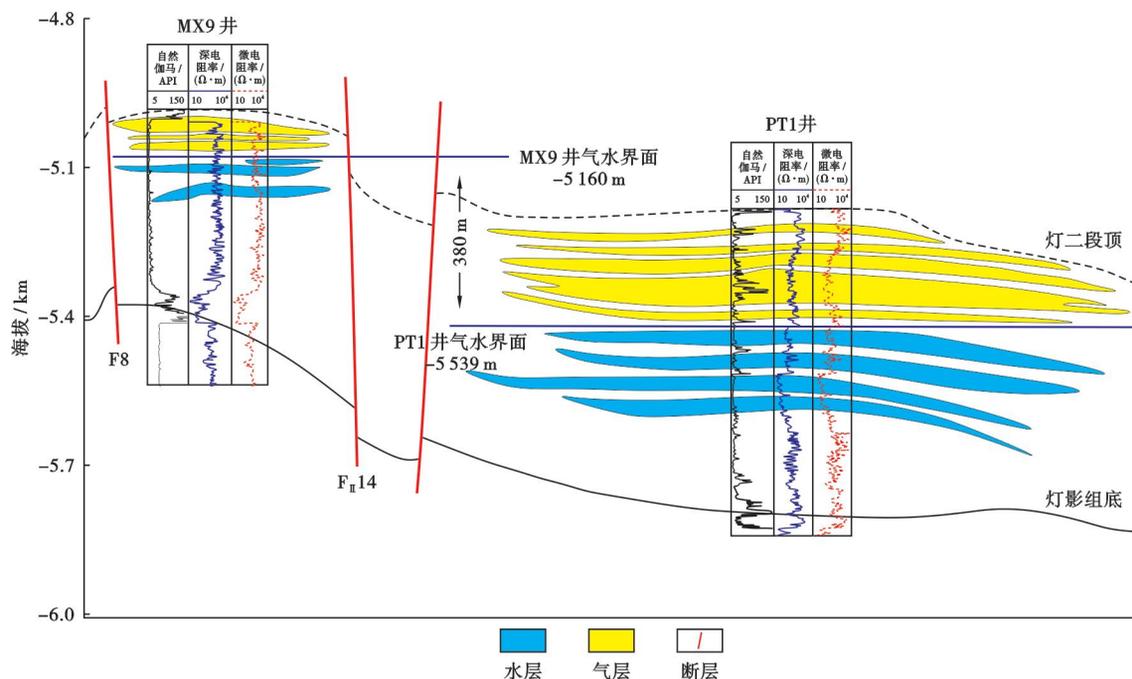


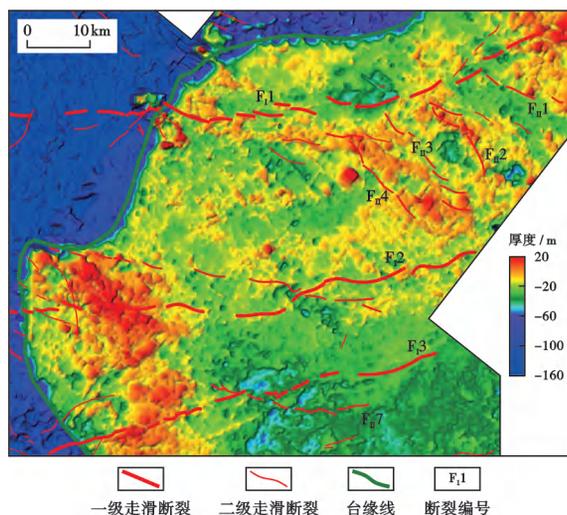
图 7 川中北斜坡区 PT1 井区灯影组天然气藏剖面

Fig. 7 The gas reservoir section of Dengying Formation for PT1 well area in the northern slope of the central Sichuan Basin

井等井出现气水同出的结果也揭示其不是统一的整装气藏^[5](图 5)。

结合川中北斜坡震旦系丘滩体的分布特征与地震储层预测资料分析,斜坡背景上发育一系列有分隔的丘滩体,尤其是碳酸盐台地内部丘滩的孤立性更强(图 8),可能形成一系列受丘滩/礁滩体控制的岩性圈闭。

除相控丘滩体圈闭外,走滑断层对丘滩体的分布及圈闭的形成也有重要控制作用,可能形成断裂-丘滩复合圈闭(图 5)。丘滩体可能以走滑断层带分隔,在上倾方向通过致密走滑断层带遮挡形成断裂-丘滩型圈闭。同时,走滑断层还可能改造碳酸盐岩储层^[12-15],形成高孔、高渗储集体,并通过上倾方向致密碳酸盐岩遮挡形成断裂改造的成岩圈闭。这类圈闭可能以致密碳酸盐岩遮挡,也可以充填的致密走滑断层遮挡(图 5)。根据川中地区岩心与地震资料分析,大型张扭断层容易为筇竹寺组泥岩充填,或通过错断与筇竹寺组泥岩对接,具有较强的侧向断层封闭性。此外,部分断层核与破碎带也容易为泥岩充填或方解石胶



注:红色为局部高的丘滩体发育部位。

图 8 川中地区灯影组四段古地貌叠加走滑断层 (据文献^[11]修改)

Fig. 8 The paleogeographic map of Member 4 of Dengying Formation and superimposed strike-slip faults in the central Sichuan Basin

结,形成低渗透的致密区段,也可能具有封闭性,并为钻至断层核的GS118井等井所证实。尽管走滑断层相关的圈闭规模较小、内部结构复杂,但裂缝发育,储层物性好、连通性较好,天然气产量高,可能构成相-断共控复合型圈闭群(图5)。

总之,近期沿走滑断层带在川中北斜坡钻遇多套含气层段^[5,14-15],证实斜坡背景上发育一系列有分隔的岩性与构造-岩性圈闭(图5),走滑断层控制了圈闭的有效性与差异性,具有形成沿走滑断层带

分布“小藏大气田”的地质条件,是有利钻探的气藏新类型。

3.3 走滑断控制气藏富集作用与富集模式

通过气藏解剖表明,高产井主要沿走滑断层带分布[图9(a)、图9(b)]。二叠系高产井位于距走滑断层800 m的范围内,震旦系—寒武系高产井多数位于距走滑断层1100 m的范围内,受控于走滑断层破碎带的分布。其中震旦系台缘带一些高产井不受走滑断层控制^[15],但台缘带断裂发育部位的钻井产量也相对较高。

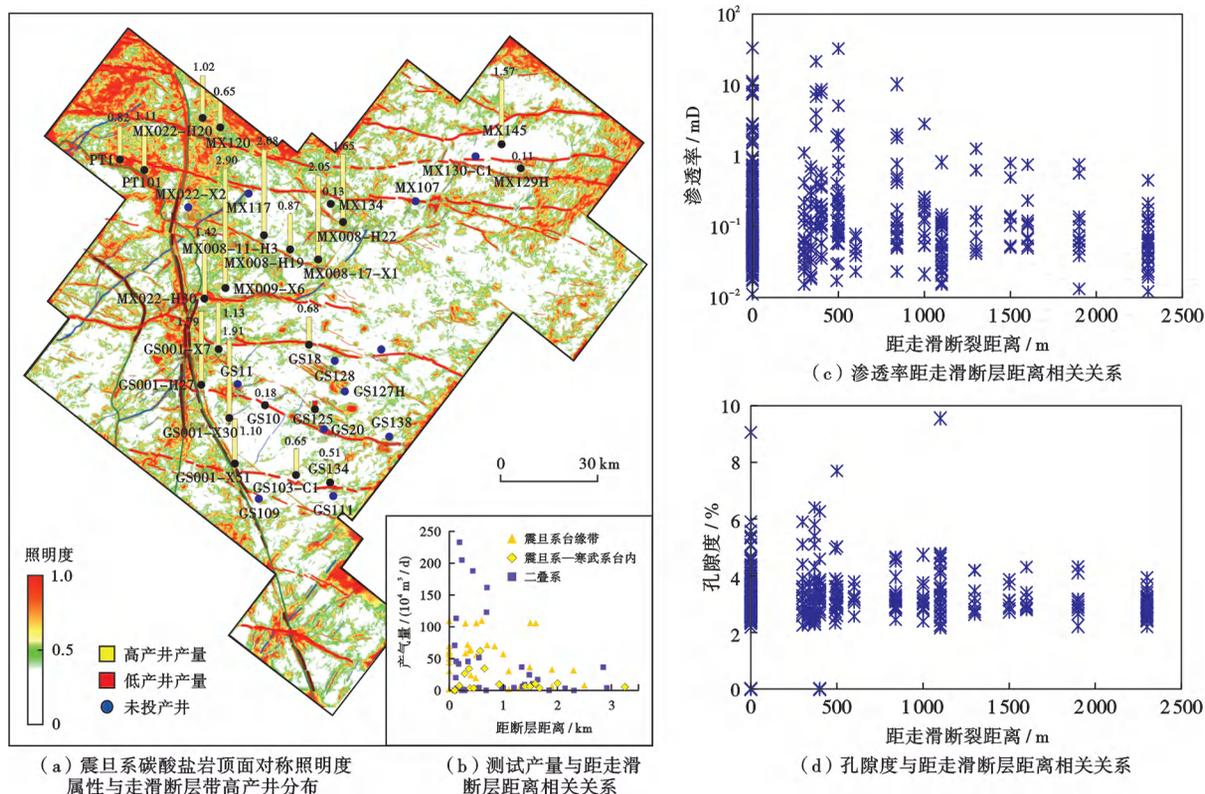


图9 安岳气田震旦系走滑断层分布及其地质属性与距走滑断层距离之间的关系

Fig. 9 Distribution of Sinian strike-slip faults in Anyue gas field and relationship between its geological properties and the distance from the strike-slip fault

分析表明,走滑断层对天然气富集的控制主要体现在3个方面。①通过控制局部地貌进而控制高能储集相带沿断裂带发育^[11],这对同断裂期或断裂后的台内滩分布影响大(图8),并影响岩溶作用的地貌与流动网络分布,有利于形成相-断共控的构造-岩性圈闭。②走滑断层对致密碳酸盐岩储层具有重要的建设性作用^[12-15],远离走滑断层带的基质孔隙度一般小于4%,渗透率一般小于0.5 mD,而断裂作用造成渗透率可增加1~3个数量级,沿断裂的溶蚀作用可导致基质储层孔隙度增加1倍以上,容易形成高孔高渗的裂缝-孔洞型与裂缝-洞穴型“甜点”储层[图9(c)、图9(d)],也是高产气井钻探的主要对象。当然,沿走滑断层带也有

储层更致密、产量更低的钻井(图9),这与断裂的愈合及充填密切相关。③走滑断层是天然气运移优势通道(图5、图6),有利于油气沿走滑断层带运移成藏,走滑断层带附近圈闭充注程度更高,而远离走滑断层带的圈闭边/底水活跃。同时,走滑断层带也是多期油气调整的重要部位,有利于油气沿走滑断层带的再聚集。值得注意的是,震旦系台内的高产井均位于走滑断层破碎带,这可能与大量气源从德阳—安岳海槽通过走滑断层侧向运移有关。此外,二叠系天然气的富集与走滑断层更为密切,可能与走滑断层垂向的远源运聚作用有关。

统计分析表明,走滑断层带基质孔隙发育的丘滩/

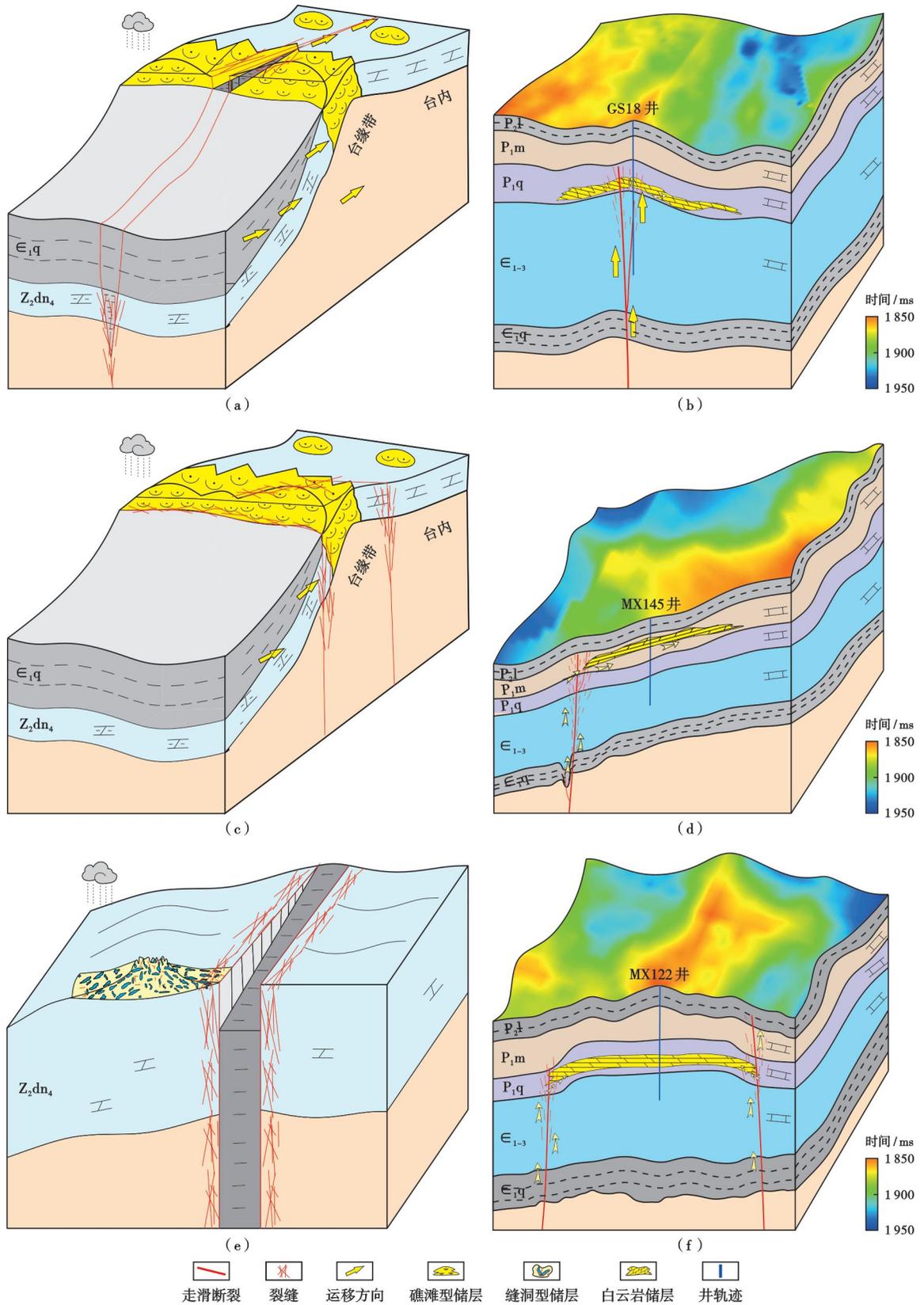
礁滩体钻井试气产量低,但断裂发育的储层段日产量可能提高1~4倍[图9(b)]。在生产过程中,丘滩/礁滩型气藏单井产量低,通常需要通过水平井钻探获得工业气流,而且礁滩-断裂复合型气藏稳定日产量可能提高2~5倍^[14]。值得注意的是,走滑断层对震旦系台内气藏高产的控制作用表现更显著,高产井均位于走滑断层破碎带,远离走滑断层的钻井未形成工业产能。走滑断层带高产井的日产量随距断层距离的减小而显著增加,具有明显的幂律分布特征。当然,走滑断层带也有许多低产井,这些井主要钻遇断裂欠发育的基质孔隙部位,以及部分断裂充填严重、断裂相关溶蚀孔隙欠发育的部位。综合分析表明,高产井多具有走滑断层与储层规模大、局部构造高的特点,形成多种差异富集模式(图10)。

上震旦统灯影组与下寒武统龙王庙组沿德阳—安岳海槽烃源岩附近的高产井多,具有近源、高能相带与断裂发育特征,形成近源断控运聚、相-断-溶共控储层发育、局部构造发育的富集模式[图10(a)]。MX22井区灯影组台缘带紧邻海槽烃源岩中心,发育相控白云岩基质孔隙,并叠加了断裂与岩溶改造作用,孔洞型、裂缝-孔洞型储层发育。而且该区位于古隆起高部位,发育磨溪背斜构造,有利于油气运聚与保存。走滑断层控制了油气的充注路径与部位,有效提高了储层的渗透率与孔隙度,对天然气的富集与产出具有重要作用。在台缘丘滩体发育、岩溶孔洞型储层发育的井区,走滑断层可能没有显著的控储作用,仅沟通源-储,形成断层输导、相-溶控储、局部台缘丘滩/构造的富集模式[图10(c)]。在远离海槽烃源岩的碳酸盐台地内部,上震旦统一寒武统也发育台内高能丘滩相白云岩储层,但以特低孔($<3.5\%$)特低渗($<0.5\text{ mD}$)储层为主。钻井分析表明,相对基质-孔隙型储层而言,走滑断层破碎带的裂缝-孔洞储层发育段的孔隙度可能增加1倍以上,渗透率可能增加1个数量级以上^[11-15],走滑断层增储作用显著,断控裂缝-孔洞型、缝洞型储层是高产的关键。前期灯影组碳酸盐台地内部远离走滑断层的一系列井均未形成高产稳产开发区,也揭示了走滑断层对气藏富集高产的重要作用。通过台内高产井分析,这类富集高产模式具有走滑断层与断-相-溶共控储层发育,局部构造高发育的特征[图10(e)],其中储层与局部构造高均与走滑断层密切相关,表明走滑断层对富集高产的作用更为显著。川中地区中二叠统栖霞组、茅口组沉积环境为浅水开阔台地相,台内滩相灰岩发育,间夹薄层白云岩是主要的储层^[4-5],并在川中地区广泛分布。沿走滑断层带白云岩储层物性

变化大,渗透率变化范围达1~2个数量级,而且单井日产量变化比震旦系断控气藏更显著[图9(b)],而且气水关系更复杂,很可能与走滑断层造成的储层强非均质性有关。栖霞组高产井主要分布于距走滑断层600m的范围之内,茅口组高产井主要分布于距走滑断层850m的范围之内,部分井受到次级断层的影响产量更高,二叠系高产井的井区范围则较小。综合分析可以看出,走滑断控气藏富集模式主要包括3种类型[图10(b)、图10(d)、图10(f)]。在GS18井区,走滑断层规模大,有效改造了薄层白云岩储层,并在灰岩中也形成了断裂溶蚀作用相关的裂缝-孔洞型储层。更为重要的是,走滑断层发育在栖霞组,而且产生了局部背斜构造,形成沿走滑断层构造高部位的垂向运聚成藏。由于断层基本消失在栖霞组,油气保存条件好,造成沿走滑断层顶部的构造富集模式[图10(b)]。这类富集模式的高产井较少,主要原因在于后期的构造活动可能激活走滑断层,造成油气的破坏与调整。如在MX117井区也有类似的成藏条件,但走滑断层后期活动强烈,向上断穿盖层,测试产气后很快出水,气藏的封闭条件差,难以富集高产。在MX145井区[图10(d)],构造高部位发育茅口组白云岩,而构造低部位发育走滑断层,通过走滑断裂远源垂向-侧向输导,油气向上倾高部位的岩性圈闭中运聚成藏,该区白云岩储层发育,走滑断层仅起到通源与输导作用,形成走滑断层上倾构造高部位富集模式。当然,这种类型的富集气藏也可能叠加走滑断层对储层的改造作用,形成高孔高渗的裂缝-孔洞型、缝洞型储层。另外,在两条走滑断层夹持的断垒带[图10(f)],走滑断层不仅控制了局部构造,而且可能通过断裂作用改造白云岩储层,并通过两条断层垂向输导供烃,在构造高部位形成油气富集。

基于走滑断层增储控富作用的认识,在震旦系与二叠系碳酸盐台地内部MX8井区、GS18井区不同规模、不同类型走滑断层带部署了水平井[图9(a)],开展了对开发先导试验区走滑断控“甜点”的钻探。钻探结果表明,钻穿走滑断层带8口井的裂缝-孔洞型储层钻遇率提高50%以上,储层平均孔隙度增加50%以上、渗透率增加1~2个数量级,单井稳定产量是台内碳酸盐岩单井日产量的3~5倍。

综上所述,川中地区走滑断层具有显著的控富高产作用,揭示“源-断-储”三元耦合控藏、差异富集规律,呈现分层、分区、分类富集的差异性,是深层碳酸盐岩高效勘探开发的有利新领域,也需要采取针对性的钻探措施。



注: Z_2dn_4 —上震旦统灯影组四段; E_{1q} —下寒武统筇竹寺组; E_{1-3} —寒武系; P_{1q} —下二叠统栖霞组; P_{1m} —下二叠统茅口组; P_{2l} —上二叠统龙潭组; 图(d)、(e)、(f)顶面为上二叠统龙潭组底界构造图。

图 10 川中地区走滑断控气藏富集模式

Fig. 10 Enrichment pattern of gas reservoirs controlled by strike-slip faults in the central Sichuan Basin

4 结 论

(1) 川中地区发育弥散性分布的前中生界走滑断层系统,印支期—燕山期成藏演化配置优越,具有形成前中生界多层系走滑断控复式成藏富气系统的地质条件。

(2) 走滑断层控制了川中地区前中生界运聚输导体系,形成了上震旦统一寒武系近源侧向成藏与中二叠统远源垂向成藏模式,具有分层、分区运聚成藏的差异性。

(3) 川中地区走滑断层与高能相带复合形成相断共控的构造-岩性圈闭,走滑断层控制了圈闭的有效性与差异性,构成沿走滑断层带分布“小藏大气田”的断控气藏群。

(4) 川中地区走滑断层控制了高产井的分布,具有增储与控富作用,并形成震旦系—寒武系与二叠系碳酸盐岩的差异富集模式。

(5) 川中地区走滑断控碳酸盐岩气藏具有“源-断-储”三元耦合控藏、差异富集的规律,以及控运、控圈与控富作用的差异性,走滑断控“甜点”气藏是深层碳酸盐岩高效勘探开发的有利新领域。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):278-293.
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [2] 杨跃明,杨雨,杨光,等. 安岳气田震旦系、寒武系气藏成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报,2019,40(4):493-508.
YANG Yueming, YANG Yu, YANG Guang, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies of Sinian and Cambrian gas reservoirs in Anyue gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 493-508.
- [3] 魏国齐,杨威,谢武仁,等. 四川盆地震旦系—寒武系天然气成藏模式与勘探领域[J]. 石油学报,2018,39(12):1317-1327.
WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Accumulation modes and exploration domains of Sinian-Cambrian natural gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1317-1327.
- [4] 马新华,杨雨,文龙,等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2019,46(1):1-13.
MA Xinhua, YANG Yu, WEN Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 1-13.
- [5] 杨雨,文龙,宋泽章,等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报,2022,43(10):1351-1368.
YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1351-1368.
- [6] 马永生,何治亮,赵培荣,等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报,2019,40(12):1415-1425.
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [7] 李建忠,陶小晚,白斌,等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):52-67.
LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 52-67.
- [8] 焦方正,杨雨,冉崎,等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. 天然气工业,2021,41(8):92-101.
JIAO Fangzheng, YANG Yu, RAN Qi, et al. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 92-101.
- [9] 梁瀚,唐浩,冉崎,等. 四川盆地川中地区走滑断裂的分布、类型与成因[J]. 地质学报,2023,97(8):2609-2620.
LIANG Han, TANG Hao, RAN Qi, et al. The distribution, type and origin of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(8): 2609-2620.
- [10] 马兵山,梁瀚,邬光辉,等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. 石油勘探与开发,2023,50(2):333-345.
MA Bingshan, LIANG Han, WU Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 333-345.
- [11] WEN Long, RAN Qi, TIAN Weizhen, et al. Strike-slip fault effects on diversity of the Ediacaran mound-shoal distribution in the central Sichuan intracratonic basin, China[J]. Energies, 2022, 15(16): 5910.
- [12] 马德波,汪泽成,段书府,等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. 石油勘探与开发,2018,45(5):795-805.
MA Debo, WANG Zecheng, DUAN Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 795-805.
- [13] HE Bing, LIU Yicheng, QIU Chen, et al. The strike-slip fault effects on the Ediacaran carbonate tight reservoirs in the central Sichuan Basin, China[J]. Energies, 2023, 16(10): 4041.
- [14] 何晓,唐青松,邬光辉,等. 四川盆地安岳气田震旦系走滑断裂控储作用[J]. 石油勘探与开发,2023,50(6):1116-1127.
HE Xiao, TANG Qingsong, WU Guanghui, et al. Control of strike-slip faults on Sinian carbonate reservoirs in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1116-1127.
- [15] 邬光辉,邹禹,徐伟,等. 四川盆地川中古隆起北斜坡震旦系走滑断裂分布及其勘探意义[J]. 天然气工业,2023,43(7):37-43.
WU Guanghui, ZOU Yu, XU Wei, et al. Distribution and petroleum exploration significance of Sinian strike-slip faults in the northern slope of Central Sichuan paleo-uplift[J]. Natural Gas In-

- dustry, 2023, 43(7):37-43.
- [16] 张旋, 冉崎, 陈康, 等. 川中地区安岳气田走滑断裂对灯影组储层及含气富集的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6):917-928.
ZHANG Xuan, RAN Qi, CHEN Kang, et al. The controlling effect of strike-slip fault on Dengying Formation reservoir and gas enrichment in Anyue gas field in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6):917-928.
- [17] TIAN Xingwang, LIU Guangdi, LUO Bing, et al. Structural characteristics and their significance for hydrocarbon accumulation in the northern slope of the central Sichuan Paleouplift[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(4):1451-1470.
- [18] 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, LIANG 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.
- [19] LIANG Shangzi, LI Zhong, ZHANG Wang, et al. The characteristics of strike-slip faults and their control on hydrocarbon distribution in deep carbonate reservoirs of the central Sichuan Basin [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11:64835.
- [20] 付小东, 张本健, 汪泽成, 等. 四川盆地中西部走滑断裂及其对油气成藏控制作用[J]. 地球科学, 2023, 48(6):2221-2237.
FU Xiaodong, ZHANG Benjian, WANG Zecheng, et al. Strike-slip faults in central and western Sichuan Basin and their control functions on hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science, 2023, 48(6):2221-2237.
- [21] 李纯泉, 陈红汉, 唐大卿, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断裂控制下的“层楼式”油气成藏模式:以震旦系—寒武系为例 [J]. 地球科学, 2023, 48(6):2254-2266.
LI Chunquan, CHEN Honghan, TANG Daqing, et al. Strike-slip faults controlled “Floor Type” hydrocarbon accumulation model in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin: a case study of Sinian-Cambrian[J]. Earth Science, 2023, 48(6):2254-2266.
- [22] 刘树根, 李智武, 孙玮, 等. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. 地质科学, 2011, 46(1):233-257.
LIU Shugen, LI Zhiwu, SUN Wei, et al. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1):233-257.
- [23] 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.
- [24] 文龙, 罗冰, 钟原, 等. 四川盆地灯影期沉积特征及槽-台体系成因模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(5):513-524.
WEN Long, LUO Bing, ZHONG Yuan, et al. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying period in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2021, 48(5):513-524.
- [25] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系一下古生界天然气勘探新认识及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2020, 40(7):1-9.
XU Chunchun, SHEN Ping, YANG Yueming, et al. New understandings and potential of Sinian-Lower Paleozoic natural gas exploration in the central Sichuan paleouplift of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7):1-9.
- [26] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造解析 [M]. 北京:石油工业出版社, 2022.
YANG Haijun, WU Guanghui, HAN Jianfa, et al. Structural analysis of strike-slip fault in Tarim Basin[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2022.
- [27] 杨鹏, 袁海锋, 马奎, 等. 川中太和气区震旦系灯影组二段储层成岩流体演化及油气成藏史——来自岩石学、原位地球化学、流体包裹体及年代学的证据[J]. 地质学报, 2023, 97(7):2332-2353.
YANG Peng, YUAN Haifeng, MA Kui, et al. Diagenetic fluid evolution and hydrocarbon accumulation history of second Member of the Sinian Dengying Formation in the Taihe gas area, central Sichuan Basin: evidence from petrology, in situ geochemistry, fluid inclusions and chronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(7):2332-2353.
- [28] 姜华, 李文正, 黄士鹏, 等. 四川盆地震旦系灯影组跨重大构造期油气成藏过程与成藏模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(5):11-23.
JIANG Hua, LI Wenzheng, HUANG Shipeng, et al. Process and model of hydrocarbon accumulation spanning major tectonic phases of Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5):11-23.
- [29] ALLEN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(7):803-811.
- [30] FISHER Q J, CASEY M, HARRIS S D, et al. Fluid-flow properties of faults in sandstone: the importance of temperature history [J]. Geology, 2003, 31(11):965-968.
- [31] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11):1557-1575.
- [32] PEI Yangwen, PATON D A, KNIPE R J, et al. A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150:121-138.

(收稿日期 2023-07-07 改回日期 2024-04-10 编辑 王培玺)