

成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组天然气运移特征与富集主控因素

唐宇¹,吕正祥²,叶素娟¹,孟万斌²

(1. 中国石化西南油气田分公司,四川成都610081; 2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610059)

摘要:成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组气藏为次生气藏,其中的天然气来自纵向上距其3 000多米的下伏上三叠统,储层和烃源岩层的远距离纵向分隔使得运移条件在成藏诸要素中尤为关键。蓬莱镇组中含气砂体较为发育且分布非均质性较强,认识其非均质性特征需要深入分析天然气富集的主控地质因素。通过气源分析,纵向上各气藏产出天然气的同位素组成、原始组分、干燥系数、 iC_4/nC_4 等地球化学特征分析表明,蓬莱镇组气藏天然气运移通道主要为气源断层和储集砂体,运移方式为借助断裂系统和纵向上较为发育的多套渗透性砂体进行立体式高效运移。勘探开发成果分析表明:发育气源断层是成都凹陷蓬莱镇组成藏的必要条件;气源断层与储层的合理配置、砂岩的储集性好坏进一步影响天然气富集程度,储层下倾方向与气源断层相接或与之邻近、砂岩物性好的地区天然气富集程度高。天然气在气源断层与储层合理配置带内的有利储层中最为富集的部署思想,大大提高了钻获高产井和工业气井的成功率。

关键词:气源断层;天然气运移;蓬莱镇组;上侏罗统;成都凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of natural gas migration and accumulation in the Upper Jurassic Penglaizhen Formation of Chengdu Sag

Tang Yu¹, Lü Zhengxiang², Ye Sujuan¹, Meng Wanbin²

(1. SINOPEC Southwest Oilfield Company, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology & Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Upper Jurassic Penglaizhen Formation gas pool in Chengdu sag is a secondary gas pool with its gas being sourced from the Upper Triassic source rocks over 3 km beneath the reservoirs. Due to the long vertical distance between the reservoir and source rocks, the gas migration path and mechanism are assumed to be of particular importance. The gas-bearing sandstones are widely distributed in the Penglaizhen Formation and have great heterogeneity, thus study of the principal controlling factors on gas accumulation is critical to understanding its heterogeneity. Analyses of gas sources, original gas compositions, isotopic compositions, dry coefficient, and iC_4/nC_4 demonstrate that the major hydrocarbon migration pathways are source-rock-connected faults and permeable carrier beds through which gas is capable of migrating with high efficiency. Hydrocarbon exploration and exploitation indicate that source-rock-rooted faults and good-quality reservoirs. The existence of source rock-rooted faults is the indispensable condition for gas accumulation in the Penglaizhen Fm in Chengdu sag. The rational combination between the source rock-rooted faults and reservoirs and the poroperm characteristics of reservoirs further influence the enrichment of gas. Gas is highly enriched in the downdip areas where the sandstones have good poroperm characteristics and are connected with or near to the source rock-rooted faults. The study results are valuable for gas exploration and development and can increase success rate in drilling prolific and commercial wells.

Key words: source rock-rooted fault, hydrocarbon migration, Penglaizhen Formation, Upper Jurassic, Chengdu Sag

川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组(J_3p)为不具生烃能力的陆相碎屑岩地层,早期在川西坳陷侏罗系中发现了的新场、马井、洛带气田等,在蓬莱镇组中探明了几

百亿的天然气储量^[1],这些气田都分布在正向构造上,在构造位置较低的成都凹陷和北部的梓潼凹陷探明储量很少,近年来在弱变形成都凹陷中的钻井在蓬莱镇

收稿日期:2012-10-08;修订日期:2013-04-08。

第一作者简介:唐宇(1964—),男,高级工程师,油气勘探与管理。E-mail: tangrnpvip@vip.sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05002-004-001)。

组中钻获了较多含气砂体,预示蓬莱镇组中蕴藏有丰富的天然气。成都凹陷中的烃源岩主要发育在垂向上距离蓬莱镇组 1 km 以上的下伏上三叠统及其更老地层中,蓬莱镇组砂体中的含气丰度非均质性较强,富集程度与构造高低关系不明显,因此天然气运移通道、运移方式、天然气富集主控因素分析等对研究蓬莱镇组成藏和预测富集区尤为重要。研究表明,成都凹陷蓬莱镇组气源来自上三叠统须家河组,其运移通道是向下断达上三叠统、向上断至蓬莱镇组的断层(本文下称气源断层)和蓬莱镇组中发育的多套渗透性砂体,天然气借助断层、渗透性砂体组成的高速运移通道进行运移,富集主控因素是气源断层-储层配置关系和储层的储集性,即在气源断层与储层有效配置地区,如果砂岩的储集性好即可形成天然气的高富集,反之含气丰度低。

1 地质概况

成都凹陷构造上属于四川盆地西部的川西坳陷,凹陷以北为北东东向隆起的新场构造带,西部为呈北东-南西向展布的龙门山构造带,东部为呈南北向展布的知新场构造带^[2](图1)。川西坳陷浅中层侏罗系蕴藏的天然气十分丰富,分布层位自下侏罗统的白田坝组(J_1b),中侏罗统千佛崖组(J_2q)、下沙溪庙组(J_2x)、上沙溪庙组(J_2s),上侏罗统遂宁组(J_3s)、蓬莱

镇组(J_3p)等,侏罗系中发现的气田主要有成都凹陷以北的新场大气田、东南部洛带气田和凹陷中部的马井气田,此外还发现多个含气构造。

成都凹陷侏罗系埋深一般在 1 000 ~ 4 000 m,厚度 2 500 m 左右,其中蓬莱镇组埋深一般在 1 000 ~ 2 500 m,地层厚度约 1 300 m^[3-4]。

2 天然气运移特征

勘探证实川西坳陷中、上侏罗统气藏远离烃源岩层,成都凹陷蓬莱镇组与川西坳陷其它地区蓬莱镇组一样,聚集的天然气来自下伏上三叠统须家河组^[5-7],因此为次生气藏。成都凹陷蓬莱镇组主要为河流-三角洲沉积环境,沉积了多套河流相、三角洲相砂岩,为天然气成藏提供了必要的储集空间;蓬莱镇组中较为发育的泥岩以及上覆厚度较大的白垩系构成较好的盖层;成都凹陷处于弱变形地区,除个别地区发育断裂外,其它地区均无断裂发育,保存条件较好。由此可见,成都凹陷蓬莱镇组具备天然气成藏的储层和封盖条件,能否成藏的关键要素是天然气的运移条件。

2.1 运移通道

2.1.1 同位素组成

相关研究表明,天然气碳同位素对于天然气运移和来源均有良好的指示作用^[8]。甲烷碳同位素受天然

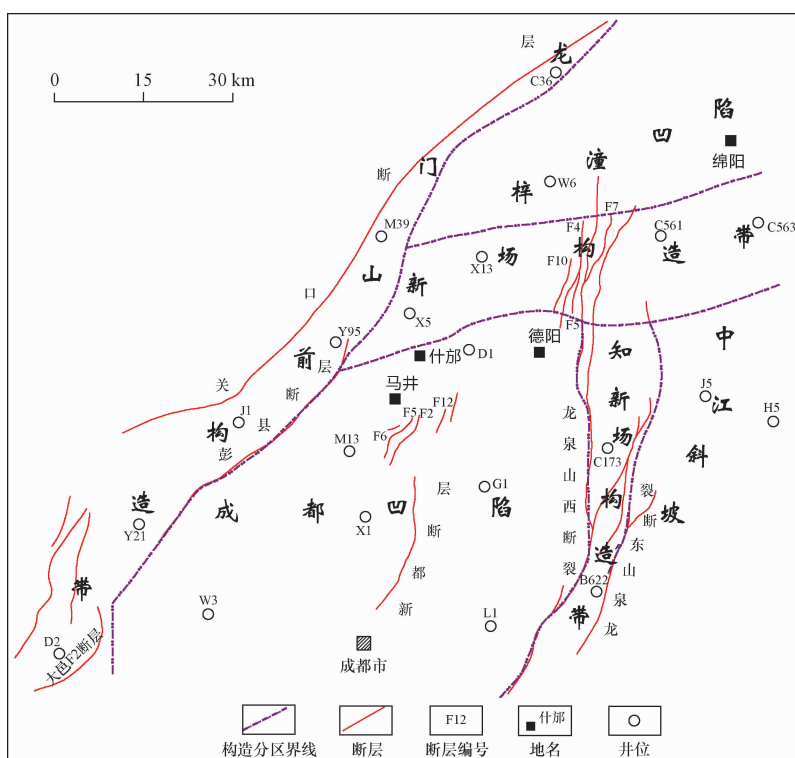


图1 川西坳陷中段浅、中层构造区划

Fig. 1 Tectonic division map of shallow-middle strata in the middle part of the western Sichuan Depression

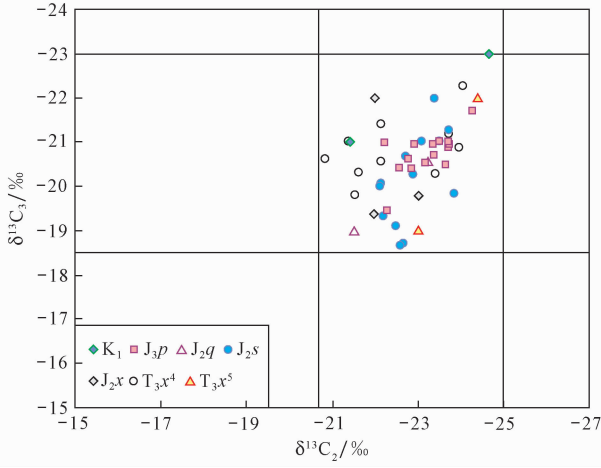


图2 研究区天然气乙烷-丙烷碳同位素交汇图

Fig. 2 Scatter plot showing the relationship between isotopic compositions of ethane and propane in the study area

气运移和热成熟度的影响较大,一般用来指示天然气的运移和源岩成熟度,乙烷、丙烷等碳同位素则基本不受天然气运移和热成熟度的影响,因此是良好的天然气来源示踪指标^[9-10]。

从成都凹陷须家河组到白垩系中产出天然气的乙烷-丙烷交汇图来看(图2),乙烷、丙烷碳同位素组成分布区间均较为局限,乙烷碳同位素主要分布在-25‰~-21‰之间,丙烷碳同位素主要分布在-23‰~-18.5‰之间,可见侏罗系和白垩系各层段中天然气的原始组分是相近的,属于典型的煤型气,同时也可以看出须家河组五段(T₃x⁵)和四段(T₃x⁴)中天然气的碳同位素和侏罗系天然气碳同位素差异很小,体现了两者在原始来源上的一致性(图2)。

2.1.2 干燥系数

根据蓬莱镇组天然气组分数据统计:气藏天然气以甲烷含量占绝对优势,一般在90%以上,平均96.69%,乙烷含量普遍低于5%,平均2.5%,其他重烃含量之和在2%以下(表1)。从中侏罗统气藏到最上部的白垩系气藏,产出的天然气成分差异小,反应了运移过程中天然气分异程度低。侏罗系产出的天然气的干燥系数变化特征也具同样特点,由深至浅虽然井深差异很大,但干燥系数差异很小(表1,图3),表明天然气垂向分异不明显。原因是天然气主要通过高速运

表1 马井-什邡地区侏罗系气藏天然气组分特征
Table 1 Gas composition of the Jurassic gas samples in Majing-Shifang area

层位	甲烷/ %	乙烷/ %	干燥系数 (C ₁ /ΣC ₁₊)	iC ₄ /nC ₄	二氧化碳/ %	氮气/ %
K	96.92	2.30	0.956 9	1.342 0	0.488 1	1.291 9
J ₃ P	96.69	2.50	0.957 0	1.022 2	0.646 3	1.744 7
J ₂ s + J ₂ x	95.76	3.12	0.948 0	0.978 5	0.340 9	1.350 9

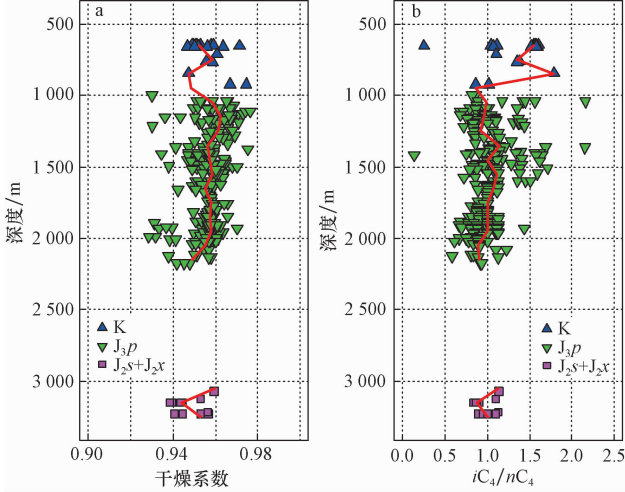


图3 马井-什邡地区中浅层天然气干燥系数 a) 和 iC₄/nC₄ b) 与埋深关系

Fig. 3 Gas dry coefficient and iC₄/nC₄ versus burial depth for gas samples from shallow-middle reservoirs in Majing-Shifang area

移通道——断层向上运移,地层分馏作用^[11-12]对天然气组分影响小,因此干燥系数变化微弱。

2.1.3 正构烷烃/异构烷烃(iC₄/nC₄)

运移效应对正构烷烃/异构烷烃(iC₄/nC₄)值的影响主要包括通道过滤分异效应和扩散分异效应^[12]。通道过滤效应是因为通道半径较小,正、异构烷烃分子体积不同产生的,当通道半径较大时,正、异构烷烃均容易通过,则通道过滤分异效应影响较小,反之则影响较大。扩散分异效应是由正、异构烷烃不同的扩散系数引起的,如果轻烃以气态方式在疏松岩层中进行渗流运移,由于其扩散系数大于正构烷烃,导致沿着油气运移方向 iC₄/nC₄ 值变大。(iC₄/nC₄)的变化特征也进一步反应出断裂及其破碎带在运移中的作用^[11,13]。从成都凹陷中浅层天然气 iC₄/nC₄ 分布情况看,一是从深至浅该比值逐渐增大(表1,图3),反映出天然气主要以气态方式沿着渗流条件较好的断裂进行渗流运移;二是对应相同深度地层,iC₄/nC₄ 变化较大(图3),表明天然气存在侧向运移,侧向运移的主要通道是具有渗透性的砂体。

2.1.4 芳烃运移参数

众所周知,天然气运移过程中,轻烃溶解度一般按照芳烃-环烷烃-正构烷烃的顺序降低,即同碳数烃中芳烃具较高溶解度,正构烷烃溶解度最低^[11-12]。当天然气以游离相运移时,地质色层效应起主导作用,极性物质(芳烃)易被岩石吸附,而非极性物质(正构烷烃和环烷烃)相对容易运移,故沿着运移方向非极性物质组分相对增加^[11]。因此,根据系列芳烃运移地化参数,可

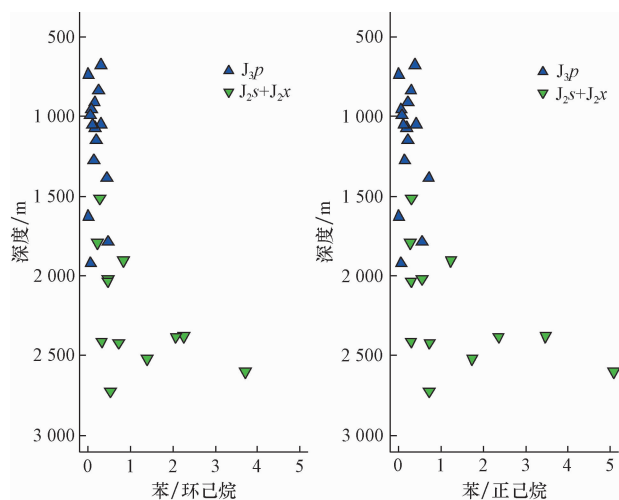


图4 川西坳陷侏罗系天然气苯/正己烷以及苯/环己烷含量比随深度变化

Fig. 4 Benzene/n-hexane and benzene/cyclohexane content ratio versus burial depth for the Jurassic gas samples in the western Sichuan Depression

以对天然气运移机制进行判别^[13-14]。成都凹陷侏罗系天然气苯/正己烷、苯/环己烷与深度关系(图4)显示,上侏罗统蓬莱镇组这两项参数较为集中,均小于1,其较低的苯/正己烷、苯/环己烷值反映其中的天然气主要以游离相通过断层运移,受地质色层效应影响,非极性的正构烷烃和环烷烃相对增加,导致这两项比值变小。

2.2 运移模式

综上所述,成都凹陷中浅层气藏具有明显的反热力学特征,即从下向上(J_2x-J_3p-K),干燥系数、 iC_4/nC_4 表现出逐渐变大的趋势,体现了运移分馏作用的影响^[15-16],天然气的垂向运移通道是断层及其伴生的裂缝系统^[17]。成都凹陷蓬莱镇组中聚集的天然气来

自下伏上三叠统,其垂向运移相态是游离相,垂向运移通道是断层及其伴生的裂缝系统,横向运移通道是渗透性砂体^[18](图5)。断层及其伴生裂缝与渗透性砂体组合,形成了复杂的天然气运移通道网络^[17-18],通过运移通道网络,天然气沿着不同方向进行纵、横向立体式运移,从而聚集成藏(图5)。

3 天然气富集主控因素

成都凹陷蓬莱镇组成藏地质条件表明,天然气运移条件是成藏所需的关键要素。蓬莱镇组中砂体较为发育,含气砂体及其含气丰度的分布非均质性较强,表明不同地区天然气富集的主控因素存在一定差别。

3.1 气源断层是必要条件

分隔须家河组烃源岩层与蓬莱镇组的是泥岩较为发育的中、下侏罗统和上侏罗统遂宁组,这些地层中的泥岩致密化程度很高,且其中的砂岩也大多数较为致密,储集性好的砂岩均以透镜状分布在泥岩中,因此天然气在没有好的通道条件下运移进入蓬莱镇组砂体阻力大,仅靠扩散运移进入透镜体砂岩中的天然气量较少,导致砂岩中含气丰度不高。从凹陷蓬莱镇组断层分布特征(图5)与含气性关系可以看出,当气源断层发育时,其上倾方向发育的储集砂体含气性较好;在气源断层不发育的地区,如凹陷南部的温江地区,即使钻遇好的储集砂体,也难有天然气的有效聚集。由此可见,要在蓬莱镇组中形成天然气的有效聚集,必须具备气源断层。

3.2 气源断层与储层配置关系

虽然发育气源断层是蓬莱镇组砂岩中聚集天然气

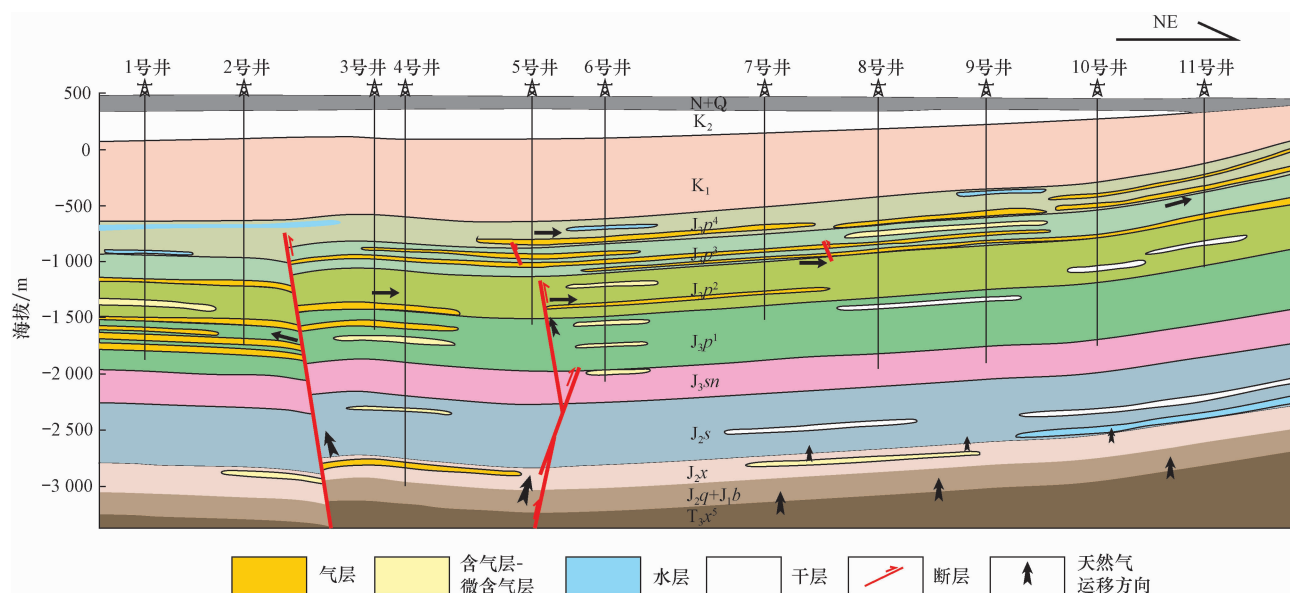


图5 成都凹陷蓬莱镇组气藏运移模式

Fig. 5 Model of hydrocarbon migration in the Penglaizhen gas reservoir, Chengdu Sag

的必要条件,但并非充分条件。成都凹陷在发育气源断层的地区,气源断层与储集砂体间具备多种配置关系,不同的配置关系将导致天然气在储层中具有不同的聚集效果^[19]。

3.2.1 储层下倾部位与气源断层相接

该方式最有利于天然气聚集,即气源断层位于储层的下倾方向上,储层主要发育在高于断面的构造部位,储层与断层(破碎带)相接(图5)。如成都凹陷东北部的斜坡地带,由于在构造较低部位发育气源断层,在气源断层西部主要为高于断裂的鼻状背斜,且背斜上发育较多河流相和三角洲相储层,沿气源断层进入蓬莱镇组的天然气在渗透性砂体中横向运移,并聚集成藏。

成都凹陷蓬莱镇组中,该类配置方式最有利于天然气聚集。这是因为:①该类配置为天然气聚集提供了最好的高速运移通道——断层及其破碎带+渗透性砂体,高速运移通道是次生气藏发育的关键要素;②在天然气运移路径上发育具备储集性的砂体;③砂体上部具备有封盖能力的泥岩致密层。由此组成了次生气藏最有利的通道、储层、盖层组合关系,为天然气的高效聚集提供了必备条件^[20]。

3.2.2 储层发育在距断层上倾尖灭点不远的地层中

砂体与断层不直接相接,断层断至距离储层较近的下伏地层中(图6),天然气沿断层长距离垂向运移到蓬莱镇组后,由于气源充分,天然气在断层通道中不断聚集升压,依靠浮力或扩散进入未与断层直接连接的上覆储层中聚集成藏。钻井证实该类砂体中聚集的天然气的充满度不及断层与砂体直接相接的模式,可以获得工业产能但产能相对较低,如SF3井即属于该类配置,为低产工业气井(图6)。其原因主要是该

类配置地区,天然气聚集必须通过比砂岩更致密的泥岩地层,加大了天然气运移难度。

该类配置与前述方式的不同之处不仅是储层并未与断层直接相接,还包括在断层—储层之间发育泥岩隔层,这些隔层在下伏气源不充分情况下将阻止天然气进入上覆砂岩储层中;但当气源较为充分时,天然气在泥岩附近断裂带聚集升压,升压到一定程度后将突破泥岩的封盖进入上覆储层中聚集成藏。

3.2.3 气源断层位于储层上倾方向而未断开蓬莱镇组

这是成都凹陷部分地区蓬莱镇组中能够成藏的储层—气源断层配置特例(图7)。从现今的断层—储层组合模式来看,储层上倾方向与断层相接,一般情况下将导致天然气散失而难以有效聚集,但在成都凹陷部分地区,这类配置关系仍形成了有效聚集,如马井地区典型钻井MP55D和MP12等井产层,虽然储层位于断层下盘,仍获得了工业气流。

分析其原因是,马井地区蓬莱镇组成藏期是西高东低的一个单斜构造,在成藏期,该地区仍是储层下倾方向与气源断层相接,有利于天然气聚集成藏,现今表现出的配置是后期构造运动调整形成,储层在未与更高部位的断层面相接时即尖灭,故断层并不会对天然气产生散失作用。

该类配置能够成藏的关键是:①在天然气主要聚集期,该地区处于相对比较高的构造位置,有利于天然气的聚集;②主要聚集区天然气的富集程度较高,气水分异位置较低,后期改造并未将其调整为低于气水分异带。因此仍保留了天然气的有效聚集。

3.2.4 储层上倾方向与开启断层相接

储层发育,且在上倾方向与断层相接,断层断至地

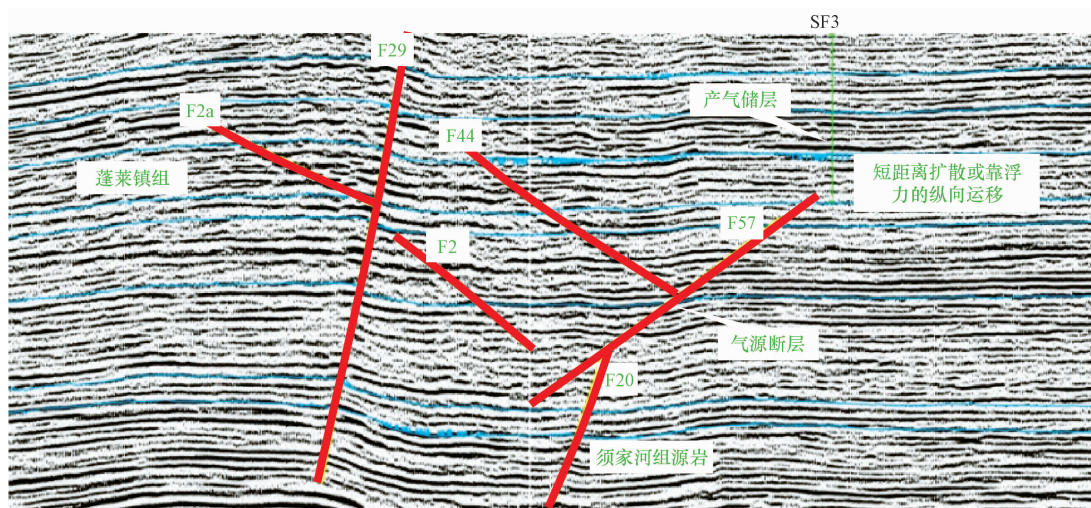


图6 储层位于气源断层上倾尖灭点不远的上覆地层中

Fig. 6 Schematic diagram showing the reservoirs being located in the overlying strata near the updip pinch out points of the source-rock-rooted fault

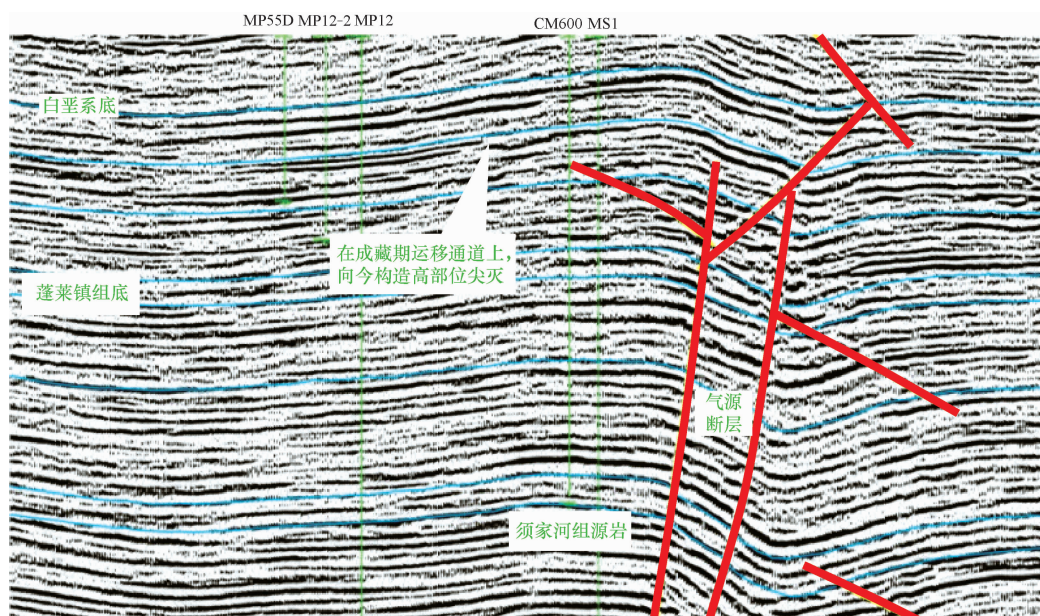


图7 气源断层位于储层上倾尖灭方向

Fig. 7 Schematic diagram showing the source-rock-rooted faults being located in the updip pinch out direction

表且现今仍处于开启状态。这种配置关系最不利于天然气聚集,其主要原因就是断层开启导致无法形成有效圈闭,因此难以形成天然气的有效聚集。

综上所述,在储层和气源断层均发育的地区,必须有储层与断层的合理配置,才能形成天然气的有效聚集。最有利于天然气聚集的配置是储层以其低部位与气源断层或其破碎带相接;其次是储层位于距离断层面上倾方向尖灭点不远的上覆地层中,最不利的是储层上倾方向与断达地表的断层相接。

3.3 储层储集性好

在气源断层发育、储层与气源断层合理配置下,天然气可以在蓬莱镇组储层中有效聚集。勘探开发实践表明,聚集的天然气仍表现出丰度差异,有的钻井获得高产,有的低产,甚至有的仅产微气。进一步分析其成因,天然气含气丰度与储层的物性关系十分密切。在已经成藏的地区,蓬莱镇组砂岩含气性以及测试产能与砂岩孔隙度、渗透率呈明显正相关。成都凹陷的马井-什邡、新都-洛带地区气层孔隙度一般大于8%,渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;测试产能大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的储层平均渗透率普遍大于 $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度大于12%。在已经成藏地区,蓬莱镇组砂岩的储能系数(孔隙度×有效厚度)与无阻流量关系十分明显(图8),即如果储层物性好、厚度大,天然气丰度就高,反之丰度低。可见成都凹陷蓬莱镇组含气丰度主要受控于储层物性,物性好的砂岩含气丰度高,反之含气丰度低。

4 结论

1) 成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组中天然气来自下

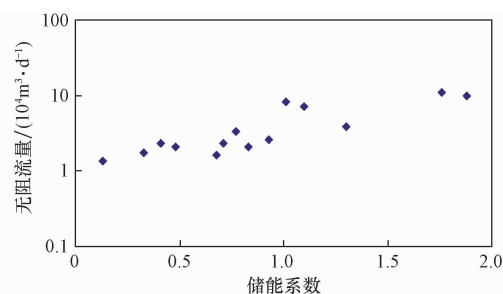


图8 蓬莱镇组储能系数与无阻流量关系

Fig. 8 Reserve coefficients versus open flow capacity of the Penglaizhen reservoir

伏上三叠统烃源岩层,主要以游离相运移到蓬莱镇组,纵向运移通道是断层及其伴生破碎带,在蓬莱镇组中的侧向运移通道是渗透性砂体。气源断层及其破碎带、蓬莱镇组中较为发育的渗透性砂体提供了良好的运移通道条件。

2) 蓬莱镇组储盖条件较好,下伏烃源岩层提供的气源丰富,气源断层是成藏的必要条件。蓬莱镇组中发育纵向上多套、平面上叠置连片的渗透性砂体,砂体中能否富集天然气主要受控于3个主要地质因素:①必须有气源断层;②储层在下倾方向与气源断层相接或邻近;③储层物性好。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
Ma Yongshen, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(3): 347-354.
- [2] 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: 35-77.

- Guo Zhengwu, Deng Kanglin, Han Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 35–77.
- [3] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 206–263.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional geology of Sichuan province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 206–263.
- [4] 胡晓强, 陈洪德, 纪相田, 等. 川西前陆盆地侏罗系层序地层 [J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2): 16–19.
- Hu Xiaoqiang, Chen Hongde, Ji Xiangtian, et al. Jurassic sequence stratigraphy in the western Sichuan foreland basin, China [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(2): 16–19.
- [5] 戴金星, 王庭斌, 宋岩, 等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 76–83.
- Dai Jinxing, Wang Tingbin, Song Yan, et al. Formation conditions and distribution of China's large-medium sized gas fields [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 76–83.
- [6] 李景明, 魏国齐, 李东旭. 中国西部叠合盆地天然气勘探前景 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 1–6.
- Li Jingming, Wei Guoqi, Li Dongxu. Natural gas exploration prospect in superposition basins, western China [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 1–6.
- [7] 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 22–26.
- Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 30(3): 22–26.
- [8] 马安来, 金之钧, 李婧婧, 等. 塔中 I 号坡折带顺西区块顺 7 井油气地球化学特征及来源 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 828–835.
- Ma Anlai, Jin Zhijun, Li Jingjing, et al. Geochemical characteristics and origin of hydrocarbons in the Well Shun-7 of western Shuntuoguole Block, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 828–835.
- [9] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别 [J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1): 11–19.
- Dai Jinxing. Different types natural gas origin identification [J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1992, 6(1): 11–19.
- [10] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. 天然气地球科学, 1993, 2(3): 1–40.
- Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotopic compositions and origin identification of different types natural gas [J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 42(3): 1–40.
- [11] 郝石生, 林玉祥, 王子文. 油气地球化学勘探方法与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1–172.
- Hao Shisheng, Lin Yuxiang, Wang Ziwen. Geochemical technologies and applications in oil and gas exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1–172.
- [12] 马立元, 张晓宝, 李剑, 等. 地层条件下天然气扩散过程中地球化学组分变化的模拟实验研究 [J]. 石油实验地质, 1999, 20(1): 65–68.
- Ma Liyuan, Zhang Xiaobao, Li Jian, et al. Experimental investigation on variation of geochemical compositions of natural gas during diffusion under stratigraphic condition [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1999, 20(1): 65–68.
- [13] 林壬子. 轻烃技术在油气勘探中的应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 39–403.
- Lin Renzi. Light hydrocarbons techniques & its application in oil & gas exploration [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 39–403.
- [14] 肖伟, 鲍征宇, 黎华, 等. 烃类物质微渗漏机制及垂向运移的数值模拟 [J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(1): 29–32.
- Xiao Wei, Bao Zhengyu, Li Hua, et al. Hydrocarbon microseepage mechanism and numerical simulation of vertical migration [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(1): 29–32.
- [15] 李广之, 胡斌, 邓天龙, 等. 不同赋存状态轻烃的分析技术及石油地质意义 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 111–116.
- Li Guangzhi, Hu Bin, Deng Tianlong, et al. Analytic techniques and petroleum geological significance of different existing states of light hydrocarbons [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 111–116.
- [16] 李广之. 轻烃地球化学场的形成和特征 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 65–68.
- Li Guangzhi. Formation and characteristics of light hydrocarbon geochemical fields [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 65–68.
- [17] 张彦霞, 李海华, 王保华, 等. 松辽盆地长岭断陷深层天然气输导体系研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(6): 582–586.
- Zhang Yanxia, Li Haihua, Wang Baohua, et al. Characteristics of deep gas transportation in Changling Fault Depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(6): 582–586.
- [18] 刘传虎, 王学忠. 准西车排子地区复杂地质体油气输导体系研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 129–133.
- Liu Chuanhu, Wang Xuezhong. Hydrocarbon migration system in complex geological bodies at Chepaizi area, western Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 129–133.
- [19] 杨帆, 孙准, 赵爽. 川西坳陷回龙地区沙溪庙组成藏条件及主控因素分析 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 569–573.
- Yang Fan, Sun Zhun, Zhao Shuang. Accumulation conditions and controlling factors of Shaximiao Formation, Huilong area, Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(6): 569–573.
- [20] 尹伟, 郑和荣, 胡宗全, 等. 鄂南镇泾地区延长组油气富集主控因素及勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 159–165.
- Yin Wei, Zheng Herong, Hu Zongquan, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation and favorable exploration targets for the Yanchang Formation in Zhenjing area, south Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 159–165.