

川西坳陷三叠系须家河组油气富集与地层压力关系

段正鑫¹, 刘一锋¹, 楼章华¹, 刘忠群²

1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316000;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要:川西坳陷新场构造带的上三叠统须家河组是四川盆地重要的致密砂岩油气勘探开发目的层。为提升勘探开发成效,提出以流体动力学为切入点,从动态角度研究油气运动特征,并结合静态研究成果确定油气分布特征的方法,开展油气富集与地层压力关系研究。该区域发育超压,须三段超压发育程度最高,主要产气层须二段地层压力普遍在60~80 MPa之间;剩余压力最高可达40 MPa,大部分区域的剩余压力梯度在0~3 MPa/km之间,最高可达10 MPa/km。通过动态法油气富集理论和对剩余压力、剩余压力梯度等的相关研究,认为其与断层、流体、油气分布具有重要的关系:剩余压力梯度较高(1~2 MPa/km)的区域能兼顾断层改善流体运移能力和较好储层的优势,有利于长期高产稳产。

关键词:地层压力;剩余压力梯度;油气富集;须家河组;川西坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Correlation between formation pressure and hydrocarbon enrichment in Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

DUAN Zhengxin¹, LIU Yifeng¹, LOU Zhanghua¹, LIU Zhongqun²

1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316000, China;

2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract: The Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang structural belt of the Western Sichuan Depression is an important exploration target for tight sandstone hydrocarbon in the Sichuan Basin. Several studies are carried out in this paper to improve the effectiveness of exploration and development including the characteristics of oil and gas movement with a view of dynamic point combining with fluid dynamics, determine the distribution characteristics of oil and gas in combination with static research results, and study the relationship between hydrocarbon enrichment and formation pressure. Overpressure is developed in the study area, and the degree of overpressure in the third member of Xujiahe Formation is the highest. Whilst the formation pressure of the main gas producing layer, the second member of Xujiahe Formation, is generally between 60–80 MPa with the maximum residual pressure reaches 40 MPa. The residual pressure gradients in most areas distribute between 0–3 MPa/km and up to 10 MPa/km as the highest. According to dynamic hydrocarbon enrichment theory and the relevant research on residual pressure and residual pressure gradient, it is considered that it has an important relationship with faults, fluids, hydrocarbon distribution and production performance. The area with higher residual pressure gradient (1–2 MPa/km) both improves fluid migration capacity and provides favorable reservoir, which is conducive to long-term high-yield and stable production.

Key words: formation pressure; residual pressure gradient; hydrocarbon distribution; Xujiahe Formation; West Sichuan Depression

川西坳陷是四川盆地重要的勘探带,上三叠统须家河组储层致密,储量丰富,但开发程度不高,开发效益不好,寻找天然气富集区,实现有效勘探开发是目前面临的关键难题^[1-3],尤其是如何预测致

密碎屑岩储层气藏高产、稳产的油气富集区十分关键,也是实现致密气商业开发亟需解决的问题。针对这一难题不少学者开展过相关研究,也形成不少认识^[4-5],但主要是基于沉积储层等来对天然气

富集特征开展静态研究。针对这一难题的探索,经过深入研究,提出结合流体动力学从动态角度来研究油气运动特征,结合静态研究成果,确定油气分布特征,以期为实现勘探开发提供新的依据和手段。

四川盆地是我国重要的含油气盆地之一,总面积约为 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。印支运动过后,四川盆地从海相沉积转变为内陆湖盆相沉积,沉积了巨厚的陆相碎屑岩地层;随后,四川运动导致其周缘褶皱形成山脉,盆地内部相对下沉,从而形成了当今盆地的基本雏形^[6-7]。盆地内部分为川西、川中、川南和川东四大构造单元,新场构造带位于川西坳陷中部,其内部呈现中间高、南北低的构造特征(图1a)。上三叠统须家河组与上下地层均为不整合接触,其内部自下而上可划分为须一、须二、须三、须四、须五和须六共6段,其中须六段在川西坳陷绝大部分地区已被剥蚀^[2,5,8-9]。须三段和须五段以厚层黑色页岩、泥岩和夹煤层为主,被视为该区域内陆相油气最重要的烃源岩,同时也可对下伏油气起到封盖作用^[10]。须二段和须四段以厚层砂岩为主,是主要的储层,但储层致密化程度高。

须家河组二段是该区的主要产层,须二段的砂岩厚度可占整个地层的60%以上;须二段上部以致密砂岩为主,孔隙度普遍小于5%,夹少量泥岩,须二段下部主要为砂泥岩互层(图1b)。前期实施的钻井揭示该区地质条件十分复杂,在 100 km^2 的范围内,同样的储层,既有天然气累计产量过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的高产高效井,也有低产井,甚至无产量井。油气的富集高产问题长期困扰该区的开发工作,亟需从地质—地球物理综合预测方面去解决问题。

1 动态法研究油气分布

1.1 理论依据

浮力和异常流体压力是油气运移的主要动力^[11]。在非常规油气储层中,岩石致密导致喉道变细造成毛细管力增大,使得油气运移更加困难,异常压力对烃类流体的运移成藏就显得尤为重要^[12]。此外,异常压力对储层的物性也有一定的改善作用^[13]。四川盆地陆相地层经历了深埋成岩作用,大多已经致密化,但勘探实践表明,其油气资源仍前景十分广阔^[1,14]。盆地内超压广泛发育,超压与致密油气成藏富集的关系越来越受到关注^[15-17]。川西坳陷位于四川前陆盆地的沉积中心,地层总厚度和有效烃源岩厚度都是盆地内的最大值,目前落实的含油气丰度也最大。新场构造带是目前川西坳陷须家河组勘探程度最高的地区,以该地区为例剖析异常压力与致密油气富集的关系对全盆地致密砂岩油气成藏研究都极具参考意义^[3,18]。

含油气盆地超压的主要表征参数包括压力系数、剩余压力和压力梯度。剩余压力是油气运移的根本动力,可以表征流体运移能力的强弱;压力梯度是指单位距离内压力变化量,反映流体运移过程中动力大小的变化幅度。前人通过剩余压力和剩余压力梯度研究来建立其与油气藏的关系,且在一些研究区中取得了较好的应用效果^[19-21],但在非常规油气储层中,剩余压力和剩余压力梯度与油气藏分布的相关性尚不明确。本文以超压发育的川西坳陷新场构造带须家河组为例,探讨了油气运移动力条件变化对致密油气成藏富集的影响。

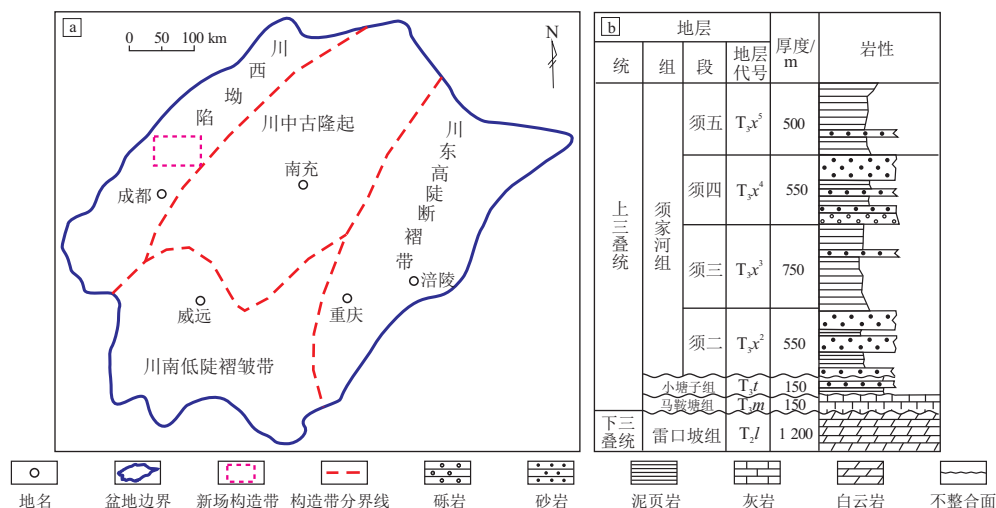


图1 川西坳陷新场构造带位置及其地层岩性

Fig.1 Location and stratigraphic lithology of Xinchang structural belt in West Sichuan Depression

1.2 主要研究方法

本研究通过实测地层压力、剩余压力与计算的剩余压力梯度获得压力分布特征,分析其与剩余油气分布、储层特征和生产动态间的相互关系,弥补该区域相关研究的空白。研究区钻井较多,压力数据丰富,为实测地层压力分析提供了数据基础。以钻孔实测压力数据为主,钻井液数据为补充开展现今压力场分析,并对实测压力数据和钻井液数据进行了仔细筛选,剔除了非稳态测压数据和明显过高的钻井液数据。

剩余压力是地层压力与静水压力的差值,能够排除构造差异对地层压力的影响,更为直观地反映平面分布规律。本研究中的剩余压力分布是在实测地层压力的基础上,根据各井位的构造深度获得静水压力,进而得到剩余压力的分布趋势。

剩余压力梯度是反映某一方向在单位距离内剩余压力的变化程度。在剩余压力的等值线图,以超压中心为起点、剩余压力零点为终点计算剩余压力梯度;在非均匀变化区间,也可以通过分段取值计算^[19-20],其计算公式为:

$$G_p = \Delta P / L \quad (1)$$

式中: G_p 为剩余压力梯度,MPa/km; ΔP 为剩余压力变化值,MPa; L 为取值点之间的距离,km。

具体而言,由于在研究区须二段整体发育超压,剩余压力值均较高,少有剩余压力的零点,因此,本研究使用分段取值计算。首先通过坐标计算两处井位间在某一方向上的空间距离,再计算实测的两点间的剩余压力变化值,结果相除即可获得两

点间剩余压力梯度,然后对该方向上的其他井之间重复上述计算流程,最后可获得某一方向上连续的剩余压力梯度的剖面。

2 地层压力、剩余压力与剩余压力梯度特征

2.1 地层压力

须家河组整体发育超压,新场构造带超压始于上侏罗统蓬莱镇组(埋深约 1 200 m),中一下侏罗统和上三叠统须家河组中发育强超压,其中须三段(埋深约 3 800~4 500 m)异常压力最高,须二段相较于须三段超压明显降低(图 2)。既有勘探实践表明新场构造带须二段的油气最为富集、开发程度最高,也积累了较多的钻井地质和天然气生产动态资料。因此,本次研究选择须二段进行流体场与致密油气成藏关系的研究。

新场构造带须二段现今地层压力主要在 60~80 MPa 之间,呈现两侧高、中间低的分布特征,中间低超压带存在 X851 井区和 L150 井区两个相对高压区。该区域东北的 C561 井和西南的 C565 井区地层压力都超过了 85 MPa,东南的 C140 井地层压力最低,仅为 53 MPa(图 3)。新场构造带须二段中的高产井主要分布在北西走向的中间相对低压区域,两侧强超压区井产量均较低。

2.2 剩余压力特征

新场构造带须二段剩余压力与地层压力的分布特征相似,也呈现两侧较高、中间较低。剩余压力值分布在 25~35 MPa 之间,占总体的 80% 以上。

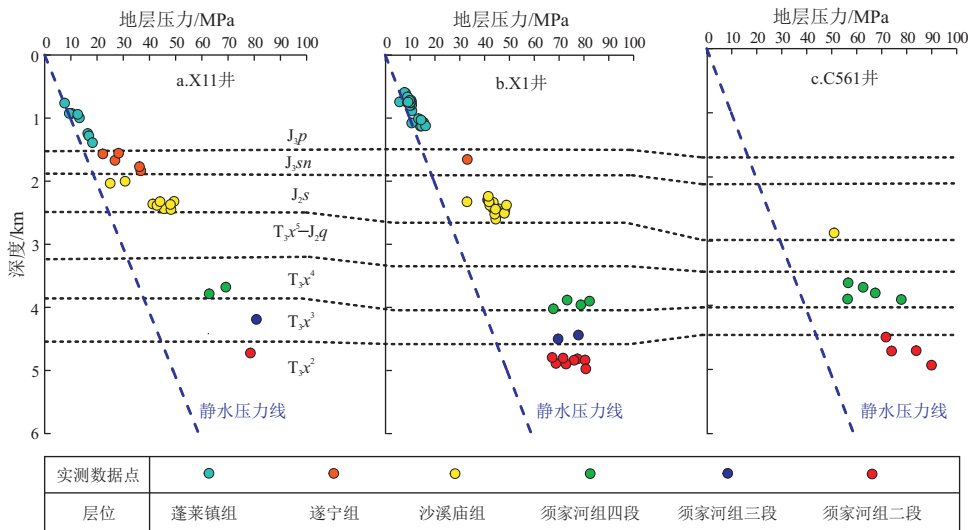


图 2 川西坳陷新场构造带井区地层压力垂向分布

Fig.2 Vertical distribution of formation pressure in well zones, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

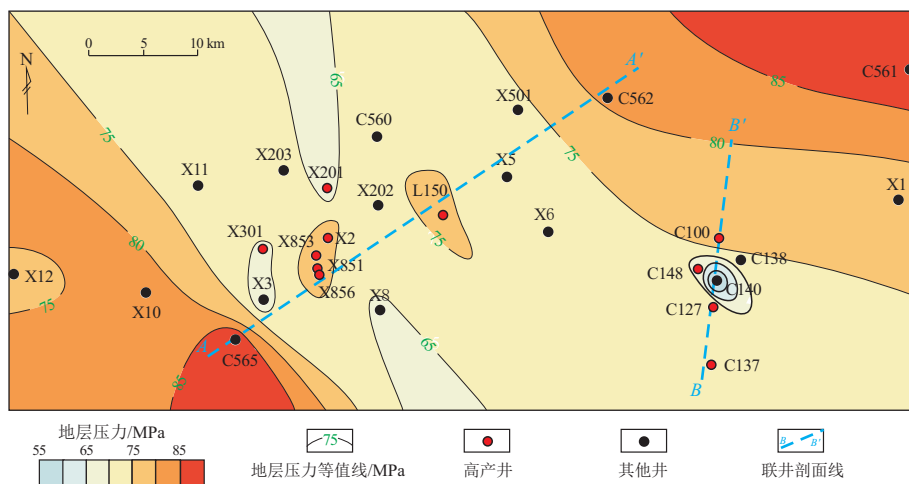


图 3 川西坳陷新场构造带上三叠统须家河组二段地层压力平面分布

Fig.3 Plane distribution of formation pressure in second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

C561 井剩余压力可达 40 MPa, C565 井剩余压力为 35 MPa。剩余压力的分布明显受到断层的控制, C561 井附近无断层发育, 超压保存能力好; C565 井周围只发育层内的三级断层和连通须三段的二级断层, 这些断层并没有破坏地层的保存条件, 从而产生明显的压力降低。C140 井剩余压力为全区最低, 仅有 10 MPa。在川合井区发育一条连通多个层位的一级断层, 这是重要的流体泄压通道, 从而导致了周围流体的散失和压力的大幅下降(图 4)。

2.3 剩余压力梯度特征

本文中选取了 AA' 和 BB' 两条剖面为例分析须二段气藏剩余压力梯度与油气分布的关系。在 AA' 剖面中, 存在两个高剩余压力梯度中心, 其最高值为 5 MPa/km, 在 X3 井附近; 次高值为 3.5 MPa/km, 位

于 X851 井区, 其发育的二级断层连通了须三段。剩余压力的驱动方向在剖面左侧是自西向东, 在剖面右侧是自东向西。高产井区的剩余压力梯度为 1~2 MPa/km, 且距离高剩余压力梯度的区域不远, 其中产量最高的 X851 井/X2 井位于两个高剩余压力梯度中心之间的低剩余压力梯度区域。低产井区往往远离剩余压力梯度高值区, 或位于高剩余压力梯度区域(图 5a)。

在 BB' 剖面中, 剩余压力梯度与产量的关系更为直观明显。该剖面中, 剩余压力梯度的高值区域在 C140 井附近, 剩余压力梯度可达 10 MPa/km, 也是研究区内剩余压力梯度的最高值区域, 其他井区的剩余压力梯度均为 1~2.5 MPa/km; 剩余压力的驱动方向是自北向南。此外, C140 井不仅是 BB' 剖面中剩余压力梯度的极高值区域, 也是唯一

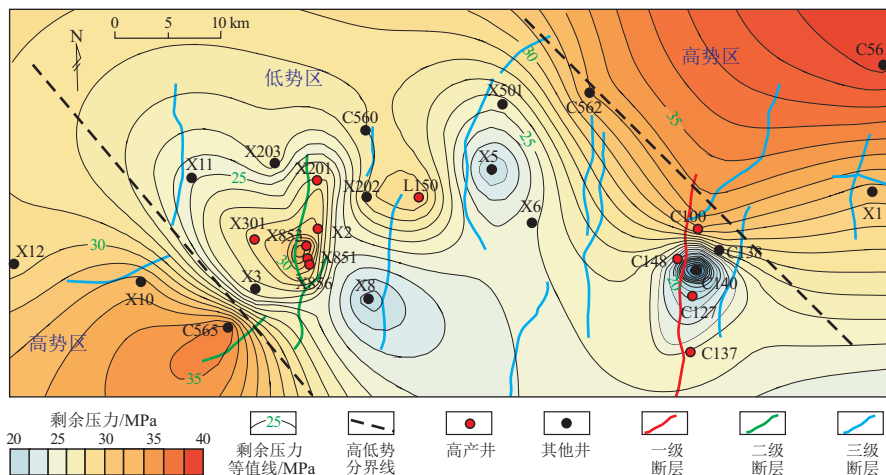


图 4 川西坳陷新场构造带须二段剩余压力平面分布

Fig.4 Plane distribution of residual pressure in second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

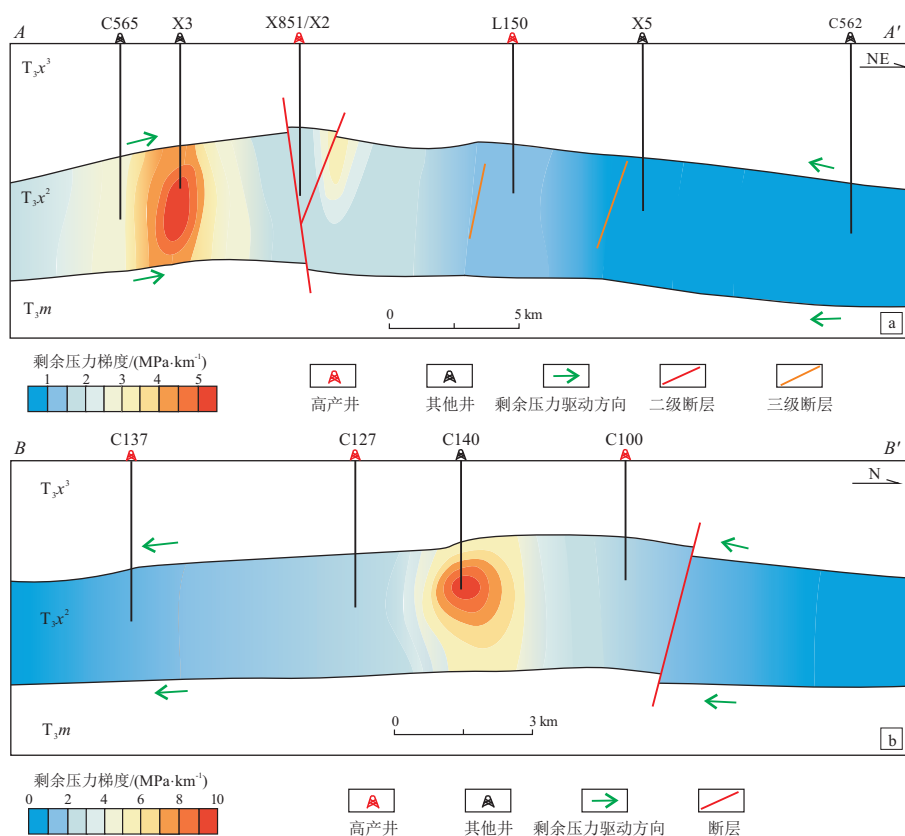


图 5 川西坳陷上三叠统须家河组二段联井剖面剩余压力梯度
剖面位置见图 3。

Fig.5 Residual pressure gradients of well connection sections of second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

的非高产气井,其他井均为高产井(图 5b)。

3 剩余压力梯度与油气富集的关系

剩余压力梯度反映剩余压力变化的快慢,在不同的地质条件下,其对油气分布的影响可能存在差异。本节从断层作用、流体作用方面解释影响剩余压力梯度强弱的关键因素,结合实际生产数据,探讨剩余压力梯度与油气富集、动态生产间的关系。

3.1 断层作用

断层是重要的泄压通道,流体能够沿断层快速运移,并直接影响地层压力的大小^[23-24]。有学者认为在构造油气藏中,受到断层的封堵作用,高剩余压力梯度区域常常出现在断层附近^[19,22]。新场构造带须家河组受多期构造活动和青藏高原挤压隆升的影响,断层发育较多,存在连通地表的一级断层、须家河组内部的二级断层和须二段内部的三级断层^[16,25]。

在新场构造带区域,一级断层连通地表并穿过多套压力系统,会导致这类断层连通的附近区域压力降低,如 C140 井明显的压力下降(图 4),进而在断层周围出现高的压力梯度。二级断层连通须家

河组的各段层位,由于须家河组整体均发育超压,当上下层位间压差较小时,连通后不会产生明显的压力变化,如 X2 井和 C565 井附近。位于须二段弱超压区的二级断层连通了须三段强超压,导致断层附近的地层压力上升,进而剩余压力梯度升高,如 X3 井(图 4)。须二段层内压力变化较小,其内部的三级断层对压力的影响作用较小,与剩余压力梯度的相关性较弱。

3.2 与储层和流体的关系

流体作用较为剧烈的区域,易形成溶蚀孔。溶蚀作用对改善致密储层的物性有着重要的意义^[26-27]。地层水矿化度的高低是反映流体活跃程度的重要指标,高矿化度区域水—岩反应强度往往较大^[28-30],但在不同的剩余压力梯度下的流体作用可能存在差异。

新场构造带矿化度数据较为丰富,须二段的矿化度范围为 67~117 g/L^[31]。X2 井区孔隙度较发育,最高可达 12%,平均孔隙度为 4.9%(图 6a)。X2 井区优质储层与微裂缝—溶蚀孔隙密切相关,其剩余压力梯度为 1.6 MPa/km,地层水矿化度可达 110 g/L^[31]。X3 井须二段孔隙度最高值仅为

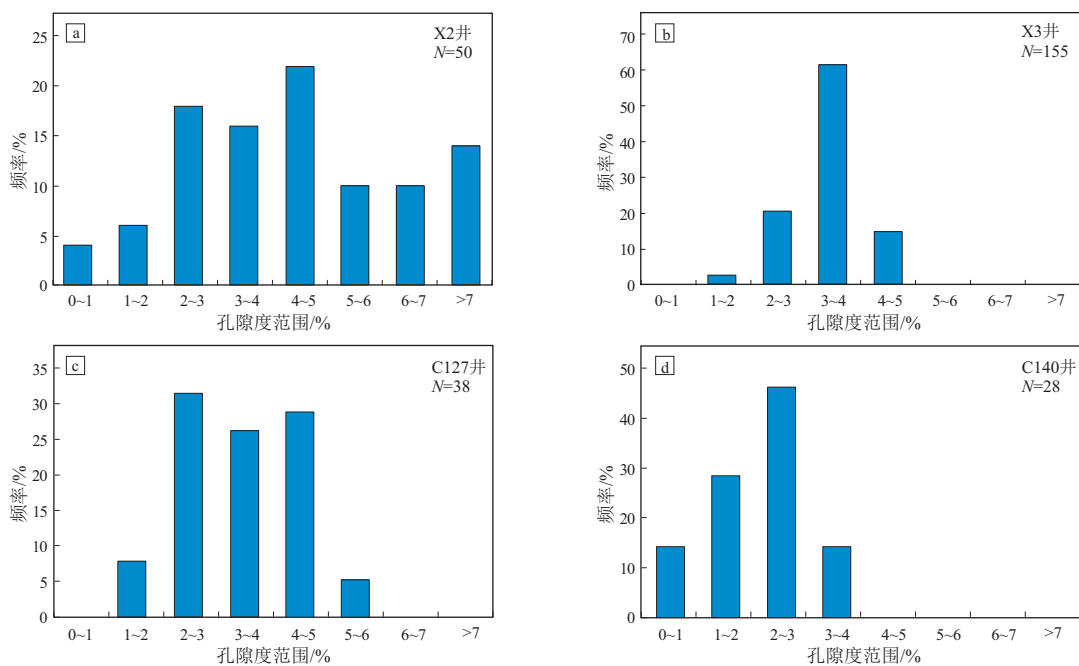


图 6 川西坳陷上三叠统须家河组二段孔隙度频率分布

Fig.6 Porosity frequency distribution of second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

4.4%, 平均孔隙度为 3.2% (图 6b), 溶蚀孔隙不发育, 剩余压力梯度可达 5 MPa/km。

C140 井为剩余压力梯度最高的区域, 剩余压力梯度值高达 10 MPa/km, 平均孔隙度为 2.1%, 最高为 3.8% (图 6c)。C140 井须二段压实和胶结作用强烈, 几乎没有溶蚀孔, 矿化度为 76 g/L^[31]。其附近的 C127 井的剩余压力梯度为 1.8 MPa/km, 平均孔隙度为 3.4%, 最高 5.8% (图 6d), 矿化度高于 C140 井, 可达 88 g/L^[31]。

过高的剩余压力梯度可能是由于较差的孔隙条件导致的, 高剩余压力梯度的井区普遍出现平均孔隙度较低, 孔隙度范围较小, 最大孔隙度低的特征 (图 7)。具体而言, C140 井和 X3 井的剩余压力值均远低于周围井区, 较差的孔隙条件导致流体更难流动, 从而剩余压力梯度增大。剩余压力梯度在 1~2.5 MPa/km 之间的井区, 具有平均孔隙度较高, 孔隙度范围广的特征 (图 7)。溶蚀孔隙发育, 水-岩反应较强, 矿化度相对较高, 孔渗条件较好, 是该剩余压力梯度区间天然气高产的重要原因。剩余压力梯度低于 1 MPa/km 的区域, 压力对流体运移的驱动效果很弱, 压力与孔隙发育的相关性低。

3.3 与油气分布的关系

在低孔低渗的致密储层中, 流体运移较为困难, 目前针对新场构造带须二段天然气成藏研究大多是围绕断层展开, 不少学者提出断层控制了天然

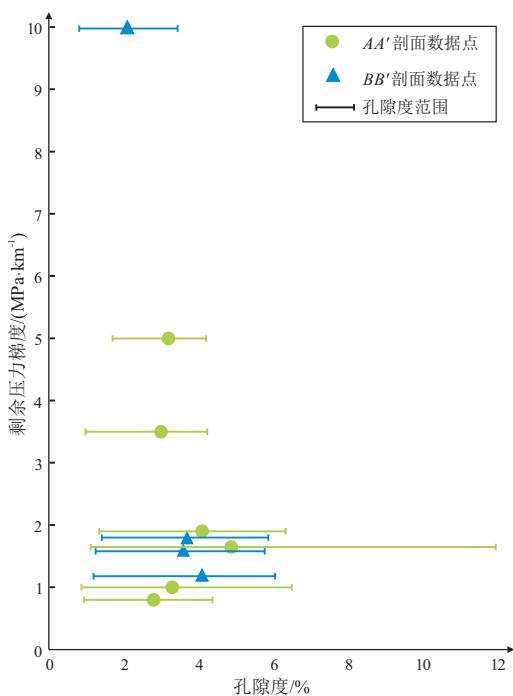


图 7 川西坳陷上三叠统须家河组二段孔隙度与剩余压力梯度关系

Fig.7 Relationship between porosity and residual pressure gradient of second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

气的富集^[5,32]。但是仍存在许多有断层发育却也无法高产的区域。在剩余压力分布图中, 流体势场受西南向和东北向的高剩余压力控制, 流体从两侧向中间区域运移富集, 进而高产井主要分布于中

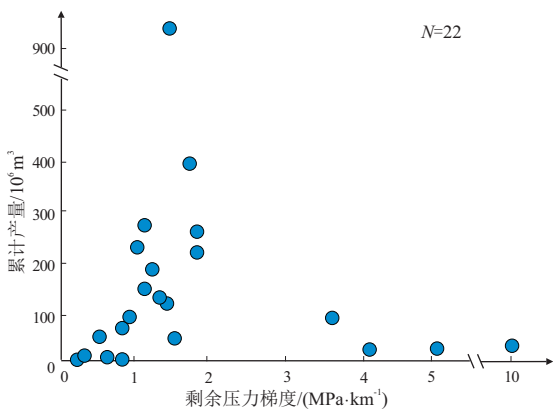


图 8 川西坳陷上三叠统须家河组二段
剩余压力梯度与累积产量关系

Fig.8 Relationship between residual pressure gradient and cumulative production of second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, West Sichuan Depression

间剩余压力相对较低的区域(图 5)。剩余压力发育的强弱差异决定了基本的油气分布趋势,但是有利区中仍有不少低产井,排除储层等造成的部分油气低产井,仅靠剩余压力对更小范围的油气富集区的确定比较困难。此外,新场构造带须二段的累积产量与剩余压力梯度具有较明显的关系,高产井的剩余流体压力梯度基本在 1~2 MPa/km 之间,剩余压力梯度过高(大于 3.5 MPa/km)和过低(小于 1 MPa/km)的地区天然气产量均不太理想(图 8)。

5 结论

(1)川西坳陷新场构造带在侏罗系—上三叠统陆相地层整体发育超压,其中须家河组超压最为明显。新场构造带的主要产气层须二段的地质压力和剩余压力平面分布总体呈现出中间较低,两侧较高的特征,但剩余压力受构造的影响,分布特征更为复杂。

(2)不同级次的断层在致密储层中具有不同的作用,跨层位的一级断层能够促进流体运移,有助于压力的释放,压力变化导致高的剩余压力梯度;二级断层若连通压力差异较大的层位,也可能产生较高的剩余压力梯度;层内三级断层有助于改善致密储层物性,与剩余压力梯度的相关性不高。

(3)完善了新场构造带的须二段断层控制的动态成藏体系和油气富集规律认识,剩余压力梯度能够反映剩余压力变化的程度。须二段的剩余压力梯度存在多个高值中心,最高可达 10 MPa/km,大部分区域的剩余压力梯度为 0~3 MPa/km。在储层条件较好,且剩余压力梯度较高(1~2 MPa/km)的区域,具有较好的油气运移能力和聚集能力,有

利于油气富集以及持续的产出。剩余压力梯度大于 3.5 MPa/km 和低于 1 MPa/km 的区域会分别受制于储层物性与运移动力,不利于油气富集。从压力与油气富集的角度为以后勘探开发部署提供了重要依据。

致谢:感谢中国石化石油勘探开发研究院四川中心和中国石化西南石油局为本项研究提供的地质资料和相关帮助。

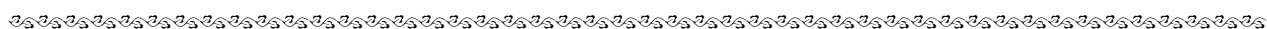
参考文献:

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 段文燊.四川盆地中侏罗统下沙溪庙组致密气勘探潜力及有利方向[J].石油实验地质,2021,43(3):424-431.
DUAN Wenshen. Exploration potential and favorable direction of tight gas in Middle Jurassic Xiashaximiao Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 424-431.
- [3] 郑和荣,刘忠群,徐士林,等.四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2021,42(4):765-783.
ZHENG Herong, LIU Zhongqun, XU Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, SINOPEC exploration areas, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 765-783.
- [4] 刘忠群,徐士林,刘君龙,等.四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J].天然气工业,2020,40(2):31-40.
LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 31-40.
- [5] 刘君龙,刘忠群,肖开华,等.四川盆地新场地区三叠系须家河组二段致密砂岩有利岩石相表征及油气地质意义[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1111-1121.
LIU Junlong, LIU Zhongqun, XIAO Kaihua, et al. Characterization of favorable lithofacies in tight sandstone reservoirs and its significance for gas exploration and exploitation: a case study of the 2nd member of Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1111-1121.
- [6] 李智武,刘树根,林杰,等.川西坳陷构造格局及其成因机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):645-653.
LI Zhiwu, LIU Shugen, LIN Jie, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan Depression in China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 645-653.
- [7] LIU Shugen, YANG Yu, DENG Bin, et al. Tectonic evolution of

- the Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 213: 103470.
- [8] 刘殊,任兴国,姚声贤,等.四川盆地上三叠统须家河组气藏分布与构造体系的关系[J].*天然气工业*, 2018, 38(11): 1-14.
LIU Shu, REN Xingguo, YAO Shengxian, et al. Relationship between gas reservoir distribution and structural system of Upper Triassic Xujiahe Fm in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(11): 1-14.
- [9] LI Mengyao, ZHU Rong, LOU Zhonghua, et al. Diagenesis and its impact on the reservoir quality of the fourth member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 485-498.
- [10] YANG Peng, ZHANG Likuan, LIU Keyu, et al. Diagenetic history and reservoir evolution of tight sandstones in the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation, western Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108451.
- [11] 郝芳,邹华耀,方勇,等.断—压双控流体流动与油气幕式快速成藏[J].*石油学报*, 2004, 25(6): 38-43.
HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yang, et al. Overpressure—fault controlled fluid flow and episodic hydrocarbon accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 38-43.
- [12] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].*石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- [13] 李明诚,李剑.“动力圈闭”:低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J].*石油学报*, 2010, 31(5): 718-722.
LI Mingcheng, LI Jian. “Dynamic trap”: a main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 718-722.
- [14] 吴小奇,周小进,陈迎宾,等.四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩分子地球化学特征[J].*石油实验地质*, 2022, 44(5): 854-865.
WU Xiaoqi, ZHOU Xiaojin, CHEN Yingbin, et al. Molecular characteristics of source rocks in Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 854-865.
- [15] 王志宏,郝翠果,李建明,等.川西前陆盆地超压分布及成因机制[J].*岩性油气藏*, 2019, 31(6): 36-43.
WANG Zhihong, HAO Cuiguo, LI Jianming, et al. Distribution and genetic mechanism of overpressure in western Sichuan foreland basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(6): 36-43.
- [16] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等.川西坳陷中段陆相地层压力演化及其成藏意义[J].*石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 426-433.
GUO Yingchun, PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, et al. Evolution of continental formation pressure in the middle part of the Western Sichuan Depression and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 426-433.
- [17] 王震亮,李耀华,张健.川西地区上三叠统异常流体压力的主要形成机制[J].*石油与天然气地质*, 2007, 28(1): 43-50.
WANG Zhengliang, LI Yaohua, ZHANG Jian. Analysis on main formation mechanisms of abnormal fluid pressure in the Upper Triassic, west Sichuan area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(1): 43-50.
- [18] 裴森奇,李跃纲,张本健,等.川西地区上三叠统天然气成藏主控因素及勘探方向[J].*天然气工业*, 2012, 32(10): 6-9.
PEI Senqi, LI Yuegang, ZHANG Benjian, et al. Major controlling factors of gas pooling and exploration directions in the Upper Triassic in the western Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(10): 6-9.
- [19] 刘华,李君,冯月琳,等.渤海湾盆地渤南洼陷沙河街组三段剩余压力梯度与油气分布关系[J].*石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 1083-1091.
LIU Hua, LI Jun, FENG Yuelin, et al. Relationship between excess pressure gradient and hydrocarbon distribution in the 3rd member of Shahejie Formation in Bonan Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 1083-1091.
- [20] 冯月琳,刘华,宋国奇,等.平面压降梯度计算原则及其应用[J].*石油实验地质*, 2019, 41(4): 598-605.
FENG Yuelin, LIU Hua, SONG Guoqi, et al. Calculation and application of plane pressure decrease gradient [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 598-605.
- [21] 孙明亮,柳广弟,李剑.超压盆地内剩余压力梯度与天然气成藏的关系[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 19-22.
SUN Mingliang, LIU Guangdi, LI Jian. Relationship between excess-pressure gradient and gas accumulation in overpressured basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(3): 19-22.
- [22] WANG Qiaochu, CHEN Dongxia, WANG Fuwei, et al. Attenuating gradient of residual stratigraphic pressure and its controls on hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 108062.
- [23] HAO Fang, ZHU Weilin, ZOU Huayao, et al. Factors controlling petroleum accumulation and leakage in overpressured reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(5): 831-858.
- [24] XU Shang, HAO Fang, XU Changgui, et al. Hydrocarbon migration and accumulation in the northwestern Bozhong subbasin, Bohai Bay Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 477-488.
- [25] XIE Runcheng, ZHOU Wen, XIANG Mingliang, et al. Development mode of reverse fault-associated fractures in deep tight sandstones; a case study in Xinchang Gas Field, Sichuan Basin, China [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(6): 2997-3011.
- [26] 杨威,谢武仁,俞凌杰,等.四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩溶蚀实验及地质意义[J].*石油实验地质*, 2021, 43(4): 655-663.
YANG Wei, XIE Wuren, YU Lingjie, et al. Dissolution experiments and geological implications of tight sandstones in the Xujiahe Formation of Upper Triassic, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 655-663.

- ZHENG Guodong, MENG Qingtao, LIU Zhaojun. Geochemical characteristics and paleolimnological information of oil shale in 1st member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2):392-404.
- [31] 贾建亮, 刘招君, BECHTEL A, 等. 松辽盆地嫩江组油页岩发育控制因素[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(2):174-186.
- JIA Jianliang, LIU Zhaojun, BECHTEL A, et al. Major factors controlling formation of oil shale in Nenjiang Formation of Songliao Basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(2):174-186.
- [32] 拜文华, 吴彦斌, 高智梁, 等. 浅湖—半深湖相湖湾环境油页岩成矿富集机理研究[J]. 地质调查与研究, 2010, 33(3):207-214.
- BAI Wenhua, WU Yanbin, GAO Zhiliang, et al. Study on the mechanism of oil shale minerogenetic enrichment in the arm of shallow to half-deep lake depositional environment[J]. Geological Survey and Research, 2010, 33(3):207-214.
- [33] 刘全有, 李鹏, 金之钧, 等. 湖相泥页岩层系富有机质形成与烃类富集: 以长 7 为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(2):270-290.
- LIU Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrine shale strata: a case study of Chang 7 Member[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(1):118-138.
- [34] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3):524-534.
- ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3):524-534.
- [35] 刘伟新, 朱晓军, 马安林, 等. 不同泥岩相有机质赋存特征及对对比面积的影响: 以渤海湾盆地沾化凹陷古近系为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2):204-210.
- LIU Weixin, ZHU Xiaojun, MA Anlin, et al. Occurrence of organic matter in different mudstone lithofacies and its influence on specific surface area: a case study of the Paleogene in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2):204-210.

(编辑 黄娟)



(上接第 79 页)

- [27] 祝海华, 钟大康, 张亚雄, 等. 川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1):65-76.
- ZHU Haihua, ZHONG Dakang, ZHANG Yaxiong, et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):65-76.
- [28] 康保平, 黄小燕, 郭淑萍, 等. 川西坳陷须二气藏气田水成因、运移及其成藏演化[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2):309-317.
- KANG Baoping, HUANG Xiaoyan, GUO Shuping, et al. Origin, migration, and accumulation evolution of reservoir water in the gas field with Xu 2 gas reservoir, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2):309-317.
- [29] 叶素娟, 朱宏权, 李嵘, 等. 天然气运移有机—无机地球化学示踪指标: 以四川盆地川西坳陷侏罗系气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4):549-560.
- YE Sujuan, ZHU Hongquan, LI Rong, et al. Tracing natural gas migration by integrating organic and inorganic geochemical data: a case study of the Jurassic gas fields in western Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4):549-560.
- [30] 楼章华, 朱蓉, 金爱民, 等. 沉积盆地地下水与油气成藏—保存关系[J]. 地质学报, 2009, 83(8):1188-1194.
- LOU Zhanghua, ZHU Rong, JIN Aimin, et al. Relationship between groundwater and hydrocarbon accumulation—preservation in sedimentary basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8):1188-1194.
- [31] 楼章华, 苏一哲, 朱蓉, 等. 四川盆地新场构造带上三叠统须家河组二段地层水化学动态特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4):841-851.
- LOU Zhanghua, SU Yizhe, ZHU Rong, et al. Dynamic chemical characteristics and origin of formation water in the second member of Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4):841-851.
- [32] 张世华, 田军, 叶素娟, 等. 断层输导型天然气成藏模式的动态成藏过程: 以川西坳陷新场构造带上三叠统须二段气藏为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(7):49-56.
- ZHANG Shihua, TIAN Jun, YE Sujuan, et al. Dynamic accumulation process of fault-translocation natural gas accumulation model: a case study on the gas reservoir of the second member of Upper Triassic Xujiahe Fm in the Xinchang structural zone of the Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7):49-56.

(编辑 黄娟)