

鄂尔多斯盆地北缘石炭系-二叠系大型气田形成条件

郝蜀民,李良,张威,齐荣,马超,陈敬轶

(中国石化 华北油气分公司,河南 郑州 450006)

摘要:鄂尔多斯盆地北部边缘杭锦旗地区的天然气勘探经历了 40 年的历史。近 10 年来,通过在该区进行系统的天然气成藏条件调查与研究,建立了以大型岩性圈闭为主要评价目标的勘探思路,并通过展开勘探取得重大突破,在石炭系-二叠系致密低渗碎屑岩含气层系获得地质储量已超 $7\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。综合研究认为,发育在石炭系-二叠系下部海-陆过渡层序中的层状“广布式”近源成藏系统是该区大型气田形成的基本条件。该成藏系统具有大型化的成藏要素:大面积分布的上石炭统煤系源岩、大面积下二叠统河道砂岩储集体、大面积源-储近源配置关系、早白垩世大范围的生烃充注过程及上二叠统大面积区域封盖层。大面积含气、低丰度储量及以岩性气藏为主是杭锦旗地区上古生界气藏的一大特征。在储层普遍致密低渗背景下,寻找富集高产区带、实现有效勘探开发将是面临的挑战。

关键词:成藏要素;近源成藏;大型气田;杭锦旗地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin

Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, Qi Rong, Ma Chao, Chen Jingyi

(SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The Hangjinqi area in the northern margin of the Ordos Basin has been explored for natural gas for about 40 years. However, it wasn't until a decade ago that a systematic investigation of gas reservoiring conditions in this area has been initiated. As a result, exploration breakthrough had been made here after aiming at the large-scale lithological traps. The Permo-carboniferous tight elastic rocks were found to contain more than 700 billion m^3 of gas-in-place. A comprehensive study shows that large-scale gas fields in the area were mostly formed within the pervasive near-source layered petroleum system in the transitional sequences at the lower Permo-Carboniferous. This petroleum system has widely-distributed coal-measure source rocks in the Upper Carboniferous, huge Lower Permian channel sandstone reservoirs, short distance between the source and the reservoirs, massive hydrocarbon generation and charging during the Early Cretaceous and large area of Upper Permian cap rocks. The Upper Paleozoic gas reservoirs in the area feature in lithological traps, large gas-bearing area and low abundance of reserves. As newly found reservoirs are mostly tight and low-permeability, how to locate sweet spots to realize a highly effective gas discovery is a challenge for all those engaging in petroleum industry.

Key words: reservoiring factor, near-source accumulation, large gas field, Hangjinqi area, Ordos Basin

我国致密砂岩气藏及其资源量主要分布在鄂尔多斯盆地石炭系和二叠系、四川盆地西部上三叠统须家河组及准噶尔盆地二叠系佳木河组等,其主要成藏规律是近源大面积连续(准连续)成藏,资源呈中、低丰度特征^[1-5]。一是在大面积生气中心覆盖发育大面积多层砂岩储集体,形成同层或大面积近源有利配置,天然气主要依靠源、储压力差可以高效进入储层。二是气藏类型以岩性气藏为主,众多岩性气藏在空间上的

叠合连片呈大面积含气特点。三是大面积发育的异常压力封存箱^[6-7],形成高效的保存系统,加之储集体非均质性强,天然气成藏后难以大规模调整。

鄂尔多斯盆地北缘的伊盟隆起区早在 20 世纪 70 年代就已钻探产出过天然气,是鄂尔多斯盆地古生界最早经勘探发现天然气的地区^[8-11],由于地处盆地上古生界大型生气中心的边缘,加之早期的一些探井产水,许多研究对该区的资源潜力并不看好,有过“小构

造控气”、“水区”等认识^[12-13]。30多年来,中国石化华北分公司对该区坚持探索,投入大量勘探工作,对该地区天然气资源潜力和成藏条件的研究从未停止。

近年来随着认识程度的提高,以大型岩性圈闭为主要勘探目标的思路取得巨大成功,在该区已获得地质储量超 $7\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,一个大型气田已经展现。

本文所指鄂尔多斯盆地北缘包含了伊陕斜坡北缘和伊盟北部隆起大部,简称杭锦旗地区,研究区面积近 $10\,000 \text{ km}^2$ 。笔者对研究区成藏条件进行了系统分析,认为鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系下部海-陆过渡层序中的层状“广布式”近源成藏系统在研究区有面积分布,是该区大型气田形成的基本条件。该成藏系统具有大型化的成藏要素:大面积分布的煤系源岩、大面积河道致密砂岩储集体、大面积源-储近源配置、大面积同期生烃充注过程及大面积区域封盖条件。

1 气源岩分布与资源量测算

1.1 气源岩分布

石炭系-二叠系下部构成“近源”成藏组合(图1),天然气来源于其层序底部的煤和暗色泥岩,主要烃源岩太原组-山西组煤层厚 $5 \sim 20 \text{ m}$,全区整体进入有机质的成熟-高成熟阶段。

伊盟北部隆起自早古生代以来为继承性隆起。受泊尔江海子-乌兰吉林庙-三眼井断裂带的控制,太原组-山西组煤层主要分布于断裂带以南(图2),总体为南厚北薄、东厚西薄。在伊盟隆起区烃源岩发育程度较差,部分地区缺失。

研究区上古生界碳质泥岩和暗色泥岩26个样品有机碳含量最大值为23.24%,最小值为0.07%,平均值为3.01%;氯仿沥青“A”含量最大值为0.1954%,最小值为0.0015%,平均值为0.0301%。参照“陆相烃源岩地球化学评价方法”(SY/T 5735—1995)烃源岩有机质丰度评价指标,本区的泥岩类样品总体属中等-好烃源岩。相对地,断裂带以南样品有机质丰度高于断裂带以北,碳质泥岩好于暗色泥岩,太原组-山西组下部样品好于下石盒子组样品。

太原组-山西组31个煤岩样品有机碳含量平均值为56.92%,氯仿沥青“A”含量最大值为2.3830%,最小值为0.3900%,平均值为0.8477%。研究区中、东部13个煤岩样品镜质体反射率测试值在1.07%~1.35%,表明有机质热演化进入成熟-高成熟阶段,推测西部新召区带有机质热演化程度整体达到高成熟阶段。总体上,研究区石炭系-二叠系源岩有机质热演化程度由北东向南西增大,与现今构造面貌一致。

选择研究区东部的锦6井上古生界碳质泥岩和煤

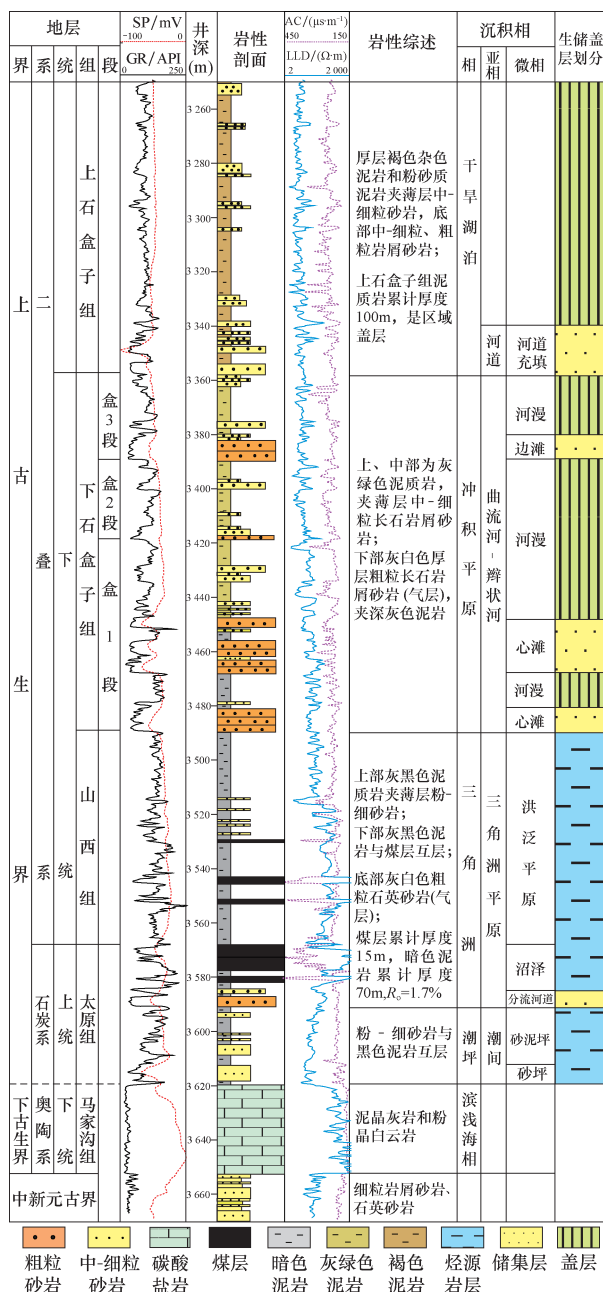


图1 杭锦旗地区石炭系-二叠系综合柱状图

Fig.1 Generalized columnar section of Permo-Carboniferous in Hangjinqi area

样进行了热模拟试验,得到了样品烃产率曲线。在 $350 \sim 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,源岩以生气为主,煤岩产烃率为 113 kg/t ,碳质泥岩产烃率为 71 kg/t ,显然煤岩比泥岩生烃量大。

1.2 资源量测算

采用成因法计算杭锦旗地区上古生界烃源岩现今累计生气量为 $19.462 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。从生气强度分布看呈南好北差:断裂带以南总体为 $(15 \sim 30) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$;杭锦旗断阶东部的什股壕区带为 $0 \sim 10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$;乌兰吉林庙和三眼井断裂以北的公卡汉凸起由于缺少资料,推测生气强度仅在断裂附近能够达到 $(5 \sim 10) \times$

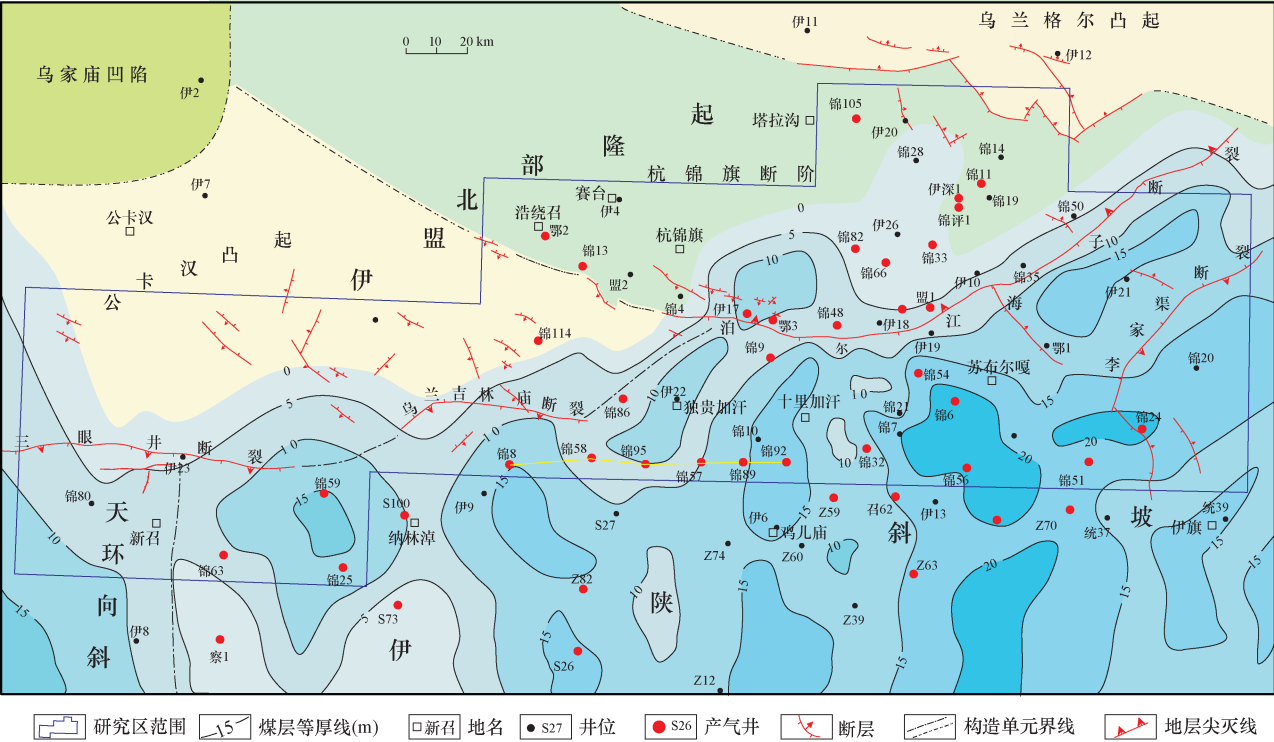


图2 鄂尔多斯盆地北缘构造区划及石炭系-二叠系煤层厚度分布

Fig.2 Tectonic division and isopach of the Permo-Carboniferous coalbeds in the north margin of the Ordos Basin

$10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$;而远离断裂的北部由于源岩不发育,地层没有生气能力。

考虑到研究区上石盒子组-石千峰组厚层泥质岩封盖层分布面积远大于源岩层的分布,保存条件较好,在计算资源量时主要参考了大牛地气田的生聚系数(0.096)进行类比,以生聚系数0.096计算,资源量乐观值为 $1.878 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。若考虑杭锦旗断阶北部具有散失因素,则取大牛地气田生聚系数的70%进行计算,天然气资源量为 $1.308 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

除成因法计算外,还根据研究区各区带资料和认识程度采用类比法、圈闭法^[14-17]进行了资源量计算,计算杭锦旗地区上古生界天然气资源量为 $13\,645.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1)。断裂带以南地区资源丰度较高,为 $2.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,而断裂以北烃源岩不发育,资源量丰度较低(未考虑天然气向北部隆起带运移的因素),杭锦旗断阶资源丰度为 $(0.45 \sim 1.23) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

2 大面积分布源-储近源配置

杭锦旗地区晚古生代早期经历了太原期潮坪-三角洲、山西期三角洲平原、下石盒子期辫状河等由海向陆转变的过程,到上石盒子期的陆相干旱湖泊沉积,构成一个完整的超长期地层旋回,包含生、储、盖层,是一个完整的成藏系统。在层序的下部形成大面积的自生自储(太原组、山西组下部)和下生上储(山西组上部、下石盒子组)的源-储配置关系(图3)。在总体构造面

表1 杭锦旗地区天然气资源量统计

Table 1 Statistics of gas resource in Hangjinqi area

区带名称	十里加汗	乌兰吉林庙	什股壕	新召	阿镇	浩绕召	总计
面积/ km ²	2 450	275	1 610	1 150	1 305	910	7 700
资源量/ (10 ⁸ m ³)	7 136	339	1 974	2 244	1 539	413	13 645

貌为北东高、西南低的平缓单斜背景下,大面积分布的河道叠置体易形成大型岩性圈闭,往往在纵向上多层叠合(图4)。河道砂体总体为特低渗透、致密储层(表2),非均质性强,造成含气性的差异^[18-20]。

3 大范围同期生烃充注过程

与鄂尔多斯盆地内部相同,研究区烃源岩具有较为统一埋藏成熟史,在早白垩世陆续进入生气高峰期(图5)。

断裂带南部烃源岩在中-晚侏罗世末期开始生气,早白垩世进入生气高峰期,源岩层形成超压,天然气依靠源、储压力差向上覆大面积砂体近距离充注。而断裂带以北杭锦旗断阶东部的什股壕区带烃源岩则在早白垩世中、晚期开始生气。

结合断裂活动期次的研究,杭锦旗地区烃源岩达到生气高峰时,三大断裂皆处于活动期,封闭性较差,以断层和砂体为主构成的输导体系为南部天然气向北

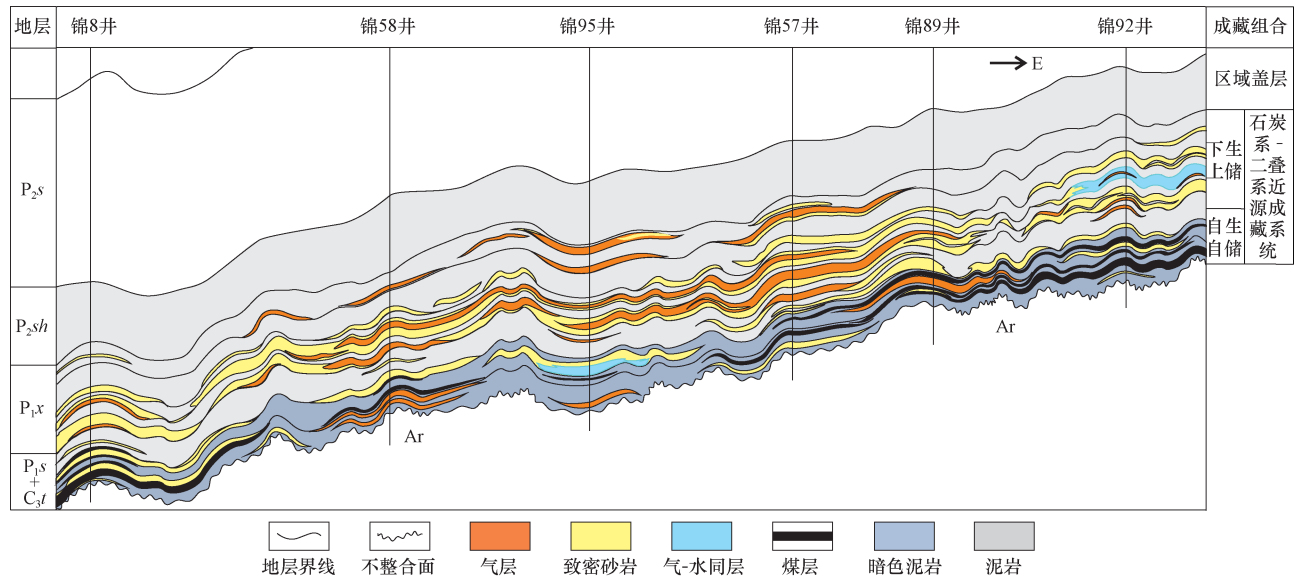


图 3 杭锦旗地区十里加汗区带气藏剖面(剖面位置见图 2)

Fig. 3 Gas reservoir profile in Shilijiahan play, Hangjinqi area

P_{2s}. 石千峰组; P_{2sh}. 上石盒子组; P_{1x}. 下石盒子组; P_{1s}. 山西组; C_{3t}. 太原组; Ar. 太古界

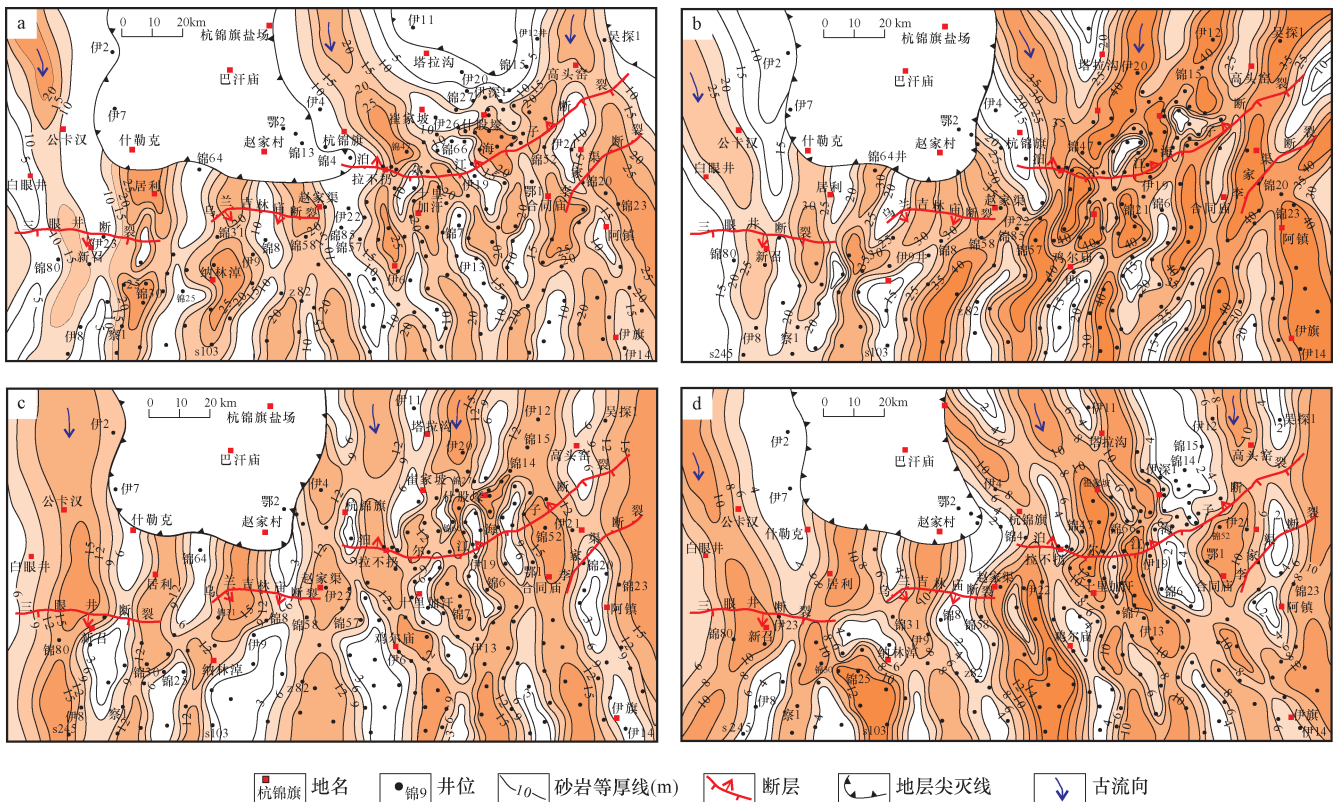


图 4 杭锦旗地区主要含气层段砂岩厚度分布

Fig. 4 Isopach of the main gas-bearing sandstone in Hangjinqi area

a. 山 2 段; b. 盒 1 段; c. 盒 2 段; d. 盒 3 段

部隆起方向运移提供了可能性。

4 良好的区域封盖条件

与盆地内部相似,盆地北缘杭锦旗地区上石盒子组和石千峰组主要为大套内陆干旱湖相泥质岩夹少量

砂岩,泥质岩厚度 130 ~ 160 m,分布广泛而稳定,构成了下伏山西组、下石盒子组天然气藏的区域性盖层,即使有少量高角度断层穿过,并不影响其区域封盖功能。

钻井的泥岩压实趋势研究表明(图 6),上石盒子组普遍发育泥岩“欠压实”带,根据平衡深度法计算其最大剩余地层压力在 5.0 ~ 13.9 MPa;向下进入下石

表2 杭锦旗地区不同区带储层物性统计
Table 2 Physical properties of reservoirs in different blocks in Hangjinqi area

区带	层位	孔隙度	渗透率
		平均值/%	平均值/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
什股壕	盒3段	12.3	1.94
	盒2段	9.8	0.74
	盒1段	11.3	1.36
山西组	山西组	11.5	2.30
	盒1段	8.7	0.60
十里加汗	山西组	8.3	1.39
	盒1段	9.0	0.81
新召	山西组	7.7	1.22
	盒1段	11.9	0.68

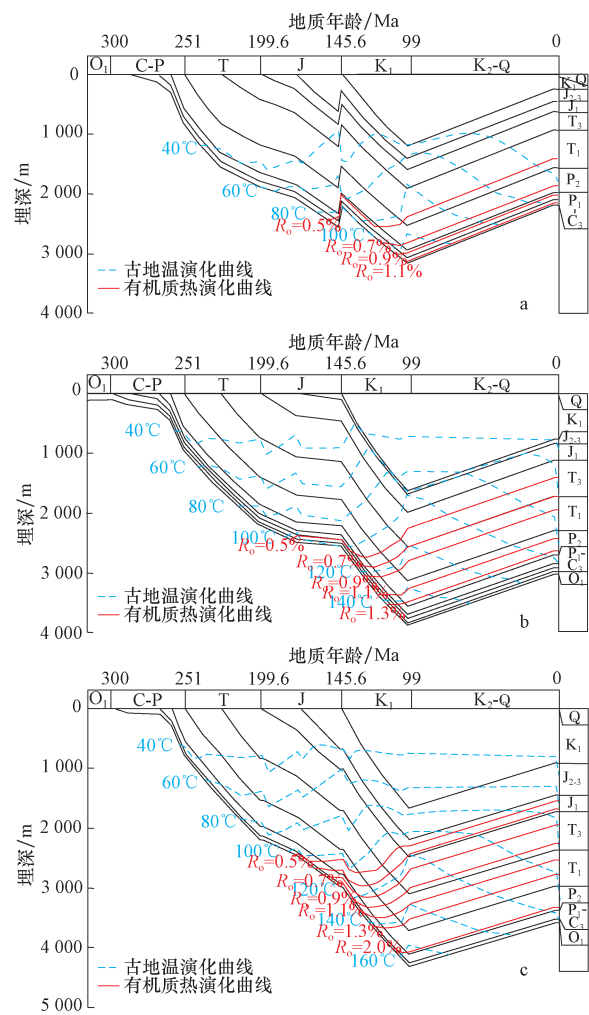


图5 杭锦旗地区单井埋藏史

Fig. 5 Burial history of single well in Hangjinqi area
a. 锦评1井; b. 锦10井; c. 伊23井

盒子组、山西组和太原组,泥岩剩余压力逐步减小,形成一个面积巨大的“压力封闭箱”。即使在接近盆地边缘靠近乌兰格凸起的什股壕区带,上石盒子组这样的“欠压实”带也同样发育,大面积岩性气藏被限定在下石盒子组。这种压力封盖作用在盆地内部普遍存

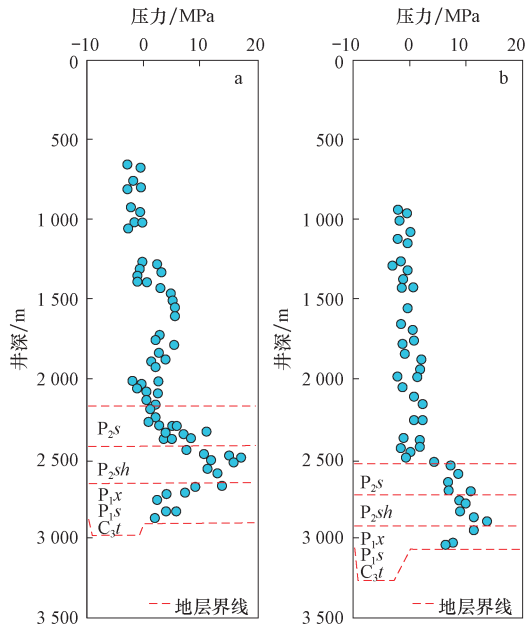


图6 杭锦旗地区锦51井(a)和锦88井(b)泥岩异常压力剖面
Fig. 6 Abnormal pressure profiles of mudstone in Well 51(a) and Well 88(b) in Hangjinqi area
 P_{2s} . 石千峰组; P_{2sh} . 上石盒子组; P_{1x} . 下石盒子组;
 P_{1s} . 山西组; C_{3t} . 太原组

在,说明在盆地内部大面积发育的“近源成藏”系统一直延伸到盆地北部边缘。

5 认识

- 1) 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系北部边缘的杭锦旗地区已具备培育大型气田发育的储量基础。伊陕斜坡石炭系-二叠系下部海-陆过渡层序中的层状“广布式”近源成藏系统在研究区有大面积分布,是该区大型气田形成的基本条件。
- 2) 断裂带以南的近源成藏区域,以大型岩性气藏为特征,源岩层生气潜力大和物性条件好的河道砂体叠合区域是天然气富集高产有利区带。伊盟北部隆起区大部缺少烃源岩发育,但储层要素和封盖要素发育良好,由于其自早古生代以来继承性隆起的特征,可以接收通过断层和砂体为主构成的输导体系由南部运移来的天然气,形成“源外”成藏区。

参 考 文 献

[1] 赵靖舟,李军,曹青,等. 论致密大油气田成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):573-583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(5):573-583.

[2] 席胜利,刘新社,孟培龙. 鄂尔多斯盆地大气区的勘探实践与前瞻[J]. 天然气工业,2015,35(8):1-9.
Xi Shengli, Liu Xinshe, Meng Peilong. Exploration practices and pros-

- pect of Upper Paleozoic giant gas fields in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 1-9.
- [3] 樊阳, 查明, 姜林, 等. 致密砂岩气充注机制及成藏富集规律[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 1-6.
Fan Yang, Zha Ming, Jiang Lin, et al. Charging mechanism of tight sandstone gas reservoir and its pattern of accumulation and enrichment[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 1-6.
- [4] 王南, 裴玲, 雷丹凤, 等. 中国非常规天然气资源分布及开发现状[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 26-31.
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [5] 王香增. 延长探区天然气勘探重大突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 1-9.
Wang Xiangzeng. Major breakthrough of gas exploration in Yangchang blocks and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 1-9.
- [6] 郝蜀民, 李良, 尤欢增. 大牛地气田石炭-二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 606-611.
Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. The marine to continental facies depositional systems in Permo-Carboniferous of Daniudi gas field and its near-source box-type reservoiring mode. Geology in China, 2007, 34(4): 606-611.
- [7] 李仲东, 惠宽洋, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运聚特征及成藏过程分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(3): 77-83.
Li Zhongdong, Hui Kuanyang, Li Liang, et al. Analysis of characteristics of gas migration and reservoir-forming in the Upper Paleozoic of northern Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(3): 77-83.
- [8] 李良, 袁志祥, 惠宽洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 21(3): 269-271.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Hui Kuanyang, et al. Natural gas accumulation conditions in the north part Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 21(3): 269-271.
- [9] 李威, 文志刚. 鄂尔多斯盆地马岭地区延长组长7烃源岩特征与分布[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 24-27.
Li Wei, Wen Zhigang. Characteristics and distribution of Chang 7 source rocks of Yangchang Formation in Maling area of Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 24-27.
- [10] 时保宏, 郑飞, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组石油成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 285-290.
Shi Baohong, Zheng Fei, Zhang Yan, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of Chang 7 section, Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 285-290.
- [11] 刘威, 张春生, 方金, 等. 鄂尔多斯盆地绥靖地区长7油层组沉积相特征研究[J]. 石油地质与工程, 2016, 30(1): 37-40, 147.
Liu Wei, Zhang Chunsheng, Fang Jin, et al. Study on sedimentary facies characteristics of Chang-7 oil reservoir group in Suijin area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(1): 37-40, 147.
- [12] 洪峰, 宋岩, 赵林. 鄂尔多斯盆地北部天然气成藏控制因素[J]. 天然气工业, 1998, 18(5): 22-25.
Hong Feng, Song Yan, Zhao Lin. Controlling factors of gas reservoir formation in the north of Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(5): 22-25.
- [13] 张金亮, 常象春, 张金功. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 30-35.
Zhang Jinliang, Chang Xiangchun, Zhang Jingong. Deep basin gas trap in the Upper Paleozoic of Ordos basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 30-35.
- [14] 黄学斌, 李军, 闫相宾, 等. 圈闭资源量参数概率分布及有效性检验[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 577-584.
Huang Xuebin, Li Jun, Yan Xiangbin, et al. Probability distribution of parameters for trap resources assessment and its validation[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 577-584.
- [15] 陈元千, 李剑. 中国新版《石油可采储量计算方法》标准中存在的主要问题及建议[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 8-13.
Chen Yuanqian, Li Jian. Reviews on problems and recommendations for new edition standard of The estimated methods of oil recoverable reserves in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 8-13.
- [16] 刘超英, 闫相宾, 高山林, 等. 油气预探区带评价优选方法及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 314-318.
Liu Chaoying, Yan Xiangbin, Gao Shanlin, et al. Play evaluation methods and their application in preliminary exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 314-318.
- [17] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 致密油资源富集区与“甜点区”分布关系研究——以美国威利斯顿盆地为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 619-626.
Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, et al. Relationship between resource-rich regions and sweet spots for tight oils: A case study of the Williston Basin in the USA[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 619-626.
- [18] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 183-189.
Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao area of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 183-189.
- [19] 聂海宽, 张金川, 薛会, 等. 杭锦旗探区储层致密化与天然气成藏关系[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(1): 2-8.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Xue Hui, et al. Relationship between the densification of reservoir and the accumulation of gas in Hangjinqi area of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2009, 24(1): 2-8.
- [20] 郭少斌, 赵可英. 鄂尔多斯盆地上古生界泥页岩储层含气性影响因素及储层评价[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 678-683.
Guo Shaobin, Zhao Keying. Gas-bearing influential factors and estimation of shale reservoirs in Upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 678-683.

(编辑 李 军)