

延长探区天然气勘探重大突破及启示

王香增

[陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西 西安 710075]

摘要:延长石油集团天然气探区位于鄂尔多斯盆地伊-陕斜坡东南部。长期以来,盆地存在“南油北气”的固有认识,导致对延长探区上古生界天然气勘探潜力评价较低。自2003年完钻了第一口真正意义上的天然气探井以来,通过强化地质研究,明确了延长探区位于油气富集的陕北斜坡东部,储集层以水下分流河道砂体、障壁岛砂坝为主,烃源岩广泛发育,泥岩盖层厚度大、分布稳定,天然气资源潜力在 $7\,500\times 10^8\text{ m}^3$ 以上。通过积极推动理论和技术创新,明确提出“优质储层与古流体运聚空间的有效配置决定着天然气富集程度”的成藏认识,成功研发出适合延长探区上古生界致密砂岩气藏的新型VES- CO_2 泡沫压裂液体系,取得了探明地质储量超过 $3\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 、年产天然气能力达到 $7.2\times 10^8\text{ m}^3$ 的良好效果,在短时间内取得了天然气勘探的重大突破。此外,还在鄂尔多斯盆地首次发现了具有百万方以上无阻流量的高产气层——石炭系本溪组。

关键词:致密砂岩气藏;天然气勘探;延长气田;上古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Major breakthrough of gas exploration in Yangchang blocks and its significance

Wang Xiangzeng

[Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China]

Abstract: The natural gas exploration blocks of Yanchang Petroleum Group(Yanchang exploration blocks) are located in the southeast of Yishan slope of Ordos Basin. The basin has long been believed to be rich in oil in its south part and abundant in gas in its north-a mindset that resulted in pessimistic evaluation data of gas potential in the Upper Paleozoic exploration blocks of the Group. The first real exploratory well for gas was drilled in the area in 2003. Geological data gathered since then have revealed that the blocks sit in the eastern part of the northern Shanbei slope, which is rich in both oil and gas. The reservoirs are dominated by underwater distributary channels and barrier islands, source rocks are widely distributed, and mudstone seals are thick and stable. The gas resource was estimated to be over 750 bcm. Theoretical and technological innovation obtained during exploration in the blocks by the Group had led to the following achievements: (1) A new understanding of gas accumulation is proposed, i. e. gas accumulations are controlled by combination of reservoirs with paleo-fluid migration and accumulation space; (2) A new foam fracturing system(VES- CO_2) was developed and tested for the Upper Paleozoic tight gas reservoirs. A proven gas in place of more than 300 bcm and annual gas production capacity of 720 million cm^3 were obtained. What's more, the Carboniferous Benxi Formation in the basin was found to be able to produce gas at an absolute open flow of over million cubic meters.

Key words: tight sand gas reservoir; gas exploration; Yangchang gas field; Upper Paleozoic; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国具有代表性的克拉通内盆地,中、晚三叠世—早白垩世陆相盆地叠加在早、晚古生代大型海相、海-陆交互相盆地之上,属多重叠合型盆地^[1]。其构造发育史大体与华北地台相当,沉积岩层厚度大、分布稳定,蕴藏着丰富的油气及煤炭资源。近年来,陆续在盆地北部上古生界发现了苏里格、榆林、大牛地、乌审旗等多个探明储量超千亿方的大型气田;其中,苏里格气田目前探明、基本探明天然气储量

$2.85\times 10^{12}\text{ m}^3$ ^[2],是目前国内天然气储量及产量增长的重点区域。然而与北部相比,盆地南部的天然气勘探进展缓慢,这与早期形成的“南油北气”的固有认识及较低的勘探程度有关,地质认识不清制约了北纬38°线以南天然气勘探的思路及步伐。

延长石油集团的天然气勘探区域位于陕西省延安市境内,构造位置处于鄂尔多斯盆地伊陕-斜坡东南部,资源面积 $10\,775\text{ km}^2$ 。2004年全国第三次资源评

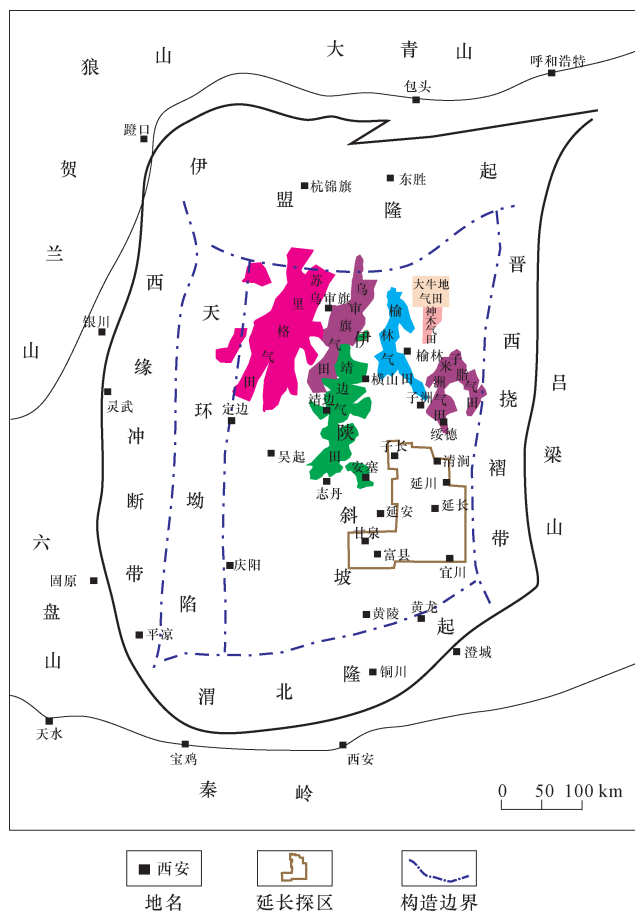


图1 延长天然气探区位置

Fig. 1 Location of the Yanchang exploration block

价认为延长探区的天然气资源量仅为 $3\,007 \times 10^8 \text{ m}^3$, 传统上认为是勘探潜力有限的贫气区(图1)。“十一五”以来,延长石油集团解放思想、积极探索,以地质认识的突破和开采技术的创新带动天然气勘探的突破,实现了天然气勘探的高效、快速发展。截至2012年底,估算探区内上古生界石炭系本溪组、二叠系山西组和下石盒子组盒8段探明天然气地质储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 且已形成 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的年生产能力。延长气田的发现将成为鄂尔多斯盆地南部第一个储量规模超千亿方的大型气田,表明盆地南部天然气勘探具有广阔的前景。

1 延长气田发展历程

1.1 初期探索阶段(2003—2006年)

延长探区天然气勘探起步较晚。2003年完钻了延长历史上第一口真正意义上的天然气探井——延气1井,在上古生界二叠系石千峰组、石盒子组、山西组、石炭系本溪组及下古生界奥陶系马家沟组均不同程度见到天然气显示,证实了延长探区古生界的含气性。

2005年,在探区中部完钻两口天然气探井——延气2、延气4井,发现山(山西组)2段、盒(下石盒子

组)8段储层发育。其中,延气2井在上古生界解释气层15.8 m、含气层29.3 m;对其盒8段、山2段气层试气,分获无阻流量 $15\,966,30\,799 \text{ m}^3/\text{d}$,初步揭示了延长探区天然气的勘探潜力。

2006年,根据钻探成果及地质认识,提出了“整体解剖”的勘探思路,沿南北向3条锯齿状大剖面部署了10口探井,均钻遇气层。对延102井盒8段、山1段气层试气,分获无阻流量 $7\,005,10\,240 \text{ m}^3/\text{d}$;对延104井山2段气层试气,获无阻流量 $9\,796 \text{ m}^3/\text{d}$;对延109井本溪组气层试气,获无阻流量 $14\,248 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由此充分证实延长探区上古生界发育多套含气砂体,进一步证实延长探区上古生界具良好的勘探潜力。

1.2 勘探突破阶段(2007—2008年)

2007—2008年,延长石油集团确立了“立足本区、兼顾外围、点上开花、有利辐射”的勘探思路,加大了探区中部和南部的勘探力度,累计完钻探井30口,并完成了二维地震直测线870 km、高家河三维地震144 km^2 的资料采集与处理解释工作。通过分析研究探区中部、南部山2段、盒8段的砂体展布特征,初步预测了有利靶区。同时,进一步改善了钻井、试气工艺。所有这些都取得了良好的勘探效果。

位于探区南部的延127井在山2段钻遇含气砂体21 m,物性较好、砂体较纯,试气获无阻流量 $128.87 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,试气产量首次突破百万方日产。位于探区中部的延128井在本溪组试气,获无阻流量 $15.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。从而,在探区中部、南部揭示了山西组、本溪组高产气层的发育,上古生界天然气勘探取得重大突破。

1.3 勘探开发一体化阶段(2009—2010年)

2009年,延长石油集团提出“以勘探为重点、开发提前介入”的发展战略,建立了延气2、延128两个先导试验区,当年完钻探井20口、试采井73口,其中工业气流井58口、低产井14口,同时开展了2500 km二维地震测线的采集及处理解释工作。位于延128井区的试8井在本溪组气层试气,获无阻流量 $150.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,首次在鄂尔多斯盆地石炭系本溪组发现无阻流量百万方以上的高产气层。位于延气2井区的试211井在山2段气层试气,获无阻流量 $116.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。当年,在延气2、延128先导试验区完成天然气产能建设 $3.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,勘探及开发先导试验成果显著。

2010年,延长石油集团加快了延气2、延128井区的勘探开发步伐,完钻探井134口、试采井50口,并对12口气井进行了试采,获取了第一手生产动态资料。

同年,延气2、延128井区在上古生界盒8段、山1段、山2段、本溪组计算天然气探明地质储量超过 $1\,060\times 10^8\text{ m}^3$,延长探区大型天然气田正式发现。

在探区中部及南部取得突破之后,更加坚定了延长石油集团进一步扩大天然气勘探战果的信心和决心。2011年,在探区北部实现天然气探明储量超过 $1\,100\times 10^8\text{ m}^3$;2012年,在探区东部、东北部实现天然气控制储量超过 $1\,700\times 10^8\text{ m}^3$,有望在2013年获得天然气探明储量 $1\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 。期间,延长石油集团在延气2、延128两个先导试验区各建成LNG(液化天然气)站一座,于2012年4月投产试运行,目前已形成 $7.2\times 10^8\text{ m}^3$ 的年生产能力。

2 延长探区天然气勘探实践

2.1 以地质认识的突破指导天然气勘探的突破

2.1.1 深入分析延长探区地质条件,明确天然气资源潜力

据2004年全国第三次资源评价,延长探区天然气资源量仅 $3\,007\times 10^8\text{ m}^3$,平均资源丰度 $0.279\,6\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,天然气勘探潜力有限。受鄂尔多斯盆地北部陆续发现大气田的启发,通过深入开展油气地质基础研究,认识到“南油北气”分布格局的形成是受到延长探区位于盆地南部的深湖区、储集层不发育等传统认识限制的结果。

2007—2008年,延长石油集团调整油气勘探开发思路,提出了“油气并举”的勘探方针,重新落实了探区资源量,希望转变以油为主的能源结构。在充分利用已完钻的40余口气井资料的基础上,通过与相邻气田地质条件的比较分析,认为延长探区位于油气比较富集的陕北斜坡东部,储集条件具备。石炭系—二叠系煤系气源岩(煤层、暗色泥岩、含泥生物灰岩等)广泛分布,厚度大;有机质丰度较高,有机质类型较好,以腐泥—腐殖型干酪根为主;热演化程度高,镜质体反射率 R_o 值在 $0.7\%\sim 3.5\%$;在晚侏罗世—早白垩世末期大面积成熟,表现出“广覆式”生烃特征。气源岩上部的上石盒子组—石千峰组泥质岩系厚度大、分布稳定、横向连续性好,组成良好的区域性盖层。最新资源评价结果表明,延长探区天然气资源丰度应为 $0.7\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,资源量应在 $7\,500\times 10^8\text{ m}^3$ 以上,预计可探明天然气地质储量 $(3\,000\sim 3\,800)\times 10^8\text{ m}^3$ 。从而明确了延长探区的天然气资源潜力,为天然气勘探工作的开展夯实了基础。

2.1.2 以地质认识的突破指导天然气勘探部署,以工程技术的进步为勘探突破提供保障

延长探区的天然气在勘探初期面临诸多难题,如:

物源及沉积体系分布规律不清楚;受地震资料品质限制,储层横向预测技术难度大;天然气成藏主控因素及富集规律不明确;天然气规模化开发关键技术研究未开展,尤其是气层压裂改造技术经验欠缺等。为了解决这些问题,“十一五”期间延长石油集团开展了多项专项技术难题攻关,为天然气勘探突破提供了有力的技术支持。

首先,在区域构造和沉积背景控制下,依据前人已有研究成果,在沉积学、层序地层学、储层地质学等理论的指导下,采用由点(井)—线(剖面)—面(平面)—域(时间与空间域)—点(有利目标)的研究思路,明确了延长探区的沉积展布格局和沉积演化规律,包括石炭系海—陆变迁及相应滨岸沉积展布格局、二叠系三角洲空间展布规律与相带分异特征;总结了石炭系本溪组滨岸沉积类型及碎屑岩发育特征与分布规律;搞清了二叠系三角洲南、北两大区域的发育与展布特征,明确了延长探区位于南、北物源的交汇区域。同时,确定了主要储层发育的沉积相带、砂体宏观规模及沉积体系演变对储层发育的控制作用,为天然气富集层段及储层分布规律的研究奠定了基础。

其次,开展了上古生界天然气成藏机制、高产要素及富集规律的研究。通过分析石炭系—二叠系主要含气层段储层物性特征,明确了高产、低产气层的储层物性差异的成因,为气田采用相应的开采工艺与技术提供了地质依据。通过盖层分布规律、封盖机理及天然气富集规律研究,分析了区内已知气藏的成藏要素,明确了成藏期次与阶段,建立了相应的成藏模式,提出了“优质储层与古流体运聚空间的有效配置决定天然气富集程度”的新认识,实现了对鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集规律的补充和完善。

针对鄂尔多斯盆地上古生界储集层普遍具有“低孔、低渗、低产”的特点,力求最大限度解放气层,积极开展以酸压技术为主的工程技术攻关,成功研发出新型VES—CO₂泡沫压裂液体系,在实践中取得了良好效果,有效提高了单井产量。该项技术已获国家专利3项,为天然气勘探重大突破提供了强有力的技术保障。

在勘探部署的具体实施中,遵循“整体勘探、分步实施”的指导思想,按照“甩开勘探、探点连线、整体解剖、重点发现”的勘探思路,深入开展钻探后评估工作,及时开展部署优化调整,实现“完钻一口、搞清一片”的目的,走出了认识—实践—再认识—再实践的勘探之路,为延长探区在短时间内实现上古生界天然气勘探重大突破创造了条件。

2.2 形成适合致密砂岩气藏的配套技术

2.2.1 物源及沉积相分析技术

前人针对鄂尔多斯盆地上古生界的地质综合研究

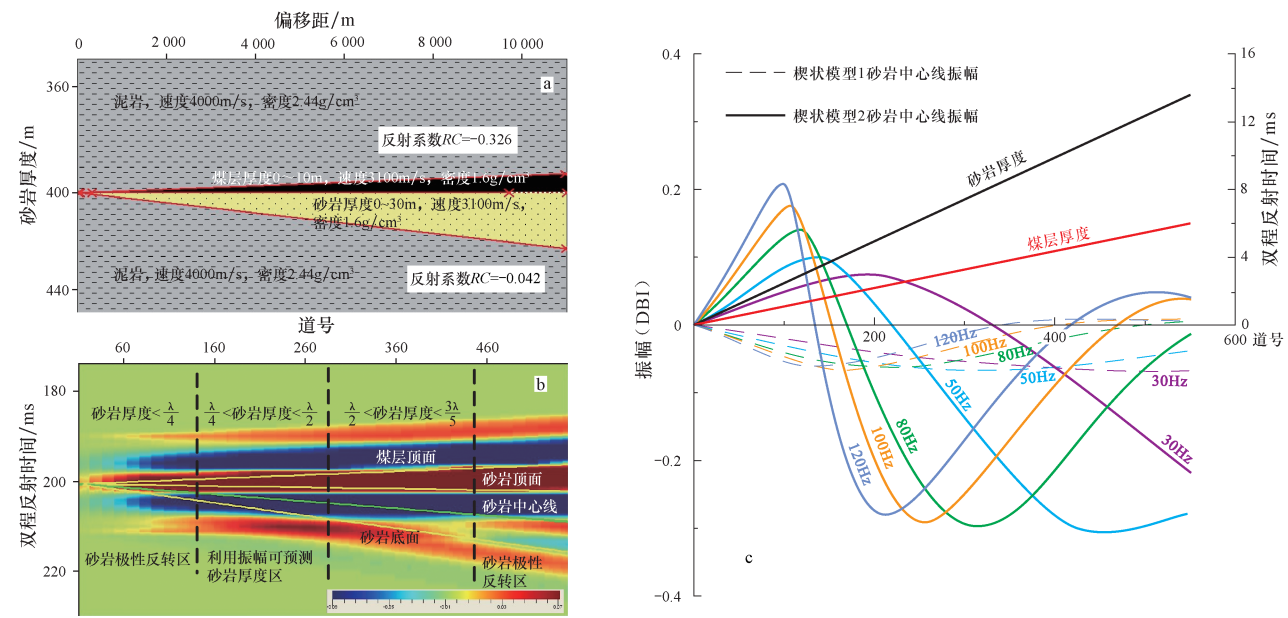


图3 延长探区含煤楔状模型90°相位 Ricker 子波地震响应特征

Fig. 3 Seismic response characteristics of Ricker wavelet of 90° phase in coal-bearing wedged model of the Yanchang exploration block
a. 含煤楔状地质模型;b. 90°相位 80 Hz 频率 Ricker 子波合成地震剖面;c. 砂岩中心振幅分布特征

质性强、地震剖面识别难度大等问题,在传统地震沉积学技术上引入时频分析。通过对楔状模型合成地震记录开展时频分析,可见利用时频分析可以确定砂体的连续性。若调谐频率连续变化,说明砂体连续分布;若调谐频率宏观上连续分布但有突变现象,说明砂体厚度有变化;若调谐频率成断续或斑状分布,表明砂体不连续。通过对连井合成地震记录进行时频扫描,反映了工区的砂体分布特征;在时频谱分析的基础上,建立了三维工区沉积体系空间模型构型(图4)。

3) 地震剖面高频等时格架(短期旋回)建立及地层切片沉积体系综合识别技术

以建立的参考等时地震反射框架为基础,在等时界面间进行线性内插,可在90°相位地震数据体中形成311层具有等时意义的地层切片。通过井深、地层

切片双程旅行时间和相对地质时间的分析,建立了新的时-深关系,进而确定振幅地层切片的地质意义,并标定振幅地层切片数据体的绝对地质时间。通过多层拉平技术(Wheeler变换),形成90°相位振幅地层切片数据体。针对不同频率数据体,提取具有地质等时意义的地层切片;结合单井资料标定,对地层切片进行沉积体系解释,进而识别出不同级别的沉积相及沉积微相,并形成相应的沉积相平面图(图5)。

2.2.3 天然气运聚成藏分析技术

研究表明^[9-18],延长探区同鄂尔多斯盆地上古生界一样,具有良好的天然气成藏条件。鉴于探区目的层段主要发育低孔、低渗的致密砂岩气藏,储层物性及含气性非均质性强,不同区域天然气成藏地质条件差异明显。

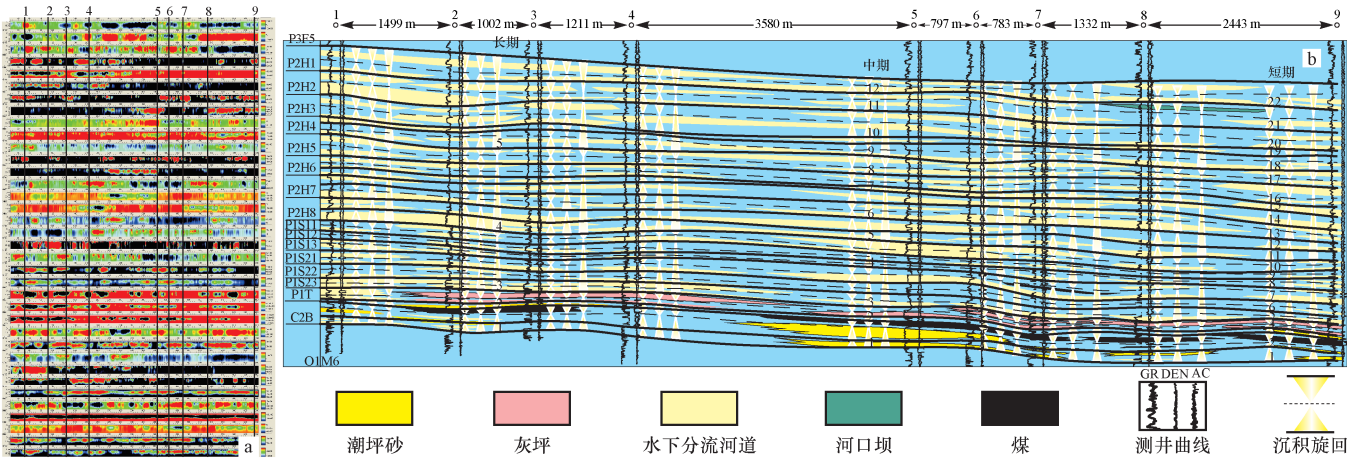


图4 延长探区频谱与测井资料结合确定井间沉积体系关系

Fig. 4 Sedimentary system interpretation based on combination of time-frequency spectrum and well logging in the Yanchang exploration block
a. 连井时频谱对比剖面;b. 连井沉积相对比剖面

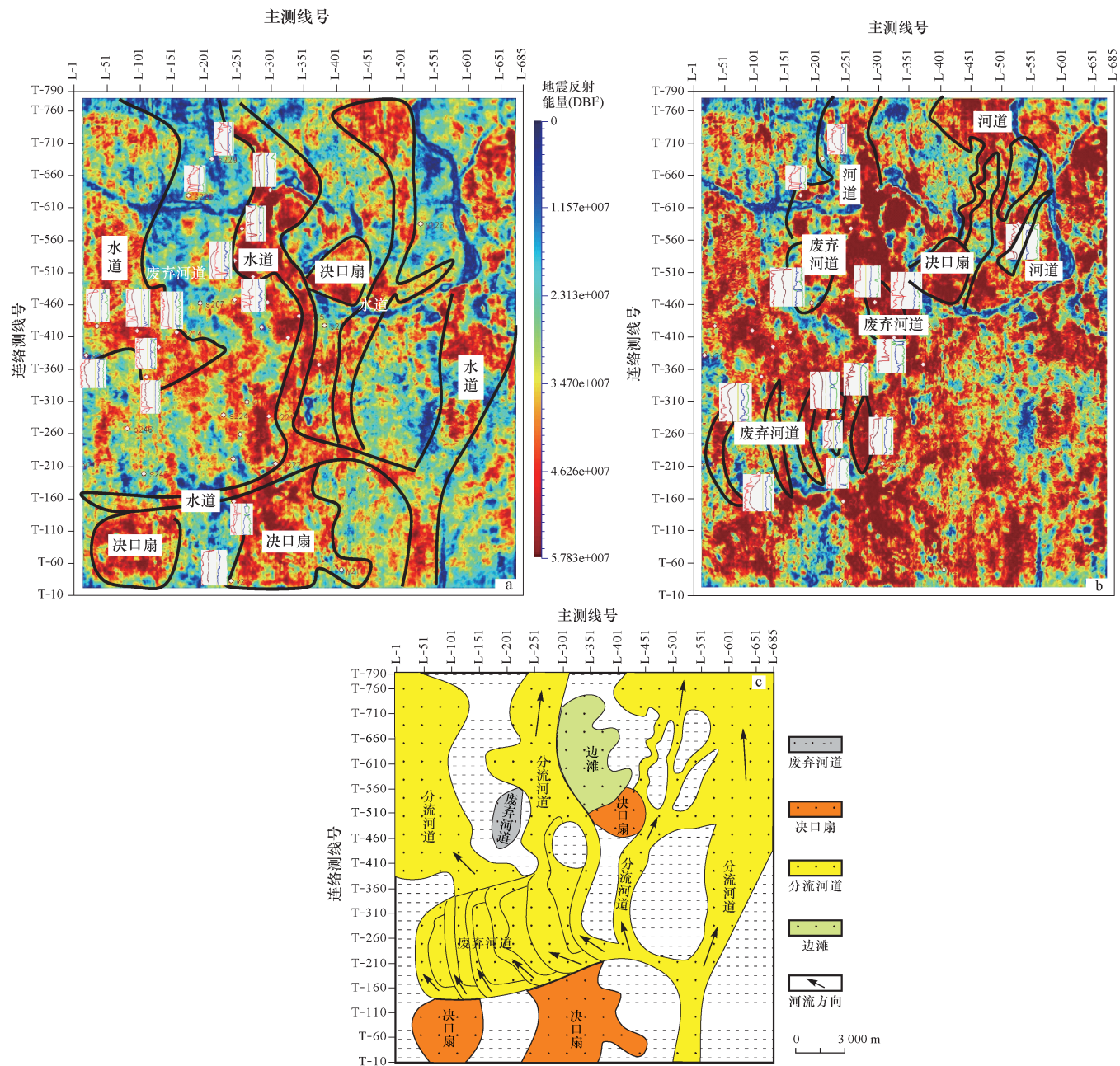


图 5 延长探区不同频率能量地层切片及沉积体系解释

Fig. 5 Stratral energy slices of different frequency and sedimentary system interpretation of the Yanchang exploration block

a. 60 Hz 地层能量切片; b. 70 Hz 地层能量切片; c. 沉积体系平面分布解释成果

为明确延长探区天然气成藏主控因素及富集规律,采用平衡剖面法,系统恢复了探区各目的层的顶面构造图,研究了各目的层顶面在不同地质历史时期的平面、剖面演化特征(图 6);采用数值模拟手段,恢复了古流体动力,以运移时期的古流体动力分布及演化为主线,分析了油气运移方向(图 7);由此,形成了天然气运聚成藏研究的关键技术。研究表明,优质储层与古流体运聚空间的有效配置决定了探区天然气的富集程度。

2.2.4 VES - CO₂ 泡沫压裂储层改造技术

针对延长探区上古生界气藏储层致密、物性及

含气性非均质性强等地质特征,成功研发出适合该区上古生界气藏的新型 VES - CO₂ 泡沫压裂液体系和新型清洁压裂液体系及破胶剂等工艺技术,有效提高了单井产量,准确评价了气层产能,为延长气田勘探开发提供了重要技术手段。该项技术已获国家专利,其特点为:①流变性能好,滤失低,与地层配伍性好;②破胶可控(依靠地层流体、温度或外加破胶剂破胶),无残渣,对储层伤害小;③采用恒定内相、变泡沫质量设计理念,加砂规模进一步提高;④实现泡沫质量大于 60.0%,用量量少,压裂液返排快、彻底。

延长天然气探区的试 3 井之前采用胍胶压裂液压

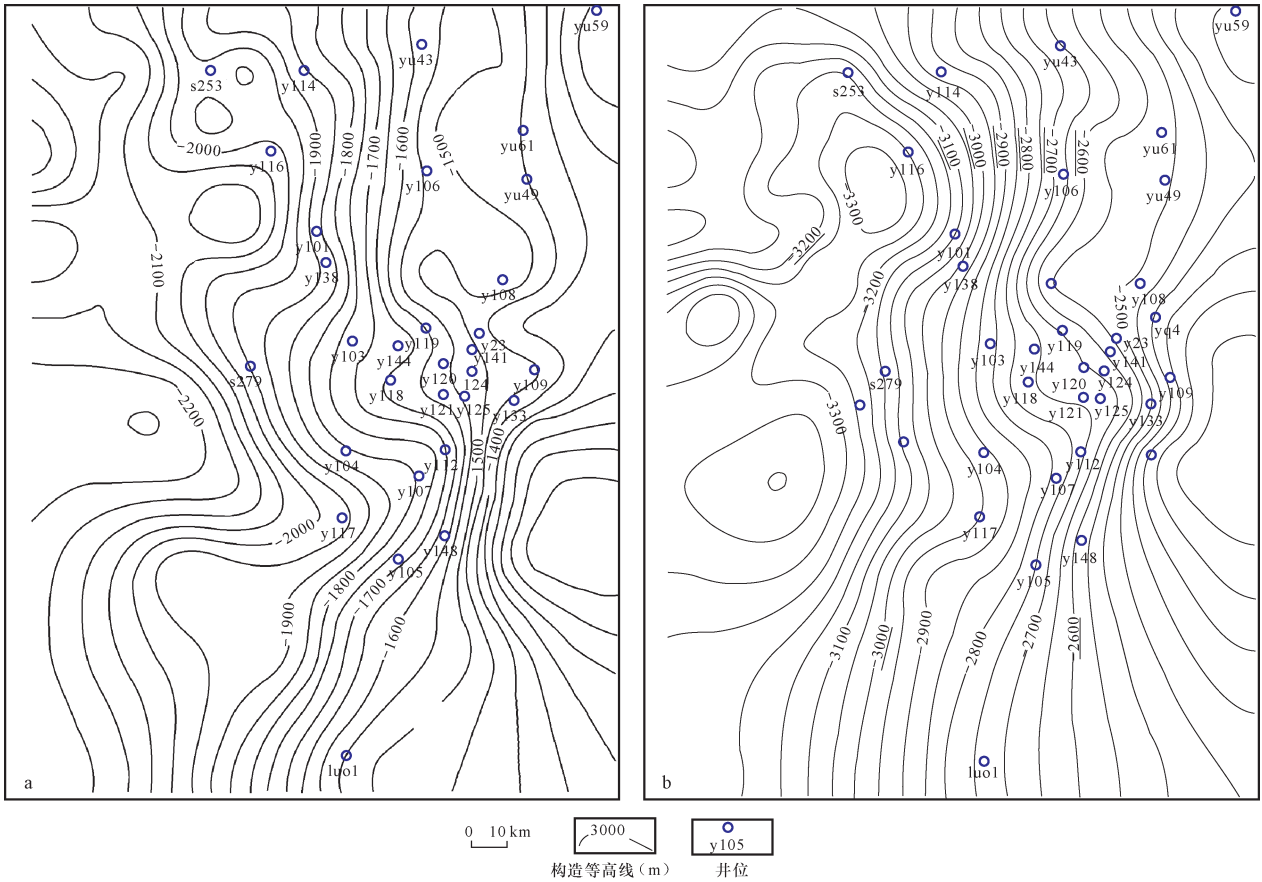


图 6 延长探区山 2³ 段顶面不同时期构造特征

Fig. 6 Structural map of the top Shan 2³ member of the Yanchang exploration block in different geologic periods

a. 现今山 2³ 段顶面构造; b. 晚白垩世末山 2³ 段顶面构造

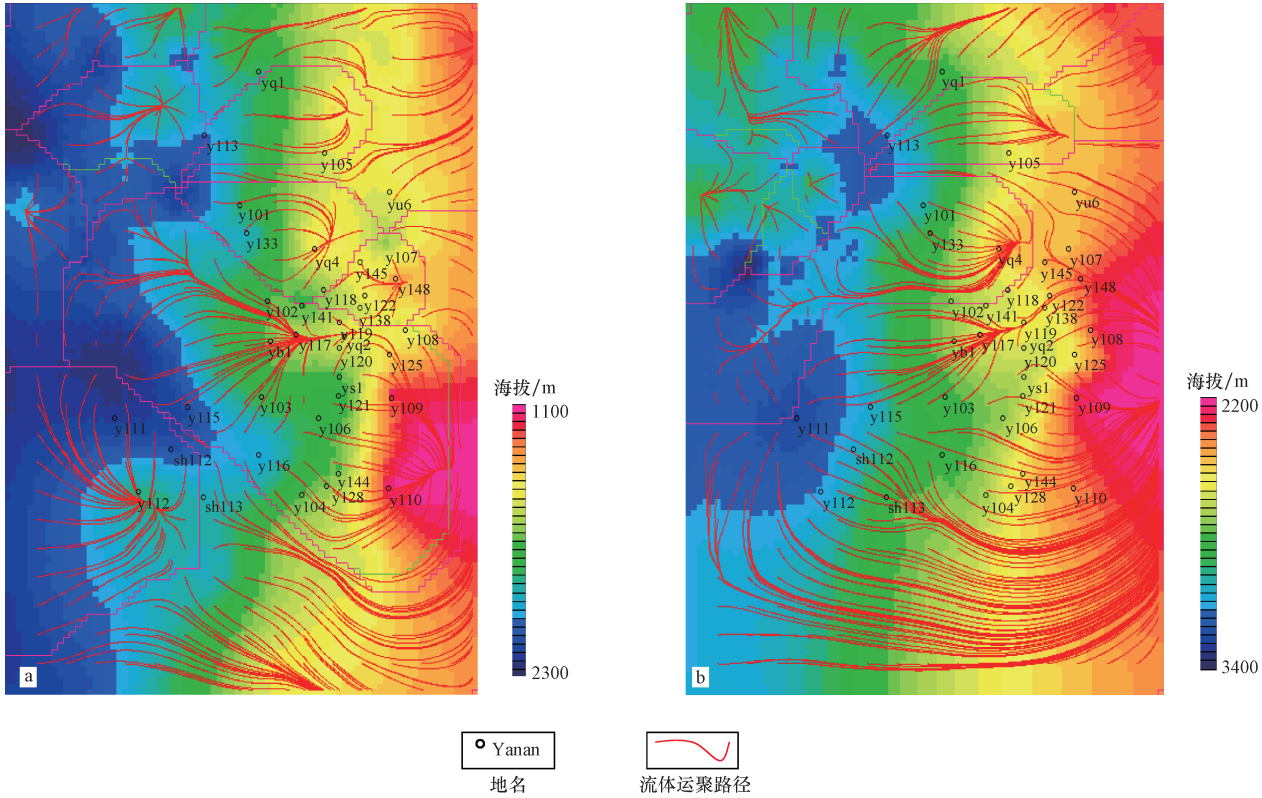


图 7 延长探区山 2³ 段不同时期流体平面运聚特征

Fig. 7 Fluid migration and accumulation characteristics of the Shan 2³ member in the Yanchang exploration block in different geologic periods

a. 现今山 2³ 段流体平面运聚特征; b. 晚白垩世末山 2³ 段流体平面运聚特征

裂,无阻流量仅为 $2.1533 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;采用 VES- CO_2 泡沫压裂,压后无阻流量为 $9.9293 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,增产 360%。延 287 井之前采用胍胶压裂液压裂,无阻流量仅为 $1.4243 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;采用 VES- CO_2 泡沫压裂,压后无阻流量为 $2.99 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,增产 110%。

3 延长探区天然气勘探突破的启示

延长探区从 2003 年完钻第一口天然气探井到 2012 年的短短 9 年时间里,在上古生界探明地质储量超过 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、控制地质储量超过 $1700 \times 10^8 \text{ m}^3$,建成我国鄂尔多斯盆地南部首个超千亿方大型气田,对我国西部能源化工产业的提升及国家能源紧张局面的缓解具有重要意义。这些成就的取得,主要得益于延长石油集团强化地质研究,推动理论和技术创新,突破前人“南油北气”固有认识,实现了天然气勘探的高效、快速发展。

3.1 勘探工作必须解放思想、勇于挑战传统认识

延长天然气勘探的重大突破,是在认真分析探区地质条件的基础上,解放思想,勇于探索,转变思路,敢于挑战传统认识的结果,是一条认识—实践—再认识—再实践的成功之路。

通过认真分析延长探区古生界的资源潜力,解放了思想,挑战了“贫气”传统认识,制定出“油气并举”的勘探方针;不拘泥于相邻探区的勘探认识,勇于探索,在石炭系本溪组、二叠系山西组、下石盒子组钻井获数万方以上无阻流量,使之成为延长探区的主要目的层,其中石炭系本溪组获无阻流量百万方以上的高产,属鄂尔多斯盆地首次发现;敢于挑战固有技术,积极寻求技术突破,成功研发出适合延长探区上古生界致密砂岩气藏的新型 VES- CO_2 泡沫压裂技术。

3.2 地质认识及理论的深化和发展是天然气勘探突破的基础

天然气勘探取得的突破,首先是地质理论和地质认识的突破。延长石油集团科研人员在积极继承相邻气田成功地质理论和勘探模式的基础上,大胆创新,不断提出新认识、新思维,进一步深化了探区沉积展布格局及沉积演化规律,补充完善了鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集规律。这些新认识的取得为延长气田的发现及取得成功奠定了基础。

3.3 工程技术的进步是勘探取得突破的重要保证

实现预期勘探目标,不仅需要科学合理的地质部署方案,而且需要先进适用的工程技术予以支持。延

长石油集团针对上古生界气层“低孔、低渗、低产”难题,积极发展以酸化压裂为主的配套工程技术,成功解放了气层,实现了单井产量的突破。因此,地质认识和工程技术的有效结合、地质认识的深化和工程技术的进步同步开展,是延长石油集团天然气取得重大突破的重要保证。

3.4 实现勘探的突破必须有一支迎难而上、锲而不舍、攻坚啃硬的技术队伍

长期以来,延长石油集团未设立专业科研板块,限制了企业的技术创新能力。2008 年,延长石油集团研究院正式成立,确立了“自主创新、人才立院、开放协作、支撑发展”的办院方针,建成了集油气田勘探开发、油田工程技术、石油化工和煤盐化工综合利用为一体的综合性技术研发机构,迅速形成了基础理论扎实、掌握先进勘探技术、敢于攻坚啃硬、积极奋发向上的技术研发团队,为企业发展、产业发展、科研生产提供了强有力的技术支持,大大提高了延长探区整体地质认识,为天然气勘探突破奠定了坚实基础。

4 认识与结论

1) 自 2003 年完钻第一口真正意义上的天然气探井——延气 1 井以来,延长气田历经了“初期探索、勘探突破、勘开一体化”等发展阶段,突破了前人“南油北气”的固有成藏认识,已取得估算天然气探明地质储量超过 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、年产能力 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的良好勘探开发效果,预示着鄂尔多斯盆地南部天然气具有广阔的勘探开发前景。

2) 延长探区天然气勘探实践表明,通过深入分析地质条件,明确了该区天然气资源潜力,以地质认识的突破带动了天然气勘探开发的突破,并形成了适合该区致密砂岩气藏的“物源及沉积相分析技术、黄土塬地震沉积学应用技术、天然气运聚成藏分析技术、VES- CO_2 泡沫压裂储层改造技术”等系列配套技术,走出了一条认识—实践—再认识—再实践的勘探之路,为延长探区在短时间内实现上古生界天然气勘探重大突破创造了条件。

3) 延长石油集团天然气勘探之所以能在短时间内取得高效、快速发展,关键在于解放了思想,勇于挑战传统认识;强化了地质研究,及时深化、发展了地质认识及成藏理论;推动了理论和技术创新,确保地质认识深化和工程技术进步同步开展;培养了一支锲而不舍、攻坚啃硬的技术队伍。

参 考 文 献

[1] 刘池洋,赵红格,桂小军,等.鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐

标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638.

Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.

[2] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 苏里格大型致密砂岩气藏形成条件及勘探技术[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊1): 27-35.

Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Formation conditions and exploration technology of large-scale tight sandstones reservoir in Sulige[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 27-35.

[3] 张满郎, 李熙喆, 谷江锐, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层划分及演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 289-297.

Zhang Manlang, Li Xizhe, Gu Jiangrui, et al. Sequence division and evolution of Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 289-297.

[4] 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕, 等. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 202-209.

Ye Liming, Qi Tianjun, Peng Haiyan, et al. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 202-209.

[5] 陈安清, 陈洪德, 向芳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部山西组上石盒子组三角洲沉积及演化[J]. 地层学杂志, 2010, 34(1): 97-103.

Chen Anqing, Chen Hongde, Xiang Fang, et al. Delta deposits in the Shanxi and Shangshihezi formations in the northeastern Ordos Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(1): 97-105.

[6] 杨奕华, 包洪平, 贾亚妮, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储集层控制因素分析[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 25-32.

Yang Yihua, Bao Hongping, Jia Yani, et al. Analysis on control factors of sandstone reservoir of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 25-32.

[7] 张晓莉. 鄂尔多斯盆地中部上古生界沉积相演化[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 26-36.

Zhang Xiaoli. Sedimentary facies evolution of Upper Palaeozoic formation in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(3): 26-36.

[8] 周进松, 赵谦平, 银晓, 等. 鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组储层沉积特征及天然气勘探方向[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(2): 13-17.

Zhou Jinsong, Zhao Qianping, Yin Xiao, et al. Sedimentary characteristics of carboniferous Benxi Formation, southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(2): 13-17.

[9] 刘志武, 韩代成, 周立发. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界天然气勘探前景[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(5): 24-30.

Liu Zhiwu, Han Daicheng, Zhou Lifa. Natural gas prospecting foreground of the Palaeozoic in southeastern Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(5): 24-30.

[10] 付金华, 魏新善, 黄道军. 鄂尔多斯大型含煤盆地岩性气藏成藏规律与勘探技术[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(1): 137-141.

Fu Jinhua, Wei Xinshan, Huang Daojun. Law of reservoir formulation and exploration techniques of natural gas lithologic reservoir in Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 137-141.

[11] 李明瑞, 窦伟坦, 蔺宏斌, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密岩性气藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 56-60.

Li Mingrui, Dou Weitan, Lin Hongbin, et al. Model for tight lithologic gas accumulation in Upper Palaeozoic, east of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 56-60.

[12] 杨伟利, 王毅, 孙宜朴, 等. 鄂尔多斯盆地南部上古生界天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 13-16.

Yang Weili, Wang Yi, Sun Yipu, et al. Gas potential of the Upper Palaeozoic in the southern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 13-16.

[13] 陈义才, 林杭杰, 唐波, 等. 苏里格地区石炭-二叠系天然气充注特点及充注能力[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 91-97.

Chen Yicai, Lin Hangjie, Tang Bo, et al. Characteristics and potential of gas charging in the Permo-Carboniferous of Sulige region[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 91-97.

[14] 周妍, 孙卫, 白诗筠. 鄂尔多斯盆地致密油地质特征及其分布规律[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(3): 27-29.

Zhou Yan, Sun Wei, Bai Shijun. Reserch on dense oil geologic characteristics and distribution regularity in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(3): 27-29.

[15] 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 811-827.

Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 811-827.

[16] 曹青, 赵靖舟, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏气源条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 584-591.

Cao Qing, Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, et al. Gas source conditions of quasi-continuous accumulation of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 584-591.

[17] 彭海艳, 刘家铎, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地东部山西组高分辨率层序地层与天然气聚集研究[J]. 石油物探, 2008, 47(5): 519-525.

Peng Haiyan, Liu Jiaduo, Cheng Hongde, et al. High-resolution sequence stratigraphy and gas accumulation of Shanxi Formation in East Ordos Basin[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2008, 47(5): 519-525.

[18] 李军, 赵靖舟, 凡元芳, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气运移机制[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 592-600.

Li Jun, Zhao Jingzhou, Fan Yuanfang, et al. Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 592-600.

(编辑 李 军)