

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.03.024

致密碳酸盐岩气藏井位优选技术及其应用 ——以苏里格气田东区为例

白慧^{1,2}, 杨国平³, 杨特波^{1,2}, 马志欣^{1,2}, 侯科锋^{1,2}, 畅永刚^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西 榆林 719100)

摘 要:鄂尔多斯盆地下古生界碳酸盐气藏属于岩性-地层圈闭气藏, 储层厚度小、非均质性强, 开发难度大。为提高气田开发效果, 笔者以苏里格气田东区为例, 综合应用钻井、测井、地震、试气等动静态资料, 通过对沉积相与成岩机理分析、小幅度古构造精细刻画、岩溶古地貌研究, 分析白云岩储层的主控因素, 明确了天然气高产富集规律及成藏特征, 并结合储层地震, 综合预测碳酸盐岩致密气藏有利富集区。在综合考虑天然气成藏模式、控制因素及储渗条件等因素的基础上, 地质、地震、测井与气藏工程多学科相结合, 优选下古气藏井位坐标, 形成了适用于苏里格气田东区下古气藏有效开发的井位优选技术。该技术有效提高了下古气藏开发效果, 经济效益大, 为致密碳酸盐岩气藏高效开发提供了技术指导。

关键词:井位优选; 碳酸盐岩气藏; 奥陶系; 苏里格气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE357.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)03-0264-09

Research and Application of Well Location Optimization Technique in Tight Carbonatite Gas Reservoir: A Case Study of the Eastern Part of Sulige Gas Field

BAI Hui^{1,2}, YANG Guoping³, YANG Tebo^{1,2}, MA Zhixin^{1,2}, HOU Kefeng^{1,2}, CHANG Yonggang^{1,2}

(1. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, Petrochina, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. No. 2 Gas Production Plant of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yu'lin 719100, Shaanxi, China)

Abstract: The lower Paleozoic carbonatite gas reservoir in Ordos Basin is litho-stratigraphic trap gas reservoir of small thickness and great heterogeneity, thus difficult to develop effectively. This paper takes the eastern area of Sulige Gas Field as an example, using such dynamic and static data as drilling, well logging, seismic and well test data, etc. to analyze some main controlling factors of dolomite reservoir. It also clarifies the enrichment regularities and the characteristics of hydrocarbon accumulation and makes a synthesis forecast of favorable enrichment areas of tight carbonatite gas reservoir based on the reservoir seismic prediction Taking into considerations of

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(2016ZX05050), 股份公司科技专项“长庆气田稳产及提高采收率技术研究”(2016E-0509)

作者简介: 白慧(1984-), 女, 陕西榆林人, 工程师, 现从事气田开发与地质研究工作。E-mail: bhui_cq@petrochina.com.cn

hydrocarbon accumulation, controlling factors and store-permeability conditions, etc., the authors optimize the well location in the lower Paleozoic carbonatite gas reservoir. This Well Location Optimization technique is applicable to the eastern area of sulige gas field. It has improved the development of the lower Paleozoic carbonatite gas reservoir and provided technical guidance for the efficient development of the tight carbonate gas reservoirs.

Keywords: well location optimization; carbonatite gas reservoir; Ordovician; Sulige gas field; Ordos basin

鄂尔多斯盆地是中国第二大含气盆地,盆地中部下古生界奥陶系马家沟组发育一套以碳酸盐岩为主、夹蒸发岩的地层,是典型的致密碳酸盐岩天然气储层(张明禄,2001;杨华,2013;新善,2017)。苏里格气田东区位于鄂尔多斯盆地中央古隆东侧,区域构造属于伊陕斜坡中北部(图1)(苏中堂,2012),勘探开发实践表明,该区块下古生界致密碳酸盐岩气藏具有很大的开发潜力。

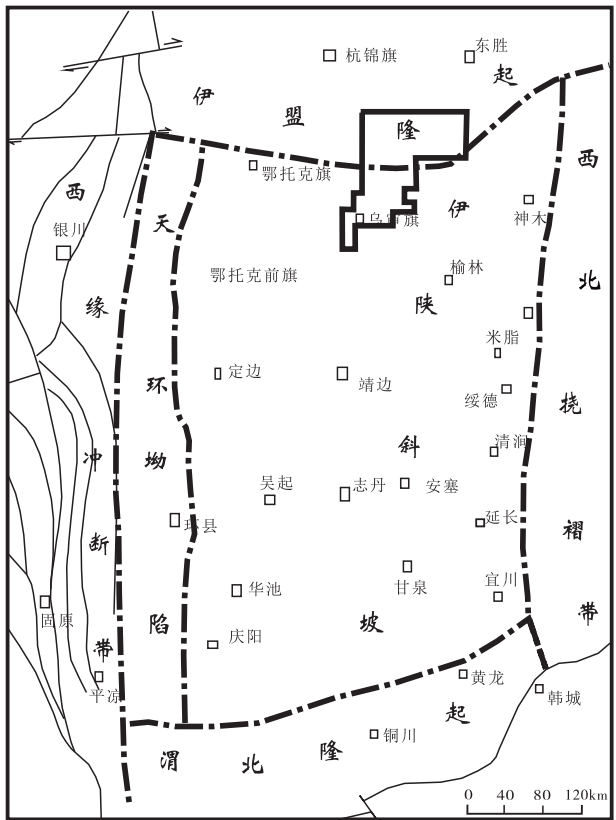


图1 鄂尔多斯盆地区域构造单元分区及研究区位置图
Fig.1 Partition of tectonic elements and location of the study area in Ordovician, Ordos basin

随着勘探开发的不断深入,该区勘探开发对象日趋复杂,资源品位逐渐变差,低产低效气井不断增

多,稳产能力逐渐下降,仅依靠上古气藏开发难以保障气田持续稳产。因此,亟需提升下古气藏地质认识,加大下古气藏开发力度。

近年来,研究者们在下古致密碳酸盐岩气藏的沉积相、成岩机理、储层展布特征、主控因素及成藏规律等方面已取得了一定的认识,但对该区下古气藏井位优选技术方法有待于深入研究。

为进一步提高苏里格气田东区致密碳酸盐岩天然气开发效益,进而提高气田稳产能力,有必要深入开展下古生界碳酸盐岩气藏井位优选技术研究。笔者利用钻井、测井、录井、岩心、分析化验及试气等动、静态资料,地质与地震相结合,开展沉积相与成岩机理分析、小幅度古构造精细刻画、岩溶古地貌等研究,分析白云岩储层主控因素,预测下古气藏含气富集区,优化布井方法,探索出一种适合苏里格气田下古致密气藏的井位优选技术,进一步提高气田开发效益,降低产能建设风险,为该区块下古气藏开发及产能建设优化部署提供科学依据。

1 区域地质简况

苏里格气田东区下古生界碳酸盐岩气藏主要有奥陶系马家沟组蒸发潮坪沉积的风化壳岩溶型气藏和潮间及潮下沉积的岩性气藏;气藏埋深一般为3 000~3 700 m(刘燕,2011;李振宏,2006),主要产气层位是马五₁₊₂、马五₄¹和马五₅储层。由于加里东风化壳层储层遭受长期的风化淋滤作用,马家沟组自东向西逐层剥露,形成了孔、洞、缝发育、非均质性强、储渗关系复杂的储层,侵蚀沟槽分布复杂,构造为小于2°的西倾单斜,平均坡降4~5 m/km西倾单斜(谢锦龙,2013;苏中堂,2011)。在平缓西倾大单斜上,发育多排轴向北东—南西小幅度的鼻状构造,构造类型多样,地层及储层厚度变化大,储层厚度为

19~26m,气层厚度为3~20 m,孔隙度为4%~10%,渗透率为 $0.1\times10^{-3}\sim14.5\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,含气饱和度为30%~80%,无阻流量为 $1.0\times10^4\sim231\times10^4\text{m}^3/\text{d}$,平均无阻流量为 $18.6\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

2 下古井位优选技术

2.1 井位优选技术研究思路

该技术以地震、测井、地质、气藏工程相结合,综合应用钻井、测井、分析化验、试气等动静态资料,通过沉积相与成岩机理分析、小幅度古构造精细刻画、岩溶古地貌研究,明确白云岩储层主控因素,探索下古气藏天然气富集规律。地质与地震相结合,应用储层地震综合预测技术,通过常规剖面波形分析以及高频吸收分析综合预测储层发育规模与含气性,并开展下古储层综合评价,优选出天然气富集区,优选井位坐标,优化部署下古气藏产能建设,技术研究思路如图2所示。

2.2 天然气富集区筛选技术

2.2.1 沉积微相研究

沉积相对储层发育有着重要的控制作用,控制着白云岩及有效储层的分布(于洲,2012;霍勇,2012)。早奥陶世,研究区马五段地层处在潮坪环境中,上组合(马五₁—马五₄)沉积时期,处于高频海平面变化的低水位时期,整体处在潮上—潮间带碳酸盐蒸发沉积环境中,海水的进退以及蒸发浓缩作用导

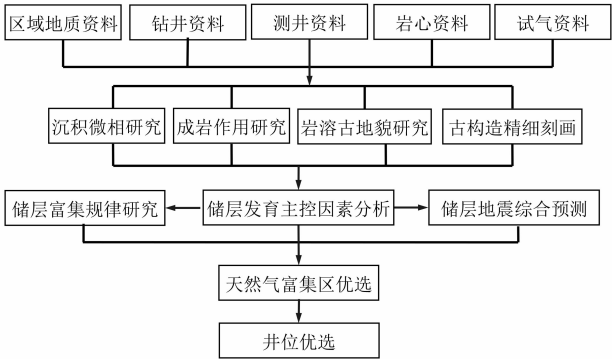
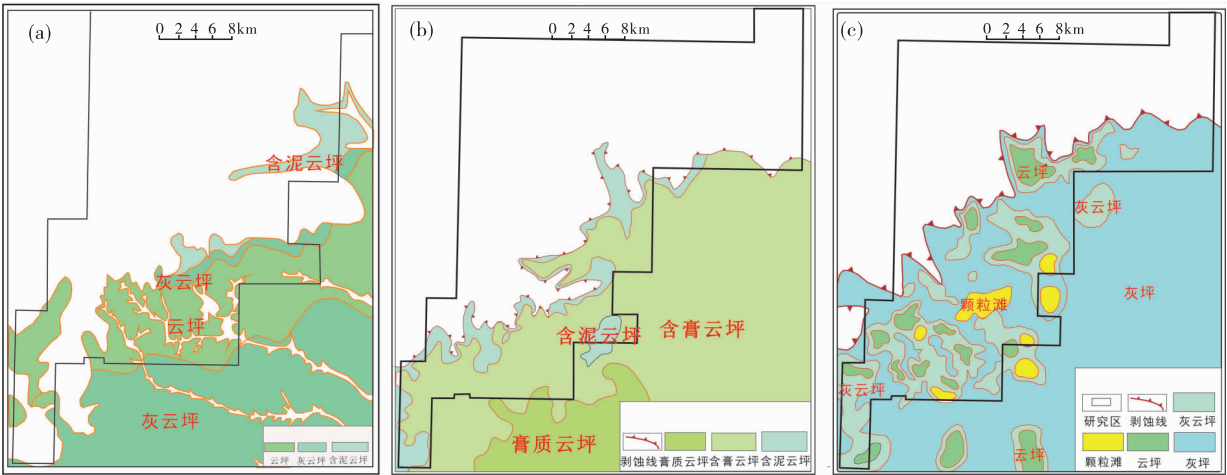


图2 苏里格气田东区下古气藏井位优选技术思路图
Fig.2 The flow chart of deployment of development well site for lower paleozoic in the east of Sulige gas field

致膏云坪和云坪广泛发育,易溶膏盐矿物含量高,成为最有利的沉积微相(图3A、图3C)(白慧,2017)。中组合马五₅段沉积时期,苏里格气田为台地潮坪相,北部主要为潮上带沉积,中南部主要为潮间及潮下沉积,总体以灰坪、灰云坪沉积微相为主,最有利的沉积微相是颗粒滩(图3B)(于洲,2012)。通过综合分析研究区在整个盆地中的位置、岩心观察和薄片鉴定,认为马五₁₊₂白云岩在含膏云坪、云坪分布为主,灰云坪次之;马五₄¹白云岩在含膏云坪分布为主,而在剥蚀线附近的含泥云坪分布较少;马五₅白云岩主要在潮间和潮上带粒屑滩,云坪为主要有利沉积微相带上。



A. 苏东马五₁₊₂沉积相图;B. 苏东马五₄¹沉积相图;C. 苏东马五₅沉积相图

图3 鄂尔多斯盆地苏东区块马五沉积相平面图

Fig.3 Sedimentary facies of Ma5₁₋₅ member of eastern Sulige gas field in Ordos basin

2.2.2 成岩作用研究

成岩作用是储层储集空间和储集性能的关键(苏中堂,2011;王保全,2009)。白云岩化作用使碳酸盐岩孔隙度增大,岩石类型增多,所形成的含硬石膏结核白云岩、含石膏晶体白云岩增强了储层的可溶性,不仅改善了储集性能,为后期的溶蚀作用创造了有利条件,也为风化壳溶孔型储层的发育奠定了物质基础(杨西燕,2015,黄擎宇,2010)。上组合(马五₁—马五₄)储层白云岩化作用主要有准同生期蒸发泵白云岩化和同生、成岩早期渗透回流白云石化,以准同生泥粉晶白云岩及含硬石膏结核白云岩为主;中组合马五₅白云岩化作用主要包括准同生白云岩化和浅埋藏成因白云岩化作用,一般以粉-细晶白云岩为主。在成岩早期发生的准同生白云岩化形成的原生孔隙不易保存,不能形成有效孔隙。在浅埋藏成岩期发生埋藏白云岩化作用,形成集性能良好的晶间孔,同时压实压溶作用形成缝合线构造;以及在表生成岩期,奥陶系经加里东运动整体抬升,并遭受了长期的风化剥蚀淋滤作用,形成次生溶蚀孔、洞缝,为天然气运移提供良好的通道,对白云岩化作用后储层的改造和最终形成至关重要;加里东运动后期,苏里格气田又一次接受沉积,进入后埋藏成岩期,在煤系地层的压实作用下,富 Mg^{2+} 卤水沿着晶间孔、溶蚀孔洞、缝进入下覆地层,发生不同程度的溶蚀作用,导致溶孔、洞、缝进一步扩大。但随着埋藏深度不断扩大,压实和重结晶作用使原生孔隙大量丧失,导致储层更加致密。

2.2.3 岩溶古地貌研究

晚奥陶世,加里东运动使华北台地整体抬升,经历了长期的沉积间断,马家沟组顶部经受长期的风化剥蚀及淋滤作用,形成一个区域性的大型古侵蚀面,呈现出高低起伏的岩溶地貌(何自新,2003;代金友,2005)。中石炭世,盆地又整体沉降,接受了海陆交互相沉积,对古地貌起到填平补齐的作用(赵卫卫,2011)。经研究认为,利用印模法和古地质法相结合,恢复前石炭系古地貌相对准确。根据石炭系太原组马儿沟灰岩填平补齐作用,经石炭系厚度去压实校正,结合前石炭系古地质特征,地质、地震相结合,恢复出前石炭系岩溶古地貌是西高东低分布格局,盆地内自西向东形成了岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶盆地等3个地貌单元(代金友,2005)。苏里格气田东区主体处于岩溶斜坡上,地势起伏相对较大,

局部发育古残丘和古沟槽。

经综合地质研究认为,岩溶古地貌控制了储层的发育程度(张添锦,2017)。在残丘的边缘地带,溶蚀孔、洞比较发育,它们与溶蚀沟槽为天然气进入储层提供了通道。因此,有效白云岩储层主要分布在岩溶残丘、沟槽与残丘的风化淋滤带,成为天然气富集的有利区。在剥蚀线附近,储层孔隙充填程度高,有效储层分布的较少。而处于古沟槽的主力层剥蚀强烈,充填作用也强,不利于天然气的富集;古洼地受淋滤作用较弱,储层致密,不利于成藏,所以低产井主要分布在古沟槽和古洼地。在区域剥蚀带上,中组合马五₅上覆地层较薄,准同生期古地形高部位有利于白云岩化作用,形成透镜体白云岩,具有成藏优势,是马五₅高产气井有利区域。

截止2019年12月底,苏里格气田东区单试下古气井217口,无阻流量 $>50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产井33口,其中有24口高产气井处于古坡地上(图4)(表1),占高产气井73%。钻遇无阻流量 $<2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产井有117口,其中58口无产能井,有75%的低产井及约72%的无产能井在洼地和沟槽上。由此可见,古残丘以及古残丘—古沟槽之间的过渡地带最有利于天然气富集,古沟槽、古洼地不利于天然气富集。

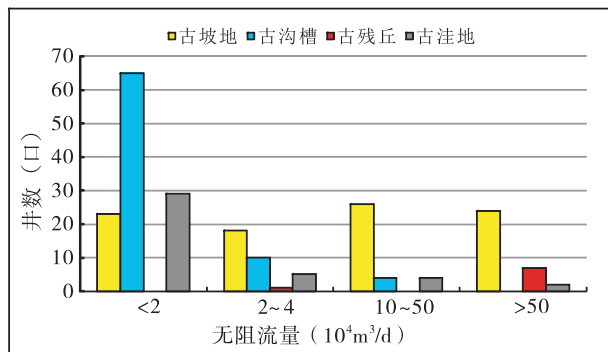


图4 古地貌单元与试气产量关系图

Fig. 4 The relationship between the geomorphic units and test gas yield, Ordos basin

2.2.4 古构造精细刻画

在印支、燕山运动以后,苏里格气田东区原来东倾的单斜构造发生整体反转,形成了地层倾角小于 2° 的西倾斜坡,平均坡降为 $4 \sim 5 \text{ m/km}$ 。在平缓西倾大单斜上,发育多排轴向北东—南西的小幅度的鼻状构造,鼻状隆起的轴线走向为北东向(谢锦龙,

表 1 岩溶古地貌与高产井的关系表
Tab. 1 The relationship between the geomorphic units and high yield-wells, Ordos basin

序号	井号	出露层位	无阻流量 (10 ⁴ m ³ /d)	古地貌位置
1	SX1	马五 ₄ ²	51.76	古坡地
2	SX2	马五 ₁ ³	54.05	古坡地
3	SX3	马五 ₃ ³	64.22	古坡地
4	SX4	马五 ₁ ²	67.35	古坡地
5	SX5	马五 ₁ ²	75.97	古坡地
6	SX6	马五 ₄ ²	77.36	古坡地
7	SX7	马五 ₃ ¹	93.38	古坡地
8	SX8	马五 ₄ ³	58.69	古坡地
9	SX9	马五 ₄ ²	150.73	古坡地
10	SX10	马五 ₂ ¹	174.03	古坡地
11	SX11	马五 ₄ ²	231.65	古坡地
12	SX12	马五 ₄ ¹	454.71	古坡地
13	SX13	马五 ₄ ²	51.27	古坡地
14	SX14	马五 ₂ ¹	96	古坡地
15	SX15	马五 ₁ ²	55	古坡地
16	SX16	马五 ₃ ³	113	古坡地
17	SX17	马五 ₃ ³	142	古坡地
18	SX18	马五 ₃ ³	213	古坡地
19	SX19	马五 ₄ ³	212	古坡地
20	SX20	马五 ₄ ³	185	古坡地
21	SX21	马五 ₄ ³	130	古坡地
22	SX22	马五 ₁ ³	50.5	古坡地
23	SX23	马五 ₁ ²	60.7	古坡地
24	SX24	马五 ₁ ³	107.5	古坡地
25	SX25	马五 ₃ ³	135.44	残丘
26	SX26	马五 ₁ ³	61.45	残丘
27	SX27	马五 ₃ ²	121.50	残丘
28	SX28	马五 ₃ ³	125.25	残丘
29	SX29	马五 ₁ ¹	51.96	残丘
30	SX30	马五 ₁ ³	110.2	残丘
31	SX31	马五 ₃ ³	122.3	残丘
32	SX32	马五 ₁ ¹	61.08	洼地
33	SX33	马五 ₁ ⁴	88.34	洼地

2013)。通过研究古构造对储层物性的影响程度,构造对储层孔隙度和含气饱和度的影响相对较小,对储层渗透率的影响较大,该区试气无阻流量较高的井主要分布在鼻隆和鼻翼部位。截止 2019 年 12 月,苏里格气田东区共钻遇无阻流量大于 50 × 10⁴ m³/d 的高产下古气井 33 口,其中分布在鼻隆和鼻翼的高产气井 25 口,占总井数的 76%;分布在鼻凹部位的气井 9 口,占 27%,表明构造对下古气藏天然气的富集有一定的控制作用,构造高部位有利于成藏(图 5)。

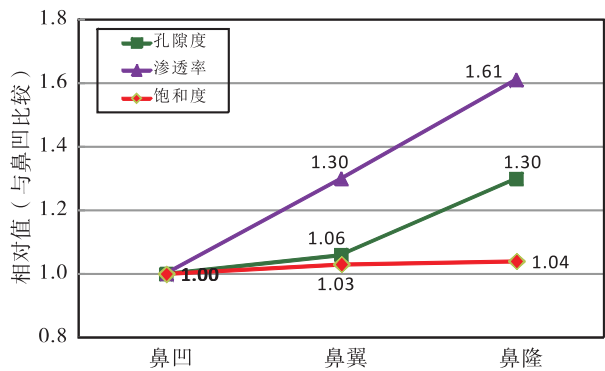


图 5 构造部位对储渗参数的影响程度图

Fig. 5 Diagram of the influence of structural sites on the storage and permeability parameters

2.3 储层地震综合预测

储层地震综合预测是充分利用地震、地质测井资料,地质和地震相结合,通过常规剖面波形分析以及高频吸收分析综合预测储层规模与含气性,利用部署井的实钻效果进行地质分析,并验证和检验地震和地质研究成果认识,从而精细刻画有效储层分布特征,寻找有效储层展布规律。再依据研究区振幅随偏移距增大而增强的特点,在波形剖面上对比分析,寻找有效储层目标区,筛选出有利富集区,为气田产能建设提供建产有利目标区。苏里格气田东区天然气开发坚持上、下古气藏立体开发,一次性整体动用地质储量,本次研究只针对下古气藏开发,地震储层预测只是流程图的其中一部分技术(图 6)。

由于苏里格气田东区奥陶系马家沟组发育了多条复杂的树枝状侵蚀沟槽(贺训云,2014;代金友,2005),地质预测难度较大。利用地震储层预测技术精细解释侵蚀沟槽(图 7),以地震波形分类技术为基础,根据波形特征在碳酸盐岩剥蚀面存在的差异,判断侵蚀沟槽的分布和储层岩性特征,预测沟槽和

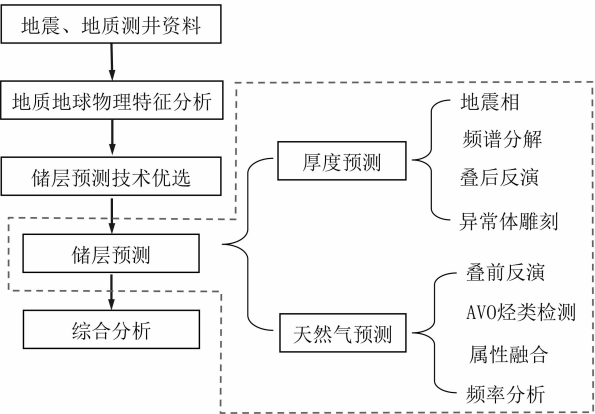


图 6 地震储层预测流程图

Fig. 6 The flow chart of the seismic reservoir synthesis forecast

地台。含气储层地震波响应频率越高,衰减越大,在其他条件相同的情况下,含油气后高频成分更容易被吸收(畅永刚,2008;畅永刚,2012)(图 8),并与地质认识相互印证,综合判识有效储层的展布情况。由于研究区下古气藏有效储层厚度变化大,地层埋藏深,沙漠覆盖区老等现场实际复杂情况,地震分辨能力受到挑战。通过精细地震、地质综合研究,深化储层地质定性分析,在开发实践中不断验证,完善有效储层分布。

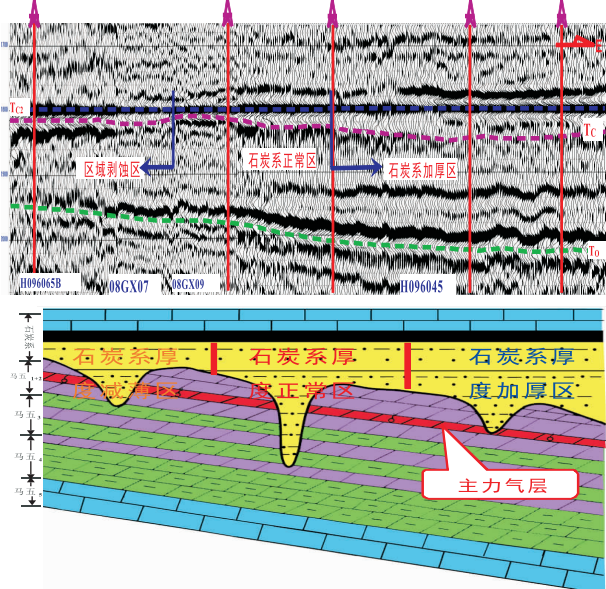


图 7 地震技术预测古地貌图

Fig. 7 Seismic technology predict the palaeo-geomorphology

波形分析是通过目标区常规剖面的波形分析,根据目的层顶、底面振幅的强弱和时差大小,确定该目标区目的层砂体发育规模与含气性(图 7),从而提高有效储层钻遇率,提高气田开发效果。

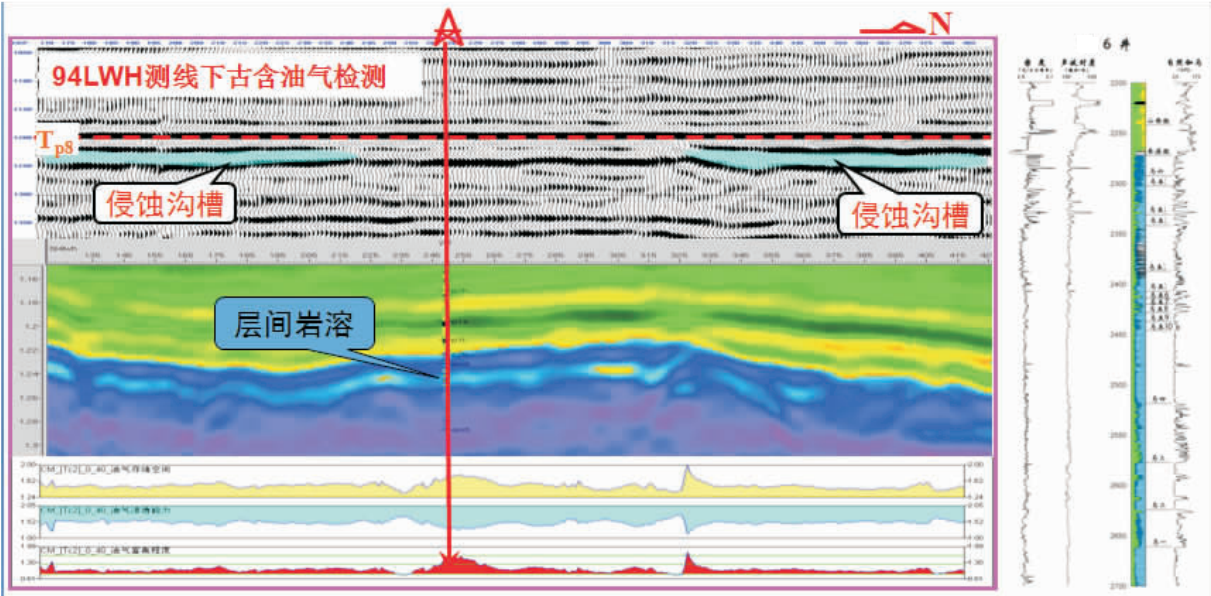


图 8 地震解释沟槽及预测储层情况图

Fig. 8 Seismic technology predict the reservoir and explain the groove situation

3 应用效果

在前人地质研究成果认识的基础上,应用上述下古致密碳酸盐岩气藏井位优选技术,综合利用地震、测井、录井、试气生产等静态和动态基础资料,从沉积相、成岩作用、岩溶古地貌及古构造等多角度入手,明确白云岩储层分布的主要控制因素,探索出有效储层展布规律,确定天然气有利富集区主要分布在岩溶古地貌残丘、斜坡、残丘与沟槽之间的过渡带,以及水下隆起的高部位,优选出下古气藏Ⅰ类+Ⅱ类优质储层(表 2)。通过地震储层综合预测技术,依据振幅随偏移距增大而增强的特点,在波形剖面上对比分析,地质、地震综合研究,综合预测白云岩储层发育规模,并在气田开发实践中不断检验和修正研究成果认识,精细储层描述,精准刻画白云岩展布特征,优选出天然气有利富集区(图 9),指导气田下古气藏的产能建设。

表 2 苏里格气田东区下古储层富集区优选表
Tab. 2 The optimization of the lower Paleozoic reservoir enrichment area in the east of Sulige gas field

类型	层位	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
孔隙度 $\varphi(\%)$	马五 ₁₊₂	>6.3	4~6	2.5~4
	马五 ₄ ¹	>8	2.5~8	<2.5
	马五 ₅	>8	2.5~8	<2.5
渗透率 K ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	马五 ₁₊₂	>0.2	0.2~0.04	0.04~0.01
	马五 ₄ ¹	>0.5	1~0.25	0.25~0.01
	马五 ₅	>0.5	1~0.25	0.25~0.07
无阻流量 ($10^4\text{m}^3/\text{d}$)	马五 ₁₊₂	>20	20~5	<5
	马五 ₄ ¹	>10	4~10	<4
	马五 ₅	>10	4~10	<4
有效厚度(m)	马五 ₁₊₂	>4	2~4	<2
	马五 ₄ ¹	>3	1~3	<1
	马五 ₅	>6	4~6	<4

苏里格气田东区坚持上、下古气藏立体开发,利用一套开发井网纵向上兼顾两类气藏开发,针对上组合薄层风化壳气藏和中组合厚层块状气藏采用不同的开发对策,在充分考虑井网井距、地面工程系统布局以及储量动用程度等气田开发的实际情况下,在优选天然气富集区内,优化部署下古气藏井位坐

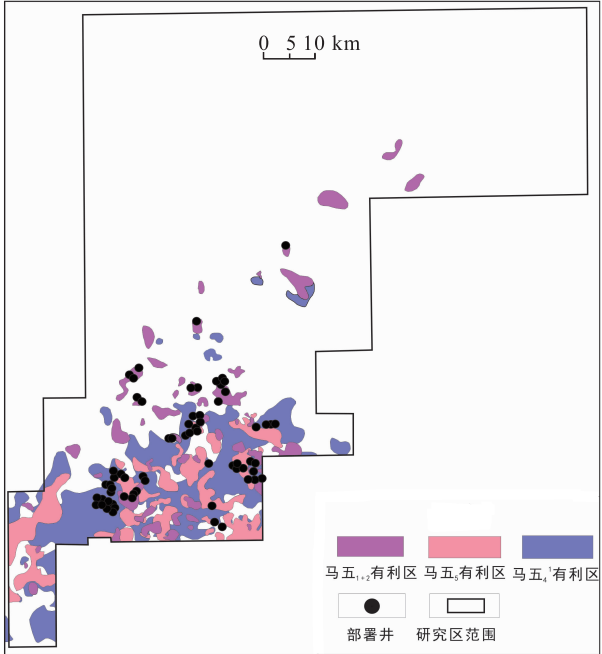


图 9 苏里格气田东区下古储层富集区及井位部署图
Fig. 9 The chart of the lower Paleozoic reservoir enrichment area and deployment of well site in the east of Sulige gas field

标。由于上组合(马五₁—马五₄)储层受岩溶古地貌主控,主要在古沟槽两侧的斜坡带以及古残丘地貌位置部署井位;中组合马五₅储层在白云岩预测的基础上,优先在古地貌高部位和构造高点甩开评价,在已落实马五₅有利区实行扩边优化部署。2019 年,该区块应用下古气藏井位优选技术,共优化部署下古井 74 口(图 7),有效储层钻遇率达 70.3% 以上,平均无阻流量为 $19.3\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,平均无阻流量是上古生界气井的 3~4 倍,其中 4 口下古井成功斩获 $100\times 10^4\text{m}^3$ 以上的高产工业气流,最高无阻流量达 $213\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ (SX18)。下古气藏开发效果显著,助推了苏里格气田东区Ⅰ+Ⅱ类井比例逐年攀升,较产建初期提高了 7.3 个百分点。该技术应用效果良好,为苏里格气田东区的高效开发做出了突出的贡献。

4 结论

(1)沉积环境控制了有效储层的发育,前石炭纪岩溶古地貌和成岩作用是下古气藏天然气富集的关键因素。

(2)通过区块储层及有效储层展布规律分析,并结合地震储层,预测有利目标区,进行井位优化部署,下古气藏储层钻遇率有效提高,开发效果良好。

(3)富集区筛选是提高开发效果的最有效手段,明显降低了产能建设的风险和投资成本,为产能建设任务的圆满完成和苏里格气田长期持续稳产的实现提供有力保障。

(4)勘探开发实践证明,苏里格气田东区下古致密气藏井位优选技术研究思路和方法正确,适合苏里格气田东区下古气藏的开发,为同类气藏的有效开发提供了借鉴和依据。

参考文献(References):

张明禄,卢涛,王勇.长庆气田下古生界气藏高产富集规律和高产井筛选[J].中国石油勘探,2001,6(4):50-56.

ZHANG Minglu, LU Tao, WANG Yong. High-yield enrichment and screening of high-yield wells in the lower Paleozoic gas reservoirs in Changqing gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2001,6(4):50-56.

杨华,刘新社,张道锋.鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J].天然气工业,2013;33(5):1-12.

YANG Hua, LIU Xinshe, ZHANG Daofeng. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 2013;33(5):1-12.

魏新善,陈娟萍,张道锋,等.鄂尔多斯盆地东部大面积致密碳酸盐岩气地质特征及成藏条件分析[J].天然气地球科学,2017,28(5):677-686.

WEI Xinshan, CHEN Juanping, ZHANG Daofeng, et al. Geological characteristics and reservoir forming area tight carbonate gas in eastern Ordos's conditions of large Basin[J]. China Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5):677-686.

苏中堂,陈洪德,欧阳征健,等.鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J].中国地质,2012,39(3):623-633.

SU Zhongtang, CHEN Hongde, OUYANG Zhengjian, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Geology in China, 2012,39(3):623-633.

刘燕,付金华,李建明.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组白云岩成因机理分析[J].石油天然气学报,2011,33(11):46-50.

LIU Yan, FU Jinhua, LI Jianming. Origin of dolomite in Majiagou Formation of Ordovician, east of Ordos Basin

[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011,33(11):46-50.

李振宏,王欣,杨遂正,等.鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶储层控制因素分析[J].现代地质,2006,20(2):229-307.

LI Zhenhong, WANG Xin, YANG Suizheng, et al. Analysis of Control Factors of Ordovician Karst Reservoir in Ordos Basin[J]. Geoscience, 2006,20(2):229-307.

谢锦龙,吴兴宁,孙六一,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段岩相古地理及有利区带预测[J].海相油气地质,2013,18(4):23-32.

XIE Jinlong, WU Xinning, SUN Liuyi, et al. Lithofacies Palaeogeography and Potential Zone Prediction of Ordovician Majiagou Member—5 in Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013,18(4):23-32.

苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J].岩石学报,2011,27(8):2230-2238.

SU Zhongtang, CHEN Hongde, XU Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(8):2230-2238.

于洲,孙六一,吴兴宁,等.鄂尔多斯盆地靖西地区马家沟组中组合储层特征及主控因素[J].海相油气地质,2012,17(4):49-56.

YU Zhou, SUN Liuyi, WU Xinning, et al. Characteristics and controlling factors of the middle array of Ordovician Majiagou reservoirs to the west of Jinbian Gas Field, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012,17(4):49-56.

霍勇,罗顺社,庞秋维,等.鄂尔多斯台地靖边潜南部中奥陶统马五₂¹岩相古地理[J].中国地质,2012,39(1):86-95.

HUO Yong, LUO Shunshe, PANG Qiuwei, et al. Lithofacies Paleogeography of Middle Ordovician Ma5₁² in Jingbian tableland, Ordos platform[J]. Geology in China, 2012,39(1):86-95.

白慧,颜学成,王龙,等.苏里格气田东区奥陶系马家沟上组合储层特征及主控因素分析[J].西北地质,2017,50(2):207-213.

BAI Hui, YAN Xuecheng, WAN Long, et al. Analysis on the main controlling factors and characteristics of the upper combination of Ordovician Majiagou Formation in the eastern part of Sulige gasfield[J]. Northwestern Geology, 2015,48(1):221-228.

苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J].岩石学报,2011,27(8):2230-2238.

SU Zhongtang, CHEN Hongde, XU Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou

- dolomites in Ordovician, Ordos, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 7(8): 2230-2238.
- 王保全, 强子同, 张帆, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段白云岩的同位素地球化学特征[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 472-479.
- WANG Baoquan, QIANG Zitong, ZHANG Fan, et al. Isotope characteristics of dolomite from the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation, the Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 472-479.
- 杨西燕, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组马五段亚段白云岩类型及稳定同位素特征[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(4): 650-656.
- YANY Xiyan, BAO Hongping, REN Junfeng, et al. Types of dolomites and characteristics of stable Isotope from the Ma 5₁ sub-member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(4): 650-656.
- 黄擎宇, 张峭楠, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云岩成因研究[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(2): 147-153.
- HUANG Qingyu, ZHANG Shaonan, DING Xiaoqi, et al. Origin of dolomite of Ordovician Majiagou Formation, western and southern margin of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(2): 147-153.
- 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- HE Zixin. The evolution and Petroleum of Ordos basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- 代金友, 何顺利. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系古地貌研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(3): 37-43.
- DAI Youjin, HE Shunli. Ordovician paleokarst landform of Central Gas Field in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(3): 37-43.
- 赵卫卫, 王宝清. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. *地球学报*, 2011, 32(6): 681-690.
- ZHAO Weiwei, WANG Baoqing. Geochemical characteristics of dolomite from 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2011, 32(6): 681-690.
- 张添锦, 王云. 鄂尔多斯盆地岩溶古地貌恢复与天然气富集关系—以高桥地区奥陶系马家沟组马五段为例[J]. *西北地质*, 2017, 50(2): 207-213.
- ZHANG Tianjin, WANG Yun. The Relationship between Karst Palaeogeomorphology Recovery and Gas Enrichment in Ordos Basin: Example from Mawu Section of Ordovician Majiagou Formation in Gaoqiao Area [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 207-213.
- 贺训云, 寿建峰, 沈安江, 等. 白云岩地球化学特征及成因—以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 1-10.
- HE Xunyun, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Geochemical characteristics and origin of the dolomite: A case study from the middle assemblage of Majiagou Formation Member 5th of the west of Jinbian Gas Field, Ordos Basin, North China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 1-10.
- 畅永刚, 桂志先, 张宗和, 等. 多参数地震属性分析技术在储层预测中的应用—以 NP 地区为例[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(1): 244-246.
- CHANG Yonggang, GUI Zhixian, ZHANG Zonghe, et al. Application of multi-parameter seismic attribute analysis in reservoir prediction [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(1): 244-246.
- 畅永刚, 史松群, 赵玉华, 等. 基于 SVD 法三维地震属性优化技术在苏里格气田含气性预测中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(3): 596-601.
- CHANG Yonggang, SHI Songqun, ZHAO Yuhua, et al. Application of optimization technology of SVD-based 3D seismic attribution in gas bearing prediction of Sulige gas field [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 596-601.
- 王勇, 王宏, 王彩丽, 等. 靖边气田优化布井技术及其在产能建设中的应用[J]. *天然气工业*, 2002, 22(6): 80-83.
- WANG Yong, WANG Hong, WANG Caili, et al. Used for Jingbian gas field and its application in productivity construction [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(6): 80-83.
- 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩成因及分布规律[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(6): 600-604.
- ZHENG Jianfeng, SHEN Anjiang, LIU Yongfu, et al. Origin and distribution of dolomite in Cambrian-Ordovician, Tarim Basin, China [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(6): 600-604.
- 杨俊杰, 裴锡古. 中国天然气地质学(卷四)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- YANG Junjie, FEI Xigu. China natural gas geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- 洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律[J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 99-110.
- HONG Haitao, TIAN Xingwang, SUN Yiting, et al. Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 99-110 (in Chinese with English abstract).