

苏里格致密砂岩气田潜力储层特征及可动用性评价

王国亭,贾爱林,闫海军,郭智,孟德伟,程立华

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:苏里格气田开发已全面进入稳产阶段,后备优质储量资源相对不足,对低于物性下限标准的储层进行潜力储层筛选并评价其开发可动用性,具有重要意义。面对气田致密砂岩储层分类不尽完善的问题,继承性开展了储层系统性综合评价,将储层划分成5大类6种类型,并明确Ⅲ₂类储层是未来最具有开发潜力的储层类型。潜力储层形成主控于同砂岩粒度密切相关的储层物性,即发育于高能心滩-辫状河道微相中上部、中-低能心滩-辫状河道微相主体及中下部物性较差的中-细粒岩相部分。总结了潜力储层的6种发育模式,提出了间接动用、组合动用和直接动用等3种开发动用方式。可动用性评价表明,直接和间接动用方式开发效果相对较好,潜力储层具备较好的开发前景。潜力储层特征及可动用性评价可为未来此类储层开发提供有力支撑。

关键词:可动用性评价;潜力储层;储层评价;致密砂岩;苏里格气田

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and recoverability evaluation on the potential reservoir in Sulige tight sandstone gas field

Wang Guoting, Jia Ailin, Yan Haijun, Guo Zhi, Meng Dewei, Cheng Lihua

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Sulige tight sandstone gas field has been in the stable production stage. However, the remaining undeveloped high-quality gas reserves is not sufficient for long term stable production. It is of great significance to utilize potential reservoirs which are below current quality cut-offs, and to evaluate their recoverability to increase gas resources for long term production. Considering that the present reservoir classification criteria is not sufficient, a new comprehensive evaluation criterion of tight sands reservoir is established. Tight sandstone reservoir in Sulige gas field can be divided into 5 categories (6 types), and the Ⅲ₂ type is the most potential reservoir for future development. The potential reservoir is mainly controlled by their physical properties, which in turn related to grain size. The reservoir is fine-middle grained sandstone which belongs to middle-upper part of high-energy channel bar-braided channel, and middle-lower part of low-energy channel bar-braided channel. 6 types of formation pattern and 3 kinds of development modes (indirect, combined and direct) for the potential reservoir are also summarized. Recoverability evaluation reveal the relatively good results for direct and indirect method. This potential reservoir characterization and recoverability evaluation can provide a reliable basis for future potential reservoir development.

Key words: recoverability evaluation, potential reservoir, reservoir evaluation, tight sandstone, Sulige gas field

中国致密砂岩气具有巨大的资源潜力和可观的储量规模,分布于鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地和塔里木盆地等沉积盆地。位于鄂尔多斯盆地的苏里格气田是我国目前储量和产量规模皆最大的气田^[1-2],累计探明储量达 $4.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,近年来产量超过 $220 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。“十一五”和“十二五”期间,气田探明储量的提交以孔隙度5%,渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气饱和

度50%为储层物性下限,当前开发动用的重点目标也是针对高于物性下限标准的有效类砂体,即“甜点”进行的^[3]。

经过10余年的开发建设,苏里格气田在经历了开发早期评价、规模效益开发和快速上产等3个阶段后,目前已全面进入稳产期。致密气田主体采用衰竭式开发,由于气井产量递减快,稳产期间每年需新动大量储

收稿日期:2016-08-15;修订日期:2017-08-21。

第一作者简介:王国亭(1982—),男,博士、工程师,低渗致密气藏开发与评价。E-mail:wgting@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05015)。

量以弥补递减。受地层水、储层品质降低和地面保护区等因素的影响,剩余可开发动用的优质储量不断减少,后备优质储量相对不足是气田实现长期稳产面临的关键问题^[4-7]。随着“甜点”类储层的普遍动用,“非甜点”类储层中蕴含的致密气资源将会逐渐受到重视,开发工艺的进步也将助推此类资源的开发。本文通过对苏里格气田低于下限标准的“非甜点”储层开展评价,优选出具备开发潜力的储层并进行可动用性分析,以期为气田可动资源的扩大和长期稳产提供支撑。

1 基本地质特征

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地北部,构造位置属伊陕斜坡,勘探面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要目的层段为二叠系下石盒子组8段(盒8段)和山西组1段(山1段)。随着开发的持续深入,针对气田的储层地质的认识逐渐清晰^[8-16],总体可概括为以下3个方面。

1.1 砂岩致密且普遍含气

苏里格气田储层总体致密,砂岩厚度大且表现为普遍含气特征,“甜点类”有效砂体呈“透镜状”包裹于厚层状、物性差的基质砂岩中。实验分析表明,85%以上样品的覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,按致密气国家评价标准(GB/T 30501—2014),苏里格气田整体属致密砂岩气田。目的层段沉积期,盆地北部因发育多个大型辫状河水系而形成广泛分布的厚层辫状河复合砂体,受普遍发育的煤系源岩影响砂体具有普遍含气的特征,砂体富气程度与其物性呈正相关关系。有效砂体发育于辫状河心滩、河道沉积微相中物性较好的粗粒砂岩部分,其含气饱和度高于基质砂体。

1.2 有效砂体规模小且空间多层叠置连片分布

有效砂体规模较小,横向连通性差,多层发育的有效砂体空间上呈非连通性叠置,平面上表现出广泛分布的特征。密井网精细解剖、野外露头及干扰试井等综合分析表明,苏里格气田有效砂体规模相对较小,有效单砂体厚、宽、长的主要范围分别为1~5 m,200~500 m和400~700 m,其中长小于700 m,宽小于500 m的比例达70%。单井可钻遇2~4个有效单砂体,井间多不连通,呈多层孤立状分散于三维空间,平面上有效砂体多期叠合分布,平面上表现为大面积连片的特征,展布面积可达上万平方千米。

1.3 储量丰度低且平面差异性大

气田储量丰度范围为 $(0.5 \sim 2.6) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,

平均约为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,总体偏低,平面差异化分布,优质储量集中分布于气田中部区域,东部与南部区因储层物性变差造成储量品质降低,西部及北部局部区储量受水影响严重。目前主要选取丰度大于 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的富集区进行开发,富集区呈连片状分布于气田中部区,东区与南区呈分散状分布,而西区约50%的气井受水影响严重,总体为富水储量区,难以整体效益开发。

2 储层系统划分与潜力储层筛选

2.1 储层系统划分

先前苏里格气田储层研究的重点侧重于有效砂体,而对低于物性下限的储层未开展相关研究,因此储层系统分类并不完善,难以满足气田未来深入开发的需求。基于有效砂体研究取得的成果认识,继承性开展苏里格气田致密砂岩储层系统评价,重点剖析低于物性下限标准的基质类储层。

基于10 789块样品的物性实验数据,对气田储层的常压孔、渗关系进行了系统分析。分析发现,常压孔隙度为2.5%和5%两处对应的常压渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在孔渗半对数坐标上(2.5%, $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和(5.0%, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)处表现出两个明显转折拐点,孔渗关系呈现3段式特征(图1)。孔渗关系的阶段性差异变化是储层储集、渗流性能差异的综合体现,可作为储层系统分类的基础。基于此,将上述两拐点作为储层类型划分的关键点,(5%, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)恰是目前界定有效砂岩的下限标准点,(2.5%, $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)可作为含气基质储层进一步细分的界限点。而针对高于下限标准的有效砂岩,紧密结合生产特征,将其在(10%, $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和(12%, $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)两处进行进一步细分。綜上述,依据孔渗关系将苏里格气田储层划分为I—V等5种基本类型(表1)。

核磁共振和气驱水实验等综合分析表明,含气饱和度和同常压渗透率具有较好正相关关系,渗透率越大含气饱和度越大,束缚水饱和度则越小。同特定渗透率值对应的含气饱和度并非为固定值,而是幅度约为20%~30%区间范围(图2)。对常压渗透率 $<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $(0.5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $>1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层而言,相对应的含气饱和度平均范围分别为 $<25\%$, $25\% \sim 35\%$, $35\% \sim 60\%$, $60\% \sim 70\%$, $>70\%$ 。目前含气饱和度50%是提交探明储量的气饱下限,I,II

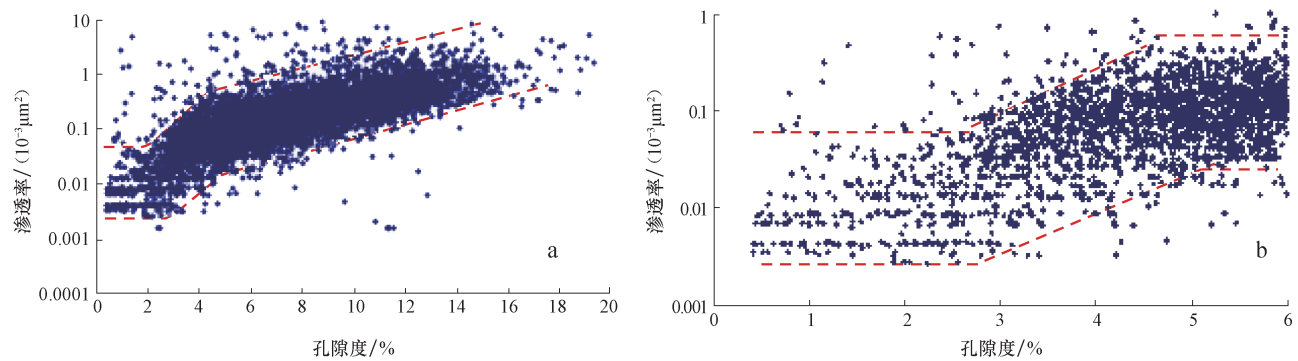


图1 苏里格气田孔隙度-渗透率关系

Fig.1 Relation between porosity and permeability in Sulige gas field
a. 储层整体孔-渗关系;b. 储层局部孔-渗关系

表1 苏里格气田致密砂岩储层综合系统划分

Table 1 Integrated systematic division of tight sandstone reservoir in Sulige gas field

类型	I	II	III		IV	V
			III ₁	III ₂		
岩石类型	含砾粗砂岩、粗砂岩	粗砂岩	粗及中－细砂岩		细－中砂岩及少量粗砂岩	细－粉细砂岩
常压孔隙度/%	>12	12～10	10～5		5～2.5	<2.5
常压渗透率/(10 ^{－3} μm ²)	>1	1～0.5	0.5～0.1		0.1～0.01	<0.01
地层渗透率/(10 ^{－3} μm ²)	>0.5	0.5～0.1	0.1～0.005		0.005～0.000 1	<0.000 1
含气饱和度/%	>70	70～60	60～50	50～35	35～25	<25
密度/(g·cm ^{－3})	<2.34	2.34～2.40	2.40～2.56		2.56～2.64	>2.64
纳米级孔隙比例/%	<65	65～75	75～80		80～98	>98
主要喉道半径/μm	>0.16	0.16～0.13	0.13～0.10		0.10～0.06	<0.06
排驱压力/MPa	<0.5	0.5～1	1～1.5		1.5～2.8	>2.8
最大进汞饱和度/%	>85	85～75	75～60		60～25	<25
启动平方压力梯度/(MPa·cm ^{－2})	<0.3	0.3～0.6	0.6～2.4		2.4～18	>18
开发动用情况	有效储层、“甜点”目前开发动用的主体目标			基质类储层还未开发动用		

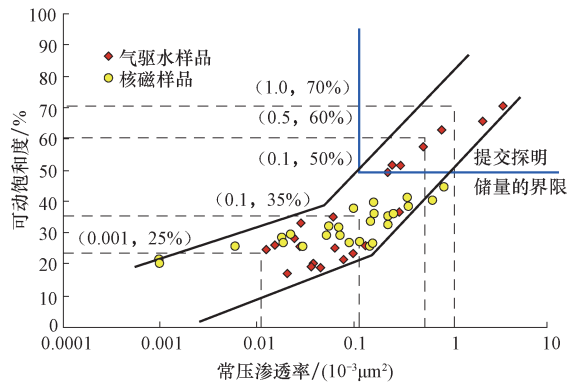


图2 苏里格气田渗透率-含气饱和度关系

Fig.2 Relation between permeability and gas-saturation in Sulige gas field

类储层含气饱和度都大于此标准,而Ⅲ类储层含气饱和度范围为35%~60%,因此以50%为界将Ⅲ类储层进一步细划分为Ⅲ₁和Ⅲ₂两类(表1)。Ⅲ₁类为富气有效储层部分,Ⅲ₂类为含气基质储层部分。

高分辨率场发射扫描电镜和Naco-CT等方法分

析表明,苏里格气田储层纳米级孔隙约占总孔隙空间的主体部分^[17],区分苏里格气田致密砂岩储层微、纳米级孔隙的临界喉道半径为0.5 μm^[3]。以压汞实验分析为对重要手段,对苏里格气田不同类型储层的微、纳米级孔隙的发育程度进行了探讨性分析。对常压渗透率<0.01×10⁻³ μm², (0.01~0.1)×10⁻³ μm², (0.1~0.5)×10⁻³ μm², (0.5~1)×10⁻³ μm², >1×10⁻³ μm²的储层而言,纳米级孔隙体积占比依次约为>98%,80%~98%,75%~80%,65%~75%,>65%(图3)。对基质储层而言,纳米级孔隙空间占总孔隙空间的绝大部分,成为储层储集性能的主要贡献者。

在孔渗、含气饱和度和微-纳米级孔隙比例等关键要素分析的基础上,进一步结合地层覆压渗透率、密度、孔隙结构和启动压力梯度等参数,最终将苏里格致密砂岩储层类型系统划分成5个大类6种类型,其中,I,II,Ⅲ₁类储层是有效储层,Ⅲ₂,IV,V类储层是含气基质储层(表1)。

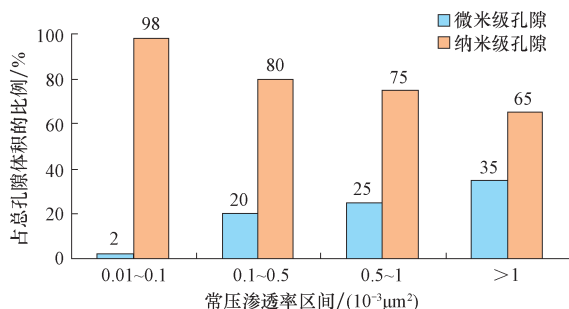


图3 苏里格气田不同类型储层微-纳米级孔隙比例

Fig. 3 Volume ratios between micron-pores and nano-pores in different types of reservoirs

2.2 潜力储层筛选

含气基质类储层厚度大、连通性好且分布广泛,同时蕴含丰富的天然气资源,从其中筛选出具有开发潜力的储层对气田可动储量扩大和长期稳产具有重要意义。以苏里格气田东部 4 450 km² 区域为重点解剖对象,在储层厚度、储量丰度及储量规模等统计分析的基础上开展了潜力储层筛选。

统计表明,Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ₁类有效砂体重叠总均厚为 8.22 m,占砂岩总均厚的 22.33%,储量丰度为 1.11 × 10⁸ m³/km²,占天然气总资源量为 51.63%。有效储层厚度比例虽低却蕴含了大部分天然气资源。Ⅲ₂,Ⅳ,Ⅴ类储层目前还未开发动用,潜力储层主要从此 3 类储层中筛选。Ⅲ₂ 储层均厚为 10.29 m,占砂岩总均厚的 27.95%,储量丰度为 0.77 × 10⁸ m³/km²,占天然气总资源量的 35.81%;Ⅳ类储层均厚为 7.12 m,占砂岩总均厚的 19.34%,储量丰度为 0.22 × 10⁸ m³/km²,占天然气总资源量的 10.23%;Ⅴ类储层均厚为 11.18 m,占砂岩总均厚的 30.37%,储量丰度为 0.05 × 10⁸ m³/km²,占天然气总资源量的 2.32% (图 4)。

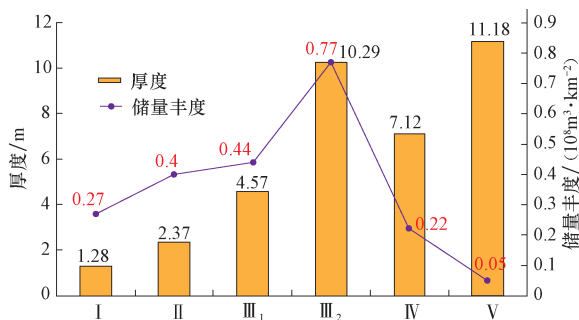


图4 苏里格气田不同类型储层均厚和丰度特征

Fig. 4 Characteristics of average thickness and resource abundance of different types of reservoir in Sulige gas field

分析表明,Ⅲ₂类储层具有厚度大、物性好、储量丰度相对较高和天然气资源相对集中的特点。目前,苏里格气田有效储层探明储量规模为 4.7 × 10¹² m³,据此推算Ⅲ₂类储层内天然气资源基础巨大,蕴含约 2.90 × 10¹² m³ 天然气,是未来最具有开发潜力的储层类型,Ⅳ和Ⅴ类储层厚度虽大,但其内所蕴含的天然气资源量有限,难以成为未来开发潜力储层。

3 潜力储层形成主控因素、发育模式与动用方式

3.1 潜力储层形成主控因素

鄂尔多斯盆地山 1 段和盒 8 段沉积期古气候开始向热带、亚热带干旱气候转变,干旱气候下河流补给以间歇性大气降水为主,在洪水期辫状河水系搬运能力强,沉积物载荷量大,而枯水期水系搬运能力有限^[18]。根据辫状河水体能量的强弱与碎屑组分构成的差异,将苏里格气田目的层段普遍发育的辫状河划分高能辫状河和中-低能辫状河。高能辫状河集中发育于洪水期,由于水体能量较强粗粒、中-细粒碎屑沉积都发育,粗粒碎屑组分主要沉积于高能心滩、高能河道微相中-下部和底部,而中-细粒组分则主要发育于上述微相中上部和上部;中-低能辫状河主要发育于枯水期,由于水体能量偏弱,粗粒碎屑组分不发育,中-细粒沉积组分主要发育于中-低能心滩及河道微相的主体部位(图 5)。

苏里格气田天然气富集受生烃强度、储层物性和微构造幅度等多种因素的综合影响^[5-7,19]。目前气田西部主体及北部部分区受水影响严重,在宏观生烃强度一定的条件下,储层物性对天然气富集起着决定性影响。研究表明,苏里格气田储层物性同砂岩粒度有较好的对应关系,随着砂岩粒度的由粗变细,物性较好储层的发育比例逐渐降低,储层物性逐渐变差(图 6)。有效砂体主要受控于粗粒岩相,主要发育于高能心滩中下部及高能河道底部。潜力储层发育主要受控于中细粒岩相,主要发育于高能心滩及河道的中上部、中-低能心滩及河道的主体部位及中下部(图 5)。

3.2 潜力储层发育模式

3.2.1 有效砂体发育模式

受沉积物源、水动力及古地形等条件控制,苏里格气田辫状河沉积体系可分为辫状河体系叠置带、辫状河体系过渡带和辫状河体系间 3 个宏观相带单元^[20]。

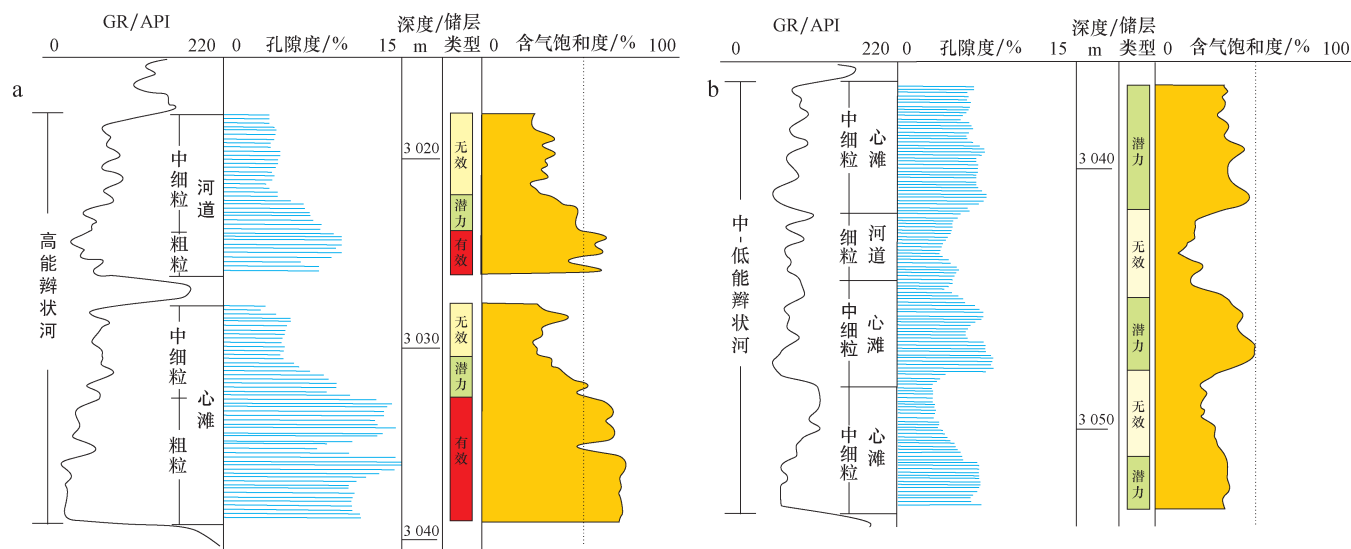


图5 苏里格气田高能和中-低能辫状河含气性、粒度及储层发育特征

Fig. 5 Gas content, sandstone grain size, and reservoir characteristics in high-energy and low-energy braided river reservoirs in Sulige gas field

a. SD30-52井,高能辫状河,潜力储层位于中上部;b. SD29-41井,中低能辫状河,潜力储层位于主体部

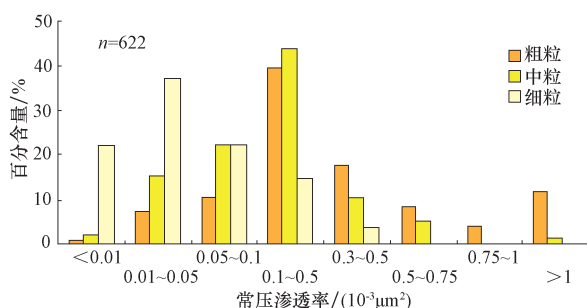


图6 苏里格气田储层物性与粒度相关性

Fig. 6 Correlation between reservoir physical properties and sandstone grain size in Sulige gas field

辫状河体系根据水系能量强弱、沉积物构成、沉积微相类型等可划分为高能辫状河体系和中-低能辫状河体系(图7)。高能辫状河体系叠置带处于古地形最低洼处,为古河道持续发育部位,砂地比大且高能辫状河集中发育,以高能心滩和高能河道等微相为主。中-低能辫状河体系叠置带也处于古地形相对低洼处,砂地比大且以中-低能辫状河集中发育为主要特征,微相以中-低能心滩、中-低能河道等为主,高能微相不发育。辫状河体系间则以泥质沉积为主,砂地比最低,心滩、河道等富砂微相不发育。

密井网解剖及野外露头等综合分析表明,苏里格地区有效砂体的叠置模式可划分为孤立型、垂向叠置型和侧向切割型等3种主要类型。孤立型是苏里格气田有效砂体发育的主体,有效砂体厚1~5 m,横向展布数百米;垂向叠置型指纵向上多个有效砂体相邻或

切割叠置而发育形成的厚层有效砂体,累计厚度可达5~10 m,横向展布可近千米;横向切割型指有效砂体侧向上切割叠置连通,有效砂体厚3~8 m,连通规模可达千米(图7)。

3.2.2 潜力储层发育模式

在高能辫状河体系发育带,潜力储层多与有效砂体相伴发育,因此其发育模式同有效砂体发育紧密相关。以密井网解剖为重要手段,同时紧密结合有效砂体发育模式,总结了苏里格气田潜力储层发育的6种主要模式(图7)。

1) 高能辫状河孤立型

单期高能心滩或河道孤立发育,有效砂体垂、横向上不与其他有效砂体接触。剖面上潜力储层发育于有效砂体中上部及两侧,空间上将单个有效砂体包裹于其中,潜力储层厚度较小。

2) 高能辫状河垂向叠置型

高能心滩或河道垂向上多期发育,多个有效砂体垂向切割叠置或紧密相邻。剖面上潜力储层填充于多个有效砂体之间及两侧,空间上潜力储层将多个有效砂体包裹于其中,潜力储层累计厚度较大。

3) 高能辫状河侧向叠加型

高能心滩或河道侧向上多期切割,多个有效砂体侧向切割连通。剖面上潜力储层分布于侧向连通有效砂体两侧,空间上潜力储层与将有效砂体整体包裹,潜力储层厚度也较大。

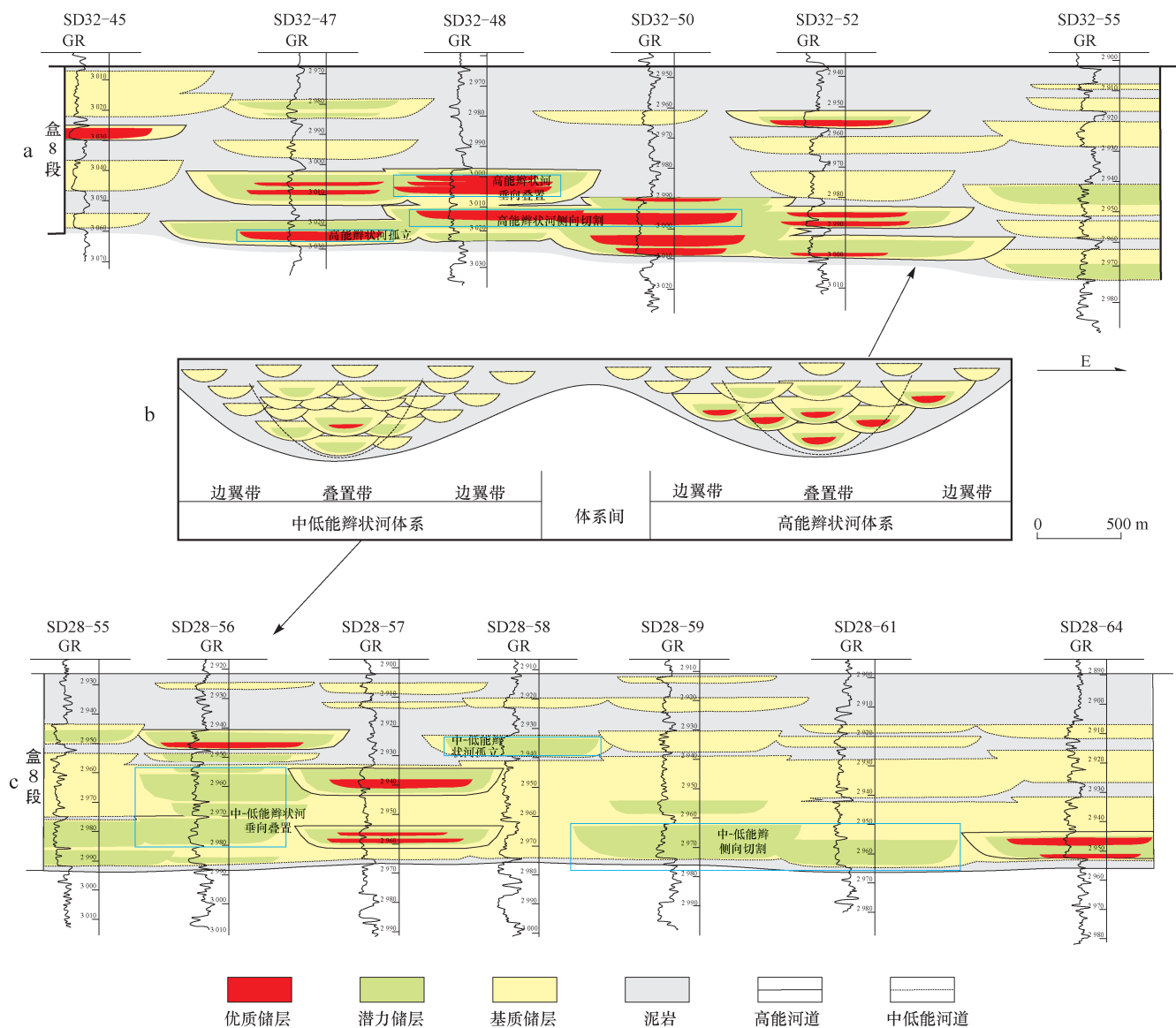


图 7 苏里格气田潜力储层剖面发育特征及发育模式

Fig. 7 Profile features and depositional models for the potential reservoirs in Sulige gas field

a. 高能辫状河体系;b. 辫状河体系类型划分模式;c. 中-低能辫状河体系

4) 中-低能辫状河孤立型

中-低能心滩或河道孤立发育,无有效砂体发育,潜力储层垂、横向上不与其他潜力储层接触,潜力储层规模较小。

5) 中-低能辫状河垂向叠置型

多期中-低能心滩或河道垂向上切割叠置,无有效砂体发育,潜力储层垂向上多期切割叠置,可形成厚层连通储渗单元体。

6) 中-低能辫状河侧向叠加型

中-低能心滩或河道侧向上多个切割叠加,有无效砂体发育,潜力储层侧向可形成较大规模连通储渗单元体。

3.3 潜力气层动用方式

目前,苏里格气田开发主体目标是有效砂体,主要采取直井多层和水平井多段压裂的开发动用方式,潜力储层的开发动用还处于探索阶段。各类垂向叠置、侧向叠加型潜力储层发育厚度大、延伸范围广,是开发动用的重点类型。在前述潜力储层发育模式分析的基础上,总结 3 种开发动用方式(图 8)。

1) 间接动用型

主要针对分布于有效砂体外围的潜力储层。在有效砂体持续开采过程中,渗流边界范围不断扩大,当扩大至潜力储层时,其内天然气便开始向有效砂

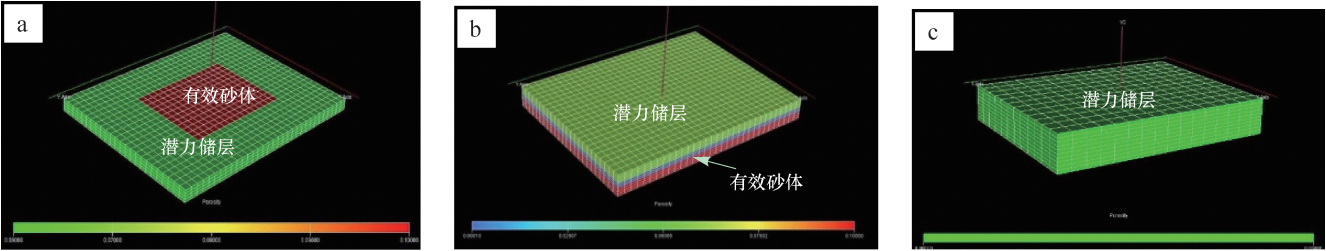


图 8 苏里格气田潜力储层开发动用模式

Fig. 8 Potential reservoir development models in Sulige gas field
a. 间接动用型; b. 组合动用型; c. 直接动用型

体区供给,并最终通过井筒开采出来。这种动用方式也可称之为“高渗采低渗”,即通过高渗有效砂体的开发带动外围相对低渗潜力储层的动用。适用于高能辫状河孤立型、高能辫状河垂向叠置型、高能辫状河侧向叠加型等模式中有有效砂体外围潜力储层的开发。

2) 组合动用型

主要针对与有效砂体上下相邻的潜力储层。在开采过程中,同时对上下相邻的有效储层和潜力储层采取压裂措施,有效储层和潜力储层内的天然气同时流向井筒并开采出来。同“高渗采低渗”的间接动用方式相比,组合动用方式主要是针对与有效储层垂向相邻的潜力储层,而非分布于有效储层四周的潜力储层。适用于高能辫状河孤立型、高能辫状河垂向叠置型、高能辫状河侧向叠加型等模式中与有效砂体上下相邻的潜力储层开发。

3) 直接动用型

主要针对于无有效砂体发育的类型。可选择叠置层厚度较大的潜力储层,采取工艺措施进行直接动用。与前两种潜力储层的动用方式相比,直接动用模式中潜力储层的开发动用不受有效储层影响。适用于中-低能辫状河孤立型、中-低能辫状河垂向叠置型、中-低能辫状河侧向叠加型等模式中潜力储层的开发。

4 潜力储层可动用性分析

4.1 潜力储层开发现场试验

目前潜力储层开发动用方式主要为间接动用和直接动用。间接动用主要是重点分析生产时间较久且后期表现为间歇式生产特征的气井。苏 38-16-5 井是气田中区苏 6 区块的典型气井,于 2003 年 10 月投产,气井生产历史可划分为初始生产(2003—2005)、拟稳态生产(2005—2006)、间歇生产(2006—2015)3 个阶

段,前两个阶段天然气产自有效砂体,间歇生产中后期天然气应主要产自于潜力储层。分析表明,目前有效储层累计产出天然气 $4\,316 \times 10^4 \text{ m}^3$,潜力储层累计产出约 $455.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前产量贡献率为 10.56%,表现出较好的开发效果。直接动用重点针对有效砂体不发育的潜力储层,压裂试气表明,潜力储层自身也具有较好的产气能力,如苏 314 井,山 1 段潜力储层厚度为 11 m,孔隙度为 6.26%,渗透率为 $0.044 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气饱和度为 40.46%,试气产量为 $1.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;苏 364 井,山 1 段潜力储层厚度为 4 m,孔隙度为 5.43%,渗透率为 $0.047 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气饱和度为 38.46%,试气产量为 $0.57 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.2 潜力储层可动用性评价

为系统评价 3 种潜力储层开发动用方式的效果,设计了系列组合条件下的单井机理预测模型。间接动用模式下有效砂体分别与 5 种不同物性非有效储层横向等厚度组合;组合动用模式下有效砂体分别与 5 种不同物性非有效储层垂向等厚度组合;直接动用模式下分别评价 5 种不同物性非有效储层各自的开发效果(表 2)。配产方式为先定产生生产,后定压生产,配产范围为 $(0.1 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。以地层压力为 2.3 MPa、经济极限产量为 $0.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 为废弃条件。

表 2 3 种动用模式下单井理论模型储层组合参数
Table 2 Parameter setting of single-well theoretical model in three recoverable modes

储层	孔隙度/ %	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	气饱和度和/ %	设计厚度/ m
非有效储层	7.5	0.250	50	10
	6.0	0.125	40	10
	5.0	0.100	35	10
	4.0	0.050	30	10
	2.5	0.010	25	10
有效砂体	10.0	0.750	65	10

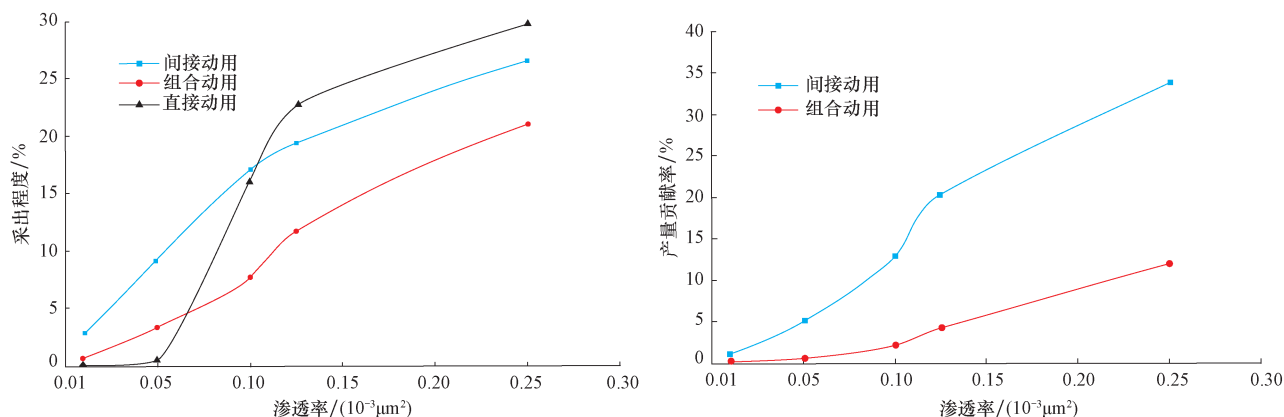


图9 不同动用方式下潜力储层采出程度及产量贡献对比

Fig. 9 Comparison on recovery rate and ultimate production of potential reservoir in different development modes

a. 采出程度; b. 产量贡献

分析表明,3种动用方式下潜力储层天然气采出程度主要与物性相关,物性越好采出程度越高。间接动用与组合动用相比,前者潜力储层开发效果相对较好,天然气采出程度、产量贡献率都相对较高(图9)。主要因为在组合动用开发过程中,有效砂体和潜力储层自始至终都同时向井筒供给天然气,在开发过程及达到废弃条件时,受有效砂体产气能力较强的影响,潜力储层压力释放和天然气产出不彻底;而间接动用开发过程中,前期为有效砂体单独供气,后期产量则主要为潜力储层贡献,达到废弃条件时,压力释放和天然气的产出都相对彻底。直接动用方式下,产量都由潜力储层贡献,当储层物性低于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,由于难以达到经济极限产量而无法开发动用,随着储层物性变好,采出程度快速增加并迅速超过间接动用型和组合动用型。

比较而言,直接动用型开发效果最好,间接动用型次之,组合动用效果较差。潜力储层具备采出20%天然气蕴含量的开发前景,可有效扩大苏里格气田长期稳产的资源基础。

5 结论

1) 基于苏里格气田孔、渗关系曲线的3段式特征,并结合储层物性下限标准,将储层系统划分成5个大类6种类型。其中Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ₁类为有效储层,Ⅲ₂,Ⅳ,Ⅴ为含气基质储层。分析认为,Ⅲ₂类储层具有厚度大、物性好、丰度高的特点,是未来最具开发前景的潜力储层。

2) 潜力储层发育于高能心滩、辫状河道微相中上部,中-低能心滩、辫状河道微相的主体及中下部,其

形成主要受控于中-细粒岩相。总结了潜力储层的6种发育模式,提出垂向多期叠置和侧向叠加型潜力储层厚度大,是未来开发动用的重点。

3) 明确潜力储层开发动用的3种方式:间接动用、组合动用和直接动用。采用现场试验与理论模型分析相结合的方法,开展了潜力储层开发动用效果评价。结果表明,直接动用和间接动用的开发效果较好。

参 考 文 献

- [1] 杨华,刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤层气勘探进展[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):129-138.
Yang Hua, Liu Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China [J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(2): 129-138.
- [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,2012,31(S.1):27-36.
Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Formation conditions and exploration technology of large-scale tight sandstone gas reservoir in Sulige [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 31(S.1): 27-36.
- [3] 王国亭,何东博,王少飞,等. 苏里格致密砂岩储层岩石孔隙结构及储集性能特征[J]. 石油学报,2013,34(4):660-666.
Wang Guoting, He Dongbo, Wang Shaofei, et al. Characteristics of the pore structure and storage capability of Sulige tight sandstone gasfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 660-666.
- [4] 卢涛,刘艳侠,武力超,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩气藏稳产难点与对策[J]. 天然气工业,2014,35(6):43-52.
Lu Tao, Liu Yanxia, Wu Lichao, et al. Challenges to and countermeasures for the production stabilization of tight sandstone gas reservoirs of the Sulige Gasfield, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 35(6): 43-52.
- [5] 窦伟坦,刘新社,王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. 石油学报,2010,31(5):767-773.
Dou Weitan, Liu Xinshe, Wang Tao. The origin of formation water and

- the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(5): 767–773.
- [6] 王泽明, 鲁保菊, 段传丽, 等. 苏里格气田苏20区块气水分布规律[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 37–40.
- Wang Zeming, Lu Baoju, Duan Chuanli, et al. Gas-water distribution pattern in Block 20 of the Sulige gas field [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 37–40.
- [7] 代金友, 李建霆, 王宝刚, 等. 苏里格气田西区气水分布规律及其形成机理[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 35(5): 524–529.
- Dai Jinyou, Li Jianting, Wang Baogang, et al. Distribution regularity and formation mechanism of gas and water in the western area of Sulige gas field, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 35(5): 524–529.
- [8] 贾爱林, 唐俊伟, 何东博, 等. 苏里格气田强非均质致密砂岩储层的地质建模[J]. *中国石油勘探*, 2007, 12(1): 12–16.
- Jia Ailin, Tang Junwei, He Dongbo, et al. Geological modeling for sandstones reservoirs with low permeability and strong heterogeneity in Sulige gas field [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(1): 12–16.
- [9] 何东博, 贾爱林, 田昌炳, 等. 苏里格气田储集层成岩作用及有效储集层成因[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(3): 69–71.
- He Dongbo, Jia Ailin, Tian Changbing, et al. Diagenesis and genesis of effective sandstone reservoirs in the Sulige Gas Field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(3): 69–71.
- [10] 何东博, 贾爱林, 冀光, 等. 苏里格大型致密砂岩气田开发井网技术[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 79–89.
- He Dongbo, Jia Ailin, Ji Guang, et al. Well type and pattern optimization technology for large scale tight sand gas, Sulige gas field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 79–89.
- [11] 何东博, 王丽娟, 冀光, 等. 苏里格致密砂岩气田开发井距优化[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 458–464.
- He Dongbo, Wang Lijuan, Ji Guang, et al. Well spacing optimization for Sulige tight sand gas field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 458–464.
- [12] 唐俊伟, 贾爱林, 何东博, 等. 苏里格低渗透强非均质性气田开发技术对策探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 33(1): 107–110.
- Tang Junwei, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Development technologies for the Sulige gas field with low permeability and strong heterogeneity [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 33(1): 107–110.
- [13] 李跃刚, 徐文, 肖峰, 等. 基于动态特征的开发井网优化——以苏里格致密强非均质砂岩气田为例[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 56–61.
- Li Yaogang, Xu Wen, Xiao Feng, et al. Development well pattern optimization based on dynamic characteristics: A case study from the Sulige tight sandstone gas field with great heterogeneity [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 56–61.
- [14] 李波, 贾爱林, 何东博, 等. 苏里格气田强非均质性致密气藏水平井产能评价[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(3): 539–549.
- Li Bo, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Productivity evaluation of horizontal wells in Sulige tight gas reservoir with strong heterogeneity [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(3): 539–549.
- [15] 马旭, 郝瑞芬, 来轩昂, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井体积压裂矿场试验[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 742–747.
- Ma Xu, Hao Ruifen, Lai Xuanang, et al. Field test of volume fracturing for horizontal wells in Sulige tight sandstone gas reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 742–747.
- [16] 费世祥, 王东旭, 林刚, 等. 致密砂岩气藏水平井整体开发关键地质技术——以苏里格气田苏东南区为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1620–1629.
- Fei Shixiang, Wang Dongxu, Lin Gang, et al. The key geological technology for horizontal wells overall development in tight sandstone gas reservoirs: Take the Sudongnan area of Sulige Gas field for an example [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1620–1629.
- [17] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857–1864.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857–1864.
- [18] 刘锐娥, 肖红平, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系“洪水成因型”辫状河三角洲沉积模式[J]. *石油学报*, 2013, 34(S. 1): 660–666.
- Liu Rui'e, Xiao Hongping, Fan Liyong, et al. A depositional mode of flood-induced braided river delta in Permian of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 34(S. 1): 660–666.
- [19] 王国亭, 冀光, 程立华, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田西区气水分布主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(6): 657–659.
- Wang Guoting, Ji Guang, Cheng Lihua, et al. The main controlling factors of gas and water distribution in western Sulige gas field, Ordos basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 657–659.
- [20] 郭智, 贾爱林, 何东博, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田辫状河体系带特征[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 197–205.
- Guo Zhi, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Characteristics of braided river sedimentary system zones in Sulige gasfield, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 197–205.

(编辑 张玉银)