

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2019.04.002

# 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、 前景展望和对策措施

付金华<sup>1,2</sup> 范立勇<sup>2,3</sup> 刘新社<sup>2,4</sup> 胡新友<sup>2,3</sup> 李继宏<sup>2,3</sup> 季海锟<sup>2,3</sup>(1 中国石油长庆油田公司; 2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室; 3 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院;  
4 中国石油长庆油田公司勘探事业部)

**摘 要:** 鄂尔多斯盆地一直是中国油气勘探开发的重点地区之一,发现了一批重要的油气田。随着勘探程度提高,勘探对象转向致密、深层及盆地周边等成藏条件复杂区,寻找新的整装规模储量难度不断增大。通过系统总结近年来长庆油田公司在致密砂岩气和海相碳酸盐岩天然气等领域取得的新认识和新进展,分析了盆地不同类型气藏的主要地质特征和控制因素,结合油气资源分布状况和新发现气藏基本特征,科学地提出了油田公司“两步走”的发展战略,并指出了碳酸盐岩天然气、致密砂岩气以及除致密砂岩气以外的非常规天然气未来的勘探接替领域。同时针对勘探开发过程中面临的问题,紧密结合生产实践,系统制定了相应的工作对策。通过强化地质研究、积极转变工作思路,加大技术攻关、推进勘探开发一体化、地质工程一体化进程,以实现天然气的规模有效勘探开发,为其他类似盆地勘探和开发提供经验和借鉴。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 致密气; 气藏特征; 勘探方向; 勘探对策**中图分类号:** TE122.1**文献标识码:** A

## New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin

Fu Jinhua<sup>1,2</sup>, Fan Liyong<sup>2,3</sup>, Liu Xinshe<sup>2,4</sup>, Hu Xinyou<sup>2,3</sup>, Li Jihong<sup>2,3</sup>, Ji Haikun<sup>2,3</sup>

(1 PetroChina Changqing Oilfield Company; 2 National Engineering Laboratory of Low-permeability Oil &amp; Gas Exploration and Development; 3 Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company; 4 Exploration Department, PetroChina Changqing Oilfield Company)

**Abstract:** The Ordos Basin has always been one of the key oil & gas exploration and development areas in China. And in the Ordos Basin, some important oil and gas fields have been discovered. As the exploration continues, the exploration objects turn to the areas with complex hydrocarbon accumulation conditions, e.g. tight zones, deep zones and basin peripheries, and the difficulty in searching for new large-scale monoblock reserves increases. The Changqing Oilfield Company's new cognitions and progresses in the fields of tight sandstone gas and marine carbonate gas in recent years were summarized systematically, and the main geological characteristics and control factors of different types of gas reservoirs in the Ordos Basin were analyzed. Then, based on the distribution situations of oil and gas resources and the basic characteristics of newly discovered gas reservoirs, the "two-step" development strategy of Changqing Oilfield Company was put forward scientifically. In addition, the future exploration replacement fields of carbonate gas, tight sandstone gas and unconventional natural gas (tight sandstone gas excluded) were pointed out. Finally, in view of the problems in the process of exploration and development, the corresponding

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“长庆油田 5000 万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”课题“鄂尔多斯盆地古生界天然气富集规律及勘探目标优选”(2016E-05-02); 中国石油天然气股份有限公司重点项目“长庆油田探区‘十三五’油气资源及经济、环境评价”(135YQZP-2017-KT11)。

第一作者简介: 付金华(1963—),男,湖北黄冈人,博士,2004年毕业于西北大学,教授级高级工程师,现从事油气勘探开发管理工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路 151 号长庆油田,邮政编码: 710018。E-mail: fjh\_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 范立勇(1978—),男,山东肥城人,博士,2007年毕业于中国科学院,高级工程师,现从事油气地质勘探综合研究和油气资源评价工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路 151 号长庆油田,邮政编码: 710018。E-mail: lyfan123\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-04-26; 修改日期: 2019-06-24

countermeasures were formulated systematically by combining with production practice closely. In this way, the geologic researches are strengthened, the working concept is transformed actively, the technical researches were reinforced and the exploration-development integration and the geology-engineering integration are promoted so as to realize the large-scale efficient exploration and development of natural gas and provide the experience and reference for the exploration and development of similar basins.

**Key words:** Ordos Basin, tight gas, characteristics of gas reservoir, exploration direction, exploration countermeasures

## 1 概况

自2000年以来,随着天然气勘探地质理论和工程技术进步,鄂尔多斯盆地天然气勘探成果显著。从早期高建设三角洲成藏理论和岩性圈闭描述技术指导储量不断取得发现开始,经历了大面积致密砂岩气成藏聚集、海相碳酸盐岩天然气成藏等理论,以及碎屑岩砂体精细刻画、碳酸盐岩储层综合评价等技术的形成,到成熟的天然气勘探理论和技术的推广及规模化应用,引领了油田储量取得年均新增 $5000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的快速增长,天然气勘探不断取得重要进展(图1)。面对国际低油价和中国油气依存度逐渐升高的新形势,

长庆油田公司按照国家加快国内勘探开发力度及油田 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 油当量长期稳产对天然气资源的需求,重点围绕盆地碎屑砂岩与海相碳酸盐岩两大领域,针对“规模效益储量和战略新发现”两大重点目标,通过开展综合地质研究和工程技术攻关,精细天然气预探和风险勘探部署方案,优化了生产组织与管理模式,创新和发展了一系列地质理论和关键技术,鄂尔多斯盆地天然气勘探取得了一批新的发现和重要突破。截至2018年年底,长庆油田公司发现气田12个,已提交探明地质储量 $6.38 \times 10^{12} \text{m}^3$ (含基本探明储量 $2.83 \times 10^{12} \text{m}^3$ )(图2),为油田持续稳健发展奠定了扎实的储量基础。

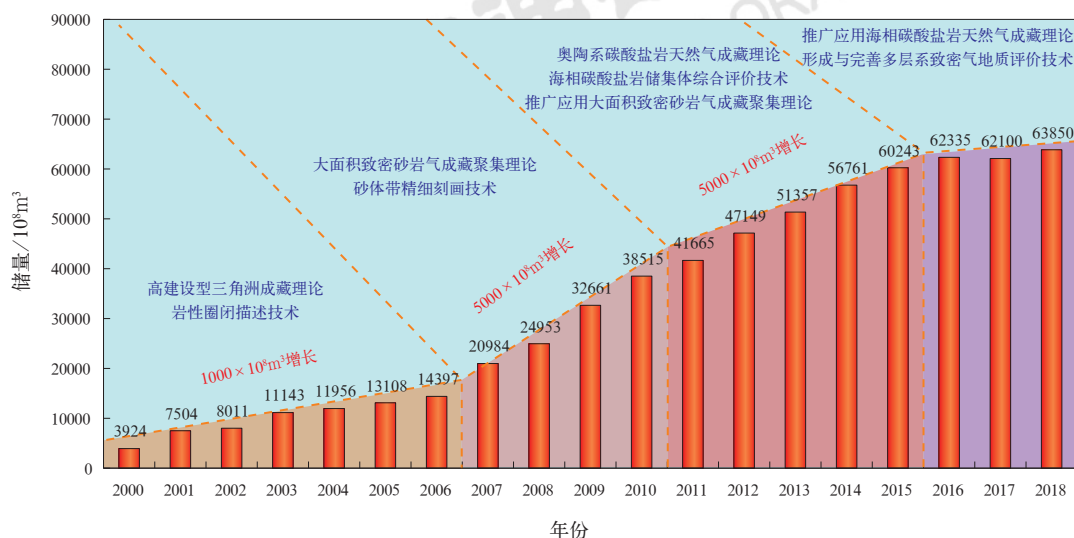


图1 长庆油田2000—2018年天然气储量增长柱状图

Fig.1 Column of natural gas reserve increase in the Changqing oilfield in 2000—2018

## 2 近年来地质认识和天然气勘探主要进展

鄂尔多斯盆地勘探领域广阔,油气资源丰富<sup>[1-3]</sup>,“十五”以来始终保持中国新增油气探明储量主力地位。2006年以来,以大面积致密砂岩气成藏理论和海相碳酸盐岩天然气成藏地质认识为指导<sup>[4]</sup>,在海相碳酸盐岩气藏、致密砂岩气藏和除致密砂岩气以外非常规气藏等领域研究取得了新的进展,加强勘探技术攻关,开展大规模整体勘探,积极甩开预探,气田范

围持续扩大,在盆地内部形成了苏里格地区、盆地东部上古生界多层系和盆地中东部下古生界3个万亿立方米大气区(图2),落实了盆地南部新的接替领域,发现了一些潜在油气新领域,有力助推了长庆油田天然气的快速上产。

### 2.1 深化了海相碳酸盐岩地质认识,下古生界勘探获得重大突破

中国古老海相碳酸盐岩主要分布于塔里木、四川和鄂尔多斯三大克拉通盆地,这3个盆地是海相

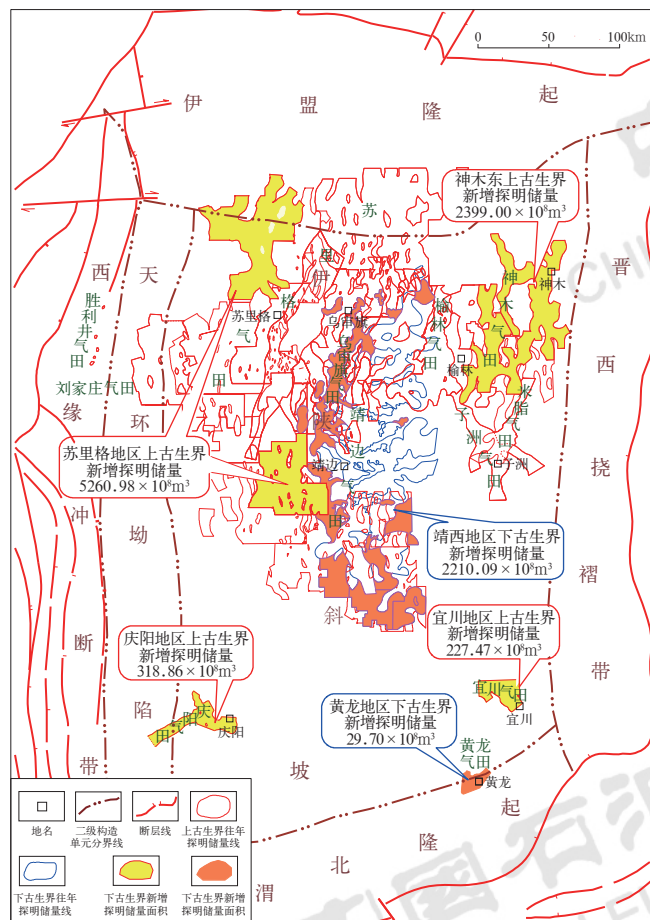


图2 鄂尔多斯盆地天然气田分布及储量情况图

Fig.2 Distribution and reserves of gas fields in the Ordos Basin

油气勘探的重点地区<sup>[5-7]</sup>。鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩时代老、演化历史长,经历多期构造运动改造,油气分布规律非常复杂。自靖边气田发现以来,经过长期探索和持续工程技术攻关,在碳酸盐岩天然气勘探方面形成了一定的地质认识和技术体系。一是发展了海相碳酸盐岩岩溶古地貌控制天然气成藏理论:构建了“上组合垂向运聚、中组合侧向运聚”的双向运聚模式(图3),揭示了盆地海相碳酸盐岩岩溶古地貌气藏形成机制;提出了“古侵蚀面、古沟槽、古岩溶储层”共同控制了气藏形成与分布。二是揭示了奥陶系中组合沉积储层成因机理:明确了高频旋回沉积控制马五段储层的空间分布,以及该段发育膏盐溶孔、白云石晶间孔两类储集空间的认识。三是研发形成稠化酸、清洁转向酸、低阻缓速酸3种新型酸液体系和多级交替注入工艺,解决了深井高温储层酸压摩阻高、反应速率快的难题,提高了非均匀刻蚀程度。在此认识基础上,海相碳酸盐岩勘探在岩溶孔洞型储层和深层白云岩储层等领域不断获得新突破。以靖边气田为代表的风化壳气藏含气面积不断扩大,近年来在靖西地区新增探明地质储量 $2210 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、预测地质储量 $2007 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,为开发建产提供了资源保障。同时,奥陶系盐下马家沟组马五<sub>5</sub>—马五<sub>10</sub>段气藏勘探获得新的进展,发现了

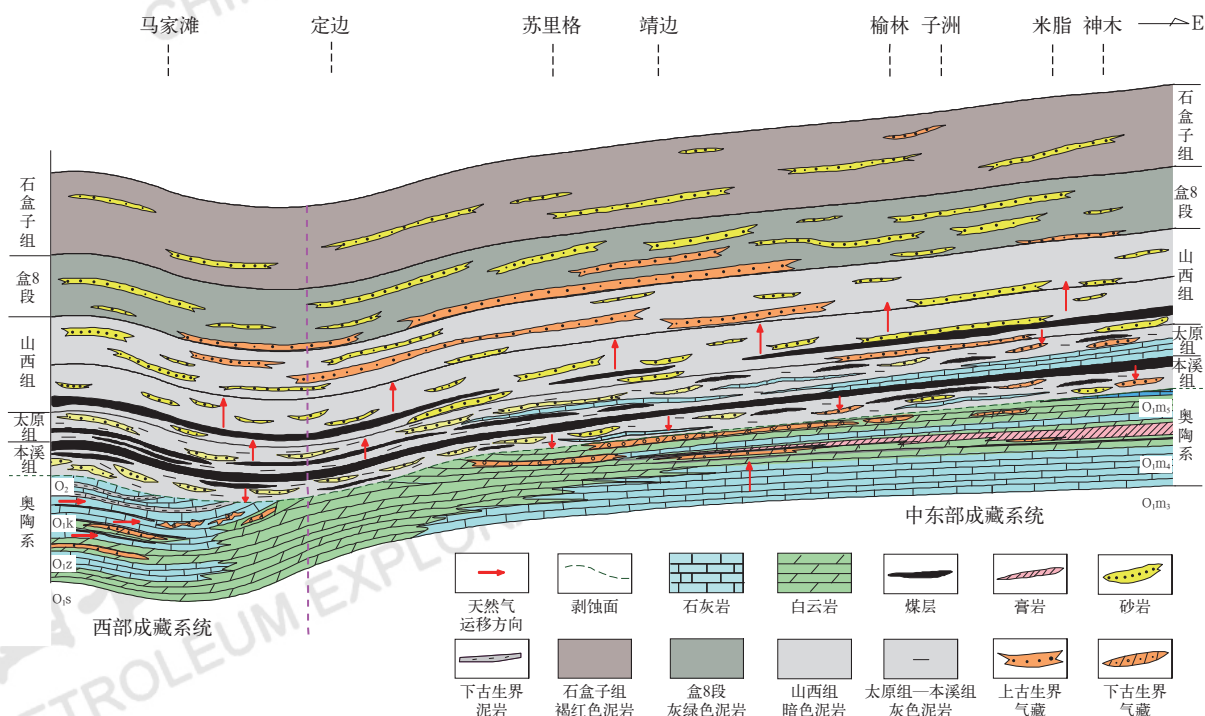


图3 鄂尔多斯盆地古生界天然气成藏模式图

Fig.3 Hydrocarbon accumulation model of Paleozoic natural gas in the Ordos Basin

莲92井区、统74井区等多个高产富集区,含气面积约6000km<sup>2</sup>。截至2018年,鄂尔多斯盆地地下古生界累计探明储量 $6577 \times 10^8 \text{m}^3$ ,形成新的下古生界碳酸盐岩万亿立方米大气区。勘探的持续发现为开发建设提供了优质的储量区块,靖边气田连续14年稳产 $55 \times 10^8 \text{m}^3$ 。在靖边气田西侧奥陶系马五<sub>4</sub>段、马五<sub>5</sub>段已新建产能 $22 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

## 2.2 创新发展了致密气成藏理论,探明中国陆上最大的苏里格气田

鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩广覆式生烃、河流—三角洲致密砂岩大面积含气<sup>[8]</sup>。2000年通过苏6井的成功钻探发现了苏里格气田,提交探明储量 $5336.52 \times 10^8 \text{m}^3$ 。经过10多年的努力,通过深入开展地质综合研究,创新地提出了“广覆式生烃、大面积充注、孔缝耦合输导、近距离运聚”的致密气成藏理论,攻关形成了全数字多波地震勘探技术,实现了对含气储层的有效预测,助推了苏里格地区天然气整体勘探<sup>[9]</sup>。近几年来,在储集砂体构型描述和气藏解剖为核心的地质条件研究基础上,构建了大型缓坡三角洲沉积背景下大面积薄饼状、集群式心滩—分流通道叠合砂体发育模式,完善了广覆式生烃、源储相互叠置、大面积分布、集群式富集的陆相致密砂岩气成藏理论(图3)。按照“整体部署、稀井广探、规模控制、择优探明”的勘探思路,优化井位部署方案,有效提高了钻探成功率,苏里格气田探明含气面积不断扩大,新发现了苏里格西二区、苏里格南区等千亿立方米储量规模区,探明地质储量 $5260.98 \times 10^8 \text{m}^3$ 。苏里格地区累计探明(含基本探明)储量达 $4.72 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,成为中国陆上最大的气田<sup>[10]</sup>。勘探的稳步推进为气田的开发快速上产提供了资源保障,2013年年底苏里格气田建成 $230 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的生产能力,并保持稳产5年。截至2018年年底,气田累计生产天然气 $1936 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

## 2.3 加强关键技术攻关,盆地东部多层系勘探取得重要进展

鄂尔多斯盆地东部具有多层系含气、储层水锁伤害强、单井产量及资源动用程度低等特征,已发现探明地质储量达千亿立方米的榆林、神木等气田。近年来,通过深化地质综合研究,一是明确了受沉积演化控制发育不同类型砂体、孔隙决定局部发育相对高渗透储层和源储配置关系控制气藏富集程度等地质认识,

深化了盆地东部多层系成藏富集规律研究;二是提出了本溪组在北部以河控三角洲砂体为主,南部发育潮汐沙坝砂体,改变了以往障壁岛—潟湖沉积的传统认识,在本溪组发现了多个高产富集区;三是明确了太原组发育3套储集砂体,桥头砂体规模最大,揭示了太原组砂岩、石灰岩为同时异相沉积,砂岩与石灰岩呈相互消长的关系,砂体呈现出北强南弱分布格局;四是针对盆地东部的地质特点,持续加大关键技术的研发和攻关,形成了套管滑套连续分压、全程防水锁滑溜水携砂压裂等技术系列,试验取得较好效果,该区的平均单井产量较以前提高了2~4倍。通过构建“地质工程一体化、勘探开发一体化”的管理模式,取得了良好的勘探效果。近年新增探明地质储量 $2399 \times 10^8 \text{m}^3$ 、控制地质储量 $6381 \times 10^8 \text{m}^3$ ,落实了盆地东部地区上古生界石盒子组盒8段、山西组、太原组整装规模储量区,发现了本溪组勘探甜点富集区。截至目前,鄂尔多斯盆地东部地区已落实三级地质储量 $1.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,形成了继苏里格之后又一个新的万亿立方米规模储量区。

## 2.4 坚持区域甩开勘探,盆地南部天然气勘探获得新进展

鄂尔多斯盆地南部天然气勘探程度相对较低,该区储层具有砂体厚度薄、物性变化快等特征,以往研究认为该区具备气藏形成的基本地质条件,通过前期钻探也发现了一些工业气流井,是长庆油田未来的接替领域之一。近年来,通过深化南部物源控制的砂体展布规律和天然气成藏机理等研究,认为晚古生代华北板块南缘碰撞造山带具有物源条件,盆地西南部河流三角洲向东北方向展布,形成相对大平原、小前缘格局,储层为石英砂岩,以盒8段、山1段为主,埋藏深、规模较小、连续性相对较差。盆地东南部沉积储层多层系分布,本溪期发育障壁岛砂体,储层岩性以石英砂岩为主,物性、含气性较好;山1段发育三角洲前缘储集砂体,储层岩性以岩屑石英砂岩为主;盒8段三角洲储集砂体多期叠置,叠合连片,储层岩性以岩屑石英砂岩为主;奥陶系马家沟组马五段发育含膏白云岩,风化壳期处于古地貌较高部位,有利于形成溶蚀孔洞储层。通过研究进一步明确了盆地南部天然气富集规律,落实了多个有利含气砂带和含气富集区,近年来,陇东地区提交探明地质储量 $318.86 \times 10^8 \text{m}^3$ 、预测地质储量 $1456.54 \times 10^8 \text{m}^3$ ,宜川—黄龙地区提交上古生界探

明地质储量  $227.47 \times 10^8 \text{m}^3$ 、下古生界探明地质储量  $29.70 \times 10^8 \text{m}^3$ ，发现了庆阳、宜川和黄龙等气田。

### 3 主要气藏特征

鄂尔多斯盆地主要发育下古生界碳酸盐岩、上古生界碎屑岩两套含气层系。下古生界主要发育马家沟组马五<sub>1+2</sub>段、马五<sub>4</sub>段、马五<sub>5</sub>段、马五<sub>6</sub>段、马五<sub>7</sub>段、马五<sub>9</sub>段等含气层系，形成奥陶系顶部风化壳型

气藏及白云岩型气藏，以靖边气田为代表；上古生界主要发育石炭系本溪组、二叠系太原组、山西组、石盒子组及石千峰组等含气层系，形成砂岩岩性气藏，以苏里格、榆林、神木等气田为代表。综合分析表明，不同类型气藏在层系分布、储层特征、储集体成因等方面具有不同地质特征（表1）。随着盆地天然气规模勘探持续不断推进，不同学者对成藏地质条件也进行了深入研究和讨论，先后应用连续性气藏、准连续

表 1 鄂尔多斯盆地主要气藏类型及特征

Table 1 Main types and characteristics of gas reservoirs in the Ordos Basin

类型	地区	气田名称	主力气层	储层特征					沉积(储层)成因	气藏特征
				分布特征	岩性	孔隙度 / %	渗透率 / mD	孔隙类型		
上古生界碎屑岩气藏	盆地中部	苏里格气田	二叠系石盒子组盒8段、山西组山1段	平面上砂体大面积分布；纵向上砂体层内相互叠置，单层砂体厚度大	石英砂岩	8.59	0.84	以岩屑溶孔、晶间孔为主	湖泊三角洲	埋深为 3200~3500m；气藏压力为 28.6~32MPa；中低丰度
	盆地东部	榆林气田	二叠系山西组山2段	平面上砂体宽条带状分布；纵向上砂体层内叠置，单层砂体厚度相对较大	石英砂岩	5.36	4.85	以粒间孔为主	海退三角洲	埋深为 2756~2937m；气藏压力为 24.2~28.2MPa；低丰度
		神木—米脂气田	二叠系石盒子组盒6段、盒7段、盒8段，山西组、太原组等多个层系	平面上砂体宽条带状分布，多层系复合连片；纵向上砂体层内叠置，多层系叠置	岩屑石英砂岩	4~10	0.1~3	以岩屑溶孔、晶间孔为主	湖泊三角洲、海侵浅水三角洲	埋深为 2000~2880m；气藏压力为 18~27MPa；低丰度，多层系
	盆地南部	宜川气田	石炭系本溪组	平面上砂体呈点状、面状分布；纵向上砂体呈透镜状，相对孤立	石英砂岩	6.7	0.97	以岩屑溶孔、晶间孔为主	海侵浅水三角洲	埋深为 2350~2650m；气藏压力为 19.8~21.5MPa；特低丰度
		庆阳气田	二叠系山西组山1段	平面上砂体呈窄条带状分布，规模小；纵向上砂体单层厚度薄	岩屑石英砂岩	5.7	0.64	以岩屑溶孔、晶间孔为主	湖泊三角洲	埋深为 3740~4190m；气藏压力为 35~39MPa；特低丰度
	盆地中部	靖边气田	奥陶系马家沟组马五 <sub>1+2</sub> 段风化壳	平面上分布稳定	泥粉晶白云岩	5.9	3.48	以溶孔、铸模孔为主	大气淡水淋滤	埋深为 2900~3500m；气藏压力为 26.7~31.9MPa；含气饱和度为 73.9%~80%；低丰度
下古生界碳酸盐岩气藏			奥陶系马家沟组马五 <sub>5</sub> 段	平面上砂体呈环带分布，具有良好的分带性；纵向上呈薄层状	粗粉晶—细晶晶粒状白云岩	4.9	0.49	以晶间孔、溶孔为主	混合水白云石化、早表生期溶蚀	埋深为 3000~4200m；气藏压力为 31.3~32.4MPa；含气饱和度为 67.7%~71.6%；低丰度

性气藏、大面积致密砂岩气藏和海相碳酸盐岩气藏进行了理论总结。尽管不同学者对气藏特征、成藏条件和成藏模式在认识上还存在争议,但气藏大面积分布,致密、低压、低产的气藏特征和烃源岩广覆式生烃、天然气近距离运聚的成藏模式,获得了广泛共识<sup>[11-29]</sup>。

### 3.1 上古生界碎屑岩岩性气藏特征及成因

鄂尔多斯盆地上古生界沉积、储层成岩、烃源岩生烃演化等基本成藏地质条件的不同,控制了致密砂岩气的成藏差异。

(1) 沉积演化控制了优势砂体空间展布。经加里东期长达1.5亿年的抬升剥蚀,形成了开阔、平缓的古地形。晚古生代沉积演化可划分为晚石炭世受限陆表海、早二叠世陆表海、中二叠世—晚二叠世早期近海内陆拗陷、晚二叠世晚期内陆湖盆四大演化阶段<sup>[30]</sup>,晚古生代经历了早期海相潟湖—潮坪沉积体系到陆相河流—三角洲沉积体系演变,主要发育海侵型、海退型和湖泊型3种类型的三角洲沉积。从本溪期到石盒子期,北部物源供给增强,水体变浅,河流水动力增强,盆地砂体规模持续向南扩大,形成了平面上大面积分布、纵向上多层系叠置的“满盆砂”分布格局。受物源和沉积环境控制,不同地区砂体组合特征差异性较大(表1):苏里格气田储集砂体沉积旋回相对较少,单层砂体厚度大,分布稳定;盆地东部气田储集砂体多层系复合叠置,单层厚度较大,分布稳定;盆地南部气田储集砂体沉积旋回相对较少,单层厚度较薄,横向变化较快。

(2) 物源及沉积水动力条件不同控制了储层碎屑组成差异。鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层可大致分为石英砂岩区、岩屑石英砂岩区(表1),其中苏里格气田、榆林气田、宜川气田储层以石英砂岩为主,神木—米脂气田、庆阳气田储层以岩屑石英砂岩为主。不同类型储层砂体物源碎屑组成、沉积期气候条件、水动力条件、同沉积期火山活动提供的火山物质不同,导致了盆内储层碎屑组成、粒度、分选、磨圆的差异。石英砂岩储层面孔率高,粒间孔较发育,以硅质、高岭石胶结为主,平均孔隙度为5.3%~8.9%、渗透率为0.86~1.33mD,以榆林气田、苏里格气田最为典型。岩屑石英砂岩储层面孔率约1.4%,岩屑溶孔占60%以上,粒间孔不发育,胶结物以黏土矿物为主,平均孔隙度为6.1%~7.8%、渗透率为0.41~0.69mD,为致密储层,以神木—米脂气田和庆阳气田为代表。石英砂岩塑性岩屑含量低,压实作用下

粒间孔隙消减相对缓慢,溶蚀作用强,多为相对优质储层。致密砂岩储层喉道细微,最大喉道半径小于3 $\mu\text{m}$ ,孔喉连通性差,渗流能力弱,应力敏感性强、水锁伤害强度大。依据颗粒间充填物不同,致密储层喉道可分为刚性喉道和塑性喉道。当颗粒粒间缝被硅质胶结时,喉道为刚性喉道,压裂改造效果好;当粒间缝被黏土矿物充填后,喉道偏于塑性,压裂改造效果差。

(3) 煤系烃源岩分布及演化控制了气藏分布。鄂尔多斯盆地上古生界煤层分布范围广,厚度不一。东北部 and 西北部厚度最大,可达30m左右;东部子洲—清涧、北部的乌审旗—榆林到横山地区煤层厚度大于10m,靖边地区煤层厚度大于8m。南部煤层厚度相对较薄,仅为2~4m。暗色泥岩广布于整个盆地,总体也呈东西部厚、中部较厚、南北部较薄的特征。暗色泥岩与煤层可溶烃特征的差异不仅表明二者之间存在着生烃母质的不同,同时也表明二者之间演化程度存在差异,从而导致了生、排烃特征明显的不同<sup>[31-32]</sup>。受生烃强度、储层物性和天然气差异充注的控制,气藏分布具有一定的特征:平面上,盆地中东部气藏含气性好,大面积复合连片;盆地南部气藏含气性变化较大,气藏规模较小;盆地北部气藏气水关系复杂。

### 3.2 下古生界碳酸盐岩气藏特征及成因

奥陶系沉积具明显的分区性和旋回性特征。鄂尔多斯地区早古生代以中央古隆起为界,存在华北海与秦祁海两大海域,其沉积体系发育特征差异明显。奥陶纪中央古隆起控制了东西分异的沉积格局。古隆起以西秦祁海域,奥陶系发育齐全,岩性主要为深水盆地相和斜坡相石灰岩。古隆起以东华北海域,缺失中—上奥陶统马家沟组,发育陆表海碳酸盐岩与局限海蒸发岩旋回性沉积,其中马一段、马三段、马五段为膏云岩与盐岩、膏岩发育段;马二段、马四段、马六段为石灰岩、白云岩发育段。盆地中东部马五段由于沉积期海平面的振荡性海进—海退变化,在其内部形成了膏盐岩—碳酸盐岩互层状沉积,其中马五<sub>1-4</sub>段、马五<sub>6</sub>段、马五<sub>8</sub>段、马五<sub>10</sub>段为海退期沉积,岩性以蒸发岩为主;马五<sub>5</sub>段、马五<sub>7</sub>段、马五<sub>9</sub>段为夹在蒸发岩层序中的短期海侵沉积,以碳酸盐岩沉积为主。

受东西两大沉积体系控制,鄂尔多斯盆地地下古生界形成风化壳溶孔型、白云岩型、台缘礁滩型、岩溶缝洞型四大储层类型。①盆地中东部上组合以风化壳

溶孔型储层为主,主要发育在马家沟组马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>含膏白云岩段;加里东风化壳期,形成西高东低的古地貌,岩溶作用使膏盐矿物溶解形成风化壳溶孔型储层;储层物性较好,横向分布稳定,是靖边风化壳气田的主要产层。孔隙充填物类型及充填程度控制了有利储层的分布,其中靖边气田充填物以白云石为主,充填程度低(<70%),储层平均孔隙度为5.9%,渗透率为3.48mD。靖边西侧地区充填物以白云石为主,充填程度相对较低(<80%),储层平均孔隙度5.2%,渗透率为1.43mD。盆地东部地区充填物以方解石为主,充填程度较高(>90%),储层平均孔隙度为3.9%、渗透率为0.41mD。②盆地中部中下组合发育白云岩储层,马五<sub>5</sub>段、马五<sub>7</sub>段、马五<sub>9</sub>段、马四段、马二段主要为粗粉晶—细晶结构的晶粒状白云岩,海侵期“混合水云化”形成晶间孔型白云岩储层。马五<sub>6</sub>段、马五<sub>8</sub>段、马五<sub>10</sub>段、马三段、马一段主要以泥晶—细粉晶白云岩为主,伴生膏质成分,海退期早表生期淋溶形成溶孔型白云岩储层。③台缘礁滩型储层分布于盆地西部及南部的台缘相带中,碳酸盐岩骨架结构被选择性溶蚀形成有效孔隙层。储层物性好,孔隙度为5%~10%,渗透率为0.5~100mD;储层厚度较大(5~10m)。④岩溶缝洞型储层分布于盆地西部及南部的台缘相带中,加里东期东高西低的古地貌格局使克里摩里组石灰岩发生顺层岩溶作用,形成大规模分布的岩溶缝洞型储层。

鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩气藏储层与上、下古生界两套烃源岩相配置,形成中东部、西部两大成藏系统,发育上生下储、自生自储和混合生储3种成藏模式(图3),同时,依据成藏地质要素时空配置、含气显示情况与空间分布等不同,划分为四大成藏区带。其中盆地中东部风化壳、中组合勘探已经取得突破,奥陶系盐下及台缘相带资源基础良好,近期勘探已经获得日产百万立方米工业气井,并在多个新层系见到新苗头。

## 4 勘探前景展望

### 4.1 油气资源分布及勘探战略

2016年中国石油天然气股份有限公司第四次油气资源评价研究过程中,精细评价了鄂尔多斯盆地的常规与非常规油气资源量,为客观认识目前油气勘探阶段提供了依据<sup>[33]</sup>。第四次油气资源评价结果揭示,鄂尔多斯盆地天然气资源量为 $15.68 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,

累计探明天然气地质储量为 $6.38 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,控制天然气地质储量为 $0.86 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,预测天然气地质储量为 $0.56 \times 10^{12} \text{m}^3$ ;盆地剩余天然气资源量为 $7.88 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,长庆探区天然气资源探明率为45.1%,处于勘探中期阶段。2018年开始的“十三五”油气资源滚动评价,依据最新的勘探成果,系统评价奥陶系深层天然气资源量 $0.63 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,使目前盆地天然气资源量达到 $16.31 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,结合资源潜力分析,鄂尔多斯盆地仍具有较好的勘探前景。

鄂尔多斯盆地油气资源丰富,但随着盆地勘探程度提高,勘探开发的对象已经转向致密、深层、盆地周边及外围成藏条件复杂区域,勘探层系已面向品位更低、风险更大的深层资源,发现的气藏具有“低、深、难、小、散”的特征,理论研究、技术攻关和勘探部署等方面面临着一系列的突出问题。为保持油气稳产 $5000 \times 10^4 \text{t}$ ,长庆油田公司科学制定了“稳油增气、持续发展”、加快天然气发展的“两步走”战略目标。2018—2020年,天然气产量实现从 $370 \times 10^8 \text{m}^3$ 向 $420 \times 10^8 \text{m}^3$ 的稳步增长,新增探明地质储量 $6400 \times 10^8 \text{m}^3$ ;2021—2035年,天然气产量达到奋斗目标 $450 \times 10^8 \text{m}^3$ ,并保持稳产,新增探明储量 $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

### 4.2 发展方向

按照加快发展的要求,结合对勘探实践和资源潜力的分析,明确了长庆油田未来增储上产的目标领域(图4)。

#### 4.2.1 重点突出奥陶系海相碳酸盐岩天然气高效勘探,寻找优质规模储量区

近年来,随着勘探工作的不断深入,一批探井在奥陶系马家沟组钻遇白云岩气层,试气获日产超百万立方米的高产工业气流,奥陶系中部组合及奥陶系膏盐下等层位勘探取得重要突破,评价马五<sub>4</sub>段—马五<sub>10</sub>段剩余资源量为 $0.67 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,盆地东部马五<sub>1+2</sub>段资源量为 $722.11 \times 10^8 \text{m}^3$ 。这些新发现的气藏其孔隙类型、岩石特征与靖边气田风化壳气藏既有相似之处,又有不同的特征。下一步勘探将围绕这些新发现,精细分析气藏特征,在靖边西侧奥陶系马五<sub>4</sub>段、马五<sub>5-10</sub>段及盆地东部马五<sub>1+2</sub>段等领域寻找新的勘探有利目标区,实现盆地碳酸盐岩天然气勘探领域的有序接替。

(1)靖边地区西侧奥陶系马五<sub>4</sub>段气藏。该区主要发育风化壳溶孔型储层,与靖边气田马五<sub>1+2</sub>段

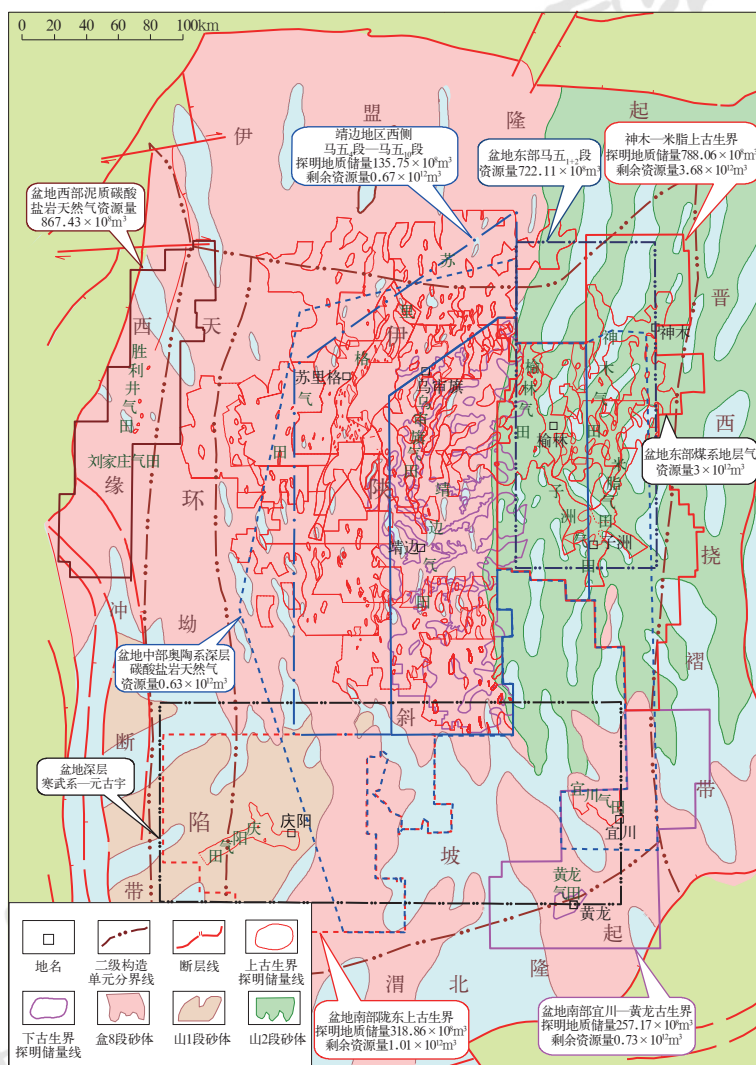


图4 鄂尔多斯盆地勘探领域分布图

Fig.4 Distribution of exploration fields in the Ordos Basin

具有类似的成藏条件,具有局部高产富集的特征,勘探面积为  $1.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。目前已有 28 口探井获工业气流,其中 14 口井产量大于  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。已落实陕 234、桃 54、陕 356、陕 373 等 4 个含气富集区,有利含气面积为  $5000 \text{ km}^2$ 。提交探明地质储量  $96.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、基本探明地质储量  $330.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、控制地质储量  $719.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。马五<sub>4</sub>段气藏处于岩溶高地古地貌单元,存在风化壳残缺、有效储层分布局限、气藏控制因素复杂等地质问题,下一步在储层含气性及流体地震预测、低阻气水层测井识别等方面加强技术攻关,寻找新的有利目标区,进一步扩大气藏的含气面积。

(2) 靖边西部地区奥陶系马五<sub>5-10</sub>段气藏。该区主要发育晶间孔型、溶孔型白云岩储层,气藏沿古隆起呈环带状局部分布,具有高产富集的特征。目

前已有 40 口探井获工业气流,其中 19 口井试气产量大于  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,落实了苏 203、统 99 等多个有利含气区,面积约为  $8000 \text{ km}^2$ 。已提交探明地质储量  $39.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、控制地质储量  $1376.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该区存在白云岩储层多为“薄互层”状、储层展布稳定性差等地质问题,下一步需加强各向异性成像、白云岩储层预测等地震技术攻关,加大多体系酸液转向、多级交替注入、大酸量深度刻蚀等酸压技术攻关,提升勘探效益。

(3) 盆地东部奥陶系马五<sub>1+2</sub>段气藏。该地区是靖边气田向东侧的延伸,风化壳储层分布相对稳定、气藏连续。储层孔隙充填物以方解石、白云石为主,局部岩溶残丘发育优质储层,勘探面积为  $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内已获工业气流井 31 口,落实了双 5、双 15、米 36、麒 20 等 16 个含气有利区,面积约

为4000km<sup>2</sup>。该区存在储层普遍致密、地震古地貌刻画与“甜点区”优选难度大等地质问题,下一步以开展水平井攻关试验和气藏工程技术研究为主,以提高单井产量为目标,向东侧寻找新的含气领域,预计可形成500×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>规模储量。

#### 4.2.2 深化致密砂岩气精细勘探,加强工艺技术攻关,落实规模储量

鄂尔多斯盆地致密砂岩气具有储层致密、单井产量低的特点。通过深化致密砂岩气藏形成机理和有效储层控制因素研究,强化压裂改造技术攻关,加大盆地东部多层系立体勘探和盆地南部甩开勘探的力度,实现致密砂岩气规模储量持续扩大。

(1) 神木—米脂上古生界气藏。该地区勘探面积约为2.0×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,发育上古生界二叠系石盒子组、山西组、太原组和石炭系本溪组等多套含气层系。二叠系石盒子组8段具有储集砂体分布广、气藏含气普遍、规模大且大面积连续分布的特征,发现有利含气面积3000km<sup>2</sup>。山西组是榆林气田、子洲气田的主力层系,气藏分布连续,规模较大,发现有利含气面积4000km<sup>2</sup>。太原组是神木气田的主力层系,气藏呈带状分布,南北向延伸距离远,规模较大,落实有利含气面积1500km<sup>2</sup>。本溪组气藏规模相对较小,具有单井产量高、局部高产富集的特征,已落实14个含气富集区,是高效建产的主要现实目标。神木—米脂地区已提交天然气探明地质储量788.06×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,剩余资源量为3.68×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,是提交和扩大规模储量的现实目标区。该区存在砂岩储层塑性组分、黏土矿物含量高,孔隙结构复杂,敏感性、水锁性较强,单井单层产量低[(1~2)×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d为主],有效勘探开发难度大等问题,下一步通过加强工艺技术对储层进行改造,开展多层系整体勘探部署研究,预计可新增探明地质储量1×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>以上,是近期增储上产的现实目标。

(2) 盆地南部古生界气藏。盆地南部主要有陇东和宜川—黄龙两个勘探区域,勘探程度相对较低,从近几年的勘探效果来看,具有良好的勘探潜力。该区有利勘探面积约为2.5×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。陇东地区气藏集中分布在上古生界石盒子组8段和山西组山1段,通过前期勘探,已有9口探井获工业气流,产量为(4.41~11.86)×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d,已发现4个含气富集区,落实含气面积5000km<sup>2</sup>。陇东地区已提交探明地质储量318.86×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,剩余资源量为1.01×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。该区存在盒8段、山1砂体厚度较小、埋深大、储层致

密、地震预测难度高等问题,下一步需加强黄土塬区地震技术攻关,落实砂体并预测含气性,预计可形成千亿立方米规模储量。宜川—黄龙地区勘探面积为0.9×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,上古生界石盒子组、山西组及下古生界马家沟组等多层系含气,气藏埋深相对较浅。区内有21口探井获2×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d以上工业气流,落实有利含气面积4000km<sup>2</sup>,截至目前已提交天然气探明地质储量257.17×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,剩余资源量为0.73×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。该区下古生界奥陶系气层叠合发育,气藏规模较大;上古生界本溪组局部砂体厚度较大,物性好,局部高产富集;山西组山1段砂体复合连片,发育含气富集区;石盒子组盒8段砂体分布广泛、大面积普遍含气。同时,该区还存在储层普遍致密、单层试气产量偏低等问题,下一步需继续开展上古生界成藏地质研究,持续扩展各层系的勘探面积,同时重点开展多层多段与合层压裂改造工艺技术攻关,提高单井产量,提升勘探效益。

#### 4.2.3 积极推进深层及非常规新层系的勘探,寻求勘探接替区

在寻找优质规模储量和落实整装储量的基础上,针对近年新层系的勘探发现,积极探索深层气和非常规天然气的勘探方法和技术,重点在鄂尔多斯盆地奥陶系深层碳酸盐岩天然气、二叠系煤系地层气和奥陶系泥质碳酸盐岩天然气等领域寻找新的有利接替区。

(1) 奥陶系深层碳酸盐岩天然气。深层指奥陶系马家沟组马四段—马一段,发育多个海侵—海退沉积旋回。海侵旋回主要发育晶间孔型白云岩储层,海退旋回以膏溶孔型白云岩储层为主。目前奥陶系深层勘探程度低,已发现的主要含气层为马四段,有14口探井获低产气流,主要集中在盆地中东部的靖边—榆林地区。靖边—榆林地区储层主要发育晶间孔、晶间溶孔及膏溶孔多种储集空间。有机碳含量相对较高(平均为0.36%,最大为1.86%),有效烃源岩累计厚20~40m,具有一定的生烃能力。马四、马三等层段均发育白云岩夹层,向东发生岩性相变,有利于形成自生自储型白云岩岩性气藏(图5)。2017年桃90井在马三段发生气侵,进一步证实了奥陶系深层具备较好的成藏条件。初步评价鄂尔多斯盆地奥陶系深层碳酸盐岩天然气资源量为0.63×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,在盆地中部榆林—横山地区优选马四段、马三段有利目标区3×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。下一步需要系统开展气源判识、白云岩储层地震识别及分布规律等方面研究,为甩开部署提供依据。

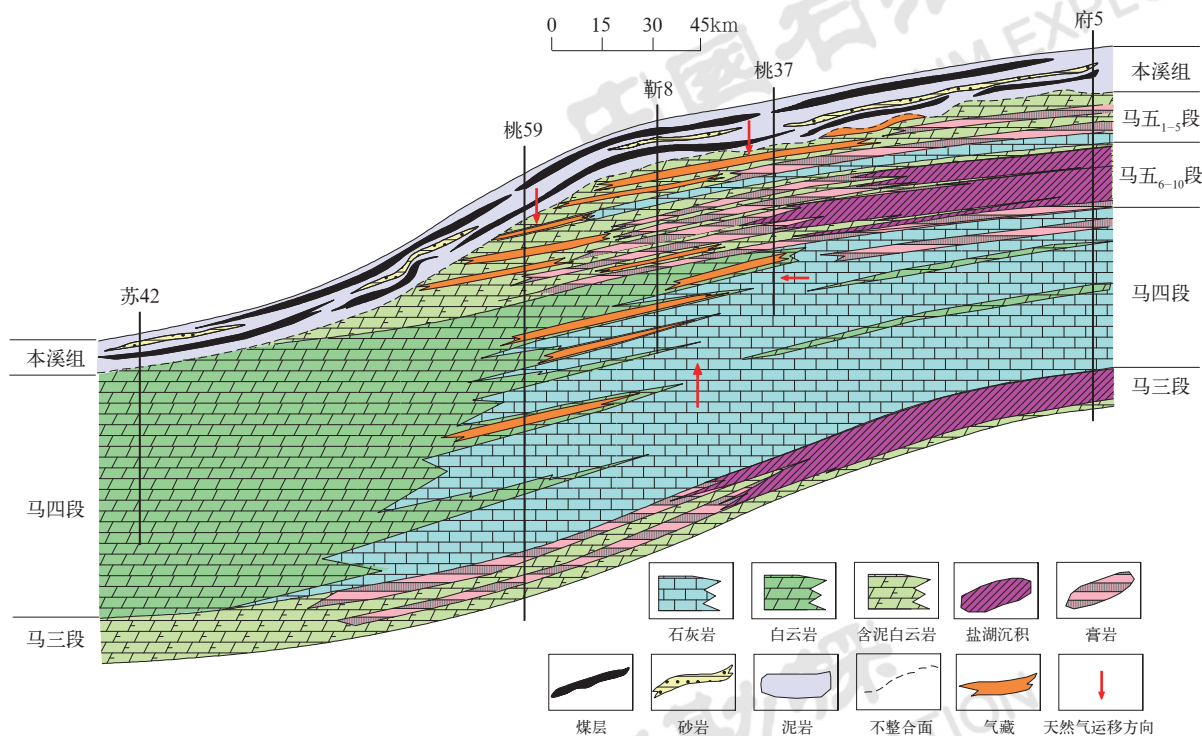


图5 鄂尔多斯盆地下古生界奥陶系中下组合成藏模式图

Fig.5 Hydrocarbon accumulation model of Middle-Lower assemblage in the Ordovician of Lower Paleozoic in the Ordos Basin

(2) 二叠系煤系地层气(页岩气)。煤系地层气是指除目前勘探开发的致密砂岩气之外,赋存在煤层、泥页岩、粉细砂岩中的天然气。前期研究表明,鄂尔多斯盆地东部上古生界本溪组、太原组和山西组煤系地层中的煤层、暗色泥岩、致密砂岩呈互层分布,含气显示活跃。盆地东部山西组山2段泥岩厚10~25m,泥岩TOC为1%~4%, $R_o$ 为0.8%~2.6%,埋深为1600~3200m。现场罐装样取心解吸试验分析,山2段泥岩含气量为0.19~2.16m<sup>3</sup>/t,煤层含气量为20m<sup>3</sup>/t,致密粉细砂岩含气量为1.6m<sup>3</sup>/t,不同层系均具有良好的含气性。2013年,部署的榆94井、桃50井在山西组煤系地层试气分别获6366m<sup>3</sup>/d、1226m<sup>3</sup>/d的气流,进一步明确了寻找可持续发展的接替资源的方向,初步估算资源量为 $3 \times 10^{12}$ m<sup>3</sup>。煤系地层气(页岩气)富集控制因素及资源评价方法等方面还有待进一步深化研究,针对该类储层配套的压裂改造技术尚不成熟,下一步需开展针对性的地质研究,加强砂、泥、煤岩薄互层钻完井和水平井体积压裂等技术的攻关,着力提升这种新类型气藏的单井产量。

(3) 奥陶系泥质碳酸盐岩天然气。泥质碳酸盐岩天然气是指赋存在盆地西部奥陶系乌拉力克组泥质碳

酸盐岩中的天然气,主要分布在李庄子—惠安堡地区,勘探面积为3000km<sup>2</sup>。目前已有3口井在乌拉力克组泥质灰岩试气获天然气流,其中忠4井获4.12×m<sup>4</sup>/d工业气流,显示出较好的勘探前景。泥质碳酸盐岩自身具有较好的气源条件,主要目的层乌拉力克组为台缘洼地沉积,有效烃源岩厚度为30~60m,TOC为0.21%~0.93%,平均为0.56%,镜质组反射率为1.81%~1.83%,干酪根以I—II<sub>1</sub>型为主。储层孔隙度为1.6%~4.4%,平均为2.3%,孔隙类型以微米级孔隙、微裂缝为主,具有一定储集及吸附天然气的的能力,局部发育的层间缝是有利的渗流通道。近年来盆地西缘祁连海域勘探部署多口井钻遇明显的气测异常,评价资源量为867.43×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。目前,该领域存在泥质碳酸盐岩天然气成藏地质条件和储层形成机理等认识不清等问题,下一步需加强海相烃源岩评价研究及储层改造工艺技术攻关,进一步评价勘探潜力。

(4) 寒武系一元古宇。鄂尔多斯盆地南部下寒武统三道撞组发育黑色碳质页岩、灰黑色泥岩,累计厚度为40~50m,有机碳含量平均为2.56%,最大为8.53%。盆地南缘发育寒武系裂陷槽,向盆地内部有一定延伸,可能存在与秦岭三道撞组相当的下寒武

统烃源岩层,可为南部寒武系提供气源。张夏期是寒武纪最大海侵期,盆地南部主要为碳酸盐台地环境,发育浅水高能的鲕粒滩相沉积,白云岩化作用强烈,容易形成晶间孔型白云岩储层,具有发育较好的白云岩储层的条件。裂隙槽内部的烃源岩与两侧隆起带白云岩储层构成良好的源储配置,可在寒武系形成自生自储型气藏。目前鄂尔多斯盆地寒武系整体勘探及认识程度比较低,仅有38口探井钻穿寒武系。盆地南部古裂隙槽周边可能形成寒武系天然气成藏的有利区带,近期已在盆地南部优选出灵台、正宁、黄龙等有利勘探目标,下一步需加强井位论证,寻找有利接替领域。

总之,鄂尔多斯盆地主要发育上古生界碎屑岩和下古生界碳酸盐岩气藏,通过进一步勘探,预计盆地可新增天然气地质储量 $1.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上,其中奥陶系马五<sub>4</sub>段、马五<sub>5</sub>段及盆地东部本溪组高效储量 $3500 \times 10^8 \text{m}^3$ ,盆地东部及苏里格外围效益储量 $7500 \times 10^8 \text{m}^3$ ,奥陶系深层和盆地南部后备储量 $7000 \times 10^8 \text{m}^3$ ,到2035年,盆地天然气总体可形成 $8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 储量规模,可以满足加快发展对储量的需求。

## 5 勘探对策

### 5.1 强化地质研究,落实勘探接替领域

鄂尔多斯盆地已进入复杂气藏勘探阶段,需根据盆地精细勘探目标的特点,坚持4个突出为核心,落实新的勘探方向。①突出思路创新:牢固树立创新理念,突破已有认识的局限,换思路、换角度、换方法分析油气基本地质条件和勘探潜力,大胆探索,充分挖掘油气藏潜力。②突出问题导向:聚焦勘探生产难题,准确把握地质研究方向。突出白云岩储层分布、成藏控制因素研究;深化致密砂岩气储层精细评价和天然气富集规律研究;强化新区、新领域及非常规天然气基础地质研究。③突出基础研究:充分依托油田信息化、数字化平台,强化基础实验、数据、图件等基础研究工作,加强地质认识深度,增强对勘探实践的指导性。④突出学科联合:坚持地质、地震、测井、工程多学科相结合、国家重大专项与油田生产科研相结合、自主研发与联合攻关相结合,积极推进产、学、研、用一体化,提升整体科研创新能力。

### 5.2 转变工作思路,突出高效勘探

积极转变思想观念,从重视地质储量向可采储量

转变,从重视规模储量向效益储量转变,突出剩余储量评价分类,落实高效建产目标,突出新区、新领域地质研究,积极寻找新发现,为“稳油增气、持续发展”谋划新篇章。①加强奥陶系深层、陇东地区、盆地周边及外围等新领域的风险勘探与预探,加快目标落实,加大勘探力度,力争打出大场面,实现规模商业发现。②加大神木—米脂、宜川—黄龙等重点区带勘探开发的结合力度,实现规模增储、增气目标,加快储量变产量的步伐。③开展靖西地区奥陶系中下组合及本溪组成藏富集规律研究,强化区带与目标分析,积极推动高效勘探,为油气田产能建设提供优质目标。

### 5.3 加大新技术攻关力度,打造提产增效的技术利器

以增储量、提效益为目标,积极推广成熟配套技术应用,加大新技术、新工艺攻关试验力度,持续提升天然气勘探保障能力。①地震:强化古地貌精细刻画与风化壳储层“甜点区”预测技术,攻关白云岩储层含气性及流体预测技术,提高预测成功率。②测井:重点围绕靖边地区奥陶系复杂气水层,强化成像测井资料精细处理解释,提高碳酸盐岩复杂气水层测井识别能力。③工艺:加强碳酸盐岩深度复合酸压、砂岩多层多段与合层压裂及防水锁体积压裂等技术攻关,提升改造效果、提高单井产量。

### 5.4 推进勘探开发一体化,提高整体勘探效益

坚持整体勘探、整体评价、整体开发,缩短勘探开发进程。根据勘探开发年度任务,认真梳理井位,建产区内及扩边探井统一由开发实施;扩大含气面积及区域甩开探井由勘探统一实施,降低勘探成本,同时积极推进千口井复查工程,提高勘探开发整体效益。

## 6 结语

2000年以来,长庆油田公司在鄂尔多斯盆地勘探已经取得了一些重要的成果,每年都有较大规模的储量发现。近几年,盆地已进入中高勘探程度阶段,围绕长庆油田 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 稳产、上产对油气资源的需求,勘探工作将围绕“规模效益储量”和“战略新发现”两项关键任务,以理论和技术的创新,落实集中勘探、风险勘探、精细勘探、综合勘探的目标,通过重新认识剩余资源分布和前期主力层系的勘探潜力,加大成熟区带精细评价,落实有效益、可动用储量区域,同时在深化新区、新层、新目标综合地质研究的基础上,区域甩开勘探,寻找重要战略接替领域,明

确未来发展的方向,为“稳油增气、持续发展”夯实资源基础,全面保障油田公司“两步走”发展目标顺利实现。

### 参考文献

- [1] 闵琪,付金华,席胜利,刘新社,王涛,姬红,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征[J].石油勘探与开发,2000,27(4):26-29.  
Min Qi, Fu Jinhua, Xi Shengli, Liu Xinshe, Wang Tao, Ji Hong, *et al.* Characteristics of natural gas migration and accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(4):26-29.
- [2] 付金华,段晓文,姜英昆.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法[J].中国石油勘探,2001,6(4):68-75.  
Fu Jinhua, Duan Xiaowen, Jiang Yingkun. Geological features and exploration methods of natural gas reservoir formation in the Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2001,6(4):68-75.
- [3] 何自新,付金华,席胜利,付锁堂,包洪平.苏里格大气田成藏地质特征[J].石油学报,2003,24(2):6-12.  
He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli, Fu Suotang, Bao Hongping. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(2):6-12.
- [4] 赵文智,胡素云,王红军,卞从胜,汪泽成,王兆云.中国中低丰度油气资源大型化成藏与分布[J].石油勘探与开发,2013,40(1):1-13.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Hongjun, Bian Congsheng, Wang Zecheng, Wang Zhaoyun. Large-scale accumulation and distribution of medium-low abundance hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):1-13.
- [5] 马永生,何登发,蔡勋育,刘波.中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J].岩石学报,2017,33(4):1007-1020.  
Ma Yongsheng, He Dengfa, Cai Xunyu, Liu Bo. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017,33(4):1007-1020.
- [6] 汪泽成,赵文智,胡素云,姜华,潘文庆,杨雨,等.我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J].石油与天然气地质,2013,34(2):153-160.  
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Jiang Hua, Pan Wenqing, Yang Yu, Bao Hongping, *et al.* Reservoir types and distribution characteristics of large marine carbonate oil and gas fields in China[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(2):153-160.
- [7] 赵文智,汪泽成,胡素云,潘文庆,杨雨,包洪平,等.中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征[J].石油学报,2012,33(增刊2):1-10.  
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Hu Suyun, Pan Wenqing, Yang Yu, Bao Hongping, *et al.* Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(S2):1-10.
- [8] 杨华,付金华,刘新社,孟培龙.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J].石油勘探与开发,2012,39(3):295-303.  
Yan Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, Meng Peilong. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(3):295-303.
- [9] 杨华,付金华,刘新社,范立勇.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):211-219.  
Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, Fan Liyong. Formation conditions and exploration technology of large-scale tight sandstone gas reservoir in Sulige[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(S1):211-219.
- [10] 付金华,范立勇,刘新社,黄道军.苏里格气田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2019,40(2):240-256.  
Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, Huang Daojun. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(2):240-256.
- [11] 李剑,魏国齐,谢增业,刘锐娥,郝爱胜.中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素——以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J].石油学报,2013,34(增刊1):14-28.  
Li Jian, Wei Guoqi, Xie Zengye, Liu Ruie, Hao Aisheng. Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas fields in China: cases study on Ordos Basin and Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(S1):14-28.
- [12] 魏国齐,张福东,李君,杨慎,黄朝勇,余源琦,等.中国致密砂岩气成藏理论进展[J].天然气地球科学,2016,27(2):199-210.  
Wei Guoqi, Zhang Fudong, Li Jun, Yang Shen, Huang Chaoyong, She Yuanqi, *et al.* New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(2):199-210.
- [13] 杨仁超,樊爱萍,韩作振,田雨.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的地质特征[J].山东科技大学学报:自然科学版,2005,24(1):53-56.  
Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, Tian Yu. Geological features of natural gas pool formation in the Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2005,24(1):53-56.
- [14] 刘新社,周立发,侯云东.运用流体包裹体研究鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏[J].石油学报,2007,28(6):37-42.  
Liu Xinshe, Zhou Lifa, Hou Yundong. Study of gas charging in the Upper Paleozoic of Ordos Basin using fluid inclusion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(6):37-42.
- [15] 李仲东,惠宽洋,李良,周文,张哨楠,过敏.鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移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, Zhou Wen, Zhang Shaonan, Guo Min. 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.
- [16] 邹才能,陶士振,袁选俊,朱如凯,侯连华,王岚,等.连续型油气藏形成条件与分布特征[J].石油学报,2009,30(3):324-331.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Wang Lan, *et al.* The formation conditions and distribution characteristics of continuous reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(3):324-331.
- [17] 邹才能,陶士振,袁选俊,朱如凯,董大忠,李伟,等.“连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价[J].石油勘探与开发,2009,36(6):669-682.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Zhu Rukai, Dong Dazhong, Li Wei, *et al.* Global importance of “continuous”

- petroleum reservoirs; accumulation, distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669–682.
- [18] 郭迎春, 宋岩, 庞雄奇, 姜振学, 付金华, 杜建军. 连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 433–440.
- Guo Yingchun, Song Yan, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, Fu Jinhua, Du Jianjun. Character and genetic mechanism of near-source accumulated accumulation for continuous-type tight sand gas[J]. Earth Science, 2016, 41(3): 433–440.
- [19] 彭威龙, 庞雄奇, 向才富, 郭继刚, 白静, 蒋锐, 等. 苏里格地区上古生界连续型致密砂岩气成藏条件及过程分析[J]. 地质科技情报, 2016, 41(3): 180–185.
- Peng Weilong, Pang Xiongqi, Xiang Caifu, Guo Jigang, Bai Jing, Jiang Rui, *et al.* Condition and process of continuous tight sandstone gas accumulation of the Upper Paleozoic in Sulige[J]. Geological Science and Technology information, 2016, 41(3): 180–185.
- [20] 杨智, 付金华, 刘新社, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 等. 苏里格气田上古生界连续型致密气形成过程[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2016, 33(3): 221–233.
- Yang Zhi, Fu Jinhua, Liu Xinshe, Wu Songtao, Lin Senhu, Wang Lan, *et al.* Formation process of upper paleozoic continuous tight sandstone gas reservoir in the Sulige gas field[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2016, 33(3): 221–233.
- [21] 曹青, 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 刘新社, 赵会涛, 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, Yao Jingli, Liu Xinshe, Zhao Huitao, *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.
- [22] 李军, 赵靖舟, 凡元芳, 曹青, 王倩, 胡维强. 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, Cao Qing, Wang Qian, Hu Weiqiang. Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 592–600.
- [23] 李得路, 李荣西, 赵卫卫, 王宝萍, 吴小力, 赵帮胜, 等. 准连续型致密砂岩气藏地质条件和成藏特征——以鄂尔多斯盆地中部上古生界山西组为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 299–308.
- Li Delu, Li Rongxi, Zhao Weiwei, Wang Baoping, Wu Xiaoli, Zhao Bangshen, *et al.* Geological conditions and accumulation characteristics of “quasi-continuous” tight sandstone gas reservoirs—a case study of Shanxi Formation in the middle of Ordos Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017, 53(3): 299–308.
- [24] 杨华, 席胜利, 魏新善, 陈义才. 鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏地质理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 279–299.
- Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan, Chen Yicai. Geological theory of large area tight sandstone gas accumulation in Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016: 279–299.
- [25] 杨智, 付金华, 郭秋麟, 林森虎, 陈宁生, 潘松圻, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 9–15.
- Yang Zhi, Fu Jinhua, Guo Qiulin, Lin Senhu, Chen Ningsheng, Pan Songqi, *et al.* Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9–15.
- [26] 刘乃震, 何凯, 叶成林. 地质工程一体化在苏里格致密气藏开发中的应用[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 53–60.
- Liu Naizhen, He Kai, Ye Chenglin. Application of geology–engineering integration in the development of tight gas reservoir in Sulige gasfield[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 53–60.
- [27] 孟祥振, 刘鹏, 孟旺才, 冷丹凤, 陈立军. 鄂尔多斯盆地西南部延长组 7 段致密油地质“甜点”评价[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 90–95.
- Meng Xiangzhen, Liu Dan, Meng Wangcai, Leng Danfeng, Chen Lijun. Geological “sweet-spot” evaluation of Chang-7 member tight oil in the Yanchang Formation of south western Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 90–95.
- [28] 王凤娇, 刘文坤, 于苏浩. 苏里格气田东区致密砂岩储层特征[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 43–47.
- Wang Fengjiao, Liu Yikun, Yu Suhao. Reservoir characteristics of tight sandstone in the eastern Sulige gas field[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 43–47.
- [29] 李勇, 孟尚志, 吴鹏, 牛鑫磊. 煤层气成藏机理及气藏类型划分——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(8): 22–30.
- Li Yong, Meng Shangzhi, Wu Peng, Niu Xinlei. Accumulation mechanisms and classification of CBM reservoir types: a case study from the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(8): 22–30.
- [30] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 汪泽成, 钱凯. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 44–51.
- Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, Wang Zecheng, Qian Kai. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 44–51.
- [31] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 17–24.
- Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil–gas accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 17–24.
- [32] 周江羽, 吴冲龙, 韩志军. 鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟史[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 20–24.
- Zhou Jiangyu, Wu Chonglong, Han Zijun. Geothermal field and maturing history of organic matter in the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20(1): 20–24.
- [33] 侯启军, 何海清, 李建忠, 杨涛. 中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 1–13.
- Hou Qijun, He Haiqing, Li Jianzhong, Yang Tao. Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 1–13.