

鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践

付金华^{1,2}, 李士祥^{1,2}, 刘显阳^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田公司, 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)

摘要:鄂尔多斯盆地中生界延长组主要发育“低渗、低压、低丰度”的“三低”油藏, 油藏受优质烃源岩和大型储集砂体控制。勘探实践中, 突破了传统的理论认识和勘探思路, 不断创新和完善了低渗透油藏勘探理论体系, 构建了曲流河三角洲成藏模式、辫状河三角洲成藏模式、多层系复合成藏模式、坳陷湖盆中部成藏模式和致密油成藏模式等, 不断开创了石油勘探的新局面。包括: 以曲流河三角洲成藏理论为指导, 在陕北地区找到了储量超 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 的大型含油区带; 构建盆地西南辫状河三角洲成藏模式, 在陇东地区发现了储量规模达 10 亿吨级的整装大油田; 创建多层系复合成藏模式, 在姬塬地区落实了超 15 亿吨级的规模储量; 创立内陆坳陷湖盆中部成藏理论, 在华庆地区勘探中取得重大突破; 大力推进致密油地质研究与技术攻关, 在鄂尔多斯盆地形成了新的规模储量接替区。通过创新地质理论、突破关键技术、推行勘探开发一体化和转变发展方式, 提高了“三低”油田的综合勘探效益, 夯实了低渗透油田快速发展的资源基础, 取得了巨大的经济和社会效益。

关键词:勘探地质理论; 勘探实践; 勘探思路; 成藏理论; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE12

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2013)06-1091-11

引用格式: Fu Jinhua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Geological theory and practice of petroleum exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1091-1101. [付金华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1091-1101.]

0 引言

鄂尔多斯盆地位于我国中部, 是陆上第二大沉积盆地。自中国石油长庆油田公司(以下简称“长庆油田”)于 20 世纪 70 年代在鄂尔多斯盆地开展大规模勘探以来, 在古地貌成藏理论^[1-4]、三角洲成藏理论^[5-7]、多层系复合成藏理论^[8]、内陆坳陷湖盆中部成藏理论^[9]的指导下, 先后发现了马岭、安塞、靖安、西峰、姬塬和华庆等一大批油田。截至 2012 年底, 长庆油田已累计在鄂尔多斯盆地探明石油地质储量 $30.76 \times 10^8 \text{ t}$, 2012 年年产石油 $2\,261 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气 $290 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产油气当量达到 $4\,500 \times 10^4 \text{ t}$ 石油当量, 现已步入了快速发展的阶段, 成为了我国油气

产量最高的油气田。

随着鄂尔多斯盆地勘探程度的不断提高, 更加致密的储层已逐渐成为重要的勘探热点, 勘探对象面临“深度大、储集层薄、物性差、非均质性强、含油性变化大”等难题, 勘探理论与工程技术面临着诸多挑战。近年来, 长庆油田面对复杂的地质条件和艰苦的外部环境, 以解放思想为先导, 以全面创新为动力, 以高效益开发低渗透油田为目标, 不断深化盆地地质理论和石油勘探开发规律认识, 不断攻克致密石油勘探开发技术难题, 不断突破制约“三低”油田效益开发的技术瓶颈, 突出新层系、新类型、新领域的勘探, 努力寻找规模含油富集区, 确保了长庆油田年产量 $5\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 的目标和“西部大庆”建设的高

收稿日期: 2013-08-13; 修回日期: 2013-11-27.

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2011ZX05044; 2011ZX05001-004)资助.

作者简介: 付金华(1963-), 男, 湖北黄冈人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探管理工作.

E-mail: fjh-cq@petrochina.com.cn.

效顺利推进。

1 概况

鄂尔多斯盆地是中、新生代盆地叠加在华北古生代克拉通浅海台地基础上发育起来的大型陆内叠合盆地^[10-11],其位于几大构造应力场的交会部位,应力相互消减、均衡,内部构造相对稳定^[12],发育晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘逆冲带、渭北隆起及伊盟隆起等七大构造单元,现今发现的油气田主要分布在伊陕斜坡、天环坳陷两大构造单元。鄂尔多斯盆地中生代为典型的大型内陆坳陷湖盆,具有稳定沉降、湖盆宽缓、沉积范围大的特点,晚三叠世早期进入湖盆发育阶段,发育一套河流相—三角洲相—湖泊相碎屑岩沉积,由于物源供应充足,加之湖盆稳定回返,沉积了一套厚约千余米的湖泊相—三角洲相碎屑岩建造^[8]。

鄂尔多斯盆地长庆油田探区石油储层普遍具有“低渗、低压、低丰度”的“三低”特点,其中主要产层——中生界延长组砂岩储层渗透率为 $(0.3\sim2)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,油藏压力系数普遍偏低,多为 $0.50\sim0.85$ ^[13],石油资源丰度为 $(20\sim40)\times10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。油井自然产能低或无自然产能,必须压裂改造,油井日均产量为 $2\sim4\text{t}$ 。同时长庆油田的“三低”油田具有以下八大优势^[14]:埋藏适中;面积大,储层分布稳定;原油黏度低,流动性好;储层岩石以酸敏矿物为主,水敏矿物较少,利于水驱开发;储层润湿性为弱亲水——中性层;可动油多,驱替效率好;储层微裂

缝发育,吸水能力比较强;储层孔隙、微裂缝搭配比较好,能够形成很好的渗流条件。

三叠系延长组油藏主要受优质烃源岩和大型储集砂体控制^[8],通过不断总结和深化低渗透岩性油藏的成藏特点,延长组主要发育曲流河三角洲成藏模式^[5-7]、辫状河三角洲成藏模式^[15-18]、多层系复合成藏模式^[8]、坳陷湖盆中部成藏模式^[9,18]、致密油成藏模式^[14]等。曲流河三角洲成藏模式:盆地东北沉积体系为曲流河三角洲沉积,油藏沿曲流河三角洲前缘主砂带分布,水下分流河道砂体为主要的储集体,以陕北安塞油田、靖安油田为代表。辫状河三角洲成藏模式:盆地西部沉积体系为辫状河三角洲沉积,油藏受辫状河三角洲前缘分流河道砂体控制,呈带状分布,以陇东西峰油田为代表。多层系复合成藏模式:盆地西北部位于生烃中心,烃源岩厚度大,纵向上储集砂体发育,在异常压力和多种输导体系的有效组合下,形成了纵向上多层系复合含油的场面,以姬塬油田为代表。坳陷湖盆中部成藏模式:油藏主要受三角洲前缘与重力流复合沉积砂体控制,呈大面积分布,以华庆油田为代表。致密油成藏模式:源储互层共生,纵横向上叠置连片,储量规模大,以延长组长7油层为代表。截至2012年底,长庆油田完钻探井近5000口,二维地震 $4.3\times10^4\text{km}$,发现油田30个。已连续10a新增探明储量 $1\times10^8\text{t}$ 以上,2008年以来连续3a石油探明储量超过 $2\times10^8\text{t}$,2011年突破 $3\times10^8\text{t}$,2012年达到 $3.5\times10^8\text{t}$,实现了新的储量增长高峰(图1)。



新增石油探明地质储量
rves in recent years of Changqing Oilfield

2 勘探理论认识及实践

长庆油田立足低渗透岩性油藏实际,持续深化地质综合研究,不断创新和完善石油勘探理论体系,近年来发展创新了“湖相优质烃源岩生烃潜力、湖盆中部成藏机理、多层系石油富集规律、大型三角洲沉积模式、非常规油藏赋存特征”等五大理论认识,实现了“勘探领域从三角洲拓展到深湖区、勘探层系从延长组中上部拓宽到延长组下部、勘探类型由常规油藏发展到非常规致密油”的三大转变,引领了勘探不断取得新发现,在陕北地区、陇东地区、姬塬地区、华庆地区和湖盆中部致密油勘探区等5个地区及领域取得重大突破(图2),石油储量大幅度增加。

2.1 以曲流河三角洲成藏理论为指导,在陕北地区找到了储量超 $10\times10^8\text{t}$ 大型含油区带

陕北地区位于鄂尔多斯盆地中东部,构造十分平缓,晚三叠世延长组,鄂尔多斯盆地陕北地区为构造宽缓的斜坡带,古气候潮湿,物源充足,发育多条河流,盆地内沉积补偿大于沉降,为多个大型复合三角洲的形成提供了条件^[6]。应用三角洲找油理论,进行了三叠系沉积相与油气富集规律的研究,提出了三角洲油气富集规律的基本认识,通过综合分析盆地成因特点以及晚三叠世湖盆形成演化规律,认为鄂尔多斯盆地陕北地区延长组长6油层组发育大面积三角洲沉积体系,三角洲前缘亚相分流河道和河口坝砂体广泛分布,储集条件优越,横向上分布稳

定,纵向上叠合连片,为形成大型岩性圈闭的最有利相带^[7]。

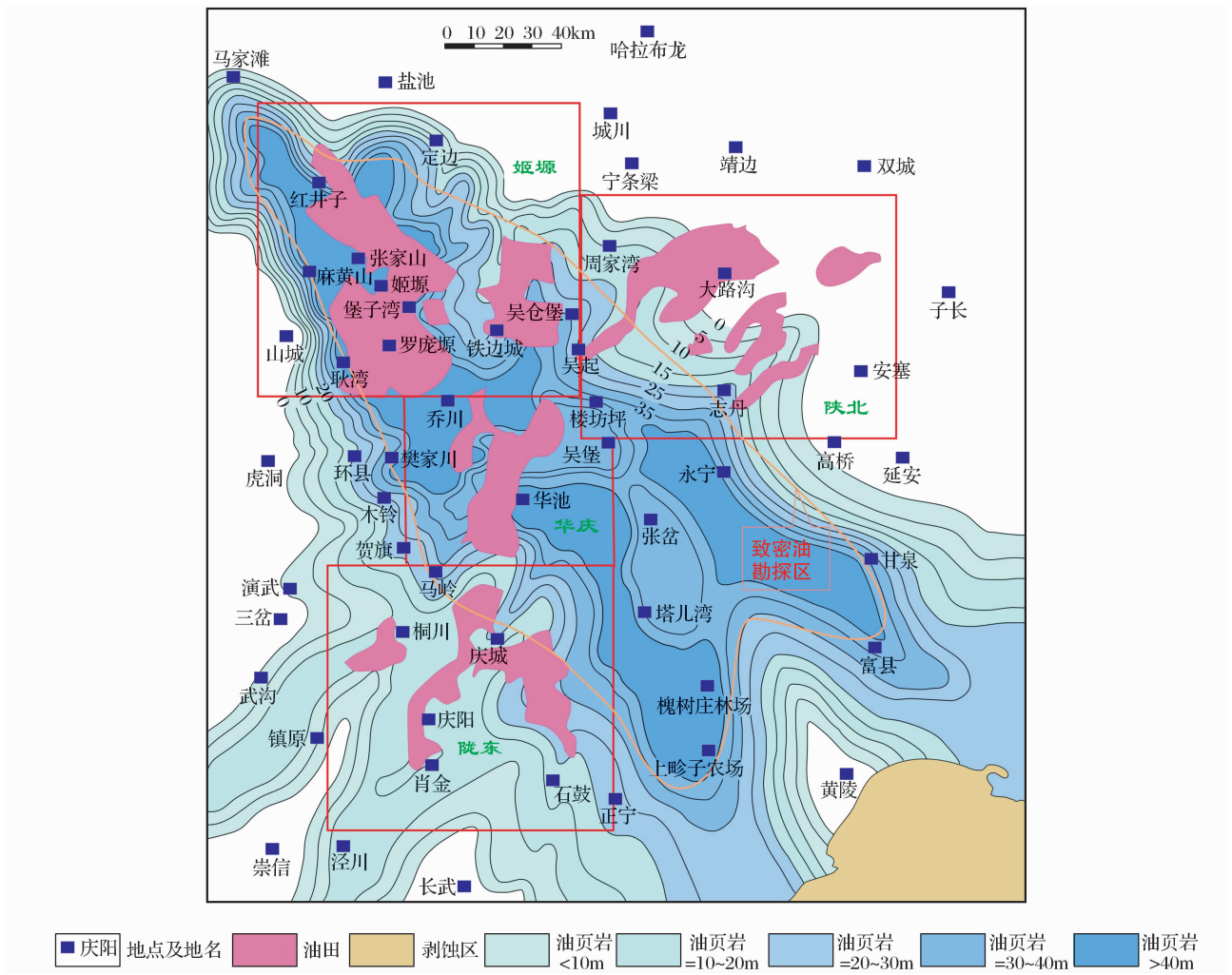


图 2 鄂尔多斯盆地延长组长 7 烃源岩及勘探区域分布特征

Figure 2 Chang 7 source rocks and the exploration area of Yanchang Formation in Ordos Basin

油藏的形成和分布基本受延长组生油凹陷的控制,三角洲体系是形成生、储、盖成油配置的有利地质框架,沿上倾侧变致密层提供了较好的遮挡条件,主要发育大型岩性油藏^[7]。平面上油藏分布受沉积背景控制而具有一定序列性,从长_{6₃}到长_{6₁}砂体进积展布,油藏分布依次向南挺进;长₄₊₅为短暂湖侵期,砂体退积展布,长_{4+5₂}油藏分布在长_{6₁}油藏的北部。储油砂体接受生油坳陷中侧向运移提供的石油,物性较好的叠合连通砂体形成了良好的运移通道,石油可通过叠合砂体长距离运移,纵向上多油层复合发育。

陕北地区长₆油层组砂岩储层储集条件优越,储层岩性为中、细粒长石砂岩,具低成分成熟度,高结构成熟度的特点,孔隙类型以粒间孔和次生溶孔为主。长石类砂岩储层,在自生成岩过程中,浊沸石

沉淀作用使岩石固相体积增加约 40%,但对钙离子和硅离子的消耗限制了自生碳酸盐和石英的沉淀,使得浊沸石发育的层位和地区碳酸盐胶结和自生石英的沉淀作用相对不发育^[19]。由于石油与羧酸类的介入,浊沸石溶蚀形成次生溶孔,大大改善了储层的储渗性能。

20 世纪 80—90 年代,在三角洲找油理论指导下,发现了亿吨级安塞油田、靖安油田。近年来,通过深化石油运聚规律及油藏特征研究,完善了曲流河三角洲成藏理论,开展精细勘探,实现了长₆油藏的复合连片,并发现延长组下组合新的含油有利区^[20-21]。对陕北老区通过进一步精细勘探,扩边连片,预计可形成超 10 亿吨级储量规模。

2.2 构建盆地西南辫状河三角洲成藏模式,在陇东地区发现了储量规模达 10 亿吨级整装大油田

受西南特提斯构造域和华北盆地逆时针旋转的共同影响,鄂尔多斯盆地与秦岭造山带对接后长期处于挤压状态,形成了陡倾的盆地边缘,奠定了广泛发育辫状河三角洲的地质背景。通过深化母岩特征、岩矿组分和沉积相研究,突破了以往陇东地区长8油层组属扇三角洲沉积体系、砂体规模较小的认识,认为沉积物源主要来自盆地西南缘秦岭物源区,为辫状河三角洲沉积^[15],发育多条北东—南西向展布的三角洲砂体,其中三角洲前缘水下分流河道砂体延伸远、展布宽、规模大,具备形成大型岩性油藏的物质条件^[16,22]。

石油在由分散状态到聚集成油藏的渗流过程中,必然遵循流体力学的基本原理,即流体整个系统处于静止状态时,分散状态的石油在其势能能达到最低值以前,其运动方向从高势区向低势区运移。垂向上,长8油层组与长7油层组存在明显的过剩压力差^[18],而上部长6油层组主要以泥质沉积为主,形成了遮挡层,因而,石油具备向下运移的动力条件。横向上,西峰地区过剩压力与最高区相差达20MPa以上,处于石油运移的有利方向,有利于石油的富集和成藏^[23]。

在三角洲砂岩储集体中,受湖水改造作用影响,砂体中心部位和沿岸砂坝储层物性相对较好,而向河道侧翼物性逐渐变差,陇东地区延长组长8₁段渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层主要分布在砂体带的主体部位^[24]。该区孔隙类型以粒间孔为主,成岩早期的烃类充注以及绿泥石膜对石英自生加大的抑制作用,是原生粒间孔得以较好保存的主要原因^[25],成岩微裂缝和局部溶蚀作用是形成相对高渗的有利因素。通过盆地西南部沉积相和油藏控制因素的研究,创立了辫状河三角洲成藏理论,明确了辫状河三角洲分流河道砂体延伸距离远、分布稳定,是石油富集的有利场所。坚持甩开勘探,陇东地区含油面积进一步扩大,在西峰油田东西两侧的镇北、合水地区发现了两大含油富集区,通过进一步勘探和评价,有望形成 $10 \times 10^8 \text{t}$ 以上储量规模。

2.3 创建多层系复合成藏模式,在姬塬地区落实了超15亿吨级规模储量

姬塬地区位于盆地中西部,横跨伊陕斜坡、天环拗陷2个构造单元,山大沟深,自然环境恶劣,地质条件复杂,工程施工难度大,石油勘探经历了曲折的勘探历程,长期未获突破。近年来,在深化沉积相、砂体展布、油藏富集规律等地质研究的基础上,提出了延长组发育东北、西北三角洲沉积体系,纵向上大

型岩性油藏复合连片的新认识,石油勘探取得了重大发现。三叠纪延长世湖盆演化过程中,整体为一个大的湖进湖退的过程,在此期间发生了几期小的湖进湖退过程,姬塬地区发生了多期湖平面的上升和下降,湖平面的变化使得姬塬地区形成了多种类型的砂体。延长组长4+5期为短暂湖侵期,受东北沉积物源控制,主要发育三角洲前缘亚相,水下分流河道和河口坝砂体发育,厚度大,颗粒较粗,分选较好,有利于形成相对高渗储层,为低渗背景上相对高渗带,具有与陕北地区长6三角洲油藏相似的成藏背景,具备良好的勘探前景。姬塬地区长8期主要受西北沉积物源的影响,发育三角洲前缘亚相沉积,地层中植物碎片丰富,植物茎秆保存较完好,垂直虫孔发育,表明湖盆水体整体较浅,水下分流河道砂体展布稳定、连片性好^[21],形成了大面积展布的储集砂体,具备形成大型岩性油藏的基础。

姬塬地区延长组主要储集砂体形成于辫状河三角洲和滨浅湖环境,按砂体成因可以划分为两大类:一类是受牵引流作用控制的河道型砂体,主要为三角洲平原分流河道砂体和三角洲前缘水下分流河道砂体,发育的层位主要为长8₁段^[21]、长6油层组、长9油层组和长4+5油层组;另一类为与湖浪和湖流改造作用有关的滩坝型砂体,主要包括三角洲前缘河口坝砂体和滨浅湖砂质滩坝砂体,砂质滩坝砂体主要发育于长8₂段。在湖平面多次振荡的背景下沉积的泥岩与砂岩呈互层状接触,其中砂岩是石油储集的良好场所,而泥岩形成了较好的盖层条件,多套储盖组合为姬塬地区大型复合油藏的形成奠定了基础,具有发育大型复合岩性油藏的特点。

姬塬地区长7优质烃源岩厚度大、分布范围广^[26],烃源岩层生烃增压产生的过剩压力最高可大于20MPa,长6油层组、长4+5油层组、长8油层组的过剩压力小于10MPa,存在明显的压力差,是石油发生运移的基本动力条件^[8,18]。由于成藏期储层成岩演化程度相对较低,孔渗条件较好,具有生烃增压、双向主动排烃、近源运聚、多种输导和差异聚集的成藏特征^[18,27],长7油层组生成的原油在过剩压力作用下,通过微裂缝和叠置砂体发生垂向及侧向运移,在长4+5油层组、长6油层组、长8油层组形成了大面积分布的岩性油藏,在长9油层组、长2油层组及侏罗系形成了高产的岩性—构造油藏。

在深化沉积体系分析的基础上,重点开展了石油运聚成藏机理研究,总结了姬塬地区具有多层系复合成藏特点,认为姬塬地区具有生烃增压、双向主动排

烃、近源运聚、多种输导及差异聚集的成藏特征(图3),在长4+5油层组、长6油层组、长8油层组^[18]形成了大面积分布的岩性油藏,在长9油层组、长2油

层组及侏罗系形成了高产的构造—岩性油藏。目前该区已有探明地质储量 $9\times 10^8\text{t}$,通过进一步勘探评价,姬塬地区储量规模可达 $15\times 10^8\text{t}$ 以上。

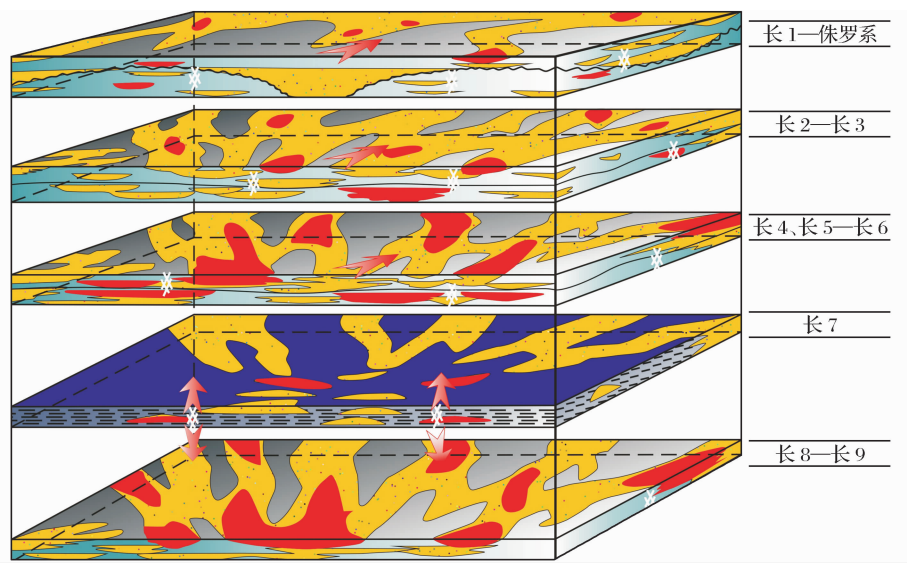


图3 鄂尔多斯盆地姬塬地区多层系复合成藏模式

Figure 3 Multi-layer composites accumulation model in Jiyuan area, Ordos Basin

2.4 创立内陆坳陷湖盆中部成藏理论,在华庆地区勘探取得重大突破

湖盆中部是指位于延长组湖盆中心的华庆—合水—塔儿湾地区,过去一直认为该区属于湖盆中心汇水区,以泥质沉积为主,砂岩致密,物性差,难以形成有效储集砂体,长期未作为重点勘探目标。近年来不断解放思想,顽强探索,开展多学科联合攻关,通过物源分析、湖盆底形、等时地层沉积充填特征研究,构建了三角洲—重力流复合沉积新模式,突破了湖盆中部难以形成有效储集砂体的传统认识,明确了湖盆中部可形成大面积分布的砂岩储集体^[9,28-30],强化工艺技术攻关,坚持勘探开发一体化,石油勘探取得了重大突破,发现了华庆大油田。

通过层序地层和沉积相研究,认为长6期湖盆中部三角洲前缘分流河道砂体、浊积体交替发育,具有较好的储层条件^[28,31]。华庆地区主要发育东北三角洲前缘沉积,以牵引流沉积为主,多期进积砂岩叠加复合;合水地区古地形较陡,在重力等外界因素的诱导下,西南三角洲前缘砂岩形成多期滑塌浊积砂岩^[29-30]。

水下坡折带是三角洲前缘中分流河道能量和沉积动力学状态发生变化的部位,是河流入湖后能量变化的枢纽,在坡折带以下沉积了相对较厚的砂体,而在坡折带以上沉积砂体厚度较薄^[30]。近年来,在层

序地层划分的基础上,围绕晚三叠世湖盆底形形态及其演化规律研究,应用地震层序解释等方法开展坡折带研究,延长组长6段沉积时期,湖盆东北部总体坡度较缓,在吴起南,湖盆底形坡度突然变陡,三角洲前缘水下分流河道砂体在深水坡折带下部的深湖中心发生滑塌、卸载,先期形成的砂体遭受后期水道的下切、侵蚀作用,或直接叠加在其之上,形成了分流河道与滑塌砂体相互叠置的厚层砂岩复合体^[28-30],垂直坡折带分布。位于合水地区的西南部陡坡型沉积发育多期浊积砂岩的复合体,平行坡折带分布。

华庆地区长6储层总体上粒度较细,杂基含量偏高,排驱压力较大,中值喉道半径小,毛细管压力曲线平台明显,喉道分选好,孔隙类型主要有粒间孔、长石溶孔及少量的微裂缝^[31]。由于受沉积和成岩作用的双重影响,在平面上不同区块的砂岩储层物性存在差异,华庆地区西部砂带填隙物中绿泥石较为发育,在三角洲前缘水下分流河道、河口坝以及湖滨波浪作用带等高能环境下,碎屑颗粒表面发育的绿泥石黏土膜能有效增加岩石抗压实能力,抑制石英的自生加大,有效地保护了原生粒间孔,其平均渗透率为 $0.60\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;东部砂带填隙物中碳酸盐含量较高,通过充填粒间孔和粒内溶孔破坏了砂岩孔渗体系,是造成该区物性变差的主要原因,平均渗透率为 $0.35\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,储层相对变差。

湖盆中部地区紧邻生烃中心,源储配置好,发育大型岩性油藏。长₃油层厚度大、分布稳定、连片性好及油藏规模较大,已提交探明地质储量 $5\times 10^8\text{t}$,并在东部发现了新的含油砂带,同时在长₈段新层发现了有利目标区,预计该区整体储量规模可达 $12\times 10^8\text{t}$ 。

2.5 大力推进致密油地质研究与技术攻关,形成了新的规模储量接替区

长₇段沉积期为盆地三叠纪延长期最大湖侵期,发育了一套细粒沉积,储层致密,孔喉细小,结构复杂,渗透率相对较低,地面渗透率一般小于 $0.3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,勘探开发难度极大。进入新世纪以来,随着盆地低渗—超低渗透油藏的经济有效开发以及国外致密油勘探开发的突破,进一步坚定了我们挑战致密油的信心。

长₇油页岩厚度大、分布范围广(图2),与之互层共生的碎屑岩较为发育,具备致密油形成的有利地质条件,具有较好的发展潜力。鄂尔多斯盆地致密油具有分布范围广、烃源岩条件优越、砂岩储层致密、孔喉结构复杂、物性差、含油饱和度高、原油性质好、油藏压力系数低的特点^[14]。致密油储集体广泛发育纳米级孔喉系统^[32],是大面积连续型或准连续型石油聚集的根本特征,决定了石油呈连续或准连续分布^[33-34]。鄂尔多斯盆地致密油储层中值孔喉直径介于 $20\sim 300\text{nm}$ 之间,主要分布于 $50\sim 200\text{nm}$ 之间^[14],原油分子运移的储层喉道半径下限为 45nm ,致密砂岩储层中大多数连通的孔喉直径大于临界孔喉直径,满足石油在致密储层中运移的条件。

长₇烃源岩厚度大,生烃增压作用产生的强大动力,促使石油沿泥页岩纳米级孔隙及干酪根网络向邻近的致密砂岩储层连续充注,双向主动排烃,有利于石油在致密储层中运聚成藏。

通过在鄂尔多斯盆地积极开展致密油地质研究及技术攻关,积极推进致密油勘探,在陇东地区X233井区开展水平井勘探示范区,实施水平井10口,平均水平段长度1508m,油层钻遇率达90.3%,试油均获日产 100m^3 以上高产油流,试采效果好,单井试采日产油 $10\sim 20\text{t}$,致密油勘探取得了良好的效果。目前鄂尔多斯盆地已落实含油面积为 1400km^2 、储量规模 $10\times 10^8\text{t}$ 以上,形成了新的储量接替领域。

3 勘探思路与体会

勘探的每一次重大发现,均得益于勘探理论的创新及勘探思路的转变^[35-36]。围绕鄂尔多斯盆地低渗透岩性油藏的实际,开展了针对性的勘探配套技

术,地质理论的创新和勘探思路的转变,使得鄂尔多斯盆地低渗透岩性油藏的勘探发生着深刻的变革。

3.1 勘探思路转变引领石油资源评价4次变迁

鄂尔多斯盆地中生界石油勘探不断获得新发现的关键在于中生界具有丰富的石油资源基础。随着地质理论的创新、勘探技术的突破,实现了“勘探领域、勘探层系、勘探类型”的三大转变,鄂尔多斯盆地石油总资源量的评价发生了4次变迁,由最初的 $19.1\times 10^8\text{t}$ 增加到 $128.5\times 10^8\text{t}$,增幅570%(图4)。

20世纪80年代,在侏罗系古地貌成藏理论指导下,以侏罗系油藏为主要勘探对象阶段,对鄂尔多斯盆地进行了首次资源评价,石油总资源量为 $19.06\times 10^8\text{t}$;20世纪80—90年代,随着勘探的持续推进,在曲流河三角洲成藏理论的指导下,延长组勘探获得重要突破,发现了亿吨级的安塞油田和靖安油田,勘探层系发生了转变,开展了第2次资源评价,石油总资源量为 $40\times 10^8\text{t}$;20世纪90年代到21世纪初,勘探对象主要集中在延长组,在辫状河三角洲成藏理论和多层系复合成藏理论的指导下,勘探区域由盆地的东北部拓展到了盆地的西南部 and 西北部,工艺技术的进步解放了一批低渗透储层,发现了西峰、姬塬等大型岩性油藏,在更加详实的地质资料基础上,将石油资源量重新评价为 $85.88\times 10^8\text{t}$;21世纪初以来,长庆油田不断攻克低渗透,在湖盆中部成藏理论和致密油成藏理论的指导下,勘探推进到了半深湖亚相—深湖亚相区,在坳陷湖盆中部发现了华庆大油田,并且随着对低渗透储层的进一步攻关,更加致密的储层也得到了有效改造,发现了亿吨级的致密油储量规模,对资源量进行了新一轮的评价,将石油总资源量评价为 $128.5\times 10^8\text{t}$ 。相关理论的突破及勘探技术的进步,推动了这4次资源量评价的变迁,理论认识的创新和思路的转变,对石油勘探起着重要的指导意义。

3.2 勘探认识与体会

长期以来,长庆油田的发展受到低渗透上能不能建设大油田的困惑和束缚。我们坚持解放思想、实事求是,一切从实际出发,辩证地认识低渗透,创新石油地质理论,形成进一步加快发展的思路、目标和举措,推动了长庆油田加快发展。面对复杂的地质条件和艰苦的外部环境,以解放思想为先导,以全面创新为动力,以高效益开发低渗透油田为目标,不断深化盆地地质理论和石油勘探开发规律认识,不断攻克致密油勘探开发技术难题,不断突破制约“三低”油田效益开发的管理瓶颈,努力营造有利于油田

加快发展的良好环境,确保了年产 $5\,000\times10^4\text{t}$ 的目标和西部大庆建设的高效顺利推进。

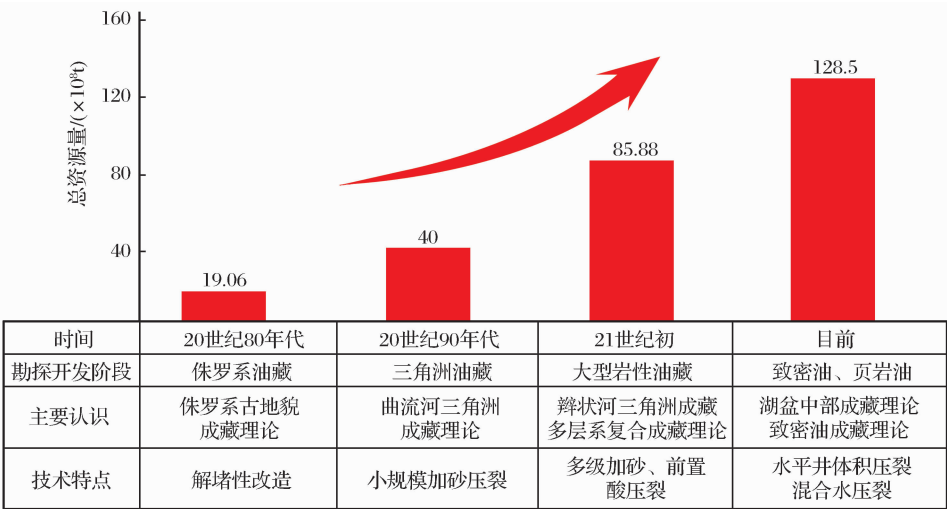


图 4 长庆油田石油总资源量变化

Figure 4 Changes of total oil resources in changqing Oilfield

3.2.1 解放思想是不断开创石油勘探新局面的灵魂

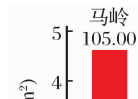
思想的解放引领了油田的大发展。解放思想就是思想和实际相结合、主观和客观相结合。解放思想是我们认识新形势、认识新事物、完成新任务的根本思想武器。长庆油田在几十年的发展历程中,每一次思想的解放和认识的深化,都带来了石油产量的跨越式增长。正是由于解放思想,油田开发主力油层由侏罗系向三叠系成功转移,摆脱了原油产量在 100 多万吨徘徊 10 多年的困局。也是由于解放思想,长庆油田提出了重新认识鄂尔多斯盆地、重新认识长庆低渗透、重新认识长庆油田自己的“三个重新认识”思想,走上了油气并举、协调发展的良性轨道,建成了千万吨级大油田。

与时俱进地去认识问题、解决问题是解放思想的基本要求。与时俱进,用发展的眼光认识低渗透,今天没有石油的地方并不意味着明天找不到石油,现在不能开发的储量并不意味着未来也不能开发。只有打破传统思维束缚,用发展的眼光看问题,才能实现新的发展。正是由于解放思想,当年制约“三低”油田有效开发的一系列难题都得到较好解决,长庆油田步入了大幅度增储上产的新时期。从 20 世纪 70 年代马岭油田到 80 年代安塞油田,尤其是到近年来湖盆中部华庆油田和致密油的勘探发现,储层物性从 $100\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 降到 $0.2\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 左右(图 5),在不断挑战低渗透中,解放思路实现了一次又一次新突破,引领长庆油田开创了石油勘探的新局面。

3.2.2 创新地质理论是引领石油勘探新突破的不竭动力

长期以来,长庆油田始终把地质理论创新作为勘探工作的突破口,形成了对盆地石油资源宏观、立体、全方位的新认识,引领了盆地勘探不断取得大突破、大发现。鄂尔多斯盆地石油勘探经历了经验认识、初步认识和全新理论创新 3 个阶段,不同认识阶段获得了不同的勘探发现。

坚持把勘探放在首位,不断创新地质理论,进一步拓宽了石油勘探领域。盆地东北曲流河三角洲成藏模式的建立,为陕北油区的发现提供了理论依据:20 世纪 80 年代,提出了“湖盆东北部长 6 期发育大型曲流河三角洲,前缘水下分流河道及河口坝砂体是石油富集有利场所”的新认识,锁定延长组长 6 油层组大面积分布的三角洲砂体为重点勘探目标,找到了盆地内第一个亿吨级的安塞油田。盆地西南辫状河三角洲成藏理论的形成,有效地指导了西峰大油田的勘探;通过深化盆地沉积体系研究,提出了“陇东地区延长组长 8 油层组属辫状河三角洲沉积”的新认识,突破了“盆地西南水下扇难以形成大面积储集体”的传统观念,探明了西峰整装大油田。多层系复合成藏理论的创立,指导了姬塬多层系的勘探突破:姬塬地区处于生烃中心,优质烃源岩厚度大、有机质丰度高,在主生排烃期,可产生强大的排烃运移动力,烃类通过相互叠置的砂体、微裂缝和不整合面等优势通道进行运移,是多层系复合含油的有利地区,发现了姬塬多层系复合含油有利区。三角洲



前缘牵引流与重力流复合控砂新认识的提出,开辟了湖盆中部勘探新领域:通过深化湖盆中部沉积特征研究,提出了“长6期湖盆中部三角洲前缘牵引流与重力流控制了厚层储集砂体展布”的新认识,突破了“湖盆中部以泥质岩类为主,缺乏有效储层”的传统观念,开辟了勘探新领域,发现了华庆油田。地质理论的创新使盆地石油分布格局得到进一步证实,石油勘探证实了长7致密油及长6油藏、长8油藏在全盆地均有分布,长4+5油藏、长9油藏大面积分布,长3以上油藏及长10油藏局部分布的格局。

3.2.3 突破关键技术是推动石油勘探大发展的重要保障

突破关键技术,提高了致密性油藏开发效益。长庆油田紧密围绕提高单井产量、提高采收率和降低开发成本的“两提一降”目标,借鉴北美地区近几年页岩气、致密油开发成功经验,在富集区筛选、水平井体积压裂、直井多层压裂等一系列关键技术上取得突破。水平井开发技术成为低渗透油田转变开发方式、提高单井产量的主要方向。近几年,油田完钻的水平井投产初期平均单井产量达8.3t,是直井产量的3倍以上。压裂技术的进步,特别是分段压裂技术的突破,使得水平井在长庆油田大规模应用成为可能。长庆油田在甘肃庆城实施的水平井勘探示范区取得重要突破,实施的YP1井—YP10井共10口水平井体积压裂获得成功,初期试油日产量均在100m³以上,投产半年仍保持10多吨的日产水平,其中YP1井和YP2井投产一年半仍保持10多吨的日产水平。针对单井产液量低、油井分散、管理幅度大、成本高的实际,长庆油田研发了一批撬装化、小型化、一体化集成设备并大面积推广应用,简化了工艺流程,大幅提高了油田建设速度,减少了土地占用,初步实现了数万口油水井、上千座场站的智能化、网络化管理,有效控制了建设投资和用工总量增长,提高了开发效益。大井组丛式井开发技术全面推广,实现了土地等资源的集约利用,2000年以来共节约土地超过13×10⁴公顷。注重科技自主创新与集成创新,研发了复杂地貌地震采集与处理、油层测井快速评价与产能预测等12项主体技术和致密油藏规模有效开发、数字化生产控制管理等7项配套技术系列,形成了适应大面积、隐蔽性、致密岩性油藏的勘探开发配套技术。关键技术的突破,使我们拥有独特的“三低”油藏规模有效开发的技术系列,成为提高发展质量的革命性推动力量。

3.2.4 勘探开发一体化是提高勘探成效的重要手段

勘探开发一体化可以概括为“四个一体化、两个延伸、三个促进”。“四个一体化”即:油田勘探、评价、开发目标一体化;方案部署、井位优化一体化;地质研究、技术攻关一体化;资料录取、信息共享一体化。“两个延伸”即:勘探向后延伸,实现快速、规模、高效开发;开发向前延伸,不断扩大石油勘探成果。“三个促进”即:缩短油田建设周期,促进投资效益的提高;预探、评价和开发共同寻找富集区,减少重复建设,促进规模建产,整体开发;加强前期评价,促进低渗透油田快速有效开发。

“整体勘探、整体评价、整体开发”是实现“大油田管理,大规模建设”的有效手段,是长庆油田实现油气当量5 000×10⁴t的重要保障^[37]。近年来,围绕姬塬、华庆、志靖—安塞、镇北—合水四大含油区带,在勘探、评价、开发中全面践行勘探开发一体化,取得了丰硕的勘探开发成果。

通过勘探开发一体化的实施,实现了整体研究、整体部署、集中评价和快速上产,有效缩短了勘探评价周期(图6)。在生产实践中得到了“大型岩性油藏是全面推进勘探开发一体化的地质基础,坚持勘探开发一体化是加快发展的保证,科技创新是实现勘探开发一体化的重要保证,标准化和市场化是实现勘探开发一体化的有效手段”的认识与体会。

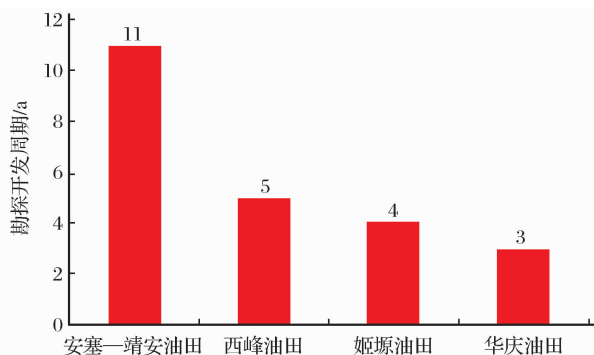


图6 长庆油田主要大油田勘探开发周期对比

Figure 6 Exploration and development cycle comparison in main oil field in Changqing Oilfield

4 结论

鄂尔多斯盆地中生界延长组具有“低渗、低压、低丰度”的“三低”特征,油藏主要受优质烃源岩和大型储集砂体控制。长庆油田立足低渗透岩性油藏实际,不断完善勘探理论与勘探实践,勘探理论指导勘探实践,勘探实践完善勘探理论,不断开创了石油勘

探的新局面。突破传统的理论认识和勘探思路,不断创新和完善了低渗透油藏勘探理论体系,构建了曲流河三角洲成藏模式、辫状河三角洲成藏模式、多层系复合成藏模式、坳陷湖盆中部成藏模式和致密油成藏模式等。例如:以曲流河三角洲成藏理论为指导,在陕北地区找到了储量超 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 的大型含油区带;构建盆地西南辫状河三角洲成藏模式,在陇东地区发现了储量规模达 10 亿吨级的整装大油田;创建多层系复合成藏模式,在姬塬地区落实了超 15 亿吨级的规模储量;创立内陆坳陷湖盆中部成藏理论,在华庆地区勘探取得重大突破;大力推进致密油地质研究与技术攻关,形成了新的规模储量接替区。

参考文献 (References):

- [1] Tao Huifei, Wang Duoyun, Li Shutong, *et al.* Relationship between the Yangchang Formation top's paleogeomorphology and the Earlier Jurassic Petroleum, Suijing Oilfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 183-187. [陶辉飞, 王多云, 李树同, 等. 绥靖油田延长组顶部侵蚀古地貌与侏罗系油藏关系分析[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 183-187.]
- [2] Guo Zhengquan, Zhang Lirong, Chu Meijuan, *et al.* Pre-Jurassic palaeogeomorphic control on the hydrocarbon accumulation in the Lower Yan' an Formation in southern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 63-71. [郭正权, 张立荣, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地南部前侏罗纪古地貌对延安组下部油藏的控制作用[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 63-71.]
- [3] Huang Yanran, Wen Zhigang, He Wenxiang, *et al.* Influence of Early Jurassic eroded paleogeomorphology on reservoir distribution in Jiyuan area[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2008, 15(6): 38-40. [黄俨然, 王志刚, 何文祥, 等. 姬塬前侏罗纪侵蚀古地貌对油藏分布的影响[J]. *特种油气藏*, 2008, 15(6): 38-40.]
- [4] Zhu Jing, Li Wenhui, Han Yonglin, *et al.* Research on palaeogeomorphic features of Pre-Jurassic and accumulation regularity of oil reservoir in the area of eastern Gansu, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1229-1237. [朱静, 李文厚, 韩永林, 等. 陇东地区前侏罗纪古地貌及油藏成藏规律研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1229-1237.]
- [5] Yang Hua, Fu Jinhua, Yu Jian, *et al.* Oil/Gas accumulation characteristics and exploration methods of the deltaic lithologic reservoirs in northern Shaanxi area[J]. *Petroleum Science*, 2004, 1(2): 69-78.
- [6] Yang Hua, Fu Jinhua, Yu Jian. Oil reservoir enrichment patterns of large delta systems and application of exploration techniques in Shanbei area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 6-10. [杨华, 付金华, 喻建. 陕北地区大型三角洲油藏富集规律及勘探技术应用[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 6-10.]
- [7] Zhu Guohua, Wang Wenjiong. A discussion on delta hydrocarbon accumulation of Yanchang Formation in Ansai, north Shaanxi[J]. *Oil & Gas Geology*, 1987, 8(4): 440-447. [朱国华, 王文炯. 论陕北安塞延长组三角洲的油气富集条件[J]. *石油与天然气地质*, 1987, 8(4): 440-447.]
- [8] Liu Xianyang, Hui Xiao, Li Shixiang. Review of formation rule for low permeability reservoir of Mesozoic in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 964-974. [刘显阳, 惠潇, 李士祥. 鄂尔多斯盆地中生界低渗透岩性油藏形成规律综述[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 964-974.]
- [9] Yang Hua, Fu Jinhua, He Haiqing, *et al.* Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huaqing, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 641-648. [杨华, 付金华, 何海清, 等. 鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 641-648.]
- [10] Sun Zhaocai, Xie Qiuyuan. Evolution characteristics of superposed basin and its petroleum significance; Example for Ordos Basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1980, 2(1): 13-21. [孙肇才, 谢秋元. 叠合盆地的发展特征及其含油气性——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *石油实验地质*, 1980, 2(1): 13-21.]
- [11] Compilation group of petroleum geology of Changqing Oilfield. *Petroleum Geology of China; Vol. 12, Changqing Oilfield* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 1-103. [长庆油田石油地质志编写组. *中国石油地质志: 卷十二, 长庆油田* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1-103.]
- [12] Deng Xiuqin, Yao Jingli, Hu Xifeng, *et al.* Characteristics and geological significance of hydrodynamic system on ultra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2011, 41(6): 1044-1050. [邓秀芹, 姚泾利, 胡喜锋, 等. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透岩性油藏成藏流体动力系统特征及其意义[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2011, 41(6): 1044-1050.]
- [13] Li Shixiang, Shi Zejin, Liu Xianyang, *et al.* Quantitative analysis of the Mesozoic abnormal low pressure in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 528-533. [李士祥, 施泽进, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地中生界异常低压成因定量分析[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 528-533.]
- [14] Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11. [杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1-11.]
- [15] Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 34-44. [付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 34-44.]
- [16] Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, *et al.* Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(2): 25-29. [付金华, 罗安湘, 喻建, 等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向[J]. *石油学报*, 2004, 25(2): 25-29.]
- [17] Wang Zhikun, Wang Duoyun, Zheng Ximin, *et al.* Depositional

- characteristics and physical behavior analysis of the Chang6-8 reservoir of Trassic Yanchang Formation in Longdong area, Shanganning[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(5): 380-385. [王志坤, 王多云, 郑希民, 等. 陕甘宁盆地陇东地区三叠系延长统长6—长8储层沉积特征及物性分析[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(5): 380-385.]
- [18] Chu Meijuan, Li Shixiang, Liu Xianyang, *et al.* Accumulation mechanisms and modes of Yanchang Formation Chang 8 interval hydrocarbons in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 683-692. [楚美娟, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组石油成藏机理及成藏模式[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 683-692.]
- [19] Zhu Guohua. Formation of lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(1): 1-8. [朱国华. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. *石油学报*, 1985, 6(1): 1-8.]
- [20] Fu Jinhua, Li Shixiang, Liu Xianyang, *et al.* Sedimentary facies and its evolution of the Chang 9 interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 269-284. [付金华, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长9油层组沉积相及其演化[J]. *古地理学报*, 2012, 14(3): 269-284.]
- [21] Li Shixiang, Liu Xianyang, Han Tianyou, *et al.* Accumulation characteristics in Chang 10 oil reservoir set of Yanchang Formation in the north area of Shaanxi[J]. *Oil and Gas Geology*, 2011, 32(5): 698-709. [李士祥, 刘显阳, 韩天佑, 等. 陕北地区延长组长10油层组成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(5): 698-709.]
- [22] Li Shixiang, Chu Meijuan, Huang Jinxiu, *et al.* Characteristics and genetic mechanism of sandbody architecture in Chang-8 oil layer of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 435-444. [李士祥, 楚美娟, 黄锦绣, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组砂体结构特征及成因机理[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 435-444.]
- [23] Fu Jinhua, Liu Guangdi, Yang Weiwei, *et al.* A study of the accumulation periods of low permeability reservoir of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 125-131. [付金华, 柳广弟, 杨伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透油藏成藏期次研究[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 125-131.]
- [24] Ma Chunlin, Wang Ruijie, Luo Bilin, *et al.* Characteristics of Chang-8 oil reservoir and distribution of oil reservoirs in Ma-ling Oilfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 214-219. [马春林, 王瑞杰, 罗必林, 等. 鄂尔多斯盆地马岭油田长8油层组储层特征与油藏分布研究[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(3): 214-219.]
- [25] Chu Meijuan, Guo Zhengquan, Qi Yalin, *et al.* Quantitative diagenesis and diagenetic facies analysis on Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 477-484. [楚美娟, 郭正权, 齐亚林, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8储层定量化成岩作用及成岩相分析[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 477-484.]
- [26] Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, *et al.* Leading effect of high class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation-hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(3): 289-293. [张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用—强生排烃特征及机理分析[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(3): 289-293.]
- [27] Deng Xiuqin, Liu Xinshe, Li Shixiang. The relationship between compaction history and hydrocarbon accumulating history of the super-low permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2009, 30(2): 156-161. [邓秀芹, 刘新社, 李士祥. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密史与油藏成藏史[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(2): 156-161.]
- [28] Deng Xiuqin, Li Wenhui, Li Shixiang, *et al.* Deepwater sedimentary association of Chang 6 oil bearing formation, Yanchang Formation of Huaqing Oilfield in Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(3): 1-12. [邓秀芹, 李文厚, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地华庆油田延长组长6油层组深水沉积组合特征[J]. *地质科学*, 2010, 45(3): 1-12.]
- [29] Li Xiangbo, Fu Jinhua, Chen Qilin, *et al.* The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 286-294. [李相博, 付金华, 陈启林, 等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 286-294.]
- [30] Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, *et al.* Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075. [邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.]
- [31] Zhang Rui, Wang Qi, Yao Jingli, *et al.* Diagenetic characteristics and pore evolution from high-quality reservoirs of Yanchang Formation in the middle of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(6): 890-896. [张瑞, 王琪, 姚经利, 等. 鄂尔多斯盆地延长世湖盆中部长6段储层成岩特征[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(6): 890-896.]
- [32] Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, *et al.* First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864. [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.]
- [33] Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-653. [邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641-653.]
- [34] Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconven-

tional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2):173-187. [邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2):173-187.]

[35] Luo Qun. Discussion on theoretical innovation of Chinese petroleum geology and exploration-concept and models of theoretical innovation and thinking[J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(5):6-10. [罗群. 试论中国石油地质勘探理论的进一步创新——理论创新的概念、模式与思考[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(5):6-10.]

[36] Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, Zou Caineng, *et al.* Geological exploration theory for large oil and gas provinces and its significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5):513-522. [赵政璋, 杜金虎, 邹才能, 等. 大油气区地质勘探理论及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5):513-522.]

[37] Fu Jinhua, Yao Jingli, Hui Xiao, *et al.* A discussion on integrative management model about exploration and development of scientific research institutions[J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(4):76-80. [付金华, 姚泾利, 惠潇, 等. 科研单位推行勘探开发一体化管理方式的探讨[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(4):76-80.]

Geological Theory and Practice of Petroleum Exploration in the Ordos Basin

FU Jin-hua^{1,2}, LI Shi-xiang^{1,2}, LIU Xian-yang^{1,2}

(1. *PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China*; 2. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China*)

Abstract: The Mesozoic Yanchang Formation mainly develops “low permeability, low pressure, low abundance” reservoirs, which is controlled by high quality source rocks and large sand body. In exploration practices, the traditional theoretical knowledge and exploration ideas made breakthrough, and the exploration theory in low permeability reservoirs also had constant innovation and improvement. The accumulation models, including meandering river delta, braided river delta, multi-layer and composite, the middle part of depression lake basin and tight oil, initiate a new situation of oil exploration. Guided by the meandering river delta accumulation theory, large oil-bearing region with geological reserves more than 1 billion tons have been found in the north Shanxi area. Based on the accumulation model of braided river deltas in southwest, monoblock oilfield has been discovered in eastern Gansu province, which has geological reserves more than 1 billion ton. According to the multiple layer compound accumulation model, more than 1.5 billion tons geological reserves had been found in Jiyuan area. With the central lake accumulation model of inland depression basin, the exploration obtained a significant breakthrough in Huaqing area. With the advancement of tight oil geological research and technological breakthrough, new scaled reserve replacement area has been formed in the Ordos Basin. Based on the geological theory innovation, key technology breakthrough, systematic exploration and development implementation, and development mode change, it enhanced the integrated exploration benefit of “three low” oil and gas fields, solid the resource foundation of the rapid development of low permeability oil and gas fields, and achieved huge economic and social benefits.

Key words: Exploration geological theory; Exploration practice; Exploration idea; Accumulation theory; Ordos Basin