

鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望

李荣西^{1,2} 段立志^{1,2} 张少妮^{1,2} 陈宝赞^{1,2} 石彬³ 阎改萍⁴

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部
重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710060;
4. 中国石油天然气集团公司测井有限公司 长庆事业部, 陕西 西安 710021)

摘要: 鄂尔多斯盆地是中国规模最大的低渗透油气资源勘探与开发基地, 其低渗透油气藏具有油层物性差、非均质性、油藏成藏因素复杂、油藏分布受多种因素联合控制等特点。在回顾鄂尔多斯盆地低渗透油气藏成藏理论研究和勘探历史经验基础上, 认为目前鄂尔多斯盆地低渗透油气藏成藏研究存在两大理论体系, 即沉积学控制成藏理论和运移动力学控制成藏理论, 前者从沉积特征出发, 强调储层砂体沉积相、非均质性和成岩作用在低渗透性油藏形成中的控制作用, 后者从石油运移与聚集过程出发, 强调运移动力学在初次运移和二次运移中的重要作用。但是目前低渗透油气成藏研究存在一定的局限性和片面性, 过分强调了单个地质因素的作用, 其中沉积学控制成藏理论局限于沉积相划分和沉积模式建立方面, 过多地强调了沉积相对成藏因素静态的控制作用, 而忽视了油气成藏过程的动态属性; 运移动力学控制成藏理论却过分强调了油气流体运移过程的模式化和公式化, 过分夸大和随意解释了油气运移成藏记录——油气包裹体的作用及其原始地质意义, 轻视了深部地层条件下油气运移的复杂性和油气包裹体记录的多解性。因此, 传统的单因素控制油气成藏理论和相应的勘探研究方法已经不能确切揭示油气富集规律和有效指导勘探工作。低渗透油气成藏理论研究趋势是要重视分析油气藏地质记录, 动态研究油气藏形成和演化历史过程, 总结油气富集规律, 为油气勘探战略部署提供重要资料。

关键词: 低渗透储层; 初次运移; 二次运移; 成藏; 岩性油藏; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1; P618.130.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)04-0364-09

Review on Oil/gas Accumulation with Low Permeability in Ordos Basin

LI Rong-xi^{1,2}, DUAN Li-zhi^{1,2}, ZHANG Shao-ni^{1,2}, CHEN Bao-yun^{1,2}, SHI Bin³, YAN Gai-ping⁴

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of West Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Petroleum Exploration and Development, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Company Limited, Xi'an 710060, Shaanxi, China; 4. Changqing Branch, Well Logging Company, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Ordos Basin is the largest base for low permeable oil/gas exploration and development in China. The low permeable oil/gas accumulation in Ordos Basin featured with poor physical property, strong heterogeneity and complex factors controlling oil/gas accumulation and distribution. Based on reviewing and summarizing the history and experience of low permeability reservoir exploration in Ordos Basin, it indicated that there are two theory systems in studying low permeability reservoir formation at present. One is sedimentary controlling reservoir formation theory, which emphasizes that low permeability reservoir formation was controlled by sedimentary facies, heterogeneity and diagenesis; the other one is dynamics controlling reservoir formation theory, which focuses on oil/gas migration dynamics in primary migration and secondary migration. At present, it is insufficient to study low permeable oil/gas accumulation because traditional theories emphasize on single factor controlling oil/gas accumulation and corresponding exploration, which can not exactly reveal oil/gas accumulation principle and effectively guide exploration. Similarities and differences between low permeability reservoirs and conventional reservoirs should be paid attention. The sedimentary controlling reservoir formation theory limited to divide sedimentary facies and to establish depositional model; it emphasized on the controls of sedimentary factors to oil/

收稿日期: 2011-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173055)

作者简介: 李荣西(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 工学博士, 从事油气地质与勘探研究。E-mail: rongxi99@163.com

gas accumulation, and ignored the dynamic properties of hydrocarbon accumulation process. Dynamics controlling reservoir formation theory overemphasizes the modeled and formulistic oil/gas fluid migration; it exaggerated and optionally explained the role of oil/gas migration and accumulation record (oil/gas inclusion) and its original geological significance, and ignored the complex of oil/gas migration and the multiplicity of oil/gas inclusion record. It is important to study reservoir geological record and reservoir formation history to summarize oil/gas accumulation principle and to provide important data for oil and gas exploration.

Key words: low permeable reservoir; primary migration; secondary migration; accumulation; lithological reservoir; Ordos Basin

0 引言

油气成藏及其分布规律是指导油气勘探实践活动的重要理论支撑,低渗透油气资源在中国分布广,储量大,在油气勘探和开发中占据十分重要的地位^[1]。鄂尔多斯盆地是中国规模最大的低渗透油气资源勘探与开发基地,经过几十年的艰苦努力,低渗透油气勘探与开发取得了举世瞩目的成就,油气产量创历史新高^[2-6]。鄂尔多斯盆地低渗透油气勘探成功经验证明,油气成藏和分布规律研究是指导油气勘探战略部署的理论基础,也是低渗透油气勘探成功的关键。近年来,低渗透油气成藏机理、油气聚集成藏控制因素以及如何通过油气成藏研究来更加有效地指导油气勘探实践活动等成为学者潜心研究的重要问题^[6]。

1 油气成藏理论发展与勘探历程回顾

油气勘探的最终目标是发现油气藏,油气成藏研究是油气勘探的重点。通过油气成藏地质特征研究,总结油气成藏机理和油气分布规律,指导油气勘探活动是油气成藏研究的核心任务。学术界曾经提出过许多关于油气成藏机理的理论,例如“背斜油气成藏理论”、“海相油气成藏理论”、“陆相油气成藏理论”、“异常压力圈闭”、“水动力圈闭”、“油气差异性聚集理论”、“煤成油理论”、“低熟油气理论”、“深盆气理论”、“油气成藏系统理论”、“复式油气聚集带理论”、“油气成藏源(源岩灶)控论”、“压力封存箱”等。这些油气成藏理论的提出和研究为油气勘探活动提供了有益的理论指导,张厚福等对此进行了系统的总结和评述^[7-8]。

鄂尔多斯盆地低渗透油气资源丰富,经过几代人持之以恒不懈努力,已经发现了一大批油气田,形成了南油北气、油气并举、协调勘探和开发的战略格局,特别是进入21世纪以来,一批新的油气接替区相继投入勘探和开发,使鄂尔多斯盆地油气勘探进入鼎盛期^[2-5]。回顾和总结鄂尔多斯盆地油气勘探

历程和经验表明,低渗透油气勘探取得的突破和进展无不与油气成藏理论发展有关。

长期以来,学者对鄂尔多斯盆地油气藏特征进行了大量分析研究。纵观这些研究成果可以看出,鄂尔多斯盆地油气藏具有两大突出特征,一是典型的陆相油气藏,二是超低—低渗透油气藏。早在1941年,中国著名石油地质学家潘钟祥教授首次提出了“陆相生油论”,明确指出石油不仅来自海相地层,也能够来自淡水沉积物(即陆相沉积),陆相地层也可以形成有开采价值的油藏^[9]。但是,鄂尔多斯盆地真正意义上的油气勘探和研究工作开始于20世纪70年代,长庆油田和原地质矿产部第三普查大队等勘探单位长期以来坚持不懈地开展油气地质研究和勘探工作,初期以少量探井资料结合盆地边缘野外露头地质资料,重点研究有关盆地构造演化、地层、沉积相和烃源岩与生烃等石油天然气基础地质问题^[10]。20世纪80年代以前,油气勘探主要以背斜构造理论为指导,进行以构造圈闭为主要目标的油气勘探工作。鄂尔多斯盆地西缘和中南部地区由于断裂和褶皱构造发育,地层埋藏浅,野外地层露头清晰,是当时油气勘探的重点;到了1980年代早期之前,在陕甘宁边区的陇东、延安和马家滩等地区的勘探获得了成功^[10]。20世纪80年代中期,随着油气勘探进程加快,油气勘探理论也出现了百家争鸣的局面,代表性的有“岩性油气成藏”、“复式油气聚集带理论”、“煤成油理论”、“油气成藏源控论”等^[7]。同时,低渗透岩性油气藏被视为鄂尔多斯盆地的重要勘探目标,油气勘探思路从寻找构造圈闭向岩性圈闭转变,针对三叠系延长组低渗透岩性油藏的勘探研究工作也有序进行着,其中有关浊沸石溶蚀和次生孔隙发育机理等理论研究为鄂尔多斯盆地安塞、志丹、靖安、华池等油田的成功勘探提供了非常重要的理论支撑^[11-12]。进入21世纪以来,低渗透油气藏油气运移和聚集机理的研究为姬塬和西峰等新区块低渗透油气勘探工作提供了理论指导^[13-14]。

伴随着低渗透油气藏勘查的巨大成果,天然气

勘探也取得了辉煌成绩,其中 20 世纪 90 年代初期,陕参 1 井获得了日产 $28.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流,标志着鄂尔多斯盆地从石油勘探向油气并举、协同勘探的转变,并由此正式拉开了大规模天然气勘探的历史序幕^[6]。目前,以鄂尔多斯盆地北部为主战场的岩性天然气藏勘探取得了重大突破,陆续发现了米脂、靖边、乌审旗、榆林和苏里格等大型天然气田,其中上古生界低渗透性大型砂岩岩性气层自下而上包括本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组,多层系天然气复合联片勘探已经成为鄂尔多斯盆地天然气勘探的主要方向^[2-6]。

2 低渗透油气藏基本特点

低渗透油气藏具有低孔、低渗、低饱和和低产等特征。实际上,低渗透性油气层是一个相对概念;根据中国多年油气田勘探开发实践经验和理论研究,按照油藏分类标准,提出将储集岩空气渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油气层称为低渗透性油气层,另外,根据油层渗透率可以将低渗透性油气层进一步细分为三类:空气渗透率为 $(10.1 \sim 50.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油气层为一般低渗透性油气层;空气渗透率为 $(1.1 \sim 10.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油气层为特低渗透性油气层;空气渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油气层为超低渗透性油气层^[15]。生产实践证明,低渗透性油藏油井产量一般可以达到工业油流标准,只是当油井产量低下时,需要采取压裂措施提高单井产量才能取得较好的开发效果和良好的经济效益。而特低渗透性油气层含油饱和度低,一般达不到工业油流标准,需要采取大型压裂等油层改造措施,才能获得一定产能^[15-16]。

鄂尔多斯盆地目前发现和开发的低渗透性油藏地质和分布特征,可以简要概括为以下 3 点。

2.1 油气藏形成地质因素复杂多样

鄂尔多斯盆地位于中国东西部两种不同大地构造动力学机制和两种不同地壳构造演化背景结合部位,处于西北和华北两大地理地貌和地质构造单元过渡区,其地质构造演化既继承了华北地块古生代碳酸盐岩台地稳定构造演化特征,又叠加了西部中生代盆山活动构造演化的地域特色^[17-21]。鄂尔多斯盆地复杂的构造地质演化背景决定了其油气形成与演化的多阶段性、多样性和复杂性,特别是中生代晚期到新生代以来的西部活动构造地质作用加大了盆地油气成藏条件和保存条件的复杂性^[22-24]。

近年来钻探实践表明,传统的构造、沉积和古地

貌等控制油气成藏的理论和相应的地质研究和勘探方法虽然具有盆地范围内的广泛适应性,但是并不能完全确切地反映和揭示不同地区、不同层系的油气富集成藏规律,也很难有效指导勘探工作。对于低渗透碎屑岩油气藏,由于储层砂体薄、散、杂,加之岩石沉积非均质性和成岩非均质性影响,油气聚集和分布规律更加复杂。因此,在目前油气勘探形势下,需要充分应用新的油气成藏理论和研究手段,有针对性地开展鄂尔多斯盆地不同地区、不同层系的低渗透油气藏成藏特征研究,在不同性质构造作用叠加改造和以河流三角洲沉积为主导的大背景之下,分地区、分层系剖析油气成藏的主控因素,总结低渗透油气藏成藏和分布规律,为今后大规模开展低渗透油气勘探提供新的技术支撑和宝贵资料。

2.2 油层物性差,非均质性强

鄂尔多斯盆地低渗透岩性油气藏储量占总油气储量的 60% 以上^[15],储层岩石类型以细砂岩为主,碎屑颗粒中石英和岩屑含量相对较高,胶结物以黏土矿物和碳酸盐岩矿物为主。该盆地储层物性差,孔隙度和渗透率低。储层物性数据统计表明,鄂尔多斯盆地孔隙度大于 20% 的油层占有油层数的 14%,孔隙度为 10%~20% 的占 37%,孔隙度小于 10% 的占 50%。鄂尔多斯盆地目前发现的油气藏主要分布在渗透率为 $(1 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层砂体中,储层渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油层占有油层数的 60% 以上^[15,25]。储层孔隙以粒间孔为主,原生孔隙和次生孔隙都发育,其中溶蚀孔隙发育是优质油层的标志性特征。储层非均质性特征明显,表明其主要与储层沉积旋回和成岩作用有关^[12]。一般储层裂缝比较发育,而且主要为构造裂缝,裂缝产状以高角度裂缝为主,裂缝宽度小,一般只有十几个微米,延伸长度较大。实验测试表明,该盆地低渗透油气藏原始含水饱和度高,一般为 30%~50%。储层敏感性强,原油质量高、密度小、黏度小、含胶质和沥青少、含蜡量高^[15,25]。

2.3 油气分布受多重因素联合控制

鄂尔多斯盆地三叠系低渗透性油藏主要分布在围绕三叠系延长组以长 7 期深湖为中心的多个三角洲砂体,包括延安、安塞、定边、靖边、环县、庆阳、正宁和直罗等三角洲。延长组自下而上,从长 10 到长 2 均发现工业油层,其中长 8—长 2 为主要含油层。低渗透油气藏勘探实践表明,在沉积砂体控制的油气宏观聚集成藏背景之下,河道主砂带上发育的低幅构造高点或相对高孔高渗带一般为油气聚集场

所,即在岩性圈闭基础上叠置的低幅构造是较好的圈闭^[13]。

目前,鄂尔多斯盆地天然气勘探集中于盆地北部地区,该区受伊盟古隆起和由陆表海向陆相沉积演化的地质背景双重控制。天然气主要赋存在自北而南展布的晚古生代大型河流三角洲砂体,从东向西依次为神木—米脂、东胜—榆林、乌审旗、杭锦旗—苏里格和鄂托克旗等砂带,主砂带呈细长条状上下叠置,气层自下而上有本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组。不同时期河道摆动较大,多层系天然气复合联片勘探已经成为鄂尔多斯盆地天然气勘探的主要方向之一^[4-6]。

3 低渗透油气藏形成理论研究现状

目前有关鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成机理及其控制因素的研究成果较多,可以将这些成果归结为沉积学控制成藏理论和运移动力学控制成藏理论两种观点。

3.1 沉积学控制成藏理论

沉积学控制成藏理论主要从储层沉积地质特征出发,认为低渗透油气层的含油(气)性受控于沉积体系、沉积相和储层砂体的非均质性,因为勘探发现油气层分布与沉积相控制的沉积砂体展布有关,其中三角洲前缘分流河道砂体为最主要的油气储层,也是最重要的油气聚集成藏场所。区域沉积演化分析认为,延长组层系序列表现出一个完整的从湖进到湖退的沉积旋回,并自下而上划分出低位体系域、湖进体系域和高位体系域,由此从层序地层学观点出发对延长组油气层分布进行预测。经文献检索发现,20世纪90年代中期以来,有关鄂尔多斯盆地延长组层序地层方面的文献超过百篇,其中不乏十几篇博士学位论文,大多涉及区域性、局部地区性的层序和高分辨层序划分与对比等。但是,勘探成果证明,延长组油层一般均为规模不大的透镜状砂岩,砂体宽度一般仅有几百米到1 000 m左右,长度也不过几千米,而且砂体厚度和展布多变,并不像海相地层那样具有一定的规模和相对稳定性。虽然可以用层序地层学观点探讨地层旋回性及其区域构造成因,但是探讨其对油藏成藏的控制作用没有实际意义。

沉积相对延长组油藏的控制主要体现为古地理位置、古气候变化和物源供给等因素引起河流—三角洲沉积环境中入湖水流状态和强度发生变化,致使不同沉积微相中砂体粒级、分选、孔隙结构等都存在

明显差异,造成纵向上层间和平面上不同砂体间具有不同的孔渗特征,最终形成沉积体系中不同砂体含油性的差异^[26-27]。砂体的非均质性也是造成其含油性差异的主要原因之一。对于同一成因类型的砂体,由层内不同微层间砂岩碎屑粒度大小、颗粒排列、片状碎屑和胶结物含量等差异引起的微观渗透率各向异性,造成含油层系层内非均质性和含油性的差异。延长组勘探成果表明,一般的水下分流河道砂体具有明显的正韵律沉积旋回特征,旋回下部滞留沉积处颗粒粗,但分选差,杂基含量较高,后期成岩作用也强,其含油性一般较差,而旋回上部细砂岩层段分选好,杂基含量低,具颗粒支撑结构,原生孔隙保存好,孔隙度和含油饱和度都较高。顶部粉砂质泥岩和泥质粉砂岩段层理和纹理发育,起到直接盖层的作用^[28]。

除了沉积相和砂体非均质性对油气成藏控制外,砂岩成岩作用对储层物性和含油性影响也非常明显。勘探表明,局部构造发育区块储层砂体的次生孔隙或者裂隙也相对较发育,多属于高孔高渗区块,也就是高孔隙高渗区与局部构造和主砂体常常叠置。如果综合考虑沉积作用和成岩作用在低渗透性砂岩油藏形成中的控制作用,可以将沉积作用控制的低渗透性砂岩油藏称为原生低渗透性砂岩油藏,其特点是沉积物细,成岩作用弱,原生孔隙和次生孔隙均不发育,低渗透性的原因是物性“先天不足”^[29]。将成岩作用控制的低渗透性砂岩油藏称为次生低渗透性砂岩油藏,其特点是成岩作用强,胶结作用和自生矿物发育,降低了储层孔隙度和渗透率,储层致密,原生孔隙残留少,但是溶蚀作用使碳酸盐岩、浊沸石、钠长石和斜长石等矿物溶蚀,次生孔隙非常发育,储层孔隙度和渗透性得到改善,从而形成有效储层^[29]。定量分析表明,压实成岩作用和胶结成岩作用导致延长组储层原始孔隙度损失超过50%以上^[30]。除此之外,晚期构造裂隙作用改善了低渗透性砂岩的渗透性,储层中出现的大量裂隙是油气运移的主要通道和富集的主要空间,特别是发育的许多肉眼不能观测但在显微镜下可以观测到的显微裂隙,使储层渗透性得到改善,从而形成低渗透性储层。

研究表明,延长组长2+3油气藏属于典型的原生低渗透性砂岩油藏,残余粒间孔隙是储层主要孔隙类型。长4+5到长8属于次生低渗透性砂岩油藏,溶蚀孔隙发育情况是低渗透性砂岩储层评价的重要标志。

3.2 运移动力学控制成藏理论

运移动力学控制成藏理论主要是从油气运移与聚集历史过程出发,讨论油气运移方式、驱动力、通道、时间、期次和物理化学条件等。油气运移包括初次运移和二次运移两个阶段,目前对油气二次运移成藏过程研究较多,而油气初次运移研究是油气成藏研究的弱点,也是难点^[30-32]。

3.2.1 油气初次运移

泥岩异常压实所导致的异常过剩压力是油气初次运移的主要动力。鄂尔多斯盆地三叠系含油层广泛分布有促使油气发生初次运移的异常过剩压力,由异常过剩压力所控制的油气初次运移在相当大程度上影响了油气二次运移及富集成藏过程。陈荷立曾对鄂尔多斯盆地一些探井泥岩压实曲线分析研究表明,延长组发育有广泛的泥岩欠压实现象,主力生油层系(长7油层组)的欠压实现象尤其明显,认为生油层系中较高的异常过剩压力成为油气初次运移的主要动力^[33]。

油气初次运移的条件之一是烃源岩中有机质成熟的深度与异常高压出现的深度要匹配,这样才能形成既能生、又能排的有效烃源岩^[29]。也就是说,产生异常压实的最小埋深就是油气具备初次运移动力的最小深度。通过对鄂尔多斯盆地中部大量油藏形成过程研究表明,鄂尔多斯盆地中部地区产生初次运移的深度在晚侏罗世末以前没有达到门限深度,无法产生油气初次运移,而只在白垩系沉积之后才进入较大的埋深,并在早白垩系晚期达到最大埋

深,油气大量形成并发生大规模运移。而且,伴随油气形成和运移,油层物性也相应发生变化,油藏形成就是油气形成、运移及其与储层物性演化匹配的结果(图1)。

油气初次运移的方向及途径与动力学关系十分密切,因为地下油气运移总是按照沿阻力最小的途径由相对高过剩压力区向相对低过剩压力区运移。大量研究表明,鄂尔多斯盆地延长组低渗透油气成藏体系中长7段烃源岩异常压力是油气排出和运移的主要动力,对于渗透能力较好的上下储层,烃源岩侧向过剩压力差总是小于其与上下相邻储层之间的过剩压力差,烃源岩形成的油气侧向运移阻力一般高于向上下储层运移的阻力,这样生成的油气在过剩压力驱动下将首先进入邻近储层,其方向既可向上也可向下^[34],前人对此已经进行了大量的研究^[29,33-34]。刘勇等基于过剩压力理论分析了鄂尔多斯盆地代表性单井剖面过剩压力分布,认为油气初次运移方向与油气聚集具有较好的一致性^[29]。进一步从理论上分析认为,下部地层具有更高的过剩压力;因此,在正常情况下,长7烃源岩形成的油气初次运移方向应以垂向向上运移为主(图2a)。

如果长7段烃源岩上覆的长6和长4+5储层致密,裂缝不发育,输导能力差,那么长7烃源岩形成的油气在过剩压力驱动下无法突破上覆致密储层阻力而进入长6及其以上储层成藏。但是,如果其下部长8和长9储层物性好,输导能力强,那么当长7烃源岩形成油气的过剩压力到达或者超过下伏储

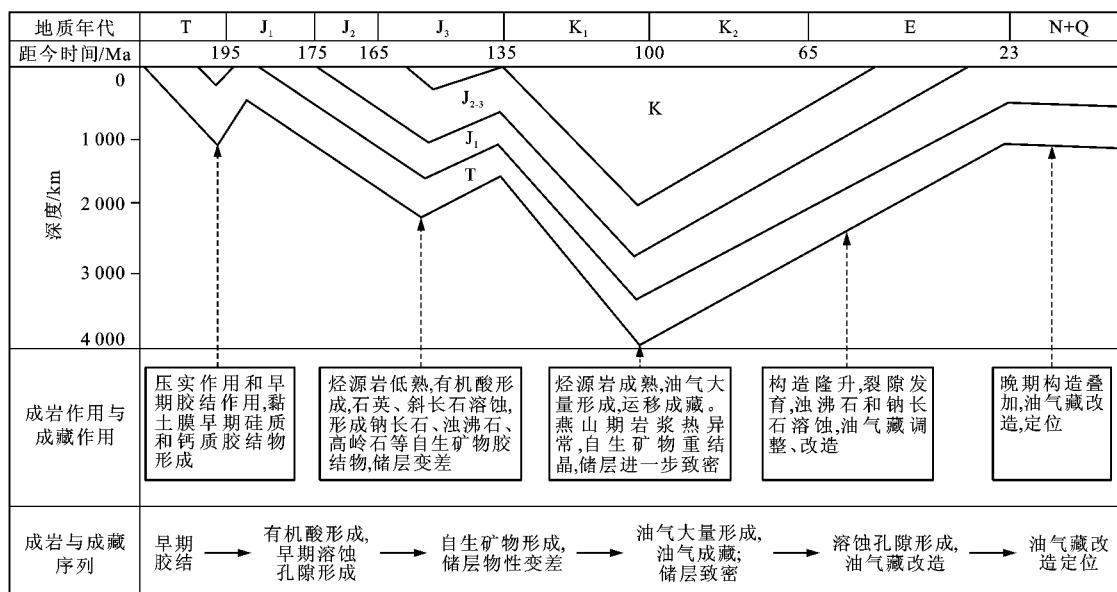


图1 延长组低渗透储层致密与油气成藏时间序列

Fig. 1 Time Sequence of Low Permeable Reservoir Compaction and Oil/gas Accumulation in Yanchang Formation

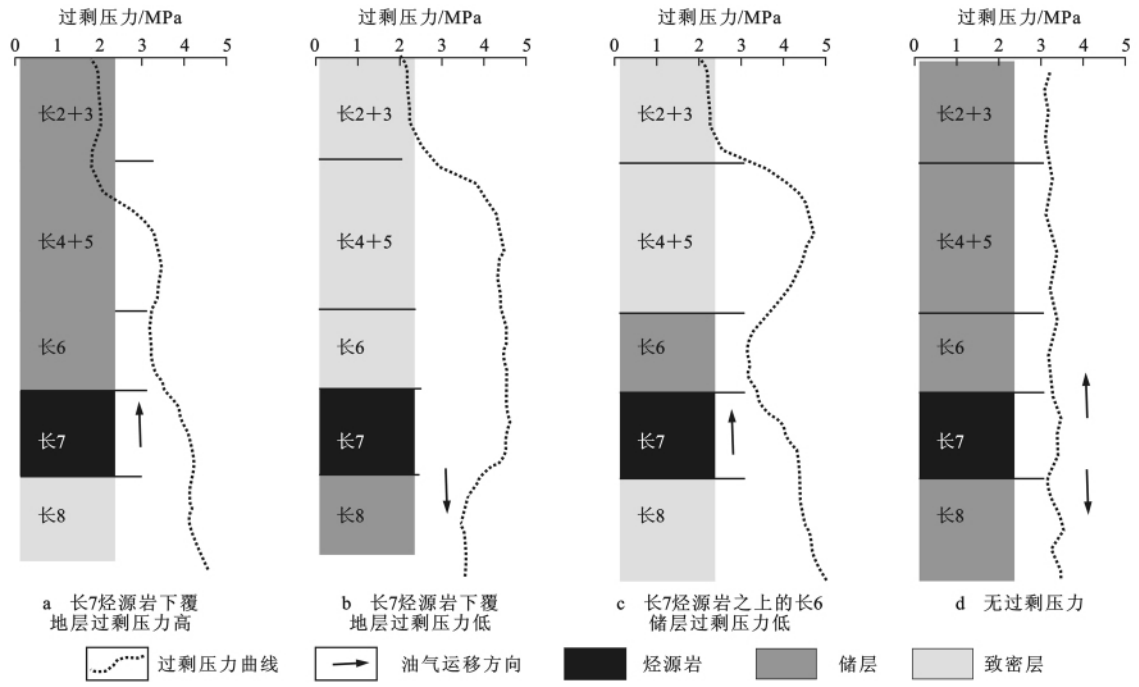


图 2 延长组长 7 烃源岩过剩压力与油气运移关系

Fig. 2 Diagram Showing Relations Between Residual Pressure of Chang-7 Hydrocarbon Source Rocks and Oil/gas Migration in Yanchang Formation

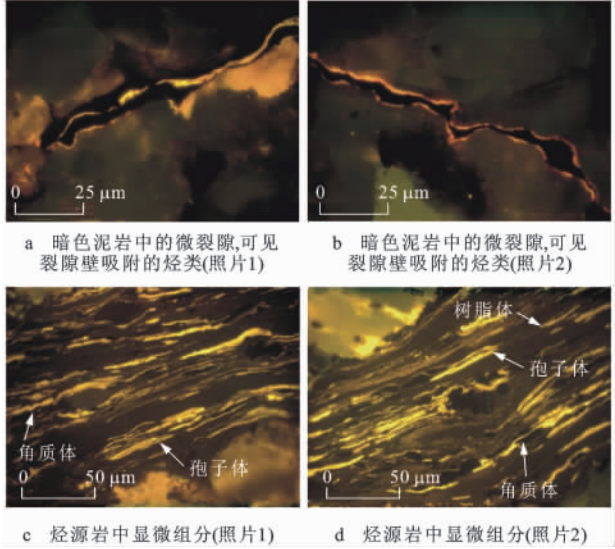
层对油气下移阻力时,油气就会向下运移进入长 8 和长 9 储层成藏(图 2b)^[35]。当然,如果长 7 烃源岩存在横向相变,当其与透镜状砂体侧向联通时,长 7 烃源岩生成的油气可以发生侧向长距离运移,在远离生烃中心地带聚集成藏。

在垂直剖面上,延长组长 4+5 储层泥岩厚度大,储层致密且裂缝不发育,输导能力差,而长 6 储层砂体厚度较大,长 7 烃源岩形成的油气在过剩压力驱动下虽然可以突破上移阻力进入长 6 储层,但是无法继续上移进入长 4+5 储层(图 2c),这就是勘探实践发现的延长组长 6 油层比长 4+5 油层发育的原因。在长 7 烃源岩大量生烃前,如果延长组存在着区域性裂缝以及长 7 烃源岩上下储层存在连通的裂缝,那么不存在过剩压力的情况,生成的油气可以顺利向上和向下排出,进入上下储层中(图 2d)。

张文正等认为,对于长 7 优质油源岩而言,长 7 储层优质油源岩生烃作用强,生烃作用产生的超压是巨大的,完全有可能成为石油初次运移(排烃)的最主要动力^[36],甚至对低渗透储层中的油气二次运移产生重要影响,同时认为长 7 烃源岩以连续油相运移并为特低渗—超低渗储层提供油气。

鄂尔多斯盆地半深湖—深湖相优质油源岩厚度较大,单层厚度一般为 5~25 m,累计厚度大都为 10~50 m,最厚可达 80 m 以上。从石油形成和排

烃的传统观点分析认为,厚度如此大的烃源岩形成石油的排泄通道及其排烃效率值得深入研究。实际上,通过在显微镜下对烃源岩观察发现,长 7 烃源岩中发育大量显微裂隙,在荧光下内壁可见黄色的吸附烃类,这些裂隙呈类似“香肠”状不规则延伸,这是石油在高压下运移造成的一种结果(图 3)。显



注:荧光镜下,峰 6 井,2 439.9 m。

图 3 延长组长 7 烃源岩中显微裂隙照片

Fig. 3 Microscopic Features of Micro-fractures and Oil-prone Macerals in Chang-7 Hydrocarbon Source Rocks of Yanchang Formation

微裂隙实际上是长 7 烃源岩形成石油和排烃的证据和记录。

3.2.2 油气二次运移

二次运移是油气成藏的关键,涉及运移通道、动力、方向和流体势等问题。在正常条件下,油气总是沿阻力最小的方向以及沿优势运移通道向流体势减小的方向运移聚集。油气运移通道一般包括孔渗性好的砂体、开启性断层和不整合面等。油气二次运移动力包括浮力、水动力、构造应力和异常压力等。二次运移的时期也是关注的主要问题。通过地质分析认为,油气二次运移时期应该与烃源岩大量生排烃时期、运移通道形成时期和区域地壳构造运动发生的时期有关,一般应综合考虑这 3 个地质时期匹配关系及其与油气成藏的对对应关系。近年来,油气包裹体储层成岩作用及孔隙演化以及油气充注地球化学记录等方面的研究为判断油气二次运移和成藏时间提供了许多直接的证据和研究方法^[32-41]。

鄂尔多斯盆地延长组属于特低渗透储层,断裂构造不发育,主要为致密岩性油藏,油气二次运移成藏机理颇受关注。张文正等在强调鄂尔多斯盆地长 7 优质油源岩在石油形成中决定性作用的同时,也肯定了其在低渗透油气成藏富集中的主导作用,认为只有优质烃源岩的存在及其强排烃作用产生的高压才能突破储层的各种阻力形成具工业规模的油田^[36-37]。

近年来,借助物理模拟、数值模拟等方法,应用流体力学方法和思路,研究多孔介质下油-气-水多相渗流机理,研究油气二次运移发生的浮力、水动力和毛细管力等 3 个重要驱动力特征,建立油气运移模型,分析油气运移输导体系和油气运移通道展布特征等,从而探讨在地质圈闭中油气运移和聚集的动力学过程及其对成藏的控制作用。Hindle 研究在多种驱动力作用下油气流体运移通道分布特征的思路和方法,对于低渗透砂岩油层油气运移研究具有指导意义^[38]。刘玉林等利用建立的一种真实砂岩微观模型,分析了鄂尔多斯盆地长 8 致密砂岩的微观非均质性特征,认为砂岩的成岩作用和孔隙结构是影响低渗透砂岩微观非均质性的主要原因,由溶蚀作用引起砂岩产生强烈的非均质性并形成长 8 致密砂岩的高渗带是油气聚集成藏的主要场所^[37]。罗晓容等总结了通过物理模拟实验研究含油气多相流体排替过程,从而建立特定地质背景下油气流体运移路径的模式;并应用以浮力为主要动力的数学模型(即 MigMOD 模型),基于实验室尺度排替过程

的物理模拟,以鄂尔多斯盆地陇东地区长 8 储层的输导体系为例,进行了盆地大尺度范围和实际地质条件下非均匀输导层内油气运移过程的理论模型分析;结合流体势场和输导格架模拟获得的运移路径分布图,发现目前已发现的油田位置与运移路径和油气聚集范围比较吻合^[14]。

另一方面,随着分析测试手段的提高,应用伊利石测年技术和流体包裹体测温,在盆地构造和生烃演化历史过程恢复基础上,研究流体运移历史和示踪分析。有关这方面的研究成果很多,而且目前仍然是鄂尔多斯盆地低渗透油气藏成藏研究的热点和重点。

4 低渗透油气藏成藏理论研究趋势

鄂尔多斯盆地是中国最主要的低渗透油气资源勘探和开发基地,油气勘探取得了举世瞩目的成绩,有关油气成藏研究也方兴未艾。从目前的认识来看,有关油气藏形成机理和分布规律仍然是低渗透油气成藏研究难点和普遍关注的焦点问题,对低渗透油气藏形成时间、期次、成藏过程、控制因素等存在着不同认识和观点。虽然有关低渗透油气藏研究成果很多,但是目前仍然有点“瞎子摸象”的感觉,由于不同研究者从不同角度出发、采用不同手段进行研究,过分强调了某单个因素的作用,得出的结论不可避免地具有一定的局限性和片面性,与油田勘探实际不同程度地存在一定差距。多年来,通过研究认为,低渗透性油气成藏机理研究必须建立在低渗透性油藏储层成因与油气注入关系基础上,查明二者成因及其相互联系,需要注重研究低渗透储层与成藏的特殊性和常规油气成藏一般性的异同点,需要注重从储层岩石成岩矿物客观原始记录以及实验分析来揭示地质历史时期的油气藏形成和演化历程。

综合分析认为,目前研究鄂尔多斯盆地低渗透油气藏成藏研究需要重点研究以下问题^[42]。

(1)鄂尔多斯盆地低渗透油气储层以碎屑岩为主,碎屑岩储层原始孔、渗条件都很好,原始孔隙度一般超过 30%,许多研究者也恢复出鄂尔多斯盆地低渗透油气储层原始孔隙度在 35% 以上^[37],而现今鄂尔多斯盆地低渗透油气储层孔隙度一般仅为 10%~15%,那么它如何变成了低渗透储层?低渗透储层形成的原因是什么?什么时间和成岩阶段变成低渗透储层?

(2)低渗透储层孔、渗条件都很差,但是储层中

原始孔隙水如何能够排得出去?油气如何能够进来?同时,低渗透储层以透镜体砂岩为主,砂体周围一般为致密层包围,内外流体如何进出和交换?

(3)鄂尔多斯盆地低渗透油气储层致密时间与油气充注和定位成藏时间序列如何?这关系到储层成岩作用与孔隙演化的阶段性和油气充注的时序关系问题,具体分析它们的时间序列不外乎以下3种情况:①储层先致密成为低孔渗层,油气后充注进入储层成藏。如果这样,那么油气依靠什么动力、通过什么通道进入储层的?储层中原始孔隙水通过什么通道如何排出的?②油气先充注,储层后致密。如果这样,那么储层为什么在油气充注后才变成致密层?因为根据鄂尔多斯盆地低渗透油气勘探结果发现,有些粒度粗而且物性很好储层砂体并不是油气层,而含油气层砂体一般粒度细、物性相对较差;③储层致密与油气充注二者同时进行。如果这样,那么储层致密和油气充注之间就成为因果关系,那么是什么因素控制了储层致密和油气充注的发生,有什么规律可循?

总之,有关鄂尔多斯盆地低渗透储层油气运移相态、方式、动力、通道等仍然需要深入研究。目前,从理论上有不同的解释和推论,但是油气储层作为储存油气的场所,应该有相关地质记录和证据,而目前大多研究缺少这类证据。

当前,研究低渗透性油气藏时所用的手段和方法、思路和解决问题的出发点等诸方面存在不同之处。例如,沉积学控制成藏理论仍然局限于沉积相领域,过多强调沉积相的绝对控制作用;但是,低渗透性砂岩油层孔隙演化史表明,成岩作用在储层发育中的作用并不比沉积相的重要性小。目前,对延长组成岩矿物及其与储层孔隙和含油性关系研究不够,大部分研究只停留在对砂体沉积相划分、成岩作用类型、成岩阶段和成岩序列等一般性分析,而对成岩矿物成因、成岩流体物质来源和形成条件的研究很少,成岩作用对储层物性和含油性的影响研究不够深入。特别是如何通过成岩作用研究预测储层分布,并能有效指导勘探实践活动,是一项迫切的任务。

同样,运移动力学控制成藏论过分强调油气流体运移过程的模式化和公式化,过分夸大和随意解释了油气运移成藏记录——油气包裹体的作用及其原始地质意义,轻视了深部地层条件下油气运移的复杂性和多因素性。实际上,油气包裹体既记录了油气运聚地质历史信息,又记录了成岩流体信息;油

气包裹体就是油气成藏各因素匹配巧合的记录。运移动力学控制成藏理论在研究和解释油气包裹体成果时,不能脱离研究区构造演化、沉积成岩历史、油气形成过程等油气成藏因素的动态演化,更不能简单地就包裹体记录而解释油气成藏历史过程,应该加强研究区构造演化、沉积成岩历史、油气形成过程等油气成藏因素的动态研究,将油气包裹体落实和对应到具体的构造演化阶段、确切的沉积相带、明确的成岩阶段、确定的成岩寄主矿物、具体的油气形成阶段和运移期次。

5 结语

低渗透油气藏分布广、储量大,在中国油气资源勘探中占有重要的地位。鄂尔多斯盆地是中国目前最重要的油气资源勘探和开发基地,其低渗透油气藏具有油层物性差、非均质性强、油藏成藏因素复杂、油藏分布受多种因素联合控制等特点。在沉积学控制成藏理论和运移动力学控制成藏理论指导下,鄂尔多斯盆地低渗透油气藏成藏研究和勘探取得了巨大成就;但是,实践证明传统的单因素控制油气成藏理论和相应的勘探研究方法难以确切地揭示油气富集规律,也不能有效地指导勘探工作。重视油气藏客观地质记录,动态研究油气藏形成和演化历史过程,总结油气富集规律,是今后油气成藏研究的趋势。因此,继续加强对鄂尔多斯盆地低渗透油气成藏研究,对当前和今后油气勘探战略部署显得十分重要,同时对指导中国同类型油气资源勘探具有重要借鉴意义。

本文是对近十年来对鄂尔多斯盆地三叠系低渗透油气成藏研究成果的系统总结,十多年来长庆油田分公司有关领导和技术人员与笔者共同研究,一起野外考察,对一些学术问题时常进行面对面交流和讨论,因此,本文的一些观点和成果也是大家集体智慧的集中反映。

参考文献:

- [1] 李道品,张连春.我国低渗透油田开发当前之新进展[J].低渗透油气田,2004,9(1):1-9.
- [2] 付金华,魏新善,任军峰,等.鄂尔多斯盆地天然气勘探形势与发展前景[J].石油学报,2006,27(6):1-4.
- [3] 李德生.重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学[J].石油勘探与开发,2004,31(6):1-7.
- [4] 马新华.鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析[J].石油勘探与开发,2005,32(4):50-53.
- [5] 王道富,杨华,付金华.鄂尔多斯盆地天然气勘探开发战略

- 研讨[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 1-4.
- [6] 杨 华, 付金华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 5-8.
- [7] 张厚福, 王永诗. 油气藏研究的历史、现状与未来[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [8] 张厚福, 徐兆辉. 从油气藏研究的历史论地层-岩性油气藏勘探[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 114-123.
- [9] Pan C H. Nonmarine Origin of Petroleum in North Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China[J]. AAPG Bulletin, 1941; 25(11): 2058-2068.
- [10] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [11] 朱国华. 陕北油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.
- [12] 朱国华. 碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 114-123.
- [13] 席胜利, 刘新社, 王 涛. 鄂尔多斯盆地中生界石油运移特征分析[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 229-235.
- [14] 罗晓容, 喻 建, 张发强, 等. 二次运移数学模型及其在鄂尔多斯盆地陇东地区长 8 段石油运移研究中的应用[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(增): 73-82.
- [15] 李道品, 罗迪强, 刘雨芬. 低渗透油田概念及我国储量分布状况[J]. 低渗透油气田, 1996, 1(1): 1-8.
- [16] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.
- [17] 汤锡元, 陈荷立. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
- [18] 赵重远. 鄂尔多斯及山西地块地质构造及沉积盆地的形成、演化及其与油气关系[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- [19] 刘池洋, 赵红格, 王 锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 737-747.
- [20] 张福礼. 多旋回与鄂尔多斯盆地石油天然气[J]. 石油实验地质, 2004, 26(2): 138-142.
- [21] Liu S F. The Coupling Mechanism of Basin and Orogen in the Western Ordos Basin and Adjacent Regions of China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1998, 16(4): 369-383.
- [22] 邱领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 34-37.
- [23] 贾承造, 魏国齐, 李本亮. 中国中西部燕山期构造特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 9-15.
- [24] 王庭斌. 中国气藏主要形成、定型于新近纪以来的构造运动[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 126-132.
- [25] 马文杰, 陈丽华, 王雪松. 我国致密碎屑岩天然气储层特征[J]. 低渗透油气田, 1997, 2(4): 8-13.
- [26] 李文厚, 魏红红, 马振芳, 等. 苏里格庙气田碎屑岩储集层特征与天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 387-391.
- [27] 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长 6—8 段储层砂岩成岩作用研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 373-380.
- [28] 褚喜准, 王 琪, 史基安. 鄂尔多斯盆地盐池—姬塬地区三叠系长 2 砂岩成岩演化特征与优质储层分布[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 98-106.
- [29] 刘 勇, 金晓辉, 雷天成. 鄂尔多斯盆地延长组油气初次运移特征[J]. 西安石油学院学报, 1997, 12(1): 8-11.
- [30] 罗静兰, 刘小洪, 林 潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 664-673.
- [31] 席胜利, 刘新社. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移通道研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(5): 628-632.
- [32] 李荣西, 席胜利, 邱领军. 用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 194-199.
- [33] 陈荷立. 油气运移研究的有效途径[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 126-131.
- [34] Hanson A D, Ritts B D, Moldowan J W. Organic Geochemistry of Oil and Source Rock Strata of the Ordos Basin, North-central China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1273-1293.
- [35] Yang Y T, Li W, Ma L. Tectonic and Stratigraphic Controls of Hydrocarbon Systems in the Ordos Basin: a Multicycle Cratonic Basin in Central China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 255-269.
- [36] 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.
- [37] 刘林玉, 王震亮, 高 潮. 真实砂岩微观模型在鄂尔多斯盆地泾川地区长 8 砂岩微观非均质性研究中的应用[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 80-84.
- [38] 杨 华, 张文正. 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: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
- [39] Hindle A D. Petroleum Migration Pathways and Charge Concentration: a Three-dimensional Model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [40] 王 琪, 褚喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯西部长 6 砂岩成岩演化与优质储层[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 17-23.
- [41] 王彩萍. 鄂尔多斯盆地直罗油田长 6 油层组成岩作用及孔隙演化研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 161-165.
- [42] 石 彬. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组油气成藏特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.