

文章编号: 0253-9985(2006)06-0731-10

济阳坳陷第三系隐蔽油气藏勘探理论与实践

张善文

(中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司, 山东 东营 257000)

摘要: 作为典型的陆相断陷盆地, 济阳坳陷经受了复杂的构造活动和沉积作用, 隐蔽油气藏十分发育。通过隐蔽油气藏形成机制的研究, 提出了三个重要的理论认识: 其一, 断裂主导的盆地构造活动形成的陡坡和缓坡断阶、盆内和凸缘坡折控制了储集岩的形成与分布, 成为隐蔽圈闭目标区带优选的基础, 亦即“断坡控砂”; 其二, 网毯式、“T”型、阶梯型、裂隙型等输导类型在盆地特定的时空域发育和产生作用, 构成了复杂的油气输导网络体系, 成为隐蔽油气藏勘探方向评价的条件, 亦即“复式输导”; 其三, 相(接受条件)、势(动力条件)存在的耦合关系, 决定了油气成藏的基本条件和不同特点, 成为勘探目标评价的关键, 亦即“相势控藏”。这三个观点构成了陆相断陷盆地隐蔽油气藏勘探思维的核心, 有力地指导了“十五”期间济阳坳陷的隐蔽油气藏勘探。

关键词: 断坡; 隐蔽油气藏; 油气勘探; 陆相断陷盆地; 济阳坳陷

中图分类号: TE112 322 文献标识码: A

Exploration theory and practice of the Tertiary subtle reservoirs in Jiyang depression

Zhang Shanwen

(Shengli Oilfield Co Ltd, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000)

Abstract Jiyang Depression, a typical terrestrial rifted basin experienced complicated tectonism and sedimentation, contains many well-developed subtle reservoirs. Research on the forming mechanism of the subtle reservoirs reveals three important theoretical understandings. First, steep and slow slope fault-steps and inner- and outer-basin slope-breaks shaped during fault-dominated tectonism control the formation and distribution of reservoir rocks (also known as ‘faulting-slope-controlled sandstone’), making the place an ideal area for exploration of subtle reservoirs. Secondly, different hydrocarbon conducting paths with the shape of meshwork-carpet, capital letter ‘T’, ladder, and fractures develop and operate inside the particular time-space tract in the basin, constituting a complex hydrocarbon transportation system (also known as ‘compound transportation’) and providing information for the evaluation of exploration direction of subtle reservoirs. Finally, the coupling relation between facies (receiving condition) and liquid potential (driving condition) determines reservoiring conditions and characteristics (also known as ‘facies-potential-controlled reservoirs’). These understandings constitute the kernel idea of subtle reservoir exploration and promote effectively the petroleum exploration in Jiyang depression during the Tenth Five-Year Plan.

Key words terrestrial rifted-basin; subtle reservoir; fault slope; carrier system; reservoiring mechanism; oil exploration; Jiyang depression

隐蔽油气藏通常是指以地层、岩性为主要控制因素、常规技术手段难以发现的油气藏^[1]。济

阳第三系断陷盆地构造活动强烈、沉积作用及其演变复杂, 隐蔽油气藏十分发育, 并成为重要的勘

收稿日期: 2006-10-09

作者简介: 张善文(1955—), 男, 教授级高级工程师, 石油地质勘探与管理

探对象。

济阳拗陷隐蔽油气藏伴随着胜利油田的勘探而发现。1964 年 9 月完成的营 2 井首次获得 555 t/d 的高产工业油流, 为大规模勘探济阳拗陷的战略决策提供了依据, 其主要类型也就是沙河街组三段的浊积岩油藏^[2]。但限于隐蔽油气藏的复杂性和当时的技术条件, 之后的 20 余年之中一直没有引起足够的重视。20 世纪 80 年代后期, 在“复式油气聚集”^[3]理论指导下, 应用地震地层学等新兴技术, 对构造翼部的隐蔽油气藏进行了一些有益的探索, 发现了以牛庄为代表的岩性、地层型油田。但总体上隐蔽油气藏仍属于区域兼探阶段, 在新增探明储量构成中居于次要地位。

进入“九五”以来, 随着勘探程度的提高, 勘探面临着迅速增大的难度: 资源探明比例和隐蔽油气藏、低渗透油气藏比例显著提高; 构造油藏的发现率、单元油藏储量规模、有效圈闭储备量不断下降。这意味着济阳拗陷将进入隐蔽油气藏为主的勘探阶段。然而, 由于隐蔽油气藏形成、分布的复杂性, 油气勘探还面临一系列需要解决的理论问题, 如: 隐蔽圈闭的形成机制及控制因素, 烃源岩、储集层和输导体系对油气成藏的主控作用, 隐蔽油气藏成藏机理和预测评价的依据和技术, 等等。

“十五”期间, 加大了隐蔽油气藏形成机制与分布规律的研究力度。在济阳拗陷构造、沉积作用时空演化的背景上, 深入研究了断陷盆地储集岩分布、油气运聚和油气成藏的主要机制, 提出了以“断坡控砂”、“复式输导”和“相势控藏”为核心的隐蔽油气藏勘探理论认识和预测评价技术, 发现和勘探了江家店等油田和宁海鼻状构造、车 66 等一批整装区块的勘探, 有力地促进了济阳拗陷油气勘探领域向隐蔽油气藏的转变, 并展现了良好的勘探前景。

1 断坡控砂与储集岩预测

1.1 断坡与断坡控砂

沉积古地貌是控制沉积作用的贯穿始终的关键因素, “坡折”一词较好地表达了沉积古地貌梯度的变化。在层序地层学中, “坡折”被认为是低位体系域、甚至沉积体系的重要控制因素^[4 5]。近年来, 部分学者强调了断陷盆地主要同沉积断

裂的作用, 提出了“断裂坡折带”的概念, 并把它与低位扇等沉积体系所控制的储集岩重要变化联系起来^[6]。

研究发现, 陆相断陷盆地沉积古地貌变化虽然直接受控于断裂活动、沉积和侵蚀作用、沉积物压实等多种因素, 但归根到底是由以断裂为主要方式的盆地构造活动所产生和决定的。因此, 把由断裂为主导的陆相断陷盆地构造活动所造成的沉积古地貌突变统称为“断坡”。断坡在陆相断陷盆地的发育历史中普遍存在, 随着盆地演变而不断变化, 通过改变沉积古地貌而控制了沉积作用的方式与发生的地点, 从而控制了盆地沉积体系的类型和时空分布, 决定了储集岩类型的多样性。断坡对储集岩类型与分布状态的控制作用简称为“断坡控砂”。

1.2 断坡的类型和分布

按主控因素的特点及对沉积体系的控制作用, “断坡”可以划分为两个大类、4 种基本类型(图 1):

1) 同沉积“断-坡”

同沉积“断-坡”发育于同沉积断裂持续活动, 产生明显沉积地貌突变的古构造枢纽带, 按其发育部位分为陡坡断阶和缓坡断阶。

陡坡断阶主要发育于断陷盆地陡坡带, 是由陡坡主要同沉积断裂持续活动所产生的“阶状”沉积地貌突变。由于断陷盆地陡坡带断裂活动强烈, 陡坡断阶常常具有较大的地貌起伏(图 1A)。

缓坡断阶是由于缓坡带调节断层间歇活动产生的“阶状”沉积古地貌突变, 呈带状分布于断陷盆地缓坡带(图 1B)。

2) 前沉积“断-坡”

前沉积“断-坡”是在早期活动的断裂或古破碎带背景上, 由于风化侵蚀作用和沉积作用造成的沉积地貌突变。按其发育部位可分为盆内坡折和凸缘坡折。

盆内坡折是在主控断裂活动控制的盆地古地貌背景上, 由于沉积速率差异而造成的地形坡度突变, 呈带状分布于盆内大型沉积体系前方, 如三角洲平原与前缘的结合部(图 1C)。

凸缘坡折是指湖盆边缘溯源侵蚀作用造成的地貌突变, 呈带状分布于凸起边缘部位, 沿着古破碎带或早期活动的断裂带发育(图 1D)。

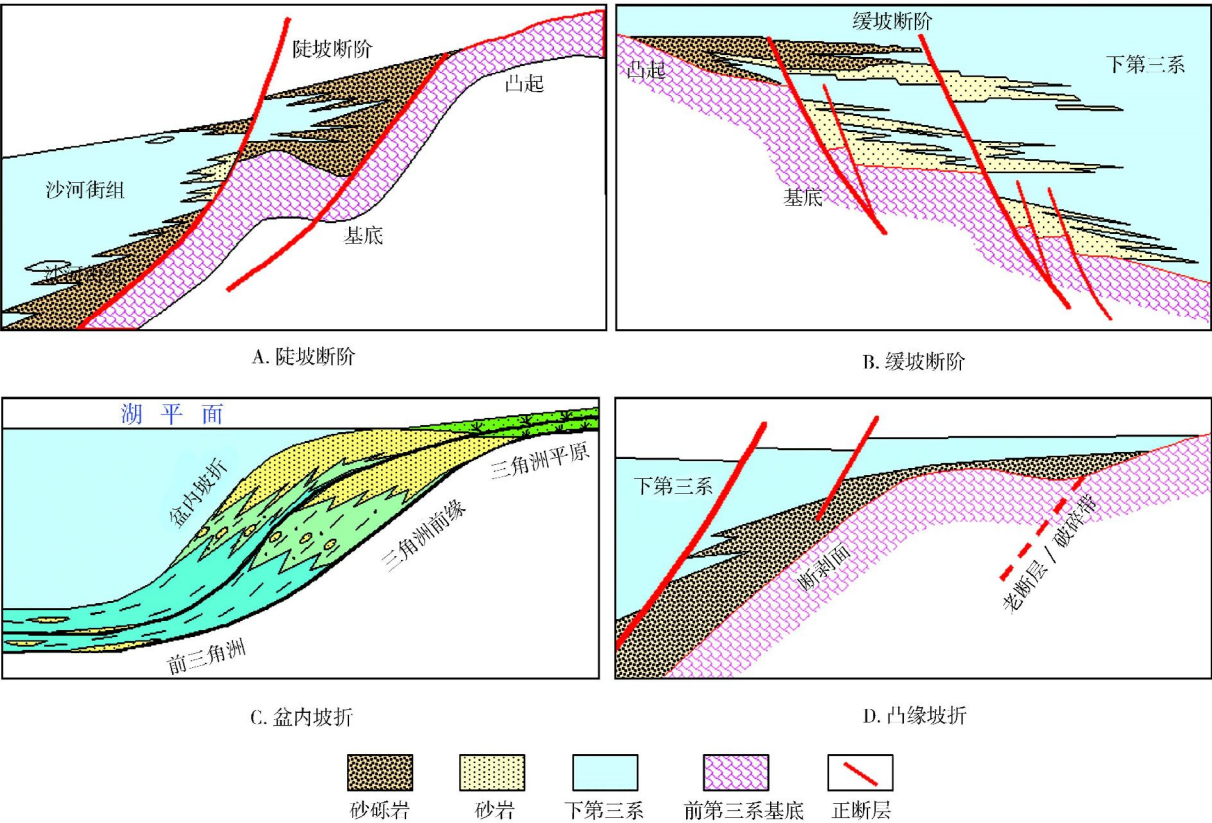


图 1 断陷盆地的主要断坡类型示意

Fig 1 Sketch map showing types of fault slope

表 1 断坡类型划分及对沉积控制作用

Table 1 Fault slope types and their control over sedimentation in Tertiary Jiyang depression		
断坡类型	亚类	控制的沉积体系及沉积特点
陡坡断阶	板式断阶	近岸水下扇和洪积扇沉积, 缺少隔层, 平面分布窄, 相带变化快
	铲式断阶	冲积扇、扇三角洲及浊积扇沉积, 不同期次之间被泥岩分隔
	阶梯式断阶	洪积扇-辫状河三角洲-水下冲积扇-滑塌浊积扇和深水浊积扇沉积, 期次明显
缓坡断阶	平行式断阶	以发育低位三角洲(滑塌浊积扇)沉积为主
	斜列式断阶	远岸浊积扇沉积为主, 规模较大
盆内坡折	走向坡折	远源河流三角洲沉积为主, 进积作用强, 分期性明显
	垂向坡折	扇三角洲沉积为主, 发育期次较少, 分期性不明显
凸缘坡折	凸缘坡折	以发育洪积扇、冲积扇沉积为主
	凸缘沟槽	控制了物源体系的入口及发展方向

这 4 种断坡还可按内部形态和地貌坡折组合方式继续细分为 9 个亚类, 分别与特定的沉积类型相关(表 1)。

陆相断陷盆地中断裂等构造活动的差异性和有序性, 也就决定了断坡的发育程度和分布的规律性。在断陷盆地(如济阳坳陷)中, 不同类型和成因机制的断坡在平面上构成了环绕盆地沉积中心分布的断坡“圈带”。从盆地边缘到沉积中心, 分别发育凸缘坡折、陡坡断阶和缓坡断阶、盆内坡折, 在不同层次上控制了沉积作用。

1.3 断坡对沉积作用的控制

可容空间及其变化决定了沉积作用。断坡对于沉积作用的控制正是通过对可容空间变化的影响而发生的。一方面, 断坡决定了沉积作用发生时不同地理位置的可容空间大小和底部形态, 也就决定了沉积作用发生的地点和先后关系; 另一方面, 断坡的变化造成了可容空间变化, 这种变化影响了可容空间与沉积物供给速率的比值, 控制了地层的叠置样式。具体地讲, 主要表现在以下

方面:

1) 断坡控制沉积物供给

对于凸缘坡折、陡坡和缓坡断阶来讲,坡顶的地势和断坡落差大小,决定了物源区与汇水区的势能差异和坡顶地层的剥蚀状态,对沉积物性质以及供给数量具有控制作用。不同类型和规模的断坡的控制作用也各有差别(图 2)。以盆缘坡折为例,凹陷陡坡和缓坡位置发育的盆缘坡折在坡度、规模上存在较大的差异,决定了各自不同的沉积物供给特点:陡坡一侧山高坡陡,主要发育了粒度相对较粗的冲积扇、扇三角洲等沉积类型;缓坡侧盆缘坡折坡度和落差相对较小,有利于形成沉积物粒度相对较细的辫状河及湖盆滨岸类沉积。

断坡控制沉积物供给的另一个方面在于凸缘沟槽对沉积物分散体系的注入点和推进方向的控制。凸缘沟槽是沉积区与物源区联系的主要通道,一方面与物源区的山间水系相接,成为沉积物汇聚的主要方向;另一方面沉积物主体顺沿沟槽搬运,起到了沉积通道的作用。

2) 断坡控制沉积类型及分布特点

沉积物越过断坡发生沉积作用时,由于可容空间和沉积能量场的变化,沉积方式常常产生重要的变化,这种变化常常成为隐蔽储层的成因之一。具体地说,断坡之下,储集岩沉积的类型发生重要变化、厚度明显加大、层数增多、相带分布更具规律。

宏观上看,断陷盆地特有的断坡圈层结构控制了沉积体系发育的圈层特点(图 2)。盆地外层的凸缘坡折主要控制了冲积扇、河流和(扇)三角洲平原、滨浅湖等沉积类型,靠近盆地中心的沉积坡折控制了不同类型的浊积岩(扇)等深水沉积,而其间的陡、缓坡断阶控制了三角洲前缘、滨浅湖滩坝、水下扇等浅水沉积。

具体到每一种断坡,由于发育特点不同,对沉积作用的控制也各不相同(表 1)。陡坡断阶具有较高的地貌梯度、较大的地貌落差,控制的砂砾岩体厚度巨大、不同期次垂向叠置为主、近源粗粒沉积为主、沉积机制变化迅速、沉积相带较窄和岩相变化剧烈;缓坡断阶地貌梯度和落差较小,控制的

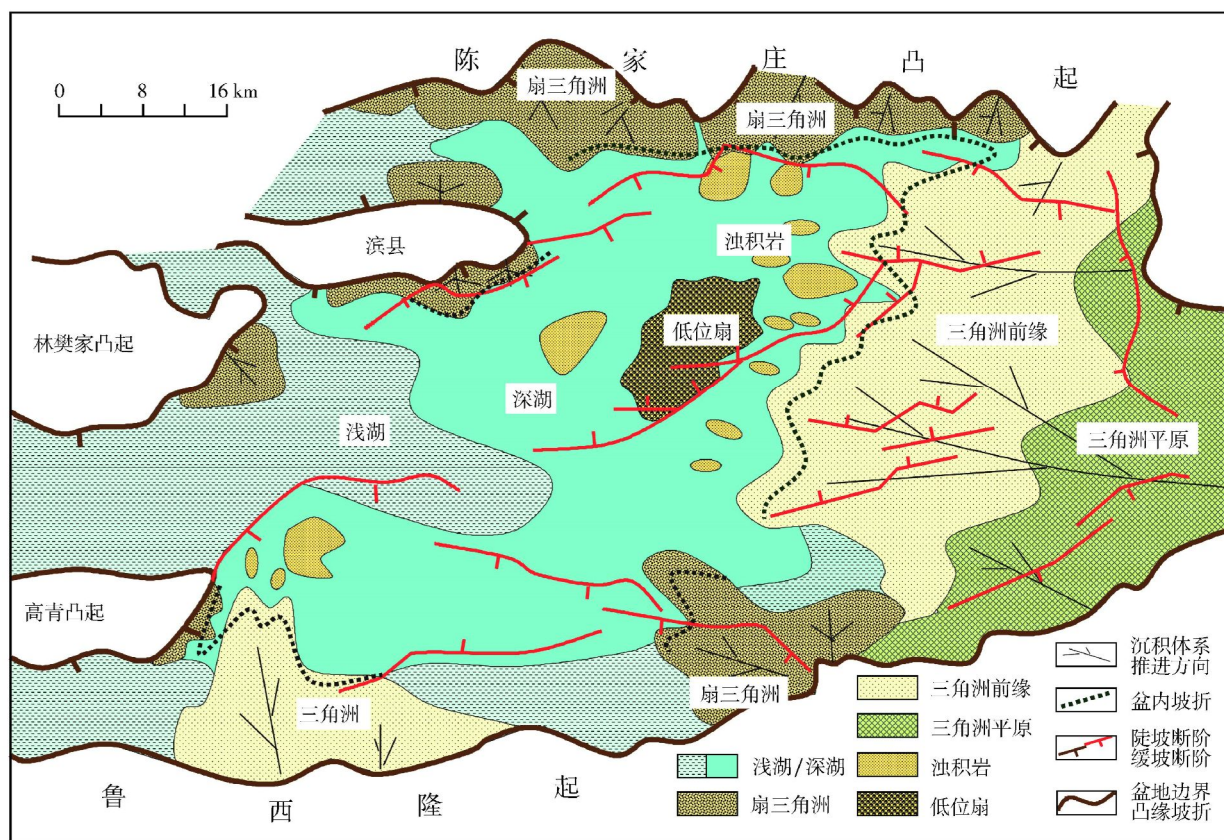


图 2 东营凹陷沙河街组三段中沉积时期的断坡类型与沉积体系分布关系

Fig. 2 Fault slope types vs. distribution and sedimentary systems during depositions of the middle third Member of Shahejie Formation

辫状河三角洲或滨浅湖等沉积体系相带宽展、厚度较薄、沉积相分异明显; 盆内坡折则通过地貌梯度的大小控制了浊积岩发育的规模, 当地貌梯度小于一定数值时, 浊积岩和浊积扇就难以形成。

2 复式输导体系及其成藏组合

油气输导体系是指连接源岩与圈闭的油气运移通道的空间组合体, 其静态要素包括: 骨架砂体(储集层)、层序界面(不整合面)、断层及裂缝^[7]。断陷盆地多期次构造运动形成了广泛分布、不同级次和组合样式的断裂网络, 而断坡控制了储集体的分布, 二者相互依存、影响和补充, 形成了纵横交错的运移通道, 共同构筑了济阳坳陷第三系不同特点的油气输导体系。

研究认为, 断陷盆地发育的油气输导要素, 按照特定方式组合起来, 分别构成了网毯式、“T”型、阶梯型、裂隙型等四种基本的输导体系类型(图 3)。在盆地构造-沉积格架的控制下, 这些类型的输导体系在特定的时空域内有序分布和发挥作用, 构成了断陷盆地的“复式输导体系”。同时, 不同的输导体系生成于各自的构造-沉积环境, 与特定的构造区带和圈闭群体相关联, 形成了各具特色

的油气藏组合, 因此, 研究输导体系的类型与分布, 对于勘探方向和目标区带的预测具有重要意义。

2.1 网毯式输导体系

以往, 济阳坳陷浅层勘探强调了披覆背斜等大型构造主控断裂的垂向油气输导作用^[3], 对于盆地充填后期的广泛分布的厚层储层在油气横向运移中的作用没有引起重视。位于缓坡部位的老河口油田的勘探表明, 这种厚层储层与不同级次的断裂构成了以横向运移为特色的网毯式油气输导体系。

网毯式油气输导体系是指来自下第三系烃源岩或油气藏的它源型油气, 通过油源断裂网络进入上第三系, 在馆陶组下段稳定分布的巨厚块状砂砾岩临时聚集后, 再依赖浮力运移到上第三系的各类圈闭中成藏(图 3A)。所谓“网”, 是指体系下部的油气源通道网层(切至油源的主要断裂)和上部的油气聚集网层(次级断裂及其连通的枝状砂体); “毯”是指呈“毯状”稳定分布的巨厚块状砂岩, 以及油源断裂输送上来的油气临时储存在其中, 状如“毯状”。因此, 这种块状砂岩又称为“仓储层”。网毯式输导体系内部, 仓储层蓄积的油气可继续横向运移, 也可沿次级断裂网垂向进入上

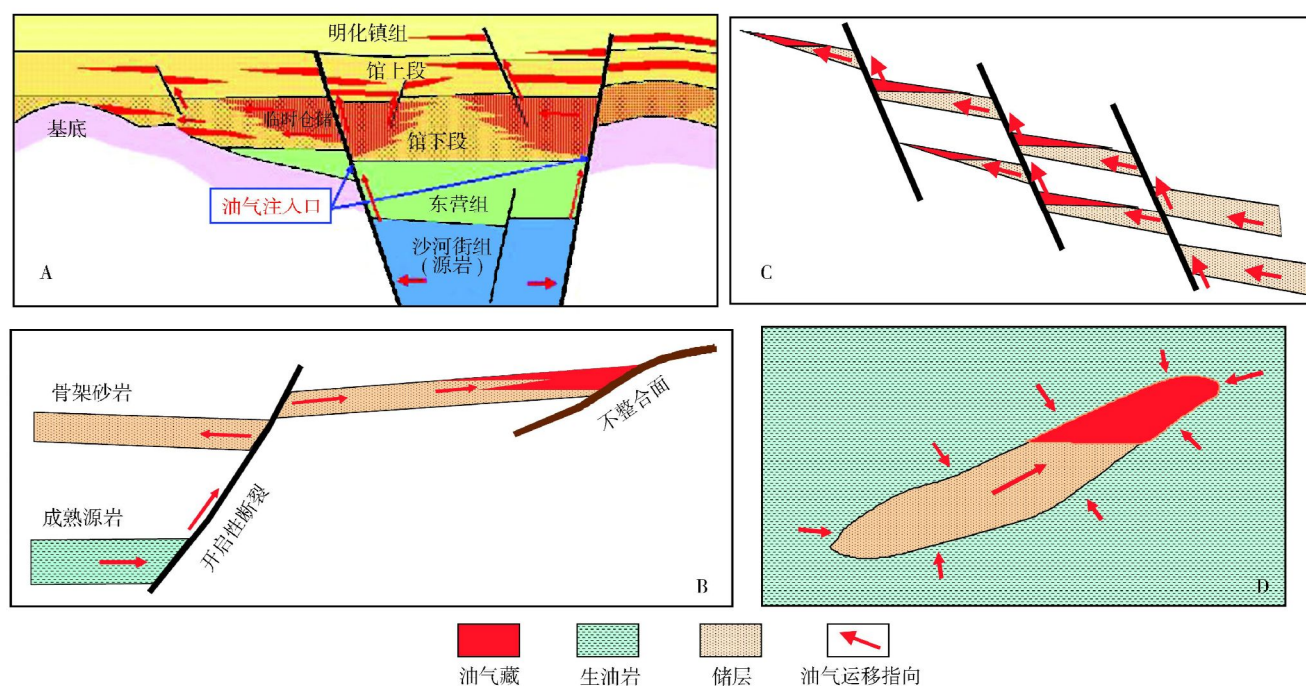


图 3 断陷盆地输导体系类型模式

Fig. 3 Mode chart showing carrier system types in rifted basin

A. 网毯式输导体系; B. “T”型输导体系; C. 阶梯型输导体系; D. 裂隙型输导体系

部的油气聚集网层,在有圈闭条件的部位形成油气藏。

网毯式输导体系本身是一个含油气实体单元,在不同的构造带形成不同的油气藏组合,分别为:①凸起或潜山顶部的大型(披覆)构造油气藏组合;②凸起边缘构造-地层油气成藏组合;③缓斜坡部位岩性-岩性-构造油气成藏组合。

2.2 “T”型输导体系

“T”型输导体系描述了油源断层和骨架砂岩等要素之间“T”形的空间配置关系(图 3B)。油气首先沿油源断裂垂向运移,遇到骨干砂岩后向两侧横向运移。在盆地边缘,油气可直接被输送到鼻状构造背景上的地层圈闭中形成地层油藏。因此,“T”型输导体系是油气进入大中型地层圈闭的主要方式,研究“T”型输导体系对于地层油藏的勘探至关重要。

“T”型输导体系主要形成地层为主的油气藏组合。对于盆缘大型鼻状构造,这种油藏组合包括地层尖灭带附近的地层油藏、鼻状构造低部位的断层构造油藏、地层-构造-岩性复合油藏。油气藏的发育除了受“T”型输导体系的制约外,还受到大型鼻状构造、多期发育的不整合面的控制。

在济阳拗陷,断陷末期与拗陷初始期之间的过渡时期—“断-拗转换期”,是盆地构造样式和充填方式发生重要变化的特殊地质时期。上、下第三系间长时期的抬升侵蚀、盆缘大型鼻状构造、后期持续活动的油源断裂、受凸缘坡折控制发育的小型扇体,为地层圈闭的形成提供了有利的条件。东营凹陷北部王庄-宁海鼻状构造的发现和勘探即是断-拗转换期“T”型输导体系研究和应用的典型实例。

2.3 阶梯型输导体系

阶梯型输导体系是指由阶状断层和带状骨架砂岩共同组成的油气由高势区向低势区连续运移的油气输导系统(图 3C)。沉积物在向沉积中心汇聚的过程中,常形成带状骨干砂体;同时,盆地沉降过程中,走向性断裂,特别是阶梯状组合的盆倾断裂,更容易在成藏期持续活动。二者在空间上相互配置,使油气顺沿断裂和带状储层进行垂向、横向运移,具体的途径具有阶梯状特点。

阶梯型运聚体系多发育于断陷盆地的斜坡带。与之相关的油气藏包括构造-断层-岩性和岩性尖灭等类型。在阶梯型输导体系中,地层砂泥比例、砂岩变化关系、断裂活动性、断面渗透性等因素决定了油气是继续运移还是形成油藏,也就决定了断阶带中油气分布的特点。在平面上,阶梯型输导体系形成的油气藏常与主运移指向一致,呈串珠状分布,如东营南坡王家岗油田的孔店组油藏。

2.4 裂隙型输导体系

裂隙型输导体系是指烃源岩排出的油气沿着孔隙、微层理面和微裂隙等“隐性”通道,以多种方式向相邻储集体运移的输导体系(图 3D)。油源对比表明,东营凹陷沙河街组三段中亚段没有断裂切割的浊积岩油藏的油源多为下伏的沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段的烃原岩。岩心分析也已发现微裂隙内部残留了不同时期的原油和沥青。实验证明,泥质沉积物埋藏到一定深度,形成的不连通孔隙会产生高压。压力蓄积到岩石破裂阈值后,不连通孔隙将由于压裂而形成连续的微裂隙,排出流体。之后,微裂隙闭合,进入下一个循环过程^[8]。这种压裂排液是间歇性的,间歇的时间即为不连通孔隙中能量积累的时间。

裂隙型输导体系主要分布于洼陷带中,常与压力封存箱相伴生,在岩性透镜体油藏的勘探中具有重要作用。

2.5 输导体系发育模式

陆相断陷盆地构造活动和沉积作用决定了输导要素的时空配置规律,也就决定了不同类型输导体系的空间分布(图 4)。横向上,受控于特定的地质结构,断陷盆地陡坡带常常发育“T”型输导体系,中央断裂背斜带以网毯式输导体系为主,洼陷带以裂隙型输导体系为特点,缓坡带主要分布阶梯型输导体系;纵向上,受控于不同发育阶段的特定构造沉积特点,断陷初期有利于阶梯型输导体系的形成,深陷期促进了裂隙型输导体系的发育,断陷充填期和拗陷期使网毯式输导体系的基本要素优先具备,断陷-拗陷转换时期则决定了“T”型输导体系的发育条件。

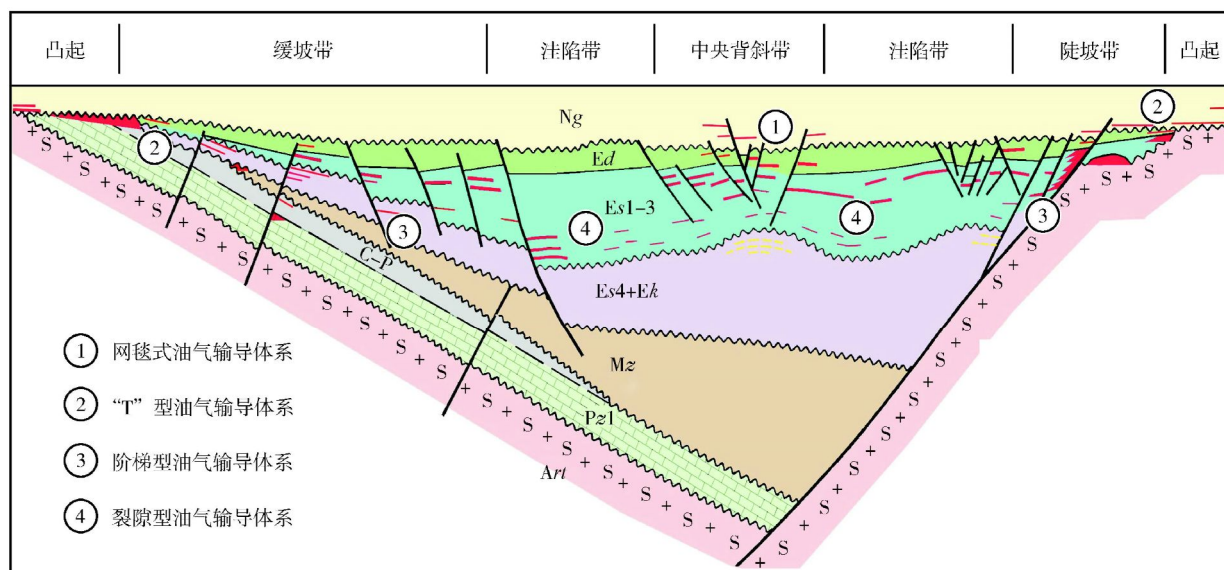


图 4 断陷盆地油气输导体系分布模式

Fig. 4 Mode chart showing the distributions of carrier systems

3 相势控藏与隐蔽圈闭成藏条件

油气成藏一直是石油地质学家极力解决的关键问题。多数学者强调了成藏动力方面的重要性,对于成藏阻力方面的研究相对较少^[9~12]。济阳坳陷的研究表明,成藏动力和阻力作为矛盾的双方,共同决定了油气成藏的基本条件,亦即“相势控藏”。

3.1 异常高压(势)与油气藏分布

沉积盆地油气藏分布宏观上是由地层压力、浮力、水动力、构造应力等因素控制的流体动力条件综合作用的结果。大多数沉积盆地内部都包含着两个以上重叠的水文地质系统:较浅的系统通常分布在整个盆地,呈现正常的静水压力;较深的系统则由一系列具有独立水动力系统的封存箱组成,具有高异常的流体压力^[13]。沉积盆地的这种流体动力特点直接控制着油气成藏的类型及其分布。

济阳坳陷东营凹陷的压力分布也具有类似特征,并控制着油气藏类型及分布。异常高压体系内部,岩性体被生油岩所包围,形成自生、自储、自盖的组合模式,地层压力等是油气成藏的主要动力。在箱内高压构成的动力条件下,砂岩透镜体圈闭富含油气,如牛庄洼陷。异常压力不发育的

地区,岩性透镜体则难以成藏,如滋镇洼陷;高压流体封存箱之外,不同类型的输导体系沟通烃源岩与储集体,形成旁生侧储或下生上储的储盖组合,随着离开生油中心的距离增加,成藏的主要动力逐渐成为油气的浮力。这时的隐蔽油气藏主要为岩性尖灭、地层超覆和剥蚀面油藏。

3.2 沉积体系(相)与油气藏分布

盆地沉积体系类型同样也是控制隐蔽油气藏类型及空间展布的主要因素。如三角洲-浊积体系控制了原生岩性油气藏形成和分布,近岸水下扇体系控制了地层-岩性油气藏形成和分布。

其他成藏条件相似的情况下,油气成藏常常由储集岩性质决定。东营凹陷坨76井沙河街组四段浊积扇中部的砾状砂岩物性较好,岩心中含油饱和度高,具有工业产能;而扇根砾岩成熟度低,非均质性强,孔渗性能差,岩心观察含油不均匀,测试仅获低产。惠民凹陷的基山砂岩,同一砂层内由于物性差异,表现为含油和不含油两种截然不同的状态。这说明,不同的沉积相带和同一相带内,由于储集岩渗透性能的差异,储层的含油性存在着明显的差别。

进一步的研究表明,储集岩本身存在一个物性临界值,只有在物性高于这个临界值时,才有可能储集油气。根据胜坨、宁海、王庄、利津、郑家等5个油田287个区块的油藏实际统计资料,孔隙度

表 2 部分油田储集岩物性下限统计表

Table 2 Lower limits statistics on physical properties of reservoir rocks in some oilfields							
油田名称	区块	深度 /m	组段	砂组	储量 / (10 ⁴ t)	孔隙度下限, %	渗透率下限 / (10 ⁻³ μm ²)
胜坨	三区	1 653	沙一段	1	342	28	89.00
胜坨	三区	1 764	沙一段	4	57	25	72.50
胜坨	二区	1 826	沙二段上亚段	1	1 945	25	72.50
胜坨	二区	1 865	沙二段上亚段	3	881	23	61.50
胜坨	二区	1 948	沙二段上亚段	6	238	22	56.00
胜坨	三区	2 080	沙二段下亚段	10	547	21	50.50
胜坨	三区	2 164	沙二段下亚段	12	78	20	45.00
利津	利 32- 33	2 075	沙二段	3	310	21	50.50
利津	店子	2 236	沙二段	2	44	16	23.00
利津	店子	2 321	沙二段	4	50	16	23.00
利津	利古 3	2 550	沙四段上亚段	1	106	13	6.50
利津	利 882	2 610	沙三段中亚段		15	16	23.00
宁海	坨 85	2 523	沙三段中亚段		189	13	6.50

下限分别为 12% ~ 28%、渗透率下限 $1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总的趋势是: 同一构造带, 不同的沉积体系 (岩相), 层位越老, 埋深越大 (地层压力越高), 孔隙度下限越低。

3.3 相势耦合关系及其控藏作用

综上所述, 含烃流体动力和储集岩物性都是决定油气是否成藏的基本要素。用“势”来代表油气运聚的基本动力条件 (主要是地层压差、浮力、毛细管力等), 用“相”来代表油气接收条件 (主要是储集岩的渗透性能), 则油气成藏的过程也就成为“势”所代表的动力不断克服“相”所代表的阻力的过程。具体地说, 油气成藏动力充足, 一些较差的储集岩也会成藏, 也就是成藏所需要的储层渗透性能下限也就相应降低; 相应地, 储集岩渗

透性能好, 要求的成藏动力条件就可以适当降低。反之亦然 (图 5)。因此, “相”、“势”之间存在着既相互联系、又相互制约的复杂关系, 这种关系在油气成藏上统一起来, 共同决定了油气成藏必须满足的基本条件。这种关系称为“相势耦合关系”。

“相势耦合关系”准确地把握了油气成藏的核心内容, 即成藏动力与阻力的关系, 因而是油气成藏研究以及勘探家作出圈闭含有性判断的一个主要出发点。这里, 简单地用驱替压力和孔隙度分别代表油气成藏时所要达到的流体动力和储集岩物性条件, 来讨论东营凹陷利津洼陷部分圈闭的“相势耦合关系”与油气成藏。经过大量实例的统计分析后, 得出下面的关系式:

$$y = 7\,619x^{-3.299\,1} \tag{1}$$

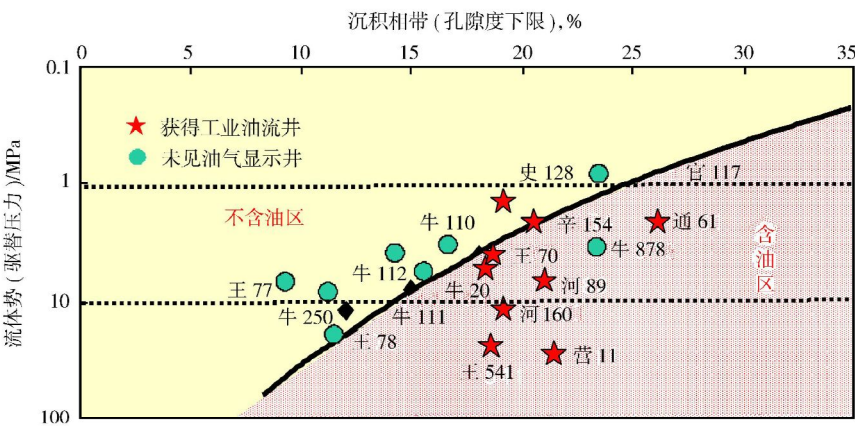


图 5 东营凹陷利津和牛庄洼陷岩性圈闭的相势关系

Fig. 5 Facies vs fluid potential of lithologic traps in Lijin and Nuzhuang subsag of Dongyin depression
实线是利津洼陷统计的结果; 所列井号是在牛庄洼陷验证的情况

(1)式中 y 为流体势 (MPa); x 为储层孔隙度下限, %。

关系式 (1) 代表了利津洼陷油气成藏所必须满足的基本条件, 具体反映在图 5 中。以图中的实线为界, “相势耦合关系” 将不同位置和储集性质的油气圈闭分为两个状态, 即含油或不含油: 投影到左上部的圈闭, 其相势指标均较低, 难以形成油气藏; 而右下部的圈闭则易于形成油气藏。

关系式 (1) 在济阳拗陷其它地区也得到较好的验证。如牛庄油田沙河街组三段中亚段埋深 2 930~3 375 m 的 12 个含油砂体, 通过公式 (1) 计算孔隙度下限 12%~13%, 实际测得的含油岩心孔隙度下限为 13.5% (如图 5 中的牛 20、王 541 井), 小于该值的岩性体难以成藏 (如图 5 中的牛 110、王 77 井)。埕岛油田馆陶组埋深 1 200~1 400 m 的曲流河砂体孔隙度下限计算值与实际均为 28%。这反映了“相势耦合关系”控制油气成藏的普遍性。

进一步的研究也表明, 在保证油源和输导条件的前提下, 满足这种“耦合关系”的相势条件越充分, 圈闭的油气充满程度也就越高。例如, 牛庄油田的牛 25-C 砂体, 油层中部埋深 3 250 m, 地层压力系数 1.68, 主要储集岩孔隙度在 16%~20% 之间, 平均空气渗透率 $260 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具有高“势”、中等“相”的成藏条件。经油气开发验证, 该砂体的油气充满度接近 100%。又如王 70-A 砂体, 储集岩平均孔隙度 22.1%、空气渗透率 $260 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 相对好于牛 25-C 砂体, 但由于处于洼陷边缘正常压实的泥岩中, 压力系数仅 1.14, 具有低“势”、中等“相”的成藏条件, 砂体的充满度仅 26%。这说明“相势”条件与圈闭含油程度有着密切的关系。对于“相势”关系的深入研究, 将成为定量或半定量预测圈闭油气充满程度的重要途径。

4 勘探实践及下步工作方向

4.1 隐蔽油气藏勘探思路

断坡控砂、复式输导、相势控藏三个具有因果关系的基本观点, 构成了陆相断陷盆地隐蔽油藏勘探的系统和完整的认知体系 (图 6), 其中, 断坡控砂是基础、复式输导是条件、相势控藏是关键。

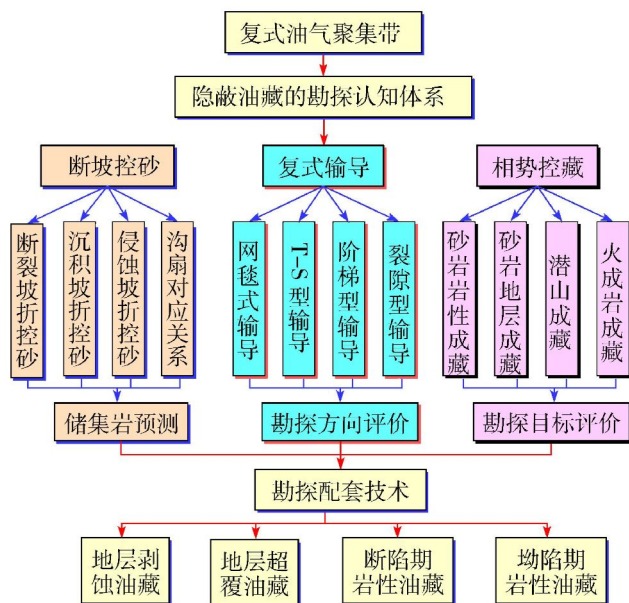


图 6 隐蔽油气藏勘探理论及思路示意

Fig. 6 Sketch map showing the theory and idea of subtle reservoir exploration in Jiyang depression

在其指导下, 隐蔽油气藏勘探的主要思路是: 在高精度地层格架内, 研究盆地控砂-输导-成藏的规律和特点, 确定不同的油气运聚模式, 通过勘探配套技术的运用, 优选和评价勘探目标。

1) 隐蔽油气藏勘探首先要解决的是目标区隐蔽圈闭发育规律, 而储集岩预测是其中的关键。通过断坡控砂的研究, 不仅能够预测储集岩的发育与分布, 也能评价储集岩与其它成藏条件的配置关系, 从而为优选勘探区带提供依据。

2) 隐蔽油气藏勘探成功与否, 重要的条件是勘探方向的选择。由于输导体系决定了油气藏组合及分布的不同特点, 选择勘探方向就要建立在对输导体系有效性和具体输导路径进行评价的基础上。清楚了输导体系构成方式, 也就清楚了查找隐蔽圈闭的主要方向。

3) 勘探目标的评价历来是勘探成败的焦点问题。按照相势耦合控藏的要求, 评价流体势和储集岩性能两个相关联的因素, 以之决定勘探策略和井位部署方案, 是实现隐蔽油气藏勘探效益的关键。

4.2 勘探效果分析

“十五”期间, 济阳拗陷隐蔽油气藏勘探以断坡控砂、复式输导、相势控藏等理论认识为指导, 按照隐蔽油气藏勘探的具体思路, 加强储集岩、控藏模

式、含油性评价和配套技术攻关,取得了显著成效。

1) 在中高勘探程度下,济阳拗陷年度探明、控制和预测石油地质储量均过亿吨,油气资源序列趋于合理,探井成功率、单元储量规模、单位储量成本等指标均较“九五”有所提高,初步实现了油气勘探的良性循环。证明隐蔽油气藏勘探理论的认识较好地指导了老区油气勘探实践。

2) 发现和勘探了江家店、阳信、2个油田,以及以宁海大型地层油藏、牛 871 岩性油藏群、高 89 滩坝砂岩油藏、东营凹陷中央断裂背斜带浅层、车镇凹陷车 66 深层、垦东凸起北部浅层等为代表的整装储量区块,部分油田和区块迅速投入了开发,成为胜利油田油气产量保持稳定的主要支撑。

3) 明确了洼陷带油积岩油藏、盆缘地层油藏、缓坡带和浅层构造岩性油藏、陡坡带复杂砂砾岩油藏、深层复杂低渗透油气藏等六大勘探方向,为济阳拗陷油气勘探的深化发展奠定了基础。

4.3 存在问题与研究方向

济阳拗陷第三系发育了多套优质烃源岩,具有多次构造运动、多物源、多沉积类型的特点,对形成隐蔽油气藏极为有利。与世界上一些勘探程度较高的盆地类比,以资源探明程度 80%、隐蔽油气藏占 50% 以上计算,济阳拗陷隐蔽油气藏资源量达 33×10^8 t 以上。仍然具有较大的勘探潜力。

“十五”期间,济阳拗陷新增探明石油地质储量中,隐蔽油气藏储量所占比例增加到了 69%,且随着勘探程度的提高,这个比例不断加大。与勘探程度的提高相对应,隐蔽油气藏这个勘探对象会越来越复杂,对勘探理论和技术也提出了更高的要求。“十五”期间济阳拗陷探井失利原因分析表明,圈闭有效性、储层质量、油气运移条件等问题,仍然是探井失利的首要因素,表明老区挖潜还有诸多的问题需要解决。面对未来隐蔽油气藏的勘探需求,需要在理论发展和勘探实践两个方面不断开拓。

勘探理论上,将以陆相断陷盆地输导体系、隐蔽油气藏的成藏机理和模式、油气藏评价 3 个方向深入开展,贯彻量化、动态、历史的研究思路,突出对不同成藏要素、成藏机理、成藏模式的量化和历史分析,重点解决油气运聚的基础科学问题,提高成藏研究理论水平及勘探精度。

勘探实践上,“十一五”期间将主要立足于济阳拗陷的 2 个陡坡带、4 个缓坡带、6 个洼陷带和 3 个潜山披覆构造带,深浅并进,加强隐蔽油气藏勘探新领域的探索,为油气勘探持续稳定发展做出积极贡献。

参 考 文 献

- 1 李丕龙,庞雄奇. 陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳拗陷为例 [M]. 北京:石油工业出版社, 2004 1~4
Li Peilong Pang Xiongqi Forming of subtle reservoirs in lacustrine depression taking Jiyang depression [M]. Beijing Petroleum Industry Press 2004 1~4
- 2 帅德福,潘元林,张善文,等. 济阳拗陷油气勘探 [M]. 北京:石油工业出版社, 2004 13~19
Shuai Defu Pan Yuanlin Zhang Shanwen et al Petroleum exploration in Jiyang depression [M]. Beijing Petroleum Industry Press 2004 13~19
- 3 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践 [M]. 山东东营:石油大学出版社, 1992 254~309
Wang Binghai Qian Kai Geology research and exploration practice in the Shengli petroleum province [M]. Dongying Shandong The Petroleum University Press 1992 254~309
- 4 Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well cores and outcrops—concept for high-resolution correlation of times and facies [A]. Methods in Exploration Series [C], AAPG 1990 (7)
- 5 王英民,金武弟,刘书会,等. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2003 24(3): 199~203
Wang Yingmin Jin Wudui Liu Shuhui et al Generic types distribution and exploration significance of multistage slope breaks in rift lacustrine basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003 24(3): 199~203
- 6 郑和荣,孔凡仙,潘元林,等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000 25(3): 260~264
Zheng Herong Kong Fanxian Pan Yuanlin et al Structural slope-break zone key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences 2000 25(3): 260~264
- 7 张照录,王华,杨红. 含油气盆地的输导体系研究 [J]. 石油与天然气地质, 2000 21(2): 133~135
Zhang Zhaolu Wang Hua Yang Hong Study on passage system petroliferous basin [J]. Oil & Gas Geology, 2000 21(2): 133~135
- 8 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京:石油工业出版社, 1994 27~28

(下转第 761 页)

- House 2000 24- 35
- 6 翟晓先, 漆立新. 塔河油田勘探实践与面临的挑战 [A]. 见: 翟晓先, 编. 塔河油气田勘探与评价论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006 1~ 10
Zhai Xiaoxian, Qi Lixin. Exploration practice and challenge in Tahe oilfield [A]. In Zhai Xiaoxian, ed Tahe oilfield exploration and development transactions [C]. Beijing Petroleum Industry Press 2006 1- 10
 - 7 李培廉, 张希明, 陈志海. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 17~ 39
Li Peilian, Zhang Ximing, Chen Zhihai. The development of the carbonate caved fracture and hole type reservoirs in Tahe oilfield [M]. Beijing Petroleum Industry Press 2003 17- 39
 - 8 鲁新便, 李峰, 杨敏, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元研究及其开发意义 [A]. 见: 焦方正, 编. 塔河油气田开发研究论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006 17~ 23
Lu Xinbian, Li Feng, Yang Ming, et al. A study and development implication on fluid compartments of karsted carbonate reservoir in Ordovician Tahe oilfield [A]. In Jiao Fangzheng, ed Tahe oilfield development transactions [C]. Beijing Petroleum Industry Press 2006 17- 23
 - 9 黄太柱, 云露, 蒋华山. 塔河油田成藏条件与富集规律 [A]. 见: 翟晓先, 编. 塔河油气田勘探与评价论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2006 11~ 20
Huang Taizhu, Yun Lu, Jiang Huashan. The formation condition and concentrate regularity of oil pool in Tahe oilfield [A]. In Zhai Xiaoxian, ed Tahe oilfield exploration and development transactions [C]. Beijing Petroleum Industry Press 2006 11- 20
 - 10 翟晓先, 云露, 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田石油地质特征与勘探经验 [A]. 见: 中国石油地质年会论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2005 210~ 221
Zhai Xiaoxian, Yun Lu, Yu Renlian. The petroleum geological characteristics and exploration experience in Tahe oilfield, Tarim basin [A]. In China petroleum geology annual meeting transactions [C]. Beijing Petroleum Industry Press 2005 210- 221
 - 11 翟晓先. 塔里木盆地北部复杂地质条件下寻找大油气田的方向和地区 [A]. 见: 康玉柱, 编. 中国塔里木盆地石油地质文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1996 56~ 64
Zhai Xiaoxian. Directions and areas for searching large oil-gas fields in northern Tarim basin under complicate geological conditions [A]. In Kang Yuzhu, ed Tarim basin petroleum geology transactions China [C]. Beijing Geology Publishing House 1996 56- 64
 - 12 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(1): 64~ 77
He Dengfa, Jia Chenzao, Li Desheng. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005 26(1): 64- 77
 - 13 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展 (之二) —— 以塔里木盆地为例 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 281~ 288
Jin Zhijun. New Progresses in research of China's typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons (Part II): taking Tarim basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2006 27(3): 281- 288
 - 14 俞仁连, 闫相宾, 金晓辉, 等. 塔里木盆地研究进展与勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(5): 598~ 604
Yu Renlian, Yan Xiangbin, Jin Xiaohui, et al. Research achievements and exploration direction in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005 26(5): 598- 604

(编辑 李 军)

(上接第 740 页)

- Li Mingcheng. Migration of petroleum [M]. Beijing Petroleum Industry Press 1994 27- 28
- 9 庞雄奇, 李丕龙, 金之钧, 等. 油气成藏门限研究及其在济阳拗陷中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2003 23(2): 204~ 209
Pang Xiongqi, Li Peilong, Jin Zhijun. Hydrocarbon accumulation threshold and its application in Jiyang depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003 23(2): 204- 209
 - 10 孙冬胜, 金之钧, 吕修祥, 等. 沉积盆地超压体系划分及其与油气运聚关系 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(1): 14~ 20
Sun Dongsheng, Jin Zhijun, Lü Xiuxiang, et al. Classification of overpressure system in sedimentary basins and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2004 25(1): 14- 20
 - 11 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005 239~ 325
Hao Fang. Kinetic of hydrocarbon generation and mechanism of petroleum accumulation in overpressured basin [M]. Beijing Science Press 2005 239- 325
 - 12 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展 [J]. 地学前缘, 2000 7(3): 11~ 21
Hao Fang, Zou Huayao, Jiang Jianqun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances [J]. Earth Science Frontiers, 2000 7(3): 11- 21
 - 13 王连进, 叶加仁. 沉积盆地超压形成机制评述 [J]. 石油与天然气地质, 2001 22(1): 17~ 20
Wang Lianjin, Ye Jiaren. A comment on forming mechanism of overpressure in sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 17- 20

(编辑 武新民)