

辽河拗陷西部凹陷油气成藏体系及天然气分布^{*}

李晓光^{1,2} 张金川³ 陈振岩¹ 单俊峰^{1,3}

(1. 中国石油大学·北京 2. 中国石油辽河油田公司 3. 中国地质大学·北京)

李晓光等. 辽河拗陷西部凹陷油气成藏体系及天然气分布. 天然气工业, 2007, 27(5): 39-43.

摘要 辽河拗陷西部凹陷是中国东部油气资源丰度最高的地质单元之一, 目前已产出大量原油, 但天然气勘探研究相对薄弱。为此, 根据地质条件及其变化关系分析, 并侧重油气分布地质规律认识, 将该拗陷西部凹陷划分为各自特征明显的4个油气成藏体系, 分别是北部陡坡带、西部斜坡带、中部断背斜带和南部陡坡带成藏体系。各成藏体系的形成演化及含油气地质特点与西部凹陷的沉降—沉积中心由北向南、由西向东的迁移特点密切相关, 有机质的生烃能力、油气的富集程度以及天然气的聚集丰度均受制于这一地质过程。作为多因素地质作用的结果, 油气分布具有顺层、近源、受层系控制的成藏及分布模式, 天然气分布主要出现在各成藏体系中靠近注陷中心的地方, 环绕鸳鸯沟、清水、盘山等南部注陷, 形成了天然气分布的环圈状特点, 沉降—沉积中心的迁移和成藏体系的展布控制了该区天然气的空间分布。

关键词 辽河拗陷 西部凹陷 天然气 成藏体系 气藏形成 分布

西部凹陷是辽河拗陷中油气资源最为丰富的地质单元之一, 也是我国东部地区重要的石油产出基地, 但该凹陷的天然气资源研究相对薄弱, 目前亟待分析地质特点, 认识天然气发育规律, 探讨石油高成熟探区天然气的深入勘探和发展之路。

一、油气成藏体系

成藏体系研究以油气聚集目标为核心内容, 突出研究了油气分布的特点。为了克服含油气系统(Petroleum System)研究方法的局限性并进一步对油气勘探进行直接指导, 金之钧、庞雄奇等人(2000)在系统论本身研究基础上, 依据“元素+结构→产生新功能”的指导思想, 提出了以油气运移边缘(出发点)为起点, 以油气运聚指向目标为中心, 与油气运聚成藏方向、单元、分布等特点紧密结合的成藏体系(Petroleum Accumulation System)研究方法。该方法充分考虑了油气运聚及成藏特点, 并将现代油气成藏地质相关理论融入其中, 适用于辽河西部凹陷高勘探程度条件的油气地质规律研究。

根据西部凹陷的构造特点(包括格局、演化、特

点等)、油气运聚(包括流体、运移、方向等)以及油气分布(包括类型、产状、展布等)等, 将西部凹陷划分为四大油气成藏体系(图1、2, 表1)。对于各成藏体系的边界, 分两种情况进行处理, 一是油气运移的起始边界, 即生烃中心区内油气背向运移的临界点, 一般是凹陷中心各套地层分割槽的中线; 二是油气运移的终止边界, 即油气运移所能达到的最大边界, 一般是凹陷的外缘隆起边缘或油气运移的终点。

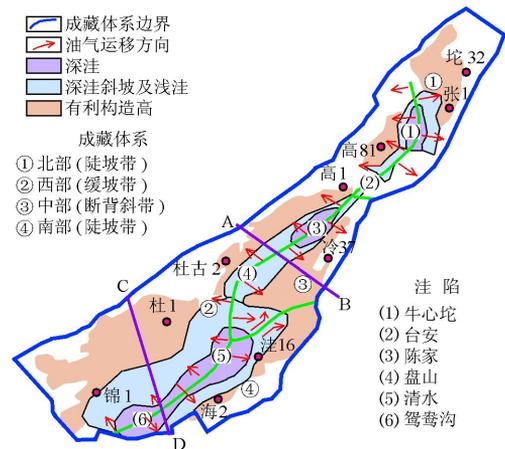


图1 西部凹陷油气成藏体系平面划分图

^{*} 本文为国家自然科学基金项目(编号:40472073)研究成果。本文作者还有侯读杰、薛会、徐波、李国永、李敬含、卞昌蓉、刘保宏等。

作者简介 李晓光, 1966年生, 高级工程师; 1989年毕业于原石油大学, 现为中国石油大学(北京)博士研究生; 主要从事综合石油地质及勘探决策研究工作。地址: (124010)辽宁省盘锦市中国石油辽河油田公司勘探开发研究院。电话: (0427) 7800361。E-mail: lixg@petrochina.com.cn

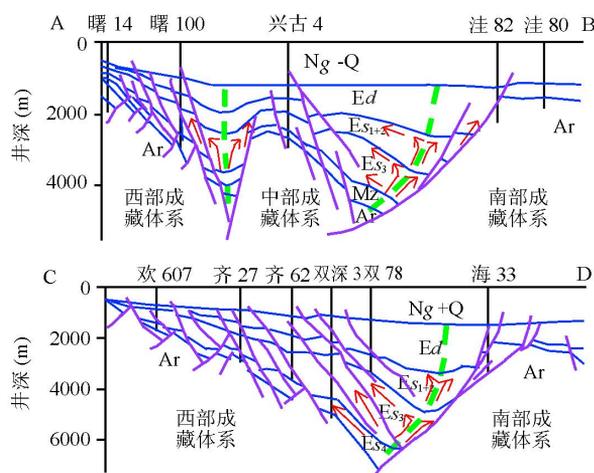


图2 西部凹陷油气成藏体系划分剖面图

表1 西部凹陷油气成藏体系特征表

成藏体系	北部陡坡带	西部缓坡带	中部断背斜带	南部陡坡带
代表性油气聚集层段	沙三段及其以下层位	中部沙三段;中南部沙二段;南部沙一、二段和东营组	沙三段及沙一、二段	东营组
烃源岩	牛心坨洼陷的沙三、四段	中部为陈家、盘山、清水洼陷的沙一、三、四段;南部为鸳鸯沟洼陷的沙一、三段	陈家、盘山、清水洼陷的沙一、三、四段	清水、鸳鸯沟洼陷的沙一、三段
输导	砂体	中部:砂体、断层;南部:断层、不整合	不整合、断裂	
主要圈闭类型	断块、潜山、构造—岩性	中部:构造、潜山;南部:构造—岩性	潜山、构造、岩性、岩性—构造	断块

12、坨10、坨21和坨15南潜山的新生古储式组合及洼陷中心牛心坨油层段的自生自储组合等。沙四段主力烃源岩厚度大,坨25井揭示了800 m厚的暗色泥岩。沙三段、沙四段、中生界及太古界潜山多套储集层发育,其中的沙四段砂体累计厚度200 m。该成藏体系发现了牛心坨等油田,除杜家台和高升油层外,其他油组均不同程度地获得了工业性油流。总体分析,由构造运动所控制的烃源岩熟化作用是影响该成藏体系中油气成藏的主要控制因素。

西部缓坡带成藏体系位于西部凹陷的东倾状西部缓坡带,跨越了多个地质单元。虽然它南北延伸长度大、面积大,但其缓坡带地质特征南北贯穿,特征明显,具有大致相同的油气运聚成藏条件。根据沉积与构造演化研究,该带在沙三段沉积前为有机质富集的洼陷中心,由于后期的构造运动影响,凹陷沉积范围明显扩大并形成区域性斜坡,原始的沉降—沉积中心被动倾斜并被整体覆盖,在向东部位形成了新的沉降—沉积中心(沙三段以新),形成了目前悬挂于区域性斜坡部位的早期生供油气中心(沙四段)。由于区域性斜坡的形成,斜坡带实际上

北部陡坡带成藏体系位于西部凹陷最北端,主要指牛心坨地区的陡坡带,是西部凹陷沉降及回返最早的地区。该成藏体系主要形成于古近纪早期,主体接受了沙四期和沙三期的快速沉积。此后由于沉降、沉积中心的区域性南向迁移,导致位于北部的牛心坨地区发生了较长时期的抬升运动,逐渐弱化并终止了成藏体系的演化,阻碍了成藏体系成熟度的进一步提高。根据生烃条件研究,沙四段及沙三段烃源岩在其沉积末期已经开始进入成熟阶段,后期抬升作用控制油气生成过程缓慢,目前主要处于低熟—成熟($R_o=0.55\%$)阶段,表现为近源分布的富油贫气特点。由于断裂活动的多期性和沉积的多旋回性,牛心坨地区形成了良好的成藏组合,如坨

就成了油气运聚的最有利指向。实际上,这也是西部凹陷高丰度油气富集的最重要原因之一。由于西部斜坡带本身的“早洼晚斜”构造演化特点以及牛心坨、陈家、盘山、清水、鸳鸯沟等多个生烃中心同时提供油气,该成藏体系成为油气资源丰度最高、油气成藏期延续时间最长、油气及油气藏类型最为丰富的成藏体系,是高升、欢喜岭、曙光等亿吨级油田的主要分布单元。由于洼陷生供能力和条件的区域性渐变差异,导致产生了南富北贫、南复杂北简单的含油气地质特点,各段油气富集特点与其相应的陡坡带成藏体系(北、中、南)存在一定的对应关系。

中部背斜带成藏体系位于西部凹陷中部偏东部位,是西部凹陷沉降—沉积中心由北向南迁移的中过渡地带,也是由西向东迁移的目标指向之一。其沙三段及其以新地层发育,沙河街组和东营组砂地比达到60%以上,砂体厚度大物性好,孔隙度一般20%或更大,高的可达36%,渗透率一般在 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 以上。由于中部成藏体系处于陈家、盘山、清水等主要生烃洼陷的包围之中,是一个典型的“凹中隆”油气聚集模式,多元侧向供烃及成藏使它在成藏

条件上具有供烃强度大、多方向汇聚供烃、构造位置有利、多类型圈闭发育以及保存条件优越等成藏有利性,构造及构造—岩性圈闭捕集了以沙三段为主要来源的大量油气,在沙河街组及东营组地层中形成高丰度聚集的油气,是西部凹陷油气资源最为富集的地质单元之一。目前已发现了兴隆台和冷家堡两个亿吨级大油田。

南部成藏体系位于西部凹陷东南段,主要指小洼—月海构造带一线,属于受大洼—海南断裂控制的陡坡断裂带,其西、北、东外缘依次为清水—海南洼陷、中央凸起的南部倾没端及二界沟洼陷。作为沉降—沉积中心迁移的归宿方向,该成藏体系形成时间晚但后期沉降幅度大。作为主要生供烃来源的海南及清水洼陷,主要发育了沙三段和沙一、二段两套烃源岩,累计厚度分别达到了1500 m和2000 m。由于快速沉降作用,有机质演化均已达到成熟—高成熟阶段。该成藏体系以沙三段为烃源岩、以东营组为油气聚集的主要层系,体现出了较之北部和西部成藏体系相对为晚的演化特点,在很大程度上影响了油气的富集。进一步研究表明,该成藏体系本身的储集条件较差,后期构造活动强烈,断裂分割明显,油气成藏及保存条件处于相对不稳定状态,埋深较浅的东营组遭受不同程度破坏而使原油产生次生降解作用。这些因素制约了油气的大规模聚集及完好保存,除一些中小型油气田外,该成藏体系一直未能发现大型油气田。

二、油气成藏体系与天然气分布关系

(1)成藏体系的形成特点决定西部凹陷富含油气:根据第三次油气资源评价结果,辽河西部凹陷的油气资源丰度达到了 $70 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 左右的水平,在所统计的海域、东部及部分中、西部盆地各凹陷中高居榜首。研究表明,造成这一结果的主要原因:一是地层沉积速度大,西部凹陷古近系各套地层的厚度增加速率($500 \sim 1000 \text{ m/Ma}$)大约是渤海湾盆地对应层位平均值的2倍,高速的河、湖、沼及三角洲相沉积导致了有机质的异常丰富;二是有机质含量高,有机碳含量平均达到2.86%,氯仿沥青“A”含量平均达到0.34%,这些数值也是中国东部地区盆地对应层位平均值的2倍左右,形成了强有力的烃源基础;三是地温梯度高,一般为 $4 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,高的可达 $6.4 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,较之东部地区其他盆地凹陷高出10%~15%;四是后期的总体保存条件好,油气开始成藏后的构造抬升运动薄弱,除凹陷西部边缘存在

轻度抬升剥蚀以外,缺乏区域性地层剥蚀,与东部地区盆地其他凹陷的数百逾千米剥蚀厚度相比,西部凹陷具有完好地保存特点。

西部凹陷不乏天然气的存在,但目前的发现程度相对较差。按照三次资源评价结果并以油气当量计算,两者之间的资源量配比目前大致表现为12~15倍的富油贫气关系,与2000年以前的30多倍关系相比,油气资源及产储比已得到明显缩小。尽管与全国平均的2~3倍关系相比仍有相当差距,但根据剩余可采资源计算结果,西部凹陷石油与天然气当量仅约为3.8倍关系。这些数据表明,西部凹陷富含天然气。究其原因,主要是Ⅲ型干酪根发育,尤其是垂向上由沙四段到沙一段,Ⅱ₂和Ⅲ型干酪根含量不断增加,一般分布在20%~40%之间,沙一段Ⅱ₂和Ⅲ型干酪根含量平均达到了45%,形成了典型的混合型有机质类型。同时,有机质普遍达到成熟、高成熟阶段,为天然气的生成创造了良好的源岩条件。由于西部凹陷区域倾斜的构造特点以及保存条件上的东强西弱规律,目前所发现的天然气主要集中在凹陷中心的气源岩附近,分别受不同成藏体系的地质条件所影响。

(2)各成藏体系的差异性特点决定其含油气差异较大:北部成藏体系形成时间最早,以沙四段为主要烃源岩,在沙三段、沙四段发育了良好的成藏组合,形成了牛心坨、高升、杜家台(沙四段)及莲花、大凌河(沙三段)等产油层。由于成藏体系演化时间相对较早,后期构造抬升强烈(缺失沙一、二段),保存条件较差,天然气产出相对很少;处于区域构造斜坡部位的西部成藏体系发育时间长,有效烃源岩层位多,在从沙四段到沙一段的各套地层中均发现了高产油气层(杜家台、莲花、热河台、大凌河及兴隆台油气层)。进一步,西部凹陷南北延伸长度大,自身体现了西部凹陷沉降—沉积中心由北向南迁移的完整过程,生储盖条件各处差异较大,形成了北贫南富、东贫西富的天然气聚集趋势和特点。由东向西,依次出现了斜坡高部位的稠油—沥青、斜坡中部位的重油—较轻质原油以及斜坡深部位的轻质油、凝析油和天然气聚集;中部成藏体系的沙四段主体缺失,沙三段底部也较少出现,油气富集主要集中在沙三段中上部和沙一、二段(热河台、大凌河、兴隆台油层)。该成藏体系位于沉降—沉积中心迁移的过渡地带,尤其是成藏体系的南部拥有各成藏体系所具有的共同性优越条件,是天然气最为富集的地质单元之一,所形成的天然气藏密度高、规模大;南部成

藏体系是西部凹陷沉降—沉积中心迁移的目标指向和目标地域之一,构造发育及成藏活动相对较晚。由于后期断裂活动幅度大,圈闭类型多,紧邻的生烃中心以天然气产出为主,在沙一段和东营组(于楼和马圈子产层)形成了天然气的相对富集。

(3)成藏体系的演化特点决定天然气的空间分布,辽河西部凹陷内的天然气资源丰富,且与石油的成藏有着密切的联系。西部凹陷有机质类型丰富多样,混合型特点明显,有机质在生油的同时也生成天然气。油气同源共生、并存分布是天然气成藏及分布的基本特点。目前所发现的天然气以与原油伴生产出为主,共生形式主要表现为游离气顶和原油溶解气,纯气藏发育相对较少。

纵向上,由于Ⅲ型干酪根含量由沙四段(平均10%~12%)向上增加(沙一段平均20%),天然气的生成与成藏能力也相应增强,与天然气主要产出层位集中在沙三段、沙一—二段以及东营组的特点相吻合。进一步向上,馆陶组的烃源岩成熟度相对较差,不适宜于热解天然气的大量生成,天然气富集程度明显下降,反映为天然气产出及分布在剖面上明显受制于层系分布特点的规律,与区域上的砂控顺层状油气输导特点一致。在深度剖面上,有机质的生气及运聚成藏特点表现为深浅部气藏较少但以纯气藏为主,中深层位气藏较多但以伴生气居多,在剖面上形成下部范围小、上部分布广的所谓的“喇叭状”气藏展布分布格局。即生物化学、低成熟热解以及深部次生气源共同作用,在小于1500 m和大于3500 m的浅部和深部形成了以纯气藏为主的聚集特点,浅部以纯气藏形式聚气的主要原因是主力产油气层位中所生成的石油无法到达,深部对应的主要原因是局部热演化程度较高,生气能力较强。

根据各层位烃源岩地球化学指标特点及实际的天然气勘探效果观察,沙三段至东营组是天然气分布最多的层系,这一天然气在层位上的分布特点及沉降—沉积中心转移规律决定了各成藏体系中天然气分布的基本格局。即北部成藏体系以沙四段为主要烃源岩,埋藏浅成熟度适中,原油黏度、密度适中,含蜡较少,以生物作用为主产生的天然气具有较高的甲烷含量;西部成藏体系以沙三段和沙四段烃源岩为主体,天然气分布南多北少、东疏西密,甲烷含量北多南少、东高西低(乙烷和丙烷含量则相反),与原油的黏度、密度、含蜡量整体偏大,东部保存条件总体较差的宏观格局具有良好对应关系;南部成藏体系以沙河街组上部和东营组气源岩为主体,天然

气中的甲烷含量从深到浅逐渐降低,与原油的黏度和密度向上增加、含蜡量向上减小形成良好对应,也表明了天然气的来源与层位之间的对应关系;中部成藏体系处于具有过渡变化特点的复杂地质背景中,天然气的成分变化特点不明显,规律不明显,但原油物性变化与南部成藏体系具有相同趋势。在中部成藏体系,特殊的地质背景、有利的区域位置和成藏条件导致了西部凹陷最大气田的出现。

沉降中心与天然气聚集中心呈现良好的对应迁移关系,即由西向东,由北向南,地层沉积总厚度越来越大,含油气层位越来越新,天然气分布越来越多。受源岩条件及成藏体系地质背景条件影响,天然气分布在平面上形成了明显的环状分布格局(图3)。在西部成藏体系的东南部、中部成藏体系的南部以及南部成藏体系的西部,天然气富集程度相对增加,环绕鸳鸯沟、清水及盘山等生烃洼陷展布,形成了总体以迁移后的沉降—沉积中心为中心、跨越各不同成藏体系的圆环状天然气分布圈,为源控条件下,天然气顺层运移并就近聚集的结果。在平面上,天然气的环状分布位置是凹陷沉降—沉积中心转移所产生的直接结果,后期沉降—沉积中心形成了新的烃源岩聚集中心,沉积了大量富含Ⅲ型干酪根的有机质。同时也加大了原始沉积地层的埋藏深度,增加了有机质的熟化作用,构成了有利的生、供气中心。

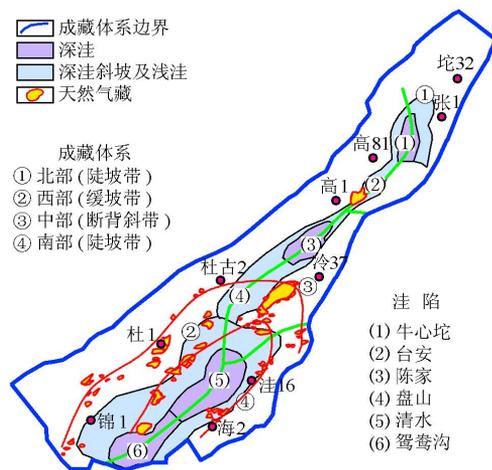


图3 西部凹陷天然气分布图

三、问题讨论

(1)成藏体系是一种与传统含油气系统分析思路相反的研究方法,它能够从油气运聚及成藏的角度对油气分布规律进行系统分析,进一步解决油气

地质单元及其与油气分布之间的关系。四个成藏体系特点不同,控制天然气分布各异。出于对油气成藏及天然气分布规律的深入研究,有必要对成藏体系进行细化和深入研究。

(2)由于沉降—沉积中心的迁移作用和过程特点研究尚不系统、细致,它对油气运聚成藏,尤其是对天然气成藏与分布的影响尚无法系统认识。但目前资料表明,西部凹陷沉降—沉积中心随时间的迁移过程对天然气的分布构成了明显的控制作用,两者大致呈对应变化关系。因此,在沉积中心迁移条件下,成藏体系中天然气的动态成藏及静态分布仍然值得深入探讨。

(3)中国东部地区总体具有富油贫气特点,西部凹陷油气勘探长期以石油为主,天然气发现较少、研究程度相对较低,天然气资源前景研究仍然值得进一步探讨。尤其是沙河街组下部页岩地层中新发现在天然气形成的物质基础及赋存的空间条件,近年来的油气资源倍比关系不断降低,表明西部凹陷仍有天然气资源增长的较大空间。

(4)目前的天然气发现资料明确显示了平面区域上天然气藏分布的环圈状规律,表明了天然气较大的资源潜力。按照天然气成藏机理及国外相似盆地的天然气发育规律对比,在已发现的天然气环圈状范围之内仍将存在天然气新发现的可能,只是由于沉降—沉积中心部位的天然气成藏地质条件特殊,将有可能以非常规形式对天然气进行富集,如岩性隐蔽气藏、页岩气藏、裂缝气藏、致密砂岩气藏等,有待进一步探讨。

参 考 文 献

[1] 张占文,陈振岩,郭克园,等.辽河盆地天然气地质[M].

北京:地质出版社,2002.

- [2] 金之钧,张一伟,王捷,等.油气成藏机理与分布规律[M].北京:石油工业出版社,2003.
- [3] 秦承志,王先彬,林锡祥,等.辽河盆地埋藏史及烃源岩成熟度演化史的数值模拟[J].沉积学报,2002,20(3):493-498.
- [4] 陈振岩,余炳俊,郑治宇,等.辽河盆地多源天然气复合成因[J].沉积学报,1997,15(2):58-61.
- [5] 单俊峰,陈振岩,张卓,等.辽河坳陷西部凹陷西斜坡古潜山的油气运移条件[J].现代地质,2005,19(2):274-278.
- [6] 李军生,郭克园,张占文,等.辽河盆地浅层气藏特征[J].天然气工业,1997,17(3):76-77.
- [7] 孙洪斌,张风莲.辽河断陷西部凹陷古近系砂岩储层[J].古地理学报,2002,4(3):83-92.
- [8] 吴铁生等.辽河盆地天然气的形成与演化[M].北京:科学出版社,1993.
- [9] 郑荣才,吴朝容.西部凹陷深层沙河街组生储盖组合的层序分析[J].成都理工学院学报,1999,26(4):348-356.
- [10] 朱芳冰.辽河盆地西部凹陷源岩特征及低熟油分布规律研究[J].地球科学——中国地质大学学报,2002,27(1):25-29.
- [11] BASIM FARAJ, HAROLD WILLIAMS, GARY ADISON, BRIAN MCKINSTRY et al. Gas potential of selected shale formations in the Western Canadian Sedimentary Basin [J]. GTI E&P Services Canada, 2004, winter:21-25.
- [12] SCHMOKER J W. Determination of organic-matter content of appalachian devonian shales from gamma-ray logs[J]. AAPG, 1981, 62:1285-1298.

(修改回稿日期 2007-03-01 编辑 居维清)