

文章编号: 0253-2697(2010)03-0373-06

鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系

杨智^{1,2} 何生² 邹才能¹ 李奇艳¹ 陈召佑^{2,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院提高石油采收率国家重点实验室 北京 100083; 2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 湖北武汉 430074; 3. 中国石油化工股份有限公司华北分公司勘探开发研究院 河南郑州 450006)

摘要: 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田上古生界含气层系多, 储量规模大, 是一个典型的大型煤成气田。对源岩及天然气地化特征、源岩热演化模拟、储层岩石学、成岩演化及相关成藏要素的综合研究表明, 大牛地气田具有“两个生气中心, 储层致密化前后分明, 早期侧向运移, 晚期垂向充注”的成藏模式, 形成了研究区内两种不同类型的气藏, 即西南角的盒2段和盒3段辫状河道砂体储层气藏和东北角的太2段障壁砂坝储层气藏, 生气中心和储层致密化对上古生界天然气成藏有着重要的控制作用。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 大牛地气田; 上古生界; 天然气成藏模式; 致密砂岩; 煤成气

中图分类号: TE112.31

文献标识码: A

Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi Gas Field in North Ordos Basin

YANG Zhi^{1,2} HE Sheng² ZOU Caineng¹ LI Qiyan¹ CHEN Zhaoyou^{2,3}

(1. State Key Laboratory of EOR, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resource of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Exploration and Production Research Institute, Sinopec Huabei Company, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Daniudi Gas Field is a typical and large coal-genetic gas field in North Ordos Basin and has the characteristics of multiple gas-bearing layer series and large-scale explored reserves in Upper Palaeozoic reservoir. The comprehensive analyses on the geochemistry characteristics of source rocks and natural gas, thermal evolution modeling results of source rocks, reservoir petrology, diagenesis evolution and other gas accumulation elements show that Daniudi Gas Field possesses a special gas accumulation model controlled by two gas generating centers and the tightening processes of sandstone and divided by the tightening time of sandstone termination. There developed two kinds of gas reservoir in Daniudi Gas Field. Prior to the tightening time of sandstone termination, the lower maturation gas migrated to the higher traps in large scale under the force of buoyancy and formed the T2 barrier bar facies gas reservoir in the Northeast. Then, the high-maturation gas migrated upward in the fracture systems under the force of gas-generating overpressure and formed H2 and H3 braided channel facies gas reservoir in the Southwest. The gas accumulation center and tightness of sandstone controlled the natural gas accumulation of Upper Palaeozoic reservoir in North Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin; Daniudi Gas Field; Upper Palaeozoic; natural gas accumulation model; tight sandstone; coal-genetic gas

鄂尔多斯盆地北部具有丰富的天然气资源, 已发现苏里格、榆林、大牛地、乌审旗和子洲等5个储量为 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 以上的上古生界大型气田^[1-3]。鄂尔多斯盆地北部上古生界具有勘探面积大、含气层系多等特点, 气藏多为低孔隙、低渗透、低压、低产量、低丰度的大面积岩性气藏^[4-8]。针对鄂尔多斯盆地上古生界气田群的成藏模式, 前人做了大量的研究, 先后提出“深盆气或根源气”、“广覆式生气条件下的粗相带富气成藏模式或近源箱形成藏模式”、“高低压相间共存的复杂压力封存箱成藏模式”、“储层先致密而后天然气充注成藏”等各种不同的成藏模式^[9-12]。分析这些不同

的成藏模式, 发现研究者都认为鄂尔多斯盆地北部上古生界气田具有充足的气源(广覆式生气)、致密的储层(浮力不是主要驱动力, 源储之间的压力差是主要的天然气运移动力)和有效的盖层(石千峰组和上石盒子组物性、压力双重封盖), 如此的一种成藏配置, 使在距今95 Ma之前大量生成的天然气得以有效保存。然而在研究大牛地气田储层成岩演化与天然气成藏过程之间的耦合关系时, 基于天然气地球化学(尤其是甲烷碳同位素)、储层岩石学、流体包裹体、碳酸盐胶结物的碳和氧同位素、盆地模拟等大量资料的综合分析, 却得出了不完全相同的成藏模式认识, 即“两个生气中心、储

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05001)、国家示范工程项目(2008ZX05044)和中国石油天然气股份有限公司科技开发项目(2008B-0100)联合资助。

作者简介: 杨智, 男, 1980年2月生, 2009年获中国地质大学(武汉)博士学位, 现为中国石油勘探开发研究院在站博士后, 主要从事石油地质综合研究工作。E-mail: yangzhi2009@petrochina.com.cn

层致密化前后分明、早期侧向运移、晚期垂向充注”的成藏模式。现今大牛地气田天然气的富集高产是生气过程和储层致密化过程相互耦合、共同作用的结果,详细解剖这一复杂的成藏过程对于鄂尔多斯盆地北部上古生界煤成气田群的深入勘探具有借鉴作用。

1 地质背景

大牛地气田勘探面积约为 2004.8 km^2 , 构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部, 为西倾单斜构造, 倾角不足 1° , 发育少量低幅度构造, 断层不发育。

鄂尔多斯盆地北部晚石炭世太原期滨岸沼泽煤系地层以及早二叠世山西期的冲积平原煤系地层构成了盆地上古生界的气源岩; 发育于气源岩之间及其以上的河道砂体、三角洲平原分流河道砂体、三角洲前缘水下分流河道砂体、河口砂坝、海陆过渡相滨岸砂坝、潮道砂体构成了储集体; 晚二叠世大面积分布的上石盒子组和石千峰组河漫、湖相泥岩形成了盆地上古生界气藏的区域盖层。大牛地气田共有 7 套含气层系, 从下往上分别为太 1 段、太 2 段、山 1 段、山 2 段、盒 1 段、盒 2 段和盒 3 段含气层^①, 其中太 1 段和太 2 段为海陆过渡相沉积; 山 1 段和山 2 段为辫状河流相沉积; 盒 1 段、盒 2 段和盒 3 段为辫状河流相—曲流河相沉积。截至 2007 年底, 大牛地气田探明天然气地质储量已超过 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[13], 但储量丰度仅为 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。主要建产区位于工区西南角的盒 2 和盒 3 段辫状河道砂体储层气藏, 其次为位于工区东北角的太 2 段障壁砂坝储层气藏, 两者之和约占整个气田产能的 90%。

2 源岩及天然气地化特征

2.1 源岩特征

大牛地气田上古生界石炭系—二叠系发育滨岸沼泽和河漫、湖相沼泽煤系地层, 主要气源岩层有太 1 段和山 1 段煤系地层, 次要气源岩包括太原组和山西组暗色泥岩。煤的有机质丰度极高, 残余有机碳含量 (TOC) 为 71.52%~85.5%, 岩石热解生烃潜量 ($S_1 + S_2$) 为 101.62~185.18 mg/g; 煤系中暗色泥岩的 TOC 值为 4.63%~28.17%, $S_1 + S_2$ 为 6.23~49.61 mg/g。煤和泥岩的 HI 为 73~202.85 mg/g, 平均为 154.31 mg/g, 大部分为 120~170 mg/g, 干酪根类型以Ⅲ型为主。 R_o 值为 0.95%~1.53%, 集中分布在 1.4%~1.5%, T_{max} 为 450~491°C, 集中分布在 470~490°C, 处于高成熟热演化阶段。

大牛地气田较厚的山西组源岩层(煤层+暗色泥岩)

主要分布在西南、中南和东北部, 厚度大于 46 m; 较厚的太原组源岩层(煤层+暗色泥岩)主要分布在中南、东部和西北部, 厚度大于 32 m。总体上看, 较厚的大牛地气田源岩层仅主要分布在西南、中南和东部局限区域, 大牛地气田各区域生烃的物质基础有很大差异。

2.2 天然气特征

大牛地气田上古生界气藏 7 套主要产层天然气中烃类气占绝对优势, 其含量为 75%~99%, 气体组成中以甲烷为主, 甲烷相对含量为 72%~92%, 多数为 82%~90%, 干湿系数为 6.35~22.8, 干燥系数为 85.11%~95.71%。气层总烃含量多数大于 90%, 且以山 1 段烃源岩为中心, 向上向下甲烷含量、干湿系数和干燥系数均增加, 反映分馏效应和近源重烃气含量较高。

大牛地气田上古生界天然气甲烷碳同位素值为 $-39.02\text{‰} \sim -33.28\text{‰}$, 多数为 $-37\text{‰} \sim -34\text{‰}$; 乙烷的碳同位素组成 $-26.5\text{‰} \sim -23.54\text{‰}$; 烷烃气 $\delta^{13}\text{C}$ 值连线呈 L 形, 具有 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4 < \delta^{13}\text{C}_5$ 的碳同位素系列特征, 说明这些烷烃气是原生型有机成因气。由不同公式计算^[14-15], 得到 R_o 值为 0.5%~1.5%, 反映天然气为成熟—高成熟阶段生成的产物。

2.3 源岩热演化及生气中心

早白垩世距今约 140~100 Ma, 鄂尔多斯盆地发生一期构造热事件, 持续时间约为 10~40 Ma^[16-18]。受该期构造热事件的影响, 大牛地上古生界源岩的热演化生烃作用可明显划分为两个阶段(图 1)。

第一阶段: 从晚三叠世至早白垩世末(距今 210~

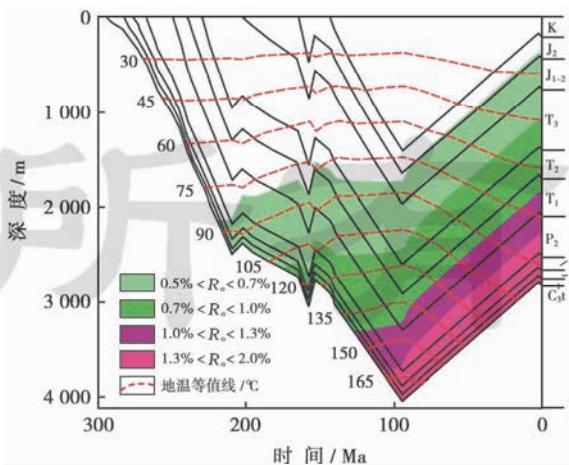


图 1 大牛地气田地层埋藏史、地温史和成熟史

Fig. 1 Burial history, geothermal history and maturation history of Upper Paleozoic in Daniudi Gas Field

^① 文中地层划分依照中国石油化工股份有限公司的分层系统, 大致与中国石油天然气股份有限公司的分层系统对应为: 太 1 段和太 2 段对应太原组; 山 1 段对应山 2 段; 山 2 段对应山 1 段; 盒 1 段对应盒 7 段和盒 8 段; 盒 2 段对应盒 6 段; 盒 3 段对应盒 5 段。

95 Ma)。烃源岩在晚三叠世—早侏罗世处于快速埋藏期,该时期烃源岩刚进入生烃门限,主要生成含烃的CO₂气体;中、晚侏罗世处于缓慢沉降期,烃源岩进入成熟阶段,开始生烃和排烃,有少量液态烃和较多的天然气生成;早白垩世受燕山期构造热事件的影响烃源岩迅速达到成熟—高成熟阶段,开始大量生气,成为气藏形成的关键时期。

第二阶段:早白垩世末至现今(距今95 Ma~现今)。地层遭受抬升剥蚀,大牛地气田工区内地层剥蚀厚度达到950~1350 m,烃源岩温度、压力降低,燕山期构造热事件影响逐步消退,源岩本身仅有少量天然气生成,生烃作用明显降低并趋于停止。

生气中心系指生气强度最大区,是烃源岩厚度、有机质丰度、有机质类型及成熟度的综合体现^[1-3]。大牛地气田包括太原组和山西组两个生气强度中心区(图2)。太

原组生气中心区位于东南部,主要是太1段的贡献,生气强度为(1 000~1 200)m³/m²;山西组生气中心区位于中西部,主要是山1段的贡献,生气强度为(1 500~2 350)m³/m²。整体上,大牛地气田生气强度中心区位于东南和中西部,生气强度大于2 500 m³/m²,对大牛地气田的形成和分布具有控制作用。

3 储层致密化过程

3.1 储层特征

大牛地气田上古生界砂岩类型主要为岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和石英砂岩,其中下石盒子组和山西组中岩屑砂岩居多,占样品总数的60%以上,而太原组则含有较多的石英砂岩。碎屑石英主要由单晶石英和多晶石英组成,见少量燧石;岩屑以千枚岩、片岩、板岩和变质砂岩等浅变质岩为主,其次为火山岩岩屑,岩屑中以塑性岩屑为主,经历了强烈的压实[图3(a)]。填隙物主要由自生胶结物和陆源杂基组成:其中,自生胶结物中主要有硅质[图3(b)和(c)]、含铁方解石[图3(c)和(d)]、铁白云石、菱铁矿、高岭石、绿泥石等;陆源杂基以凝灰质、水云母、绿泥石为主。

含气砂岩颗粒粒径一般为0.4~1.2 mm,主要为粗砂岩和含砾粗砂岩,部分为中砂岩。颗粒接触以线接触、线—凹凸接触及凹凸接触等紧密接触方式为主,颗粒分选多数中等,呈次棱角状、孔隙式胶结。大牛地上古生界砂岩储层为低孔隙、低渗透储层,63.3%的样品孔隙度小于8%,73.3%的样品渗透率小于0.5×10⁻³ μm²(样品总数为6 853个)。其中盒3和盒2段的物性最好,其次是太原组,而盒1段和山西组的物性较差。孔隙类型主要为粒间次生溶孔,其次是原生残余粒间孔隙。溶蚀成分主要是长石矿物和岩屑中的长石类成分,碳酸盐胶结物溶蚀增孔较为次要。

3.2 储层致密化因素及成岩演化序列

大牛地气田砂岩的黏土矿物中伊蒙间层矿物有序度很高,多数样品为15%~30%,少数小于15%;储层的孔隙度普遍小于10%,以少量次生溶孔为主并见裂缝。大牛地气田砂岩成岩阶段已达到晚成岩阶段B期和晚成岩阶段A₂亚期(图4)。

大牛地气田致密砂岩储层经历了复杂的成岩演化。造成砂岩致密化的因素较多,但主要有两种因素:①高含量塑性岩屑因机械压实作用造成砂岩致密。大牛地气田砂岩储层含大量千枚岩、泥板岩等柔性物质,长期在上覆岩层高强度压实下形变、压缩挤压孔隙、形成以微孔为特征的致密储层。②硅质和碳酸盐胶结作用造成砂岩致密。在砂岩储层埋藏过程中,存在碎屑颗粒之间的硅质和碳酸盐胶结物,极大地降低了储层

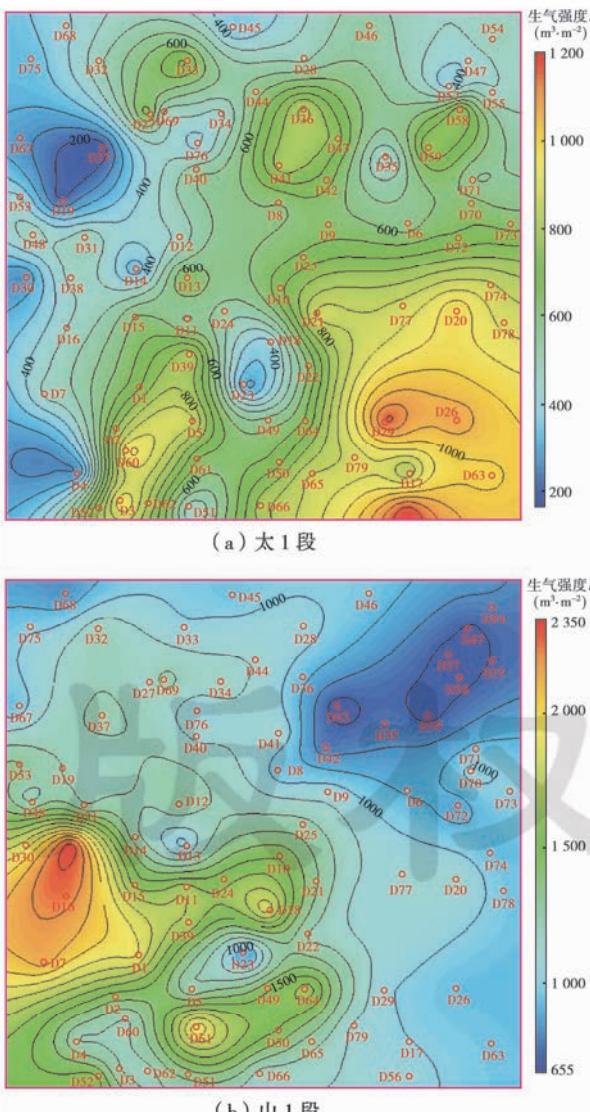


图2 大牛地气田太1段和山1段累积生气强度等值线

Fig. 2 Total gas generation strength contour in T1 and S1 of Daniudi Gas Field
S1 of Daniudi Gas Field

的孔隙、渗透性,形成低孔隙、低渗透的致密储层。硅质胶结主要以次生加大、充填于粒间孔或溶孔内的自生石英及自形石英、愈合石英等形式产出。自生石英包裹体均一温度显示,本区自生石英形成的温度主要

为 80~130℃,部分样品可达 160~170℃。碳酸盐胶结物主要为含铁方解石、含铁白云石和方解石,少量菱铁矿,下石盒子组和山西组主要为含铁方解石和方解石,铁白云石存在于太原组和山西组底部,粒间充填的

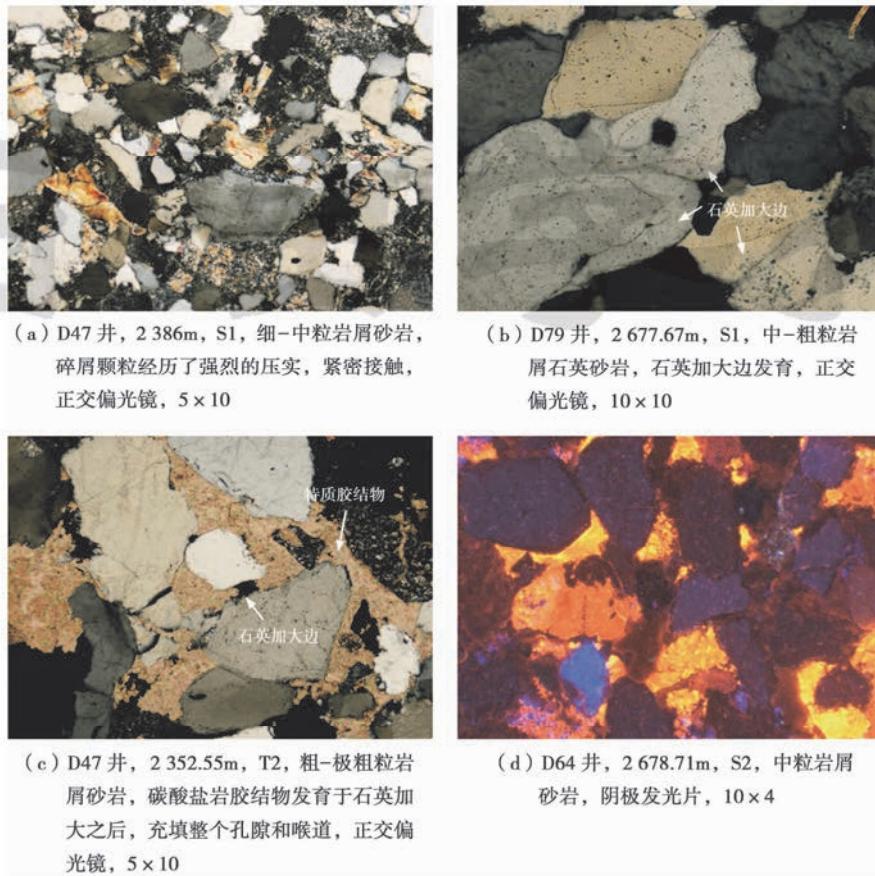


图 3 大牛地气田上古生界砂岩显微薄片照片

Fig. 3 Diagenesis micrographs of Upper Paleozoic sandstones in Daniudi Gas Field

碳酸盐胶结物形成于石英次生加大之后,自生碳酸盐包裹体均一测温和氧同位素温度计显示,碳酸盐岩胶结物形成温度一般为 85~135℃。另外,粒间泥质充填和自生黏土矿物的沉淀也是造成砂岩致密的较重要因素^[19]。

诸多的致密化因素导致本区上古生界砂岩储层特殊的成岩演化序列(图 4)。在距今 140 Ma(早白垩世),埋深 3 000 m,地温约为 130℃, R_o 约为 0.8% 时,本区中粗砂岩已致密化,即孔隙度多小于 10%,渗透率多小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层非均质性很强,强烈的成岩作用背景下优质储层已被条块分割,天然气依靠气柱的浮力驱动运移已不可能。机械压实作用在古埋深 2 100 m 时已使孔隙减少到 15%~20%;自生石英应形成于早成岩 B 期,并延续到晚成岩 B 期,主要温度范围为 80~130℃,使孔隙减少 5%~10%;碳酸盐胶结物形成于石英加大之后,主要温度范围为 90~135℃,使孔隙减少 2%~5%;而次生溶蚀孔隙主要形

成于晚成岩阶段 A₁ 期和 A₂ 期早期。

成岩阶段	古埋深 / m	R_o / %	古地温 / °C	机械压实	石英次生加大	方解石胶结	菱铁矿胶结	含铁方解石胶结	铁白云石胶结	高岭石沉淀	绿泥石膜	伊利石沉淀	溶蚀作用	构造破裂作用
早成岩 B 期	2 100	0.5	85											
晚成岩 A ₁ 期	2 700	0.7	110											
晚成岩 A ₂ 期	3 300	1.0	145											
晚成岩 B 期	3 700	1.3	160											
	4 200	1.5	175											

图 4 大牛地气田上古生界砂岩储层成岩演化序列

Fig. 4 Diagenesis evolution sequence of Upper Paleozoic sandstone reservoirs in Daniudi Gas Field

4 大牛地气田成藏模式

大牛地气田天然气是以甲烷占绝对优势的成熟—高成熟煤成气,甲烷碳同位素是反映研究区天然气成熟度的最佳指标。根据收集到的研究区27个天然气甲烷碳同位素数据,发现研究区东北一侧天然气样品主要分布在太2段NE—SW向障壁砂坝位置(图5),且天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较低,为 $-39.02\text{\textperthousand} \sim -36.58\text{\textperthousand}$,换算 R_\circ 为 $0.65\% \sim 0.86\%$,成熟度相对较低,生成时的古地温为 $100 \sim 128^\circ\text{C}$,对应生成时间为距今 $210 \sim 140\text{ Ma}$ 。而研究区西南一侧天然气样品主要分布在山西组生气中心附近,且天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较高,为 $-36.15\text{\textperthousand} \sim -33.28\text{\textperthousand}$,换算 R_\circ 为 $0.89\% \sim 1.50\%$,成熟度相对较高,生成时的古地温为 $133 \sim 175^\circ\text{C}$,对应生成时间为距今 $140 \sim 95\text{ Ma}$ 。

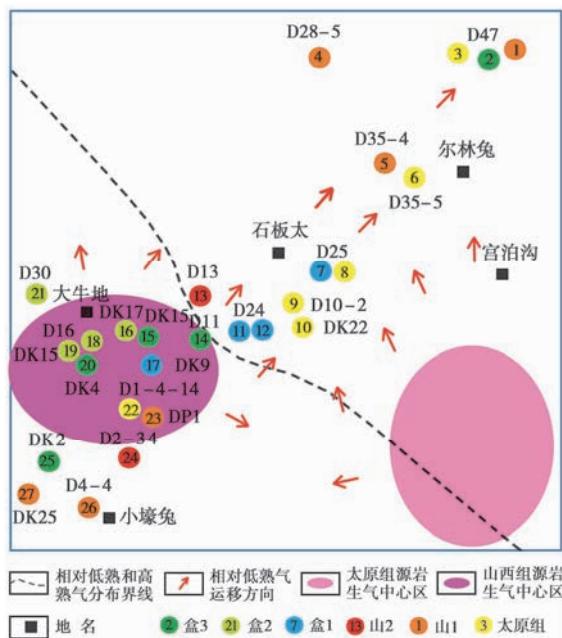
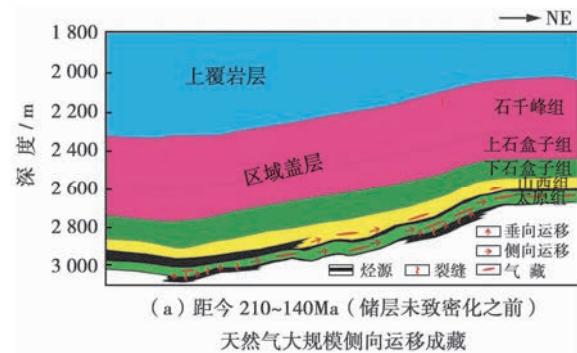


图5 大牛地气田天然气样品位置及早期相对低熟天然气的运移

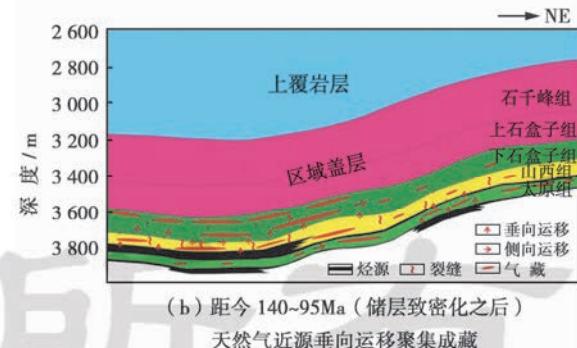
Fig. 5 Sample locations and the migration direction for relatively lower matured gas in early stage in Daniudi Gas Field

对应前文储层致密化过程和阶段的分析,恰恰也是以地温 130°C 、时间 140 Ma 为间隔。大牛地气田致密储层成岩演化与天然气充注成藏过程之间存在着非常有趣的耦合关系,以储层完成致密化时间(距今 140 Ma)为界,大牛地气田区有两期大规模天然气充注成藏过程。早期:晚三叠世至早白垩世初期(距今 $210 \sim 140\text{ Ma}$),砂岩储层致密化前,有少量液态烃和较多的天然气生成,山西组和太原组两大生气中心生成的天然气成熟度相对较低;此时储层物性较好,尤其是太2

段障壁砂坝石英砂岩,可以形成较高的连续气柱;天然气以浮力为主要驱动力,向东北方向进行较大规模的侧向运移,在高部位有利岩性圈闭中聚集成藏[图5和图6(a)],东北部地区太原组和山西组砂岩储层同时发生聚气和致密化过程。晚期:早白垩世初期至早白垩世末期($140 \sim 95\text{ Ma}$),砂岩储层致密化后,天然气大量生成时期,生成的天然气成熟度相对较高;此时储层非均质性很强,毛细管压力大,难以形成较高的气柱;浮力已不是主要运移动力,侧向运移已非常困难,天然气生成的过剩压力成为主要驱动力;天然气由生气中心原地垂向供气(主要是山1段供气),由生气增压和构造应力共同作用产生的山西组和盒1段较发育的裂缝系统为主要运移通道^[20];太原组、山西组和下石盒子组砂岩储层先致密后聚气,富集区域为山西组和太原组生气中心附近区域有利岩性圈闭[图6(b)]。归纳起来,即大牛地气田具有“两个生气中心,储层致密化前后分明,早期侧向运移,晚期垂向充注”的成藏模式。



(a) 距今 $210 \sim 140\text{ Ma}$ (储层未致密化之前)
天然气大规模侧向运移成藏



(b) 距今 $140 \sim 95\text{ Ma}$ (储层致密化之后)
天然气近源垂向运移聚集成藏

Fig. 6 Gas accumulation models of Daniudi Gas Field

5 结论

(1) 大牛地气田煤系地层是主要的气源岩,现今已达到高成熟的热演化程度(R_\circ 为 $1.4\% \sim 1.5\%$);天然气主要为中等成熟热降解气和高成熟热裂解气,为典型的煤成湿气;生成于晚三叠世至早白垩世末(距今 $210 \sim 95\text{ Ma}$);山西组和太原组源岩生气中心区分别位于研究区的中西部和东南部,累积生气强度超

过 $2500 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

(2) 大牛地气田致密砂岩储层为低孔隙、低渗透储层,现今已处于晚成岩阶段 B 期和 A₂ 亚期;造成砂岩致密化的因素主要有高含量塑性岩屑机械压实和硅质、碳酸盐胶结作用,其中自生石英形成的温度主要为 80~130℃,钙质胶结物一般形成于石英加大之后,形成温度一般为 85~135℃,而次生溶蚀孔隙主要形成于晚成岩阶段 A₁ 期和 A₂ 期早期;在距今约 140 Ma,本区中一粗砂岩已完成致密化。

(3) 在生气中心和储层致密化的控制下,本区天然气具有早晚两期不同的成藏模式。早期储层致密化以前,即距今 210~140 Ma(晚三叠世—早白垩世初期),相对低熟天然气以浮力驱动,向东北方向大规模侧向运移,在高部位有利圈闭中聚气;晚期储层致密化之后,即距今 140~95 Ma(早白垩世初期—早白垩世末期),相对高熟天然气以生气超压为主要驱动力、以裂缝系统为主要运移通道,垂向近生气中心聚气成藏。

致谢 感谢赵彦超教授的无私帮助和有益见解,感谢陈红汉教授、李纯泉博士、郭振华博士、王冰洁、骆杨、戴世立、李弘和杨姣等给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 戴金星,邹才能,陶士振,等.中国大气田形成条件和主控因素[J].天然气地球科学,2007,18(4):473-484.
Dai Jinxing, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 473-484.
- [2] 邹才能,陶士振.中国大气区和大气田的地质特征[J].中国科学:D辑,2007,37(增刊Ⅱ):12-28.
Zou Caineng, Tao Shizhen. Large gas areas and its geological characteristics in China[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(Supplement Ⅱ): 12-28.
- [3] 宋岩,柳少波.中国大型气田形成的主要条件及潜在勘探领域[J].地学前缘,2008,15(2):109-119.
Song Yan, Liu Shaobo. Main conditions for formation of middle-large gas fields and the potential gas exploration areas in China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 109-119.
- [4] 杨华、张文正,李剑锋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究[J].沉积学报,2004,22(增刊):39-44.
Yang Hua, Zhang Wenzheng, Li Jianfeng, et al. Geochemical study of the Upper Paleozoic gas in the northern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(Supplement): 39-44.
- [5] 郝蜀民,李良,尤欢增.大牛地气田石炭一二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J].中国地质,2007,34(4):607-611.
Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. Permo-Carboniferous paralic depositional systems in the Danidi gas field and its near-source box-type gas accumulation-forming model[J]. Geology in China, 2007, 34(4): 607-611.
- [6] 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 Lifan, 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.
- [7] 邹才能,陶士振,袁选俊,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, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30 (3): 324-331.
- [8] 何自新,付金华,席胜利,等.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, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 6-12.
- [9] 付金华.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D].西安:西北大学,2004.
Fu Jinhua. The gas reservoir-forming conditions and accumulation rules of Upper Paleozoic in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2004.
- [10] 李仲东,郝蜀民,李良,等.鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J].石油与天然气地质,2007,28(4):466-472.
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Compartments in the Upper Paleozoic of northern Ordos Basin and their relationship with gas enrichment [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28 (4): 466-472.
- [11] 张刘平,罗晓容,马新华,等.深盆气-成岩圈闭:以鄂尔多斯盆地榆林气田为例[J].科学通报,2007,52(6):679-687.
Zhang Liuping, Luo Xiaorong, Ma Xinhua, et al. Deep basin gas-diagenesis trap: A case from Yulin gas field in Ordos Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(6): 679-687.
- [12] 李熙喆,张满郎,谢武仁.鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律[J].石油学报,2009,30(2):168-175.
Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 168-175.
- [13] 石宝珩,薛超.科技攻关与中国天然气工业发展——煤成气理论研究 30 周年感言[J].石油勘探与开发,2009,36(3):257-263.
Shi Baoheng, Xue Chao. Key scientific and technological problems tackling and China's natural gas industry development: At the 30th anniversary of coal-formed gas theoretical studies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 257-263.
- [14] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].中国科学:B辑,1992,22(2):185-193.
Dai Jinxing. Identification of different alkane gas[J]. Science in China: Series B, 1992, 22(2): 185-193.
- [15] 陈安定,张文正,徐永昌.沉积岩成烃热模拟实验产物的同位素特征及应用[J].中国科学:B辑,1993,23(2):209-217.
Chen Anding, Zhang Wenzheng, Xu Yongchang. Characteristics and application of isotopes in products from organic matter in

(下转第 385 页)