

文章编号: 0253-9985(2009)01-0011-06

柴达木盆地东部涩北一号叠置气藏的两种成藏模式

程付启^{1,2}, 金强², 周廷全¹, 张水昌³, 马凤良⁴

(1. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015; 2. 中国石油大学, 山东 东营 257061; 3. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 柴达木盆地东部涩北一号气田由7个纵向叠置的气藏组成, 各气藏中生物气的富集程度相差悬殊。为了查明生物气富集的控制因素, 首先以单储系数、储量丰度和试气产量为依据, 将7个气藏划分为高富集与低富集两类; 然后对两类气藏的成藏条件进行了对比分析。研究认为, 埋深大于950 m的第四—第七气藏为高富集气藏, 这些气藏处于最大生气带, 能同时接受本区及中央凹陷生物气的供给, 加上其储盖组合、圈闭及后期保存条件优越, 有利于生物气富集成藏; 浅部的第一—第三气藏为低富集气藏, 它们埋藏所处层段还未达到生气高峰, 主要由下部气藏扩散散失生物气充注成藏, 且保存条件较差, 生物气难以富集。在成藏条件分析的基础上, 将高、低富集气藏的形成分别归结为气源充注和扩散充注成藏模式。

关键词: 高富集气藏; 低富集气藏; 成藏条件; 成藏模式; 涩北一号气田; 柴达木盆地东部

中图分类号: TE122.3 文献标识码: A

Two pooling patterns of superimposed reservoirs in Sebei-1 gas field, the eastern Qaidam Basin

Cheng Fuqi^{1,2}, Jin Qiang², Zhou Tingquan¹, Zhang Shuichang³, Ma Fengliang⁴

(1. Research Institute of Geological Sciences, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China;

2. China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

3. PetroChina Exploration & Development Research Institute, Beijing 100083, China;

4. Northwest Branch of PetroChina Exploration & Development Research Institute, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: The Sebei-1 field consists of seven vertically superimposed gas reservoirs with various biogas enrichments. These reservoirs are divided into high-enrichment reservoirs (HER) and low-enrichment reservoirs (LER) based on such data as reserves per unit volume, abundance of gas reserves, and flow rate tested. The pooling conditions for these two types of reservoirs are compared and analyzed. The results are used to define the controlling factors for the biogas enrichment in the field. The lower four deeper reservoirs with burial depth greater than 950 meters are the HER type, while the upper three shallow ones belong to the LER type. The former ones are favorable for gas pooling and enrichment as they are located in the central of a gas-generation zone with biogas charging both from the local area and central depression, and apart from that, they also have favorable reservoir-seal assemblage, trapping and preservation conditions. In contrast, the later ones are unfavorable for gas pooling and enrichment as the source rocks have not reached peak gas generation, the biogas are mainly sourced from the lower gas reservoirs through diffusion, and the preservation conditions are relatively poor. Based on the analysis of pooling conditions, the paper suggests that the pooling patterns for the HER and LER

收稿日期: 2008-12-15。

第一作者简介: 程付启(1978—), 男(汉族), 博士, 油气地质与地球化学研究。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB209102)。

reservoirs be described as source charged and dispersion charged respectively.

Key words: high-enrichment reservoir; low-enrichment reservoir; pooling condition; pooling pattern; Sebei 1 gas field; eastern Qaidam Basin

柴达木盆地东部(简称柴东)是我国生物气富集区,已发现涩北一号、涩北二号、台南、台吉乃尔、盐湖和驼峰山等6个生物气田,探明储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。自柴东含气区发现以来,为了揭示埋藏浅、成岩弱的地层中生物气的成藏规律,前人做了大量的研究工作^[1~6],并提出了充注-散失动态平衡成藏模式^[7,8],概括了生物气聚集的一般规律。但是,柴东生物气在构造(气田)之间分布很不均衡。例如,目前89.84%的储量分布在涩北一号、涩北二号和台南气田,其他3个气田仅占10.16%^[9]。不仅如此,同一气田不同气藏的富集程度也存在差别,表现为深部气藏富集程度高、浅部气藏富集程度低的特征。柴东生物气分布的非均匀性说明,气藏之间成藏条件及成藏模式存在差异。已有的成藏模式不能区分这种差别,对生物气勘探的帮助不大。为了揭示生物气富集的控制因素,以涩北一号气田为例,在对所含叠置气藏按生物气富集程度分类的基础上,对比分析了它们的成藏条件,并建立了相应的成藏模式,以期能为柴东及相似地区生物气勘探提供指导。

1 高、低富集生物气藏划分依据

涩北一号气田位于三湖坳陷北部斜坡带涩北背斜构造之上,已探明储量 $990.61 \times 10^8 \text{ m}^3$,是目

前该区乃至我国储量最大的生物气田。气田含气层段近1 200 m(430~1 614 m),根据储盖层“四性”特征及储层气-水关系划分为7个气藏(表1)。根据储量丰度、单储系数及试气最大日产量等参数,将其分为高富集和低富集两类气藏。

1.1 单储系数和储量丰度

天然气储量与含气面积和储层体积有关,不能客观反映气藏富气程度。储量丰度(单位含气面积的天然气储量)和单储系数(单位含气体积的天然气储量)分别消除了含气面积和储层体积的影响,是评价天然气富集程度的有效参数。由于柴东第四系具有砂、泥岩频繁交替沉积的特点,每一气藏均由多个薄储层组成。为了准确反映气藏的富气程度,储量丰度取气藏中所有储层单储系数的面积加权平均值,单储系数则用储量丰度除以储层总厚度得到(表1;图1)。

由图1a可知,储量丰度总体上随气藏深度增加而增大。浅部第一、第二气藏储量丰度均小于 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,属于低富集气藏;深部第六、第七气藏储量丰度分别为 $3.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 和 $3.31 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,属于高富集气藏;中间第三、第四、第五气藏储量丰度均在 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,其中第三和第四气藏相差较大,分别划归低富集和高富集气藏,第五气藏根据其他指标划归高富集气藏。

表1 涩北一号气藏划分及储量分布

Table 1 Gas reservoir classification and reserve distribution in the Sebei 1 gas field

气藏	盖层段深度/m	储集段深度/m	标准层	地质储量/ (10^8 m^3)	储量丰度/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	单储系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
1	400~430	430~467	k ₁	6.56	0.28	0.76
2	467~499	499~637	k ₂	58.62	0.62	0.45
3	637~654	654~933	k ₃ —k ₄	185.34	1.08	0.39
4	933~965	965~1 123	k ₅ —k ₆	253.83	1.84	1.16
5	1 123~1 157	1 157~1 200	k ₇	40.62	1.12	2.60
6	1 200~1 224	1 224~1 425	k ₈ —k ₉	377.21	3.41	1.70
7	1 428~1 437	1 437~1 614	k ₁₀ —k ₁₂	68.43	3.31	1.87

注: k₁—k₁₂为柴东第四系地震反射标准层。

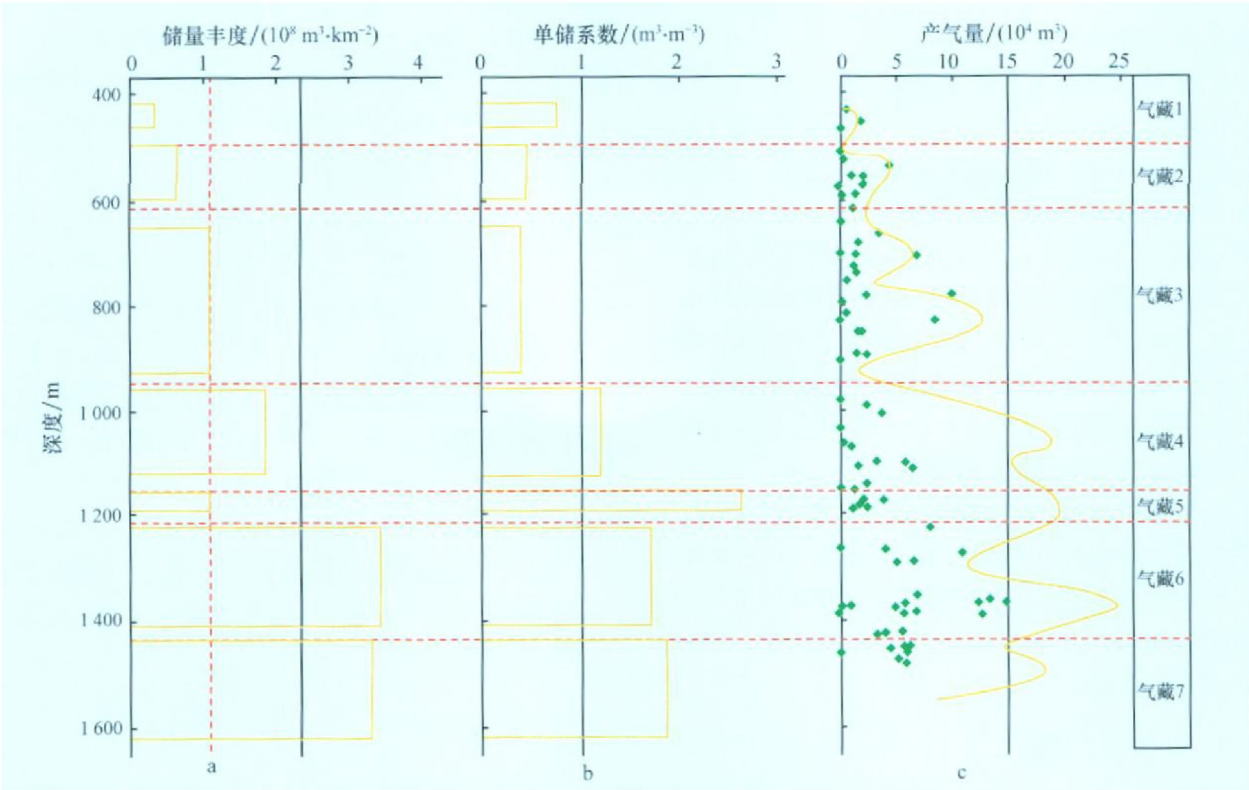


图 1 涩北一号气田各气藏储量丰度、单储系数及试气日产量对比

Fig. 1 Comparison of the reserves of per unit volume, abundance of gas reserves, and tested flow rates for reservoirs in the Seber 1 gas field

根据单储系数, 容易将 7 个气藏分为高富集和低富集两类。第一—第三气藏单储系数明显小于 $1.0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 属于低富集气藏; 第四—第七气藏单储系数均大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 应为高富集气藏(表 1; 图 1b)。

1.2 试气产量

试气产量直接反映了天然气的富集程度。涩北一号气田第一—第三气藏试气产量较小, 均小于 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 属于低富集气藏; 第四—第七气藏产量增加, 均含有产量大于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的气层, 属于高富集气藏(图 1c)。

对比储量丰度、单储系数和试气日产量, 发现三者的变化趋势具有很好的一致性。可见, 涩北一号气田明显包含两类富集程度不同的气藏: 埋深超过 950 m 的第四—第七气藏储量丰度大于 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 单储系数大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 试气最大日产量大于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 为高富集气藏; 埋深小于 950 m 的第一—第三气藏储量丰度小于 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 单储系数小于 $1.0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 试气最大日产量小于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 为低富

集气藏。

两类气藏天然气的富集程度与各自的成藏条件有关。通过两类气藏成藏条件的对比分析, 可以揭示生物气富集的控制因素, 从而更好地把握生物气的富集规律。

2 高、低富集生物气藏成藏条件对比

对于气田形成的地质条件, 前人已经做了大量论述^[1~4, 10], 这里着重分析两类气藏成藏条件的差别。

2.1 气源条件

生物气是有机质在厌氧细菌生物化学作用下矿化的终极产物^[11], 各种形式的有机质均能为细菌活动提供养料^[12]。柴东第四系发育湖相暗色泥岩和湖沼相碳质泥岩两类气源岩, 两者要么体积巨大(暗色泥岩厚约 1 000 m, 分布范围大于 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$), 要么质量好(碳质泥岩有机碳含量平均为 9.06%, 最高 18.99%)^[1, 3]。柴东第四系泥岩均能为细菌活动提供有机质, 它不是深、浅气藏气

源条件差异的决定因素。

厌氧细菌活动受环境水体温度、盐度、pH 值和 Eh 值等的影响。对普遍具有高盐度、低 Eh 值特征的第四系地层水来说,温度的适宜与否决定了细菌数量的多寡及活动强度的高低。研究表明,厌氧细菌最适宜的温度约为 35℃^[13],对应该区埋深约 950 m。浅部低温、高盐度的水体环境抑止了细菌的活动,生物气生成缓慢;埋深增加到约 950 m 时,已达到细菌强烈活动带,具有生物气大量供给的基础(图 2)^[14]。这一趋势还可以从地层中脂肪酸的分布情况得到证明^[15]。

由此可见,厌氧细菌活动强弱的差别导致两类气藏气源条件的差异。深部第四—第七气藏位于细菌强烈活动带(生气高峰带),气源条件好;浅部第一—第三气藏距离生气高峰带较远,而紧邻泥岩,生气微弱,气源条件差。

2.2 储盖组合质量

受第四纪湖盆水深频繁变化的控制,柴东第四系多发育砂、泥岩互层沉积,缺少纯的砂岩层和泥岩层。这些砂、泥过渡性地层均具有高孔、高渗的特点,在不同的构造部位或层段往往既可能成为储层也可能成为盖层。只要上、下地层存在排替压力差,生物气就可以在下部排替压力较小的地层中聚集;富集程度则取决于排替压力差的大

表 2 涩北一号气田各气藏储盖层排替压力差

Table 2 Reservoir cap displacement pressure differences of each gas reservoir in the Sebei 1 gas field

气藏	1	2	3	4	5	6	7
排替压力差/MPa	0.49	0.25	1.75	2.90	0.96	4.85	2.31

小。因此,可以利用储盖层排替压力差衡量气藏储盖组合的质量。

为了考察高、低富集气藏储盖组合的差异,利用实测数据分别建立了砂、泥岩排替压力的测井计算模型,并对各气藏储盖层的排替压力差进行了计算(表 2,模型建立及计算过程见文献[9])。由表 2 中数据可知,深部第三—第七气藏排替压力差是浅部第一—第二气藏的 2~20 倍,说明两类气藏储盖组合质量相差很大。

2.3 运移方式

藏与源位置关系的不同导致两类气藏运移方式的差异。深部气藏处于或紧邻生气高峰带,气体生成之后直接向上排出进入储层;浅部气藏与生气高峰带有气藏相隔,气源直接供给量小,主要捕集下部气藏扩散气体成藏。涩北构造紧邻中央凹陷,除本区源岩供气之外,还接受中央凹陷生物气供给^[8,14,16]。王明明等还曾提出中央凹陷生物气以溶解态运移至北部斜坡,然后析出聚集的成藏模式^[6]。与气田区相似,中央凹陷生气高峰带也位于较深部位,由于地层水具有顺层运移的特点,中央凹陷以水溶供给的气体也主要向深部气藏充注。可见,深部高富集气藏包含本区生物气垂向运移与中央凹陷生物气横向水溶运移两种方式;浅部低效气藏以下部气藏垂向扩散运移为主。

生物气组分和同位素纵向分布特征反映了两类气藏运移方式的差异。天然气在扩散过程中,由于小分子(轻同位素分子)活动性强、扩散速率大,将在前端富集^[17~20],从源到藏具有甲烷含量增加、同位素组成变轻的趋势。涩北一号气田生物气甲烷含量向上增加、碳同位素组成向上变轻,表现出气体由下至上扩散运移的特征(图 3);950 m 以下甲烷含量分布范围大、纵向变化趋势不明显,应是气源直接充注占优势的表现(图 3a)。

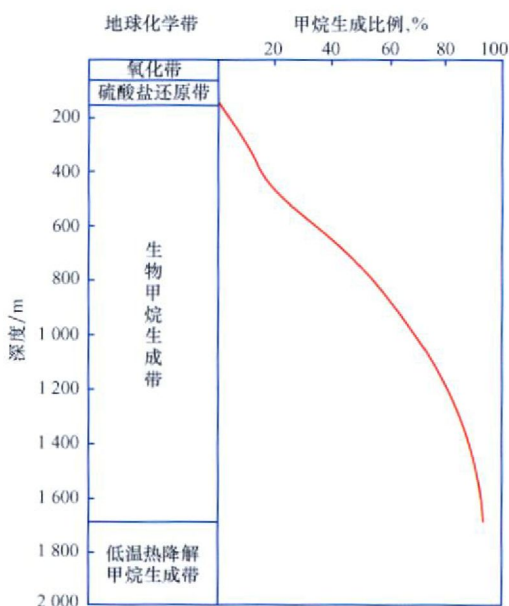


图 2 柴东生物气生成剖面^[14]

Fig. 2 Biogas generation profile in eastern Qaidam Basin^[14]

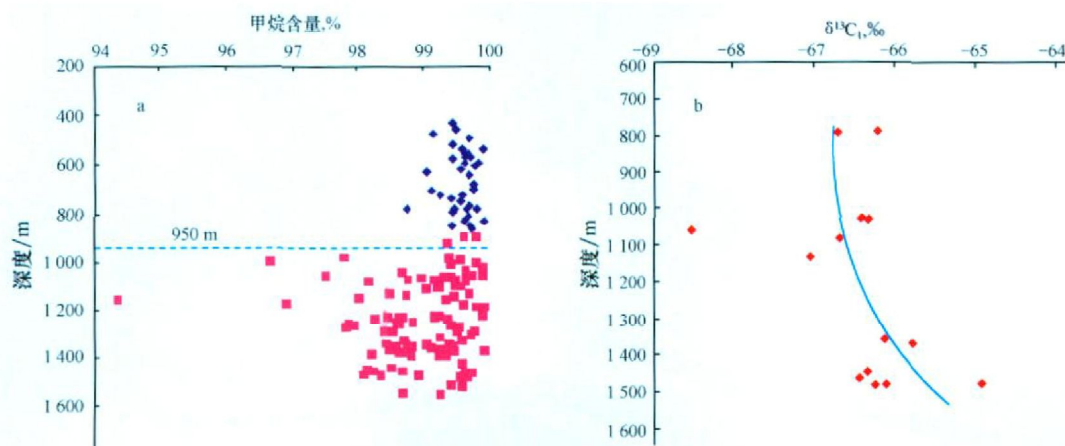


图 3 涩北一号生物气甲烷含量、碳同位素组成纵向分布

Fig. 3 Vertical distribution of methane content and carbon isotopic composition of biogas in the Seber 1 gas field

2.4 圈闭条件

涩北一号气田各气藏均为同沉积背斜圈闭, 具有顶薄翼厚、向上圈闭幅度减小的规律。就闭合高度而言, 浅部气藏圈闭条件较差。但是, 7 个气藏均处于未充满状态, 闭合高度不应是导致两类气藏圈闭好坏的原因。

由于涩北一号为同沉积背斜, 地层沉积的同时圈闭形成。当生物气大量产生时, 深部圈闭已经形成, 能够及时捕集生成的气体; 而浅部圈闭却还未形成, 聚气效果不佳。因此, 圈闭形成与生气高峰时间匹配的适当与否, 决定了两类气藏圈闭体积的好坏。

2.5 保存条件

第四纪新构造运动对深、浅气藏影响程度不同, 这是两类气藏保存条件存在差异的原因之一。涩北一号构造靠近中央凹陷, 埋藏深度相对较大, 新构造仅在浅部砂、泥岩地层形成了一些小型断裂、裂缝, 未能波及深部地层^①。因此, 浅部气藏盖层封闭能力下降, 生物气散失速率增高; 而深部气藏几乎未受影响, 保存条件良好。

深、浅部泥岩盖层阻止生物气扩散能力的高低, 是导致两类气藏保存条件差异的又一原因。扩散是天然气向外散失的最常见方式^[21], 更是第四纪疏松地层气体散失的主要途径^[22]。气体扩散速率是扩散系数与浓度梯度的函数。扩散系数与

浓度梯度大, 气体散失快, 保存条件差; 反之, 则保存好^[23]。由庞雄奇等(1999)^②的实测数据可知, 柴东泥岩盖层扩散系数具有随埋深变小的规律(图4)。从图4可知, 1 000 m 以上泥岩扩散系数随埋深急剧减小, 说明深部气藏阻止扩散能力增强。又由于深部泥岩生气速率大、含气浓度高, 在阻止气体扩散方面较浅部盖层有效。

3 高、低富集生物气藏形成模式

根据两类气藏成藏条件的差异, 特别是充注方式的不同, 将它们的成藏模式归结为气源充注和扩散充注两种(图5)。

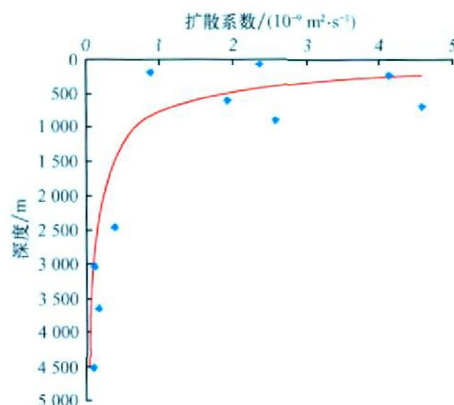


图 4 柴达木盆地泥岩中天然气扩散系数的纵向变化

Fig. 4 Vertical change of natural gas diffusion coefficient through mud rock in Qaidamu Basin

① 范连顺. 柴达木盆地东部第四系生物气成藏条件与勘探目标选择. 青海石油管理局, 1995

② 庞雄奇. 柴达木盆地天然气资源评价与有利勘探区选择. 石油大学(北京), 1999

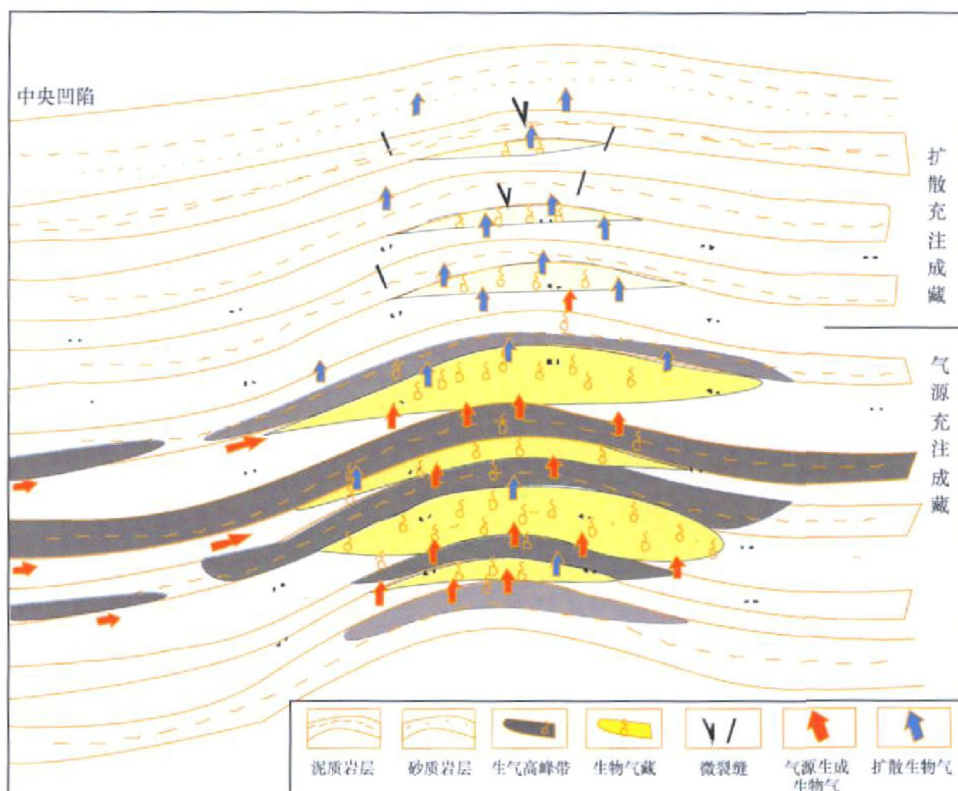


图5 涩北一号气田高、低富集生物气藏成藏模式

Fig. 5 Pooling patterns of high- and low-enrichment biogas reservoirs in the Seber 1 gas field

3.1 气源充注成藏

该类气藏埋深超过 950 m, 位于或紧邻细菌强烈活动带, 且与中央凹陷生物气生成高峰深度一致。同沉积背斜圈闭的形成与生物气大量生成时间匹配良好, 能有效捕集本区生成与横向运移来的生物气。结构疏松的砂岩、粉细砂岩储层为生物气提供充足的储集空间, 上覆泥岩、粉砂质泥岩盖层较大的排替压力有效地阻止了气体的渗漏。气藏形成以后未受构造运动的影响, 有利于生物气保存; 泥岩生成气体对生物气扩散的烃浓度封闭作用, 减缓了生物气的扩散散失。气藏目前仍处于生物气充注的有利位置, 散失气体能够及时得到补偿。除涩北气田 900~1 000 m 以下的第四—第七气藏之外, 该区涩北二号及台南气田深部气藏也以这一模式形成。

3.2 扩散充注成藏

该类气藏埋深小于 950 m, 生物气开始大量生成时圈闭有效性尚差, 且与生物气生成高峰带相隔, 来自源岩的生物气难以直接注入, 主要捕集下伏气藏扩散逸失的气体成藏。由于盖层疏松, 生物气易于扩散散失; 微断层、微裂缝的存在, 加剧了生

物气的漏失。又因下伏扩散及浅部泥岩自身生成生物气补充有限, 气藏入不敷出, 规模逐渐减小。除涩北一号气田第一—第三气藏之外, 涩北二号和台南浅部, 以及盐湖、驼峰山气田均为这类气藏。

4 结论

1) 涩北一号不同气藏富气程度相差很大。根据单储系数、储量丰度和试气最大日产量, 将其分为深部高富集与浅部低富集气藏两类, 两者之间的界线约在 950 m 深度处。

2) 成藏条件的优劣导致两类气藏含气丰度的高低。深部高效气藏气源、储盖组合、圈闭、运移及保存条件优于浅部低效气藏, 这是深部气藏富气而浅部气藏贫气的原因。

3) 根据两类气藏的成藏条件, 提出了相应的成藏模式, 即气源充注成藏模式和扩散充注成藏模式, 分别对应于深部高富集和浅部低富集气藏。

致谢: 研究过程中受到青海油田勘探开发研究院天然气勘探室的谭彦虎、徐子远主任, 以及姜桂凤、侯泽生等同志的大力帮助, 在此致以衷心感谢!

(下转第 25 页)

- 24 Burruss R C. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions[J]. SEPM Short Course, 1991, 25 (1): 1- 7
- 25 Burruss R C. Hydrocarbon fluid inclusions in studies of sedimentary diagenesis[A]. In: Hollister L S, Crawford M L, eds. Fluid inclusions: applications to petrology[C]. Mineralogical Association of Canada Short Course Notes, 1981. 138-156
- 26 Parnell J, Chen Honghan. Application of fluid inclusion studies to understanding oil charge, pre-salt succession, offshore Angola[J]. Geological Society of London, Special Publications, 2003, 207: 275- 283
- 27 李纯泉, 陈红汉, 张希明, 等. 塔河油田奥陶系储层流体包裹体研究[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 42~ 46
- 28 冯乔, 马硕鹏, 樊爱萍. 鄂尔多斯盆地上古生界储层流体包裹体特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 28 ~ 32
- 29 李兆奇, 陈红汉, 刘惠民, 等. 流体包裹体多参数综合划分东营凹陷沙三段油气充注期次及充注时期确定[J]. 地质科技情报, 2008, 27(4): 69~ 74
- 30 李明诚. 石油与天然气运移研究综述[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 3~ 9
- 31 陈中红, 查明. 断陷湖盆超压封存箱形成机理与油气成藏机制——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 50~ 64
- 32 陈中红, 查明, 金强. 东营凹陷超压系统的幕式排烃[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 444~ 454
- 33 刘晓峰, 解习农. 东营凹陷流体压力系统研究[J]. 地球科学, 2003, 28(1): 78~ 86
- 34 郑和荣, 黄永玲, 冯有良. 东营凹陷下第三系地层异常高压体系及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 67~ 70

(编辑 董立)

(上接第 16 页)

参 考 文 献

- 1 周翥虹, 周瑞年, 管志强. 柴达木盆地东部第四系气源岩地化特征与生物气前景[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(2): 30~ 37
- 2 顾树松. 柴达木第四系生物气藏的形成与模式[J]. 天然气工业, 1996, 16(5): 5~ 9
- 3 管志强, 徐子远, 周瑞年, 等. 柴达木盆地第四系生物气的成藏条件及控制因素[J]. 天然气工业, 2001, 21(6): 1~ 5
- 4 党玉琪, 侯泽生, 徐子远, 等. 柴达木盆地生物气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2003, 25(5): 374~ 378
- 5 戚厚发, 关德师, 钱贻伯. 中国生物气成藏条件[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 1~ 268
- 6 王明明, 李本亮, 魏国齐, 等. 柴达木盆地东部第四纪水文地质条件与生物气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 341~ 345
- 7 徐志远, 姜桂凤, 韩凤祥. 柴达木盆地生物气资源现状与勘探方向[A]. 张一伟, 党玉琪, 熊继辉, 等编. 柴达木盆地油气勘探论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2004. 197~ 203
- 8 梁全胜, 刘震, 常迈, 等. 柴达木盆地三湖坳陷浅层生物气成藏模式分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(3): 36~ 39
- 9 程付启, 金强, 林会喜, 等. 柴达木盆地三湖地区储盖组合有效性对生物气富集的控制作用[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 333~ 346
- 10 张祥, 纪宗兰, 杨银山, 等. 试论柴达木盆地第四系盖层的封盖机理[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 383~ 386
- 11 张水昌, 赵文智, 李先奇, 等. 生物气研究新进展与勘探策略[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 90~ 96
- 12 关德师. 甲烷菌的生存条件与生物气[J]. 天然气工业, 1990, 10(5): 13~ 19
- 13 王庭斌. 中国大中型气田成藏的主控因素及勘探领域[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 572~ 583
- 14 魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成机理、分布规律与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84~ 89
- 15 康宴, 王万春, 张道伟, 等. 柴达木盆地第四系脂肪酸分布特征与生气潜力的关系[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 778~ 785
- 16 张晓宝, 徐自远, 段毅, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气的形成途径与运聚方式[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 168~ 174
- 17 Prinzhofer A, Huc A. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionation in natural gas[J]. Chemical Geology, 1995, 126: 281~ 290
- 18 Snowden L R. Natural gas composition in a geological environment and the implications for the processes of generation and preservation[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32: 913~ 931
- 19 李剑, 刘朝露, 李志生, 等. 天然气组分及其同位素扩散作用模拟实验研究[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 463~ 468
- 20 史基安, 卢龙飞, 王金鹏, 等. 天然气运移物理模拟实验及其结果[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 32~ 34
- 21 程付启, 金强. 成藏后天然气组分与同位素的分馏效应研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 522~ 525
- 22 Leythaeuser D. Diffusion of light hydrocarbons through near-surface rocks[J]. Nature, 1980, 284(4): 522~ 525
- 23 Krooss B M, Leythaeuser D, Schaefer R G. The quantification of diffusive hydrocarbon losses through cap rocks of natural gas reservoirs—a reevaluation[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(3): 403~ 406

(编辑 李军)