

文章编号: 1001-6112(2009)04-0403-06

油气藏上方吸附丝指标异常模式及成因分析

——以塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏为例

蒋涛¹, 汤玉平¹, 吴传芝¹, 张恒启²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;

2. 安徽省地质矿产勘查局 地质实验研究所, 合肥 230001)

摘要:分析了塔里木盆地英吉苏凹陷英南 2 井侏罗系气藏特殊的封闭成藏特征及其不同的油气微渗漏方式, 并对测区吸附丝轻烃指标(C₂₋₈)、重烃指标(C₁₅₋₁₉)地球化学场特征进行了研究, 发现该气藏上方二指标的地球化学场特征、异常模式等均存在显著差异。研究认为: 该气藏致密砂岩的水锁效应、气藏轻物质微渗漏方式(扩散、渗透)等因素是引起上述差异的根源; 气体游离扩散相重烃物质扩散散失是气藏区上方 C₁₅₋₁₉ 指标异常的成因, 重烃物质局部扩散系数从构造顶部高值区到构造翼部低值区的变化趋势是气藏区上方 C₁₅₋₁₉ 指标曲线倒“V”状特征的形成原因; 未发生水锁效应气藏边缘区轻烃物质的渗透散失强于发生水锁效应气藏区轻烃物质的扩散散失, 是研究区 C₂₋₈ 指标剖面曲线“驼峰”状特征的成因。应用该气藏上方吸附丝二指标的异常模式及组合关系对孔雀 1 井的钻前预测得到了后期勘探成果的有效验证, 其对孔雀河古斜坡区、英吉苏致密砂岩区的油气勘探也具有借鉴意义。

关键词:气藏; 吸附丝; 指标; 异常模式; 地球化学勘探; 侏罗系; 英吉苏凹陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE132.4

文献标识码: A

ANOMALY PATTERN ORIGINS OF THE WIRE-ADSORBED HYDROCARBON INDICATORS

—OVER THE JURASSIC GAS RESERVOIR OF WELL YINGNAN 2 IN THE TARIM BASIN

Jiang Tao¹, Tang Yuping¹, Wu Chuanzhi¹, Zhang Hengqi²

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 2. Institute of Geological Experiment, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Anhui Province, Hefei, Anhui 230001, China)

Abstract: A research on the causes of the anomaly patterns of the wire-adsorbed geochemical indicators over the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Yingjishu Sag of the Tarim Basin has been conducted. The knowledge was gained that the water lock effect provides the favorable trapping and accumulation conditions for this gas reservoir, and the hydrocarbon gases within the reservoir can migrate upward through different ways (such as diffusion and permeation). The Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 was chosen to conduct the research of the geochemical field characteristics and the anomaly patterns of the light wire-adsorbed hydrocarbon (C₂₋₈) and the heavy wire-adsorbed hydrocarbon (C₁₅₋₁₉) indicators. It is found that both the characteristics of the geochemical field and the anomaly patterns of the 2 kinds of indicators differ obviously from each other. The analysis results indicate that the water lock effect of the tight sandstones and the microseepage and diffusion ways of the hydrocarbons are the root causes of these differences; and the diffusion rate of the light hydrocarbons within the water-locked sandstone area in the gas reservoir is less than that within the area without water lock effect in the edge of the gas reservoir, which causes the high anomaly values of the light wire-adsorbed hydrocarbons (C₂₋₈) in the edge of the gas reservoir and the sub-high anomaly values of these hydrocarbons in the gas reservoir area. The study also indicates that the low-content of heavy hydrocarbons in the gas reservoir and the local diffusion coefficient of the reservoir hydrocarbon gases are the geological causes of the high value anomaly of the heavy wire-adsorbed hydrocarbon indicators (C₁₅₋₁₉) over the top of the this gas reservoir.

Key words: gas reservoir; adsorbent wire; indicator; anomaly pattern; geochemical exploration; Jurassic; Yingjishu Sag; Tarim Basin

收稿日期: 2008-08-26; 修订日期: 2009-06-26。

作者简介: 蒋涛(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事油气化探科研与生产研究。E-mail: tj05hf@163.com。

基金项目: 中国石化股份公司科研项目(P03073)。

地表烃类气体赋存方式大致可分为 4 类:游离态、吸附态、溶解态、气液包体。考虑到近地表土壤介质因素对酸解烃等土壤烃类化探指标检测的干扰^[1],一些学者与专家依据美国科罗拉多矿业学院的 Klusman 及 Voorhess 研制的累积并鉴定微量气相物质的 K-V 指纹技术,开发了“色谱-质谱”微量烃类检测的直接找油气方法(K-V 指纹法,又称吸附丝法),以石油烃类化合物作为直接找油气指标^[2],利用具有吸附性的物质富集深部油气藏垂向微运移至近地表并以游离态形式存在于土壤气中的烃物质,然后进行样品测试^[3]。

油气化探在多个领域里取得的积极进展均表明,近地表有效化探指标异常与油气藏微渗漏间存在着成因联系^[4~6]。本文选择塔里木盆地英吉苏凹陷英南 2 井侏罗系气藏为研究区,结合该气藏的相关地质认识以及不同的油气微渗漏方式,对区内吸附丝轻烃指标(C₂₋₈)、重烃指标(C₁₅₋₁₉)进行了地球化学场特征描述和异常模式探讨。

1 英南 2 井侏罗系气藏概况

1.1 区域地质概况

英吉苏凹陷位于塔里木盆地东部,西部与满加尔凹陷相接,西北方向为孔雀河斜坡,东北方向过渡至罗布泊凹陷(图 1),面积约 3.14 × 10⁴ km²。英吉苏凹陷是发育于下古生界剥蚀地貌背景上的中、新生代断拗盆地,凹陷内的地层主要由 3 部分构成:古生界、中生界和新生界。中生界侏罗系是本区油气勘探的主要目的层,岩性为灰色、灰紫色

细砂岩、中砂岩和灰绿色粉砂岩。

塔东地区已完钻探井中,英南 1、华英参 1、英南 2、龙口 1 井在侏罗系和志留系见到良好的油气显示。华英参 1 井在侏罗系获得低产油流;龙口 1 井在志留系完井测试中获工业油气流;英南 2 井在中途测试中获得高产工业油气流;充分说明该地区具有良好的勘探前景^[7]。

1.2 英南 2 井侏罗系气藏成藏特征

英南 2 井侏罗系气藏圈闭面积 60 km²,幅度 420 m,产气井段为侏罗系 3 624~3 700 m(图 2)。该井录井资料显示:侏罗系至其气藏之上均为细砂岩、中砂岩和粗砂岩,没有厚层泥质或膏盐岩盖层,且在气层之上的 3 317.31~3 373.00 m 的井段日产水 36.57 m³。

英南 2 井侏罗系气藏的成藏要素和封盖条件显示其具有“深盆地气藏”圈闭特征。关于“深盆地气藏”的认识和研究,许多学者均提出了自己的观点,也取得了一定的进展^[8~11]。Leythaeuser 等^[9]根据天然气的扩散作用,提出动态平衡的深盆地气藏圈闭性质;金之钧等强调动力学平衡作用是深盆地气藏形成的主导因素^[10];Brown(1984)认为毛细管压力是深盆气的封闭机理,当储集层中存在 2 种不相溶混合流体时,一种流体对另外一种流体能力的影响,使其渗流能力降低,当这种流体是水时,称之为水锁现象。

杨晓宁等^[12,13]认为水锁效应是英南 2 井侏罗系气藏圈闭成藏机理。英南 2 井致密砂岩水锁试验数据展示了该气藏具备水锁效应的形成条件(表 1)^[12]。

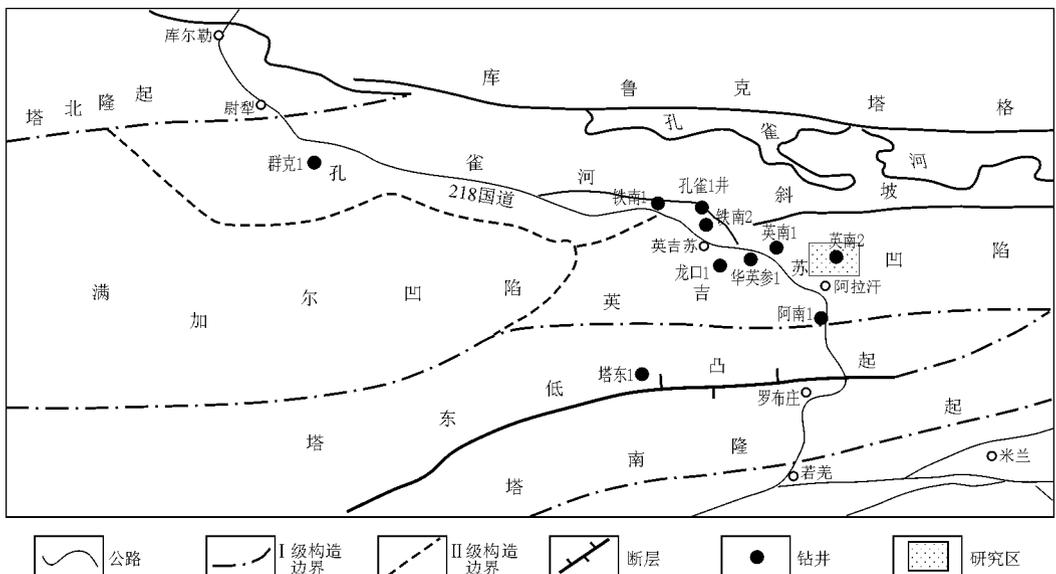


图 1 研究区构造单元及位置示意

Fig. 1 Schematic diagram showing the location of the study area

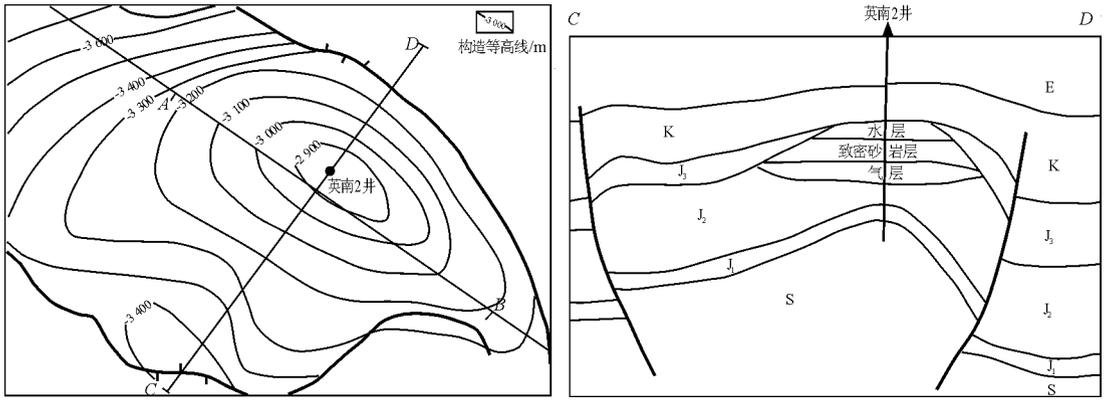


图 2 塔里木盆地英南 2 井气藏圈闭及剖面示意

Fig. 2 Schematic diagram showing the trap and the profile of the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Tarim Basin

表 1 塔里木盆地英南 2 井致密砂岩水锁试验数据^[12]

Table 1 Water lock experimental data of the tight sandstone in the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Tarim Basin

样品深度/ m	干样渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	不同含水饱和度时的气体渗透率				驱替压 力梯度 ($\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1}$)
		含水 饱和度, %	渗透率/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	含水 饱和度, %	渗透率/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	
3 410.99	0.053	64.1	0.038 2	77.9	0.005 21	1.372
3 486.05	0.076	63.4	0.076 3	78.0	0.008 25	1.394
3 487.50	0.066	61.4	0.086 2	81.8	0.011 70	1.361
3 491.50	0.044	66.9	0.022 7	81.4	0.002 99	1.182
3 509.87	0.127	55.2	0.165 0	78.4	0.033 20	1.333
3 512.12	0.072	63.5	0.098 5	75.0	0.014 00	1.351

致密砂岩含水饱和度达到 60% 以上时(英南 2 井 3 408~3 550 m 井段致密砂岩,测井解释含水饱和度均在 80% 以上),其渗透率较不含水致密砂岩下降 3 个数量级以上,渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,排驱压力均大于 1.182 MPa/cm。因此,该致密砂岩层发生水锁效应后,当其厚度达到 50 m 以上时即可成为封住气藏的良好盖层。

1.3 英南 2 井侏罗系气藏烃物质微渗漏方式

油气藏上方沉积物内存在微量轻烃及其间接产物,实际上是在漫长地质历史中,地下烃类通过多种方式向上运移而形成的。油气藏中的烃类物质向上运移存在多种方式,其中扩散运移和脉冲式渗透是重要的运移方式^[14]。

英南 2 井气藏的天然气从生油层向上运移进入气藏圈闭及后期扩散经历了气体连续相、气体隔离相、气体游离扩散相 3 个过程^[13]。气藏纵向上具有气、水倒置形成的动力学平衡作用,气体游离扩散相中烃类物质的扩散散失与下方溶解石油气的扩散补充始终处于一个动态的烃物质运移过程;而在气藏边缘未能发生水锁效应的致密砂岩区域,具备脉冲式渗透运移条件的气藏烃物质则可进行渗透散失。

2 吸附丝指标地球化学场特征

2.1 吸附丝指标地球化学空间场特征

吸附丝指标的空间展布规律即为它们的地球化学空间场特征。研究区 C_{2-8} 、 C_{15-19} 指标剖面显示二指标剖面曲线特征差异显著(图 3), C_{15-19} 指标在气藏范围内(AB 点间)存在明显高值曲线; C_{2-8} 指标在气藏范围内与远离气藏范围区之间的过渡区存在明显高值曲线。因此,依据二指标高值异常区的空间分布规律及二指标间搭配关系的认识,结合英南 2 井气藏范围、吸附丝样品点与气藏范围距离的远近关系,将研究区大致划分为气藏区、气藏边缘区、背景区(图 3)。

2.2 吸附丝指标地球化学浓度场特征

平均值可反映整体数据的集中性和聚集中心,揭示数据分布的整体趋势,由不同区域吸附丝指标均值的定量化对比,可认识该指标地球化学浓度场特征及其整体趋势的“高”值分布区,并由此探讨和追溯该指标“高”值分布区形成的地质原因。

研究区吸附丝指标地球化学浓度场特征(表 2、图 4): C_{2-8} 指标在气藏边缘区呈明显高均值,在气藏区呈现高于背景区的次高均值特征; C_{15-19} 指

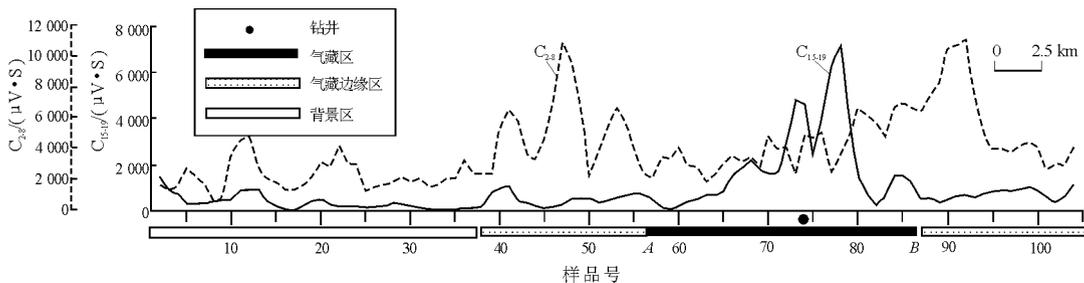


图 3 塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏上方吸附丝指标剖面
剖面位置见图 2。

Fig. 3 Profile of the wire-adsorbed hydrocarbon indicators over the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Tarim Basin

表 2 塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏不同区域吸附丝指标均值

Table 2 Mean values of the wire-adsorbed hydrocarbon indicators in different areas of the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Tarim Basin

气藏分区	样品号	样品数/ 个	C ₂₋₈ 指标特征		C ₁₅₋₁₉ 指标特征	
			均值/(μV·S)	特征	均值/(μV·S)	特征
背景区	1~38	38	2 273.70	低	401.63	低
气藏边缘区	39~57, 89~105	36	5 380.94	高	666.03	次高
气藏区	58~88	31	4 173.50	次高	1 899.84	高

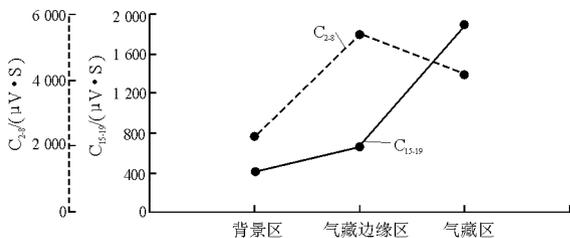


图 4 塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏不同区域吸附丝指标均值对比

Fig. 4 Comparison of the mean values of the wire-adsorbed hydrocarbon indicators in different areas of the Jurassic gas reservoir of Well Yingnan 2 in the Tarim Basin

标在气藏区呈现明显高均值,在气藏边缘区均呈现略微高于背景区的次高均值特征。

综上所述,研究区 C₂₋₈、C₁₅₋₁₉ 指标地球化学浓度场特征与它们的地球化学空间场特征是一致的,前者对二指标地球化学场总体特征的描述更直观、更清晰,二者从不同角度说明了二指标地球化学场特征存在显著差异。

3 气藏上方吸附丝指标异常模式成因及研究意义

英南 2 井在 3 626.02~3 667.56 m 井段进行的 2 次相邻的油气测试中,一次获得折日产气 144 781 m³ 的气流,一次获得折日产气 69 568 m³、油 4.72 m³ 的商业油气流^[15]。2 次油气测试结果表明,英南 2 井气藏有低含量的重烃物质。

3.1 气藏上方吸附丝化探指标异常模式

气藏上方 C₂₋₈、C₁₅₋₁₉ 指标异常模式差异明显。C₁₅₋₁₉ 指标异常模式为:该指标异常曲线呈倒“V”状形态特征分布于气藏区上方,在气藏边缘区、背景区的差别不明显(图 3);C₂₋₈ 指标异常模式为:该指标剖面曲线呈“驼峰”状形态特征,气藏边缘区为指标高均值异常区(“驼峰”),气藏区为次高均值异常区。

3.2 气藏上方 C₁₅₋₁₉ 指标异常模式成因

英南 2 井气藏区水锁效应致密砂岩气体游离扩散相中存在轻烃组分、重烃组分的扩散散失作用,从而形成气藏区 C₂₋₈、C₁₅₋₁₉ 指标含量均值高于背景区各指标含量均值的特征。虽然英南 2 井气藏边缘区致密砂岩不存在水锁效应,但该气藏中低含量重烃组分因其不具备渗透散失的物质基础,因而它的高值异常区是气藏区。

Liu 将自由体积与扩散自由能整合到一起提出的扩散模型,包含有局部范围内所特有的特殊扩散系数,并称之为局部扩散系数^[16],即:

$$D_{loc} = D' \left(\frac{\pi k_B T}{m} \right)^{1/2} \nu_{loc} \exp\left(-\frac{\epsilon}{k_B T}\right)$$

式中: D_{loc} 为局部扩散系数; D' 为扩散因子,与分子性质有关; k_B 为 Boltzmann 常数; m 为分子质量; T 为温度; ν_{loc} 为局部自由体积; ε 为分子局部势能。

局部扩散的存在依赖于 2 个独立假设: ① 扩散分子获得的能量必须大于临界局部自由能 ε*, 以

摆脱相邻分子力场的约束;②扩散分子周围自由空间必须大于分子局部临界体积 ν^* 。

气藏区气体游离扩散相中的重烃物质含量低,质量大,体积大,因而,它所处位置的局部扩散系数(D_{loc})对它自身的扩散作用影响甚大。①不同构造部位的各种作用力影响到重烃物质的 D' ,在浮力作用、分子力扩散作用的双重力的作用下,重烃物质必然向构造顶部区域运移,因此,构造顶部区域重烃物质 D' 较其它地区的大;②不同构造部位微裂隙发育影响到 ν_{loc} ,构造轴部存在的局部应力场使得这些区域的微裂隙较其翼部更加发育,英南2井地质资料^[19]显示:该气藏构造顶部与气藏构造轴部处于同一区域,因而构造顶部区域重烃物质 ν_{loc} 较其它地区的大;③不同构造位置影响到重烃物质临界局部自由能(ϵ^*),构造顶部区域的重烃物质扩散需要克服的 ϵ^* 小于其它地区的 ϵ^* ,因而该处的重烃物质需要较小的 ϵ^* 就可发生扩散散失作用。

综上所述,英南2井气藏气体游离扩散相中重烃物质在气藏构造顶部区存在局部扩散系数(D_{loc})高值区,这类似于在气藏区安装了重烃物质扩散散失的“抽吸泵”,而“抽吸泵”的“泵口”在气藏构造顶部区;其次,重烃物质在气藏构造翼部区存在局部扩散系数(D_{loc})低值区,因此,气藏区气体游离扩散相重烃物质局部扩散系数存在从构造顶部高值区到构造翼部低值区的变化趋势,而这种重烃物质局部扩散系数由大到小的变化趋势是形成气藏区上方 C_{15-19} 指标曲线倒“V”状特征的原因(图3)。

3.3 气藏上方 C_{2-8} 指标异常模式成因

扩散系数与分子表面积成反比^[16],轻烃物质较重烃物质的质量和表面积小,轻烃物质的扩散系数大于重烃物质;轻烃物质较重烃物质的扩散自由能大;轻烃物质在水锁效应情况下,动力学平衡作用使得气体游离扩散相中高含量轻烃物质可以均匀分布。因此,相比于重烃物质,轻烃物质的扩散速度更“快”也更“均匀”。由于轻烃物质在气藏区不同构造部位上的 D' , ν_{loc} , ϵ^* 等参数值的差异小,即不同构造部位轻烃物质局部扩散系数(D_{loc})差值小,因而,气藏区上方 C_{2-8} 指标曲线波动较 C_{15-19} 指标曲线波动要平缓的多(图3)。

英南2井气藏边缘区致密砂岩水锁效应消失,因而具备脉冲式渗透条件的气藏轻烃组分可在气藏边缘区发生渗透散失,而气藏区轻烃组分仅能通过水锁效应致密砂岩气体游离扩散相发生扩散散失。由于轻烃组分渗透散失效率高于其扩散散失效

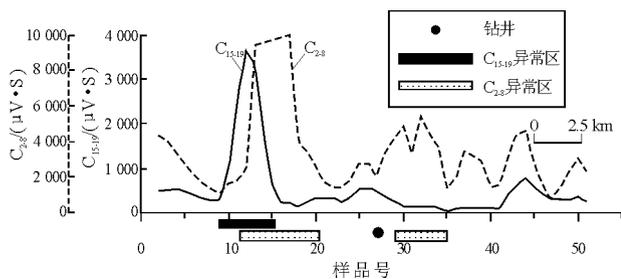


图5 塔里木盆地孔雀1井上方吸附丝 C_{2-8} 、 C_{15-19} 指标异常剖面^[18]

Fig. 5 Anomaly profiles of the wire-adsorbed hydrocarbon indicators over Well Kongque 1 in the Tarim Basin

率,因此,气藏边缘区轻烃组分渗透通量高于气藏区轻烃组分扩散通量,并由此形成了气藏上方 C_{2-8} 指标剖面曲线的“驼峰”形态特征,气藏边缘区为 C_{2-8} 指标的高值异常区(“驼峰”),气藏区仅为次高值异常区。

3.4 气藏上方吸附丝指标异常模式的研究意义

应用英南2井气藏上方 C_{2-8} 、 C_{15-19} 指标异常模式及它们的匹配关系,对孔雀1井进行了钻前预测,并得到了后期勘探成果的有效验证(图5)^[17,18]。依据英南2井气藏上方 C_{15-19} 指标异常模式、 C_{15-19} 指标异常区与孔雀1井的位置关系判断,该井不大可能找到油;依据英南2井气藏上方 C_{2-8} 指标异常模式,结合孔雀1井与其上方 C_{2-8} 指标异常区(“驼峰”)的位置关系推断,该井可能见到气。后期孔雀1井确实钻遇到了气层(工业测试为4 000 m³/d,但无油层或凝析油层)。因此,该区勘探结果验证了二吸附丝指标异常模式组合关系对孔雀1井的钻前预测^[18]。

综上所述,依据英南2井气藏上方 C_{2-8} 、 C_{15-19} 指标异常模式及其异常配置关系,结合塔里木盆地孔雀河古斜坡成藏条件^[23]和英吉苏致密砂岩盖层形成机理^[19]等相关地质新认识,可对孔雀河古斜坡区和英吉苏致密砂岩区^[20]进行油气有利聚集区的勘探评价。

4 结论

1)英南2井气藏中低含量重烃物质组分仅通过水锁效应致密砂岩气体扩散相进行扩散散失,这是吸附丝重烃指标(C_{15-19})高值异常存在于气藏区上方的地质原因; C_{15-19} 指标剖面曲线在气藏边缘区、背景区的差别不明显。重烃物质局部扩散系数由构造顶部高值区到构造翼部低值区的变化趋势是 C_{15-19} 指标异常曲线在气藏区上方出现倒“V”状特征的原因。

2) 英南 2 井气藏轻烃组分可通过水锁效应致密砂岩的气体扩散相进行扩散散失,也可在未发生水锁效应的致密砂岩气藏边缘区进行渗透散失;气藏边缘区的渗透散失强于气藏区的扩散散失,这种轻烃组分微渗漏差异是气藏上方吸附丝轻烃指标(C₂₋₈)剖面曲线“驼峰”形态特征的形成原因,气藏边缘区是 C₂₋₈ 指标的高值异常区(“驼峰”),而气藏区是 C₂₋₈ 指标的次高值异常区。

3) 英南 2 井气藏上方二吸附丝指标异常模式及配置关系对孔雀 1 井的钻前预测得到了后期勘探结果的有效验证,对英吉苏致密砂岩区和孔雀河古斜坡区的油气勘探亦具有借鉴意义。

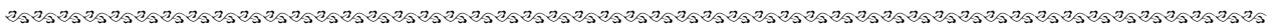
致谢:本文写作过程中,得到了赵克斌教授、程同锦教授的指导和支 持,在此表示感谢。

参考文献:

1 程同锦,李广之,陈银节. 吸附烃提取新技术及其在地表油气化探中的应用[J]. 石油实验地质,2007,29(2):116~119
 2 侯镜德,张逢玉,冯建跃. 吸附丝法研究油气垂直运移理论[J]. 化学学报,1994,52:1194~1198
 3 阮天健,费琪. 石油与天然气地球化学勘探[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992. 46~52,67~83
 4 蒋涛,夏响华,陈浙春. 地球化学烃场效应的探讨及应用[J]. 石油实验地质,2003,25(3):290~294
 5 蒋涛,陈银节,赵克斌等. 已知油气藏上方油气化探指标的有效性分析[J]. 石油实验地质,2008,30(2):207~211
 6 李红梅,夏斌,程军等. 东营凹陷花沟地区 CO₂ 气藏化探指标综合评价[J]. 油气地质与采收率,2007,14(1):44~46

7 杨永才,常象春,张枝焕等. 英吉苏凹陷天然气地球化学特征[J]. 天然气工业,2006,26(8):12~15
 8 Masters J A. Deep basin gas trap[J]. AAPG Bulletin,1979,63(2):152~181
 9 Leythaeuser D. Schaefer R G. Yukler A. Role of diffusion in Primary migration of hydrocarbon[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(4):408~429
 10 金之钧,张金川,王志欣. 深盆地成藏关键地质问题[J]. 地质论评,2003,49(4):400~407
 11 张金亮,张金功. 深盆地气藏的主要特征及形成机制[J]. 西安石油学院学报,2001,16(1):1~7
 12 杨晓宁,张惠良,朱国华. 致密砂岩的形成机制及其地质意义[J]. 海相油气地质,2005,10(1):31~36
 13 杨晓宁,王国林,张丽娟等. 塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏性质[J]. 新疆石油地质,2003,24(3):218~220
 14 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment[J]. AAPG Bulletin,1990, 74(1):1~12
 15 刘玉魁,胡剑风,闵磊等. 塔里木盆地英吉苏凹陷成藏机理分析[J]. 天然气工业,2004,24(10):6~9
 16 尹小勇,宋海华. 基于扩散热能和自由体积的扩散模型[J]. 天津大学学报,2006.39(10):1157~1161
 17 蒋涛,吴瑞金,程同锦等. 化探技术在我国西部油气勘探中的应用探讨[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):117~120
 18 蒋涛,汤玉平,程同锦. 塔北某区油气藏上方吸附丝指标异常模式研究[J]. 天然气工业,2003(增刊):32~34.
 19 杨铭,汤达祯,邢卫新等. 塔里木盆地孔雀河古斜坡成藏条件新认识[J]. 石油实验地质,2007,29(3):275~279
 20 张丽娟,顾乔元,邸宏利等. 英吉苏地区致密砂岩盖层形成机理及其分布预测[J]. 中国石油勘探,2003,8(4):24~28

(编辑 徐文明)



(上接第 402 页)

4 蒋启贵,张彩明,张美珍等. 岩石 C₆-C₁₅ 轻烃定量分析方法研究[J]. 石油实验地质,2007,29(5):512~516
 5 许怀先,陈丽华,万玉金等. 石油地质实验测试技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001. 43~62
 6 Radke M, Welte D H, Wilisch H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. Geochimica et

Cosmochimica Acta,1982,46(1):1~10
 7 包建平,王铁冠,周玉琦等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. 江汉石油学院学报,1992,14(4):8~13
 8 张渠,宋晓莹,张志荣. 原油中甾烷的生物降解模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2007,29(1):99~102
 9 彼得斯 K E,莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南[M]. 北京:石油工业出版社,1995. 156~165

(编辑 徐文明)