

油气优势运移通道形成“三要素”分析

——以苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油田为例

李鹤永¹, 田 坤¹, 邱旭明¹, 刘启东¹, 刘 震², 宋丽艳¹

(1. 中国石化 江苏油田分公司, 江苏 扬州 225012;

2. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要: 油气优势运移通道研究是勘探目标评价的重要内容, 其形成主要受输导层的非均质性、通道产状和运移动力 3 种“要素”控制。结合计算分析和针对苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油田的油气运移模拟实验, 进一步论述了油气优势运移通道形成中“三要素”的作用机理。“三要素”中“动力”要素是核心, 控制着油气运移的趋势和方向; “产状”要素对“动力”要素起约束作用; “非均质性”要素决定着油气能否运移以及运移速度。油气优势运移通道实际上是“三要素”综合作用的结果。

关键词: 非均质性; 通道产状; 流体动力; 优势运移通道; 高邮凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Three factors controlling petroleum migration pathways:

A case study of XJZ oilfield in the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

Li Heyong¹, Tian Kun¹, Qiu Xuming¹, Liu Qidong¹, Liu Zhen², Song Liyan¹

(1. SINOPEC Jiangsu Oilfield Branch Company, Yangzhou, Jiangsu 225012, China; 2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The analysis of prevailing petroleum migration pathways can help evaluate petroleum exploration targets. Three factors control migration pathways, including the heterogeneity of carrier beds, the attitude of migration pathways and fluid dynamic force. A case study was made in the XJZ oilfield in the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin, to consider the controlling effects on petroleum migration pathways. Fluid dynamic force plays a core role and controls the direction of petroleum migration. The attitude of pathways constrains fluid dynamic force. The heterogeneity of carrier beds determines whether petroleum can migrate and the velocity of migration. Petroleum migration pathways are determined by the interaction of three factors.

Key words: heterogeneity; attitude of migration pathways; fluid dynamic force; prevail petroleum migration pathways; Gaoyou Sag; North Jiangsu Basin

油气优势运移通道是地下油气在非均质输导层(储层、断层或不整合面等)内运移过程中优先选择的路径通道。国内外大量数值和实验模拟等研究^[1-20]均表明, 油气二次运移主要集中于输导层内的有限优势通道中进行, 油气藏分布受优势运移通道控制作用明显^[1], 因此优势运移通道研究对于评价有利勘探区带和目标至关重要。

目前关于油气优势运移通道的研究, 注重单一因素、强调通道本身条件的较多, 综合分析较少。实际上, 形成优势运移通道的主体并非通道本身, 而是其中的油气。优势运移通道是输导层中的油气

在多种外界条件推动和约束下最终形成的运移路径。因此在讨论优势运移通道时, 如只考虑通道本身的因素, 只会得出片面的结论。

笔者在前人研究的基础上, 归纳并总结了控制油气优势运移通道形成的 3 个基本要素。并以流体为核心, 综合分析油气运移通道的形成, 通过以典型油藏为原型设计并展开模拟实验研究, 求证了分析结果。

1 优势运移通道形成主控因素

研究油气优势运移通道, 关键是主控因素的确

收稿日期: 2016-04-14; 修订日期: 2016-07-12。

作者简介: 李鹤永(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 从事石油地质研究。E-mail: liheyong@163.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司项目“苏北盆地构造体系、演化与成藏研究”(P15077)和江苏油田分公司项目“汉留断裂带油气富集规律研究及圈闭评价”(JS14001)联合资助。

表 1 油气优势运移通道控制因素分类

Table 1 Controlling factors of petroleum migration pathways

影响因素类别		影响因素
非均质性	输导层内非均质性	孔隙度、渗透率、润湿性及毛管压力 ^[21-24]
	输导层间非均质性	层间孔隙度、渗透率、润湿性及毛管压力差异 ^[21,25]
	断层	断层封闭或开启程度 ^[1,26]
产状	封闭层	封闭层底面形态及产状 ^[1-2,27]
	输导体组合	输导体(断层、砂体、不整合等)间叠置和拼接的样式 ^[25,28]
	断层面	断层面产状及形态 ^[1,29-30]
动力	流体动力	稳态流:水动力或流体势梯度、油气自身浮力及流体压力 ^[22,31-32]
		瞬态流:异常压力 ^[3-4,23,25,33-34]

定,对于该问题,各学者持不同的观点。表 1 归纳了国内外不同学者研究优势运移通道时所侧重的主要控制因素^[21-34]。实际上,油气优势运移通道的形成是个复杂的过程,是油气在输导层内部运移过程中多种因素综合作用的结果。综合这些因素的特点,可大体分为 3 大类:①形成优势通道的各种输导层本身的非均质性因素,包括输导层内及层间非均质性、断层开启或封闭程度等;②封闭层底面和断面形态、产状以及输导体间的叠置样式都属于通道产状的范畴,与构造形态直接相关;③不论是稳态流还是瞬态流,都属于流体动力范畴。这 3 大类可对应于 3 种宏观地质条件:输导系统内部结构的非均质性、输导层构造特征(包括形态、产状)和输导动力条件。

2 优势运移通道形成的“三要素”

以上分析表明,优势运移通道的形成主要受如下 3 个基本要素控制:①非均质性(输导层内非均质性 & 层间非均质性);②产状(输导层顶面形态产状以及输导体间邻接配置);③动力(流体流动样式、流体势场分布)。实际地质条件下的优势通道通常是三要素联合影响下形成的复合结果,可概括为在一定的流体动力条件下,油气通过一系列具有特定几何特征的非均质输导层时优先选择的运移路径。

2.1 动力要素

动力包括浮力和水动力,其中水动力条件还可划分为稳态流和瞬态流。

稳态流指的是油气在浮力和稳定水动力条件下运移的流体状态。地下水运动十分缓慢条件下可以认为浮力是主要的运移动力。浮力流的优势通道方向永远都是向上的。曾溅辉等^[25]通过 2D 物理模拟证明,油气在浮力作用下优先充注断层的上升盘。这主要是因为上升盘接受的油气柱高度

比下降盘要大,油珠所受浮力大,油气进入砂层的动力大,使上升盘成为优势通道。庞雄奇等^[28]综合考虑了水动力和浮力的作用,提出优势通道取决于浮力和水动力在运移方向上的分量大小。因此稳态流作用下的优势通道取向于水动力和浮力合力的方向。

瞬态流条件下油气运移的规律和稳态流相差很大,曾溅辉等^[25]、张善文等^[3]利用二维模型模拟了快速幕式流条件下油气在输导层内的运移和聚集效应。实验证明,幕式(瞬态流)条件下,油首先充注断层上部和下部砂层。因此瞬态流作用下油气充注作用优势取向为近注入口方向。

2.2 产状要素

产状要素包括输导层顶面或封闭层底面的几何形状、产状(倾向、倾角、位置等)以及输导层之间邻接配置关系。油气在运移动力的驱动下,其运移方向主要受运移通道产状约束,优势运移通道的取向永远趋向于动力合力分量最大的通道方向,即趋向于与运移动力夹角最小的方向。输导层顶面或封闭层底面形成的构造脊是重要的优势运移通道^[1,26]。

2.3 非均质性要素

非均质性要素是指输导层内或层间存在的非均质现象。非均质性是油气运移阻力产生的直接原因,阻力的大小取决于输导层非均质性的强弱,方向与运移方向相反。因此,在其他外界条件相同的情况下,油气优先选择孔渗性最好,即阻力最小的路径运移。曾溅辉等^[25]通过实验证实,稳态流作用下,石油优先充注物性较好的砂层。对于断层则是断层封闭性越差,其通道性越强。庞雄奇等^[28]称此类优势通道为级差优势通道。

3 优势运移通道形成“三要素”分析

形成优势运移通道的主体是油气,而非通道本

身。对于每一个油珠或气泡,动力是形成运移的前提条件,不同运移动力下优势运移通道的取向不同。因此,“动力”,即油气运移过程中所受的各种推动力(主要包括水动力、浮力等)的合力,是核心要素,控制着油气运移的趋势和方向;但这个合力大小和方向还要受输导层顶面或封闭层底面形态及产状的约束,也就是第二要素“产状”。油气运移阻力主要为毛细管阻力,主要由输导层非均质性决定,即“三要素”中的第三要素“非均质性”。

三要素中,“动力”和“产状”二要素决定了油气运移的具体方向;“非均质性”要素决定着油气能否运移以及油气运移的速度,它的大小由非均质性决定,方向与油气运移的实际方向相反,与产状无关。油气优势运移通道的形成实际上是“三要素”综合作用的结果。宏观上的运移趋势也可由运移动力、输导系统和构造三者所统一起来。下面以石油在倾斜板状地层内不同物性和走向的河道砂拼接而成的输导体内运移为例,说明优势运移通道的形成过程。

图 1 为一倾斜板状地层中发育有 2 条拼接在一起的砂体,分别为砂体 1 和砂体 2,地层与水平面的夹角为 θ ,砂体 1 和砂体 2 延伸方向与板状地层倾斜线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 。假设运移动力只有浮力,砂体 1 和砂体 2 的平均毛细管阻力分别为 H_1 和 H_2 ,现在来分析一下砂体 1 或砂体 2 在何种情况下为优势通道。

该情况下优势通道的方向即是油珠在输导层内所受合力的方向,该合力受三要素直接控制,即受浮力(动力要素)、砂体产状(产状要素)和毛细管阻力(非均质性要素)的联合控制。以下为同一油珠在 2 个砂体内的受力情况分析。

设运移上来的单个连续油珠所受浮力大小为 H 。在“产状”和“非均质性”要素影响下,推动油珠沿砂体 1 运移的合力 F_1 大小为:

$$F_1=H \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta_1-H_1$$

同理,油珠沿砂层 2 运移的合力 F_2 大小为:

$$F_2=H \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta_2-H_2$$

只有在运移合力大于 0 的情况下,油珠才可能在输导层内向前运移,合力越大,运移速度越快。因此,通过分析油珠在不同砂层内所受合力的相对大小,就能够判断出油气运移优先选择的路径,或优势运移路径。

(1) 当 $\theta_1>\theta_2, H_1>H_2$, 即砂体 1 与地层倾斜线

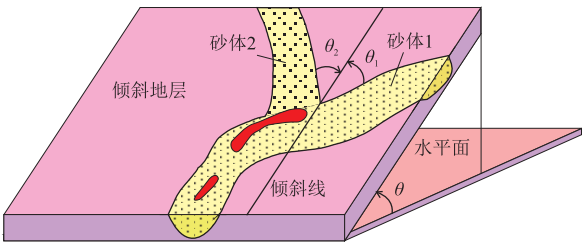


图 1 油气优势运移通道选择示例

Fig.1 An example of petroleum migration pathways

夹角大,且砂体 1 毛细管阻力也比砂体 2 大。 F_1 和 F_2 的大小关系如图 2 所示,在油气不断充注过程中,会发生下列变化:①随着油气的充注,连续油柱高度不断增高,浮力随之增大,当浮力 H 增加到 $H>H_2/(\sin\theta\cos\theta_2)$ 时, $F_2>0>F_1$, 砂体 2 开始有油气运移,但此时砂体 1 内无油气运移;②当浮力 H 增加到 $H>H_1/(\sin\theta\cos\theta_1)$ 时, $F_2>F_1>0$, 两砂体内都有油气运移,但砂体 2 具有优势。

(2) 当 $\theta_1>\theta_2, H_1<H_2$, 即砂体 1 与地层倾斜线夹角大,但砂体 1 毛细管阻力比砂体 2 小。 F_1 和 F_2 的大小关系如图 3a 和 3b 所示,在浮力不断增大过程中,会发生下列变化。当两直线交点在横坐标轴下方时,油气在两砂体内的运移情况和条件(1)相似(图 3a)。当两直线交点在横坐标轴上方时(图 3b),随油珠所受浮力 H 的增加,油气在两砂体内的运移会出现 3 种情况:①当浮力 H 增加到 $H>H_1/(\sin\theta\cos\theta_1)$ 时, $F_1>0>F_2$, 砂体 1 开始有油气运移,但此时砂体 2 内无油气运移;②当浮力 H 继续增加到 $H>H_2/(\sin\theta\cos\theta_2)$ 时(未到交点处), $F_1>F_2>0$, 两砂体内都有油气运移,但砂体 1 具有优势;③当浮力 H 继续增加到 $H>(H_2-H_1)/(\sin\theta\cos\theta_2-\sin\theta\cos\theta_1)$ 时, $F_2>F_1>0$, 两砂体内都有油气运移,但砂体 2 具有优势。

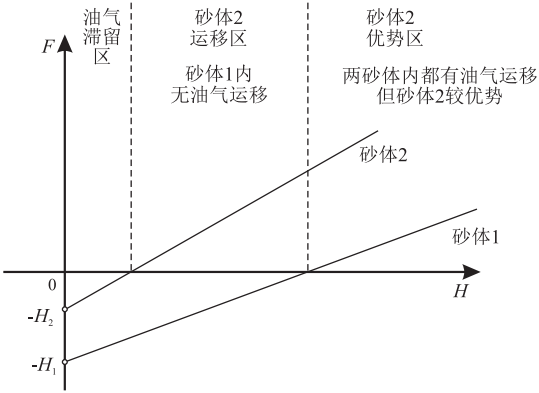


图 2 运移合力与浮力变化关系($\theta_1>\theta_2, H_1>H_2$)

Fig.2 Relationship between resultant force and buoyancy of oil an column ($\theta_1>\theta_2, H_1>H_2$)

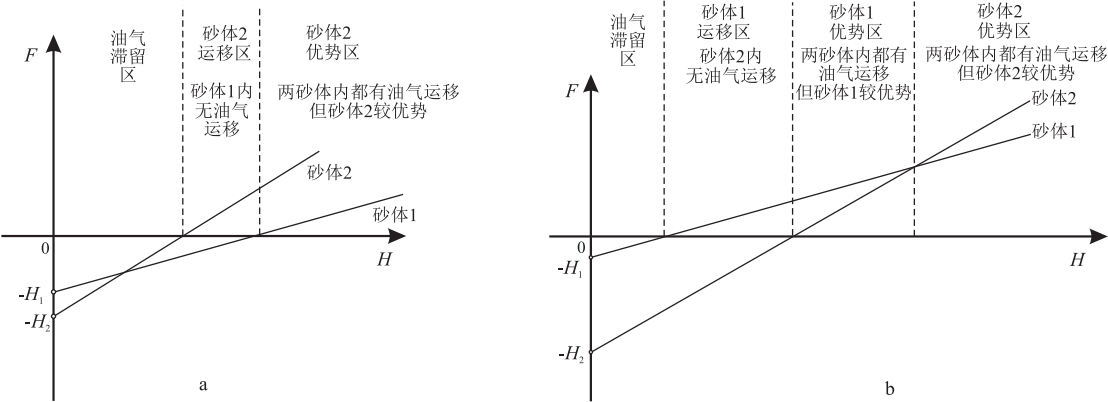


图 3 运移合力与浮力变化关系($\theta_1>\theta_2, H_1<H_2$)

Fig.3 Relationship between resultant force and buoyancy of an oil column ($\theta_1>\theta_2, H_1<H_2$)

从以上分析可以看出,在运移动力较小的情况下,油气优先沿着阻力较小的输导体运移;随着动力的增强,产状因素作用逐渐显现,如果动力足够大,产状成为影响优势通道的决定因素,具有有利产状的输导体成为最终的优势通道。因此,非均质性或毛细管阻力并不是影响优势通道的决定性因素,优势通道的选择与输电体的产状和油气运移动力有重要关系。

4 优势运移通道模拟实验分析

4.1 实验模型和实验条件

该实验主要以苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油藏为原型(图 4)。该油藏供烃源岩为下伏阜四段暗色泥岩,原油主要通过断层进入上部戴南组及三垛组地层。实验模型中储层相对渗透率依据油藏实际物性数据(表 2)进行等比例放大。该油田发育有 3 类断层,一类为二级控凹断层,一类为三级同生断层,还有一类为早期形成的四级断层,设计实验时,设定 3 类断层渗透性依次降低。

根据实际地质原型,设计实验模型如图 5 所示。

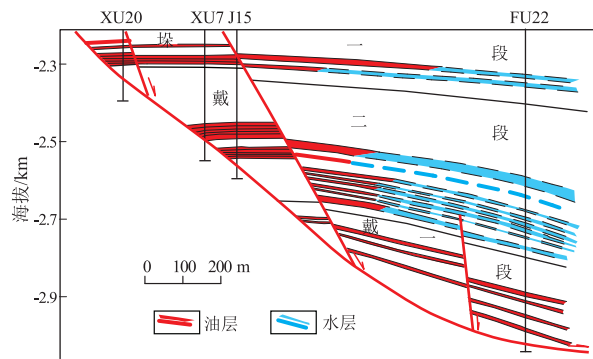


图 4 苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油田油藏剖面

Fig.4 Reservoir profile of XJZ oilfield, Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

表 2 苏北盆地高邮凹陷 XJZ 油田储层物性参数

Table 2 Reservoir physical properties of XJZ oilfield, Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

层位	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
垛一段	22	920
戴二段	18	520
戴一段	12	24

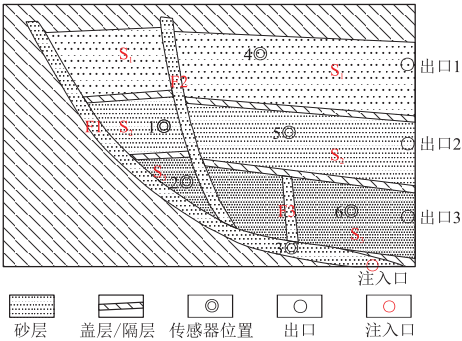


图 5 实验模型示意

Fig.5 Schematic diagram of the experimental model

实验模型尺寸为 50 cm×30 cm×2 cm。模型中 F1 为主断层,它与下伏油源层相通,F2 和 F3 为分支断层;模型中布置 6 个压力传感器,黑色同心小圆圈表示其位置;砂层之间被宽约 1 cm 的非渗透层隔开,每个砂层右端分别设有 1 个出口。斜线充填的部分为非渗透性地层,主要以橡胶充填;砂层主要为白色纯净的亲水石英砂;充注油为用天然色素染成红色的煤油(密度 0.75 g/cm³);实验用水为蒸馏水(密度 1.0 g/cm³)。实验模型的有关参数如表 3 所示。

依据研究区成藏特征,考虑到可能的流体运聚特征,实验中设计 2 种充注方式,分别为稳态充注和幕式充注,实验条件如表 4 所示。

表 3 实验模型参数

Table 3 Reservoir properties of the experimental model

参数	砂层 S1	砂层 S2	砂层 S3	断层 F1	断层 F2	断层 F3
粒径/mm	0.15~0.25	0.1~0.2	0.05~0.10	0.10~0.15	0.05~0.15	0.05~0.06
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	2 960	1 665	416	1 156	740	223

表 4 各实验条件对比

Table 4 Comparison of the experimental conditions

实验 编号	充注 方式	充注压力/ MPa	充注次数 (幕式)	充注时间 (连续)/min	每次充注油量 (幕式)/mL	注油速率(连续)/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	稳态			4 032		0.1
2	幕式	2.5	40		13	

实验 1 采用稳态充注,充注流体为油,注油速率为 0.1 mL/min。通过连续不间断的充注,让油在模型中运移聚集,同时记录每个出口的排液情况,实验过程中拍摄记录油的运移路径和过程。

实验 2 采用幕式充注,每次充注压力为 2.5 MPa,注油量约 13 mL。实验开始前先使模型各砂层充分饱含水。每次向模型注油前先关闭阀门,当 ISCO 泵与模型之间的高压容器压力达到 2.5 MPa 时迅速打开阀门,让流体通过注入口进入模型,模拟断层幕式开启、流体幕式释放的过程。连续记录每个出口的排液量。重复以上实验过程,至出口排出的油水比稳定、且模型内油运移达到稳定时,即可停止实验,同时拍摄和记录整个充注过程中油运移聚集的特征。

4.2 实验过程及结果分析

实验过程及结果如图 6 和图 7 所示,不同的充注方式,优先充注的通道和最终成藏的部位差异很

大。下面结合控制优势运移通道形成的三要素阐明其形成的机制。

(1)稳态充注条件下,油气优先充注物性较好的输导层,首先沿着物性条件相对较好的断层 F1 运移,充注顺序为注入口—断层 F1 下部—砂层 S2 左—断层 F1 上部—砂层 S1 左—断层 F2 上部—砂层 S1 右—出口 1;随着油气充注的持续进行,油突破断层 F2 时又形成了注入口—断层 F1 下部—砂层 S2 左—断层 F2 中上部—砂层 S1 右—出口 1 通道,后来的通道逐渐成为主要通道。油气最终富集于砂层 S2 左侧和砂层 S1。实验 1 表明,在稳态运移动力较小的条件下,油主要沿阻力最小的路径运移,非均质性因素占主导作用。此实验与运移动力较小情况下优势运移通道的形成分析相一致。

(2)幕式条件下,油气优先充注距注入口近的 S3 砂层,至 F1 与 F2 断层拼接处时,与实验 1 相反,主要沿 F2 断层运移,通过 F2 断层后先充注 F2

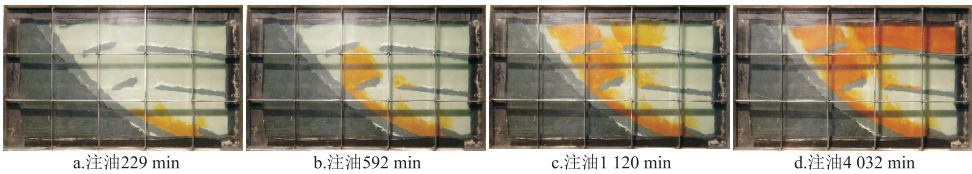


图 6 实验 1 稳态充注条件下油的运移过程
图中黄色为油,白色为砂体饱含水

Fig.6 Oil migration process under steady filling state of experiment 1

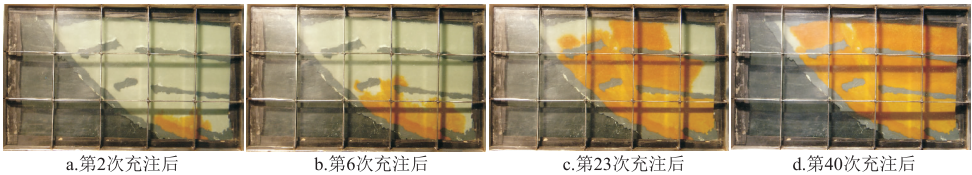


图 7 实验 2 幕式充注条件下油的运移过程
图中黄色为油,白色为砂体饱含水

Fig.7 Oil migration process under pulse filling condition of experiment 2

上盘砂体,后充注下盘砂体,最终各砂体均有油气聚集。实验 2 表明,由于压差很大,产状因素作用增强,甚至超过非均质性因素,油气更多地沿产状较陡的 F2 断层运移,优先充注断层上盘砂体。由于动力足够强,各输导体均对油有输导作用,最终可形成各砂层均有油气聚集的结果。实验 2 的过程和结果与动力足够大情况下优势通道的形成分析十分一致。

实验 1 与实验 2 对比表明,不同运移动力条件下油气优势运移通道的取向差异很大。运移动力较小的稳态充注情况下,油气优先充注物性好的输导体;动力较强的幕式充注条件下,物性虽差但产状有利的输导体同样可成为优势运移通道。两实验进一步证实了前面的理论计算得出的结论。

实验结果也表明 XJ2 油藏主要的成藏方式是幕式充注,该条件下深层物性差的砂体均可形成油气富集。

5 结论

综合前人研究成果,并通过本文的理论计算和实验分析表明,油气优势运移通道的形成主要受输导层非均质性、通道产状和运移动力“三要素”控制。“动力”要素是核心,控制着油气运移的总体趋势和方向;“产状”要素对“动力”要素起约束作用;“非均质性”要素决定着油气能否运移以及油气运移的速度。“三要素”分析表明,非均质性或毛细管阻力并不是影响优势运移通道的决定性因素,优势通道的选择与输电体的产状和油气运移动力有重要的关系。当运移动力较小情况下,油气优先沿着阻力较小的输导体运移;随着动力的增强,产状因素作用逐渐显现,如果动力足够大,具有有利产状的输导体可成为最终的优势通道。油气优势运移通道实际上是“三要素”综合作用的结果。宏观上的油气运移趋势也可由运移动力、构造和输导系统三者所统一起来。

参考文献:

- [1] Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [2] Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723-760.
- [3] 张善文, 曾溅辉. 断层对沾化凹陷馆陶组石油运移和聚集影响的模拟实验研究 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2003, 28(2): 185-190.
Zhang Shanwen, Zeng Jianhui. An experiment study on influence of fault on petroleum migration and accumulation in Guantao Formation, Zhanhua Depression [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(2): 185-190.
- [4] 侯平, 周波, 罗晓容. 石油二次运移路径的模式分析 [J]. 中国科学(D 辑地球科学), 2004, 34(S1): 162-168.
Hou Ping, Zhou Bo, Luo Xiaorong. Experimental studies on pathway patterns of secondary oil migration [J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2004, 34(S1): 162-168.
- [5] 曾溅辉, 王洪玉. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1999, 24(2): 193-196.
Zeng Jianhui, Wang Hongyu. An experimental study of petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(2): 193-196.
- [6] 曾溅辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
Zeng Jianhui, Jin Zhijun. Physical modeling of oil and gas migration and accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [7] 曾溅辉, 王洪玉. 层间非均质砂层石油运移和聚集模拟实验研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 108-111.
Zeng Jianhui, Wang Hongyu. Experimental study on oil migration and accumulation in the heterogeneous sand beds of different porosity and permeability [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Sciences), 2000, 24(4): 108-111.
- [8] 曾溅辉, 王洪玉. 反韵律砂层石油运移模拟实验研究 [J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 594-599.
Zeng Jianhui, Wang Hongyu. Experimental study of oil migration in coarsening upwards sands [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 594-599.
- [9] 李铁军, 罗晓容. 碎屑岩输导层内油气运聚非均一性的定量分析 [J]. 地质科学, 2001, 36(4): 402-413.
Li Tiejun, Luo Xiaorong. The inhomogeneity of petroleum migration in clastic carrier beds [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(4): 402-413.
- [10] 吴冲龙, 刘海滨, 毛小平, 等. 油气运移和聚集的人工神经网络模拟 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 203-212.
Wu Chonglong, Liu Haibin, Mao Xiaoping, et al. Artificial neural network simulation on hydrocarbon migration and accumulation [J]. Petroleum Geology Experiment, 2001, 23(2): 203-212.
- [11] 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 69-75.
Zhang Faqiang, Luo Xiaorong, Miao Sheng, et al. The patterns and its effect factors of secondary hydrocarbon migration [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(1): 69-75.
- [12] 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析 [J]. 地质科学, 2004, 39(2): 159-167.
Zhang Faqiang, Luo Xiaorong, Miao Sheng, et al. Experiments on oil migrating in a limited pathway and the mechanism analysis [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 159-167.
- [13] 李明诚. 油气运移基础理论与油气勘探 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(4): 379-383.

- Li Mingcheng. Basic principles of migration and hydrocarbon exploration [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4): 379–383.
- [14] Dembicki H Jr, Anderson M J. Secondary migration of oil: Experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(8): 1018–1021.
- [15] Sylta O. Modelling of secondary migration and entrapment of a multicomponent hydrocarbon mixture using equation of state and ray-tracing modeling techniques [M] // England W A, Fleet A J, eds. Petroleum migration. London: Geological Society Special Publications, 1991, 59: 111–122.
- [16] Sylta O, Pedersen J I, Hamborg M. On the vertical and lateral distribution of hydrocarbon migration velocities during secondary migration [M] // Parnell J, ed. Dating and Duration of Fluid Flow and Fluid-rock Interaction. London: Geological Society Special Publication, 1998, 144: 221–232.
- [17] Catalan L, Fu Xiaowen, Chatzis I, et al. An experimental study of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(4): 638–650.
- [18] Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1995, 76(1): 19–29.
- [19] Carruthers D, Ringose P. Secondary oil migration: Oil-rock contact volumes, flow behaviour and rates [M] // Parnell J, ed. Dating and duration of fluid flow and fluid-rock interaction. London: Geological Society Special Publication, 1998, 144: 205–220.
- [20] Hantschel T, Kauerauf A I, Wygrala B. Finite element analysis and ray tracing modeling of petroleum migration [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 815–820.
- [21] 庞雄奇, 金之钧, 姜振学. 油气成藏定量模式 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Pang Xiongqi, Jin Zhijun, Jiang Zhenxue. Quantitative models of hydrocarbon accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [22] 林玉祥, 孙宁富, 郭凤霞, 等. 油气输导机制及输导体系定量评价研究 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 237–245.
- Lin Yuxiang, Sun Ningfu, Guo Fengxia, et al. Mechanism and quantitative evaluation method of the petroleum migration system [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 237–245.
- [23] 郝芳, 邹华耀, 王敏芳, 等. 油气成藏机理研究进展和前沿研究领域 [J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 7–14.
- Hao Fang, Zou Huayao, Wang Minfang, et al. Research advances and frontier areas of mechanisms of petroleum accumulation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(4): 7–14.
- [24] 杨泰, 汤良杰, 余一欣, 等. 滨里海盆地南缘盐构造相关油气成藏特征及其物理模拟 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 246–251.
- Yang Tai, Tang Liangjie, Yu Yixin, et al. Characteristics of reservoirs related to salt structure and its experimental simulation in the southern margin of PreCaspian Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 246–251.
- [25] 曾溅辉, 王捷. 油气运移机理及物理模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Zeng Jianhui, Wang Jie. Mechanisms and physical simulation of hydrocarbon migration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [26] Allen P A, Allen J R. Basin analysis: Principles and applications [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [27] Gussow W C. Differential entrapment of oil and gas: A fundamental principle [J]. AAPG Bulletin, 1954, 38(5): 816–853.
- [28] 庞雄奇, 罗群, 姜振学, 等. 叠合盆地断裂上、下盘油气差异聚集效应及成因机理 [J]. 地质科学, 2003, 38(3): 297–306.
- Pang Xiongqi, Luo Qun, Jiang Zhenxue, et al. Accumulating diversity and its mechanism between hanging and lower walls of fault in superimposed basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 297–306.
- [29] 姜素华, 曾溅辉, 李涛, 等. 断层面形态对中浅层石油运移影响的模拟实验研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(2): 245–248.
- Jiang Suhua, Zeng Jianhui, Li Tao, et al. An experimental study on the influence of fault-plane shape on petroleum migration in middle and shallow formations [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2005, 35(2): 245–248.
- [30] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法: 断面优势运移通道的提出及其应用 [J]. 地质论评, 2005, 51(2): 156–162.
- Luo Qun, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue. A new method for effective trace petroleum migration path: Concept of fault section dominant migrating channel and its application [J]. Geological Review, 2005, 51(2): 156–162.
- [31] England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(2): 327–347.
- [32] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG Bull, 1953, 37(8): 1954–2026.
- [33] 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.
- [34] 刘传虎, 王永诗, 韩宏伟, 等. 济阳凹陷致密砂岩储层油气成藏机理探讨 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(2): 115–119.
- Liu Chuanhu, Wang Yongshi, Han Hongwei, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of tight sandstone reservoir in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 35(2): 115–119.