

文章编号 :1000-0550(2002)02-0333-06

石油二次运移物理模拟及运移特征分析^①

史基安¹ 邓津辉¹ 曾凡刚² 王琪¹

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

(中国人民大学环境学院 北京 100872)

摘要 石油二次运移是一个复杂的地质过程,本文通过利用饱和地层水的低孔低渗储层砂岩来进行石油二次运移模拟实验,初步研究了此过程的变化特征。研究表明:在静水条件下,石油水平运移带的平均含油饱和度达 15%~25%。运移过程中饱和烃、芳烃及非烃与含油饱和度呈正相关性。在运载层物性相差较小的情况下,运移驱动力是运移效率的主导因素。在孔渗性好的运载层,含油饱和度容易达到稳定。

关键词 石油二次运移模拟 储层砂岩 含油饱和度 运移效率

第一作者简介 史基安 男 1958 年出生 研究员 储层沉积学及储层地球化学

中图分类号 TE122.1 文献标识码 A

石油二次运移是连接石油生成和聚集的纽带,是发生在地质历史时期的复杂的动态过程,是石油地质领域重要的研究难题之一。二次运移过程由于受地层条件、构造运动、古地温演化史、古水动力演化及成岩作用等诸多因素的影响^[1],因此对此过程的研究大多局限于理论分析和推测^[2]。目前,有的研究人员通过地球化学方法研究石油运移路径^{[3][4]};有的通过地球物理方法追踪油气运移路径^[5];有的通过计算机数值模拟方法分析油气运移史^[6]。但很少见到从石油运移模拟实验的角度来分析研究石油二次运移的地球化学过程。

本文通过采用抽提、X 衍射方法及 GC/MS 对石油二次运移模拟实验的油、岩样品进行分析,为石油二次运移研究提供依据。

1 实验方法

实验装置如图 1 所示。选择不同矿物组成的低孔低渗岩芯样品(表 1),用岩芯切磨机磨制成圆柱状,长大致为 7 厘米。将磨制好的岩芯装入脂肪抽提器中,然后倒入甲苯和乙醇(其比例为 3:1),清洗岩心中的残油和盐类,洗至液体无色,最后干燥岩芯。用气测法(氮气)精确测定各岩芯样品的孔隙度和渗透率,称出岩芯干重后,将其与配置好的盐水(地层水)分别放入橡皮管连接的两个锥形瓶中,使用真空泵抽取 4 小时后,将盐水通过橡皮管倒入岩芯,继续抽取三个小时。关闭真空泵后,将岩芯继续在盐水中浸泡 20 小时左

右,以保证岩芯充分被盐水饱和。

把岩芯装入岩芯夹持器当中,用高压手动泵将围压加至 3.0 MPa。开启微量泵,把微量泵控制器进油速度调至 4 毫升/小时。此时开始计时。微量泵吸入的煤油通过“排出”口进入装水的中间容器压水,水通过钢管进入装油的中间容器的底部,驱使原油进入岩心夹持器中。原油不断在夹持器中聚集,压力随之不断上升。当达到某一压力值时,压力停止上升,此时关闭微量泵,释放夹持器中的注入压力,并终止计时。释放围压,取出岩芯(实验数据见表 2)。将注入油的岩芯称重,并切成 6~7 份岩芯片,分别装入广口瓶中密封。采用索氏抽提法分别对各个岩芯片进行抽提和石油族组分的分离(表 3)。

2 实验数据的处理

依据表 1、表 2 的数据,我们可以求出各个岩芯片的含油饱和度。首先依据式(1)计算出各岩芯片的长度:

$$l = l_0 \times (m / \sum m_i) \quad (1)$$

式中 l 为岩芯片长度, l_0 为岩芯长度, m 为岩芯片质量, $\sum m_i$ 为各岩芯片质量和。由圆柱的体积公式及岩芯的孔隙度,可计算出各岩芯片的孔隙体积。通过

$$r_p = (m_p / \rho_p) / V \quad (2)$$

计算出含油饱和度(残余油饱和度)。其中 r_p 是含油饱和度, m_p 是残留油(抽提物)的质量, ρ_p 是石油的密度, V 是岩芯片的孔隙体积。

^① 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043310)和国家自然科学基金项目(批准号:40072050)联合资助

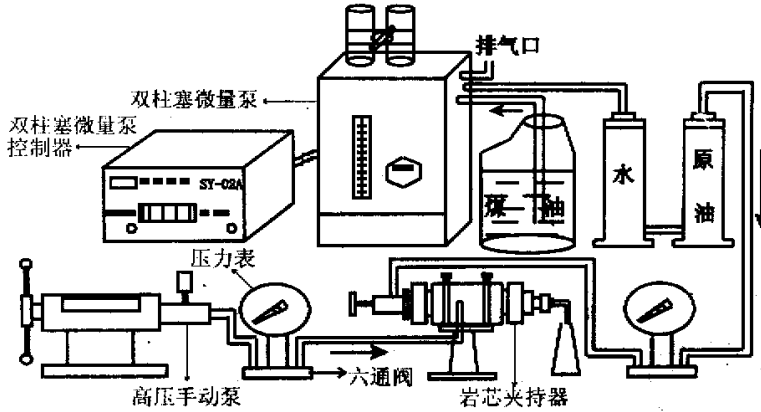


图1 石油二次运移模拟实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map on equipments of the simulating secondary oil migration experiment

表1 实验样品矿物组成

Table 1 Mineral constitutes of the experimental samples

岩芯号	石英/%	长石/%	粘土矿物/%	碳酸岩类矿物/%	其它/%
2	56	22	19	<2	2
3	54	24	18	<2	3
4	55	23	7	3	9
5	49	18	22	11	\

表2 运移模拟实验数据

Table 2 Experimental data of simulating secondary oil migration

岩芯号	最大注入压力/MPa	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	围压/MPa
2	1.18	10.2442	0.184	5.00
3	0.90	10.7213	0.755	4.00
4	1.40	10.4586	0.511	5.00
5	1.05	8.2449	0.154	4.92

经过以上计算,得到含油饱和度(残余油饱和度)(见表3)。

运移过程中,石油组分是随运移距离变化的。由于本模拟实验切割的岩芯片厚度存在差异,不能利用直接的抽提结果进行比较。为了对二次运移有一个定量地认识,我们将抽提出的石油族组分转化为单位运移距离各族组分的质量(表3)。这不仅有利于对运移过程中散失量的认识,而且为不同岩芯样品的运移结果之间进行对比提供了便利。

3 实验结果及讨论

3.1 含油饱和度特征

如图2所示,岩芯2、3、5的含油饱和度是随石油运移距离的增加而减小,而岩芯4由于孔渗性相对较好,注入压力较大,其中的含油饱和度在运移过程中呈增加趋势,表现出明显地运移。此外,由于孔渗性好的运载层容易形成较多、较连续的运移通道,导致孔渗性

较好的岩芯3及岩芯4的含油饱和度趋于稳定,起伏较小,而岩芯2和岩芯5的孔渗性很差,含油饱和度由大到小变化显著。

本项实验是在水湿、静水的条件下进行石油水平运移模拟实验,从表3可知,石油在运移带的平均含油饱和度在15%~25%之间,明显高于Thomas和Clouse^[7]通过运移机理模拟实验得到的垂向运移带和侧向运移通道的油平均饱和度,由此可以说明本项实验的石油水平运移的效率较高。

3.2 石油中各族组分特征

石油各族组分由于物理、化学性质以及运载层物性之间的差异,在石油运移过程中呈现出不同的变化特征(图3)。通过对石油中各族组分与含油饱和度进行线性回归^[8](表4),表明它们之间具有很好的正相关性,但沥青质的变化较大,与含油饱和度不具相关性。鄢捷年^[9]研究认为沥青质在油藏岩石中的吸附程度与沥青质本身的结构、特性和地层水的离子组成

表 3 运移过程中单位距离族组分分布数据表

Table 3 Data of compositions per centimeter in oil during secondary oil migration

样品号	运移距离 /cm	单位距离饱和烃 /(mg/cm)	单位距离芳烃 /(mg/cm)	单位距离沥青质 /(mg/cm)	单位距离非烃 /(mg/cm)	含油饱和度/%
岩 2-1	6.334	13.60	2.67	0.93	4.30	4.968
岩 2-2	5.268	28.93	3.14	1.18	8.88	9.723
岩 2-3	4.162	43.26	5.74	1.38	15.62	15.241
岩 2-4	3.202	62.41	10.41	14.30	11.77	22.845
岩 2-5	2.151	72.20	7.12	0.27	24.48	24.043
岩 2-6	1.200	68.42	10.29	1.93	21.74	23.662
岩 2-7	0.406	81.62	10.85	0.25	26.63	27.581
岩 3-1	6.279	21.70	3.03	1.17	4.36	6.529
岩 3-2	5.082	75.06	8.75	1.44	27.25	24.280
岩 3-3	3.970	85.76	8.15	1.16	20.68	24.967
岩 3-4	3.092	78.56	10.82	2.20	25.40	25.261
岩 3-5	2.191	57.51	12.45	1.28	42.31	24.494
岩 3-6	1.225	90.09	11.60	0.78	28.94	28.375
岩 3-7	0.421	92.62	14.39	1.90	36.86	31.478
岩 4-1	6.382	13.86	25.20	6.30	65.95	25.060
岩 4-2	5.390	52.12	6.21	0.22	20.36	17.759
岩 4-3	3.892	47.57	5.15	0.99	15.03	15.469
岩 4-4	2.402	37.74	4.31	1.17	11.53	12.323
岩 4-5	1.196	34.64	5.28	1.34	13.44	12.308
岩 4-6	0.338	75.68	7.55	2.22	29.62	25.861
岩 5-1	6.315	0.00	0.00	0.00	0.00	0.558
岩 5-2	5.284	8.90	2.07	0.86	2.25	3.959
岩 5-3	4.076	21.79	3.66	0.72	6.52	9.181
岩 5-4	2.938	41.95	7.07	0.59	16.32	18.531
岩 5-5	1.818	46.36	4.99	1.06	12.18	18.132
岩 5-6	0.603	59.02	6.55	1.82	22.22	25.156

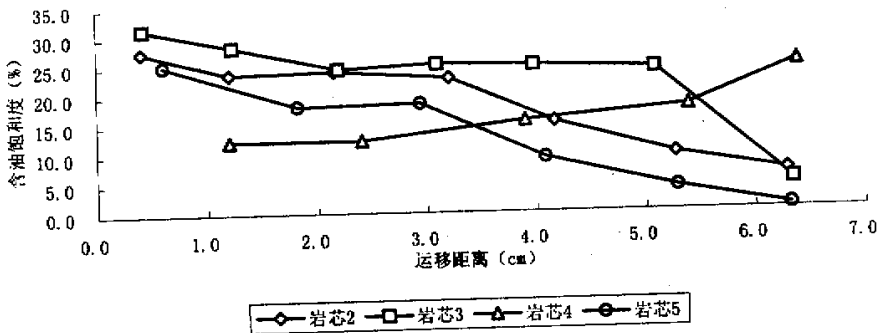


图 2 运移过程中含油饱和度的变化曲线

Fig. 2 Distributing curves for oiliness saturation during secondary oil migration

有关。

如图 3 所示,在石油运移过程中,岩芯 4 饱和烃量呈递增趋势,而其他岩芯表现出减少的趋势,表明孔渗性好的运载层在驱动力较大的条件下,有利于连续的运移通道形成,为石油高效地运移提供了可能。芳烃和饱和烃都不具有极性或极性很小^[10],不易与其它物质反应,因此这两族组分的变化趋势具有相似性。

由 X 衍射分析资料可知,岩芯 5 的粘土含量较

高。由于沥青质及非烃具有一定的极性且分子量普遍较大^[11],容易被粘土类矿物束缚,导致岩芯 5 中的沥青质和非烃在运移过程中呈现明显地递减趋势。岩芯 4 的孔渗性好、注油压力大、粘土含量低,有利于沥青质和非烃的流动,这就使非烃与含油饱和度呈现明显的正相关性,但沥青质仍然表现为规律性递减变化,这可能与石油样品中沥青质的性质有关。岩芯 2 的沥青质和非烃在一定程度上表现出互补关系;岩芯 3 的

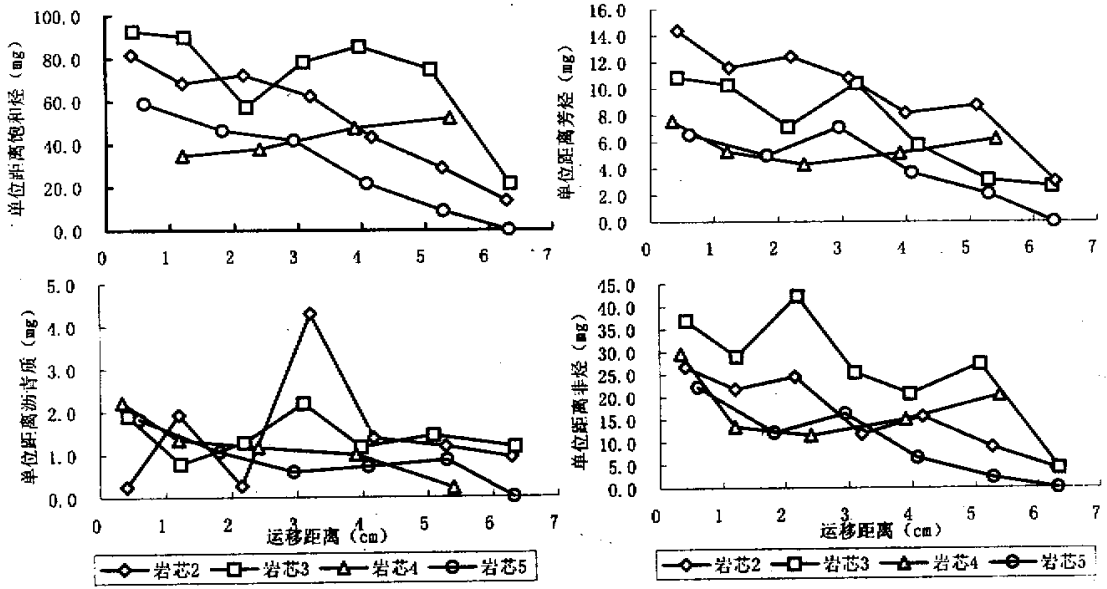


图3 运移过程石油中各族组分变化曲线

Fig. 3 Distributing curves for composition in oil during secondary oil migration

表4 石油族组分与含油饱和度回归关系表

Table 4 Regress relations between compositions in oil and oiliness saturation

样品号	回归方程	相关系数 r	y	x
岩芯2	$y = 3.212x + 1.519$	0.9952	含油饱和度	单位距离饱和烃
岩芯3	$y = 3.226x + 0.301$	0.9422		
岩芯4	$y = -2.078x + 24.312$	-0.5859		
岩芯5	$y = 4.118x + 0.367$	0.9969		
岩芯2	$y = 21.750x + 2.910$	0.9366		
岩芯3	$y = 21.004x + 2.643$	0.9086		
岩芯4	$y = 5.433x + 11.569$	0.9239		
岩芯5	$y = 33.132x - 0.855$	0.9415		
岩芯2	$y = 8.473x + 4.788$	0.8828	单位距离非烃	
岩芯3	$y = 5.744x + 8.158$	0.8188		
岩芯4	$y = 2.176x + 11.088$	0.9495		
岩芯5	$y = 10.988x + 1.693$	0.9858		

沥青质的变化呈现较大的起伏,而非烃呈良好的递减趋势变化。这一方面反映出运载层的非均质性导致石油族组分有选择的流动,另一方面表明运载层矿物组成和物理参数的不同给石油运移带来的影响。

3.3 正构烷烃的变化特征

由岩芯4和岩芯5的正构烷烃色谱图(图4)可以看出,正构烷烃中的重组分与轻组分的比值呈有规律的减小(表5),而且随着运载层中粘土矿物含量的增加,这一比值的变化更加明显。这说明在运移初期,轻正构烷烃比重正构烷烃易于被粘土矿物吸附,导致它们之间产生差异。在实际油田样品分析中发现重组分

比轻组分较易滞留于运移通道中,恰恰与本模拟实验的结果相反。由于此模拟实验是在常温且压力不大的条件下进行的,粘土矿物和原油之间的是一种物理吸附。开始时吸附速度大大超过解吸速度,随着运移的进行,这个差别逐渐减小,致使附着在粘土矿物表面的轻组分发生解吸现象^[12]。

4 结论

通过对石油二次运移过程进行实验模拟以及对模拟实验的产物—残留油中的族组分进行抽提分离及色质分析,揭示出以下有关运移过程中石油各族组分及岩芯含油饱和度的变化特征:

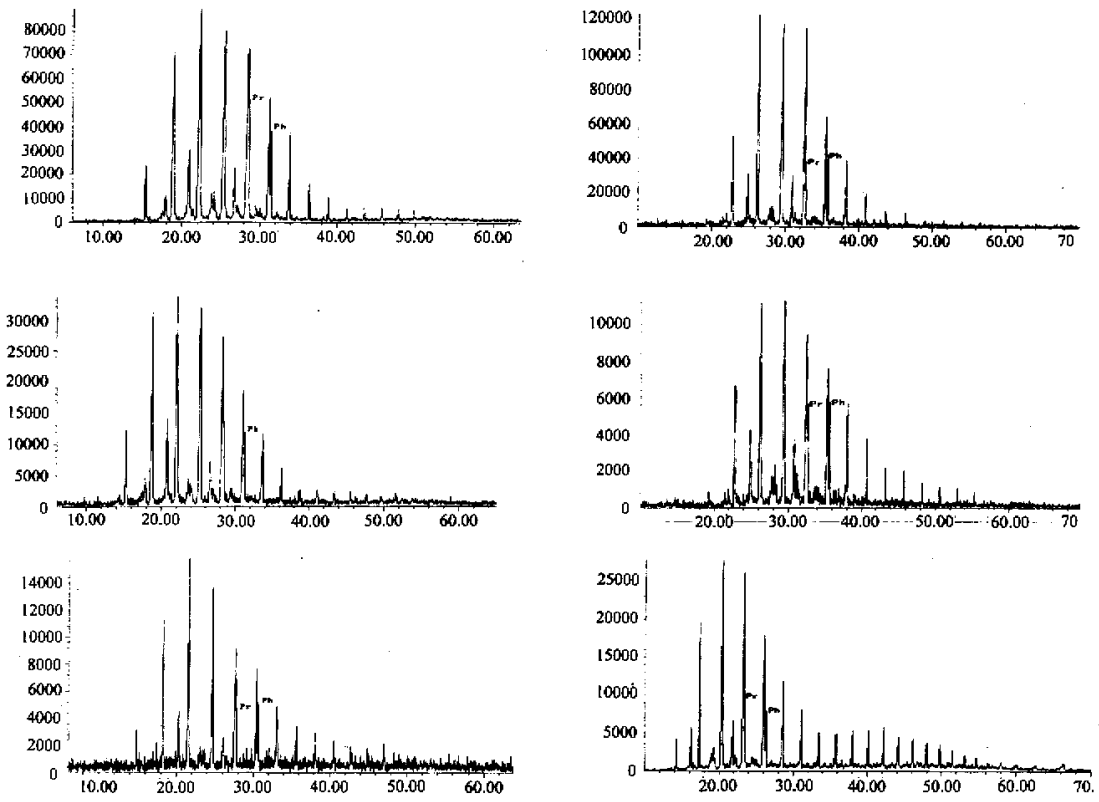


图 4 岩芯 2 正构烷烃色谱图、岩芯 5 正构烷烃色谱图
Fig. 4 and 5 Chromatograms of n-alkanes from Sample 2 and Sample 5

表 5 岩芯 2、5 中正构烷烃比值表

Table 5 Ratio list of n-alkanes in Sample 2 and Sample 5

样品号	岩 2-7	岩 2-6	岩 2-5	岩 2-4	岩 2-3	岩 2-2	岩 2-1	岩 5-6	岩 5-5	岩 5-4	岩 5-3	岩 5-2
$-n\text{C}_{18}/+n\text{C}_{19}$	3.91	3.49	4.31	3.83	2.79	2.23	1.88	5.39	5.16	2.45	2.05	1.31

(1) 在石油运移过程中,饱和烃、芳烃及非烃与含油饱和度呈正相关性,粘土含量较高、孔渗性较差的运载层对非烃和沥青质的束缚能力较大;孔渗性较好的运载层对沥青质的束缚能力要大于非烃。

(2) 在水湿、静水条件下,孔渗性较好的运载层中,若运移的驱动力较大,石油运移现象明显,含油饱和度在运移过程呈增加地趋势变化,而驱动力较小且孔渗性较差的运载层中含油饱和度则呈现递减的趋势。在运载层物性相差较小的情况下,运移驱动力是运移效率的主导因素。

(3) 孔渗性好的运载层,含油饱和度容易达到稳定,即含油饱和度在运移路径的各部位基本相同,说明

形成了连续的运移通道。

(4) 在水湿、静水条件下进行石油水平运移的模拟实验中,石油的运移效率较高,平均含油饱和度达 15%~25%。

参 考 文 献 (References)

- 李明诚. 石油与天然气运移(第二版) [M]. 北京:石油工业出版社, 1994. 127~164 [Li Mingcheng. The migration of oil and gas (Second edition) [M]. Beijing :Petroleum Industry Publishing House ,1994. 127~164]
- 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集 [M]. 北京:地质出版社, 1997. 9~16 [Zha Ming. Second migration and accumulation of oil and gas in rift basin [M]. Beijing :Geological Publishing House ,1997. 9~16]

- 3 Lynda B Williams , *et al.* Nitrogen isotope geochemistry of organic matter and minerals during digenesis and hydrocarbon migration[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,1995 ,59(4) :765~779
- 4 Masanobu Yamamoto. Fraction of azararenes during oil migration[J]. *Org. Geochem.* ,1992 ,19(4~6) :389~402
- 5 Davis R W. Analysis of hydrodynamic factors in petroleum migration and entrapment[J]. *AAPG Bull.* ,1987 ,11(6) :643~649
- 6 Ungerer P. Basin evaluation by integrated 2-dimensional modeling of heat transfer , fluid flow , hydrocarbon generation , and migration[J]. *AAPG Bull.* ,1990 ,74(3) :309~335
- 7 Thomas M M ,Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration[J]. *AAPG Bull.* ,1995 ,79(1) :19~29
- 8 赵旭东. 石油数学地质概论[M]. 北京 :石油工业出版社 ,1992. 41~48[Zhao Xudong. An introduction of petroleum mathematic geology [M]. Beijing : Petroleum Industry Publishing House ,1992. 41~48]
- 9 鄢捷年. 原油沥青质在油藏岩石表面的吸附特性[J]. 石油勘探与开发 ,1998 ,25(2) :78~82[Yan Jienian. The absorption of asphalt on the reservoir rocks[J]. *Petroleum Exploration and Exploitation* ,1998 ,25(2) :78~82]
- 10 尹玉英等. 有机化学[M]. 北京 :高等教育出版社 ,1992. 24~26 , 95~100[Yin Yuying , *et al.* Organic chemistry [M]. Beijing :Higher Education Publishing House ,1992. 24~26 ,95~100]
- 11 J. M. 亨特. 石油地球化学和地质学[M]. 北京 :石油工业出版社 ,1986. 19~26[J. M. Henter. *Petroleum Geochemistry and geology* [M]. Beijing :Petroleum Industry Publishing House ,1986. 19~26]
- 12 И Л 马尔哈辛. 油层物理化学机理[M]. 北京 :石油工业出版社 ,1987. 40~42[И Л Maerhason. The physical chemistry mechanism of oil reservoir [M]. Beijing :Petroleum Industry Publishing House ,1987. 40~42]

An Experiment on Physically Simulating Secondary Oil Migration and Analysis of Dissipating Features

SHI Ji 'an¹ DENG Jin-hui¹ ZENG Fan-gang² WANG Qi¹

(State Key Laboratory of Geochemistry Lanzhou Institute of Geology ,

Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000)

² School of Environment and Resources ,Renmin University of China ,Beijing 100872)

Abstract Secondary petroleum migration is a complex geological phenomenon. This paper primarily discusses the changeable features of the process through the modelling experiment of secondary migration using the reservoir sandstone with ultra-low porosity and permeability. The experimental results indicate the average oiliness saturation in a horizontal migrating zone is 15% ~ 25% under a hydrostatic condition , and the migrating efficiency is better. During migration , saturated , aromatic and non-hydrocarbons have a good relation with oiliness saturation. Driving power of secondary petroleum migration is a critical factor that controls migrating efficiency when the difference in conduits is very little. Oiliness saturation can be easily obtained in the conduits with good porosity and permeability.

Key words modelling secondary petroleum migration , reservoir sandstone , oiliness saturation , migrating efficiency