

文章编号: 1000-0550 (2005) 03-0420-09

渤南洼陷深层 (沙三 沙四段) 原油—水—岩石相互作用模拟实验研究

宫秀梅^{1,2} 曾溅辉^{1,2} 金之钧³

1(石油大学(北京)盆地与油藏研究中心 北京 102249) 2(石油大学 油气成藏机理教育部重点实验室 北京 102249)

3(中国石油化工集团公司石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 为了更好地研究地层温压条件下原油—水—岩石相互作用发生的化学变化及其对成藏条件特别是储层物性等的影响,结合渤南洼陷深层的成藏条件及流体动力系统特征,进行物理实验模拟。结果表明:1)在一定的温压条件下(温度 120、压力 45 MPa)岩石及实验后的原油化学成分及生物标志物均发生了变化。油样的饱和烃含量增加,沥青质+非烃含量明显降低;油砂的饱和烃含量沿实验装置从下到上逐渐增加,最高值达 62.22%,沥青质+非烃含量由 40.55%下降到 12.78%。实验样品的生物标志物及族组成显示油沿着实验装置从下向上运移过程中发生了地质色层效应。2)原油—水—岩石相互作用以溶蚀作用为主,并随原油在实验本体从下向上的运移而逐渐增强。溶蚀作用的结果改善了普遍以低孔低渗为特征的深部储层的物性,为深层油气的运移和保存提供了有效空间。

关键词 深层 相互作用 一维实验装置 模拟实验 地质色层效应

第一作者简介 宫秀梅 女 1974 年出生 博士研究生 地质资源与地质工程

中图分类号 P618.130.2⁺1 **文献标识码** A

1 引言

渤南洼陷位于济阳坳陷沾化凹陷东部,北起埕南断层,南至罗家断层,东达孤西断层,西邻义和庄凸起,分布面积约 350 km² (图 1),其深层(埋藏深度大于 3 500 m)是胜利油区深层重点勘探区域之一,主要目的层是沙河街组沙三段—沙四段地层^[1-4]。该洼陷作为沾化凹陷东部的一个三级负向构造单元,渤南洼陷接受了巨厚的中、新生代断陷湖盆和坳陷湖盆沉积,整体为一北陡南缓北东走向的箕状洼陷,内部有近于洼陷走向垂直的孤西断裂带以及发育在渤南洼陷内部的断裂活动,将洼陷分成四个构造单元,由北向南依次是埕南断裂带、渤南深洼带、渤深 4 断阶带和南部斜坡带,其中深层油气藏主要分布在渤南深洼带和渤深 4 断阶带。据统计渤南洼陷深层的石油资源量为 1.96 × 10⁸ t,天然气资源量为 155 × 10⁸ m³,已探明的石油地质储量只有 446 × 10⁴ t,仅占总资源量的 2.3%^[5],可见渤南洼陷深层尚具有较大的剩余油气资源潜力。

然而由于受深部地层温压条件的影响,导致深层

油源问题、原油与地层水和岩石的相互作用变得尤为复杂。就油源问题而言,渤南洼陷深层既有沙三段又有沙四段油源,还有沙三和沙四混合油源的特征^[6]。另外,结合渤南洼陷深层的地层温压及水化学特征,发现深层油气主要集中分布在 3 500 ~ 4 000 m 深度范围内的超压流体动力系统中^[7],压力系数最高达 1.6,该系统上部还受一定规模的膏盐层遮挡^[8]。深部地层由于在地史过程中连续受到沉降作用的影响,致使储层呈现出中孔低渗特征,次生孔隙较为发育。

国内外利用高温高压岩心驱替装置模拟油气生成、运移和聚集以及流体—岩石相互作用等方面已取得了一定的认识^[9-13]。就流体—岩石相互作用而言,许多学者先后已经进行了一定程度的研究,其中王铁冠等和张枝焕等分别针对储层流体—岩石相互作用中砂岩储层成岩地球化学变化、次生孔隙形成、介面润湿性及流体性质等的影响因素分别进行了研究和论述^[14-15]。张枝焕等认为盆地内地层流体—岩石相互作用导致储层特征和流体性质发生变化^[16-17]。其中有关烃类物质的注入使原油—水—岩石相互作用变得更为复杂。Ca 等首次提出了塔北

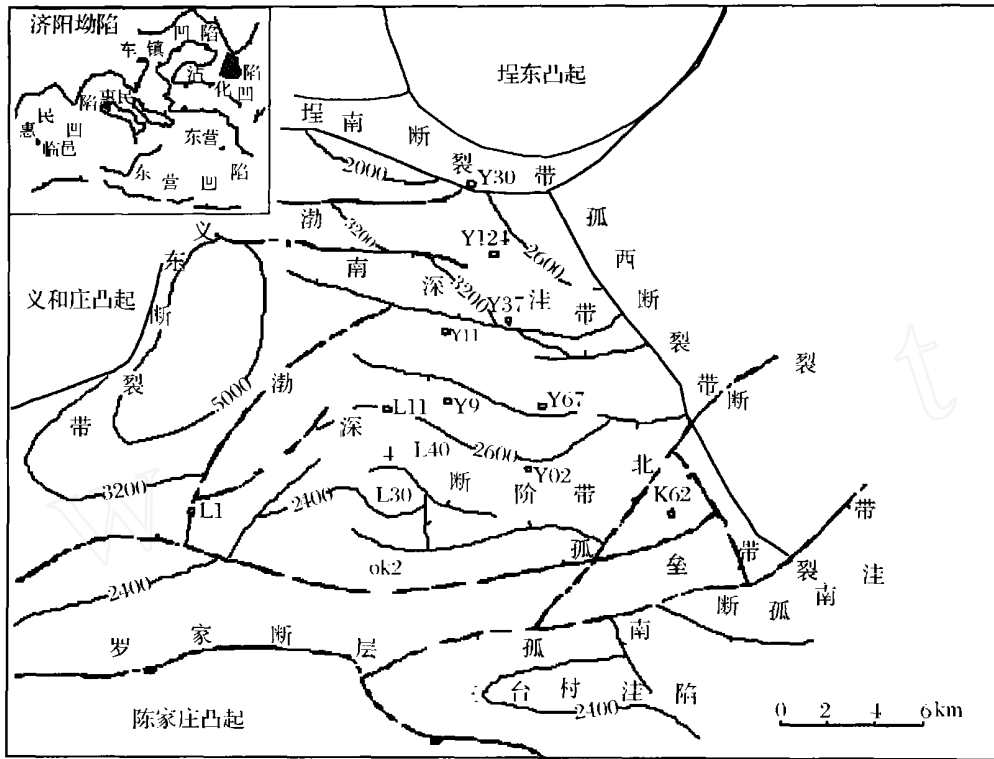


图 1 渤南洼陷深层构造图

Fig 1 A sketch tectonic map of deep zone in the Bona

不整合面附近的烃—水—岩石相互作用,并对原地有机酸产生机理、硫酸盐还原菌及矿物溶解-沉淀等作用进行了讨论^[18]。蔡进功等和李艳霞等认为烃类充注对储层成岩演化具有一定的控制作用^[19~20]。为此,本文结合渤南洼陷深层的沉积和流体动力背景,选取渤南洼陷深层的原油为实验样品,分别以天然石英砂和地层水为介质,进行了高温高压条件下不同层系原油—地层水—岩石相互作用的物理模拟实验,试图从实验角度剖析原油—水—岩石相互作用对原油性质、储层物性等方面的影响,并对前人的认识加以验证。

2 模拟实验和实验方法

2.1 实验模型与实验材料

实验模型为一维高温高压模拟实验装置,由流体输入系统、实验本体、温压控制系统、数据采集分析系统和流体输出系统组成(图 2)。流体注入系统由注入泵组成;实验本体为各类岩心夹持器,实验的岩样放置在岩心夹持器内;温压控制系统主要控制实验的温度和压力,一般温度是由保温箱或电热带控制,而

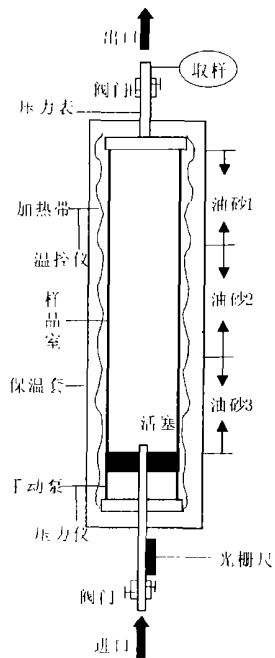


图 2 一维高温高压实验装置示意图^[11]

Fig 2 Schematic diagram of 1-D experimental apparatus for high-pressure and high-temperature^[11]

压力由围压泵控制。实验过程主要采集的物理参数有温度、压力、流量等,而有机成分分析可通过气相色谱等仪器测定。流体输出系统主要控制流体的输出流量及样品收集^[11]。

实验所用的地层水采自胜利油田渤南洼陷沙四段,矿化度介于 3~4 g/l。实验用砂为天然砂,其成分与沙四段砂岩的成分相似。实验所用的原油分别取自义 170 井的沙河街组沙三段和沙四段油层,前者油质相对较重,粘度大,呈黑色,后者油质相对较好,呈棕褐色。

2.2 实验步骤

考虑到渤南深层油源问题,实验主要分三个阶段进行。第一阶段:先充注沙四段原油,即将适量的地层水装入压实成岩模型,然后装入天然砂,装满压实,其内部流体压力为 30 MPa,温度为 100 (进出口加滤网),待其稳定后,从模型的下部注入沙四段的原油(150 ml),之后将模型垂直竖起,实验时间为 6 天。第二阶段:继续向模型内注入沙三段的原油(200 ml),实验时间为 25 天,使其内部流体压力达到 45 MPa 左右,温度 120,实验基本达到稳定状态,即其内部的流体压力与挤压力基本一致(图 3)。第三阶段:进行取样和分析,分别收集排出油样和实验本体中抽提出的油砂样品(即从出口排出的和从砂中抽提的油样),进行相应的地化分析(包括原油族组成分析、饱和烃色谱分析、芳香烃气相色谱分析、轻烃色谱分析及天然石英砂全烃抽提及族组分分析等;矿物成分分析,包括反应前的天然砂与反应后的砂(包括

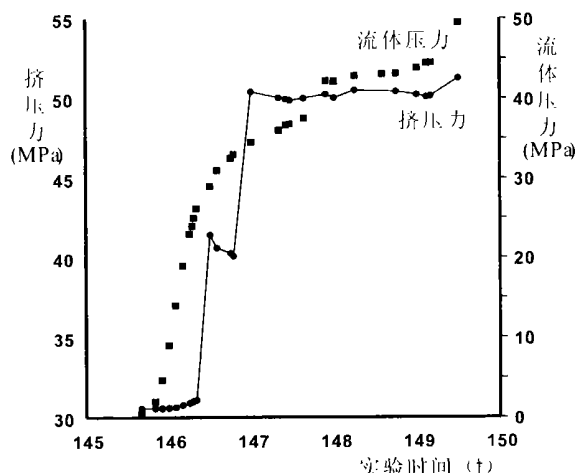


图 3 实验过程中挤压力与流体压力随时间变化曲线图(注入沙三段原油过程中)

Fig 3 Squeezing pressure and fluid pressure vs time after injection of E₅₃ oil sample during the experiment

含油的和不含油的砂)。其中:样品 1 是第二阶段结束后排出的油样,油砂 1、油砂 2、油砂 3 分别是距离出口不同部位的油砂样品(图 2)。

3 实验结果与讨论

3.1 原油化学成分的变化

(1) 原始油样成分特征

沙三段、沙四段原油样品的族组分包括饱和烃、芳烃、沥青质+非烃,其中沙三段原油以饱和烃为主,含量占 56.72%,其次是芳烃 19.78%,沥青质+非烃含量为 13.81%;沙四段原油中饱和烃含量达 63.36%,其次是沥青质+非烃含量,达 27.38%,芳烃含量较少,仅有 9.54%(表 1)。饱和烃色谱图的特征比较相似,都是前锋型,即在主峰碳位置陡然升起形成一个高峰,而向高碳方向很快递减,构成一个前高后低的碳数分布曲线(表 1,图 4),其中沙三段原油的主峰碳为 C₁₅,沙四段原油的主峰碳为 C₁₁。两件油样的 Pr/Ph 值介于 0.70~1.10 之间,Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 值介于 0.20~0.40 之间,但沙四段的 Pr/Ph、Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 值略低于沙三段;沙三段、沙四段原油的 CPI 分别为 1.062、1.019 之间,OEP 分别为 1.047、0.948,奇偶优势不明显。

沙三段原油的轻重比中等,C₍₂₁₊₂₂₎/C₍₂₈₊₂₉₎、C₂₁₋/C₂₂₊ 指标分别为 1.584、1.159;而沙四段原油的轻重比较大,C₍₂₁₊₂₂₎/C₍₂₈₊₂₉₎ 为 1.84,C₂₁₋/C₂₂₊ 为 2.24,反映了沙四段原油的母质类型相对较好。

(2) 实验结束后所有样品的地球化学特征

结束后,所获得的样品包括从出口处排出的样品(样品 1)和装置内的油砂样品(油砂 1、油砂 2、油砂 3),具体的取样位置见图 2。其中样品 1 的原油族组分中饱和烃含量最高,达 79.16%,芳烃为 13.81%,沥青质+非烃含量很低,仅为 7.12%(表 1)。饱和烃色谱图上主要显示为前锋型,主峰碳为 C₁₁,其色谱图特征与沙三段、沙四段原油的基本相似(图 4)。CPI 为 1.034,OEP 为 0.96,奇偶优势不明显。Pr/Ph 为 0.717,Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 分别为 0.21、0.32。样品 1 的轻重比较大,C₍₂₁₊₂₂₎/C₍₂₈₊₂₉₎ 为 1.817,C₂₁₋/C₂₂₊ 为 2.048,与沙四段原油较为相似,但相对于沙三段原油而言,该指标有所增加。

而油砂 1、油砂 2、油砂 3 的原油族组分变化呈现出一定的规律性,即从油砂 3 油砂 2 油砂 1,饱和烃含量逐渐增加(44.06%~62.22%),沥青质+非烃含量逐渐降低(40.55%~13.91%),油砂 2 的芳

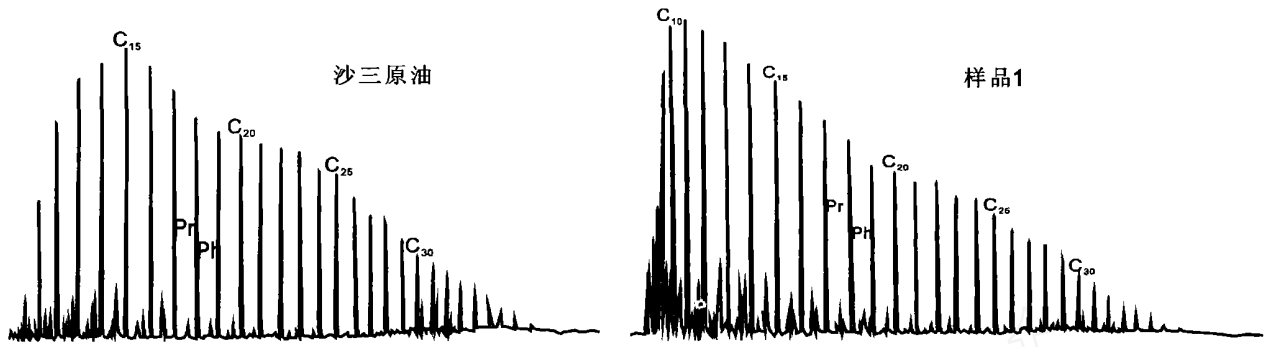


图 4 样品 1 与沙三段原油饱和烃色谱对比图

Fig 4 Saturated hydrocarbon chromatographic correlation of sample 1 and Es₃ oil sample

表 1 实验样品的基本地球化学特征

Table 1 The basic geochemical characteristics of samples

样品	原油 1	原油 2	样品 1	油砂 1	油砂 2	油砂 3
族组成 / %				距离出口不同部位的油砂		
饱和烃	56.72	63.36	79.16	62.22	57.49	44.06
芳烃	19.78	9.54	13.46	18.7	20.45	12.78
沥青质 + 非烃	13.81	27.48	7.12	13.91	15.06	40.55
MAX-PEA K	单峰 C ₁₅	单峰 C ₁₁	单峰 C ₁₁	双峰前锋 C ₁₅	双峰前锋 C ₁₅	双峰前锋 C ₁₅
生物标志化合物						
OEP	1.062	1.019	1.034	1.038	1.049	1.049
CPI	1.047	0.948	0.967	1.013	1.026	1.035
C ₍₂₁₊₂₂₎ / C ₍₂₈₊₂₉₎	1.584	1.836	1.817	1.598	1.562	1.376
C ₂₁₋ / C ₂₂₊	1.159	2.235	2.048	1.140	0.960	0.953
Pr/Ph	1.062	0.709	0.717	0.910	0.970	1.034
Pr / nC ₁₇	0.322	0.212	0.210	0.274	0.305	0.361
Ph / nC ₁₈	0.336	0.325	0.320	0.319	0.332	0.328

烃含量最高,达 20.45% (表 1)。三件油砂样品的饱和烃色谱图上则表现为双峰前锋型,其主碳峰都为 C₁₃ 和 C₂₅ (图 5)。CPI 为 1.038 ~ 1.049, OEP 为 1.013 ~ 1.035, 奇偶优势不明显。类异戊二烯烃特征基本上介于沙三、沙四段油样之间,即 Pr/Ph 为 0.910 ~ 1.034, Pr / nC₁₇ 为 0.274 ~ 0.361, Ph / nC₁₈ 为 0.319 ~ 0.332, 而且从油砂 3 油砂 2 油砂 1, Pr/Ph, Pr/nC₁₇, Ph/nC₁₈ 值逐渐降低。三件油砂样品的轻重比中等, C₍₂₁₊₂₂₎ / C₍₂₈₊₂₉₎ 为 1.376 ~ 1.598, C₂₁₋ / C₂₂₊ 为 0.953 ~ 1.140, 并随着油从实验本体的下部向上运移过程中, C₍₂₁₊₂₂₎ / C₍₂₈₊₂₉₎、C₂₁₋ / C₂₂₊ 值逐渐增大。

结合本次实验分析结果,相对于原油样品的族组成,样品 1 的沥青质 + 非烃含量显著降低,饱和烃含量增高达 79.16%, Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 值降低;油砂 3 油砂 2 油砂 1 中的族组成显示沥青质 + 非烃含量也显著降低,饱和烃含量增高, Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 值基本上呈降低趋势 (表 1)。这种现象很可能与油气运移过程中地质层效应有关。由于石油中不同组分存在极性差异,所以油气在运移过程中将会发生

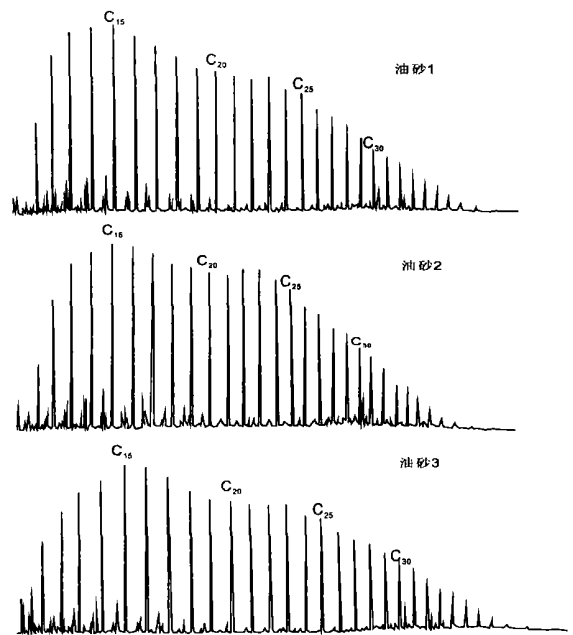


图 5 油砂 1、2、3 样品的饱和烃色谱对比图

Fig 5 Saturated hydrocarbon chromatographic correlation of oily-sand samples of 1, 2, 3

地质色层效应。一些学者认为最显著的地质色层效应通常是含氮化合物与矿物之间的吸附作用,导致其在运移通道上发生分馏^[21, 22]。然而有学者研究表明,流体—岩石相互作用也会导致其它化合物发生一定规模的分馏作用,如油气运移过程中,原油中沥青质含量降低、 P_{17}/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 值随运移距离增大而降低等^[23]。由此可以认为,原油自容器下部向上运移过程中,岩石矿物对原油的成分会有一种“过滤”和“吸附”作用,从而造成原油成分中较轻的组分运移得更远一些,在上部聚集;而较重的原油组分则在下部聚集。

3.2 对储层的改造情况

实验结束后,对实验本体中的油砂进行了扫描电

镜分析,对比实验前的天然砂的扫描电镜特征,油砂中的石英、长石与天然砂相比,均发生一定程度的溶蚀作用,基于三段油砂所在装置内的位置不同,其蚀变程度亦存在着一定的差异。

(1) 石英的蚀变过程

由图 6 可见,相对于天然砂中石英而言,油砂 3 中的石英粒表发生了轻微的溶蚀,但不十分明显,油砂 2 在放大倍数达到 3 000 倍时,石英粒表出现了溶孔,但相对于油砂 1 在放大倍数达到 1 000 倍时的溶孔要小的多。因而,从石英的蚀变程度可以看出,油砂 1 内发生的溶蚀作用最强,油砂 3 中最弱。从镜下观测,石英粒表的溶蚀物可能是 Fe、Mg 及铝硅酸盐。

(2) 钾长石的变化过程

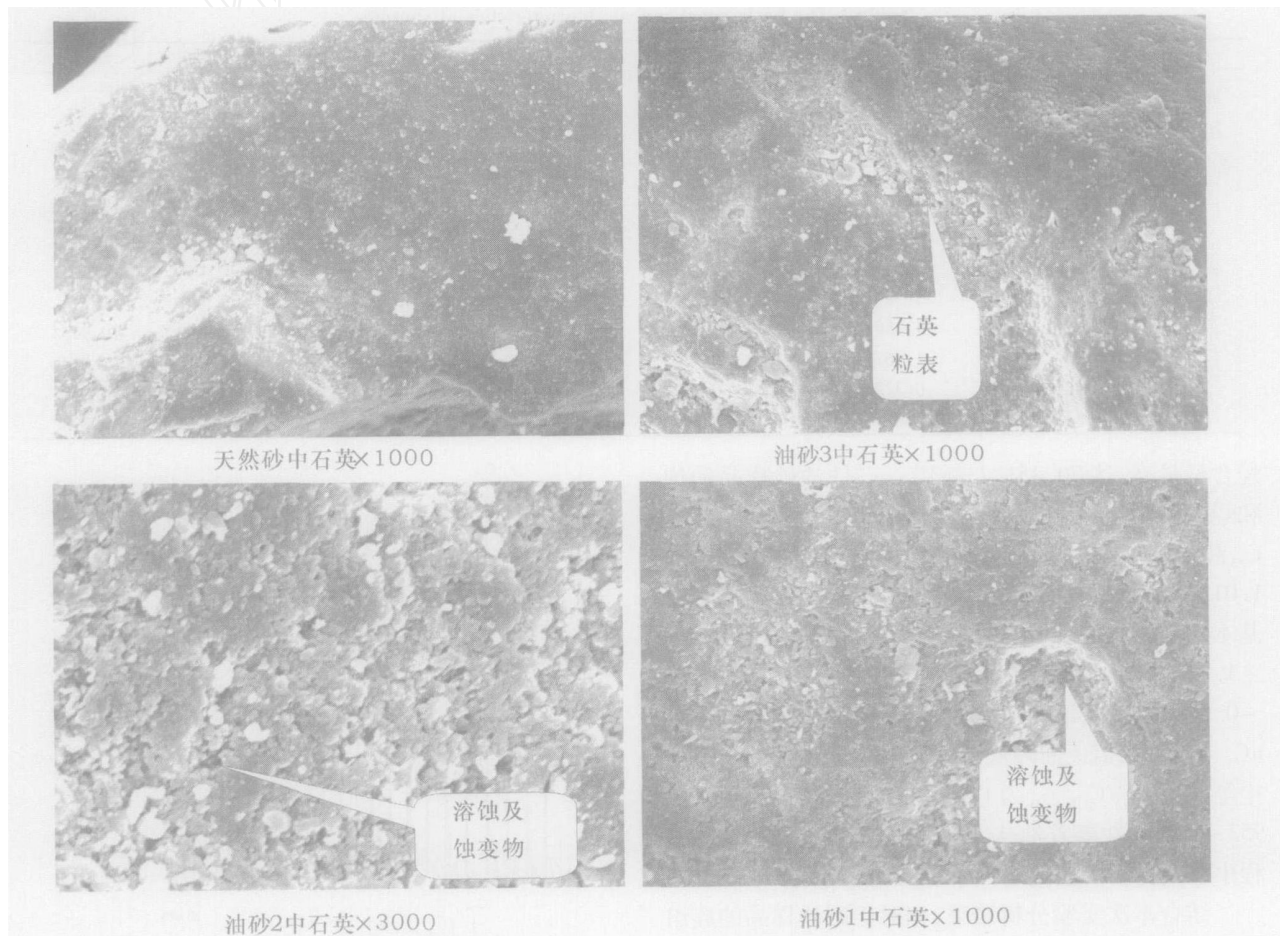


图 6 扫描电镜砂岩结构图像——石英的蚀变过程

Fig 6 SiO_2 alteration: scanning electron photomicrographs of sandstone texture

钾长石在油砂 1 中基本上呈带状发生溶蚀,但由于颗粒中矿物成分的差异导致发生蚀变的程度不同,图 7 中所标出的区域是溶蚀作用较强的区域,在电镜

下观测出现一些过渡蚀变物。而油砂 3 是在放大倍数达到 5 000 倍时所观察到的钾长石颗粒,其颗粒周围的物质基本已被溶掉,而钾长石颗粒表面变化不

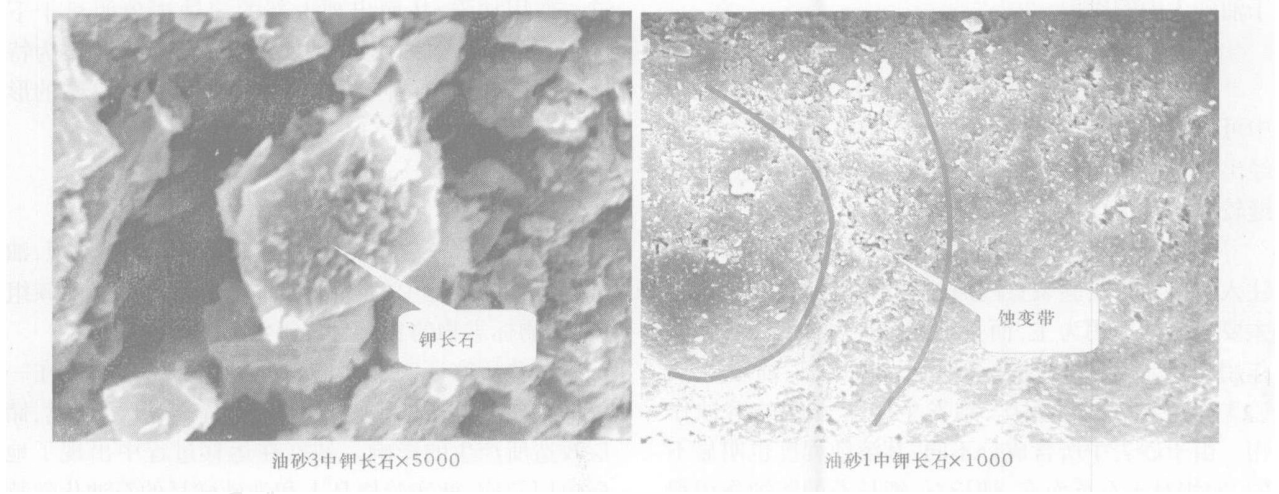


图 7 扫描电镜砂岩结构图像——钾长石的蚀变过程

Fig 7 Potash feldspar alteration: scanning electron photomicrographs of sandstone texture

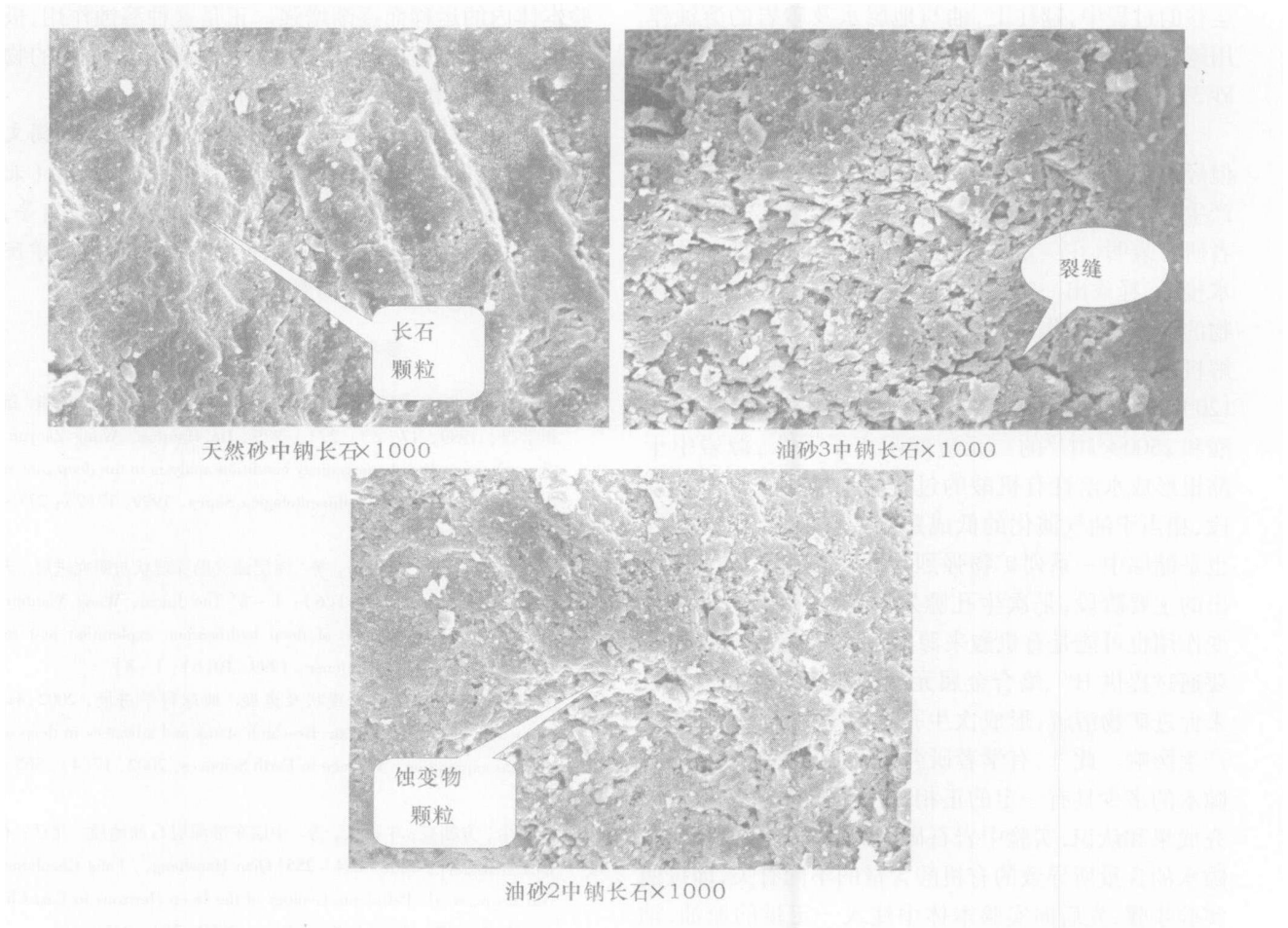


图 8 扫描电镜砂岩结构图像——钠长石的蚀变过程

Fig 8 Albite alteration: scanning electron photomicrographs of sandstone texture

大。从而可以看出钾长石在油砂 1 中的溶蚀作用强于油砂 3 中的作用。

(3) 钠长石的变化过程

钠长石在长石中是易溶的一种岩石矿物,从图 8 中可以看出,与天然砂相比较,钠长石在油砂 2 中已经出现了溶孔,而在油砂 3 中溶孔相对较少,但节理缝较多。

上述分析结果可以看出,在一定的温度条件下,注入的原油与实验装置内的地层水及砂岩发生反应,主要以溶蚀作用为主,而且随运移距离的增加,溶蚀作用增强,并出现溶蚀孔等现象,如油砂 1、油砂 2、油砂 3 样品与天然砂相比,均发生一定程度的溶蚀作用。由于砂岩中所含成分不同,其溶蚀程度也明显不同,如相对于石英而言,钠长石、钾长石的溶蚀作用都比较强,并出现溶蚀孔,而且钾长石在油砂 1 中基本上呈带状发生溶蚀的。原油在实验本体内从下向上运移的过程中,越往上,油与地层水及砂岩的溶蚀作用越强,即油砂 1 和油砂 2 中的溶蚀作用明显强于油砂 3。

尽管渤南洼陷的油田水普遍缺少有机组份分析,但烃类的注入可产生大量的有机酸,其对储层岩石所产生的影响已为诸多学者研究和证实^[19,20,24]。有学者研究表明,在一定的地层温压条件下,原油与孔隙水接触,释放出一定的有机酸,这些有机酸加速了矿物的溶蚀、溶解作用^[16]。目前,人们对有机酸高温裂解机理尚不很清楚,但普遍认为储层温度在 80 ~ 120 范围内油田水可含高达 10000×10^{-6} 的一元羧酸和 2500×10^{-6} 的二元羧酸阴离子^[25,26],源岩中干酪根形成水溶性有机酸的过程主要发生在这一温度段,相当于油气演化的低成熟至成熟阶段,这一阶段也是储层中一系列矿物强烈溶解和自生矿物大量析出的主要阶段,是次生孔隙发育带^[16];另外,原油热变作用也可能是有机酸来源之一^[27]。这些有机酸主要通过提供 H^+ 、络合金属元素,提高矿物的溶解度,来促进矿物溶解,形成次生孔隙,从而对矿物稳定性产生影响。此外,有学者研究认为有机酸的含量与孔隙水的多少具有一定的正相关性^[16]。基于前人的研究成果和认识,实验中岩石矿物的变化很可能与由孔隙水的含量所导致的有机酸含量的不同有关,即按照实验步骤,先后向实验本体中注入一定量的原油,油在实验本体内从下向上充注运移过程中,势必会驱替岩石中的孔隙水,并将下部的孔隙水逐渐向上驱替,从而导致容器下部的地层水相对较少,致使油—水—

岩石相互作用减弱,而上部由于地层水相对较多,使这一作用加强,从而出现上部的溶蚀现象明显于下部。正是这种溶蚀作用,改善了普遍以低孔低渗为特征的深部储层的物性,从而更有利于深层油气藏的形成。

4 结论

原油—水—岩石相互作用模拟实验结果发现,油气运聚成藏过程中的各种地球化学因素对原油族组成、生物标志物的相对含量等都有一定的影响。

实验研究证实了原油—水—岩石相互作用在一定的地层温压条件下对原油化学特征、沉积环境、储层改造所产生的影响。油气在运移过程中出现了地质色层效应,使实验样品 1 和油砂样品的石油化学特征发生了变化。对储层的影响主要以溶蚀作用为主,出现溶蚀孔等现象,溶蚀作用随着原油从下向上在实验本体内的运移而逐渐增强。正是这种溶蚀作用,极大的改善了普遍以低孔低渗为特征的深部储层的物性,从而更有利于深层油气藏的形成。

致谢 非常感谢胜利油田研究院深层室孙锡文同志在现场取样所给予的帮助,感谢石油大学(北京)朱毅秀老师在分析扫描电镜方面的帮助和指导,文章在撰写过程中得到了石油大学资源与信息学院李素梅老师、朱雷老师的帮助,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- 1 何海清,王兆云,程玉群. 渤海湾盆地深层石油地质条件分析. 沉积学报, 1999, 17(2): 273 ~ 279 [He Haiqing, Wang Zaoyun, Cheng Yuqun. Petroleum geology condition analysis to the deep zone of Bohai Gulf basin. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 273 ~ 279]
- 2 妥进才,王先彬,周世新,等. 深层油气勘探现状与研究进展. 天然气地球科学, 1999, 10(6): 1 ~ 8 [Tuo Jincan, Wang Xianbin, Zhou Shixin, et al. State of deep hydrocarbon exploration and research. Natural Gas Geoscience, 1999, 10(6): 1 ~ 8]
- 3 妥进才. 深层油气研究现状及进展. 地球科学进展, 2002, 417(4): 565 ~ 571 [Tuo Jincan. Research status and advances in deep oil and gas exploration. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(4): 565 ~ 571]
- 4 谯汉生,方朝亮,牛嘉玉,等. 中国东部深层石油地质. 北京:石油工业出版社, 2002. 254 ~ 255 [Qiao Hansheng, Fang Chaoliang, Niu Jiayu, et al. Petroleum Geology of the Deep Horizons in East China. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. 254 ~ 255]
- 5 田克勤,于志海,冯明,等. 渤海湾盆地第三系深层油气地质与勘探. 北京:石油工业出版社, 2000. 250 ~ 251 [Tian Haiqin, Yu Zhihai, Feng Ming, et al. Geology and Exploration of Hydrocarbon in

- Paleogene Deep Zone of Bohai Gulf Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 250 ~ 251]
- 6 尹长河. 济阳坳陷深层油气藏地球化学研究. 胜利油田博士后研究工作站. 2003 [Yin Changhe. Study on Geochemistry of Deep Oil & Gas Pool in Jiyang Depression. Preserved in Working station of Post D. 2003]
 - 7 高喜龙, 肖贤明, 赵必强, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷下第三系烃源岩生烃史. 沉积学报, 2004, 22(2): 359 ~ 364 [Gao Xilong, Xiao Xianming, Zhao Biqiang, *et al*. Petroleum generation history of Lower Tertiary source rocks from the Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 359 ~ 364]
 - 8 宫秀梅, 曾溅辉. 渤南洼陷古近系膏盐层对深层油气成藏的影响. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 24 ~ 27 [Gong Xiumei, Zeng Jianhui. Impact of Paleogene evaporates on hydrocarbon accumulation in deep Bonan Sub-sag, Jiyang depression. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 24 ~ 27]
 - 9 Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(1): 19 ~ 29
 - 10 Wendebourg J. Modeling multi-component petroleum fluid migration in sedimentary basins. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, (69-70): 651 ~ 656
 - 11 曾溅辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟. 北京: 石油工业出版社, 2000. 31 ~ 33 [Zeng Jianhui, Jin Zhijun. *Physical Simulation of Hydrocarbon Secondly Migration and Accumulation*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 31 ~ 33]
 - 12 曾溅辉, 王捷. 油气运移机理及物理模拟. 北京: 石油工业出版社, 2002. 2 ~ 12 [Zeng Jianhui, Wang Jie. *Mechanisms and Physical Simulation of Hydrocarbon Migration*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. 2 ~ 12]
 - 13 冯子辉, 迟元林, 杜洪文, 等. 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验. 沉积学报, 2002, 20(3): 506 ~ 509 [Feng Zihui, Chi Yuanlin, Du Hongwen, *et al*. Carbon isotopic composition and yield of gaseous hydrocarbon by oil hydrous pyrolysis in rock medium. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 506 ~ 509]
 - 14 王铁冠, 张枝焕. 油藏地球化学的理论与实践. 科学通报, 1997, 42(19): 2017 ~ 2025 [Wang Tieguan, Zhang Zhihuan. Theory and practice of geochemistry of reservoirs. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(19): 2017 ~ 2025]
 - 15 张枝焕, 常象春, 曾溅辉. 水—岩相互作用研究及其在石油地质中的应用. 地质科技情报, 1998, 17(3): 69 ~ 74 [Zhang Zhihuan, Chang Xiangchun, Zeng Jianhui. Research on water-rock interaction and its application on petroleum geology. *Geological Science and Technology Information*, 1998, 17(3): 69 ~ 74]
 - 16 张枝焕, 胡文宣, 曾溅辉, 等. 东营凹陷下第三系流体—岩石相互作用研究. 沉积学报, 2000, 18(4): 560 ~ 566 [Zhang Zhihuan, Hu Wenxuan, Zeng Jianhui, *et al*. Study of fluid-rock interactions in Eocene Formation in Dongying Depression, Bohai Gulf Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 560 ~ 566]
 - 17 张枝焕, 邓祖佑, 吴水平, 等. 石油成藏过程中的地球化学变化及控制因素的综合评述. 高校地质学报, 2003, 9(3): 484 ~ 493 [Zhang Zhihuan, Deng Zuyou, Wu Shuiping, *et al*. Geochemical alteration of hydrocarbon compositions during migration and accumulation and its controlling factors. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(3): 484 ~ 493]
 - 18 Cai Chunfang, Mei Bowen, MA Ting, *et al*. Hydrocarbon-water-rock interactions in the diagenetically altered system near major unconformities in Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(19): 1631 ~ 1635
 - 19 蔡进功, 张枝焕, 朱筱敏, 等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 79 ~ 83 [Cai Jingong, Zhang Zhihuan, Zhu Xiaomin, *et al*. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 79 ~ 83]
 - 20 李艳霞, 刘洪军, 袁东山, 等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 274 ~ 280 [Li Yanxia, Liu Hongjun, Yuan Dongshan, *et al*. Effect of oil charging on reservoir's diagenetic mineral evolution. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 274 ~ 280]
 - 21 Bonilla J V and Engel M H. Chemical alteration of crude oils during simulate migration through quartz and clay minerals. *Organic Geochemistry*, 1988, 13: 503 ~ 512
 - 22 Brothers, Engel M H, Kroos B M. The distribution of organic compounds in synthetic crude oils. *Organic Geochemistry*, 1991, 13: 503 ~ 512
 - 23 Milles J A. Secondary migration routes in the Brent sandstones of the Viking Graben and East Shetland basin: Evidence from oil residues and subsurface pressure data. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1718 ~ 1735
 - 24 蔡春芳, 顾家裕, 蔡洪美. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响. 沉积学报, 2001, 19(1): 60 ~ 65 [Cai Chunfang, Gu Jiayu, Cai Hongmei. Effect of hydrocarbon emplacement on diagenesis of Silurian sandstone of central Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 60 ~ 65]
 - 25 Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity. In: Mc Donald D A, Surdam R C. *Clastic diagenesis*. *AAPG Bulletin Abstract*, 1984, 37: 127 ~ 149
 - 26 蔡春芳. 沉积盆地流体—岩石相互作用研究的现状. 地球科学进展, 1996, 11(6): 575 ~ 579 [Cai Chunfang. Advancements of fluid rock interactions in sedimentary basin. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(6): 575 ~ 579]
 - 27 Kharaka Y K, Lungardard P D, Ambats G, *et al*. Generation of a liphatic acid anions and carbon dioxide by hydrous pyrolysis of crude oils. *Applied Geochemistry*, 1993, 8: 317 ~ 324.

Experimental Simulation on Oil-Water-Rock Interaction in the Deep Bonan Sub-sag

GONG Xiu-mei^{1,2} ZENG Jian-hui^{1,2} JIN Zhi-jun³

1(Basin & Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249)

2(Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Education Ministry, Beijing 102249)

3(Institute of Exploration & Development of SINOPEC, Beijing 100083)

Abstract One dimension experimental apparatus composed of fluid input/output system, experimental nomenon, T/P controlling system, as one of the very effective methods studying the subsurface hydrocarbon origin, migration, accumulation and reservoir reconstruction is adopted to simulate oil migration and accumulation in deep zones in this paper. And the interaction of oil-water-rock under actual high temperature and high pressure (120 °C, 45MPa) was simulated. The results showed that many changes including their chemical components and rock inner structure etc., under certain temperature and pressure, occurred during petroleum migration from the bottom up along the apparatus with the increased charging quantities, and interaction with sandstone and formation water in apparatus. And the specific changes were as follows: 1. Many changes took place in the rock structure and its chemical components of inner hydrocarbon. Vertically, saturated hydrocarbon content of oily-sands gradually increased from the bottom up, and the peak value 12.78%. And the biomarkers and family components of all samples derived from experiment show the existence of geochromatographic effect during the oil migration along the apparatus. 2. A certain extent dissolution has acted on mineral component of oily-sands during the oil-water-rock interaction, and it strengthens gradually during hydrocarbon migration from the bottom up along the apparatus. Just because of this dissolution, the property of deep reservoirs with low porosity and permeability has been greatly improved, and it supplies effective space for deep hydrocarbon migration and accumulation.

Key words deep zone, interaction, one dimension experimental apparatus, simulation experiment, geochromatographic effect