

# 油气运聚成藏机理实验模拟研究进展

李贤丽

(东北石油大学电子科学学院, 大庆 163318)

**摘要** 实验模拟是油气二次运移和聚集理论发展的起始点,在描述油气运聚机理和过程方面始终是不可替代的手段。随着实验模型种类的多样化,实验模拟研究的内容越来越多。但由于检测手段、边界效应、设备微渗漏和许多地质现象在实验模型中构建不合理等因素的影响,许多实验结果难以反推到地下。因此检测手段的改进、边界效应影响的减小和自动成图技术的发展是今后实验装置设计的发展方向。岩性油气藏成藏机理、断裂控藏、晚期构造运动对早期油气的改造作用和非常规油气运聚成藏机理仍然是未来实验模拟的主题,但必须从实际地质解剖出发,论证实验的可行性,保证实验结果能够应用于地下条件。

**关键词** 运移 聚集 实验模拟 实验模型

**中图法分类号** TE122.11; **文献标志码** A

油气二次运移发生在地质历史时期复杂的时空变化过程中,现今不易观察到,即使找到一些运移过程留下的“痕迹”,也无法正确恢复过去的运移历史,至今依然是油气地质理论研究和应用中的薄弱环节<sup>[1]</sup>。实验模拟是油气二次运移和聚集理论发展的起始点,在描述油气运聚机理和过程方面是不可替代的手段<sup>[2]</sup>,人们试图通过“微缩模型”去探索运移机理或者再现地质历史时期油气的运移过程,为勘探实践提供理论依据。回顾油气二次运移和聚集实验模拟研究历史,大体可以分为三个阶段:第一阶段:20世纪50年代以前,以二维模型为主体,定性研究油气沿砂体、背斜、向斜和断层等典型构造中二次运移的过程<sup>[3,4]</sup>;第二阶段:20世纪50年代—20世纪90年代中期,以微观模型为主体,定性或定量研究油气二次运移机理<sup>[5-12]</sup>;第三阶段:20世纪90年代中期之后,多种模型(微观模型、一维模型、二维模型和三维模型)联合使用,定量分析影响油气运移的主控因素<sup>[13,14]</sup>、运移过程中油气性质的改变<sup>[15]</sup>,定性模拟油气沿不同类型的输导体

系、不同构造样式运聚成藏过程<sup>[16,17]</sup>,岩性油气藏成藏机理和非常规油气运聚机理等<sup>[18-21]</sup>。

## 1 主要研究进展

### 1.1 实验模型

实验模型是油气二次运移和聚集实验模拟研究的主体,根据模型的形状和尺寸,大体可以分为微观模型、一维模型、二维模型和三维模型<sup>[22]</sup>。微观模型是采用光化学刻蚀或铸体工艺,在平面玻璃上制成,包括球粒充填模型、单孔模型、网络模型和岩石模型<sup>[2,16]</sup>,具有储集层孔隙结构的基本特征,润湿性及孔隙表面的粗糙度均可控制,主要用于研究孔隙尺度下油气运移机理。一维模型多为管状,按制作材料分为玻璃管模型和金属管模型,玻璃管模型实验条件为低温低压,尽管和地下实际地质条件有差异,但能直观地实现浮力驱动油气运移,因此在油气二次运移机理研究中有着不可替代的作用<sup>[14]</sup>。金属管模型的形状有直管和弯管(模拟背斜或向斜)两种类型,实验条件是高温高压、真实介质或松散砂样介质,通过局部耐高温的“可视窗”、间接的检测手段、中途取样或进出模型流体量的变化

来了解油气运移发生的过程,主要用于煤层气吸附特征、油气运移过程地球化学特征的改变、油气沿不同介质运移速率等方面的研究<sup>[15,21]</sup>。二维和三维模型没有严格的定义,一般从尺寸上界定,模型的高度与宽度的比值大于10为二维模型,小于10为三维模型。二维和三维模型有可视化和不可视化两种模型,可视化模型为玻璃箱体或带可视化窗的金属箱体,均可以通过直接观察来了解油气的运移过程,只能在低温低压条件下开展实验模拟。不可视化模型为金属箱体,可以模拟油藏温度压力条件下油气运移过程,但只能通过间接的检测手段来了解。我国学者特别青睐于这种大尺度的二维和三维模型,在岩性油气藏成藏机理<sup>[18]</sup>、油气沿不同类型的输导体、不同构造样式运聚成藏过程<sup>[16,17]</sup>以及非常规油气聚集机理方面做了大量的工作。

从实验模型构建的过程来看,一是为了解决多种类型复杂的运移和聚集的机理、过程及其影响因素,实验模型实现了多元化;二是为了模拟实际的地质条件,实验条件从低温低压向高温高压条件发展,金属体实验模型越来越多。

## 1.2 研究成果

实验模拟研究成果与实际地质条件分析的结合,揭示了油气二次运移和聚集的机理,在一定程度上也推动了油气勘探的深入。

### 1.2.1 浮力驱动油气在砂体中的运移规律

油气在输导层内的二次运移是一个极不均一的过程<sup>[23]</sup>,油气二次运移只通过局限的优势通道进行,Weidner<sup>[10]</sup>和 Meakin<sup>[24]</sup>利用微观模型做了基于浮力条件下油气运移模拟实验,在机理上证实石油发生优势运移是一种典型的逾渗现象,在输导层物性确定的情况下,单纯的浮力和较小的驱动力是油气形成优势二次运移路径的重要因素,油水密度差、界面张力、润湿角和颗粒大小影响着优势运移路径的形态<sup>[14]</sup>。实验模拟和数值模拟结合证实<sup>[11,12,23,25]</sup>,运移路径的体积大约只占导层通道的1%—10%。

实验模拟证实了优势通道的存在,使人们在油气勘探实践中建立一个理念,即只有位于优势通道

(路径)上的圈闭才有捕获油气的机会,对油气分布规律的认识提到一个新的高度。但在盆地尺度上预测优势运移路径还是个难题,因为影响优势路径形成的因素很多,概括起来主要有<sup>[26—29]</sup>:运移动力、砂体分布和物性特征、输导层顶面或封闭层底面的形态(构造脊线)、断层和水动力等,如何综合考虑这些因素,合理地预测油气运移路径,实验模拟也应进一步研究<sup>[30]</sup>。

### 1.2.2 压力驱动油气在不同类型输导体中的运移规律

含油气盆地中主要的输导体为砂体、不整合面、断层及其在空间上的多种组合<sup>[1]</sup>,开展油气沿输导层运移规律的砂箱实验,采用注入泵注油,主要还是压力驱动,油气运移方式是达西流。

早在1988年Lenormand利用微观模型研究了孔隙介质中非混溶驱替过程,将毛细管力和粘性力对油气运移的影响概括为三种现象:粘性指进、毛细指进、稳定驱替<sup>[31]</sup>,基本涵盖了压力驱动油气沿砂体运移的模式。但不同类型的砂体输导油气的特征存在着差异<sup>[16,32]</sup>,油气沿均质砂层运移具有两个主要特点:一是油垂向运移时,油的运移通道比较宽,油发生大量的弥散作用,散失量大;二是当油在砂层进行侧向运移时,运移通道相对较窄,限于砂层顶部较小的区域,散失量较小,运移效率较高。层间非均质性对砂层的油水分布和含油饱和度起着至关重要的作用,正韵律砂层和反韵律砂层油气的运移方向、路径和通道主要受油气充注方向、充注速率和渗透率级差等条件的影响。

断裂带内部结构和活动行为是复杂的,影响油气沿断裂带运移规律的因素很多,包括断层性质、活动方式、驱动力、断层面的空间几何形态、填充物特征、断移地层的特征、与围岩的相对渗透性及断层的组合方式等<sup>[33]</sup>,这些因素是相互联系、相互制约的,目前实验模拟只停留在单因素理性模式上。通过实验模拟证实了四个问题:1) 油气在稳态充注和幕式充注条件下,运移和聚集的规律不同<sup>[34]</sup>;2) 断层面形态控制着油气沿断层运移的方向及聚集量的大小<sup>[35]</sup>;3) 断裂带填充物的性质及导致的渗

透性变化是决定断层输导能力和封闭性的关键因素,实验中通过改变断裂带中的泥质含量来控制断裂带和围岩的相对渗透性,得到实验室条件下断裂带封闭油和天然气的泥质含量临界值<sup>[36]</sup>;4)不同构造样式断层组合方式决定圈闭有无油气充注的关键因素<sup>[17]</sup>。

### 1.2.3 岩性油气藏运聚成藏机理实验模拟

陈章明教授是我国乃至世界最早开展砂岩透镜体成藏机理实验模拟的<sup>[18]</sup>,实验箱体首次实现可视化,同时在箱体中埋放电极,通过电阻率变化检测油气的运移过程。实验初步证实了三种模式的岩性油气藏成藏机理:即自生自储式、下生上储式和上生下储式。源岩层内的凸镜状砂岩油藏形成机理,是毛细管作用与源岩排烃压力促使油水交替成藏,孤立的砂岩体只有在接触或被烃源岩包裹,并且生油气源岩进入供烃门限的前提下才能成藏,在围岩具备供烃能力的情况下,孤立砂体能否聚集成藏取决它是否进入了聚烃门限或聚烃的临界地质条件<sup>[37]</sup>,由此发展为“三元”复合成藏理论<sup>[38]</sup>。源岩上凸镜体砂岩在有缝隙沟通源岩与砂体时亦由上述机理形成油藏<sup>[18]</sup>,渗透率级差极大影响砂体的含油气性<sup>[39]</sup>。以断层为主要通道,石油可跨越泥岩层而向下伏岩性圈闭中运移成藏,烃源岩层超压、砂体和断裂有利的配合是上生下储岩性油气藏成藏的关键因素。实验模拟和实际地质分析结合,丰富了岩性油气藏成藏理论,极大推动了济阳坳陷岩性油气藏勘探的进程,到2002累计探明岩性油气藏储量是 $60\,244 \times 10^4$ 吨,占济阳坳陷总探明储量的17%<sup>[40]</sup>。

### 1.2.4 非常规油气运聚成藏实验模拟

早在20世纪60年代,国外已有不少学者测定了烃类气体在水中的溶解度<sup>[41]</sup>,并提出水溶气藏形成的可能性。实验模拟表明<sup>[42]</sup>,天然气在地层水中的溶解主要存在两种机理:一种是天然气分子与水分子作用形成水合分子;另一种是天然气分子填充在水分子的间隙中。无论是哪一种,天然气的溶解度都会受到温度、压力和矿化度变化的影响。水溶相天然气在运移的过程中,由于地质条件的改变(如沿断层垂向运移)或由于地壳抬升,使含水层隆

起或地层水基准面区域性或局部性降低和温度、压力逐渐降低,导致被地层水溶解的天然气由未饱和和一饱和一过饱和而释放出来成为游离气,并在有利的圈闭中(低势区)聚集成水溶气藏<sup>[43-45]</sup>。只有了解了水溶气藏的特征及背景,才能进一步探索水溶气藏的成藏条件。通过对实际岩芯样品进行高压水溶气运移成藏的实验模拟,研究水溶作用对天然气运移指标产生的影响,认为水溶气组分、甲烷和乙烷碳氢同位素、 $C_{2+}$ /总烃、 $iC_4/nC_4$ 、苯和甲苯等地球化学参数对水溶气气藏的识别和油气运移的研究均具有重要的参考价值<sup>[20,46,47]</sup>。将这些指标与实际的地质背景相结合,分析水溶气成藏特征和富集规律,将是今后天然气研究的一个重要方向。

深盆气藏是特殊机理形成的一种储层致密的天然气藏,其非常规的特征表现为:气水倒置,水封闭气成藏,成藏机理概括为力平衡和物质平衡<sup>[48]</sup>,成藏过程中存在一个临界地质门限,这一门限可以用储气砂层的临界孔喉半径表达,常温常压下的实验模拟实验证明<sup>[19]</sup>:单一微细玻璃管直径大于0.3cm时,水不能封气而形成“深盆气藏”;漏斗状玻璃管的水封气门限为0.102—0.359cm,且随夹角增大而减小、随注气速率增加而增加;单一填砂粗玻璃管的封气门限取决于所装砂粒粒径的大小,粒径小于0.05—0.1mm的砂粒能够封气。已发现的所有深盆气藏的孔隙度均小于12%和渗透率均小于 $0.987 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。深盆气高产富集区块称为“甜点”,实验模拟表明,高产富集区块形成演化过程经历深盆气初期充注阶段、临界接触时刻、“甜点”充气阶段、两气相连时刻、气藏扩展和调整共溶6个阶段,从而建立了实验条件下较完整的深盆气高孔渗富气区成藏序列和成因机理模式<sup>[49]</sup>。

煤层气不同于常规天然气的特征是吸附气,煤层气成藏模拟主要是模拟地层温度、压力、地层流体介质下煤层气富集成藏过程,分析煤层气运聚规律,建立煤层气成藏模式<sup>[21]</sup>。

## 2 存在的主要问题

### 2.1 实验条件和地质条件的差异

实验条件和地质条件的差异使实验结果无法

应用到地下,表现在四个方面:(1)受模型尺寸的限制,实验模拟只能根据“相似性原理”构建“微缩模型”,造成原始信息大量丢失;(2)实验材料主要为实际岩心和散砂,散砂与固结的岩石相比尽管存在物性的差异,仍能体现相对的渗透性,装砂过程中易于出现裂缝,改变油气的运移规律,实验结果的可信度大打折扣;(3)温压条件与检测手段之间的矛盾使实验条件无法逼近地质条件,可视化实验装置不需要检测手段,只能在低温低压条件开展实验,不可视化的实验装置能够开展地层温压条件的实验模拟,但目前检测手段无法实现油气运移过程的动态观察。(4)地质现象的本质不清,构建的实验模型凭空设想,实验结果的可信度较低。突出的问题是断裂模型的构建,基于一个模糊的概念“断裂带的物性高于围岩”,设计了不同的介质模型<sup>[17,50]</sup>,不同介质不同的动力,油气沿断裂的运移规律不同,究竟哪个符合地质条件还是个未知数。

正是实验条件与地下地质条件相差甚远,许多实验结果反推地下未实验区的可靠性大打折扣,无法指导油气勘探。

## 2.2 含油气饱和度的检测技术是模拟实验的障碍

不可视化的金属体模型中用于反映含油饱和度变化的检测技术,目前主要有: $\gamma$ 射线技术、超声波技术、核磁共振技术、电阻率检测技术和电容检测技术<sup>[14,18,37,51,52]</sup>。 $\gamma$ 射线技术和超声波技术准确性较高,但实验设备昂贵,设计难度大,主要适用于一维模型。核磁共振技术准确性也较高,但核磁共振仪很难与砂箱模型匹配在一起,主要用于一维管状和真实岩心含油饱和度的检测。通用的是电阻率检测技术,具有简单易行的特点,但准确率不高,同时大量电极放于箱内,装载模型麻烦,还无法直观地显示油气运移过程。对于气体检测更难,目前主要有两种方法:压力反映气体运移过程的方法和化学方法<sup>[17]</sup>,第一种方法一般适用于低温低压条件,温度压力的升高这种变化不明显,同时箱体封闭气体的能力减弱。第二种办法是在散砂中加入酚酞,通过注入氨气观察油气的运移路径,但氨气水溶性强,同烃气性质必定存在差异。目前各种方

法均不能经济而准确地使用,极大限制了真实地层条件下油气二次运移和聚集实验模拟的开展,使得可视化实验装置一直占据着主导地位。

## 2.3 边界效应和设备微渗漏是制约实验结果可靠性的两大因素

边界效应是可视化实验装置突出的问题,是指松散的砂岩与玻璃板之间的有效缝隙对油气运移过程及排水的影响,通常会出现三种明显的情况:(1)注入量较大时,造成油从玻璃板与散砂之间渗出,是实验失败的主要原因之一;(2)砂岩中的水受油驱动从二者之间的缝隙排出,由于不易观察,易造成假象,认为水是从其它通道排出,聚油排水机理的认识“误入歧途”,在砂岩透镜体聚油排水机理的实验中是常见的;(3)成为气体逃逸的通道,天然气运移规律改变。边界效应只能尽量减小却不能彻底克服。

设备微渗漏指设备的连接口及封闭螺丝附近存在的微细空间,对高温高压条件下气体的封闭和运移规律影响较大,这是目前我国很少在砂箱模型中开展天然气二次运移研究的主要原因。

## 3 未来发展及可行性分析

### 3.1 实验设备和技术的发展

油气二次运移和聚集实验模拟实验装置主要由模型系统、注入系统、计量系统(包括回压系统)、检测系统和控制系统五个主要构成部分。发展方向为模块化、全自动化。模块化要求五个主要构成部分各自为一个独立的系统,便于不同的模型类型共享其它四个系统,达到经济使用的目的。全自动化是指模型装载完毕后,一切操作可由计算机控制,要实现这个目标,两个关键的实验技术必须解决:(1)含油气饱和度的检测技术:目前通用的电阻率检测含油饱和度技术和压力反映天然气运移技术准确性较低,可操作性差,研发高精度、易操作的含油气饱和度检测技术可能对二次运移和聚集实验模拟具有划时代的意义。(2)自动检测、成图技术:无论哪种检测含油气饱和度的技术,系统均不

是直接检测到含油气饱和度值,而是检测电阻率值,实验员根据检测到的数据去判断油气的运移过程,因此需要通过软件系统将检测到的数据转化为含油气饱和度,计算机自动生成饱和度“云图”,便于时时监控油气的运移过程,这在煤炭气化实验中已经实施。

### 3.2 研究内容的深入及可行性分析

过去实验模拟集中于油气二次运移和聚集机理、控制因素及其过程描述三个方面,基本是“验证不确定的地质现象”的过程,即地质分析可能的现象要从实验中得到证据,进一步去指导勘探,因此实验模拟紧随勘探的主流。目前我国油气勘探的目标主要集中在四个方面:东部裂谷盆地隐蔽油气藏、中西部前陆盆地油气藏、叠合盆地油气藏和非常规油气藏。映射到油气二次运移和聚集实验模拟上,可能有四个方向:岩性油气藏成藏机理、断裂控藏、多期构造运动对早期油气的改造作用和非常规油气藏运聚机理<sup>[53-65]</sup>。

#### 3.2.1 岩性油气藏成藏机理实验模拟

按着源—藏关系,岩性油气藏有四个领域:即自生自储式、下生上储式、上生下储式和旁生侧储式,各领域成藏特征不同,实验模拟解决的问题不同。

自生自储式的关键是成藏动力和相应的聚油排水机理问题,毛细管力和压力是成藏的主要动力,存在的主要问题:一是实验多用二维模型开展,排水受边界效应影响较大;二是实验过程均有注油和加压的过程,无法分清毛细管力和压力哪个是主要动力;三是多用散砂模拟透镜体,装载模型易出现裂缝,无法分清是裂缝输导油气并排出水,还是通过孔隙油水自由交替成藏的,不能正确解释在没有断裂和裂缝发育的岩性圈闭,油气是否能够成藏的问题。因此正确解决动力和聚油排水机理问题,必须利用三维模型和人造岩心开展实验模拟,以便消除边界效应和裂缝带来的各种麻烦。

下生上储和上生下储式岩性圈闭成藏的关键条件是断裂沟通源与藏,因此砂体与断裂之间的配置关系对岩性圈闭成藏影响较大,分析断层在不同

驱动力作用下成为有效输导通道的条件和影响断裂输导能力的因素,不仅对于断裂控藏机理深入研究具有理论的意义,同时对预测断层—岩性圈闭的含油气性具有现实意义。同时与数值模拟结合<sup>[66]</sup>,进一步探索复杂地质条件下油气沿断裂的运移和聚集规律。

旁生侧储式岩性油气藏成藏的关键因素是只有位于油气运移路径上的圈闭才能成藏。如何预测油气的运移路径成为目前实验模拟的主要任务,微观实验模拟证实了油气优势运移路径的存在,利用大尺度实验模型,从宏观上开展影响油气运移路径的因素和运移过程地球化学参数变化的实验模拟,结合实际地质条件和地球化学分析去预测油气优势运移路径。

#### 3.2.2 晚期构造运动对早期油气的改造作用实验模拟

叠合盆地及中西部前陆盆地均具有多期构造运动的特征,晚期的构造运动对早期聚集的油气具有重要的改造作用<sup>[67-70]</sup>,研究依然停留在地质分析层次上,实验室如何证实这个过程,对深入探讨叠合盆地和前陆盆地油气运聚成藏过程具有重要的意义。要实现这种实验模拟,仅靠传统的静态的实验模型是不够的,因为油气多期成藏,运移过程和构造运动同时发生,需要建立一种与构造模拟实验类似且具有封闭性的装置,模拟构造形成过程中油气运移过程。

#### 3.2.3 非常规油气藏运聚成藏机理实验模拟

目前非常规油气成藏实验模拟集中于以下几点:深盆气主要考虑成藏门限<sup>[19]</sup>;水溶气主要研究有别于常规天然气的地球化学特征,以此去判识水溶气藏的存在<sup>[20]</sup>;煤层气主要研究吸附特征及其影响因素<sup>[21]</sup>。这些研究均为非常规天然气富集规律的研究奠定了基础,但影响非常规油气富集的因素很多,实验模拟对未来寻找非常规油气藏具有重要的意义。同时页岩气、向斜中的油气藏、生物气等运聚成藏机理实验模拟研究均有着广阔的前景<sup>[71-81]</sup>。

## 4 结论

随着实验模型多样化,油气运聚成藏实验模拟涉及的内容越来越多,在岩性油气藏成藏机理、油气沿不同类型输导体运移规律、非常规油气藏运聚成藏机理等多方面取得重要的成果。检测手段、边界效应和设备微渗漏是目前实验模拟进展的严重障碍,加之许多地质现象在实验模型中构建的不合理,使许多实验结果难以反推到地下。因此检测手段的改进、边界效应影响的减小和自动成图技术的发展是未来实验装置设计的发展方向。

未来油气二次运移和聚集实验模拟的四个方向:岩性油气藏成藏机理、断裂控藏、晚期构造运动对早期油气的改造作用和非常规油气藏运聚成藏机理,必须从实际地质解剖和设备本身出发,论证实验的可行性,保证实验结果能够应用于地下条件。

### 参 考 文 献

- 李明诚. 石油与天然气运移(第三版). 北京:石油工业出版社,2004
- 金之钧,张发强. 油气运移研究现状及主要进展. 石油与天然气地质,2005;26(3):263—270
- Emmons W H. Experiments on accumulation of oil sands. AAPG Bull, 1921;5:103—104
- Illing V C. The migration of oil and natural gas. Jour nst Petrol Technol,1933;19(4):229—260
- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. AAPG Bull,1952;37(8):1954—2026
- Berg R R. Capillary pressure in stratigraphic traps. AAPG Bull,1975;59(6):939—959
- Tiratsoo E N. Petroleum geology. New York: McGraw - Hill, 1951; 1—449
- Chatenever A, Calhoun J C. Visual examinations of fluid behavior in porous media ( Part I ) . AIME Petroleum Transaction, 1952; 195: 149—156
- Chatzis I, Dullien F A L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets; theory vs. experiments. Journal of Colloids and Interface Science, 1983;91(1):199—222
- Weidner D E, Schwartz L W. An experimental and numerical investigation of buoyancy-driven two-phase displacement. Phys Fluids A, 1991;3(9):2076—2080
- Dembicki H J, Anderson M J. Secondary migration of oil; experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits. AAPG Bull,1989;73(8):1018—1021
- Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I. An experimental study of secondary oil migration. AAPG Bull,1992;76(5):638—650
- Tokunaga T, Mogi K, Matsubara O. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns; an experimental study. AAPG Bull,2000;84(1):65—74
- 张发强,罗晓容,苗胜,等. 石油二次运移模式及其影响因素. 石油实验地质,2003;25(1):69—75
- 史基安,邓津辉,曾凡刚,等. 石油二次运移物理模拟及运移特征分析. 沉积学报,2002;20(2):333—338
- 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
- 付晓飞,杨勉,吕延防,等. 库车坳陷典型构造天然气运移过程物理模拟. 石油学报,2004;25(5):38—43
- 陈章明,张云峰,韩有信,等. 凸镜状砂体聚油模拟实验及其机理分析. 石油实验地质,1998;20(2):166—170
- 庞雄奇,金之钧,姜振学,等. 深盆气成藏门限及其物理模拟实验. 天然气地球科学,2003;14(3):207—214
- 刘朝露,李剑,方家虎,等. 水溶气运移成藏物理模拟实验技术. 天然气地球科学,2004;15(1):32—36
- 焦贵浩,王红岩,刘洪林,等. 物理模拟技术在煤层气成藏研究中的应用. 天然气工业,2005;25(1):47—50
- 曾溅辉,金之钧,王伟华. 油气二次运移和聚集实验模拟研究现状与发展. 石油大学学报,1997;21(5):94—97
- Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. AAPG Bull, 1979; 63(5):723—760
- Meakin P, Wagner G, Vedvik A. Invasion percolation and secondary migration; experiments and simulations. Marine and Petroleum Geology,2000;17:777—795
- Aker E, Maloy K J. Dynamics of stable viscous displacement in porous media. Physical Review E,2000;61(3):2936—2946
- Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration; a three-dimensional model. AAPG Bull,1997;81(8):1451—1481
- 郝芳,邹华耀,姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展. 地学前缘,2000;7(3):11—21
- 向才富,夏斌,解习农,等. 松辽盆地西部斜坡带油气运移主输导通道. 石油与天然气地质,2004;25(2):205—215
- Rhea L, Person M, Marsily G D, et al. Geostatistical models of secondary oil migration within heterogeneous carrier beds; a theoretical example. AAPG Bull,1994;78:1679—1691
- 姜振学,庞雄奇,曾溅辉,等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究. 地学前缘,2005;12(4):507—516

- 31 Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical Models and Experiments on Immiscible Displacements in Porous Media, *Fluid Mech*, 1988; 189:165—187
- 32 曾溅辉,王红玉. 层间非均质砂层石油运移和聚集模拟实验研究. *石油大学学报*, 2000, 24(4): 108—111
- 33 吕延防,付广,高大岭. 油气藏封盖研究. 北京:石油工业出版社, 1996
- 34 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. *地球科学*, 1999; 24(2): 193—196
- 35 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. *中国海洋大学学报*, 2005; 35(2): 245—248
- 36 付晓飞,吕延防,付广,等. 逆掩断层垂向封闭性定量模拟实验及评价方法. *地质科学*, 2004; 39(2): 223—233
- 37 陈冬霞,庞雄奇,姜振学,等. 砂岩透镜体成藏门限物理模拟实验. *科学技术与工程*, 2004; 4(6): 458—461
- 38 庞雄奇,陈冬霞,李丕龙,等. 砂岩透镜体成藏门限及控油气作用机理. *石油学报*, 2003; 24(3): 38—45
- 39 邱楠生,万晓龙,金之钧,等. 渗透率级差对透镜状砂体成藏的控制模式. *石油勘探与开发*, 2003; 30(3): 48—52
- 40 曾溅辉,张善文,邱楠生,等. 济阳坳陷砂岩透镜体油气藏充满度大小及其主控因素. *地球科学*, 2002; 27(6): 729—732
- 41 McAuliffe C. Solubility in water of C<sub>1</sub>—C<sub>9</sub> hydrocarbons. *Nature*, 1963; 200:1092—1093
- 42 付晓泰,王振平. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程. *中国科学(B) 辑*, 1996; 126(2): 124—130
- 43 Kortsenshtejn V N. The influence of periodical freezing on the formation of the uniuue gas accumulation in the north of the Tyumen district. *Doklady Akadem ii Nauk SSSR*, 1970; 191(6): 1366—1369
- 44 Zorking L M, Stadnik E V. Unique features of gas saturation of formation waters I: Oil and gas bearing basins in relation to hydrocarbon generation and formation of hydrocarbon accumulations. *Izvestnik Vyshykh Uchebnykh Zaveden ii Geolog ii IRazvedk i*, 1965; 6: 85—99
- 45 Zorking L M. Carbon isotope composition of methane in free gas and in gas dissolved in water from the gas fields Urengoj and Medvezhe. *Doklady Akadem ii Nauk SSSR*, 1984; 276(5): 1221—1223
- 46 卢家烂,傅家谟. 不同条件下天然气运移影响的模拟实验研究. *石油与天然气地质*, 1991; 12(2): 153—160
- 47 陈安定,李剑锋. 天然气运移的地球化学指标研究. *天然气地球科学*, 1994; 5(24): 38—67
- 48 庞雄奇,方 辉,汤良杰,等. 深盆气分布范围理论预测模型与应用实例. *深盆气研究*. 北京:石油工业出版社, 2001
- 49 马新华,王 涛,庞雄奇,等. 深盆气高孔渗富气区块成因机理物理模拟实验与解析. *石油实验地质*, 2004; 26(4): 383—388
- 50 张 洪,庞雄奇,姜振学,等. 物理模拟在天然气成藏研究中的应用. *新疆石油地质*, 2004; 25(4): 429—430
- 51 Selle O M, *et al.* Experimental verification of low-dip, low-rate two-phase (Secondary) migration by means of  $\gamma$ -ray Absorbition. In: *Geofluids* 93 (Ed. by J. Parnell, A H Ruffell and N R Moles): 72—75
- 52 Thomas M M, Ciouse J A. Scaled Physical Model of Secondary Oil Migration. *AAPG Bull*, 1995; 79(1): 19—29
- 53 江 科. 隐蔽油气藏. *江汉石油科技*, 2009; 20(1): 34—37
- 54 季 敏,谭丽娟,刘 斌. 隐蔽油气藏研究的现状和发展趋势. *断块油气田*, 2009; 16(4): 45—47
- 55 庞雄奇,陈冬霞,张 俊. 隐蔽油气藏成藏机理研究现状及展望. *海相油气地质*, 2007; 12(1): 56—62
- 56 宋 岩,赵孟军,李本亮,等. 我国中西部前陆盆地油气地质特征及勘探战略. *中国工程科学*, 2010; 12(5): 39—45
- 57 李本亮,魏国齐,贾承造. 中国前陆盆地构造地质特征综述与油气勘探. *地学前缘*, 2009; 16(4): 190—202
- 58 刘和甫. 前陆盆地类型及褶皱—冲断层样式. *地学前缘*, 1995; 2(3—4): 59—68
- 59 罗志立. 试论中国型(C—型)冲断带及其油气勘探. *石油与天然气地质*, 1984; 5(4): 315—324
- 60 宋 岩,魏国齐,赵孟军,等. 中国中西部前陆盆地石油地质特征. 北京:科学出版社, 2008
- 61 贾承造. 中国喜马拉雅构造运动的陆内变形特征与油气矿藏富集. *地学前缘*, 2007; 14(4): 96—104
- 62 吕延防,沙子萱,付晓飞,等. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用. *石油学报*, 2007; 28(5): 34—38
- 63 罗 群. 断裂控烃理论与实践—断裂活动与油气聚集研究. 武汉:中国地质大学出版社, 1998; 6—33
- 64 吴孔友,查 明. 柴达木盆地北部块断带断层控烃作用. *石油学报*, 2007; 28(3): 17—22
- 65 吕延防,付 广. 断层封闭性研究. 北京:石油工业出版社, 2002
- 66 Stephan K, Matth? i, Stephen G, Roberts. The influence of fault permeability on single-phase fluid flow near fault - sand intersections: Results from steady-state high-resolution models of pressure-driven fluid flow. *AAPG Bull*, 1996; 80(11): 1763—1779
- 67 戴金星,陈践发,钟宁宁,等. 中国大气田及其气源. 北京:科学出版社, 2003
- 68 戴金星,卫延召,赵靖舟. 晚期成藏对大气田形成的重大作用. *中国地质*, 2003; 30(1): 10—19
- 69 王庭斌. 新近纪以来的构造运动是中国气藏形成的重要因素. *地质论评*, 2004; 50(1): 33—42
- 70 康竹林,傅诚德,崔淑芬,等. 中国大中型气田概论. 北京:石油工业出版社, 2000
- 71 张金川,金之均,袁明生. 页岩气成藏机理和分布. *天然气工业*, 2004; 24(7): 15—18
- 72 Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum sys-

- tems. AAPG Bulletin, 2002; 86 (11): 1851—1852
- 73 Rose P R · Possible basin centered gas accumulation, Roton Basin, Southern Colorado. Oil & Gas Journal, 1984; 82 (10): 190—197
- 74 Law B E, Dickinson W W · Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulation in low permeability reservoirs. AAPG Bulletin, 1985; 69 (8): 1295—1304
- 75 Spencer C W · Review of characteristics of low permeability gas reservoirs in Western United States. AAPG Bulletin, 1989; 73 (5): 613—629
- 76 张金川. 深盆地(根缘气)研究进展. 现代地质, 2003; 17 (2): 210
- 77 张金川. 从“深盆地”到“根缘气”. 天然气工业, 2006; 26 (2): 46—48
- 78 Kuuskraa V A. Tight sands gas as U. S. gas source. Oil & Gas Journal, 1996; 94 (12): 102—107
- 79 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 深盆地成藏门限及其物理模拟试验. 天然气地球科学, 2003; 14 (3): 207—214
- 80 张金亮, 张金功, 洪峰, 等. 鄂尔多斯盆地二叠统深盆地气藏形成的地质条件. 天然气地球科学, 2005; 16 (4): 526—534
- 81 胡宝林, 车遥, 杨起等. 鄂尔多斯盆地煤储层低温氮等温吸附特征分析. 煤田地质与勘探, 2003; 31 (2): 20—23

## Advances in Experimental Simulation of Oil and Gas Migration and Accumulation Mechanism

LI Xian-li

(College of Electronic Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China)

**[Abstract]** Physical simulation is the development beginning and one of the important ways in depicting the mechanism and process of oil and gas migration and accumulation. With more kinds of experimental models, more contents are included in physical simulation. Because of the influence of many factors, such as detecting means, boundary effects, delicacy seepage of instruments, irrational geology phenomena in the experimental model, many experimental results couldn't apply in subsurface conditions. So it's the main future aspect that we better the detecting means and decrease the boundary effects and developing the automatic forming charts. In future, physical simulation main thesis include many aspects: such as lithological reservoir, mechanism of faults' controlling the migration and accumulation of oil and gas, Later tectonic movement reconstructing the early oil reservoir, mechanism of migration and accumulation of unconventional oil and gas. Based on the actual reservoir analysis, we should discuss the experimental feasibility so that it was applied in the subsurface conditions.

**[Key words]** migration      accumulation      physical simulation      experimental model