

文章编号:1672-9854(2008)-03-0011-06

## 非稳态成藏理论探索与实践

孙龙德<sup>1</sup>, 江同文<sup>1</sup>, 徐汉林<sup>1,2</sup>, 单家增<sup>3</sup>

(1 中国石油塔里木油田公司; 2 中国石油勘探开发研究院)

(3 中国科学院地质与地球物理研究所)



孙龙德

**摘要** 将油气从生成到散失全过程作为时间域内一个连续而统一的系统,并将其分为前油藏、油藏及后油藏等三个阶段,定义了非稳态油气藏的概念,建立了非稳态油气成藏理论框架。非稳态油气藏是指油气处于充注或调整过程之中、尚未形成统一的油气水界面、油气水处于动态平衡状态下的油气富集单元,主要特征表现为在相互连通的储集体内出现多个或大幅度倾斜的油气水界面,或者出现油气水关系侧向倒置等特殊现象。对塔里木盆地哈得逊油田东河砂岩油藏进行了物理模拟实验,探讨了后油藏阶段油气的富集类型,拓宽了油气勘探开发对象。将非稳态油气成藏理论应用于哈得逊地区和塔中4油田的滚动勘探开发实践,后油藏的概念得到了勘探的证实,取得了良好的勘探效果。非稳态油气成藏理论为塔里木盆地油藏滚动勘探开发奠定了新的理论基础。

**关键词** 油气藏形成;非稳态油气藏;油气成藏理论;倾斜油气水界面;塔里木盆地

**中图分类号**:TE112.3 **文献标识码**:A

**孙龙德** 1962年生,教授级高级工程师。1983年华东石油学院毕业,2000年获中国科学院理学博士学位。享受国务院政府特殊津贴。现为中国石油天然气股份公司副总裁。国内外发表论文20余篇,先后获得铁人科技成就铜奖、国家科技进步二等奖各1项,省部级科技成果奖6项,其中一等奖3项。通讯地址:100011 北京市东城区安德路16号

现有的石油地质学理论认为,油气藏是油气在单一圈闭的聚集,具有统一的压力系统和油(气)水界面<sup>[1-2]</sup>,即同一个油气藏中的油气水界面是统一的、相对稳定的(本文称之为稳态油藏)。这意味着在油气藏评价过程中,只要从一口油气井中确定了油气水界面,整个油气藏的油气水界面也就被确定。塔里木盆地多年的勘探开发实践却表明,诸多油气藏(主要为油藏)的油水关系十分复杂。例如,塔中4油田石炭系东河砂岩油藏中存在着多个油水界面;哈得逊油田东河砂岩油藏则存在着大幅度倾斜的油水界面,倾斜幅度至少大于120m;轮古油田奥陶系碳酸盐岩油藏在轮古东地区甚至发生了油气的侧向倒置,即原油位于油气藏的顶部而天然气则处于原油的侧下部。一个油气藏内存在多个油水界面、出现倾斜油水界面或油气倒置的现象,采用经典的石油地质学理论是难以解释的,这种异常现象在国内外文献中也鲜有报道。笔者根据塔里木盆地勘探开发实

践成果,将油气从生成、聚集成藏,再到油藏调整、改造直至枯竭,作为时间域内一个连续、统一的系统进行研究,初步提出非稳态油气成藏的理论框架,抛砖引玉,以期引起同行的重视,并共同进行更深入的研究,以进一步完善现有的石油地质学理论。

### 1 非稳态成藏理论构想

前人对油气成藏进行了大量的研究,取得了丰富的成果,构成了现代石油地质学的理论基础,其研究的重点主要集中在油气的生成、运移、成藏机制,以及油气藏的分类及特征等诸多方面,但对油气成藏以后的演化研究非常薄弱。本文将油气从生成到油藏枯竭作为在时间域内一个连续而统一的系统进行研究,探讨油气从生成、运移、聚集、成藏、破坏、调整到油藏枯竭的全过程。油气从烃源岩生成、排出后,在聚集过程中和尚未达到平衡形成稳定的油气藏之前,是在油—气—水系统自身的内动力(主要是浮力)的作用下发

收稿日期:2008-05-20

生自然运移和动态聚集。只有当圈闭内的油、气、水达到相对平衡时才形成经典的油气藏。但油气藏的形成并不是成藏演化过程的终点和结束,按照事物发展的普遍规律,油藏形成后随着时间的推移必然会消亡,油气聚集量也会随着时间和外界条件的改变而发生变化,最后只有少量油气残留地下。如遭遇后期构造运动的影响,导致圈闭条件(如溢出点)的改变,油气藏内的油—气—水动态平衡条件被破坏,圈闭内的油气在内动力或外力作用下发生缓慢的自然溢散,并可能在合适的新的圈闭条件下再聚集。最典型的实例就是,油气藏发现以后在人为的外力作用(如油气的开采)下,油气水的平衡被打破,油气发生快速运移,最后只有部分残余油残留地下储集层。因此油气藏从形成到最后的衰竭是一个连续的动力过程,这一过程是阶段性和连续性的对立统一,在此期间油气藏内的动力机制和主要矛盾也发生相应的变化,从而形成了具有不同特征的油气聚集形式。依据不同阶段的主控因素及其油气富集形式,笔者将油气生成、聚集再到散失的全过程分为前油藏阶段、油藏阶段以及后油藏阶段等三个演化阶段(图1)。

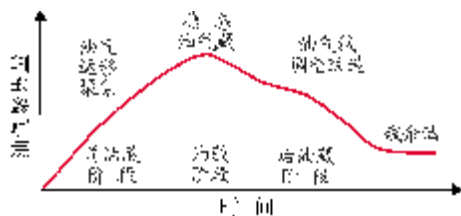


图1 油气成藏演化阶段示意图

为了便于讨论,笔者将经典石油地质学中定义的油气藏称为稳态油气藏(一般具有统一的油气水界面),而将处于油气充注或调整过程之中、尚未形成统一的油气水界面、油气水处于动态调整状态下的油气聚集称为非稳态油气藏。非稳态油气藏的主要特征是在相互连通的储集体内,出现油水界面大幅度倾斜或油—气—水关系倒置。以石油的运移、聚集、破坏过程为例,图1中所示的前油藏阶段是指油气从烃源岩中生成并向圈闭中运移、聚集但尚未达到平衡而形成稳态油藏之前的阶段,该阶段油气处于充注过程中,浮力流沿优势运移通道呈断续状流动,并优先在有利储层中发生动态聚集(不完全受圈闭控制),形成非稳态的前油藏,其油气水关系随时间发生变化。随着油气的进一步聚集,当圈闭中的油气水达到相对平衡形成统一的油水界面时,油气演化

进入油气藏阶段,也就是经典石油地质学中定义的油气藏。油气藏形成以后由于构造运动的多期性和复杂性以及其它地质条件的变化,圈闭等条件也会发生变化,油气藏内的动力平衡机制被打破,油气进入后油藏阶段,该阶段可能比油气成藏阶段持续时间更长,并且整体表现为油气散失,最后只有部分油残留原地下储集层之中。在这一漫长的后油藏阶段演化过程中,油气水关系随时间而变化(非稳态性)。笔者将处于后油藏阶段、含油饱和度介于原始含油饱和度和残余油饱和度之间的油气富集单元称为后油藏。

从上述分析可知,稳态油藏仅是油气聚集的一种存在形式,而且这种形式在整个油气聚集演化过程中的存在时间相对比较短暂。

## 2 后油藏过程物理模拟实验研究

前油藏阶段油气的生成、运移和聚集过程,油藏阶段油气藏的类型及其基本特征,是经典石油地质学的基石。但对后油藏阶段油气的演化发展却还没有引起足够的重视。二维和三维地震资料精细的构造解释都显示哈得逊油田东河砂岩在三叠系沉积之前并不存在任何圈闭。而在哈得逊以北的乡3井(距离HD17井约25 km处)附近存在一个圈闭面积大于200 km<sup>2</sup>、闭合高度大于90 m的古油藏(乡3井东河砂岩厚度约94.5 m,为大套干沥青段,在其顶部现今有19.5 m厚的差油层)。距离乡3井不远,同样处于乡3井古圈闭范围内的T727井东河砂岩段顶部9 m为油气层,中部11.5 m为差油气层,余下层段均为水层。围绕古油藏的诸多钻井都不约而同地出现顶部为厚度不大的油气层,中部为差油气层,下部为厚度较大的水层。地震资料的精细解释还发现,现今在乡3井附近并不存在以东河砂岩为储集层的构造圈闭,证实早期形成的构造圈闭现今已不存在。哈得逊油田高分辨率三维地震资料精细的构造研究还表明,从库车期(N<sub>2</sub>k,距今约5 Ma~6 Ma)开始,喜马拉雅晚期的新构造运动使哈得逊地区东河砂岩顶面的构造高点逐渐向南迁移并发生了构造反转(图2)。这一构造反转必然会改变古油藏圈闭条件并使其发生调整、改造,它为研究后油藏阶段的各种特征提供了一种向导。为此笔者选择了横跨哈得逊油田南北的构造剖面,从库车期开始划分出7个不同的演化时段,每个时段的间隔约1 Ma,根据相似准则建立了物理模拟模型,进行油藏调整(后油藏过程)物理

模拟实验。实验过程分为以下几个阶段:

- (1) 古油藏的充注阶段(用时 24 天);
- (2) 古油藏建立以后的静止阶段(7 天);
- (3) 油藏调整过程的实施阶段(24 天);
- (4) 统一油水界面的观察阶段(24 天)。

具体实验结果及含油饱和度的变化如图 3 所示。

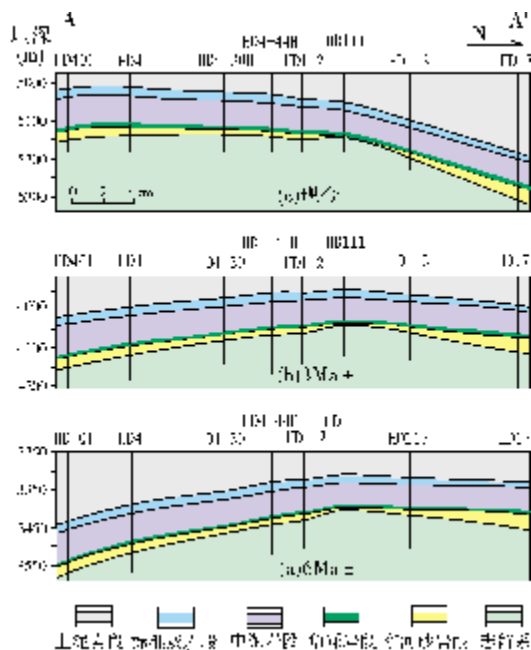


图 2 哈得逊油田东河砂岩油藏库车期(6 Ma)至今构造演化剖面位置见图 5

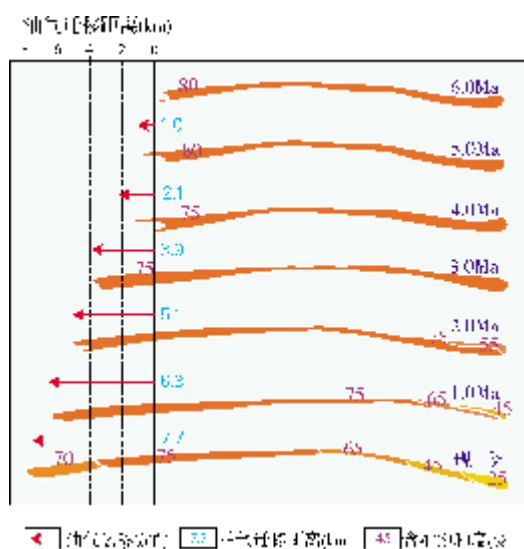


图 3 哈得逊油田东河砂岩油藏库车期(6 Ma)以来油藏调整过程及含油饱和度变化模拟实验结果  
模拟剖面与图 2 为同一条剖面

图 3 显示古油藏在调整的过程中, 不同时间段具有不同的含油范围, 其含油饱和度也发生了明显的改变。

在 6 Ma~5 Ma 期间含油范围向南扩大了 1.0 km; 在 5 Ma~4 Ma 期间含油范围向南扩大了 2.1 km, 调整前缘(图中左侧)的含油饱和度为 75%, 略低于原始含油饱和度(80%)。随着时间的推移, 石油不断向南迁移使含油范围越来越大, 同时图的右侧(古油藏北段)的含油饱和度逐渐减小。在 3 Ma~2 Ma 期间含油范围向南扩大了 5.1 km, 调整前缘的含油饱和度为 70%~75%, 油藏后缘(图中右侧)的含油饱和度降为 55%~75%, 低于原始含油饱和度(80%), 中部的含油饱和度保持为原始含油饱和度。自 6 Ma 至今, 哈得逊东河砂岩油藏向南部调整迁移了大约 7.7 km, 古油藏主体部位后缘的含油饱和度降至 25%~65%, 明显低于原始含油饱和度, 调整前缘的含油饱和度则不断增大, 由水层演变为含油饱和度达 70%~75% 的油层。物理模拟实验还显示石油的调整速度明显滞后于构造调整速度, 现今的东河砂岩非稳态油藏再经历大约 3 Ma 的静止期后, 其倾斜的油水界面就能达到基本水平(稳态油藏)。

物理模拟实验结果表明, 稳态油气藏(实验中距今 6 Ma 的古油藏)的形成并不是成藏过程的终点和结束, 它也会随着时间和外界条件的改变而逐渐变化。由于后期构造运动的影响, 稳态油气藏的圈闭条件发生改变, 油气藏内的油—气—水动态平衡条件被破坏, 圈闭内的油气在内动力或外力作用下发生缓慢的自然溢散。一方面含油边界、含油范围和含油饱和度不断发生变化, 并可能在合适的圈闭条件下再聚集; 另一方面原含油范围内的油气性质、含油饱和度和油水关系也会发生变化。因此后油藏阶段是一个极其重要而又客观存在的油气成藏阶段, 其油气运移的动力机制、油气富集形式及其特征与前面两个阶段都有较大的差异, 在后油藏阶段可以形成后油藏、次生油藏、次生油藏等多种油气聚集类型(表 1)。

后油藏 是指滞留在原圈闭范围内的油气聚集单元, 由于圈闭条件改变, 其油水关系随时间而变化, 具有非稳态性, 通常是滞留在物性相对较差的储层中(如哈得逊油田哈得 17 井区东河砂岩油藏)。

次生油藏 是指从古油藏转移出来的油气在运移并向新圈闭充注过程中形成的油气聚集单元,

表1 不同成藏阶段的油气聚集类型及特征

成藏阶段	聚集类型	主要特征	油藏属性
前油藏阶段	前油藏	临近烃源岩, 油气处于充注过程中, 优先在有利储层中聚集, 油气水关系复杂并随时间变化	非稳态
油藏阶段	油藏	已在圈闭中充注成藏, 具有统一的压力系统和油气水界面, 油气水界面不随时间变化	稳态
后油藏阶段	后油藏	古油藏圈闭条件遭受破坏, 部分油气滞留在原圈闭范围内, 油气水关系复杂且随时间变化	非稳态
	次生前油藏	古油藏圈闭条件遭受破坏, 部分油气向新圈闭充注, 优先在有利储层中聚集, 油气水关系复杂并随时间变化	非稳态
	次生油藏	远离烃源岩, 古油藏调整并在新圈闭中再聚集成藏, 油气水关系统一且不随时间变化	稳态

这是一个动态过程, 油气水尚未达到平衡, 具有非稳态性, 通常聚集于物性相对较好的储层中, 在同一套储层中可能出现油水层交互 (如哈得逊油田哈得405井区东河砂岩油藏)。

**次生油藏** 上述的次生前油藏, 经过一定时期的调整后在新圈闭中油—气—水重新达到平衡, 进入相对稳定状态, 则就形成了具有统一油气水界面的次生油藏。

### 3 非稳态成藏理论应用实例

常规油藏只要在一口井中钻遇油水界面就能确定整个油藏的油水关系, 而非稳态油藏的典型特征是油水关系复杂, 在评价过程中常常会钻遇多个油水界面, 其评价过程也比通常意义的油藏评价要复杂。笔者在此重点介绍非稳态成藏理论在塔里木盆地哈得逊油田和塔中4油田滚动勘探开发中的

应用实例。

#### 3.1 哈得逊油田

##### 3.1.1 运用经典油气藏理论勘探阶段

1998年底部署在哈得4号圈闭高点上的HD4井发现了哈得逊油田石炭系东河砂岩油藏, 同时在开发井HD1-2井北侧发现了东河砂岩油藏的尖灭线。2000年按经典油气藏理论, 确定了哈得4圈闭的含油面积(图4a)。

哈得逊油田开发建设初期, 随着钻探资料的增多, 发现哈得4圈闭和哈得1-2圈闭的油水界面高度不一致, 根据经典油气藏理论, 认为哈得4圈闭和哈得1-2圈闭是相互独立的两个油藏。同时通过精细构造解释和HD405井的钻探扩大了哈得1-2构造圈闭, 在2001年确定了这两个圈闭的东河砂岩含油面积(图4b)。

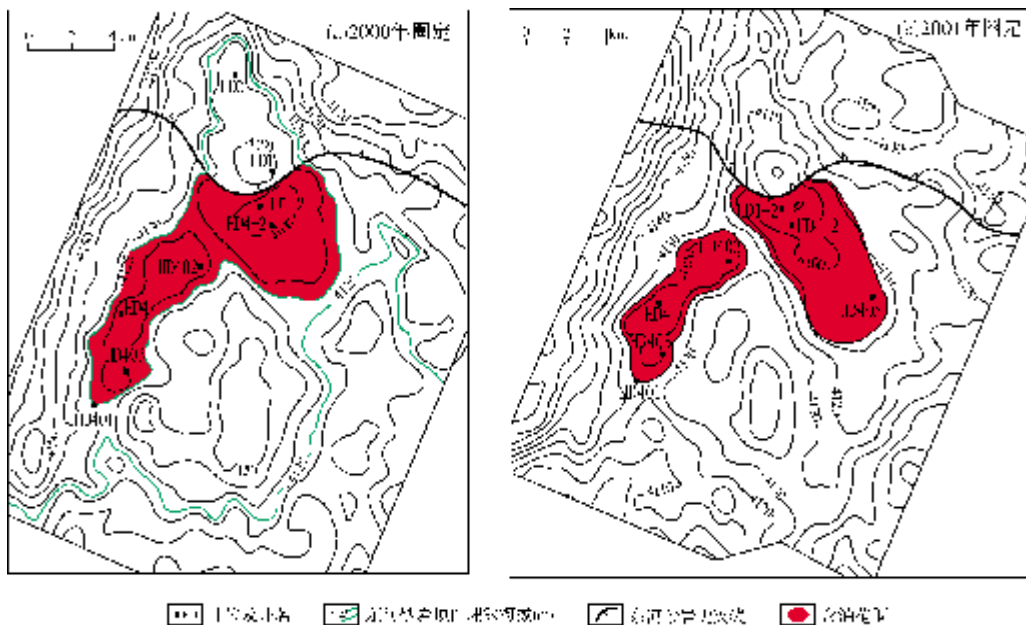


图4 按经典油气藏理论圈定的哈得逊油田东河砂岩油藏含油气面积

### 3.1.2 运用非稳态成藏理论勘探阶段

2002 年底,哈得逊油田北部的 HD11 井在哈得 11 石炭系地层圈闭中钻遇东河砂岩并获低产油流,同时甩开钻探开发评价井 HD4-30H,并于 2003 年初获得成功。在滚动勘探开发的实践过程中,逐渐认识到了哈得逊油田东河砂岩油藏的油水界面为整体向西北倾斜,并初步提出了非稳态油藏的概念和勘探设想。笔者认为,哈得逊油田东河砂岩构造高点随着时间向南迁移,油气在浮力的作用下也随之向南东方向调整运移,从而预测了哈得逊油田东河砂岩油藏具有继续向西北扩大的趋势。在这一非稳态成藏理论的指导下,在哈得逊油田的西北部又先后部署实施了 HD111、HD4-44H、HD112、HD113、HD404 等评价井,根据评价成果重新落实了石炭系东河砂岩油藏的构造形态及含油范围(图 5),明确了哈得逊油田石炭系东河砂岩油藏是一个具有倾斜油水边界的整装油藏。

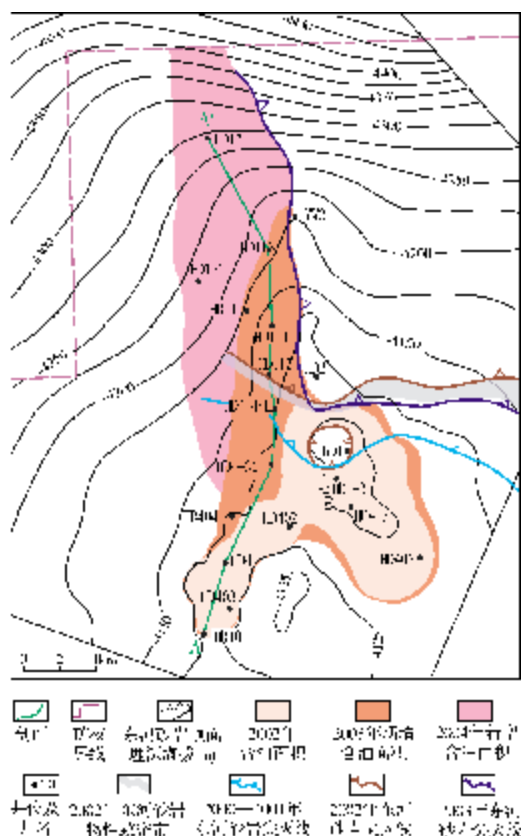


图 5 2002 年以来哈得逊油田东河砂岩油藏含油范围变迁示意图

另一方面,根据古油藏调整速度受浮力和毛管阻力控制的认识,提出了在物性好的储层中油气的运移速度大于物性较差的储层,因此在古油藏迁移

过程中物性较差的储层内含油饱和度反而要高于物性较好的储层。根据这一观点,2003—2004 年在哈得逊油田西北部对东河砂岩顶部的低渗目的层又部署了 HD17、HD171 等探井和评价井,并相继获得成功,含油范围又得到了进一步扩大(图 5)。

由于将非稳态油藏理论应用于勘探开发实践之中,东河砂岩油藏含油范围不断扩大,哈得逊油田的储量不断增加,外加石炭系中泥岩段薄砂层的勘探成果,哈得逊油田已成为塔里木盆地乃至我国国内第一个亿吨级海相砂岩油田。

### 3.2 塔中 4 油田

塔中 4 油田的滚动勘探开发也是非稳态成藏理论应用的典型实例。

2004 年以前的勘探开发结果显示,现今油水界面位于海拔-2 528~-2 510 m 之间,古油藏油水界面位于海拔-2 610 m,古、今油水界面之间为“水淹层”,厚度 100 m 左右。在现今油水界面以下的水淹层中还发现了被夹层所遮挡的油层,而这些夹层分布不稳定,不具有盖层条件。这些特殊的石油地质现象一直困扰着相关科研人员。王飞宇等<sup>[3]</sup>综合油源岩、生烃史、构造发展史、圈闭形成期、流体历史分析等结果,提出塔中 4 油气藏具多期充注成藏特征,现今油气藏主体形成于燕山期以后,油藏调整发生在晚近期。根据非稳态成藏理论构想推论,古油藏中近 100 m 厚的油层由于新构造运动的影响,部分通过断层作垂向运移,一部分散失,一部分重新聚集成藏,也有一部分可能滞留在古油藏物性较差的储集层中。由于塔中 4 油田东河砂岩段的均质砂岩亚段的物性远好于含砾砂岩亚段,而且含砾砂岩亚段中夹层发育、非均质性强,在古油藏调整过程中物性好的储层调整速度快,即油气在均质砂岩亚段储层中调整的速度远大于在含砾砂岩亚段储层中的速度。同时由于调整发生在新近纪,调整时间短,预测含砾砂岩亚段与均质砂岩亚段不具有统一的油水界面,含砾砂岩亚段的油水界面比均质砂岩亚段的油水界面低,在含砾砂岩亚段古油藏范围内(海拔-2 610 m 以上)可能具有滚动勘探开发的潜力。基于这种认识,对塔中 4 油田测井资料进行复查后发现,所有已完钻井在含砾砂岩亚段均没有发现油水界面,即使位于均质砂岩亚段现今油水界面以下的含砾砂岩亚段也没有发现水层(为干层),又进一步印证了原先预测。另一方面,油藏开发动态分析发现塔中 422 井

区的地质储量采出程度达到 26%时,其含水率仅有 7.6%,且当时地质储量的采油速度为 3.48%,这又与常规的开发规律相互冲突,间接预示了该区块具有较大的滚动勘探开发潜力。

基于上述全新认识,决定对位于塔中 422 与塔中 401 两个含油构造之间的低部位进行钻探。2005 年首先部署了钻探奥陶系的 TZ75 井(图 6),兼探比均质砂岩亚段油水界面低约 30m 的含砾砂岩亚段。结果在含砾砂岩亚段测井解释油层 3.5m,中途测试折算日产油 11.38 m<sup>3</sup>,日产水 13.24 m<sup>3</sup>。这一钻探结果证实了原先预测,说明了非稳态成藏理论的正确性。为了进一步扩大滚动勘探开发成果,在 TZ75 井获得成功以后,2005 年又在构造的更低部位(海拔-2600m)部署了 TZ409 井,目的层是东河砂岩的含砾砂岩亚段,结果又钻遇油层 6.5m,MDT 测试证实为纯油层,实现了塔中 422 与塔中 401 区块之间含砾砂岩亚段的连片。

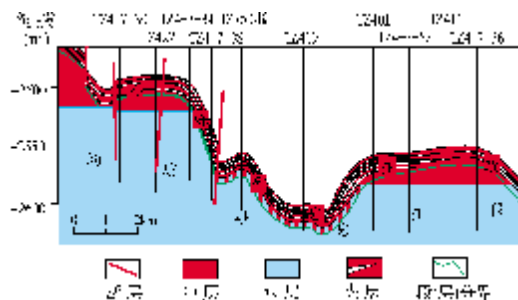


图 6 塔中 422—塔中 401 井区石炭系东河砂岩油藏剖面图

## 4 结论与讨论

(1) 油气从生成直至油藏的枯竭是一个连续的

动态过程,是阶段性和连续性、稳态和非稳态的对立统一,依据不同时期油气聚集的主控因素及油气聚集形式,将油气生成、聚集再到散失的全过程分为前油藏阶段、油藏阶段、后油藏阶段三个阶段。在前油藏阶段和后油藏阶段出现非稳态油藏,这是一种新的油气聚集类型,是指处在油气充注或调整过程之中、尚未形成统一油水界面的油气藏。

(2) 后油藏阶段是一个极其重要而又客观存在的油气成藏阶段,油气运移的动力机制、油气富集的形式及特征等,与前油藏阶段和油藏阶段都有较大的差异。后油藏阶段可以形成后油藏、次生前油藏、次生油藏等多种油气聚集类型。

(3) 复杂的油气水关系是非稳态油气藏最为显著的特征,与经典石油地质学理论和实践不同的是非稳态油藏的勘探开发重心可能位于所钻遇的油水界面之下,其勘探开发策略应不同于常规的稳态油藏。

(4) 在构造活动频繁的地质条件下,油气水平衡是相对的和短暂的,油藏阶段在整个发展过程中也是短暂的,以稳态油气藏形式存在的油气聚集量相对油气总量也只是很少的一部分,大部分油气可能处于前油藏阶段或后油藏阶段,表现为非稳态聚集,更可能是相互交织、重叠,其油气聚集规律也更趋复杂。

### 参考文献

- [1] 蒂索 B P, 威尔特 D H. 石油形成与分布 [M]. 徐永元, 徐濂, 郝石生, 等, 译. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [2] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [3] 王飞宇, 张水昌, 梁狄刚. 塔中 4 油田油气水界面的变迁与成藏期 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 560-562.

编辑: 吴厚松

## Exploration and Practice for Theory of Unsteady-state Hydrocarbon Accumulation

Sun Longde, Jiang Tongwen, Xu Hanlin, Shan Jiazeng

**Abstract:** The authors regard the entire process within a continuous period from oil and gas being formed to them being lost as a unified system, which can be divided into pre-reservoir, reservoir and post-reservoir stages. The concept of unsteady-state oil reservoirs is defined and the theoretical framework of unsteady-state hydrocarbon accumulation is established. An unsteady-state oil reservoir is defined as the oil and gas enrichment unit with a dynamically balanced gas-oil-water state instead of a unified oil-water contact, which is formed in the process of hydrocarbon fulfilling or adjustment. It is mainly characterized by multiple or significantly tilted gas-oil-water contacts within interconnected reservoirs or laterally inversed gas-oil-water relations. More targets for oil and gas exploration and development are emerged by physical modeling for Donghe Sandstone reservoir in Hadexun Oilfield, Tarim Basin, and research to the types of hydrocarbon enrichment during the post-reservoir stage. The theory of unsteady-state hydrocarbon accumulation that was applied to the rolling exploration and development in Hadexun Oilfield and Tazhong-4 Oilfield has preliminarily confirmed the concept of post-reservoir and improved exploration effect.

**Key words:** Unsteady-state oil reservoir, Hydrocarbon accumulation theory, Pre-reservoir, Post-reservoir, Titled gas-oil-water contact, Tarim Basin

**Sun Longde:** male, Senior Geologist, Professor, Vice-president of PetroChina Company. Add: PetroChina Company Limited, 16 Ande Road, Beijing, 100011 China