

doi:10.3799/dqkx.2014.053

# 塔里木盆地塔中16石炭系低含油饱和度油藏成因机理

李 卓<sup>1,2</sup>, 姜振学<sup>1,2</sup>, 李 峰<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学非常规天然气研究院, 北京 102249

**摘要:** 塔中16石炭系油藏位于塔里木盆地塔中地区, 具有低含油饱和度的油层分布在相对低孔一渗的储层中, 而高GOI值的水层分布在高孔一渗储层中的特征。为阐明其特殊的成因机理, 利用石油包裹体丰度(GOI)分析方法, 结合圈闭演化历史开展了详细研究。结果表明, 现今油层和水层的样品都具有较高的GOI值(5.6%~32.0%), 暗示在地质历史时期形成了古油层, GOI值与孔隙度和渗透率具有正相关关系。高孔一渗储层优先充注油气, 形成具有高含油饱和度、高GOI值的油层, 低孔一渗储层充注油气较少, 形成具有低含油饱和度, 相对低GOI值的油层。而古油层泄漏的过程中, 高孔一渗储层中聚集的油气也更容易泄漏, 形成高GOI值水层, 低孔一渗储层中充注的油气泄漏较少, 形成低含油饱和度油层。综合分析认为: 不同孔一渗条件储层的差异充注和成藏后的差异泄漏, 是塔中16石炭系低含油饱和度油藏的形成机理。深化并研究了多期演油气区的成藏机理, 对于深入认识多期演化背景的致密砂岩油气勘探潜力具有指导意义。

**关键词:** 塔中地区; 塔中16石炭系油藏; 石油包裹体丰度(GOI); 低含油饱和度; 差异充注; 差异泄漏; 石油地质。

中图分类号: P618.3

文章编号: 1000-2383(2014)05-0557-08

收稿日期: 2013-06-30

## Genetic Mechanism of Carboniferous Low-Oil Saturation Reservoirs in Tazhong-16 Well Block

Li Zhuo<sup>1,2</sup>, Jiang Zhenxue<sup>1,2</sup>, Li Feng<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Institute of Unconventional Natural Gas Research, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** The Tazhong-16 Carboniferous oil reservoir, located in the central Tazhong area, has the characteristics of low-oil saturation layers preferentially accumulated in the low porosity and permeability sandstone reservoirs and water layers exist in high porosity and permeability reservoirs. Grains containing Oil Inclusion (GOI) method was applied to further understand the mechanisms of the low-oil saturation layers in this field. Most GOI values in both current oil layers and water layers range from 5.6% to 32%, suggesting abundant paleo-oil charge and large amount of oil leak from filled oil layers. The GOI values have positive correlation with high porosity and permeability, indicating oil preferentially charge reservoirs with high porosity and permeability forming oil layers with high-oil saturation. When oil leaks from a trap, the larger pores are drained more easily than the smaller ones, resulting in a decrease of residual oil saturation with increasing porosity and permeability in drained reservoirs. The framework of the Tazhong-16 Carboniferous trap changed during the Late Triassic can be responsible for the large amount of oil leak. Preferential oil charge and preferential leak of the accumulated oil in reservoirs with different porosity and permeability during oil remigration is the mechanism of the formation of water layers with high GOI values and the low-oil saturation layers. Petroleum reservoirs in basins with complex evolution history usually experienced multiple phases of petroleum charge and post-accumulation alteration process. Thus, understanding the origin, charge history and physicochemical alteration processes associated with oil accumulation and preservation become critical for successful petroleum exploration in basins with complex evolution history.

**Key words:** Tazhong area; Tazhong-16 oil reservoir; grains containing oil inclusion; low-oil saturation; differential oil charge; differential oil leak; petroleum geology.

**基金项目:** 国家自然基金项目(No.40972088); 国家重点基础研究“973”项目(No.2011CB201100); 国家油气重大专项(No.2011ZX05003-001).

**作者简介:** 李卓(1983—), 男, 助理研究员, 主要从事油气成藏机理与油气藏分布预测研究。E-mail: lz830706@yahoo.cn

多期演化盆地的油气成藏往往具有多期充注和多期改造的特点,油气成藏后常经历复杂的物理化学改造作用,造成油气分布极其复杂,给油气勘探带来了难度。因此,研究多期演化盆地的油气成藏机理对于降低油气勘探风险意义重大,成为近年的研究热点(金之钩和王清晨,2004;庞雄奇等,2007;Hao *et al.*, 2008, 2011; Pang *et al.*, 2010)。塔中16石炭系油藏是一个规模较小的低幅背斜油藏(圈闭闭合度约15 m),位于塔里木盆地塔中地区中部,经历了复杂的演化历史,成为塔中16复式油气田的一部分(吕修祥和胡轩,1997)。前人针对塔中16复式油气田的研究主要针对复式油气成藏机理和奥陶系碳酸盐岩的成藏机理(韩剑发等,2007),而关于石炭系成藏机理的研究少有报道。近年兴起的致密砂岩油气成藏机理研究为深入认识该油藏提供了机遇。塔中16石炭系油藏呈层状分布,最显著的特点是在低孔一渗的储层中形成低含油饱和度的油层,而在高孔一渗的储层中形成具有高GOI值的水层。塔中地区经历了复杂的演化过程,圈闭多发生改造,导致其中聚集的古油藏发生再运移甚至被破坏(Jiang *et al.*, 2010a; Pang *et al.*, 2010)。本文的研究目的是重建塔中16石炭系低含油饱和度油藏的形成过程,揭示其充注和泄漏机理。

## 1 区域地质概况

塔中地区位于塔里木盆地的中央隆起带中段,面积约 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,经历了多期构造演化,形成了多个构造带,由北向南依次发育塔中I号坡折带、塔中10号构造带和塔中主垒带,塔中16石炭系油藏位于塔中地区中部,处于3个构造带的汇聚部位(图1)。

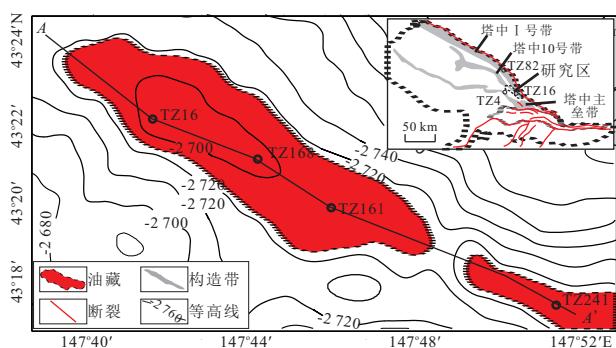


图1 塔中16油田构造位置与油藏剖面

Fig.1 Location of the Tazhong-16 oil reservoirs

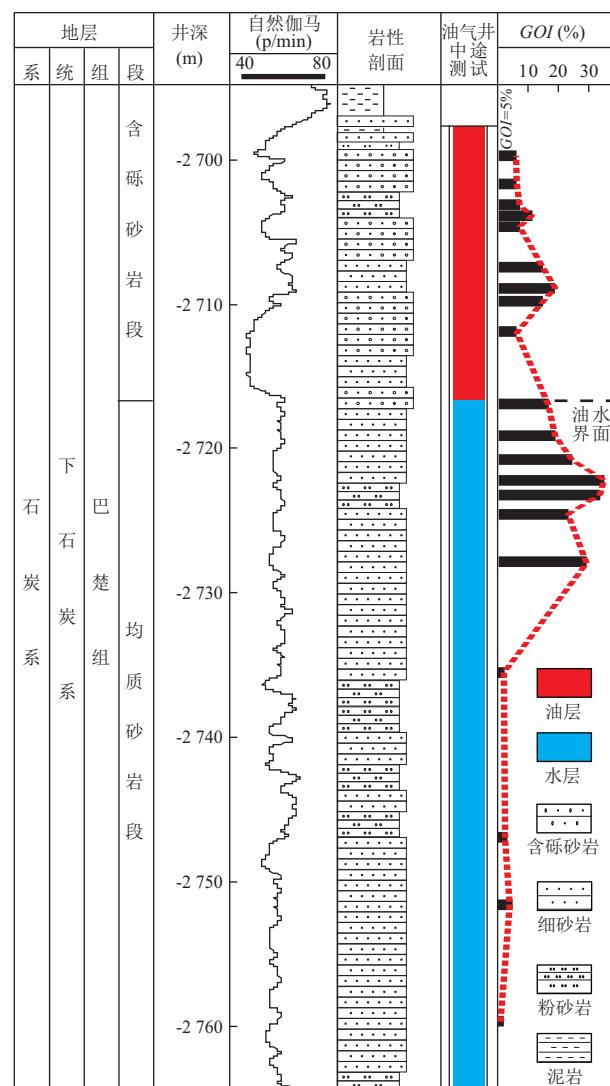


图2 TZ16井石炭系综合柱状图与GOI值  
Fig.2 Strata column showing GOI values in Well TZ16

塔中地区构造活动开始于奥陶纪末期,发展于志留纪末期,构造面貌基本定型于二叠纪末期,在三叠纪末期发生局部构造活动,对油气分布产生重要影响(贾承造和魏国奇,2002;邬光辉等,2009;Jiang *et al.*, 2010b),塔中16石炭系背斜圈闭形成于二叠纪末期,此时的圈闭规模较大,圈闭闭合度约为40~50 m,随后在三叠纪末期,受南部主垒带构造活动影响,圈闭发生调整,溢出点升高,形成现今低幅度背斜圈闭的形态,圈闭闭合度约为15 m(吕修祥和胡轩,1997)。塔中地区已经发现的油气主要来源于寒武系一下奥陶统和中—上奥陶统烃源岩,前者分布广泛,厚度大,有机质丰度高,热演化程度高,在晚加里东期—早海西期进入生油期,现今处于生干气阶段( $R_o > 2.0$ );后者分布在塔中北部的斜坡部位,在晚海西期进入生油期,现今处于生油高峰后期。

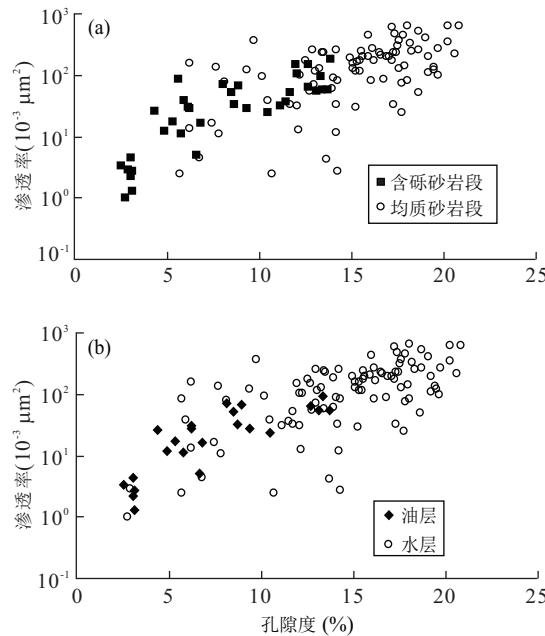


图 3 塔中 16 石炭系油藏储层孔隙度与渗透率关系

Fig.3 Correlations of porosity with permeability in the Tazhong-16 oil reservoirs

a. 岩性分段与孔—渗关系; b. 含油气性与孔—渗关系

( $R_o > 1.2$ ) (Zhang et al., 2000; Peters et al., 2005; Zhang and Huang, 2005; Zhang et al., 2005; Pan and Liu, 2009; Li et al., 2010). 塔中地区东河砂岩段( $C_{III}$ )是石炭系最重要的油气储层,塔中石炭系探明的塔中 4 油田、塔中 6 油田、塔中 10 油田都在东河砂岩中发现了大量油气(孙龙德等,2005)。东河砂岩是在石炭纪低水位期形成的滨岸滩坝相砂岩,可分为上下两段(图 2):上亚段为含砾砂岩段,岩性为含砾岩屑石英细砂岩,其中夹有薄层状的灰质砂岩和泥质粉砂岩;下亚段为均质砂岩段,岩性为岩屑石英细砂岩,夹薄层状泥岩。与均质砂岩段相比,含砾砂岩段具有较低的孔隙度和渗透率(图 3a),东河砂岩与上覆的下泥岩段形成直接储盖组合,油层主要分布在低孔—渗储层中,水层分布在较高孔—渗储层中(图 3b)。塔中 16 石炭系油田断裂不发育,多数断裂只断至石炭系底部,沟通了下伏的志留系和奥陶系,有利于油气垂向输导。

## 2 样品与实验

古油层评估通过储层石油包裹体丰度(GOI)技术确定,该方法基于包裹体岩相学研究,统计含有石油包裹体的颗粒比例来定量评价古油层,具体方法在文献中有详细论述(Lisk et al., 2002)。石油包裹

体丰度研究的储层岩心样品采自于 TZ16 井,共 16 块,其中油层样品 6 块,水层样品 10 块,样品分布见图 2。储层含油饱和度、孔隙度和渗透率数据从数据库收集,这些数据通过岩心测试得到。

## 3 结果与讨论

### 3.1 石油包裹体丰度(GOI)

石油包裹体丰度(GOI, Grains containing Oil Inclusion)技术是研究砂岩中古油层分布的有效方法之一,通过计算含有石油包裹体的矿物颗粒的个数,定量地评价古油层.GOI 值大于 5% 说明古油层已经形成,而小于 1% 表明油气运移而没有聚集(Lisk et al., 2002). GOI 研究方法的提出,是根据澳大利亚 16 个盆地大量样品的研究所提出的经验标准,可以判断存在古油层与否或是否只作为油气运移通道,而不用考虑现今储层中的油气相态(Eadington et al., 1996; Lisk et al., 2002). 笔者在研究过程中对此经验标准进行了验证,在塔中 16 油田的样品中,现今油层的 GOI 值普遍大于 5%,而 4 个现今水层样品的 GOI 值小于 1%,证实此经验标准可以判断古油层是否存在。需要着重指出,在样品的 GOI 分析过程中发现,现今油水界面附近的样品中发现了大量的石油包裹体,暗示地质历史时期有大量油气充注,其中 GOI 值是借助标准的 GOI Toolbox 软件确定的。

油源和生烃史研究基本证明,塔中 16 石炭系油田油源是中—上奥陶统烃源岩,石油充注石炭系储层的时间应是二叠纪末期(Zhang et al., 2005; Pan and Liu, 2009; Li et al., 2010),形成的古油藏必然受到三叠系末期构造活动的影响。在经历多期演化的地区形成低含油饱和度油藏,可能是由于早期石油充注不足,更加可能的情况是古油层形成后发生泄漏。因此,研究地质历史时期的石油包裹体丰度是阐明低含油饱和度油藏成因机理的关键。

采集了塔中 16 井石炭系储层中 16 块岩心样品开展石油包裹体丰度(GOI)研究(图 2)。样品中包裹体沿石英碎屑中的微裂隙成线状、带状分布,包裹体的液烃呈淡黄色,少部分呈褐色、褐黄色,显示浅黄色荧光,部分样品的粒间孔隙中可以观察到有沥青分布(图 4)。

16 块储层岩心样品的 GOI 值范围是 0.2%~32.0%,有 4 块样品的 GOI 值低于 1%,都采自—2735 m 之下的水层中,位于现今油层之下约 30 m

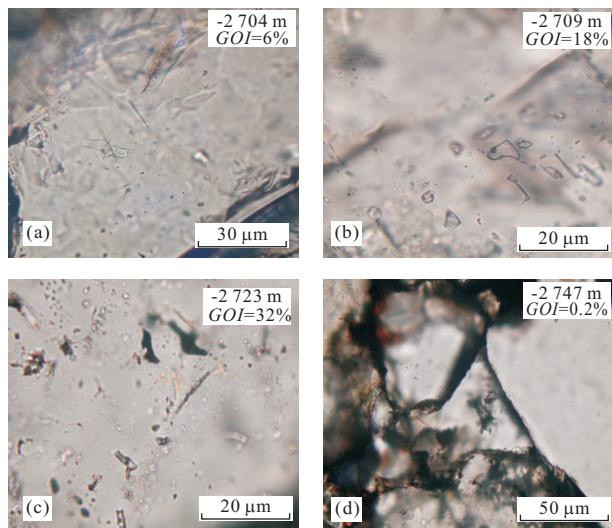


图 4 TZ16 井石油包裹体特征与 GOI 值

Fig.4 Photos showing petroleum inclusions and GOI values in Well TZ16

a.沿石英微裂隙零星分布的淡黄色的石油包裹体;b.沿石英碎屑内的微裂隙成带状分布淡黄—灰色的气液烃包裹体;c.沿石英微裂隙成带状分布深褐色、淡黄色的液烃包裹体;d.粒间孔隙被深褐色沥青充填,透射光照

处,暗示样品位于古油水界面以下(图 2).其他在-2735 m以上的样品,无论钻杆测试(DST)结果是油层还是水层,都具有超过 5% 的 GOI 值(5.6%~32.0%).在-2700~-2715 m 井段的现今低含油饱和度的油层中,GOI 值的范围是 5.6%~18.0%,6 块样品均值不到 10%,GOI 值小于下伏的水层,暗示在地质历史时期形成了古油层,但古含油饱和度低于现今水层中形成的古油层(图 4a, 图 4b),现今的低含油饱和度油层特征与此有关.具有最高的 GOI 值(25%~32%) 的 4 个样品出现在-2720~-2725 m 井段的现今水层中,暗示存在古油层,同时在地质历史时期具有较高的含油饱和度(图 4c).在-2715~-2720 m 井段的水层样品具有较高的 GOI 值(6%~22%),表明在地质历史时期同样具有较高的含油饱和度,形成了古油层.同时,通过包裹体岩相学研究发现在大部分水层样品的粒间孔隙中充填深褐色的沥青,进一步证实形成了古油层(图 4d).综上所述,TZ16 井的油层和水层样品都具有较高的 GOI 值(5.6%~32.0%),超过 GOI 值 5% 的经验标准.同时,水层中高 GOI 值的样品中发现了少量的沥青,进一步证实现今低含油饱和度的油藏在地质历史时期表明存在古油层,后来发生了泄漏.

利用 GOI 方法确定了古油层后,可以判断古油水界面的位置(Lisk *et al.*, 2002). TZ16 井的

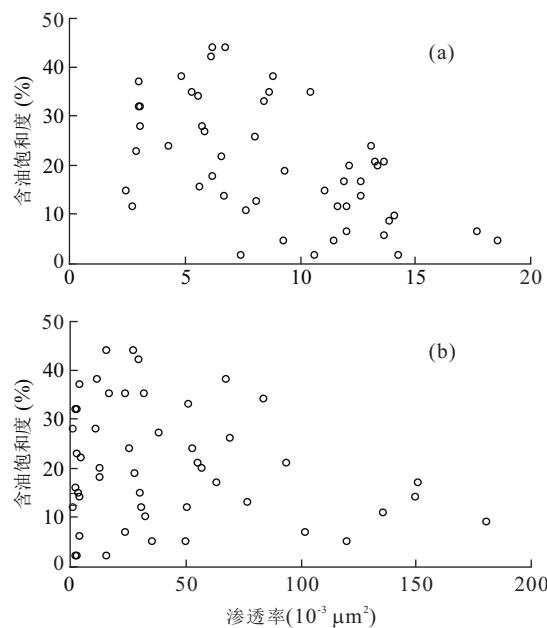


图 5 塔中 16 石炭系油田含油饱和度与孔隙度、渗透率关系

Fig.5 Correlations of oil saturation with porosity and permeability in the Tazhong-16 oil reservoirs

-2735 m之下样品的 GOI 值低于 1%, 表明在地质历史时期为油气运移通道而没有成藏, 处于古油水界面之下.TZ16 井-2725 m 以上样品的 GOI 值都大于 5%, 表明现今水层在地质历史时期是古油层, 处于古油水界面之上. 据此可以判断, TZ16 井的古油水界面位于-2725~-2735 m 之间, 古油柱高度约为 25~35 m(图 1, 图 2).

### 3.2 含油饱和度

塔中 16 石炭系油藏的储层含油饱和度的范围是 0.2%~44.0%, 并且钻杆测试的油层的含水量也相对较高, 表明储层中含有大量的水, 也证实了现今油层的低含油饱和度的特征. 含油饱和度与孔隙度、渗透率具有复杂的关联(图 6).

石油运移的动力包括浮力和水动力, 阻力主要是毛细管力, 随着孔喉半径的减小和界面张力、润湿性的增大, 石油进入储层孔隙的难度加大(England *et al.*, 1987; England, 1994; Hindle, 1997). 低孔—渗的储层聚集石油相对困难, 但也不容易泄漏, 那么含油饱和度取决于石油充注量, 与孔隙度和渗透率应呈现正相关关系(Bhullar, 1999), 孔隙度和渗透率越高, 含油饱和度越高; 高孔—渗的储层聚集石油容易, 但泄漏也相对容易, 那么含油饱和度决定于储层中残留的石油的量, 与孔隙度和渗透率应呈现负相关关系(Bhullar *et al.*, 1999), 孔隙度和渗透率越高, 含油饱和度越低; 储层中同时存在着两种含油饱

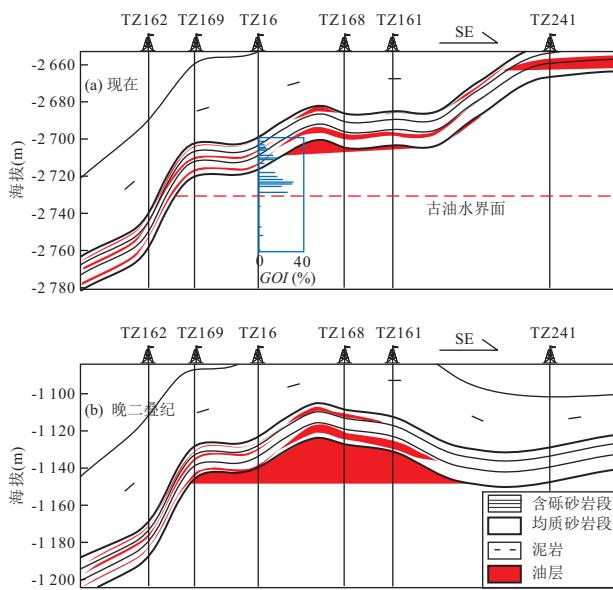


图6 塔中16油田成藏演化剖面

Fig.6 Profile evolution of the Tazhong-16 oil reservoir

和度与孔隙度和渗透率关系时,表现为对应于同一孔隙度和渗透率,含油饱和度的分布范围较宽,规律性较差(图5).

## 4 塔中16油田石炭系油气充注和泄漏机理

石油包裹体丰度(GOI)研究结果显示:现今均质砂岩段中的水层具有高GOI值,暗示存在古油层,大量石油在成藏后的演化过程中,在物理化学改造作用下泄漏了.导致油藏泄漏的物理化学作用机理主要包括生物降解、水洗、原油裂解、气侵驱替、断裂活动和超压导致盖层破坏等.结合塔中16油田石炭系的石油地质条件,利用排除法分析了可能导致油藏泄漏的机理.

### 4.1 成藏后物理化学改造作用

油藏内的石油生物降解会导致大量石油的损失,形成含有大量非烃和沥青质的重油及沥青席(Hunt, 1990; Peters *et al.*, 2005).塔中16石炭系油藏的石油的平均密度为 $0.90\text{ g/cm}^3$ ,平均粘度 $1.12\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,非烃含量为 $4\%\sim 12\%$ ,石油中既有完整的正构烷烃,又有“UCM”和25-降藿烷系列出现,表明非生物降解油和严重生物降解油的混合.由于下伏志留系和奥陶系都发现了严重生物降解的石油(Pan and Liu, 2009; Li *et al.*, 2010),暗示带有生物降解油特征的石炭系原油可能来自下伏层系严重

生物降解油的污染.同时,塔中16石炭系油藏储层中未见大量的沥青席分布,只在孔隙中发现少量沥青充填(图5d),暗示生物降解的影响是非常微弱的,可以排除生物降解作用导致油藏泄漏的可能.

水洗作用会导致石油中易溶于水的组分,尤其是低分子量芳烃组分的损失,水洗后石油中 $C_6$ 和 $C_7$ 中正构烷烃与芳烃的比值增加(De Hemptonne, 2001),塔中16井区石炭系原油中未发现这一现象(李素梅等, 2008; Li *et al.*, 2010).另外,从区域构造形态分析,塔中16井区石炭系构造相对平缓,水动力条件弱,不具备大规模的地下水水流冲洗油层的条件,可以排除水洗作用导致油藏泄漏的可能.

深埋油藏中的石油在温度超过 $160\text{ }^\circ\text{C}$ ,成熟度超过 $1.3R_\circ\%$ 的条件下会发生裂解,形成低分子量烃和沥青(Hunt, 1990).塔中16石炭系油藏现今处于最大埋深接近 $4\,000\text{ m}$ ,油层温度为 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,成熟度接近 $1.2R_\circ\%$ ,没有达到原油裂解的温度和成熟度条件.

强烈的气洗会使油层被驱替(Kissin, 1987; George *et al.*, 1998; Lisk *et al.*, 2002; George *et al.*, 2004; Arouri *et al.*, 2009; 李卓等, 2010),形成具有高GOI值的气层.塔中16油田的石炭系原油性质为正常的黑油,没有明显的证据表明发生过大规模天然气充注,大量石油的损失不是气洗作用造成的.

沿断裂的垂向泄漏会造成油藏泄漏,如在塔中4油田,由于断裂活动导致古油藏泄漏,古油水界面上升大约 $100\text{ m}$ (王飞宇等, 2004),损失了大量石油.塔中16石炭系油田断裂不发育,多数断裂只断至石炭系底部,不可能导致石油泄漏.

### 4.2 塔中16石炭系油藏充注和泄漏机理

结合研究区演化历史认为,三叠纪末期圈闭调整对塔中16石炭系油藏产生了重要影响.通过对塔中16石炭系油藏现今含油饱和度和石油包裹体丰度(GOI, 代表古含油饱和度)的研究,证实该油藏最显著的特点是在低孔—渗储层中形成低含油饱和度的油层,而在高孔—渗储层中形成具有高GOI值的水层.在多期圈闭演化背景下,不同孔—渗条件储层的差异充注和成藏后的差异泄漏,是导致塔中16石炭系油藏泄漏,形成现今低含油饱和度油藏的原因(图6).

(1) 差异充注:在有限充注的前提下,石油优先充注高孔—渗储层(England *et al.*, 1987; Bhullar *et al.*, 1999; Leythaeuser *et al.*, 2000).因此,储层含

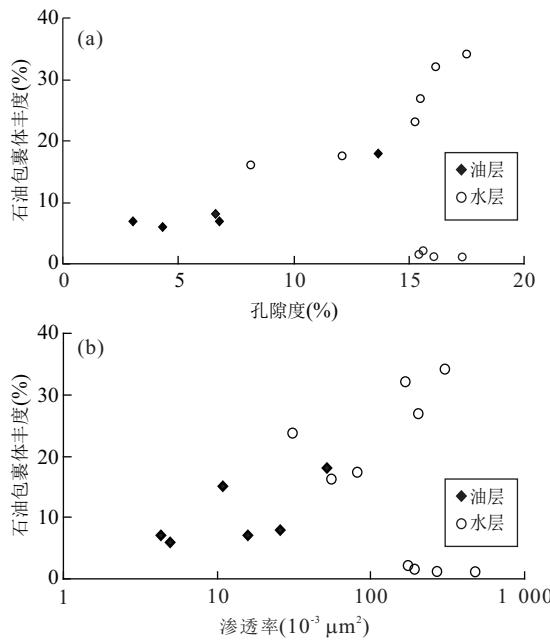


图 7 塔中 16 石炭系油田 GOI 值与孔隙度、渗透率关系  
Fig.7 Correlations of GOI values with porosity and permeability in the Tazhong-16 oil reservoir

油饱和度随着孔隙度和渗透率的增大而增大。二叠纪末期,源自中—上奥陶统烃源岩的石油充注塔中 16 石炭系圈闭形成古油层,根据石油包裹体丰度(GOI)结果判断,古油水界面位于 -2 725~ -2 735 m 之间,古油柱高度约为 25~35 m。石油优先充注孔隙度和渗透率高的均质砂岩段储层,这些储层具有很高的 GOI 值(反映古含油饱和度高),并且 GOI 值与孔隙度和渗透率呈现出正相关关系(图 7),孔隙度和渗透率高的储层具有高 GOI 值,孔隙度和渗透率低的储层具有低 GOI 值,高 GOI 值的水层分布在高孔—渗的均质砂岩段储层中,低含油饱和度的油层形成在低孔—渗的含砾砂岩段储层中(图 5)。

(2) 差异泄漏:塔中 16 石炭系圈闭在三叠纪末期受主垒带断裂活动影响发生调整,圈闭闭合度减小,造成古油藏泄漏,形成现今油藏油柱高度约 15 m 的低含油饱和度油藏。当储层孔隙中的石油发生泄漏时,与低孔—渗储层相比,高孔—渗储层中的油也更容易发生泄漏,储层孔隙中残留的石油会随着孔隙度和渗透率的增大而减少(Bhullar *et al.*, 1999)。塔中 16 石炭系古油层泄漏过程中,高孔—渗的储层中聚集的石油更容易完全泄漏,形成现今具有高 GOI 值的水层(图 6),如 TZ16 井 -2 720~ -2 725 m 井段,孔隙度和渗透率最高的储层中可以具有很低的含油饱和度,相对低孔—渗储层中聚集

的石油更可能会部分保存,形成现今具有较高 GOI 值和低含油饱和度的油层,如 TZ16 井 -2 708~-2 710 m 井段,孔隙度和渗透率较低的储层中同样具有较高的含油饱和度。在孔—渗很低致密砂岩储层中,极可能发生的情况是,石油充注不足但更容易保存,后期泄漏很少,形成现今具有低 GOI 值和低含油饱和度的油层,如 TZ16 井 -2 700~-2 705 m 井段。由于存在这 3 种石油充注和泄漏的过程,造成了储层含油饱和度与孔隙度和渗透率之间的复杂关系(图 5)。

#### 4.3 勘探启示

不同孔—渗储层的差异充注和成藏后的差异泄漏造成了塔中 16 石炭系油藏泄漏,形成现今低含油饱和度的油藏,在多期演化地区,这种成藏机理应引起重视,这对于深入认识具有多期演化背景的致密砂岩储层的油气勘探潜力具有指导意义。

首先,致密砂岩储层具有低孔隙度(小于 12%)和低渗透率(小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )特征(关德师和牛嘉玉,1995)。根据差异充注机理,致密砂岩储层不利于聚集大规模的油,但是,当致密储层中充注了石油之后,根据差异泄漏机理,聚集的石油将更易于保存,形成一定规模的石油聚集,表明致密砂岩油藏同样具有很大的资源潜力。

其次,从古油层中差异泄漏的石油,通过再运移充注构造上倾方向的圈闭,极有可能聚集大量石油,成为极具经济价值的勘探目标。

## 5 结论

(1) 塔中 16 石炭系储层的 GOI 值与孔隙度和渗透率具有正相关关系,水层的孔隙度和渗透率高于油层,GOI 值也高于油层,证实古油优先充注高孔—渗储层;(2) 塔中 16 石炭系圈闭在三叠纪末期发生改造,导致古油层泄漏,形成现今油层下伏的具有高 GOI 值的水层;(3) 不同孔—渗条件储层的差异充注和成藏后差异泄漏是塔中 16 石炭系低含油饱和度油藏的成因机理,在低孔—渗储层中形成低含油饱和度的油层,高孔—渗储层中分布高 GOI 值的水层;(4) 具有多期演化背景的致密砂岩储层有利于保存早期充注的油气,具有很大勘探潜力。

## References

- Arouri, K.R., Al-Saleh, S.H., Al-Hilal, Z.M., 2009. Residual Oil as a Tool in Migration and Filling History Analysis

- of Petroleum Reservoirs, Ghazal Field, Saudi Arabia. *Organic Geochemistry*, 40: 617 – 627. doi: 10.1016/j.orggeochem.2009.02.002
- Bhullar, A.G., Karlsen, D.A., Lacharpagne, J.C., et al., 1999, Reservoir Screening Using Iatroscan TLC-FID and Identification of Paleo-Oil Zones, Oil-Water Contacts, Tar Mats and Residual Oil Saturations in the Frøy and Rind Petroleum Accumulations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23: 41 – 63. doi: 10.1016/S0920-4105(99)00007-8
- De Hemptinne, 2001. Compositional Changes Resulting from the Water-Washing of a Petroleum Fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29: 39 – 51. doi: 10.1016/S0920-4105(00)00089-9
- Eadington, P.J., Krieger, F.W., Lisk, M., Identifying Oil Well Sites: USA, US6097027A, 1996-08-06.
- England, W.A., 1994. Secondary Migration and Accumulation of Hydrocarbons. In: Magoon, L.B., Dow, W.G., eds., The Petroleum System—From Source to Trap. *AAPG Memoir*, 60: 211 – 217.
- England, W.A., MacKenzie, A.S., Mann, O.M., et al., 1987. The Movement and Entrapment of Petroleum Fluids in the Subsurface. *Geological Society (London)*, 144: 327 – 347. doi: 10.1144/gsjgs.144.2.0327
- George, S.C., Lisk, M., Eadington, P.J., 2004. Fluid Inclusion Evidence for an Early, Marine-Sourced Oil Charge Prior to Gas-Condensate Migration, Bayu-1, Timor Sea, Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 1107 – 1128. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.07.001
- George, S.C., Lisk, M., Summons, R.E., et al., 1998. Constraining the Oil Charge History of the South Pepper Oil-field from the Analysis of Oil-Bearing Fluid Inclusions. *Organic Geochemistry*, 29: 631 – 648.
- Guan, D.S., Niu, J.Y., 1995. Unconventional Petroleum Geology in China. Petroleum Industry Press, Beijing, 60 – 85 (in Chinese).
- Han, J.F., Mei, L.F., Yang, H.J., et al., 2007. The Large Ordovician Lithologic Accumulation Conditions and Exploration Potential in Tarim Basin. *Nature Gas Geoscience*, 18 (3): 426 – 435 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Guo, T.L., Zhu, Y.M., et al., 2008. Evidence for Multiple Stages of Oil Cracking and Thermochemical Sulfate Reduction in the Puguang Gas Field, Sichuan Basin, China. *AAPG Bulletin*, 92 (61): 1 – 637. doi: 10.1306/01210807090
- Hao, F., Zhang, Z., Zou, H., et al., 2011. Origin and Mechanism of the Formation of the Low-Oil-Saturation Moxizhuang Field, Junggar Basin, China; Implication for Petroleum Exploration in Basins having Complex Histories. *AAPG Bulletin*, 95 (61): 983 – 1008. doi: 10.1306/11191010114
- Hindle, A. D., 1997. Petroleum Migration Pathways and Charge Concentration: A Three-Dimensional Model. *AAPG Bulletin*, 81: 1451 – 1481.
- Hunt, J. M., 1990, Generation and Migration of Petroleum from Abnormally Pressured Fluid Compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1 – 12.
- Jia, C.Z., Wei, G.Q., 2002. Tectonic Features and Hydrocarbon in Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47 (Suppl.): 1 – 8 (in Chinese).
- Jiang, Z.X., Yang, H., Li, Z., et al., 2010a. Difference of Hydrocarbon Enrichment between the Upper and the Lower Structural Layers in the Tazhong Paleouplift. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 84 (5): 1116 – 1127. doi: 10.1111/j.1755-6724.2010.00284.x
- Jiang, Z.X., Pang, X.Q., Yang, H.J., et al., 2010b. Hydrocarbon Enrichment Characteristics and Difference Analysis in the TZ1-TZ4 Well Block of the Tarim Basin. *Petroleum Science*, 7 (2): 201 – 210. doi: 10.1007/s12182-010-0023-y
- Jin, Z.J., Wang, Q.C., 2004. Advance in Superimposed Basin Research in China, Take Tarim Basin for Example. *Science in China Ser.D: Earth Sciences*, 34 (Suppl.1): 1 – 12 (in Chinese).
- Kissin, Y., 1987. Catagenesis and Composition of Petroleum: Origin of N-Alkanes and Isoalkanes in Petroleum Crudes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2445 – 2457. doi: 10.1016/0016-7037(87)90296-1
- Leythaeuser, D., Schwark, L., Keuser, C., 2000. Geological Conditions and Geochemical Effects of Secondary Petroleum Migration and Accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 857 – 859. doi: 10.1016/S0264-8172(00)00010-6
- Li, S., Pang, X., Jin, Z., et al., 2010. Petroleum Source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin; New Insights from Geochemical and Fluid Inclusion Data. *Organic Geochemistry*, 41: 531 – 553. doi: 10.1016/j.orggeochem.2010.02.018
- Li, S.M., Pang, X.Q., Yang, H.J., et al., 2008. Characteristics and Genetic Type of the Oils in the Tazhong Uplift. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33 (5): 635 – 642 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Jiang, Z.X., Yang, H.J., et al., 2010. Quantitative Gas Washing Evaluation on Reservoirs in TZ83 Well Block in Tarim Basin. *Geoscience*, 24 (6): 1171 – 1177 (in Chinese).

- nese with English abstract).
- Lisk, M., O'Brien, G. W., Eadington, P. J., 2002. Quantitative Evaluation of the Oil-Leg Potential in the Oliver Gas Field, Timor Sea, Australia. *AAPG Bulletin*, 86(9): 1531—1542.
- Lü, X.X., Hu, X., 1997. Hydrocarbon Accumulation and Distribution in Tazhong Low Uplift of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 18(4): 288—293, 308 (in Chinese with English abstract).
- Pan, C., Liu, D., 2009. Molecular Correlation of the Free Oil, Adsorbed Oil and Inclusion Oil of Reservoir Rocks in the Tazhong Uplift of the Tarim Basin, China. *Organic Geochemistry*, 40: 387—399. doi: 10.1016/j.orggeochem.2008.11.005
- Pang, X.Q., Luo, X.R., Jiang, Z.X., et al., 2007. Advancement and Problems on Hydrocarbon Accumulation Research of Complicated Superimposed Basins in Western China. *Advances in Earth Science*, 22(9): 879—887 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X.Q., Meng, Q.Y., Jiang, Z.X., et al., 2010. A Hydrocarbon Enrichment Model and Prediction of Favorable Accumulation Areas in Complicated Superimposed Basins in China. *Petroleum Science*, 7: 10—19. doi: 10.1007/s12182-010-0002-3
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Cambridge University Press, Cambridge, 1155—1158.
- Sun, L.D., Zhou, X.Y., Wang, G.L., 2005. Contributions of Petroleum Geology and Main Directions of Oil-Gas Exploration in the Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 40(2): 167—178 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. Y., Zhang, S. C., Liang, D. G., 2004. Evolution of Oil-Gas-Water Contact and Timing of Petroleum Accumulation in Tazhong-4 Field, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(5): 560—562 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Li, Q. M., Xiao, Z. Y., et al., 2009. The Evolution Characteristics of Paleo-uplifts in Tarim Basin and Its Exploration Directions for Oil and Gas. *Geotectonica et Metallogenesis*, 33(1): 124—130 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Huang, H., 2005. Geochemistry of Palaeozoic Marine Petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 1. Oil Family Classification. *Organic Geochemistry*, 36: 1204—1214. doi: 10.1016/j.orggeochem.2005.01.013
- Zhang, S., Huang, H., Xiao, Z., et al., 2005. Geochemistry of Paleozoic Marine Petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 2. Maturity Assessment. *Organic Geochemistry*, 36: 1215—1225. doi: 10.1016/j.orggeochem.2005.01.014
- Zhang, S.C., Hanson, A.D., Moldowan, J.M., et al., 2000. Palaeozoic Oil-Source Rock Correlations in the Tarim Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 31: 273—286.
- ### 附中文参考文献
- 关德师,牛嘉玉,1995.中国非常规油气地质.北京:石油工业出版社,60—85.
- 韩剑发,梅廉夫,杨海军,等,2007.塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力.天然气地球科学,18(3):426—435.
- 贾承造,魏国奇,2002.塔里木盆地构造特征与油气.科学通报,47(增刊):1—8.
- 金之钧,王清晨,2004.中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展—以塔里木盆地为例.中国科学D辑:地球科学,34(增刊1):1—12.
- 李素梅,庞雄奇,杨海军,等,2008.塔中隆起原油特征与成因类型.地球科学——中国地质大学学报,33(5): 635—642.
- 李卓,姜振学,杨海军,等,2010.塔里木盆地塔中83井区气侵定量研究.现代地质,24(6): 1171—1177.
- 吕修祥,胡轩,1997.塔里木盆地塔中低凸起油气聚集与分布.石油与天然气地质,18(4): 288—293, 308.
- 庞雄奇,罗晓容,姜振学,等,2007.中国西部复杂叠合盆地油气成藏研究进展与问题.地球科学进展,22(9): 879—887.
- 孙龙德,周新源,王国林,2005.塔里木盆地石油地质研究新进展和油气勘探主攻方向.地质科学,40(2): 167—178.
- 王飞宇,张水昌,梁狄刚,2004.塔中4油田油气水界面的变迁与成藏期.新疆石油地质,25(5): 560—562.
- 邬光辉,李启明,肖中尧,等,2009.塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探.大地构造与成矿学,33(1): 124—130.