

文章编号:1001-6112(2012)04-0445-06

# 塔北地区志留系 沥青砂岩热模拟实验及其供烃意义

黄继文, 顾 忆, 陈强路, 邵志兵

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:**采用人工样品与地质样品2套模拟实验方案,开展了塔北志留系沥青砂岩作为再生烃源的生烃潜力的模拟实验。综合人工样品与地质模拟实验中不同温度的产率、产物组成变化,志留系沥青砂岩作为再生烃源的演化可分为蒸发分馏排油气阶段(模拟温度100~300℃,相当于 $R_o < 0.9\%$ )、裂解油气生成排出阶段(模拟温度325~400℃,相当于 $R_o = 0.9\% \sim 1.8\%$ )、裂解生排气阶段(模拟温度大于400℃,相当于 $R_o > 2.0\%$ )3个不同的演化阶段。就塔北志留系沥青砂岩实际埋深及成熟度而言,能进入裂解油气生、排阶段的志留系沥青砂岩,现今埋深应在6000m以上的,主要分布于沙西—哈拉哈塘地区。资源量估算认为,塔北志留系沥青砂岩虽不足以形成大规模的油气聚集,但也是塔北地区重要的辅助性再生烃源。

**关键词:**生烃潜力;再生烃源;热模拟;沥青砂岩;志留系;塔里木盆地

**中图分类号:**TE135.6

**文献标识码:**A

## Thermal simulation of Silurian bituminous sandstone and its significance of hydrocarbon supply in northern Tarim Basin

Huang Jiwen, Gu Yi, Chen Qianglu, Shao Zhibing

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** To study the hydrocarbon generation potential of the Silurian bituminous sandstone in the northern Tarim Basin, two sets of experiment program were carried out using artificial and geologic samples respectively. According to the yielding rate and product composition under different experiment temperatures, the hydrocarbon generation process of the Silurian bituminous sandstone was divided into 3 stages including evaporative fractionation oil-and-gas expulsion stage (with the simulative temperature of 100–300℃, equivalent to  $R_o < 0.9\%$ ), cracking oil-and-gas expulsion stage (with the simulative temperature of 325–400℃, equivalent to  $0.9\% < R_o < 1.8\%$ ), and cracking gas expulsion stage (with the simulative temperature over 400℃, equivalent to  $R_o > 2.0\%$ ). According to the actual depth and maturity of the Silurian bituminous sandstone in the northern Tarim Basin, those sandstones during the cracking oil-and-gas expulsion stage were buried over 6000m deep and mainly located in the western Shaya and Halahatang areas. Through resource estimation, although the bituminous sandstones could not provide enough hydrocarbons for accumulation in large scale, they were the most important auxiliary regenerative hydrocarbon source rocks in the northern Tarim Basin.

**Key words:** hydrocarbon potential; regenerative hydrocarbon source rock; thermal simulation; bituminous sandstone; Silurian; Tarim Basin

不同学者通过以志留系沥青砂岩或以重质油与储层混合制成的人工样品为对象进行热模拟实验研究,取得了一定的认识<sup>[1-4]</sup>。对塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因及特征也有较多研究<sup>[5-7]</sup>。沥青砂岩可作为再生烃源已成为研究热点<sup>[2,8-12]</sup>。

由原油蚀变成沥青及再埋藏是一个连续的过程,从已有的模拟分析来看,直接以志留系沥青砂

岩为模拟样品,有2点值得注意:(1)现今钻井志留系沥青砂岩生烃作用应该完成或至少也有不同程度的发生,缺少从原油到沥青形成至现阶段成熟度之间的产物;(2)志留系最大埋深是一个有限的深度,决定其成熟度不可能很大,因此将井下埋深的样品模拟到极高的温度不符合地质实际。而以人工样品为模拟对象的热解模拟实验也有2点值得

收稿日期:2011-12-21;修订日期:2012-05-10。

作者简介:黄继文(1973—),男,高级工程师,从事石油地质研究工作。E-mail:huangjw\_syky@sinopec.com。

基金项目:中石化西北油田分公司科技项目(KY-S2006-21)资助。



表2 不同温阶下人工样品、地质样品热模拟产物组成

Table 2 Product composition of thermal simulation with artificial and geologic samples under different temperatures

样品类型	温度/ ℃	$R_o$ /%	烃气/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	析出油/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	残留油/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	总产物组成/%			模拟演化阶段
						析出油率	析出气率	残留率	
人工样品	100	0.52	0.49	21.43	933.38	2.24	0.05	97.71	蒸发分馏排油气阶段
	125	0.55	0.25	24.56	925.67	2.58	0.03	97.39	
	150	0.56	1.27	17.72	937.65	1.85	0.13	98.02	
	175	0.61	0.66	38.12	915.95	3.99	0.07	95.94	
	200	0.62	1.51	33.95	917.57	3.56	0.16	96.28	
	250	0.67	1.83	47.45	753.82	5.91	0.23	93.86	裂解油气生排阶段
	300	0.77	8.19	46.30	681.00	6.30	1.11	92.59	
	325	0.99	13.41	76.36	581.98	11.37	2.00	86.64	
	350	1.25	76.57	198.46	361.71	31.17	12.02	56.81	
	400	1.76	250.11	245.41	79.62	42.67	43.49	13.84	
500	3.01	564.44	28.10	17.62	4.61	92.51	2.89	裂解气生排阶段	
地质样品	150	0.56	0.48	30.13	1 127.09	2.60	0.04	97.36	蒸发分馏排油气阶段
	175	0.61	0.43	49.04	1 047.48	4.47	0.04	95.49	
	200	0.62	0.47	72.17	966.12	6.95	0.04	93.01	
	250	0.67	0.66	88.49	954.56	8.48	0.06	91.46	
	300	0.77	3.72	99.64	881.18	10.12	0.38	89.50	裂解油气生排阶段
	325	0.99	22.60	104.69	794.61	11.36	2.45	86.19	
	350	1.25	82.25	213.88	468.82	27.96	10.75	61.29	
	400	1.76	495.80	152.05	83.44	20.79	67.80	11.41	
500	3.01	645.29	47.20	13.64	6.68	91.38	1.93	裂解气生排阶段	

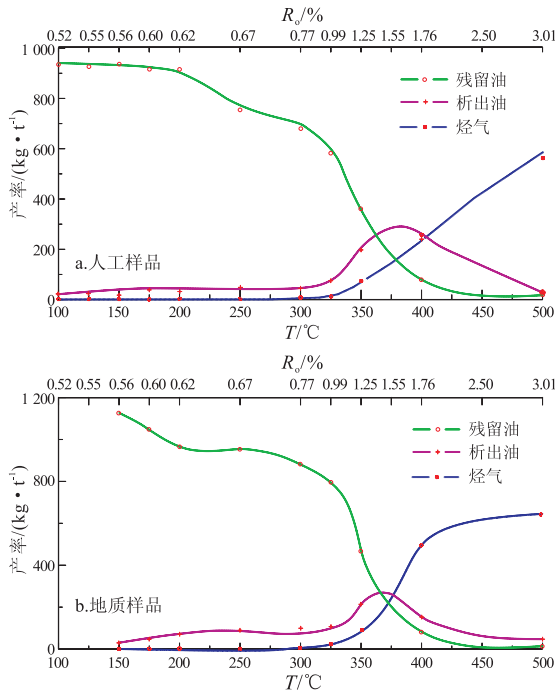


图2 人工模拟样品与地质样品在不同温阶下的产率  
Fig. 2 Yielding rates of thermal simulation with artificial and geologic samples under different temperatures

稳定分布在0.5~1.0 kg/t,仅占油气总量的0.1%左右;析出油量25~30 kg/t,占油气总量的2%~4%;储层内的残留油量大于95%。250~300℃的2个

温阶,相当于成熟度 $R_o=0.7\% \sim 0.9\%$ ,虽有裂解作用发生,但从析出油、气量的变化,主体还是处于蒸发分馏阶段,存在于储层中的油量仍大于93%。可以认为,与此阶段相对应的埋深,遭受破坏的古油藏(重质油—沥青砂岩)不会对新的油气形成作出有效贡献。

第二段(模拟温度325~400℃)相当于成熟度 $R_o=1.0\% \sim 1.8\%$ ,模拟样品的主要反应是裂解作用,产物主要是轻质油气,为裂解油气排出阶段。其特点为析出油量大,达80~250 kg/t(析出油量由占油气总量的11%增加到43%),烃气排出量高,由13.41 kg/t急剧增加到250.11 kg/t,由占油气总量的2%急剧增加到43%;而储层的残留烃则由占油气总量的86%下降到14%,反映在这一阶段内,随模拟温度的升高裂解作用相当强烈,重质组分大量断链裂解转化为轻质—凝析油及烃气,并快速离开储层。显然,这一阶段的裂解油气能对新油气的形成作出决定性的贡献。根据钻井志留系沥青砂岩实测的等效镜质体反射率(表3),与这一阶段模拟成熟度基本匹配,这也表明志留系古油藏破坏形成的沥青砂岩(或重质油)有可能成为重要的再生油气资源。

第三段(模拟温度大于400℃)相当于成熟度 $R_o$ 在2.0%以上,该阶段主要是裂解生气阶段,析出

表3 塔北地区志留系等效镜质体反射率

Table 3 Vitrinite reflectance of Silurian bituminous sandstone samples in northern Tarim Basin

井号	等效镜质体反射率/%
S112	1.1 ~ 1.3
S109	0.8
顺2	0.8
中1井	1.25 ~ 1.40
中4井	1.0
哈1	1.28 ~ 1.44

油量仅为第二阶段的1/10,而排出的烃气又提高了一倍以上,储层的残留物剩下3%左右(主要是高度聚合物及残碳)。由于这一阶段成熟度远高于塔北及邻近地区志留系沥青砂岩的成熟度,即埋埋深的志留系沥青砂岩的成熟度,因此这一演化阶段可能不具实际意义。

### 3 地质样品模拟产物组成及产率

志留系沥青砂岩的热模拟产物组成及产率(表2,图2b)同样可能分为3个不同的演化阶段,与人工模拟样品相比,主要差别在裂解油气排出阶段为350℃,低于前者的400℃。

第一阶段(模拟温度小于325℃)相当于成熟度 $R_o < 0.99\%$ ,为蒸发分馏油气排出阶段。随模拟温度的升高析出油增加到100 kg/t,产出烃气则由0.5 kg/t增加到近4 kg/t,残留物由97%减少到90%;以蒸发分馏作用为主,残留(吸附为主)在储层内已生成的少量油及微量气随模拟温度及其本身分子结构依次排出。由于排出量小,不会对新油气的形成作出有效贡献。

第二阶段(模拟温度在325~350℃)相当于成熟度 $R_o$ 在1.0%~1.3%左右,为裂解油气排出阶段。这一阶段油气大量离开模拟样品,烃气排出量增加(23 kg/t→82 kg/t),析出油量达高峰(105 kg/t→214 kg/t),残留于样品内的油急剧下降(由86%→61%)。大量油气的生成与排出表明发生了较强烈的裂解作用,大分子烃类断链形成轻质油及烃气,受高温热力驱动而离开母体,这一阶段也是沥青砂岩作为可能再生烃源的重要油气供给期。

第三阶段(模拟温度大于400℃)相当于成熟度 $R_o > 1.8\%$ 左右,为裂解生气排出阶段。烃气生成、排出量达高峰(496 kg/t→65 kg/t),析出油量则急剧下降(152 kg/t→47 kg/t),模拟样品内的残留油则由18%下降到2%,实际上已剩下残碳。大量的烃气生成、排出及析出油量的下降,表明该阶

段主要是裂解生、排气态烃。

## 4 模拟结果分析

综合2种模拟实验分析成果,可以得出如下几点认识:

(1)作为“再生烃源”的志留系沥青砂岩其生排烃模式可以分为以下3个阶段:第一阶段(相当于 $R_o < 0.9\%$ )为蒸发分馏排油气阶段,以分馏作用为主要特征,古油藏遭受破坏,原油组成中轻质组分逸散,油质变重,形成重油(或沥青),随埋深增加,地温逐渐升高,但不足以发生裂解作用,重质油(或沥青)因热力作用发生分馏作用,排出吸附的微量烃气及少量残留轻质油,不足以对新油气藏的形成作规模供给;第二阶段(相当于 $R_o = 0.9\% \sim 1.8\%$ )为裂解油气生成排出阶段,以裂解作用的发生为主要特征,析出油量急剧增大至高峰,烃气产出也大量增加,储层(模拟样品)内的残留物(油)大量减少,是沥青砂岩(重油)深埋过程中最重要的供油气期;第三阶段(相当于 $R_o > 1.8\%$ )为裂解生排气阶段,以大分子的大量裂解、烃气干燥化为特征,随着温度的进一步升高,首先是排出烃组成中液态烃急剧减少,烃气大量生成,然后是残留烃大量减少,甲烷气体大量生成,为主要的供气期。

(2)2种模拟方法的对比可以看出,以志留系沥青砂岩地质样品为模拟对象的油产率低于重油人工样品,可能与志留系沥青砂岩经过一定程度的地质演化有关( $R_o = 0.80\% \sim 0.83\%$ )。

(3)从2种模拟方法的温阶对应的产率曲线特征来看,志留系沥青砂岩地质样品发生热裂解作用的时间要早于人工样品,其原因是否与地质样品的储层中无机矿物的催化作用有关尚待研究。

(4)利用重油合成人工样品低、中温阶模拟(从古油藏经破坏、形成重质油或沥青砂岩,到现今志留系埋深所经历的油气生成、排出历史)及地质样品中、高温阶模拟并定量更大埋深志留系砂岩的油气生成、排出特点的设计思想与目的已完全达到,也得到了再生烃源不同演化阶段的可能油气贡献的定量参数。

## 5 再生烃源潜力评价

### 5.1 评价依据

通过对塔北地区奥陶系重油人工合成样及志留系沥青砂岩热模拟产物产率演化系列及产物组成(油、气)演化系列的全面研究,获得了蒸发分馏排油气、裂解油气生、排及裂解气生、排3个演化

阶段模拟产物的组成及不同成熟度(对应于不同温阶)的油气排出率(表2),为评价再生烃源提供了理论依据及定量数据。

## 5.2 评价结果

从上述对本次再生烃源模拟研究成果的简要小结,不难看出,对塔北地区再生烃源评价有3大要素:第一,古油藏破坏产物的埋藏史及成熟度演化;第二,对应成熟度(模拟温度)所处的演化阶段及特定成熟度的油气产率;第三,必须要有进入裂解油气生排阶段的再生烃源规模(体积)。因此,结合本区地质情况分别予以评价。

本次S109井现埋深5862m的志留系沥青砂岩模拟样品,实测等效镜质体反射率 $R_o$ 为0.80%~0.83%,主要处于蒸发分馏排油气阶段,析出油气量均很低,不足以对油气藏的形成作出有效供给。能进入裂解油气生、排阶段的志留系沥青砂岩,现今埋深应大于6000m。

从塔北地区沥青砂岩的分布状况看(图3),主要分布于沙西—哈拉哈塘—塔河南部等部分地区,沥青砂岩埋藏深度大于6000m的地区主要集中于DH7—跃参1井区及英买力西部地区,面积约4416km<sup>2</sup>。沥青砂岩埋藏深度最大为6500m,最高镜质体反射率为1.1%左右。从钻井揭示的志留系沥青砂岩厚度看,哈1井67.5m,哈4井31m,YM11井45.0m,YM2井4.0m,S21井5.0m,S26井

4.5m,哈德2井33.5m,羊屋2井32.5m,跃南1井31.5m,顺1井77.2m,顺8井30.5m,厚度分布受当时古构造面貌、古油藏储层厚度的影响。综合各井厚度分析暂取沥青砂岩的平均有效厚度为30m;沥青砂岩密度 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。本次实测S109井5858,5862m井段有机碳分别为0.79%、0.64%;哈拉哈塘凹陷哈1井6083~6241m井段有机碳为2.06%,6065~6239.8m井段4件样品有机碳分布于1.23%~3.77%,平均2.58%<sup>[13]</sup>;跃南1井5860.4m为1.07%,残留有机碳平均值取2.0%。必须注意的是,该值是现今哈拉哈塘志留系沥青砂岩 $R_o$ 为1.1%时的有机碳残留值,据模拟实验残留烃相对减少在73%左右,因此原始有机碳含量取值3%。前人对塔里木盆地不同层位烃源岩所生成的原油,在喜马拉雅期成藏的聚集系数取值大于0.106,根据哈拉哈塘再生烃源油气形成晚、成藏期晚、后生改造小、保存条件好等成藏特点,聚集保存条件优越,取油聚集系数为0.10,气聚集系数为0.02。排出气态烃量、排出油量、残留烃量及总产率的取值则以模拟实验325℃与350℃的人工样品与地质样品的平均值参与计算。经估算,塔北地区志留系沥青砂岩经裂解生成并排出的总烃量为 $18.80 \times 10^8 \text{ t}$ ,其中排出气态烃 $4.65 \times 10^8 \text{ t}$ ,排出油 $14.15 \times 10^8 \text{ t}$ ,排出的油气比为1:0.33。结合油气排聚系数估算,其中油资源量为 $1.415 \times 10^8 \text{ t}$ ,气资源量为 $0.093 \times$

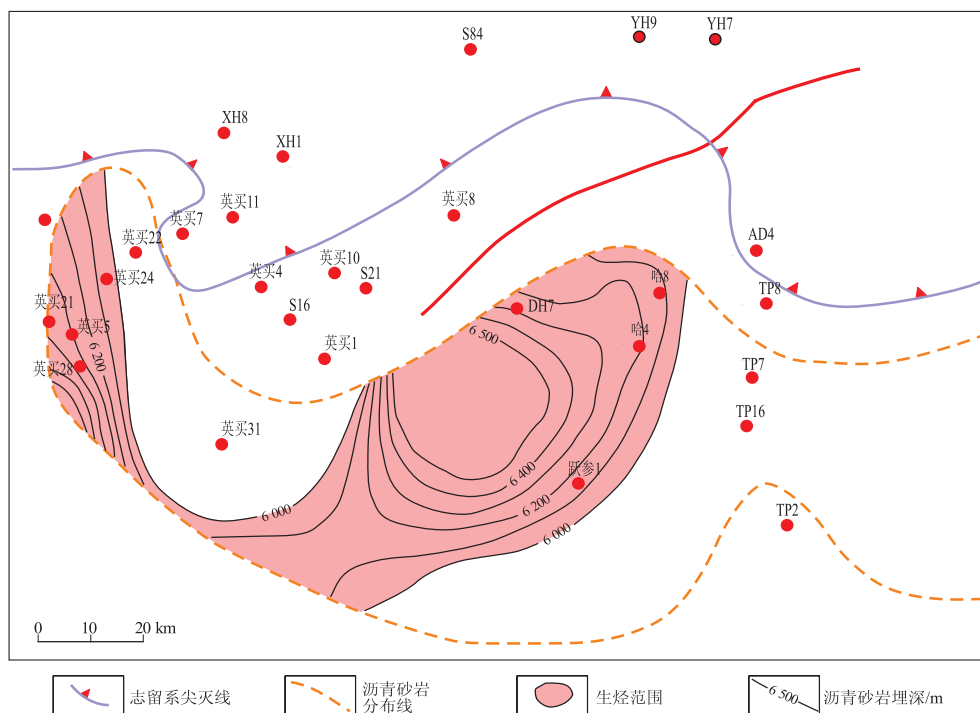


图3 塔北地区志留系沥青砂岩评价

Fig. 3 Evaluation of Silurian bituminous sandstones in northern Tarim Basin

10<sup>8</sup> t, 油气总资源量 1.508×10<sup>8</sup> t, 油气资源量比为 1 : 0.07。

### 6 结论

1) 塔河西部志留系沥青砂岩埋深大于 6 000 m 的地区主要分布于沙西—哈拉哈塘地区, 目前主要处于蒸发分馏排油后期—裂解排油早期阶段, 所生成的油气总资源量较小, 油气资源结构主要以油为主。

2) 再生油气能否形成有效供给及形成油藏(或叠加于早期油气藏上), 还要看其他成藏条件的配置, 但从资源量来看, 不足以形成大规模的聚集。

3) 塔北志留系沥青砂岩虽不足以形成大规模的油气聚集, 但也是塔北重要的辅助性再生烃源。目前在塔河西部艾丁地区出现的轻甲烷碳同位素的天然气, 应该就是志留系沥青砂岩早期裂解的产物。

致谢: 谨以此文缅怀“李四光地质科学奖野外地质工作者奖”荣获者、著名石油地质与油气地球化学家陈正辅先生! 感谢他的悉心指导与教诲!

#### 参考文献:

[1] 刘光祥. 塔里木盆地 S74 井稠油热模拟实验研究(一): 模拟产物地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 179-185.

[2] 宫色, 彭平安, 卢玉红, 等. 生物降解沥青砂再次热作用的实验模拟[J]. 科学通报, 2004, 49(S1): 39-47.

[3] 李慧莉, 金之钧, 何治亮, 等. 海相烃源岩二次生烃热模拟实验研究[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1322-1327.

[4] 郑伦举, 秦建中, 张渠, 等. 中国海相不同类型原油与沥青生气潜力研究[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 360-365.

[5] 刘洛夫, 赵建章, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因类型及特征[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 12-17.

[6] 刘洛夫, 方家虎, 王鸿燕. 塔里木盆地志留系沥青砂岩石学特征及其意义[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2001, 16(1): 16-22.

[7] 张俊, 庞雄奇, 刘洛夫, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的分布特征与石油地质意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(S1): 169-176.

[8] 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 等. 中国南海相层系天然气烃源新认识及其示踪体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 819-825.

[9] 何治亮, 顾忆, 高山林. 中国西部多旋回演化与油气聚集[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 433-438.

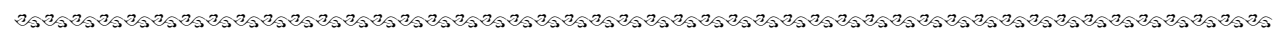
[10] 刘光祥. 塔里木盆地 S74 井稠油热模拟实验研究(二): 沥青生气潜力探讨[J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 382-385.

[11] 高志农, 陈远荫. 碳酸盐岩中天然沥青演化特征的再认识[J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 405-410.

[12] 何坤, 米敬奎, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂的二次生烃及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 682-691.

[13] 刘大锰, 金奎励, 王凌志. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的特性及其成因[J]. 现代地质, 1999, 13(2): 169-175.

(编辑 黄娟)



(上接第 444 页)

[26] 杨磊, 蔡耀光, 孙志信, 等. 油气二次运移动力学分析及实验研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 600-604.

[27] 李元昊, 刘建平, 梁艳, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组低渗透岩性油藏成藏物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 706-712.

[28] 赵卫卫, 查明. 陆相断陷盆地岩性油气藏成藏过程物理模拟及机理初探[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(6): 37-43.

[29] 牟雪梅, 赵卫卫, 查明. 东营凹陷胜坨地区岩性油气藏物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 219-224, 231.

[30] 马中良, 曾溅辉, 郑伦举, 等. 稳态充注下输导层交汇处油气运移路径的选择性[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 89-93.

[31] 张善文, 张林晔, 张守春, 等. 东营凹陷古近系异常高压的形成与岩性油藏的含油性研究[J]. 科学通报, 2009, 54(11): 1570-1578.

[32] 刘士林, 郑和荣, 林舸, 等. 渤海湾盆地东营凹陷异常压力分布和演化特征及与油气成藏关系[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 233-237.

(编辑 徐文明)