

# 油藏注水开发过程中原油芳烃成熟度 参数变化特征及意义

常象春<sup>1</sup>, 薛圣同<sup>1</sup>, 崔晶<sup>2</sup>, 王涛<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国石化胜利油田 鲁明公司, 山东 东营 257001)

**摘要:**基于原油芳烃组分在油气地质研究中的重要作用,对注水开发过程中原油芳烃成熟度参数的动态变化进行精细的地球化学对比,探索其变化规律和成因。研究表明注水开发过程中,由于不同芳烃化合物的水溶解度、结构构型、极性的不同,导致在水驱过程中被优先移除的机会不同,进而使芳烃成熟度参数呈现不同变化规律。烷基萘成熟度参数(MNR、DNR、 $TNR_1$ 、 $TMNR$ )呈逐渐变大趋势,反映了水洗作用影响,而烷基菲成熟度参数( $MPI_1$ 、 $MPI_2$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ )、二苯并噻吩成熟度参数(4-/1-MDBT、(2-+3-)/1-MDBT、MDBI)、三芳甾烷成熟度参数 $C_{28}20S/(20S+20R)$ 基本保持不变,仍可有效应用于油气地质评价中。

**关键词:**注水开发;原油组份;芳烃;成熟度参数;水洗作用

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)04-0021-07

## Variation and Implications of Aromatic Hydrocarbon Maturity Parameters in Waterflooded Oil Reservoir

CHANG Xiangchun<sup>1</sup>, XUE Shengtong<sup>1</sup>, CUI Jing<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Luming Oilfield Branch, Shengli Oil Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China)

**Abstract:** In view of the importance of crude oil aromatic hydrocarbon in petroleum geology research, geochemical comparisons of the dynamic variations of aromatic hydrocarbon maturity parameters during the process of waterflooding were made, and the variations and genesis were investigated. The results indicate that aromatic maturity parameters change differently due to the different solubility, configuration and polarity of aromatic fractions, which leads to different reducing preference during the process of waterflooding and different variation laws of aromatic hydrocarbon maturity parameters. The alkylnaphthalene maturity parameters (MNR, DNR,  $TNR_1$ ,  $TMNR$ ) tend to increase, implying the effect of water washing, while the alkylphenanthrene maturity parameters ( $MPI_1$ ,  $MPI_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ), DBT maturity parameters (4-/1-MDBT, (2-+3-)/1-MDBT, MDBI) and TAS maturity parameters  $C_{28}20S/(20S+20R)$  keep almost unchanged, which can still be effectively used in geological assessment of petroleum.

**Key words:** waterflooding; oil component; aromatic hydrocarbon; maturity parameter; water washing

在油藏开发过程中,注水是一种常见的提高采收率方法。长时间注水驱油,会选择性地溶解原油的易溶解成分,对原油产生水洗作用。一些研究实例与实验模拟均表明,水驱油首先驱出的是密度较低、粘度较小的原油组分。水驱过程中的水洗作用通过水溶解并带走原油中相对低分子质量、溶解度高的化合物<sup>[1]</sup>,造成

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ201311)

作者简介: 常象春(1974—),男,陕西绥德人,教授,博士生导师,主要从事油气地质与地球化学方面的教学与科研工作。

E-mail: xcchang@sina.com

原油中易溶于水的溶剂大量丧失,从而使溶质部分相对富集<sup>[2]</sup>。芳烃在水中的溶解度最大,随着油层水洗程度的增加,其原油组分的芳烃含量减少<sup>[3]</sup>。水驱油引起了原油平均分子量增大,芳烃减少,非烃、沥青质增加<sup>[4]</sup>。水洗过程中低碳数的芳烃以很高的速度损失,二环和三环芳烃含量下降,四环以上多环芳烃,尤其是苯并荧蒽和苯并花化合物相对含量显著增加<sup>[5]</sup>,二苯并噻吩在芳烃损失后选择性损失<sup>[6]</sup>,甚至在水洗作用中可被完全消耗<sup>[7]</sup>。带有甲基的芳烃和含硫杂环化合物的许多立体异构体比值,已发展成为应用广泛的热成熟度指标。在注水动态开发影响下,这些成熟度参数还能否有效,抑或其变化规律如何,都值得深入研究。本文以典型注水开发的曲 9 油藏为例,通过动态监测的精细地球化学剖析,探究芳烃化合物在注水开发过程中的变化规律。

## 1 地质背景

曲堤油田构造上位于惠民凹陷临南斜坡的曲堤地垒,油田北部为临南洼陷,南面为济阳地堑,西接西南缓坡带(图 1)。曲堤地垒北侧为夏口断层,南侧为曲堤断层,东侧为白桥断层。其基底为太古界变质岩,缺失元古界。沉积盖层自下而上依次为寒武系、早—中奥陶统、中—上石炭统、二叠系、中—下侏罗统、古近系、新近系和第四系。其中,古近系沙三段是主要烃源岩,馆陶组三段(Ng<sub>3</sub>)为主要产油层位。自 1995 年 2 月,曲斜 9 井馆三段试油获得日产 16.0 t/d 的工业油流后,曲 9 油藏先后经历了新建产能阶段、天然能量开采阶段,2005 年 8 月起开始注水开发,进行了二次差异化调整,并适时提液,水驱开发效果逐步变好。

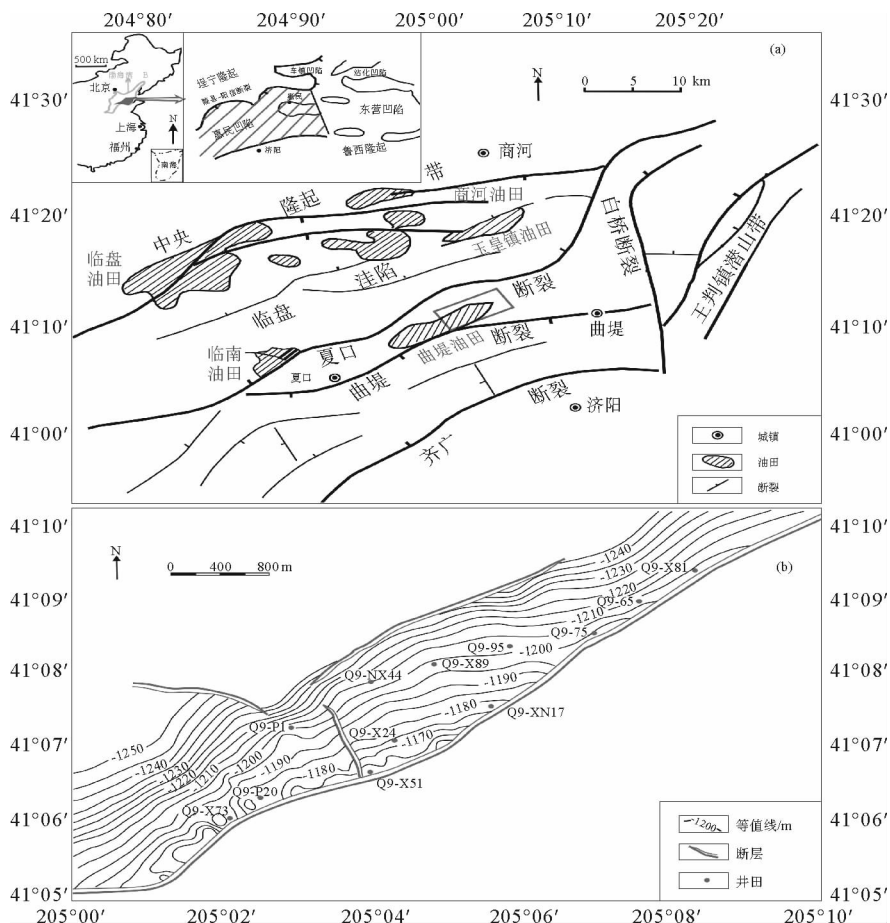


图 1 曲 9 油藏井位分布图

Fig. 1 Structural location of Qu9 reservoir and distribution of samples

## 2 样品与试验

### 2.1 样品采集

动态采集曲 9 油藏 Q9-XN1、Q9-65、Q9-X89、Q9-75、Q9-95、Q9-P1、Q9-X81、Q9-NX44、Q9-51、Q9-X73、Q9-P20、Q9-X24 等 12 口开发井的井口原油(图 1),以每 4 个月左右为一次采样周期,样品均属于 Ng3 层位,实验室对其脱水后进行相关分析。

### 2.2 族组分分离

使用柱层析法进行油样的族组分分离,采用氧化铝和硅胶填柱,取 30~50 mg 油样用正己烷沉淀过滤除去沥青质,然后转入氧化铝硅胶柱,依次用正己烷、二氯甲烷:正己烷(2:1)、二氯甲烷洗脱出饱和烃、芳香烃及非烃,静放挥发试剂,然后取出芳香烃进行色谱-质谱分析

### 2.3 色谱-质谱

美国 Agilent 6890 GC/5975i MS,仪器配置 HP-5MS 弹性石英毛细柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),程序升温:初温为 50 °C,保持 1 min,以 20 °C/min 的速率升至 120 °C,再以 3 °C/min 的速率升至 310 °C,保持 25 min。芳烃程序升温:从初温 80 °C 保持 1 min 后,以 3 °C/min 的速率升至 310 °C,保持 16 min。进样口温度为 300 °C,载气为 He 气(99.999%),流速为 1.0 ml/min,不分流进样。质谱部分:EI 电离源,电离电压为 70 eV,获取数据方式为全扫描与选择离子同时进行,质量扫描范围 50~600 m/z。

## 3 结果与讨论

### 3.1 烷基萘成熟度参数

萘和多甲基取代萘系列化合物普遍存在于原油中<sup>[8]</sup>,且可以根据其分布特征或相对含量来评价原油成熟度<sup>[9]</sup>,常用的成熟度参数有甲基萘指数 MNR<sup>[9]</sup>、二甲基萘比值 DNR<sup>[10-11]</sup>、三甲基萘指数 TNR<sub>1</sub><sup>[12]</sup>、三甲基萘比值 TMNr<sub>1</sub><sup>[13]</sup>等,其值越大表明原油的成熟度越高。

对比分析不同时期采集原油的烷基萘成熟度参数,可以看出随着注水开发过程的推进,上述 4 种烷基萘成熟度参数均呈逐渐变大的趋势(表 1,图 2)。低碳数芳烃是原油中相对易溶于水的一类化合物,但不同结构的芳烃化合物在水中的溶解度也存在差异。就其结构而言,2-MN 位于 β 位,1-MN 位于 α 位,由于 β 空间阻碍较小,所以 2-MN 要比 1-MN 稳定。根据中国科学院化学专业数据库<sup>[14]</sup>,当 pH=7 时,α-甲基萘在水中的溶解度是 0.036 g/100 g 水,疏水参数为 3.904,而 β-甲基萘的疏水参数为 3.95<sup>[15]</sup>。疏水参数是指物质的疏水性的量度,它表示其亲脂性的大小,其值越大越不易溶于水<sup>[16]</sup>。因此在注水开发过程中,易溶组份 α-甲基萘比难溶组份 β-甲基萘更易被地下水溶解带走,故随着时间的推移,甲基萘指数 MNR 会越来越大(图 2(a))。

二甲基萘系列化合物中,1,5-DMN 从结构上属于 αα 构型,2,6-DMN 和 2,7-DMN 属于 ββ 构型,6-和 7-都属于 β 位,2,6-DMN 和 2,7-DMN 为位置异构的同分异构体,所以 2,6-DMN 和 2,7-DMN 性质相似<sup>[17]</sup>。2,7-DMN 的疏水参数为 4.447,溶解度 0.008 g/100g;1,5-DMN 的疏水参数为 4.296,溶解度 0.011 g/100 g<sup>[16]</sup>。故 1,5-DMN 比 2,6-DMN 和 2,7-DMN 更易溶于水,因此在注水开发过程中,二甲基萘比值 DNR 亦呈升高趋势(图 2(b))。

三甲基萘系列化合物中,2,3,6-TMN、1,3,5-TMN 和 1,4,6-TMN 的溶解度(pH=7)为 0.002 g/100 g 水,1,2,5-TMN 的溶解度(pH=7)为 0.003 g/100 g 水<sup>[14]</sup>。水溶解性对这几种物质的影响差别较小,随着注水开发过程的推进,三甲基萘指数 TNR<sub>1</sub> 与三甲基萘 TMNr 的比值变化幅度较小,但仍呈升高趋势(图 2(c), 2(d))。

### 3.2 烷基菲成熟度参数

甲基菲异构体分布是最常用的成熟度指标之一。Radke 等<sup>[18]</sup>提出甲基菲指数(MPI<sub>1</sub>、MPI<sub>2</sub>)。Kvalheim 等<sup>[19]</sup>提出甲基菲比值 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 来评价原油成熟度(F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>)。从图 2(e-h)中可以看出,随着注水开发过程的推进,烷基菲成熟度参数并没有大的波动,基本稳定。

表 1 注水开发过程中曲 9 油藏原油芳烃成熟度参数表

Tab. 1 The aromatic maturity parameters of crude oils waterflooded from Qu9 reservoir

井号	层位	时间	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Q9-XN17	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 98	1. 12	0. 46	0. 26	0. 32	0. 21	0. 52	0. 66	1. 77	1. 20	0. 35	0. 52
		2014. 02	1. 05	4. 10	0. 54	0. 36	0. 33	0. 21	0. 50	0. 62	1. 78	1. 17	0. 33	0. 51
		2014. 07	1. 44	4. 89	1. 23	0. 42	0. 31	0. 20	0. 50	0. 65	1. 75	1. 12	0. 34	0. 51
Q9-X24	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 77	1. 06	0. 50	0. 34	0. 32	0. 20	0. 49	0. 60	1. 93	1. 24	0. 34	0. 52
		2014. 02	0. 78	3. 84	0. 61	0. 39	0. 33	0. 20	0. 49	0. 60	1. 90	1. 23	0. 33	0. 50
		2014. 07	1. 34	6. 85	0. 90	0. 42	0. 33	0. 20	0. 49	0. 60	1. 96	1. 19	0. 34	0. 52
Q9-P1	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	1. 06	2. 17	0. 31	0. 25	0. 18	0. 12	0. 30	0. 40	0. 94	0. 80	0. 29	0. 53
		2014. 02	1. 40	3. 45	0. 34	0. 24	0. 20	0. 13	0. 33	0. 42	0. 92	0. 78	0. 27	0. 51
		2014. 07	1. 45	3. 90	0. 60	0. 33	0. 19	0. 12	0. 40	0. 41	0. 99	0. 82	0. 29	0. 53
Q9-95	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	1. 06	1. 68	0. 42	0. 21	0. 24	0. 14	0. 40	0. 49	0. 95	0. 96	0. 28	0. 55
		2014. 02	1. 11	2. 99	0. 31	0. 26	0. 25	0. 15	0. 40	0. 49	1. 06	0. 92	0. 28	0. 52
		2014. 07	1. 28	2. 84	0. 39	0. 27	0. 23	0. 14	0. 39	0. 45	1. 08	0. 93	0. 29	0. 52
Q9-75	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 87	1. 34	0. 20	0. 19	0. 26	0. 16	0. 43	0. 54	1. 09	0. 95	0. 29	0. 53
		2014. 02	1. 13	3. 64	0. 28	0. 27	0. 27	0. 17	0. 44	0. 53	1. 15	0. 95	0. 29	0. 52
		2014. 07	1. 17	3. 43	0. 29	0. 20	0. 24	0. 16	0. 41	0. 53	1. 08	0. 90	0. 30	0. 53
Q9-NX44	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 83	1. 85	0. 24	0. 21	0. 16	0. 09	0. 25	0. 28	1. 35	1. 01	0. 31	0. 53
		2014. 02	0. 99	3. 67	0. 24	0. 23	0. 20	0. 11	0. 30	0. 32	1. 29	1. 02	0. 29	0. 51
		2014. 07	1. 53	3. 33	0. 28	0. 19	0. 12	0. 07	0. 19	0. 22	1. 29	1. 01	0. 30	0. 52
Q9-X73	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 66	1. 12	0. 74	0. 48	0. 38	0. 21	0. 54	0. 60	2. 65	1. 51	0. 36	0. 54
		2014. 02	0. 89	3. 38	0. 89	0. 53	0. 39	0. 22	0. 53	0. 59	2. 65	1. 49	0. 36	0. 51
		2014. 07	2. 56	8. 28	1. 17	0. 58	0. 38	0. 21	0. 52	0. 58	2. 74	1. 47	0. 37	0. 53
Q9-65	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 87	2. 69	0. 24	0. 26	0. 20	0. 12	0. 32	0. 40	0. 75	0. 93	0. 23	0. 55
		2014. 02	1. 08	2. 67	0. 16	0. 16	0. 19	0. 12	0. 31	0. 39	0. 74	0. 93	0. 22	0. 53
		2014. 07	1. 54	3. 13	0. 28	0. 20	0. 19	0. 12	0. 31	0. 39	0. 77	0. 92	0. 24	0. 53
Q9-X89	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 77	2. 58	0. 37	0. 31	0. 16	0. 10	0. 26	0. 30	0. 98	0. 95	0. 27	0. 55
		2014. 02	1. 15	3. 01	0. 36	0. 26	0. 14	0. 09	0. 23	0. 27	0. 89	0. 88	0. 25	0. 53
		2014. 07	1. 20	3. 89	0. 89	0. 32	0. 14	0. 09	0. 23	0. 29	0. 89	0. 85	0. 27	0. 54
Q9-X81	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 66	1. 81	0. 26	0. 26	0. 20	0. 13	0. 34	0. 46	0. 73	0. 89	0. 22	0. 55
		2014. 02	1. 12	1. 77	0. 05	0. 04	0. 21	0. 14	0. 36	0. 47	0. 58	0. 84	0. 20	0. 52
		2014. 07	1. 33	1. 98	0. 10	0. 10	0. 17	0. 11	0. 28	0. 38	0. 65	0. 89	0. 22	0. 52
Q9-P20	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 49	2. 91	0. 62	0. 49	0. 38	0. 21	0. 50	0. 55	2. 55	1. 50	0. 35	0. 55
		2014. 02	0. 57	3. 15	0. 78	0. 50	0. 38	0. 21	0. 50	0. 55	2. 58	1. 48	0. 35	0. 52
		2014. 07	1. 01	3. 70	0. 88	0. 51	0. 37	0. 21	0. 50	0. 56	2. 57	1. 46	0. 36	0. 53
Q9-X51	Ng <sub>3</sub>	2013. 11	0. 70	1. 21	0. 60	0. 41	0. 37	0. 21	0. 51	0. 58	2. 33	1. 39	0. 35	0. 55
		2014. 02	0. 78	3. 66	0. 73	0. 46	0. 36	0. 21	0. 50	0. 57	2. 28	1. 39	0. 34	0. 53
		2014. 07	0. 92	4. 72	0. 86	0. 49	0. 36	0. 21	0. 51	0. 58	2. 31	1. 33	0. 36	0. 53

注: R1; MNR=2-MN/1-MN; R2; DNR=(2,6-+2,7-DMN)/1,5-DMN; R3; TNR<sub>1</sub>=2,3,6-TMN/(1,3,5-TMN+1,4,6-TMN); R4; TM-Nr=2,3,6-TMN/(1,2,5-TMN+2,3,6-TMN); R5; F<sub>1</sub>=(3-MP+2-MP)/(1-MP+9-MP+3-MP+2-MP); R6; F<sub>2</sub>=(2-MP)/(1-MP+9-MP+3-MP+2-MP); R7; MPI<sub>1</sub>=1.5×(3-MP+2-MP)/(P+9-MP+1-MP); R8; MPI<sub>2</sub>=3×(2-MP)/(P+9-MP+1-MP); R9; 4-/1-MDBT; R10; (2-+3-)/1-MDBT; R11; MDBI=4-MDBT/(DBT+1-MDBT+2-MDBT+3-MDBT+4-MDBT); R12; C<sub>28</sub>20S/(20S+20R)

王连生等<sup>[15]</sup>利用高效液相色谱法对多环芳烃化合物的水溶解度及疏水参数进行估算,得出 1-甲基菲、2-甲基菲、3-甲基菲、9-甲基蒽的疏水参数均为 5.11。其中,9-甲基蒽是 9-甲基菲的同分异构体,性质相似<sup>[17]</sup>,所以水溶解性对这几类物质的影响基本一致。在注水开发过程中,随着时间的推移,烷基菲成熟度参数没有变化。

### 3.3 二苯并噻吩参数

二苯并噻吩系列化合物随热成熟度增高而变化的规律性很强,并且与镜质体反射率间存在良好的线性关系<sup>[20]</sup>。4-MDBT 和 2-、3-MDBT 的相对丰度随埋深增加而增加,1-MDBT 则随之下降,故而 4-/1-MDBT 和 (2-+3-)/1-MDBT 是两个应用广泛的成熟度参数<sup>[21]</sup>。魏志彬等<sup>[22]</sup>提出采用甲基二苯并噻吩分布指数 (MDBI) 来评价原油成熟度。

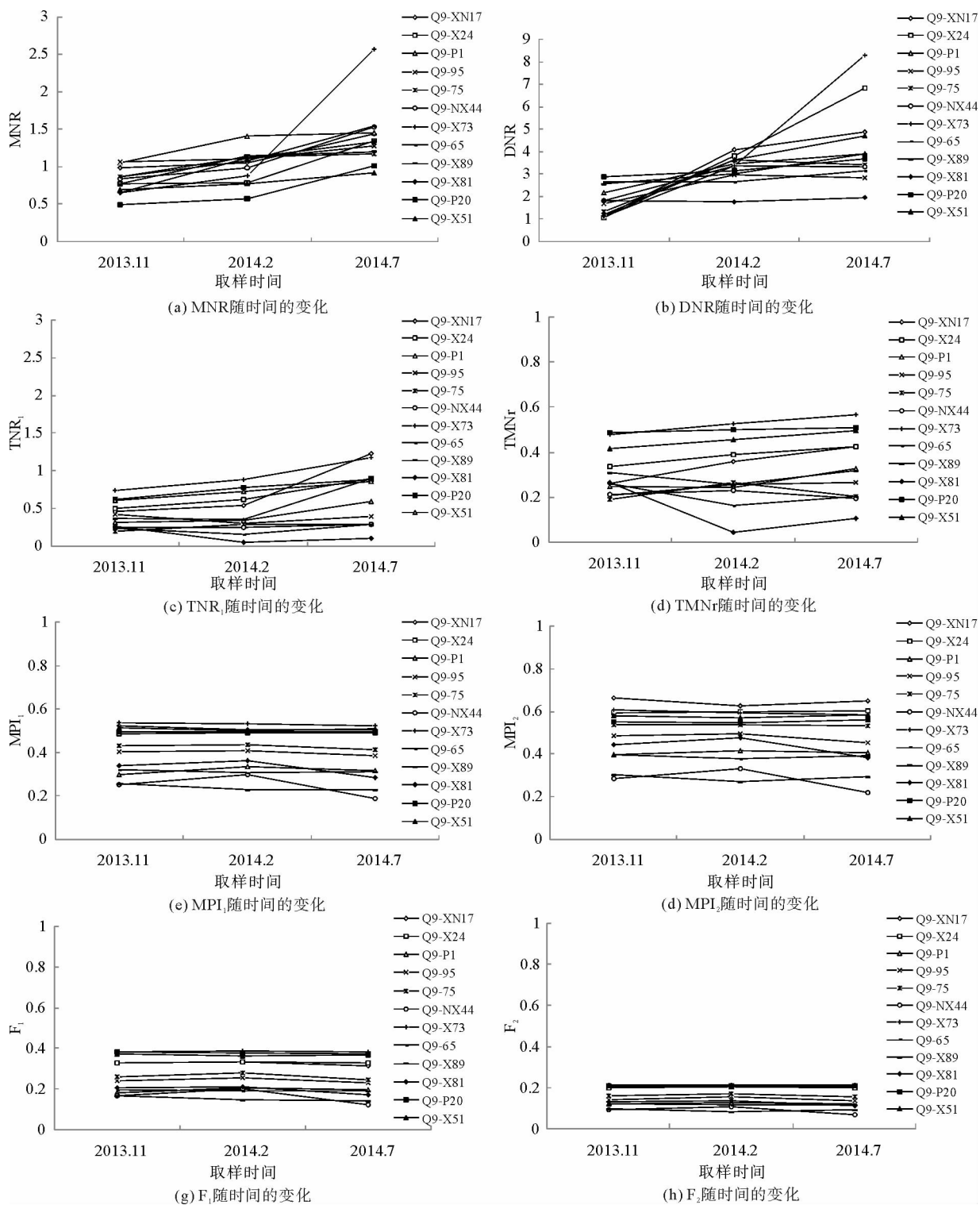


图2 原油烷基菲与烷基萘成熟度参数随注水开发过程的动态变化

Fig. 2 The variations of alkyl phenanthrene and alkyl naphthalene maturity parameters during the process of waterflooding

动态对比分析表明,二苯并噻吩成熟度参数在注水开发过程中变化不大,相对稳定(图3(a~c))。根据化学专业数据库可知,1-MDBT、2-MDBT、3-MDBT和4-MDBT的疏水参数均为5.034,所以水溶解性对这几类物质的影响基本一致。故在注水开发过程中,随着时间的推移,二苯并噻吩成熟度参数没有变化。

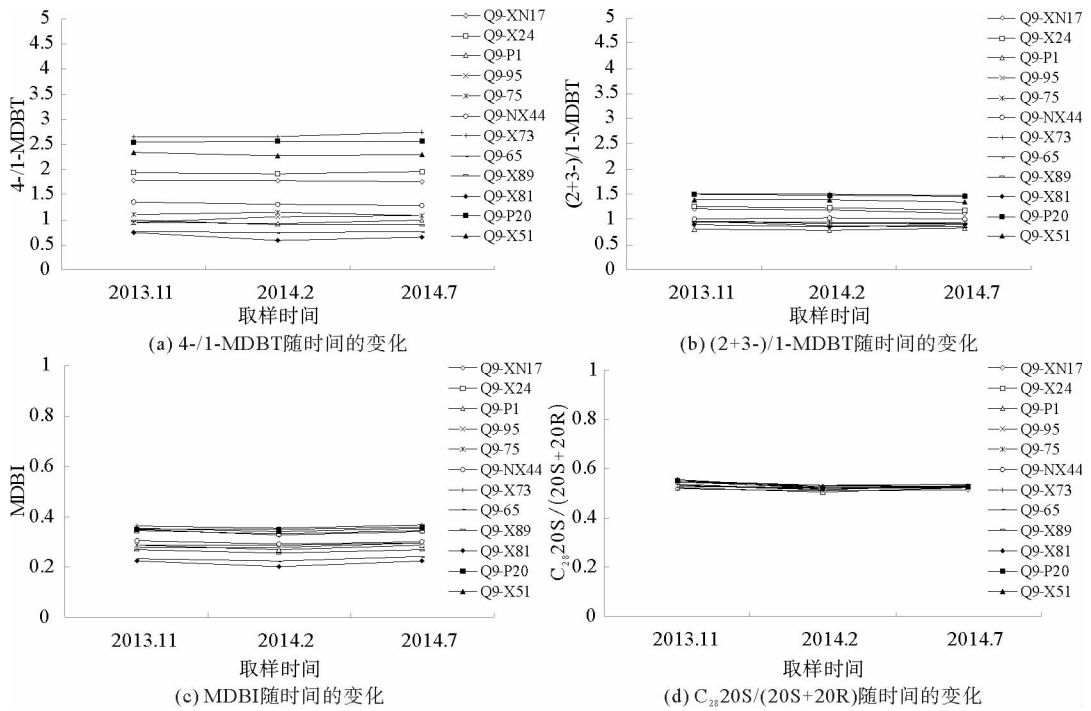


图 3 原油二苯并噻吩和三芳甾烷成熟度参数随注水开发过程的动态变化

Fig. 3 The variations of DBT and TAS maturity parameters during the process of waterflooding

### 3.4 三芳甾烷成熟度参数

在有机质热演化过程中,三芳甾烷结构和异构化作用比单芳甾烷和甾烷更敏感,因此有关三芳甾烷的参数可以反映有机质的热演化程度<sup>[23-24]</sup>。其中  $C_{28} 20S/(20S+20R)$  比值可以作为评价烃源岩中有机质和原油成熟度指标。对比分析表明,注水开发过程中,无论同一口井的样品  $C_{28} 20S/(20S+20R)$  比值变化,还是不同井的样品参数值变化范围,均呈现相对稳定、基本不变的规律(图 3(d))。根据  $C_{28}$  三芳甾烷结构来看,侧链 20 碳位为手性中心,具有 R、S 两种构型,即  $C_{28} 20S$  和  $C_{28} 20R$ ,互为旋光异构体,其物理和化学性质极其相似<sup>[25]</sup>。因此在注水开发过程中, $C_{28} 20S/(20S+20R)$  参数值不会有太大变化。

## 4 结论

- 1) 随着注水开发过程的推进,不同构型的芳烃化合物,由于溶解度或极性不同,体现不同的变化规律。
- 2) 烷基萘成熟度参数,甲基萘指数(MNR)、二甲基萘比值(DNR)、三甲基萘指数( $TNR_1$ )和三甲基萘比值( $TMNR$ )随开采时间的推进逐渐升高,可以用于指示注水开发的进程。
- 3) 烷基菲成熟度参数( $MPI_1$ 、 $MPI_2$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ )、二苯并噻吩成熟度参数(4-/1-MDBT、(2+3-)/1-MDBT)、三芳甾烷成熟度参数( $C_{28} 20S/(20S+20R)$ )随开采时间的推进基本保持不变,可以有效应用于原油成熟度评价、油气充注等研究。

### 参考文献:

[1] 郭建军,陈践发,李粉丽,等.注水开发过程中原油的水洗作用初探[J].地球化学,2007,36(2):215-216.  
GUO Jianjun, CHEN Jianfa, LI Fenli, et al. Influence of water washing on crude oils during water flooding[J]. Geochimica, 2007, 36(2): 215-216.

[2] 徐志明,王廷栋,姜平,等.原油水洗作用与高凝固点原油的成因探讨[J].地球化学,2000,29(6):556-557.  
XU Zhiming, WANG Tingdong, JIANG Ping, et al. Probe on the water washing with genesis of solidifying point crude oil [J]. Geochimica, 2000, 29(6): 556-557.

[3] 李玉桓,曹革新,杨济学.水驱油物模试验及原油在水驱过程中组分变化的分析研究[J].录井技术,2000,11(3):45.  
LI Yuhuan, CAO Gexin, YANG Jixue. Water-drive oil physical model test and the analysis research on the component chan-

- ging of oil during water-drive[J]. *Mud Logging Engineering*, 2000, 11(3): 45.
- [4] 常象春, 王明镇, 郭海花, 等. 注水开发过程中原油组成的动态变化特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(3): 375.  
CHANG Xiangchun, WANG Mingzhen, GUO Haihua, et al. Dynamic variations of oil compositions during the course of waterflood development[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(3): 375.
- [5] 张敏, 张俊. 水洗作用对油藏中烃类组成的影响[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 290-291.  
ZHANG Min, ZHANG Jun. Effect of waterwashing on hydrocarbon compositions of petroleum sandstone reservoir in Tarim basin, NW China[J]. *Geochemica*, 2000, 29(3): 290-291.
- [6] PALMER S E. Effect of water washing on  $C_{15}^+$  hydrocarbon fraction of crude oils from northwest Palawan, Philippines[J]. *AAPG Bull*, 1984, 68: 137-149.
- [7] LAFARGUE E, BARKER C. Effect of water washing on crude oil compositions[J]. *AAPG Bull*, 1988, 72: 263-276.
- [8] TISSOT B P, WELTE D H. *Petroleum formation and occurrence*[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [9] 李美俊, 王铁冠. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(6): 607-608.  
LI Meijun, WANG Tieguan. The generating mechanism of methylated naphthalene series in crude oils and the application of their maturity parameters[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(6): 607-608.
- [10] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: Relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 1-10.
- [11] RADKE M, RULLKOTTER J, VRIEND S P. Distribution of naphthalenes in crude oils from the Java sea; Source and maturation effects[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(17): 3675-3689.
- [12] ALEXANDER R, BASTOW T P, FISHER S J, et al. Geosynthesis of organic compounds: II. Methylation of phenanthrene and alkylphenanthrenes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(10): 2043-2056.
- [13] VAN AARSEN B G K, BASTOW T P, ALEXANDER R, et al. Distributions of methylated naphthalenes in crude oils: Indicators of maturity, biodegradation and mixing[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(10): 1213-1227.
- [14] 中国科学院上海有机化学研究所. 化学专业数据库[DB/OL]. (2015-10-31)[2016-03-30] <http://www.organchem.csdb.cn>.
- [15] 王连生, 汪小江. 多环芳烃的溶解度与双区理论[J]. *中国科学(B辑 化学 生物学 农学 医学 地学)*, 1988(9): 907-909.  
WANG Liansheng, WANG Xiaojiang. Solubility of polycyclic aromatic hydrocarbons and the theory of dual zone[J]. *Science China (B Chemistry Biology Agriculture Medicine Geology)*, 1988(9): 907-909.
- [16] 郭明, 许禄. 有机化合物的疏水参数与拓扑指数相关性的研究[J]. *化学学报*, 1996(12): 1145-1150.  
GUO Ming, XU Lu. Study on relationship between partition coefficient of compounds and topological indices[J]. *Acta Chimica Sinica*, 1996(12): 1145-1150.
- [17] 陆乾生, 宋永安. 有机化合物的异构现象[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [18] RADKE M, WELTE D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [M]. *Advances in Organic Geochemistry*. Chichester: Wiley, 1981: 504-512.
- [19] KVALHEIM O M, CHRISTY A A, TELNAES N, et al. Maturity determination of organic matter in coals using the methylphenanthrene distribution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(7): 1883-1888.
- [20] 罗健, 程克明, 付立新, 等. 烷基二苯并噻吩: 烃源岩热演化新指标[J]. *石油学报*, 2001, 22(3): 28-30.  
LUO Jian, CHENG Keming, FU Lixin, et al. Alkylated dibenzothiophene index: A new method to assess thermal maturity of source rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(3): 28-30.
- [21] 包建平, 王铁冠, 陈发景. 烃源岩中烷基二苯并噻吩组成及其地球化学意义[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1996, 20(1): 19-22.  
BAO Jianping, WANG Tieguan, CHEN Fajing. Relative abundance of alkyl dibenzothiophene in the source rocks and their geochemical significances[J]. *Journal of China University of petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 1996, 20(1): 19-22.
- [22] 魏志彬, 张大江, 张传禄, 等. 甲基二苯并噻吩分布指数(MDBI)作为烃源岩成熟度标尺的探讨[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 245-246.  
WEI Zhibin, ZHANG Dajiang, ZHANG Chuanlu, et al. Methylated dibenzothiophenes distribution index as a tool for maturity assessments of source rocks[J]. *Geochimica*, 2001, 30(3): 245-246.
- [23] MACKENZIE A S, HOFFMANN C F, MAXWELL J R. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France-III; Changes in aromatics steroid hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(8): 1345-1355.
- [24] MACKENZIE A S, LEWIS C A, MAXWELL J R. Molecular parameters of maturations in the Toarcian shales, Paris basin-IV; Laboratory thermal alteration studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(12): 2369-2376.
- [25] 林瑞余. 有机化学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.