

文章编号:1000-0550(2018)04-0818-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.093

# 鄂尔多斯盆地盐池一定边地区长7段烃源岩芳烃地球化学特征

刘亚洲,刚文哲,陈果,孙晶波,姜崇

中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

**摘要** 基于鄂尔多斯盆地盐池一定边地区13口井16块长7段烃源岩样品的GC-MS分析资料,研究了源岩的芳烃地球化学特征,进行了生源和沉积环境的分析,并探讨了芳烃系列成熟度评价参数在该地区的有效性。研究结果显示:研究区源岩主要以二环和三环芳烃类化合物为主,而四环和五环芳烃类化合物较低,芴含量较高,普遍含有1,2,5-TMN和1,2,5,6-TeMN且部分样品含量偏高,并检测出一定含量的萜烯、菲、蒽和芘等陆源高等植物生物标志化合物,表明研究区源岩形成于滨浅湖弱氧化—弱还原的环境中,高等植物的输入对该地区源岩的形成占有一定贡献。芳烃中烷基萘、烷基菲和烷基二苯并噻吩等成熟度参数表明源岩样品现今正处于成熟阶段。虽然利用不同系列芳烃类化合物求取的等效镜质体反射率存在一定差异,但能定性地反映出源岩的热演化程度。

**关键词** 盐池一定边地区;芳烃;地球化学特征;成熟度

**第一作者简介** 刘亚洲,男,1992年出生,硕士研究生,油气地球化学,E-mail:158776013@qq.com

**通信作者** 刚文哲,男,教授,E-mail:gangwenzhe@cupl.edu.cn

**中图分类号** P593 P618.13 **文献标志码** A

## 0 引言

鄂尔多斯盆地是我国油气勘探的一个重要的含油气盆地,石油主要分布于侏罗系延安组和三叠系延长组,其中长庆油田截止2016年底在该盆地年产油气当量连续四年突破5000万吨,成为国内油气生产的绝对主力。前人关于上三叠统延长组进行了大量研究分析表明延长组形成于淡水—微咸水湖泊沉积环境,烃源岩以处于低熟—成熟阶段的长4+5—长9段的半深湖—深湖环境中的泥页岩为主<sup>[1]</sup>,其中长7段为该盆地延长组的主力烃源岩层段<sup>[2]</sup>。即使是同一层位的烃源岩也会由于沉积环境等因素的不同而导致不同位置的烃源岩生烃潜力的差异,这直接影响着研究区的勘探前景。盐池一定边地区位于鄂尔多斯盆地的西北缘,勘探程度相对较低,根据研究区钻探井位的录井资料揭示该研究区的长8段、长9段和长4+5段具有很好的油气显示,并且在峰2井获得了高产油气流<sup>[3]</sup>。盐池一定边地区远离湖盆中心,烃源岩有机地球化学特征与湖盆中心的烃源岩存在差异。芳烃作为烃源岩抽提物的一个重要组成部分,

可提供丰富地质信息,包括生源母质类型、沉积环境、成熟度和油源对比,且芳烃相对于饱和烃具有更强的稳定性,在成熟度评价过程中适用范围更广,因此在有机质成熟度评价中显示出其特有的优越性,对芳烃的深入研究也是对饱和烃研究的一个很好的补充和佐证<sup>[4-5]</sup>。目前对于盐池一定边地区长7段烃源岩芳烃地球化学特征的系统研究较为薄弱,本文通过芳烃色谱—质谱实验分析,对盐池一定边地区烃源岩抽提物中的芳烃生物标志化合物特征进行系统分析,从而明确研究区烃源岩的生源、沉积环境和成熟度特征,以期有助于深入认识研究区的油气成因,为区内中生界的进一步勘探提供参考依据。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于我国的中西部,是继塔里木盆地之后的我国的第二大沉积盆地,整体形状为一南北向延伸的矩形盆地。盆地地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,面积约 $25 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,可供勘探的面积达到 $10 \times 10^4$  km<sup>2</sup>以上。鄂尔多斯盆地东自吕梁山,西抵贺兰山、六盘山,南到秦岭,北起阴山、大青山和狼山<sup>[6-7]</sup>。根

收稿日期:2017-10-18;收修改稿日期:2018-01-02

基金项目:中国石油长庆油田分公司陕北石油预探项目组重大攻关项目(2016-007) [Foundation: Major Research Projects of Oil Pre Exploration Project Group in Northern Shaanxi Branch of PCOC, No. 2016-007]

据鄂尔多斯盆地的构造特征、基底性质以及现今的构造形态,可以将鄂尔多斯盆地划分为六个一级构造单元(图1),即东部晋西挠褶带、西部天环坳陷、南部渭北隆起带、北部伊盟隆起带、中部伊陕斜坡带和西缘隆起带。盆地演化至今,虽经历过吕梁、晋宁、加里东、海西、印支、燕山和喜山等多期构造运动叠合的影响,但盆地内构造环境相对稳定。根据前人的研究成果<sup>[8]</sup>,该盆地的构造演化史可以分为中晚元古代坳拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代近海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷五个演化阶段,其中中生代内陆湖盆阶段形成了该盆地最为重要的三叠系和侏罗系油藏。晚三叠世是鄂尔多斯盆地烃源岩主要发育时期,湖盆水体经历了浅—深—浅的变化过程,在湖盆鼎盛时期深湖—半深湖相发育的泥页岩为该盆地中生界的主力烃源岩。晚三叠世延长组根据地层的沉积特征和油层的纵向分布特征,可以将延长组分为5段10个油层组。长10到长8时期为湖盆的扩张时期,长7为湖盆的鼎盛时期,长6到长1时期为湖盆消亡时期,至此完成了湖泊的出现、发展和消亡的整个过程<sup>[9-10]</sup>。受到多重因素的影响<sup>[11-12]</sup>,长7烃源岩成为全盆最为发育的优质烃源岩。本次研究所取盐池—定边地区13口井16块烃源岩样品,井位见图1,通过芳烃化合物组成特征和相对含量来探讨研究区烃源岩的生源和沉积环境特征,选取有效的烷基萘、烷基菲和三芳甾烷等系列成熟度参数来进行烃

源岩成熟度评价。

## 2 样品和实验

本次研究在盐池—定边地区13口井的上三叠统延长组中的长7油层组共采集了16块源岩样品,岩性为深灰色、灰色泥岩。源岩样品的有机碳含量主要介于0.77%~7.17%,平均值为2.79%;生油潜量( $S_1 + S_2$ )大都变化在1.11~39.20 kg/t,平均值为9.03 kg/t;氯仿沥青“A”含量为0.12%~1.16%,平均值为0.48%(表1)。与有机碳含量相比,生油潜量和氯仿沥青“A”反映的有机质丰度值显得偏高,表明研究区烃源岩生成液态烃量较大的特点。源岩样品的干酪根碳同位素组成分布于-24.7‰~-30.6‰之间,变化范围较大;饱和烃含量介于12.95%~58.42%,饱和烃/芳烃比值大于1;氢指数主要介于82~491 mg/g之间,表明研究区有机质类型主要为 $II_1$ 和 $II_2$ 混合型有机质(图2)。所选的16块源岩样品的热解 $T_{max}$ 为441℃~455℃,根据范式图可以发现这些样品均属于成熟烃源岩,且正处于生油窗范围。

烃源岩样品粉碎至100目,经索氏抽提72小时,称取适量的氯仿沥青“A”放入三角瓶中,先用石油醚进行溶解、过滤,其中不能溶解的组分即为沥青质,然后用硅胶/氧化铝柱层析分离,分别用石油醚、以2:1比例混合的二氯甲烷和石油醚、以93:7比例混合的二氯甲烷和甲醇依次分离得到饱和烃、芳烃、非烃组

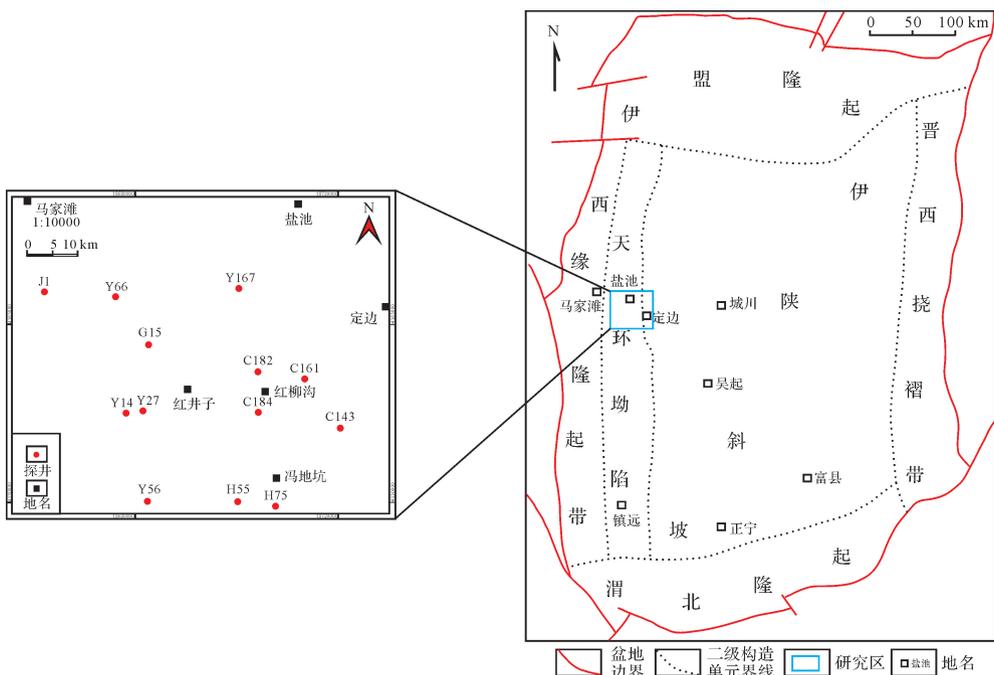


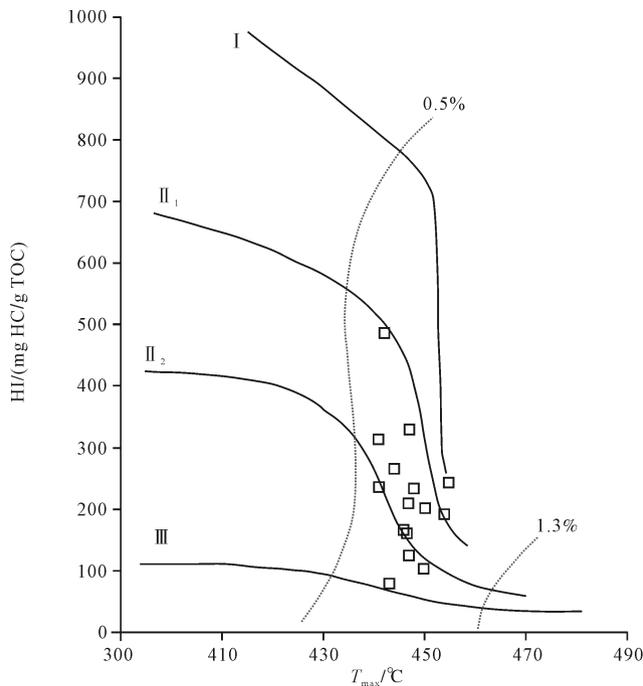
图1 研究区地质构造及采样点位置图

Fig.1 Geological structure of the study area showing the sampling locations

表1 盐池—定边地区烃源岩热解参数与族组成特征

Table 1 Pyrolysis parameters and group compositions of source rocks in the Yanchi-Dingbian area

井名	深度 /m	层位	TOC /%	氯仿沥青 “A”/%	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> /(mg/g)	T <sub>max</sub> /°C	HI /(mg/g)	饱和烃 /%	芳烃 /%	非烃+沥青质 /%	饱/芳 比值	δ <sup>13</sup> C 干酪根 /‰
C143	2 696.0	长7	1.92	0.40	5.46	450	204	39.72	14.32	36.08	2.77	-27.4
C161	2 246.5	长7	3.74	0.39	9.89	455	245	15.10	13.01	60.23	1.16	-28.8
C182	2 340.0	长7	4.31	0.62	15.15	441	315	27.29	12.84	52.08	2.13	-30.6
C184	2 340.3	长7	2.23	0.40	5.19	454	195	35.53	20.51	33.30	1.73	-28.8
G15	2 342.6	长7	0.77	0.26	1.48	447	127	42.10	12.92	35.83	3.26	-25.8
H55	2 599.1	长7	3.21	0.41	8.33	448	235	26.73	18.36	42.47	1.46	-28.6
H75	2 599.3	长7	1.83	0.38	3.39	447	165	14.56	11.25	65.53	1.29	-26.8
J1	1 003.1	长7	1.30	0.12	1.28	443	82	15.38	12.31	61.06	1.25	-24.7
Y14	2 520.3	长7	0.79	0.14	1.11	450	104	34.40	14.19	42.77	2.42	-25.2
Y167	2 381.3	长7	5.96	1.12	21.45	447	332	19.63	10.29	57.73	1.91	-27.4
Y27	2 474.5	长7	1.49	0.44	4.39	446	167	30.77	11.15	45.62	2.76	-26.2
Y56	2 984.4	长7	7.17	1.16	39.2	442	491	27.50	19.50	40.85	1.41	-29.0
Y56	2 963.8	长7	3.49	0.78	11.9	444	268	40.49	20.17	29.58	2.01	-29.6
Y56	2 971.4	长7	3.81	0.70	11.18	441	238	31.99	14.15	43.40	2.26	-28.6
Y66	2 265.0	长7	1.02	0.15	2.41	447	212	25.23	17.23	45.15	1.46	-28.0
Y66	2 271.4	长7	1.64	0.20	2.59	447	127	12.95	11.51	64.66	1.13	-25.8

图2 盐池—定边地区烃源岩有机质类型范氏图解  
(底图据 Espitalie *et al.* [13])Fig.2 Van Krevelen diagram for source rocks in  
Yanchi-Dingbian area (based on Espitalie *et al.* [13])

分。每个组分自然风干保存,以备进入色谱—质谱分析仪检测。

烃源岩的芳烃组份采用常规色谱分离,分离前加入 D-DBT 标样。芳烃分析使用美国 Agilent 公司生产的 7890-5975c 色谱—质谱—质谱联用仪,色谱分

析条件:色谱柱为 HP-5MS 弹性石英毛细柱 (60 m×0.25 m×0.25 μm),采用纯度为 99.999% 氦气作为载气,载气流速为 1 mL/min,进样口温度为 290 °C,传输线温度为 250 °C,进样方式为不分流进样。升温程序:柱始温 50 °C,恒温 1 min,以 15 °C/min 的升温速率升至 120 °C,再以 3 °C/min 的升温速率升至 300 °C,保持恒温 35 min。质谱分析条件:离子源采用电子 (EI) 轰击,电子能量 70 eV,绝对电压 1 047 V,采用全扫描/选择离子采集方式,质量扫描范围 *m/z* 为 50~600,扫描时间为 1.8 s。化合物的定性研究是根据《气相色谱质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》(GB/T18606—2001) 为标准,化合物的定量研究是在其特征离子对应的质量色谱图中完成。根据不同系列化合物在质量色谱图中的峰面积进行相关参数比较和计算。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 芳烃宏观分布特征

盐池—定边地区烃源岩抽提物的芳烃组份中共检测出 168 种芳烃类化合物,主要包括萘系列、菲系列、蒽系列、芘系列、二苯并噻吩系列、联苯系列、二苯并呋喃系列、芴系列和三芳甾烷系列等化合物。芳烃的宏观组成特征受到母质类型、沉积环境和成熟度等因素的影响。芳烃类化合物中的二环至五环芳香烃在有机质热演化过程中,呈现出低环芳烃逐步增加、多环芳烃逐步减少的规律<sup>[14]</sup>。根据前人研究<sup>[15-16]</sup>可以

发现,未熟—低熟样品的芳烃色谱图往往呈现出后峰型或者双峰型的分布特征,后峰型即以四环或者五环化合物为主,双峰型即二环、三环化合物含量与四环、五环化合物含量大致相当;中—高熟样品的芳烃色谱

图常常表现出前峰型的分布特征,即以二环或者三环化合物为主。从研究区源岩样品的芳烃总离子流图(图3)可以看出,研究区长7烃源岩以二环或三环化合物为主,四环和五环芳烃化合物含量相对较低,呈

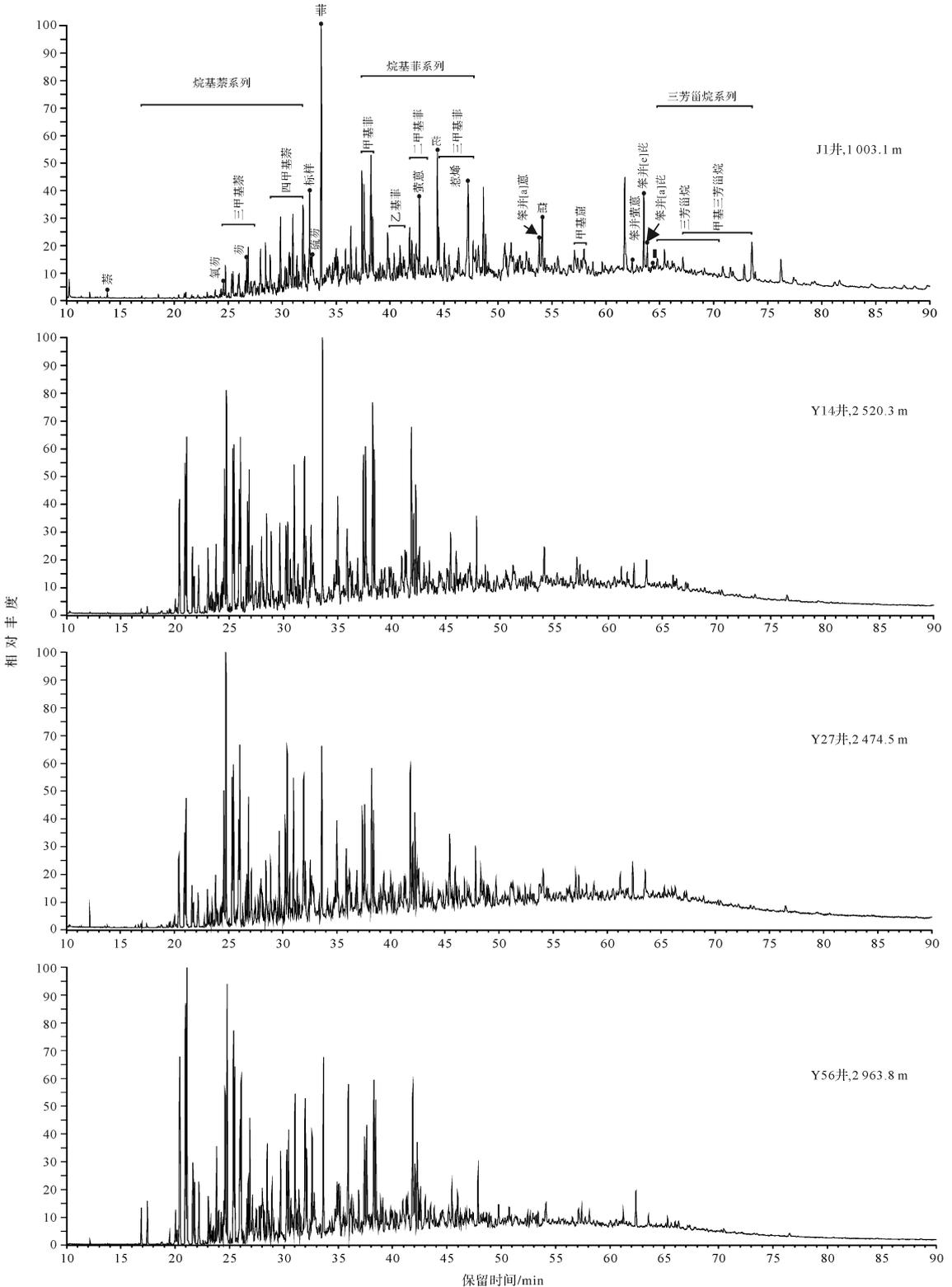


图3 研究区源岩芳烃总离子流图

Fig.3 The TIC of aromatic hydrocarbon of source rocks in the study area

现出前峰型的分布特征,但该分布特征可能是受多种因素影响的结果。该样品中还检测出了丰富的稠环芳烃类化合物,主要包括卡达烯、蒽烯、蒎、萤葱、苯并萤葱、苯并芘和芘等典型的高等植物生源的生物标志化合物<sup>[17-18]</sup>,反映出高等植物的输入对该地区的烃源岩形成具有一定的贡献。

### 3.2 萘系列化合物

研究区的长7烃源岩样品中普遍存在萘和多甲基取代萘系列化合物,且含量较高,该系列化合物的广泛存在也反映出陆源有机质的输入对该地区烃源岩的形成占有一定的贡献<sup>[19]</sup>。萘系列化合物的分布特征同样受到生源、成熟度的影响,因此可以用多甲基取代萘系列化合物的分布特征和相对比值来反映研究区的有机质类型和成熟度等信息。萘系列化合物在研究区源岩样品中主要有萘、甲基萘、二甲基萘、三甲基萘和四甲基萘,其中二甲基萘、三甲基萘和四甲基萘相对含量较高,而萘和甲基萘含量较低。结合所取样品的深度和萘系列化合物分布特征,还可以看出随着埋藏深度的增加,二甲基萘和三甲基萘的相对含量有所增大(图3)。根据前人研究成果<sup>[20]</sup>认为,1,2,5-TMN和1,2,5,6-TeMN化合物存在两种生物先质,即高等植物生源的五环三萜香树脂素或者树脂生

源的二环二萜刺柏酸,因此萘系列中这两种化合物的存在可以作为陆源高等植物生源的生物标志物。研究区源岩样品普遍含有1,2,5-TMN和1,2,5,6-TeMN(表2),且部分样品含量偏高,表明研究区源岩的生源主要以低等水生生物为主,同时部分位置含有较多的高等植物的有机质。随着有机质热演化程度的增高,热力学中不稳的 $\alpha$ 位取代基向较为稳定的 $\beta$ 位迁移,即具有 $\beta$ 位取代基的异构体含量相对增加<sup>[21-22]</sup>。

通过对研究区源岩样品中MNR、TNR<sub>1</sub>和TNR<sub>2</sub>参数对比研究可以发现研究区的源岩样品成熟度相差不大。利用TNR<sub>2</sub>计算的类似镜质体反射率 $R_1$ 介于0.77%~0.98%之间,平均值为0.86%,也反映出该研究区源岩现今处于成熟阶段。萘系列化合物参数可以定性的反映出有机质的相对热演化程度,但在利用TNR<sub>2</sub>来计算类似的镜质体反射率可能与真实的镜质体反射率存在一定的差异,还需要结合其他地球化学参数来共同判识。三甲基萘指数TMNr和四甲基萘指数TeMnr也是常用的成熟度参数,这两个参数会随着成熟度增加而增大。陈致林等<sup>[23]</sup>通过对临清坳陷中的禹城洼陷的生油岩芳烃化合物研究时,认为三甲基萘指数和四甲基萘指数可以有效地确定低—高

表2 研究区源岩芳烃地球化学参数

Table 2 The aromatic geochemical parameters of source rocks from the study area

井名	深度/m	层位	MNR	TNR <sub>1</sub>	TNR <sub>2</sub>	$R_1$	1,2,5- /TMN	1,2,5,6- /TeMN	TMNr	TeMnr	MPI <sub>1</sub>	$R_2$	$F_1$	$F_2$	$C_{28}20S/(20S+4-1-20R)$ TAS	4,6-/1,4-MDBT	$R_3$	
C143	2 696.0	长7	0.68	1.04	0.71	0.83	0.08	0.14	0.67	0.47	0.86	0.92	0.45	0.24	0.57	5.18	1.42	0.77
C161	2 246.5	长7	0.84	1.40	0.91	0.94	0.06	0.16	0.75	0.70	0.76	0.85	0.47	0.25	0.59	5.76	1.47	0.78
C182	2 340.0	长7	0.87	0.87	0.76	0.85	0.24	0.33	0.31	0.45	0.88	0.93	0.50	0.26	0.57	2.71	0.69	0.67
C184	2 340.3	长7	0.96	1.25	0.79	0.87	0.05	0.13	0.77	0.61	0.72	0.83	0.44	0.25	0.58	5.52	1.47	0.78
G15	2 342.6	长7	0.66	0.97	0.64	0.78	0.09	0.14	0.62	0.33	0.77	0.86	0.42	0.23	0.57	5.77	1.39	0.76
H55	2 599.1	长7	0.81	0.83	0.63	0.78	0.09	0.13	0.60	0.39	0.81	0.88	0.45	0.23	0.58	5.54	1.36	0.76
H75	2 599.3	长7	0.79	1.46	0.74	0.84	0.18	0.16	0.45	0.36	0.73	0.84	0.44	0.25	—	3.03	0.95	0.70
J1	1 003.1	长7	1.27	1.28	0.81	0.89	0.22	0.33	0.37	0.61	0.75	0.85	0.53	0.26	0.52	3.21	0.97	0.71
Y14	2 520.3	长7	0.79	0.99	0.81	0.89	0.11	0.23	0.56	0.53	0.86	0.91	0.47	0.25	0.54	3.79	0.93	0.70
Y167	2 381.3	长7	1.55	1.85	0.95	0.97	0.09	0.13	0.68	0.58	0.83	0.90	0.50	0.28	0.48	4.28	1.07	0.72
Y27	2 474.5	长7	0.83	1.29	0.76	0.86	0.10	0.18	0.60	0.37	0.70	0.82	0.45	0.25	0.58	3.97	1.13	0.73
Y56	2 984.4	长7	0.70	0.78	0.62	0.77	0.10	0.15	0.57	0.38	0.77	0.86	0.42	0.22	0.58	4.91	1.11	0.72
Y56	2 963.8	长7	0.84	0.77	0.72	0.83	0.09	0.18	0.59	0.48	0.69	0.82	0.42	0.23	0.56	5.38	1.20	0.74
Y56	2 971.4	长7	2.41	1.08	0.75	0.85	0.12	0.17	0.57	0.45	0.77	0.86	0.42	0.23	0.57	5.49	1.16	0.73
Y66	2 265.0	长7	0.71	1.10	0.85	0.91	0.19	0.30	0.41	0.57	0.79	0.87	0.52	0.26	0.56	2.89	0.83	0.69
Y66	2 271.4	长7	1.40	1.61	0.96	0.98	0.29	0.34	0.32	0.54	0.87	0.92	0.54	0.28	0.53	2.73	0.70	0.67

注: MNR=2-MN/1-MN; TNR<sub>1</sub>=2,3,6-TMN/(1,4,6-TMN+1,3,5-TMN); TNR<sub>2</sub>=(1,3,7-TMN+2,3,6-TMN)/(1,3,5-TMN+1,3,6-TMN+1,4,6-TMN);  $R_1=0.6 \times TNR_2+0.4$ ; 1,2,5-/TMN=1,2,5-TMN/1,2,5,6-TeMN; 1,2,5,6-TeMN/TMNr=2,3,6-TMN/(2,3,6-TMN+1,2,5-TMN); TeMnr=(1,3,6,7-TeMN)/(1,3,6,7-TeMN+1,2,5,7-TeMN); MPI<sub>1</sub>=1.5×(2-MP+3-MP)/(P+9-MP+1-MP);  $R_2=0.6 \times MPI_1+0.4$ ( $R_2$ 介于0.65%与1.35%之间);  $F_1=(2-MP+3-MP)/(2-MP+3-MP+1-MP+9-MP)$ ;  $F_2=2-MP/(2-MP+3-MP+1-MP+9-MP)$ ;  $R_3=0.14 \times [(4,6-DMDBT)/(1,4-DMDBT)]+0.57$

整个热演化阶段原油和生油岩的成熟度,并不受运移过程分馏效应的影响,对成熟度的变化反映灵敏,高成熟的原油与源岩的这两比值都大于0.5,成熟源岩与原油的这两比值介于0.4~0.6,低熟原油与源岩这两比值介于0.3~0.5,未熟原油与源岩这两比值都小于0.4。研究区的长7烃源岩样品三甲基萘指数TMNr比值介于0.31~0.77,平均值为0.55;四甲基萘指数TeMNr比值介于0.33~0.70,平均值0.49;从研究区源岩样品的TMNr和TeMNr的交会图(图4)中可以看出,研究区源岩现今处于成熟—高成熟阶段,这与实际情况相矛盾,说明这两个比值在该地区还受其他因素(生源、沉积环境等)的影响,该参数不适合于研究区源岩成熟度评价。

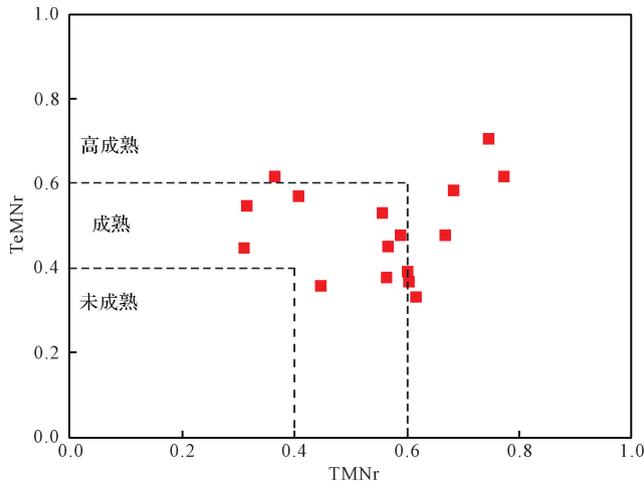


图4 研究区源岩TMNr和TeMNr相互关系图

Fig.4 The correlation between TMNr and TeMNr of source rocks from the study area

### 3.3 菲系列化合物

菲系列化合物主要用于原油和烃源岩的成熟度评价,其中的个别化合物具有生源和沉积环境的指示意义。研究区烃源岩样品中共检测出菲、甲基菲、乙基菲、二甲基菲、三甲基菲和蒽烯等系列化合物(图3)。研究区烷基菲系列化合物相对丰度由小到大依次为:乙基菲<蒽烯<三甲基菲<二甲基菲<甲基菲。作为典型的陆源高等植物的生物标志化合物蒽烯在所分析的样品中含量相对较高,该化合物虽然可能有其他来源,但目前通常认为是由松香酸和海松酸通过部分降解而来<sup>[24-25]</sup>。这些烃源岩样品中蒽烯的含量相对较高,可能与该研究区的沉积环境具有较强的氧化性有关,因为蒽烯一般形成于含氧环境中<sup>[26]</sup>。

在有机质热演化过程中,菲系列化合物甲基化、

甲基重排及脱甲基化作用主要受到热力学作用控制,而受到沉积环境影响相对较小,热稳定性强的异构体含量相对增加而热稳定性差的异构体含量相对减少。Radke *et al.*<sup>[27]</sup>最早提出利用菲和甲基菲的相对含量来计算成熟度参数甲基菲指数,并用甲基菲指数来换算等效的镜质体反射率。在此基础之上,国内外学者进行了大量的实验研究和论证,用于解决烃源岩与原油的成熟度评价的问题。研究区的源岩甲基菲指数(MPI<sub>1</sub>)主要介于0.78~0.88,对应的等效镜质体反射率R<sub>2</sub>介于0.82%~0.93%,综合该参数也可以定性的看出研究区烃源岩现今正处于成熟阶段。Kvalheim *et al.*<sup>[28]</sup>提出利用甲基菲比值F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>来对源岩和原油进行成熟度评价,包建平<sup>[29]</sup>在此研究的基础之上,提出源岩低熟阶段F<sub>1</sub>小于0.4、F<sub>2</sub>小于0.27,成熟阶段F<sub>1</sub>介于0.40~0.55、F<sub>2</sub>介于0.27~0.35,高熟阶段F<sub>1</sub>大于0.55、F<sub>2</sub>大于0.35。研究区源岩样品的甲基菲比值F<sub>1</sub>介于0.42~0.54、F<sub>2</sub>介于0.22~0.28,与已有的评价标准相矛盾。因而该甲基菲比值可能受到其他因素的影响不适合在该研究区进行源岩成熟度判别。

### 3.4 三芴系列化合物

三芴系列化合物是芳烃地球化学研究中最常见的一类指标,既可以用于指示源岩或者原油形成时的沉积环境,又可以用于油源对比以及油油对比中。在陆相淡水、微咸水湖相中的烃源岩或者原油中芴相对含量较高,在沼泽相煤或者煤成油中氧芴相对含量较高,在盐湖相或者海相碳酸盐烃源岩中硫芴相对含量较高<sup>[30-31]</sup>。从图5三芴系列组成三角图中可以看出,芴含量较高(57.36%~65.09%),其次是氧芴含量(20.71%~34.29%),硫芴含量相对最低(8.35%~17.09%),表明研究区的长7烃源岩形成于滨浅湖的沉积环境。该沉积环境有别于沼泽环境,沼泽相的煤系烃源岩也主要分布于IV区内,但该类烃源岩主要分布在“三芴”系列组成中氧芴系列相对含量大于50%的IV区的右下方。结合Pr/Ph和w(硫芴系列)/w(氧芴系列)相关关系图(图6)也可以看出研究区的长7烃源岩形成于弱氧化—弱还原的沉积环境中。

烷基二苯并噻吩分子结构对称,具有高度的热稳定性和抗生物降解能力,在各个时代的地层中都有广泛的分布,是常用的烃源岩热演化程度评价参数,可用于低熟—高熟阶段的成熟度评价。在有机质热演化过程中,相对稳定的二苯并噻吩系列化合物异构体相对增加而不稳定的二苯并噻吩系列化合物异构体相对减少。Radke *et al.*<sup>[19]</sup>提出甲基二苯并噻吩参数

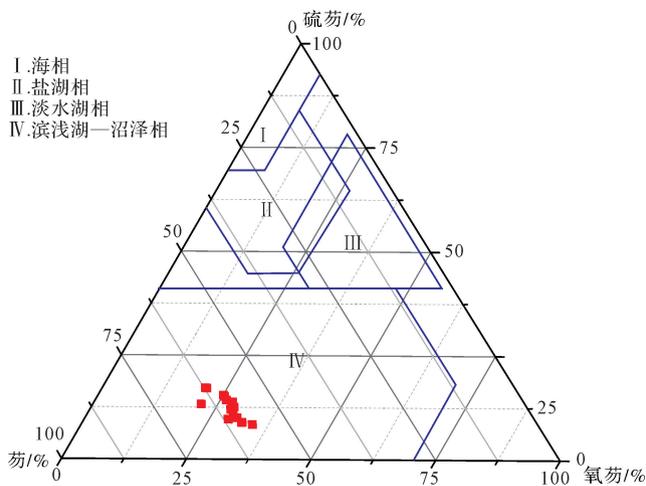


图5 三芴系列相对含量三角图

Fig.5 Triangular plots of relative contents of fluorenes (F), dibenzothiophene (SF) and dibenzofuran (OF) of source rocks from the study area

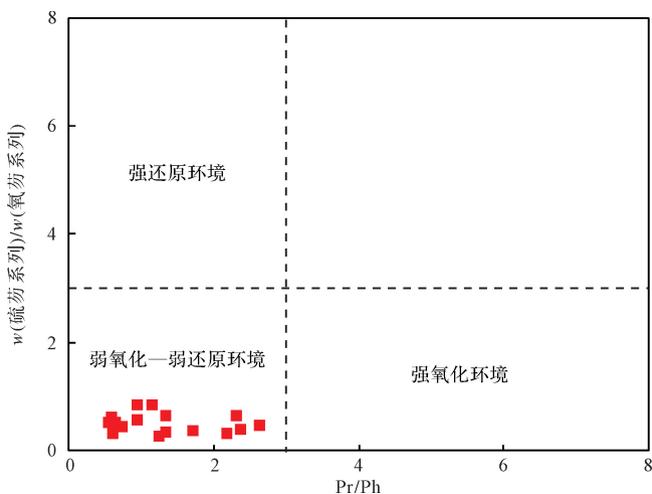


图6 源岩 Pr/Ph 与  $w(\text{硫芴系列})/w(\text{氧芴系列})$  关系图

Fig.6 The relationship between pristane/phytane and  $w(\text{dibenzothiophene})/w(\text{dibenzofuran})$  of source rocks

(4-MDBT/1-MDBT), 4-MDBT 相对于 1-MDBT 热稳定性更高,且随着热演化程度的升高该比值增大。研究区长 7 烃源岩 4-MDBT/1-MDBT 相对丰度比值介于 2.71~5.77 之间,平均值为 4.39,表明该地区的烃源岩现今处于成熟阶段。Chakhmakhchev *et al.*<sup>[31]</sup> 研究发现二甲基二苯并噻吩中 4,6-DMDBT 相对含量随着热演化程度的增加而增加,1,4-DMDBT 相对含量随着热演化程度的增加而减少,因而可以用 4,6-DMDBT 和 1,4-DMDBT 的比值来评价烃源岩的成熟度。罗健等<sup>[32]</sup> 通过对烷基二苯并噻吩的系统研究,建立了利用二甲基二苯并噻吩来求去等效的镜质体反射率

$R_3$  经验公式。研究区的长 7 烃源岩等效镜质体反射率  $R_3$  介于 0.67%~0.78%,平均值为 0.73%,属于成熟阶段的范畴,与前面其他参数得出的结论相一致。

### 3.5 三芳甾烷系列化合物

现今对三芳甾烷系列化合物研究相对较多,该系列化合物既可用于成熟度评价,又可用于指示生源和沉积环境。三芳甾烷在有机质热演化过程中不断发生着高碳数向低碳数转化,致使低碳数三芳甾烷相对增加。芳香甾烷随着成熟度增加,伴随着发生着芳构化及断侧链等作用,且主要发生在生烃门限以下,并可以一直持续到湿气阶段<sup>[32-34]</sup>。盐池一定边地区长 7 烃源岩中都检测出了三芳甾烷 ( $m/z231$ ) 和甲基三芳甾烷 ( $m/z245$ ) 系列化合物 (图 7)。利用三芳甾烷系列化合物来评价成熟度的参数众多,考虑到一些异构体共逸而难以进行有效区分,本文选用  $C_{28}20S/(20S+20R)$ -TAS 进行源岩成熟度评价。研究区源岩  $C_{28}20S/(20S+20R)$ -TAS 比值介于 0.48~0.59,平均值为 0.56,表明该研究区源岩成熟度相差不大,且主要处于成熟阶段。该参数与前面成熟度评价参数相吻合,表明该参数在研究区是一个可靠的成熟度评价参数。

### 3.6 其他多环芳烃系列化合物

研究区长 7 烃源岩还检测出具有生源意义的其他多环芳烃系列化合物,包括苯并蒽、甲基蒽、苯并荧蒽、苯并芘、菲和甲基芘,其中菲、蒽、蒽系列化合物的检出,表明研究区陆源有机质具有一定的贡献。羟基菲醌色素是菲的可能先质,它在热演化过程中能生成菲,同时该色素常见于昆虫、真菌和陆地植物中<sup>[35]</sup>。因此,菲被认为是陆源有机质的重要指示,在煤系或者 III 型干酪根中普遍存在菲。菲系列化合物的含量也受到成熟度的影响,在低成熟源岩样品中含量较高,而在镜质体反射率高于 0.8% 该化合物的含量迅速减少,研究区的菲含量较低也从另一方面证实研究区源岩现今处于生油窗范围。苯并荧蒽和苯并 [e] 芘虽然都是五元稠环芳烃,但是苯并荧蒽是四个六元环和一个五元环,而苯并 [e] 芘具有五个六元环,在有机质热演化过程中苯并 [e] 芘相对于苯并荧蒽具有更高的热稳定性,因此随着有机质热演化程度的增高苯并荧蒽/苯并 [e] 芘比值减小<sup>[23]</sup>。研究区的长 7 烃源岩样品苯并荧蒽/苯并 [e] 芘比值介于 0.02~0.23 之间,平均值值为 0.09,也反映出研究区源岩处于成熟阶段。值得注意的是该比值过小,可能还受到生源或者沉积环境的影响。

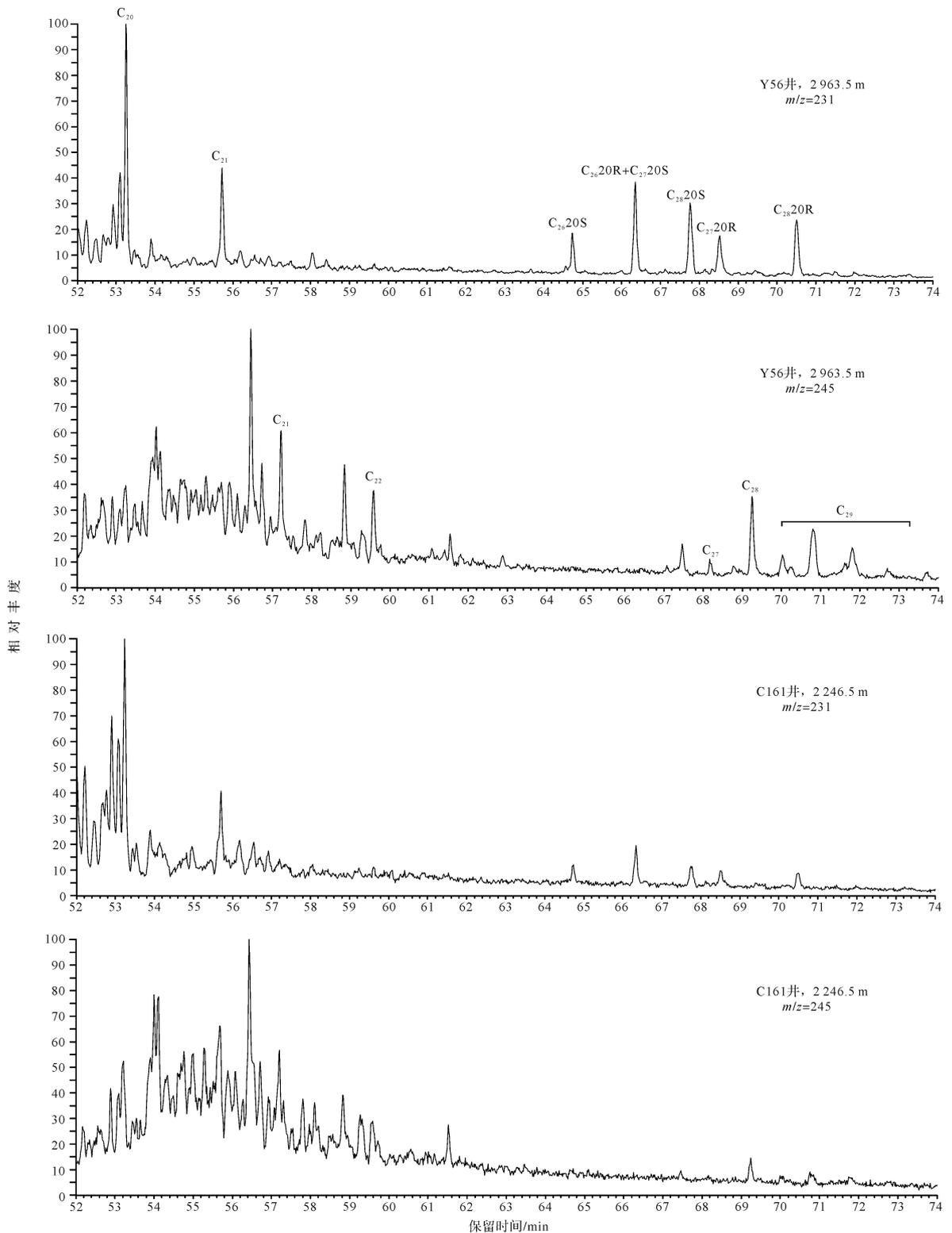


图7 研究区源岩三芳甾烷及甲基三芳甾烷质量色谱图

Fig.7 Mass chromatograms of triaromatic steroid methyl triaromatic steroid of source rocks in the study area

## 4 结论

(1) 根据芳烃色谱分布特征图可以看出,研究区

源岩以二环和三环芳烃类化合物为主,而四环和五环芳烃类化合物含量较低,反映出研究区长7烃源岩现今处于成熟阶段。结合埋藏深度还可以看出,随着埋

藏深度的增加,主峰碳由高碳数向低碳数转变,表现出烷基萘系列化合物的含量相对增加。

(2) 根据三芴系列相对含量三角图可以看出盐池—定边地区长7烃源岩形成于滨浅湖弱氧化—弱还原环境中。研究区源岩样品普遍含有1,2,5-TMN和1,2,5,6-TeMN,且部分样品含量偏高,表明研究区源岩的生源主要以低等水生生物为主,同时部分位置含有较多的高等植物的有机质。葱烯、茛、蒈和茈等系列化合物的检出,也表明陆源有机质的输入对该地区烃源岩的形成具有一定的贡献。通过源岩的热解分析,表明源岩有机质类型主要为II<sub>1</sub>和II<sub>2</sub>型,也再次印证了高等植物输入对该地区源岩形成的贡献。

(3) 通过对研究区源岩芳烃中烷基萘、烷基菲、烷基二苯并噻吩、三芳甾烷和其他多环芳烃成熟度参数的评价,表明研究区的源岩现今处于成熟阶段。其中二甲基萘指数(TNR<sub>2</sub>)、甲基菲指数(MPI<sub>1</sub>)和二甲基二苯并噻吩比值(4,6-DMDBT/1,4-DMDBT)求取的等效镜质体反射率(R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>和R<sub>3</sub>)虽然存在一定的差异,但能定性地反映出源岩的热演化程度,该参数存在差异可能是由于不同系列化合物受到生源和沉积环境的影响不同所造成的。

## 参考文献 (References)

[1] 杨亚南,周世新,李靖,等. 鄂尔多斯盆地南缘延长组烃源岩地球化学特征及油源对比[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(4): 550-565. [Yang Ya'nan, Zhou Shixin, Li Jing, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation of Yanchang Formation in southern Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 550-565.]

[2] 袁选俊,林森虎,刘群,等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式:以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43. [Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.]

[3] 韩博. 陕北盐池地区延长组油气成藏条件与勘探靶区优选[D]. 长沙:中南大学, 2012. [Han Bo. Research of hydrocarbon accumulation conditions and prediction of prospecting target of Yanchang Formation, Triassic, Shanbei-Yanchi area[D]. Changsha: Central South University, 2012.]

[4] 马军,李水福,胡守志,等. 芳烃化合物组成及其在油气地球化学中的应用[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 73-79. [Ma Jun, Li Shuifu, Hu Shouzhi, et al. The composition of aromatic hydrocarbon and its application in petroleum geochemistry[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 73-79.]

[5] 王传远,杜建国,段毅,等. 芳香烃地球化学特征及地质意义

[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 29-32. [Wang Chuanyuan, Du Jianguo, Duan Yi, et al. Geochemical characteristics and significance of aromatic hydrocarbon in oil and gas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 29-32.]

[6] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 1-390. [He Zixin. Tectonic-thermal evolution history and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-390.]

[7] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 1-228. [Yang Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-228.]

[8] 赵振宇,郭彦如,王艳,等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20. [Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.]

[9] 邓秀芹,蔺昉晓,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J]. 古地学报, 2008, 10(2): 159-166. [Deng Xiuqin, Lin Fangxiao, Liu Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 159-166.]

[10] 杨华,窦伟坦,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 254-263. [Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254-263.]

[11] 张文正,杨华,杨奕华,等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64.]

[12] 张文正,杨华,解丽琴,等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响:以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 424-429. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.]

[13] Espitalie J, Deroo G, Marquis F. Rock-Eval Pyrolysis and its application[J]. Revue De L'institut Francais Du Petrole, 1985, 40: 748-755.

[14] 刚文哲,林壬子. 应用油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 2011: 1-279. [Gang Wenzhe, Lin Renzi. Hydrocarbon geochemistry application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 1-279.]

[15] 许婷,侯读杰,曹冰,等. 东海盆地西湖凹陷轻质原油芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 182-192. [Xu Ting, Hou

- Dujie, Cao Bing, et al. Characteristics of aromatic geochemistry in light oils from Xihu sag in East China Sea Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 182-192.]
- [16] 赵兴齐,陈践发,郭望,等. 开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油及烃源岩芳烃地球化学特征[J]. *地球化学*, 2013, 42(3): 262-273. [Zhao Xingqi, Chen Jianfa, Guo Wang, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon in crude oil and source rocks from Nai 1 block of Naiman depression, Kailu Basin[J]. *Geochimica*, 2013, 42(3): 262-273.]
- [17] 何大双,侯读杰,孙超,等. 白云深水凹陷高成熟原油芳烃地球化学特征研究[J]. *地球化学*, 2014, 43(1): 77-87. [He Dashuang, Hou Dujie, Sun Chao, et al. Study on geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon of high-maturity crude oils in the Baiyun deep-water sag[J]. *Geochimica*, 2014, 43(1): 77-87.]
- [18] 王志勇,郑建京,杜宏宇,等. 东疆地区原油芳烃地球化学特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 184-191. [Wang Zhiyong, Zheng Jianjing, Du Hongyu, et al. The geochemical characteristics and significance of aromatic hydrocarbon of eastern Xinjiang area crude oils[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 184-191.]
- [19] Radke M, Willsch H. Extractable alkyldibenzothiophenes in Posidonia Shale (Toarcian) source rocks: Relationship of yields to petroleum formation and expulsion[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(23): 5223-5244.
- [20] Alexander R, Larcher A V, Kagi R I, et al. The use of plant derived biomarkers for correlation of oils with source rocks in the Cooper/Eromanga basin system, Australia[J]. *The APPEA Journal*, 1988, 28(1): 310-324.
- [21] 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): 606-611, 623. [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): 606-611, 623.]
- [22] 郭小文,何生,石万忠. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 52-57. [Guo Xiaowen, He Sheng, Shi Wanzhong. Aromatic geochemistry characteristics of light oils from Panyu Lower Uplift in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 52-57.]
- [23] 陈致林,李素娟,王忠. 低—中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 192-197. [Chen Zhilin, Li Sujuan, Wang Zhong. A study on maturity indicators of some aromatics in low-midmature thermal evolution zones[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 192-197.]
- [24] 朱扬明,周洁,顾圣啸,等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 32-39. [Zhu Yangming, Zhou Jie, Gu Shengxiao, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu depression, East China Sea Shelf Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 32-39.]
- [25] 彼得斯 K E,沃尔特斯 C C,莫尔多万 J M. 生物标志化合物指南[M]. 2版. 张水昌,李振西,译. 北京:石油工业出版社, 2011: 1-1112. [Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The biomarker guide*[M]. 2nd ed. Zhang Shuichang, Li Zhenxi, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 1-1112.]
- [26] Romero-Sarmiento M F, Riboulleau A, Vecoli M, et al. Occurrence of retene in upper Silurian - lower Devonian sediments from North Africa; Origin and implications[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(3): 302-306.
- [27] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons[M]//Bjørøy M. *Advances in organic geochemistry*. Chichester: Wiley, 1981: 504-512.
- [28] Kvalheim O M, Christy A A, Telnæs N, et al. Maturity determination of organic matter in coals using the methylphenanthrene distribution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(7): 1883-1888.
- [29] 包建平,王铁冠,周玉琦,等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. *江汉石油学院学报*, 1992, 14(4): 8-13, 19. [Bao Jianping, Wang Tieguan, Zhou Yuqi, et al. The relationship between methyl phenanthrene ratios and the evolution of organic matter[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1992, 14(4): 8-13, 19.]
- [30] Zhang M, Philp P. Geochemical characterization of aromatic hydrocarbons in crude oils from the Tarim, Qaidam and Turpan Basins, NW China[J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(4): 448-457.
- [31] Chakhmakhchev A, Suzuki M, Takayama K. Distribution of alkylated dibenzothiophenes in petroleum as a tool for maturity assessments[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 483-489.
- [32] 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): 27-31. [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): 27-31.]
- [33] Asif M, Fazeelat T. Petroleum geochemistry of the Potwar Basin, Pakistan; II-Oil classification based on heterocyclic and polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(8): 1655-1665.
- [34] 李林强,林壬子. 利用芳烃化合物研究东濮凹陷西斜坡地区原油成熟度[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 361-366. [Li Linqiang, Lin Renzi. Study on maturity of crude oil distributed in west slope of Dongpu depression using aromatic compounds[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 361-366.]
- [35] Laflamme R E, Hites R A. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(3): 289-303.

# Geochemical Characteristics of Aromatic Hydrocarbons of Chang7 Source Rocks from the Yanchi-Dingbian Area, Ordos Basin

LIU YaZhou, GANG WenZhe, CHEN Guo, SUN JingBo, JIANG Chong

College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** Based on the GC-MS analytical data of 16 samples of Chang7 source rocks from 13 wells in the Yanchi-Dingbian area, Ordos Basin, the geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of source rocks, the origins and sedimentary environments were investigated in detail, and the validity of maturity parameters of aromatic hydrocarbon biomarkers were discussed. It is shown that the source rocks in the study area are characterized by high abundance of bicyclic and tricyclic aromatic hydrocarbons, low abundance of tetracyclic and pentacyclic aromatic hydrocarbons, relatively high abundance of fluorene, relatively high abundance of 1,2,5-TMN and 1,2,5,6-TeMN in some samples, a certain content of terrigenous biomarkers such as retene, perylene, chrysene and pyrene. All these results indicated the source rocks of Chang7 Formation were mainly developed in slightly oxidizing-reducing shore-shallow lacustrine environment. Besides, the terrestrial higher plants input had certain contribution in the formation of source rocks. The maturity parameters of alkyl naphthalene, alkyl phenanthrene and alkyl dibenzothiophene from aromatic hydrocarbons suggested that the thermal evolution stage of source rocks reached the maturity stage. Although the equivalent vitrinite reflectance calculated by different series of aromatic compounds had some differences, it could qualitatively reflect the stage of thermal evolution of source rocks.

**Key words:** Yanchi-Dingbian area; aromatic hydrocarbon; geochemical characteristics; maturity