

塔里木盆地塔河油田原油芳烃 地球化学特征及其成因

郑朝阳^{1a,1b}, 柳益群^{1a,1b}, 段毅², 王传远³, 吴保祥², 张学军⁴

(1. 西北大学 a. 大陆动力学国家重点实验室; b. 地质学系, 西安 710069; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州
油气资源研究中心, 兰州 730000; 3. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003;
4. 河南省地质矿产局第二地质队, 河南 焦作 454000)

摘要: 芳烃是原油的重要组分, 含有丰富的地球化学信息, 但塔里木盆地塔河油田原油芳烃地球化学研究仍是薄弱环节。通过对塔河油田原油的系统采样和 GC-MS 分析, 研究了原油中萘、菲和三芴系列等芳烃化合物组成特征并分析了其成因, 进行了油源对比。研究认为, 烷基萘和芴系列化合物分布特征指示原油形成于海相还原环境, 母质来源为菌藻类; 甲基菲和烷基二苯并噻吩系列化合物显示原油成熟度较高; 油源对比研究表明塔河油田原油主要来源于中、上奥陶统烃源岩。这些研究成果为塔河油田的油气勘探提供了科学数据, 对我国同类型海相碳酸盐岩油气田原油有机地球化学及成因研究具有一定的参考意义。

关键词: 塔河油田; 芳烃; 烃源岩; 成熟度; 奥陶系

中图分类号: TE133.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2011)01-0096-07

塔河油田位于新疆维吾尔自治区库车县和轮台县境内, 构造上位于塔里木盆地塔北沙雅隆起阿克库勒凸起的西南部, 是我国目前发现的最大的海相碳酸盐岩油气田。塔河油田的发现展示了我国古生界海相碳酸盐岩具有良好的油气开发前景。前人通过对塔河油田的研究认为该区有效烃源岩为寒武系—奥陶系烃源岩^[1-2], 油源充足, 孔、缝、洞为其主要的储集空间, 石炭系和三叠系泥岩为其盖层, 断裂和储集层为其运移通道, 研究区地壳稳定, 后期改造破坏活动程度低, 保存条件较好^[3]。

芳烃是烃源岩抽提物和原油的重要组分, 其中包含着丰富的地质、地球化学信息, 可以反映原油和烃源岩的母质类型、沉积环境和成熟度^[4-5]。前人对塔河油田奥陶系原油饱和烃进行了较为系统的分析研究^[1-2,6], 但是, 缺乏对芳烃地球化学特征的系统研究, 本文系统采集了塔河油田不同区块和层位原油样品 27 个(图 1), 拟通过高精度的色谱、质谱分析, 全面研究芳烃的分布和组成特征, 探讨塔河油田原油的母质类型、沉积环境和成熟度, 并进行油源对比。

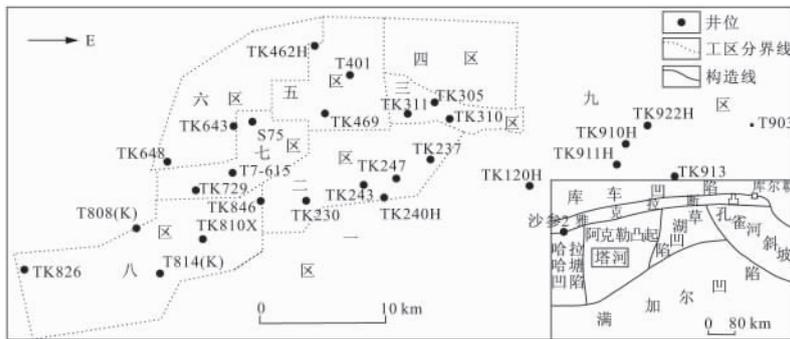


图 1 塔河油田原油样品及构造位置图

Fig. 1 Structural and sampling location of Tahe Oilfield

1 样品与实验

本次研究的塔河油田原油样品来自近年来开采的新井位,以前未进行过原油芳烃地球化学分析,样品采集时即进行了油水分离;运回实验室在低温下保存。原油样品沉淀沥青质后,用氧化铝/硅胶柱色谱分离。饱和烃用正己烷冲洗;芳烃用苯冲洗。芳烃用色谱(GC)和美国安捷伦科技公司(Agilent)制造的气相色谱—质谱联用仪(GC-MS)进行分析。GC 仪器型号为 6890N,色谱柱为 HP-5(30 m×0.32 mm),固定相涂膜厚度 0.25 μm,载气为 He,起始温度 80℃,以 4℃/min 升温至少 300℃,然后恒温 30 min。MS 仪器型号为 5973N,离子源温度为 250℃,电离电压为 70 eV。以上测试在中国科学院兰州地质所完成。

2 原油中芳烃组成和分布特征

2.1 原油的基本特征

塔河油田原油物性差异较大,其中 1 区为低黏度、低硫、含蜡—高蜡的轻质原油;2 区原油以高硫、含蜡—高蜡、重质稠油为主,而 TK231 井和 TK218

井原油则为含硫、高蜡、中质稠油;3 区块原油为中—高黏度、含硫、高蜡、轻—中质原油;4,6,7,8 区原油为以高硫为主、含蜡—高蜡的重质稠油;9 区原油为低黏度、低硫、含蜡—高蜡的轻质原油。原油的族组分以饱和烃为主, w_B 为 35.65%~91.49%;其次为芳烃和沥青质, w_B 为 11.37%~26.67%,个别样品在 5%以下;非烃质量分数相对较低,多数样品在 5%以下,最低为 1.94%,最高为 31.24%。重质稠油的饱和烃质量分数较低,芳烃和沥青质质量分数较高;而轻质原油的饱和烃和芳烃质量分数较高,沥青质质量分数较低,饱芳比普遍大于 1,个别样品达 10 以上,最高为 16.22(表 1),可能与成熟度或生物降解作用有关^[6]。

2.2 原油芳烃的组成特征

原油的母质类型、形成环境和成熟度不同,其芳烃分布、组成也存在差异。未成熟—低成熟度原油中芳烃总离子流图为后峰型或双峰型,四环或五环化合物占优势,而高成熟度原油的芳烃馏分以二环或三环化合物为主,具有前峰型分布特征^[7],由图 2 可知塔河油田原油中二环和三环芳烃占优势,具有高成熟度原油的特征。原油中检测出了丰富的噻吩系列化合物和二环、三环芳烃以及联苯化合物,而多

表 1 塔河油田原油族组成和物理性质

Table 1 Fraction components of crude oils from Tahe Oilfield

井号	油区	层位	饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	饱芳比	黏度/ (mPa·s)	密度/ (g·cm ⁻³)	含硫量 w(S)/%
			$w_B/\%$							
TK230	2 区	O ₁₋₂ y	46.54	21.17	8.19	24.10	2.20	0.949 3	761.74	2.59
TK243		O ₁₋₂ y	45.31	21.95	8.47	24.27	2.06	0.970 9	1 053.59	2.57
TK237		O ₂ yj	55.57	22.09	5.04	17.30	2.52	0.934 2	318.50	2.03
TK305	3 区	O ₁₋₂ y	61.39	19.47	3.67	15.47	3.15	0.862 7	25.11	0.98
TK311		O ₁₋₂ y	65.29	17.15	3.71	13.85	3.81	0.902 4	84.22	1.74
TK469	4 区	O ₁₋₂ y	61.25	4.07	10.52	24.16	15.05	0.968 6	1 096.40	2.64
TK462H		O ₁₋₂ y	40.31	23.83	14.13	21.74	1.69	—	—	—
TK401		O ₁₋₂ y	48.33	21.40	7.07	23.20	2.26	0.963 7	1 007.17	2.62
TK643	6 区	O ₁₋₂ y	57.80	14.34	4.38	23.48	4.03	0.962 2	1 012.29	2.57
TK648		O ₁₋₂ y	49.88	18.69	10.51	20.91	2.67	0.963 8	774.19	2.60
TK729	7 区	O ₁₋₂ y	46.19	24.46	5.94	23.41	1.89	0.951 6	471.52	2.41
T7-615		O ₁₋₂ y	68.41	13.33	5.51	12.75	5.13	—	—	—
T810X(K)	8 区	O ₁₋₂ y	74.89	15.87	4.69	4.55	4.72	0.860 9	14.83	0.82
T814(K)		O ₁₋₂ y	47.81	22.57	9.51	20.10	2.12	0.932 1	371.32	2.16
TK826		O ₂ yj	46.47	26.67	5.06	21.80	1.74	0.951 4	385.30	2.34
TK846		O ₂ yj	57.62	21.80	7.09	13.49	2.64	0.922 8	213.61	1.66
T913	9 区	O ₂ yj	91.49	5.64	1.56	1.31	16.22	—	—	—
T903		O ₂ yj	64.46	18.91	4.04	12.58	3.41	0.907 0	76.02	1.70
TK310	3 区	C	89.72	6.77	2.76	0.75	13.25	0.836 2	6.59	0.78
T808K	8 区	C	84.48	8.41	3.22	3.88	10.05	0.827 6	8.38	0.38
S75		C	46.11	13.74	33.95	6.20	3.36	0.875 9	21.48	1.16
TK120H	1 区	T	65.52	20.37	6.16	7.95	3.22	0.888 3	42.06	1.44
TK240H	2 区	T	59.90	9.64	28.02	2.44	6.21	0.934 7	467.94	2.09
TK247		T	57.12	8.44	31.24	3.20	6.77	—	—	—
TK910H	9 区	T	63.59	16.24	6.43	13.74	3.92	0.917 0	134.30	1.70
TK911H		T	46.90	20.96	21.37	10.76	2.24	—	—	—
TK922H		T	46.21	20.41	23.97	9.40	2.26	—	—	—

注:O₁₋₂y. 中下奥陶统鹰山组;O₂yj. 中奥陶统一间房组。

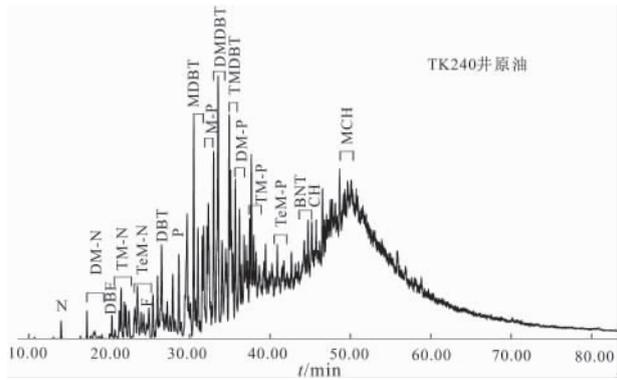


图2 塔河油田 TK240 原油芳烃总离子流图

Fig.2 GC/MS TIC of aromatic hydrocarbons of crude oils of TK240 well from Tahe Oilfield

N. 萘; DM-N. 二甲萘; TM-N. 三甲萘; TeM-N. 四甲基萘; P. 菲; M-P. 甲基菲; DM-P. 二甲菲; TM-P. 三甲菲; TeM-P. 四甲基菲; DBT. 二苯并噻吩(硫芴); MDBT. 甲基苯并噻吩; DMD-BT. 二甲基二苯并噻吩; TMDBT. 三甲二苯并噻吩; CH. 蒽; MCH. 甲基蒽; BNT. 苯并萘并噻吩; DBF. 二苯并呋喃(氧芴)。

环芳烃化合物如茈萸(FL)、苯并茈萸(B-FL)、苯并萸(B-An)、蒽(CH)、芘(Py)、苯并芘(B-Py)、芘(Pe)等典型的高等植物输入的芳烃标志化合物含量很低,与吐哈盆地和鄂尔多斯盆地陆相原油相比塔河油田原油稠环芳烃的含量明显偏低^[8-9],反映了塔河油田原油母质可能来自于海相低等藻类的贡献。

2.3 萘系列化合物

烷萘系列化合物的分布与有机质类型、成熟度和沉积环境关系密切^[10]。塔河油田原油中检测到丰富的萘、甲基萘、二甲萘、三甲萘和四甲基萘,其中二甲萘和三甲萘丰富,萘和四甲基萘质量分数相对较低,总体上表现为:三甲萘>四甲基萘>二甲萘>萘>甲基萘,与西藏措勤盆地白垩系海相灰岩烃源岩相比其二甲萘质量分数较高,而萘质量分数则为措勤盆地白垩系海相灰岩烃源岩较高^[11],可能是研究区原油成熟度较高影响所致。Alexander等^[12]研究认为1,2,5-三甲萘来源于高等植物生源五环三萜香树素和双环二萜刺柏酸,由此认为高含量的1,2,5-三甲萘可以作为高等植物生源输入的标志。朱扬明等^[13]的研究表明,1,2,5三甲萘/1,3,6-三甲萘质量分数比值在海相原油中较低,而在陆相原油中则较高,如塔里木盆地海相原油中该参数为0.15~0.29,陆相原油中在0.30以上,煤成油中达到0.74~1.48。王传远等^[9]的研究表明,鄂尔多斯盆地西峰油田原油中该参数为0.21~0.59,在烃源岩中则为0.65。本研究中塔河油田原油中该参数在0.10~0.60之间,多数样品在0.30以下,显示原油形成于海相成油环境,其母质类型为菌藻类,由图3可知,塔河油田奥陶系原油

样品中 $w(\text{DBT})/w(\text{DBF})$ 比值在3.10~4.86之间变化,而在成熟度较高的石炭系和三叠系原油中该参数在8.0以上,可能反映了烃源岩演化过程中还原性增强而导致生成原油 $w(\text{DBT})/w(\text{DBF})$ 比值增大,鄂尔多斯盆地二叠系太原组海陆过渡相原油也显示了类似的演化特征。上述塔河油田不同层位原油的对比表明石炭系和三叠系原油的 $w(\text{DBT})/w(\text{DBF})$ 比值加大,说明原油生成环境的还原性较强,另据前人研究,塔河油田奥陶系、石炭系和三叠系原油共同来源于寒武系—奥陶系烃源岩,而石炭系和三叠系成熟度较奥陶系原油的高^[2],因此,这种现象的出现可能是由于烃源岩有机质成熟度升高使得烃源岩的还原性增强所致。

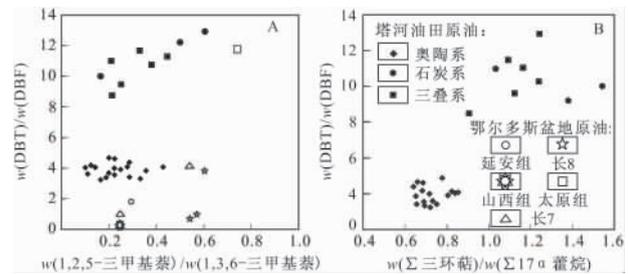


图3 塔里木盆地原油 $w(\text{DBT})/w(\text{DBF})$ 与 $w(1,2,5\text{-三甲萘})/w(1,3,6\text{-三甲萘})$ (A)和 $w(\Sigma\text{三环萜})/w(17\text{-a 藿烷})$ (B)相关图

Fig.3 Correlation plots of DBT/DBF versus 1, 2, 5-/1, 3, 6-TMN(A) and DBT/DBF versus total of tricyclic terpane/17-a hopane (B) in crude oils from Tahe Oilfield

鄂尔多斯盆地原油数据引自文献^[9]。

2.4 菲系列化合物

菲系列化合物目前主要用于原油和烃源岩成熟度研究,同时也有学者认为它们的质量分数受沉积环境和母源输入的影响^[14]。塔河油田原油中检测到了丰富的菲系列化合物,包括菲、甲基菲、二甲菲、三甲菲和四甲基菲,其中二甲菲质量分数最高,四甲基菲质量分数最低。据朱扬明等^[13]研究,9-甲基菲在海相原油中质量分数较低,而在陆相原油中质量分数较高,达到29%以上,在煤成油中则达到33.9%以上。本研究中奥陶系原油9-甲基菲质量分数为28%~35%,可能与其受到生物降解和成熟度的影响有关,而受到生物降解影响较小的三叠系原油该参数则在30%以下。

甲基菲指数(MPI)是常用的成熟度参数,是由Radke等^[4]最先提出并最早引入到烃源岩的成熟度研究中;此后,国内外学者做了大量的深入研究工作,成功地将该参数用于不同环境下的烃源岩和原油成熟度研究^[9, 14-16]。研究区原油通过 MPI_1 计算的成熟度值 R_c 为0.65%~0.87%(表2),从不同层

表 2 塔河油田原油菲系列化合物参数表

Table 2 Parameters of naphthalene of the crude oils from Tahe Oilfield

井号	油区	层位	MPI_1	MPI_2	MPI_3	MPR	$MPDF_1$	$MPDF_2$	$R_c/\%$	$R_o/\%$
TK230		$O_{1-2}y$	0.73	1.42	0.78	0.87	0.44	0.53	0.84	0.82
TK243	2 区	$O_{1-2}y$	0.68	1.36	0.73	1.05	0.44	0.53	0.87	0.82
TK237		O_2yj	0.67	1.31	0.71	0.89	0.41	0.51	0.80	0.76
TK305	3 区	$O_{1-2}y$	0.67	1.33	0.70	0.96	0.41	0.52	0.80	0.76
TK311		$O_{1-2}y$	0.54	0.91	0.57	0.67	0.36	0.39	0.73	0.64
TK469		$O_{1-2}y$	0.61	1.20	0.64	0.85	0.39	0.49	0.77	0.71
TK462H	4 区	$O_{1-2}y$	0.62	1.25	0.66	0.88	0.40	0.50	0.77	0.73
TK401		$O_{1-2}y$	0.58	1.13	0.58	0.80	0.37	0.48	0.75	0.66
TK643	6 区	$O_{1-2}y$	0.60	1.17	0.61	0.81	0.38	0.48	0.76	0.68
TK648		$O_{1-2}y$	0.58	1.11	0.57	0.77	0.36	0.47	0.75	0.65
TK729	7 区	$O_{1-2}y$	0.54	1.00	0.53	0.68	0.34	0.44	0.72	0.61
T7-615		$O_{1-2}y$	0.58	1.11	0.56	0.77	0.36	0.48	0.75	0.63
T810X(K)		$O_{1-2}y$	0.50	0.94	0.48	0.65	0.33	0.43	0.70	0.56
T814(K)	8 区	$O_{1-2}y$	0.57	1.06	0.54	0.73	0.35	0.46	0.74	0.62
TK826		O_2yj	0.74	1.80	0.87	1.29	0.46	0.64	0.84	0.87
TK846		O_2yj	0.55	1.06	0.54	0.77	0.35	0.46	0.73	0.62
T913	9 区	O_2yj	0.66	1.20	0.64	0.83	0.39	0.49	0.80	0.71
T903		O_2yj	0.62	1.18	0.63	0.83	0.39	0.48	0.77	0.70
TK310	3 区	C	0.63	1.22	0.63	0.76	0.39	0.50	0.78	0.70
S75	8 区	C	0.74	1.26	0.72	0.92	0.42	0.49	0.65	0.77
TK808K		C	0.98	1.66	0.96	1.19	0.49	0.56	0.69	0.93
TK120H	1 区	T	0.76	1.45	0.82	1.00	0.45	0.53	0.86	0.85
TK240H	2 区	T	0.90	1.61	0.93	1.20	0.48	0.56	0.69	0.91
TK247		T	0.95	1.71	0.95	1.28	0.49	0.59	0.69	0.92
TK910H		T	0.55	1.13	0.54	0.78	0.35	0.49	0.73	0.62
TK911H	9 区	T	0.81	1.53	0.86	1.07	0.46	0.55	0.68	0.87
TK922H		T	0.91	1.69	0.96	1.24	0.49	0.57	0.69	0.93

注: $MPI_1 = 1.5 \times (3-MP+2-MP) / (P+1-MP+9-MP)$; $MPI_2 = 3 \times 2-MP / (1-MP+9-MP)$; $MPI_3 = (3-MP+2-MP) / (1-MP+9-MP)$; $MPR = 2-MP / 1-MP$; $MPDF_1 = (3-MP+2-MP) / (3-MP+2-MP+9-MP+1-MP)$; $MPDF_2 = 2 \times 2-MP / (3-MP+2-MP+9-MP+1-MP)$; $R_c = 0.6MPI_1 + 0.40$; $R_o = -0.166 + 2.242MPDF_1$ 。以上比值均为质量分数比值。

位上分析, 奥陶系原油的成熟度相对较低, 而石炭系和三叠系原油的成熟度相对较高。George 等^[17]将甲基菲分馏系数用于原油和烃源岩成熟度的评价中。此次应用甲基菲分馏系数测算出的塔河油田烃源岩的 R_o 为 0.56%~0.87%, 显示了与 MPI_1 相同的变化特征, 即 4, 5, 7 区奥陶系原油的成熟度相对较低, 而 9, 2 原油及 8 区部分奥陶系原油的成熟度相对较高, 从不同层位看, 奥陶系原油的成熟度较石炭系和三叠系原油的成熟度相对偏低, 结合前人关于塔河油田油源的研究成果^[2, 18-20], 笔者认为此种现象可能是由于石炭系、三叠系以及奥陶系 2, 3, 8, 9 区原油主要为晚期原油充注成藏的结果。

2.5 三芴系列化合物

林壬子等^[21]认为芳烃化合物中的芴(F)、氧芴(二苯并呋喃, DBF)和硫芴(二苯并噻吩, DBT)来源于共同的母质, 可以反映原油的生油环境。在弱氧化—弱还原环境中芴系列化合物质量分数较高; 在海相或盐湖环境中, 二苯并噻吩系列化合物质量分数丰富^[16, 22]; 在氧化条件下, 氧芴则在三芴系列化合物中的相对质量分数明显提高, 因此, 三芴系列化合物的相对质量分数可以作为区分成油环境的标志。

塔河油田原油中硫芴的质量分数较高, 与鄂尔多斯盆地侏罗系、三叠系原油, 珠江口盆地古近系和新近系原油以及吐哈盆地侏罗系烃源岩相比, 其硫芴质量分数偏高而氧芴质量分数明显偏低^[8-9, 23], 总体表现为 $w(DBT) > w(F) > w(DBF)$, $w(DBT)/w(DBF)$ 比值为 3.31~12.99, 与该区的 $w(Pr)/w(Ph)$ 比值为 0.78~0.95 < 1 所指示的还原环境相一致, 由图 4 可知研究区原油形成于强还原环境的海相成油环境。

2.6 烷基二苯并噻吩

早期只能分析出甲基苯并噻吩的两个异构体, 分析技术的进步促进了烷基二苯并噻吩系列化合物的研究, 20 世纪 90 年代 Budzinski 等^[14]和 Chakhmakhenev 等^[24]运用 GC-MS 分析技术确定了二甲基二苯并噻吩(DMDBT)的 3 个异构体。二苯并噻吩随着埋深增大, 热稳定性较高的 4-甲基二苯并噻吩质量分数相对增加, 而稳定性较差的 1-甲基二苯并噻吩质量分数则相对降低, 因此, 4-/1-MDBT 质量分数比值随着成熟度的增加而增大^[25]。罗健等^[26]通过对烷基二苯并噻吩的系统研究, 建立了 R_o 与烷基二苯并噻吩参数的关系式: $R_o(\%) = 0.14$

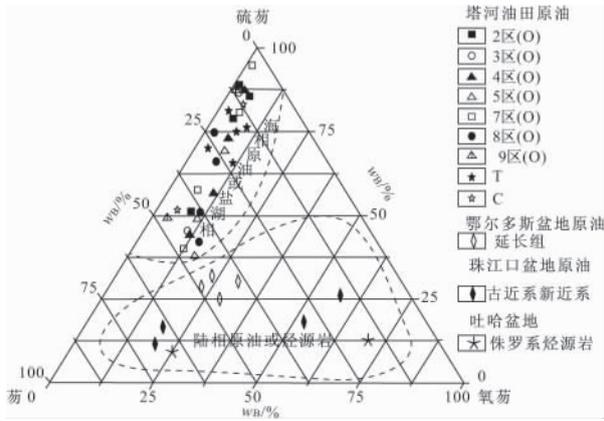


图4 塔河油田原油中芴、氧芴和硫芴三角图

Fig. 4 Ternary diagram of fluorene, dibenzothiophene and dibenzofuran of crude oils from Tahe Oilfield
鄂尔蒂斯盆地珠江口盆地和吐哈盆地数据来自文献[8-9,23]。

$K + 0.57$, 其中 $K = 4, 6\text{-DMDBT}/1, 4\text{-DMDBT}$ 质量分数比值。夏燕青等^[27]通过模拟实验研究认为热成熟度的增加将使苯并噻吩化合物相对于噻吩化合物含量增加。本次研究得到塔河油田奥陶系原油中4,6,7区的4-MDBT/1-MDBT质量分数比值在3.63~4.83之间,8,9区该参数则达到3.86~14.00,多数样品在5.40以上,说明研究区4,6,7区与8,9区相比原油的成熟度相对较低;从不同层位上看奥陶系原油该参数较低而石炭系和三叠系较高,说明石炭系和三叠系原油的成熟度高。4,6-DMDBT/1,4-DMDBT质量分数比值在平面上的分布表现出4-MDBT/1-MDBT质量分数比值类似的

分布规律。通过罗健等^[26]提出的公式: $R_v(\%) = 0.14K + 0.57$,得到研究区烃源岩的视镜质体反射率 R_v 为0.71%~0.78%,三叠系和石炭系原油该参数为0.77%~0.80%,与应用 MPI_1 确定的 R_v 值相近。从该参数分析塔河油田原油为成熟原油。

3 油源对比研究

古生界岩石中丰富的三芳甲萜甾烷可能与古生代海洋中的沟鞭藻有关^[28-31]。塔里木盆地寒武系和奥陶系在三芳甲萜甾烷质量分数方面存在明显差异,即寒武系烃源岩含有丰富的三芳甲萜甾烷,而中、上奥陶统烃源岩甲萜甾烷质量分数很低;寒武系烃源岩 C_{26} 和 C_{27} 三芳甾烷质量分数明显高于 C_{28} 三芳甾烷,中上奥陶统烃源岩具有 C_{28} 三芳甾烷优势。这种差异反映了寒武纪和奥陶纪海洋环境和生物组成的差异^[32],因此,三芳甾烷系列化合物可以作为油源对比的依据。

塔河油田中、上奥陶统烃源岩含有较丰富的 3β -甲基-24-乙基三芳甾烷,而寒武系烃源岩中则 4α -甲基-24-乙基三芳甾烷含量更为丰富;寒武系烃源岩中含有丰富的三芳甲萜甾烷,而中、上奥陶统烃源岩中三芳甲萜甾烷含量极低(图5)。由图5可知原油中 3β -甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{29})丰富, 4α -甲基-24-乙基三芳甾烷与寒武系烃源岩相比含量明显偏低,而与中、上奥陶统烃源岩甲基三芳甾烷的分布接近;塔河油田原油中三芳甲萜甾烷含量很低,也表现出与中、上奥陶统烃源岩相似的特征。

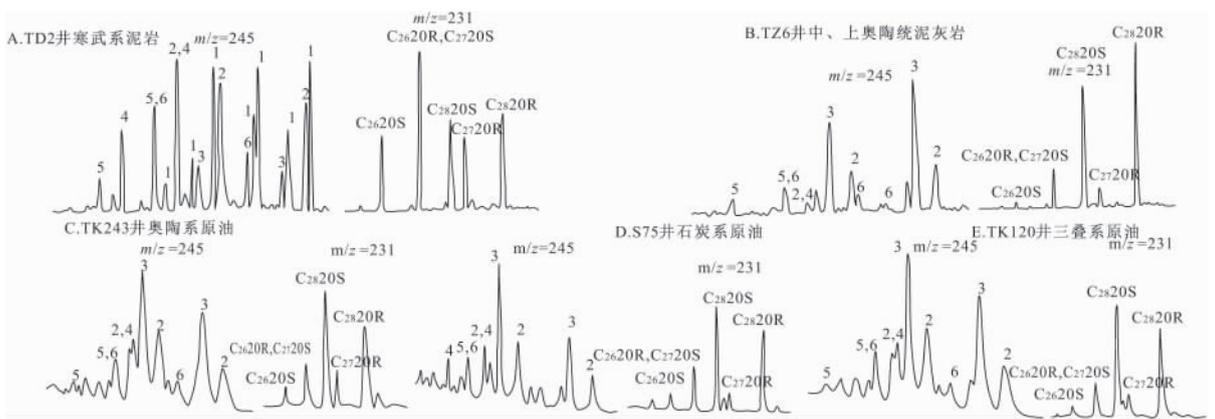


图5 塔河油田烃源岩抽提物和原油的甲基三芳甾烷和三芳甾烷分布图(烃源岩资料引自文献[2])

Fig. 5 Distributed diagram of triaromatic-sterane of source rocks and crude oils from Tahe Oilfield

图中:1代表4,23,24-三甲基三芳甾烷(C_{29} 三芳甲薄甾烷);2代表 4α -甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{29});3.代表 3β -甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{29});4代表4-甲基三芳甾烷(C_{27});5代表3-甲基三芳甾烷(C_{27});6代表 3β -甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{28})。

塔河油田各层位原油三芳甾烷的分布特征相近。由图5可知原油 C_{28} 三芳甾烷占绝对优势,而

C_{26} 和 C_{27} 三芳甾烷含量较 C_{28} 三芳甾烷低,与寒武系和中、上奥陶统烃源岩相比,三芳甾烷分布规律与

中、上奥陶统烃源岩更为接近,表现高 C_{28} 三芳甾烷,低 C_{26} 和 C_{27} 三芳甾烷的特征。

由三芳甲藻甾烷/(三芳甲藻甾烷+ 3β -甲基-24-乙基三芳胆甾烷)质量分数比与(4α -甲基-24-乙基+4-甲基)/(4-甲基+ 4α -甲基-24-乙基+ 3β -甲基-24-乙基)三芳甾烷质量分数比值相关图(图 6)可知寒武系和下奥陶统烃源岩上述两个参数值均在 60% 以上,而中、上奥陶统烃源岩三芳甲藻甾烷/(三芳甲藻甾烷+ 3β -甲基-24-乙基三芳胆甾烷)质量分数比值分别为 5%~25% 和 30%~60%^[2,32]。在塔河油田原油中三芳甲藻甾烷/(三芳甲藻甾烷+ 3β -甲基-24-乙基三芳胆甾烷)质量分数比值为 12%~14%,而(4α -甲基-24-乙基+4-甲基)/(4-甲基+ 4α -甲基-24-乙基+ 3β -甲基-24-乙基)三芳甾烷质量分数比值为 33%~51%,与中、上奥陶统烃源岩中该参数的分布吻合,以上现象说明塔河油田原油与中、上奥陶统烃源岩具有亲缘关系。

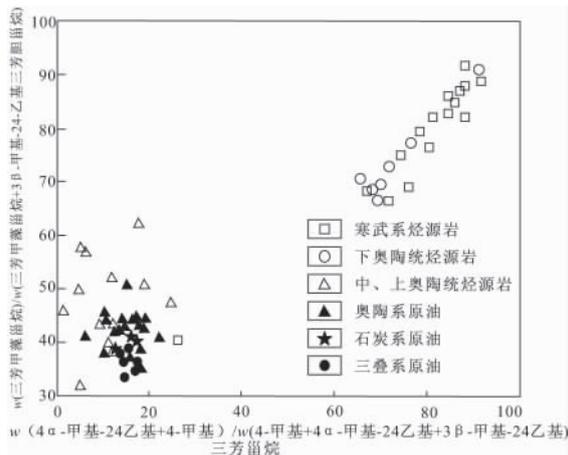


图 6 塔河油田原油和烃源岩三芳甲藻甾烷/(三芳甲藻甾烷+ 3β -甲基-24-乙基三芳胆甾烷)与(4α -甲基-24-乙基+4-甲基)/(4-甲基+ 4α -甲基-24-乙基+ 3β -甲基-24-乙基)三芳甾烷质量分数比值相关图

Fig. 6 Cross plot of triaromatic-dinoflagellate vs.(triaromatic-dinoflagellate + 3β -methyl-24-ethyl-triaromatic-sterane) and (4α -methyl-24-ethyl+4-methyl) vs. (4-methyl+ 4α -methyl-24-ethyl+ 3β -methyl-24-ethyl) triaromatic-sterane in crude oils and source rocks from Tahe Oilfield

烃源岩数据引自文献^[2]。

4 结 论

(1)塔河油田原油含硫量为 0.78%~2.59%,为含硫—高硫原油;其萘系列化合物中 1,2,5 三甲基萘/1,3,6 三甲基萘质量分数比值多数样品在 0.30 以下;原油中三萘系列化合物相对质量分数为

$w(\text{DBT}) > w(\text{F}) > w(\text{DBF})$, 以及 $w(\text{DBT})/w(\text{DBF})$ 比值和 1,2,5 三甲基萘/1,3,6 三甲基萘质量分数比值反映塔河油田原油来源于海相还原环境,其母质类型为菌藻类。

(2)塔河油田原油中甲基萘、甲基菲和烷基二苯并噻吩指数均反映原油为成熟—高成熟原油。

(3)塔河油田各层位原油的芳烃分布特征相似,说明原油具有相同的油源;其甲基三芳甾烷、甲藻甾烷和三芳甾烷的分布与中、上奥陶统烃源岩接近,说明中、上奥陶统烃源岩为塔河油田主力烃源岩。

参考文献:

- [1] 段毅, 于文修, 郑朝阳, 等. 塔里木盆地塔河油田原油与原岩对比研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(1):164-171.
- [2] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊):16-23.
- [3] 李国政, 王辉, 丁勇. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油气藏石油地质条件[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(6):493-495.
- [4] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbon [A]// Anon. Advances in Organic Geochemistry [C]. New York: J. Wiley and Sons, 1981:504-511.
- [5] 刘洛夫, 王伟华, 徐新德, 等. 塔里木盆地群 5 井原油芳烃地球化学研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(2):47-55.
- [6] 南青云, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔河油田原油甾烷系列化合物地球化学再认识 [J]. 沉积学报, 2006, 24(2):295-299.
- [7] 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.
- [8] 戴卿林, 郝石生, 盛国英, 等. 吐哈盆地侏罗系煤系源岩芳烃组成及生源、环境意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 198-201.
- [9] 王传远, 段毅, 杜建国. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油芳烃地球化学研究[J]. 地球学报, 2008, 29(5):613-618.
- [10] Radke M, Rullk Tter J, Vriend S P. Distribution of naphthalenes in crude oils from Java Sea; Source and maturation effects[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(17): 3675-3689.
- [11] 任拥军, 李瑞雪. 西藏措勤盆地下白垩统海相灰岩的芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(2):282-286.
- [12] Alexander R, Larcher A V, Kagir I, et al. The use of plant-derived biomarker for correlation of oils with source rocks in the Cooper/Eromango basin systems, Australia[J]. APEA, 1988, 28(1):310-321.
- [13] 朱扬明, 张洪波, 傅家谟, 等. 塔里木盆地不同成因原油芳烃组成和分布特征[J]. 石油学报, 1998, 19(3):33-37.
- [14] Budzinski H, Cirrigues P, Cannan J, et al. Alkylated phenanthrene distribution as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(10):2043-2056.
- [15] 李林强, 林王子. 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.
- [16] 曾凡刚, 程克明. 华北地区下古生界海相烃源岩芳烃生物标志物地球化学特征:兼论饱和烃、芳烃生源组合特征[J]. 地质地球化学, 1998, 26(3): 33-39.
- [17] George S C, Lisk M, Summons E, et al. Constraining the oil charge history of the south Pepper Oilfield from the analysis of

- oil-bearing fluid inclusions[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(1/3): 631-648.
- [18] 顾忆. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J]. *石油实验地质*, 2000, 22(4): 307-311.
- [19] 周玉琦, 黎玉战, 侯宏斌. 塔里木盆地塔河油田的勘探实践和认识[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(4): 363-367.
- [20] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 轮南塔河油田稠油油源对比[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(1): 32-38.
- [21] 林王子, 王培荣, 戴允健, 等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[C]//中国地质学会, 中国石油学会, 中国矿物岩石地球化学学会. 有机地球化学论文集. 北京: 地质出版社, 1987: 129-140.
- [22] Huang Xianyu, Jiao Dan, Lu Liqiang, et al. Distribution and geochemical implication of aromatic hydrocarbons across the Meishan Permian-Triassic Boundary [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2006, 17(1): 49-54.
- [23] 李水福, 何生. 原油芳烃中三芴系列化合物的环境指示作用[J]. *地球化学*, 2008, 37(1): 45-50.
- [24] Chakhmakhnev A, Suzuki M, Takayama K. Distribution of alkylated dibenzothiophenes in petroleum as a tool for maturity assessments[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 483-490.
- [25] Hughes W B. Use of thiophenic organosulfur compounds in characterizing crude oils derived from carbonate versus siliclastic sources[M] // Palacas J B. *Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks*. AAPG, *Studies in Geology*. Vol. 18. Oklahoma; AAPG Press, 1984: 181-196.
- [26] 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.
- [27] 夏燕青, 孟仟祥, 王红勇, 等. 苯并噻吩系列化合物的成因模拟及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 1999, 17(1): 127-129.
- [28] Moldwan J M, Talyzma N M. Biogeochemical evidence for dinoflagellate ancestors in the Early Cambrian[J]. *Science*, 1998, 281(16): 1168-1170.
- [29] Moldowan J M. Trails of of life[J]. *Chemistry in Britain*, 2000, 36(8): 34-37.
- [30] Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(4): 273-286.
- [31] Jeremy D, Moldowan J M, Roger E, et al. Extended 3β -alkylsteranes and 3-alkyl triaromatic steroids in crude oils and rock extracts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(18): 3717-3729.
- [32] 马安来, 金之钧, 张水昌, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系烃源岩的分子地球化学特征[J]. *地球化学*, 2006, 35(6): 593-601.

Geochemical Characteristics of Aromatic Compounds and Genesis of Crude Oils from Tahe Oilfield, Tarim Basin

ZHENG Chao-yang^{1a,1b}, LIU Yi-qun^{1a,1b}, DUAN Yi², WANG Chuan-yuan³,
WU Bao-xiang², ZHANG Xue-jun⁴

(1a. State Key Laboratory of Continental Dynamics; 1b. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003, China; 4. The Second Team of Geology, Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: Tahe Oilfield is the largest marine-facies carbonate rock oilfield found in China so far. Aromatic compounds are important components of crude oils containing abundant geochemical information. Crude oil samples were collected systematically from Tahe Oilfield, Tarim Basin and analyzed by means of GC-MS. The aromatic compounds in crude oils are studied in this paper. The parameters of aromatic compounds in the crude oils show that the oil-forming parent materials are homonemeeae and the oils were formed under reducing environment and marine facies environments. The maturity of the oils yielded from the Triassic and Carboniferous are higher than the oils from the Ordovician. The index of methyl-triaromatic-sterane and triaromatic-sterane of oils and source rocks suggests that the major hydrocarbon source rocks of Tahe Oilfield originated from Middle and Upper Ordovician. The study results can offer scientific reference for the exploration and development of this kind of oilfield.

Key words: Tahe Oilfield; aromatic compound; source rock; maturity; Ordovician