

引用格式:王东勇,李美俊,杨禄,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三芳甾烷分布特征及油源对比[J].天然气地球科学,2022,33(11):1862-1873.

WANG Dongyong, LI Meijun, YANG Lu, et al. The distribution of triaromatic steroids in Permian source rocks and implications for oil-source correlations in the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1862-1873.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2022.06.010

## 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三芳甾烷分布特征及油源对比

王东勇<sup>1,2</sup>, 李美俊<sup>1,2,3</sup>, 杨 禄<sup>4</sup>, 杨远峰<sup>5</sup>, 李二庭<sup>6</sup>, 莫 军<sup>6</sup>, 邹贤利<sup>7</sup>, 徐伯东<sup>7</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;

3. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室 资源与环境学院,湖北 武汉 430100;

4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458;

5. 中国石油新疆油田分公司百口泉采油厂,新疆 克拉玛依 834000;

6. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院,新疆 克拉玛依 834000;

7. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 石油学院,新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组、乌尔禾组和其他不同层系原油中普遍检测出三芳甾烷(TAS)和三芳甲藻甾烷系列。基于多口井的原油和14块代表性烃源岩样品的芳烃组分色谱—质谱资料,系统分析其TAS组成特征,并将其用于油源对比研究。结果表明:TAS分布特征可以有效区分准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩和乌尔禾组烃源岩。风城组烃源岩中TAS具有C<sub>26</sub>-20S含量低、C<sub>27</sub>-20R含量高的分布特征,并且几乎不含有三芳甲藻甾烷;而乌尔禾组烃源岩中TAS具有相反的分布特征,即C<sub>26</sub>-20S相对丰度较高,C<sub>27</sub>-20R相对丰度较低,并且具有分布完整的三芳甲藻甾烷系列。玛湖凹陷不同层系原油TAS分布特征基本一致,主要表现为C<sub>26</sub>-20S含量低,C<sub>27</sub>-20R含量高,三芳甲藻甾烷含量低或者未检测出,与风城组烃源岩分布特征相似。应用C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S TAS与C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R TAS比值和TAS三角图图版进行了原油对比分析,结果表明不同层系原油均来源于风城组烃源岩。因此,三芳甾烷及三芳甲藻甾烷系列可以作为该区油源对比的有效分子标志物。

**关键词:**三芳甾烷;三芳甲藻甾烷;油源对比;风城组;乌尔禾组;玛湖凹陷

中图分类号:TE122.1<sup>+1</sup>

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2022)11-1862-12

### 0 引言

三芳甾烷(TAS)可能是由单芳甾类化合物去甲基化和芳构化而形成<sup>[1-4]</sup>。在地质体演化过程中,C<sub>26</sub>TAS、C<sub>27</sub>TAS、C<sub>28</sub>TAS分别由各自单芳甾烷转化,因此原油及烃源岩的芳烃馏分中C<sub>26</sub>-C<sub>27</sub>-C<sub>28</sub>TAS分布可以用来判断有机质来源<sup>[4]</sup>。在常规

芳烃馏分色谱—质谱(GC-MS)分析中,通常使用m/z 231碎片离子检测和鉴定三芳甾烷系列化合物。由于C<sub>26</sub>-20RTAS与C<sub>27</sub>-20STAS化合物往往共同溢出,无法进行准确定量分析生物组成来源<sup>[4]</sup>。尽管如此,三芳甾烷系列化合物被广泛应用于原油族群划分、油源对比以及成熟度判识等研究<sup>[4-10]</sup>。在塔里木盆地奥陶系储层原油成因与来源的研究中

收稿日期:2022-04-22;修回日期:2022-06-24;网络首发日期:2022-07-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:41972148);国家自然科学基金青年项目(编号:41802179);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号:GML2019ZD0102-1-01)联合资助。

作者简介:王东勇(1998-),男,汉,河南濮阳人,博士研究生,主要从事有机地球化学和油气勘探研究。E-mail:dywang0907@163.com。

通信作者:李美俊(1972-),男,重庆人,教授,博士,主要从事有机地球化学和油气勘探研究。E-mail:meijunli@cup.edu.cn。

发现,来源于中上奥陶统有机质的原油具有低  $C_{26}/C_{28}$  20S TAS 值和低  $C_{27}/C_{28}$  20R TAS 值的特征,而寒武系烃源岩来源的原油中三芳甾烷  $C_{26}/C_{28}$  20S TAS 值和  $C_{27}/C_{28}$  20R TAS 值都较高<sup>[11-12]</sup>。通过不同比例寒武系和奥陶系原油配比实验,结果表明不同比例来源原油的三芳甾烷表现出明显差异,从而确定了塔里木盆地轮南地区不同来源原油的平面分布特征<sup>[13]</sup>。成熟度和生物来源是影响三芳甾烷分布的主要因素。在  $R_o > 5.0\%$  的固体沥青油藏中三芳甲藻甾烷分布完整,相对含量较高,而在相对成熟度较低油藏中三芳甲藻甾烷含量很低<sup>[8]</sup>。

准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组取得重大突破,但其烃类来源仍存在较大争议。CHEN 等<sup>[14]</sup>、陈哲龙等<sup>[15]</sup>通过流体包裹体和微量元素手段,分析认为百口泉组原油为典型二叠系烃源岩混合原油,并存在多期成藏。阿布力米提等<sup>[16]</sup>认为百口泉组高熟油气的主要来源为风城组,也包含乌尔禾组和佳木河组的产物。但由于二叠系乌尔禾组和风城组烃源岩常规分子标志物特征相似,无法满足该地区精细油源对比<sup>[17-18]</sup>。玛湖凹陷中浅层侏罗系储层获得工业油流,之前研究主要集中在储层研究和成藏机理探讨<sup>[19-21]</sup>,但对于原油的来源还没有系统研究。此外,乌尔禾地区地表发育大型沥青矿和油砂矿<sup>[22]</sup>,但储层原油造成严重生物降解,饱和烃组分散失严重<sup>[23]</sup>,常规正构烷烃、萜类化合物和规则甾烷化合物无法准确识别,无法完成精细油源对比。

本文通过对二叠系风城组和乌尔禾组烃源岩、玛湖凹陷乌尔禾组、百口泉组和浅层侏罗系典型原油样品的芳烃馏分系统分析,探讨了三芳甾烷分布特征及此类化合物在该区油源对比中的潜力。

## 1 区域地质概况

准噶尔盆地是我国西北地区第二大含油气盆地,面积超过  $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地位于南天山和阿尔泰山之间,大致成三角形形状。准噶尔盆地被划分成4个二级构造单元,分别为东部隆起、中央坳陷、西北断裂带和南缘冲断带<sup>[24]</sup>。从构造演化方面看,准噶尔盆地共经历了6个演化阶段,分别为石炭纪断陷—拗陷、早二叠世断陷、中二叠世—三叠纪前陆盆地、侏罗纪伸展断陷—压扭盆地、白垩纪—古近纪陆内拗陷与新近纪—第四纪陆内前陆盆地<sup>[25]</sup>。玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘,是中央坳陷的一个二级构造单元,面积大约为  $5000 \text{ km}^2$ [图1(a)]。玛湖凹陷西邻西北断裂带,东面为中央坳陷一系列凸起带。玛湖凹陷主要断裂分布在玛西斜坡带,为NNE和NE走向[图1(a)]。近年来,玛湖凹陷取得重大勘探进展,探明储量超过  $10 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[26]</sup>。油气主要来源于二叠系烃源岩,主要在三叠系百口泉组砂砾岩储层中聚集成藏<sup>[27]</sup>。

研究区的沉积地层除二叠系上乌尔禾组缺失外,其他地层发育完整,古生代沉积地层自下而上分别为二叠系佳木河组( $P_{1j}$ )、风城组( $P_{1f}$ )和乌尔禾

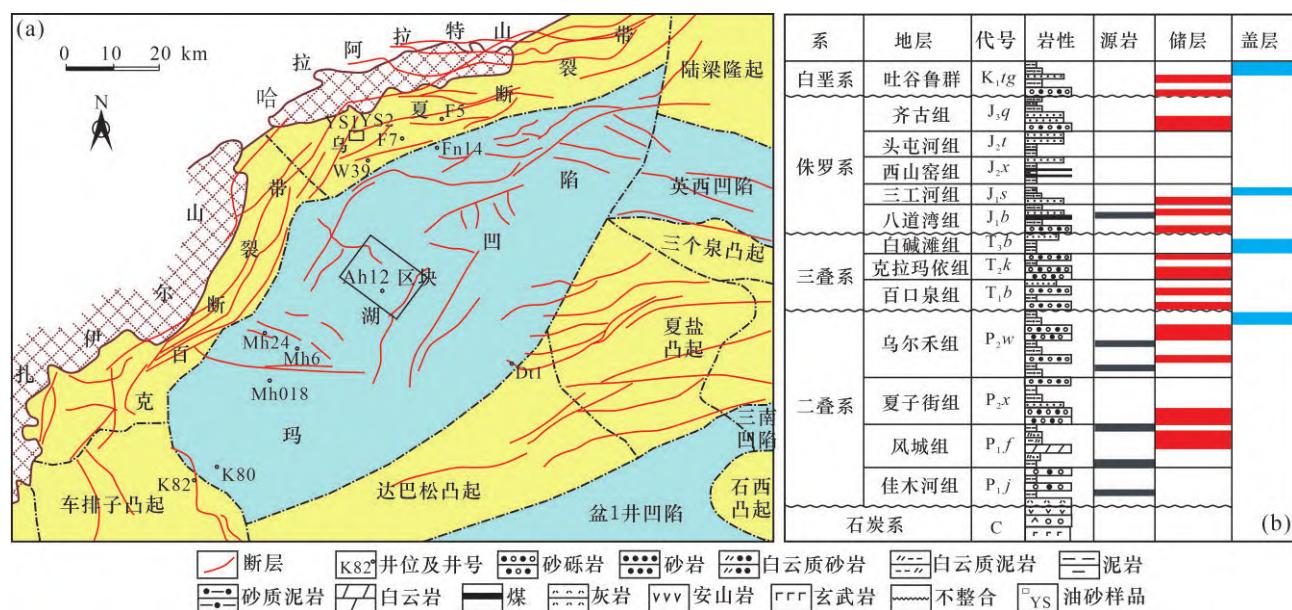


图1 准噶尔盆地玛湖凹陷区域地质构造(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Regional geological structure (a) and comprehensive stratigraphic column (b) of Mahu Sag, Junggar Basin

组( $P_2w$ )。中生代沉积地层主要包括三叠系百口泉组( $T_1b$ )、克拉玛依组( $T_2k$ )和白碱滩组( $T_3b$ )；侏罗系八道湾组( $J_1b$ )、三工河组( $J_1s$ )、西山窑组( $J_2x$ )、头屯河组( $J_2t$ )和齐古组( $J_3q$ )；白垩系吐鲁番群( $K_1tg$ )[图1(b)]。由于晚二叠世—早三叠世存在明显转换期,形成重要不整合<sup>[28]</sup>,研究区上乌尔禾组缺失严重,钻井主要显示为下乌尔禾组( $P_2w$ ),因而本文描述的乌尔禾组是指下乌尔禾组。研究区主要烃源岩层为二叠系,其中风城组是主要的烃源岩层<sup>[29]</sup>,存在晚三叠世—早侏罗世和晚侏罗世—早白垩世2个生烃高峰;乌尔禾组和佳木河组烃源岩是次要烃源岩[图1(b)]。随着勘探深入,在浅层侏罗系、中深层三叠系和深层二叠系均有重要发现[图1(b)],包括沥青、稠油和稀油等油藏。这一含油气系统被称为全油气系统<sup>[30-31]</sup>。研究区区域性盖层主要为上三叠统白碱滩组和侏罗系八道湾组煤系地层,沉积物主要由湖相泥岩、炭质泥岩和煤层组成[图1(b)]。

## 2 样品与实验

### 2.1 实验样品

本文实验样品涉及烃源岩、油砂和原油,其中乌尔禾组烃源岩分别采自K80井和Mh6井;风城组烃源岩主要来自于研究区K82井、F5井、F7井、Fn14井和Dt1井;地下原油样品主要采于W39井、Mh24井和Mh018井;油砂样品主要来自乌尔禾沥青矿地表(表1,井位见图1)。风城组烃源岩形成于还原性较强的沉积水体中,岩性复杂,其中以白云质岩类为主,本文研究样品主要为白云质泥岩和泥质白云岩。乌尔禾组烃源岩样品为暗色泥岩(表1)。

### 2.2 实验方法

利用碎样机将采集的14块烃源岩样品粉碎到100目(大约0.15 mm)左右,利用索氏抽提,用三氯甲烷(氯仿)将烃源岩粉末连续抽提3 d,得到烃源岩中可溶有机质。以正己烷充分沉淀沥青质,通过漏斗得到滤液。以层析柱法通过硅胶/氧化铝(v/v=2/1)将滤液依次分成饱和烃、芳香烃和非烃组分。对所得的饱和烃和芳烃组分再进行气相色谱—质谱实验。

同样,采集的原油样品加入正己烷充分溶解饱和烃、芳烃和非烃馏分,并充分沉淀沥青质,通过漏斗过滤出沥青质,将所得的滤液加入硅胶/氧化铝层析柱(2:1),然后用石油醚、二氯甲烷:石油醚(2:1,体积比)混合液和二氯甲烷:甲醇(93:7,体积比)

表1 研究区实验样品信息

Table 1 Distribution of studied samples  
in the study area

样品编号	井位	层位	深度/m	岩性
W1	Mh6		3 772.00	泥岩
W2	Mh6	$P_2w$	3 773.00	泥岩
W3	K80		4 084.00	泥岩
F1	F5		3 470.90	白云质泥岩
F2	F5		3 473.60	白云岩
F3	F5		3 476.10	白云质泥岩
F4	F7		3 156.16	泥质白云岩
F5	F7		3 157.50	白云质泥岩
F6	F7	$P_1f$	3 182.90	泥质白云岩
F7	F7		3 220.55	白云质泥岩
F8	F7		3 222.30	白云质泥岩
F9	Fn14		4 065.19	泥质白云岩
F10	Dt1		5 693.89	泥岩
F11	K82		4 084.30	泥岩
O1	W39	$J_1b$	/	/
O2	Mh24	$T_1b$	/	/
O3	Mh018	$P_2w$	/	/
O4	Ah12区块	$J_1b$	/	/
YS1	/	$J_1b$	地表	/
YS2	/	$K_1q$	地表	/

注:O4代表Ah12区块44个油样,后续参数表中数据为平均值

依次冲洗层析柱中的组分,分别得到饱和烃、芳烃和非烃馏分。对芳烃组分进行色谱—质谱实验。

饱和烃色谱—质谱实验采用美国安捷伦(Agilent)公司制造的气相色谱—质谱(GC-MS)联用仪进行分析鉴定,以HP-5MS弹性石英毛细管柱做为色谱柱,其规格为30 m×250 μm×0.25 μm。采用电子轰击的方式获得碎片离子,离子源电离能量为70 eV、温度为230 °C。实验中的载气介质为氦气(纯度:99.999%)。升温程序:GC初始温度为50 °C,以20 °C/min的升温速率从50 °C加热至100 °C,继续以3 °C/min的升温速率从100 °C加热至315 °C,最后恒温20 min。数据采集采用全扫描和多离子检测方式。芳烃馏分GC-MS分析中,色谱柱为HP-5MS弹性石英毛细管柱,规格为60 m×250 μm×0.25 μm。仪器进样口温度初始值为50 °C并恒温保持1 min,随后以3 °C/min的升温速率从50 °C加热至310 °C并恒温保持20 min。载气介质也为氦气,纯度为99.999%。

## 3 结果与讨论

### 3.1 烃源岩基础地球化学特征

风城组烃源岩总有机碳(TOC)含量分布在

0.40%~3.60%之间,平均为1.46%,有机质丰度表现为中等—好烃源岩(表2)。风城组烃源岩生烃潜力( $S_1+S_2$ )分布在0.69~42.22 mg/g<sub>TOC</sub>之间,平均为12.24 mg/g<sub>TOC</sub>,表明具有较高的生烃潜力。风城组烃源岩氢指数( $I_H$ )分布在104.55~817.05 mg/g<sub>TOC</sub>之间,有机质类型为I型和II<sub>1</sub>型—I型干酪根。风城组烃源岩最高峰温度( $T_{max}$ )大于435℃,并且镜质体反射率( $R_o$ )大于0.50%,表明有机质达到成熟—高成熟阶段。

成熟阶段。因此,风城组烃源岩生油潜力较大。与风城组烃源岩相比,乌尔禾组烃源岩 $TOC$ 值较低,分布在0.55%~1.05%之间,有机质丰度表现为中等; $I_H$ 值也较低,有机质类型为II<sub>1</sub>型—I型干酪根(表2)。乌尔禾组烃源岩有机质同样处于成熟—高成熟阶段。乌尔禾组同样具备生油能力。综上所述,风城组和乌尔禾组烃源岩均为研究区潜在的油源岩。

表2 研究区烃源岩基础地球化学参数

Table 2 Basic geochemical parameters of source rocks in the study area

样品编号	$TOC$ /%	$S_1$ /(mg/g)	$S_2$ /(mg/g)	$I_H$ /(mg/g)	$T_{max}$ /℃	$R_o$ /%	有机质丰度	有机质类型	有机质成熟度
W1	1.05	0.28	0.71	477.90	445	1.14	中等—好	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
W2	0.60	0.19	0.79	267.62	455	1.20	差—中等	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
W3	0.55	0.16	0.88	160.00	457	/	差—中等	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
F1	0.63	0.54	7.05	817.05	441	0.89	中等—好	I	成熟—高成熟
F2	0.73	0.86	2.99	794.32	447	1.01	中等—好	I	成熟—高成熟
F3	0.40	0.34	1.11	662.12	454	1.15	差—中等	I	成熟—高成熟
F4	1.74	0.90	8.51	490.49	436	/	中等—好	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
F5	3.60	0.51	33.47	805.92	442	1.05	中等—好	I	成熟—高成熟
F6	1.34	0.85	6.66	498.50	433	/	中等—好	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
F7	0.44	1.40	7.89	585.71	438	0.96	差—中等	I	成熟—高成熟
F8	3.43	2.32	39.90	688.46	440	1.11	好—极好	I	成熟—高成熟
F9	2.40	1.03	13.93	635.25	440	/	好—极好	I	成熟—高成熟
F10	0.66	0.40	0.29	104.55	457	/	中等—好	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟
F11	0.71	1.79	1.86	261.97	445	/	中等—好	II <sub>1</sub> —I	成熟—高成熟

注:TOC为总有机碳; $S_1$ 为游离烃; $S_2$ 为裂解烃; $I_H$ 为氢指数; $T_{max}$ 为最高热解峰温; $R_o$ 为镜质体反射率

### 3.2 二叠系烃源岩三芳甾烷分布特征

TAS通常在原油及烃源岩可溶有机质的芳烃馏分的色谱—质谱 $m/z$ 231碎片离子检测和鉴定<sup>[4]</sup>。由于C<sub>26</sub>-20R-TAS与C<sub>27</sub>-20S-TAS化合物往往共同溢出,因此无法计算C<sub>26</sub>-C<sub>28</sub>20R相对组成。Li<sup>[6]</sup>和李美俊等<sup>[9]</sup>通过比较C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S与C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R的相对比值,有效划分了塔里木盆地奥陶系原油成因类型。通过对玛湖凹陷二叠系乌尔禾组和风城组烃源岩的TAS的鉴定和分布特征分析,结果表明乌尔禾组烃源岩以C<sub>28</sub>-20S和C<sub>28</sub>-20R为主,具有较高含量的C<sub>26</sub>-20S化合物,C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值相对较高;C<sub>27</sub>-20R相对含量较低,C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R值相对较低[图2(a),图2(b)]。而风城组烃源岩中TAS分布特征与乌尔禾组烃源岩存在明显差异,以C<sub>28</sub>-20S和C<sub>28</sub>-20R为主,但具有较高含量的C<sub>27</sub>-20R化合物,C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R值相对较高;而C<sub>26</sub>-20S相对含量极低,C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值也很低[图2(c)],

图2(d)]。

### 3.3 二叠系烃源岩甲基三芳甾烷分布特征

甲基三芳甾烷通常在有机质芳烃馏分 $m/z$ 245碎片离子中检测与鉴定<sup>[4]</sup>。通过分析玛湖凹陷烃源岩样品的甲基三芳甾烷分布特征,结果表明2套烃源岩甲基三芳甾烷分布存在明显差异(图2)。乌尔禾组烃源岩中甲基三芳甾烷含量较高,分布相对完整,特别是三芳甲藻甾烷相对丰度高,可以定性检测和鉴定[图2(e),图2(f)]。风城组烃源岩中C<sub>27</sub>—C<sub>29</sub>甲基三芳甾烷系列分布完整,而不含三芳甲藻甾烷系列化合物[图2(g),图2(h)],与乌尔禾组烃源岩分布明显不同。

包建平等<sup>[8]</sup>通过对黔南坳陷和黔北坳陷高熟油藏研究表明造成三芳甲藻甾烷分布不同的主要原因是热成熟度演化过高。在 $R_o>5.0\%$ 的固体沥青油藏中三芳甲藻甾烷分布完整,相对含量较高,而在相对成熟度较低油藏中三芳甲藻甾烷含量很

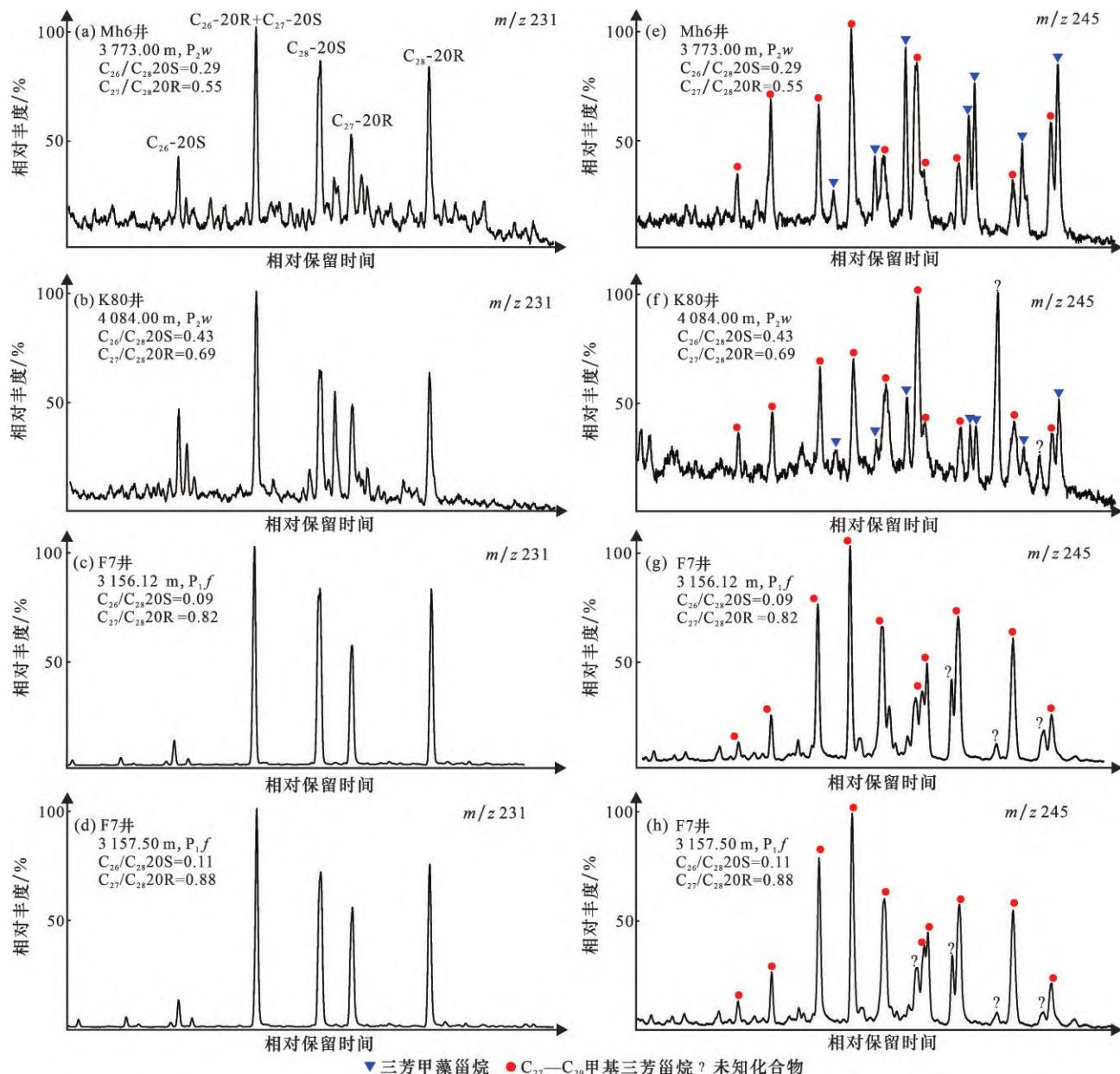


图2 玛湖凹陷二叠系烃源岩三芳甾烷及甲基三芳甾烷分布

Fig. 2 The distributions of triarylstane and methyltriarylstane in Permian source rocks from Mahu Sag

低<sup>[8]</sup>。该研究中,乌尔禾组烃源岩  $R_o$  值为 1.14%~1.20%,风城组烃源岩  $R_o$  值分布在 0.89%~1.15% 之间,并没有达到  $R_o=5.0\%$  高演化程度。从数据看,两者成熟度相差不大,不至于造成风城组烃源岩中三芳甲藻甾烷全部消失。如果与成熟度有关,乌尔禾组成熟度似乎比风城组成熟度略高,但反而成熟度高的样品中三芳甲藻甾烷含量较高。因此,认为成熟度可能不是研究区 2 套烃源岩三芳甲藻甾烷巨大差异的主要因素。

三芳甾烷在生物体中分布广泛,其生物来源仍有较大争议<sup>[4]</sup>。但是,三芳甲藻甾烷生物标志物专

属性较强,通常认为其生物前驱体为沟鞭藻类化合物<sup>[4, 32-35]</sup>。研究区乌尔禾组烃源岩生物来源具有陆源有机质与低等水生生物的双重贡献<sup>[36-37]</sup>,干酪根表现为 II型(表 2)。三芳甲藻甾烷普遍发育于乌尔禾组烃源岩中,推测此时期沟鞭藻对有机质具有一定的贡献。但是,风城组沉积时期水体盐度较高,还原性较强,以碱湖为主,其有机质来源以噬盐细菌为主,例如杜氏藻、蓝细菌等。王广利等<sup>[32-34]</sup>研究表明在盐湖相不发育 24-降胆甾烷,结果表明盐湖相可能也不发育三芳甲藻甾烷。因此,风城组沉积时期为盐度高的环境<sup>[38]</sup>,可能不适合沟鞭藻类生物

生存,从而导致烃源岩中三芳甲藻甾烷缺失。因此,沉积环境和有机质来源可能是导致研究区三芳甲藻甾烷分布不同的主要原因。

### 3.4 原油中三芳甾烷分布特征

通过对西北缘及环玛湖凹陷代表性原油样品的TAS分布研究,结果表明所有原油TAS分布特征相似(图3)。靠近西北缘地区的W39井中,以C<sub>28</sub>-20S和C<sub>28</sub>-20R为主,C<sub>27</sub>-20R含量较高,基本不含C<sub>26</sub>-20S[图3(a)]。玛西斜坡Ah12井区浅层侏罗系原油获得重要油气显示,浅层原油TAS中C<sub>28</sub>-20S相对含量最高,C<sub>26</sub>-20S相对含量极低,C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值较低[图3(b)]。对于玛湖凹陷主力产层三叠系百口泉组原油,其TAS中C<sub>28</sub>-20S、C<sub>28</sub>-20R、C<sub>27</sub>-20R相对丰度较高,具有低丰度的C<sub>26</sub>-20S[图3(c)],与该区浅层原油分布特征相似[图3(d)]表明它们可能具有统一的来源。中深层乌尔禾组同样表现出C<sub>28</sub>-20S、C<sub>28</sub>-20R、C<sub>27</sub>-20R含量高、C<sub>26</sub>-20S含量低的特征[图3(d)]。

西北缘乌尔禾地区地表普遍发育沥青矿和油砂矿,由于遭受严重生物降解,储层原油常规的藿烷类化合物和规则甾烷无法进行定性判识和定量计算(图4)。这给油源对比带来极大困难。三芳甾烷在地质体演化和成藏过程中,具有较高稳定性,抗生物降解能力强<sup>[4]</sup>。

通过对沥青矿油砂和油砂矿油砂中的生物降解原油的TAS分析,结果表明TAS在生物降解原油样品中分布完整[图3(e)–图3(f)],其中以C<sub>28</sub>-20S、C<sub>28</sub>-20R丰度最高,C<sub>26</sub>-20S相对丰度很低,C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值较低,C<sub>27</sub>-20R相对丰度较高[图3(e),图3(f)]。

### 3.5 原油中甲基三芳甾烷分布特征

通过对原油的m/z 245质量色谱图分析,结果表明不同层系原油中甲基三芳甾烷系列及三芳甲藻甾烷表现出相似的分布特征(图3)。侏罗系、三叠系和二叠系原油中的C<sub>27</sub>—C<sub>29</sub>甲基三芳甾烷含量较高,分布完整,可以定性检测和鉴定[图3(g)–图3(i)]。但是,所有样品中均不含三芳甲藻甾烷系列化合物,与风城组烃源岩分布特征一致[图2(g)–图2(h)],而与乌尔禾组烃源岩表现出明显差异[图3(e)–图3(f)]。尽管油砂样品浅层遭受严重生物降解(图4),但是甲基三芳甾烷和三芳甲藻甾烷仍然可以定性检测,同样含有高丰度的C<sub>27</sub>—C<sub>29</sub>甲基三芳甾烷,基本不含三芳甲藻甾烷系列化合

物,与深层原油样品[图3(g)–图3(i)]和风城组烃源岩分布特征一致[图2(g)–图2(h)]。因此,从上述甲基三芳甾烷系列及三芳甲藻甾烷分布特征可以看出,风城组烃源岩是西北缘及玛湖凹陷不同层系原油的主要来源。

### 3.6 油源对比

根据上述质量色谱图分析,结果表明西北缘及环玛湖凹陷不同层系原油中TAS分布特征相似,即以C<sub>28</sub>-20S、C<sub>28</sub>-20R为主,C<sub>26</sub>-20S含量极低,C<sub>27</sub>-20R相对丰度较高[图3(a)–图3(f)]。这与二叠系风城组烃源岩分布特征是一致的[图2(a)–图2(d)]。对比C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S与C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R值,结果表明原油C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值较低,分布在0.06~0.16之间,平均为0.11(图5);而C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R值较高,分布在0.79~0.91之间,平均为0.85(图5)。而乌尔禾组烃源岩呈现相反的趋势,即C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S值较高,C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R值相对较低,在交会图上远离原油族群。风城组烃源岩与原油分布特征相似,在交会图上聚为一类,表明两者具有亲缘关系,即原油来源于风城组烃源岩,而不是乌尔禾组烃源岩(图5)。

由于C<sub>26</sub>R-TAS与C<sub>27</sub>S-TAS在常规GC-MS图谱中共溢<sup>[4]</sup>,所以此类化合物并没有像C<sub>27</sub>—C<sub>29</sub>规则甾烷普遍使用。由于C<sub>28</sub>R-TAS与C<sub>28</sub>S-TAS分离较好,张宝收等<sup>[39]</sup>通过计算两者比例作为系数,分别计算C<sub>26</sub>R-TAS和C<sub>27</sub>S-TAS的含量,并且成功应用于塔里木盆地和北部湾盆地的原油族群划分和油源对比等研究<sup>[10,39]</sup>。通过上述研究,结果表明风城组烃源岩C<sub>26</sub>-TAS含量极低,小于5%;而乌尔禾组烃源岩中C<sub>26</sub>-TAS含量较高,分布在10%~20%之间。而所有原油样品的C<sub>26</sub>-TAS含量也低于10%,明显与风城组聚为一类(图6),表明这些原油均来源于风城组烃源岩。

风城组烃源岩存在2个异常值,分别为K82井和Dt1井(图5,图6),2口井位置均位于凹陷边缘[图1(a)]。K82井区沉积相为扇三角洲沉积,伽马蜡烷相对含量较低[图5(b)],反映一种偏氧化的沉积环境;并且其有机质丰度低,其生物来源与其他典型样品存在较大差异。此外,Dt1井位于玛湖凹陷东斜坡位置,远离玛湖凹陷已探明油藏,横向跨度大,不存在长距离横向运移<sup>[40]</sup>;其碳同位素组成相对偏重(表3),反映沉积环境和有机质来源存在较大差异。因此,可能对研究区原油也没有明显贡献。

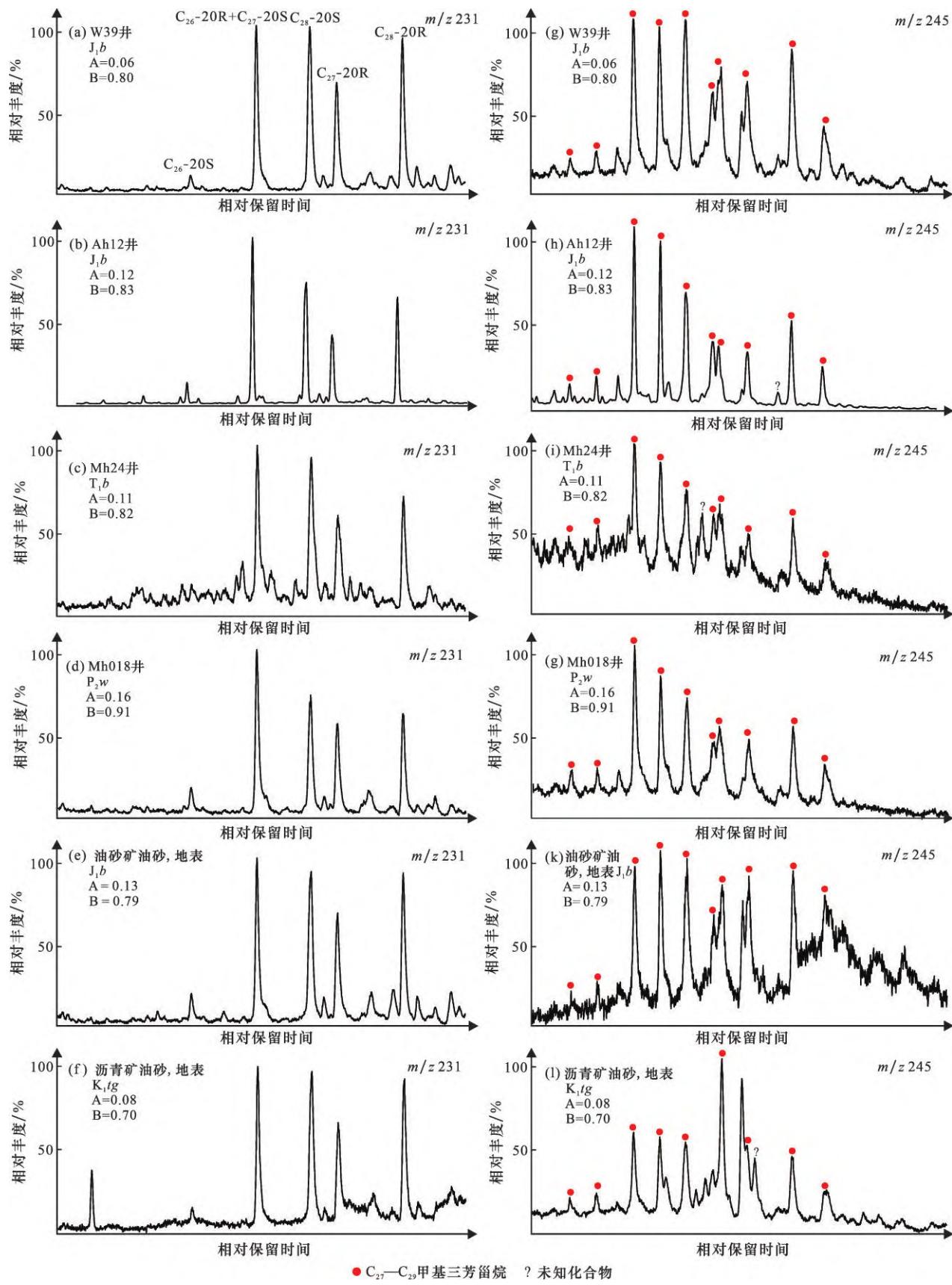


图3 玛湖凹陷原油三芳甾烷分布图

Fig.3 The distributions of triarylstane in crude oils from Mahu Sag

注: A =  $C_{26}-20S/C_{28}-20S$ ; B =  $C_{27}-20R/C_{28}-20R$

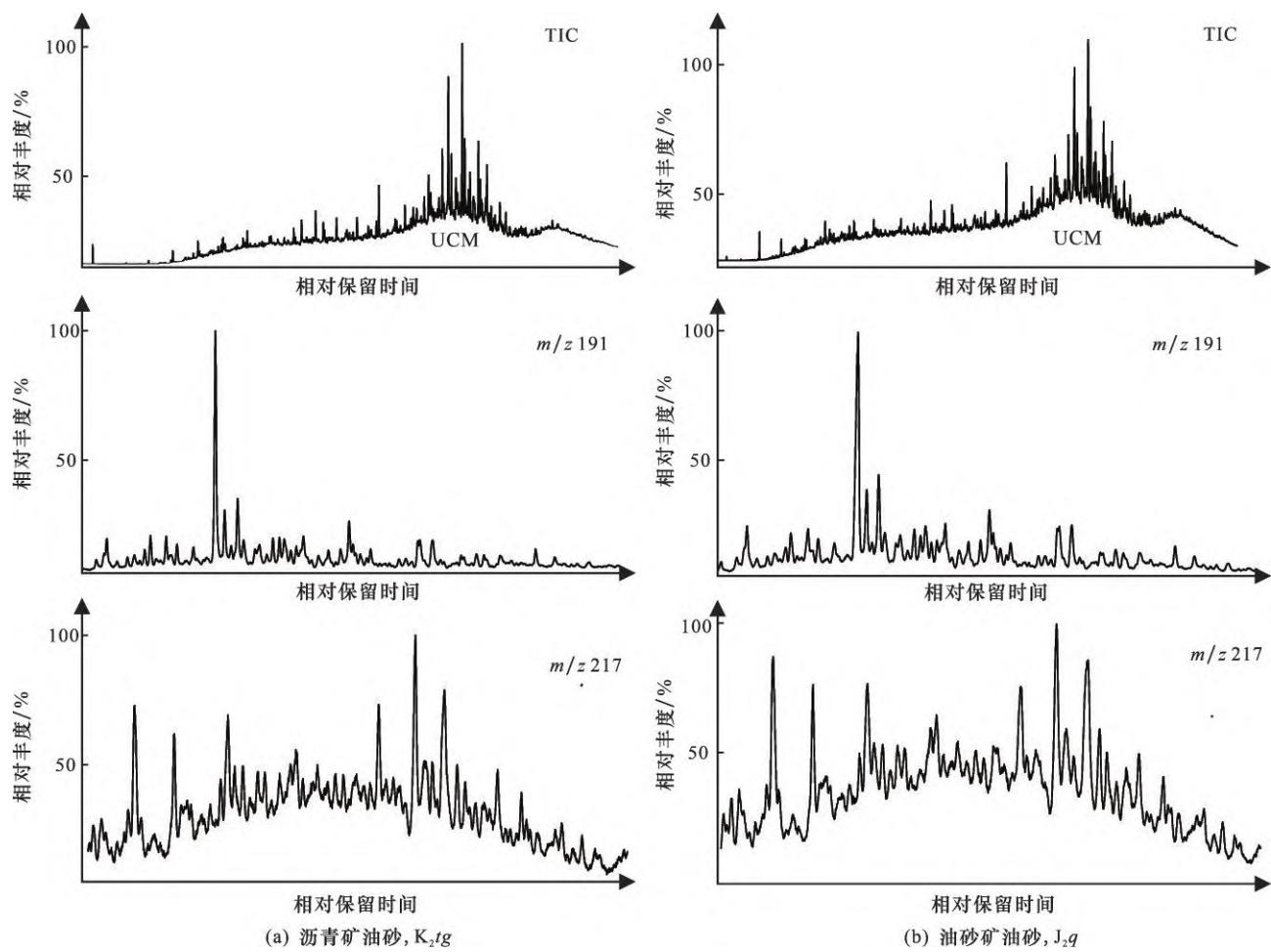
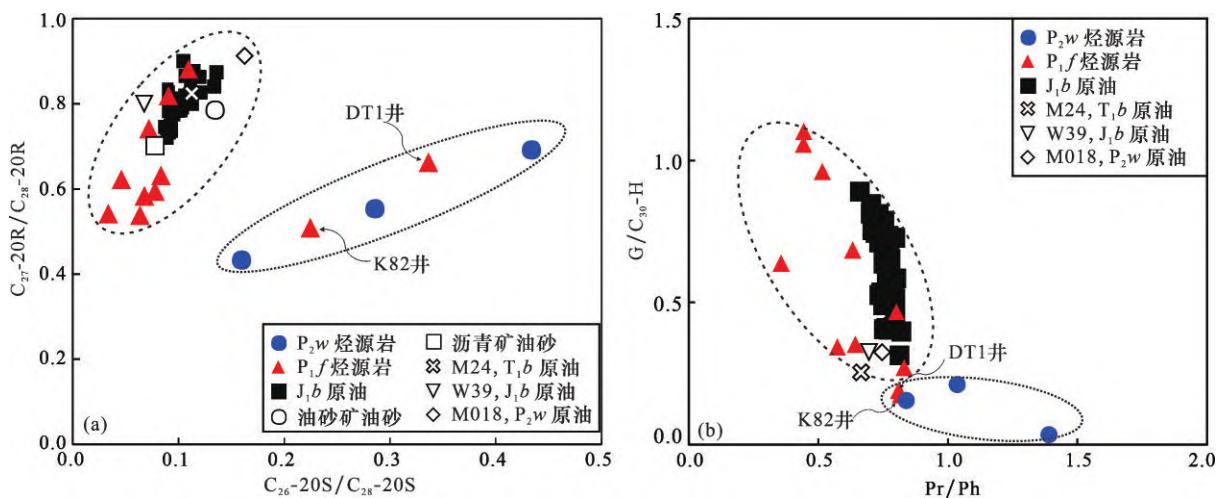


图4 研究区西北缘油砂样品总离子流图及萜类和规则甾烷分布

Fig. 4 The distributions of total ion chromatogram (TIC), terpenes and regular steranes in oil sand samples in the northwest margin of the study area

图5  $C_{26}-20S/C_{28}-20S$ 与 $C_{27}-20R/C_{28}-20R$ 三芳甾烷比值相关图进行油源对比Fig. 5 Cross-plot of  $C_{26}-20S/C_{28}-20S$  TAS and  $C_{27}-20R/C_{28}-20R$  TAS showing oil-source correlations

### 3.7 碳同位素证据

陈建平等<sup>[17-18]</sup>报道了准噶尔盆地西部地区下乌尔禾组烃源岩干酪根碳同位素组成较重, 干酪根的

$\delta^{13}C$ 值集中分布在 $-23\text{‰}$ ~ $-21\text{‰}$ 之间。但是, 由于下二叠统风城组烃源岩生源以水生生物为主, 其同位素具有明显富集 $^{12}C$ 而贫 $^{13}C$ 的特征, 导致其

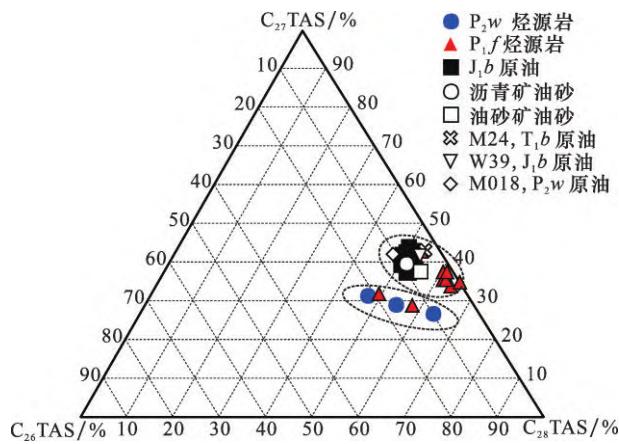


图6 玛湖凹陷烃源岩及原油三芳甾烷三角图

Fig.6 Ternary diagram of TAS in source rocks and crude oils from Mahu Sag

表3 研究区样品生物标志物和稳定碳同位素参数

Table 3 Biomarker and stable carbon isotopes parameters of studied samples in the study area

样品 编号	C <sub>26</sub> S/ C <sub>28</sub> S	C <sub>27</sub> R/ C <sub>28</sub> R	C <sub>26</sub> /%	C <sub>27</sub> /%	C <sub>28</sub> /%	Pr/ Ph	GI	δ <sup>13</sup> C /‰
W1	0.16	0.43	0.10	0.27	0.63	1.39	0.03	-23.02
W2	0.29	0.55	0.17	0.30	0.54	1.04	0.21	-22.54
W3	0.43	0.69	0.22	0.32	0.46	0.84	0.15	/
F1	0.06	0.54	0.02	0.34	0.64	0.44	1.10	-29.52
F2	0.08	0.63	0.02	0.38	0.60	0.44	1.06	-28.25
F3	0.08	0.59	0.03	0.36	0.61	0.52	0.96	/
F4	0.09	0.82	0.04	0.43	0.53	0.64	0.35	-29.25
F5	0.11	0.88	0.05	0.45	0.51	0.80	0.47	-28.83
F6	0.03	0.54	0.00	0.35	0.65	0.57	0.34	-30.47
F7	0.07	0.58	0.03	0.36	0.62	0.63	0.68	/
F8	0.05	0.62	0.01	0.38	0.61	0.36	0.64	/
F9	0.07	0.74	0.06	0.40	0.54	0.83	0.27	-28.40
F10	0.34	0.66	0.19	0.32	0.49	0.81	0.19	-26.13
F11	0.22	0.51	0.13	0.29	0.58	0.82	0.17	/
O1	0.11	0.82	0.03	0.44	0.53	0.66	0.25	-29.32
O2	0.16	0.91	0.11	0.43	0.47	0.75	0.33	-29.16
O3	0.07	0.80	0.05	0.42	0.53	0.70	0.33	/
O4	0.10	0.80	0.08	0.41	0.51	0.76	0.63	-28.73
YS1	0.08	0.70	0.07	0.38	0.55	/	/	-29.34
YS2	0.13	0.79	0.09	0.40	0.51	/	/	-28.10

注: C<sub>26</sub>S/C<sub>28</sub>S: C<sub>26</sub>-20S/C<sub>28</sub>-20S TAS; C<sub>27</sub>R/C<sub>28</sub>R: C<sub>27</sub>-20R/C<sub>28</sub>-20R TAS; C<sub>26</sub>%: C<sub>26</sub>/(C<sub>26</sub>+C<sub>27</sub>+C<sub>28</sub>) TAS; C<sub>27</sub>%: C<sub>27</sub>/(C<sub>26</sub>+C<sub>27</sub>+C<sub>28</sub>) TAS; C<sub>28</sub>%: C<sub>28</sub>/(C<sub>26</sub>+C<sub>27</sub>+C<sub>28</sub>) TAS; Pr/Ph: 姥姣烷/植烷; GI: 伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷; δ<sup>13</sup>C: 稳定碳同位素, 烃源岩样品为干酪根碳同位素, 原油样品为全油碳同位素

δ<sup>13</sup>C值偏低。通过对研究区2套烃源岩的碳同位素组成(表3),结果表明乌尔禾烃源岩干酪根δ<sup>13</sup>C值明显偏高,远远高于风城组烃源岩干酪根δ<sup>13</sup>C值。

相比而言,原油碳同位素组成较轻,与风城组烃源岩相近。上述结果表明,不同层位原油均来源于二叠系风城组烃源岩,这与三芳甾烷分布特征一致。因此,同位素证据表明三芳甾烷及三芳甲藻甾烷是研究区油源对比的有效指标。

## 4 结论

(1) 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩和不同层系原油普遍含有高丰度的三芳甾烷,三芳甾烷是研究区油源对比的良好分子标志物。

(2) 风城组烃源岩C<sub>26</sub>-20S TAS含量较低,C<sub>27</sub>-20R TAS相对含量较高;而乌尔禾组烃源岩表现出相反分布特征,C<sub>26</sub>-20S TAS含量较高,而C<sub>27</sub>-20R TAS相对含量较低;不同层系原油含有相对低含量的C<sub>26</sub>-20S TAS和高含量的C<sub>27</sub>-20R TAS,与风城组烃源岩具有可比性。

(3) 二叠系2套烃源岩中均含有高丰度的甲基三芳甾烷。但是乌尔禾组烃源岩中三芳甲藻甾烷含量较高,并且分布完整;而风城组烃源岩中不含有三芳甲藻甾烷。此外,所有原油样品均未检测出此类化合物。三芳甲藻甾烷分布表明原油来源于风城组烃源岩。

## 参考文献(References)

- [1] RIOLO J, ALBRECHT P. Novel rearranged ring C monoaromatic steroid hydrocarbons in sediments and petroleums[J]. Tetrahedron Letters, 1985, 26(22): 2701-2704.
- [2] RIOLO J, HUSSLER G, ALBRECHT P, et al. Distribution of aromatic steroids in geological samples: Their evaluation as geochemical parameters[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(4-6): 981-990.
- [3] MOLDOWAN J M, FAGO F J. Structure and significance of a novel rearranged monoaromatic steroid hydrocarbon in petroleum[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(3): 343-351.
- [4] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M, et al. The Biomarker Guide[M]. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 586-587.
- [5] YOU B, NI Z Y, CHEN J F, et al. A distinct oil group in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China: New insights from norcholestane and triaromatic steroid analyses[J]. Organic Geochemistry, 2021, 162: 104316.
- [6] LI M J, WANG T G, LILLIS P G, et al. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic steroids and dinosteroids in oils and Cambrian-Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China [J]. Applied Geochemistry,

- 2012, 27(8): 1643-1654.
- [7] KILLOPS S D, ZHANG S, LICHTFOUSE E. Triaromatic dinosteroids-isomeric distributions and their geochemical significance[J]. *Organic Geochemistry*, 2021, 162: 104300.
- [8] 包建平, 倪春华, 朱翠山, 等. 高演化地质样品中三芳甾类标志物及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 2020, 38(4): 898-911.
- BAO J P, NI C H, ZHU C S, et al. Triaromatic steroids and their geochemical significance in highly mature geological samples in the North Guizhou Depression[J]. *Acta Sedimentologic Sinica*, 2020, 38(4): 898-911.
- [9] 李美俊, 王铁冠, 王春江, 等. 塔河油田奥陶系原油三芳甾分布及原油族群划分[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(5): 20-24.
- LI M J, WANG T G, WANG C J, et al. Distribution of triaromatic steroids and oil family classification of Ordovician oils in Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 2012, 36(5): 20-24.
- [10] 杨福林, 云露, 王铁冠, 等. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 851-861.
- YANG F L, YUN L, WANG T G, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin and oil-source correlation with typical marine crude oil[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 851-861.
- [11] 张水昌, 王飞宇, 张保民, 等. 塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 23-28.
- ZHANG S C, WANG F Y, ZHANG B M, et al. Middle-Upper Ordovician source rock geochemistry of the Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6): 23-28.
- [12] ZHANG S C, HUANG H P. Geochemistry of Paleozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 1. Oil family classification[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(8): 1204-1214.
- [13] 米敬奎, 张水昌, 陈建平, 等. 轮南地区寒武系原油的分布特征[J]. *科学通报*, 2007, 52(S1): 102-107.
- MI J K, ZHANG S C, CHEN J P, et al. The distribution of the oil derived from Cambrian source rocks in Lunnan area, the Tarim Basin, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(S1): 102-107.
- [14] CHEN Z L, LIU G D, HUANG Z L, et al. Controls of oil family distribution and composition in nonmarine petroleum systems: A case study from Inner Mongolia Erlian Basin, northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 36-52.
- [15] 陈哲龙, 柳广弟, 王绪龙, 等. 玛湖凹陷三叠系百口泉组油藏多期混源成藏的包裹体证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(S1): 740.
- CHEN Z L, LIU G D, WANG X L, et al. Inclusion evidence of multistage mixed source reservoir formation in Triassic Baikouquan Formation, Mahu Sag[J]. *Journal of Jilin University (Earth Sciences Edition)*, 2015, 45(S1): 740.
- [16] 阿布力米提, 曹剑, 陈静, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷高成熟油气成因与分布[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(4): 379-384.
- ABULIMITI, CAO J, CHEN J, et al. Origin and occurrence of highly matured oil and gas in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(4): 379-384.
- [17] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. *地质学报*, 2016, 90(1): 37-67.
- CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(1): 37-67.
- [18] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 421-450.
- CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(3): 421-450.
- [19] 宋涛, 黄福喜, 汪少勇, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷侏罗系油气藏特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(3): 341-349.
- SONG T, HUANG F X, WANG S Y, et al. Characteristics and exploration potential of Jurassic oil and gas reservoirs in Mahu Sag of the Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(3): 341-349.
- [20] 陈永波, 程晓敢, 张寒, 等. 玛湖凹陷斜坡区中浅层断裂特征及其控藏作用[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 985-994.
- CHEN Y B, CHENG X G, ZHANG H, et al. Fault characteristics and control on hydrocarbon accumulation of middle-shallow layers in the slope zone of Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 985-994.
- [21] 胡潇, 曲永强, 胡素云, 等. 玛湖凹陷斜坡区浅层油气地质条件及勘探潜力[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(2): 67-77.
- HU X, QU Y Q, HU S Y, et al. Geological conditions and exploration potential of shallow oil and gas in slope area of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(2): 67-77.
- [22] 陈刚强, 王学勇, 刘海磊, 等. 准噶尔盆地乌尔禾沥青矿脉走滑断裂体系特征及形成机制[J]. *新疆地质*, 2019, 37(4): 520-524.
- CHEN G Q, WANG X Y, LIU H L, et al. Strike-slip fault system characteristics and forming mechanisms of bituminous vein in Wuerhe, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2019, 37(4): 520-524.
- [23] 张景廉, 张宁, 朱炳泉, 等. 克拉玛依乌尔禾沥青脉 Pb—Sr—Nd 同位素地球化学[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 1997, 27(4): 325-330.
- ZHANG J L, ZHANG N, ZHU B Q, et al. Pb-Sr-Nd isotopic geochemistry of the Wuerhe Bitumen Vein, Karamay, NW China[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1997, 27(4): 325-330.
- [24] 马宗晋, 曲国胜, 陈新发. 准噶尔盆地构造格架及分区[J].

- 新疆石油地质, 2008, 29(1): 1-6.
- MA Z J, QU G S, CHEN X F. Tectonic framework and deviation in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 1-6.
- [25] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 845-861.
- HE D F, ZHANG L, WU S T, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 845-861.
- [26] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 39(2): 127-137.
- TANG Y, GUO W J, WANG X T, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 39(2): 127-137.
- [27] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 14-23.
- KUANG L C, TANG Y, LEI D W, et al. Exploration of fan-controlled large-area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in slope zone of Mahu Depression in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 14-23.
- [28] 李攀, 李永强, 经俭波, 等. 准噶尔盆地西北部P-T转换期不整合的发育演化特征及意义[J]. 古地理学报, 2020, 22(4): 697-714.
- LI P, LI Y Q, JING J B, et al. Unconformities formed during the P-T transition in the northwestern Junggar Basin: Nature, evolution and implications[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(4): 697-714.
- [29] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 781-790.
- CAO J, LEI D W, LI Y W, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790.
- [30] 唐勇, 曹剑, 何文军, 等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 1-9.
- TANG Y, CAO J, HE W J, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: Insights from the discovery of Mahu large oil Province[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 1-9.
- [31] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规—非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.
- ZHI D M, TANG Y, HE W J, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 38-51.
- [32] 王广利, 李姝. 沟鞭藻: 24-降胆甾烷的重要生源[J]. 石油实验地质, 2010, 32(1): 64-66.
- WANG G L, LI S. Dinoflagellates as potential precursors of 24-norcholestanes[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(1): 64-66.
- [33] 王广利, 王铁冠, 陈致林, 等. 济阳坳陷古近纪沟鞭藻分子化石的分布与控制因素[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 100-104.
- WANG G L, WANG T G, CHEN Z L, et al. Distribution and controlling factors of molecular fossils derived from dinoflagellates in the Paleogene lacustrine Jiayang Super-depression [J]. Acta Sedimentologic Sinica, 2008, 26(1): 100-104.
- [34] WANG G L, WANG T G, SIMONEIT B R, et al. The distribution of molecular fossils derived from dinoflagellates in Paleogene lacustrine sediments (Bohai Bay Basin, China) [J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(11): 1512-1521.
- [35] 张水昌, 边立曾, 张宝民, 等. 分子化石在寒武—前寒武纪地层中的异常分布及其生物学意义[J]. 中国科学:D辑, 2001, 31(4): 299-304.
- ZHANG S C, BIAN L Z, ZHANG B M, et al. Anomalous distribution of molecular fossils in Cambrian-Precambrian strata and their biological significance[J]. Science in China (Series D), 2011, 31(4): 299-304.
- [36] FENG C, LI T, HE W J, et al. Organic geochemical traits and paleo-depositional conditions of source rocks from the Carboniferous to Permian sediments of the northern Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 191: 107117.
- [37] WANG T T, CAO J, JIN J, et al. Spatiotemporal evolution of a Late Paleozoic Alkaline Lake in the Junggar Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104799.
- [38] 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 311-322.
- CHEN Z L, LIU G D, WEI Y Z, et al. Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 311-322.
- [39] 张宝收, 李美俊, 赵青, 等. 原油中C<sub>26</sub>-C<sub>28</sub>三芳甾烷相对含量计算方法及其应用[J]. 石油实验地质, 2016, 38(5): 692-697.
- ZHANG B S, LI M J, ZHAO Q, et al. Determining the relative abundance of C<sub>26</sub>-C<sub>28</sub> triaromatic steroids in crude oils and its application in petroleum geochemistry[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 692-697.
- [40] 卞保力, 张景坤, 吴俊军, 等. 准噶尔盆地西北缘大侏罗沟走滑断层油气成藏效应[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 238-247.
- BIAN B L, ZHANG J K, WU J J, et al. Re-characterization of the Dazhuluogou strike-slip fault in northwestern Junggar Basin and the implications for hydrocarbon accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 238-247.

## The distribution of triaromatic steroids in Permian source rocks and implications for oil-source correlations in the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China

WANG Dongyong<sup>1,2</sup>, LI Meijun<sup>1,2,3</sup>, YANG Lu<sup>4</sup>, YANG Yuanfeng<sup>5</sup>, LI Erting<sup>6</sup>,  
JIN Jun<sup>6</sup>, ZOU Xianli<sup>7</sup>, XU Bodong<sup>7</sup>

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

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University) Ministry of Education, Wuhan 430100, China;

4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

5. Baikouquan Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China;

6. Research Institute of Experiment and Detection of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China;

7. College of Petroleum, China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China)

**Abstract:** Triaromatic steroids (TAS) are effective indicators for crude oil family classification and oil-source correlation. Based on analyses of gas chromatographymass spectrometry (GC-MS) for aromatic fractions of representative oil and source rock samples in the Mahu Sag, this paper systematically studies the TAS distribution characteristics. The results show that the distribution patterns of TAS have distinct differences, which can effectively distinguish Permian Fengcheng Formation ( $P_1f$ ) and Wuerhe Formation ( $P_2w$ ) source rocks in the study area. The relative contents of  $C_{26}20S$  TAS are lower, while those of  $C_{27}-20R$  TAS are relatively higher in the  $P_1f$  source rocks. In contrast, the  $P_2w$  source rocks are characterized by high relative contents of  $C_{26}20S$  TAS and low relative contents of  $C_{27}20R$  TAS. Furthermore, the distributions of triaromatic dinosteranes in  $P_2w$  source rocks are complete and readily identified, while the  $P_1f$  source rocks contain less those compounds. All oil samples from different strata are characterized by low relative contents of  $C_{26}20S$  TAS, high relative contents of  $C_{27}20R$  TAS and less triaromatic dinosteranes, which is consistent with those of the  $P_1f$  source rocks. Low  $C_{26}-20S/C_{28}-20S$  TAS ratios, high  $C_{27}-20R/C_{28}-20R$  TAS ratios and the triangle diagram of  $C_{26}-C_{28}$  TAS indicate that the crude oils in different strata are mainly derived from  $P_1f$  source rocks. Therefore, TAS and triaromatic dinosteranes can be used as effective molecular markers for oil source correlation in the study area.

**Key words:** Triaromatic steroid (TAS); Triaromatic dinosteranes; Oil-source rocks correlation; Fengcheng Formation; Wuerhe Formation; Mahu Sag

**Foundation items:** The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41972148); the Youth Project of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41802179); the Guangdong Laboratory of Southern Ocean Science and Engineering (Guangzhou) (Grant No. GML2019ZD0102-1-01).