

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

陈哲龙^{1,2}, 柳广弟¹, 卫延召², 高 岗¹, 任江玲³, 杨 帆², 马万云³

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油新疆油田公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000]

摘要:准噶尔盆地西北缘原油及烃源岩中生物标志物以高丰度的三环萜烷系列为典型特征,其分布样式的差异一直被当作研究本区原油成因类型及油-源对比的典型指标。通过对烃源岩样品的系统地球化学分析,认为本区风城组源岩(P_{1f})主要以三环萜烷(C_{20} , C_{21} , C_{23})呈“上升型”为特征,泥质岩类与碳酸盐岩类相比 C_{24} , C_{25} 三环萜烷含量较高;下乌尔禾组(P_{2w})源岩和佳木河组(P_{1j})源岩样品三环萜烷均呈“下降型”分布特征。通过对源岩镜下进行观察和加水热模拟实验等方法,分别探讨了沉积环境与母质类型、成熟度及排烃作用对三环萜烷分布样式的影响,认为 P_{1f} 和 P_{2w} 源岩中三环萜烷的分布主要受控于沉积环境和母质类型的原生差异。 P_{1f} 源岩有机质多源于本地沉积的藻类及细菌,沉积环境属于蒸发、还原的咸化湖沉积; P_{2w} 源岩中外来有机质含量相对较多,沉积环境属于淡水还原环境。 P_{1j} 源岩整体热演化程度较高,有机质炭化作用强烈;埋藏成熟演化在有机质处于成熟-高熟阶段内对三环萜烷分布样式影响不大,若达到过熟阶段则会造成低碳数三环萜烷(C_{20} , C_{21})含量增加;排烃作用对三环萜烷影响相对较小,不改变其分布样式。

关键词:三环萜烷;生物标志物;加水热模拟;二叠系;烃源岩;玛湖凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin

Chen Zhelong^{1,2}, Liu Guangdi¹, Wei Yanzhao², Gao Gang¹, Ren Jiangling³, Yang Fan², Ma Wanyun³

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

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Experiment and Testing, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 843000, China)

Abstract: Biomarkers extracted from the crude oil and source rock samples obtained from the northwestern margin of Junggar Basin are characterized by high abundance of tricyclic terpanes (TTs). The distribution pattern of TTs has been used to distinguish oil families and to conduct oil-source correlations. Comprehensive geochemical analyses of source rock samples reveal that different distribution patterns of TTs correspond to different sets of source rocks, i. e. the Fengcheng Formation (P_{1f}) features in “Going Up” of C_{20} , C_{21} and C_{23} TTs, with higher amounts of C_{24} and C_{25} TTs for mudstones in comparison with carbonate rocks; the Lower Wuerhe Formation (P_{2w}) and the Jiamuhe Formation (P_{1j}) are characterized by “Going Down” of C_{20} , C_{21} and C_{23} TTs. The influences of sedimentary environment, kerogen type, maturity and hydrocarbon expulsion on distribution of TTs were studied through microscopic observation of thin sections and hydrous pyrolysis simulation. We concluded that the TTs distribution patterns of P_{1f} and P_{2w} are mainly controlled by sedimentary environment and kerogen type. The organic matters of the P_{1f} source rocks were mainly derived from autochthonous algae or bacteria and were deposited in an evaporative reducing salt lake, while allochthonous organic matters were relatively abundant in the P_{2w} and were deposited in a semi-reducing fresh lacustrine environment. The P_{1j} source rocks are currently over-mature and have experienced intense carbonization. Burial thermal evolution has limited impacts on the distri-

收稿日期:2015-07-12;修订日期:2017-02-20。

第一作者简介:陈哲龙(1988—),男,博士、工程师,油气地球化学与成藏。E-mail:chenzl@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05001005);中石油新疆油田公司课题(2014-C4023)。

bution patterns of TTs during mature and high-mature stage, but can result in the increase of low carbon number terpanes during over-mature stage. Hydrocarbon expulsion has limited influences on the TTs distribution pattern.

Key words: tricyclic terpanes, biomarkers, hydrocarbon pyrolysis, Permian source rock, Mahu Depression, Junggar Basin

三环萜烷在原油及源岩抽提物生标中普遍存在,其碳数可以从 C_{19} 延伸至 C_{45} , 且常常用作油源对比及反映成熟度的可靠指标^[1-2]。三环萜烷在区分不同沉积相类型时具有重要作用,通常湖相陆源沉积物以高含量的 C_{21} 三环萜为特征;近岸沉积以 C_{19} 和 C_{20} 三环萜为主;深水泥岩沉积以 C_{24} 和 C_{25} 三环萜为高峰;页岩相以高含量的 C_{23} 萜烷为特征^[3]。前人在其来源方面做了大量研究,认为其可能为原核生物膜^[4]、藻类^[5]或高等植物^[6],而高丰度的三环萜烷常常与 *Tasmanites* 藻类及较高成熟度的盐湖相或碳酸盐沉积环境有关^[7-8]。因此,饱和烃生标中三环萜烷分布的变化主要受生源(细菌或藻类)、成熟度和生排烃作用等因素的影响^[9-11]。

目前还并没有对原油中丰富的三环萜系列的具体来源和沉积环境进行明确的定义,而三环萜却被广泛应用于高成熟条件下表征源岩抽提物和原油的特征,并且运用到对生物降解油的油源对比分析。众所周知,随成熟度的增加,三环/五环萜呈明显的增加^[12],虽然三环萜碳数的变化主要被应用于成熟度分析,但对于成熟度相近样品的分布变化,研究显示其可能受到沉积环境或生排烃作用的影响^[13]。本次研究以玛湖凹陷二叠系样品为例,研究成熟-高成熟条件下不同源岩中三环萜烷的分布样式及其影响因素,为本区原油类型的划分与油源对比研究提供有益借鉴。

前人在研究准噶尔盆地腹部及西北缘原油类型及烃源岩时将三环萜烷(C_{20} , C_{21} , C_{23})的分布样式与烃源岩建立了初步的对应关系,如:三环萜烷呈“上升型”分布可能对应风城组(P_1f)源岩,“山峰型”可能对应乌尔禾组(P_2w)源岩,“下降型”可能对应佳木河组(P_1j)源岩^[14-15]。但限于早期所能取到优质烃源岩样品的稀少及本区原油混源现象的普遍存在^[16],一直未能对烃源岩中三环萜的分布样式提供强有力的直接证据,也未对其成因进行合理解释,而三环萜的分布特征对于解决准噶尔盆地油源对比问题至关重要。结合前人研究成果,本次研究将本区主力源岩风城组细分为碳酸盐岩类和泥质岩类两种岩性,结合乌尔禾组及佳木河组新取岩心,在对烃源岩样品进行常规地球化学分析的基础上,辅以烃源岩镜下有机相观察,并对其成熟度和生排烃运移特征进行探讨,从而确认玛湖凹陷二叠系各套源岩中三环萜的分布特征及其受控的主要因素。

1 地质概况

玛湖凹陷是准噶尔盆地中央坳陷的次一级负向构造单元,毗邻西北缘克-夏断裂带,东接达巴松凸起、南临中拐凸起,总面积达 $11\,400\text{ km}^2$ ^[17]。玛湖凹陷先后经历海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期次构造运动。早石炭世-二叠纪前陆隆起,盆地受挤压应力影响,形成了一系列沟通烃源岩层的大型逆断裂,逆断层持续发育至早中三叠世停止,现今构造较为简单,表现为东南倾的平缓单斜,局部发育低幅度背斜或鼻状构造^[18-20]。近年在玛湖斜坡区三叠系百口泉组勘探取得重大突破,探明亿吨级油气田,初步形成了以玛北斜坡区(夏子街扇)、艾湖(黄羊泉扇)及玛湖地区(克拉玛依扇)为主的大油气区(图1)。

玛湖凹陷地层发育齐全,自下而上主要发育有石炭系,二叠系佳木河组、风城组、夏子街组、乌尔禾组,三叠系百口泉组、克拉玛依组、白碱滩组,侏罗系八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组及白垩系(图2)。其中,三叠系百口泉组储层主要发育扇三角洲、冲积扇沉积^[21],斜坡区埋深 $3\,000\sim4\,000\text{ m}$,整体为低孔低渗储层,孔隙度介于 $6.95\%\sim13.9\%$,平均达 9% ,渗透率介于 $(0.05\sim139)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $1.34\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。上覆克拉玛依组泥岩形成局部盖层,白碱滩组泥岩全区分布形成区域盖层。本区烃源岩主要包括二叠系佳木河组、风城组及乌尔禾组3套,其中风城组沉积在不同地区形成了两种典型沉积物,一种以深灰色泥岩为主,包括凝灰质泥岩及粉砂质泥岩等岩性组合,主要分布在夏子街、玛东等广大区域,其有机碳含量(TOC)在 $0.57\%\sim2.73\%$,平均可达 1.51% ,热解氢指数(HI) 在 $71.4\sim700\text{ mg/g}$,有机质类型以Ⅱ型为主,少量为Ⅰ型,镜质体反射率(R_o) 在 $0.7\%\sim1.1\%$,处于成熟阶段(表1)。另一种主要分布于风城及玛南地区,沉积物岩性主要为白云质泥岩及含石膏白云岩为主,其有机碳含量相比风城组泥岩略低, TOC 平均达 1.10% ,氢指数在 $120\sim800\text{ mg/g}$,成熟度(R_o) 与泥岩分布区间类似。从有机质的热演化程度来看,风城组源岩在斜坡区埋深相对较大,整体处于成熟-高成熟演化阶段。乌尔禾组源岩样品主要分布于斜坡区, TOC 大多处于 $0.5\%\sim1.0\%$,氢指数处于 $10\sim200$

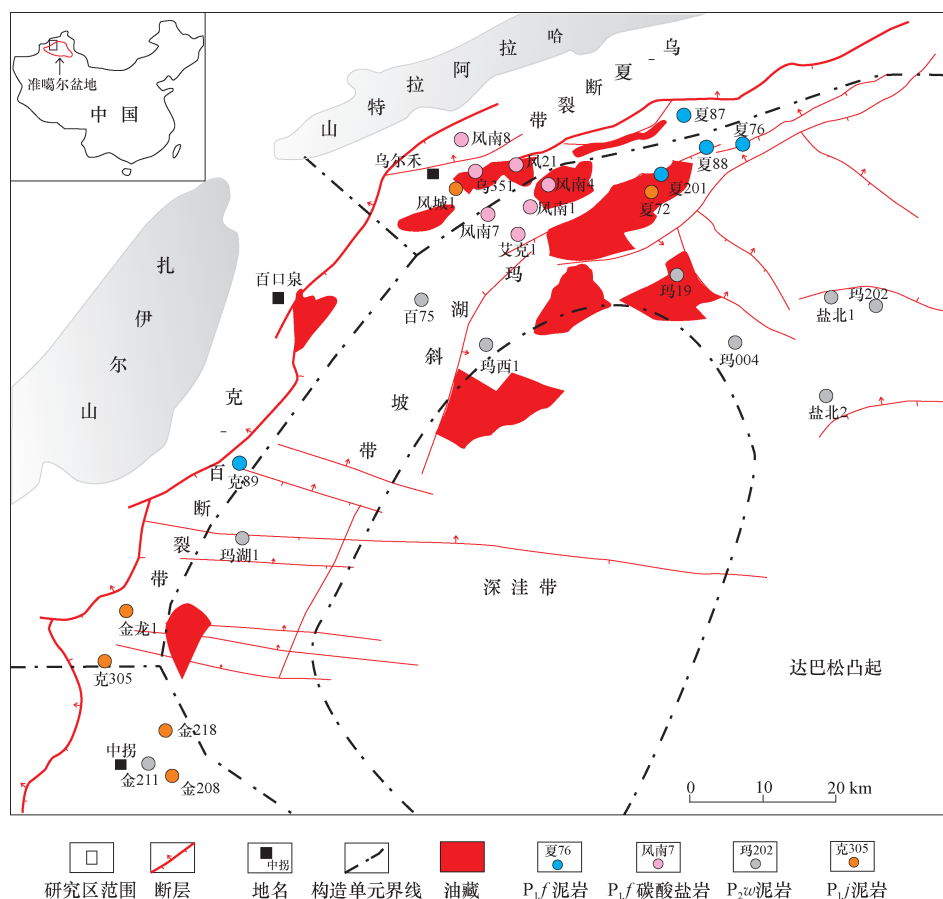


图1 玛湖凹陷构造分区及样品分布

Fig. 1 Structure division of the Mahu Depression and sample point distribution

mg/g,且成熟度相对较高, R_o 介于0.94%~1.45%,属于中等质量源岩,乌尔禾组沉积物在断裂带相对较粗,有效源岩不发育;佳木河组泥岩样品 TOC 和热解数据整体更差,演化程度处于高熟-过熟阶段,且佳木河组有效烃源岩分布相对局限,仅在风城1井及金218井钻遇较好泥岩,且属于较差烃源岩。

2 样品与分析方法

本次研究首先通过对过取心井段进行筛选,采集了玛湖凹陷新钻取岩心井中富有代表性的37块二叠系源岩样品,其中风城组(P_{1f})泥岩类和碳酸盐类各10块、下乌尔禾组(P_{2w})泥岩9块、佳木河组(P_{1j})泥岩8块,样品分布如图1所示。由于钻井深度及取心段的限制,样品主要分布在断裂带及斜坡区,其中风城组样品基本分布于风南、夏子街地区,处于低熟-成熟演化阶段;乌尔禾组样品主要分布在玛东、玛西地区,基本处于成熟-高成熟演化阶段,佳木河组样品基本在夏子街和中拐地区,演化阶段为高-过成熟阶段(表1)。首先对这些样品进行了 TOC 、热解分析,数据如

表1所示,并统一进行了索氏抽提,然后对饱和烃组分进行了色谱-质谱(GC-MS)分析,所有实验均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室和重质油国家重点实验室完成。镜下有机相观察在Leica DM 2500P显微镜上进行;所有饱和烃色质分析均在Agilent 7890-5975c色质仪上完成;除此之外选取了2块成熟度相对较低的风城组样品(夏76井泥岩MHN-27和风南7井泥质白云岩MHN-22)进行加水热模拟分析,实验在自行设计的高温高压密闭热模拟装置上完成,在进行热模拟之前所有样品均进行了48h抽提,排除了吸附烃类对新生成烃类的影响,将样品等分为4份,并分别进行4个温度点(310,330,350和370℃)的热模拟实验,具体方法及指标见高岗等(2004)^[22]。

3 结果与讨论

3.1 烃源岩三环萜分布样式

三环萜的前身生物生长于相对温和盐度的环境,三环己异戊烯醇可能是其先驱^[23],湖相咸水环境和海

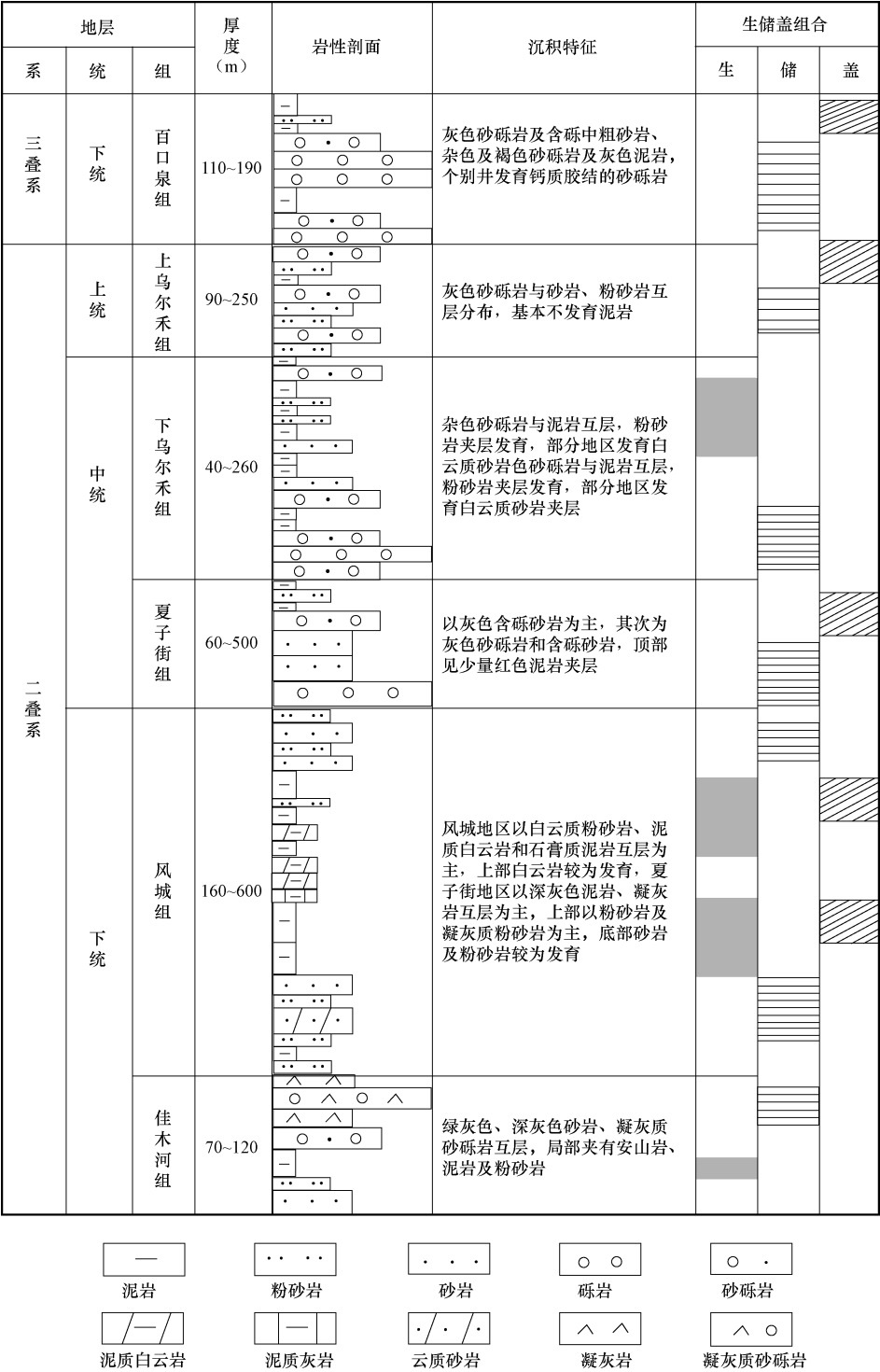


图 2 玛湖凹陷二叠系 - 三叠系综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Permian and Triassic in the Mahu Depression

相碳酸盐岩环境以高丰度的三环萜出现为特征,超盐和淡水环境对三环萜先驱有抑制作用。成熟度较高的原油及源岩中三环萜含量较高,可以作为油源对比的有效指标。有学者在研究四川盆地上二叠统龙潭组源岩三环萜(C_{20}, C_{21}, C_{23})分布时,认为其随温度增加低碳数萜烷逐渐增加,高碳数减少^[24];而塔里木塔中地

区大多数原油呈现出 $C_{20} > C_{21} < C_{23}$ 的“下凹型”分布样式^[25],而“下降型”分布的原油则具有较高的三环/五环萜比值,故认为 $C_{20} < C_{21} < C_{23}$ 随成熟度增加转变为“下凹型”,再转变为“下降型”。但三环萜分布样式也受到源岩相的影响,相类型的差异可能会造成三环萜不同的分布形式,如在研究中国西北柴达木盆地、塔

表 1 玛湖凹陷二叠系烃源岩基本地球化学数据

Table 1 Geochemical data of the Permian source rocks in the Mahu Depression

编号	样品号	井号	岩性	深度/m	层位	TOC/%	$S_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	S_2 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$R_o/\%$
1-1	MHN-3	玛 004	深灰色泥岩	3 591.51	P_2w	2.51	0.07	0.38	443	0.94
1-2	MHN-9	玛东 2	灰褐色泥岩	3 813.00	P_2w	3.09	0.01	0.56	444	1.25
1-3	MHN-10	盐北 1	灰黑色泥岩	4 010.50	P_2w	1.71	0.19	0.64	454	—
1-4	MHN-19	金 211	灰黑色泥岩	3 808.70	P_2w	0.96	0.03	0.30	447	—
1-5	MHN-13	盐北 2	深灰色粉砂质泥岩	4 467.00	P_2w	2.00	0.06	0.36	534	1.45
1-6	MHN-17	金 218	灰绿色泥岩	3 743.79	P_2w	0.28	0.04	0.72	447	1.02
1-7	MHN-30	玛西 1	灰黑色泥岩	3 849.20	P_2w	0.52	0.02	0.07	544	1.20
1-8	MHN-34	玛 202	粉砂质泥岩	3 794.50	P_2w	0.73	0.02	0.14	426	—
1-9	MHN-35	玛湖 1	黑褐色泥岩	3 965.53	P_2w	0.10	0.02	0.04	413	—
1-10	MHN-14	风城 1	炭质泥岩	5 457.50	P_{1j}	1.00	0.04	0.16	491	—
1-11	MHN-2	金 218	灰黑色凝灰岩	3 888.00	P_{1j}	1.87	8.18	8.21	433	1.98
1-12	MHN-11	夏 76	灰色凝灰质泥岩	4 041.50	P_{1j}	0.09	0.07	0.03	426	—
1-13	MHN-23	夏 76	凝灰岩	4 045.20	P_{1j}	0.07	0.04	0.11	448	2.21
1-14	MHN-4	夏 76	灰绿色凝灰质泥岩	4 040.00	P_{1j}	0.04	0.01	0.02	475	—
1-15	MHN-7	风南 1	凝灰质泥岩	4 508.60	P_{1j}	0.04	0.01	0.01	415	—
1-16	MHN-29	夏 72	灰绿色泥岩	5 244.56	P_{1j}	0.12	0.06	0.03	480	2.43
1-17	MHN-33	金龙 1	红褐色泥岩	3 957.50	P_{1j}	0.06	0.09	0.04	417	—
1-18	MHN-26	夏 88	灰黑色泥岩	3 670.50	P_{1f}	0.77	0.48	0.55	423	0.80
1-19	MHN-8	风南 8	灰黑色粉砂质泥岩	4 257.67	P_{1f}	2.22	0.42	15.47	438	—
1-20	MHN-20	夏 87	深灰色泥岩	4 154.35	P_{1f}	2.55	3.74	13.77	429	—
1-21	MHN-24	夏 76	粉砂质泥岩	3 455.50	P_{1f}	0.53	1.27	1.38	435	—
1-22	MHN-27	夏 76	泥岩	3 455.50	P_{1f}	2.73	3.42	21.87	437	0.76
1-23	MHN-15	夏 72	灰色粉砂质泥岩	4 569.70	P_{1f}	1.09	2.94	4.14	441	—
1-24	MHN-36	克 89	灰褐色泥岩	3 627.00	P_{1f}	0.54	0.06	0.28	420	0.89
1-25	MHN-32	夏 76	灰色粉砂质泥岩	3 454.10	P_{1f}	0.90	4.18	3.45	427	—
1-26	MHN-16	夏 201	深灰色泥质粉砂岩	4 719.80	P_{1f}	0.94	3.62	1.61	442	1.10
1-27	MHN-38	夏 40	深灰色沉凝灰岩	4 566.24	P_{1f}	1.43	1.46	3.64	443	—
1-28	MHN-1	风 21	白云质泥岩	3 372.40	P_{1f}	0.70	2.56	2.63	416	0.72
1-29	MHN-5	乌 351	白云质泥岩	3 316.20	P_{1f}	2.39	0.58	16.72	430	0.54
1-30	MHN-6	风南 1	白云质泥岩	4 096.50	P_{1f}	1.42	1.72	6.89	435	—
1-31	MHN-22	风南 7	泥质白云岩	4 590.78	P_{1f}	1.11	9.35	1.96	407	0.96
1-32	MHN-31	艾克 1	白云质泥岩	5 667.00	P_{1f}	0.43	0.62	0.87	447	1.45
1-33	MHN-38	风南 7	含凝灰白云质泥岩	4 237.80	P_{1f}	0.42	1.05	1.04	420	—
1-34	MHN-21	风南 7	灰色泥质白云岩	4 595.50	P_{1f}	0.91	3.79	1.18	401	—
1-35	MHN-25	风南 4	泥质白云岩	4 402.88	P_{1f}	1.13	2.35	3.97	435	1.14
1-36	MHN-12	风南 1	深灰色粉砂质泥岩	4 362.00	P_{1f}	0.92	0.84	3.49	432	—
1-37	MHN-37	风南 5	深灰色白云质泥岩	4 344.00	P_{1f}	0.98	0.23	2.01	417	—

注:TOC 为有机碳含量; S_1 为游离烃含量; S_2 为吸附烃含量; T_{max} 为热解峰温; R_o 为镜质体反射率。

里木盆地、鄂尔多斯盆地和吐哈盆地不同相类型的原油时,发现三环萜可分为两类,一类为 C_{23} 为主峰,一类以 C_{19} 、 C_{20} 和 C_{21} 为主峰,整体上陆源以 C_{19} 和 C_{20} 为主, C_{23} 主峰以咸化湖相和海相为主,并认为三环萜可以作为划分原油类型,研究原油相类型的工具^[26]。

通过对本区 3 套源岩样品抽提物饱和烃组分的色质图进行分析,发现本区不同源岩间生标谱图特征存在差异。其中,风城组样品在饱和烃分布(TIC)上具有典型的 Ph 明显高于 nC_{18} 烷的特征,其正构烷烃呈现以 C_{20} 为单峰的特征,且 $\text{Pr}/\text{Ph} < 1$,不同岩性源岩抽提物样品在萜烷($m/z191$)上显示出 C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷逐渐上升的特征,其五环萜系列比三环萜含量随成

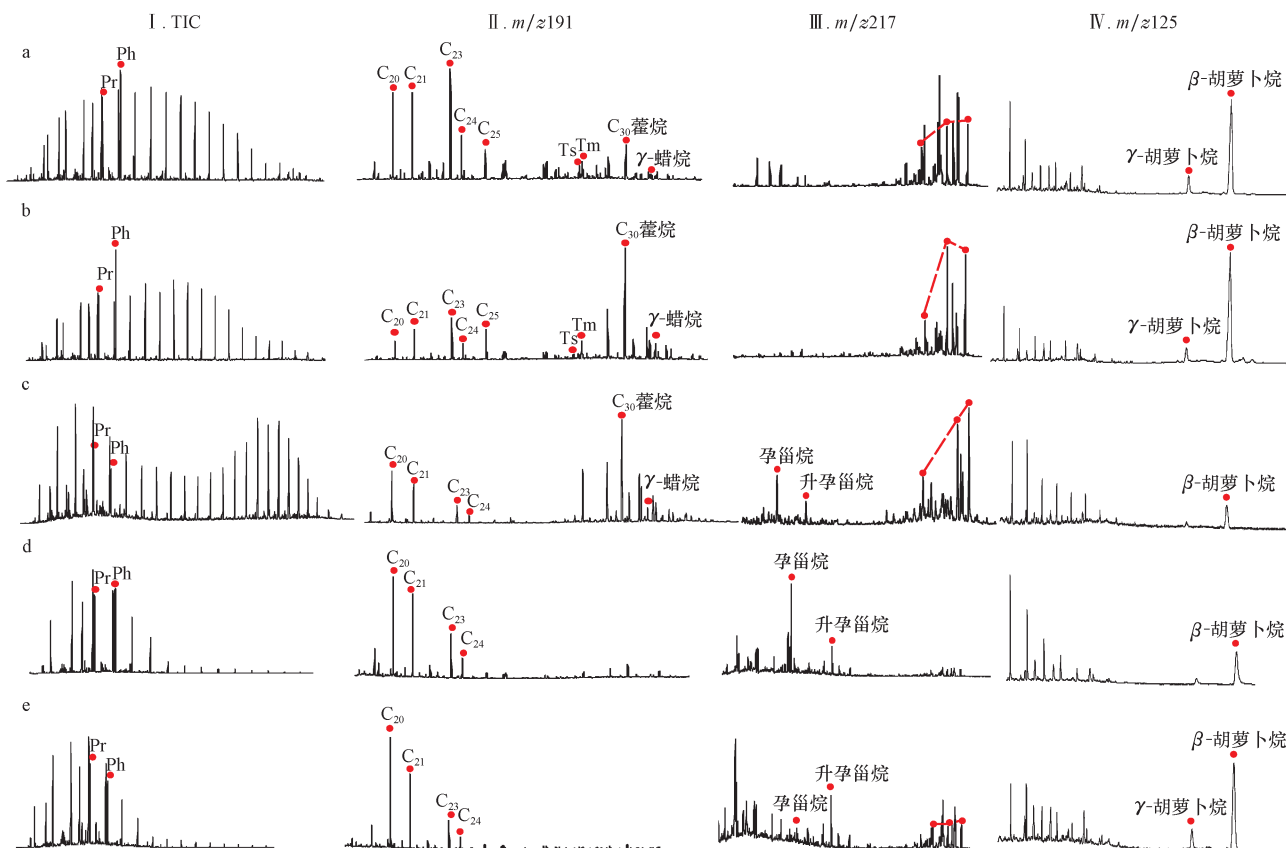


图3 玛湖凹陷二叠系烃源岩抽提物饱和烃典型色谱-质谱

Fig. 3 Typical GC-MS graphs of saturates in extracts of the Permian source rocks in the Mahu Depression

a. 风南7井,埋深4 595.5 m, P_{1f} ,灰色泥质白云岩;b. 夏76井,埋深3 455.4 m, P_{1f} ,灰色粉砂质泥岩;c. 艾参1井,埋深4 403.7 m, P_{2w} ,黑灰色泥岩;d. 盐北2井,埋深4 467 m, P_{2w} ,深灰色粉砂质泥岩;e. 夏72井,埋深5 244.56 m, P_{1j} ,黑褐色泥岩

熟度有所变化,胡萝卜烷系列含量较高;对比碳酸盐岩和纯泥岩类样品,发现泥质岩类中 C_{24} , C_{25} 三环萜相对 C_{23} 含量较高,碳酸盐岩则具有 C_{24} , C_{25} 含量较低的特征(图3a,b),风城组典型特征为 Ph 比 nC_{18} 高, β -胡萝卜烷含量高,且三环萜表现出典型的“上升型”特征,碳酸盐类与泥岩类的典型差异主要在三环萜内 C_{24} , C_{25} 三环萜的相对含量上,其中泥质岩类表现出 C_{24} , C_{25} 三环萜相对含量较高的特征,碳酸盐类则相对较低,且分析的所有样品均符合此特征,这种 C_{23} 三环萜为主要高峰的特征可能与沉积环境及母质类型中藻类物质较多有关,由于成熟度对甾烷分布影响较大,且本地区整体成熟度偏高,甾烷参数(m/z 217)对本区类型划分作用相对较小;乌尔禾组源岩样品 Pr, Ph 均低于正构烷烃系列,其三环萜(C_{20} , C_{21} , C_{23})呈“下降型”分布的特征(图3c,d),不同成熟度源岩均表现出相对一致的分布特征,其中艾参1井样品成熟度相对较低,盐北2井样品孕甾烷系列含量高,胆甾烷系列则较低,三环萜系列整体较高,五环萜系列含量较低,另外艾参1井样品 TIC 图上呈现双峰分布,显示这种 C_{20} 三环

萜呈主要高峰的特征可能与外来陆源碎屑影响较多有关;此外,个别样品呈现出三环萜含量较低,其 C_{20} , C_{21} , C_{23} 三环萜呈“山峰型”分布的特征,经过分析认为其主要是受外来运移烃类影响所致,与源岩本身性质关系不大;佳木河组源岩整体成熟度较高,其三环萜也呈现出“下降型”分布特征,但由于样品整体演化程度较高,其可能受到母源和成熟度的影响。综上所述,本区二叠系3套4类源岩中,由于埋深较大、成熟度整体较高,三环萜分布特征区分作用较为明显,可以作为区分不同源岩的代表性特征,不同的三环萜分布构型可能受到沉积环境、母源、成熟度或生排烃等作用的影响^[27]。

3.2 分布样式的影响因素

3.2.1 母质类型与沉积环境的影响

母质类型的差异会造成不同源岩中生标参数的变化,高三环萜含量可能是某种藻类富集的结果^[28]。前人通过对热解产物的研究分析,认为 *Tasmanite* 藻和

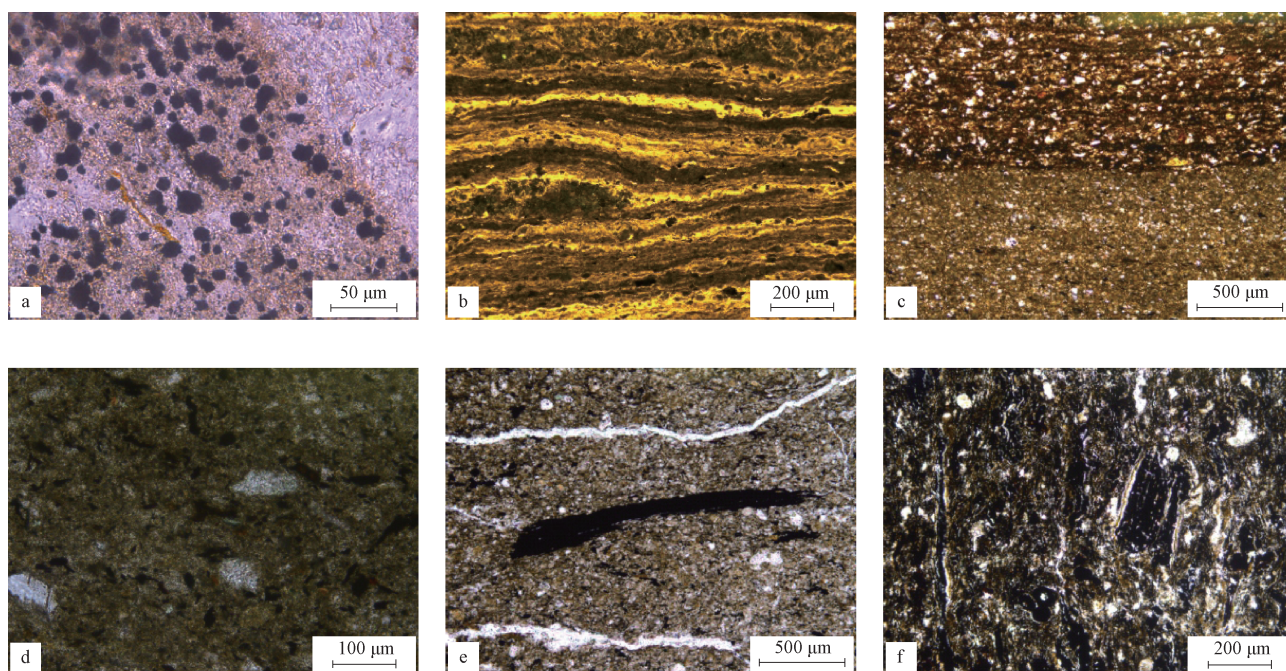


图4 玛湖凹陷二叠系烃源岩镜下照片

Fig. 4 Microscopic photographs of the Permian source rocks in the Mahu Depression

a. 内源藻类体, 风南1井, 埋深4 096.5 m, P_1f , 泥质白云岩, 单偏光; b. 层状有机质与白云石互层, 风南8井, 埋深3 595 m, P_1f , 泥质白云岩, 反射荧光; c. 有机质纹层, 夏87井, 埋深4 154.35 m, P_1f , 深灰色泥岩, 单偏光; d. 陆源无定形有机质与镜质体碎屑, 玛西1井, 埋深3 849.2 m, P_2w , 单偏光; e. 陆源碎屑, 盐北2井, 埋深4 467 m, P_2w , 灰色粉砂质泥岩, 单偏光; f. 碳化有机质, 风城1井, 埋深5 547.5 m, P_1j , 炭质泥岩, 单偏光

Leiosphaerdi 藻都可能是形成高丰度三环萜烷的先驱母质, 三环萜生源藻类可能较多^[29], 因此需对本区源岩样品进行镜下有机相观察。

通过镜下有机相观察及对生标参数进行分析, 本区不同烃源岩间母质类型上存在一定差异, 其中风城组(P_1f)碳酸盐类中有机质在单偏光下观察可见散乱分布的圆形、椭圆形藻类体及无定形有机质(图4a), 在反射荧光条件下白云石呈灰黑色与亮黄色有机质呈互层分布(图4b), 显示出风城组碳酸盐类烃源岩中有机质含量较高, 这些圆形、椭圆形菌藻类有机质是碳酸盐烃源岩干酪根的主要存在形式, 外源有机质较少; 而泥质岩类源岩则呈现出有机质纹层与细粒碎屑沉积水平互层的特征(图4c), 显示出原地静水沉积的特点^[30]。而乌尔禾组(P_2w)烃源岩则显示出陆源输入较多的特点, 镜下观察显示其源岩以内源无定形有机质与镜质体杂乱分布(图4d), 整体以碎屑沉积为主, 偶见白云石胶结, 镜下可见较大的陆源碎屑颗粒(图4e)。佳木河组烃源岩(P_1j)镜下观察可见碳化较严重(图4f), 有机碎屑呈现紧密压实扭曲呈现出高-过成熟的演化阶段。综上所述, 本区镜下观察发现风城组有机质以内源藻类为主, 这可能是形成三环萜呈“上升型”分布的因素之一; 乌尔禾组有机质受外来碎屑影响较大的特点, 这可能是其形成三环萜“下降型”分布的

因素之一。佳木河组镜下观察也以陆源碳屑为主, 但由于演化程度较高, 改变了部分原生形态结构, 给生源判定造成了一定困难。

萜烷分布指示了沉积环境的变化, 也记录了湖盆的地球化学演化^[31]。Kruge等(1990)研究发现黑色页岩和孔隙充填沥青中 C_{21} 和 C_{23} 含量相当, 而在灰色含粉砂泥岩抽提物(干酪根代表本层)中则 C_{23} 占优势, 认为主要是沉积环境变化的结果^[10]。通过选取典型地球化学参数, 对本区各套源岩的沉积环境及母质来源进行分析, $Ts/(Ts + Tm)$ 可以指示碳酸盐岩与泥岩相的差异, γ -蜡烷指数的高低主要反映沉积水体的咸化水平, 从图5a中可以看出, 风城组泥质岩类和乌尔禾组泥岩表现出以湖相泥岩为主的沉积特征, 风城组在局部地区发育了蒸发相的碳酸盐岩沉积, 佳木河组显示出盐度较高的特征(对应高伽马蜡烷指数); 此外, C_{19}/C_{23} 三环萜可以反映陆源有机质与本地有机质含量的差异, C_{24} 四环萜含量高低可以反映水体蒸发条件(图5b), 从散点图上可以看出风城组母质来源以内源有机质本地沉积为主, 乌尔禾组泥岩及佳木河组泥岩母质来源中外源有机质输入较多, 且风城组沉积期水体处于一定的蒸发环境下; 利用 Pr 和 Ph 参数可以反映水体氧化还原条件和成熟度的变化, 从图5c中可以看出乌尔禾组及佳木河组泥岩样品成熟度较高, 风城

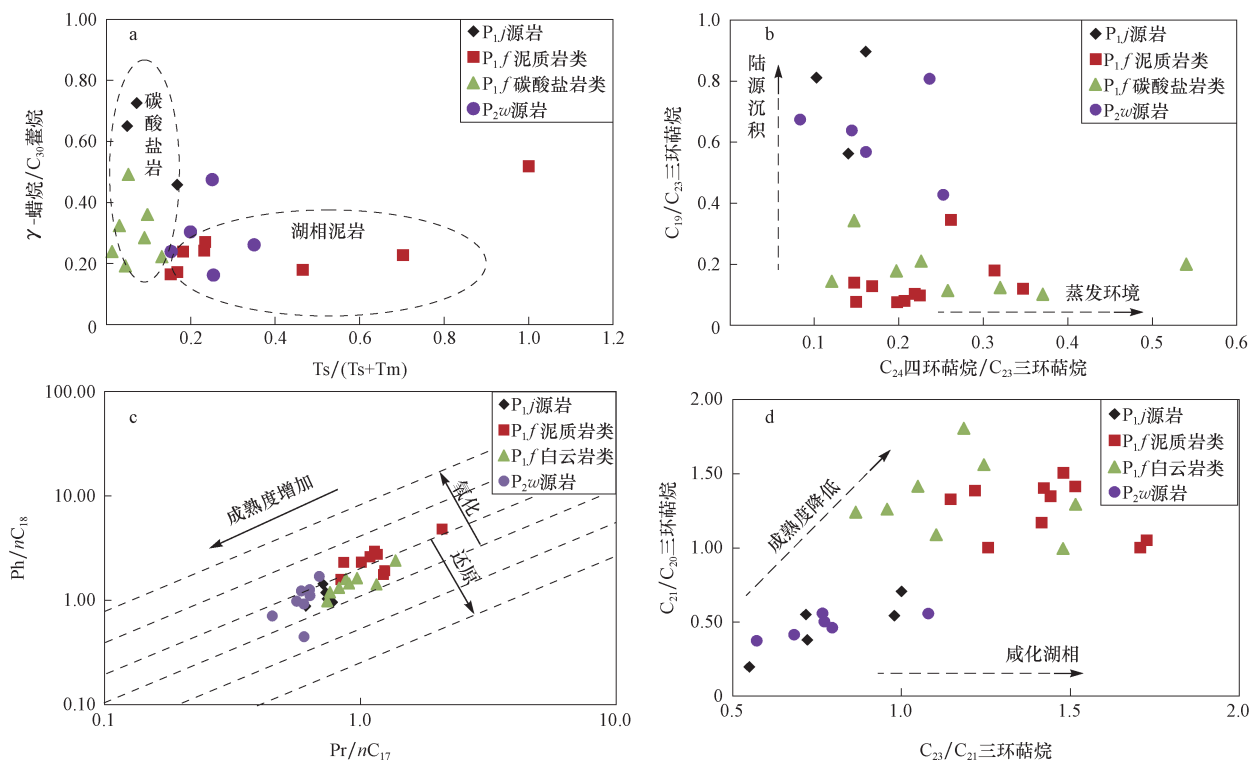


图5 玛湖凹陷二叠系源岩生物标志物参数散点图

Fig. 5 Scatter diagrams of biomarker parameters of the Permian source rocks in the Mahu Depression

- a. $Ts/(Ts+Tm)$ 与 γ -蜡烷指数交汇图指示源岩相类型; b. 四环、三环萜烷比值交汇图指示物源和沉积环境;
c. 姥鲛烷和植烷指数交汇图指示成熟度及沉积环境; d. 三环萜烷比值交汇图指示源岩相类型

组样品成熟度相对较低, 风城组白云岩类沉积水体环境与泥岩相比还原性较强, 而乌尔禾及佳木河组泥岩成熟度较高, 生标参数可能受成熟度影响较大; 三环萜对于区分本区各套源岩特征具有明显指示作用, 其中 C_{23}/C_{21} 三环萜可以反映水体咸化程度的差异, 通常水体越咸化 C_{23} 三环萜越富集, 通过图 5d 可以看出风城组沉积期水体咸化程度较高, 而乌尔禾期及佳木河期水体环境以淡水为主。综合以上生标散点图的分析结果, 基本印证了前部分源岩镜下观察的结论, 即风城组烃源岩 C_{23} 三环萜为高峰, 形成 C_{20} , C_{21} , C_{23} 呈“上升型”分布的原因为以藻类等本地物源输入为主及相对还原、咸化的湖水沉积环境造成的结果, 而乌尔禾组及佳木河组烃源岩 C_{21} 三环萜为高峰, 形成 C_{20} , C_{21} , C_{23} 呈“下降型”分布的原因为沉积期物源有较多外来陆源碎屑镜质体及惰质体沉积, 其水体环境也为相对淡水的弱还原环境, 保存条件相对较差, 这说明各套源岩母质类型和沉积环境存在的差异是造成三环萜分布样式差异的主要内因。

3.2.2 成熟度差异的影响

成熟度差异也可以对三环萜的分布造成影响, 成

熟度越高, 三环萜的含量越大。但对于 C_{20} , C_{21} 及 C_{23} 三环萜来说, 其碳数接近, 其如何分布可能更多受控于母质来源等原生条件的差异。Tuo 等 (1999) 在研究泌阳凹陷核桃园组源岩时深部样品的 3 个生标呈现“上升型”, 而较浅部位则呈现出“下凹型”的分布样式, 更

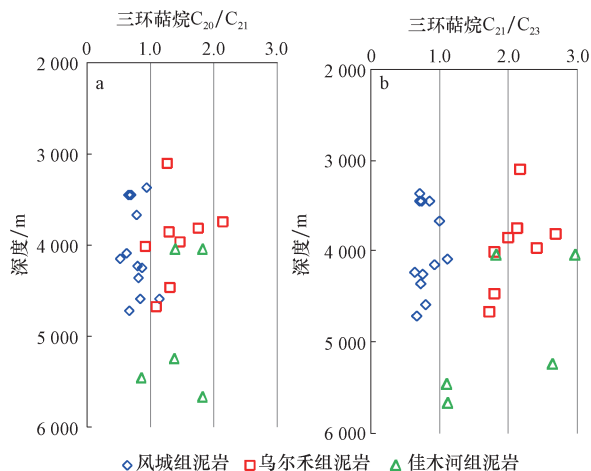


图6 玛湖凹陷二叠系源岩样品三环萜比值随深度变化
Fig. 6 Tricyclic terpanes ratios vs. depth of the Permian source rocks in the Mahu Depression

- a. 三环萜 C_{20}/C_{21} 随深度变化; b. 三环萜 C_{21}/C_{23} 随深度变化

浅部位呈现出“下降型”的分布特征,并未表现为深部位轻碳数 C_{20} 、 C_{21} 富集的特征,这说明三环萜的分布并不是主要受成熟度的控制^[32]。随深度的增加,三环萜异构体含量明显降低($\alpha\alpha > \beta\alpha$),随成熟度增加逐渐转变为稳定的 $\beta\alpha$ 构型,但各三环萜分布形式并未发生太大变化^[33]。

根据地质样品在深度剖面上的分布(图6)可以看出风城组样品 C_{20}/C_{21} 基本小于1, C_{21}/C_{23} 也小于1,三环萜呈典型“上升型”分布,且深度范围介于3 000 ~ 5 000 m,而乌尔禾组泥岩样品和佳木河组泥岩样品 C_{20}/C_{21} 和 C_{21}/C_{23} 比值基本大于1,三环萜呈“下降型”分布,深度范围介于3 000 ~ 6 000 m。由于大型

坳陷型盆地源岩纵向埋深相对稳定,且随深度的增加三环萜(C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23})系列的分布并未发生明显变化,成熟作用会造成三环萜含量相对于五环萜的整体增加,但对于三环萜中各个系列的含量并未造成明显变化,乌尔禾组泥岩与风城组埋深相当,但普遍呈现三环萜“下降型”的分布形式,说明成熟度对三环萜的分布形式影响较小,但会造成三环萜含量的整体增加。

热模拟实验可以研究源岩成熟过程中,烃类生标中各组分的变化情况。Wang 等(2012)利用热模拟实验分析了褐煤在高温高压下热解产物的三环萜变化,褐煤为在弱氧化条件下沉积的陆源有机质,在热演化

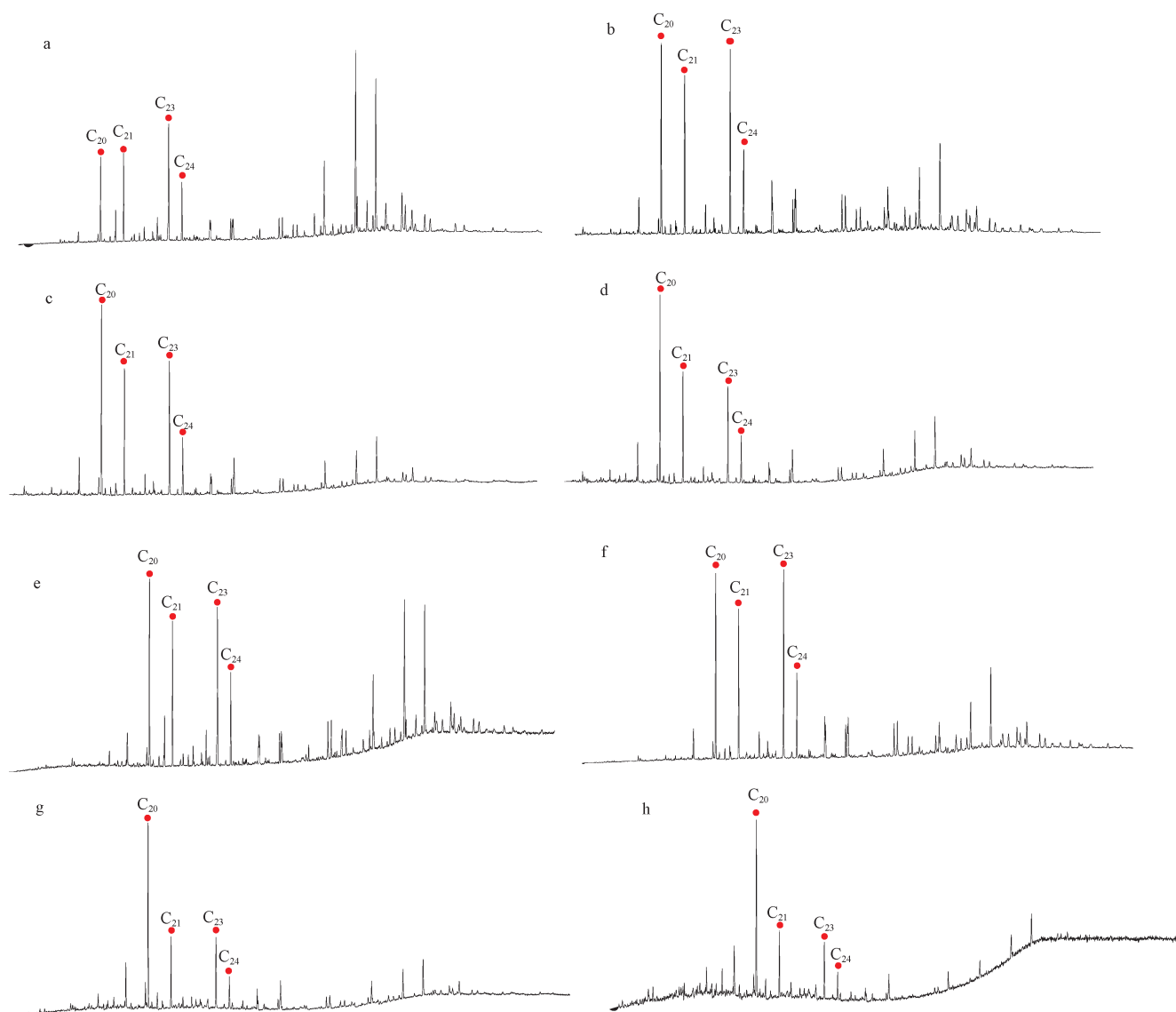


图7 玛湖凹陷风南7井 P_{1f} 泥质白云岩(埋深4 595.5 m)加水热模拟多温度点三环萜谱图(m/z 191)

Fig. 7 Tricyclic Terpanes graphs(m/z 191) with multi-temperature points from hydrous thermal simulation of P_{1f} shaly dolomite of Well Fengnan 7 in the Mahu Depression

a—d. 在310,330,350,370 °C条件下热模拟生油样品点;e—h. 在310,330,350,370 °C条件下热模拟残渣收集沥青

条件下,三环萜与藿烷比值随温度升高而增加,三环萜的分布样式在 500 °C 前并无明显变化^[34]。以风城组风南 7 井 P₁f 泥质白云岩样品为例(图 7),在 310 °C 生成烃类及残渣抽提物的三环萜分布特征与未模拟前抽提物特征类似,在 330 °C 时,三环萜中 C₂₁ 不断增加、C₂₃ 不断降低,五环萜烷系列含量也不断下降,在 350 °C 时三环萜 C₂₀, C₂₁, C₂₃ 呈现出“下降型”的分布特征,370 °C 时也呈现“下降型”的分布特征,基线出现轻微漂移。在地质历史演化过程中,不同于热模拟实验的高温短时间演化,有机质演化属于低温长时间的演化生烃过程,在此过程中相对低温环境的产物可能更接近地质历史过程真实产物,因此,310 °C 的烃类产物与残留沥青说明风城组碳酸盐岩具有三环萜呈“上升型”的特征,过高的温度导致长链五环萜或高碳数三环萜的断裂,短链三环萜 C₂₀ 不断增加,形成三环萜分布呈“下降型”的特征,与实际地质情况存在差异。

3.2.3 排烃作用对分布样式的影响

与无水封闭黄金管和开放系统下的岩石热解(Rock – Eval)不同,加水热模拟产出的油在成分上

与天然石油最为接近,且对排烃过程也相对合理,所以加水热模拟为排烃效率和岩石性质的研究确定提供了一种方法^[35]。传统上认为三环萜系列与五环萜系列化合物含量的比值可以作为衡量成熟度的指标(可以衡量到将近 1% 的 R_o)。在热模拟实验中随温度的升高三环萜含量稳步增加^[36],但通过对比热模拟生成油(即排出烃)与热模拟残渣抽提物(即残留烃)的差异,可以认识生排烃作用对三环萜分布的影响。两组实验结果较为相似,以风南 7 井 P₁f 泥质白云岩为例进行说明(图 7),在 310 °C 和 330 °C 模拟生油与残留烃产物上可以看出三环萜分布样式并无明显变化,排出烃中三环萜相对于五环萜含量较低但差异不明显,五环萜中 Ts, Tm 及 C₂₉ 藿烷等在排出烃和残留烃中有一定变化,在更高温度(350 °C 和 370 °C)下排出烃类显示出三环萜下降型的分布特征,残留烃也呈“下降型”,但 C₂₀ 含量更高, C₂₁ 和 C₂₃ 含量较低,五环萜则变化更加明显,甚至出现 UCM (Unresolved Complex Mixture) 鼓包^[37],说明生排烃对重组分萜烷的分布影响更为明显。以上实验说明,排烃作用对相对短链的三环萜分布影响较小,排烃作用主要对正构组分和在甾、藿烷中

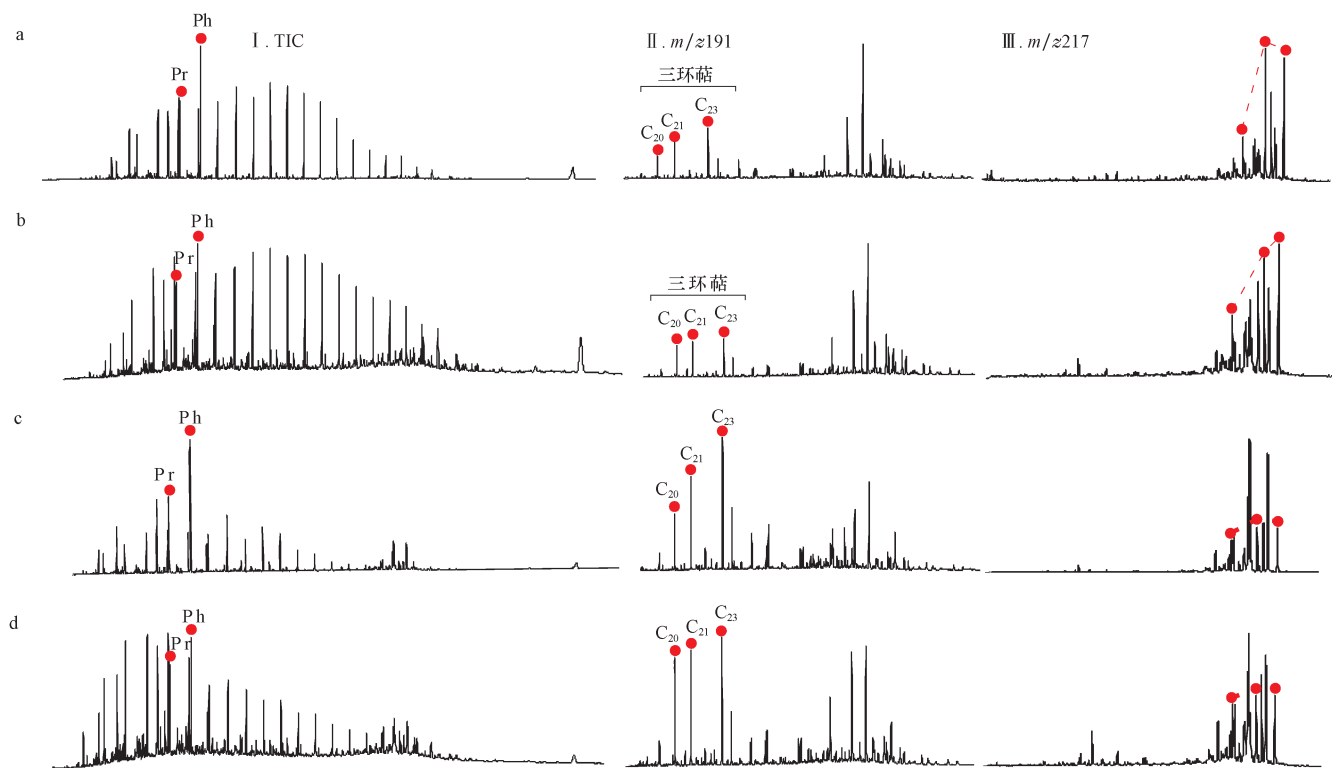


图 8 玛湖凹陷二叠系风城组不同岩性烃源岩热模拟生、排烃谱图特征

Fig. 8 GC-MS graphs of hydrocarbons generation and expulsion from thermal simulation of source rocks with different lithologies in the Fengcheng Formation in the Mahu Depression

a, b. 风南 1 井, P₁f, 埋深 4 096.5 m, 白云质泥岩, a 为原始抽提物特征, b 为 310 °C 排出油特征;
c, d. 夏 201 井, P₁f, 埋深 4 719.8 m, 粉砂质泥岩, c 为原始抽提物特征, d 为 310 °C 排出油特征

分子量较大的组分分布样式有一定影响,在310℃条件下我们又进行了不同组不同岩性源岩4组热模拟实验,其结果都显示排出烃和残留烃在三环萜的分布上不存在明显差异。如图8所示,以风南8井及夏201井风城组泥岩样品为例,在较低模拟温度下(310℃),排出油生标谱图特征与原始残留沥青特征相似,三环萜分布的样式并未发生显著改变,对五环萜及甾烷分布样式存在一定影响^[38-39],造成部分在甾烷样式的变化,而低温长时间演化更加符合地质历史时期生油岩演化规律^[40],排出油特征更具代表性,因此,初次排烃运移对三环萜分布的影响相对较小。

4 结论

1) 通过分析玛湖凹陷二叠系烃源岩分子地球化学资料,认为二叠系三套源岩中三环萜烷化合物相对富集,且在三环萜的分布样式上存在明显的差异,其中主力风城组源岩丰度高、类型好、生烃潜力最高,C₂₀,C₂₁,C₂₃三环萜呈明显的“上升型”分布特征,泥质岩类烃源岩与碳酸盐类相比C₂₄,C₂₅三环萜含量较高;乌尔禾组源岩属于中等到好烃源岩,三环萜主要呈“下降型”分布特征,佳木河组源岩生油能力相对较差,源岩分布较为局限,样品演化程度较高,三环萜烷分布特征变化较大。

2) 本区不同烃源岩之间三环萜烷的分布形式主要受控于沉积环境及母质类型的差异,风城组主要来源于本地沉积的藻类及细菌,其中风城组碳酸盐岩沉积属于蒸发、还原的咸化湖相沉积,风城组泥岩类属于较还原的深湖相沉积,水体盐度分层不显著,乌尔禾组及佳木河组源岩外来有机质含量较多,沉积环境属于淡水弱还原环境;成熟度会造成三环萜烷整体含量的增加,但对三环萜的分布样式影响相对较小,当成熟度过高时会造成三环萜烷中短链、轻组分的增加;排烃作用对三环萜的分布样式影响相对较小,对五环萜及甾烷等较重的组分存在一定影响。

参 考 文 献

- [1] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Identification of an extended series of tricyclic terpanes in petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(8): 1531-1534.
- [2] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [3] Zumberge J E. Prediction of source rock characteristics based on terpane biomarkers in crude oils: A multivariate statistical approach[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(6): 1625-1637.
- [4] Dutta S, Greenwood P F, Brocke R, et al. New insights into the relationship between Tasmanites and tricyclic terpenoids[J]. *Organic geochemistry*, 2006, 37(1): 117-127.
- [5] Simoneit B R T, Leif R N, Radler de Aquino Neto F, et al. On the presence of tricyclic terpane hydrocarbons in Permian tasmanite algae[J]. *Naturwissenschaften*, 1990, 77(8): 380-383.
- [6] Zumberge J E. Terpenoid biomarker distributions in low maturity crude oils[J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(6): 479-496.
- [7] De Grande S M B, Neto F R A, Mello M R. Extended tricyclic terpanes in sediments and petroleum[J]. *Organic geochemistry*, 1993, 20(7): 1039-1047.
- [8] Palacas J G, Anders D E, King J D. South Florida basin-a prime example of carbonate source rocks of petroleum[C]//Palacas J G, ed. *Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate source rocks*, AAPG Studies in Geology, 1984, 8: 71-96.
- [9] Neto F R A, Cardoso J N, Rodrigues R, et al. Evolution of tricyclic alkanes in the Espirito Santo Basin, Brazil[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(9): 2069-2072.
- [10] Kruege M A, Hubert J F, Akes R J, et al. Biological markers in Lower Jurassic synrift lacustrine black shales, Hartford basin, Connecticut, USA[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(3): 281-289.
- [11] Revell A T, Volkman J K, O'leary T, et al. Hydrocarbon biomarkers, thermal maturity, and depositional setting of tasmanite oil shales from Tasmania, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(18): 3803-3822.
- [12] Samuel O J, Kildahl-Andersen G, Nytoft H P, et al. Novel tricyclic and tetracyclic terpanes in Tertiary deltaic oils: structural identification, origin and application to petroleum correlation[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(12): 1326-1337.
- [13] Farrimond P, Bevan J C, Bishop A N. Tricyclic terpane maturity parameters: response to heating by an igneous intrusion[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(8): 1011-1019.
- [14] 王绪龙, 康素芳. 准噶尔盆地腹部及西北缘斜坡区原油成因分析[J]. *新疆石油地质*, 1999, 20(2): 108-112.
Wang Xulong, Kang Sufang. Analysis of crude origin in Hinterland and slope of northwest margin, Junggar basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(2): 108-112.
- [15] 王绪龙, 康素芳. 准噶尔盆地西北缘玛北油田油源分析[J]. *西南石油学院学报*, 2001, 23(6): 6-8.
Wang Xulong, Kang Sufang. On the oil source of the Mabei oilfield, northwest Junggar basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2001, 23(6): 6-8.
- [16] Xiang B, Zhou N, Ma W, et al. Multiple-stage migration and accumulation of Permian lacustrine mixed oils in the central Junggar Basin (NW China)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 187-201.
- [17] 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 Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, 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.
- [18] 雷德文, 阿布力, 唐勇, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组油气高

- 产区控制因素与分布预测[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 495–499.
- Lei Dewen, Abulimiti, Tang Yong, et al. Controlling factors and occurrence prediction of high oil-gas production zones in Lower Triassic Baikouquan formation of Mahu sag in Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 495–499.
- [19] 陈石, 郭召杰, 漆家福, 等. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 322–331.
- Chen Shi, Guo Zhaojie, Qi Jiafu, et al. Three-stage strike-slip fault systems at northwestern margin of Junggar Basin and their implications for hydrocarbon exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 322–331.
- [20] 张国印, 王志章, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地乌夏地区风城组云质岩致密油特征及“甜点”预测[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 219–229.
- Zhang Guoyin, Wang Zhizhang, Guo Xuguang, et al. Characteristics and ‘sweet spot’ prediction of dolomitic tight oil reservoirs of the Fengcheng Formation in Wuxia area, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 219–229.
- [21] 张顺存, 邹妞妞, 史基安, 等. 准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 640–650.
- Zhang Shuncun, Zou Niuniu, Shi Ji'an, et al. Depositional model of the Triassic Baikouquan Formation in Mabei area of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 640–650.
- [22] 高岗, 姜振学, 赵喆, 等. 加水模拟条件下升温速率对烃源岩成烃特征的影响[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 461–464.
- Gao Gang, Jiang Zhenxue, Zhao Zhe, et al. Influence of temperature increase velocity to the hydrocarbon formation of source rock by hydrolysis[J]. Natural Gas Geosciences, 2004, 15(5): 461–464.
- [23] Greenwood P F, Arouri K R, George S C. Tricyclic terpenoid composition of Tasmanites kerogen as determined by pyrolysis GC-MS[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(7): 1249–1263.
- [24] Jin X, Pan C, Yu S, et al. Organic geochemistry of marine source rocks and pyrobitumen-containing reservoir rocks of the Sichuan Basin and neighbouring areas, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 147–165.
- [25] Yu S, Pan C, Wang J, et al. Molecular correlation of crude oils and oil components from reservoir rocks in the Tazhong and Tabei uplifts of the Tarim Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(10): 1241–1262.
- [26] Tao S, Wang C, Du J, et al. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 460–467.
- [27] 田春桃, 马素萍, 杨燕, 等. 湖相与海相碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 336–341.
- Tian Chuntao, Ma Suping, Yang Yan, et al. Comparison of hydrocarbon generation conditions between lacustrine and marine carbonate source rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 336–341.
- [28] Philp R P, Gilbert T D. Biomarker distributions in Australian oils predominantly derived from terrigenous source material[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1): 73–84.
- [29] Neto F R A, Restle A, Connan J, et al. Novel tricyclic terpanes (C_{19} , C_{20}) in sediments and petroleum[J]. Tetrahedron Letters, 1982, 23(19): 2027–2030.
- [30] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 685–695.
- Hu Guang, Liu Wenhui, Tengger, et al. Tectonic-sedimentary constraints for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 685–695.
- [31] Fu J, Sheng G. Biological marker composition of typical source rocks and related crude oils of terrestrial origin in The People's Republic of China: a review[J]. Applied Geochemistry, 1989, 4(1): 13–22.
- [32] Tuo J, Wang X, Chen J. Distribution and evolution of tricyclic terpanes in lacustrine carbonates[J]. Organic geochemistry, 1999, 30(11): 1429–1435.
- [33] Chicarelli M I, Neto F R A, Albrecht P. Occurrence of four stereoisomeric tricyclic terpane series in immature Brazilian shales[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(8): 1955–1959.
- [34] Wang C, Du J, Wang W, et al. Distribution and isomerization of terpanes in pyrolyzates of lignite at high pressures and temperatures[J]. Journal of Petroleum Geology, 2012, 35(4): 377–387.
- [35] Lewan M D, Dolan M P, Curtis J B. Effects of smectite on the oil-expulsion efficiency of the Kreyenhagen Shale, San Joaquin Basin, California, based on hydrous-pyrolysis experiments[J]. AAPG bulletin, 2014, 98(6): 1091–1109.
- [36] Van Graas G W. Biomarker maturity parameters for high maturities: calibration of the working range up to the oil/condensate threshold[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(4): 1025–1032.
- [37] Frysinger G S, Gaines R B, Xu L, et al. Resolving the unresolved complex mixture in petroleum-contaminated sediments[J]. Environmental science & technology, 2003, 37(8): 1653–1662.
- [38] 钱志浩, 曹寅. 新疆塔里木盆地北部原油运移地球化学效应[J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 186–190.
- Qian Zhihao, Cao Yin. Geochemical effects of crude oil migration in the north Tarim Basin, Xinjiang[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(2): 186–190.
- [39] Song D, He D, Qi X, et al. Occurrence and composition of solid bitumens from the Bulonggoer Devonian paleo-oil reservoir, North Xinjiang, China[J]. Organic Geochemistry, 2015, 83: 1–15.
- [40] 周勇水, 邱楠生, 宋鑫颖, 等. 准噶尔盆地腹部超压地层烃源岩热演化史研究[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 812–822.
- Zhou Yongshui, Qiu Nansheng, Song Xinying, et al. Study of source rock thermal evolution in overpressure formations in the hinterland of Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 812–822.

(编辑 张亚雄)