

引用格式:陈璇琦,陈践发,师肖飞,等.2026.准噶尔盆地中部地区混源原油正构烷烃氢同位素特征及地质意义[J].沉积学报,44(2):750-769.

CHEN XuanYu, CHEN JianFa, SHI XiaoFei, et al. 2026. Molecular Isotope ($\delta^2\text{H}$) Composition Traits and Geological Significance of Petroleum *n*-alkanes in Junggar Basin Hinterland, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 750-769.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.020

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.020

准噶尔盆地中部地区混源原油正构烷烃氢同位素特征及地质意义

陈璇琦¹, 陈践发¹, 师肖飞², 王梓巨¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心上海实验中心, 上海 200941

摘要 【目的】准噶尔盆地中部地区地质条件多变, 原油性质复杂, 为了解决该地区原油类型划分和油气来源问题, 对准中混源油进行原油正构烷烃氢同位素组成($\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$)研究。【方法】应用GC-MS、GC-IRMS、GC-TC-IRMS技术, 对来自不同层位的27个原油饱和烃进行了生物标志化合物分析和正构烷烃单体氢同位素测试。【结果】将准中地区原油划分出三种类型: I类原油来自下侏罗统八道湾组(J_1b)煤系烃源岩, 由于有大量陆源高等植物有机质输入, 其氢同位素最轻; II类原油主要来自下二叠统风城组(P_2f)烃源岩, 其中II_A原油来自海陆过渡环境的潟湖相沉积, Ga/C₃₀H低, 氢同位素较重, II_B原油正构烷烃氢同位素较轻, Ga/C₃₀H比值较高; III类原油主要来自中二叠统下乌尔禾组(P_2w)烃源岩, 正构烷烃氢同位素轻。【结论】将正构烷烃氢同位素与生物标志化合物手段相结合, 可以精细划分原油类型, 明确其来源, 对整个准噶尔盆地油气勘探起到追踪油源并进行原油分类的作用。

关键词 准噶尔盆地中部; 正构烷烃氢同位素; 生物标志化合物; 混源原油分类; 氢同位素影响因素

第一作者 陈璇琦, 男, 1994年出生, 博士研究生, 油气地球化学, E-mail: chenxuanyu1126@outlook.com

通信作者 陈践发, 男, 教授, E-mail: jfchen@cup.edu.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550(2026)02-0750-20

0 引言

氢是有机质中的重要组成部分, 氢有较大的同位素分馏效应, 会导致不同地质条件下氢同位素分布特征差异较大。Dawson *et al.* (2004)、Sessions (2016)研究认为正构烷烃氢同位素组成特征受环境、生物等因素综合控制, 尤其是对于沉积环境的变化最为敏感。因此, Duan (2000)、Duan and Ma (2001)、Vinnichenko *et al.* (2021)认为通过正构烷烃氢同位素分析可以判定有机质来源, 揭示古沉积环境的变化。原油正构烷烃单体氢同位素组成主要受沉积环境影响, 不同来源的原油氢同位素特征分布不同。一般来说, 陆相原油单体氢同位素组成大约在-200‰~-120‰, 而海相原油单体氢同位素组成大约在-160‰~-50‰, 明显比陆相有机质更加富氘(Li

et al., 2001; Schimmelmann *et al.*, 2004)。此外还受有机质母质类型影响, 藻类等海洋低等生物 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 较重, 陆源高等植物 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 较轻。 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 受原油成熟度影响, 热演化程度增加 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 逐渐偏重, 但是在一些高成熟度的原油中需要结合实际地质背景讨论, 像在混源油中不同成熟度混合的原油 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 会存在较大差异(Jia *et al.*, 2013, 2017)。原油形成后次生作用对 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 的影响相对较小, 其中生物降解程度越严重, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 越重(Asif *et al.*, 2009), 但也有学者发现同一来源原油, 遭受严重生物降解原油与正常原油 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 范围一样(Jia *et al.*, 2017)。而油气生成后的运移作用通常对 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 没有影响(王保忠等, 2014)。因此, 正构烷烃氢同位素组成可以作为油源对比工具, 尤其是可以为解决混源油的来源问题提供分子指纹和同位素证据(赵孟军等, 1994; 段毅等, 2003; 卢鸿等,

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-06-04; 录用日期: 2025-09-16; 网络出版日期: 2025-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972127); 国家重点研发计划(2021YFA0719000)

2004; Abogilila *et al.*, 2010; 朱信旭, 2019; 綦艳丽, 2020)。

本次样品取自准噶尔盆地中部地区(下文简称准中地区)莫索湾凸起、盆1井西凹陷以及沙湾凹陷, 总共27个原油样品。准中地区经过多年的勘探, 已发现多个油气藏。该地区发育多套烃源岩, 油、气源关系相对复杂, 前人主要通过原油生物标志化合物和碳同位素组成对准中地区原油地球化学特征以及成因来源进行研究(刘文锋等, 2015; 刘惠民等, 2023; 宋永等, 2024)。学者们统一将准中地区原油归为一类原油, 该类全油碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 小于 -29‰ , 以 C_{29} 甾烷为主, 由于该类原油三环萜烷、伽马蜡烷(Ga)、 β -胡萝卜烷丰度变化大, 又可以进一步划分成五个亚类(何登发等, 2004; 陶国亮等, 2008; 陈建平等, 2016a, 2016b; 李博偲等, 2022)。王屿涛(1997)根据原油物性划分成五类分别是夏盐型、石西型、陆南型、滴西型和滴南型; 王绪龙和康素芳(2001)、王绪龙等(2013)根据三环萜烷相对丰度划分成四类, 上升型、下降型、山峰型、山谷型; 陈建平等(2016a)则根据原油碳同位素组成和生物标志化合物特征将其细分为四个亚类。从前人对准中地区原油类型划分上可以看出, 划分原油类型时选择的参数越稳定, 受干扰因素越少, 分类越准确。但对于准中地区混源原油来说, 由于原油混合效应使得原油地球化学参数复杂多变, 难以识别不同油源对混合原油的贡献, 同一种原油可能既具有风城组原油地化特征, 又具有乌尔禾组原油地化特征。尤其是反映环境参数的生标变化幅度大, 解释起来尤为困难。而单体氢同位素作为指示沉积环境的有效指标, 可以更进一步划分准中地区混源原油类型, 明确原油来源, 为该区域油气勘探提供重要参考依据。

1 地质背景

准中地区位于准噶尔盆地腹部, 以盆地中央坳陷带为主, 本次研究的重点区域主要包括四个凹陷, 分别为盆1井西、东道海子、沙湾及阜康凹陷, 以及三个凸起带, 分别为莫南、莫北和莫索湾凸起(图1a)。

准中地区自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系、第四系共8套地层(图1b), 其中二叠系、三叠系、侏罗系为准中地区主要烃源岩层(陈建平等, 2016a, 2016b)。石炭系为半深海—深海沉积地层, 主要发育玄武岩、安山岩和

火山碎屑岩。二叠系以陆相碎屑岩沉积为主, 自下而上分别为下二叠统佳木河组(P_{1j})、风城组(P_{1f})、中二叠统夏子街组(P_{2x})、下乌尔禾组(P_{2w})和上二叠统上乌尔禾组(P_{3w})。三叠系以冲积—河流相及湖相沉积为主。侏罗系主要发育砾岩、含砾砂岩, 以及灰色、灰黑色泥质岩, 局部夹煤层或煤线。白垩系岩相类型相较单一, 在盆地内分布较为稳定以一套由泥质岩类组成的湖相沉积为主。盆地内新生代地层发育, 为陆相沉积, 构造格局与白垩系相似, 岩性主要为暗红色与棕红色泥岩、砂质泥岩夹不等粒砂岩(陶国亮等, 2008; Hu *et al.*, 2016; Tao *et al.*, 2016; 寇晨辉, 2017; Feng *et al.*, 2019; 刘刚等, 2019; 李博偲等, 2022; 师肖飞, 2022)。

2 样品测试和结果

本次研究采集自准噶尔中部地区24口井27个原油样品, 大多数为黄褐色原油, 属于中质油, 部分为轻质油、凝析油或稠油。其中来自侏罗系储层原油20个, 白垩系储层4个, 储层层系不清的原油3个。

由于异构烷烃会影响测量正构烷烃氢同位素值, 所以要准确地测试单体烃的氢同位素, 样品预处理至关重要。目前, 从饱和烃中分离出正构烷烃的方法较多, 但考虑操作步骤及经济等方面的原因, 本次实验采用分子筛络合法进行样品的预处理。样品处理步骤如下: (1)称取20~50 mg原油样品并加入30 mL左右石油醚, 放置12 h以上充分沉淀沥青质; (2)用充填有脱脂棉的短颈漏斗过滤沥青质; (3)润湿安装好的层析柱, 对去除沥青质的原油样品分别用正己烷、二氯甲烷和甲醇做洗脱剂, 依次进行族组分的分离, 获得饱和烃、芳烃和非烃组分; (4)在分离得到的饱和烃中加入活化后的5A分子筛和异辛烷, 放置于加热台上, 将温度设置为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热一周使分子筛充分吸附正构烷烃; (5)关闭加热台, 将加热后的溶液静置5 min后倒掉溶液, 再次加入异辛烷, 每个样品重复此步骤30次彻底洗去异构烷烃; (5)对吸附后的分子筛使用氢氟酸和石油醚进行破碎得到正构烷烃。

单体烃氢同位素测试仪器主要由三部分组成: (1)气相色谱仪, 仪器型号为Agilent 7890B, 色谱柱为石英毛细柱($60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)载气为He, 起始温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保持30 min; (2)同位素质谱仪, 仪器型号为Elementar

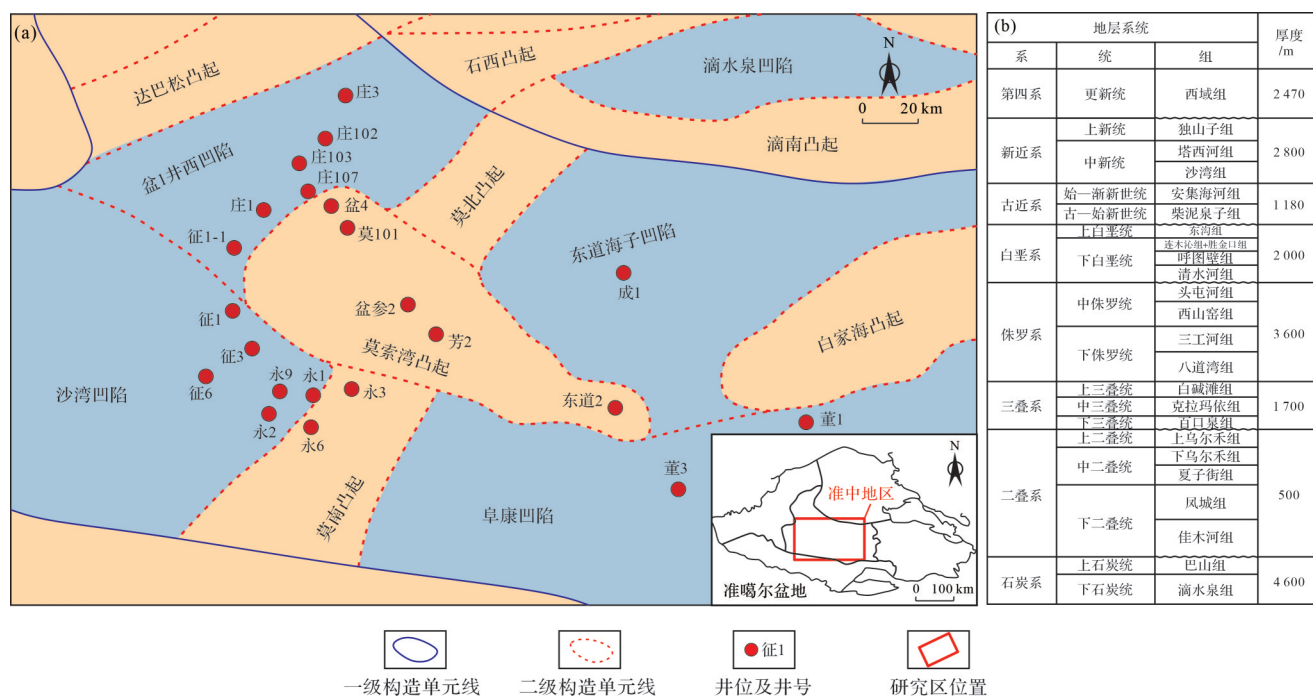


图1 准中地区(a)区域构造和(b)地层图(寇晨辉, 2017; 刘刚等, 2019; 师肖飞, 2022)

Fig.1 Regional structure (a) and stratigraphic map (b) of the Junggar Basin hinterland (Kou, 2017; Liu *et al.*, 2019; Shi, 2022)

isoprime precision; (3) 裂解炉, 型号为 Elementar GC5。氢同位素测试所用裂解炉温度为 1 450 °C。样品经气相色谱仪分离成单分子化合物, 进入高温裂解炉, 有机质完全裂解, 生成 H₂、CO 和 C, C 沉淀于炉管上, CO 和 H₂ 由载气送入同位素质谱仪测定氢同位素。单个碳氢化合物的同位素数据以千分之(‰)为单位, 以常规 delta 表示法(即 δ²H)报告。每个样品至少进行三次测量, 原油 δ²H 的三次测量的标准偏差 ≤±3‰。原油 δ¹³C 三次测量的标准偏差 ≤±0.08‰。

3 原油地球化学特征

3.1 原油族组分特征

原油的族组成可以反映原始生油母质来源, 还能反映原油生成后次生变化。对准中地区原油样品的族组分含量进行分析统计, 来自不同层位原油族组分含量存在差异, 并且来自不同地区原油族组分分布也存在不一致的情况, 说明准中地区原油存在不同来源(图2)。准中地区原油族组分中饱和烃含量明显高于其他组分, 分布范围较广, 介于 60.85%~87.84%, 平均值为 72.91%; 芳烃含量介于 5.45%~20.85%, 平均值为 13.56%; 非烃和沥青质含量介于 6.15%~23.87%, 平均值为 13.53%(表1)。

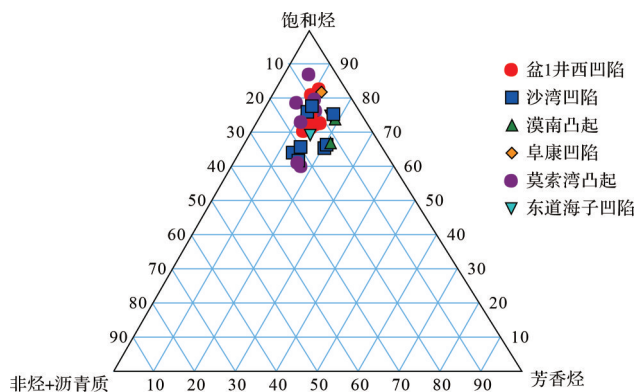


图2 准中地区原油族组分特征

Fig.2 Crude oil group composition traits of the Junggar Basin hinterland

3.2 生物标志化合物

准中原油从总离子流图(Total Ion Current, TIC)来看, 其正构烷烃峰型分布以单峰型、前峰型分布为主, 部分原油含有较丰富的β-胡萝卜烷(图3)。姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)相对关系可以用来确定相应沉积环境(图4)(Powell and McKirdy, 1973; ten Haven *et al.*, 1988), 准中地区原油 Pr/Ph 介于 0.6~5.2, 大部分样品 Pr/Ph 介于 1.0~2.0, 表现为氧化—弱还原的沉积水体环境(表2)。在 Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈关系图中表现为部分原油的生烃母质来自过渡环境混合有机质来

表1 准中地区原油族组分
Table 1 Crude oil group composition of the Junggar Basin hinterland

井号	构造区	层位	深度/m	原油族组分/%		
				饱和烃	芳香烃	非烃+沥青质
庄1	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 353	73.48	15.19	11.33
庄3	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 072	75.86	11.85	12.29
庄102	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 269	72.21	13.62	14.17
庄103	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 278	71.21	12.14	16.65
庄106	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 307	73.08	14.34	12.58
庄107	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 274	83.42	10.16	6.42
征1	沙湾凹陷	K _{1tg}	4 788	66.31	13.96	19.73
征1	沙湾凹陷	J _{1s}	4 809	73.49	13.78	12.73
征101	沙湾凹陷	J _{1s}	5 053	73.68	12.75	13.57
征6	沙湾凹陷	—	—	78.54	10.93	10.53
永1	沙湾凹陷	J _{3g}	5 873	62.54	16.51	22.64
永2	沙湾凹陷	—	—	76.12	17.35	6.53
永6	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 858	66.14	13.96	19.90
永6	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 913	67.04	13.04	19.93
永9	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 052	64.82	22.48	12.70
成1	东道海子凹陷	J _{1b}	5 326	75.41	16.94	7.65
东道2	东道海子凹陷	J _{1s}	5 402	72.17	13.24	14.59
永3	莫南凸起	J _{3g}	5 610	74.32	18.69	6.99
永3	莫南凸起	J _{1s}	5 801	67.25	20.85	11.90
董1	阜康凹陷	J _{2t}	4 871	71.64	13.03	15.33
董3	阜康凹陷	J _{2t}	5 324	82.54	11.31	6.15
莫005	莫索湾凸起	J _{1s}	3 820	77.19	12.18	10.63
莫101	莫索湾凸起	J _{1s}	4 204	79.58	6.31	14.11
芳2	莫索湾凸起	J _{2x}	4 812	61.84	15.1	23.06
芳2	莫索湾凸起	J _{1s}	4 944	60.85	16.51	22.64
盆参2	莫索湾凸起	J _{1b}	5 122	80.57	10.52	8.91
盆4	莫索湾凸起	—	3 243	73.83	10.29	15.88

源,其他原油来自泥炭—煤等陆相有机质来源(图4)。 β -胡萝卜素作为干旱、湖相的标志物,最早在准噶尔盆地发现(蒋助生,1983),主要来源于藻类产生的色素,性质比较稳定。在原油中检出 β -胡萝卜素,极有可能与风城组、乌尔禾等二叠系源岩有关(Moldowan *et al.*, 1985; 郭建军等, 2007; Brocks and Schaeffer, 2008; 甘应星等, 2025)。从表2中反映 β -胡萝卜素含量的参数可知,大部分原油样品 β -胡萝卜素含量较少,如阜康凹陷和东道海子凹陷原油甚至不含 β -胡萝卜素,但是仍存在部分井 β -胡萝卜素含量较高(盆1井西凹陷庄103井、莫南凸起永3井以及莫索湾地区芳2井等)。其中,永3井原油可能由于遭受生物降解,正构烷烃较 β -胡萝卜素抵抗能力弱,优先被消耗,使得 β -胡萝卜素/ nC_{max} 大于1。但其原油的正构烷烃分布完整,也有可能是后期二次充注的影响。从 β -胡萝卜素与Pr/Ph关系图中可知(图5),Pr/Ph所反

映的不同沉积环境与 β -胡萝卜素之间的关系并不明显,不能很好地区分准中地区原油。

三环萜烷主要来源于藻类或者微生物,也可以作为反映母质来源和沉积环境的常用指标(Bohacs *et al.*, 2000; Peters *et al.*, 2008; Tao *et al.*, 2015; 陈哲龙等, 2017; 肖洪等, 2019)。准中地区原油根据三环萜烷含量有三种不同的分布模式(图6, 7),第1种 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 、 $C_{23}TT$ 分布形态呈现出上升型分布(图6a),三环萜烷含量高,三环萜烷主峰碳与 $C_{30}H$ 比值介于0.98~1.01(表2)。第2种 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 、 $C_{23}TT$ 分布形态呈现出上升型或山峰型分布(图6b~d),三环萜烷含量较高,三环萜烷主峰碳与 $C_{30}H$ 比值介于0.13~0.50(表2)。第3种 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 、 $C_{23}TT$ 分布形态为山谷型分布,三环萜烷主峰碳与 $C_{30}H$ 比值均小于0.1(图6e, f)。虽然根据三环萜烷分布模式可以推断出原油有三种不同类型,但是同样的分布模式并不

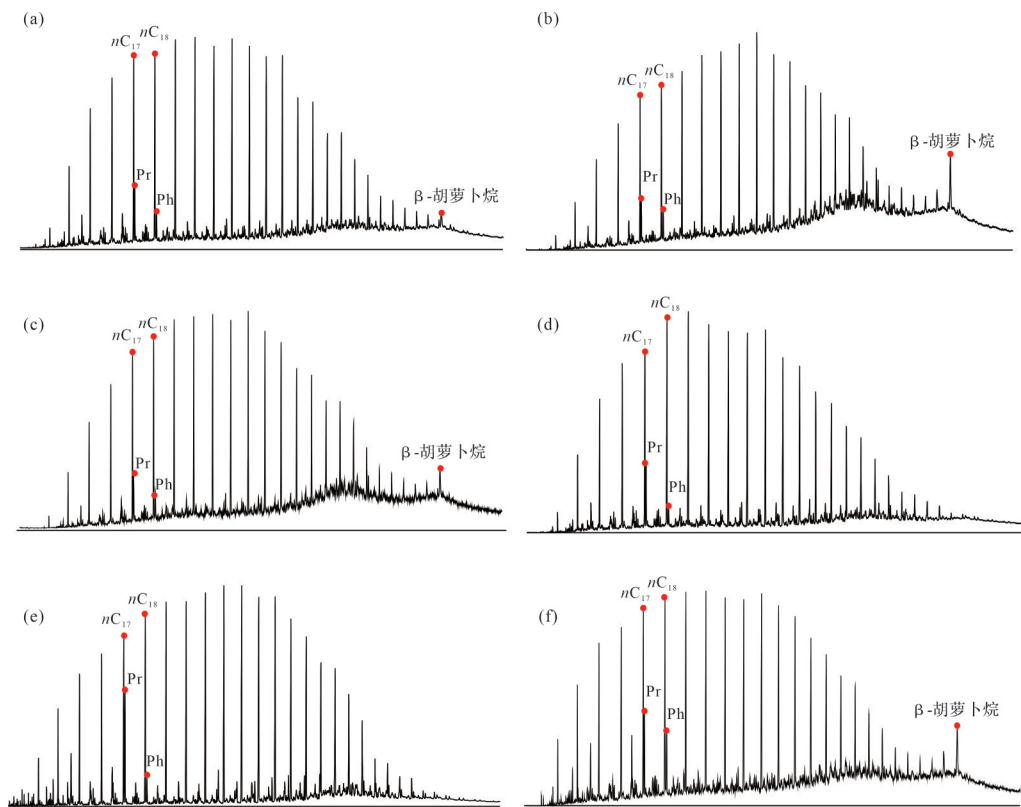


图3 准中地区部分原油饱和烃总离子流图(TIC)

(a)盆1井西凹陷,庄1井,4 353.00 m, J₁s; (b)沙湾凹陷,征1井,4 808.50 m, J₁s; (c)漠南凸起,永3井,5 609.60 m, J₂g; (d)阜康凹陷,董1井,4 871.00 m, J₂t; (e)东道海子凹陷,成1井,5 326.00 m, J₁b; (f)莫索湾凸起,盆参2井,5 122.00 m, J₁b

Fig.3 Saturated hydrocarbon total ion current (TIC) of partial crude oil samples from the Junggar Basin hinterland

(a) well Pen 1 west Sag, well Zhuang 1, 4 353.00 m, J₁s; (b) Shawan Sag, well Zheng 1, 4 808.50 m, J₁s; (c) Monan uplift, well Yong 3, 5 609.60 m, J₂g; (d) Fukang Sag, well Dong 1, 4 871.00 m, J₂t; (e) Dongdaohaizi Sag, well Cheng 1, 5 326.00 m, J₁b; (f) Mosuowan uplift; well Pencan 2, 5 122.00 m, J₁b

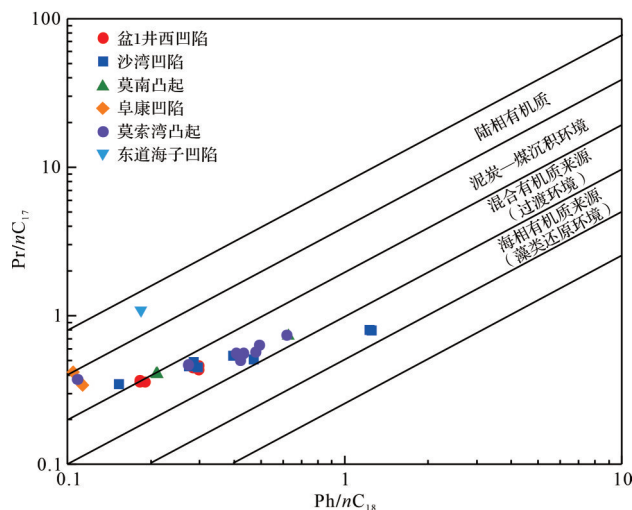


图4 Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈关系图

Fig.4 Plot of Pr/nC₁₇ vs. Ph/nC₁₈

代表来自同一种类型原油。如盆参2井和永3井原油三环萜烷分布模式一致(图6b,c),三环萜烷主峰碳与C₃₀H比值分别为0.38和0.36,但是反映沉积环

境参数Ga/C₃₀H比值相差较大,盆参2井Ga/C₃₀H为0.13,永3井Ga/C₃₀H为0.33,因此两者是否来自同一类型原油需要进一步验证。

C₂₄TeT可以指示细菌和陆源输入(Woodhouse *et al.*, 1992; Samuel *et al.*, 2010; 包建平等, 2018),在准中地区大部分原油样品Pr/Ph>1.0(表2),这种偏氧化的沉积环境有利于陆源三萜类化合物在微生物作用下形成C₂₄TeT,而由细菌所形成的C₂₄TeT则需要在还原环境中才可以大量生成。与三环萜烷分布模式做对比,发现三环萜烷分布模式呈上升型和山峰型的原油C₂₄TeT/(C₂₄TeT+C₂₆TT)比值相近,介于0.29~0.60(图8),而三环萜烷呈下降型分布模式的原油C₂₄TeT/(C₂₄TeT+C₂₆TT)比值高于前两类(图8),介于0.69~0.88,说明该类原油存在高等植物贡献。并且该类原油Ga/C₃₀H比值也小于0.10,而其他两种类型原油Ga/C₃₀H比值介于0.13~0.77,说明这种原油原始沉积环境与前两种原油完全不同。通过Ga/C₃₀H与C₂₄TeT/(C₂₄TeT+C₂₆TT)关系图表明这两个参数为负

表2 准中地区原油地球化学参数
Table 2 Crude oil geochemical parameters of the Junggar Basin hinterland

井号	构造区	层位	深度/m	生物标志化合物										
				R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
庄1	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 353.00	1.9	0.18	0.36	0.09	0.89	0.90	0.15	0.42	0.55	0.51	0.21
庄3	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 072.00	1.8	0.19	0.36	0.11	0.85	0.96	0.13	0.42	0.55	0.52	0.17
庄102	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 269.00	1.8	0.18	0.36	0.10	0.97	0.84	0.13	0.46	0.66	0.31	0.16
庄103	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 278.20	1.4	0.30	0.44	0.59	0.73	0.84	0.25	0.34	0.54	0.54	0.35
庄106	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 307.00	1.9	0.18	0.37	0.14	0.83	0.90	0.15	0.41	0.55	0.53	0.23
庄107	盆1井西凹陷	J _{1s}	4 273.90	1.6	0.28	0.45	0.03	0.81	0.93	0.21	0.32	0.53	0.56	1.01
征1	沙湾凹陷	K _{1tg}	4 788.00	1.5	0.29	0.45	0.43	0.75	1.08	0.23	0.37	0.54	0.52	0.25
征1	沙湾凹陷	J _{1s}	4 808.50	1.6	0.27	0.46	0.38	0.77	1.04	0.18	0.38	0.54	0.53	0.26
征101	沙湾凹陷	J _{1s}	5 053.40	1.3	0.40	0.54	0.42	0.79	1.06	0.18	0.36	0.53	0.52	0.23
征6	沙湾凹陷	—	—	1.5	0.28	0.47	0.15	0.72	1.02	0.29	0.39	0.52	0.51	0.24
永1	沙湾凹陷	J _{3q}	5 873.00	1.5	0.29	0.49	0.30	0.71	1.09	0.30	0.36	0.43	0.39	0.50
永2	沙湾凹陷	—	—	2.2	0.15	0.35	0.02	1.86	0.85	0.09	0.60	0.55	0.52	0.16
永6	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 858.40	0.6	1.23	0.80	0.27	0.68	0.84	0.53	0.35	0.50	0.53	0.36
永6	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 913.90	0.6	1.25	0.80	0.29	0.60	0.90	0.77	0.29	0.53	0.44	0.31
永9	沙湾凹陷	K _{1tg}	5 051.50	1.1	0.47	0.51	0.19	0.70	0.97	0.61	0.40	0.54	0.51	0.14
成1	东道海子凹陷	J _{1b}	5 326.00	5.2	0.18	1.09	—	6.29	0.60	0.04	0.88	0.56	0.51	0.07
东道2	东道海子凹陷	J _{1s}	5 401.50	3.0	0.11	0.37	—	2.30	0.74	0.03	0.78	0.50	0.46	0.06
永3	莫南凸起	J _{3q}	5 609.60	1.7	0.21	0.41	0.18	0.73	1.12	0.33	0.41	0.54	0.53	0.36
永3	莫南凸起	J _{1s}	5 801.00	1.2	0.63	0.73	0.97	0.84	1.07	0.22	0.35	0.57	0.52	0.31
董1	阜康凹陷	J _{2f}	4 871.00	3.6	0.10	0.42	—	7.35	0.35	0.02	0.87	0.49	0.46	0.06
董3	阜康凹陷	J _{2f}	5 324.03	2.9	0.11	0.34	—	1.98	0.79	0.06	0.70	0.46	0.50	0.05
莫005	莫索湾凸起	J _{1s}	3 820.00	1.2	0.48	0.57	0.42	0.81	0.96	0.13	0.32	0.54	0.52	0.26
莫101	莫索湾凸起	J _{1s}	4 204.00	1.2	0.43	0.56	0.05	0.83	0.89	0.16	0.32	0.61	0.40	0.98
芳2	莫索湾凸起	J _{2x}	4 812.00	1.2	0.49	0.64	1.40	0.85	1.00	0.16	0.30	0.57	0.48	0.30
芳2	莫索湾凸起	J _{1s}	4 944.00	1.7	0.62	0.74	1.72	0.78	1.06	0.20	0.31	0.56	0.55	0.36
盆参2	莫索湾凸起	J _{1b}	5 122.00	1.2	0.42	0.50	0.31	0.87	1.01	0.13	0.29	0.57	0.55	0.38
盆4	莫索湾凸起	—	3 243.00	1.3	0.41	0.56	0.22	0.93	0.97	0.06	0.30	0.53	0.51	0.25

注: R1=Pr/Ph; R2=Ph/nC₁₈; R3=Pr/nC₁₇; R4=β-胡萝卜素/nC_{max}; R5=C₂₀TT/C₂₁TT; R6=C₂₁TT/C₂₃TT; R7=Ga/C₃₀H; R8=C₂₄TeT/(C₂₄TeT+C₂₆TT); R9=C₂₉β/(β+αα); R10=C₂₉20S/(20S+20R); R11=三环萜烷主峰碳/C₃₀H; “—”无数据。

相关关系,前者高,表明水体盐度高,高等植物输入就少。另外,原油中当C₂₄TeT/(C₂₄TeT+C₂₆TT)比值相似时,Ga/C₃₀H值不同,说明原油中存在不同成因来源原油(图8)。

不同的甾烷类生物标志物可以指示不同的生物来源和沉积环境(Peters *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2021)。前人研究认为C₂₇、C₂₈、C₂₉规则甾烷可以反映不同生源母质来源,C₂₇甾烷来源于藻类低等水生生物;C₂₉甾烷来源于陆源高等植物输入;C₂₈甾烷则作为混合来源有机质。准中地区原油甾烷组成中大部分样品C₂₉规则甾烷占优势,C₂₇规则甾烷含量低,C₂₇、C₂₈、C₂₉构型规则甾烷呈上升型分布(图9)。还有一部分原油C₂₇、C₂₈、C₂₉构型规则甾烷呈“V”字型分布。大部分样品重排甾烷含量低,但是莫索湾凸起东部

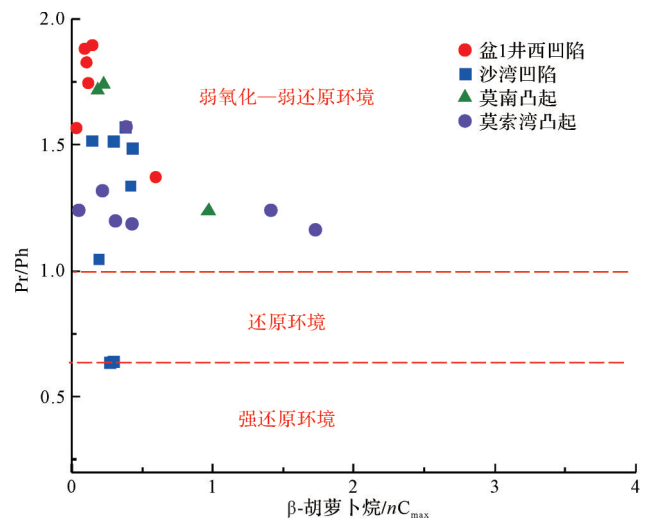


图5 β-胡萝卜素/nC_{max}与Pr/Ph关系图
Fig.5 Plot of Pr/Ph vs. β-carotene/nC_{max}

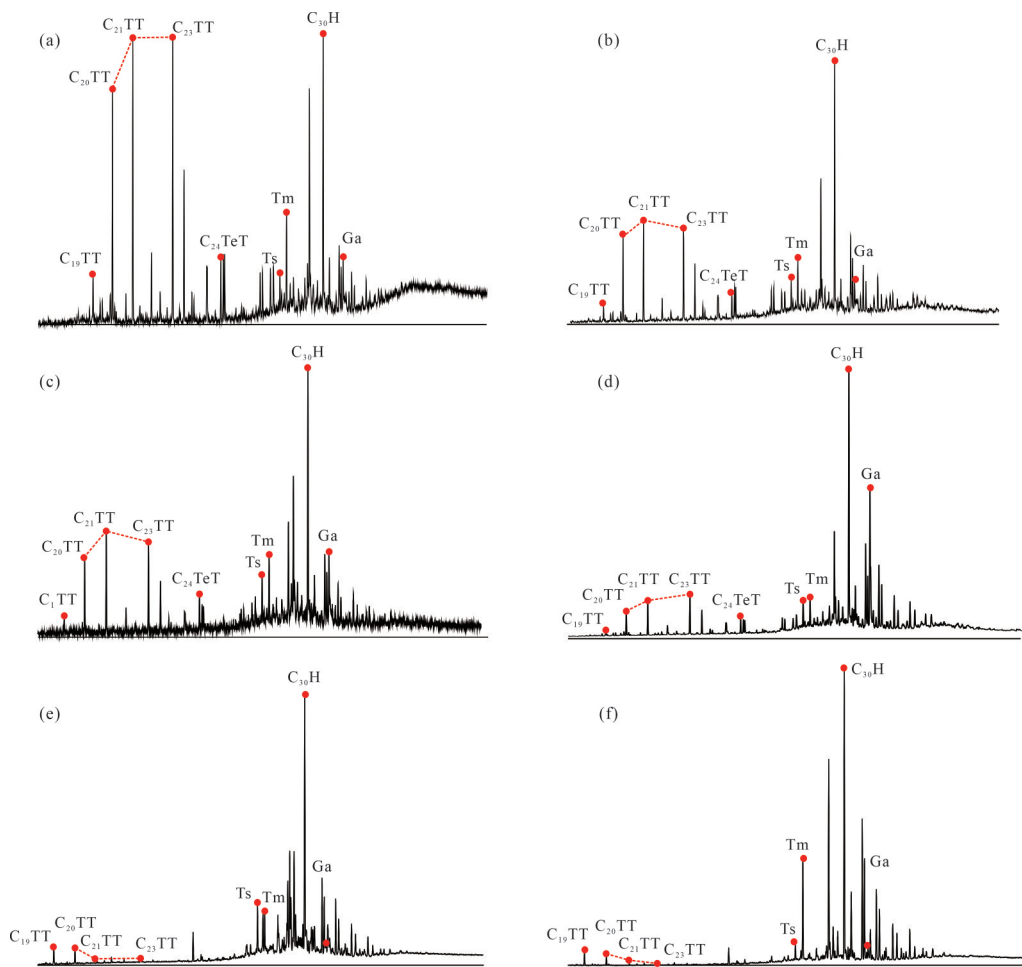


图6 准中地区部分原油 m/z 191 质量色谱图

(a) 盆1井西凹陷, 庄107井, 4 273.90 m, J_1s ; (b) 莫索湾凸起, 盆参2井, 5 122.00 m, J_1b ; (c) 漠南凸起, 永3井, 5 609.60 m, J_3g ; (d) 沙湾凹陷, 永6井, 5 858.40 m, K_1tg ; (e) 东道海子凹陷, 成1井, 5 326.00 m, J_1b ; (f) 阜康凹陷, 董1井, 4 871.00 m, J_2

Fig.6 Mass chromatograms (m/z 191) of partial crude oil samples from the Junggar Basin hinterland

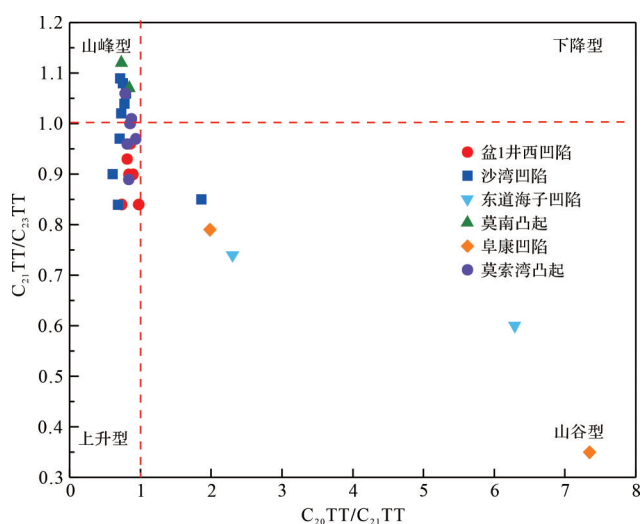
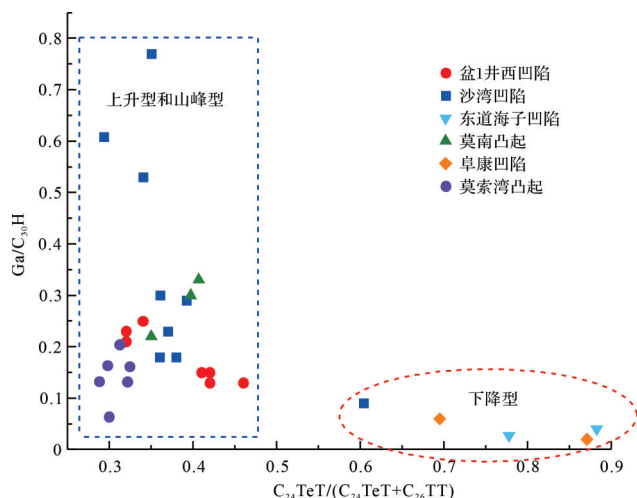
(a) well Pen 1 west sag, well Zhuang 107, 4 273.90 m, J_1s ; (b) Mosuowan uplift, well Pencan 2, 5 122.00 m, J_1b ; (c) Monan uplift, well Yong 3, 5 609.60 m, J_3g ; (d) Shawan Sag, well Yong 6, 5 858.40 m, K_1tg ; (e) Dongdaohaizi Sag, well Cheng 1, 5 326.00 m, J_1b ; (f) Fukang Sag, well Dong 1, 4 871.00 m, J_2

东道2井原油重排甾烷含量高,与腹部其他井原油不同。准中地区原油中短链的 C_{21} 孕甾烷和 C_{22} 升孕甾烷相对含量较高,早期的研究认为,其丰度高低与成熟度和黏土矿物存在有关(Requejo *et al.*, 1997)。当成熟度不是太高时,来自侧链断裂的可能性较小,但是有学者通过实验证明孕甾烷/规则甾烷值不随热模拟温度的升高而增加反而略有降低(Hughes and Holba, 1988),因此认为与高盐度的沉积环境相关(秦黎明等, 2008; 王作栋等, 2009; Wang *et al.*, 2015)。准中地区原油(孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷值介于0.13~1.25(表2),但也有比值小于0.2的原油,其甾烷成熟度参数 C_{29} 甾烷20S/(20S+20R)和 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值分别介于0.37~0.51与0.46~0.66(图10),说明原油已达到异构化平衡阶

段,均属于成熟油,因此并不是成熟度导致(孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷值出现差异;而(孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷值比值小于0.2的原油其Ga/ $C_{30}H$ 比值小于0.1,表明含盐度影响了孕甾烷和升孕甾烷含量。

3.3 原油正构烷烃碳同位素特征

准中地区原油正构烷烃碳同位素组成($\delta^{13}C_{alk}$)为-33.9‰~-25.9‰,原油正构烷烃碳同位素随碳数增加逐渐偏轻。通过对准中不同地区原油 $\delta^{13}C_{alk}$ 分布范围分析,发现存在四种不同分布特征。第一种以沙湾凹陷永6井原油为主(图11a),原油正构烷烃碳同位素最轻, $\delta^{13}C_{alk}$ 为-30.7‰~-33.8‰;第二种以莫索湾凸起、盆1井西凹陷以及部分沙湾凹陷原油为主(图11), $\delta^{13}C_{alk}$ 为-27.0‰~-32.5‰;第三种以沙湾凹

图7 $C_{20}TT/C_{21}TT$ 、 $C_{21}TT/C_{23}TT$ 相关图Fig.7 Plot of $C_{20}TT/C_{21}TT$ vs. $C_{21}TT/C_{23}TT$ 图8 $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$ 和 $Ga/C_{30}H$ 相关图Fig.8 Plot of $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$ vs. $Ga/C_{30}H$

陷征1井、征6井和永2井以及漠南凸起永3井原油为主(图11a), $\delta^{13}C_{alk}$ 介于 $-27.4\%o \sim -30.4\%o$; 第四种以东道海子凹陷和阜康凹陷原油为主(图11b), 这些井原油 $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT) > 0.7$, 同时 $Ga/C_{30}H < 0.04$, 说明形成原油的干酪根来自陆源的高等植物, 因此原油正构烷烃碳同位素组成最重, $\delta^{13}C_{alk}$ 介于 $-25.9\%o \sim -30.4\%o$ 。

虽然准中地区原油通过正构烷烃碳同位素分成了四种类型, 但有些井原油正构烷烃碳同位素组成特征解释上存在争议。例如, 永3井 J_s 原油 $\delta^{13}C_{alk}$ 介于 $-31.0\%o \sim -29.4\%o$, 重于永6井原油, 同时 $Ga/C_{30}H$ 为0.22, 小于永6井的 $Ga/C_{30}H$, 但是永3井 δ^2H_{alk} 却重于永6井, 因此永3井 J_s 原油还需要进一步分析, 仅通过原油正构烷烃碳同位素与生标无法正确地反映

有机质形成时的沉积环境。除此之外, 盆1井西凹陷原油(图11c)虽然正构烷烃碳同位素分布范围一致, 但是从 C_{20} 开始庄1井、庄3井、庄102井 $\delta^{13}C_{alk}$ 与庄103井、庄107的 $\delta^{13}C_{alk}$ 出现差别。以往的正构烷烃碳同位素分析中只有这种差别足够明显才会划分成不同来源原油(Jia *et al.*, 2013, 2017; Yu *et al.*, 2017), 但是这几口井原油反映环境的生标参数有所差别, 如庄107井和庄103井原油 $Ga/C_{30}H$ 、 β -胡萝卜素/ nC_{max} 大于庄1井、庄3井、庄102井, Pr/Ph 小于这三口井。因此, 为了解决碳同位素组成在反映沉积环境上的不足, 需要一个更为灵敏的环境指标。

3.4 原油正构烷烃氢同位素特征

准中地区原油 δ^2H_{alk} 变化范围大, 介于 $-187\%o \sim -111\%o$ 。根据对所有原油样品 δ^2H_{alk} 范围划分为四种正构烷烃氢同位素曲线类型(表3): (1) δ^2H_{alk} 轻, δ^2H_{alk} 介于 $-187\%o \sim -139\%o$; (2) δ^2H_{alk} 偏轻, δ^2H_{alk} 介于 $-177\%o \sim -124\%o$; (3) δ^2H_{alk} 偏重, δ^2H_{alk} 介于 $-163\%o \sim -116\%o$; (4) δ^2H_{alk} 重, δ^2H_{alk} 介于 $-159\%o \sim -111\%o$ 。

盆1井西凹陷原油 δ^2H_{alk} 整体较轻, 介于 $-184\%o \sim -124\%o$, 随碳数增加, 氢同位素逐渐偏重, 除庄107井、庄103井外, 其余井原油正构烷烃氢同位素特征较一致, 氢同位素曲线形态平缓(图12a)。庄107井和庄103井低数碳部分($C_{15} \sim C_{23}$) δ^2H_{alk} 较重于盆1井西凹陷其他原油, 从 C_{23} 开始 δ^2H_{alk} 偏重, 曲线斜率变大。

沙湾凹陷永2井、征101井和征1井原油 δ^2H_{alk} 偏轻, 介于 $-177\%o \sim -137\%o$ (图12b)。沙湾凹陷其他井原油 δ^2H_{alk} 偏重, 介于 $-159\%o \sim -111\%o$ 。其中永2井原油虽然正构烷烃氢同位素特征与其他两口井一致, 但是 $Ga/C_{30}H$ 为0.09, β -胡萝卜素/ nC_{max} 为0.02, 远小于同地区其他原油, 说明氢同位素组成特征一致的原由还有可能来自不同类型原油。沙湾凹陷其他井原油除 δ^2H_{alk} 偏重之外, 原油 $\delta^{13}C_{alk}$ 同样也重于该地区其他原油, 这种碳、氢同位素同时都偏重的现象可能与该地区独特的生物类型和沉积环境有关。值得一提的是, 永6井原油与永2井类似, 也是和该地区其他井原油 δ^2H_{alk} 一致而生标不同。

莫南凸起永3井不同储层的原油正构烷烃氢同位素特征不同。永3井 J_s 原油 δ^2H_{alk} 较轻, 介于 $-177\%o \sim -124\%o$, 与庄107井氢同位素组成特征相似; 永3井 J_s 原油 δ^2H_{alk} 最重, 介于 $-157\%o \sim -121\%o$ (图12b)。莫索湾地区原油 δ^2H_{alk} 除了芳2井原油外,

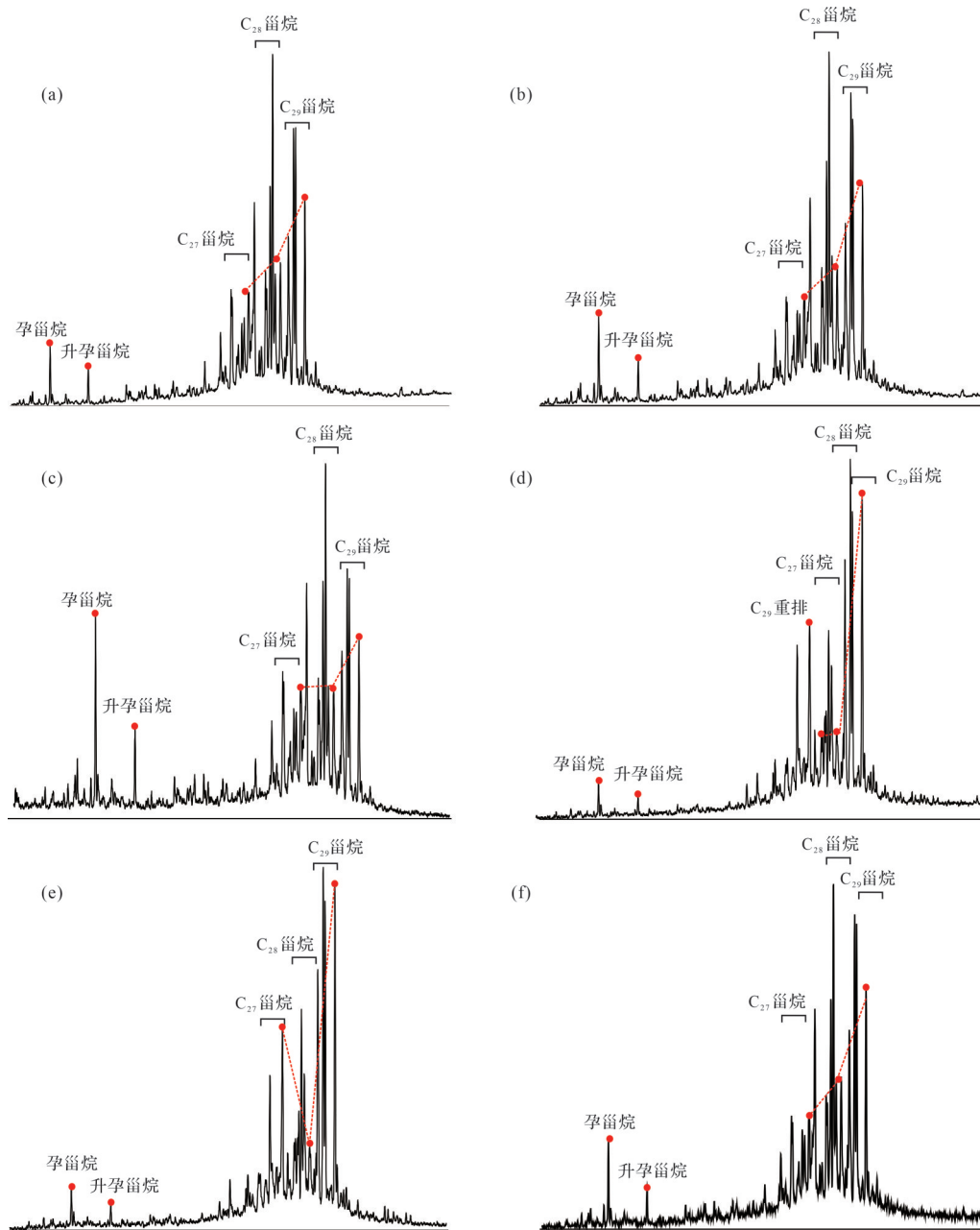


图9 准中地区部分原油 m/z 217 质量色谱图

(a) 盆1井西凹陷, 庄103井, 4 278.20 m, J_1s ; (b) 沙湾凹陷, 永1井, 5 873.00 m, J_3g ; (c) 莫索湾凸起, 莫101井, 4 204.00 m, J_1s ; (d) 东道海子凹陷, 东道2井, 5 401.50 m, J_1s ; (e) 阜康凹陷, 董1井, 4 871.00 m, J_2t ; (f) 漠南凸起, 永3井, 5 609.60 m, J_3g

Fig.9 Mass chromatograms (m/z 217) of partial crude oil samples from the Junggar Basin hinterland

(a) well Pen 1 west Sag, well Zhuang 103, 4 278.20 m, J_1s ; (b) Shawan Sag, well Yong 1, 5 873.00 m, J_3g ; (c) Mosuowan uplift, well Mo 101, 4 204.00 m, J_1s ; (d) Dongdaohaizi Sag, well Dongdao 2, 5 401.50 m, J_1s ; (e) Fukang Sag, well Dong 1, 4 871.00 m, J_2t ; (f) Monan uplift, well Yong 3, 5 609.60 m, J_3g

δ^2H_{alk} 偏重, 介于 -160‰ ~ -116‰ ; 芳2井原油 δ^2H_{alk} 轻, 介于 -182‰ ~ -160‰ (图 12c)。来自东道海子凹陷的成1井原油与来自阜康凹陷的董1井和董3井原油, 则与永2井无论是 δ^2H_{alk} 还是生物标志化合物参数均呈现高度一致性, 唯一的差别就是永2井的三环萜烷含量大于这三口井 (图 12c)。

4 混源原油来源及原油类型划分

4.1 混源原油来源

准中地区主要存在三种类型烃源岩的贡献, 分别是下侏罗统八道湾 (J_1b) 烃源岩、下二叠统风城组 (P_1f) 烃源岩和中二叠统乌尔禾组 (P_2w) 烃源岩 (陈建

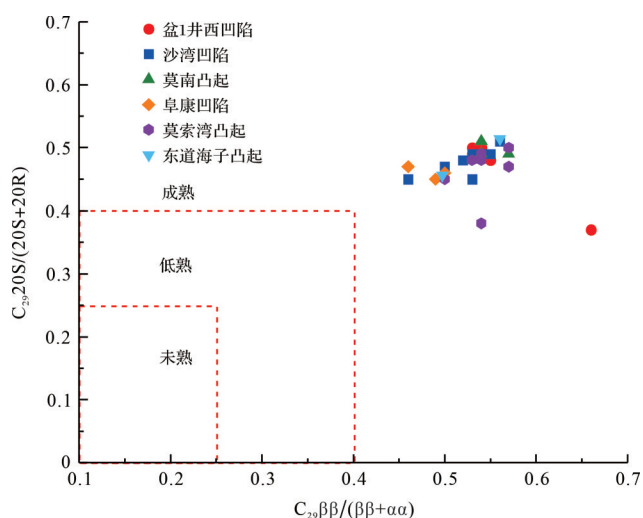


图 10 甾烷异构化参数关系图

Fig.10 Plot of $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ vs. $C_{29}20S/(20S+20R)$ to determine thermal maturity

平等, 2016a; 师肖飞, 2022; 吴小奇等, 2023)。J_{1b} 烃源岩贡献的原油主要来自东道海子凹陷成1井、东道2井原油与阜康凹陷董1井和董3井原油(图 13), 这些地区原油与准中地区其他原油存在明显区别, 三环萜烷含量低, Ga/C₃₀H 比值小于 0.1, 规则甾烷成“V”字型分布, 原油正构烷烃碳同位素最重, 并且原油正构烷烃氢同位素与其他类型原油相比整体较轻(图 12)。而永2井原油混合了部分P_{1f}烃源岩形成的原油(以下简称P_{1f}原油), 大部分P_{1f}原油三环萜烷主峰碳为C₂₁TT, Pr/Ph<2.0, δ²H_{alk}重(表 4), 因此混合了P_{1f}原油的永2井原油三环萜烷主峰为C₂₁TT, δ²H_{alk}略重于其他J_{1b}原油(图 14)。

P_{1f}烃源岩作为盆地主力烃源岩层, 集中分布于玛湖—东道海子凹陷的沉积中心(Yu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022), 分布面积大, 沙湾凹陷和莫索湾凸起原油大部分均来自P_{1f}烃源岩贡献(图 13)。但是P_{1f}烃源岩在湖盆时期沉积厚度不一, 导致在沉积期形成烃源岩的过程中不同地区烃源岩厚度差距较大, 使得深水湖相沉积的P_{1f}烃源岩与浅水湖相沉积的P_{1f}烃源岩地化特征不同。沙湾凹陷永6井原油就是典型的深水相P_{1f}原油(图 12, 13), δ¹³C_{alk}轻, δ²H_{alk}偏重, Pr/Ph为0.6, Ga/C₃₀H>0.53。沙湾凹陷永3井J_{1s}原油就是典型的浅水相P_{1f}原油(图 12, 13), δ¹³C_{alk}和δ²H_{alk}都重于深水湖相P_{1f}原油, Pr/Ph通常介于1.0~2.0, Ga/C₃₀H为0.22, 也小于深水湖相P_{1f}原油。沙湾凹陷永3井J_{1q}原油和征1井原油以浅湖相P_{1f}原油为主, 混入了部分J_{1b}原油, 因此δ¹³C_{alk}重, δ²H_{alk}偏轻(表

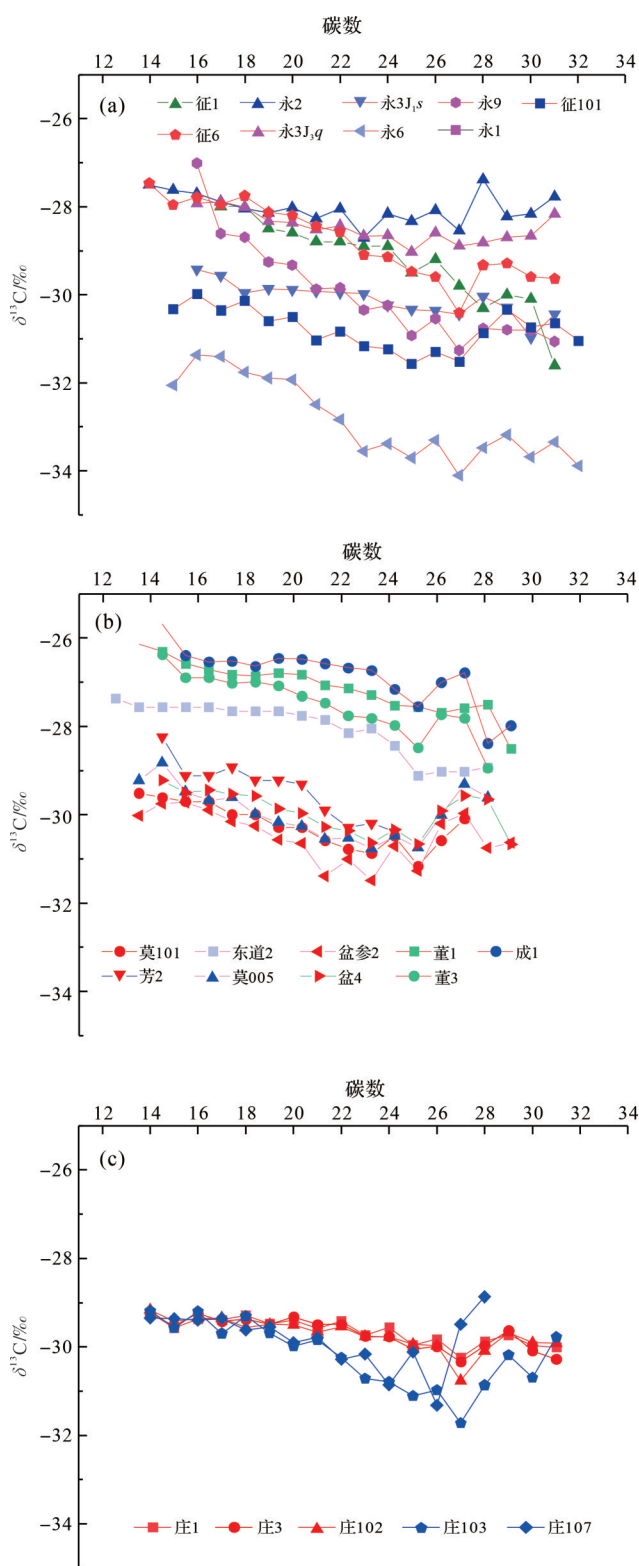


图 11 准中地区正构烷烃碳同位素特征

(a) 沙湾凹陷和漠南凸起; (b) 莫索湾凸起、阜康凹陷和东道海子凹陷; (c) 盆1井西凹陷

Fig.11 δ¹³C of n-alkanes plotted against chain length from the Junggar Basin hinterland

(a) Shawan Sag and Monan uplift; (b) Mosuowan uplift, Fukang Sag and Dongdao-haizi Sag; (c) well Pen 1 west Sag

表3 准中地区 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 类型Table 3 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ types of crude oil samples in the Junggar Basin hinterland

$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 类型	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}/\text{‰}$
轻	-187~-139
偏轻	-177~-124
偏重	-163~-116
重	-159~-111

4)。永9井原油则是深湖相和浅湖相 P_1f 原油的混合(图13),同时具备了深湖相高 $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 和浅湖相较重 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 特征(表4)。

P_2w 烃源岩呈现“西厚东薄”的楔状体特征,盆1井西凹陷沉积中心厚度达450 m。盆1井西凹陷除庄107井、庄103井之外,其余井原油 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏轻(图12),甚至与陆相来源为主的 J_1b 原油相当,三环萜烷较高, β -胡萝卜素含量较少, $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 比值小于0.15,是典型 P_2w 原油。盆1井凹陷庄107井和庄103井原油由于混入浅湖相 P_1f 原油(图13), $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 明显重于盆1井西凹陷其他 P_2w 原油,并且发现大部分混源油相较于未混源原油,曲线斜率均会增大(图12)。莫索湾凸起的莫101井和盆4井原油即为浅湖相 P_1f 原油混入部分 P_2w 原油(图13),因为与浅湖相 P_1f 原油相比, $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 和生物标志化合物参数无明显变化,只有 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 整体偏轻。

4.2 原油类型划分

根据对所有样品原油 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 和生物标志化合物特征分析,将准中地区原油精细划分为三种类型原油(I类、II类和III类),其中第II类原油进一步划分成两个亚类 II_A 和 II_B (表5)。

I类原油来自 J_1b 烃源岩形成的原油,正构烷烃氢同位素轻, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 介于 -187‰ ~ -139‰ ; $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 重, $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 介于 -30.4‰ ~ -25.9‰ (图14);三环萜烷含量较少,以 C_{19}TT 优势,三环萜烷主峰/ C_{30}H <0.07;反映高等植物来源的 $\text{C}_{24}\text{TeT}/(\text{C}_{24}\text{TeT}+\text{C}_{26}\text{TT})$ 大于0.70;无 β -胡萝卜素, Pr/Ph 介于2.9~5.2, $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 比值低;I类原油孕甾烷含量少,(孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷介于0.13~0.32; C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 20R构型规则甾烷呈“V”字形分布(表5)。I类原油中部分混有 P_1f 原油, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏轻, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 介于 -170‰ ~ 137‰ (表4)。

II类原油主要来自 P_1f 烃源岩形成的原油, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 重, $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 介于 -163‰ ~ -111‰ ,以 C_{21}TT 或 C_{23}TT 优势为主, C_{20}TT 、 C_{21}TT 、 C_{23}TT 分布形态呈现出山峰型或上

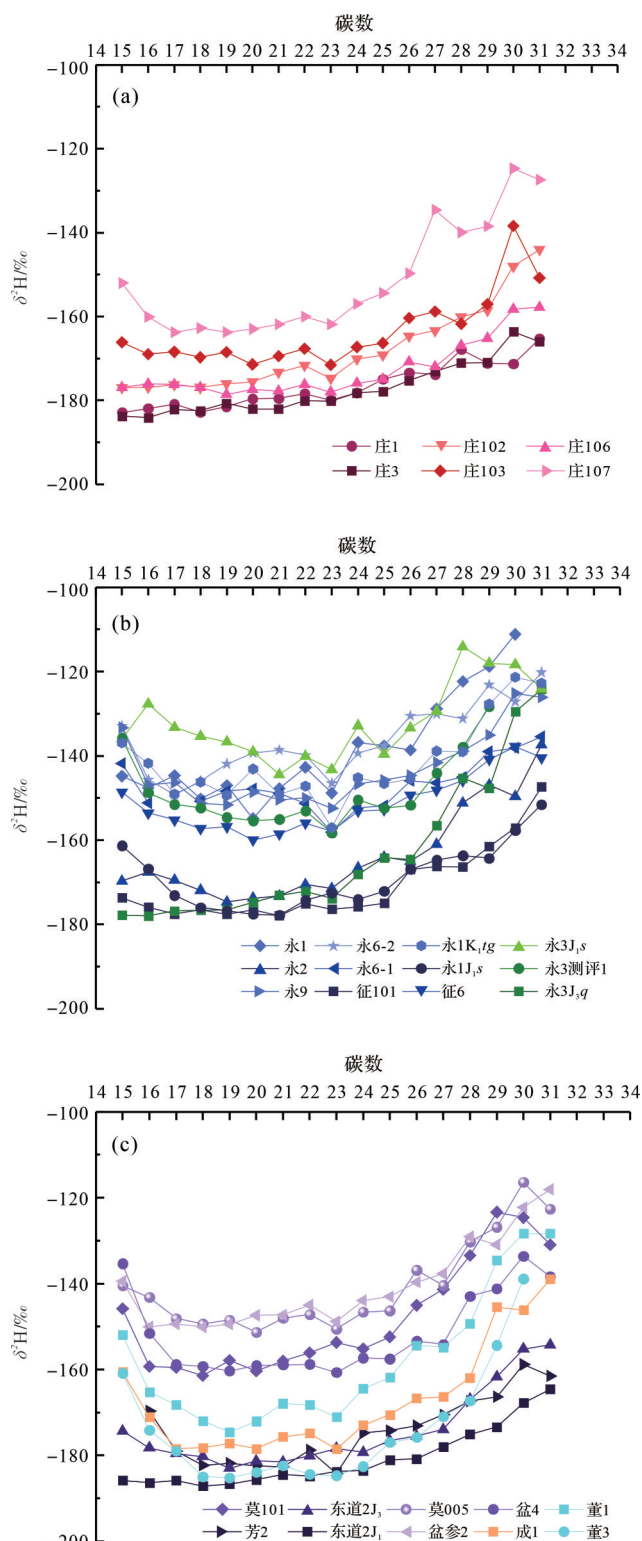


图12 准中不同地区正构烷烃氢同位素特征

(a) 盆1井西凹陷; (b) 沙湾凹陷和漠南凸起; (c) 莫索湾凸起、阜康凹陷和东道海子凹陷

Fig.12 $\delta^2\text{H}$ of n -alkanes plotted against chain length from the Junggar Basin hinterland

(a) well Pen 1 west Sag; (b) Shawan Sag and Monan uplift; (c) Mosuowan uplift, Fukang Sag and Dongdaohaizi Sag

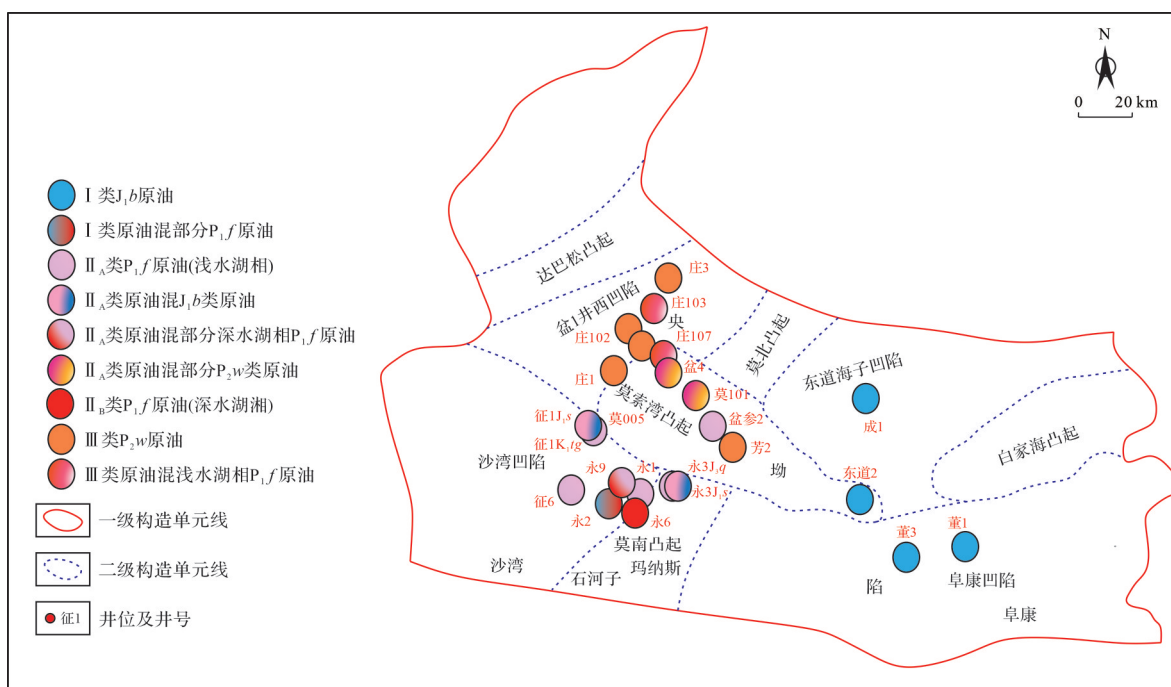


图13 准中地区混源原油来源分布图

Fig.13 Source distribution map of mixed-source crude oil in the Junggar Basin hinterland

升型分布, C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 20R 构型规则甾烷呈上升型分布。但是根据正构烷烃碳、氢同位素特征和 $Ga/C_{30}H$ 比值进一步分为两个亚类, II_A类原油和 II_B类原油。II_A类原油 δ^2H_{alk} 重, δ^2H_{alk} 介于 $-159\text{‰} \sim -111\text{‰}$; $\delta^{13}C_{alk}$ 偏重, $\delta^{13}C_{alk}$ 介于 $-30.5\text{‰} \sim -27.3\text{‰}$ (图 14); 三环萜烷含量较高, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H$ 介于 $0.24 \sim 0.50$ 。Pr/Ph 介于 $1.2 \sim 1.5$; $Ga/C_{30}H$ 比值较低, 介于 $0.13 \sim 0.30$, β -胡萝卜素/ nC_{max} 介于 $0.05 \sim 0.97$; 孕甾烷、升孕甾烷含量较高, (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷介于 $0.34 \sim 0.69$ (表 5)。II_B类原油 δ^2H_{alk} 偏重, δ^2H_{alk} 介于 $-163\text{‰} \sim -134\text{‰}$; $\delta^{13}C_{alk}$ 轻, $\delta^{13}C_{alk}$ 介于 $-34.0\text{‰} \sim -30.8\text{‰}$ (图 14); Pr/Ph 为 0.6, β -胡萝卜素/ nC_{max} 介于 $0.27 \sim 0.29$; 孕甾烷、升孕甾烷含量较低, (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷介于 $0.19 \sim 0.20$; $Ga/C_{30}H$ 大, 介于 $0.53 \sim 0.77$ (表 5)。II_A原油中混 II_B原油 δ^2H_{alk} 介于 $-152\text{‰} \sim -120\text{‰}$, $Ga/C_{30}H$ 为 0.60 (表 4)。II_A原油中混 P_{2w} 原油, δ^2H_{alk} 偏重, 介于 $-160\text{‰} \sim -116\text{‰}$, $\delta^{13}C_{alk}$ 偏轻, 介于 $-31.9\text{‰} \sim -29.6\text{‰}$ (表 4)。II_A原油中混 J_{1b} 原油, δ^2H_{alk} 偏轻, δ^2H_{alk} 介于 $-177\text{‰} \sim -129\text{‰}$ (表 4)。

III类原油主要来自 P_{2w} 烃源岩形成的原油, 原油 δ^2H_{alk} 轻, δ^2H_{alk} 介于 $-184\text{‰} \sim -144\text{‰}$ (表 5), 与来自陆相侏罗系煤系烃源岩原油正构烷烃氢同位素特征相似 (图 14)。 $\delta^{13}C_{alk}$ 偏轻, 介于 $-30.2\text{‰} \sim -28.9\text{‰}$ 。Pr/Ph

介于 $1.2 \sim 1.9$, 含 β -胡萝卜素, β -胡萝卜素/ nC_{max} 介于 $0.09 \sim 1.72$ (表 5)。 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 、 $C_{23}TT$ 分布形态以上升型为主, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H$ 介于 $0.17 \sim 0.36$, $Ga/C_{30}H$ 比值低于 0.20。孕甾烷和升孕甾烷含量较高, (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷介于 $0.31 \sim 0.50$ (表 5)。III类原油中混 II_A类原油, δ^2H_{alk} 偏轻 (图 14), δ^2H_{alk} 介于 $-171\text{‰} \sim -124\text{‰}$ (表 3)。

5 原油正构烷烃氢同位素影响因素及地质意义

沉积环境是影响正构烷烃氢同位素特征最主要的因素, 从整体上影响 δ^2H_{alk} 分布范围。通过对准中地区原油正构烷烃氢同位素特征研究, 发现不同来源的原油正构烷烃氢同位素呈现出差异性分布特征, 能够作为原油类型划分的依据。来自不同原始沉积环境的原油具有不同的正构烷烃氢同位素分布特征 (图 15)。来自陆相煤系地层的 I 类原油正构烷烃氢同位素最轻, 来自淡水—半咸水的下乌尔禾组烃源岩的 III 类原油正构烷烃氢同位素较轻。但是作为同样来自半咸水—咸水的风城组烃源岩原油却存在不同的正构烷烃氢同位素分布特征。一般来说, $Ga/C_{30}H$ 比值越大, 水体分层越明显, 水体越咸, 正构烷烃氢同位素应该越重, 但是腹部地区部分原油却

表4 混源原油地球化学特征
Table 4 Geochemical characteristics of mixed-source crude oil

混源原油类型	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}/\text{‰}$	类异戊二烯	甾烷分布形式与特征指标	甾烷分布形式与特征指标
J_1 原油混 P_f 原油	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏轻, -170~-137	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 重, -27.3~-28.7	Pr/Ph: 2.2; β -胡萝卜烷/ $n\text{C}_{\text{max}}$: 0.02	C_{29} 规则甾烷为主, "v"字型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.42	三环甾烷主峰/ C_{30}H : 0.16; C_{19} 三环甾烷优势; $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$: 0.09; $\text{C}_{24}\text{Te}/\text{C}_{26}\text{TT}$: 0.60
P_f 原油(浅湖)混 P_f 原油(深湖)	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏重, -152~-120	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 偏重, -31.3~-27.0	Pr/Ph: 1.1; β -胡萝卜烷/ $n\text{C}_{\text{max}}$: 0.19	C_{29} 规则甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.38	三环甾烷主峰/ C_{30}H : 0.49; C_{23} 三环甾烷优势; $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$: 0.61; $\text{C}_{24}\text{Te}/\text{C}_{26}\text{TT}$: 0.29
P_f 原油(浅湖)混 P_2w 原油	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏重, -160~-116	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 偏轻, -31.3~-29.6	Pr/Ph: 1.2~1.3; β -胡萝卜烷/ $n\text{C}_{\text{max}}$: 0.05~0.22	C_{29} 规则甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.64~0.90	三环甾烷主峰/ C_{30}H : 0.25~0.98; C_{23} 三环甾烷优势; $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$: 0.06~0.16; $\text{C}_{24}\text{Te}/\text{C}_{26}\text{TT}$: 0.30~0.32
P_f 原油(浅湖)混 J_1 原油	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏轻, -177~-129	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 偏重, -30.5~-27.9	Pr/Ph: 1.6~1.7; β -胡萝卜烷/ $n\text{C}_{\text{max}}$: 0.18~0.38	C_{29} 规则甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.44~0.61	三环甾烷主峰/ C_{30}H : 0.26~0.36; C_{21} 三环甾烷优势; $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$: 0.18~0.33; $\text{C}_{24}\text{Te}/\text{C}_{26}\text{TT}$: 0.38~0.41
P_2w 原油混 P_f 原油(浅湖)	$\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 偏轻, -171~-124	$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 偏轻, -31.7~-28.9	Pr/Ph: 1.4~1.6; β -胡萝卜烷/ $n\text{C}_{\text{max}}$: 0.03~0.59	C_{29} 规则甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.47~1.13	三环甾烷主峰/ C_{30}H : 0.35~1.01; C_{23} 三环甾烷优势; $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$: 0.21~0.25; $\text{C}_{24}\text{Te}/\text{C}_{26}\text{TT}$: 0.32~0.34

存在相反的情况, $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 比值越大, 正构烷烃氢同位素越轻。造成这种现象的原因可能主要与风城组烃源岩在形成之前的沉积环境有关。整个准噶尔盆地二叠纪为陆相湖盆(陈建平等, 2016a, 2016b), 该沉积期时虽然均为咸水湖相沉积, 但是在形成初期为海陆过渡环境的潟湖相沉积, 水体较浅, 发育白云质泥岩, 再因蒸发作用使得较浅的水体含盐度增大, 导致作为反映水体分层指标的 $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 比值极低。部分潟湖相沉积形成的风城组烃源岩被保留下来, 因此, 风城组烃源岩 $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 比值低, 反而水体更咸, 正构烷烃氢同位素越重(图 16a)。

来自 P_2w 和 P_f 浅水湖相沉积的原油无论是 $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 还是 Pr/Ph 都具有高度相似性(图 16a, b), 因此仅通过反映环境的生标参数同样无法解释氢同位素组成之间的差距。准中地区 P_2w 烃源岩为浅湖沉积, 多为淡水、弱氧化环境, 以陆源有机质输入为主。而 P_f 浅水湖相沉积由于碱湖环境下的烃源岩多富含杜氏藻, 使得 P_f 浅水湖原油比 P_2w 原油更富集重氢, 因此 P_f 浅水湖原油 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 重于 P_2w 原油。

有机质类型是影响 $\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$ 的重要因素。从图 16c 中可以看到同一类原油中, 反映细菌或陆源物质输入的参数 $\text{C}_{24}\text{Te}/(\text{C}_{24}\text{Te}+\text{C}_{26}\text{TT})$ 越大, 原油正构烷烃加权平均值 $\delta^2\text{H}$ 越小。说明来自同一沉积环境的原油, 不同类型有机质影响原油正构烷烃氢同位素组成特征。三大类原油正构烷烃加权平均值 $\delta^2\text{H}$ 与 C_{27} 甾烷/ C_{29} 甾烷之间没有明显的关系(图 16d), 但是将所有类型原油的混源原油加入对比, 发现两者呈正相关关系, 说明当原油混入其他类型原油时, 来自低等藻类的生物越多, $\delta^2\text{H}$ 越重。

从原油正构烷烃氢同位素分布曲线来看, 均随着碳数增加 $\delta^2\text{H}$ 逐渐变重(图 14)。这是因为, C-¹H 键相对 C-²H 较弱, 在烃类热成熟演化过程中, ¹H 首先丢失, 使干酪根更富集 ²H(Li *et al.*, 2001)。并且由于低碳数正构烷烃稳定, 高碳数正构烷烃不稳定, 因此随着热演化过程的增加, 高碳数正构烷烃分解形成低碳数正构烷烃, 使得低碳数正构烷烃单体氢同位素组成较轻而高碳数正构烷烃单体氢同位素组成较重。但是热演化需要根据实际情况考虑。准中地区原油所有样品原油均已达到成熟阶段, 通过成熟度参数与 $\delta^2\text{H}$ 关系(图 16e)发现, 以藻类低等水生生物为主的 P_f 来源的原油, $\delta^2\text{H}$ 与成熟度参数之间没有明显关系, 而来自煤系 J_1 烃源

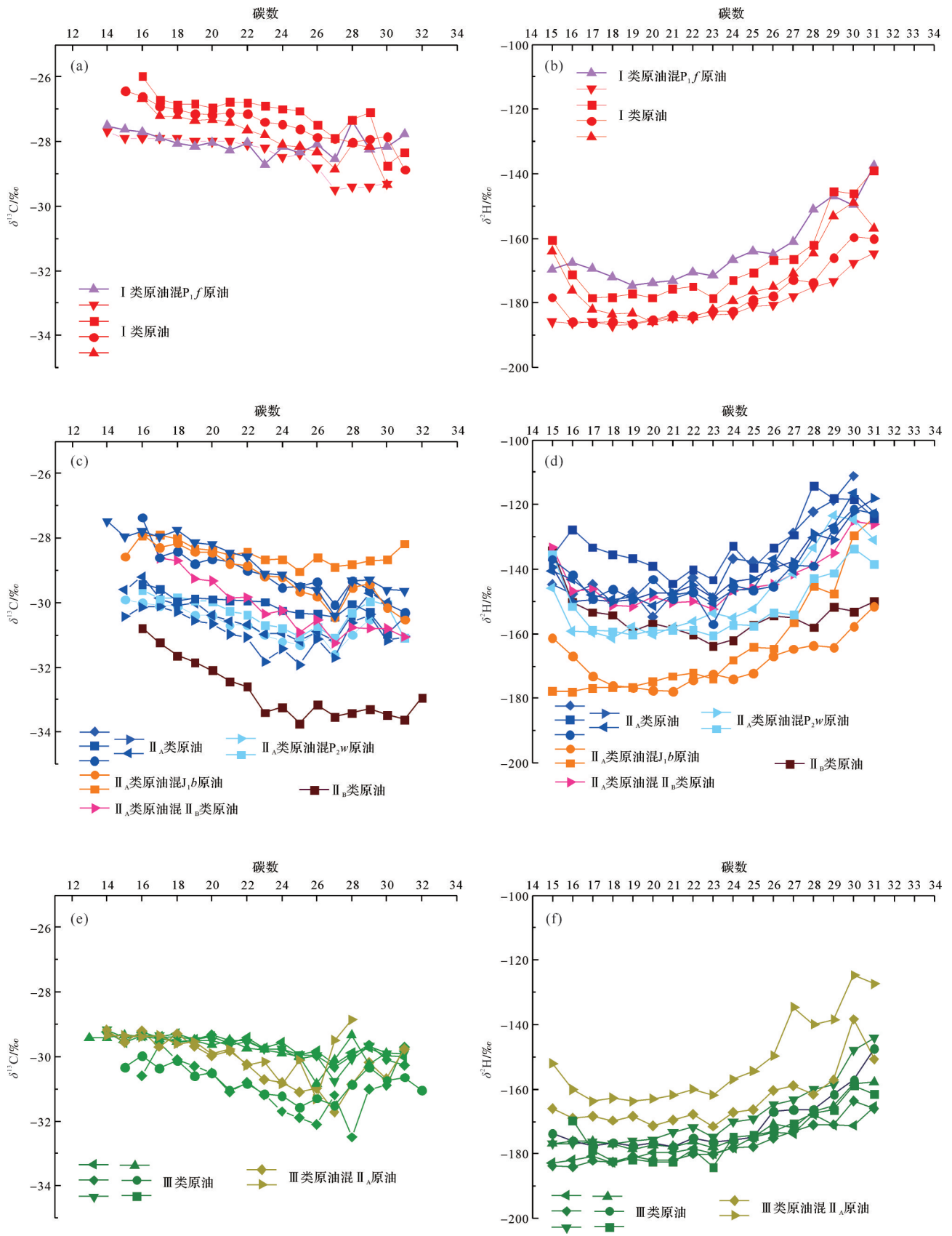


图 14 准中地区不同类型原油正构烷烃碳、氢同位素特征

Fig.14 $\delta^{13}C_{alk}$ and δ^2H_{alk} of different types crude oil in the Junggar Basin hinterland

表5 准中地区原油类型及判别指标
Table 5 Crude oil types and identification criteria in the Junggar Basin hinterland

原油类型	主力油源	$\delta^2H_{alk}/\text{‰}$	$\delta^{13}C_{alk}/\text{‰}$	类异戊二烯	甾烷分布形式与特征指标	萜烷分布形式与特征指标
I类	J ₁ f 烃源岩	δ^2H_{alk} 轻, -187~-139	重, -30.4~-25.9	Pr/Ph: 2.9~5.2; 无 β -胡萝卜素	C_{29} 规则甾烷为主, “V”字型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.13~0.32	三环萜烷含量低, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H < 0.07$; C_{10} TT 优势; $Ga/C_{30}H < 0.06$; $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 大; 0.70~0.88
II _A 类	P ₁ f 烃源岩 (浅水湖相)	δ^2H_{alk} 重, -159~-111	偏重, -30.5~-27.3	Pr/Ph: 1.2~1.5; β -胡萝卜素/ nC_{max} : 0.15~0.97	C_{29} 规则甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.34~0.69	三环萜烷含量较高, $C_{23}TT$ 优势, 上升型或山峰形分布, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H$: 0.24~0.50; $Ga/C_{30}H$: 0.13~0.30
II _B 类	P ₁ f 烃源岩 (深水湖相)	δ^2H_{alk} 偏重, -163~-134	轻, -34.0~-30.8	Pr/Ph: 0.6; β -胡萝卜素/ nC_{max} : 0.27~0.29	C_{29} 甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.19~0.20	三环萜烷含量较低, $C_{23}TT$ 优势, 上升型分布, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H$: 0.13~0.14; $Ga/C_{30}H$ 大; 0.53~0.77; $C_{24}TeT/C_{26}TT$: 0.34~0.35
III类	P ₂ w 烃源岩	δ^2H_{alk} 轻, -184~-144	偏轻, -30.2~-28.9	Pr/Ph: 1.2~1.9; β -胡萝卜素/ nC_{max} : 0.09~1.72	C_{29} 甾烷为主, 上升型分布; (孕甾烷+升孕甾烷)/ C_{29} 规则甾烷: 0.31~0.50	三环萜烷含量较高, $C_{23}TT$ 优势, 上升型分布, 三环萜烷主峰/ $C_{30}H$: 0.17~0.36; $Ga/C_{30}H$ 小; 0.13~0.20; $C_{24}TeT/C_{26}TT$: 0.30~0.46

岩的 I 类原油和来自淡水湖泊陆源有机质为主的 P₂w 烃源岩原油随着 C₂₉20S/(20S+20R) 增大, δ^2H 逐渐偏重, 并且若原油中混有 J₁b 原油也符合这种规律。

6 结论

(1) 准中地区原油正构烷烃呈单峰型分布, 部分原油含有较丰富的 β -胡萝卜素; Pr/Ph 值介于 1.00~2.00, 反映弱氧化—弱还原的沉积水体环境。三环萜烷分布可分为上升型、山峰型和山谷型, 前两类含量较高, 山谷型原油 Ga/C₃₀H 较低。规则甾烷为上升型和“V”字型分布, 前者孕甾烷和升孕甾烷含量高。

(2) 依据准中地区原油正构烷烃氢同位素 (δ^2H_{alk}) 变化范围 (-187‰~-111‰), 可分为四种同位素曲线类型。不同构造单元原油氢同位素特征差异明显: 盆 1 井西凹陷偏轻且随碳数增加逐渐富集; 沙湾凹陷部分井偏轻、部分偏重; 莫南凸起不同层位氢同位素组成不同; 莫索湾地区多数偏重, 仅芳 2 井较轻; 东道海子与阜康凹陷原油 δ^2H_{alk} 轻、 $\delta^{13}C_{alk}$ 重。

(3) 准中地区原油可划分为三种类型: I 类原油源自侏罗系煤系烃源岩 (J₁b), δ^2H_{alk} 轻、 $\delta^{13}C_{alk}$ 重, C₁₉TT 优势, C₂₄TeT 高, 无 β -胡萝卜素, Ga/C₃₀H 低, 规则甾烷呈“V”型; II 类原油源自二叠系风城组 (P₁f), δ^2H_{alk} 重, 三环萜烷含量高, 含 β -胡萝卜素, 规则甾烷为上升型; 可进一步按 Ga/C₃₀H 和同位素特征分为两个亚类; III 类原油源自下乌尔禾组 (P₂w), δ^2H_{alk} 轻, 三环萜烷含量较低, Ga/C₃₀H < 0.3。

(4) 沉积环境是控制原油正构烷烃氢同位素组成的主要因素, 煤系烃源岩 (I 类) δ^2H_{alk} 最轻, 淡水—半咸水环境 (III 类) 较轻, 半咸水—咸水环境 (II 类) 较重。有机质类型也显著影响氢同位素, 细菌/陆源输入参数与 δ^2H_{alk} 负相关, 而藻类输入使其偏重。热演化作用对 J₁b 和 P₂w 原油氢同位素有一定影响, 与成熟度正相关, 但 P₁f 碱湖原油无明显规律。

致谢 感谢中国地质科学院国家地质实验测试中心徐学敏副研究员在实验测试过程中提供的帮助。感谢两位审稿专家在本文修改过程中提出的宝贵意见。

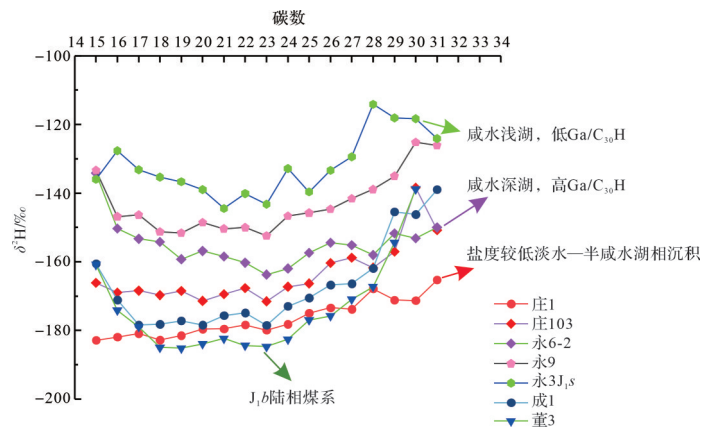


图 15 不同沉积环境正构烷烃氢同位素特征
Fig.15 $\delta^2\text{H}$ of *n*-alkanes in various sedimentary environments

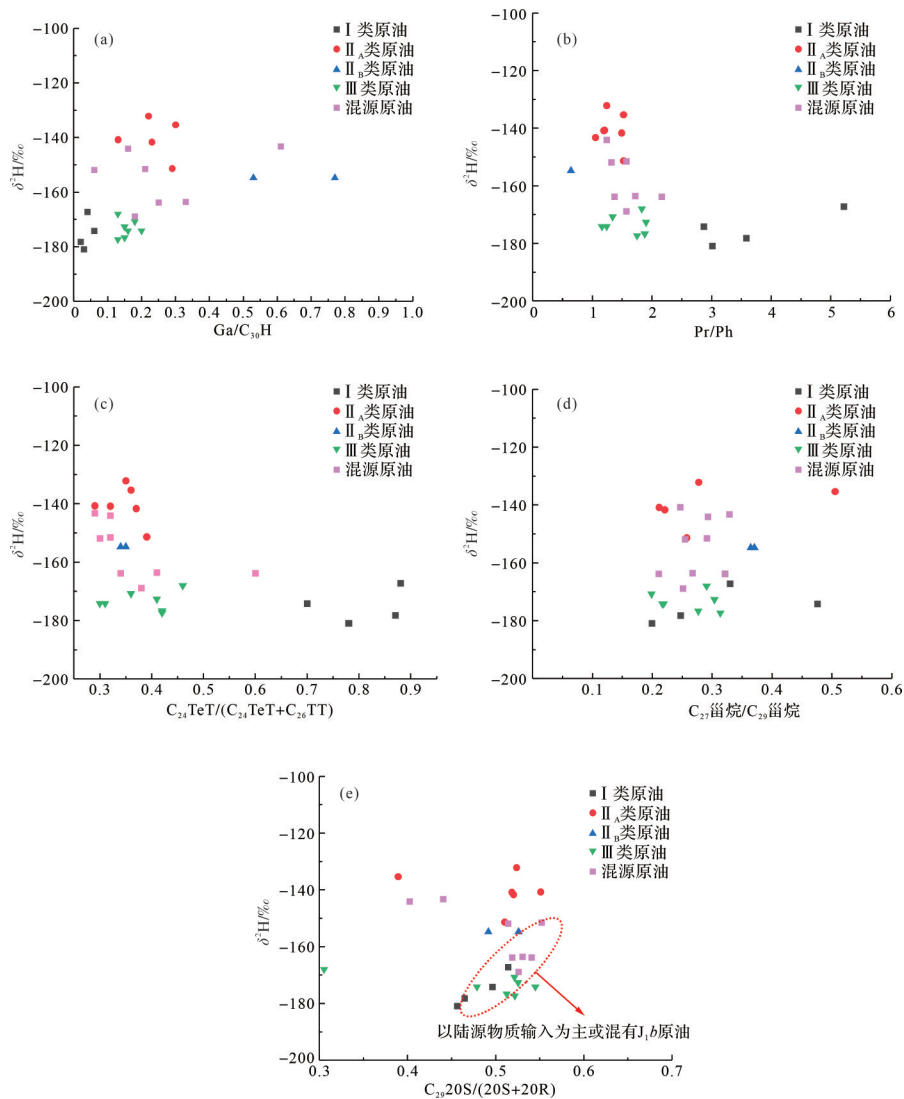


图 16 准中地区不同类型原油正构烷烃加权平均值 $\delta^2\text{H}$ 与生标关系图
(a) $\delta^2\text{H}$ 与 $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ 关系图; (b) $\delta^2\text{H}$ 与 Pr/Ph 关系图; (c) $\delta^2\text{H}$ 与 $\text{C}_{24}\text{TeT}/(\text{C}_{24}\text{TeT}+\text{C}_{26}\text{TT})$ 关系图; (d) $\delta^2\text{H}$ 与 C_{27} 甾烷/ C_{29} 甾烷关系图; (e) $\delta^2\text{H}$ 与 $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$
Fig.16 Plot of $\delta^2\text{H}$ vs. biomarker from the Junggar Basin hinterland
(a) $\delta^2\text{H}$ vs. $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$; (b) $\delta^2\text{H}$ vs. Pr/Ph ; (c) $\delta^2\text{H}$ vs. $\text{C}_{24}\text{TeT}/(\text{C}_{24}\text{TeT}+\text{C}_{26}\text{TT})$; (d) $\delta^2\text{H}$ vs. $\text{C}_{27}\alpha\alpha\alpha\text{R}/\text{C}_{29}\alpha\alpha\alpha\text{R}$; (e) $\delta^2\text{H}$ vs. $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$

参考文献 (References)

- 包建平, 朱翠山, 陈希文, 等. 2018. 珠江口盆地珠一坳陷原油和烃源岩中C₂₄四环萜烷及其成因[J]. 地球化学, 47(2): 122-133. [Bao Jianping, Zhu Cuishan, Chen Xiwen, et al. 2018. C₂₄ tetracyclic terpanes and their origin in crude oils and source rocks from the Zhu 1 Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Geochimica, 47(2): 122-133.]
- 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 2016a. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. 地质学报, 90(1): 37-67. [Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. 2016a. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 90(1): 37-67.]
- 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 2016b. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. 地质学报, 90(3): 421-450. [Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. 2016b. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 90(3): 421-450.]
- 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 等. 2017. 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, 38(2): 311-322. [Chen Zhelong, Liu Guangdi, Wei Yanzhao, et al. 2017. 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, 38(2): 311-322.]
- 段毅, 张辉, 吴保祥, 等. 2003. 柴达木盆地原油单体正构烷烃碳同位素研究[J]. 矿物岩石, 23(4): 91-94. [Duan Yi, Zhang Hui, Wu Baoxiang, et al. 2003. Carbon isotopic studies of individual n-alkanes in crude oils from Qaidam Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 23(4): 91-94.]
- 甘应星, 赵红静, 王志勇, 等. 2025. 三塘湖盆地马朗凹陷芦苇沟组烃源岩β-胡萝卜烷富集主控因素[J]. 沉积学报, 43(4): 1371-1385. [Gan Yingxing, Zhao Hongjing, Wang Zhiyong, et al. 2025. Main controlling factors for Lucaogou Formation β-carotane enrichment in the Malang Sag, Santanghu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(4): 1371-1385.]
- 郭建军, 陈践发, 陈仲宇, 等. 2007. 古隆1井海相地层中高丰度胡萝卜烷的检出及意义[J]. 新疆石油地质, 28(5): 585-588. [Guo Jianjun, Chen Jianfa, Chen Zhongyu, et al. 2007. High abundance carotane from marine strata in well Gulong-1 in Tarim Basin and its geological significance[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 28(5): 585-588.]
- 何登发, 陈新发, 张义杰, 等. 2004. 准噶尔盆地油气富集规律[J]. 石油学报, 25(3): 1-10. [He Dengfa, Chen Xinfu, Zhang Yijie, et al. 2004. Enrichment characteristics of oil and gas in Jungar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 25(3): 1-10.]
- 蒋助生. 1983. 克拉玛依原油中的类胡萝卜烷及其地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 4(2): 151-159. [Jiang Zhusheng. 1983. Perhydro carotenes in Karamay crude oil and their geochemical characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 4(2): 151-159.]
- 寇晨辉. 2017. 准噶尔盆地腹部深层油气来源与成藏模式研究[D]. 南京: 南京大学, 40-46. [Kou Chenhui. 2017. Origins and accumulation model of hydrocarbon in deep strata of the central Junggar Basin, northwestern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 40-46.]
- 李博德, 李美俊, 唐友军, 等. 2022. 烃源岩生物标志化合物分布特征及其地质意义: 以准噶尔盆地腹部地区中二叠统下乌尔禾组为例[J]. 东北石油大学学报, 46(5): 68-82, 105. [Li Bocai, Li Meijun, Tang Youjun, et al. 2022. Distribution characteristics and geological significance of biomarkers in source rocks of Lower Wuerhe Formation of Middle Permian in central Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 46(5): 68-82, 105.]
- 刘刚, 卫延召, 陈桐, 等. 2019. 准噶尔盆地腹部侏罗系—白垩系次生油气藏形成机制及分布特征[J]. 石油学报, 40(8): 914-927. [Liu Gang, Wei Yanzhao, Chen Gang, et al. 2019. Genetic mechanism and distribution characteristics of Jurassic-Cretaceous secondary reservoirs in the hinterland of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(8): 914-927.]
- 刘惠民, 张关龙, 范婕, 等. 2023. 准噶尔盆地腹部征沙村地区征10井的勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 44(5): 1118-1128. [Liu Huimin, Zhang Guanlong, Fan Jie, et al. 2023. Exploration discoveries and implications of well Zheng 10 in the Zhengshacun area of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 44(5): 1118-1128.]
- 刘文锋, 孙德强, 杨朝栋, 等. 2015. 准噶尔盆地腹部石南地区头屯河组岩性地层油气藏成藏特征及成藏模式[J]. 天然气地球科学, 26(12): 2267-2274. [Liu Wenfeng, Sun Deqiang, Yang Chaodong, et al. 2015. Stratigraphic reservoir formation patterns and the favorable zones of stratigraphic/lithological reservoirs in central Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 26(12): 2267-2274.]
- 卢鸿, 李超, 肖中尧, 等. 2004. 轮南油田代表性原油正构烷烃单体氢同位素组成、分布与母源信息[J]. 中国科学: 地球科学, 34(12): 1145-1150. [Lu Hong, Li Chao, Xiao Zhongyao, et al. 2004. Hydrogen isotopic compositions, distributions and source signals of individual n-alkanes for some typical crude oils in Lunnan oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Science China Earth Sciences, 34(12): 1145-1150.]
- 綦艳丽. 2020. 正构烷烃单体烃的氢同位素分析方法及应用[J]. 石油实验地质, 42(2): 319-324. [Qi Yanli. 2020. Method and application of hydrogen isotope analysis of n-alkanes[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42(2): 319-324.]
- 秦黎明, 张枝焕, 杨永才, 等. 2008. 准噶尔盆地中部III区块原油甾烷异常分布特征与成因[J]. 地球科学与环境学报, 30(4): 373-379. [Qin Liming, Zhang Zhihuan, Yang Yongcai, et al. 2008. Abnormal distribution and its origin of steroids in the block III of central Junggar Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 30(4): 373-379.]
- 师肖飞. 2022. 准噶尔盆地中部油气地球化学特征与油气源精细对比[D]. 北京: 中国石油大学(北京): 15-30. [Shi Xiaofei. 2022. Geochemical characteristics of petroleum and oil-source correlation in central Junggar Basin[D]. Beijing: China University of

- Petroleum (Beijing): 15-30.]
- 宋永,唐勇,何文军,等. 2024. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 45(1): 52-68. [Song Yong, Tang Yong, He Wenjun, et al. 2024. New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 45(1): 52-68.]
- 陶国亮,胡文瑄,曹剑,等. 2008. 准噶尔盆地腹部二叠系混源油油源组成与聚集特征研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 44(1): 42-49. [Tao Guoliang, Hu Wenxuan, Cao Jian, et al. 2008. Source composition and accumulation characteristics of Permian mixed oils in central Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 44(1): 42-49.]
- 王保忠,周世新,欧文佳,等. 2014. 准噶尔盆地腹部地区原油单体烷烃、氢同位素组成[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 50(6): 809-815. [Wang Baozhong, Zhou Shixin, Ou Wenjia, et al. 2014. Carbon and hydrogen isotopic compositions of individual n-alkanes from crude oil in the central region of Junggar Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(6): 809-815.]
- 王绪龙,康素芳. 2001. 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, 23(6): 6-8. [Wang Xulong, Kang Sufang. 2001. On the oil source of the Mabei oilfield, northwest Junggar Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 23(6): 6-8.]
- 王绪龙,支东明,王屿涛,等. 2013. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社: 18-342. [Wang Xulong, Zhi Dongming, Wang Yutao, et al. 2013. Source rocks and oil-gas geochemistry in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 18-342.]
- 王屿涛. 1997. 准噶尔盆地腹部陆南凸起原油成因分类及含油有利区预测[J]. 新疆石油地质, 18(3): 225-230. [Wang Yutao. 1997. Genetic classification of oils and prediction of favorable oil-bearing zones in Lunan arch in the hinterland of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 18(3): 225-230.]
- 王作栋,孟仟祥,陶明信,等. 2009. 烃源岩中 C_{19} ~ C_{29} 甾烷系列和25-降藿烷系列的检出及其地质意义[J]. 沉积学报, 27(1): 180-185. [Wang Zuodong, Meng Qianxiang, Tao Mingxin, et al. 2009. Identification of C_{19} - C_{29} steranes and 25-norhopanes in source rock and geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(1): 180-185.]
- 吴小奇,任新成,刘德志,等. 2023. 准噶尔盆地沙湾凹陷东部原油地球化学特征和来源[J]. 石油实验地质, 45(4): 646-655. [Wu Xiaoqi, Ren Xincheng, Liu Dezhi, et al. 2023. Geochemical characteristics and source of crude oil from the eastern Shawan Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 45(4): 646-655.]
- 肖洪,李美俊,杨哲,等. 2019. 不同环境烃源岩和原油中 C_{19} ~ C_{23} 三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. 地球化学, 48(2): 161-170. [Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, et al. 2019. Distribution patterns and geochemical implications of C_{19} - C_{23} tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments[J]. Geochimica, 48(2): 161-170.]
- 赵孟军,黄第藩,张水昌. 1994. 原油单体烃类的碳同位素组成研究[J]. 石油勘探与开发, 21(3): 52-59. [Zhao Menjun, Huang Difan, Zhang Shuichang. 1994. An on-line carbon isotope study of hydrocarbon monomers in crude oils from Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 21(3): 52-59.]
- 朱信旭. 2019. 塔里木盆地寒武—奥陶系烃源岩及深层原油正构烷烃的碳—氢同位素特征[D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 45-70. [Zhu Xinxu. 2019. Carbon and hydrogen isotopic characteristics of n-alkanes in the Cambrian-Ordovician source rocks and deep oils from the Tarim Basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 45-70.]
- Abogila S, Grice K, Trinajstic K, et al. 2010. Use of biomarker distributions and compound specific isotopes of carbon and hydrogen to delineate hydrocarbon characteristics in the East Sirte Basin (Libya) [J]. Organic Geochemistry, 41(12): 1249-1258.
- Asif M, Grice K, Fazeelat T. 2009. Assessment of petroleum biodegradation using stable hydrogen isotopes of individual saturated hydrocarbon and polycyclic aromatic hydrocarbon distributions in oils from the Upper Indus Basin, Pakistan[J]. Organic Geochemistry, 40(3): 301-311.
- Bohacs K M, Carroll A R, Neal J E, et al. 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework[M]//Gierlowski-Kordes E H, Kelts K R. Lake basins through space and time. Houston: AAPG Studies in Geology: 3-33.
- Brocks J J, Schaeffer P. 2008. Okenane, a biomarker for purple sulfur bacteria (Chromatiaceae), and other new carotenoid derivatives from the 1640 Ma Barney Creek Formation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(5): 1396-1414.
- Dawson D, Grice K, Wang S X, et al. 2004. Stable hydrogen isotopic composition of hydrocarbons in torbanites (Late Carboniferous to Late Permian) deposited under various climatic conditions[J]. Organic Geochemistry, 35(2): 189-197.
- Duan Y. 2000. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China[J]. Organic Geochemistry, 31(2/3): 159-167.
- Duan Y, Ma L H. 2001. Lipid geochemistry in a sediment core from Ruergai marsh deposit (eastern Qinghai-Tibet Plateau, China)[J]. Organic Geochemistry, 32(12): 1429-1442.
- Feng C, Lei D W, Qu J H, et al. 2019. Controls of paleo-overpressure, faults and sedimentary facies on the distribution of the high pressure and high production oil pools in the Lower Triassic Baikouquan Formation of the Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 232-248.
- Hu T, Pang X Q, Yu S, et al. 2016. Hydrocarbon generation and expulsion characteristics of Lower Permian P_1f source rocks in the Fengcheng area, northwest margin, Junggar Basin, NW China: Implications for tight oil accumulation potential assessment[J]. Geological Journal, 51(6): 880-900.
- Hughes W B, Holba A G. 1988. Relationship between crude oil quality

- and biomarker patterns[J]. *Organic Geochemistry*, 13(1/2/3): 15-30.
- Jia W L, Chen S S, Zhu X X, et al. 2017. D/H ratio analysis of pyrolysis-released *n*-alkanes from asphaltenes for correlating oils from different sources[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126: 99-104.
- Jia W L, Wang Q L, Peng P A, et al. 2013. Isotopic compositions and biomarkers in crude oils from the Tarim Basin: Oil maturity and oil mixing[J]. *Organic Geochemistry*, 57: 95-106.
- Li M W, Huang Y S, Obermajer M, et al. 2001. Hydrogen isotopic compositions of individual alkanes as a new approach to petroleum correlation: Case studies from the western Canada Sedimentary Basin [J]. *Organic Geochemistry*, 32(12): 1387-1399.
- Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 69(8): 1255-1268.
- Peters K E, Hostettler F D, Lorenson T D, et al. 2008. Families of Miocene Monterey crude oil, seep, and tarball samples, coastal California[J]. *AAPG Bulletin*, 92(9): 1131-1152.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2004. *The biomarker guide* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press: 1-471.
- Powell T G, McKirdy D M. 1973. Relationship between ratio of pristane to phytane, crude oil composition and geological environment in Australia[J]. *Nature Physical Science*, 243(124): 37-39.
- Requejo A G, Hieshima G B, Hsu C S, et al. 1997. Short-chain (C_{21} and C_{22}) diasteranes in petroleum and source rocks as indicators of maturity and depositional environment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2653-2667.
- Samuel O J, Kildahl-Andersen G, Nytoft H P, et al. 2010. Novel tricyclic and tetracyclic terpanes in Tertiary deltaic oils: Structural identification, origin and application to petroleum correlation[J]. *Organic Geochemistry*, 41(12): 1326-1337.
- Schimmelmann A, Sessions A L, Boreham C J, et al. 2004. D/H ratios in terrestrially sourced petroleum systems[J]. *Organic Geochemistry*, 35(10): 1169-1195.
- Sessions A L. 2016. Factors controlling the deuterium contents of sedimentary hydrocarbons[J]. *Organic Geochemistry*, 96: 43-64.
- Tao K Y, Cao J, Wang Y C, et al. 2016. Geochemistry and origin of natural gas in the petroliferous Mahu Sag, northwestern Junggar Basin, NW China: Carboniferous marine and Permian lacustrine gas systems[J]. *Organic Geochemistry*, 100: 62-79.
- Tao S Z, Wang C Y, Du J G, et al. 2015. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 460-467.
- ten Haven H L, de Leeuw J W, Sinninghe Damsté J S, et al. 1988. Application of biological markers in the recognition of palaeohypersaline environments[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 40(1): 123-130.
- Vinnichenko G, Jarrett A J M, van Maldegem L M, et al. 2021. Substantial maturity influence on carbon and hydrogen isotopic composition of *n*-alkanes in sedimentary rocks[J]. *Organic Geochemistry*, 152: 104171.
- Wang G L, Chang X C, Wang T G, et al. 2015. Pregnanes as molecular indicators for depositional environments of sediments and petroleum source rocks[J]. *Organic Geochemistry*, 78: 110-120.
- Woodhouse A D, Oung J N, Philp R P, et al. 1992. Triterpanes and ring-A degraded triterpanes as biomarkers characteristic of Tertiary oils derived from predominantly higher plant sources[J]. *Organic Geochemistry*, 18(1): 23-31.
- Yu S, Wang X L, Xiang B L, et al. 2017. Molecular and carbon isotopic geochemistry of crude oils and extracts from Permian source rocks in the northwestern and central Junggar Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 113: 27-42.
- Zhang Y D, Sun Y G, Liu Q. 2021. Distribution and carbon isotope composition of pregnane in carbonate-evaporitic rocks from the Bonan Sag, Bohai Bay Basin, eastern China: Insights into sources and associated lake environments[J]. *Organic Geochemistry*, 151: 104127.
- Zhang Z D, Gu Y L, Jin J, et al. 2022. Assessing source and maturity of oils in the Mahu Sag, Junggar Basin: Molecular concentrations, compositions and carbon isotopes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 141: 105724.

Molecular Isotope ($\delta^2\text{H}$) Composition Traits and Geological Significance of Mixed-Source Crude Oil *n*-alkanes in the Junggar Basin Hinterland, NW China

CHEN XuanYu¹, CHEN JianFa¹, SHI XiaoFei², WANG ZiGen¹

1. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co. CNOOC Central Laboratory (Shanghai), Shanghai 200941, China

Abstract: [Objective] The geological conditions in the Junggar Basin hinterland are diverse, and the crude oil properties are complex. To address the issues of crude oil type classification and oil and gas source identification in this area, a study was conducted on the hydrogen isotopic characteristics of *n*-alkanes ($\delta^2\text{H}_{\text{alk}}$) in the mixed-source crude oils from the Junggar Basin hinterland. [Methods] Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), Gas Chromatography-Isotope Ratio Mass Spectrometry (GC-IRMS) and Gas Chromatography-Thermal Conversion-Isotope Ratio Mass Spectrometry (GC-TC-IRMS) techniques were employed to analyze biomarker compounds and conduct hydrogen isotope analysis of *n*-alkane monomers in 33 crude oil samples from different strata. [Results] Three types of crude oil were identified in the Junggar Basin hinterland: Type I originated from the Jurassic coal-bearing source rocks (J_1b), with the lightest hydrogen isotopic composition due to the significant input of terrestrial higher-plant organic matter; Type II mainly originated from the Permian Fengcheng Formation source rocks (P_f), with Type II_A derived from lacustrine sedimentary environments in transitional marine-terrestrial settings, featuring a low Ga/C₃₀H ratio and relatively heavy hydrogen isotopic composition, while Type II_B had a lighter hydrogen isotopic composition and a higher Ga/C₃₀H ratio; Type III crude oil mainly originated from the Permian Lower Wuerhe Formation source rocks (P_{2w}), with a light hydrogen isotopic composition of *n*-alkanes. [Conclusions] The combination of hydrogen isotopic analysis of *n*-alkanes and biomarker compound analysis is able to precisely classify crude oil types and clarify their sources, which is highly significant for oil source tracking and crude oil classification throughout the Junggar Basin.

Key words: Junggar Basin hinterland; hydrogen isotope of normal alkane; biomarker; mixed source crude oil classification; factors affecting hydrogen isotope