

引用格式:王学军,张学军,罗欢,等.碳同位素分馏效应对深层原油来源判识的影响[J].油气地质与采收率,2024,31(4):154-163.

WANG Xuejun, ZHANG Xuejun, LUO Huan, et al. Influences of carbon isotope fractionation effects on identification of deep crude oil sources[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 154-163.

碳同位素分馏效应对深层原油来源判识的影响

王学军^{1,2,3}, 张学军^{1,3}, 罗欢^{1,4}, 王茹¹, 林璐¹, 翟正^{1,3}, 康元勇¹

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 山东东营 257015; 3. 东营市油气成藏地球化学重点实验室, 山东东营 257015; 4. 中国石化胜利石油管理局有限公司博士后科研工作站, 山东东营 257000)

摘要: 深层烃源岩演化程度高, 随成熟度升高, 原油中生物标志化合物含量大幅度减少, 影响了利用常规生物标志化合物参数进行油源对比的可靠性。针对如何更好地利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行深层原油来源判识, 通过渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷烃源岩自然演化剖面中可溶有机质、烃源岩生排烃物理模拟实验产物4种族组分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的分析, 结合烷烃质量分数特征, 探讨了深层烃源岩原油碳同位素分馏效应, 提出利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行深层原油来源判识的工作思路和方法。深层烃源岩因高热演化程度而产生的碳同位素分馏效应是明显的, 烃源岩可溶有机质的烷烃、芳烃、非烃和沥青质4种族组分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值随埋深的增加均发生了明显增大现象, 其中烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化最明显, 达5‰以上, 芳烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值约为4‰, 非烃和沥青质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的变化相对较小, 约为2‰~3‰。随埋深的增加可溶有机质中烷烃质量分数由40%左右增至80%以上, 相应烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值由-30‰左右增至-24‰以上, 且烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的变化有很好相关性。同一类型烃源岩样品生排烃物理模拟产物族组分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值也显示了相似的结果, 烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的变化幅度最大可达4‰, 而芳烃、非烃、沥青质的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化相对较小, 约为1‰~3‰。利用碳同位素进行深层原油来源判识时, 首先根据烷烃质量分数与烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的相关性判断是否存在热演化造成的碳同位素分馏效应, 并对烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行合理恢复, 然后再利用恢复后的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行原油来源的合理判识。依照上述方法对准噶尔盆地西缘车排子凸起轻质油来源进行了判识, 轻质油的碳同位素明显存在热演化造成的分馏效应, 轻质油源自深部二叠系高成熟烃源岩的可能性很大, 这对该地区油气勘探目标评价部署工作具有重要实践意义。

关键词: 深层; 高成熟原油; 碳同位素分馏; 原油来源; 车排子轻质油

文章编号: 1009-9603(2024)04-0154-10

DOI: 10.13673/j.pgre.202312011

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Influences of carbon isotope fractionation effects on identification of deep crude oil sources

WANG Xuejun^{1,2,3}, ZHANG Xuejun^{1,3}, LUO Huan^{1,4}, WANG Ru¹, LIN Lu¹, ZHAI Zheng^{1,3}, KANG Yuanyong¹

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. Key Laboratory of Geochemistry for Oil and Gas Accumulation in Dongying City, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 4. Postdoctoral Work Station of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: Deep source rocks undergo high degrees of evolution, leading to a significant decrease in biomarker content in crude oil as maturity increases. The decrease affects the reliability of the oil source correlation with conventional biomarker parameters. To

收稿日期: 2023-12-12。

作者简介: 王学军(1966—), 男, 山东荣成人, 正高级工程师, 博士, 从事油气勘探综合研究。E-mail: wangxuejun977.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”下属课题“渤海湾盆地剩余油气资源潜力研究”(2016ZX05006-001), 中国石化油气勘探开发重大项目“东部富油气凹陷及周缘资源评价”(P23234)。

better use the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ value for identifying deep crude oil sources, authors analyzed the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of four group components in the soluble organic matter from naturally evolved source rock profiles in Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohaiwan Basin and the products of physical experiments on hydrocarbon generation and expulsion. Considering the relative content of alkane, authors discussed the carbon isotope fractionation effects in the crude oil from deep source rock. Additionally, authors proposed the working thought and procedure for identifying the source of deep oil with the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values. The carbon isotope fractionation effects resulting from high thermal maturity are obvious in deep source rocks. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of the four group components of soluble organic matter from source rocks (alkane, aromatics, non-hydrocarbon, and asphaltene) exhibit a significant elevation with increasing burial depth. Specifically, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of alkane exhibit the most pronounced change, exceeding 5‰, while aromatics show a change of around 4‰. The changes in the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ value of non-hydrocarbon and asphaltene are relatively small, ranging from 2‰ to 3‰. As burial depth increases, the alkane contents in soluble organic matter increase from around 40% to over 80%. Correspondingly, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of alkane increase from around -30‰ to over -24‰, and the alkane contents show a great correlation with the variations of its $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values. Similar results can also be observed from the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of group components from physical experiments on hydrocarbon generation with the same type of source rock samples. In these experiments, the variations in the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of alkane can reach 4‰, while those in aromatics, non-hydrocarbon, and asphaltene are relatively low, ranging from 1‰ to 3‰. When utilizing carbon isotopes to identify the source of deep oil, it is essential to first check the correlation between alkane contents and their $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values to identify if the carbon isotope fractionation effects derived from thermal maturation exists. Subsequently, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of alkane should be properly recovered before utilizing it to identify the source of the oil. According to the abovementioned methods, authors identified the source of light oil from Chepaizi Uplift in the Western region of Junggar Basin. It confirmed the presence of carbon isotope fractionation effects in the light oil derived from thermal evolution. It shows a great possibility that the light oil is sourced from the underlying high-maturity source rock of the Permian, which is of important practical significance in the evaluation and deployment of the petroleum exploration target in this area.

Key words: deep formation; high-mature oil; carbon isotope fractionation; source of crude oil; light oil in Chepaizi area

随着勘探程度的增加、勘探理论的发展和勘探技术的进步,深层已成为各油公司寻找油气资源新的攻关方向及新的油气增储领域^[1-10]。通过精细的油源对比明确烃类来源,圈定有效烃源岩及油气运移方向,对深化深层油气成藏规律认识、预测资源潜力、优选勘探有利目标区具有重要的实践意义^[11-13]。

深层烃源岩演化程度高,随成熟度升高,原油中生物标志化合物含量大幅度减少,影响了利用常规生物标志化合物参数进行油源对比的可靠性。因此,碳同位素分析技术就被更多地用于深层的油源对比研究^[11-12, 14-19]。一般来讲,烃源岩可溶有机质的碳同位素组成与其母质来源和沉积环境等密切相关,并直接影响所生成油气的碳同位素组成特征。同种类型有机质的碳同位素在有机质热演化过程中因分馏作用会发生一定程度的改变^[20-22],随成熟度的升高,天然气组分的碳同位素分馏作用明显^[23-25],而原油族组分的碳同位素分馏作用研究却相对较少,且不同学者对其认识存在差异。TISSOT等认为,干酪根裂解所产烃类 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值往往比其自身的要小^[26]。BJOR等热解实验证明,石油中单体化合物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值随成熟度升高而增加^[27]。CLAYTON等认为液态烃类的生成只会对原油 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值造成比较微弱的影响(接近1‰),随成熟度

进一步增加而导致的二次裂解过程可导致原油 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值增加3.5‰^[28-29]。

为研究不同类型烃源岩和原油热演化过程中碳同位素的分馏程度,国内学者进行了模拟实验^[22, 30-34]。张文正通过对不同地区的煤和烃源岩热模拟分析发现,成熟过程对烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的影响程度高达5‰,对芳烃、非烃和沥青质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的影响相对较小,分别只有1.9‰、2.4‰和1.8‰^[22]。王新洲等进行生排烃物理模拟实验,对实验产物氯仿沥青“A”族组分碳同位素进行分析,发现在烃源岩模拟成熟度 R_o 从0.42%升至1.1%过程中,实验产物族组分中烷烃和芳烃的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值约增加2.5‰~3.0‰^[34]。

如何更好地利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行深层原油来源判识?笔者通过东营凹陷自然演化剖面烃源岩的可溶有机质、烃源岩生排烃物理模拟实验产物族组分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分析,探讨碳同位素的分馏效应,提出利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行深层原油来源判识的工作思路和方法,对今后开展深层高演化程度条件下原油来源判识具有借鉴意义。

1 自然演化过程中的碳同位素分馏

自然条件下的烃源岩生排烃为一个近似开放

的环境,在烃源岩不同演化阶段形成的烃类会发生一定程度的初次运移,进入运载体后发生二次运移成为常规油藏,滞留在烃源岩内达到一定规模的就可能成为页岩油资源。对滞留在烃源岩中的烃类碳同位素特征的解剖很大程度上能代表源于该套烃源岩油气的碳同位素特征。

1.1 烷烃碳同位素特征

东营凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷的次一级构造单元,自下而上发育C-P、Ek、Es₄、Es₃^x等多套烃源岩,其中Es₄和Es₃^x是主力烃源岩。对2套主力烃源岩可溶有机质中族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值进行统计分析,发现随埋深增加(埋深越大,烃源岩有机质成熟度也

越高,所以常用烃源岩埋深代替有机质成熟度),烷烃、芳烃、非烃和沥青质4种族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值都发生一定的变化。由图1可见,无论是哪套烃源岩,埋深在3 000 m以浅,族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值相对稳定;当埋深为3 000~4 500 m(研究区此埋深条件下,烃源岩中有机质已达到中高成熟演化阶段),族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值发生明显变化。对比4种族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值发现,埋深(成熟度)对烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的影响更大, $\delta^{13}C_{PDB}$ 中值由-30‰左右增至-24‰以上;对芳烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的影响次之, $\delta^{13}C_{PDB}$ 中值由-28‰左右增至-23‰左右;非烃和沥青质 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的变化相对较小, $\delta^{13}C_{PDB}$ 中值变化一般为2‰~3‰。可见,由于较大埋深(也

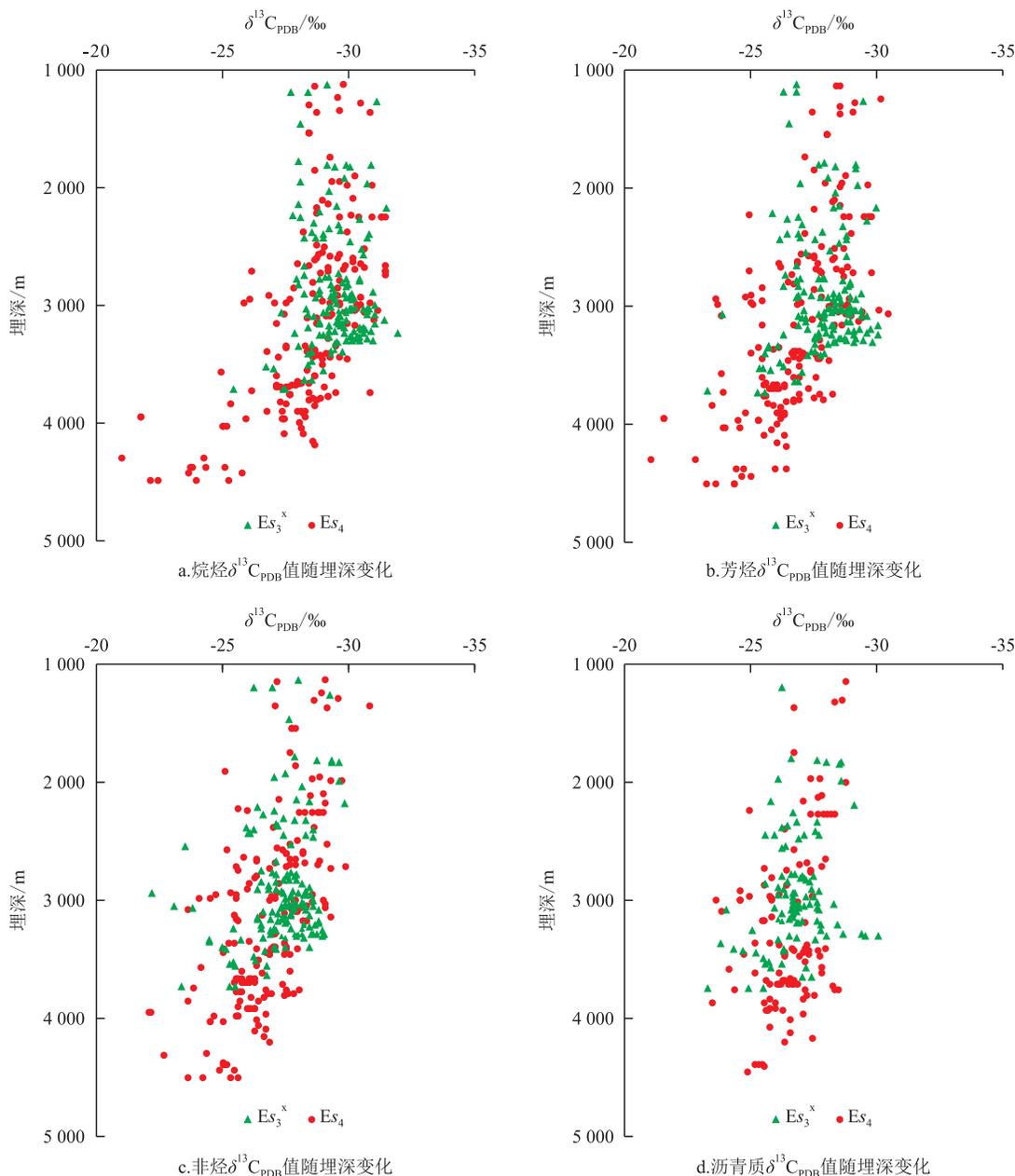


图1 东营凹陷烃源岩可溶有机质族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值随埋深变化
 Fig.1 Variation of $\delta^{13}C_{PDB}$ values of group components in soluble organic matters from source rocks in Dongying Sag with burial depth

就是高成熟度)因素导致的深层烃源岩可溶有机质族组分中烷烃碳同位素分馏效应是非常明显的。应用深层高演化条件下族组分中烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值进行原油来源判识时,如果不考虑碳同位素的分馏效应,在进行深层原油来源判识时会产生误判。

1.2 族组分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值演化规律

为解决碳同位素分馏效应对深层原油来源判识的影响,研究了自然演化过程中高成熟作用对深层高成熟原油 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的影响程度。为排除其它地质因素的影响,选取同一构造带、相近沉积环境、纵向埋深变化较大的东营凹陷北部民丰地区进行解剖,深度为2 800~4 500 m,对 $\text{E}_{\text{S}_3^x}$ — $\text{E}_{\text{S}_4^s}$ 的湖相烃源岩可溶有机质进行分析,干酪根类型主要为I型,个别为II型,镜质组反射率(R_o)约为0.5%~1.2%,族组分中烷烃质量分数及其碳同位素分析结果如表1。

分析民丰地区烃源岩可溶有机质烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值随埋深变化关系(图2a)可见,在干酪根类型相同或相近的情况下,烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值由3 000 m左右的-30‰~-29‰增至4 500 m的-25‰~-22‰,表明随埋深增加,有机质进入较高成熟演化阶段,对可溶有机质中烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的影响很大,尽管不同地区可能会存在一定的差异,但是深层有机质高成熟度对烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的影响显然是不容忽视的。

由烷烃质量分数随埋深变化(图2b)可见,随烃源岩埋深(成熟度)的增加,烃源岩可溶有机质中的烷烃质量分数不断增加,在埋深大于3 500 m的深层中,烷烃质量分数普遍大于50%。由烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的关系(图3)可见,两者呈明显正相关。图1中烷烃与芳烃的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值在埋深大于3 500 m时均存在明显拐点。这可以作为判断自然演化过程中有机质深层(高成熟度)导致烷烃碳同位素发生明显分馏的直接证据。

2 生排烃演化过程中的碳同位素分馏

2.1 样品有机地球化学特征

为进一步验证生排烃演化过程对原油碳同位素的影响,选择3块样品进行生排烃物理模拟实验。样品的有机质丰度都较高,有机碳含量均大于1%,氯仿沥青“A”含量都大于0.06%,属于好烃源岩;样品的有机显微组分以腐泥组为主,占比约90%以上,干酪根类型为I型,有机质成熟度较低, R_o 最大

表1 民丰地区沙河街组烃源岩部分有机地化分析结果
Table 1 Partial organic geochemical analysis of source rocks from Shahejie Formation in Minfeng area

井名	深度/m	烷烃质量分数/%	烷烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$R_o/\%$	干酪根类型
F8	3 131.50	47.63	-30.907	0.52	I
F8	3 163.90	52.99	-29.901	0.59	I
F8	3 402.21	62.86	-28.629	0.65	I
F8	3 403.40	57.62	-28.562	0.70	I
F8	3 947.00	73.81	-21.725	0.76	I
FS1	2 868.60	40.29	-29.340	0.51	II ₂
FS1	3 215.80	42.60	-30.663	0.56	II ₁
FS1	3 440.20	46.96	-28.523	0.57	I
FS1	3 444.05	57.06	-29.241	0.57	I
FS1	3 685.60	50.54	-27.863	0.58	I
FS1	3 687.50	46.86	-27.668	0.55	I
FS1	3 690.00	52.45	-27.573	0.63	I
FS1	3 760.50	53.55	-27.611	0.62	I
FS1	3 762.80	52.67	-27.634	0.62	I
FS1	3 915.20	45.96	-28.132	0.99	I
FS1	4 023.90	73.07	-24.956	1.00	I
FS1	4 026.90	70.70	-25.144	1.01	I
FS2	3 967.80	80.53	-27.306	0.93	II ₁
FS2	3 970.78	79.90	-27.418	1.00	I
FS2	3 972.29	75.65	-27.365	0.98	I
FS2	3 972.54	80.11	-25.893	0.95	I
FS2	4 295.28	83.53	-24.236	1.14	I
FS2	4 300.92	87.47	-21.049	1.17	II ₁
FS2	4 498.18	79.26	-22.430	1.13	I
FS2	4 499.22	80.98	-25.178	1.14	I
FS2	4 499.80	76.53	-22.135	1.14	I
FS2	4 501.25	64.49	-23.947	1.24	I

值为0.53%(表2)。

2.2 实验条件

样品准备 3块样品分别研磨至80目,再将每块样品均分为4份,分别称取重约250 g的样品与水以质量比5:1混合,装入模拟釜内,在封闭条件下进行实验。

温压条件 ①模拟实验分4个温度段进行,初始温度均为室温,每个温阶(即每块样品分成的4份样品的模拟终止温度)相差50℃,分别为250、300、350和400℃。②压力设定为样品所处地层深度的静岩压力,其中1#样品压力为59 MPa,2#样品压力为63 MPa,3#样品压力为51 MPa。

实验步骤 ①实验过程采取一次性升温,即将

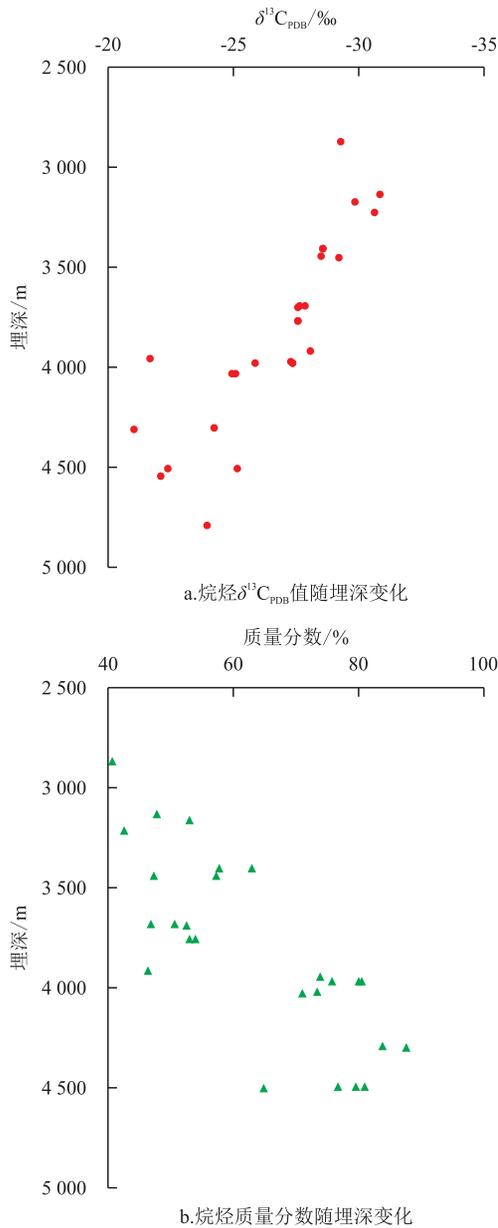


图2 民丰地区烃源岩可溶有机质烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值及其质量分数随埋深变化关系
 Fig.2 Variation of $\delta^{13}C_{PDB}$ values of alkane from source rocks in Minfeng area and its mass fraction in soluble organic matters with burial depth

每份样品均以 25 °C/min 的升温速率分别从室温升到所设定的模拟温度,并恒温 48 h,代表 4 个不同温度段的模拟过程。②实验产物分气体、液体、固体 3 部分采集,产物中气体与液体同时排出,排出后收集并进行分离,气体用排饱和食盐水法收集,玻璃瓶装;液体是油水混合物,用二氯甲烷进行萃取,放入坩锅内使二氯甲烷自然挥发,剩余的有机可溶物作为模拟实验的排出油进行族组分碳同位素分析。

2.3 排出油族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值特征

烃源岩生排烃物理模拟实验的排出油族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值在不同演化阶段均有明显变化,但存在一

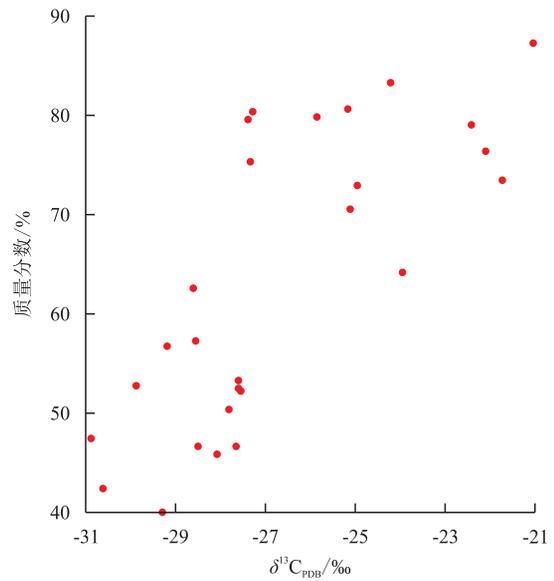


图3 民丰地区烃源岩可溶有机质烷烃质量分数与其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值关系
 Fig.3 Relationship between mass fractions and its $\delta^{13}C_{PDB}$ values of alkane in soluble organic matters from source rocks in Minfeng area

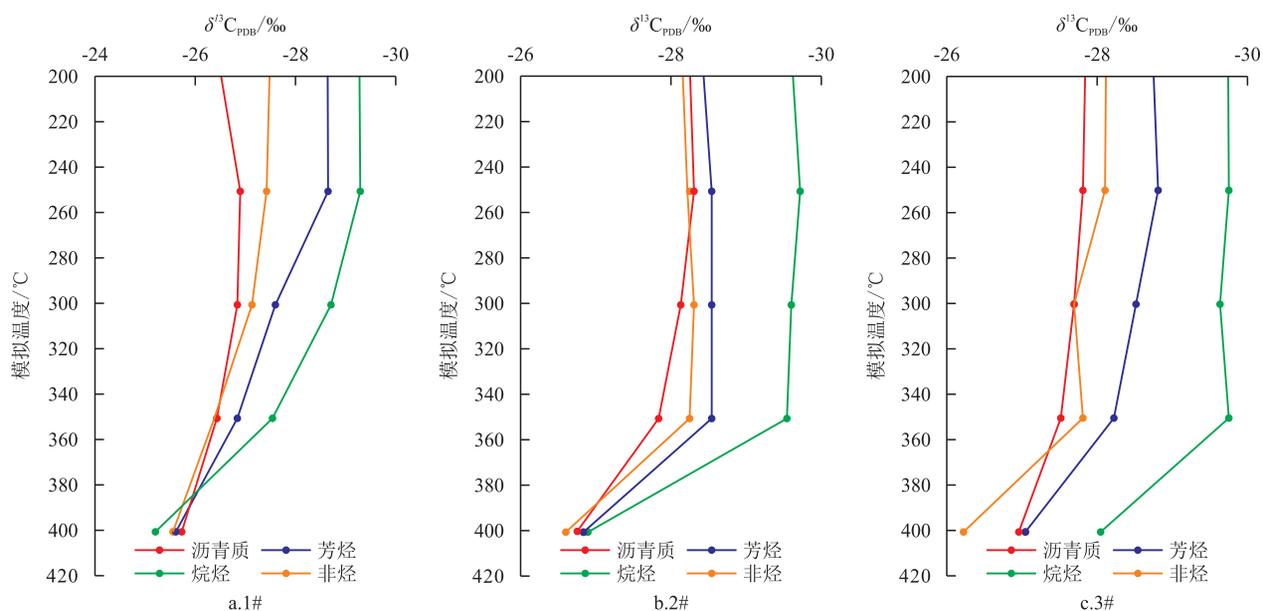
表2 样品的有机地球化学特征
 Table2 Geochemistry characteristics of samples

样品编号	层位	岩性	TOC/%	氯仿沥青“A”/%	干酪根类型	R_o /%
1#	Es ₄	泥岩	6.69	0.192 5	I	0.47
2#	Ek ₂	泥岩	5.43	0.245 5	I	0.53
3#	Ek ₂	泥岩	1.80	0.083 5	I	0.31

定差异(图4)。由图4可见,总体趋势是模拟温度小于 350 °C,各族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化不明显或缓慢升高,温度为 350 ~ 400 °C 时各族组分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值快速增大。

不同族组分演化过程 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化略有差异,烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化最明显,高达 4.0‰;芳烃、非烃和沥青质 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化相对弱一些,不同样品变化量为 1‰ ~ 3‰。

因生排烃物理模拟以温度补偿时间的理论差异,以及排烃方式与自然演化过程的不同,可能导致碳同位素分馏效应的差异。自然演化剖面上,在烃源岩进入排烃阶段后,基本上是一个相对开放或半封闭半开放的排烃体系,而生排烃物理模拟实验是各阶段生成的烃类最终混合排出,是一个封闭的排烃体系,这可能会使得自然演化过程中不同成熟阶段所形成的烃类碳同位素差异更大。自然演化与物理模拟实验相比,到达同样成熟阶段所经历的温度条件要低很多,自然演化所造成的分馏效应又可能比物理模拟实验结果偏低。尽管如此,生排烃

图4 排出油族组分的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值随模拟温度变化Fig.4 Variation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of expulsion oil with temperatures in thermal simulation experiment

物理模拟实验结果与自然演化剖面分析结果都显示了相似的变化规律,即深层有机质高成熟对深层原油族组分中烷烃碳同位素分馏的影响是显著的。深层有机质高成熟阶段以后,原油大多是以烷烃为主要组分的轻质油和凝析油,在利用烷烃碳同位素特征进行原油来源判识时,要充分考虑这种分馏效应的影响。

3 实例应用

3.1 区域概况

准噶尔盆地是一个晚石炭世—第四纪沉积的复合型叠合盆地,存在二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系等多套烃源岩,其中公认的二叠系主力烃源岩埋深最高达万米以上,盆地内深层来源高成熟油气丰富,从各烃源岩层的生烃史及分布研究来看,石炭系、二叠系以及侏罗系烃源岩对盆地油气聚集贡献最大^[35-37]。多套烃源岩发育,增加了深层油源判识的难度。

车排子凸起是准噶尔盆地西缘的二级构造带,远离烃源岩发育区,P2、P2-30等井发现轻质油的来源尚存在较大争议,包括侏罗系烃源岩单油源、侏罗系烃源岩为主但遭受白垩系烃源岩的浸析作用、侏罗系煤系烃源岩与古近系烃源岩混源、侏罗系煤系烃源岩与二叠系烃源岩混源、二叠系高过成熟烃源岩等认识^[38-42]。

总体来看,大部分研究认为车排子凸起轻质油以侏罗系来源为主,混入其他层系烃源岩的贡献。

这主要是车排子凸起轻质油生物标志化合物特征与周边凹陷主要烃源岩特征均有所不同,但其碳同位素特征与侏罗系原油的相近。鉴于碳同位素分馏效应对油气来源判识的影响,有必要进行重新认识。

3.2 烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值相关性

为进一步明确车排子凸起轻质油来源,利用原油族组分和碳同位素分析测试资料,对未发生严重降解的原油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的关系进行分析(图5)。由图5可见,两者有明显的正相关性。原油族组分中烷烃质量分数绝大部分大于50%(P2井区轻质油烷烃质量分数大于70%),且在烷烃质量分数由40%增至90%左右的过程中,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值由-33‰增至-28‰以上,烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值的同步增大现象不能仅仅依靠原油来源不同及原油混源来解释。结合前文分析不难看出,这种现象应该与深层有机质高成熟造成的碳同位素分馏效应密切相关。

3.3 轻质油来源探讨

准噶尔盆地二叠系成熟阶段烃源岩可溶有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值较小,多为-30‰~-29‰,而侏罗系烃源岩可溶有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值则较大,一般为-28‰~-26‰。P2井区轻质油的全油 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为-27.9‰~-26.3‰,这常被认为是P2井区轻质油来源于侏罗系烃源岩的依据,如果不考虑其他因素,这种结论也是可以接受的。而综合族组分中烷烃质量分数、有机质热演化程度等因素发现,这一关于轻质油来源于侏罗系烃源岩的认识值得商榷。

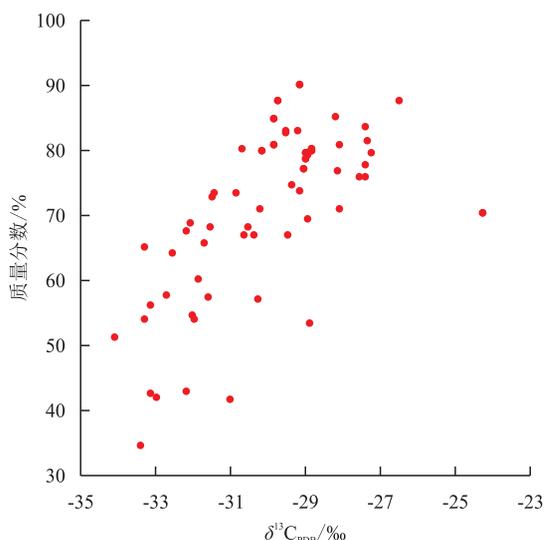


图5 车排子凸起原油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的关系

Fig.5 Relationship between mass fractions of alkanes and its $\delta^{13}C_{PDB}$ values in oil group components of crude oil from Chepaizi uplift

一方面,从车排子凸起部分轻质油族组分质量分数及烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值(表3)看,族组分中烷烃质量分数均为70%以上,非烃质量分数相对较低,不含沥青质,这种轻烃类相对较高和不含沥青质性质是高成熟油气的典型特征^[43]。

另一方面,张学军等通过对该地区轻质油的金刚烷和甲基菲进行轻质油等效镜质组反射率研究,认为轻质油的成熟度为1.2%~1.6%,是深层来源的高成熟原油^[38],而目前钻井揭示的车排子凸起邻区侏罗系烃源岩有机质热演化程度最高的 R_o 值仅为0.6%~0.8%。由此可见,高成熟原油的认识与高烷烃质量分数的特征更具一致性。这种高演化程度特征影响轻质油烷烃碳同位素分馏,所以仅利用碳同位素特征进行原油来源判识,可能会造成原油来

表3 车排子凸起部分轻质油族组分质量分数与烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值

井号	烷烃质量分数/%	芳烃质量分数/%	非烃质量分数/%	沥青质量分数/%	烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$
C907	77.31	17.43	5.26	-	-27.87
C95开1	76.83	17.46	5.71	-	-27.87
P2	81.43	13.33	5.24	-	-27.60
P2-30	87.53	8.83	3.64	-	-27.33
P2-40	88.05	7.86	4.09	-	-27.48
P2-86	71.34	18.29	10.37	-	-28.67
P8-20	83.90	11.46	4.64	-	-26.25

源的误判。

为确定车排子凸起轻质油碳同位素特征是否受有机质高成熟分馏效应的影响,对其轻质油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的相关性(图6)进行了分析。由图6可见,P2井区轻质油族组分中烷烃质量分数及 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值与重质油的差异较大,重质油来源为二叠系烃源岩成熟阶段油气^[44-45],考虑有机质高成熟对烷烃碳同位素分馏效应的影响,按照车排子凸起原油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的关系进行烷烃碳同位素恢复,P2井区轻质油对应烃源岩可溶有机质族组分中烷烃 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值达到-31‰左右,这与该地区目前获得的二叠系烃源岩可溶有机质 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值基本一致,因此,车排子凸起轻质油来源于二叠系烃源岩可能性更大,不能轻易排除沙湾凹陷、山前断冲带二叠系高成熟烃源岩的贡献,建议进行生物标志化合物绝对定量分析,以获得更为客观的认识。若上述认识是正确的,则将对成藏规律及目标优选有重要意义。

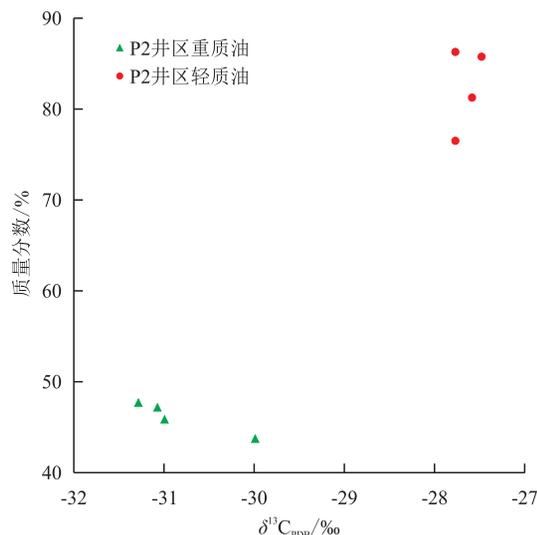


图6 车排子凸起轻质油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值的关系

Fig.6 Relationship between mass fractions of alkanes in group components and their $\delta^{13}C_{PDB}$ values of light oil from Chepaizi uplift

4 结论

(1)随演化程度的增加,深层高演化程度烃源岩中可溶有机质及原油族组分的碳同位素都发生一定程度的分馏,这种分馏效应是有机质高成熟造成的,烷烃碳同位素的分馏效应相对更为明显。使用原油碳同位素资料对深层高成熟原油进行油源判识时,应充分考虑有机质高成熟情况下产生的碳

同位素分馏效应。

(2)深层烃源岩中可溶有机质及原油族组分中烷烃质量分数与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值有较好的相关性,利用其相关特征可确定原油是否存在有机质高成熟引起的碳同位素分馏效应及分馏程度的大小,据此更为准确判定深层原油的来源,从而为深层油气成藏研究、目标评价及井位部署提供更为合理的理论依据。

(3)准噶尔盆地西缘车排子凸起轻质油虽然 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值相对较大,但族组分中烷烃质量分数都较高,不能排除是有机质高成熟导致的碳同位素分馏效应所致,该地区轻质油来源于深层二叠系烃源岩的可能性更大。

参考文献

- [1] 尚墨翰,赵向原,曾大乾,等. 深层海相碳酸盐岩储层非均质性研究进展[J]. 油气地质与采收率,2021,28(5):32-49.
SHANG Mohan, ZHAO Xiangyuan, ZENG Daqian, et al. Research progress on heterogeneity of deep marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 32-49.
- [2] 陈桂华,吴光焕,全宏,等. 深层低渗透敏感稠油油藏降黏引驱技术研究及应用——以胜利油区王家岗油田王152块为例[J]. 油气地质与采收率,2021,28(6):114-121.
CHEN Guihua, WU Guanghuan, QUAN Hong, et al. Research and application of technology of viscosity reduction induced flooding in deep, low-permeability and sensitive heavy oil reservoirs: A case of Block Wang152 of Wangjiagang Oilfield in Shengli Oil Province [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 114-121.
- [3] 徐珂,张辉,刘新宇,等. 库车坳陷深层裂缝性储层现今地应力特征及其对天然气勘探开发的指导意义[J]. 油气地质与采收率,2022,29(2):34-45.
XU Ke, ZHANG Hui, LIU Xinyu, et al. Current in-situ stress characteristics of deep fractured reservoirs in Kuqa Depression and its guiding significance to natural gas exploration and development [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 34-45.
- [4] 张钰祥,杨胜来,李强,等. 应力对超深层碳酸盐岩气藏孔喉结构的影响[J]. 油气地质与采收率,2023,30(1):49-59.
ZHANG Yuxiang, YANG Shenglai, LI Qiang, et al. Effects of stress on pore and throat structures of ultra-deep carbonate gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 49-59.
- [5] 吴鲜,李丹,朱秀香,等. 塔里木盆地顺北油气田地温场对奥陶系超深层油气的影响——以顺北5号走滑断裂带为例[J]. 石油实验地质,2022,44(3):402-412.
WU Xian, LI Dan, ZHU Xiuxiang, et al. Influence of geothermal field on ultra-deep Ordovician oil and gas in Shunbei field, Tarim Basin: a case study of Shunbei No.5 strike-slip fault[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 402-412.
- [6] 杨晓利,王政军,高文中,等. 渤海湾盆地南堡凹陷深层碳酸盐岩潜山地质特征与勘探实践[J]. 石油实验地质,2022,44(3):425-432.
YANG Xiaoli, WANG Zhengjun, GAO Wenzhong, et al. Geological characteristics and exploration practice of deep carbonate buried hills in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 425-432.
- [7] 梁霄,吴明亮,李亚丁,等. 川西坳陷天井山古油藏油源判识及其与深层油气成藏关系厘定[J]. 石油实验地质,2021,43(1):96-111.
LIANG Xiao, WU Liangliang, LI Yading, et al. Oil source correlation and its relationship with deeply buried hydrocarbon accumulations in Tianjingshan Paleozoic uplift area, northern segment of Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 96-111.
- [8] 胡英杰,蔡国钢,刘兴周,等. 辽河坳陷东部滩海深层—超深层天然气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探,2023,28(2):24-34.
HU Yingjie, CAI Guogang, LIU Xingzhou, et al. Great discovery and significance of natural gas exploration in deep to ultra-deep formation in eastern tidal zone of Liaohe Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 24-34.
- [9] 杨怀宇,张鹏飞,邱怡博,等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. 中国石油勘探,2023,28(2):92-101.
YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, QIU Yibo, et al. Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 92-101.
- [10] 支东明,李建忠,陈旋,等. 吐哈探区深层油气勘探进展及潜力评价[J]. 新疆石油地质,2023,44(3):253-264.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, CHEN Xuan, et al. Exploration progress and potential evaluation of deep oil and gas in Turpan-Hami exploration area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(3): 253-264.
- [11] 刘锋,赵红静,金颖,等. 吐哈盆地胜北洼陷中—下侏罗统致密油烃源岩评价及油源对比[J]. 新疆石油地质,2023,44(3):277-288.
LIU Feng, ZHAO Hongjing, JIN Ying, et al. Source rock evaluation and oil-source correlation for Middle-Lower Jurassic tight oil in Shengbei subsag, Turpan-Hami basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(3): 277-288.
- [12] 李宇志,周肖肖,隋风贵,等. 东营凹陷民丰地区沙四段下亚段烃源岩特征[J]. 油气地质与采收率,2023,30(3):28-41.
LI Yuzhi, ZHOU Xiaoxiao, SUI Fenggui, et al. Characteristics of source rock of Es₄^x in Minfeng area, Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(3): 28-41.
- [13] 王志杰. 高青—平方王潜山带原油地化特征及油源分析[J]. 断块油气田,2012,19(3):289-293.
WAGN Zhijie. Geochemical characteristics of crude oil and oil source analysis of Gaoqing-Pingfangwang buried hill belt [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(3): 289-293.

- [14] 马安来, 李慧莉, 李杰豪, 等. 塔里木盆地柯坪露头剖面中上奥陶统烃源岩地球化学特征与海相油源对比[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(1): 47-60.
MA Anlai, LI Huili, LI Jiehao, et al. The geochemical characteristics of Middle-Upper Ordovician source rocks in Keping outcrops profiles and marine oil-source correlation, Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(1): 47-60.
- [15] 王利, 张新顺, 肖坤叶, 等. 乍得邦戈盆地Baobab构造带形成演化及油气成藏控制因素[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(2): 84-92.
WANG Li, ZHANG Xinshun, XIAO Kunye, et al. Formation and evolution of Baobab structural zone and controlling factors of hydrocarbon accumulation in Bongor Basin, Chad [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(2): 84-92.
- [16] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 30-42.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 30-42.
- [17] 李素梅, 郭栋. 东营凹陷原油单体烃碳同位素特征及其在油源识别中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 252-258.
LI Sumei, GUO Dong. Characteristics and application of compound specific isotope in oil-source identification for oils in Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Geoscience*, 2010, 24(2): 252-258.
- [18] 杨平, 谭富文, 施美凤, 等. 尼泊尔低喜马拉雅雅雅带油源对比及油气成藏[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3 426-3 441.
YANG Ping, TAN Fuwen, SHI Meifeng, et al. Oil-source correlation and hydrocarbon accumulation in the Lesser Himalayan belt of Nepal [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3 426-3 441.
- [19] 唐友军, 张欣越, 季长军, 等. 南羌塘盆地侏罗系砂糖状白云岩古油藏油源研究——来自芳烃化合物和单体烃碳同位素的证据[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2022, 19(2): 1-11.
TANG Youjun, ZHANG Xinyue, JI Changjun, et al. Crude oil source of granulated dolomite paleo-reservoir from the Jurassic strata in the South Qiangtang Basin: Evidence from carbon isotopes of aromatic compounds and monomeric hydrocarbons [J]. *Journal of Yangtze University: natural science Edition*, 2022, 19(2): 1-11.
- [20] PRICE L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: Limits, evidence, characteristics, and possible controls [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3 261-3 280.
- [21] 张水昌, 王招明, 王飞宇, 等. 塔里木盆地塔东2油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 25-31.
ZHANG Shuichang, WANG Zhaoming, WANG Feiyu, et al. Oil accumulation history in Tadong 2 oil reservoir in Tarim Basin, NW China-A case study of oil stability and cracking [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 25-31.
- [22] 张文正. 有机质碳同位素的成熟分馏作用及地质意义[J]. 石油实验地质, 1989, 11(2): 177-184.
ZHANG Wenzheng. Fractionation of carbon isotopes of organic matter and its geological significance [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1989, 11(2): 177-184.
- [23] 邹艳荣, 帅燕华, 孔枫, 等. 煤成甲烷碳同位素演化的数学模型与应用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 92-96.
ZOU Yanrong, SHUAI Yanhua, KONG Feng, et al. Mathematical models of stable carbon isotope composition of coal-derived methane and their applications [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(2): 92-96.
- [24] 李剑, 刘朝露, 李志生, 等. 天然气组分及其碳同位素扩散分馏作用模拟实验研究[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 463-468.
LI Jiang, LIU Zhaolu, LI Zhisheng, et al. Experiment investigation on the carbon isotope and composition fractionation of methane during gas migration by diffusion [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(6): 463-468.
- [25] 王强, 付晓文, 徐志明, 等. 稳定碳同位素在油气地球化学中的应用及存在的问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 233-237.
WANG Qiang, FU Xiaowen, XU Zhiming, et al. Development and application of stable carbon isotopes in natural gas and oil geochemistry [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 233-237.
- [26] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence, second ed. [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [27] BJOR Y M, HALL P B, HUSTAD E, et al. Variation in stable carbon isotope ratios of individual hydrocarbons as a function of artificial maturity [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1): 89-105.
- [28] CLAYTON C J, BJOR Y M. Effect of maturity on $^{13}C/^{12}C$ ratios of individual compounds in North Sea oils [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(6): 737-750.
- [29] CLAYTON C J. Effect of maturity on carbon isotope ratios of oils and condensates [J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(6): 887-899.
- [30] 陈安定, 张文正, 徐永昌. 沉积岩成烃热模拟实验产物的同位素特征及应用 [J]. 中国科学: B辑, 1993, 23(2): 209-217.
CHEN Anding, ZHANG Wenzheng, XU Yongchang. Isotopic characteristics and application of products from thermal simulation experiment for hydrocarbon generation of sedimentary rocks [J]. *Science in China: Series B*, 1993, 23(2): 209-217.
- [31] 唐小强, 黄光辉, 张敏, 等. 裂解热模拟实验中碳同位素变化特征及其地球化学意义[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 1 029-1 035.
TANG Xiaoqiang, HUANG Guanghui, ZHANG Min, et al. Stable carbon isotope compositions of gaseous hydrocarbons in pyrolysis experiment and geochemical significance [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(6): 1 029-1 035.
- [32] 廖玉宏, 耿安松, 刘德汉, 等. 煤生烃过程中成熟度引起的碳同位素分馏效应[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 583-588.

- LIAO Yuhong, GENG Ansong, LIU Dehan, et al. Carbon isotopic fractionation effect caused by maturity during the generation of coal-pyrolysis hydrocarbons [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(6): 583-588.
- [33] 冯子辉, 迟元林, 杜洪文, 等. 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验[J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 505-509.
FENG Zihui, CHI Yuanlin, DU Hongwen, et al. Carbon isotopic composition and yield of gaseous hydrocarbon by oil hydrous pyrolysis in rock medium [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 505-509.
- [34] 王新洲, 宋一涛, 王学军. 石油成因与排油物理模拟——方法、机理及应用[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.
WANG Xinzhou, SONG Yitao, WANG Xuejun. Physical simulation of petroleum genesis and expulsion-method, mechanism and application [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1996.
- [35] 唐勇, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 132-148.
TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 132-148.
- [36] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
WANG Xulong, ZHI Dongming, WANG Yutao, et al. Organic geochemistry of source rocks and hydrocarbons in the Junggar Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [37] 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 Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, 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.
- [38] 张学军, 徐兴友, 彭平安. 车排子凸起轻质油成熟度分析与烃源层再认识[J]. *地球化学*, 2013, 42(2): 180-187.
ZHANG Xuejun, XU Xingyou, PENG Ping'an. Maturity assessment of light oils in Chepaizi Uplift and re-understanding of its source rock [J]. *Geochimica*, 2013, 42(2): 180-187.
- [39] 李政, 张林晔, 沈忠民, 等. 准噶尔盆地车排子凸起轻质油母源及充注方向[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(4): 419-423.
LI Zheng, ZHANG Linye, SHEN Zhongmin, et al. Source and migrating direction of light oil in Chepaizi Uplift, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(4): 419-423.
- [40] 张枝焕, 李伟, 孟闲龙, 等. 准噶尔盆地车排子隆起西南部原油地球化学特征及油源分析[J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 133-140.
ZHANG Zhihuan, LI Wei, MENG Xianlong, et al. Petroleum geochemistry and oil-source analysis in the southwest of Chepaizi Uplift, Junggar Basin [J]. *Geoscienc*, 2007, 21(1): 133-140.
- [41] 由伟丰, 孟闲龙. 准噶尔盆地车排子地区排2井油源分析[J]. *中国西部油气地质*, 2006, 2(1): 56-59.
YOU Weifeng, MENG Xianlong. Oil source analysis of Well P-2 in the Chepaizi area of the Junggar Basin [J]. *West China Petroleum Geosciences*, 2006, 2(1): 56-59.
- [42] 张闻林, 张哨楠, 王世谦. 准噶尔盆地南缘西部地区原油地球化学特征及油源对比[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 30(4): 374-377.
ZHANG Wenlin, ZHANG Shaonan, WANG Shiqian. Geochemical characteristics of oil and correlation of oil to resource rock in the southern edge of Junggar Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2003, 30(4): 374-377.
- [43] 张学军, 徐兴友, 邢丽雯, 等. 沥青质含量在车排子地区油气成藏研究中的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(4): 25-29.
ZHANG Xuejun, XU Xingyou, XING Liwen, et al. Application of asphaltene content for study of oil and gas accumulation in Chepaizi area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(4): 25-29.
- [44] 沈扬, 李茂榕. 准噶尔盆地车排子凸起稀、稠油反序分布成因探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(1): 66-71.
SHEN Yang, LI Maorong. A discussion on the genesis of light and heavy oil distribution of inverted sequences in the Chepaizi Uplift, the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(1): 66-71.
- [45] 徐兴友. 准噶尔盆地车排子地区油气成藏期次研究[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(3): 40-44, 49.
XU Xingyou. Study on pool-forming stages of oil in Chepaizi area of Junggar Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(3): 40-44, 49.

编辑 林 璐