

塔里木盆地玉北地区奥陶系原油成因特征分析

路清华¹, 邵志兵¹, 贾存善¹, 岳勇², 刘少杰²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司 石油勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:玉北地区鹰山组原油为低凝固点、含硫、高蜡的中质油,饱和烃色谱正构烷烃分布完整,但色谱基线出现不同程度抬升,且原油非烃和沥青质碳同位素偏轻,族组分碳同位素发生倒转,表明该区原油经历了至少2期成藏过程,早期充注原油遭受生物降解作用后又与后期充注的高成熟原油相混合。地化分析主要表现为后期充注原油特征:弱植烷优势($Pr/Ph \leq 1.0$),较高含量的伽马蜡烷(G/C_{30} 藿烷为0.24~0.4)及 C_{35} 升藿烷/ C_{34} 升藿烷 >1.0 的“翘尾巴式”特征,表明后期原油主要来源于还原—强还原生烃环境;正庚烷含量为46.47%~48.57%, C_{23} -三环萜烷优势,较高的三环萜烷/藿烷,指示其生油母质为菌藻类;较高的庚烷值及四甲基萜指数表明原油处于高成熟演化阶段,推测来源于寒武系烃源岩。

关键词:碳同位素;轻烃;生物标志化合物;地球化学;奥陶系;玉北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1⁺14

文献标识码:A

Genesis features of crude oil in Ordovician, Yubei area, Tarim Basin

Lu Qinghua¹, Shao Zhibing¹, Jia Cunshan¹, Yue Yong², Liu Shaojie²

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC Northwestern Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Ordovician oil in Yubei area has middle density, low freezing point and high waxy content. The distribution of normal alkane is complete while the baseline of saturated hydrocarbon chromatogram shows various degrees of excursion. It shows upside-down phenomenon that the $\delta^{13}C$ value of nonhydrocarbon and asphaltene is smaller than that of saturated and aromatic hydrocarbon. All of these indicate that the reservoir underwent no less than two periods of oil charging. The early charging oil experienced strong biodegradation and mixed with the later higher mature charging oil. Geochemical properties are mainly attributed to the late charging oil with weak phytane predominance ($Pr/Ph \leq 1.0$), abundance of gammacerane (G/C_{30} -hopanes 0.14-0.24), and higher C_{35} -hopane/ C_{34} -hopane value (>1.0) characteristics, showing reduction-strong reduction sedimentary environment. The predominance of *n*-heptane (46.47%-48.57%), and C_{23} -tricyclic terpane and higher tricyclic terpane/hopane indicate that the original source materials of later oil are homonemeae. High heptane value and tetramethylnaphthalene index suggest that the oil is in high mature stage and probably generated from the Cambrian source rock.

Key words: carbon isotope; light hydrocarbon; biomarker; geochemistry; Ordovician; Yubei area; Tarim Basin

玉北地区位于塔里木盆地西南部的麦盖提斜坡,北邻巴楚隆起南缘的玛扎塔格构造带,南侧与塔西南坳陷的叶城坳陷、东侧与塘古巴斯坳陷相邻^[1](图1)。该区块相邻地区已发现有和田河气田、鸟山气藏、巴什托油气藏和亚松迪气藏^[2]。2010年7月位于该区的玉北1井在奥陶系鹰山组获得工业油气流,经酸压测试日产原油216 m³,实现了该地区的突破。随后相继在多口评价井中的奥陶系获高产工业油气流^[3]。本文通过对玉北地

区玉北1、玉北1-2x两口井原油的地球化学特征分析,研究其有机质来源、沉积环境性质、有机质成熟度等特征,旨在明确该区原油的成因类型,为下一步的勘探提供参考。

1 原油物理性质

玉北1、玉北1-2x两口井的原油密度分布于0.9163~0.9286 g/cm³,凝固点小于-34℃,含硫量为0.69%~0.82%,含蜡量为6.63%~21.97%(表1),

收稿日期:2012-08-19;修订日期:2013-03-21。

作者简介:路清华(1981—),女,硕士,工程师,从事油气地球化学研究工作。E-mail: luqh.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技开发部项目“巴麦地区古生界油气成藏条件与勘探方向”(P10023)资助。

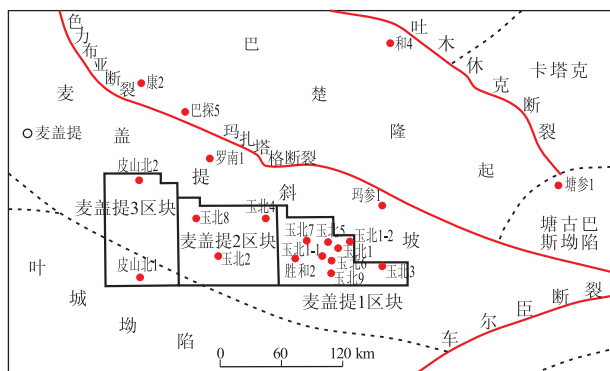


图1 塔里木盆地玉北地区构造位置示意

Fig. 1 Tectonic setting of Yubei area, Tarim Basin

总体表现为低凝固点、含硫、高蜡的中质油,较低的硫含量表明了生源母质为微咸水—咸水的沉积环境^[4]。原油动力粘度为 90.87 ~ 247.28 mPa · s, 属于稠油,认为是遭受过一定程度生物降解所致。

2 原油地球化学特征

2.1 饱和烃色谱特征

一般认为,饱和烃馏分中各类化合物的分布与组成特征反映了有机质的来源、成熟度及成藏中的次生变化;原油饱和烃色谱特征图的整体分布可表征出原油的后生变化。原油饱和烃色谱基线抬升,形成由不可识别的复杂化合物(UCM)组成的“鼓包”,是由后期遭受的氧化和生物降解作用所致,这些“鼓包”的高低反映了遭受氧化和生物降解作用的程度^[5-8]。

由图2可以看到,玉北地区原油的饱和烃色谱图基线均有不同程度的抬升,表明玉北地区原油遭受了氧化和生物降解作用。同时正构烷烃碳数分布完整,显示了至少有2期原油充注,早期的原油遭

受了氧化、生物降解作用,形成色谱图基线的抬升;后期为正常原油充注,使正构烷烃碳数分布完整。

对于玉北地区后期充注的正常油而言,以玉北1-2x井原油为例(图2,表2),其饱和烃色谱呈前单峰型分布特征,主峰碳为 C₁₅,正构烷烃碳数完整,分布范围为 C₁₁-C₃₁, C₂₁-/C₂₂₊ 比值为 5.86, C₂₁₊₂₂/C₂₈₊₂₉ 比值为 2.84,奇偶优势不明显,OEP 为 1.10。表明玉北地区原油具有演化程度高、低等水生生物居优势的生源构成特征。

姥鲨烷和植烷的比值(Pr/Ph)是指示生源沉积环境的重要参数^[5]。玉北地区原油饱和烃中 Pr/Ph 介于 0.82 ~ 1.0,显示弱植烷优势,表明原油母质为海相的还原沉积环境。Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 比值都较低,分别为 0.53 ~ 0.57 和 0.59 ~ 0.63,显示后期充注的原油演化程度高,保存条件良好。

2.2 轻烃组成特征

轻烃组分中有不同类型的C_n轻烃化合物,其

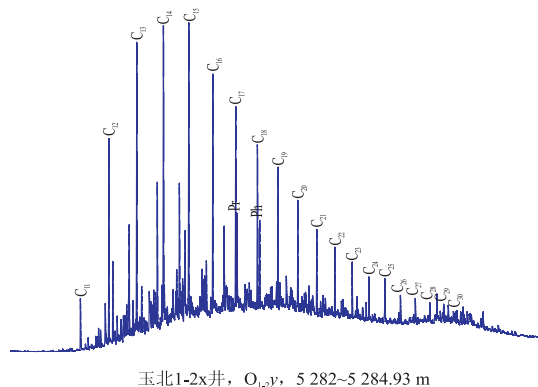


图2 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油饱和烃色谱
Fig. 2 Saturated chromatogram of Ordovician oil in Yubei area, Tarim Basin

表1 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油物理性质

Table 1 Physical property of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

井号	井段/m	层位	密度/(g · cm ⁻³)	动力粘度/(mPa · s)	凝固点/°C	含硫量/%	含蜡量/%	初馏点/°C	原油类型
玉北1	5 603.68 ~ 5 630	O _{1-2y}	0.916 3	90.87	<-34	0.69	6.63	90.8	中质油
玉北1-2x	5 105 ~ 5 450	O _{1-2y}	0.928 6	247.28	<-34	0.82	19.45	122.9	中质油
	5 100 ~ 5 190	O _{1-2y}	0.920 3	117.99	<-34	0.72	21.79	86.3	中质油

表2 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油饱和烃色谱参数

Table 2 Parameters of saturated chromatogram of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

井号	深度/m	层位	主峰碳	奇偶优势	姥鲨烷/正十七烷	植烷/正十八烷	姥鲨烷/植烷	C ₂₁ -/C ₂₂₊	C ₂₁₊₂₂ /C ₂₈₊₂₉
玉北1	5 606.7	O _{1-2y}	C ₁₈	0.97	0.55	0.59	0.82	1.05	1.30
	5 594.9 ~ 5 630	O _{1-2y}	C ₁₈	0.98	0.57	0.63	0.86	1.02	1.26
	5 603.68	O _{1-2y}	C ₁₇	1.02	0.54	0.59	0.98	1.27	1.36
玉北1-2x	5 282 ~ 5 284.93	O _{1-2y}	C ₁₅	1.10	0.53	0.62	1.00	5.86	2.84

来源于不同的生源母质类型^[9]:①正庚烷(nC_7)主要来自藻类和细菌,对成熟作用十分敏感,是良好的成熟度指标;②甲基环己烷(MCH)主要来自高等植物木质素、纤维素和醣类等,它们是腐殖型母质的主要组成物;③各种构型的二甲基环戊烷和乙基环戊烷主要来自水生生物甾类化合物和萜类化合物中的环状类脂体(RCPC₇)。玉北1井原油轻烃C₇化合物组成以正庚烷为主,分布在46.47%~48.57%范围内,显示菌藻类的生源。

庚烷值和异庚烷值是良好的成熟度的指标,随演化程度的加深,其值均增大^[10]。一般认为,庚烷值小于20,异庚烷值小于1.0为未熟—低熟区;庚烷值小于30,异庚烷值小于3.0为成熟区;庚烷值小于40,异庚烷值小于5.0为高成熟区;庚烷值大于40,异庚烷值大于5.0为过成熟区。如图3所示,玉北1井原油的庚烷值—异庚烷值指示其处于高成熟演化阶段,但低于巴什托原油。

2.3 生物标志化合物特征

玉北地区原油的生物标志化合物中的三环萜烷系列化合物碳数在C₁₉-C₂₉范围内分布连续,含量丰富,且C₂₁TT/C₂₃TT比值均小于1.0(表3),以

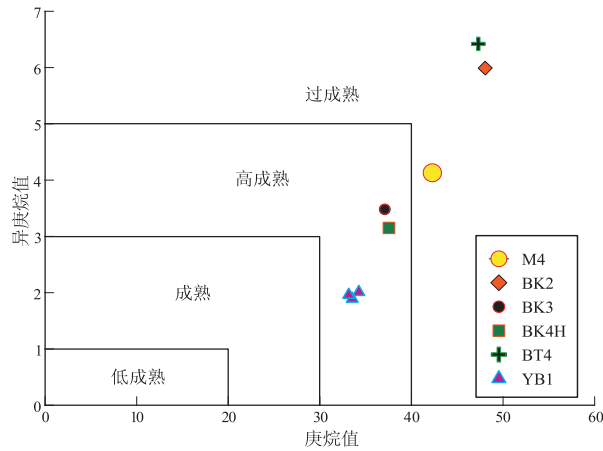


图3 塔里木盆地玉北1井、巴什托地区原油庚烷值、异庚烷值反映的成熟度

Fig. 3 Maturation degree reflected by heptane and isoheptane values of Ordovician oil in well Yubei 1 and Bashitop area, Tarim Basin

C₂₃三环萜烷占优势,表明了细菌或者藻类脂体的有机质来源^[11]。

三环萜烷/五环萜烷比值与沉积环境有关^[12]。玉北地区原油该参数分布在0.95~1.83范围内(表3),指示咸水、半咸水湖相强还原环境或者一定盐度的海相沉积环境。

C₂₄-四环萜烷与特定的沉积环境有关,指示了偏氧化的沉积环境^[13]。玉北地区原油中C₂₄-四环萜烷的丰度普遍较低,C₂₄-四环/C₂₆-三环萜烷的比值在0.48~0.50之间(表3),表明了沉积水体的还原环境。

通常C₂₇-C₂₈-C₂₉规则甾烷的相对组成可反映源岩有机质的生源构成,在研究中具有重要意义^[14]。一般认为C₂₇规则甾烷来自于低等水生生物,C₂₉规则甾烷来自于陆源高等植物,但是高含量的C₂₉规则甾烷还可能归因于海洋菌藻类低等生物^[15]。玉北地区原油规则甾烷系列化合物中C₂₉规则甾烷占绝对优势,具反“L”型分布特征(图4),这种分布明显与成因于海洋菌藻类低等生物有关。

藿烷系列化合物也具有指相意义,如升藿烷的分布可以反映沉积环境^[12]。玉北地区原油升藿烷

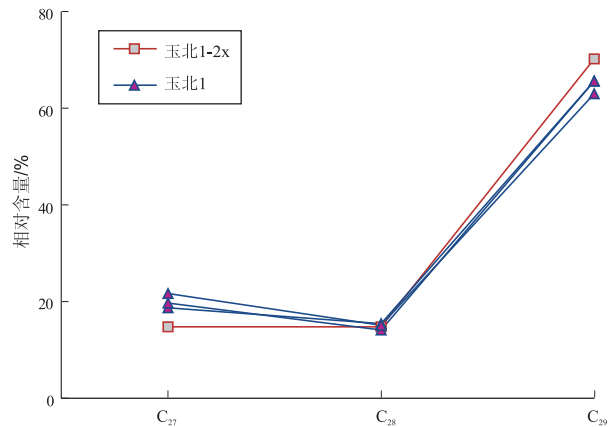


图4 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油C₂₇-C₂₈-C₂₉规则甾烷含量分布

Fig. 4 Contents of C₂₇, C₂₈, C₂₉ regular steranes of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

表3 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油甾萜烷参数

Table 3 Sterane and terpane parameters of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

井号	井段/m	层位	C ₂₁ TT/ C ₂₃ TT	C ₂₄ TeT/ C ₂₆ TT	三环萜烷/ 五环三萜烷	C ₃₅ 升藿烷/ C ₃₁₋₃₅ 升藿烷	C ₃₅ 升藿烷/ C ₃₄ 升藿烷	GI	C ₃₀ D/ C ₃₀ H	C ₂₇ 重排甾烷/ C ₂₇ 规则甾烷
玉北1	5 606.7	O ₁₋₂ y	0.59	0.48	1.52	0.12	1.15	0.14	0.10	0.95
	5 594.9~5 630	O ₁₋₂ y	0.64	0.49	1.83	0.12	1.08	0.14	0.11	1.02
	5 603.68	O ₁₋₂ y	0.63	0.50	1.70	0.11	1.03	0.14	0.09	0.97
玉北1-2x	5 282~5 284.93	O ₁₋₂ y	0.56	0.50	0.95	0.12	1.00	0.24	0.13	0.86

注:TT.三环萜烷;TeT.四环萜烷;GI.伽马蜡烷/C₃₀-藿烷;C₃₀D/C₃₀H. C₃₀-重排藿烷/C₃₀藿烷。

系列含量丰富, C_{31} – C_{35} 碳数分布完整, 升藿烷指数较高(表3), 均大于0.1, 且具有 C_{35} 升藿烷含量高于 C_{34} 升藿烷的较弱“翘尾巴”式分布特征(C_{35} 升藿烷/ C_{34} 升藿烷 ≥ 1.0), 表征了盐度较高的还原沉积环境。

伽马蜡烷是一类 C_{30} 三萜烷, 其丰度变化与沉积水体的盐度及还原程度呈正相关^{[5]363}。玉北地区原油的伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷)分布在0.14~0.24范围内, 表征了咸水—半咸水的还原性沉积环境。

重排甾烷和重排藿烷的丰度变化主要受成熟作用、沉积环境等多种因素的影响。在高成熟阶段, 甾烷通过重排作用转化为重排甾烷, 随着成熟度的增加, 重排甾烷/规则甾烷比值也相应地增加^[16]。而重排藿烷类化合物相对丰度在成熟—高成熟阶段主要与热成熟作用有关^[17-18]。玉北地区原油重排藿烷和重排甾烷均发育, C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷比值在0.1左右, C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷比值在1.0左右, 表征了较高的成熟演化程度。

2.4 芳烃组成特征

芳烃组成特征的差异性主要受成熟度的影响, 一般认为未熟—低熟样品的色谱呈后峰型或双峰型分布, 四环、五环化合物占优势; 中高熟样品呈前峰型分布, 且以二环、三环化合物为主^[19]。三芴系列化合物中的硫芴指示强还原沉积环境, 氧芴指示弱氧化—弱还原沉积环境, 芴指示正常还原沉积环境^[20]。玉北地区原油芳烃化合物具有高萘、高菲、高硫芴、低氧芴的特点(图5), 玉北1井原油芳烃组成以菲系列组分含量最高, 而玉北1-2x井以萘系列组分含量最高, 反映了原油处于高成熟演化阶段, 生烃母质沉积于还原—强还原环境, 而低联苯表明原油的生源有机质具偏腐泥型特征^[21]。

多甲基萘系列化合物因结构稳定, 成为反映高成熟度原油的重要指标。三甲基萘指数[$TMN:2,3,6-$

三甲基萘/(2,3,6+1,2,5)-三甲基萘]和四甲基萘指数[$TeMN:1,3,6,7-$ 四甲基萘/(1,3,6,7+1,2,5,6)-四甲基萘]的关系在指示塔河原油的成熟度中得到了成功的应用, 四甲基萘指数大于0.6反映了高成熟演化阶段^[21]。玉北1井及玉北1-2x井原油芳烃的四甲基萘指数分别为0.68~0.75和0.72(图6), 指示原油处于高成熟演化阶段, 与轻烃指数所指示的热演化程度相吻合。

2.5 原油碳同位素组成特征

原油稳定碳同位素组成特征具有母质继承效应, 其值分布能反映源岩有机质的性质, 一般来源于水生菌藻类等低等生物的有机质具有较轻碳同位素组成^[22-23]。玉北地区原油及族组成碳同位素较轻, 且玉北1-2x井略轻于玉北1井, 玉北1井其值分布于-32.88‰~-32.29‰, 玉北1-2x井分布于-32.9‰(图7), 显示海相低等水生生物的有机质来源; 且均表现出沥青质碳同位素值相对较轻的特征, 可能是生物降解作用的结果^[24]。

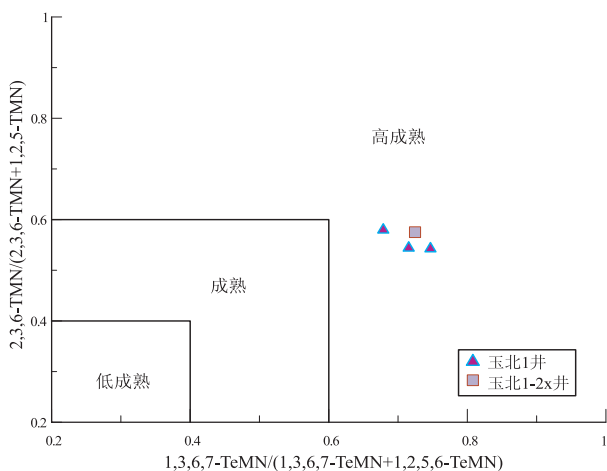


图6 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油三甲基萘指数和四甲基萘指数反映的成熟度

Fig. 6 Maturation degree reflected by trimethylnaphthalene and tetramethylnaphthalene exponent of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

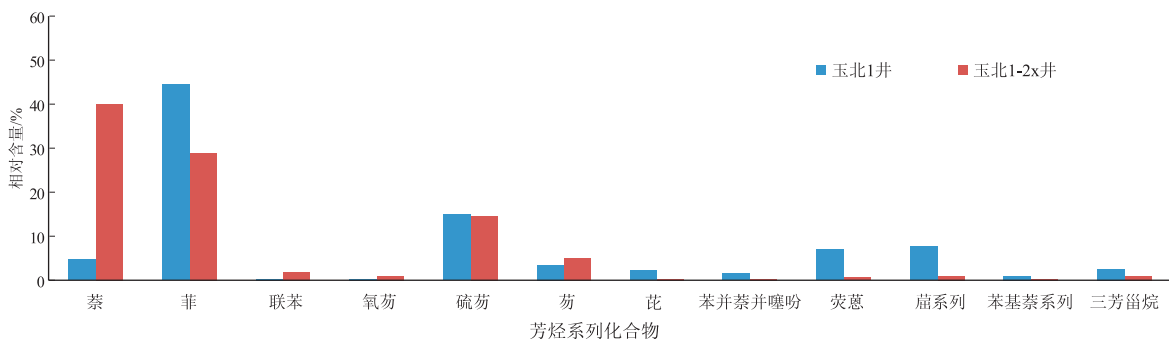


图5 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油芳烃组分组成

Fig. 5 Components of aromatics hydrocarbon of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

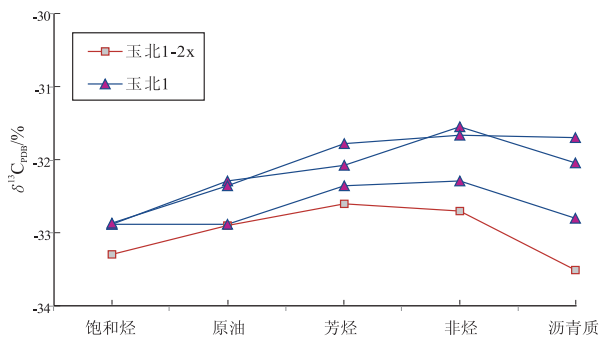


图7 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组原油碳同位素类型曲线

Fig. 7 Line chart of carbon isotope type of crude oil from Ordovician Yingshan Formation, Yubei area, Tarim Basin

3 油源探讨

目前对塔里木盆地台盆区海相原油的烃源岩仍有许多争议,但是对于两大争议的烃源岩的生物标志化合物组合特征的差异认识却是比较一致的,即寒武系—下奥陶统烃源岩具有较低的 Pr/Ph 比值,一般小于 1.2,伽马蜡烷含量较高, C₂₄-四环萜烷含量较低,具有较低的碳同位素组成;而上奥陶统烃源岩特征明显相反^[25-26]。

生物标志化合物组合特征显示,玉北地区奥陶系原油的 Pr/Ph 比值较低, C₂₄-四环萜烷不发育,富含伽马蜡烷,与寒武系—下奥陶统烃源岩特征类似,说明两者之间具有一定的成因联系。同时,该区原油具有较轻的碳同位素组成特征也证实了与寒武系—下奥陶统烃源岩的成因联系。截止目前的认识,玉北地区乃至整个塔西南地区下奥陶统烃源岩不发育,该区原油来源于寒武系烃源岩。

4 结论

1) 玉北地区原油遭受过一定程度生物降解的结果。饱和烃色谱基线的抬升也证明了生物降解作用的存在。

2) 玉北1井原油轻烃 C₇ 化合物组成以正庚烷为主,显示菌藻类的有机质生源;庚烷值—异庚烷值指示其处于高成熟演化阶段。

3) 较轻的碳同位素分布,饱和烃色谱较低碳数的主峰优势,三环萜烷系列化合物的 C₂₃TT 萜烷优势,芳烃系列化合物组成中的低联苯,指示生烃母质细菌和藻类等低等生物为主的腐泥型的有机质来源。

4) 饱和烃色谱奇偶优势不明显,较高含量的重排甾烷和重排藿烷,芳烃系列化合物以二环的萘

和三环的非化合物为主的前峰型分布特征,较高的三甲基萘和四甲基萘指示,反映了玉北地区原油处于高成熟演化阶段。

5) 原油中弱植烷优势、较高的三环萜烷/五环萜烷比值、较低 C₂₄TeT/C₂₆TT 比值、三芴系列化合物组成绝对的硫芴优势、较高的升藿烷指数及 C₃₅升藿烷>C₃₄升藿烷的“翘尾巴”式分布,较高的伽马蜡烷指数,显示了生烃母质的沉积水体为较高盐度的还原—强还原环境。

6) 玉北地区原油至少存在 2 期油充注,早期原油曾遭受较强烈的生物降解;后期原油为来源于较高成熟度、还原—强还原、以细菌和藻类低等生物为主的腐泥型母质。目前处于高成熟演化阶段,推测原油来源于寒武系烃源岩。

致谢: 本文在取样和研究过程中得到中国石化西北油田分公司勘探开发研究院领导的支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 刘高波,施泽进,余晓宇,等. 巴楚—麦盖提的区域构造演化与油气分布规律[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(2):157-161.
- [2] 邵志兵,吕海涛,耿锋,等. 塔里木盆地麦盖提地区石炭系油藏地球化学特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(1):84-90.
- [3] 赵斌,邓炜. 西北油田麦盖提斜坡油气前景[J]. 科技创新导报,2011(14):60.
- [4] 包建平,张功成,朱俊章,等. 渤中凹陷原油生物标志物特征与成因类型划分[J]. 中国海上油气地质,2002,16(1):11-18.
- [5] Peters K E, Moldowan M. The Biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993.
- [6] 胡守志,李水福,张冬梅,等. 原油中难以分辨的复杂混合物研究进展[J]. 石油实验地质,2011,33(3):292-296.
- [7] 倪春华,徐良发,周小进,等. 南华北盆地谭庄凹陷巴1井原油地球化学特征及成藏条件[J]. 石油实验地质,2012,34(5):481-485.
- [8] 白森舒,周小进,倪春华,等. 南华北盆地谭庄凹陷巴1井下白垩统原油成因及地质意义[J]. 石油实验地质,2011,33(6):634-638.
- [9] Mango F D. The origin of light cycloalkanes in petroleum [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990,54(1):23-27.
- [10] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979,43(5):657-672.
- [11] 赵孟军,张宝民,边立曾,等. 奥陶系类Ⅲ型烃源岩及其生成天然气的特征[J]. 科学通报,1999,44(21):2333-2336.
- [12] Philp R P, Fan P, Lewis C A, et al. Geochemical characteristics of oils from the Chaidamu, Shanganning and Jiangnan Basins, China [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991,5(3):351-358.
- [13] Palscas J G. Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks [J]. AAPG Studies in Geology, 1984,18:150-152.

起芳烃三芴系列化合物相对含量的变化。

4) MPII、MNR、4-MDBT/1-MDBT 等芳烃成熟度参数具有较高的值,且相互之间具有良好的正相关性,表明须家河组煤系其源岩具有较高的成熟度。

参考文献:

[1] 张金亮,王宝清. 四川盆地中西部上三叠统沉积相[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,2000,15(2):2-6.

[2] 朱如凯,赵霞,刘柳红,等. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J]. 石油勘探与开发,2009,36(1):46-55.

[3] 赵霞飞,吕宗刚,张闻林,等. 四川盆地安岳地区须家河组:近海潮汐沉积[J]. 天然气工业,2008,28(4):14-18.

[4] 王玲辉,沈忠民,赵虎. 川西坳陷中段须家河组烃源岩地球化学特征[J]. 西部探矿工程,2007(11):66-69.

[5] 杨阳,王顺玉,黄羚,等. 川中—川南过渡带须家河组烃源岩特征[J]. 天然气工业,2009,29(6):27-30.

[6] Zhang Min, Huang Guanghui, Li Hongbo, et al. Molecular geochemical characteristics of gas source rocks from the Upper Triassic Xujiahe Formation indicate transgression events in the Sichuan Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(8): 1260-1268.

[7] 妥进才. 柴达木盆地第三系芳烃的地球化学:二环芳烃与多环芳烃的关系[J]. 石油实验地质,1996,19(4):406-412.

[8] 林壬子,王培荣,戴允健,等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[C]//中国地质学会石油地质专业委员会. 有机地球化学论文集. 北京:地质出版社,1987:129-140.

[9] 戴卿林,郝石生,盛国英,等. 吐哈盆地侏罗纪煤系源岩芳烃组成及生源、环境意义[J]. 沉积学报,1997,15(2):198-201.

[10] 朱扬明,周洁,顾圣啸,等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. 石油学报,2012,3(1):32-39.

[11] Puttmann W, Villar H. Occurrence and geochemical significance of 1,2,5,6-tetramethylnaphthalene[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51: 3023-3029.

[12] 任拥军,李瑞雪. 西藏措勤盆地白垩统海相灰岩的芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报,2001,19(2):282-286.

[13] 朱扬明,张洪波,傅家谟,等. 塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J]. 石油学报,1998,19(3):33-37.

[14] 宋长玉,金洪蕊,刘璇,等. 烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响[J]. 石油实验地质,2007,29(2):183-187.

[15] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons[J]. Organic Geochemistry, 1983, 10: 504-512.

[16] 李美俊,王铁冠. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用[J]. 石油实验地质,2005,27(6):606-611.

[17] 郭小文,何生,石万忠. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征[J]. 石油学报,2008,29(1):52-57.

[18] 魏志彬,张大江,张传禄,等. 甲基二苯并噻吩分布指数(MDBT)作为烃源岩成熟度标尺的探讨[J]. 地球化学,2001,30(3):242-247.

[19] 朱战军,江永健,程喆. 利用芳烃化合物评价烃源岩成熟度:以松辽盆地东岭区块为例[J]. 石油勘探与开发,2009,36(6):790-796.

[20] 包建平,王铁冠,陈发景. 烃源岩中烷基二苯并噻吩组成及其地球化学意义[J]. 石油大学学报:自然科学版,1996,20(1):19-23.

(编辑 韩 戎)

(上接第 324 页)

[14] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8): 1255-1268.

[15] 程克明,王兆云,钟宁宁,等. 碳酸盐岩油气生成理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,1996.

[16] 黄继文. 塔里木盆地塔河油田原油生物标志化合物在运移方面的应用探讨[J]. 石油实验地质,2003,25(增刊):573-577.

[17] 王春江,傅家谟,盛国英,等. 18a(H)-新藿烷及 17a(H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用[J]. 科学通报,2000,45(13):1366-1372.

[18] Kolaczowska E, Slougui N E, Watt D S, et al. Thermodynamic stability of various alkylated, dealkylated, and rearranged 17a- and 17b-hopane isomers using molecular mechanics calculations[J]. Org Geochem, 1990, 16: 1033-1038.

[19] 陈致林,李素娟,王忠,等. 低-中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究[J]. 沉积学报,1997,15(2):192-197.

[20] 林壬子,王培荣,戴允健,等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[C]//中国地质学会石油地质专业委员会. 有机地球化学论文集. 北京:地质出版社,1987:120-140.

[21] 贾存善,王延斌,顾忆,等. 塔河油田奥陶系原油芳烃地球化学特征[J]. 石油实验地质,2009,31(4):384-388.

[22] 米敬奎,张水昌,陈建平,等. 塔北地区原油碳同位素组成特征及影响因素[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):21-25.

[23] 包建平,朱翠山,张秋茶,等. 库车坳陷前缘隆起带上原油地球化学特征[J]. 石油天然气学报,2007,29(4):40-44.

[24] 王传刚,王铁冠,何发歧,等. 塔河油田原油稳定碳同位素特征及其成藏意义[J]. 新疆石油地质,2005,26(2):155-157.

[25] 朱俊章,包建平. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩地球化学特征[J]. 海相油气地质,2000,5(3/4):55-59.

[26] 马安来,金之钧,张水昌,等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系烃源岩的分子地球化学特征[J]. 地球化学,2006,35(6):593-601.

(编辑 徐文明)