

文章编号: 0253-2697(2011)02-0206-06

塔中 4 石炭系油藏原油轻烃地球化学特征及其控制因素

肖七林^{1,2} 孙永革^{1,3} 茅晟懿¹ 万永刚⁴

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 广东广州 510640;

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 湖北武汉 430074;

3. 浙江大学地球科学系环境与生物地球化学研究所 浙江杭州 310027; 4. 中国石油大港油田勘探开发研究院 天津 300280)

摘要: 从轻烃分子及其稳定碳同位素组成两方面刻画了塔中 4 石炭系油藏原油轻烃地球化学特征, 同时结合高分子量烃类生物标志化合物指标初步厘定了蒸发分馏、水溶分馏、有机质熟化、热蚀变等次生作用对石炭系原油的影响程度, 并探讨了其地质意义。石炭系不同油组(CI、CII、CIII)原油轻烃地球化学特征显示, CI 和 CII—CIII 可分别视为两个相互独立的成藏体系。CI 原油主要是早期形成的低熟原油, 该类原油轻烃富含正构烷烃, 贫环烷烃和芳烃, 链烷烃/环烷烃比值偏高, 稳定碳同位素组成富含 ¹²C, 高分子量芳烃成熟度指标偏低; CI 原油保存相对较好, 可能只遭受了程度较弱的水溶分馏等次生改造。CII 与 CIII 原油大多是晚期形成的高熟原油, 这类原油轻烃富含轻质环烷烃和芳烃, 贫正构烷烃, 链烷烃/环烷烃比值偏低, 稳定碳同位素组成富含 ¹³C, 高分子量芳烃成熟度指标偏高; 热蚀变和蒸发分馏次生作用对 CII 与 CIII 原油轻烃地球化学特征有重要影响, 不同期次及成因原油在 CII 与 CIII 油组内相互混合的现象也较为普遍; CII 与 CIII 部分遭受热蚀变改造的原油可能是寒武系一下奥陶统古油藏内的原油热裂解后通过断层运移到石炭系聚集成藏, 原油热裂解对该区晚期天然气形成可能具有重要意义。

关键词: 轻烃; 稳定碳同位素; 蒸发分馏; 原油热裂解; 塔里木盆地

中图分类号: TE124.1 文献标识码: A

Geochemical characterization of light hydrocarbons and its controlling factors in Carboniferous crude oils from the Tz4 Oilfield, Tarim Basin, NW China

XIAO Qilin^{1,2} SUN Yongge^{1,3} MAO Shengyi¹ WAN Yonggang⁴

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Environment & Biogeochemistry, Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: The influences of thermal alteration, evaporation fractionation and water washing on the Carboniferous oils were evaluated by using chemical and isotopic compositions of light hydrocarbons (C₆—C₈) in Carboniferous crude oils from the Tz4 Oilfield, NW China. The results suggest that hydrocarbons in the CI Fm and CII and CIII Fms have distinct accumulation processes. Compared with C₆—C₈ in the CII and CIII Fms, C₆—C₈ in the CI Fm contain more normal alkanes, but less cycloalkanes and aromatics resulting in greater ratios of normal (branched) alkanes to cycloalkanes, and are comparatively depleted in ¹³C. These results indicate that hydrocarbons entrapped in the CI Fm are derived from a relatively less matured kerogen, which is consistent with the conclusion based on the biomarkers in the aromatic fraction of these oils. Water washing during petroleum secondary migration along carrier bed has a relatively minor influence on oils in the CI Fm, while oil cracking and evaporation fractionation have important role in regulating the chemical and isotopic compositions of light hydrocarbons in the CII and CIII Fms. Therefore, it is commonplace that different generative oils mix together within the CII and CIII Fms. Oil cracking probably occurred in the deeply-buried Lower Ordovician and Cambrian paleo-reservoirs through geological time scale, these thermally altered oils migrated upward along faults and finally accumulated in the Carboniferous; natural gases from hydrocarbon secondary cracking should have a critical implication in forming gas accumulations in this region recently.

Key words: light hydrocarbons; stable carbon isotope; evaporation fractionation; oil cracking; Tarim Basin

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40672084)、国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB202303)和中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室开放基金课题(OGL-200916)联合资助。

第一作者及通讯作者: 肖七林, 男, 1980年8月生, 2009年获中国科学院广州地球化学研究所博士学位, 现在中国地质大学(武汉)地质资源与地质工程博士后流动站, 主要从事石油地球化学及油气成藏等方面的科研工作。E-mail: qilinxiao@cug.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

塔中4石炭系油藏构造上位于塔里木盆地塔中隆起中央断垒带东段,从塔中4石炭系油藏发现至今,随着这一地区油气勘探及研究工作的逐步深入,对该油藏成藏过程的认识也在不断地深入和细化,但由于多期次构造运动所引发的各种物理—化学次生作用,诸如生物降解、气侵、运移分馏、多源混合等对原油的初始组成面貌产生了不同程度的改造,进而阻滞了对塔中4石炭系油藏成藏过程的深入认识。

继“八五”期间苟光汉等提出塔中4石炭系油藏“一期成藏,后期调整破坏,油源主要来自满加尔凹陷中—上奥陶统泥质烃源岩”的观点之后^①，“九五”期间,王飞宇又提出“多期成藏,多期调整改造,油源主要与中—上奥陶统烃源岩有关,但不同时期的供烃区域存在差异”的认识^②。王廷栋等的研究则表明该油藏主要形成于晚海西期,原油可能主要来自塔中地区寒武系—下奥陶统烃源岩,石炭系古油藏发生了调整改造,并遭受了一定程度的氧化和生物降解,CI、CII油组是CIII油组原油在后期调整改造过程中沿断裂向上运移形成^③。近期研究表明CI与CII、CIII可能分别有着各自独立的成藏过程,伴随天然气生成,喜山期石炭系油藏发生了较大规模气侵,形成了CIII油组的凝析气顶,并最终突破上覆泥岩盖层至CII油组形成凝析油气藏,由于塔中地区中—上奥陶统烃源岩此时正好进入生油窗,其中可能也混入了部分来自中—上奥陶统的原油^[1]。根据石炭系原油及油砂中不同赋存状态烃类生物标志化合物的分布特征, Pan 等认为塔中4石炭系油藏早期和晚期充注的原油主体可能均来自寒武系—下奥陶统烃源岩,后期充注的原油运移过程中可能受到志留系沥青砂和中—上奥陶统生成原油的浸染^[2]。无论何种观点,其中都透露出—条重要信息就是:塔中4石炭系原油遭受了诸如储层氧化和生物降解、气侵、运移分馏和多源混合等多种作用的影响和改造,这与该区复杂的构造演化史密切相关^[3-5]。此外,该区寒武系—下奥陶统古油藏内的原油可能还遭受了热蚀变改造^[6,7]。这些次生作用不同程度地影响和改变着原油的初始组成面貌,为该区成藏过程研究设置了重重障碍,增加了油气勘探的难度和风险。轻烃是石油中重要的烃类组成部分,可反映原油的热演化及蚀变程度、生物降解、蒸发分馏、水洗以及水溶分馏等多种次生作用改造^[8]。然而,迄今对塔中4石炭系油藏原油所遭受的次生改造研究大都停留在中—高分子量烃类的研究层面,对原油轻烃馏分尚未涉及。

1 样品和实验

塔中4石炭系油藏主要有CI、CII和CIII3个油组,其中,CI和CIII为碎屑岩储层,以产正常原油,即黑油为主;CII为生屑灰岩储层,以产凝析油为主,原油具有低黏度、低凝固点、低蜡、低硫、密度中等和胶质沥青质含量低等特点。研究区域和取样井位置如图1所示。

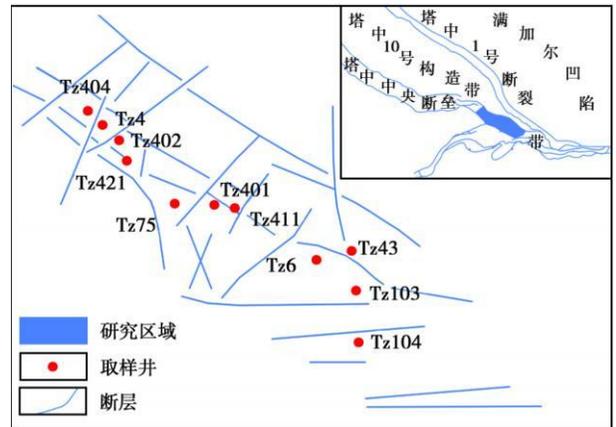


图1 研究区构造位置及取样井分布

Fig. 1 The samples location and regional tectonic of Tz4 Oilfield

1.1 全油气相色谱分析(GC)

样品气相色谱分析在HP6890型气相色谱仪上进行,使用CP-SIL 5CB GC柱(50 m × 0.32 mm × 0.40 μm),载气为氮气,流速为1.0 mL/min,进样采用分流模式,分流比为100:1。升温程序为:30 °C保留15 min,以4 °C/min升至300 °C,保留30 min。

1.2 原油轻烃单体稳定碳同位素分析(GC-irMS)

正构烷烃单体稳定碳同位素分析采用GV Instruments IsoPrime质谱仪与HP6890气相色谱仪联用系统,使用CP-SIL 5CB GC柱(50 m × 0.32 mm × 0.40 μm),载气为氮气,流速1.5 mL/min,进样采用分流模式,分流比3:1。升温程序为:30 °C保留15 min,以3 °C/min升到240 °C,再以15 °C/min升到300 °C,保留30 min。

1.3 芳烃馏分气相色谱-质谱分析(GC-MS)

芳烃馏分气相色谱-质谱分析由HP6890A—Platform II气相色谱-质谱联用仪来完成。气相色谱条件:HP-1 MS色谱-质谱柱(60 m × 0.32 mm × 0.25 μm),起始温度70 °C,保持5 min,4 °C/min升至300 °C,恒温30 min,载气为氮气,恒流模式:1.5 mL/min。质谱条件:EI模式,离子源70 eV,离子源温度200 °C,质量扫描范围50~500。

①苟光汉,张宗命,戴宗仰,等.塔中构造带油气藏的形成条件与评价.西南石油大学资源与环境学院,1995.

②王飞宇.塔中油藏形成演化史.中国石油大学(北京),2000.

③王廷栋.塔中地区油气成藏地球化学研究与勘探方向初探.中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院,2004.

2 轻烃分子组成与参数

塔中 4 石炭系油藏原油轻烃中一般直链烷烃含量最高, 次为支链烷烃和环烷烃, 轻质芳烃含量最低(表 1)。石炭系 3 个油组轻烃组成差异较大, 随地层埋深增加, 原油轻烃中链烷烃含量逐渐降低, 轻质环烷烃和芳烃含量逐渐升高(图 2)。

表 1 塔中 4 石炭系油藏原油 C₇ 轻烃馏分不同分子构型化合物相对含量

Table 1 Relative percentage of individual compounds with different chemical structures of C₇ fraction in Carboniferous crude oils of the Tz4 Oilfield

井号	深度/m	层位	原油类型	C ₇ 轻烃馏分不同分子构型化合物的相对含量/%			
				正庚烷	C ₇ 支链烷烃	C ₇ 环烷烃	甲苯
Tz421	3221.00~3223.50	CI	黑油	46.91	26.66	25.96	0.47
Tz401	3244.00~3308.00		黑油	47.48	26.26	26.04	0.21
Tz402	3259.00~3268.00		黑油	47.29	27.90	24.38	0.43
Tz411	3263.00~3450.00		黑油	50.58	24.87	24.34	0.21
Tz421	3478.00~3494.50	CII	凝析油	47.66	18.05	29.82	4.46
Tz4	3532.00~3548.00		凝析油	44.97	21.14	29.31	4.58
Tz404	3619.47~3681.81		黑油	40.40	24.18	31.54	3.88
Tz6	3647.00~3652.00		凝析油	39.27	16.41	35.79	8.53
Tz43	3652.00~3656.00	CIII	凝析油	39.41	24.22	30.31	6.05
Tz104	3647.00~3669.00		黑油	29.92	18.81	43.24	8.03
Tz421	3700.50~3702.50		黑油	37.84	23.33	35.00	3.83
Tz75	3701.00~3715.00		黑油	42.51	23.45	31.81	2.22
Tz103	3743.00~3746.00	CIII	凝析油	28.41	17.08	26.43	28.08
Tz401	4480.50~4980.50		黑油	42.89	29.65	27.07	0.39

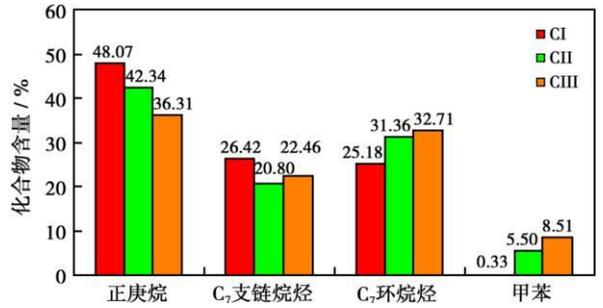
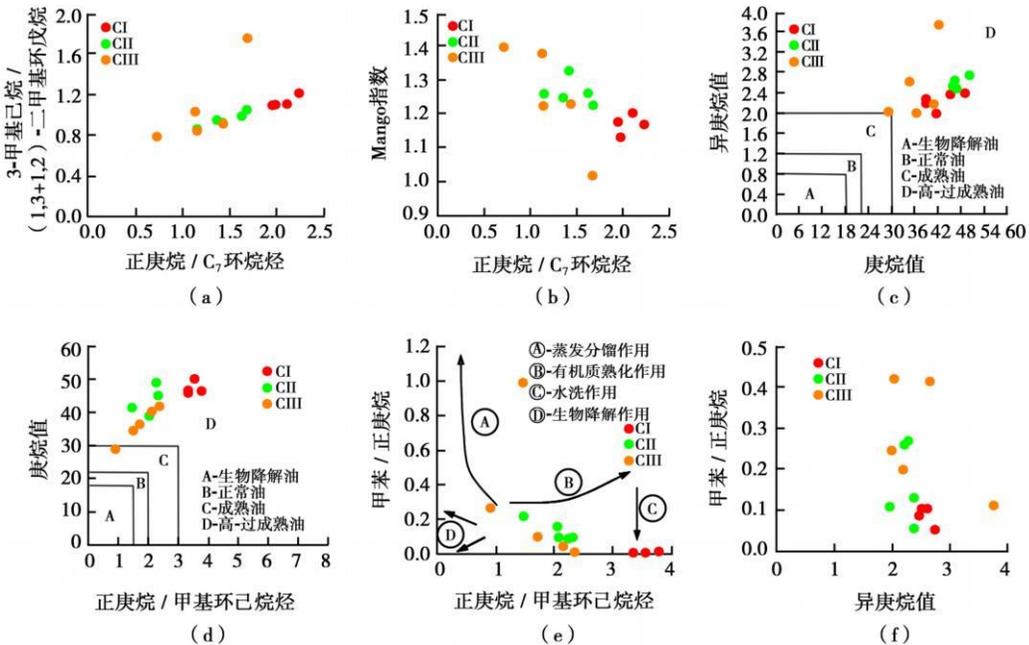


图 2 塔中 4 石炭系油藏不同油组原油 C₇ 轻烃馏分不同分子构型化合物的相对含量

Fig. 2 The relative averaged percentage of individual compounds with different chemical structures of C₇ fraction in Carboniferous crude oils from the Tz4 Oilfield

塔中 4 石炭系油藏不同油组原油轻烃馏分正(异)构烷烃/环烷烃比值、芳烃/正构烷烃比值等存在较大差异, 且呈现出一定的规律性分布, 这主要是受石炭系 3 个油组原油轻烃组成特征控制。随石炭系地层埋深增加, 各油组原油的正庚烷/甲基环己烷、正庚烷/C₇环烷烃、庚烷值、异庚烷值、3-甲基己烷/(1, 3+1, 2)-二甲基环戊烷、(正庚烷+2-甲基己烷+3-甲基己烷)/C₇环烷烃等比值大致呈逐渐减小趋势; 而原油的甲苯/正庚烷、(邻+对)-二甲苯/正辛烷等芳烃/正构烷烃比值呈现增大趋势, 这与 CI 原油链烷烃含量高、环烷烃含量低, CII 和 CIII 原油芳烃含量高、正构烷烃含量低关系密切(图 3)。



Mango 指数 = (2-甲基己烷 + 2,3-二甲基戊烷) / (3-甲基己烷 + 2,4-二甲基戊烷); 异庚烷值 = (2-甲基己烷 + 3-甲基己烷) / (1, 顺, 3+1, 反, 3+1, 反, 2)-环戊烷; 庚烷值 = (正庚烷 × 100) / (环己烷 + 2-甲基己烷 + 1,1-二甲基环戊烷 + 2,3-二甲基戊烷 + 3-甲基己烷 + 1, 顺, 3-二甲基环戊烷 + 1, 反, 3-二甲基环戊烷 + 1, 反, 2-二甲基环戊烷 + 3-乙基戊烷 + 2,2,4-三甲基戊烷 + 正庚烷 + 甲基环己烷)

图 3 塔中 4 石炭系油藏原油轻烃参数

Fig. 3 Light hydrocarbon parameters of Carboniferous crude oils from the Tz4 Oilfield

3 烃类单体稳定碳同位素

塔中 4 石炭系油藏 15 个原油样品 nC_7 — nC_{10} 单体稳定碳同位素值随碳数增加均降低, nC_{11+} 单体稳定碳同位素值的分布形式大致可以分为两类(图 4)。第一类包括: $Tz421-CIII$ 、 $Tz43-CII$ 和 $Tz6-CII$ 3 个样

品,其碳同位素值随碳数增加而增加; 第二类为其他 11 个样品,其碳同位素值随碳数增加变化不大。除 $Tz401-CIII$ 和 $Tz103-CIII$ 在 nC_{15} 以后偏高,为 $-32.6\text{‰} \sim -33.6\text{‰}$, $Tz422-CI$ 和 $Tz401-CI$ 在 nC_{15} 以后偏低,为 $-35.0\text{‰} \sim -36.0\text{‰}$ 外,其他样品的 $\delta^{13}C$ 值大都数为 $-32.6\text{‰} \sim -35.0\text{‰}$ 。

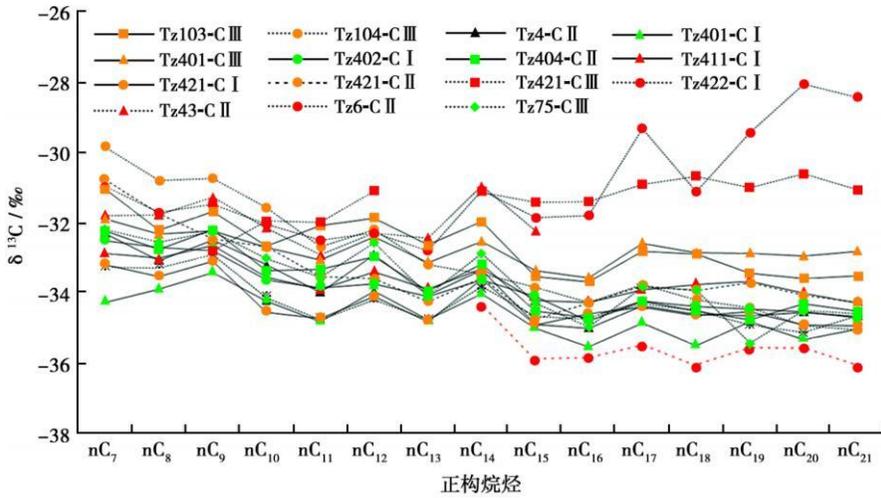


图 4 塔中 4 石炭系油藏原油正构烷烃单体稳定碳同位素分布

Fig. 4 Stable carbon isotopic components of nC_7 — nC_{21} of Carboniferous oils from the Tz4 Oilfield

总之,从 CI、CII 到 CIII, 石炭系原油逐渐富集 ^{13}C , 烃类单体稳定碳同位素值逐渐升高(图 5)。全油稳定碳同位素值偏重的 $Tz43-CII$ 、 $Tz6-CII$ 和 $Tz421-CIII$ 等样品轻烃单体稳定碳同位素值同样也偏重, 全油稳定碳同位素值偏轻的 $Tz401-CI$ 、 $Tz402-CI$ 、 $Tz421-CI$ 和 $Tz422-CI$ 等样品原油轻烃单体稳定碳同位素值同样也偏轻。

4 主要控制因素

石炭系原油中检出丰富芳基类异戊二烯烃类化合物, 进一步表明该区石炭系原油可能主要来自寒武系一下奥陶统烃源岩^[9-10]。相对 CII、CIII 原油, CI 原油轻烃富含正构烷烃, 贫环烷烃和芳烃, 由此造成石炭系上部 CI 原油反而要比石炭系下部 CII、CIII 原油的成熟度高[图 3 (c) 和(d)]。轻烃参数在蒸发分馏和水溶分馏改造的原油中均有可能出现反转或空间反序分布状况^[11-13], $Tz103-CIII$ 、 $Tz104-CIII$ 和 CI 油组原油分别遭受了蒸发分馏和水溶分馏等次生改造[图 3 (e)], 但从一系列轻烃及芳烃指标的分布特征来看, 它们都不是石炭系原油轻烃地球化学特征的主要控制因素。石炭系原油轻烃地球化学特征很可能主要与有机质熟化作用和原油热蚀变有关, 原油热蚀变对该区晚期天然气成藏可能具有重要意义。

4.1 蒸发分馏

本区原油受蒸发分馏影响相对较小。以 $Tz421$ 井为例(表 2), CI 原油以相对较低的 MPI1、MPI2、MPI3、MDR 和 DBT1, 相对较高的 $\Sigma MDBT/DBT$ 和 $\Sigma DMBT/\Sigma MDBT$ 而有别于 CII 和 CIII 原油。理论上, 在蒸发分馏形成的次生凝析油中, 其 Pr/Ph 应该比残留原油高, 其 $\Sigma MDBT/DBT$ 和 $\Sigma DMBT/\Sigma MDBT$ 值等应该比残留原油低或相当。因此, CI 原油并

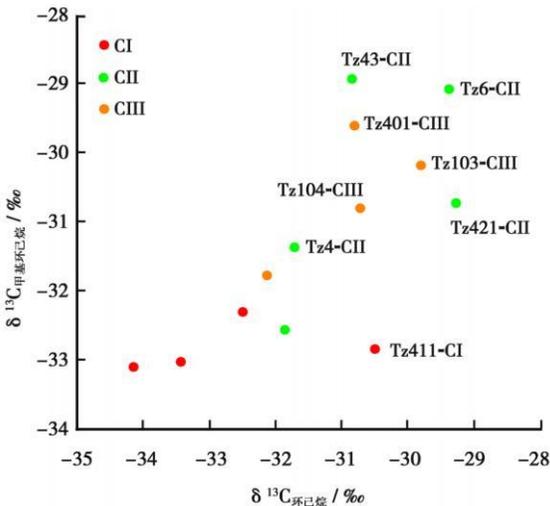


图 5 塔中 4 石炭系油藏原油轻烃单体稳定碳同位素

Fig. 5 Stable carbon isotopic components in Carboniferous oils from the Tz4 Oilfield

非下部CII和CIII原油遭受蒸发分馏改造而形成。尽管研究证实CIII原油普遍遭受蒸发分馏改造^[1,14],但蒸发分馏作用不可能是CI原油轻烃特征的主要控制因素,同时这也再次证明CI与CII—CIII也确可视为两个相对独立的成藏体系^[1]。

表2 Tz421井石炭系原油生物标志化合物指标分布

Table 2 Fossil biomarker indicators in Carboniferous oils from Tz421Well

层位	参数比值							
	Pr/Ph	MPI1	MPI2	MPI3	MDR	DBT1	$\frac{\sum\text{MDBT}}{\text{DBT}}$	$\frac{\sum\text{DMBT}}{\sum\text{MDBT}}$
CI	1.31	0.77	0.95	0.73	5.63	1.44	4.32	1.76
CII	1.36	1.00	1.11	1.37	7.01	2.00	3.23	1.21
CIII	0.99	1.38	1.55	2.00	6.18	2.18	3.70	1.49

注: MPI1=1.5(2-甲基菲+3-甲基菲)/(菲+1-甲基菲+9-甲基菲); MPI2=3(2-甲基菲)/(菲+1-甲基菲+9-甲基菲); MPI3=(2-甲基菲+3-甲基菲)/(1-甲基菲+9-甲基菲); MDR=4-甲基二苯并噻吩/1-甲基二苯并噻吩; DBT1=(2-甲基二苯并噻吩+3-甲基二苯并噻吩)/(2×1-甲基二苯并噻吩)。

4.2 水溶分馏

由于菲水溶性相对较好,遭受水溶分馏改造的原油会因此拥有较高的MPI1值而偏离有机质热成熟作用的正常演化趋势线^[13]。与由MPI3值计算得到有机质正常演化的MPI1理论值相比,CI原油样品的MPI1实际值异常偏高状况并不明显,表明原油二次运移过程中的水溶分馏作用对CI原油影响较小。因此,尽管从CIII、CII到CI,甲苯/正庚烷逐渐减小,异庚烷值逐渐增大[图3(f)],且该演化趋势与墨西哥湾Alabama地区中生代储层内原油因二次运移过程中的水溶分馏改造形成的状况相一致^[13],但水溶分馏作用也不可能是影响和控制CI原油轻烃地球化学特征的主要因素。

4.3 有机质熟化作用

从CI到CII、CIII,原油逐渐富集¹³C(图5),对于同源的一组原油而言,这很可能指示CI原油成熟度比CII、CIII低;原油高分子量芳烃成熟度指标也反映CI原油成熟度普遍要比CII、CIII低(表2);实验证实碳酸盐岩早期生成的低成熟原油富含链烷烃,与晚期生成的高成熟原油相比,早期生成的低成熟原油Thompson轻烃成熟度参数相对偏高。因此,CI原油很可能是早期生成的低成熟原油,这也许是其富含链烷烃、Thompson轻烃成熟度参数相对偏高的主要原因。相对CI而言,CII、CIII原油成熟度相对较高,所以富集轻质环烷烃、芳烃和¹³C。

4.4 原油热蚀变

众所周知,气侵对高碳数烃类的稳定碳同位素几乎没有影响^[15]。由于¹²C—¹²C、¹²C—¹³C和¹³C—¹³C

之间的键能不同,这3类键在原油热裂解过程中断裂的几率依次减小^[16-17],原油热裂解残余物因此富集¹³C。同时,因为高分子量正构烷烃热稳定性较差,易于发生裂解,稳定碳同位素动力学分馏效应也因此变得更为显著,最终导致正构烷烃单体 $\delta^{13}\text{C}$ 值随碳数增加而升高。Tz421-CIII、Tz43-CII和Tz6-CII相对富集¹³C和nC₁₁₊的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随碳数增加而升高等特征极有可能说明它们遭受了热蚀变(图4),这也是CII、CIII原油热演化程度相对较高的集中体现。

天然气组分及其稳定碳同位素资料证实塔中地区天然气形成与原油热裂解关系密切^[7,18],具体到塔中4石炭系油藏,该区天然气和地层水中富含H₂S气体,气体稳定碳同位素、储层矿物岩石学和稳定同位素地球化学等资料显示这可能与深埋寒武系一下奥陶统古油藏内的原油遭受了硫酸盐热化学还原反应改造有关^[6],尤其Tz43井天然气组成明显表现为原油热裂解气的特征^[7],这与原油轻烃稳定碳同位素指示该区Tz43-CII等样品可能遭受了热蚀变的结论相吻合。在图5轻烃单体稳定碳同位素值交会图中,若分别以CI原油和Tz421-CIII、Tz43-CII和Tz6-CII为两组端元油,CII、CIII原油大多介于两者之间,表明多数CII、CIII原油可能为热裂解原油与高成熟原油两者的混合物,这也可能是导致nC₇—nC₁₀单体 $\delta^{13}\text{C}$ 值随碳数增加而降低的重要原因之一。

原油热裂解是由热力驱动的化学动力学过程,实际地质条件下,原油发生热裂解需要一定的温度条件。原油开始大量热裂解的温度多在150~160℃以上^[19,20],硫酸盐热化学还原反应发生的温度一般也在100~120℃以上^[21]。由于地处塔中古隆起之上,古近纪以前塔中4石炭系地层底界埋深普遍小于2000m,地层温度小于90℃;古近纪至今,尤其第四纪以来,由于上覆地层快速沉积,石炭系地层埋深持续增加,储层温度迅速升高;即便如此,现今石炭系地层温度也多介于90~120℃。可见,原油热裂解在石炭系原位发生的可能性较小,而埋藏较深的寒武系一下奥陶统地层温度多介于125~200℃^[6],原油热裂解有可能发生。加之该区断层发育,遭受热蚀变改造的原油大多位于油源断裂附近(图1),因此,Tz421-CIII、Tz43-CII和Tz6-CII等遭受了热蚀变改造的原油很可能是深埋在石炭系地层以下油藏内的原油发生热裂解之后通过断层运移到石炭系聚集成藏。由于石炭系地层长期处于浅埋藏状态,这对早期生成的天然气保存是不利的,但却从另一方面表明原油热裂解对该区晚期天然气形成可能具有重要意义。新近纪以来,中—上奥陶统烃源岩正处于生油窗,原油向上运移途中也可能会有来自中—上奥陶统的原油混入。

5 结 论

塔中4碳系油藏的CI与CII—CIII油组可分别视为两个相互独立的成藏体系:CI原油主要是早期形成的低熟原油,这可能是CI原油轻烃富含正构烷烃,贫环烷烃和芳烃,链烷烃/环烷烃比值偏高和稳定碳同位素组成富含 ^{12}C 的主要原因;CI原油保存相对较好,可能只遭受了程度较弱的水溶分馏等次生改造。CII、CIII原油大多是晚期形成的高熟原油,这可能是CII、CIII原油轻烃富含环烷烃和芳烃,贫正构烷烃,链烷烃/环烷烃比值偏低以及稳定碳同位素组成富含 ^{13}C 的主要原因,原油热蚀变和蒸发分馏次生作用对CII、CIII原油轻烃地球化学特征有重要影响,多源混合也可能对CII、CIII原油轻烃地球化学特征有一定程度的影响。

致谢 中国地质大学(武汉)资源学院何生教授在行文过程中给予了精心指导和无私帮助,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 杨楚鹏,张宝民,王飞宇,等.塔里木盆地塔中4石炭系油藏成藏过程再认识[J].石油与天然气地质,2008,29(2):181-188.
Yang Chupeng, Zhang Baomin, Wang Feiyu, et al. Reassessment of the Carboniferous oil pooling in T₄ field, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 181-188.
- [2] Pan Changchun, Liu Dayong. Molecular correlation of free oil, adsorbed oil and inclusion oil of reservoir rocks in the Tazhong Uplift of the Tarim Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(3): 387-399.
- [3] 翟光明,王建君.对塔中地区石油地质条件的认识[J].石油学报,1999,20(4):1-6.
Zhai Guangming, Wang Jianjun. Analysis of petroleum geology in Tazhong region [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 1-6.
- [4] 翟光明,何文渊.塔里木盆地石油勘探实现突破的重要方向[J].石油学报,2004,25(1):1-7.
Zhai Guangming, He Wenyuan. An important petroleum exploration region in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 1-7.
- [5] 马明侠,陈新军,张学恒.塔里木盆地塔中地区寒武—奥陶系沉积特征及构造控制[J].石油实验地质,2006,28(6):549-553.
Ma Mingxia, Chen Xinjun, Zhang Xueheng. The Cambrian-Ordovician sedimentary features and structural control in the central Tarim area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(6): 549-553.
- [6] Cai C F, Hu W S, Worden R H. Thermochemical sulphate reduction in Cambrian-Ordovician carbonates in Central Tarim [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(6): 729-741.
- [7] 黄光辉,张敏,胡国艺,等.原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(II):原油裂解气和干酪根裂解气的区分方法[J].中国科学D辑:地球科学,2008,38(增刊II):9-16.
Huang Guanghui, Zhang Min, Hu Guoyi, et al. Geochemical study on oil cracked gases and kerogen-cracked gases (II): Discrimination methods between oil-cracked gases and kerogen-cracked gases [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(zk II): 10-18.
- [8] 徐志明,王廷栋,姜平,等.原油水洗作用与高凝固点原油的成因探讨[J].地球化学,2000,29(6):556-561.
Xu Zhiming, Wang Tingdong, Jiang Ping, et al. Probe on the water washing with genesis of high solidifying point crude oil [J]. Geochimica, 2000, 29(6): 556-561.
- [9] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等.塔里木海相油气的生成[M].北京:石油工业出版社,2004.
Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baomin, et al. Marine petroleum generation in the Tarim basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [10] Sun Y G, Xu S P, Lu H, et al. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim Basin, NW China: Implications from aryl isoprenoids in crude oils [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(4): 629-634.
- [11] 马柯阳,周永红,申建中.塔里木盆地气—液溶解平衡机制下的原油轻烃行为及其地质意义[J].沉积学报,1995,13(4):100-108.
Ma Keyang, Zhou Yonghong, Shen Jianzhong. Geological significance and behavior of petroleum light hydrocarbons under vapour-liquid equilibrium mechanism in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 100-108.
- [12] 马柯阳,范璞.塔北沙18井石炭系蒸发分馏成因凝析油确认的地球化学证据[J].科学通报,1995,40(19):1785-1787.
Ma Keyang, Fan Pu. Geochemical evidence for the recognition of the Carboniferous condensate by evaporative fractionation from Tabei Sha-18 Well [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(19): 1785-1787.
- [13] Thompson K F M. Contrasting characteristics attributed to migration observed in petroleum reservoirs in clastic and carbonate sequences in the Gulf of Mexico region [G]// England W A, Fleet A J. Petroleum migration. London: Geological Society Special Publication 59, 1995: 191-205.
- [14] 杨楚鹏,耿安松,廖泽文,等.塔里木盆地塔中地区油藏气侵定量评价[J].中国科学D辑:地球科学,2009,39(1):51-60.
Yang Chupeng, Geng Ansong, Liao Zewen, et al. Quantitative assessment of gas washing of oils in the Tazhong area of the Tarim Basin, Northwest China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(1): 12-21.
- [15] Sun Y G, Chen Z Y, Xu S P, et al. Stable carbon and hydrogen isotopic fractionation of individual n-alkanes accompanying biodegradation: Evidence from a group of progressively biodegraded oils [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(2): 225-238.
- [16] Hoefs Jochen. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 244.
- [17] Galimov E M. Isotope organic geochemistry [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(10): 1200-1262.
- [18] 刘全有,金之钧,王毅,等.塔里木盆地天然气成因类型与分布规律[J].石油学报,2009,30(1):46-50.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Genetic type and distribution of natural gas in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 46-50.
- [19] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 699.
- [20] Waples D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: Constraints from experimental and empirical data, and from thermodynamics [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(6): 553-575.
- [21] Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: Old and new insights [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 143-175.

(收稿日期 2010-03-09 改回日期 2010-06-31 责任编辑 熊英)