

塔里木盆地奥陶系烃源岩二次生烃研究

辛艳朋^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 秦建中³, 郑伦举³

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 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 214151)

摘要: 为研究海相烃源岩二次生烃规律和塔里木盆地生排烃规律, 以塔里木盆地奥陶系烃源岩为研究对象, 首先通过构造-热演化史和生烃史研究得出, 塔里木盆地典型构造单元奥陶系烃源岩具有二次生烃的特征, 并且起始成熟度和生烃期次不同。然后选取自然条件下演化至不同起始成熟度的奥陶系海相烃源岩, 采用热压模拟实验方法系统研究其二次生烃规律。研究表明: 塔里木盆地奥陶系海相烃源岩二次生烃的主控因素是起始成熟度, 二次生烃产率随起始成熟度增加规律性减小; 低成熟和中成熟烃源岩具有大量生排油气潜力, 出现相对延迟的生油高峰, 高成熟烃源岩没有大量生油和生气的潜力; 两次不连续生烃量与一次连续生烃量的差值也受起始成熟度控制, 具有阶段性; 起始成熟度在低成熟到成熟阶段时, 二次不连续生烃过程会增加烃源岩的生烃量, 使生烃潜力增加, 而高成熟阶段以后, 二次不连续生烃过程就会减少烃源岩的生烃量, 使生烃潜力减小。

关键词: 二次生烃; 奥陶系; 烃源岩; 高压釜; 起始成熟度; 生烃潜力; 塔里木盆地

中图分类号: P599; TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)03-0261-07

Study on Secondary Hydrocarbon Generation of Ordovician Hydrocarbon Source Rock in Tarim Basin

XIN Yan-peng^{1,2}, QIU Nan-sheng^{1,2}, QIN Jian-zhong³, ZHENG Lun-ju³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Research Center of Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Wuxi Research Institute of Experimental Petroleum Geology, Research Institute of Oil Exploration and Development, China Petroleum and Chemical Corporation, Wuxi 214151, Jiangsu, China)

Abstract: With the view of mechanism of secondary hydrocarbon generation of marine source rock and pattern of hydrocarbon generation and expulsion, Ordovician hydrocarbon source rock was taken as the object in Tarim Basin. The characteristics of Ordovician hydrocarbon source rocks in typical structural units included secondary hydrocarbon generation and different original maturities and hydrocarbon generation stages according to the study on tectonic-thermal evolution and hydrocarbon generation histories in Tarim Basin. Ordovician marine hydrocarbon source rocks with different original maturities under the natural condition were selected to discuss the pattern of secondary hydrocarbon generation according to the thermal pressure simulation. The results showed that the secondary hydrocarbon generation potential of Ordovician hydrocarbon source rocks in Tarim Basin was dominated by original maturity; secondary hydrocarbon generation production rate decreased regularly with the increase of original maturity; the hydrocarbon generation and expulsion potential of hydrocarbon source rock with low and middle maturities was high and there was relatively later hydrocarbon generation peak, and the potential of rock with high maturities was low; the difference between the amount of continuous hydrocarbon generation and the sum of the first and secondary was also dominated by original maturity; when the original maturities were low and middle, the amount and potential of hydrocarbon generation increased during the process of the first and secondary hydrocarbon generation, and the amount and potential decreased when the original maturity was high.

Key words: secondary hydrocarbon generation; Ordovician; hydrocarbon source rock; autoclave; original maturity;

收稿日期: 2011-01-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422102); 中国石油化工股份有限公司海相前瞻性研究项目(YPH08057)

作者简介: 辛艳朋(1982-), 女, 河南平顶山人, 工学博士研究生, 从事沉积盆地构造-热演化和油气成藏机理研究。E-mail: xinyanpeng82@163.com

0 引言

二次生烃是指烃源岩在地质历史过程中初次进入生烃门限之后,由于抬升剥蚀等原因造成生烃作用停止;此后地层再次深埋或特殊的地质热事件使地层温度升高,达到合适的热动力学条件,使烃源岩再次生烃的过程。在实际研究中,一般习惯于把烃源岩第一次生烃之后的第二次和多次生烃过程统称为二次生烃。二次生烃会影响盆地中现今油气藏的分布,国内外有很多实例^[1-4]。目前针对二次生烃的研究,一方面是通过盆地的构造-热演化史和烃源岩分布、地化特征等来分析二次生烃的发生条件、分布范围以及对油气藏的影响,另一方面通过热模拟实验方法,研究烃源岩二次生烃的生烃过程、生烃量、反应机制以及化学动力学等机理和生烃规律。研究表明:与连续生烃相比,烃源岩二次生烃在生烃过程、生烃量、反应机制以及化学动力学等方面都存在显著差异^[5-19],并且这些差异将对含油气盆地生烃潜力和油气藏分布有着深远影响^[20-29]。

塔里木盆地是中国主要的大型含油气盆地之一,是一个多旋回叠合盆地,下古生界是主要烃源岩层系,受多期次构造沉积及热演化史的控制,寒武系和奥陶系海相烃源岩二次生烃作用十分普遍^[23-31]。但是,目前针对塔里木盆地二次生烃的研究,无论是

在海相烃源岩二次生烃机理,还是在二次生烃分布规律及对油气藏的影响方面,都鲜有报道。因此,笔者以塔里木盆地奥陶系烃源岩为研究对象,基于构造-热演化史研究海相烃源岩二次生烃特征,并通过二次生烃模拟实验探讨海相烃源岩二次生烃机理及多阶段生烃过程对烃源岩生烃潜力的影响。

1 地质概况及奥陶系烃源岩二次生烃特征

塔里木盆地发育震旦系与下古生界(Z-S)海相—海陆交互相地层、上古生界(D-P)海陆交互相—陆相地层、中生界(T-K)陆相地层以及新生界(E-Q)海相—陆相地层。寒武系—奥陶系海相烃源岩是主力烃源岩层。奥陶系烃源岩分布于满加尔凹陷、塔中隆起、塔北隆起、阿瓦提凹陷及柯坪露头区。盆地先后经历了塔里木、库鲁克塔格、加里东、海西、印支、燕山、喜山等多期构造运动,历经多次沉降与隆升,不同构造层呈现不同的复杂构造特征,通常以下古生界“三隆四坳”的构造格局将盆地划分为7个构造单元,自北向南依次为:库车坳陷、塔北隆起、北部坳陷、中央隆起、西南坳陷、塔南隆起、东南坳陷(图1)^[32-33]。塔里木盆地边缘受多阶段板块运动的影响,产生多期地质热事件,它们发育的时代分别为震旦纪—寒武纪、奥陶纪、二叠纪、白垩纪等。塔里

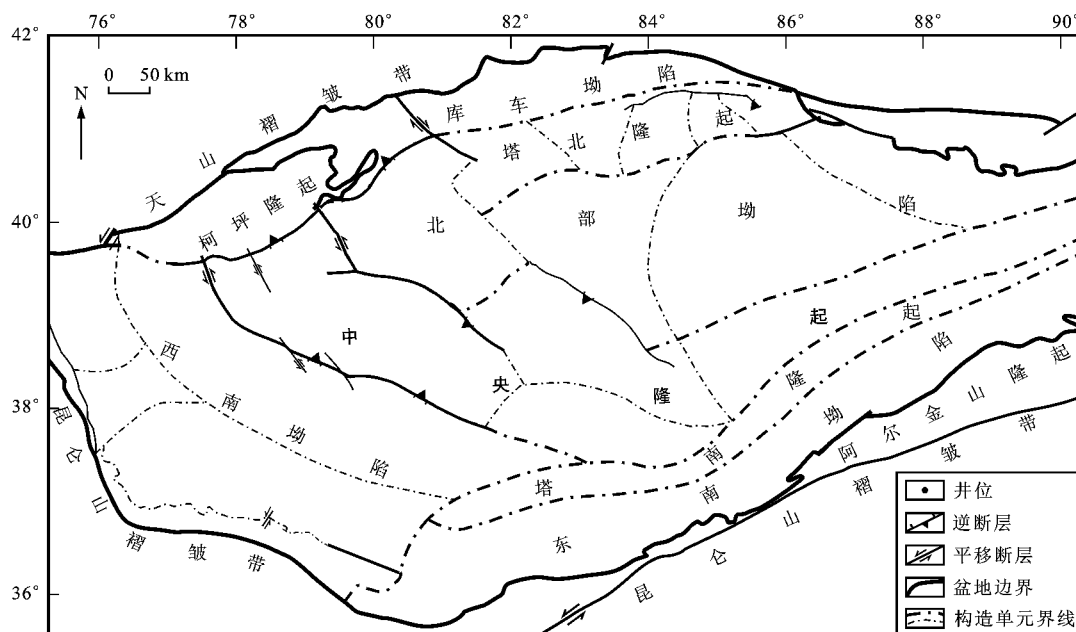


图 1 塔里木盆地构造单元划分

Fig. 1 Sketch Map of Structural Units in Tarim Basin

木盆地油气形成和演化受盆地演化和地质热事件的影响,具有复杂的多期次、动态化特征^[23-28],寒武系和奥陶系早期生成的油气由于加里东期和海西期强烈构造运动大部分已经散失,中新生代以来的二次生烃显得异常重要。通过主要构造单元典型钻井和人工井构造-热演化史和生烃史研究,可以得出奥陶系烃源岩二次生烃的发生时间和期次。

塔中隆起的卡塔克隆起、西南坳陷的麦盖提斜坡、塔北隆起的沙雅隆起和塔中隆起的古城墟隆起的奥陶系烃源岩都有二次生烃发生,但是其二次生烃的起始成熟度和生烃期次有所不同。奥陶系烃源岩基本上都是在奥陶纪末期进入生烃门限的,不同构造单元经历了不同程度的一次生烃;然后受到早古生代末构造运动的影响,生烃过程停止;之后又在不同的构造-热演化史控制下开始不同时间和期次的二次生烃。例如卡塔克隆起的奥陶系烃源岩一次生烃终止时处于低成熟阶段,石炭纪—二叠纪大地热流升高和地层埋深的双重作用,该套烃源岩开始

二次生烃的过程,由低成熟阶段演化至现今的中—高成熟阶段(图2a、b)。二叠纪以来的二次生烃才是卡塔克隆起奥陶系烃源岩的主要生烃期。在麦盖提斜坡,二次生烃起始成熟度也为低成熟,在石炭纪演化至低—中成熟阶段之后,在二叠纪停止生烃,之后在新近纪又再次开始生烃(图2c、d)。沙雅隆起英买7井奥陶系烃源岩层自奥陶纪进入低—中成熟阶段,从海西期到燕山期都经历了大规模的挤压抬升,地层剥蚀十分严重,直到新生代才接受沉积开始下沉,大致在古近纪末期(距今20 Ma)才发生二次生烃,演化至中—高成熟阶段(图2e、f)。古城墟隆起上,生烃史显示奥陶系烃源岩一次生烃终止时,各个层位演化至低、中、高不同的成熟阶段,在距今大约250 Ma和100 Ma时还有两次生烃过程(图2g、h)。

2 二次生烃模拟实验

塔里木盆地奥陶系烃源岩的二次生烃在不同构

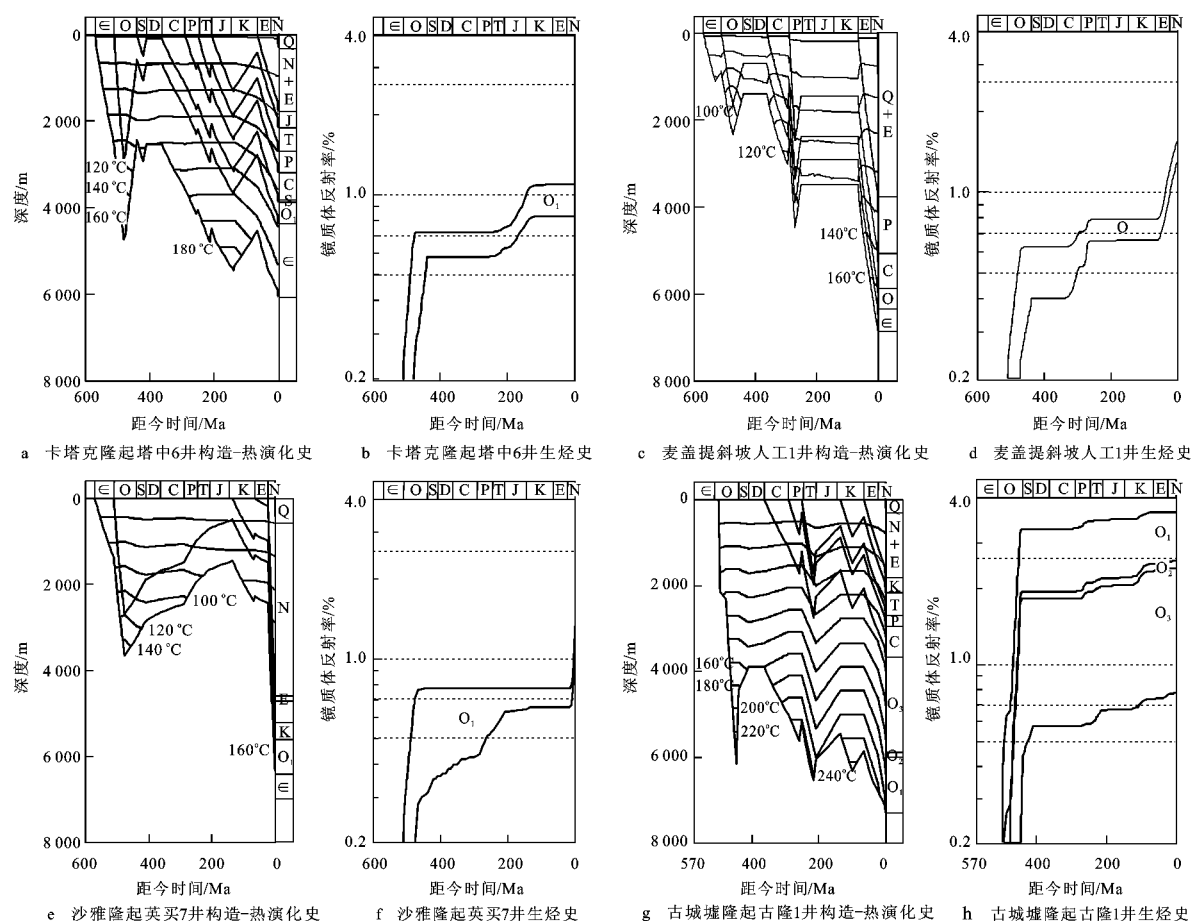


图2 塔里木盆地主要构造单元典型井构造-热演化史与生烃史特征

Fig. 2 Tectonic-thermal Evolution and Hydrocarbon Generation Histories of Typical Wells in Main Structural Units of Tarim Basin

造单元的特征不同,主要区别在于二次生烃起始成熟度不同和二次生烃开始时间不同。根据上述特征,为了研究塔里木盆地奥陶系烃源岩二次生烃规律,需要探讨烃源岩在不同起始成熟度下的二次生烃机理和规律,笔者选取了塔里木盆地等效镜质体反射率(R_o)分别为 1.03%、1.26%、1.58% 的 3 个

表 1 塔里木盆地奥陶系二次生烃样品基本地化特征

Tab. 1 Basic Geochemical Parameters of Ordovician Secondary Hydrocarbon Generation of Samples in Tarim Basin

样品	地区	层位	岩性	R_o /%	总有机碳/%	沥青 A/%	$t_{max}/^{\circ}C$	生烃潜力/ 10^{-3}	干酪根类型
X	云南楚雄	D ₂	泥灰岩	0.58	0.56	0.650 5	443		II ₁
A	塔里木柯坪	O ₂	页岩	1.03	1.69	0.151 7	465	3.22	II ₁
B	塔里木柯坪	O ₂	含钙泥岩	1.26	1.99	0.152	457	3.46	II ₁
C	塔里木塔中	O ₃	泥灰岩	1.58	0.24	0.003 71	438	0.16	II ₁

注:总有机碳、沥青 A 均为质量分数;样品 X 数据参考文献[13-14]。

热模拟实验采取单点密闭生烃方式,每个样品的实验包括 250 °C~550 °C 的 7、8 个不同温度点的热模拟生烃过程,温度点间隔为 50 °C 或者 25 °C (表 2)。针对不同样品,热模拟温度点的选取有所差异,主要与样品的 R_o 有关(表 2)。前人研究认为,样品 R_o 与温度相关性高,二次生烃过程中不同起始成熟度样品的 R_o 随温度变化规律与连续生烃的相同,可以用统一的公式来描述^[5]。借助这种计算方法,结合实验过程中的测量结果,对页岩和泥灰岩的高压釜模拟温度(t)和 R_o 的关系进行拟合,得出的页岩高压釜热模拟温度和 R_o 的计算公式为 $R_o = 0.211 0e^{0.005 0 t}$,泥灰岩高压釜热模拟温度和 R_o 的计算公式为 $R_o = 0.182 6e^{0.005 3 t}$ 。有些温度点的实验未能测量产物的 R_o 可以利用上述公式计算 R_o 。将热模拟温度转换到 R_o 标尺上,可以更明确地讨论二次生烃中成熟度与生烃规律的内在联系。为了使不同的样品生烃量可以在统一尺度上进行对比,将烃产量换算成烃产率进行比较。本文中生烃产率(K)是指烃源岩中所含的每克总有机碳产出的烃量(10^{-3}),公式表达为

$$K = \frac{I}{wm}$$

式中: I 为生烃量; w 为样品中总有机碳质量分数; m 为样品质量。热压模拟实验在中国石油化工股份有限公司无锡石油地质研究所进行,所用仪器为该所自行研制的常规高压釜密闭热压生烃模拟仪,反应釜容积为 0.25 L,内部压力为 20 MPa,最高模拟温度 600 °C。为使实验环境尽量接近地质条件,对样品颗粒大小、样品用量和加水量等都要做一定的控制。样品颗粒直径为 2.5~10 mm,用量为 50~160 g,加水量为样品质量的 5%~10%。每个温度点的实验

奥陶系烃源岩样品,干酪根类型皆为 II₁ 型(表 1)。由于塔里木盆地奥陶系地层现今成熟度都比较高,无法找到未成熟和低成熟阶段的样品,为了得到更系统的结果进行分析比对,在干酪根类型和实验条件一致的基础上,参考前人利用云南楚雄低成熟泥灰岩所做的实验结果^[13-14]。

表 2 塔里木盆地奥陶系烃源岩二次生烃热压模拟实验概况

Tab. 2 Thermal Pressure Simulation Scheme for Secondary Hydrocarbon Generation of Ordovician Hydrocarbon Source Rock in Tarim Basin

样品	模拟温度/ $^{\circ}C$							
	250	300	350	375	400	450	500	550
A	★	★	★		★	★	★	
B	★	★	★		★	★	★	
C			★	★	★	★	★	★

注:★为对应温度点下的样品进行了热模拟实验。

都采用原样单独加温到设定温度,实验过程为:将样品和纯水加入到反应釜中,密封后充入 4~6 MPa 的氮气,置入水槽试漏,待不漏后,用真空泵抽空再充氮气,反复 3~5 次,最后一次抽空之后进行加温实验,按 1 °C/min 的升温速率达到设定温度后恒温 24 h;当反应结束釜内温度降到 200 °C 时开始放气,热解气首先通过液氮冷却的液体接受管,再通过冰水冷却的螺旋管,最后进入计量管被收集;液体接受管中的水和气携凝析油加入二氯甲烷后再进行分离,并用二氯甲烷萃取水液 3 次,通过色谱法和质量进行定量分析,得出气携凝析油产量;高压釜盖、内壁和岩石表面附着的油状物用二氯甲烷冲洗,二氯甲烷挥发后得到排出的釜壁轻质油;残样用氯仿抽提沥青 A 得到残留油;气携凝析油、釜壁轻质油和残留油三者之和为总油产量。这种实验过程模拟了发生过一次生排烃的烃源岩由于二次埋深演化至高—过高成熟阶段后进行的二次生排烃过程。

3 结果分析

3.1 塔里木盆地烃源岩二次生烃规律

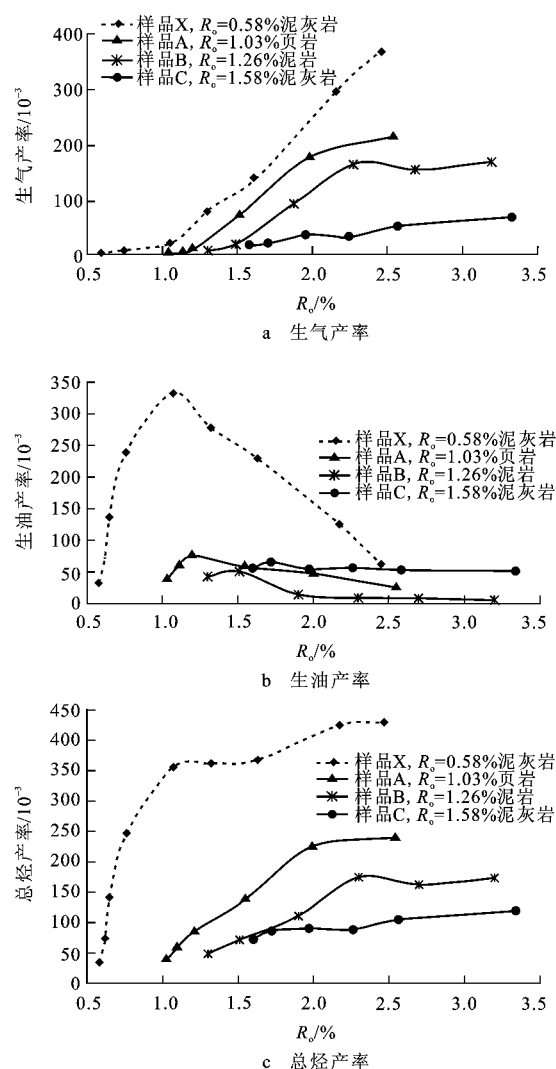
从图 3 可以看出:①低成熟样品 X 和中成熟样

品 A、B 在 $R_o < 2.0\%$ 时生气产率都有明显增加, R_o 超过 1.5% 的样品 C 生气产率一直小于 70×10^{-3} , 也没有明显升高; 并且样品 X、A、B 生气产率开始明显增加时所对应的 R_o 大致分别为 1.0% 、 1.2% 、 1.5% , 即演化程度越低的样品在开始大量生气时需要的温度越低; 因此, 低成熟和中成熟的烃源岩具有较强的生气潜力, 而高成熟烃源岩没有大量生气的潜力, 并且生气潜力随着起始成熟度的增大呈规律性减小(图 3a); ②样品 X 具有明显生油高峰, 出现位置 R_o 为 1.07% , 样品 A、B、C 的生油高峰都不明显, 生油高峰时 R_o 依次为 1.2% 、 1.5% 、 1.7% , 因此二次生烃依然有生油高峰出现, 生烃高峰位置随起始成熟度增大而规律性后移, 但是只有处于低成熟阶段的样品具有较明显的生烃高峰, 并且与传统一次连续生烃高峰位置($R_o = 1.0\%$)最接近, 另外已经进入中—高成熟阶段的样品二次生油高峰不明显(图 3b); ③对于不同起始成熟度烃源岩来讲, 总烃产率都是先增加后趋于稳定(图 3c), 并且总烃产率随起始成熟度增大而规律性减小。

以上特征说明, 影响海相烃源岩二次生烃的主控因素是起始成熟度。低成熟和中成熟烃源岩具有大量生排油气潜力, 相对生油高峰均向后有所延迟; 从低成熟演化至高成熟早期, 产物以油为主, 气体产率相对较低; 在 R_o 为 1.50% 左右开始, 大量生成气体, 同时油产率急剧下降, 主要烃类产物为凝析油、轻质油和湿气; 演化至高成熟晚期, 主要产物为气体; 演化至过成熟阶段, 其生烃产率不再有明显增加, 基本为干气; 高成熟烃源岩没有大量生油和生气阶段, 生烃产率不会急剧增加; 演化至过成熟阶段之前, 主要烃类产物为凝析油、轻质油和湿气。因此, 起始成熟度在生油窗之前, 尚具有较强的二次生油潜力, 在达到高成熟阶段之前, 还具有较强的产气潜力, 其大量生气时对应的成熟度相对延迟, 有利于天然气的晚期成烃成藏。

3.2 多阶段生烃过程对烃源岩生烃潜力的影响

烃源岩二次生烃是在一次生烃的基础上进行的。二次生烃量与一次生烃量之间有着必然的联系。关于二次生烃量及一次、二次生烃量之和与一次连续生烃量的关系, 前人做过大量研究, 但是对结果持有不同意见。较早的大部分研究者认为一次、二次生烃量之和与一次连续生烃量基本相同, 二次生烃不影响烃源岩生烃潜力^[5-8]。之后关于煤系烃源岩较系统的二次生烃实验表明, 一次、二次生烃量之和是否大于一次连续生烃量具有阶段性^[10-12]。也



注: 样品 X 引自文献 [13-14]。

图 3 不同起始成熟度海相烃源岩二次生烃产率特征
Fig. 3 Secondary Hydrocarbon Generation Production Rate of Marine Hydrocarbon Source Rock with Different Original Maturities

有结果显示, 经历过两次不连续生烃的烃源岩累计生烃量始终大于连续生烃量, 而且两次不连续生烃的过程不同, 生烃量也不相同。经历了较高一次生烃温度的样品, 其二次累积生烃量呈下降趋势^[13-14]。造成上述二次生烃量评价的分歧, 可能有仪器、样品、实验流程等多方面原因。笔者认为烃源岩的生烃潜力不仅与原始有机质含量和类型有关, 还与所经历的热演化路径有关, 二次生烃必然影响烃源岩的评价; 既然烃源岩二次生烃产率是与起始成熟度密切相关的, 说明多次不连续的生烃过程对生烃潜力的影响也应当与烃源岩开始生烃的起始成熟度密切相关。将样品 A、B 进行二次生烃实验, 结合起始成熟度的海相烃源岩 (R_o 为 0.58%) 的实验结果,

对比不同起始成熟度海相烃源岩两次不连续生烃量和一次连续生烃量的差值。

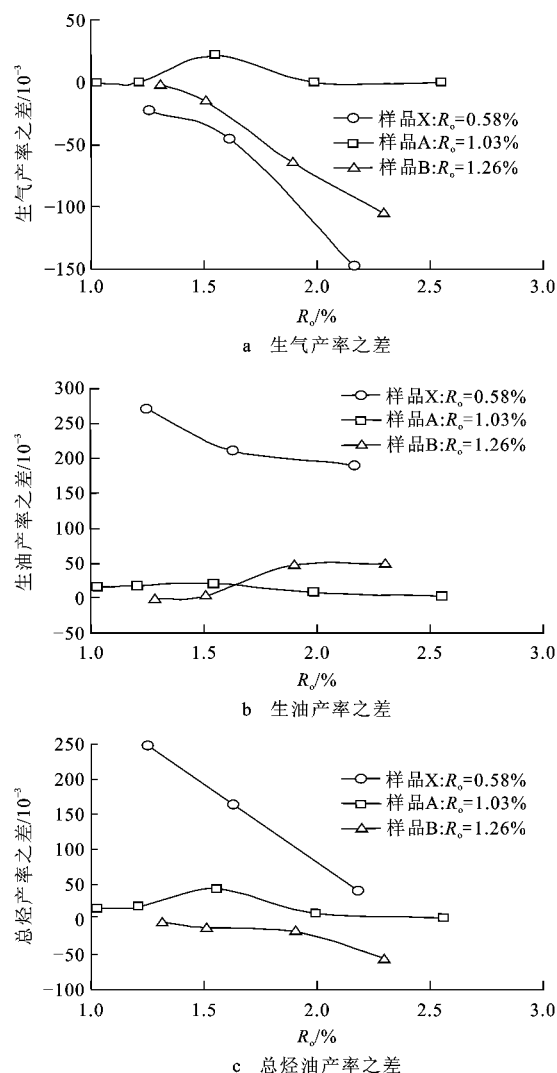
温度为 t 的二次生烃实验过程为:原样首先按一定升温速率加热到指定温度 t_0 ($t=t_0+50\text{ }^{\circ}\text{C}$),恒温 24 h,反应结束后降温至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,收集气体和凝析油,此为一次生排烃过程;不打开高压釜,自然降至室温,补充等量水后,按同样的升温速率再次升温至较高温 t ,恒温 24 h,反应完毕后降至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 收集气体与凝析油、轻质油和固体残渣,此为二次生排烃过程(成熟度较大的原样实际为三次生烃)。在不同温度点按这种方式每次取原样依次从低温点做到高温点。这种模拟实验表示的生烃演化过程为:烃源岩→埋深、生烃→抬升剥蚀、部分排烃(凝析油、水与气体)→二次埋深、二次生排烃→二次抬升剥蚀、排烃。

图 4 为 R_o 分别为 0.58%、1.03%、1.26% 的 3 个起始成熟度烃源岩一次+二次生烃产率和一次生烃产率的差值。比较可知:①起始成熟度处于生油高峰时(R_o 为 1.03%),两次不连续生气产率与一次连续生气产率相差最小,而低成熟和过成熟的烃源岩,两次不连续生气潜力都小于一次连续生气潜力,说明在生油高峰的烃源岩其生气潜力最不容易受到多次生烃过程影响;②两次不连续生油产率大于一次连续生气产率,并且对于未成熟阶段烃源岩,其差值最大,说明对于未成熟烃源岩,不连续生烃过程更有利于生成和排出液态油;③总烃产率的差值随起始成熟度增大而逐渐减小,未成熟烃源岩两次不连续生烃量远大于一次连续生烃量,而对于处在生油高峰的烃源岩,其差值较小,过了生油高峰之后,两次不连续生烃量转而低于一次连续生烃量,说明海相烃源岩二次生烃量特征与煤系烃源岩有类似之处,依然受起始成熟度控制,并具有阶段性。

4 结语

(1)控制塔里木盆地奥陶系海相烃源岩二次生烃的主控因素是起始成熟度。二次生烃产率随起始成熟度增加规律性减小。低成熟和中成熟烃源岩具有大量生排油气潜力,出现相对延迟的生油高峰。高成熟烃源岩没有大量生油和生气的的能力。

(2)两次不连续生烃量与一次连续生烃量的差值受起始成熟度控制,具有阶段性。起始成熟度在低、中演化阶段的烃源岩,二次不连续生烃过程会增加烃源岩的生烃量,使生烃潜力增加。而对于高成熟阶段的样品来说,二次不连续生烃过程就会减少



注:样品 X 引自文献[13-14]。

图 4 不同起始成熟度烃源岩一次、二次生烃量之和与一次连续生烃产量的差值

Fig. 4 Difference Between the Amount of Continuous Hydrocarbon Generation and the Sum of the First and Secondary for Hydrocarbon Source Rock with Different Original Maturities

烃源岩的生烃量,使生烃潜力减小。

(3)由于受构造-热演化史控制,塔里木盆地各构造单元奥陶系烃源岩二次生烃的起始成熟度、过程和期次都有所差别,这必然影响各构造单元的油气特征和资源潜力。卡塔克隆起由于奥陶系烃源岩一次生烃终止时处于低成熟阶段,所以应该还具有较大的生排油气潜力,二叠纪以来开始的二次生烃才是卡塔克隆起奥陶系烃源岩的主要生烃期。对于麦盖提斜坡来说,二次生烃起始成熟度也处于低成熟阶段,而且一次生烃停止之后,又分别在石炭纪和新近纪开始两次生烃过程。实验结果表明:低成熟

烃源岩具有大量生排油气潜力,并且对于低成熟到成熟阶段的烃源岩来说,二次不连续生烃过程会增加烃源岩的生烃潜力。因此麦盖提斜坡上的奥陶系烃源岩石炭纪之后的生烃对油藏形成有很大贡献。沙雅隆起与卡塔克隆起类似,二次生烃时间较晚,但烃源岩成熟演化的时间相对短,在 20 Ma 左右时间内就演化到了中—高成熟阶段,油气藏受构造运动影响小,可能更有利于保存。古城墟隆起奥陶系烃源岩一次生烃终止时,大部分烃源岩演化至高成熟阶段,且经历了二次、三次生烃,所以生烃潜力会显著减小。

参考文献:

- [1] Johnsson M J, Howell D G, Bird K J. Thermal Maturity Patterns in Alaska: Implications for Tectonic Evolution and Hydrocarbon Potential[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(11): 1874-1903.
- [2] Tissot B P. Recent Advances in Petroleum Geochemistry Applied to Hydrocarbon Exploration[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(5): 545-563.
- [3] Tissot B P, Welte D P. Petroleum Formation and Occurrence [M]. Heidelberg: Springer, 1984.
- [4] 赵宗举. 再生烃油气系统成因及全球分布[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4): 5-12.
- [5] Liu L F, Wang W H, Li S Y. Thermal Modelling of Secondary Generation of Hydrocarbon [J]. Scientia Geologica Sinica, 1996, 5(3): 345-348.
- [6] Zou Y R, Yang Q, Liu D M, et al. Maturity Control on the Patterns of Hydrocarbon Regeneration from Coal [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(2): 370-374.
- [7] 汤达祯, 王激流, 林善园, 等. 煤二次生烃作用程序热模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2000, 22(1): 9-15.
- [8] 宫色, 李剑, 张英, 等. 煤的二次生烃机理探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 541-544.
- [9] 张欣国, 缪九军, 王果寿, 等. 石炭—二叠纪煤系烃源岩二次生烃模拟实验结果探讨[J]. 天然气技术, 2007, 1(3): 25-29.
- [10] 秦勇, 朱炎铭, 范炳恒, 等. 沉积有机质二次生烃理论及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [11] 张有生, 秦勇, 刘焕杰, 等. 沉积有机质二次生烃热模拟实验研究[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 273-282.
- [12] 关德师, 王兆云, 秦勇, 等. 二次生烃迟滞性定量评价方法及其在渤海湾盆地中的应用[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 533-538.
- [13] 李慧莉, 金之钧, 何治亮, 等. 海相烃源岩二次生烃热模拟实验研究[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1322-1328.
- [14] 李慧莉. 多旋回叠合盆地中的多方式动态生烃特征与油气成藏——以塔里木盆地为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [15] 辛艳朋, 秦建中, 郑伦举, 等. 海相页岩二次生烃潜力热模拟实验研究[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1079-1084.
- [16] 耿新华, 耿安松, 熊永强, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩热解动力学研究: 全岩和干酪根的对标[J]. 地球化学, 2005, 34(6): 612-618.
- [17] 卢双舫, 钟宁宁, 薛海涛, 等. 碳酸盐岩有机质二次生烃的化学动力学研究及其意义[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(2): 178-184.
- [18] 秦建中, 刘宝泉, 郑伦举, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩生排烃能力研究[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 348-355.
- [19] Zhang Q, Huang H P, Zheng L J, et al. Secondary Hydrocarbon Generation Potential from Heavy Oil, Oil Sand and Solid Bitumen During the Artificial Maturation [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(12): 2024-2035.
- [20] 林小云, 刘建. 二次生烃机理在中下扬子高演化烃源岩评价中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 99-104.
- [21] 朱炎铭, 秦勇, 范炳恒, 等. 武清凹陷石炭—二叠系烃源岩的二次生烃评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(1): 77-84.
- [22] 郑礼全, 李贤庆, 钟宁宁. 华北地区上古生代煤系有机质热演化与二次生烃探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 21-25.
- [23] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [24] 刘国臣, 吕修祥, 金之钧. 从波动观点看塔北地区油气藏的形成演化——以英买 7 油藏为例[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 141-148.
- [25] 邱楠生, 金之钧, 王飞宇. 多期构造演化盆地的复杂地温场对油气生成的影响——以塔里木盆地塔中地区为例[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 142-144.
- [26] 邱楠生, 金之钧, 李京昌. 塔里木盆地热演化分析中热史波动模型的初探[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 398-406.
- [27] 党森, 赵虹, 姜常义. 塔里木盆地东北部侏罗系烃源岩特征及初步评价[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 1-5.
- [28] 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 等. 塔里木盆地的热史[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 613-617.
- [29] 李宇志, 梁书义, 刘克奇. 塔中地区早古生代单源三位油气成藏体系[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(2): 45-48.
- [30] 解启来, 周中毅, 施继锡, 等. 塔里木盆地塔中地区下古生界二次生烃的类型及其特征[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 377-383.
- [31] 肖芝华, 胡国艺, 钟宁宁, 等. 塔里木盆地煤系烃源岩产气率变化特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 9-13.
- [32] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [33] Zhang S C, Hanson A D, Moldovan J M, et al. Paleozoic Oil-source Rock Correlations in the Tarim Basin, NW China [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(4): 273-286.