

文章编号:1009-3850(2018)01-0103-10

北部湾盆地乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征

刘 洋¹, 任拥军¹, 杨希冰², 刘红艳³, 徐新德²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 3. 大庆油田有限责任公司第七采油厂, 黑龙江 大庆 163517)

摘要:以大量烃源岩样品地球化学分析为基础,综合应用钻井以及地震等地质资料,从有机质丰度、类型、成熟度、母质来源、沉积环境以及生物标志物等方面对乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征进行了研究。研究表明,流三段发育于还原湖泊环境,有机质丰度较高,类型主要为Ⅱ₁-Ⅱ₂型;流二段沉积于弱还原至还原环境,有机质丰度最高,尤其是流二段油页岩基本为优质烃源岩,有机质类型以Ⅱ₁-Ⅱ₂型为主;流一段沉积于偏氧化性湖泊环境,有机质丰度最低,类型以Ⅱ₂-Ⅲ型为主。依据烃源岩综合演化剖面,将其热演化过程划分为未成熟、低成熟、成熟和高成熟4个阶段,确定了烃源岩生烃门限深度为2900m,生烃高峰位于3600m。低伽马蜡烷指数显示流沙港组沉积时期水体为淡水环境,丰富的4-甲基甾烷表明水生低等植物对烃源岩母质来源有较大贡献。

关键词:烃源岩;流沙港组;乌石凹陷;地球化学特征;生物标志物

中图分类号:TE122

文献标识码:A

烃源岩研究一直是含油气盆地油气勘探中的基础工作,各国石油地质学家对其进行了多方面大量的研究。20世纪60年代后期,Tissot等人提出干酪根热降解学说^[1];20世纪80年代,黄第藩等人总结了一套适合我国陆相有机质成烃演化的理论^[2],以及胡朝元提出的“源控论”^[3],都极大地丰富了我国油气勘探理论。

乌石凹陷位于北部湾盆地南部凹陷中部(图1)。凹陷东西走向,平面上呈“S”型,北靠企西隆起,南部以流沙凸起为界,总面积2560km²。其被凹中构造脊分为东、西两洼,东洼受7号断层控制,形成南断北超的半地堑,洼内发育多个掀斜断块。西洼受6号断层控制,为北断南超的箕状断陷,洼内结

构相对简单,发育大型滚动背斜^[4-5]。基岩为石炭系石灰岩及下古生界变质岩。新生界自下而上发育古近系长流组、流沙港组、涠洲组,新近系下洋组、角尾组、灯楼角组、望楼港组和第四系^[6]。乌石凹陷自1979年开始钻探以来,已经发现了乌石16-1、17-1、17-2、22-1、22-7等含油构造或油田,说明具有良好的含油气远景^[7-9]。苏厚熙(1993),张智武等(2013),孙伟等(2008),朱继田等(2010),杨海长等(2011、2009)对凹陷构造、沉积、及成藏特征进行了初步研究^[4-5,10-13]。其中流沙港组流二段被认为是主力烃源岩段^[10],流二段中部的砂岩段是本区主要勘探目的层^[11]。目前乌石凹陷整体勘探程度不高,对流沙港组烃源岩生烃潜力尚未进行系统研

收稿日期:2016-03-09; 改回日期:2016-07-12

作者简介:刘洋(1990-),男,硕士研究生,研究方向为油气地质与勘探。E-mail:happymrliu@126.com

资助项目:乌石凹陷优质烃源岩评价与油气成藏规律研究(编号:05N13011360)资助

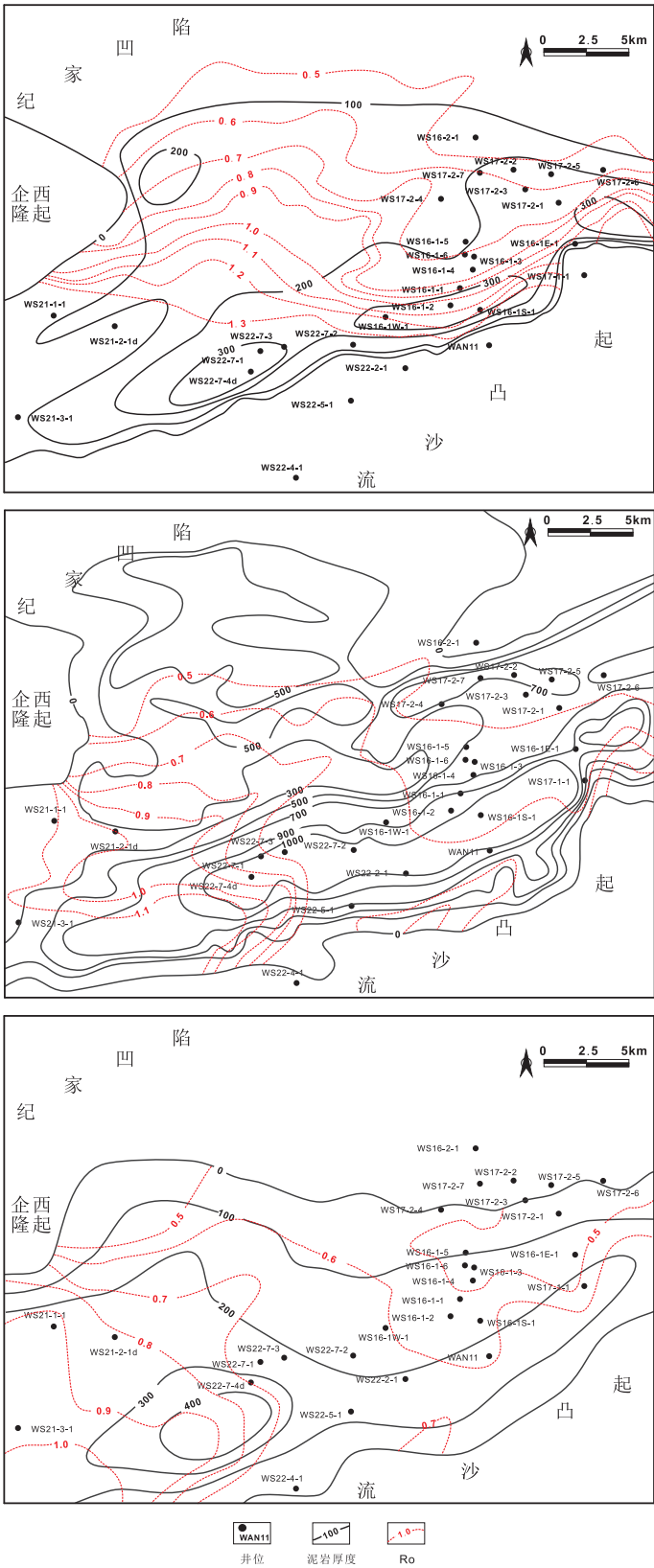


图2 乌石凹陷流沙港组泥岩厚度与成熟度分布特征
a. 流三段;b. 流二段;c. 流一段

Fig.2 Distribution of mudstone thickness and maturity in the Liushagang Formation, Wushi depression

评价有机质丰度的常用指标有有机碳含量(TOC, %)、生烃潜量($S_1 + S_2, \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、氯仿沥青“ A”(%)和总烃含量(HC, 10^{-6})^[17]。采用黄第藩等提出的陆相油源有机质评价标准^[2],对流沙港组烃源岩进行评价。通过对乌石凹陷 710 个有机碳数据、318 个氯仿沥青“ A”数据、624 个岩石热解数据进行统计(表 1)。统计分析发现,单独从 TOC 指标

(图 3a)来看,流一段泥岩样品非有效烃源岩占 40% 以上,其他各级别烃源岩均匀分布,中等-优质烃源岩占 49%;流二段泥岩样品 97% 以上为中等以上烃源岩,且大部分为好-优质烃源岩。流二段油页岩 TOC 值基本达到 2% 以上,为优质烃源岩;流三段烃源岩样品 81% 为中等以上烃源岩。

表 1 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质丰度综合评价表

Table 1 Evaluation of the organic matter abundances in the source rocks from the Liushagang Formation, Wushi depression

层位	TOC(%)	氯仿沥青" A"(%)	HC(10^{-6})	($S_1 + S_2$)($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	丰度分级
流一段	$\frac{0.073 \sim 17.9}{1.18(140)}$	$\frac{0.0041 \sim 0.3854}{0.081(30)}$	$\frac{94.55 \sim 2347.70}{715.5(18)}$	$\frac{0.09 \sim 115.15}{3.71(131)}$	差-中等
流二段 泥岩	$\frac{0.04 \sim 9.23}{1.84(415)}$	$\frac{0.0019 \sim 0.8581}{0.165(219)}$	$\frac{8.67 \sim 8163.97}{930.05(194)}$	$\frac{0.01 \sim 40.04}{6.2(348)}$	好-优质
流二段 油页岩	$\frac{0.84 \sim 16.48}{3.99(87)}$	$\frac{0.098 \sim 1.3964}{0.503(48)}$	$\frac{452.69 \sim 11963.34}{3178.92(48)}$	$\frac{2.46 \sim 102.59}{20.08(87)}$	优质
流三段	$\frac{0.03 \sim 6.23}{1.61(68)}$	$\frac{0.0528 \sim 0.389}{0.15(21)}$	$\frac{311.52 \sim 2977.41}{1077.37(19)}$	$\frac{0.12 \sim 42.35}{6.86(58)}$	好-优质

注:表中分式代表 $\frac{\text{最小值}-\text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$

研究表明,我国陆相淡水-半咸水沉积中,主力烃源岩的氯仿沥青“ A”含量均在 0.1% 以上,平均值为 0.1% ~ 0.3%^[18]。高岗等在研究鄂尔多斯盆地陇东地区湖相烃源岩时提出氯仿沥青“ A”质量分数下限值为 0.03%,总烃质量分数下限值为 150×10^{-6} ^[19]。就氯仿沥青“ A”和总烃含量统计来看,流沙港组烃源岩多数为中等 ~ 优质烃源岩。流三段烃源岩样品依据氯仿沥青“ A”含量划分的中等、好、优质烃源岩分别占 42%、32%、26%,而依据总烃含量划分的 3 个级别烃源岩分别占 17.65%、29.41% 和 52.94%(图 3b,c),说明氯仿沥青“ A”与总烃含量表现出了非同步变化,原因可能是流三段埋深较大,相对较高的成熟度造成了流三段烃源岩样品中总烃含量在氯仿沥青“ A”中所占比例异常高。

生烃潜量受风化和成熟度的影响较大^[20]。依据黄第藩等的划分标准,利用流沙港组各段烃源岩生烃潜量($S_1 + S_2$)作为划分指标,流一段中等以上烃源岩样品只有 36%,大部分样品属于差的烃源岩;流二段泥岩样品中等-优质烃源岩占 78%,大部分为中等-好的烃源岩,此段油页岩基本上为好-优质烃源岩;流三段中等以上烃源岩样品占 74%,以

中等-好的烃源岩为主。评价的结果较其它参数统计的结果偏低。为此重新定义适用于本区的评价烃源岩丰度的新标准:($S_1 + S_2$)大于 6.0 时为优质烃源岩;2.0 ~ 6.0 之间为好的烃源岩;1 ~ 2 为中等质量烃源岩;小于 1 则为差烃源岩。根据新的划分标准,对各段烃源岩有机质丰度进行分级统计,并作出相应频率分布图,得到了与其它指标较为一致的结果(图 3d)。

2.2 有机质类型

有机质的质量决定着生烃能力的大小及生成烃类的性质和组成^[21]。在同等演化条件下,不同母质类型的烃源岩,其生烃潜力可能相差几倍甚至十几倍。类型不同的生烃母质其产物性质也有所不同:水生藻类来源的腐泥型母质生成环烷烃石油,而高等植物来源的腐殖型母质则生成石蜡基或芳香族石油^[22]。本文利用干酪根显微组分分析、干酪根元素分析、岩石热解参数等方法对有机质类型进行了划分。

统计分析发现,流沙港组烃源岩干酪根显微组分中腐泥组与镜质组占优势(图 4a)。腐泥组生油潜能最大而镜质体及贫氢无定形体生油潜能差,以

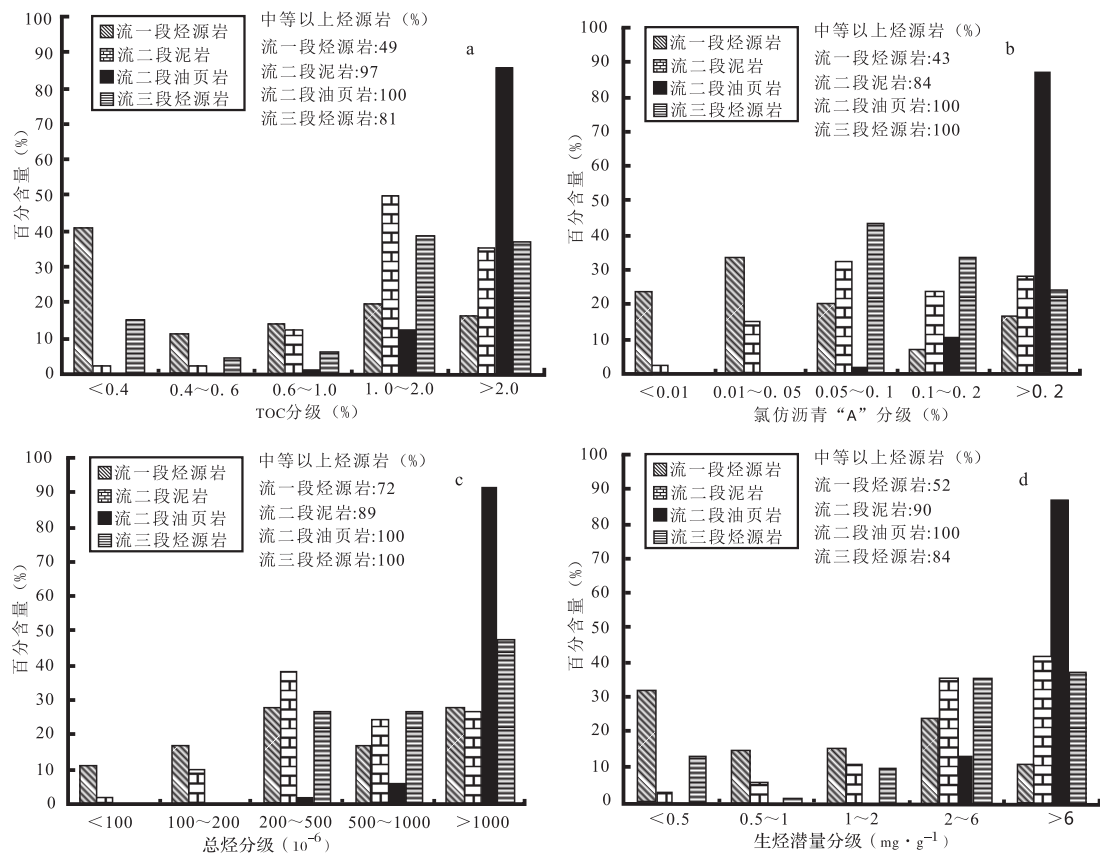


图 3 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质丰度指标频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of the organic matter abundances in the source rocks from the Liushagang Formation, Wushi depression

生气为主^[23],壳质组来源于高等植物,生烃能力仅次于腐泥组^[24]。根据显微组分构成,流沙港组烃源岩干酪根类型整体为Ⅱ₁-Ⅱ₂型。

样品 H/C 原子比分布在 0.53 ~ 1.58 之间, O/C 原子比分布在 0.04 ~ 0.39 之间。利用 D. W. VanKrevelen 图解,统计各层位干酪根类型分布(图 4b),结果指示烃源岩主要为Ⅱ₁-Ⅱ₂型。其中流一段样品全部为Ⅱ₂型;流二段泥岩样品和流三段样品中Ⅱ₂型所占比例均超过了 80%,流二段油页岩样品以Ⅱ₁型为主,占 74.07%。

从烃源岩最高热解峰温($T_{\max}$)与氢指数(HI)的关系来看(图 4c),从Ⅰ型到Ⅲ型有机质类型都有分布。流一段Ⅰ型、Ⅱ₁型、Ⅱ₂和Ⅲ型样品分别占 6.52%、22.83%、47.83%和 22.83%;流二段泥岩样品分别为 5.59%、44.12%、41.47%和 8.82%。流二段油页岩Ⅰ型、Ⅱ₁型和Ⅱ₂型分别占 32.94%、54.12%和 12.94%;流三段分别为 27.66%、

51.06%和 21.28%。

由于每种方法都存在局限性,所以利用不同方法划分的烃源岩有机质类型存在差异。综合来看,流一段烃源岩有机质类型Ⅱ₂型最多,Ⅲ型次之,有机质类型总体偏差;流二段泥岩以Ⅱ₂型最多,Ⅱ₁型次之,有机质类型中等。流二段油页岩Ⅱ₁型最多,Ⅱ₂型次之,几乎没有Ⅲ型,有机质类型较好;流三段烃源岩Ⅱ₁型最多,Ⅱ₂型次之,有机质类型较好。

2.3 有机质成熟度

烃源岩有机质的热演化程度是衡量有机质实际生烃能力的另一个重要指标^[25]。烃源岩只有在达到一定的热演化阶段时才能够生烃以及排烃^[26]。目前用于评价烃源岩热演化程度应用较为广泛的参数有镜质组反射率、热解参数以及生物标志物参数。镜质组反射率随着热演化程度的加深而不断增大,且不可逆,是研究烃源岩演化最有效的指标^[27]。

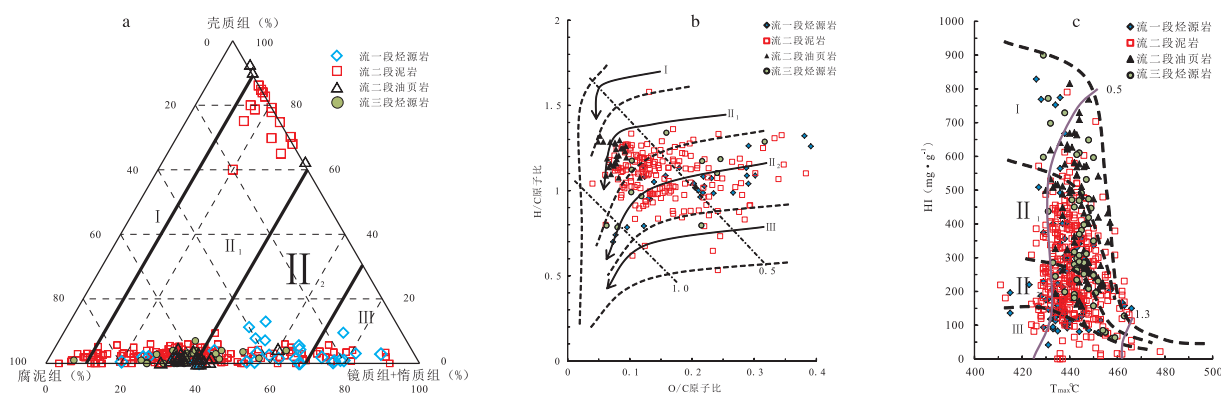


图4 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质类型判别

Fig. 4 Discrimination diagrams of the organic matter types in the source rocks from the Liushagang Formation, Wushi depression

2.3.1 烃源岩热演化阶段划分

通过对研究区镜质体反射率、热解参数、沥青转化率(沥青“A”/TOC)、产率指数($S_1/(S_1 + S_2)$)、正构烷烃奇偶优势以及生物标志物参数综合分析,将乌石凹陷烃源岩热演化阶段划分为未成熟、低成熟、成熟和高成熟4个阶段(图5)。

每个阶段对应的参数特征有所差别。(1)未成熟阶段:有机质成熟度低, $R_o < 0.5\%$, $T_{max} < 435^\circ\text{C}$,深度2000m以上。此过程以生物化学作用为主要特点,有机质经缩聚、不溶解作用形成干酪根,沥青转化率和产率指数减小^[28];(2)低成熟阶段: R_o 为0.5%~0.7%的深成作用早期阶段, C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha) < 0.3$, C_{31} 藿烷 $22S/(22S + 22R) < 0.5$,对应深度2000~2900m;(3)成熟阶段:对应 R_o 为0.7%~1.3%, C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha) > 0.3$, C_{31} 藿烷 $22S/(22S + 22R) > 0.5$,深度2900~4500m。随成熟度增加,沥青转化率和产率指数增加,在 R_o 为0.9%、埋深3600m左右时沥青转化率达40%以上,达到生烃高峰;(4)高成熟阶段:对应 R_o 在1.3%以上,深度在4500m以下。这一阶段生成的烃类产品以低分子量的轻烃为主,沥青转化率和产率指数迅速减小,烃源岩进入高成熟生凝析气阶段^[29]。

2.3.2 成熟烃源岩分布

综合多种参数,最终确定乌石凹陷烃源岩生烃门限深度为2900m,生烃高峰发生在3600m。将各层段的 R_o 等值线与泥岩等厚线进行叠合,得到了不同层段成熟烃源岩的分布特征。东洼流三段泥岩基本进入生烃门限,乌石22-7构造区域已达到高成熟阶段(图2a)。流二段泥岩成熟范围缩小,乌石

17-2及乌石16-1构造区域处于低成熟阶段,22-7构造区域达到成熟阶段,而凹陷中部沉积中心热演化相对较高,已经达到生烃高峰(图2b)。流一段泥岩成熟范围与流二段泥岩接近,但泥岩厚度远少于流二段(图2c)。

3 烃源岩形成条件

3.1 母质来源

影响湖相富有机质生油岩形成的因素很多,但高生物产率和缺氧环境最为重要,前者为富有机质的形成提供物质基础,后者为有机质提供良好保存条件^[29-31]。高丰度的浮游藻类是水体富营养化、高生产力的重要标志^[32-33]。通过对流沙港组烃源岩孢粉相研究,发现其孢粉、藻类组合中浮游藻类的含量普遍超过20%,最高可达到74%,整体表现为富藻层,流二段油页岩表现为极富藻沉积层^[8]。繁盛的浮游植物是流沙港组烃源岩发育的重要物质条件。

从饱和烃气相色谱特征来看(图6),流一段烃源岩正构烷烃碳数分布以后单峰型为主,主峰碳数一般较大,认为有机质输入以陆源植物为主。流二段泥岩也是以后单峰型为主,主峰碳数以 nC_{27} 和 nC_{29} 为主,现代地球化学分析研究证明,木本植物的正构烷烃以 nC_{27} 和 nC_{29} 为主峰碳,草本植物以 nC_{31} 为主峰碳^[34],所以认为物源输入以陆生高等木本植物为主。流二段油页岩及流三段低成熟烃源岩样品以过渡的“平台型”为主,表明其有机质输入以混源为主。

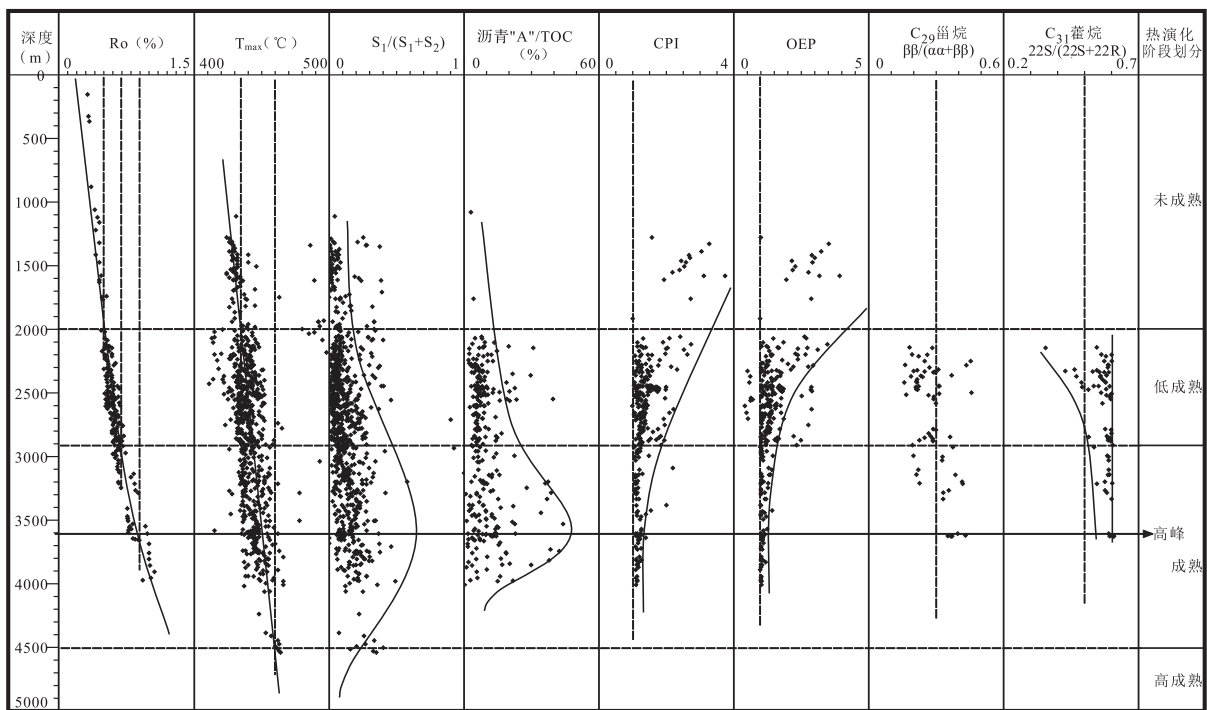


图5 乌石凹陷流沙港组烃源岩热演化剖面

Fig. 5 Thermal evolution of the source rocks from the Liushagang Formation, Wushi depression

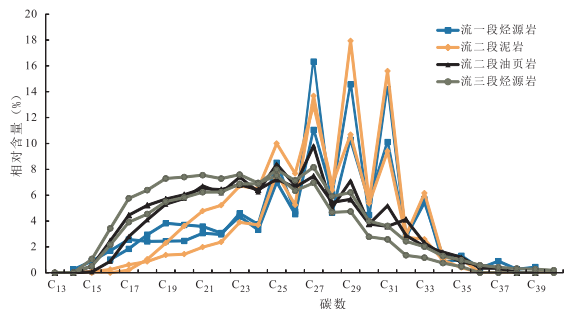


图6 乌石凹陷流沙港组烃源岩正构烷烃碳数分布

Fig. 6 Carbon number distribution of n-alkanes

具有不同母源输入样品的规则甾烷构成存在差异^[35-36]。从各层段烃源岩规则甾烷的分布来看,都是以C₂₉优势为主,C₂₇甾烷的丰度略低,C₂₇-C₂₈-C₂₉规则甾烷呈反“L”字型分布(图7)。流沙港组沉积物属断陷内陆湖盆沉积,烃源岩中发现的丰富的C₂₉甾烷与陆生高等植物密切相关,但不能认为其总有机质类型差,因为除C₂₇甾烷外,还检测出丰富的4-甲基甾烷。北部湾盆地烃源岩中4-甲基甾烷可能起源于甲藻^[37],其对乌石凹陷流沙港组油气的生成有着重要的石油地质意义。除流一段中少数煤系地层外,(C₂₇甾烷+4-甲基甾烷)/C₂₉甾烷比值大部分在1.0以上,表明水生低等植物对烃源岩母质来

源有较大贡献。

3.2 沉积环境

北部湾盆地古近纪湖泊地处热带-亚热带地区,湖水缺少季节性回水,因而在湖底深水处还原性较强,为有机质提供良好的保存条件^[8,12]。依据气相色谱分析结果进行计算,流一段样品姥植比(Pr/Ph)平均值为2.6,沉积介质属于还原至弱氧化环境。流二段样品Pr/Ph平均值为2.2,更偏还原环境。流三段烃源岩样品Pr/Ph平均值为1.8,属于还原环境。流沙港组烃源岩除流一段偏氧化环境外,流二段及流三段烃源岩沉积时总体具有还原性沉积地质条件。

乌石凹陷流沙港组烃源岩中普遍检测出了长链三环萜烷和五环三萜烷化合物。C₂₇-C₃₅藿烷系列化合物分布完整,具有αβC₃₀藿烷含量最高、αβC₂₉藿烷含量次之的特点,检测出Ts、C₂₉Ts及C₃₀* (重排藿烷)等化合物。伽马蜡烷及C₃₅升藿烷含量较低(图7)。伽马蜡烷是一种C₃₀三环萜烷,较大的伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/C₃₀αβ藿烷)通常认为是高盐度水体的沉积标志^[38]。流沙港组烃源岩伽马蜡烷含量较低,伽马蜡烷指数都在0.2以下,大部分在0.1以下,指示烃源岩沉积水体为正常淡水湖泊。

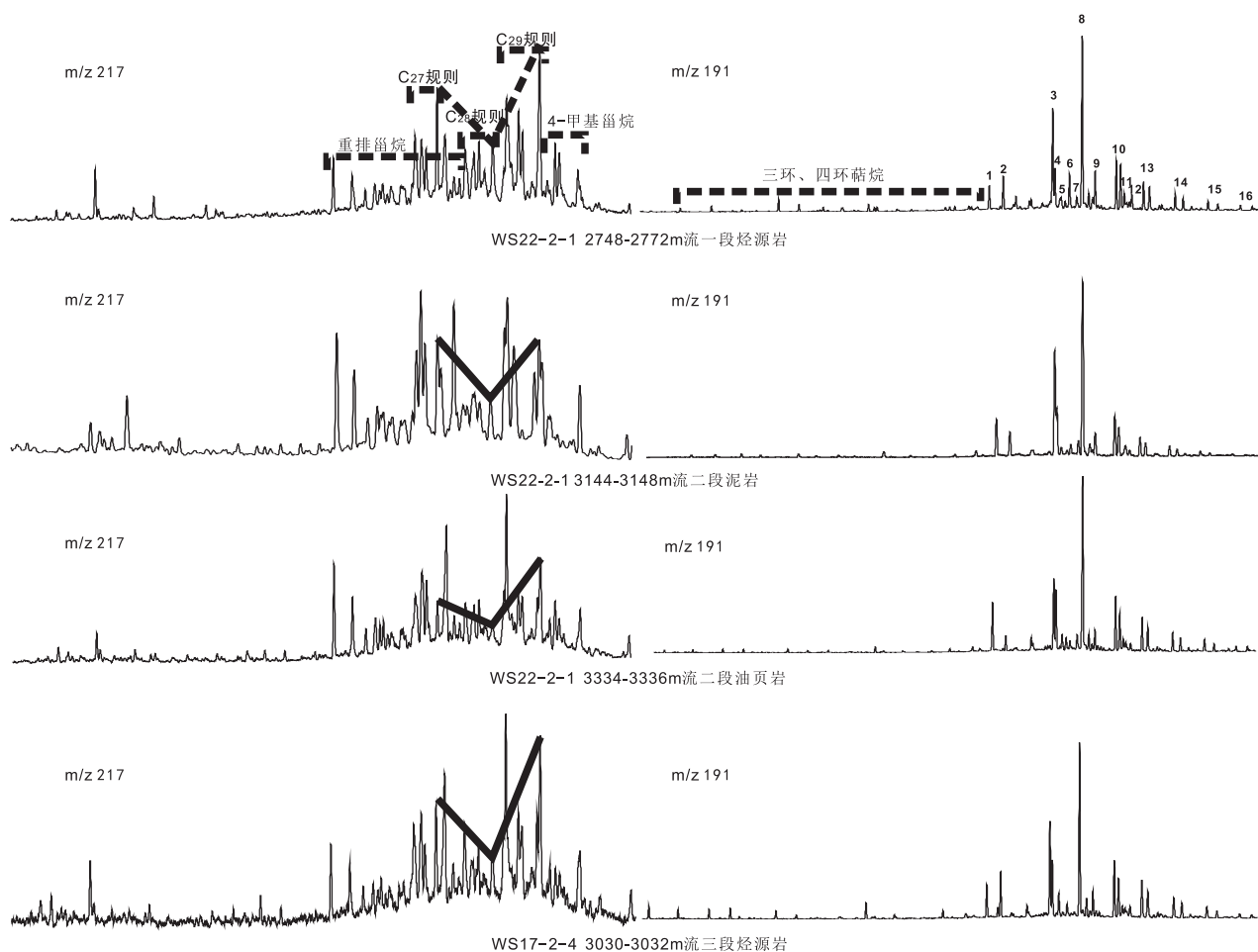


图7 乌石凹陷流沙港组烃源岩甾萜烷质量色谱

1. Ts; 2. Tm; 3. $C_{29}\alpha\beta$ -30-降藿烷; 4. C_{29} Ts; 5. C_{30} *; 6. $C_{29}\beta\alpha$ -30-降莫烷; 7. 奥利烷; 8. $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷; 9. $C_{30}\beta\alpha$ 莫烷; 10. 升藿烷; 11. 伽马蜡烷; 12. C_{31} 莫烷; 13. 二升藿烷; 14. 三升藿烷; 15. 四升藿烷; 16. 五升藿烷

Fig. 7 Gas chromatograms-mass spectrograms of the steranes and terpanes in the source rocks from the Liushagang Formation, Wushi depression

4 结论

(1) 乌石凹陷流沙港组烃源岩分布范围、沉积相带及厚度决定了东洼为主力生烃洼陷。

(2) 流二段有机质丰度最高, 尤其是流二段油页岩基本为优质烃源岩, 有机质类型以 II_1 - II_2 型为主; 流三段有机质丰度次之, 类型主要为 II_1 - II_2 型; 流一段有机质丰度最低, 类型以 II_2 - III 为主。

(3) 乌石凹陷流沙港组烃源岩热演化过程可划分为未成熟、低成熟、成熟、高成熟 4 个阶段, 其中生烃门限深度为 2900m, 生烃高峰发生在 3600m。

(4) 丰富的 4-甲基甾烷含量表明水生低等植物对烃源岩母质来源有较大贡献。姥植比参数显示, 流二段及流三段烃源岩沉积时总体具有还原性沉

积地质条件, 流一段为偏氧化环境。低伽马蜡烷指数显示流沙港组沉积时期水体为淡水环境。

参考文献:

- [1] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 95-136.
- [2] 黄第藩, 李晋超, 张大江, 等. 陆相有机质的演化和成烃机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [3] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13.
- [4] 杨海长, 梁建设, 胡望水. 乌石凹陷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 41-46.
- [5] 朱继田, 郭明刚, 刘志辉. 北部湾盆地乌石凹陷勘探前景分析[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(12): 99-101.

- [6] 张启明,苏厚熙.北部湾盆地石油地质[J].海洋地质与第四纪地质,1989,9(3):73-82.
- [7] 柳永杰,赵志刚,李建红,等.乌石凹陷成藏组合划分及主控因素分析[J].中国海上油气,2008,20(2):82-86.
- [8] 徐新德,张迎朝,黄义文,等.北部湾盆地乌石凹陷流沙港组油页岩发育的主控因素[J].石油学报,2013,34(增刊2):66-73.
- [9] 袁冰,杨希冰,张迎朝.源下油气成藏主控因素与成藏模式——以北部湾盆地乌石凹陷乌石17X下始新统流沙港组三段油藏为例[J].科学技术与工程,2014,14(30):23-27.
- [10] 张智武,刘志峰,张功成,等.北部湾盆地裂陷期构造及演化特征[J].石油天然气学报,2013,35(1):6-10.
- [11] 苏厚熙.乌石凹陷含油气远景[J].海洋地质与第四纪地质,1993,13(1):65-72.
- [12] 孙伟,樊太亮,赵志刚,等.乌石凹陷古近系层序地层特征及充填演化[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(2):233-239.
- [13] 杨海长,赵志刚,李建红,等.乌石凹陷油气地质特征与潜在勘探领域分析[J].中国海上油气,2009,21(4):227-231.
- [14] 赵军,洪庆玉,董伟良.北部湾涠西南凹陷物源方向及古地理景观分析[J].石油勘探与开发,2001,28(5):25-28.
- [15] 朱伟林,吴国瑄,黎明碧.南海北部陆架北部湾盆地古湖泊与烃源条件[J].海洋与湖泊,2004,35(1):8-14.
- [16] 胡望水,吴婵,梁建设,等.北部湾盆地构造迁移特征及对油气成藏的影响[J].石油与天然气地质,2011,32(6):920-927.
- [17] 张兴雅,马万云,王玉梅,等.准噶尔盆地古近系生烃潜力与油气源特征研究[J].沉积与特提斯地质,2015,35(1):25-32.
- [18] 胡见义,黄第藩.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [19] 高岗,柳广弟,付金华,等.确定有效烃源岩有机质丰度下限的一种新方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组湖相泥质烃源岩为例[J].西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(2):22-26.
- [20] 魏建设,卢进才,魏仙样,等.强烈风化作用对烃源岩评价指标的影响——以额济纳旗及邻区石炭系—二叠系为例[J].地质通报,2012,31(10):1715-1723.
- [21] 龚大兴,林金辉,唐云凤,等.上扬子地台北缘古生界海相烃源岩有机地球化学特征[J].岩性油气藏,2010,22(3):31-37.
- [22] 秦建中.中国烃源岩[M].北京:科学出版社,2005.
- [23] 钱门辉,侯读杰,蒋启贵,等.西湖凹陷煤系烃源岩显微组分组成特征及地质意义[J].石油实验地质,2012,34(2):182-185.
- [24] 陈文彬,付修根,占王忠,等.藏北羌塘盆地角木茶卡地区下二叠统展金组烃源岩特征及意义[J].沉积与特提斯地质,2015,35(1):43-49.
- [25] 陈善斌,甘华军,时阳,等.北部湾盆地福山凹陷烃源岩地球化学特征及地质意义[J].油气地质与采收率,2015,22(1):14-19.
- [26] 陈建平,孙永革,钟宁宁,等.地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J].地质学报,2014,88(11):2005-2028.
- [27] 任拥军,杜雨佳,郭潇潇,等.渤中凹陷古近系优质烃源岩特征及分布[J].油气地质与采收率,2015,22(1):5-13.
- [28] 蒋有录,查明.石油天然气地质与勘探[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [29] Katz B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks—an update [J]. AAPG Bulletin,1995,40(3):61-79.
- [30] 刘传联,徐金鲤,汪品先.藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制[J].地质论评,2001,47(2):207-210.
- [31] 金强,朱光有,王娟.咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(4):19-23.
- [32] 刘传联,徐金鲤.生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例[J].沉积学报,2002,20(1):144-150.
- [33] 孟庆涛,刘招君,胡菲,等.桦甸盆地始新世古湖泊生产力与有机质富集机制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(5):38-44.
- [34] Cranwell P A, Eblinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments [J]. Organic Geochemistry,1987,11:513-527.
- [35] Moldowan J M, Dahl J, McCaffrey M A, et al. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by products [J]. Energy & Fuel,1995,9:155-162.
- [36] 林家善,刘建清,冯伟明,等.黔北下志留统龙马溪组烃源岩有机地球化学特征及其古环境意义[J].沉积与特提斯地质,2014,34(2):79-85.
- [37] 陈致林,李素娟.甲藻甾烷——一种生源和沉积环境的生物标志物[J].石油勘探与开发,1994,21(3):60-64.
- [38] 傅家谟,盛国英.分子有机地球化学与古气候,古环境研究[J].第四纪研究,1992,12(4):306-320.

Geochemical signatures of the source rocks from the Liushagang Formation in the Wushi depression, Beibuwan Basin

LIU Yang¹, REN Yong-jun¹, YANG Xi-bing², LIU Hong-yan³, XU Xin-de²

(1. *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China*; 2. *Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang 524057, Guangdong, China*; 3. *No. 7 Oil Production Plant, Daqing Oil Field Company, Daqing 163517, Heilongjiang, China*)

Abstract: Based on the analysis of organic geochemical data of source rocks, drilling and seismic data, the present paper focuses on the geochemical signatures of the source rocks from the Liushagang Formation in the Wushi depression, Beibuwan Basin, including organic matter abundance, type, maturity, parent rock source, sedimentary environment and biomarkers. The analytical results show that the third member of the Liushagang Formation was deposited in a reduced lake environment with higher organic matter abundances and organic matter types of II_1 - II_2 . The second member of the Liushagang Formation was deposited in a slightly reduced to reduced environment with the maximum organic matter abundances and organic matter types of II_1 - II_2 , indicating the excellent source rocks of the oil shales in this member. The first member of the Liushagang Formation was deposited in an oxidation-prone shallow lake environment with minimum organic matter abundances and organic matter types of II_2 -III. According to the thermal evolutionary profile of the source rocks, four stages for the thermal evolutionary processes are recognized, including immature, low mature, mature and high mature stages. The threshold depth is 2900 m for the generation of hydrocarbons, and maximum depth is 3600 m for the generation peak of hydrocarbons in the source rocks. The low gammacerane indices have reflected the freshwater environments for the deposition of the Liushagang Formation. The low aquatic plants made greater contributions to the sources of the parent rocks indicated by abundant 4-methyl steranes.

Key words: source rock; Liushagang Formation; Wushi depression; geochemical signature; biomarker