

文章编号:1673-5005(2021)01-0031-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.01.004

# 乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征

李福来<sup>1,2</sup>, 吕琳<sup>3</sup>, 马文宽<sup>1,2</sup>, 刁浩<sup>1,2</sup>,  
徐志尧<sup>4</sup>, 白云明<sup>5</sup>, 杨建磊<sup>6</sup>, 刘红艳<sup>7</sup>

(1. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 3. 中国石油大港油田勘探开发研究院, 天津 300280; 4. 苏州冠德能源科技有限公司, 江苏苏州 215000; 5. 中国石油大港油田公司第三采油厂, 河北沧州 061023; 6. 中国石油大学胜利学院油气工程学院, 山东东营 257000; 7. 中国石油大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163002)

**摘要:**应用岩石热解实验、显微组成分析、元素分析、镜质体反射率和生物标志化合物等分析方法, 研究有机质丰度、类型、成熟度及母质沉积环境, 对乌石凹陷流沙港组不同层段烃源岩的地球化学特征进行综合评价和对比。结果表明: 流二段下部油页岩有机碳含量最高, 类型为 I—II<sub>1</sub> 型, 且普遍达到成熟水平, 是研究区最有利的烃源岩层段, 流二段上部油页岩次之, 流三段烃源岩是好的烃源岩, 而流一段烃源岩为中等烃源岩; 流沙港组以弱还原—还原环境为主, 除流一段以高等植物输入为主外, 该组烃源岩既有丰富的水生生物输入, 又有一定数量的陆生生物来源, 尤其是流二段下部油页岩有机母源中藻类输入较多。

**关键词:** 乌石凹陷; 烃源岩; 生物标志化合物; 地球化学特征

**中图分类号:** P 618.13 **文献标志码:** A

**引用格式:** 李福来, 吕琳, 马文宽, 等. 乌石凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 31-40.

LI Fulai, LÜ Lin, MA Wenkuan, et al. Geochemical characteristics of source rocks in Liushagang Formation of Wushi Sag [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 31-40.

## Geochemical characteristics of source rocks in Liushagang Formation of Wushi Sag

LI Fulai<sup>1,2</sup>, LÜ Lin<sup>3</sup>, MA Wenkuan<sup>1,2</sup>, DIAO Hao<sup>1,2</sup>, XU Zhiyao<sup>4</sup>,  
BAI Yunming<sup>5</sup>, YANG Jianlei<sup>6</sup>, LIU Hongyan<sup>7</sup>

1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
3. Research Institute of Exploration & Development, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China;
4. Suzhou Grand Energy Technology Limited, Suzhou 215000, China;
5. The Third Oil Production Plant of Dagang Oilfield, PetroChina, Cangzhou 061023, China;
6. Department of Oil & Gas Engineering in Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257000, China;
7. Research Institute of Exploration & Development, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163002, China)

**Abstract:** The thermal decomposition experiment, microscopic composition analysis, element analysis, vitrinite reflectance and biomarkers were utilized to comparatively analyze and contrast the organic geochemical characters of source rocks of Liushagang Formation, Wushi Sag based on its abundance, types, maturity and sedimentary environment. The results show that the oil shale in bottom of L<sub>2</sub> has the highest organic content, which belongs to type I—II<sub>1</sub> kerogen. The organic matter

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072130, 41872152)

第一作者: 李福来(1978-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为石油地质。E-mail: liful@upc.edu.cn。

通信作者: 吕琳(1988-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为油藏地质。E-mail: 626658054@qq.com。

are in the mature stage, which is the most favorable source rocks of the study area, followed by oil shale on top of  $L_2$ , normal source rocks of  $L_2$  and  $L_3$  are evaluated as good source rocks, the  $L_1$  source rock are evaluated as medium source rocks. It is also found that Liushagang Formation belongs to weak reduction-reduction environment. Apart that the organic source material of  $L_1$  is mainly higher plant, the organic source material is lower aquatic plants mixed with some higher plants, and especially the bottom of  $L_2$  has more algae input.

**Keywords:** Wushi Sag; source rock; biomarker; geochemical characteristic

烃源岩是沉积盆地中油气藏形成的物质基础。随着油气勘探程度的提高,增储上产的难度日益增大,烃源岩研究为油区勘探评价的重点。北部湾盆地已发现商业性油气田,集中在涠西南凹陷和福山凹陷。乌石凹陷毗邻涠西南凹陷,区内发现乌石 16-1、乌石 22-1 和乌石 17-2 等多个含油气构造,整体来看乌石凹陷的勘探程度不高,并且对于烃类来源和成藏规律等问题还存在争议<sup>[1-3]</sup>。笔者研究乌石凹陷流沙港组不同烃源岩的有机质丰度、类型、成熟度及沉积环境,分析流沙港组烃源岩的地球化学特征。

## 1 地质背景

乌石凹陷位于北部湾盆地南部坳陷东部,北临企西隆起,南靠流沙凸起,西以流沙凸起与海头北凹陷和迈陈凹陷相隔,面积约 2 680 km<sup>2</sup>,是新生代形成的具有南断北超结构特征的箕状凹陷。该凹陷平面结构为“S”形,由东、西两个洼陷组成,分别受 7 号断层和 6 号断层控制,其演化经历了初始断陷阶段、强烈断陷阶段、晚期坳陷 3 个构造演化阶段<sup>[1-4]</sup>。研究区构造位置见图 1(据文献[5]修改)。

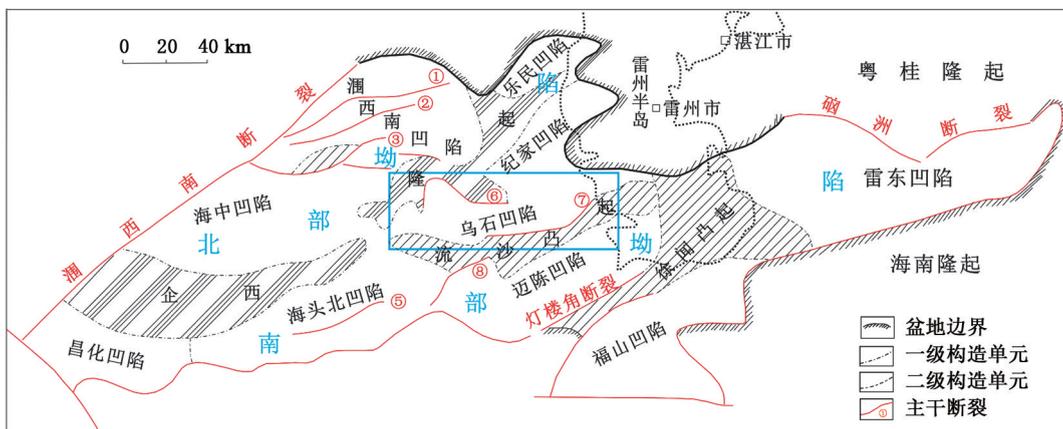


图 1 乌石凹陷构造位置图

Fig. 1 Structural location of Wushi Sag

乌石凹陷基底为前古近纪变质岩,沉积盖层为新生代沉积。新生界自下而上依次发育古近系长流组、流沙港组、涠洲组,新近系下洋组、角尾组、灯楼角组和第四系 7 套地层(图 2)。始新世流沙港组沉积时期是湖盆发育的鼎盛时期,湖盆扩张与收缩交替进行<sup>[6]</sup>,主要形成湖相和三角洲相沉积。岩性主要为褐灰色油页岩、深灰色的泥页岩夹薄层浅灰色粉砂岩、细砂岩、中砂岩。流沙港组自下而上可进一步分为流三段、流二段和流一段。

流三段沉积时期湖盆扩张,水体较浅,发育一套粗碎屑三角洲相沉积,上部为灰色泥岩与浅灰色粉砂岩、细砂岩,下部为含砾粗砂岩。流二段为湖盆发育的极盛时期,水体加深,沉积速率增加,发育一套良好的生油岩层系,具有明显的三段特征:早期发育半深湖、深湖相灰褐色厚层油页岩夹薄层浅灰色粉

砂岩、细砂岩,由下而上砂岩含量降低,页岩尤其是油页岩厚度增大;中期水体变浅,发育一套褐灰色泥页岩与薄层浅灰色粉砂岩互层,粉砂岩主要为滨浅湖相滩坝沉积;晚期湖平面上升,发育灰褐色油页岩夹深灰色泥页岩。流一段沉积时湖盆收缩、水体变浅,主要发育灰色泥岩与浅灰—灰白色中砂岩、细砂岩互层,还有少量煤层出现。

## 2 烃源岩基本特征

### 2.1 有机质丰度

有机质丰度可评价烃源岩优劣,其直接影响到烃源岩的生烃能力和生烃规模,常用的参考指标包括有机碳含量(TOC)、生烃潜量( $S_1+S_2$ )、氯仿沥青“A”含量及总烃含量(HC)等。本次研究统计乌石凹陷 31 口探井流沙港组烃源岩有机质丰度指标(表 1)。

依据中国陆相生油岩有机质丰度评价标准 (SY/T 5735—1995),有机碳含量大于 1.0%为好烃源岩,小于 0.6%为差烃源岩<sup>[7]</sup>。流一段 83 个样品有 57.83%达到好烃源岩标准,19.28%为差烃源岩。流二段 362 个样品有 88.67%为好烃源岩,其中 49.45%达到优质标准;流二段上部(L<sub>2</sub><sup>上</sup>)油页岩 48

个样品有 97.92%达到好烃源岩标准,其中优质样品高达 72.92%;流二段下部(L<sub>2</sub><sup>下</sup>)油页岩 40 个样品全达到优质烃源岩标准。流三段(L<sub>3</sub>)58 个样品有 87.93%达到好烃源岩标准,其中 43.10%达到优质标准(表 1、图 3)。

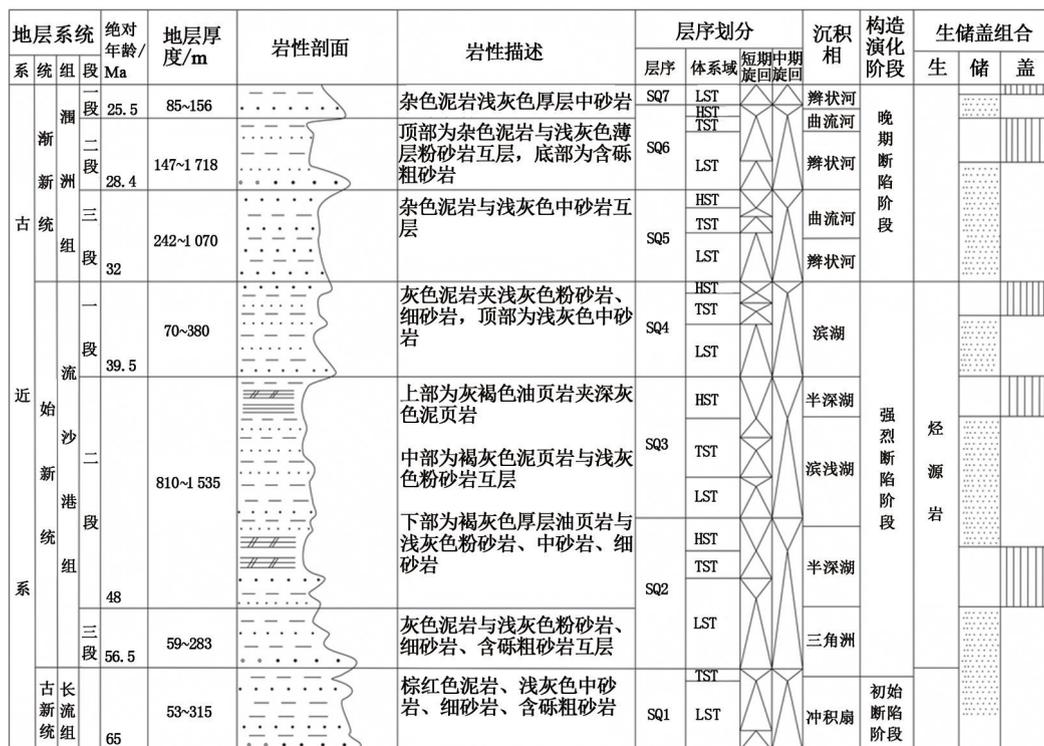


图 2 乌石凹陷流沙港组地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Liushagang Formation in Wushi Sag

烃源岩样品中可溶有机质含量变化较大,氯仿沥青“A”含量在 0.01%~1.40%,乌石凹陷各层位中,只有流二段上部和下部油页岩的氯仿沥青“A”含量达到优质烃源岩标准,平均值分别为 0.48%和 0.46%(表 1)。

生烃潜量也是评价烃源岩丰度的重要指标。岩石热解分析表明,流一段 83 个样品中 15.11%达到好烃源岩标准,47.67%为差烃源岩。流二段 328 个样品中 44.51%达到好烃源岩标准,大于 20 mg/g 的占 5.49%。流二段上部 48 个油页岩样品中 72.92%达到好烃源岩标准,其中优质样品达 14.58%;流二段下部 39 个油页岩样品全部达到好烃源岩标准,其中优质样品高达 56.41%。流三段 50 个样品中 44%达到好烃源岩标准,大于 20 mg/g 的占 8%(表 1、图 3)。与前述丰度指标相比生烃潜量评价结果偏差,这可能是受风化作用和成熟度影响所致。

通过对乌石凹陷烃源岩丰度指标分析,流二段上部和下部油页岩丰度最高,各项指标均达到或接

近优质烃源岩标准;流三段烃源岩丰度较高,达到好烃源岩标准;流一段烃源岩各项丰度指标相对较低,评价为中等—好烃源岩。

表 1 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质丰度参数统计  
Table 1 Organic material abundance data of source rocks in Liushagang Formation, Wushi Sag

层位	有机碳/%	生烃潜量/(mg·g <sup>-1</sup> )	氯仿沥青“A”/%	丰度分级
L <sub>1</sub>	0.41~6.58 1.84(83)	0.52~25.97 3.40(83)	0.01~0.38 0.09(38)	中等—好
L <sub>2</sub> <sup>上</sup>	0.89~4.87 2.50(48)	2.46~39.62 11.67(48)	0.10~1.07 0.48(21)	优质
L <sub>2</sub>	0.43~9.23 2.23(362)	0.51~40.04 7.99(328)	0.01~0.86 0.17(219)	好—优质
L <sub>2</sub> <sup>下</sup>	2.04~16.48 5.71(40)	6.54~102.59 30.43(39)	0.15~1.40 0.46(22)	优质
L <sub>3</sub>	0.45~6.23 2.17(58)	0.71~42.35 7.83(50)	0.05~0.39 0.16(19)	中等—优质

注:表中数据横线上为最小值~最大值,横线下为平均值(样品数);L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub> 分别代表流一段、流二段和流三段。

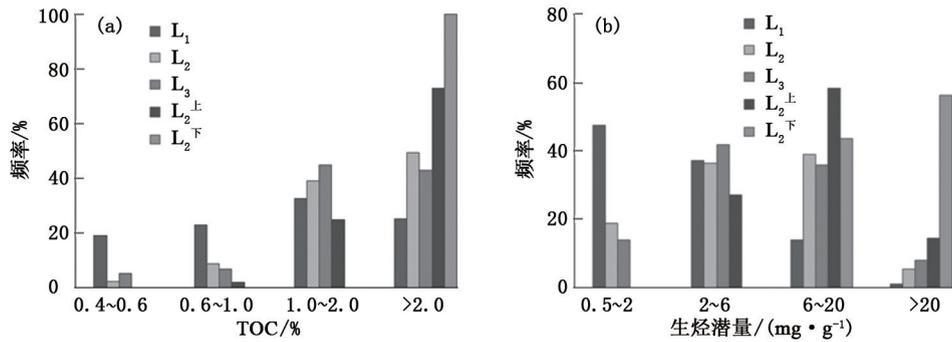


图3 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质丰度参数频率分布

Fig. 3 Frequency for organic matter abundance in Liushagang Formation, Wushi Sag

## 2.2 有机质类型

母质来源、沉积环境的差异会影响有机质类型,而不同类型的有机质生油、生气的潜力差异很大,利用干酪根显微组分、元素组成和热解参数等可研究烃源岩有机质类型(表2、图4)。

显微组分可反映有机质生源。一般认为,腐泥组主要由低等水生植物经过腐泥化作用形成,镜质组和惰质组由高等植物的细胞壁经过丝炭化作用形成<sup>[8-10]</sup>。从本区显微组分组成来看,流一段发育大

量镜质组,腐泥组含量较高,反映流一段母质来源以高等植物为主,其他层段腐泥组含量较高,反映藻类等水生生物的贡献。干酪根类型指数分析(表2)显示,流一段干酪根主要为Ⅱ<sub>2</sub>—Ⅲ型;流二段和流三段干酪根主要为Ⅱ<sub>1</sub>—Ⅱ<sub>2</sub>型;流二段油页岩则以Ⅱ<sub>1</sub>型为主,下部比上部油页岩的类型好。但干酪根在分离过程中会有部分无定形组分的损失,而无定形组分基本属于生烃组分,所以该方法得出的干酪根类型会有偏差。

表2 乌石凹陷流沙港组烃源岩有机质类型划分统计

Table 2 Organic material types data of Liushagang Formation in Wushi Sag

层位	干酪根显微组分质量分数/%				类型指数	类型
	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组		
L <sub>1</sub>	8.9~59	0.3~13.1	16.7~78.6	8.9~59	-62.30~62.60	Ⅱ <sub>2</sub> —Ⅲ
	40.7(35)	2.4(35)	46.2(35)	40.7(35)	-4.00(35)	
L <sub>2</sub> <sup>上</sup>	56~71.1	0~4.6	21.2~43.5	0~13.6	23.55~48.03	Ⅱ <sub>1</sub>
	62(12)	1.6(12)	28.9(12)	7.2(12)	33.60(12)	
L <sub>2</sub>	8~96.5	0~5.7	2~72.4	0.5~20.7	-67.25~93.88	Ⅱ <sub>1</sub> —Ⅱ <sub>2</sub>
	58(95)	2.4(95)	34.2(95)	5.4(95)	28.1(95)	
L <sub>2</sub> <sup>下</sup>	54.9~69.1	0~3.1	16.1~36.9	3.3~19.1	20.65~42.68	Ⅰ—Ⅱ <sub>1</sub>
	60.8(13)	1.1(13)	27.7(13)	10.3(13)	30.2(13)	
L <sub>3</sub>	33.7~74	0~7	18.5~51.7	0~13.7	-13.68~55.74	Ⅱ <sub>2</sub>
	58.38(20)	2.5(20)	33.17(20)	5.95(20)	28.1(20)	

干酪根的元素组成是有机质平均化学组分的综合反映,研究区样品H/C(原子比)分布在0.53~1.58,O/C(原子比)分布在0.04~0.39,根据H/C和O/C范式图(图4)来看,流沙港组地层主要发育Ⅱ<sub>1</sub>—Ⅱ<sub>2</sub>型有机质。其中流一段样品集中在Ⅱ<sub>2</sub>—Ⅲ型区域;流二段以Ⅱ<sub>1</sub>—Ⅱ<sub>2</sub>型为主,少量为Ⅲ型;流二段油页岩类型较好,以Ⅱ<sub>1</sub>型为主,且下部比上部油页岩类型要好;流三段样品主要落在Ⅱ<sub>2</sub>型区域。元素分析中H/C和O/C受成熟度影响,随成熟度升高,热解烃转化为游离烃,S<sub>1</sub>(可溶烃含量)增加,S<sub>2</sub>(热解烃含量)相对减少,且可能排烃效率较低,烃源岩中残留烃增多,出现略有不同结果<sup>[11]</sup>。

岩石热解参数也常用来确定烃源岩的有机质类型。流沙港组,与最高热解温度( $T_{max}$ )相关图显示(图4),样品主要集中在Ⅱ<sub>1</sub>—Ⅱ<sub>2</sub>型趋势线周围,少量落入Ⅰ型和Ⅲ型区域,研究区母质类型主要为混合型。根据对干酪根类型的统计,流一段主要落在Ⅱ<sub>2</sub>—Ⅲ型区域;流二段以Ⅱ<sub>1</sub>—Ⅱ<sub>2</sub>型为主,少量为Ⅲ型;流二段油页岩类型稍好,以Ⅰ—Ⅱ<sub>1</sub>型为主;流三段主要落在Ⅱ<sub>2</sub>型区域。热解参数分析法不仅考虑到成熟度对有机质类型的影响,而且在一定程度上消除了由于CO<sub>2</sub>含量较大、氧指数不准确而造成的影响。除此以外,研究区样品热解数据较多,具有统计规律,因而热解参数反映的有机质类型是最为可信的。

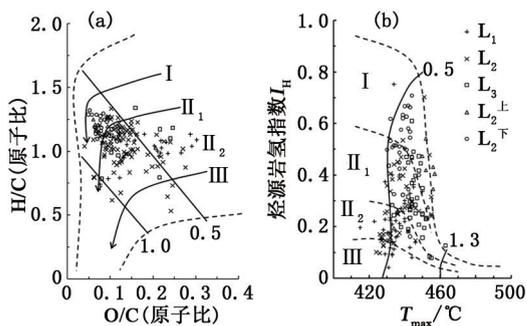


图 4 乌石凹陷干酪根元素分析和岩石热解资料划分有机质类型

Fig. 4 Kerogen element analysis and organic types based on rock-eval pyrolysis in Wushi Sag

总体而言,研究区有机质类型主要为 II<sub>1</sub>—II<sub>2</sub> 型,流一段以 II<sub>2</sub>—III 型为主,流三段主要为 II<sub>2</sub> 型,流二段以 II<sub>1</sub>—II<sub>2</sub> 型为主,流二段油页岩类型优于

一般烃源岩,以 II<sub>1</sub> 型为主,并呈现出下部油页岩类型优于上部油页岩的特点。

### 2.3 有机质成熟度

镜质体反射率 ( $R_o$ ) 是目前确定有机质成熟度最为有效的指标<sup>[12]</sup>。一般认为  $R_o = 0.5\%$  进入生油门限,  $0.5\% \sim 0.7\%$  为低成熟阶段,  $0.7\% \sim 1.3\%$  为成熟阶段,  $1.3\% \sim 2.0\%$  为高成熟阶段,  $R_o > 2.0\%$  为过成熟阶段。从表 3 可以看出三层系样品的  $R_o$  平均值均已超过  $0.5\%$ 。流一段  $R_o$  为  $0.42\% \sim 0.77\%$ , 平均为  $0.57\%$ , 大部分样品  $R_o$  小于  $0.7\%$ , 处于低成熟阶段; 流二段  $R_o$  为  $0.41\% \sim 1.04\%$ , 平均为  $0.66\%$ , 多处于成熟阶段; 流三段  $R_o$  为  $0.48\% \sim 0.92\%$ , 平均值为  $0.65\%$ , 处于成熟阶段; 流二段油页岩  $R_o$  为  $0.49\% \sim 0.81\%$ , 平均为  $0.63\%$ , 处于成熟阶段。

表 3 乌石凹陷流沙港组烃源岩成熟度及饱和烃参数统计

Table 3 Statistics of parameters for the organic matter maturity and saturated hydrocarbon of source rocks from Liushagang Formation, Wushi Sag

层位	$R_o/\%$	$T_{max}/^{\circ}C$	$w(C_{21-})/w(C_{22+})$	CPI	OEP	$w(Pr)/w(Ph)$
L <sub>1</sub>	0.42~0.77	428~467	0.10~0.68	1.07~2.52	1.02~2.76	1.24~7.29
	0.56(29)	437(44)	0.30(24)	1.61(24)	1.64(18)	2.78(24)
L <sub>2</sub> <sup>上</sup>	0.62~0.73	434~457	0.25~0.62	1.09~1.53	1.15~1.67	1.97~2.69
	0.68(11)	446(43)	0.42(11)	1.40(11)	1.36(8)	2.15(11)
L <sub>2</sub>	0.41~1.04	411~466	0.07~1.27	0.99~2.44	0.41~2.51	0.61~5.68
	0.66(87)	445(143)	0.43(91)	1.34(91)	1.32(91)	2.18(91)
L <sub>2</sub> <sup>下</sup>	0.49~0.81	430~448	0.22~0.58	1.19~1.51	1.21~1.72	1.54~3.06
	0.62(30)	441(38)	0.43(15)	1.30(15)	1.44(15)	2.01(15)
L <sub>3</sub>	0.48~0.92	429~463	0.26~1.04	1.07~1.79	0.99~1.33	1.13~2.69
	0.65(22)	450(55)	0.51(20)	1.25(20)	1.17(20)	1.89(20)

图 5 为研究区烃源岩  $R_o$  与深度的相关图, 随深度的增加  $R_o$  逐渐增大, 两者之间具有良好的对数关系, 所测  $R_o$  可用来反映样品的热演化程度。由图 5 可知, 研究区烃源岩生烃门限 ( $R_o$  为  $0.5\%$ ) 深度约为  $2\text{ km}$ , 在约  $2.9\text{ km}$  进入生烃高峰 ( $R_o$  大于  $0.7\%$ ), 在  $3.5\text{ km}$  达到生油高峰 ( $R_o$  为  $1.0\%$ ), 直到  $4\text{ km}$  时,  $R_o$  仍小于  $1.3\%$ , 表明至今乌石凹陷流沙港组烃源岩的演化尚未达到过熟程度。结合地层资料可知, 乌石凹陷流一段成熟度偏低, 其他层位普遍达到成熟阶段, 部分流二段和流三段样品成熟度较高。

最高热解峰温  $T_{max}$  随埋深的增大和地层时代的变老而增大, 也可作为烃源岩成熟度评价的有效指标。但当  $S_2$  较低 (低于  $0.2\text{ mg/g}$ ) 时,  $T_{max}$  通常是不精确的<sup>[13]</sup>。按 II 型有机质的判别标准,  $T_{max}$  在  $435\text{ }^{\circ}C$  为生油门限,  $435 \sim 440\text{ }^{\circ}C$  为低成熟阶段,  $440 \sim 455\text{ }^{\circ}C$  为大量生烃阶段。研究区烃源岩  $T_{max}$  分布在  $411 \sim$

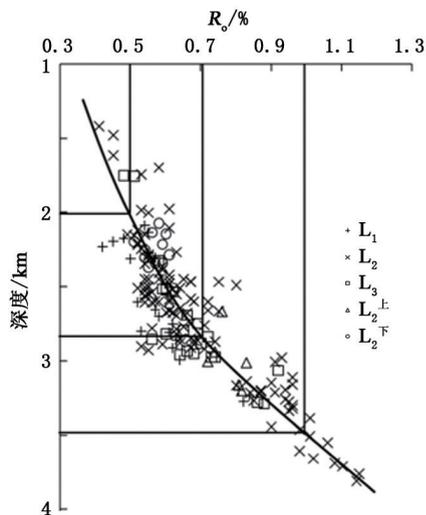


图 5 乌石凹陷流沙港组烃源岩镜质体反射率与埋深关系

Fig. 5 Crossplot of depth and  $R_o$  of source rocks in Liushagang Formation, Wushi Sag

467 °C, 平均为 444.42 °C, 流一段 44 个样品中 64.8% 的样品  $T_{\max}$  在 435 ~ 455 °C, 35.2% 的样品  $T_{\max}$  小于 435 °C, 多处于低成熟—成熟阶段; 流二段 143 个样品中 83.3% 的样品  $T_{\max}$  值处于 435 ~ 455 °C, 流二段上部和下部油页岩分别有 95.35% 和 81.59% 的样品处于 435 ~ 455 °C, 主要处于成熟阶段; 流三段  $T_{\max}$  位于 435 ~ 455 °C 的样品占总数的 74.1%, 16.7% 的样品  $T_{\max}$  大于 455 °C, 表明该段烃

源岩处于成熟—高成熟阶段(表 3)。

正构烷烃的奇偶碳优势(OEP)和碳优势指数(CPI)平均值分别分布在 1.17 ~ 1.64 和 1.25 ~ 1.61, 且呈现出由浅至深逐渐减小的特征。流一段样品的 OEP 和 CPI 值较高, 表明烃源岩处于低成熟阶段, 流二段、流三段样品的 OEP 和 CPI 值较低, 具有成熟的特点。这与镜质体反射率( $R_o$ )和最高热解峰温( $T_{\max}$ )的分析结果一致。

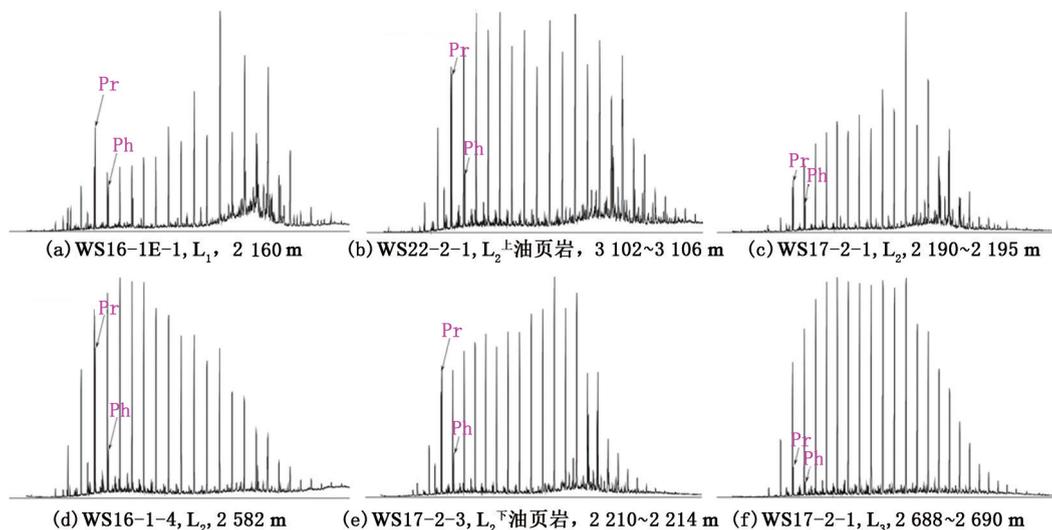


图 6 乌石凹陷流沙港组烃源岩饱和烃气相色谱

Fig. 6 Saturated hydrocarbon chromatogram of source rocks in Liushagang Formation, Wushi Sag

### 3 母质沉积环境

#### 3.1 正构烷烃

正构烷烃的分布特征可反映有机质的成熟度和生源输入。一般认为, 来源于高等植物角质层蜡的正构烷烃为  $nC_{25}$ — $nC_{33}$ , 主峰为  $nC_{27}$ 、 $nC_{29}$  或  $nC_{31}$ ; 而以  $nC_{15}$  或  $nC_{17}$  为主峰, 奇偶优势不明显的中等相对分子量( $nC_{15}$ — $nC_{21}$ )的正构烷烃则指示藻类等浮游生物来源<sup>[14]</sup>。根据可溶有机质饱和烃气相色谱分析结果(图 6), 流沙港组样品的正构烷烃碳数分布范围较宽, 介于  $nC_{13}$  ~  $nC_{40}$ , 峰型多呈后单峰型, 主峰碳以  $nC_{27}$  为主, 反映研究区烃源岩母质为以高等植物为主, 低等水生生物为辅的混源输入。质量比  $w(C_{21-})/w(C_{22+})$  分布在 0.07 ~ 1.27(表 3), 低碳数正构烷烃含量明显低于高碳数正构烷烃, 纵向上三个层段  $w(C_{21-})/w(C_{22+})$  略有不同, 流一段较低(平均值为 0.30), 流二段和流三段的  $w(C_{21-})/w(C_{22+})$  依次增高(流二段的平均值为 0.43; 流三段的平均值为 0.51), 反映了在流沙港组沉积时期母质高等植物输入比例随时间逐渐增加。

#### 3.2 类异戊二烯烷烃

无环类异戊二烯烷烃中应用最广泛的是植烷(Ph)和姥鲛烷(Pr)。一般认为, 姥鲛烷形成于氧化环境, 植烷形成于还原环境,  $w(Pr)/w(Ph) < 0.8$  指示强还原环境, 0.8 ~ 3.0 指示还原环境, 大于 3.0 指示氧化环境下陆源有机质输入<sup>[15]</sup>。研究区流一段  $w(Pr)/w(Ph)$  为 1.24 ~ 7.29, 平均为 2.78, 24 个样品中 8 个样品的  $w(Pr)/w(Ph) > 3$ , 表明了氧化环境下的陆源输入, 说明该沉积时期的水体并不太深, 而且水深具有一定的波动性, 这与其滨湖相沉积特征相符; 流二段  $w(Pr)/w(Ph)$  为 0.61 ~ 5.68, 平均为 2.18, 91 个样品中有 27 个样品表现为氧化环境, 11 个样品表现为强还原环境, 表明该时期的氧化还原条件变化波动较大, 与其滨浅湖沉积特征相吻合; 流二段上部和下部的油页岩, 以及流三段烃源岩  $w(Pr)/w(Ph)$  值均落在 0.8 ~ 3.0 之间, 表现为还原环境。流二段上部和下部沉积灰褐色油页岩, 表现为半深湖沉积特征及还原环境特征, 流三段虽然发育一套粗碎屑三角洲相沉积, 但岩石颜色以灰色为主, 同样表明了还原环境特征。因此乌石凹陷流

沙港组整体上表现为还原环境特征,只在流二段沉积中期以及流一段沉积时期的某段时期内表现为氧化环境(表3)。

### 3.3 萜类化合物 ( $m/z$ 191)

萜类化合物中五环三萜烷含量较高,三环萜烷及四环萜烷含量很低(图7)。 $\gamma$ 蜡烷是一种  $C_{30}$  五环三萜烷,被认为是原生动物和光合作用细菌的四膜虫醇通过还原作用形成的。高含量的  $\gamma$ 蜡烷常被作为强还原、超盐环境的标志,并且与盐跃层的水体分层有关<sup>[16-17]</sup>。研究区流沙港组烃源岩均检测出  $\gamma$ 蜡烷(图7),但含量不高, $\gamma$ 蜡烷异常指数  $w(4\gamma\text{蜡烷})/w(C_{31-32}\text{萜烷})$  分布于 0.01~0.89,平均为 0.40,表明烃源岩母质形成于微咸水、还原环境。流二段  $\gamma$ 蜡烷异常指数波动很大,在 0.01~0.82,反映流二段沉积环境具有动荡性,流三段该指

数偏高,表明流三段沉积时盐度稍高、还原性偏强(表4)。

藿烷是生油岩中常见的五环三萜类化合物,研究区含有丰富的藿烷化合物,藿/甾比均超过 5,具有一般陆相沉积的生标组成特点<sup>[14,18]</sup>。藿烷中的  $C_{35}$  升藿烷一般与海相碳酸盐岩或蒸发岩有关,其高值指示强还原环境,并以升藿烷指数  $w(C_{35}\text{升藿烷})/w(\sum C_{31-35}\text{升藿烷})$  作为衡量指标<sup>[7]</sup>。研究区升藿烷指数较低,在 0.01~0.09,平均为 0.04,表现出一定的氧化环境特征。另外, $C_{31-35}$  升藿烷丰度较低且随碳数增加丰度明显下降(图7),不同层段的  $C_{31}$  升藿烷含量略有不同,其中流一段样品的  $C_{31}$  升藿烷含量相对较高,表明其有机质在成岩演化过程有较多的细菌输入,原始有机质经历了一定程度的生物降解作用<sup>[18]</sup>。

表4 乌石凹陷流沙港组烃源岩甾萜烷参数统计

Table 4 Steranes and terpanes parameters of source rocks in Liushagang Formation, Wushi Sag

层位	规则甾烷质量分数/%			$w(4\text{-甲基甾烷})/\%$	$w(\text{三环萜烷})/w(\text{藿烷})$	$\gamma$ 蜡烷异常指数	奥利烷指数
	$C_{27}$	$C_{28}$	$C_{29}$				
$L_1$	16.97~37.61	18.74~26.85	39.30~64.28	6.12~15.73	0.03~0.16	0.10~0.39	0.06~0.18
	28.97(7)	23.27(7)	47.79(7)	9.26(7)	0.08(7)	0.26(7)	0.12(7)
$L_2^{\text{上}}$	33.31~42.39	16.23~29.74	28.83~48.98	7.89~17.04	0.03~0.11	0.15~0.53	0.05~0.11
	38.41(7)	20.88(7)	40.70(7)	9.46(7)	0.06(7)	0.36(7)	0.08(7)
$L_2$	24.89~43.17	10~34.33	26.37~63.30	5.25~17.32	0.02~0.25	0.01~0.82	0.01~0.21
	34.28(66)	25.13(66)	40.59(66)	10.17(66)	0.09(66)	0.45(66)	0.07(66)
$L_2^{\text{下}}$	21.61~39.35	13.86~35.51	28.6~51.05	8.77~49.73	0.02~0.15	0.15~0.49	0.02~0.06
	30.32(17)	27.31(17)	42.37(17)	20.10(17)	0.06(17)	0.30(17)	0.04(17)
$L_3$	25.38~43.00	14.87~33.78	32.06~55.26	8.30~14.38	0.06~0.18	0.23~0.89	0.04~0.14
	33.28(14)	21.47(14)	45.26(14)	11.65(14)	0.10(14)	0.38(14)	0.07(14)

三环萜烷通常被认为与菌藻类生源有关,这与北部湾盆地涠西南凹陷的流沙港组富有机质页岩中发现的丰富藻类化石相吻合。乌石凹陷流沙港组  $w(\text{三环萜烷})/w(\text{藿烷})$  较低,分布于 0.02~0.18(表4),流二段中部样品中  $w(\text{三环萜烷})/w(\text{藿烷})$  相对较高,表明该沉积时期有更加丰富的菌藻类生源贡献,这与该时期适宜藻类生长的滨浅湖相水体环境相吻合。

奥利烷被认为是白垩纪或更年轻时代陆源高等植物的标志物,奥利烷指数  $w(\text{奥利烷})/w(\alpha\beta C_{30}\text{藿烷})$  可以反映陆生高等植物有机质的输入量,该比值越大,说明陆生高等植物有机质的贡献越大。奥利烷在本区各层段中均有出现,含量变化很大,奥利烷指数在 0.01~0.21(表4),流一段奥利烷指数较高,流二段、流三段奥利烷指数较低,其中流二段下

部油页岩该指数很低,平均只有 0.04,这说明流一段烃源岩母质中高等植物输入较多,其他层段尤其是流二段下部油页岩高等植物输入较少。

### 3.4 甾类化合物 ( $m/z$ 217)

样品抽提物中的甾类化合物以规则甾烷为主,含有一定的重排甾烷,孕甾烷和升孕甾烷含量较低(图7)。不同甾烷构型的比值常用来判断烃源岩的成熟度,其中  $C_{29}$  甾烷  $20S/(S+R)$  和  $C_{29}$  甾烷  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  是最有效的参数<sup>[19]</sup>。流沙港组烃源岩  $C_{29}$  甾烷  $20S/(S+R)$  多处于 0.25~0.54,  $C_{29}$  甾烷  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  介于 0.19~0.47,表明流沙港组样品已经进入成熟阶段。

$C_{27}$ 、 $C_{28}$  和  $C_{29}$  规则甾烷的相对组成可反映有机质生源,  $C_{27}$  甾烷指示水生生物生源,  $C_{28}$  甾烷与硅藻类有关,  $C_{29}$  甾烷指示高等植物生源。在所分

析的流沙港组样品中,普遍出现  $C_{29}$  甾烷优势,平均质量分数为 42.14%;  $C_{27}$  甾烷质量分数略低,平均为 33.33%,表明研究区母质来源于以高等植物

为主,低等水生生物为辅的混源输入。不同层段甾烷的碳数分布模式及相对组成有明显区别(图7、表4)。

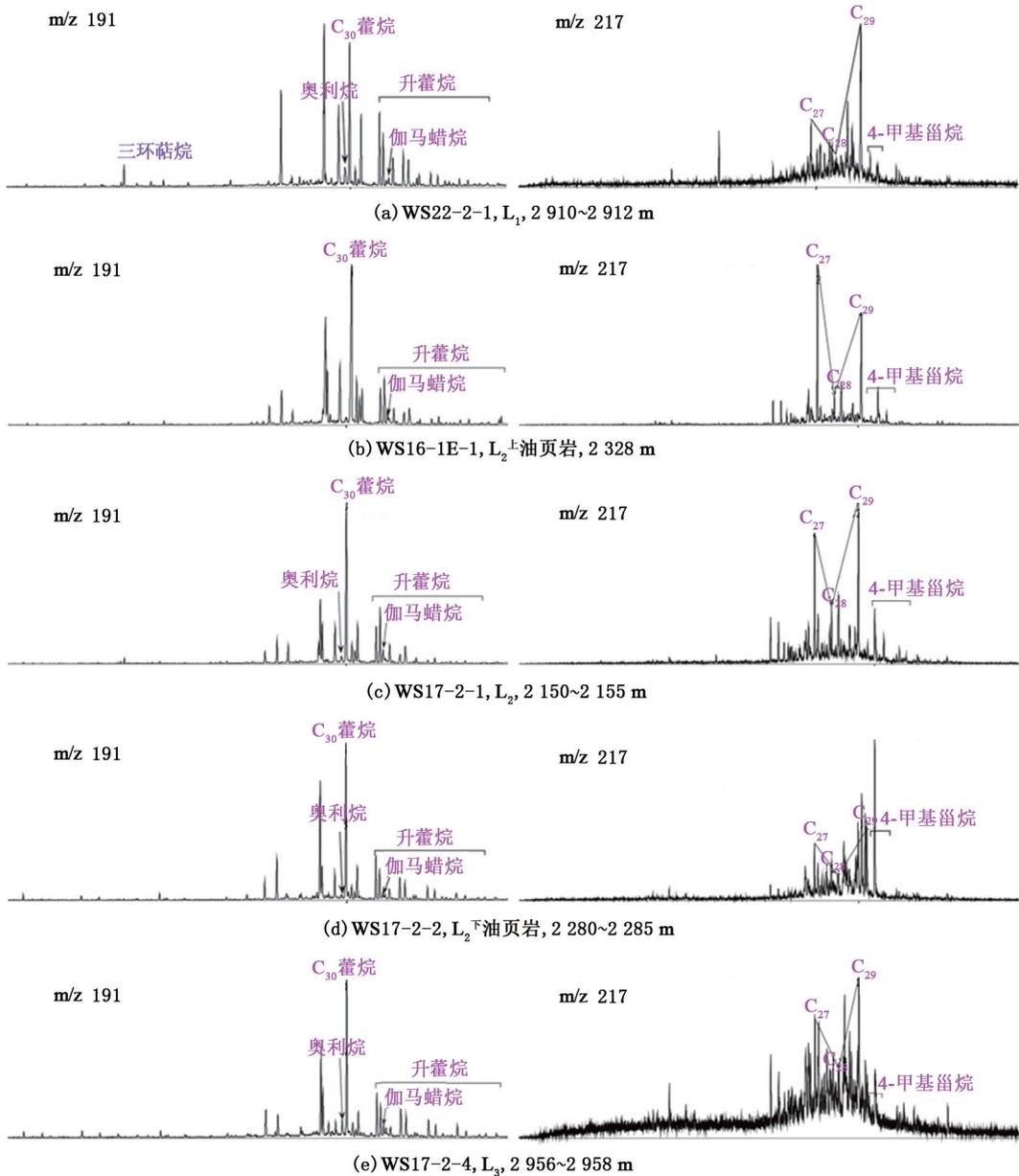


图7 乌石凹陷流沙港组烃源岩甾萜烷分布特征

Fig. 7 Distribution of steranes and terpanes of source rocks in Liushagang Formation, Wushi Sag

流一段  $C_{29}$  甾烷占绝对优势,质量分数均大于 40%,平均达 47.79%,  $C_{27}$  和  $C_{28}$  甾烷质量分数较低,在  $m/z$  217 质量色谱图上  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  和  $C_{29}$  甾烷呈明显的反“L”型分布;流二段烃源岩  $C_{29}$  甾烷虽占优势,但质量分数低于流一段,平均为 40.59%,  $C_{27}$  较  $C_{28}$  甾烷质量分数稍高,分别为 24.89%~43.17%和 10%~34.33%,  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  和  $C_{29}$  甾烷组成中“L”型、“V”型、反“L”型均有分布,说明有机质生源中高等植物有所减少且含有比例不等的水生生物;流二段油页

岩  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  甾烷的质量分数相差很大,上部油页岩  $C_{27}$  甾烷质量分数较高,平均为 28.41%,下部油页岩  $C_{28}$  甾烷质量分数较高,平均为 17.31%;流三段  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  和  $C_{29}$  甾烷相对质量分数分别为 25.38%~43%、14.87%~33.78%、32.06%~55.26%,水生生物在生源中的比例少于流二段。

4-甲基甾烷广泛存在于海相和湖相的烃源岩和石油中。现在普遍认为 4-甲基甾烷与藻类尤其是甲藻具有密切的成因联系。朱伟林等<sup>[20-23]</sup>认为

北部湾盆地烃源岩中的4-甲基甾烷可能为甲藻起源。研究区4-甲基甾烷丰度很高,反映水生藻类在有机质生源中的重要贡献。各层段4-甲基甾烷质量分数有所不同(表4),流二段油页岩特别是下部油页岩4-甲基甾烷质量分数异常高,平均达20.10%,甚至有23.53%的样品4-甲基甾烷的质量分数超过30%,表明藻类特别是甲藻类对油页岩贡献较大,流三段4-甲基甾烷质量分数较高,平均为11.65%。

高含量重排甾烷一般表明陆源黏土矿物和陆源有机质的淡水输入比较充分,而且处于弱氧化—弱还原的相对淡水环境。目的层烃源岩中 $w(C_{27}$ 重排甾烷)/ $w(C_{27}$ 规则甾烷)比值均较高,反映研究区烃源岩陆源黏土矿物和陆源有机质的淡水输入相对比较丰富,这与 $\gamma$ 蜡烷的分析结果基本一致。孕甾烷和升孕甾烷的高低代表着沉积水体的咸化程度,一般在咸化湖相中含量较高。研究区烃源岩样品(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷值介于0.01~0.19,有机质水体盐度较低,以淡水或微咸水的沉积环境为主。

## 4 结 论

(1)流沙港组烃源岩是乌石凹陷的主力烃源岩,其有机质丰度较高,类型较好,热演化程度普遍达到成熟阶段。其中流二段下部油页岩TOC均值为5.71%,类型以I—II<sub>1</sub>型为主,是最有利的烃源岩发育层段,流二段上部油页岩次之,类型以II<sub>1</sub>型为主,流二段非油页岩段烃源岩和流三段烃源岩是中等—好的烃源岩,而流一段烃源岩由于有机质丰度较低,类型以II<sub>2</sub>—III型为主,且成熟度偏低,评价为中等烃源岩。

(2)根据生物标志物特征的综合研究,可确定研究区的形成环境。流一段形成于弱还原环境,有机质来源中高等植物输入较多;流二段及流三段形成于还原性环境,有机质来源以混源输入为特征。整体上,乌石凹陷流沙港组形成时期的湖泊为淡水—微咸水湖。

致谢 感谢任拥军教授的指导和帮助!

## 参考文献:

[1] 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):234-239.  
SUN Wei, FAN Taiyang, ZHAO Zhigang, et al. Basin

filling features and evolution of sequence stratigraphy of paleogene in Wushi Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008,38(2):234-239.

- [2] 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.  
YANG Haizhang, ZHAO Zhigang, LI Jianhong, et al. An analysis of petroleum geology and potential exploration targets in Wushi Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009,21(4):227-231.
- [3] 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.  
LIU Yongjie, ZHAO Zhigang, LI Jianhong, et al. Hydrocarbon play division and major control analysis in Wushi Sag, Beibuwan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008,20(2):82-86.
- [4] 李明兴. 南海北部大陆架油气区古新统下始新统生物地层研究[J]. 石油学报, 1992,13(2):165-169.  
LI Mingxing. A biostratigraphic study of the Paleocene-lower Eocene in the petroliferous area on north shelf of the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992,13(2):165-169.
- [5] 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(江汉石油学院学报), 2013,35(1):6-10.  
ZHANG Zhiwu, LIU Zhifeng, ZHANG Gongcheng, et al. The chasmic stage and structural evolution characteristics of Beibuwan Basin[J]. Oil and Gas Journal (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2013,35(1):6-10.
- [6] 朱伟林,江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J]. 石油学报, 1998,19(3):18-22.  
ZHU Weilin, JIANG Wenrong. Relationships between fracture and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(3):18-22.
- [7] 卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 2010:200-226.
- [8] 任拥军,查明. 胶莱盆地东北部白垩系烃源岩有机地球化学特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003,27(5):16-20.  
REN Yongjun, ZHA Ming. Organic geochemistry characteristics of Cretaceous source rock in northeast Jiaolai Basin[J]. Journal of the University of Petroleum(Natural Science Edition), 2003,27(5):16-20.
- [9] 胡建义,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, 1991:164-222.
- [10] 成海燕,李安龙,龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析[J]. 海洋地质动态, 2008,24(2):7-10.

- CHENG Haiyan, LI Anlong, GONG Jianming. Source rock evaluation parameter of continental facies[J]. *Dynamic Marine Geology*, 2008, 24(2): 7-10.
- [11] 曹宏明,程子翔,程伟,等.莘县凹陷堂邑洼陷古近系沙三段烃源岩生烃潜力评价[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(2): 56-59.
- CAO Hongming, CHENG Zixiang, CHENG Wei, et al. The evaluation of hydrocarbon potential of source rocks in Sha three section of Shenxian Sag[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013, 20(2): 56-59.
- [12] 邱楠生,胡圣标,何丽娟.沉积盆地热体制研究的理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2004: 213-244.
- [13] KATZ B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks: an update[J]. *AAPG Studies Geology*, 1995, 40: 61-79.
- [14] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarkerguide(second edition)(II): biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. New York: Cambridge University Press, 2005: 483-607.
- [15] 王铁冠.生物标志物地球化学研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1990:152-164.
- [16] 孟仟祥,徐永昌,沈平,等.柴达木盆地石炭系烃源岩和煤岩生物标志化合物特征及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 729-736.
- MENG Qianxiang, XU Yongchang, SHEN Ping, et al. The biomarker characteristics and geochemical significance of carboniferous hydrocarbon source rocks and coals in Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 729-736.
- [17] 霍慎德, 任拥军, 查明.胶莱盆地白垩系烃源岩生物标志化合物[J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(5): 393-395.
- HUO Shende, REN Yongjun, ZHA Ming. The biomarkers of cretaceous tertiary source rocks in Jiaolai Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(5): 393-395.
- [18] 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, 33(1): 33-39.
- ZHU Yangming, ZHOU Jie, GU Shengxiao, et al. Molecular characteristics of coal measure source rock in Eocene Pinghu Formation, West Lake Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 33-39.
- [19] 张波,吴智平,王永诗,等.沾化凹陷三合村洼陷油气多期成藏过程研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2): 39-48.
- ZHANG Bo, WU Zhiping, WANG Yongshi, et al. Study on multi-period hydrocarbon accumulation process in Sanhecun subsag of Zhanhua sag[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(2): 39-48.
- [20] 朱伟林.中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源条件[M].北京:地质出版社,2009:297.
- [21] 黄第藩,张大江,李晋超.论4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. *石油勘探与开发*, 1989, 16(3): 8-15.
- HUANG Difan, ZHANG Dajiang, LI Jinchao. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, 16(3): 8-15.
- [22] 李友川,邓运华,张功成,等.南海北部第三系海相烃源岩[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 219-225.
- LI Youchuan, DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng, et al. Department of northern South China Sea third marine source rock [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 219-225.
- [23] 黄保家,黄合庭,吴国瑄,等.北部湾盆地始新统湖相富有机质页岩特征及成因机制[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 25-31.
- HUANG Baojia, HUANG Heting, WU Guoxuan, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in Beibuwan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 25-31.

(编辑 刘为清)