

北部湾盆地涠西地区 W4 井油气成藏主控因素分析

梁世友^{1,2}, 倪春华², 曾广东³, 周小进², 陈剑新³

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要:北部湾盆地涠西地区于 W4 井渐新统涠洲组三段获高产工业油气流, 实现了北部湾盆地新区油气勘探突破。通过对 W4 井古近系原油及相关钻井岩心样品实验测试结果的研究, 结合区内勘探新资料与邻区原油测试结果, 重点开展了油源对比与成藏主控因素分析。研究认为, 涠西地区 W4 井涠洲组三段油气藏属于断块型油气藏, 其原油来自于母质类型较好的流沙港组成熟烃源岩, 油气成藏受控于断层侧向封堵与盖层条件 2 个关键因素。

关键词:油—源对比; 成藏主控因素; 古近系; 涠西地区; 北部湾盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Controlling factors for oil & gas accumulation in well W4, Weixi area, Beibuwan Basin

Liang Shiyu^{1,2}, Ni Chunhua², Zeng Guangdong³, Zhou Xiaojin², Chen Jianxin³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Shanghai Offshore Oil & Gas Company, SINOPEC, Shanghai 200120, China)

Abstract: Recently, SINOPEC obtained high-yield industrial oil and gas flows in the third member of the Oligocene Weizhou Formation in well W4 in Weixi area of the Beibuwan Basin, and achieved a breakthrough in oil and gas exploration in the New Area of the Beibuwan Basin. An oil-source correlation was made and the major factors controlling oil and gas accumulation were studied based on the test results of crude oil and related drill core samples from well W4 in the Paleogene, combined with new exploration data from the study area and crude oil test results from the adjacent areas. The third member of Weizhou Formation in well W4 is a fault block type oil and gas reservoir, and the crude oil of which came from the mature hydrocarbon source rock of the Liushagang Formation. Hydrocarbon accumulation was controlled by two key factors including the lateral sealing characteristics of faults and cap rock conditions.

Key words: oil-source correlation; major factors of accumulation; Paleogene; Weixi area; Beibuwan Basin

北部湾盆地位于南海北部大陆架西部, 为古近纪发育的陆内断陷盆地, 面积 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 由 12 个二级构造单元组成^[1-2]。本文所指的涠西地区位于北部湾盆地的西部, 地跨涠西南凹陷、涠西南低凸起和海中西凹陷 3 个构造单元(图 1)。20 世纪末至今该区实施了一批油气井钻探, 在海中西凹陷中央反转背斜带 W14-2-1 井获得工业油气流; 在涠西南凹陷(D 次凹) W3 井流沙港组见有丰富的油气显示; 在涠西南低凸起西斜坡涠 11-5W 构造实施了 W4 井钻探, 于渐新统涠洲组三段(下文简称涠三段)两层 DST 测试均获得高产油气流, 日产高品质原油超千吨, 成为近十年来国内罕见的高产

测试探井。

本文基于 W4 井涠三段原油及相关钻井岩心的实验测试结果, 结合区内勘探新资料与邻区原油测试结果, 重点开展了油源对比与成藏条件分析, 并结合 W5 井钻探失利原因分析, 探讨了 W4 井油气成藏的主控因素。

1 W4 井油源对比

前人对北部湾盆地的烃源条件、油气成藏特征等做过一些研究工作^[1-11], 但由于主要凹陷勘探程度高低不一, 对已发现原油的地球化学特征缺乏系统研究, 油源不甚明确。本文主要通过对比 W4 井原

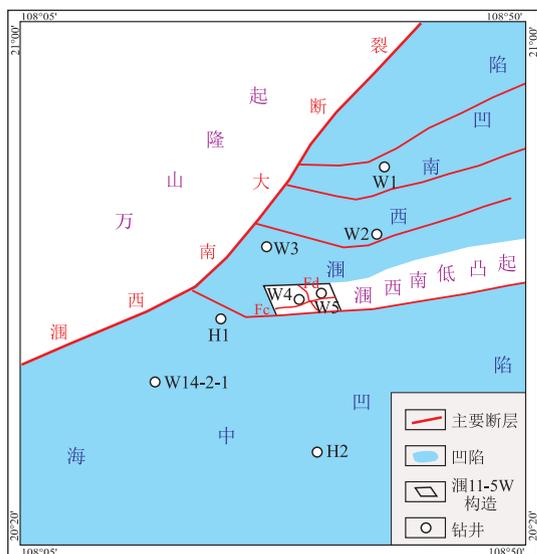


图 1 研究区位置示意

Fig.1 Location of the study area

油化学组成、碳同位素、生物标志化合物等特征的分析,结合邻区原油以及相关钻井岩心样品的对比分析,开展了油—源对比研究。

1.1 原油化学组成特征

根据试油成果资料,W4井涠三段原油密度为0.848~0.867 g/cm³,根据《中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5735-1995》的原油物性分类,该原油属于轻质油。原油族组分测试数据表明,W4井、W3井原油均以饱和烃占据绝对优势,其中,前者饱芳比(饱和烃/芳烃比值)高达4.61(表1)。原油的饱芳比可以反映其母源有机质类型和成熟度的相关信息,具体而言,有机质类型越好、成熟度越高,该比值则越大。据此根据W4井、W3井原油的饱芳比,可以推测前者较后者母源有机质类型更好、成熟度更高。这一认识与下文原油成熟度的研究结论吻合。

原油的主要化学成分是有机物质,同时还广泛存在一些无机物,即多种微量金属元素。国内外学者通过研究原油中的微量元素分布与组成特征,探索原油的成因及形成环境,并取得了较好的应用效果^[12-16]。表2列出了W4井原油20种金属元素的含量。目前研究中应用最为广泛的当属V和Ni的

表 1 北部湾盆地涠西探区 W4 井和 W3 井原油族组分测试数据

Table 1 Group components of crude oils from wells W3 and W4 in Weixi exploration area, Beibuwan Basin

井号	层系	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%	饱芳比
W4	涠三段	70.97	15.38	10.36	2.23	4.61
W3	流二段	46.11	20.47	22.00	7.84	2.25

表 2 北部湾盆地涠西探区 W4 井涠三段原油各金属元素含量

Table 2 Metal element contents of crude oils from the third member of Weizhou Formation, well W4, Weixi exploration area, Beibuwan Basin

金属元素	含量/(μg·mg ⁻¹)	金属元素	含量/(μg·mg ⁻¹)
Al	0.68	Mn	0.12
Ba	0.25	Na	8.94
Ca	7.87	Ni	11.78
Co	0.19	Sr	0.019
Cr	0.043	Ti	0.10
Cu	0.97	V	0.35
Fe	4.00	Zn	0.12
K	2.24	Zr	0.004
Li	0.20	Mo	0.005
Mg	2.59	Pb	0.029

比值(V/Ni),大量的统计结果表明,国外海相原油普遍以富V为特征,V/Ni比值在1.4~6.9之间,而国内陆相原油V/Ni比值在0.001 1~0.099之间^[17]。根据徐正球等^[18]提出的海陆相原油区分标准,W4井涠三段原油属于陆相原油,结合含量Ni>V>Co的特征,进一步判断其为湖相原油。Sr/Ba比值常被用来区分沉积水体的古盐度,即该比值大于1为咸水环境,反之则为淡水环境。W4井原油Sr/Ba值为0.076,故判断其沉积水体为淡水。综上所述,W4井涠三段原油形成于淡水湖相环境。

1.2 原油碳同位素特征

原油碳同位素的研究可以提供原油的母源性质及沉积环境、成熟度和运移过程以及生物降解等诸多重要信息,因而被学者们广泛应用于原油的成因及油—源对比等研究^[19-24]。原油的碳同位素首先取决于烃源岩的有机质类型,即不同有机质类型的烃源岩生成的原油碳同位素值存在差异;其次,同一烃源岩在不同演化阶段生成的原油,其碳同位素特征也有所差异^[20]。W4井涠三段原油全油碳同位素值(δ¹³C)为-28.0‰,饱和烃、芳烃、非烃、沥青质碳同位素值分别为-28.5‰,-27.6‰,-26.4‰,-26.8‰,结合包建平^[25]对北部湾盆地主要凹陷原油碳同位素值的统计数据对比分析(图2),位于北部湾盆地北端涠西南凹陷周缘的中海油探区已发现的原油δ¹³C值大多大于-26.0‰,而位于北部湾盆地中南部迈陈凹陷和福山凹陷的原油δ¹³C值一般为-28.0‰;比较而言,W4井涠三段原油δ¹³C值与后者更为接近,表明其与迈陈凹陷、福山凹陷的母源有机质类型较为相似,而与涠西南凹陷原油的母源有机质类型差异较大;对比

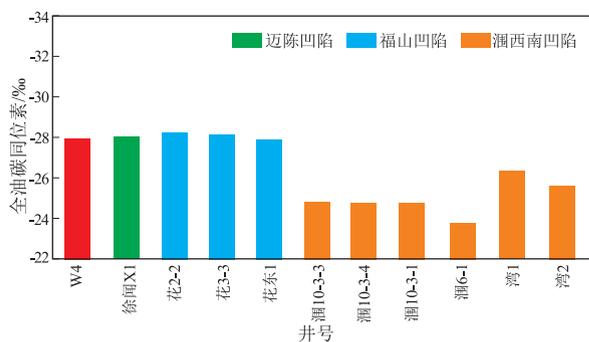


图2 北部湾盆地主要凹陷原油碳同位素组成特征

W4井数据为本次实测,其余来自参考文献[25]。

Fig.2 Carbon isotope composition of crude oils in the main sag of Beibuwan Basin

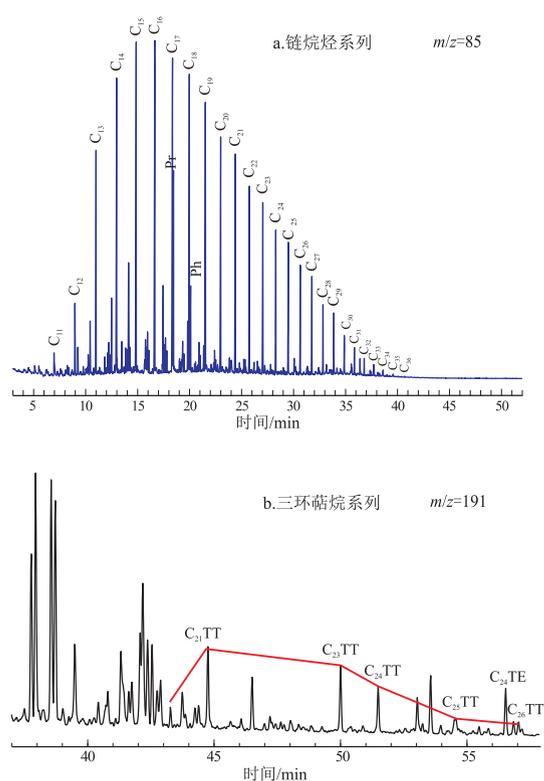
W2井、W3井始新统流沙港组烃源岩干酪根类型大多为I-II₁型,表明有机质类型较好,故其生成的原油碳同位素较轻。

1.3 原油生物标志化合物组成特征

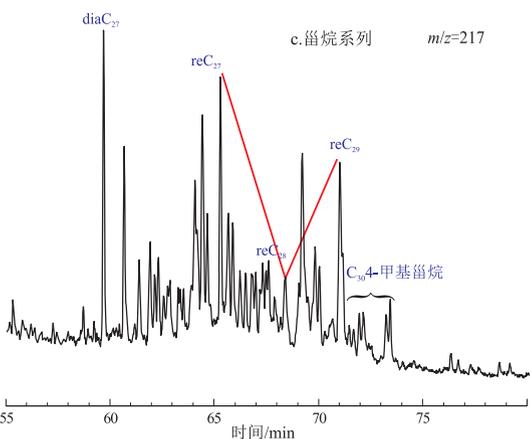
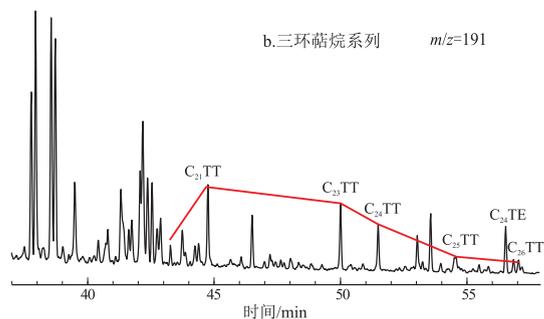
生物标志化合物常被应用于沉积环境判别、成烃演化阶段划分、油源对比、油气运移分析等地质研究[26]。

1.3.1 链烷烃系列

W4井涠三段原油正构烷烃系列分布完整,碳数分布为C₁₁-C₃₆,主峰碳数为C₁₆(图3a),表现为“前峰型”的特点,反映其生烃母质有机质类型好,



b.三环萜烷系列 m/z=191



d.五环萜烷系列 m/z=191

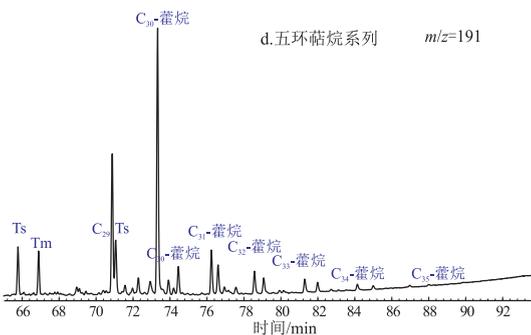


图3 北部湾盆地W4井涠三段原油生物标志化合物组成分布特征

Fig.3 Biomarker composition of crude oils from the third member of Weizhou Formation in well W4, Beibuwan Basin

主要为湖相低等生物。正构烷烃系列不具奇偶优势,奇偶优势指数OEP为1.049,显示其为成熟原油。该原油Pr/Ph比值为2.437,表现出一定的姥鲛烷优势,表明其形成于弱还原的沉积环境。根据植烷系列组成特征分析,北部湾盆地古近纪沉积环境总体具有由北往南还原性减弱的趋势,对应的原油类型也由湖相原油演变为煤成油(图4)。

1.3.2 补身烷系列

W4井涠三段原油补身烷系列组成特征显示,重排补身烷化合物相对丰度较高,重排补身烷与补身烷的比值为2.50,重排补身烷与升补身烷的比值

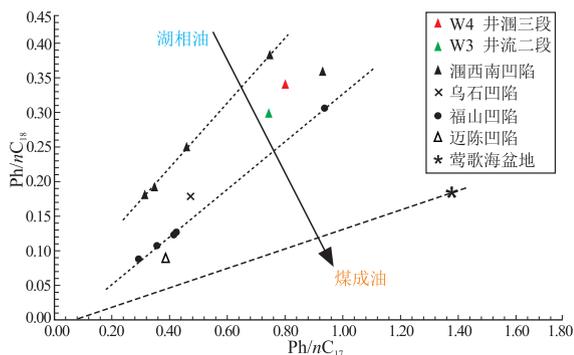


图4 北部湾盆地各主要凹陷和莺歌海盆地原油Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈关系

Fig.4 Relationship between Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈ of crude oils in the main sags of Beibuwan Basin and Yinggehai Basin

为 2.44。研究表明,重排补身烷相对丰度与沉积环境的氧化还原性密切相关^[27],据此判断该原油母源发育于古水体较深、具有一定还原性的沉积环境。

1.3.3 三环萜烷系列

不同成因类型的原油具有不同的三环萜烷系列分布与组合特征,如湖相、海相原油呈正态分布,而煤成油则呈阶梯状降低的趋势^[27]。W4 井涪三段原油三环萜烷呈近似正态分布特征($C_{19} < C_{20} < C_{21} > C_{23} > C_{24} > C_{25} > C_{26}$) (图 3b),且 C_{24} 四环萜烷相对丰度高于 C_{26} 三环萜烷,故该原油应为湖相原油。

1.3.4 甾烷系列

W4 井涪三段原油规则甾烷系列组成特征为 C_{27} 规则甾烷相对丰度高于 C_{29} 规则甾烷,呈不对称“V”型分布(图 3c),反映其母源有机质构成以低等水生生物为主,陆源高等植物为辅。另外,该原油中重排甾烷系列化合物丰度较高,且含中等丰富的 C_{30} 4-甲基甾烷,这与前人的研究认识是吻合的^[8]。

1.3.5 五环萜烷系列

W4 井涪三段原油三降藿烷 $T_s > T_m$,两者比值为 1.07,反映成熟原油的演化特征。伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷)常用来表征沉积水体的古盐度,此原油的该参数仅为 0.03,反映其具有典型的淡水沉积特征。升藿烷系列组成完整,且呈 $C_{31} > C_{32} > C_{33} > C_{34} > C_{35}$ 递减分布(图 3d),表征其湖相原油的特点。

综合上述生物标志化合物组成与分布特征,W4 井涪三段原油为成熟湖相原油。

1.4 油—源对比

油—源对比是油气勘探过程中的一项重要研究内容,主要利用原油与烃源岩在成熟度、生物标志化合物组成特征及其参数等方面的相似性,进而判别两者是否具有亲缘关系。

首先,对 W3 井、W4 井原油的成熟度进行定量评价。W3 井流二段原油 T_s/T_m 比值为 0.97,甲基菲指数(MPI)分别为 0.44 和 0.46,甲基菲比值(MPR)分别为 0.36 和 0.19;根据甲基菲比值判识图版^[28],该原油处于低成熟演化阶段(图 5)。包建平根据北部湾盆地迈陈凹陷、江苏油田徐闻探区徐闻 X1 井原油成熟度与甲基菲指数的关系,建立了换算公式 $R_o = 1.5807MPI_1 - 0.0183$ ^[25],据此计算,W3 井流二段原油成熟度为 0.68%。这一结果与 W3 井流二段泥岩样品镜质体反射率 R_o 分布范围为 0.58%~0.73% 相吻合,表明该原油可能来自流二段烃源岩,为自生自储型。利用相同的换算公式定量计算 W4 井涪三段原油的成熟度为

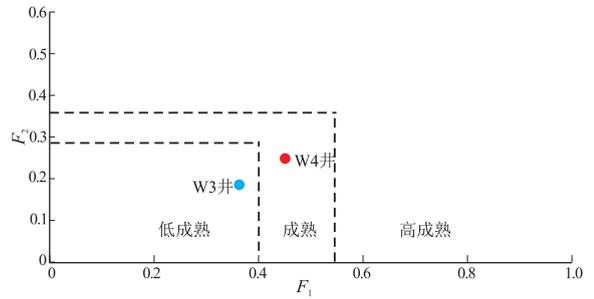


图 5 北部湾盆地 W3 井和 W4 井原油甲基菲比值 F_1 与 F_2 关系

甲基菲比值判识图版见文献^[28]。

Fig.5 Relationship between F_1 and F_2 of methylphenanthrene ratio of crude oils from wells W3 and W4, Beibuwan Basin

表 3 北部湾盆地 W4 井涪三段原油成熟度相关参数

Table 3 Maturity-related parameters of crude oils from the third member of Weizhou Formation in well W4, Beibuwan Basin

生物标志化合物类别	参数	数值
正构烷烃	奇偶优势指数(OEP)	1.049
甾烷	$C_{29}20S/(20S+20R)$	0.46
	$C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	0.31
藿烷	T_s/T_m	1.07
芳烃	甲基菲指数(MPI)	$MPI_1 = 0.62, MPI_2 = 0.65$
	甲基菲比值(MPR)	$F_1 = 0.45, F_2 = 0.24$
	甲基萘比值(MNR)	0.67
	二甲萘比值(DNR)	3.85
金刚烷	甲基单金刚烷指数(MAI)/%	0.72

注:原油深度为 2 264.9~2 275.9 m。

0.96%,处于成熟演化阶段(图 5,表 3)。

应用于油—源对比的生物标志化合物及其参数较多,归纳起来主要包括指示沉积环境、母质类型、演化程度 3 个方面。本次研究综合考虑上述 3 个要素,选择了以下 6 组参数: $C_{21}TT/C_{23}TT$ 、 $C_{24}TE/C_{26}TT$ 、GI、 $diaC_{30}H/C_{30}$ 、 $diaC_{27}/C_{27}$ 和 $C_{27}R/C_{29}R$ (图 6)。由于 W4 井钻探过程中未取心,故利用邻近的 W3 井岩心样品进行油—岩对比。根据油—岩生物标志化合物指纹参数综合比对结果分析,W3 井流二段原油、W4 井涪三段原油均与流沙港组泥岩,尤其是流二段泥岩具有较好的亲缘关系,而与其上部涪洲组烃源岩差异较大(图 6)。

综上所述,W3 井流二段原油可能来自其自身的低成熟烃源岩,具自生自储的成藏特点;而由于 W4 井所在地区流沙港组烃源岩处于未成熟—低成熟演化阶段,推测其可能来自于 3 号断层倾没端西南缘的流沙港组成熟烃源岩发育区。

2 W4 井油气成藏条件分析

通过对涪西地区 W4 井涪三段油气藏的基本

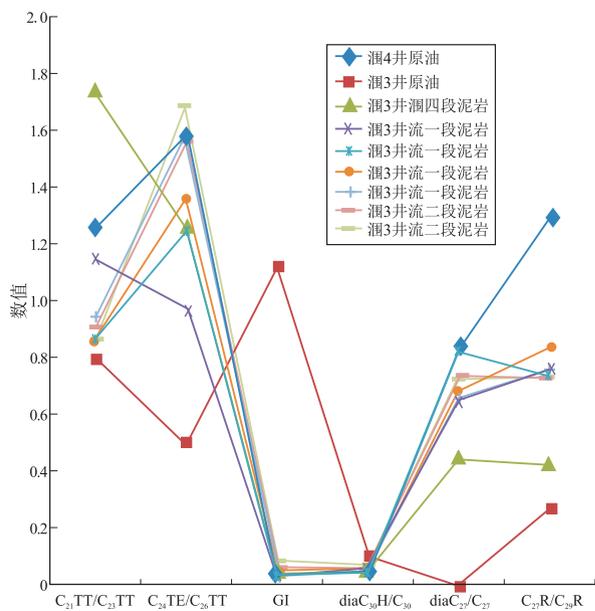


图6 北部湾盆地 W4 井和 W3 井原油与 W3 井泥岩生物标志化合物指纹参数关系

TT 为三环萜烷, TE 为四环萜烷, GI 为伽马蜡烷指数, diaC₃₀H 为重排 C₃₀ 藿烷, dia 为重排甾烷, R 为 20R 构型的甾烷异构体

Fig.6 Fingerprint parameters of biomarkers of crude oils from wells W4 and W3 and mudstones from well W3, Beibuwan Basin

成藏要素及其相关配置关系进行深入剖析,明确了该油气藏的有利成藏条件。

(1) W4 井处于有利的油气运聚指向区,且生运聚匹配关系较好。根据盆地区域构造演化,始新世流沙港期涠西南凹陷与海中凹陷为统一断陷湖盆,至渐新世涠洲期受断陷分隔演化而形成如今之构造格局。因此,涠西南 D 次凹—海中凹陷均发育了流沙港组这套区域性的烃源岩,已有数口钻井揭示涠西南 D 次凹流沙港组烃源岩厚度大、有机质丰度较高、类型好(I-II₁型),目前处于成熟阶段^[8],而与之紧邻的海中凹陷深洼区演化程度更高,推测已达高成熟阶段。而 W4 井区流沙港组烃源岩埋藏较浅,处于未成熟—低成熟阶段,自身供烃能力较差,但由于其处于涠西南低凸起向生烃洼陷的倾伏端,具凹中隆性质,故成为西侧油气沿构造脊向构造高部位运移聚集的主要指向区。而且,涠西南凹陷 D 次凹流沙港组烃源岩具有 2 次生排烃高峰期,分别为渐新世末期、中中新世末至今,与圈闭定型期相当或晚于圈闭定型期,匹配关系较好,有利于油气充注。另外,“断层+砂体”组合为油气主要输导体系,垂向—侧向运移至高部位聚集成藏。

(2) W4 井发育优质储层和良好盖层。沉积相研究表明,涠三、四段以发育三角洲平原—前缘

分流河道砂体为主,砂岩含量均达 60%以上,孔隙度为 7.5%~21.7%,平均值为 16.4%,渗透率为 $(1.3 \sim 251.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $57.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为一套中孔中渗储层。区域上涠洲组上部一、二段发育泥岩,其与涠洲组下部的三、四段砂岩构成良好的储盖组合。W4 井揭示涠洲组一、二段泥岩累计厚度逾 100 m,泥地比大于 70%,尤其是涠二段单层泥岩最大厚度可达 50 m,且泥质较纯,其为下伏涠三段储层提供了良好的直接盖层条件,构成良好的储盖组合。

(3) W4 井具备有利的圈闭发育条件,且断层侧向封堵性较好。其所在的涠 11-5W 构造西断块受 NW 向 Fd 断层和近 EW 向 Fc 断层共同控制。其中, Fd 断层为同沉积正断层,断距较大,圈闭位置涠四段顶的断距在 70~120 m; Fc 断层切割 Fd 断层,圈闭位置涠四段顶的断距达 50~110 m。由于 W4 井涠三段主力油层最大单层砂体厚度 60 m, Fd、Fc 断层的断距大于单砂体厚度,故在侧向上易于形成断层封堵,形成有效圈闭。而且,根据江苏油田对高邮凹陷复杂小断块 106 个构造、岩性油藏与砂岩发育程度的关系统计,当砂岩百分含量大于 25%时为构造型油藏。

综上所述, W4 井涠三段油气藏的形成主要归结于下列有利条件:位于凹中隆有利构造位置,发育优质储层和良好盖层,众多横切生烃洼陷近 EW 向的正断层+砂体为油气运移提供了良好的输导网络体系,更为重要的是在油气向涠西南低凸起运移过程中, Fd、Fc 断层提供了有利的侧向遮挡条件。

3 存在问题及讨论

W5 井邻近 W4 井区,位于涠西南低凸起西斜坡涠 11-5W 构造北断块,完钻层位为长流组,但录井未见荧光异常和明显的气测异常。岩性组合特征表明,该井流沙港组具备基本的烃源岩发育条件,主要为一套灰色—深灰色泥岩、粉砂质泥岩。钻探证实涠三、四段砂岩十分发育,砂岩含量分别为 82%和 52%,其中涠三段分流河道砂发育,上部砂体单层厚度大,厚度近百米,下部砂层一般 10~20 m,因此 W5 井具备基本的源储条件。但 W5 井所处的涠 11-5W 构造北断块断层侧向封堵与盖层条件较差。涠 11-5W 构造北断块东部主要受 Fb 断层遮挡,而 Fb 断层断距相对较小,涠三段顶部断距在 20~70 m 之间,小于涠三段上部单砂层厚度,故断层侧向封堵条件较差。加之 Fb 断层东部断点靠近 T₂ 削蚀面,涠洲组一、二段盖层被剥蚀殆尽,剥蚀面上覆

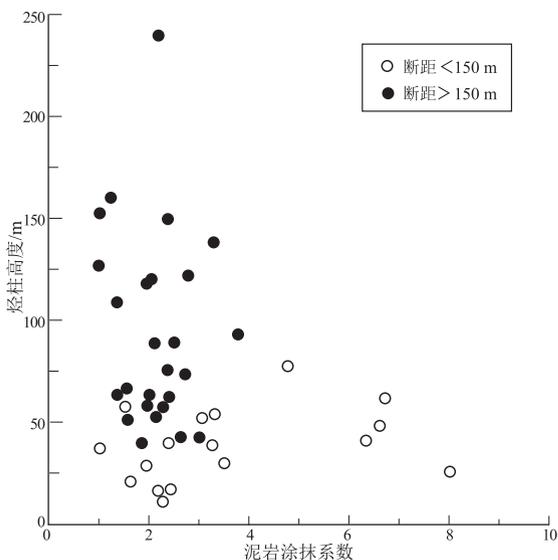


图 7 泥岩涂抹系数与烃柱高度的关系

Fig.7 Relationship between mudstone smear coefficient and hydrocarbon column height

含砾粗砂岩,从而导致对油气的封盖性能较差,进而影响涪 11-5W 构造北断块油气的整体有效保存。

研究表明,断层泥岩涂抹系数与烃柱高度存在一定的相关关系,如断距不足 150 m 的断层能够封闭的烃柱高度一般小于 100 m^[29](图 7)。而 W5 井所处位置的圈闭幅度达 450 m。此外,根据 W4 井对第一油层试油的三关双对数拟合曲线推测,油水边界距 W4 井约 400 m,油藏高度在 150 m 左右。由此推断,W5 井所在的涪 11-5W 构造北断块依靠断层侧向封堵 450 m 烃柱高度的可能性很小。

4 结论

(1) 油—源对比结果表明,W3 井流二段原油、W4 井涪三段原油与流沙港组烃源岩具有较好的亲缘关系。其中前者为低成熟原油,来自原地流沙港组低成熟烃源岩,为自生自储类型;后者为成熟原油,可能来自涪西南 D 次凹—海中凹陷的流沙港组成熟烃源岩。

(2) W4 井涪三段油气藏解剖与 W5 井钻探失利原因分析综合研究表明,W4 井涪三段油气藏属于断块型油气藏,油气能否有效成藏主要受控于断层侧向封堵与盖层条件 2 个关键因素。

致谢:文中相关原油及岩心样品的采集工作得到了中国石化上海海洋油气分公司相关部门的大力支持和帮助,在此深表谢意!

参考文献:

[1] 包建平,刘玉瑞,朱翠山,等.北部湾盆地原油地球化学特征

与成因类型[J].石油与天然气地质,2007,28(2):293-298.

Bao Jianping,Liu Yurui,Zhu Cuishan,et al.Geochemical characteristics and genetic types of crude oils[J].Oil & Gas Geology, 2007,28(2):293-298.

[2] 宋刚练,席敏红,张萍,等.北部湾盆地涪西南凹陷油气成藏特征研究[J].地质与勘探,2012,48(2):415-420.

Song Ganglian,Xi Minhong,Zhang Ping,et al.Hydrocarbon accumulation characteristics in the Weixinan Sag,Beibu Gulf Basin [J]. Geology and Exploration,2012,48(2):415-420.

[3] 朱伟林,吴国璋,黎明碧.南海北部陆架北部湾盆地古湖泊与烃源条件[J].海洋与湖沼,2004,35(1):8-14.

Zhu Weilin,Wu Guoxuan,Li Mingbi.Palaeolimnology and hydrocarbon potential in Beibu Gulf Basin of South China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2004,35(1):8-14.

[4] 马文宏,何家雄,姚永坚,等.南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J].天然气地球科学,2008,19(1):41-48.

Ma Wenhong,He Jiexiong,Yao Yongjian,et al.Characteristics of Tertiary sediments and main source rocks,Northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience,2008,19(1):41-48.

[5] 游君君,徐新德,李里,等.涪西南凹陷流沙港组二段烃源岩有机相研究[J].中国矿业,2012,21(11):87-90.

You Junjun,Xu Xinde,Li Li,et al.Organic facies of source rocks of the second member of Liushagang Formation in the Weixinan Sag [J]. China Mining Magazine,2012,21(11):87-90.

[6] 郭飞飞,王韶华,孙建峰,等.北部湾盆地涪西南凹陷油气成藏条件分析[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(3):93-98.

Guo Feifei,Wang Shaohua,Sun Jianfeng,et al.Analysis on the conditions of petroleum accumulation in Weixinan Sag,Beibuwan Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2009,29(3):93-98.

[7] Huang Baojia,Tian Hui,Wilkins R W T,et al.Geochemical characteristics,palaeoenvironment and formation model of Eocene organic-rich shales in the Beibuwan Basin,South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology,2013,48:77-89.

[8] 范蕊,李水福,何生,等.涪西南凹陷烃源岩地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质,2014,36(2):238-244.

Fan Rui,Li Shuifu,He Sheng,et al.Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation in Weixinan Sag, Beibuwan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2):238-244.

[9] 刘明全.北部湾盆地天然气成藏系统构想[J].中国海上油气,2004,16(2):93-97.

Liu Mingquan.The assumed gas accumulation systems in Beibuwan Basin [J]. China Offshore Oil and Gas,2004,16(2):93-97.

[10] 张萍,郑军,席敏红,等.北部湾盆地涪西南凹陷西南缘油气成藏条件及模式[J].石油实验地质,2015,37(2):157-163.

Zhang Ping,Zheng Jun,Xi Minhong,et al.Hydrocarbon accumulation conditions and patterns in the southwestern margin of Weixinan Sag,Beibuwan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment,2015,37(2):157-163.

[11] 毛治超,黄文魁,王新宇,等.广西北部湾盆地北缘晚古生代—中生代碳酸盐岩烃源岩特征[J].油气地质与采收率,

- 2016,23(4):53-58.
- Mao Zhichao, Huang Wenkui, Wang Xinyu, et al. Characteristics of carbonate source rocks of late Paleozoic - Mesozoic in the northern margin of Beibu Gulf in Guangxi [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 53-58.
- [12] Hitchon B, Filby R H. Use of trace elements for classification of crude oils in families example, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(7): 838-849.
- [13] 丁志敏. 微量元素在霸县凹陷油源对比中的应用 [J]. *石油与天然气地质*, 1987, 8(2): 138-144.
- Ding Zhimin. Application of trace elements in oil source correlation of Baxian Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 1987, 8(2): 138-144.
- [14] 赵孟军, 黄第藩, 廖志勤, 等. 原油中微量元素地球化学特征 [J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(3): 19-23.
- Zhao Mengjun, Huang Difan, Liao Zhiqin, et al. Geochemistry of trace elements in crude oils [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(3): 19-23.
- [15] 宗国宪, 黄正吉. 莺歌海盆地原油中微量元素分布特征及其地质意义 [J]. *海洋石油*, 2003, 23(4): 27-29.
- Zong Guoxian, Huang Zhengji. Characteristics and significance of trace elements in crude oil of Yinggehai Basin [J]. *Offshore Oil*, 2003, 23(4): 27-29.
- [16] 曹剑, 吴明, 王绪龙, 等. 油源对比微量元素地球化学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(9): 925-936.
- Cao Jian, Wu Ming, Wang Xulong, et al. Advances in research of using trace elements of crude oil in oil-source correlation [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2012, 27(9): 925-936.
- [17] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(1): 27-32.
- Deng Ping. The application of trace amount of elements in the exploration of oil and gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(1): 27-32.
- [18] 徐正球, 邓平. 干酪根和原油中的微量元素研究及其在油气勘探中的应用 [C]//中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室研究年报. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 186-198.
- Xu Zhengqiu, Deng Ping. Study on trace elements in kerogen and crude oil and its application in oil and gas exploration [C]//The Annual Report of State Key Laboratory of Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 186-198.
- [19] 段毅, 彭德华, 张晓宝, 等. 柴达木盆地原油碳同位素组成的主控因素与成因类型 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 355-359.
- Duan Yi, Peng Dehua, Zhang Xiaobao, et al. Main controlling factors and genetic types of carbon isotopic compositions for crude oils from the Qaidam Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 355-359.
- [20] 米敬奎, 张水昌, 陈建平, 等. 哈得逊与轮南地区原油碳同位素特征及影响因素 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(6): 1071-1076.
- Mi Jingkui, Zhang Shuichang, Chen Jianping, et al. Carbon isotope characteristics and the influencing factors of the oils from Lunnan and Hadexun Oil Fields [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 1071-1076.
- [21] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律: 原油地球化学特征与分类 [J]. *石油学报*, 2015, 36(11): 1315-1331.
- Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. Geochemical features and classification of crude oil in the southern margin of Junggar Basin, Northwestern China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(11): 1315-1331.
- [22] 贺聪, 吉利明, 苏奥, 等. 天然气组分碳同位素倒转成因分析及地质应用 [J]. *特种油气藏*, 2016, 23(4): 14-19.
- He Cong, Ji Liming, Su Ao, et al. Genesis analysis and geological application of gas component carbon isotope reversal [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(4): 14-19.
- [23] 刘虎, 廖泽文, 戚明辉, 等. 受生烃母质控制的干酪根及其热解产物稳定碳同位素分布模式 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(5): 652-658.
- Liu Hu, Liao Zewen, Qi Minghui, et al. Stable carbon isotope distribution patterns of kerogen and its derived hydrocarbons constrained by primary biomass [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(5): 652-658.
- [24] 张海全, 孟万斌, 王鹤. 黔南坳陷凯里油砂矿地质特征及成矿模式 [J]. *断块油气田*, 2016, 23(4): 419-422.
- Zhang Haiquan, Meng Wanbin, Wang He. Geological characteristics and forming pattern of Kaili oil sand in southern Guizhou Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2016, 23(4): 419-422.
- [25] 包建平, 朱翠山, 熊波, 等. 徐闻探区烃源岩评价 [R]. 扬州: 中石化江苏油田分公司地质科学研究所, 2005: 108.
- Bao Jianping, Zhu Cuishan, Xiong bo, et al. Source rock evaluation of Xuwen exploration area in Beibuwan Basin [R]. Yangzhou: Geological Science Institute, Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, 2005: 108.
- [26] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide: Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history, volume 2 [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 645-705.
- [27] 包建平, 朱翠山, 倪春华. 北部湾盆地不同凹陷原油生物标志物分布与组成特征 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 646-652.
- Bao Jianping, Zhu Cuishan, Ni Chunhua. Distribution and composition of biomarkers in crude oils from different sags of Beibuwan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 646-652.
- [28] 包建平, 王铁冠, 周玉琦, 等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系 [J]. *江汉石油学院学报*, 1992, 14(4): 8-13.
- Bao Jianping, Wang Tieguan, Zhou Yuqi, et al. The relationship between methyl phenanthrene ratios and the evolution of organic matter [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1992, 14(4): 8-13.
- [29] 傅广, 曹成润, 陈章明. 泥岩涂抹系数及其在断层侧向封闭性研究中的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(6): 38-41.
- Fu Guang, Cao Chengrun, Chen Zhangming. Mudstone daubing coefficient and its application in studying the lateral sealing of faults [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(6): 38-41.