

文章编号:0253-9985(2012)03-0432-10

四川盆地东南缘志留系古油藏特征及其油气勘探意义

马文辛¹, 刘树根¹, 黄文明², 张长俊¹, 徐国盛¹, 袁海锋¹

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都, 610059;

2. 中国石油 川庆钻探工程有限公司 地质勘探开发研究院, 四川 成都, 610051)

摘要:为明确四川盆地周缘志留系碳酸盐岩油气成藏特征,通过地表地质和地下地质相结合,应用岩相学和有机地球化学手段,对四川盆地东南缘下志留统石牛栏组礁滩相沉积特征和古油藏进行了精确刻画和深入解剖,认识到石牛栏组由3个向上变浅的沉积旋回构成,其中第三个旋回在林滩场-良村-丁山构造一带发育有台地边缘生物礁滩相沉积,礁滩相储层内部沥青发育,为礁滩型岩性古油藏,但古油藏分布较零星、规模较小,恢复古油藏量约为 6.62×10^3 t。古油藏的油源主要来自于震旦系古油藏原油逸散跨层充注,但可能存在志留系烃源岩的生烃充注。古油藏的形成和破坏过程如下:震旦系古油藏遭受破坏,原油充注到石牛栏组,形成古油藏(晚三叠世—早侏罗世)—持续深埋,原油裂解,形成古气藏(中侏罗世—中白垩世)—褶皱及快速隆升作用,古气藏遭受破坏(80 Ma至现今)。川东南地区志留系油气勘探前景不容乐观,而川东-渝东地区将是志留系最为有利的勘探地区。

关键词:礁滩相;志留系;地球化学;古油藏;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics of Silurian Paleo-oil reservoirs and their significance for petroleum exploration on the southeast margin of Sichuan Basin

Ma Wenxin¹, Liu Shugen¹, Huang Wenming², Zhang Changjun¹, Xu Guosheng¹ and Yuan Haifeng¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: In order to understand the hydrocarbon accumulation characteristics of the Silurian carbonates on the southeast margin of Sichuan Basin, this paper studied reef-shoal facies sedimentary features and paleo-oil reservoirs in the Lower Silurian Shiniulan Formation based on the comprehensive field and laboratory research of petrography and geochemical analysis. The Lower Silurian Shiniulan Formation is composed of upward-shallowing three cyclic deposits, of which the third cyclic deposits are bioherm-shoal facies on platform margin occurring along Lintan-chang-Liangcun-Dingshan structures. The reservoirs of reef-shoal facies are rich in bitumen, indicating that they are lithologic paleo-oil reservoirs of shoal-reef type. These paleo-oil reservoirs are small in resource scale and scatter in regional distribution. Their resources are estimated to be about 6.62×10^3 t. The oil of the paleo-oil reservoir is mainly sourced from the Sinian paleo-oil reservoir, partly from the Silurian source rocks. The formation and destruction of the Shiniulan paleo-oil reservoir includes the following process: the Sinian oil reservoirs were destroyed and the escaping oil accumulated in the Shiniulan Formation to form the oil reservoir (Late Triassic to Early Jurassic). The oil of the oil reservoir was cracked to gas due to the long term deep burial, to lead to the gas reservoir (Middle Jurassic to Middle Cretaceous). Finally, the gas reservoir was destroyed by folding and quick uplifting (since 80 Ma). The exploration prospect in the Silurian in southeast Sichuan Basin is not as good as in the eastern

收稿日期: 2011-12-02; 修订日期: 2012-05-10。

第一作者简介: 马文辛(1982—), 女, 博士研究生, 石油地质学与储层地质学。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB214805)。

Sichuan-eastern Chongqing.

Key words: reef-shoal facies, Silurian, geochemistry, paleo-oil reservoir, Sichuan Basin

四川盆地不仅是中国典型的含油富气盆地,而且为一个多旋回构造-沉积型叠合盆地^[1-4]。受志留纪末期加里东运动影响,志留系在川中古隆起核部完全缺失,但斜坡区和凹陷区则广泛发育,厚度在川东南地区可达1 200 m^[5]。志留系的勘探主要集中在川东和川东南地区,其中以志留系为目的层的钻井有20口,虽然在广阔的川东南地区,众多井位在砂岩或泥岩段获得丰富的天然气显示^[6],但在勘探上至今未有重大突破,仅在太13井石牛栏组和韩家店组(共3个层段)获得日产气 $14.2 \times 10^4 \sim 15.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

地表调研揭示在盆地东南缘贵州遵义习水县良村镇吼滩剖面石牛栏组生物礁(丘)生屑灰岩中见有含量丰富的沥青,是四川盆地及边缘唯一被发现的一个小型的志留系古油藏。有学者认为该古油藏的烃源岩来自志留系本身^[7]。但笔者通过各种资料分析认为,该古油藏中沥青各种指标与志留系烃源岩差异较明显,而与下伏震旦系古油藏中沥青关系密切。储层沥青发育(古油藏)是中国南方海相碳酸盐岩油气藏所固有的特征(如

威远气田,普光气田),其不仅是优质的气源岩,而且对现今气藏的形成具有源控作用^[8-10]。

因此,本文旨在通过地表地质和井下地质相结合的方法,应用岩相学和有机地球化学手段对吼滩古油藏进行深入解剖,并最终从常规油气藏和非常规油气藏及四川盆地海相油气成藏的共性角度探讨川东南地区,乃至四川盆地志留系的油气勘探前景。

1 区域地质概况

在现今构造格局上,研究区位于四川盆地东南缘,是娄山关隔槽式褶皱带的前锋,总体表现为背斜宽缓,向斜紧闭的构造变形特征。主要发育有两组断裂体系,分别受北东向的桑木场断裂及南川-遵义断裂两组断裂控制(图1)。良村剖面位于桑木场背斜的西翼,丁山1井和林1井分别位于桑木场背斜的西翼的两个断背斜构造上(图2)。从白垩系明显卷入褶皱变形来看,研究区构造格架定型时间应为燕山期(褶皱造山),喜马拉雅期则主要表现为强烈隆升和对先期构造的加强。

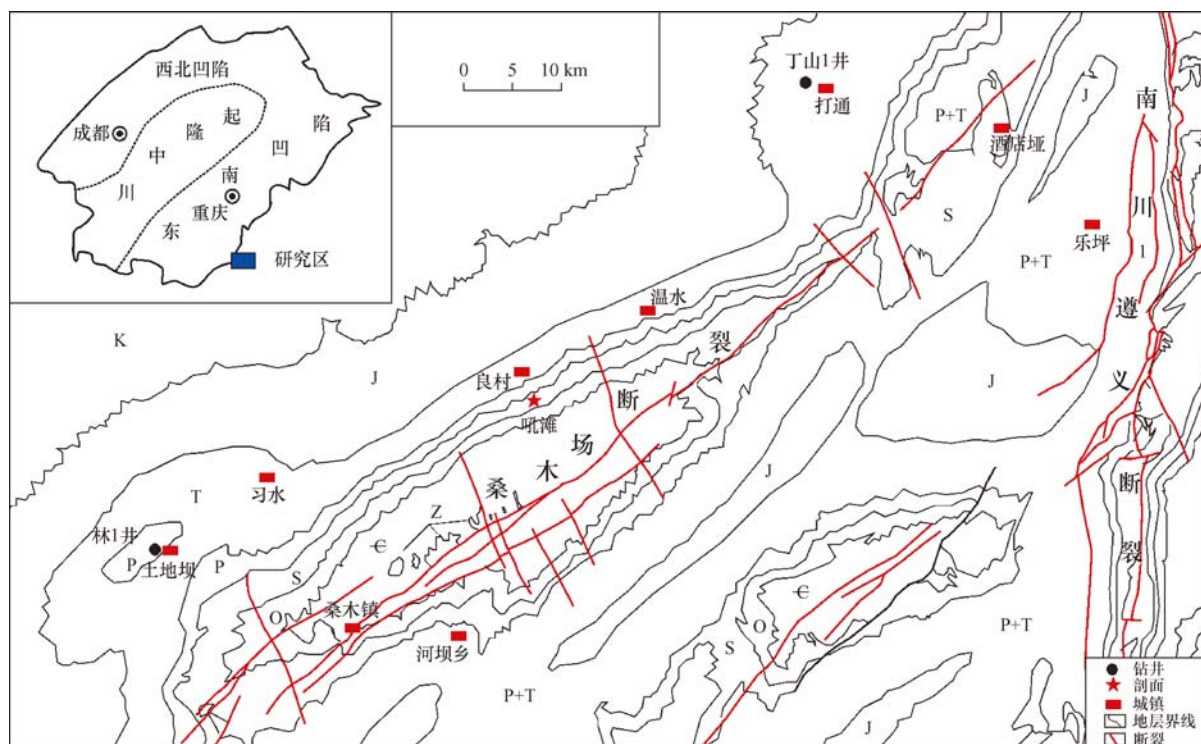


图1 研究区区域地质简图

Fig. 1 Sketch map showing regional geology of the study area

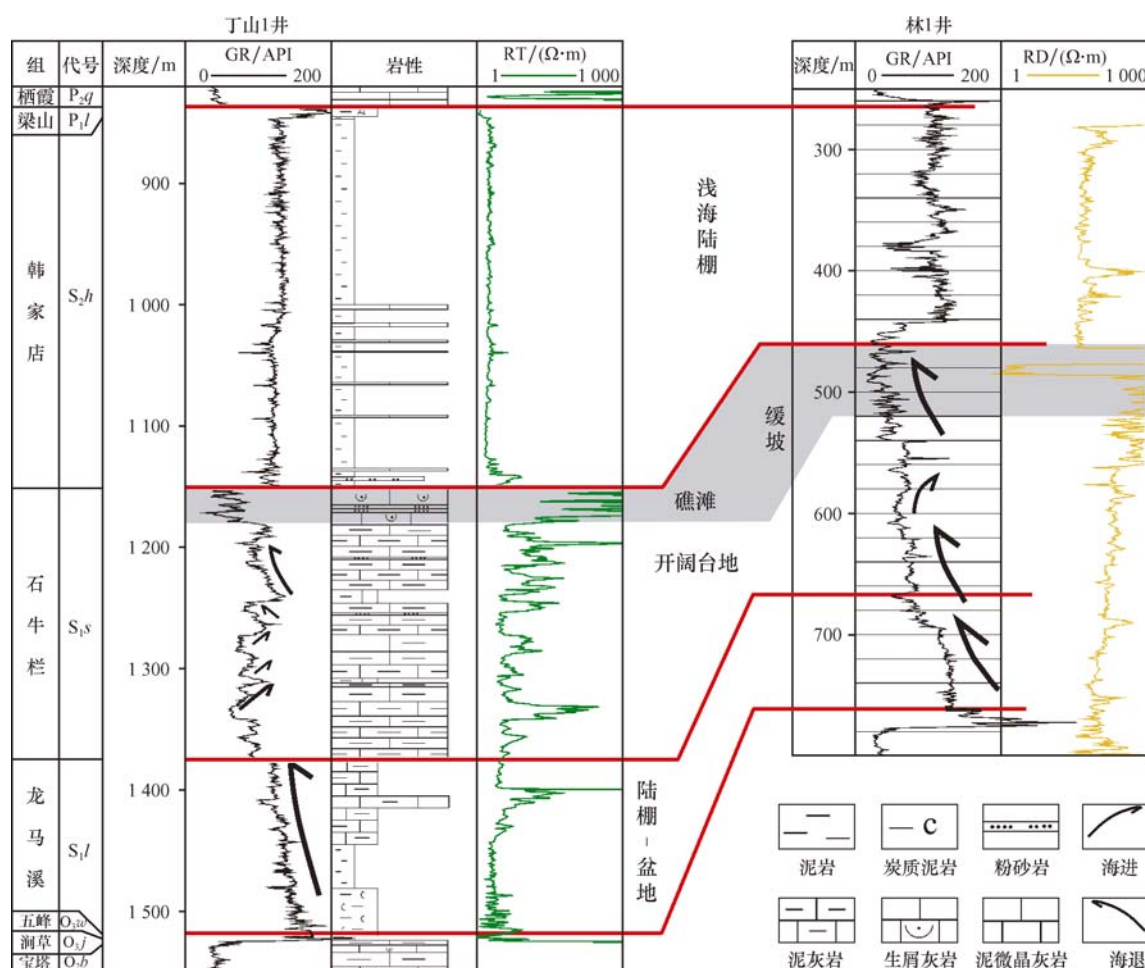


图2 四川盆地东南缘丁山1井-林1井志留系岩性柱状图

Fig. 2 Lithologic column of the Silurian in Dingshan 1 - Lin 1 wells on the southeast margin of Sichuan Basin

研究区志留系主要出露于桑木场背斜翼部,志留纪末期加里东运动导致志留系广泛遭到剥蚀,普遍被剥蚀至中下部,残存厚度一般在600~800 m(图2,图3)。志留系下部与上奥陶统五峰组呈整合接触,上部与二叠系呈平行不整合接触。志留系由下统龙马溪组、石牛栏组和中统韩家店组构成,其中龙马溪组下部的灰黑色泥岩是研究区优质的烃源岩。

石牛栏组在垂向上由3个沉积旋回组成:第一段总体表现为退积的沉积特征,岩性主要为灰色、灰黑色薄层状泥灰岩夹灰质泥岩,向上逐渐转变为中至薄层状灰质泥岩夹薄层泥灰岩,泥/灰比值介于3~7;第二段则表现为加积的沉积特征,由众多短周期的海进-海退沉积旋回组成,岩性主要表现为外陆棚薄板或薄层状灰质泥岩与泥灰岩(钙屑浊积岩)韵律层;第三段具有明显的海退特征,陆源沉积物减少,碳酸盐岩台地和浅滩沉积分

布广、厚度大,并且在林滩场-良村-丁山构造一带(丁山构造为缓坡沉积,处于台地边缘浅滩边缘)发育边缘生物礁(图2)。韩家店组总体上表现出进积-加积特征,岩性为浅海陆棚相灰绿色(砂质)页岩夹砂岩及风暴贝壳灰岩(图3)。

林1井、丁山1井及良村剖面志留系石牛栏组沉积相研究揭示(图2,图3),台地边缘礁滩相分布于林1井和良村吼滩等地,向东北方向至綦江打通(丁山1井处)已逐渐演变为缓坡沉积。台地边缘礁滩主要由浅滩相颗粒灰岩与礁相礁灰岩组成(图3)。

2 古油藏特征

2.1 古油藏规模

盆地及周缘钻达志留系的井众多,但仅在川东南外缘习水良村吼滩剖面石牛栏组礁滩生屑灰

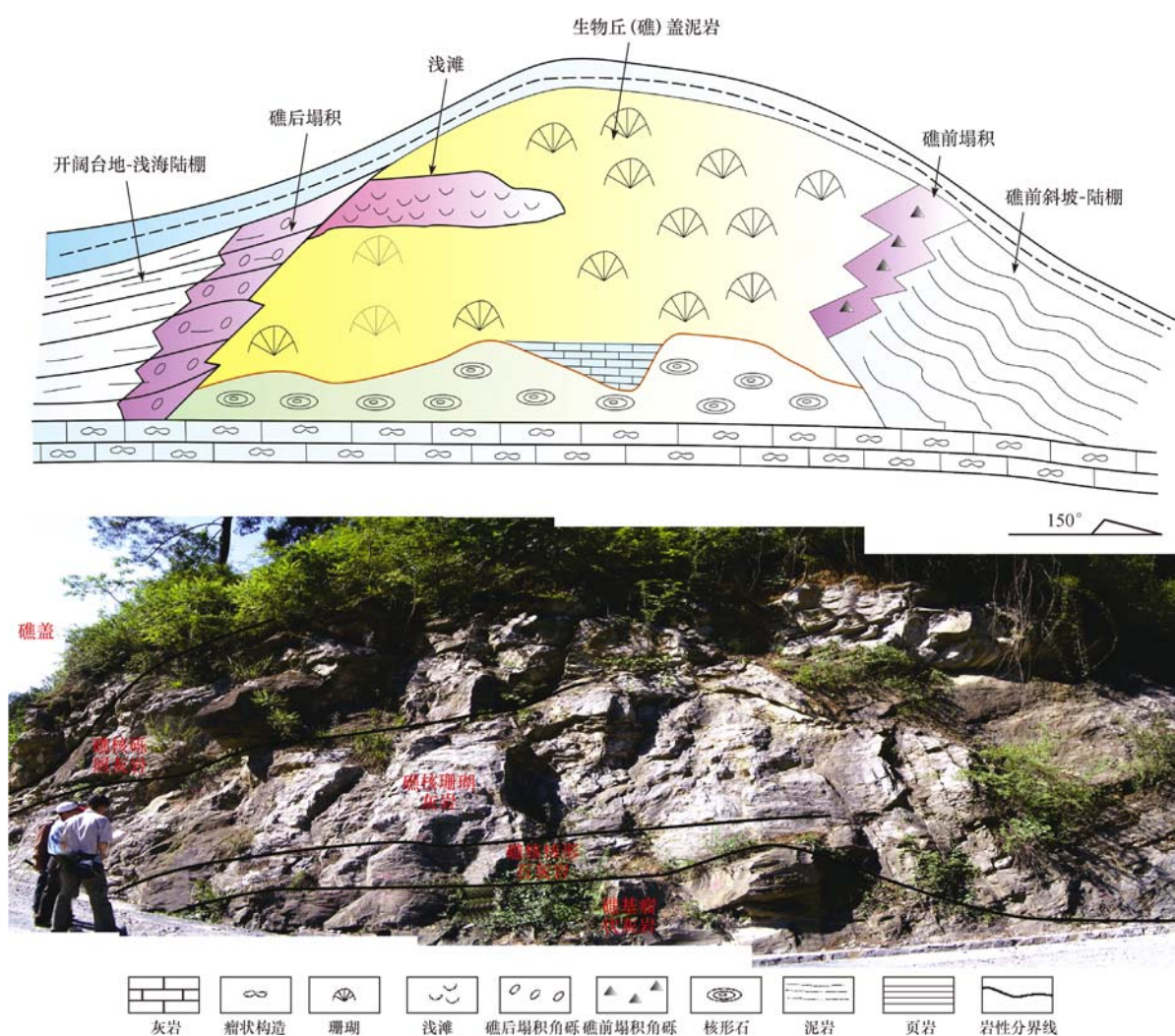


图3 四川盆地东南缘习水-良村下志留统石牛栏组生物礁(丘)剖面

Fig. 3 Xishui-Liangcun cross section showing bioherms in the Lower Silurian Shiniulan Formation on southeast margin of Sichuan Basin

岩中发现有沥青。上述礁滩相 18.79 m 厚的亮晶生物砾屑灰岩中沥青含量为 3%~20% 不等, 沥青主要赋存在生屑粒间孔、生物边缘及缝合线和裂隙中。如在海百合砾屑灰岩中, 沥青含量高达 20% (图 4)。

地表油苗追踪揭示, 沥青质灰岩纵向累积厚 8.74 m, 横向 100 m 左右范围均可追及。灰岩中沥青平均含量约为 10%, 因此, 将该点礁作为球形规则物体的一部分, 而底面弦长为 50 m, 高为 8.74 m 的一个弓形体。通过计算, 该志留系古油藏体积 (V_B) 为 $3.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。沥青含量可通过下面公式计算:

$$Q_B = V_B \times \rho \times \Phi, \quad (1)$$

式中: V_B 为古油藏体积, m^3 ;

ρ 为沥青密度, t/m^3 ;

Q_B 为古油藏中沥青含量, t ;

Φ 为含有沥青的孔隙度, %。

根据公式(1), 计算得沥青含量为 $3.66 \times 10^3 \text{ t}$, 则古油藏量 (Q_o) 约为 $6.62 \times 10^3 \text{ t}$ 。

2.2 油源对比

2.2.1 源岩与储层沥青饱和烃色谱特征

寒武系和志留系均是研究区重要的烃源岩, 同时, 在下伏震旦系存有规模巨大的古油藏^[9-11]。因此, 为了明确石牛栏组古油藏的油源, 本次研究系统采集川东南地区习水良村剖面石牛栏组海百合砾屑粒间孔中的沥青, 以及周缘寒武系牛蹄塘组和志留系龙马溪组泥岩与震旦系灯影组储层晶间沥青作烷烃色谱和色谱-质谱分析(图 5, 图 6; 表 1)。



图4 四川盆地东南缘习水-良村剖面石牛栏组古油藏照片

Fig. 4 Photo of the paleo-oil reservoir on Xishui-Liangcun outcrop on southeast margin of Sichuan Basin

(a. 海百合砾屑滩, 内部沥青含量高; b. 为a局部区域放大, 黄色箭头为乳白色的海百合砾屑, 红色箭头为黑色沥青; c. 为a处样品的显微镜下照片)

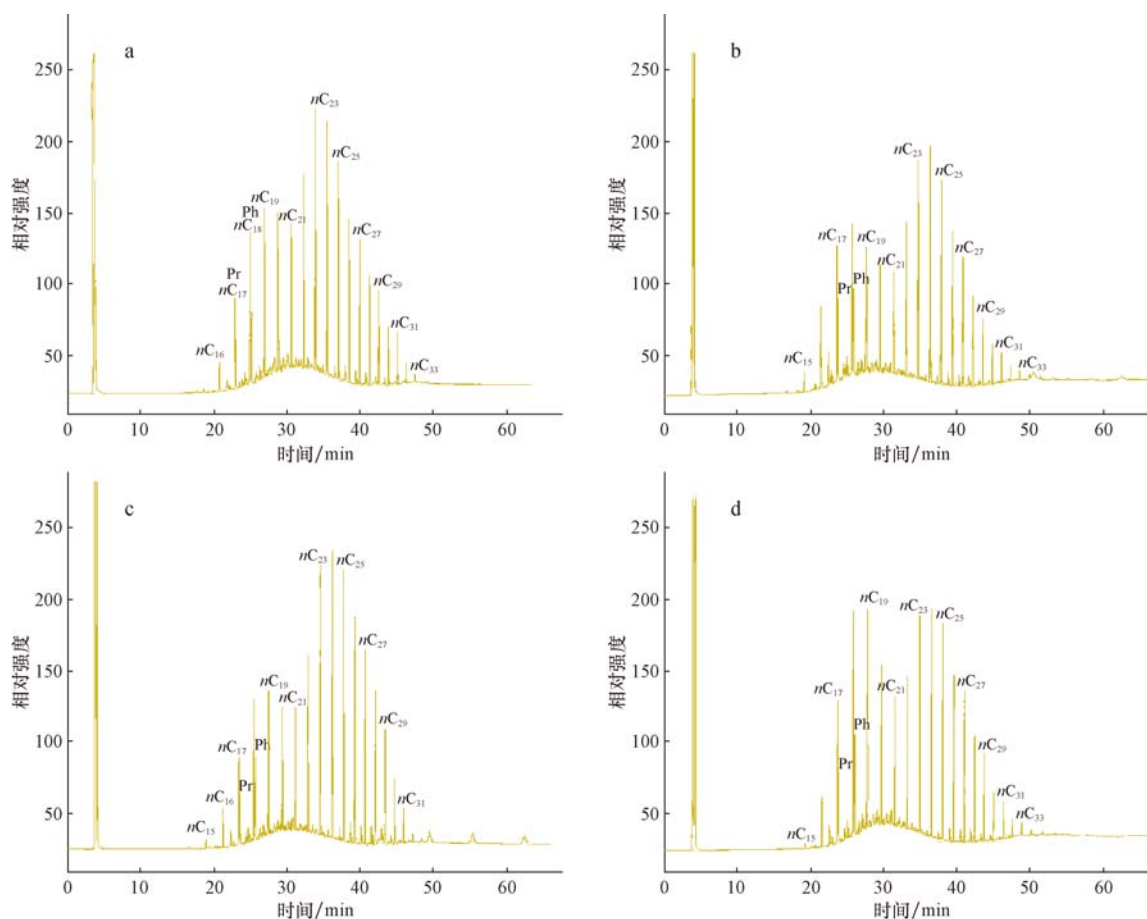


图5 四川盆地东南缘志留系石牛栏组沥青与震旦系-下古生界烃源岩饱和烃色谱比较

Fig. 5 Correlation of saturated hydrocarbon chromatogram between bitumen in Shiniulan

Formation and source rocks in Sinian-Plaeozoic on southeast margin of Sichuan Basin

a. 习水良村剖面, LC12-4, 石牛栏组(S_1s); b. 韩家店-观音桥剖面, HG5, 龙马溪组(S_1l); c. 桑木场剖面, SM5, 震旦系灯影组(Z_2dn); d. 桑木场剖面, SM1-2, 牛蹄塘组(C_1n)

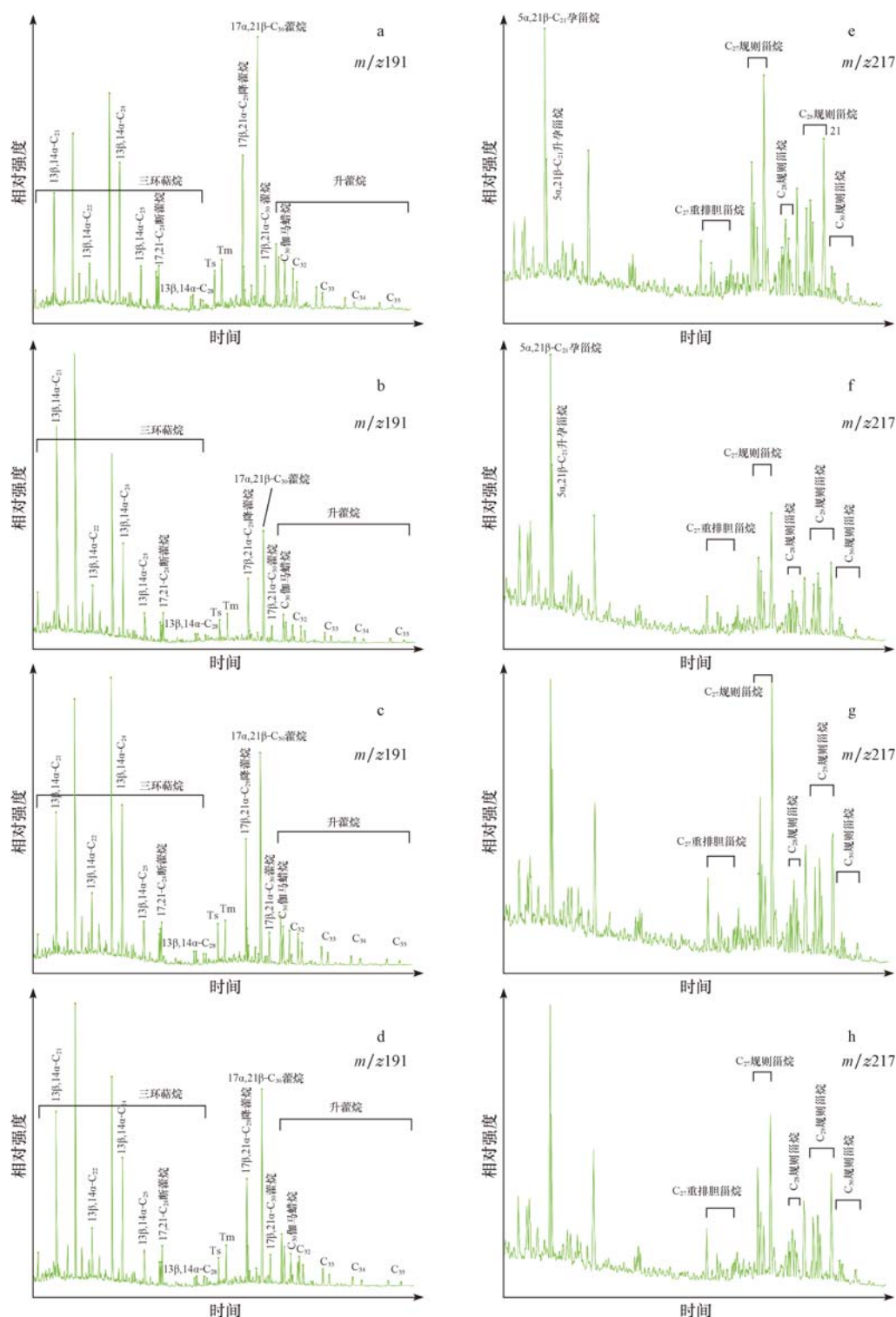


图6 四川盆地东南缘桑木场-观音桥-良村剖面露头泥岩、储层沥青样品萘烷($m/z191$)及甾烷($m/z217$)质谱对比

Fig. 6 Correlation of terpane and sterane mass chromatogram between shales and reservoir bitumen from the outcropsof Sangmuchang-Guanyinqiao-Liangcun cross section on southeast margin of Sichuan Basin

a. 习水良村剖面, LC12-4, 石牛栏组(S_1s); b. 韩家店-观音桥剖面, HG5, 龙马溪组(S_1l); c. 桑木场剖面, SM5, 灯影组(Z_2dn); d. 桑木场剖面, SM1-2, 牛蹄塘组(ϵ_1n); e. 习水良村剖面, LC12-4, 石牛栏组(S_1s); f. 韩家店-观音桥剖面, HG5, 龙马溪组(S_1l); g. 桑木场剖面, SM5, 灯影组(Z_2dn); h. 桑木场剖面, SM1-2, 牛蹄塘组(ϵ_1n).

表1 桑木场-观音桥-良村剖面源岩与储层沥青饱和烃气相色谱特征

Table 1 Gas chromatographic characteristics of saturated hydrocarbon of source rocks and reservoir bitumen from the Sangmuchang-Guanyinqiao-Liancun cross section

样号	描述	主峰碳	前主峰碳	后主峰碳	碳数分布	OEP	CPI	$(C_{21} + C_{22}) / (C_{28} + C_{29})$	C_{21} / C_{21}^+	Pr/ nC_{17}	Ph/ nC_{18}	Pr/Ph
SM1-2	牛蹄塘组泥岩	24	19	24	15~33	1.02	1.14	1.37	0.58	0.58	0.56	0.66
SM5	灯影组白云岩中的沥青	24	19	24	15~32	1.01	1.10	1.04	0.34	0.67	0.72	0.55
HG5	龙马溪组泥岩	24	18	24	14~37	1.01	1.14	1.51	0.49	0.71	0.70	0.91
LC12-4	石牛栏组生屑粒间的沥青	23	19	23	15~33	1.00	1.13	1.58	0.44	0.48	0.56	0.52

注:样品编号 SM 为桑木场;HG 为观音桥;LC 为良村。

龙马溪组、牛蹄塘组泥岩和石牛栏组、灯影组储层沥青的正构烷烃分布均具双峰态征,部分样品以后碳占优势(图5)。志留系沥青具有完整的正构烷烃结构,表明其未遭受生物降解,则志留系石牛栏组古油藏中储层沥青为热裂解成因。

通过对比上述两套烃源岩和两套储层沥青的 OEP、CPI 和 Pr/Ph 等分布特征,可得出如下结论:①石牛栏组储层沥青与震旦系储层沥青分布更为接近;②所有样品的 OEP 和 CPI 都比较接近,无明显的奇偶优势,均反应了样品成熟度较高的特点;③由于受到沉积环境和成熟度的影响,志留系泥岩样品的 Pr/ nC_{17} 、Ph/ nC_{18} 和 Pr/Ph 均高于寒武系泥岩样品及震旦系沥青,但志留系储层沥青样品的值与震旦系储层沥青相近。

所有样品的前碳和后碳比 $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ 比值介于 0.34~0.58,这表明烃源岩具有明显的海相有机质起源^[20],而且志留系储层沥青与志留系泥岩两者差异明显,其更接近于寒武系泥岩和震旦系储层沥青。Pr(nC_{17})/Ph(nC_{18}) 比率是最普遍应用的有机地化参数之一,由于其受热成熟度和输入物影响低,常被用来作为沉积环境指示剂^[12]。Ten Haven 等^[13] 研究指出,高 Pr(nC_{17})/Ph(nC_{18}) 比值(大于 3.0)指示氧化条件下的陆源输入,低 Pr(nC_{17})/Pr(nC_{18}) 比值(小于 0.8)指示还原条件或高盐度或碳酸盐岩沉积环境。研究区所有样品的 Pr/Ph 比值介于 0.52~0.91,表明烃源岩沉积环境为有一定含盐度的闭塞还原环境。但石牛栏组储层沥青 Pr/Ph 比值为 0.52,与灯影组储层沥青非常接近(0.55),而有别于寒武系和志留系泥岩。

2.2.2 源岩与储层沥青萜烷、甾烷生标特征

$m/z191$ 质量色谱图上检测的萜类化合物中,

所有样品中以三环萜烷占优势,其中石牛栏组和灯影组储层沥青三环萜烷均以 C_{23} 为最高峰,而志留系和寒武系泥岩则以 C_{21} 为最高峰(图6)。泥岩和储层沥青样品藿烷碳数分布范围为 C_{27} — C_{35} ,缺失 C_{28} 藿烷。 T_s 小于 T_m , C_{31} — C_{35} 藿烷含量 22S 高于 22R,且呈阶梯式逐步减低,所有烃源岩和储层沥青样品值均相近。样品的 T_s/T_m 变化范围在 0.73~0.90,石牛栏组沥青样与震旦系沥青样和志留系泥岩样较为接近,分别为 0.73、0.83 和 0.76。高 T_s/T_m 表明石牛栏组沥青不是来自于碳酸盐岩烃源岩^[14]。

$m/z217$ 质量色谱图上检测出的甾类化合物主要有规则甾烷、重排甾烷及少量孕甾烷。规则甾烷 C_{27} — C_{28} — C_{29} 均呈不规则“V”型分布,表现为 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$,石牛栏组储层沥青样甾烷分布与震旦系储层沥青最相似(图6)。目前研究一般认为, C_{27} 甾烷来自水生生物, C_{28} 甾烷为海洋藻类繁盛的标志, C_{29} 甾烷指示高等植物的输入^[11,15]。可见,上述特征表明了以低等生物或藻类输入为特征的源岩性质。伽马蜡烷与增加盐度沉积环境具有相关性,包括海相和湖相^[14,16]。所有露头样品中含有一定量的伽马蜡烷,伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/(伽马蜡烷 + C_{30} 藿烷))在 0.16~0.18。可见,上述特征揭示了源岩沉积环境是具有一定盐度的还原环境。

综上,石牛栏组储层沥青为原油热裂解产物,由于储层沥青和源岩已进入高成熟-过成熟阶段,源岩与储层沥青的萜烷、甾烷生标特征大多已失效。但结合各类主要对比参数,石牛栏组储层沥青与震旦系储层沥青更具亲源关系。

2.3 古油藏形成与破坏过程

参考区域地层厚度数据及实测的 R_o (镜质体反射率)值约束,应用于酪根热解动力学方程

(EASY% R_o 模型)和磷灰石裂变径迹技术(二叠系龙潭组)对良村吼滩剖面埋藏史及热史进行恢复(图7)。由此可知,研究区志留系烃源岩在二叠纪为生油期,侏罗纪-中晚白垩世为湿气期。通过对比下寒武统烃源岩的生烃演化史,当志留系烃源岩开始成熟时,寒武系烃源岩生油基本结束,两者在生油时间上不重合。

有学者在石牛栏组生屑灰岩储层中发现有与沥青伴生的盐水包裹体,其均一温度为88.6~116.1℃,平均为97.2℃^[7]。因此,该包裹体温度揭示出在石牛栏组古油藏原油充注时,石牛栏组平均地层温度为97.2℃,其时期为晚三叠世-早侏罗世(图7)。因此,志留系古油藏的形成和破坏过程如下:晚三叠世-早侏罗世,由于受峨眉地裂运动(D_2-T_2)和印支运动的影响,导致了震旦系古油藏的完全破坏或局部破坏,部分液态烃类突破封堵运移至志留系礁滩相岩性圈闭中成藏;随后,由于构造沉降,志留系持续深埋,温度和压力增高;中侏罗世-中白垩世,古油藏温度达到石油裂解温度,古油藏向古气藏转变,而随之而来的一系列压力场和温度场改变导致古气藏保存条件变弱。同时,在随后的晚白垩世以来的燕山期-喜

马拉雅期的强烈的褶皱隆升作用最终导致志留系古气藏遭受完全破坏。

3 油气勘探意义

研究表明,林1井-良材剖面石牛栏组沉积环境为台地边缘浅滩,而丁山1井则为台缘缓坡-斜坡。据区域沉积相研究揭示,自研究区向北(盆地方向)石牛栏组逐渐由碳酸盐岩台地向浅水混积陆棚沉积环境演化,在泸州一带阳高寺构造发育砂质浅滩沉积。但据钻井测试资料,在阳高寺构造志留系勘探并未获得有效突破,仅见有较多的气侵和井涌,并且层位多分布在韩家店组和龙马溪组(占72%),而非石牛栏组(仅占28%);并且在川东南所钻的18口井中,仅在太13井获商业性气流(裂缝和孔隙型粉砂岩储层)^[3]。上述志留系钻井显示特征在一定程度揭示志留系在川东南地区不具备发育大规模常规气藏的潜力,而可能存在潜力巨大的致密砂岩气或页岩气勘探潜力。

而在川东-渝东地区志留系主要为一套陆棚-潮坪相沉积,发育有粉-细砂岩储层,微孔隙十分发育,并且与之相邻的湘鄂西是志留系龙马

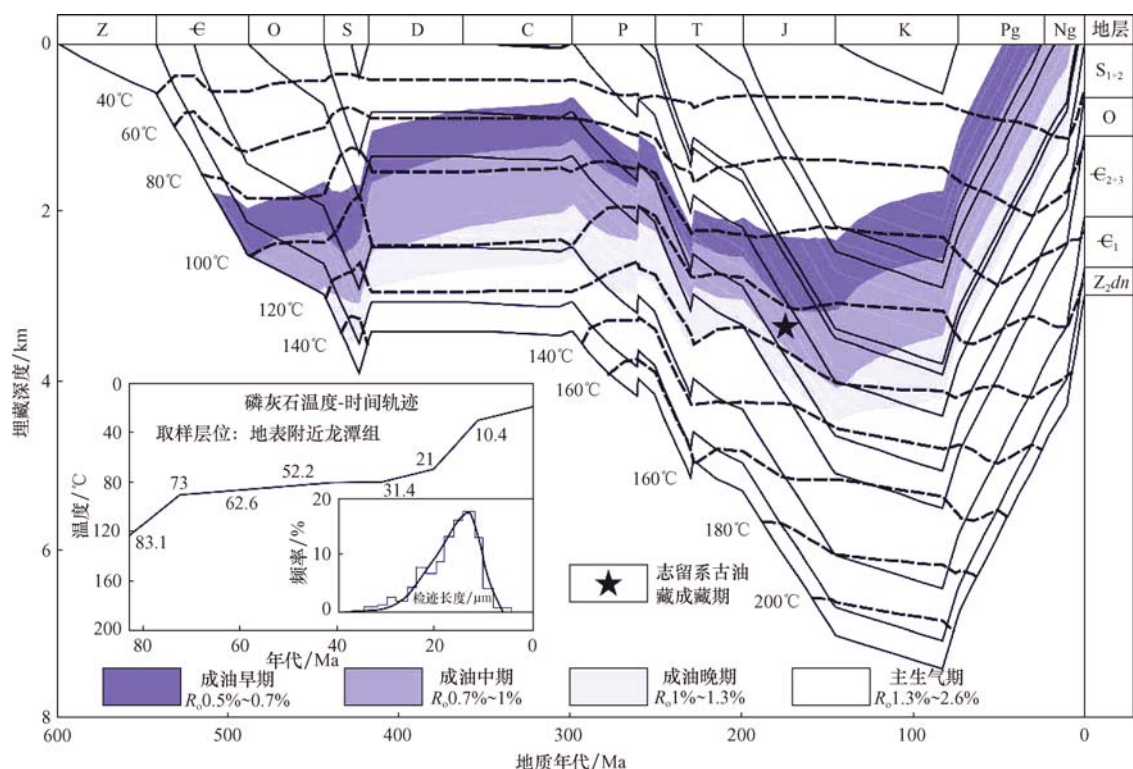


图7 四川盆地东南缘良村剖面埋藏史及烃源岩生烃演化史

Fig. 7 Burial and hydrocarbon generation evolution history of resource rocks in Houtan profile, margin of southeast Sichuan basin

溪组烃源岩最为有利的生烃中心^[17-18],因此,在川东-渝东地区小河坝组较致密^[19],具备形成自生自储的构造-岩性气藏,而且完全有条件像川西须家河组一样,形成致密砂岩气藏。例如,五科1井小河坝组砂岩中获气 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

但是,通过本次研究揭示在川东南地区局部见有点礁型古油藏,虽然其规模相对较小,但油气来源于下伏数千米深的震旦系,这是志留系存在古油藏和油气存在跨层运移的证据,具有重要的学术价值。由此可见,志留系是下古生界最为重要的一套区域性盖层。此外,志留系是一套区域性的盖层和构造滑脱层,其对下伏的与寒武系烃源岩相关的古油藏气具有一定的封盖作用。因此,川东地区强烈的褶皱隆升运动可导致震旦系-奥陶系部分天然气(藏)遭受破坏,天然气向上运移致志留系内部形成次生气藏。

综上所述,川东南地区志留系油气勘探成效相对较差,可能与川南地区相对较差的烃源岩(生烃中心面积太小)和缺乏优质储层相关。据油气成藏规律推断,川东-渝东地区将是志留系最为有利的勘探地区。

4 结论

1) 志留系沉积亚相演化序列为:浅海深水盆地—浅海陆棚—缓坡—开阔台地—台地边缘—浅海陆棚。石牛栏组由3个向上变浅的沉积旋回构造组成,第三个旋回在林滩场-良村-丁山构造一带发育有台地边缘生物礁相沉积。

2) 吼滩古油藏是四川盆地及边缘唯一已知的一处志留系古油藏,呈圆丘型零星分布、规模较小,通过恢复古油藏量约为 $6.62 \times 10^3 \text{ t}$ 。古油藏油源关系复杂,生物标志化合物特征揭示其油源主要来自于震旦系古油藏,但存在志留系烃源充注的可能。吼滩古油藏的形成和破坏过程如下:震旦系古油藏遭受破坏,原油充注到石牛栏组,形成古油藏(晚三叠世—早侏罗世)—持续深埋,原油裂解,形成古气藏(中侏罗世—中白垩世)—褶皱及快速隆升作用,古气藏遭受破坏(80 Ma至现今)。

3) 印支-燕山运动导致四川盆地东南缘震旦系古油藏发生调整,油气存在跨层运移,在志留系优质储集层段形成次生古油藏,若在后期油藏裂

解成气藏过程中保存条件较好,则可以形成规模不等的气藏。

4) 总体上,由于川东南地区储层致密、烃源岩条件有限,志留系油气勘探前景不容乐观;而川东-渝东地区则具备规模巨大的致密砂岩气和页岩气天然气勘探潜力,将是志留系最为有利的勘探地区。

参 考 文 献

- [1] 郭正吾,邓康龄,韩永辉. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社,1996:113-136.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui. The formation and evolution of Sichuan basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:113-136.
- [2] 黄文明,刘树根,马文辛,等. 四川盆地奥陶系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质,2011,31(3):461-473.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Petroleum exploration potential of the Ordovician in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3):461-473.
- [3] 黄文明,刘树根,张长俊,等. 四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理[J]. 石油与天然气地质,2009,29(5):566-575.
Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoir in Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 29(5):566-575.
- [4] 刘全有,金之钧,高波,等. 四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):10-18.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1):10-18.
- [5] 童崇光. 四川盆地断褶构造形成机制[J]. 天然气工业,1992,12(5):2-7.
Tong Chongguang. Mechanism of formation fault-folded structure in Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 1992, 12(5):2-7.
- [6] 何发岐,朱彤. 陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地侏罗统为例[J]. 石油实验地质,2012,34(3):246-251.
He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3):246-251.
- [7] 李双建,周雁,肖开华,等. 四川盆地东南缘水吼滩志留系古油藏特征[J]. 石油学报,2009,30(6):849-856.
Li Shuangjian, Zhou Yan, Xiao Kaihua, et al. Characteristics of Silurian destroyed oil reservoir in Houtan section of Xishui area in southeastern margin of Sichuan basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6):849-856.

- [8] Hao Fang, Guo Tonglou, Zhu Yangming, et al. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 611–637.
- [9] 马文辛, 刘树根, 黄文明. 古油藏及其对天然气藏的控制作用研究进展 [J]. 地质科技情报, 2010, 29(4): 89–99.
Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Progresses on primary study of the paleo oil reservoirs and its control on natural gas accumulation [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(4): 89–99.
- [10] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 四川盆地震旦系–下古生界古油藏特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 638–645.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Primary study on characteristics of paleo-oil reservoirs of Sinian system- Lower Paleozoic in Sichuan basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(6): 638–645.
- [11] 徐国盛, 袁海峰, 马永生, 等. 川中–川东南地区震旦系–下古生界沥青来源及成烃演化 [J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1143–1152.
Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng, et al. The Source of Sinian and Lower Paleozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the Middle and Southeast of the Sichuan basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1143–1152.
- [12] Peters K E, Walters C C, Moldowan J N. The biomarker guide 2nd edition [M]. New York: Cambridge university press, 2005.
- [13] Ten Haven H L, De Leeuw J W, Rulkötter J, et al. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator [J]. Nature, 1987, 330: 641–642.
- [14] Walples D W, Machihara T. Biomarkers for geologists American association of petroleum geologists methods in exploration series [J]. 1991, 9: 91.
- [15] 叶泰然, 唐建明, 文雪康, 等. 三维三分量地震资料在川西深层致密砂岩气藏预测中的应用 [J]. 石油物探, 2011, 50(6): 558–564.
Ye Tairan, Tang Jianming, Wen Xuekang, et al. Application of 3D3C seismic data for predicting deep tight gas reservoir in Western Sichuan Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(6): 558–564.
- [16] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker Guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. Englewood cliffs, NJ: Prentice hall, 1993: 363.
- [17] 刘树根, 马文辛, Luba, 等. 四川盆地东缘志留系龙马溪组储层特征 [J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239–2252.
Liu Shugen, Ma Wenxin, Luba, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the lower Silurian Longmaxi formation, east Sichuan basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239–2252.
- [18] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 川东南–鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景 [J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 364–371.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei-eastern Chongqing areas, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 364–371.
- [19] 王勇, 施泽进, 刘亚伟, 等. 鄂西渝东地区石柱复向斜志留系小河坝组致密砂岩成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 75–82.
Wang Yong, Shi Zejin, Liu Yawei, et al. Diagenesis of tight sandstone in the Silurian Xiaoheba Formation of the Shizhu Synclinalium, western Hubei eastern Chongqing Area [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 75–82.

(编辑 张亚雄)

“海洋石油 981”平台南海首钻成功

2012年5月9日在距离香港东南约320公里处,由中国自主设计、建造的深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”号开始首钻成功。“海洋石油 981”的这一钻使得中国海洋石油勘探开发的能力从300 m水深挺进到3 000 m深海,标志着中国海洋石油深海战略拉开序幕,对于维护中国能源安全具有重大战略意义。该平台的成功建造,不仅填补了我国在深水钻井特大型装备项目上的空白,而且对于加速我国进军世界级海洋工程装备开发、设计和制造领域,提升我国深水作业能力,具有重要的战略意义。