

文章编号: 1001-6112(2007)06-0604-05

龙门山北段山前带侏罗系油砂岩成因研究

戴鸿鸣¹, 刘文龙¹, 杨跃明², 李跃纲², 段勇²

(1. 西南石油大学, 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川江油 621700)

摘要: 龙门山北段山前带处于推覆体构造带的断层隐伏前锋构造带, 已发现中坝、河湾场气田和较多油气显示。野外调查和钻井发现侏罗系油浸砂岩广泛存在, 认为油砂岩中原油是寒武系泥质烃源岩在生油高峰期生成的原油经历了不同程度的生物降解和长距离的运移后, 在多期构造幕作用下, 多次充注、运移、再分配的产物。主要依据为: 油砂岩正构烷烃和支链烷烃均已消失, 遭受强烈生物降解; 芳烃碳同位素相近, 为 $-34.41\% \sim -35.03\%$; 裂解产物轻烃正构烷烃相对支链烷烃占优势, 属海相 I—II₁ 干酪根生成产物; 生物标志化合物分布特征与寒武系黑色泥岩相似; 甲基菲指数折算的成熟度为 $0.82\% \sim 1.25\%$ 。

关键词: 油气地球化学; 油砂岩; 侏罗系; 龙门山北段; 四川盆地

中图分类号: TEL122.1

文献标识码: A

THE ORIGIN OF JURASSIC OIL-SOAKED SANDSTONE IN THE PIEDMONT ZONE OF NORTH LONGMENSAN, THE SICHUAN BASIN

Dai Hongming¹, Liu Wenlong¹, Yang Yueming², Li Yuegang², Duan Yong²

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Northwest Sichuan Gas Field Mine, Southwest Oil and Gas Field Brand, PetroChina, Jiangyou, Sichuan 621700, China)

Abstract: The piedmont zone of the North Longmenshan is located at the fault front structural zone of buried faults of the nappe structural belt. Zhongba and Hewangchang Gasfields and more hydrocarbon show are discovered. The Jurassic oil-soaked sandstone is discovered to be wide distribution by field survey and well drilling. It believes that the crude oil of oil-soaked sandstone is the product which generates in the oil generation peak of Cambrian muddy source rock. It is the production by more time charging, movement and redistribution, which is after the varying degrees biodegradation and long distance movement, and under the polytectonic movement. The main criterions are following. First, the normal alkane and branched paraffin of oil-soaked sandstone disappear by strong biodegradation. Second, the carbon isotope of aromatic hydrocarbon is closed. It is $-34.41\% \sim -35.03\%$. Light hydrocarbon normal alkane in the hydrolytic product is predominantly to compare with hydrocarbon branched paraffin. It belongs to the product of marine I—II₁ type kerogen. Third, the pattern of biomarker is similar to Cambrian dark claystone. At last, the maturity which is converted by methylphenanthrene index is $0.82\% \sim 1.25\%$.

Key words: hydrocarbon geochemistry; oil-soaked sandstone; Jurassic; the North Longmenshan; the Sichuan Basin

龙门山推覆构造带位于松潘—甘孜褶皱带与扬子准地台的接合部位, 是青藏高原与四川盆地的分界带, 具有“南北分段, 东西分带”的特点; 从北到南依次分为“北段、中段、南段”3 块, 北段是指安县、北川和广元、青川县之间的龙门山区; 从西向东依次划分为后山带、前山带和山前带。山前带位于

马角坝断裂带与江油—广元潜伏断裂带之间, 属推覆体构造带的断层隐伏前锋构造带, 油气苗极为丰富^[1~3]。据不完全统计, 共有油气苗及沥青 260 多处, 纵向上自震旦系至侏罗系均有分布^[4,5]; 横向上分布在碾子坝、矿山梁、天井山等背斜构造及重华、倒流河、大梁山、永平、青林口、双鱼石、厚坝、中

收稿日期: 2006-11-01; 修订日期: 2007-10-23。

作者简介: 戴鸿鸣(1963—), 男(汉族), 重庆长寿人, 副教授, 从事油气地质和油气地球化学的研究和教学工作。

基金项目: 四川省高校重点实验室项目(2006ZD044)。

坝等构造上,其中以碾子坝—矿山梁—天井山一带的志留系沥青脉和厚坝侏罗系沙溪庙组油砂岩最为著名。1950—1960年代在江油海棠铺构造所钻探井,至今井口仍有侏罗系沙溪庙组所产少量原油。该区侏罗系主要为紫红色泥岩夹砂岩沉积^[6,7],有机碳含量很低,不可能成为有效的烃源岩。这些原油有何特征?其成因是什么?又是怎样保存下来?这些问题的解决,无疑对了解龙门山北段油气生成、运移和聚集成藏和油气勘探都具有重要意义。

1 油砂岩的地球化学特征

1.1 饱和烃色谱特征

龙门山北段厚坝、海棠铺、马角坝等地面的侏罗系油砂岩以及鱼双鱼石(鱼1井)和青林口(青林1井)构造埋深达3 000 m以上的油浸砂岩中原油,其饱和烃色谱图均呈驼峰型,绝大部分正构烷烃和支链烷烃均已消失,表明遭受过较强的生物降解。大量研究证实,烃类遭受微生物降解有如下先后顺序:正构烷烃、支链烷烃、异戊间二烯类化合物、环烷烃、芳香烃和多环芳香烃。原油的生物降解主要发生在地面或地下圈闭已遭受破坏、原油与大气淡水直接沟通并有强烈水交换的情况下。

1.2 原油族组成碳同位素特征

侏罗系油砂岩中原油族组分的碳同位素都较轻,且有明显的倒转现象(表1),这是由于生物降解作用的影响所致。Stahl^[8]的一系列实验证实,生物降解原油与同源的常规原油相比,各族组分的碳同位素组成会发生分馏,表现在:1)饱和烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋于偏正;2)芳香烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值几乎不发生变化;3)杂环化合物和沥青质往往趋于富集 ^{12}C 。

对生物降解原油可根据芳香烃碳同位素进行群组划分。侏罗系油砂岩中原油饱和烃、芳香烃碳同位素明显比二叠系灰岩氯仿沥青“A”的碳同位素轻,根据油气生成过程中碳同位素分馏原理和米仓山南缘不同层系干酪根碳同位素的研究结果,结合区内烃源岩发育情况,推测原油来源于志留系及其以下的海相地层。

1.3 油砂岩裂解轻烃特征

油砂岩中原油遭受生物降解严重,轻烃已损失,采用裂解方法分析其轻烃特征。根据裂解产物 C_4 — C_7 轻烃分析(表2),原油属海相成因,主要依据:在 C_4 — C_7 轻烃族组成中,代表海相特征的链烷烃较高,且正构烷相对烃支链烷烃占优势,与邻区具自生自储、环烷烃优势特征的须二段凝析油存在明显差别。Leythaeuser等^[9]观察到陆源有机质生成的烃富含苯和甲苯,链烃较贫乏,且支链烷烃相对正构烷烃占优势;在 C_7 轻烃化合物组成中,反映高等植物木质素和纤维素的甲基环己烷较低,而主要反映藻类和细菌生油的正庚烷含量较高。用戴金星等^[10] C_7 轻烃系统三角图版,判识这些轻烃属海相I—II₁干酪根生成产物。凝析油和原油的庚烷值和异庚烷值主要受母质来源和成熟度的影响^[11,12],油砂岩裂解产物具有海相成熟腐泥母质来源特征。

1.4 生物标志化合物特征

受生物降解的影响,油砂岩中原油生物标志化合物分布失去本来面目。干酪根与沥青质具有相似结构特征和物理化学性质,差别是干酪根分子量更大^[12],沥青质裂解产物的生物标志化合物特征能有效地反映生物降解原油成因。油砂岩裂解物的Pr/Ph低,为0.31~0.93,表征烃源岩沉积时期

表1 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩与飞仙关组碳酸盐岩晶洞中原油族组分碳同位素组成表

Table 1 Carbon isotopic composition of Jurassic oil sandstone and the crude in the Feixianguan Fm carbonate rock, the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan Basin

井号或取样地点	产状	层位	岩性	碳同位素,‰			
				饱和烃	芳香烃	沥青质	干酪根
厚坝桥头	地面露头	J ₂ s	油浸砂岩	-35.83	-34.41	-35.37	
青林1井	1 508 m	J ₂ s	油浸砂岩	-36.23	-34.89	-35.79	
二郎庙雷家河村猫儿梁	地面露头	J ₁ q	油浸砂岩	-34.86	-34.82	-35.00	
重华镇双柏村六组	地面露头	J ₁ b	油浸砂岩	-34.80	-35.04	-35.30	
扁1井	井下	P ₂ ch	灰黑色灰岩	-31.38	-30.62	-29.87	-28.57
矿2井	井下	P ₁ m	灰黑色灰岩	-31.16	-30.51	-29.92	-29.82
矿2井	井下	P ₁ q	灰黑色灰岩	-31.28	-30.23	-29.64	-29.91
河深1井	井下	S ₁ l	黑色泥岩				-30.23
南江沙滩	地面露头	E ₁ q	黑色泥岩				-33.06

表 2 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩轻烃地球化学参数

Table 2 Light hydrocarbon parameters of Jurassic oil sandstone in the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan Basin

剖面或井号	样品性质	层位	C ₄ —C ₇ 族组成, %				烷基化指标		芳构化指标	
			正构烷烃	支链烷烃	环烷烃	芳烃	异庚烷值	庚烷值	$\frac{\text{苯}}{n\text{C}_6}$	$\frac{\text{甲苯}}{n\text{C}_7}$
厚坝桥头	油浸砂岩	J _{2s}	51.03	26.13	14.92	7.92	1.07	38.46	0.10	0.55
二郎庙	油浸砂岩	J _{2s}	39.71	26.10	16.90	17.29	0.86	43.09	0.40	0.65
青林 1	油浸砂岩	J _{2s}	32.32	28.62	14.03	25.03	0.53	46.69	1.01	1.29
雷家河	油浸砂岩	J _{2q}	58.08	21.58	10.38	9.96	1.91	50.62	0.07	0.60
中 47	凝析油	T _{3x²}	17.75	16.31	53.01	12.93	1.45	13.66	0.33	1.32
中 48	凝析油	T _{3x²}	17.18	16.09	53.88	12.85	1.47	13.40	0.36	1.29
中 54	凝析油	T _{3x²}	18.43	17.54	52.13	11.90	1.46	13.62	0.33	1.20

表 3 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩与烃源岩的生物标志化合物特征

Table 3 Biomarker characteristics of Jurassic oil sandstone and source rocks in the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan Basin

项目	剖面或井号							
	厚坝	青林 1	鱼 1	鱼 1	射 1	矿 2	河深 1	南江沙滩
层位	J _{2s}	J _{2s}	J _{2s}	T _{1j}	P _{1m}	P _{1q}	S	€
产状	地面	1 508 m	3 208~ 3 246 m	5 642.25 m	井下	井下	4 028.9 m	地面
样品类型	油浸砂岩	油浸砂岩	油浸砂岩	泥晶灰岩	灰黑色灰岩	灰黑色灰岩	黑色泥岩	黑色泥岩
$\frac{\text{三环萜烷}}{\text{五环三萜烷}}$	3.86	4.26	7.16	0.84	0.55	0.53	0.54	0.56
$\frac{T_s}{T_m}$	0.58	0.80	2.49	0.87	2.84	1.04	2.52	0.70
$\frac{\gamma\text{-蜡烷}}{C_{30}\text{藿烷}}$	0.07	0.10	0.22	0.14				0.10
C ₂₇ aαa20R 甾烷, %	48.69	40.75	37.50	31.48	29.76	29.82	38.14	43.51
C ₂₈ aαa20R 甾烷, %	19.31	18.74	16.79	21.57	24.40	26.99	20.20	19.91
C ₂₉ aαa20R 甾烷, %	32.00	40.52	45.71	46.95	45.84	43.19	41.66	36.58
$\frac{(C_{21}+C_{22})\text{孕甾烷}}{(C_{27}+C_{28}+C_{29})\text{规则甾烷}}$	1.80	0.87	0.43	0.06	0.10	0.08	0.06	0.09
C ₂₉ 甾烷 $\frac{20S}{20S+20R}$	0.54	0.55	0.51	0.41	0.38	0.48	0.45	0.38
C ₂₉ 甾烷 $\frac{\alpha\beta\beta}{\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta}$	0.58	0.62	0.57	0.31	0.46	0.48	0.44	0.48
MPI 指数	1.42	0.72	0.90					
折算 R _o , %	1.25	0.82	0.93					
备注	裂解产物	裂解产物	裂解产物					

的缺氧沉积环境;三环萜烷含量较高(以 C₂₃ 为主峰),五环三萜烷含量相对较低,二者都以 C₃₀ 藿烷或 C₂₉ 降藿烷为主峰,以 Ts/Tm 值小于 1 为特征;γ-蜡烷丰度不高,这与寒武系黑色泥岩样品具有相似的特征(表 3)。但其三环萜烷/五环三萜烷值明显较寒武系烃源岩样品高,可能与生物降解作用和长距离运移有关。

原油的生物构型甾烷分布表现为 C₂₈ < C₂₇ < C₂₉ 的“V”字型分布特征,也与寒武系黑色泥岩生物构型甾烷的分布特征相似。另一方面, C₂₁, C₂₂

孕甾烷含量也有类似的特征,但其含量相对寒武系泥岩更丰富,预示原油经历了一定距离的运移。

2 油砂岩的成藏特征

结合沉积、成岩、构造和烃源岩演化研究^[13,14],龙门山北段山前带侏罗系油砂岩的成藏过程十分复杂,它是寒武系烃源岩成烃后经多期构造幕作用,多次充注、运移、再分配的产物,属于喜山期成藏(图 1,2)。

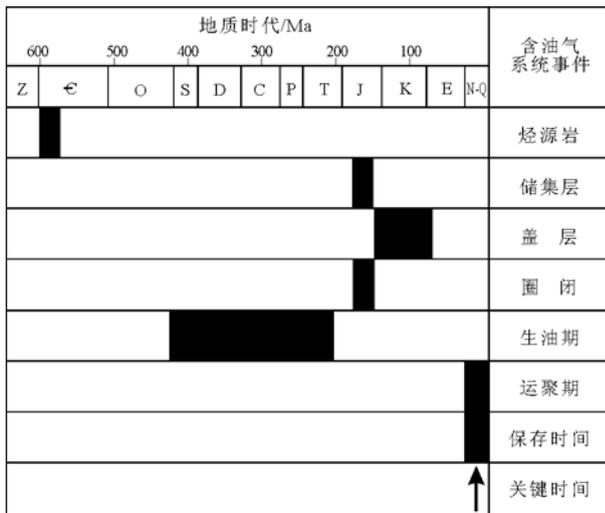


图 1 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩含油气系统事件
Fig. 1 Petroleum system event diagram of Jurassic oil sandstone in the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan Basin

2.1 成熟度特征

C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta/(\alpha\alpha+\alpha\beta)$ 是 2 个常用的表征成熟度的生物标志化合物参数,当烃源岩热演化进入生油高峰期时,它们分别达到其平衡值 0.50~0.55 和 0.70,在高一过成熟阶段又会发生倒转。从表 3 中可见,油砂岩裂解物均接近或达到其平衡值;根据甲基菲指数折算的成熟度为 0.82%~1.25%,表明它们是烃源岩在生油高峰期生成的产物。结合烃源岩热演化史分析,寒武系烃源岩在奥陶纪末进入生油阶段,开始生油,志留纪末进入生油高峰期,开始大量生油。表明侏罗系油砂岩中的原油是早期形成的古油藏遭受破坏、迁移、再分配的产物。野外观察,在龙门山北段碾子坝、矿山梁、天井山 3 个地区,地面志留系中有 138 个沥青点,其中有的已形成巨大沥青

脉,最大沥青脉宽约 8 m,长约 100 m,向地腹可见延伸约 3.5 m,井下延伸达 164 m;在北川地面和矿山梁井下亦发现泥盆系油浸砂岩,这都预示着龙门山北段山前带古油藏的存在,也是油气曾发生大规模运移、聚集的有力证据。

2.2 储层特征

油气进入储层后将阻碍成岩作用的进行。根据江油厚坝油砂岩薄片镜下观察和电镜扫描,颗粒间以点接触为主,机械压实作用相对较弱;孔隙类型主要为原生孔、粒间溶孔、粒内溶孔隙和粘土矿物晶间孔;孔隙中主要充填为高岭石,几乎不存在伊/蒙混层,少量伊利石和石英次生加大,孔隙中装满褐—黑色原油,成岩演化阶段达到早成岩“A”期,预示油砂岩进油时期早。油砂岩孔隙度介于 9.56%~22.72%之间,平均值为 17.89%,表明侏罗系沙溪庙组油砂岩具有良好的物性条件,可以为油气在此聚集提供有利的储集空间。

2.3 成藏特征

早寒武世龙门山北段为一坳陷,接受了下寒武统海相碎屑岩沉积。早寒武世末期,地壳抬升,缺失中、上寒武统及下奥陶统。中奥陶世早期,该区发生海侵,沉积了中、上奥陶统和大套海相地层。发生在志留纪末的加里东运动,使志留系遭受大幅度剥蚀,其结果形成了天井山古隆起和唐王寨坳陷,并以天井山古隆起为界,使该区和四川地块在构造形态和沉积环境上都出现明显差异。此时寒武系生成的油气运移至此,形成天井山古油藏。

加里东运动以后,该区再次发生沉降,沉积了以海相碳酸盐岩为主的泥盆系、石炭系、二叠系和中、下三叠统。在这次沉降过程中,泥盆纪末和石炭纪末各发生了一次构造运动,使上泥盆统和上石炭统遭受不同程度剥蚀,形成泥盆系古油藏。

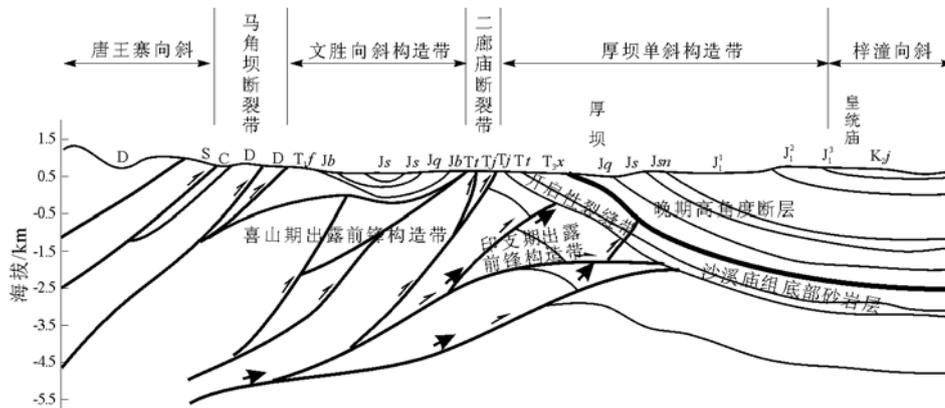


图 2 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩成藏模式

Fig. 2 Accumulation model of Jurassic oil sandstone in the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan Basin

进入二叠纪以后,四川地块与龙门山北段连为一体,再次为海洋所覆盖。中三叠世末进入印支运动旋回期后,因地壳从张裂活动转变为压扭活动,盆地开始收缩,变成陆相沉积盆地。早印支旋回的抬升运动,天井山古隆起范围扩大,形成江油—广元隆起,而古隆起带的隆起期,正是寒武系烃源岩生烃高峰期,生成的油气沿断裂面进入江油—广元隆起的三叠—二叠系储层的储集空间内,成为继天井山古油藏后继续扩大的古油藏。

印支期既是寒武系烃源岩生成的油气大量运移、聚集的高峰期,同时也是油气被破坏和生物降解的高峰期。印支晚幕,龙门山山前带内的油气多次运移、聚集、破坏、生物降解。喜山运动使龙门山系全面褶皱回返,构造分析表明,自白田坝组以下,有一组印支期断裂向地腹深处延伸至海拔—4 000 m 以下,成为深部古油藏与浅部侏罗系之间的连接通道。

3 结论

龙门山北段山前带处于推覆体构造带的断层隐伏前锋构造带,已发现了中坝、河湾场气田和较多的油气显示,无疑是最有利的勘探区带。根据油砂岩中原油族组成碳同位素和裂解产物轻烃及生物标志化合物分布特征,认为侏罗系油砂岩中原油是寒武系泥质烃源岩在生油高峰期生成的原油,在加里东运动和印支运动期形成古油藏,并经历了不同程度的生物降解,喜山期再次运移、分配进入侏罗系储层中。高角度断裂成为深部古油藏与浅部侏罗系之间油气运移的通道;油砂岩良好的储集条件,为油气的聚集提供了储集空间;油气运移、聚集

时间与古隆起的形成及构造多期次活动时期相匹配,是形成侏罗系油砂岩独特的成藏模式。

参考文献:

- 1 宋文海. 论龙门山北段推覆构造及其油气前景[J]. 天然气工业,1989,19(3):2~9
- 2 何 鲤,刘莉萍,罗 潇等. 川西龙门山推覆构造特征及有利油气勘探区块预测[J]. 石油实验地质,2007,29(3):247~252
- 3 王兰生,韩克猷,谢邦华等. 龙门山推覆构造带北段油气田形成条件探讨[J]. 天然气工业,2005,25(S1):1~5
- 4 张 林,魏国齐. 四川盆地震旦系—下古生界沥青产烃潜力及分布特征[J]. 石油实验地质,2005,27(3):276~280
- 5 徐世琦,曾 庆,唐大海等. 江油厚坝油砂岩成藏条件分析[J]. 天然气勘探与开发,2005, 28(3):1~4
- 6 刘云生,郭战峰,梁西文等. 中上扬子地区晚三叠世—侏罗纪砂岩构造意义及盆地耦合关系[J]. 石油实验地质,2006,28(3):201~205
- 7 胡晓强,陈洪德. 川西前陆盆地侏罗系三角洲沉积体系与沉积模式[J]. 石油实验地质,2005,27(3):226~231
- 8 Stahl W J. Compositional changes and ¹³C/¹²C fractionations during the degradation of hydrocarbons by bacteria [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1980,44:1903~1907
- 9 Leytaeuser D A. Generation and migration of C₂—C₇ light hydrocarbons in sedimentary basin[J]. Org Geochem. ,1979 ,1:119~124
- 10 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京:石油工业出版社,1992. 75~76
- 11 Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1979, 43:657~672
- 12 Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1983, 47:307~316
- 13 谢邦华,王兰生,张 鉴等. 龙门山北段烃源岩纵向分布及地化特征[J]. 天然气工业,2003, 23(5):21~23
- 14 陈昭国. 四川盆地川西坳陷深盆气探讨[J]. 石油实验地质, 2005,27(1):32~38



(上接第 603 页)

- 25 Farrimond P, Fox P A, Innes H E, et al. Bacterial sources of hopanoids in recent sediments: improving our understanding of ancient hopane biomarkers [J]. Ancient Biomolecules, 1998, 2: 147~166
- 26 Volkman J K, Barrett S M, Dunstan G A, et al. Sterol biomarkers for microalgae from the green algal class prasino-phyceae[J]. Organic Geochemistry, 1994, 21: 1211~1218
- 27 Huang Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43: 739~745
- 28 Obermajer M, Fowler M G, Snowdon L R. Depositional environment and oil generation in Ordovician source rocks from southwestern Ontario, Canada: Organic geochemical and petrological approach [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83: 1426~1453