

川西前陆盆地上三叠统储层流体动力学机制^{*}

赵永胜

(成都理工学院“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川成都 610059)

川西前陆盆地上三叠统储层具有正常压实和欠压实两种类型。压实过程恢复后的古流体动力场表明早侏罗世末期上三叠统流体主要向两个低势区和川中方向运移, 晚侏罗世末期与其具有相似性。川西西北侧江油地区、川中绵竹、孝泉一带及川西南三苏场、苏码头和三大湾地区是有利的油气聚集场所。

关键词 流体动力学 上三叠统 川西 前陆盆地

作者简介 赵永胜 男 33 岁 副教授 油气地质和储层地球化学

川西前陆盆地经历了 3 个阶段: 被动大陆边缘发展阶段(T_3m)、地貌盆地发展阶段($T_3t - T_3x^3$)和前陆盆地发展阶段($T_3h - Q$)。前陆盆地形成机制和油气地质方面取得了许多进展^[1], 建立了具有特殊属性的成藏地质模式和天然气富集控制机理^[2, 3]; 但对油气富集有关的地层水(流体)及其地质作用研究相对较少^[4, 5]。本文试图从流体(油气水)地质作用分析, 把油气水(流体)与岩石作为一个系统, 通过再造流体动力场和化学场, 探讨天然气的富集规律。

1 流体地质作用及流体来源

1.1 流体地质作用期

在含油气盆地古水文地质研究中, 流体地质作用期是根据地壳的升降运动来划分的。在一个流体地质作用期内, 根据地壳的升降、海水的进退, 进一步分为沉积和淋滤地质作用亚期^[6, 7]。流体地质作用期的划分方法简单易行, 但在油气古流体地质分析中存在明显的不足: (1) 研究的目的层不明确, 在含油气盆地中, 一个流体地质作用期内可形成多套储层; (2) 没有具体研究时期, 因为古流体地质分析必须与油气运移、聚集和保存结合起来才有意义; (3) 盆地内同一期地层流体压实和渗透地质作用同时存在, 盆地边缘进行渗透作用, 而盆地中心处于压实作用。因此流体地质作用期的划分除须考虑构造发展史外, 还应结合沉积埋藏史、孔隙演化史、生烃史, 以勘探目的层为目标来划分流体地质作用期。

川西前陆盆地从晚三叠世开始, 曾经历了多次构造运动: (1) 诺利期末的安县运动; (2) 印支晚幕构造运动; (3) 喜山二幕抬升运动。结合流体地质作用, 将盆地上三叠统储层划分为晚三叠世早期、晚三叠世晚期、侏罗纪—第四纪等 3 期(图 1)。

1.2 流体来源

川西前陆盆地流体随盆地的形成、发展和消亡, 经地表水转为地下水, 并随石油天然气的

^{*} “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金资助项目(9606)

收稿日期: 1996-09-16 改回日期: 1997-03-27

形成而构成现今盆地流体, 流体来源分为 3 类^[3,8]。

(1) 有机成因水: 根据上三叠统烃源岩Ⅲ型干酪根模拟实验结果编制的干酪根生烃模式, 有机质转化成天然气过程中, 生成 $C_2^+ + C_4^+$, CH_4 , H_2 , CO_2 , H_2S , N_2 等气体和大量有机水, 这些气体、液体溶解在地层水中将改变流体的性质。

(2) 渗滤成因水: 大气降水和地表水的渗入, 流体的矿化度发生明显的变化, 如盆地边缘露头区川主、旺苍、白水、什邡、熊坡断裂等流体矿化度极低, 为 0.44~5.40 g/l。

(3) 沉积成因水: 包括原生沉积水和成岩水。马鞍塘、小塘子组为海相沉积, 地层流体具有咸化特征^[9], 须家河组二段、须家河组三段为海陆交互相的三角洲沉积, 地层流体具咸化过渡性质, 须家河组四段、须家河组五段为陆相地层, 流体具淡化特征。

2 流体地球化学特征

2.1 化学组成

2.1.1 酸碱性

现今流体 pH 值是地层中水岩系统变化的结果, 龙门山前缘地区流体偏碱性, pH 值为 7.1~11.0; 中部地区偏酸性, pH 值为 5.5~6.5, 向南北地区逐渐向碱性过渡(图 2)。

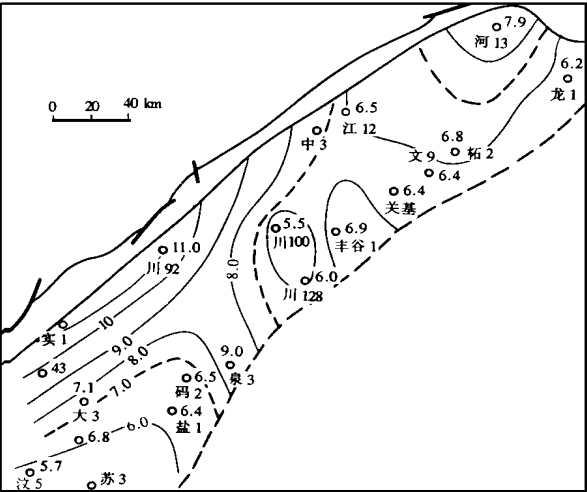


图 2 川西坳陷上三叠统流体 pH 值变化图

71.38 g/l; 中坝、合兴场、鸭子河、平落坝为中区, 为 45.52 g/l; 河湾场、雾中山为低值区, 为 5.24~1.99 g/l。阴离子组合中 Cl^- 含量占绝对优势, 其次为 HCO_3^- , 含极少量的 CO_3^{2-} , 九

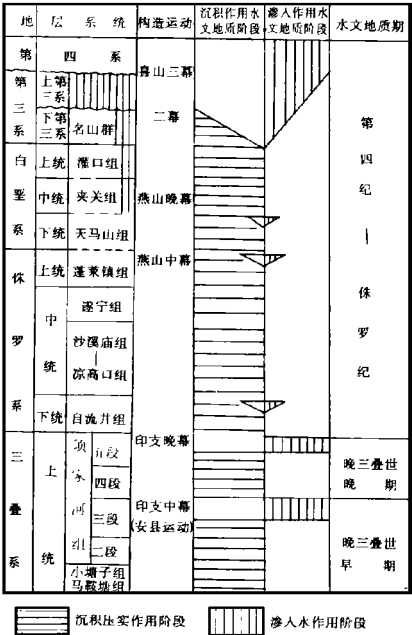


图 1 川西前陆盆地古流体地质作用期划分图

2.1.2 矿化度

上三叠统流体水矿化度变化在 46.44~173.92 g/l 之间, 靠近盆地边缘的雾中山、河湾场矿化度较低, 为 5.32~9.09 g/l, 九龙山、老关庙为高矿化度区, 为 127.70~175.92 g/l, 中坝、孝泉、鸭子河、汉王场为中矿化度区, 为 63.98~117.14 g/l, 从须家河组二段到须家河组四段, 流体矿化度有降低趋势, 但它们处于流体交替停滞带^[4,5,11], 有利于天然气的保存。

2.1.3 离子组合

川西前陆盆地上三叠统 10 个构造 30 多口井地层水分析资料表明: 阳离子组合在九龙山、汉王场、老关庙为高值区, 达

山含量高达 104.40 g/l, 文兴场、老关庙、汉王场中高值区为 70 g/l, 鸭子河、孝泉、中坝、合兴场中值区 20~ 70 g/l, 河湾场、雾中山一侧低值区小于 10 g/l; 而 HCO_3^- 在中坝、大兴西出现相对富集区, 为 9.02 g/l, 其它构造变化不大, 为 0.142~ 0.769 g/l。

2.2 垂向分带及类型

2.2.1 地层水成因类型

依据地层水中主要离子彼此间的化学亲和力强组成盐类的原则, 用离子的当量比例来划分水类^[6, 9, 11], 上三叠统流体水型主要为 CaCl_2 型, 其中汉 2 井出现 NaHCO_3 型, 关 5 井为 Na_2SO_4 型, 关 4 井为 MgCl_2 型; 侏罗系为 CaCl_2 型。

2.2.2 垂向分带

研究区的流体地质垂向分带如图 3 所示, 坳陷边缘交替阻滞带顶界层位低, 坳陷中心层位高, 即远离露头区保存条件好, 香水断裂带附近, 上三叠统储层处于自由交替带, 保存条件相对较差。

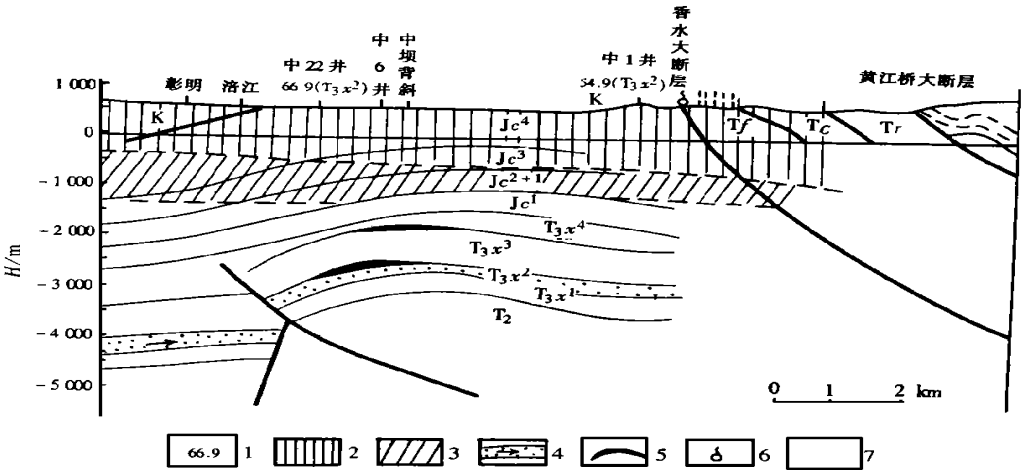


图 3 江油-黄连桥流体地质作用横剖面图

1—矿化度; 2—自由交替带; 3—交替阻滞带; 4— T_3x^2 水流方向; 5—油气层; 6—上升泉; 7—交替停滞带

川西前陆盆地除雾中山、高家场背斜东翼断层、香水断层上盘、河湾场等构造储层处于自由交替带, 保存条件较差, 其余地区处于有利于天然气保存的交替停滞带。

2.3 水化学场分区

综合古地温和古压力^[5]及流体水化学特征, 川西前陆盆地上三叠统流体水化学场分为 3 个水文地球化学区:

(1) 渗入水交替活跃带: 该带靠近上三叠统露头区, 包括雾中山、锦竹-安县香水大断带等, 见水泉、盐泉及气苗。渗入水交替强烈, 为活跃的开启环境, 属正常压力带, 古地温变化较大, 流体矿化度极低, 多数不到 1 g/l, δD 为 -6‰ SMOW, 具典型地表水特征, 区内雾中山、峨眉一带钻探, 均产水而未获油气。

(2) 渗入水淡化带: 该带为渗入水交替活跃区与封闭高矿化区间的狭窄地带, 流体矿化度低于封存高矿化区, 又高于渗入水交替活跃区, 一般为 10~ 50 g/l, 从盆地边缘到坳陷流体由

Na₂SO₄ 型渐变到 CaCl₂ 型, δD 为- 5. 13 ‰, 具有渗入淡化影响的特点。

(3) 沉积水封存区: 该区控制了川西前陆盆地的大部分面积, 包括龙泉山、合兴场、老关庙、九龙山、平落坝、大邑构造等, 矿化度大于 50 g/l, 可达 180. 0 g/l, δD 为- 4 ‰ - 2 ‰SMOW, δ¹⁸O 为- 0. 2 ‰ - 0. 3 ‰SMOW, 水交替极弱, 处于封闭的还原环境, 含气率大于 50 ‰, 是有利的勘探区块。

3 流体动力学机制

3. 1 流体动力场重塑

3. 1. 1 压实曲线类型建立

川西前陆盆地地质背景复杂, 要恢复上三叠统储层不同时期的流体动力场, 只有对某些地质条件进行合理简化: (1) 把上三叠统目的层之上的地层岩性归为砂岩和泥岩两类, 将泥质砂岩、粉砂岩归为砂岩类, 砂质泥岩及灰质泥岩归为泥岩类; (2) 岩石的骨架在压实过程中始终保持不变; (3) 仅讨论因上覆载荷引起的垂向压实不涉及由构造挤压导致的侧向压实作用; (4) 忽略水的密度在压实过程中的变化, 水的压缩系数忽略不计。

根据川西前陆盆地的地质背景、压力分布、古地温特征, 将该区压实分为 4 种类型: (1) 江油- 厚坝类型; (2) 老关庙- 柘坝场类型; (3) 孝泉- 合兴场类型; (4) 平洛坝- 苏码头类型。分别用上述区块的关基 6 井、中 12 井、汉 1 井和川孝 73 井作压实曲线, 以实测孔隙度资料为基础, 声波测井资料为补充分别建立了两种压实模型: (1) 正常压实模型(图 4A), 包括江油- 厚坝类型和平洛坝- 苏码类型; (2) 欠压实模型(图 4B), 包括孝泉- 合兴场类型和老关庙- 柘坝场类型。根据川西前

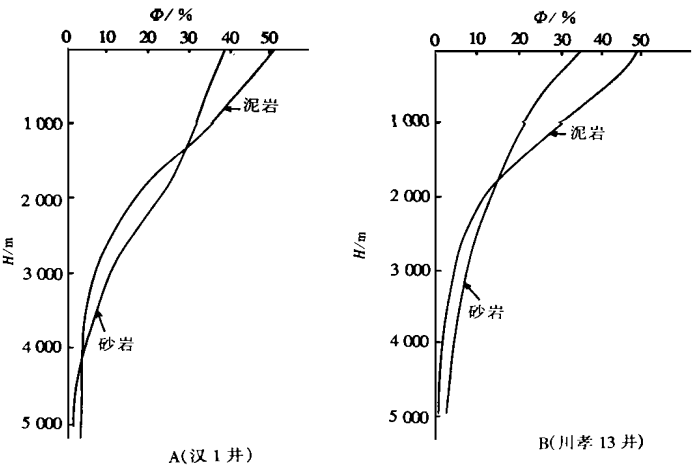


图 4 砂泥岩孔隙度埋深关系曲线

陆盆地压实过程及沉积背景, 综合前人研究成果^[8], 上三叠统沉积时砂岩、泥岩的原始孔隙度取值分别为 40. 0 ‰和 48 ‰。

3. 1. 2 地层压实过程的恢复

地层压实前后地层厚度与孔隙度之间的关系为

$$H_0/H = (1 - \Phi)/(1 - \Phi_0) \tag{1}$$

式中 H_0 为压实前地层厚度, H 为压实后地层厚度, Φ_0 和 Φ 为压实前后地层孔隙度。

写成微分方程式, 地层原始厚度为

$$H_0 = \frac{1}{1 - \Phi_0} \int_{H_1}^{H_2} (1 - \Phi) dH \tag{2}$$

依据砂泥岩压实曲线, (2) 可写成

$$H_0 = \frac{1}{1 - \Phi_0} \left[(H_2 - H_1) + \frac{1}{A} P_s \Phi_{0s} (e^{-AH_2} - e^{-AH_1}) + \frac{1}{B} P_m \Phi_{0m} (e^{-BH_2} - e^{-BH_1}) \right] \quad (3)$$

式中 Φ_{0s} , Φ_{0m} 分别为埋深 $H = 0$ 时砂、泥岩的原始孔隙度, P_s , P_m 为砂、泥岩含量。

已知 H_0 , 若设某一时期某层的顶界埋深为 H_1 , 则据(3)式可求得底界埋深 H_2 , 该时期地层厚度为 $H_2 - H_1$, 由此可求出目的层在不同埋深下的厚度。

3. 1. 3 古流体动力场的重建

由厚 L_0 的薄层沉积物瞬间负载产生的孔隙流体势(P_{L0})_a 可表示为

$$(P_{L0})_a = (\rho_{L0} - \rho_w) g h_0 \quad (4)$$

式中 ρ_{L0} 为新沉积物的密度, ρ_w 为水的密度, 在压实过程中 ρ_w 恒为 1。

写成微分方程式为: $dP_a = (\rho_b - \rho_w) g dH$

$$P_a = \int_0^H (\rho_b - 1) g dH = \sum_{i=1}^n (\rho_{bi} - 1) g H_i \quad (5)$$

式中 ρ_{bi} 为 i 层在埋深为 z 时的岩石密度, 随深度增加而增大, 是深度函数; H_i 为某一研究时期 i 层的地层厚度。

据岩石密度-深度关系曲线可计算出不同深度岩石的密度, 结合(5)式可求出目的层在不同研究时期的孔隙流体势值(表 1)。

表 1 川西前陆盆地上三叠统不同时期部分井孔隙流体势值 10⁸ MPa

井号	CY91	CY92	CY95	CX93	CH127	CH100	C139	KZJ	K8	C19	ZH6	ZB1	L4	L1	W7	W10
J _{1z}	0.179	0.203	0.204	0.194	0.158	0.151	0.142	0.092	0.105	0.036	0.068	0.062	0.069	0.079	0.114	0.098
J _{3p}	0.505	0.552	0.536	0.536	0.582	0.546	0.528	0.485	0.481	0.334	0.378	0.476	0.465	0.472	0.464	0.462

3.2 流体动力学特征

早侏罗世末期上三叠统流体动力学特征(图 5)表明: 双流-成都-新都一带是高势区, 三苏场和江油是低势区, 流体主要向两个低势区和川中方向运移。主要特点为: (1) 成都以南的龙泉驿和三大湾为低势圈闭区, 靠近成都-彭县压实水流中心, 具有良好的汇流能力; (2) 绵竹-孝泉一带三面汇流, 开口一侧水力坡度小, 具有一定的汇流能力; (3) 江油具三面汇流的特征。

晚侏罗世末期的上三叠统流体动力学场分布与早侏罗世末期具有相似性(图 6), 但也有明显的变化: (1) 成都-金堂为高势区, 北部的广元出现高势区; (2) 南侧的三苏场、中部江油、厚坝继续保持低势区, 绵竹、孝泉有局部性低势区。流体主要从彭县、新都等高势区向江油、三苏

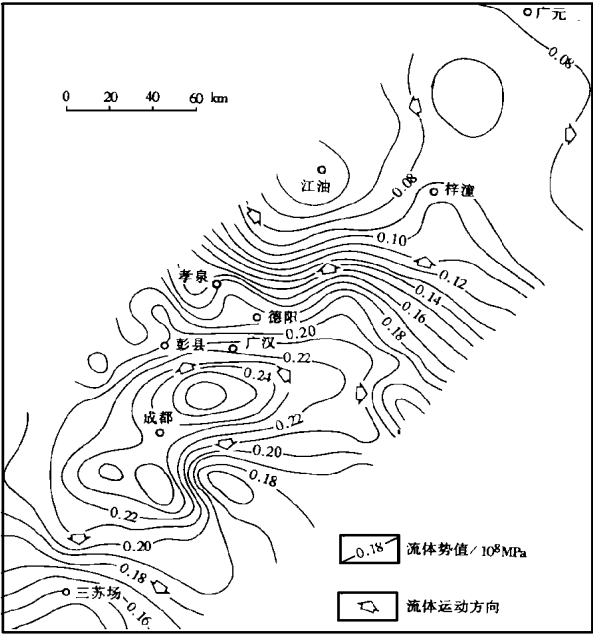


图 5 早侏罗世末期上三叠统储层流体动力学场

场等低势区及川中方向运移。

4 流体动力场与天然气富集

就沉积压实盆地而言, 压实水流长期指向的地区, 是油气聚集地带, 地下水岭或坳陷带轴部的构造是最不利的。分散的烃类流体在构造中的聚集量, 取决于集流面积和汇流面积, 流体直接指向局部构造中心部位最有利^[7]。

(1) 川西西北侧江油地区(中坝构造等和九龙山构造等)为天然气聚集有利地区, 该区无论是早侏罗世末期还是晚侏罗世末期, 均为流体低势区(图 5, 6), 汇集能力强, 且地层压力相对较低, 水化学场处于沉积水封存区, 保存条件好, 为油气释放和聚集创造了良好的条件。

(2) 川西中部绵竹、孝泉一带也是油气富集的较有利场所, 无论是早侏罗世还是晚侏罗世均处于局部低势区和水动力梯度带, 易于形成水动力圈闭, 且靠近生烃(气)中心, 有利于优先捕获油气。

(3) 川西南部三苏场及苏码头、三大湾地区, 处于低势区, 平洛坝地区处于梯度带, 流体的注入量大, 地层压力相对较低, 烃类在该区易于富集成藏, 因此, 也是有利的油气聚集场所。

致谢: 王文斌, 周文参加了部分工作, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. 46~ 64
- 2 演怀玉, 史玉祥, 韩永辉. 四川盆地上三叠统控气地质因素动态分析及找气领域. 见: 地质矿产部石地质研究所. 石油与天然气地质文集. 北京: 地质出版社, 1988. 273~ 249
- 3 郑朝阳, 郭迪孝, 罗秋霞. 四川盆地川西凹陷天然气成藏过程模拟. 石油实验地质, 1993, 15(2): 115~ 127
- 4 杨家琦, 秦成明. 四川盆地上三叠统水文地质与油气富集. 天然气工业, 1987, 7(3): 26~ 30
- 5 赵永胜. 川西坳陷上三叠统致密储层(油)水岩系统地球化学环境与天然气聚散. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室研究年报. 1994, 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 33~ 45
- 6 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理. 北京: 石油工业出版社, 1991. 55~ 94
- 7 地质矿产部水文工程地质研究所, 石油工业部华北石油勘探开发研究院, 地质矿产部石油地质综合大队 101 队. 油田古水文地质学及油田水化学——以冀中坳陷为例. 北京: 科学出版社, 1993. 164~ 203
- 8 真柄钦茨. 压实与流体运移. 陈荷立译. 北京: 石油工业出版社, 1981. 1~ 47
- 9 Collins A G. Geochemistry of oilfield water. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 45~ 97
- 10 Land L S, Macpherson G L. Origin of saline formation water, Cenozoic section, Gulf of Mexico sedimentary basin. AAPG Bull, 1992, 76(9): 1344~ 1362
- 11 Moldovanyi P E, Walter M. Regional trends in water chemistry, Smackover Formation, southwest Arkansas: geochemical and physical controls. AAPG Bull, 1997, 76(6): 684~ 894

(下转第 215 页)

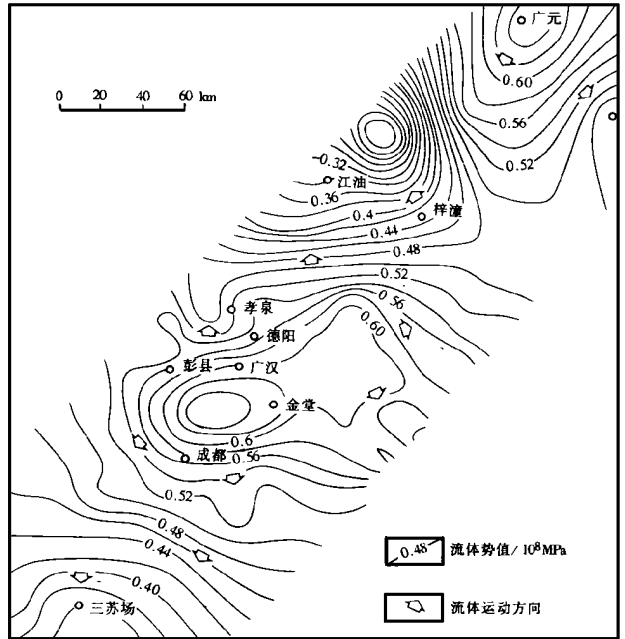


图 6 晚侏罗世末期上三叠统储层流体动力场分布

SEQUENCE STRATIGRAPHY OF JURASSIC IN TAIBEI SAG, TURPAN – HAMI BASIN

Li Wenhou

(*Department of Geology, Northwest University, Xian, Shaanxi*)

Abstract

4 sequences and 10 sedimentary system tracts could be identified in the sedimentary strata of the Jurassic in Taibei Sag of the Turpan-Hami Basin. The lowstand system tract, transgressive system tract and highstand system tract developed under the control of ancient structure, paleotopography, paleoclimate, sediment supply, and so on. In this paper, the sequence stratigraphy of the Jurassic in Taibei Sag is studied on the basis of geological, seismic, well logging and geochemical data. It is considered that sedimentary framework of the sag experienced great changes in Jurassic. From south to north, fluvial, swamp and lake deposits developed well in Early-Middle Jurassic. Braid river deltaic and lake deposits developed in Middle Jurassic; and braid river, lake and fan deltaic deposits developed in Middle-Late Jurassic. Among them, coal bed of swamp and mudstone of deep lake are good hydrocarbon source rocks, braid river delta, fan delta and river channel sand bodies are good reservoirs, and lake mudstone is good cover rock. They constitute vertically favourable source-reservoir-cap rock assemblages.

(上接第 209 页)

FLUID DYNAMIC MECHANISM OF UPPER TRIASSIC RESERVOIR IN WEST SICHUAN FORELAND BASIN

Zhao Yongsheng

(*State Key Lab. of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploration,
Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan*)

Abstract

The Upper Triassic reservoir in west Sichuan foreland basin has experienced normal compaction and ancompaction. Restored paleofluid dynamic field shows that Upper Triassic fluids primarily migrated towards lower fluid potential area and central Sichuan in the late stages of the Early and Late Jurassic; Jiangyou, Mianzhu, Xiaoqian, Sansuchang, Sumatou and Sandawan regions are favourable places for hydrocarbon accumulation.