

川西坳陷压扭应力场的 形变特征及油气地质意义

黄泽光^{1,2}, 刘光祥², 潘文蕾², 翟常博²

(1. 成都理工大学 石油系, 四川 成都 610059;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要: 该文通过川西坳陷晚三叠世以来的形成演化和沉积展布特征以及龙门山冲断带的形变分析认为, 龙门山冲断带在印支期为压性应力场环境, 燕山早期、中期在左旋压扭应力作用下形成北东东向隆坳相间构造带, 其隆褶带上形成的裂缝、微裂缝对致密砂岩的储集能力有较大的改善, 有利于油气的富集成藏。

关键词: 构造变形; 沉积展布; 压扭性; 冲断带; 龙门山; 川西坳陷

中图分类号: TE121. 1

文献标识码: A

1 构造演化

川西坳陷在晚三叠世以前具台地性质^[1], 其基底的岩性、时代以及盖层的岩性、时代基本与四川盆地中、东部相同, 具有相同的构造演化历史, 均属扬子板块的西部。在晋宁期前形成的结晶基底与变质基底上, 经历了震旦纪、寒武纪和奥陶纪的碳酸盐岩台地发育阶段, 加里东运动形成北东东向的大型乐山—龙女隆起带, 其西翼志留系海相砂岩、页岩由南东向北西渐次增厚。晚古生代海侵接受了一定厚度的台地型碎屑岩、碳酸盐岩和含煤沉积, 而后广覆着早中三叠世海相碳酸盐岩及蒸发岩沉积。经海西及印支早期构造作用, 浅海台地隆升、剥蚀, 形成广泛的区域不整合面。

印支晚期太平洋板块向西北方向推动, 扬子板块的四川块体向西北方向俯冲于阿坝—若尔盖地块之下^[2], 川西北地区由北东向西南逐渐呈剪刀状关闭。马鞍塘期(T_3m)及小塘子期(T_3t)海水自北东向西南退出, 沉积一套滨海含煤碎屑岩, 此时龙门山是一列岛状的低丘。须二时期, 沉积了大套河流—三角洲砂岩, 夹少量砾岩, 大巴山、米仓山古陆出现, 龙门山开始上升为岛状隆起; 须三时期, 为一大套湖沼相含煤沉积, 暗色泥页岩、砂岩夹煤系厚达 100~

1 000m。须二段及须三段沉积广泛分布于整个川西北坳陷区, 向东超覆于仁寿—乐至—西充一线而尖灭, 这时一个向西北倾斜、呈北东向延伸、面积达 35 000km² 的前陆盆地形成(表 1)。

印支晚期安县运动之后至燕山早期、中期, 海水退尽, 龙门山的雏型显露^[3,4]。由于太平洋板块向北西推动, 加之拉萨块体的北东俯冲及怒江缝合带关闭而造成的向北东方向的推挤, 龙门山地带形成左旋压扭应力场。此时山系上升, 川西坳陷显现出 NEE 向隆坳相间的构造格局。

燕山中期至晚期, 下白垩统为一套巨厚的磨拉石和红色碎屑岩建造, 展布方向近东西, 它的形成和分布主要受北缘米仓山隆升、冲断控制。

喜马拉雅期, 由于印度板块的陆内俯冲的远源效应, 四川盆地受到侧向挤压, 龙门山的冲断推覆再次加剧, 其前缘沉积了一定厚度的上白垩统一第四系沉积物。

2 形变特征

2.1 龙门山前缘冲断带

川西龙门山前缘冲断带(图 1)燕山期由于来自太平洋向 NW 的推挤和自冈底斯—拉萨块体向北东推挤的斜向合力, 形成压扭性应力场^[5,6]。喜山

表 1 川西坳陷晚三叠世—全新世地层系统及构造运动幕次划分表

Table 1 Episodic sequence division of the Late Triassic-Holocene stratigraphic systems and tectonic movements in the West Sichuan Depression

系	统	地 层 名 称	代 号	构造运动	构造事件	盆地演化	应力场特征		
第四系	全新统	全新统冲、洪积砂砾层	Q ₂	喜马拉雅晚幕 喜马拉雅中幕 喜马拉雅早幕	龙门山冲断、推覆 南特提斯开、合	前陆盆地 萎缩阶段	NWW-EW 向斜向挤压 NE、NNE向 构造发育		
	更新统	上更新统砂砾层及粉砂质粘土夹泥炭	Q ₁ ³						
		中更新统砂砾层及上部红色网纹红土	Q ₁ ²						
	上新统	下更新统—上新统砾岩(大邑砾岩)	Q ₁ ¹ -N ₂						
第三系	始新统	芦 山 组	E ₁ l						
	古新统	名 山 组	E ₁ m						
白垩系	上统	灌 口 组	K ₂ g	燕山晚幕 燕山中幕 燕山早幕	区域不整合 中特提斯闭合 米仓山冲断上升 中特提斯开、太平洋板块斜向推动	压扭性盆地 发展阶段	近SE向 挤压 近EW向 构造发育		
		夹 关 组	K ₂ j						
	下统	古店组	K ₁ g					天马山组	K ₁ g, K ₁ q, K ₁ h, K ₁ b, K ₁ jm, K ₁ c
		剑阁组	七曲寺组						
		汉阳铺组	白龙组						
		剑门关组	苍溪组						
侏罗系	上统	莲花口组	J ₃ l	中特提斯开、太平洋板块斜向推动	扬子块体向西北俯冲、持续沉降	SE 向 斜向挤压 NEE向 构造发育			
		蓬菜镇组	J ₃ p						
	中统	遂宁组	J ₃ sn						
		上沙溪庙组	J ₃ s ²						
下统	下沙溪庙组	J ₃ s ¹							
	千佛崖组	J ₃ q							
三叠系	上统	须家河组	须五段	T ₃ x ⁵	印支晚幕 (安县运动)	区域不整合	前陆盆地 形成阶段		
			须四段	T ₃ x ⁴					
			须三段	T ₃ x ³					
			须二段	T ₃ x ²					
	中统	小塘子组	T ₃ xt	印支中幕	T ₃ m, T ₃ k	扬子西俯冲 北特提斯开、合	SE 向 斜向挤压 NE向构造 开始发育		
		马鞍塘组	垮洪洞组						
	中统	天井山组	T ₃ t	印支早幕	北特提斯	浅海台地			
		雷口坡组	T ₃ l						

期由于印度板块的斜向推动加剧了冲断带的发育。该冲断带可划分为斜列的 4 个冲断片,即武都冲断片、江油冲断片、关口冲断片和大川冲断片,呈左行左列雁行展布,其形成时期逐渐变新。它反映了在川西剪刀状关闭过程中,龙门山北段先行隆升,其次是中段的隆升,再后是南段的隆升。这也反映了压扭性应力场作用的推移,它直接导致山前带中生

代磨拉石建造由北东往南西迁移,亦指示了沉降中心的斜向迁移。各冲断片的主要特征如下。

a) 武都冲断片:表层侏罗系构造为简单纵弯褶皱,与下伏构造呈高角度不整合;下伏三叠系具叠瓦状冲断层组,褶皱呈长条状不对称,局部暴露。

b) 江油冲断片:表层侏罗系构造与下伏构造呈低角度不整合;下伏三叠系内为背冲、对冲组合,主

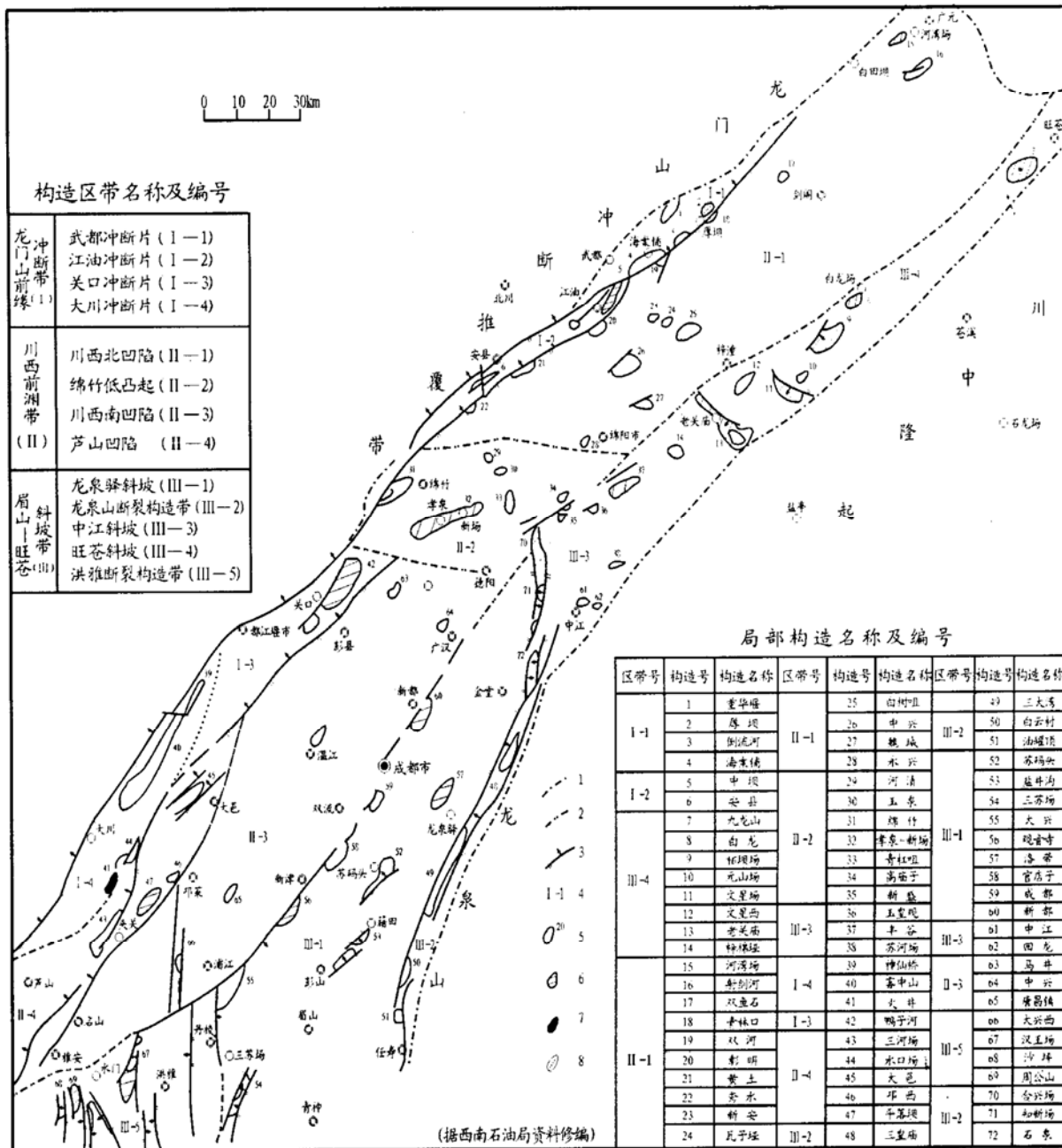


图 1 川西拗陷形变区带油气田及构造分区图

1. 川西拗陷边界; 2. 构造区分界线; 3. 逆断层; 4. 构造区带编号; 5. 局部构造及编号; 6. 气田或含气构造; 7. 油田; 8. 油砂
Fig. 1 Zoning map of oil/gas pools and structures in the deformation bands of the West Sichuan Depression

冲断层方向为南东, 褶皱呈不对称状。

c) 关口冲断片: 地表主要为白垩系单斜, 有断层伸展背斜, 北侧具背冲式上盘牵引背斜; 断层较发育, 呈“Y”形组合。

d) 大川冲断片: 上三叠统局部出露, 发育背冲式上盘牵引背斜, 面积、幅度大, 呈长轴状; 断层较发育, 呈“Y”形组合, 局部暴露。

从剖面上看, 龙门山造山带北、中、南 3 段存在较大差异(图 2)。北段是强冲断- 滑脱变形带, 安县断裂上盘外来岩体为震旦-三叠系, 断距较大, 断裂东侧最新地层为上侏罗统; 中段是中等冲断变形带; 南段是弱断褶变形带, 双石断裂西侧出露地层为泥盆-上三叠统, 断距较小, 断裂东侧白垩纪时形成

的褶皱构造近对称。造山带前缘拗陷中, 断褶构造不太发育, 仅局部地带发育隐伏断裂及微裂缝, 表明变形强度由北东往南西逐渐变弱, 形变带波及范围较窄, 显示压扭性作用的特点。而以挤压应力为主的盆地形变特征是: a) 发育以挤压- 冲断为主要特征的构造变形; b) 由山前向盆腹, 构造成排成带, 变形强度逐渐减弱; c) 变形样式以薄皮滑脱式的断滑、断展、断弯背斜及构造三角带为主要特征; d) 构造高点深浅不一, 变形样式深浅有别。

2.2 川西拗陷沉积展布

在地质历史研究中, 判断 撞山脉和伴生的前陆盆地, 除 P. A. Allen 所强调的大构造位置(山系与克拉通间)外, 还应抓住磨拉石沉积和特有的构造变

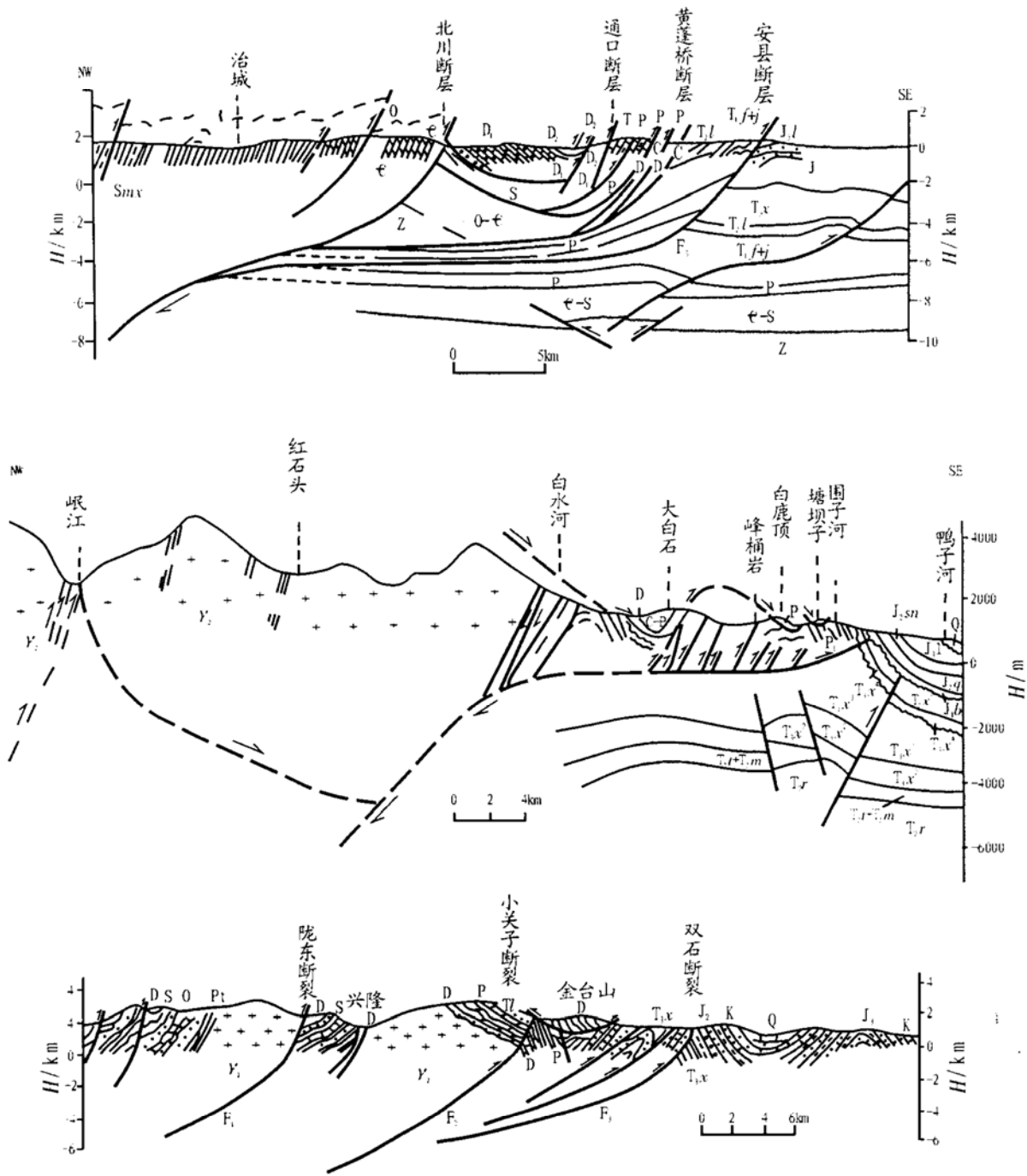


图 2 龙门山造山带——川西坳陷北、中、南段构造剖面图

Fig. 2 Tectonic profile of the Longmenshan Orogenic Belt (i. e., the northern, middle and southern parts of the West Sichuan Depression)

形,即山系前缘的逆冲-推覆及与之相邻的盆地的线性断褶带。川西坳陷上三叠统马鞍塘组一小塘子组的沉积展布呈北东向,与龙门山造山带近于平行,厚度从山前往台内逐渐减薄,最深可达 500m;上三叠统须家河组二段—三段的沉积展布亦呈北东向(图 3),平行于龙门山造山带,厚度从山前往台内逐渐减薄,最深可达 1 800m。

而上三叠统须家河组四段—下侏罗统白田坝组的沉积展布呈北东东向,与龙门山造山带斜交,特别是中侏罗统千佛岩组—上沙溪庙组(图 4)和上侏罗统遂宁组—蓬莱镇组,其隆坳相间的长轴方向与龙

门山造山带斜交,呈北东东向展布,表明前者为挤压应力场环境,后者为左旋压扭性应力场环境。

3 油气意义

川西坳陷中生界下部是一套海陆过渡相的灰色碎屑岩含煤建造。其中的马鞍塘组(T_3m)及小塘子组(T_3t)、须家河组三段(T_3x^3)及须五段(T_3x^5)暗色泥岩、碳质泥岩及煤岩是优质的烃源岩^[7]。

据统计暗色泥岩厚达 300~ 1 000m;煤层一般厚 2~ 10m,最厚可达 28m。其有机质丰度较高,据

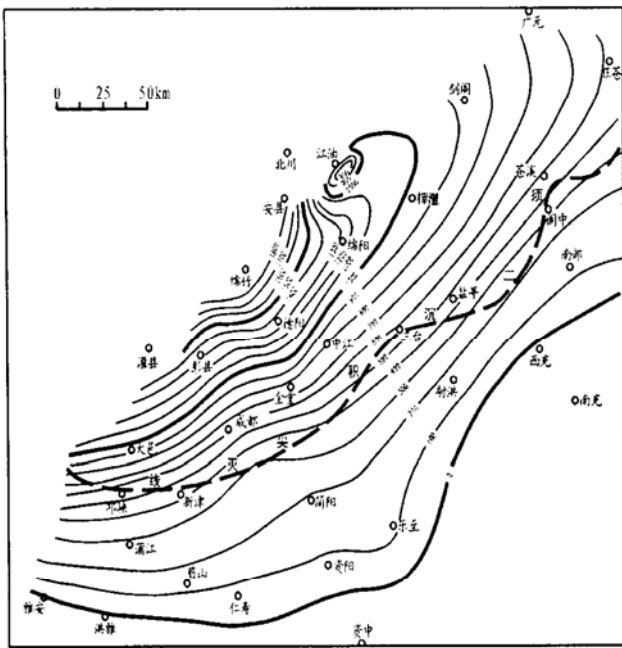


图 3 川西拗陷上三叠统须家河组二段、三段厚度等值线图(单位:m)

Fig. 3 Thickness contour diagram of the 2nd and 3rd members in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the West Sichuan Depression (unit: m)

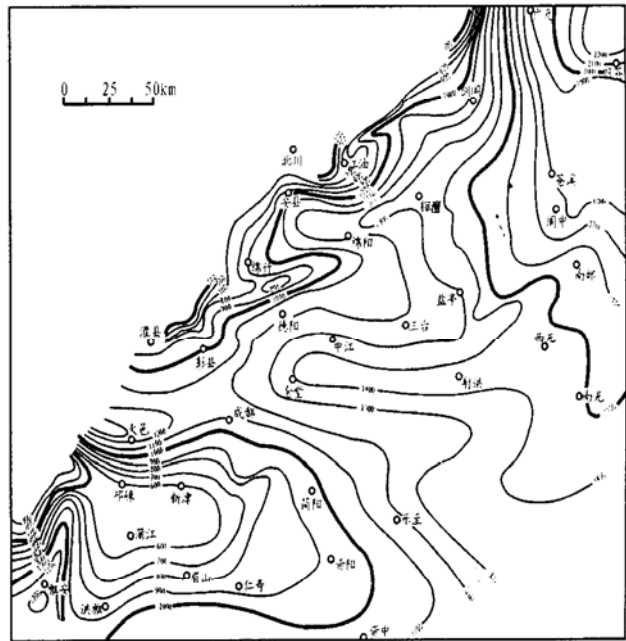


图 4 川西拗陷中侏罗统千佛岩组—上沙溪庙组厚度等值线图(单位:m)

Fig. 4 Thickness contour diagram of the Qianfoya Formation to the Upper Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of the West Sichuan Depression (unit: m)

4 口井统计平均有机碳含量 T_3x^5 为 2.87%, T_3x^3 为 2.77%, T_3x^2 为 2.32%, T_3t 为 2.32%。而煤岩有机碳含量高达 35%。暗色泥岩、碳质泥岩的干酪根类型为 ㊟ 型; 而煤及煤岩的有机质类型为 ㊟ — ㊟ 型, 其中惰质组占 18%~45%, 镜质组占 20%~60%, 类脂组含量从 20% 至 60% 不等, 属于较好的煤成油气源岩。

从目前川西的勘探发现来看, 高家场油田火 3 井在 T_3x^2 段曾发现过油流, 初产原油达 22~57m³/d, 同时产气 1600m³/d。其源岩可能是 T_3m 和 T_3t 的滨海相富含腐泥型有机质成分的暗色泥岩及煤岩, 属混合型干酪根, $R_0 = 0.7\% \pm$, 属低熟—成熟阶段, 但原油的储量甚少。

从川西拗陷上三叠统煤系源岩有机质以 ㊟ 型干酪根为主的情况来看, 该区煤系应是主要的气源层系。

从该区烃源岩的热演化史分析来看, 川西拗陷上三叠统埋深为 3000~6000m, 其镜质体反射率从 T_3x^5 向下到 T_3m R_0 值从 1.1%~2.2%, 属气肥煤到半无烟煤阶, 反映源岩热演化从成熟到高熟至过熟。到侏罗纪末期, 上三叠统烃源岩的生烃量已占总生烃量的 82%; 在白垩纪初, 普遍已经过生烃高峰期, 其 R_0 值大于 1.0%。

而现今在前渊斜坡区, R_0 值达 1.2%~1.8%; 在深凹陷中, 合兴场须二 R_0 值达 1.88%, 须四 R_0

值达 1.48%; 新场 X851 井须二气藏天然气演化程度最高, 同位素差值反射率达 2.69%, 表明了叠加深埋使烃源岩高成熟, 即已超过 CH_4 生成的最高峰值, 虽然现今地腹深处 T_3 煤系还可继续生烃, 但其 CH_4 产量应逐渐降低, 而 CO_2 、 N_2 应有所增加。

据数千个岩心样品的物性测试统计, 浅部上白垩统及上侏罗统上部属较高孔、渗性的常规储层, 而深部则为低孔渗的非常规储层。

从表 2 可见, 川西拗陷储层一般具有低孔隙度、低渗透率及高含水饱和度的特征。纵向上从上往下 1500m 以上为常规储层, 1500m 以下储层物性逐渐变差。

储层物性较好的是新场气田、马井气田的上白垩统剑门关组砂岩; 居第二位的是上侏罗统蓬莱镇组砂岩; 其次是中侏罗统沙溪庙组砂岩; 下侏罗统、上三叠统物性变差, 孔隙度仅 5% 以下, 平均渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属致密砂岩储层。在这种情况下, 常规物性参数大小已不再是判断储层与非储层的重要标准, 单纯地寻找高孔渗带的方法不完全适用于深拗陷中的非常规储层。

从川西拗陷油气田的分布来看(图 5), 大多和北东东向展布的隆起带有关, 如孝泉—新场—合兴场古构造带, 是目前油气田分布较集中的区带^[8]。前面已经谈及, 这些隆起带是在燕山早期、中期左旋压扭应力场作用下形成的, 其本身是油气运移的长

表 2 川西坳陷主产层段岩心物性平均值数据

Table 2 Mean geophysical data of cores from the main productive intervals of the West Sichuan Depression

层位	气田	平均孔隙度/ %	平均渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	平均含水饱和度/ %
K _{1j}	新场 8 井	15.0~ 25.0	10~ 50 以上	
	新场	14.03(80) ~ 14.98(46)	0.554 7(30) ~ 1.5 以上(29)	64.71(16)
	孝泉	6.29(41) ~ 6.97(118)	0.147(38) ~ 0.194(93)	85.43(21)
J _{3p}	马井	10.4	0.5	
	合兴场	9.64	1.23	
	洛带	6.0~ 16.0(756)	0.08~ 0.04(756)	
J ₁ -J _{2s}	大兴西	2.69~ 7.26	0.01~ 0.34	
J _{3sn}	新场	6.75(11)	0.505(5)	
	孝泉	3.27(174)	0.082(118)	52.97(7)
	新场	8.17(761) ~ 8.23(199)	0.159(723) ~ 0.184(186)	52.73(94)
	孝泉	3.41(582) ~ 3.83(61)	0.095(501) ~ 0.116(55)	61.32(22)
J _{2s}	平落坝	8.52	0.004	31.8
	大兴西	5.26	0.36	74.2
T _{3x} ⁴	合兴场	4.28~ 6.31	0.06~ 0.12	46.4~ 54.43
	合兴场	2.6(511) ~ 2.75(706)	0.091(675) ~ 0.10(487)	42.17(144)
T _{3x} ²	中坝	5.62	< 0.2	20~ 40
	大兴西	3.20	0.11	72.4
	平洛坝	4.18	0.033	61.2

注: 括号内为样品数。

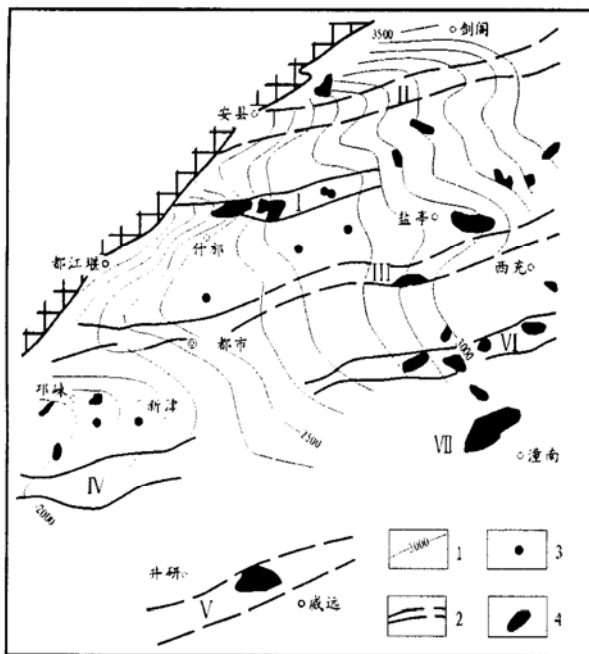


图 5 四川盆地西部燕山中、晚期构造带与油气田分布图

1. J 等厚线; 2. 燕山中晚期构造带; 3. 油气井; 4. 油气田

Fig. 5 Distribution of tectonic belts and oil/gas pools in the western part of the Sichuan Basin during the Middle-Late Yanshanian period

期指向地带; 另一方面, 隆起带上裂缝、微裂缝相对较发育。裂缝系统在致密储层中起着 3 方面的作用^[9] (表 3), 即增加部分孔隙度、提高渗透率及形成非均质性, 虽然对总孔隙度提高不大, 但对渗透率的增加很大, 因此对致密砂岩的储集能力有较大的改善, 有利于油气的富集成藏。

4 结论

a) 龙门山冲断带在印支期为压性应力场环境, 燕山早期、中期在左旋压扭应力作用下, 形成北东东向隆坳相间的构造带。

b) 压扭应力与挤压应力作用的不同点是: 1) 压扭性造山带的形成过程控制了盆地的变形特征; 2) 冲断带波及范围较窄, 变形强度大; 3) 冲断带具有较强的分区性; 4) 冲断带构造发育, 前缘坳陷中构造不太发育。

c) 压扭应力作用下的沉积展布特点是, 其隆、坳长轴与冲断带呈一定角度相交, 且锐角指向对盘运

表 3 川西坳陷致密储层裂缝对孔、渗率的贡献

Table 3 Contribution of dense reservoir fissures to porosity and permeability in the West Sichuan Depression

地区	井数	有裂缝样		无裂缝样		裂缝贡献率	
		孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度增加/ %	渗透率增加/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
新场	7	8.10	25.68	8.19	0.198	- 0.09	25.482
孝泉	5	6.58	34.94	5.10	0.177	1.48	34.763
川西	14	4.80	16.67	3.93	0.152	0.90	16.519

运动方向。在隆褶带上, 发育裂缝、微裂缝, 对致密砂岩的储集能力有较大的改善。

d) 龙门山冲断带、川西坳陷隆褶带有利于油气富集、成藏, 是寻找油气的有利地带。

参考文献:

- [1] 郭正吾, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [2] 李书兵, 等. 四川盆地晚三叠世以来陆相盆地演化史[J]. 天然气工业, 1999, 19(增刊).
- [3] 王金琪. 龙门山构造演化与山前带油气关系[J]. 地质学报, 1994, (3-4).
- [4] 陶海. 川西地区燕山期的发展演化及其油气勘探[J]. 石油实验地质, 1993, 15(4): 325-329.
- [5] 曹伟. 龙门山推覆构造带中段前缘构造浅析[J]. 石油实验地质, 1994, 16(1): 35-40.
- [6] 蔡立国. 四川前陆褶皱-冲断带构造样式与特征[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 115-120.
- [7] 饶丹. 川西坳陷上三叠统烃的运移相态研究[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 18-23.
- [8] 岳东明. 浅析川西坳陷燕山中晚期构造圈闭的有效性[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 336-340.
- [9] 符晓, 等. 四川盆地西部天然气资源与勘探开发[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2001.

DEFORMATION CHARACTERISTICS AND PETROLEUM GEOLOGICAL SIGNIFICANCES OF COMPRESSOR-SHEAR STRESS FIELDS IN THE WEST SICHUAN DEPRESSION

HUANG Ze-guang^{1,2}, LIU Guang-xiang², PAN Wen-lei², ZHAI Chang-bo²

(1. Petroleum Department, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Wuxi Research Institute of Experimental Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: By analysing on the formation, evolution and sedimentary distribution characteristics of the West Sichuan Depression since the Late Triassic and the deformation of the Longmenshan Thrust Belt, it was considered that the Longmenshan Thrust Belt was in the environment of compressive stress field during the Indosinian period, and formed the NEE-oriented and uplift-depression alternated tectonic belt in the Early-Middle Yanshanian period under the action of sinistral compressor-shear stress. The fissures and microfissures formed in the upfolded belts greatly improved the reservoir capacity of dense sandstone, and were favorable to the enrichment and accumulation of oil and gas.

Key words: tectonic deformation; sedimentary distribution; compressor-shear feature; thrust belt; the Longmenshan Mountain; the West Sichuan Depression

《石油实验地质》期刊排名大幅提升

据中国科学技术信息研究所最新发布的“2003年版中国科技期刊引证报告”,《石油实验地质》期刊影响因子为0.552,在“地质地理类”中列在第17位,在1534种中国科技论文统计源期刊中列在第191位;总被引频次为323,在“地质地理类”中列在第13位,在1534种中国科技论文统计源期刊中列在第400位。与2002年相比,在统计源期刊数量增加的情况下,我刊仍然取得了骄人的成绩,排名有了大幅度的提升,学术地位和影响力有了很大的提高。

本刊编辑部