

文章编号: 0253-9985(2007)01-0043-08

# 川西地区上三叠统异常流体压力的主要形成机制

王震亮<sup>1,2</sup>, 李耀华<sup>3</sup>, 张健<sup>3</sup>

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

(2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

(3. 中国石油天然气股份有限公司 西南油气田分公司, 四川 成都 610051)

**摘要:** 川西地区上三叠统异常压力发育。立足川西地区现今储层内实测地层压力的分布特点, 综合分析了欠压实作用、生烃作用和构造挤压作用在异常压力形成中的作用。研究认为, 川西地区上三叠统的沉积作用和岩性组合有助于形成欠压实作用。来自综合压实曲线的证据表明, 上三叠统内欠压实作用仍然存在, 并自侏罗纪末开始引起了较大幅度的异常压力。因须家河组渗透性较差, 生烃作用特别是天然气的大量生成极有可能导致地层压力的快速增长, 但具体幅度取决于欠压实增压的持续时间和流体体系的封闭程度等因素。在构造应力充分释放区, 构造挤压作用难以引起流体增压; 而在应力缓慢释放区, 处于较为封闭体系内的流体承担着大部分上覆负荷, 构造挤压引起的流体增压所起的贡献占流体异常压力实测值的 80% ~ 100%。构造挤压增压的影响主要发生于喜马拉雅构造运动期间。

**关键词:** 异常流体压力; 欠压实作用; 生烃作用; 构造挤压作用; 压力成因; 上三叠统; 川西地区

**中图分类号:** TE112.1

**文献标识码:** A

## Analysis on main formation mechanism s of abnormal fluid pressure in the Upper Triassic West Sichuan area

Wang Zhenliang<sup>1,2</sup>, Li Yaohua<sup>3</sup>, Zhang Jian<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

(2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

(3. Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China)

**Abstract** The overpressured gas reservoirs are common in the Upper Triassic strata Western Sichuan basin. On the basis of the distribution of measured reservoir pressures in the Western Sichuan basin, the effects of unconsolidation, hydrocarbon generation, and tectonic compression on the formation of abnormal pressure are analyzed. The analysis indicates that the Upper Triassic sedimentation and lithologic association are conducive to the formation of compaction. The evidence from compaction curves also indicates that the undercompaction since the end of Jurassic has caused a highly abnormal pressure and its effect still exists in the Upper Triassic strata. Owing to the low permeability in the Xujiahe Formation, the rapid buildup of reservoir pressure is most likely interpreted to be caused by hydrocarbon generation, especially the generation of larger amount of gas. The actual pressure increment depends on such factors as the duration of pressure increase caused by undercompaction and the closing degree of fluid system. In the areas with rapid tectonic stress relief, the tectonic compression is unlikely to induce fluid pressure buildup. In the areas with slow tectonic stress relief, the fluid within the closed system bears most of overburden load, the abnormal pressure caused by tectonic compression accounts for 80~100% of measured pressure data. The pressure increase by tectonic compression occurred mainly during the period of Himalaya orogeny.

收稿日期: 2006-07-20

第一作者简介: 王震亮 (1966-), 男, 教授、博士生导师, 油气运移与成藏、盆地流体动力学

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目 (IRT0559)

**Key words** abnormal fluid pressure; undercompaction; hydrocarbon generation; tectonic compression; genesis of pressure; Upper Triassic; West Sichuan area

本文所谓的川西地区上三叠统, 主要指广义的须家河组。它是一套陆相碎屑岩沉积体系, 其主要岩性组合为泥岩、砂泥岩互层, 夹有煤线, 沉积厚度 1 000~4 000 m。目前主要根据岩性变化, 自下而上将其分为 5 段。其中须一、三、五段以泥质岩为主, 须二、四段则以砂岩为主。

川西地区是发育在中三叠世海相褶皱盖层基底之上、自晚三叠世至今呈 NE-SW 向展布的前陆盆地。其西界为龙门山推覆构造带, 东与川中平缓断褶带为邻。经历了印支、燕山、喜马拉雅三大构造旋回的作用和演化, 盆地形成了目前的构造格局。作为川西地区的主体, 川西坳陷在构造上可进一步划分为龙门山中-北段前缘构造带、梓潼-剑阁凹陷、绵竹-苍溪低幅隆起带、龙门山南段前缘构造带、成都凹陷低缓构造带和龙泉山-熊坡断褶带, 其西北、北部分别为龙门山、米仓山冲断-褶皱带。特别是印支构造旋回的晚幕活动使川西地区大面积抬升, 到侏罗纪时, 沉积环境已转变为河流相。炎热干燥的古气候使夷平面之上沉积的巨厚侏罗纪碎屑沉积物呈现红色, 现今大量出露地表。因燕山晚期以来, 川西地区遭受了大规模的构造抬升与地层剥蚀, 使得现今地层发育不连续, 从而给本地区异常压力成因的评价带来了很大困难。川西地区上三叠统异常地层压力发育, 甄别其形成机制, 对于进一步深化该地区的天然气运移、成藏研究, 促进天然气勘探工作, 具有重要意义<sup>[1~3]</sup>。

## 1 现今异常压力的分布

根据川西地区须家河组 ( $T_{3x}$ ) 及其以上地层砂岩储层内压力的实测结果, 地层压力在纵向上具有明显的分带性<sup>[4]</sup>, 具体表现为: 在上侏罗统遂宁组 ( $J_3s$ ) 以上为静水压力, 属于常压带; 其下地层内一般开始出现异常流体压力, 并在部分地区的须家河组内出现高压或超高压现象。

平面上, 川西坳陷须家河组的高压中心位于川西北部。以须家河组二段 ( $T_{3x^2}$ ) 为例 (图 1), 区内超压的中心位于老关庙 (关 6 井)、文兴场 (文 7 井)、柘坝场 (柘 1 井)、白龙场 (龙 7 井)、思依场

(思依 1 井)、八角场 (角 13 井)、中台山 (台 18 井)、秋林 (秋 2 井)、金华镇 (金 1 井) 等构造所在地区, 其压力系数均在 1.8 以上, 最大可达 2.1 (老关庙-文兴场构造)。由超压中心向西北方向, 压力系数递减较快; 而向南、西南、东南方向递减较慢。甚至在隆丰场 (隆丰 1 井)-丰谷镇 (丰谷 1 井) 一线, 还存在一个相对高压带, 其压力系数达 1.7, 高于其相邻地区的 1.5~1.6。此外, 在研究区南部的龙泉山断裂附近, 地层压力系数明显降低, 且其等值线被明显错开, 显示了该断裂带对地层压力的泄漏作用。

分析认为, 造成盆地内大规模超压的机制为欠压实作用和生烃作用, 构造挤压作用也将发生积极的作用。因此, 本文重点就欠压实作用、生烃作用和构造挤压作用对川西地区异常压力形成的影响进行分析。

## 2 欠压实作用与超压的形成

### 2.1 欠压实作用赖以存在的基础——地质证据

川西地区上三叠统的沉积作用和岩性组合有助于形成欠压实作用。

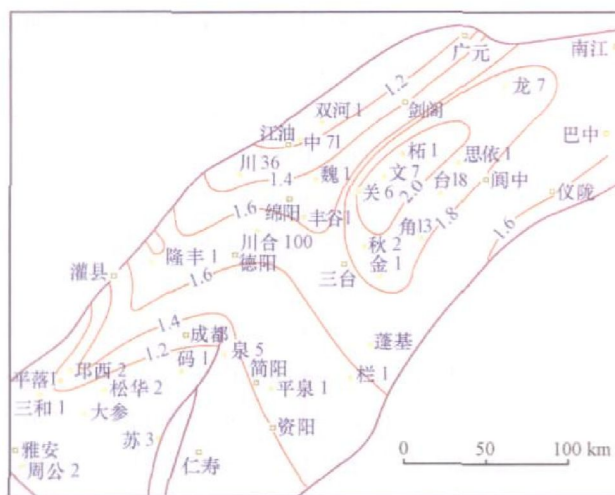


图 1 川西地区须家河组二段 ( $T_{3x^2}$ ) 砂岩实测地层压力系数分布<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Distribution of pressure coefficient measured in the 2nd member sandstones Xujiahe Formation, West Sichuan area

### 1) 沉积厚度巨大

川西地区位于龙门山前陆盆地的沉积中心, 上三叠统沉积厚度巨大。如现今超压发育的魏城-白龙场地区, 须家河组厚 1 000~1 700 m; 九龙山地区虽最薄, 也近 600 m。

### 2) 泥质岩层发育

须家河组内的须一段、须三段、须五段都有厚层泥质岩发育。如隆丰 1 井须三段—须五段最厚达 900 m, 泥质含量在 60% 左右。梓潼凹陷须一段—须二段泥质岩平均累计厚 126 m, 泥岩含量达 21%; 须三段—须五段泥质岩平均累计厚约 370 m, 占 40% 左右。

### 3) 沉积速率快

从川西地区晚三叠世—白垩纪的沉积速率分布, 晚三叠世和晚侏罗世期间, 川西地区的沉积速率最大。如晚三叠世时, 沉积速率高达 408 m/Ma, 沉积负荷的快速增加, 导致上覆负荷对目的层的压实要求与岩石实际排水能力间的不平衡, 故在成岩作用早期极易形成明显的异常压力<sup>[5]</sup>。

## 2.2 欠压实作用的确认

前人认为, 欠压实作用形成的超压在印支末期的构造运动中散失<sup>[6-7]</sup>; 或因受成岩作用强烈的影响, 地层中的机械压实作用现象不明显。

需要指出, 在进行压实研究时, 前人往往单纯根据声波时差读值确定欠压实程度。但声波测井往往会受到某些因素的影响, 如岩性、井径、岩石成分、含气、裂缝等, 从而引起读值甚至压实趋势的误差。有鉴于此, 我们采用了综合压实曲线对比法<sup>[8]</sup>, 以便更好地研究压实规律。根据作者等编制出的川西地区 30 余口钻井的综合压实曲线 (有声波时差、电阻率等曲线), 发现大部分井在遂宁组底部—沙溪庙组以下明显表现为欠压实段, 欠压实段的形态呈高、低起伏。声波时差和电阻率的同步变化说明了深部欠压实作用的存在。

根据泥岩测井密度、钻井  $dc$  指数和泥浆密度编制了 C-H-100 井的泥岩综合压实曲线 (图 2)。需要说明的是, 泥岩密度直接反映其压实程度; 用  $dc$  指数判别欠压实和异常高压的依据是, 在正常压实情况下,  $dc$  指数随埋深的增加而增大,

遇高压层段则出现低异常; 而平衡钻井所需的泥浆密度则反映了孔隙压力的高低。由图 2 可见, 该井处的正常压实段位于蓬莱镇组 ( $J_3p$ ) 内, 从地表至 1 150 m 深处,  $dc$  指数和泥浆密度都呈逐渐增加趋势, 反映地层的压实和固结程度逐渐提高。从 1 150~2 450 m (上沙溪庙组底),  $dc$  指数明显偏低, 表面上看有可能是欠压实作用造成的, 但来自泥岩密度逐渐增加 (孔隙度逐渐减小) 的信息说明岩石的压实作用继续进行, 否定了欠压实的存在。从 2 450~4 250 m, 尤其是 3 000~4 250 m 之间 (须五段至须二段),  $dc$  指数降至全井最低水平 (1.25~1.30), 泥岩密度也大幅度降低, 钻井所使用的泥浆密度达到最高幅度 ( $1.9 \text{ g/cm}^3$ ), 说明该井段内存在欠压实作用, 且与超压的形成之间有着密切联系。而在 4 250~5 300 m (上三叠统底部), 泥浆密度明显降低, 泥岩密度明显升高, 并且与浅部的正常压实趋势线吻合在一条直线上, 说明压实作用重又进行, 此处出现的超压应与欠压实无关。

区内其他地区压实曲线的情况与 C-H-100 井有一定共同之处, 说明即使在川西地区一定深度之下的地层段内, 特别是须家河组内, 压实作用仍是形成超压的重要因素。

## 2.3 砂、泥岩互层的岩性组合有利于形成压力封闭体系

相对封闭的封隔体是异常压力赖以形成、保持的重要条件。川西地区上三叠统良好的岩性组合为压力封隔体的形成提供了天然条件。研究发现, 上三叠统 3 套泥质岩 ( $T_3x^1$ ,  $T_3x^3$  和  $T_3x^5$ ) 本身构成了一个完整的封闭体系, 中间夹持的两套砂岩层 ( $T_3x^2$  和  $T_3x^4$ ) 被这些泥岩组成的一系列封隔面所封闭, 有利于流体压力的保持和增长。

## 2.4 欠压实在超压形成过程中的作用

研究表明, 欠压实作用不仅是直接形成地质历史时期超压的主要原因之一, 同时压力封闭体系 (低渗透层) 的存在也有利于促进其他因素在超压形成中的作用。综合分析表明, 上三叠统内, 因欠压实作用产生的过剩压力最盛于侏罗纪末, 但在历次构造抬升、地层剥蚀活动中逐步消失<sup>[4]</sup>。

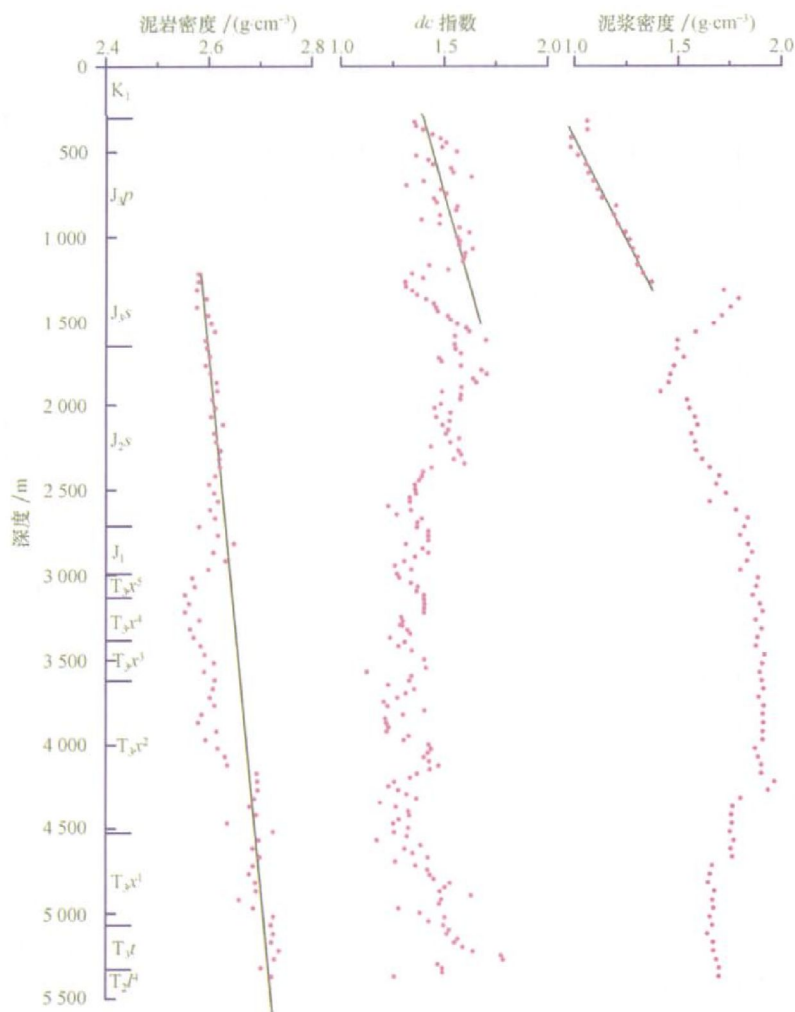


图 2 C-H-100 井泥岩综合压实曲线

Fig. 2 Synthetic compaction curves of mudstone in well C-H-100

### 3 生烃作用与超压的形成

#### 3.1 生烃作用与异常高压的关系

上三叠统内巨厚的暗色泥岩和煤层,在埋藏、成岩过程中将生成大量烃类物质,特别是天然气。处于封隔体系内的天然气,将给孔隙壁形成一个附加的气体压力,从而引起压力的增高。前人大多认为,川西地区上三叠统内天然气不断生成而又无明显的二次运移是造成压力异常的主要原因,天然气的体积膨胀是川西坳陷地层增压的主要机制。

为了更好地分析生烃作用与超压形成的关系,有必要从须家河组的生烃潜力及其与超压分布的对比入手进行研究。据研究,须一段—须三

段的大量生烃作用开始于侏罗纪末,而须五段在白垩纪末也开始大量生烃。从川西地区上三叠统总生气强度与地层压力系数的对比(图 3)看,上三叠统在历史上的生烃总量十分可观。如在位于龙门山南段的生烃中心地区,总生气强度可达  $200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  以上;而川西北部(如梓潼凹陷)上三叠统的总生气强度也高达  $20 \times 10^8 \sim 50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。从理论上讲,生烃强度大的地区,其对应的地层压力系数也应较大。但由图 3 可见,虽然总体上二者之间呈正相关关系,但高生烃强度所对应的生烃中心与异常压力中心分布之间并不一致,说明生烃作用在川西地区异常地层压力形成中的贡献较为复杂。

#### 3.2 生烃作用对异常压力形成的贡献

徐国盛等曾在一系列假设条件下定量评价了



分析认为,因川西地区须家河组渗透性总体上较差,生烃作用特别是天然气的大量生成极有可能导致地层压力的增长。但因受欠压实增压的持续时间、流体体系的封闭程度等因素的制约,生烃作用在超压形成中的贡献大小及历史时期中能否成为主要的增压机制尚需进一步探讨<sup>[9~11]</sup>。

## 4 构造挤压与超压的形成

### 4.1 现今地应力状态

前人在研究川西、川中地区须家河组裂缝的发育和分布特征时,曾对本地区的地应力场情况进行了分析,计算出多个含油气构造的最大主应力值  $\sigma_1$  (表 2)。由表可见,川西地区上三叠统现今构造应力场可分为两种类型:一是以平落坝、中坝等构造为代表的应力充分释放区,其褶皱系数较大,地层的变位强烈;二是以老关庙、柘坝场、八角场、金华镇等构造为代表的应力缓慢释放区,构造的褶皱系数小,岩石变位微弱。龙门山和秦岭—大巴两大造山带的前端交锋处(即梓潼凹陷的老关庙、柘坝场和文兴场一带)是川西地区现今最大主应力集中区。

### 4.2 现今地应力与流体压力分布间的对比

对比最大主应力和流体压力系数分布(图 4),发现二者的等值线基本呈同步变化,高压区与构造应力集中区基本重合,低压区大多为构造应力低值区。其中,老关庙、魏城、柘坝场一带地层流体压力和最大水平主应力最大,向川西南部、川西—川中过渡带二者逐渐减小并趋于发散,至龙门山前迅速降低。二者之间较为紧密的对应关系有可能暗示,构造挤压与流体增压之间存在密切的

成因联系。

### 4.3 构造挤压引起流体增压的理论分析

这里分构造和缓期与构造活动期进行讨论。在构造相对和缓期,岩石的上覆负荷应力最大,主要发生垂向上的体变,水平应力仅起到围限作用。而在构造活动期,水平方向上的最大主应力超过上覆负荷应力,岩石主要发生水平方向的挤压,并引起岩石的侧向压实作用。故构造挤压能否引起流体压力的进一步增长,主要取决于水平方向上构造主应力与上覆负荷应力的相对大小。

当地下岩石遭受构造挤压时,其总应力状态包括两部分:偏应力主要引起岩石变形;平均应力则控制岩石的体变。故 Terzaghi 有效应力方程可改为:

$$P_f = \sigma - \delta \quad (1)$$

式中:  $P_f$  为流体压力,  $\delta$  为有效应力,  $\sigma$  为  $xoz$  (纵向) 剖面上的平均应力。据此可分析构造挤压引起的流体压力大小。

### 4.4 评价结果

现今上三叠统构造应力对流体增压力的计算结果见表 3。其中,表内第 5 栏为无因次的应力比例系数 ( $P/\sigma_2$ ),代表上覆负荷应力在流体、骨架之间的比例分配,当流体压力为静水压力时,该比值为 0.8 左右,该值越大,说明地下流体所处的体系越封闭。根据这一比值,可将川西地区应力分布格局分为构造应力充分释放区和缓慢释放区。其中,中坝、平落坝、三和场、大兴西、汉王场、三苏场等构造处的应力比例系数为 0.75~0.92,流体处于开放体系,构造应力充分释放,构造挤压作用难以引起流体增压。而在柘坝场、老关庙、文兴

表 2 川西—川中地区部分含油气构造应力场特征

Table 2 Stress field characteristics in some oil-gas bearing structures of central and western Sichuan area

| 构造名称 | 褶皱系数 $1/(m \cdot km^{-2})$ | $\sigma_1$ / MPa | 应力状态  | 构造名称 | 褶皱系数 $1/(m \cdot km^{-2})$ | $\sigma_1$ / MPa | 应力状态  |
|------|----------------------------|------------------|-------|------|----------------------------|------------------|-------|
| 中坝   | 16.90                      | 68.26            | 充分释放区 | 老关庙  | 4.40                       | 201.76           | 缓慢释放区 |
| 平落坝  | 10.27                      | 102.53           |       | 柘坝场  | 1.15                       | 189.23           |       |
| 三和场  | 12.96                      | 130.41           |       | 丰谷镇  | 1.67                       | 170.30           |       |
| 高家场  | 15.00                      | 46.50            |       | 文兴场  | 1.46                       | 159.69           |       |
| 大兴西  | 27.70                      | 85.60            |       | 魏城   | 1.91                       | 190.56           |       |
| 汉王场  | 6.98                       | 64.66            |       | 白龙场  | 2.31                       | 144.26           |       |
| 三苏场  | 33.30                      | 65.64            |       | 八角场  | 0.67                       | 137.67           |       |
| 龙泉山  | 25.00                      | 57.18            |       | 金华   | 1.25                       | 147.98           |       |

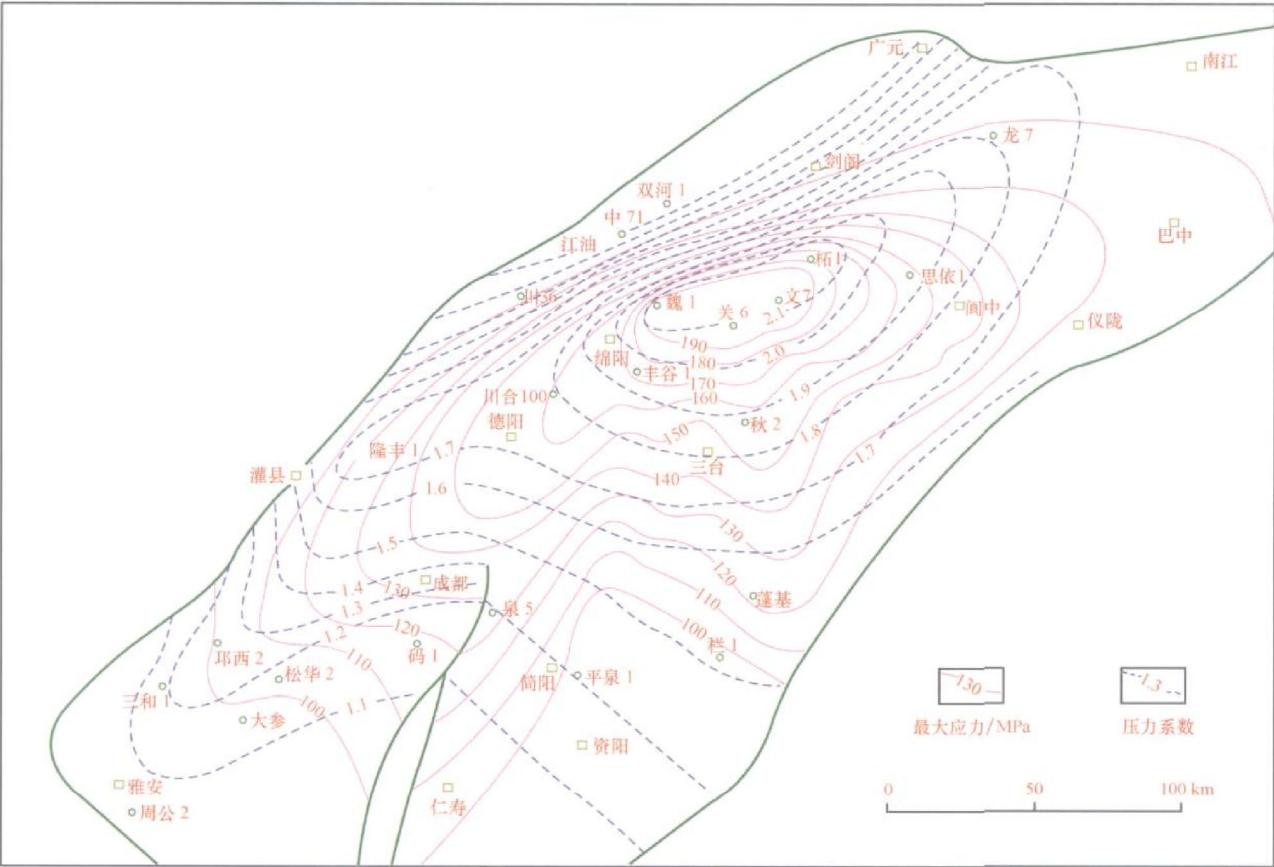


图 4 川西地区上三叠统内最大主应力与流体压力系数对比

Fig. 4 Maximum principal stress and fluid pressure coefficient in the Upper Triassic West Sichuan area

表 3 川西地区各构造范围内构造应力对地层压力的贡献

Table 3 Relationship between structural stress and fomation pressure in the different structures of West Sichuan area

| 应力分区  | 构造名称 | 层位       | $\sigma_1$ /MPa | $P/\sigma_2$ | $\delta$ /MPa | 构造增压 /MPa | 计算压力系数 | 实测压力系数 | 构造增压贡献 /% |
|-------|------|----------|-----------------|--------------|---------------|-----------|--------|--------|-----------|
| 缓慢释放区 | 柘坝场  | $T_3x^4$ | 189.23          | 3.56         | 45.57         | 96.43     | 2.13   | 2.18   | 108       |
|       | 老关庙  | $T_3x^2$ | 201.76          | 3.78         | 55.64         | 93.81     | 2.07   | 2.08   | 105       |
|       | 文兴场  | $T_3x^2$ | 159.69          | 2.36         | 50.65         | 78.96     | 1.70   | 2.17   | 67        |
|       | 魏城   | $T_3x^4$ | 190.56          | 6.71         | 55.64         | 83.05     | 2.05   | 2.08   | 109       |
|       | 丰谷镇  | $T_3x^2$ | 170.30          | 1.92         | 50.65         | 85.33     | 1.80   | 1.59   | 161       |
|       | 金华   | $T_3x^2$ | 137.67          | 3.63         | 43.12         | 60.45     | 1.69   | 1.85   | 83        |
| 充分释放区 | 八角场  | $T_3x^2$ | 147.98          | 3.16         | 46.57         | 64.39     | 1.86   | 1.82   | 101       |
|       | 中坝   | $T_3x^2$ | 68.26           | 0.85         | 32.02         | 29.30     | 1.15   | 1.12   | —         |
|       | 平落坝  | $T_3x^2$ | 102.53          | 0.92         | 38.27         | 53.58     | 1.41   | 1.19   | —         |
|       | 三和场  | $T_3x^2$ | 103.41          | 0.84         | 38.27         | 58.04     | 1.39   | 1.08   | —         |
|       | 大兴西  | $T_3x^2$ | 85.60           | 0.82         | 34.83         | 40.81     | 1.20   | 1.10   | —         |
|       | 汉王场  | $T_3x^2$ | 64.66           | 0.85         | 29.65         | 38.15     | 1.15   | 1.07   | —         |
|       | 三苏场  | $T_3x^4$ | 65.64           | 0.75         | 32.02         | 32.12     | 1.10   | 1.04   | —         |

场、魏城、丰谷镇、金华、八角场等构造, 应力比例系数高达 1.92~ 6.71, 应力释放困难且缓慢, 存在较为封闭的流体体系, 流体承担着大部分上覆负荷(可占上部负荷的 66% ~ 87%), 有利于构造应

力的积聚与流体增压。

将计算出的构造增压幅度与砂岩实测压力系数进行对比可以发现, 应力缓慢释放区计算出的流体压力与实测压力十分接近, 贡献值高达

80% ~ 100% (部分值高于 100%, 应与实际地层体系难以实现理论上的完全封闭、增大了计算结果与现今实际压力之间的差别有关)。而在应力充分释放区内计算出的流体压力系数则明显大于实测压力系数, 说明在流体体系开放区构造增压机制与岩石实际蓄压能力间明显不匹配, 理论上的增压幅度难以实现。

#### 4.5 地质时期的古地应力及其增压效应

前人有关声发射 (ESR) 的测试结果显示, 川西地区从印支期—燕山期—喜马拉雅期, 最大主地应力不断增大 (表 4)。研究发现, 在印支期和燕山期, 岩石的最大水平主应力远小于上部负荷应力, 故此时川西地区的岩石变形以垂向压实为主; 到喜马拉雅期, 部分地区的最大主应力转为水平方向, 主应力值超过上覆负荷应力, 岩石的变形主要表现为水平压实。

这说明, 川西地区构造挤压作用对流体压力的影响是从喜马拉雅期开始的, 印支—燕山期几乎无影响。只有在喜马拉雅期, 强烈的构造挤压作用才对整个川西地区, 特别是川西北部的流体压力产生了巨大影响。

### 5 结论和认识

1) 川西地区上三叠统的沉积作用和岩性组合有助于形成欠压实作用。来自综合压实曲线的证据表明, 上三叠统内欠压实作用仍然存在, 并自侏罗纪末引起了异常压力。

表 4 川西地区须家河组二段砂岩在不同时期的最大主应力实测值

Table 4 Measured values of maximum principal stress in different orogenic epoch in the 2<sup>nd</sup> member sandstone of Xujiahe Fm., West Sichuan area

| 井号或地区  | MPa         |              |              |
|--------|-------------|--------------|--------------|
|        | 印支期         | 燕山期          | 喜马拉雅期        |
| 平落 2 井 | 24.01       | 46.72        | 83.21        |
| 平落 5 井 | 19.78       | 42.66        | 70.79        |
| 鸭子河    | 2.10~ 4.80  | 6.80~ 24.90  | 25.74~ 48.90 |
| 青林 1 井 | 8.27~ 13.59 | 12.22~ 17.49 | 23.90~ 30.56 |

2) 因须家河组渗透性较差, 生烃作用特别是天然气的大量生成极有可能导致地层压力的增长, 但具体幅度受欠压实增压的持续时间、流体体系的封闭程度等因素的制约。

3) 在构造应力充分释放区, 构造挤压作用难以引起流体增压。而在应力缓慢释放区内, 存在较为封闭的流体体系, 流体承担着大部分上覆负荷, 构造挤压引起的流体增压所起的贡献占实测值的 80% ~ 100%, 但构造挤压增压的影响主要发生于喜马拉雅期。

致谢: 西北大学地质学系硕士研究生孙明亮、张立宽、李萍等曾先后参与部分基础工作, 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探开发研究院在课题执行过程中给予了大力支持, 在此一并致谢!

#### 参 考 文 献

- 王震亮, 张立宽, 施立志, 等. 塔里木盆地克拉 2 气田异常高压的成因分析及定量评价 [J]. 地质论评, 2005, 51(1): 55~ 63
- 叶加仁, 郝芳, 陈建渝. 辽河盆地大民屯凹陷流体动力场特征 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 128~ 132
- 王震亮, 朱玉双, 耿鹏, 等. 准噶尔盆地西北缘现今水动力分布特点 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 348~ 352
- 王震亮, 孙明亮, 张立宽, 等. 川西地区须家河组异常压力演化与天然气成藏模式 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(4): 433~ 439
- Smith J E. The dynamics of shale compaction and evolution of pore-fluid pressures [J]. Mathematical Geology, 1971, 3(3): 239~ 263
- 徐国盛, 刘中平. 川西地区上三叠统地层古压力形成与演化的数值模拟 [J]. 石油实验地质, 1996, 18(1): 117~ 126
- 张闻林, 刘埃平. 川西北地区上三叠统异常高压探讨 [J]. 天然气勘探与开发, 2002, 25(2): 7~ 12
- 王震亮, 孙明亮, 耿鹏, 等. 淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 32~ 34
- 赵永胜. 川西前陆盆地上三叠统储层流体动力学机制 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(3): 204~ 209
- Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1 023~ 1 041
- Law B E, Uhlir G F, Slavov I. Abnormal pressure in hydrocarbon environments [M]. Tulsa Oklahoma USA: AAPG, 1998. 1~ 104

(编辑 李 军)