

川西地区上三叠统地层 古压力形成与演化的数值模拟^①

徐国盛 刘中平

(成都理工学院石油系, 610059)

本文将川西上三叠统地层孔隙裂缝的发展变化——有机质的成熟过程——原始地层压力的形成演化当作一个整体系统来研究, 探索了二者在时间和空间上相互匹配、相互制约的关系。研究认为上三叠统原始地层压力的形成演化以喜山期构造运动为界分为早晚两期, 早期在其多种成因机制中, 烃类的生成是原始地层压力形成演化的最主要因素, 表现为循序渐进的增压过程, 并以此定量计算了喜山运动前各阶段原始地层压力的增长情况; 晚期主要表现为喜山期强烈的侧向挤压应力对先期形成的地层压力进行改造, 通过对该区构造应力场的模拟, 半定量地说明了侧向挤压应力对原始地层压力的改造程度, 并确认喜山期构造运动的差异改造是造成目前地层压力分布不一致的直接原因。

关键词 致密碎屑岩 原始地层压力 形成演化 构造应力场 数值模拟

第一作者简介 徐国盛 男 31岁 讲师 石油地质

四川盆地西部地区上三叠统碎屑岩储层是一套低孔、低渗、高含水饱和度的非常规致密砂泥岩层。尤其是广泛发育的大面积异常高压独具特色(图1)。高压、超高压区位于川西北

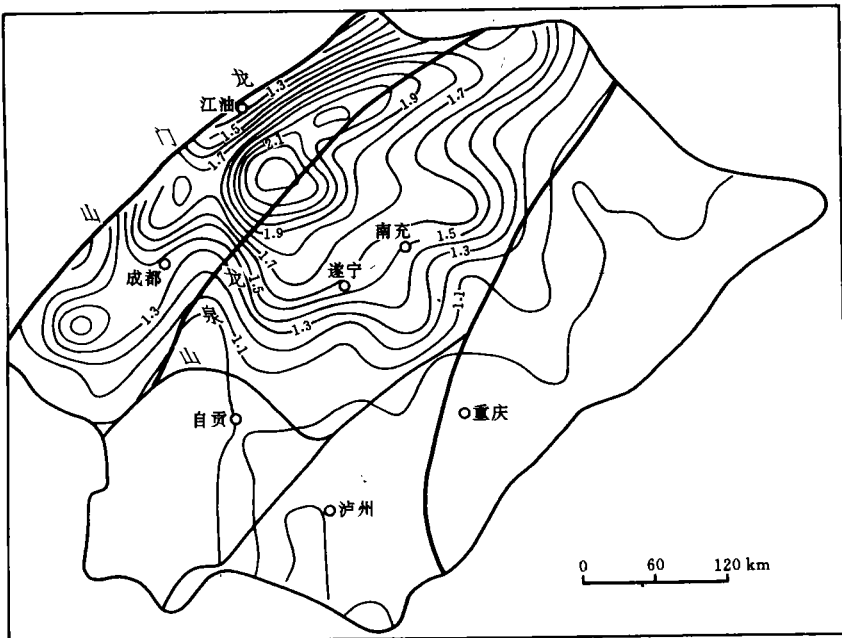


图1 四川盆地上三叠统储层地层压力系数等值线图

① “八五”国家重点科技攻关项目主要内容

部及川中西北部地区(压力系数 1.80~2.10);川西中部及川中腹地为大片高压分布区(压力系数 1.50~1.90),而龙门山山前带及龙泉山地区又为正常压力区(压力系数 1.05~1.10);由此看来,原始地层压力在四川中西部地区表现为明显的分区性及内幕分割性。

如此高的异常压力及不均一的分布格局,其形成机理及控制因素则是本文所要研究的主要问题,同时本文对古压力的形成演化作动态的数值模拟。

1 古地层压力形成与演化地质模型的建立

异常地层压力的研究涉及到广泛的石油地质各领域,地压异常与盆地的沉积构造史、成岩变化史、油气生成史、油气运移与聚集成藏等动态历史存在着极为密切的联系。为此,研究原始地层压力的变化过程就必须从上述各演化历史出发,分别讨论其对地层压力变化过程的影响程度。

据 Colin Barker(1987)研究,地层在逐渐埋深过程中,古地温逐渐升高,烃类成熟,因天然气的生成而造成地层中流体压力的变化。他曾提出一理想系统的模型,其系统体积可变,但与外界又是隔离的,即流体不容易进出。此模型适合于川西地区低渗透性沉积物古压演化情况。据这一理论及综合考虑地史期各种因素作用提出了川西上三叠统原始地层压力形成演化的地质模型。

川西上三叠统地层沉积时,由于快速沉降作用和由此产生的排流不畅,流体不能及时排出,发育了早期“欠压实”超压。但因缺少区域性膏盐层作盖层,且须三段末的“安县运动”和须五段末的印支晚幕运动使该区抬升遭受剥蚀,这对“欠压实”超压的保持十分不利,又距今二亿年左右,显然是不容易达到的。事实上,这种“欠压实”超压到早侏罗世沉积时已基本消失殆尽。进入中侏罗世后,烃类物质不断成熟生成天然气(图 2)。而川西地区上三叠统地层此时岩层已较致密,孔隙度一般为 10%左右(图 3),且第二次排水高峰期已过,天然气的不断生成造成孔隙中流体体积的急剧膨胀,生成的天然气不易在大范围内运移或散失,在地层孔隙度较低条件下势必引起流体压力的升高,形成本区继“欠压实”之后的第二次超压,它与第一次“欠压实”超压并无继续关系。到下第三系沉积末,绝大部分有机质已成熟,天然气在广大区域大量生成,引发整个川西地区此时处于异常高压的环境。喜山运动来临时,强烈的构造运动对地层压力起破坏和改造作用,一方面因岩层破裂,地压由此释放;另一方面应力叠加于原先形成的地层之上,致使流体压力进一步升高。

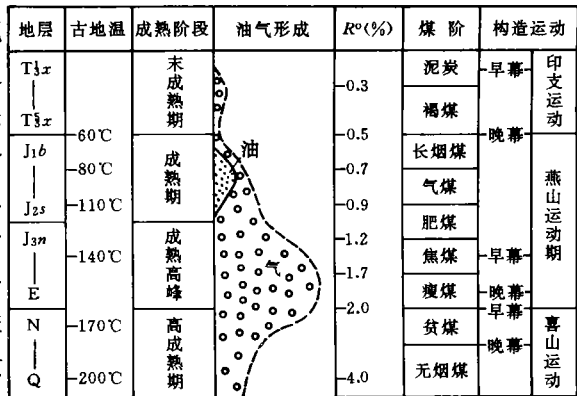


图 2 川西地区上三叠统源岩
油气形成演化示意图

水热增压作用也是形成川西上三叠统储层异常高压的一个原因,从利用牙形石色变程度和次生矿物包裹体所分析的须家河组底部古地温分布情况可知,高古地温带与异常压力

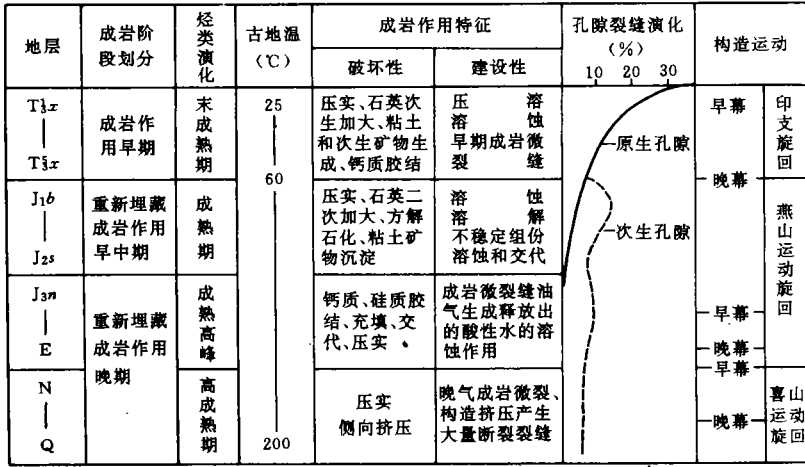


图 3 川西上三叠统地层成岩作用和孔隙裂缝演化关系图

分布区域非常近似，梓潼拗陷及川中西北部的八角场、金华镇、万年场地带是古地温最高区域，同样，该区域也是上三叠统储层高压—超高压分布地区。但水热增压不是本区主要的增压机制，因该区的增压期是在成岩作用较强后，泥页岩的矿物成份从须家河组到白垩系的剑门关组都以伊利石(绿泥石)为主，相当于孔隙水和矿物层间水绝大部分已排出期，只有少量束缚水，这说明水热增压只能起辅助作用。在古压形成演化的数值模拟中，水热增压幅度相对于生烃增压幅度很小可忽略不计。

为此，川西上三叠统储层原始地层压力的形成演化过程可归纳为：

- ①早期为沉积型异常地层压力发育和消失阶段(T_{3x1}—T_{3x5})；
- ②中期为充气型异常地层压力发育阶段(J_{1b}—E)；
- ③晚期为构造型异常地层压力发育和改造阶段(N—Q)。

2 古地层压力形成与演化的数值模拟

该区原始地层压力的形成演化以喜山期为界，分前后两大阶段。前阶段表现为循序渐进的生烃增压过程；后阶段则为强烈的侧向挤压对前期的古高压进行调整改造和破坏释放作用。

2.1 喜山期以前川西上三叠统古压的形成演化

川西地区上三叠统在快速沉降过程中，发育的“欠压实”异常压力至印支晚幕后已消失，此时烃类物质处于未成熟阶段，川西地区处于正常的静水压力环境，笔者以此作为增压的起点，开始计算增压的幅度，由于烃类的演化是本区主要的增压机制，所以计算中重点考虑因天然气的生成导致孔隙流体压力的变化情况。

2.1.1 孔隙流体压力的计算公式

根据前述构造沉积活动和有机质成熟阶段的划分结果，将原始地层压力的形成演化分三个阶段计算：中侏罗世沉积末、早白垩纪沉积末、老第三世沉积末，并且人为地把上三叠统

分为两个大的层段；须一、须二作一整体，须三作为该层的区域性盖层，须三、须四、五段作为一整体。这里以须一、须二层为例计算并代表整个上三叠统流体压力的变化。为简化计算，不妨作如下假说：

- ①早侏罗世沉积前，假设须一、二层为正常的静水压力环境；
- ②早侏罗世沉积前，假设须一、二层内还没有天然气生成；
- ③在各个沉积期间，假设须一、二层内生成的天然气并没有向外运移；
- ④地层在沉积埋藏过程中，假设其骨架密度不变。

下面以老关庙构造须一、二层在中侏罗世沉积末的生烃增压为例计算。

(1) 须一、二层在中侏罗世沉积末的厚度计算

由孔隙度的定义可得：

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t} \quad 1 - \Phi = \frac{V_s}{V_t} \quad (2-1)$$

假设研究对象是一个截面积等于 1 的柱状沉积物，则有：

$$\Phi = \frac{H_p}{H_t} \quad 1 - \Phi = \frac{H_s}{H_t} \quad (2-2)$$

那么：

$$H_s = (1 - \Phi) \cdot H_t \quad (2-3)$$

当柱状体沉积物的高度很小时，对(2-3)式取微分得：

$$dH_s = (1 - \Phi) \cdot dH_t$$

则

$$H_s = \int_{z_2}^{z_1} [1 - \Phi(z)] dz \quad (2-4)$$

在压实过程中，柱形沉积物的固体高度(H_s)是不变的，柱形体沉积物的总高度(H_t)变化取决于孔隙高度(H_p)的变化。

通过钻井资料可计算出现今须一、须二层的固体高度(H_{1s})：

$$H_{1s} = \int_b^a [1 - \Phi_1(z)] dz \quad (2-5)$$

中侏罗世沉积末，须一、须二层的固体高度(H_{2s})：

$$H_{2s} = \int_{h_1}^{h_2} [1 - \Phi_2(z)] dz \quad (2-6)$$

因

$$H_{1s} = H_{2s}$$

则

$$\int_b^a [1 - \Phi_1(z)] dz = \int_{h_1}^{h_2} [1 - \Phi_2(z)] dz \quad (2-7)$$

须一、二层系现今的孔隙度 $\Phi_1(z)$ 是已知的，取须一、二层系现今孔隙度的平均值，记为 Φ_p ，通过前述成岩作用和孔隙裂缝演化的研究；笔者可以取得须一、二层在中侏罗世沉积末的孔隙度 $\Phi_2(z)$ ，记作 φ 。

由(2-7)式积分得：

$$(b-a) \cdot (1 - \Phi_p) = (h_2 - h_1) \cdot (1 - \varphi) \quad (2-8)$$

$$h_2 - h_1 = \frac{(b-a)(1 - \Phi_p)}{1 - \varphi} \quad \text{记} \quad h_2 - h_1 = h$$

$$h = \frac{(b-a)(1-\Phi_p)}{1-\varphi} \quad (2-9)$$

参数说明: V_1 、 H_1 为地层总体积、总高度; V_p 、 H_p 、 V_s 、 H_s 为地层孔隙体积、孔隙高度、固体体积、固体高度; h_2 、 h_1 、 h 为须一、二层在中侏罗世末的底、顶界埋深及总厚度(m); b 、 a 为现今须一、二层的底、顶界埋深(m); Φ_p 、 φ 为须一、二层现今和中侏罗世末的孔隙度(小数)。

(2) 中侏罗世末须一、二层系内因天然气生成引起的增压计算

假设早中侏罗世沉积期间, 须一、二层的生气强度为 q , 圈闭闭合面积为 A , 生气量为 Q , 则:

$$Q = q \cdot A \quad (2-10)$$

① 设标准状况下气体的体积为 V_0 。

所谓标准状况, 即一般实验室温度为 0°C , 压力为 1 个大气压, 气体压缩因子为 1, 而中国矿场上温度为 20°C , 压力为 1 大气压, 气体压缩因子为 1。为便于比较, 矿场上所说的生气强度和生气量都是已换算成标准状况下的参数, 则有:

$$V_0 = Q = q \cdot A \quad (2-11)$$

② 设天然气在地层条件下的有效体积为 V_a 。

$$V_p = A \cdot h \cdot \varphi \quad (2-12)$$

$$V_w = A \cdot h \cdot \varphi \cdot S_w \quad (2-13)$$

$$V_a = V_p - V_w \quad (2-14)$$

V_p 为地层条件下总孔隙体积; V_w 为地层条件下水体所占的体积; V_a 为气体在地层条件下所占的体积。

③ 计算压缩因子和体积系数

笔者采用一个既精确有效又简单的计算气体压缩因子的方法。

$$F(Y) = a + \frac{Y + Y^2 + Y^3 + Y^4}{(1-Y)^3} - b \cdot Y^2 + c \cdot Y^d = 0 \quad (2-15)$$

式中:

$$a = -0.06125(p_r/T_r) \cdot \exp[-1.2(1-1/T_r)^2]$$

$$b = 14.74T_r^{-1} + 9.76T_r^{-2} + 4.58T_r^{-3}$$

$$c = 90.7T_r^{-1} - 242.2T_r^{-2} + 42.4T_r^{-3}$$

$$d = 2.18 + 2.8T_r^{-1}$$

$$Y = -a/z$$

(2-15) 式为隐式方程, 用迭代法求解, 具体步骤如下:

第一步: 取 $Y=0$ 作为初次估算

第二步: 用近似公式修正 Y

$$Y_{\text{新}} = Y_{\text{旧}} - \frac{F(Y_{\text{旧}})}{F'(Y_{\text{旧}})} \quad (2-16)$$

第三步: 用 $z = -a/Y_{\text{新}}$ 计算 $z_{\text{新}}$, 重叠第二步直到满意结果为止。

气体体积系数可由下式求得:

$$B_g = 3.447 \cdot T \cdot z \cdot 10^{-4} / p \quad (2-17)$$

$$p_r = p / p_c \quad T_r = T / T_c$$

p_c 、 T_c 分别为气体临界压力、临界温度; p_r 、 T_r 分别为气体对比压力、对比温度; p 、 T 分别为气体在地层条件下的压力、温度; z 、 B_g 分别为气体的压缩因子和体积系数。

④对生气增压作用,采用真实气体定律来计算:

由真实气体状态方程:

$$p_o \cdot V_o = z_o \cdot n \cdot R \cdot T_o \quad (\text{标准状况条件下}) \quad (2-18)$$

$$p_a \cdot V_a = z_a \cdot n \cdot R \cdot T_a \quad (\text{地层条件下}) \quad (2-19)$$

$$(2-18) \text{ 式得: } n = \frac{p_o \cdot V_o}{z_o \cdot R \cdot T_o} \quad (2-20)$$

$$\text{而 } V_o = Q \quad (2-21)$$

将(2-10)、(2-21)式代入(2-20)式:

$$n = \frac{p_o \cdot q \cdot A}{z_o \cdot R \cdot T_o} \quad (2-22)$$

此处假设 n mol 气体和地下水全部充满于地下的两个孔隙空间,则:

$$V_a = A \cdot h \cdot \varphi - A \cdot h \cdot \varphi \cdot S_w \quad (2-23)$$

由(2-19)式得:

$$p_a = \frac{z_a \cdot n \cdot R \cdot T_a}{V_a} \quad (2-24)$$

将(2-22)、(2-23)式代入(2-24)式得:

$$p_a = \frac{z_a \cdot p_o \cdot q \cdot T_a}{h \cdot \varphi \cdot (1 - S_w) \cdot z_o \cdot T_o} \quad (2-25)$$

再将(2-9)式代入(2-25)式:

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{z_a \cdot p_o \cdot q \cdot T_a \cdot (1 - \varphi)}{z_o \cdot T_o \cdot (b - a) \cdot (1 - \Phi_p) \cdot (1 - S_w) \cdot \varphi} \\ &= \frac{p_o}{z_o \cdot T_o} \cdot \frac{1}{(b - a) \cdot (1 - \Phi_p)} \cdot \frac{z_a \cdot q \cdot T_a \cdot (1 - \varphi)}{\varphi \cdot (1 - S_w)} \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$E_{op} = p_a \cdot 10^{-5} / (H \cdot 10^{-1}) \quad (2-27)$$

含水饱和度的计算公式:

$$\begin{aligned} A \cdot h \cdot \varphi - A \cdot h \cdot \varphi \cdot S_w &= B_g \cdot A \cdot q \\ S_w &= \frac{h \cdot \varphi - B_g \cdot q}{h \cdot \varphi} \end{aligned} \quad (2-28)$$

参数说明:

Q 为早中侏罗世沉积期间须一、二层的生气量(m^3); q 为早中侏罗世沉积期间须一、二层的生气强度(m^3/m^2); A 为某构造须一、二层的面积(m^2); p_0 、 T_0 、 z_0 为标准状况下的压力、温度、气体压缩因子; V_0 为标准状况下气体的体积(m^3); V_a 为地层条件下气体的体积(m^3); p_a 为地层条件下气体的压力(P_a); E_{OP} 为地层压力系数; T_a 为地层条件下气体的温度(K); z_a 为地层条件下气体的压缩因子; n 为气体的摩尔数; R 为气体常数。

2.1.2 参数选取说明

通过以上推导,得出计算层位某时期末的地层压力系数的公式为(2-26)和(2-27)式,下面介绍公式中参数的选取情况。

① p_0 、 T_0 、 z_0 为天然气在标准状况下的压力、温度、压缩因子,其值为:

$$p_0 = 101325(P_a) \quad T_0 = 293K \quad z_0 = 1$$

② b 、 a 、 Φ_p 分别为某层系目前的底、顶界埋深和孔隙度,其值可通过钻井和物性测试资料经加权平均处理后获得。

③ φ 、 T_a 是某层在某地史期末的孔隙度和温度。通过对成岩作用和孔隙裂缝的演化研究,可以获取该参数。孔隙度是根据杨家琦等^①的盆地压实模拟得出的孔隙度数据范围,再根据各地区的胶结、溶蚀等情况确定的;古地温是据韩应钧等^②利用镜质体反射率恢复平均古地温梯度方法反演出的古地温梯度计算的(表 1)

表 1 川西地区主要构造须一、须二层系各历史时期末的参数表

构造	时代	埋深(m)	古地温(°C)	孔隙度(%)	累积生气强度 ($10^8 m^3/km^2$)
老 关 庙	J ₂ 末	3239	137	8	1.14
	K ₁ 末	4803	153	6	10.1
	E 末	5149	162	4	13.5
平 落 坝	J ₂ 末	2327	120	10	2.3
	K ₁ 末		150	6~8	
	E 末	3537	160	5	24.5
中 坝	J ₂ 末	2388	127	12	1.5
	K ₁ 末	×	140	8~10	
	E 末	4188	150	6~7	22
合 兴 场	J ₂ 末	3567	130	7~9	5.5
	K ₁ 末	5317	160	6~7	40.5
	E 末	5567	165	5	46

④对于生气强度 q ,不同专家的研究结果差别很大,且没有一个全面的对该区各构造的生油情况的研究成果。参考前人的研究,选用各构造区域最新的有关生气量的研究成果,取

① 杨家琦、秦成明等. 龙门山前缘上三叠统主要含气层油气运聚与保存条件研究. 1990

② 韩应钧等. 龙门山前缘构造含油气研究报告. 1990

得该参数。

2.1.3 计算结果

根据前述的推导公式编制程序,通过计算机完成对地层压力的求解,输入原始数据便可计算出该区主要构造各层系在各个历史时期末的原始地层压力(见表2)。

表2 川西地区主要构造须一、二层各历史时期末的原始地层压力

构造	压力	中侏罗世末	早白垩世末	早第三世末	现今(实测)
老关庙	地层压力(MPa)	42.476	71.647	96.641	90.50
	压力系数	1.29	1.492	1.877	2.20(关6井)
平落坝	地层压力(MPa)	25.577		55.144	36.863
	压力系数	1.099		1.559	1.11(平落1井)
中坝	地层压力(MPa)	24.64		72.131	28.43
	压力系数	1.032		1.722	1.103(中1井)
合兴场	地层压力(MPa)	44.558	78.84	100.903	78.79
	压力系数	1.18	1.483	1.812	1.708(川合100井)

2.2 喜山期以后川西上三叠统古压的形成演化

前以述及,川西上三叠统地层异常高压形成演化的机理包括侧向构造挤压作用,但难知具体影响程度,这一节则通过对喜山期构造应力场的数值模拟来研究构造挤压对地层压力的影响。目前研究构造应用场主要有物理实验和数学模拟两种方法,而对地史时期构造应力场的模拟计算大多采用有限元法。如图4所示将模型划分为219个单元、139个结点、53个载荷结点,为防止计算中发生刚体位移,将其中几个结点约束住。其各单元剪应力计算结果如图5。

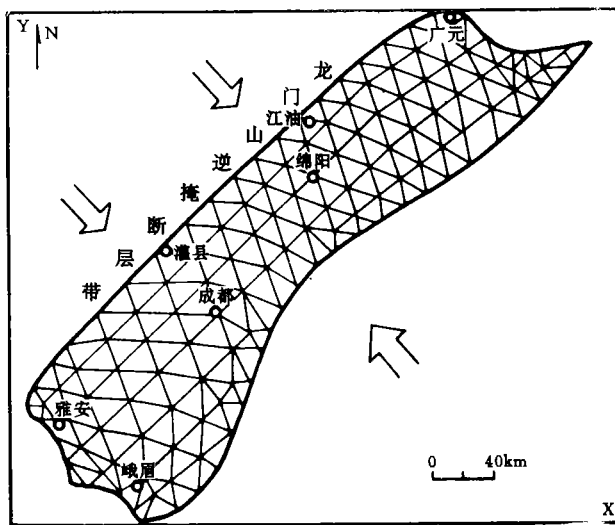


图4 川西喜山期构造应力场数学模拟分析图

川西喜山期构造挤压应力对原始地层压力产生广泛的影响。从图5可以看出,龙门山和龙泉山前缘为应力高值区,也是剪应力值最大区域。在地质历史时期中,构造应力可从以下三种方式释放。①派生次级隐状断层;②派生隐伏构造;③直接派生构造裂缝网络。这三种方式在川西地区均有表现,在中坝、平落坝等构造应力强烈地区,派生隐伏断层和大量构造裂缝,压力释降;而老关庙、合兴场等地区,派生构造裂缝网络,压力大范围均衡下降;而八角场地区,构造应力较弱,构造裂缝不发育,构造应力部分作用于孔隙流体压之上,使地层压力在原有高压(63.565MPa)基础上又有所上升(现今地压73.13MPa)。

为了更清楚地说明喜山期构造应力对川西上三叠统地层压力的影响,作出了现今地壳压力系数与老三世末的压力系数差值等值线图(图 6),老第三世末发生的喜山运动导致龙门山推覆体大规模向前推进、超覆,由于强烈挤压,在其前缘形成紧密褶皱,如中坝、平落坝构造,裂缝发育,早期富集于孔隙中的天然气相互连通,压力均衡下降或部分油气散逸,压力适量泄放;而远离龙门山推覆体的八角场等构造,强烈的挤压并未使构造破坏,相反侧向挤压应力再度强加于孔隙流体之上,压力进一步增强,达到现今的超高压状态。

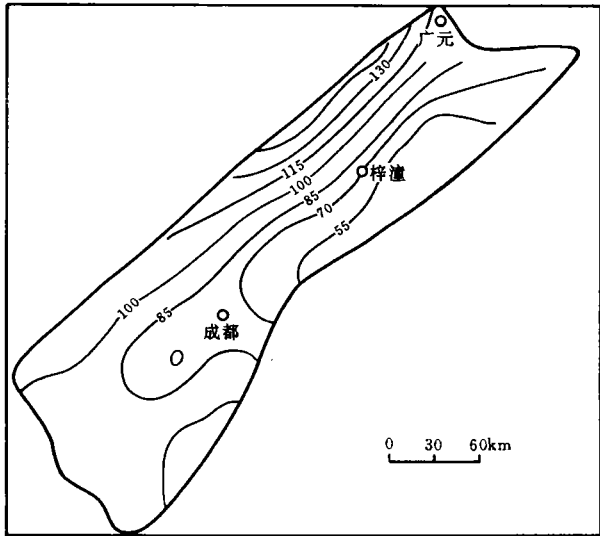


图 5 川西喜山期构造应力场最大剪应力等值线图

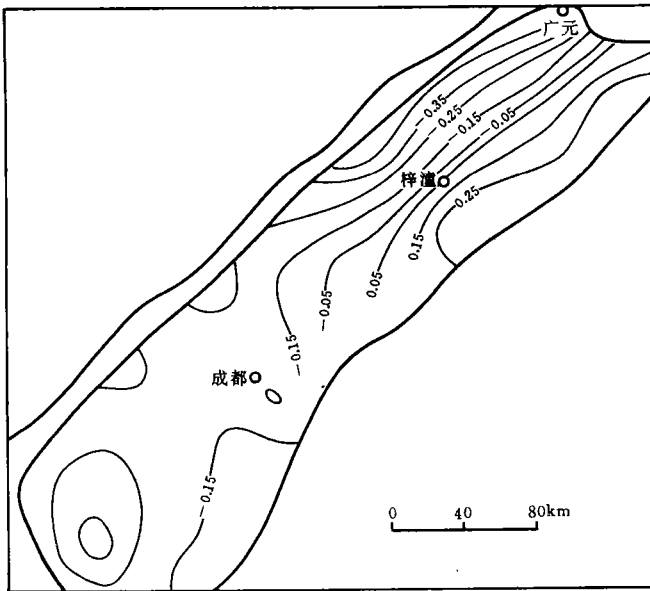


图 6 现今与老第三世末须一、二段储层地层压力系数差值等值线图

3 结论

(1)川西地区须一、二层系现今的地层压力与古孔隙流体压力并不相同。喜山期以前,各地区各构造须一、二层系原始地层压力的发展演化过程大致类似,天然气不断产生,同时岩层又较致密,全区都表现为循序渐进的增压过程,其中又以合兴场、老关庙等地增压最为明显,这与其生气强度大有关系,同时与地层储集空间大小也有直接联系。

(2)川西地区须一、须二层系喜山期以前各历史时期中的原始地层压力与现今地压有一定的成因关系,即都是在原有因生气造成的普遍异常高地层压力的基础上,再经过喜山期构

造运动对其进行差异性的改造而达到现今地层压力的分布状况。

研究过程中,得到成都理工学院彭大钧教授的精心指导,在此表示衷心感谢!

(收稿日期:1995年4月22日)

参 考 文 献

- 1 Colin, Barker. Development of Abnormal and Subnormal pressure in Veservoirs containing bactrially generated gas. *AAPG Bull.* 1987, 71(11)
- 2 Hunt J M Generation and Migration of petroleum from Abnormally pressured fluid compartments *AAPG Bull.* 1990, 74(11)

MATHEMATICAL MODELLING ON THE DEVELOPMENT AND EVOLUTION OF THE PALEO-FORMATION-PRESSURE IN THE UPPER TRIASSIC, WEST SICHUAN BASIN

Xu Guosheng Lin Zhongping

(*Chengdu Inctitute of Technology*)

Abstract

The evolution of pores and fractures, the maturation of organic matter and the development of original formation pressure (OFP) were considered in a context, and the spatial and temproal relationships among these three aspects were discussed in this paper. It was proposed that the development and evolution of OFP could be divided into two periods, i. e. the earlier period (pri-Himalayan) and the later period (since-Himalayan). Although there were many factors contributing to OFP during the earlier period, the hydrocarbon generation was the most important mechanism and OFP increased progressively. Accordingly, the increment of OFP in each stage was calculated. In the later period, the great lateral squeeering force in Himalayan strongly affected OFP formed in the earlier period. Therefore, the Variation of OFP by structural squeeze was semi-quantitatively represented through modelling on tectonic stress field, and the difference of the present OFP in area could be directly related to the extent of tectonic activity in Himalayan.