

# 川东大池干构造的正演平衡剖面

陈伟 施泽进 卢华复

(南京大学地球科学系 210008)

曾庆

(四川石油管理局研究院, 成都 610051)

在挤压推覆构造地区,推覆断层上盘的地层构造变形可用 Suppe 的断层弯曲褶皱几何要素来描述。在经典平衡剖面的假定前提下,笔者编制出一套以 Suppe 几何模型为基础的平衡剖面正演计算程序。在程序中,笔者不仅扩充了以往计算中对断面形态的简化处理,而且还辅以 Williams 的反演法获得初始断层参数。只要给出断层数目及其构造解释模型,即可求得给定区域内推覆构造的正演平衡剖面。笔者用该程序计算并绘制了川东地区大池干构造的平衡剖面以及大池干背斜的构造演化图。

**关键词** 推覆构造 断层转折褶皱 反向逆掩断层 正向断层 断层传播褶皱 正演 大池干构造  
**第一作者简介** 陈伟 男 29岁 博士 构造地质和地球物理

目前,平衡剖面已成为一种检测由地表或深度偏移地震剖面所建立的构造地质模型在几何原理上是否正确的方法。任何宏观地质构造剖面,若不进行平衡剖面计算,其解都是不确定的(Butler, 1987)。

平衡剖面的制作过程较为繁琐,需不断修改、调整所解释的构造模型,使剖面趋于平衡。因此,手工制作平衡剖面不仅费时,而且误差也较大。随着计算机的普及、新型微机的计算速度及屏幕分辨率的提高,机制平衡剖面正在代替手工制作过程。它可以在很短的时间里判断我们解释的构造模型在几何关系上是否成立。一个不平衡的剖面其地质模型肯定是错误的。目前平衡计算方法主要为正演法(由未变形态至变形后状态)和恢复法(从已变形状态至原始的未经构造作用的初始态)。

恢复法可判断地质模型的正确与否,但忽视了中间的变形过程。正演法则可以产生所给构造全部生长过程中的平衡剖面,同时还可以告诉人们所谓平衡的剖面也可能包括不平衡的中间过程。

建立在 Supp 断层转折褶皱模型(Suppe, 1983)基础上,本文采用正演法制作平衡剖面,计算流程如图1所示,基中参数在这里表示其几何形态。

## 1 正演运动模型

Suppe 几何模型(Suppe, 1983)主要应用于挤压构造地区内断层转折褶皱的数字模拟(图2),在正演计算时,可用多种方法实现其模拟过程(Cruikshank et al., 1989; Lionel

Endignoux,1990)。笔者在本文中应用速度场概念,通过将其几何模型中角度和长度的关系式转换成相应的速度场分布,进而计算并获得上盘地层的位移变形。

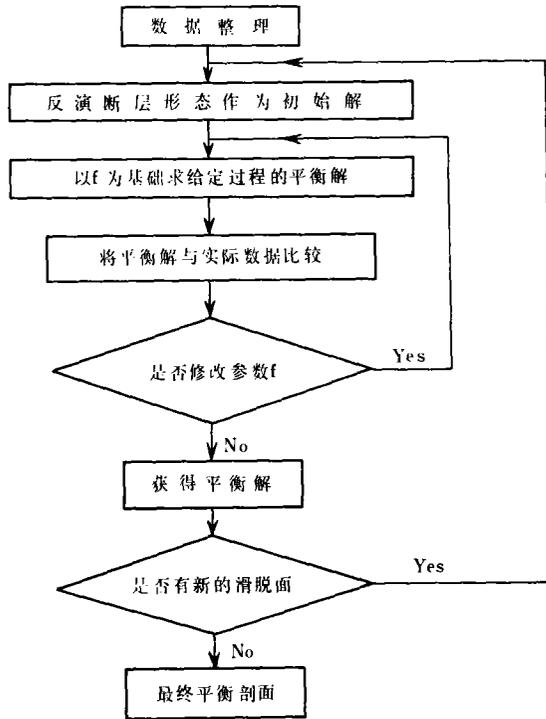


图1 正演平衡剖面计算流程图

Suppe模型中,同一台阶状断层运动变形后,会出现两种构造现象,我们模拟的结果如图3、图4所示,与Suppe定义的第一种模型和第二种模型完全对应。在实际情形中,通常出现的是第一种构造模型(图3)。

对于简单的台阶状断层(上下滑脱面加单一断坡)模拟,许多学者已做了大量工作(Cruikshank et al., 1989; Juan Contreras and Max Suter, 1990; Lionel Endignoux et al., 1990),但当断坡为多个不连续段组合时,由于计算公式复杂,往往简化为简单的台阶状断层。而在实际地质构造中,断层面并非表现为单一倾角的面,笔者在编制程序时没有回避这一问题,加入了方程求根的算法模块(图4),方程引自Suppe(1983)中式7,将它化为 $tg\gamma$ (目的是获取 $\gamma$ 值)的函数,利用牛顿迭代法求出其全部根,舍去虚根及无实际意义的实根后,可获得有地质意义的两实根(分别对应于Suppe的第一、二模式)。根据求得的 $\gamma$ 值以及断层倾角,进行转换,就得到断层上盘的速度场分布。因此,正演时只要给出位移量,即可求得任意断面时的地层变形。

同经典平衡剖面的制作类似,正演模拟遵循如下假段:

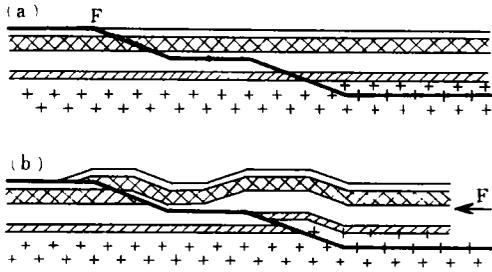


图 2 具两断坡的台阶状断层平衡剖面  
(F 代表台阶状推覆面)

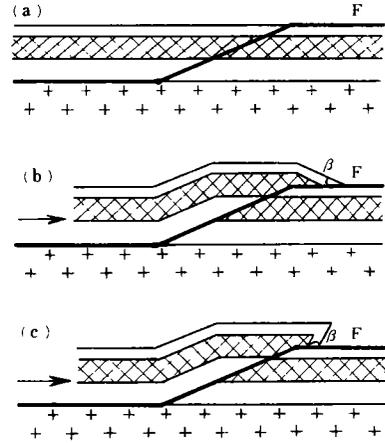


图 3 对应 Suppe 第一、第二模式的  
断层转折褶皱平衡剖面图

- a) 原始未变形剖面
- b) 第一种构造模式, 对应较小的  $\beta$  角
- c) 第二种构造模式, 对应较大的  $\beta$  角

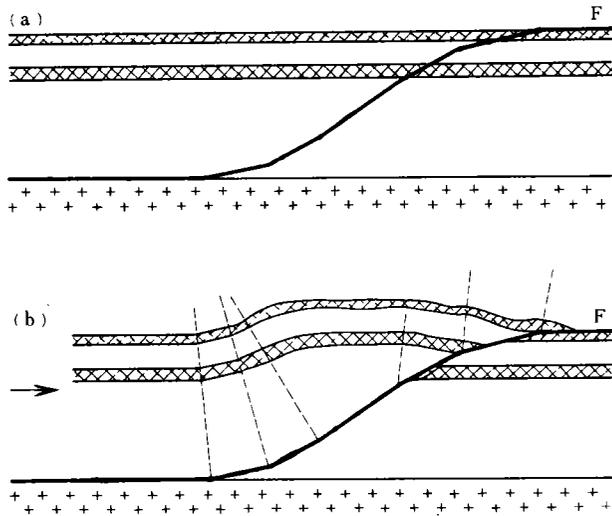


图 4 断坡为多个曲线组合时的断层转折褶皱平衡剖面

(1) 面积守恒 在平行于构造运动方向的剖面上地层面积变形前后保持不变, 忽略其中的构造压实作用 (Siddans, 1983), 认为由压溶作用产生的物质转换只发生在比剖面尺度小得多的范围内 (Endingnoux 和 Mugnier 等, 1989)。

(2)地层厚度不变 变形前后地层厚度保持不变,该假设认为地层发生平行褶皱时,在弱岩层中可能产生滑动,渗透变形(Penetrative deformation)产生平行层面的剪切作用。

(3)变形集中于褶皱枢纽处(Suppe,1983),枢纽产生于断面倾向不连续处。

由于本程序作了部分改进,因此对断层形态及断层产生顺序未作任何限制。

## 2 川东大池干构造平衡剖面

### 2.1 区域构造背景

川东大池干构造位于川鄂黔残余弧后盆靠近前陆(四川盆地克拉通)的变形带内,表现为一宽阔的侏罗山式褶皱带<sup>①</sup>,卢华复等认为该带在中晚元古代是原南华海洋板块在江南古岛弧自东南向西北俯冲而导致弧后扩张的边缘海盆地。自震旦纪至古生代俯冲带向东迁移,中生代后,由于岛弧与地体碰撞的远距离效应转化为侧向近水平挤压的弧后前陆盆地,构造运动的总方向从东南向西北,属于A型俯冲。川东为这个前陆盆地近克拉通一侧的侏罗山式褶皱带,具有典型的滑脱薄皮构造成因,狭窄紧闭的背斜被宽阔平底的向斜所分隔,背斜是多重断层转折褶皱和反向逆掩构造的复合表现。

### 2.2 构造特征

大池干背斜位于川东忠县到涪陵一线,构造上处于川东侏罗山式褶皱带的东部,属于隔挡式的等厚褶皱,为隔挡式褶皱中的狭窄背斜(图5)。

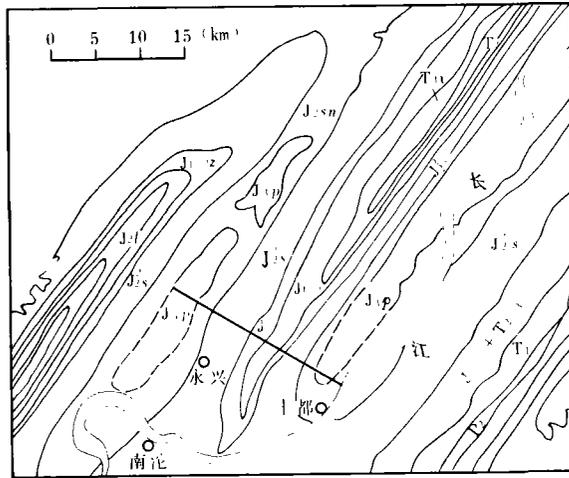


图5 地震剖面测线位置图

① 南京大学、四川石油管理局地质研究所,1987,《四川盆地川东、川西地区破裂构造的时空分布特征及其与油气富集的关系》总报告。

本文平衡计算的资料来自横穿背斜轴部、经叠加偏移处理后的 NW-SE 向深度地震剖面(图 6、7),同时还配合池 4 井和池 2 井的钻井资料进行精确调整(图 7)。

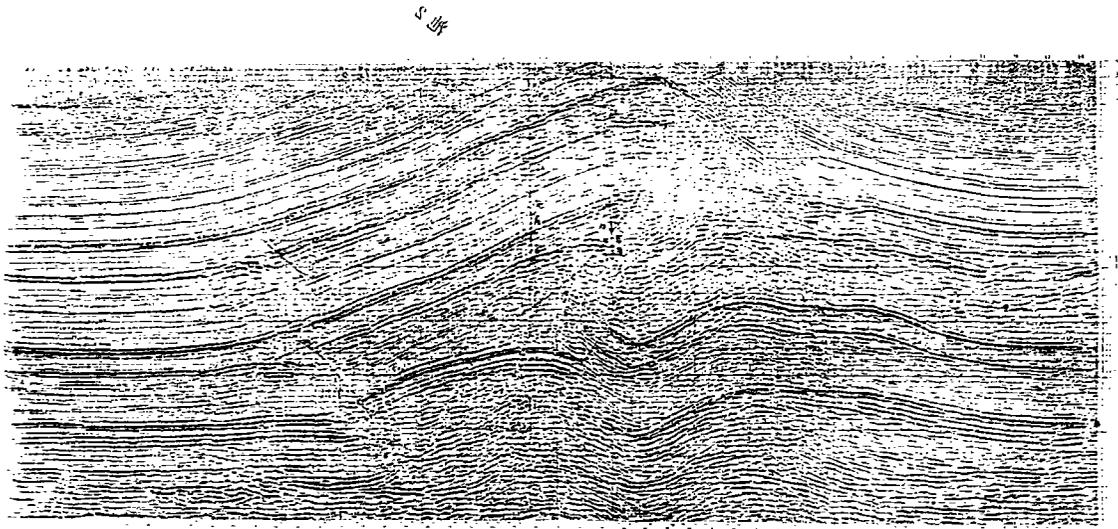


图 6 偏移叠加处理后大池干构造深度地震剖面

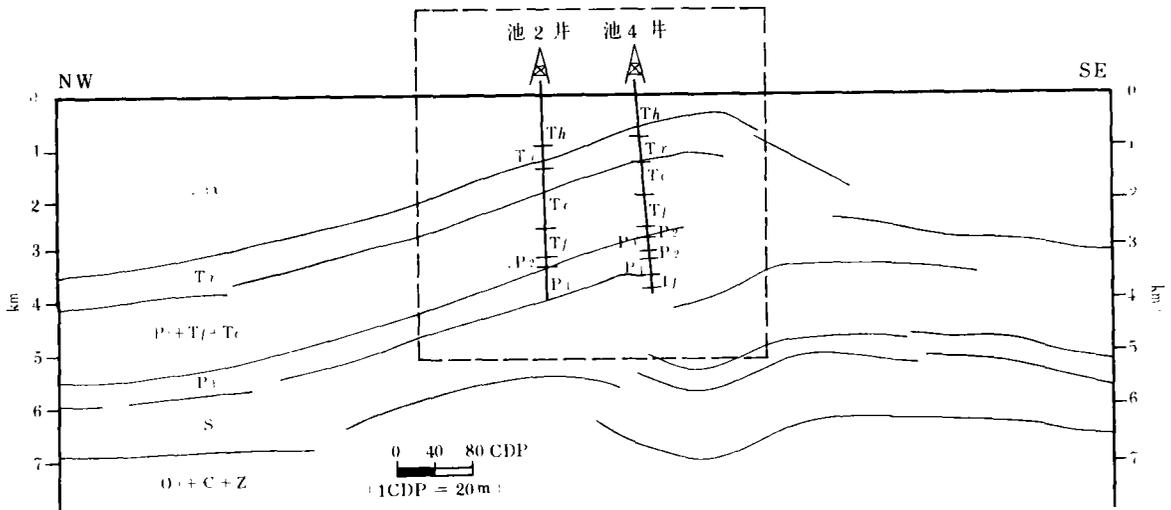


图 7 地震剖面追踪的主要地层形态及其过井剖面图

根据川东区域构造格局以及应力场的统计计算<sup>①</sup>,川东主要受 NW-SE 向近水平挤压应力场以及近 S-N、E-W、NNE 向挤压应力场的作用,其中,NW-SE 向应力场是形成川东褶皱带的主导应力场,而其它应力场则在褶皱前就已形成。因此 NW-SE 向的挤压应力场是形

① 同 446 页第 1 条脚注

成川东地区推覆滑脱的因素,它开始于印支运动,燕山晚期达到高峰,延续到喜山期。

在对图 6 地震剖面的分析及正演计算中,笔者共解释出 9 条主要的断层,编号为 1—9,各断层断坡粗略位置可从地震解释剖面中获得,经正演平衡计算,最终可推断出各构造的准确位置(图 8)。

$F_1$ :断坡倾向 NW,穿过背斜轴部,切过  $T_6$  后转入前断坪,顺嘉陵江组中的层面滑动,断坡向下切至寒武系顶面。考虑到本区的构造应力场方向,推覆运动应从 SE 向 NW,故推覆断层  $F_1$  表现为反向逆掩构造,其正向断层在上寒武统中顺层滑动。

$F_2$ :地震剖面中向下切割反射波同相轴,可能为一突发变形带,切割石炭系、下二叠统后在下二叠统中顺层滑动。

$F_3$  和  $F_4$ :主要表现在背斜轴部。追踪反射波同相轴后发现飞仙关组底与石炭系的厚度明显增厚。对比池 2 井深度资料(图 7),下二叠统、上二叠统在背斜近轴部三次重复出现,这是双重背形叠加构造所造成的一种特有现象。根据钻井资料中下二叠统、上二叠统重复出现的厚度,可以估计  $F_3$  和  $F_4$  各自断坡两侧上下滑脱的深度。

$F_5$  和  $F_6$ :发育于寒武系地层中,构成双重构造。其造成的地层褶皱在  $F_1$  下盘内有明显表现,图 6 底部寒武系上部地层反射波同相轴也有相同的地层呈角度相触现象,显示出断层的存在。

$F_7$  和  $F_8$ :在地震剖面中背斜 NW 翼轴部地层,特别是在该区域内  $F_1$  下盘地层的褶皱隆起处。说明背斜有深部褶皱叠加成分。由于图幅限制,深部地层褶皱出现的部位无法确定,笔者推测是基底推覆滑脱,  $F_7$ 、 $F_8$  组合形成的双重构造作用造成上部地层褶皱并叠加于背斜之上。

$F_9$ :倾向 E-W 向,在图 6、7 中可见它切割中、下三叠统及以下地层,而在须家河组地层中未见同相轴有错动现象。因此,它以反向破裂逆掩构造(Bock break-thrust)形式出现,向上转换成断层传播褶皱。

### 2.3 推覆序列的形成次序

从各断层间的相互切割关系,可很容易推测各断层形后的相对先后次序。前述区域应力场已表明各推覆断层活动时间,即开始于印支期,主要发生于燕山期,并延续到喜山期。按先后关系说明如下:

$F_3$  和  $F_4$ :同二叠系同相轴在背斜轴部相切割,  $F_3$  和  $F_4$  先于  $F_1$  和  $F_2$  形成。

$F_1$ 、 $F_5$  和  $F_2$ :  $F_1$  为反向逆掩构造,  $F_5$  则是由于  $F_1$  的持续作用,局部应力调整而形成的反向破裂逆掩构造,  $F_1$  先于  $F_5$ ,  $F_2$  为突发变形带,它与  $F_1$  同期。

$F_3$  和  $F_6$ 、 $F_7$  和  $F_8$  各自相互组合成双重构造。按 Butler 的观点:推覆构造发生序列一般是按背驮式(前裂式)推覆序列进行的,后裂式推覆构造将切割早期的叠瓦造扇(1987)。因此,  $F_5$ 、 $F_7$  的形成先于  $F_6$ 、 $F_8$ 。

### 2.4 地质构造模型

大池干构造是川东侏罗山式褶皱带中隔挡式褶皱的狭窄背斜(Lu Huafu, 1985)(图 5)。它是由多层台阶状逆断层和基底滑脱构造控制的断层相关褶皱、纵弯褶皱组合成的复合背斜,台阶状逆断层其中有正向的(向 NW 逆掩)、也有反向的(向 SE 逆掩)。断层相关褶皱则既有断层转折褶皱,也有断层传播褶皱,其地表横断面为一不对称的箱状褶皱,向下逐渐消

失。根据平衡正演计算及川东地区岩性组合,其构造成分有:

(1) 基底双重构造:滑脱面以下寒武统(甚至震旦系上部)为主,其次为志留系;三叠系(图8中 $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ ),造成 $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ 组合成双重构造。

(2) 反向逆掩推覆(图8中 $F_1$ )的正向推覆面是 $F_1$ 。

(3) 反向破裂式逆掩构造(break-thrust)(图8 $F_9$ ):向上近地表处位移突然消失,使上部背斜轴部附近地表地层呈不对称状,SE翼近于直立。

(4) 背形叠加双重构造(图8 $F_3$ 、 $F_4$ ): $F_3$ 产生于二叠系与三叠系下部, $F_4$ 主要产生于二叠系中,使整个背斜轴部变得尖锐。

从正演得出的大池干平衡剖面(图8)中可看出:整个背斜形态主要由 $F_1$ 控制,其余构造叠加造成了整个背斜两翼的地层呈不对称状以及陡峭形态。

### 2.5 构造演化过程及平衡剖面

在地震深度图上建立的地质模型只是解释人员所假定的、粗糙的构造轮廓,各构造的形态及其准确位置难以用手工完成,其地质模型的正确与否也难以判断;特别是各种构造相互叠加的复杂情况下尤其如此。有鉴于此,部面的平衡计算在构造解释中显著中得尤为重要。

在图1计算流程框图基础上,笔者对大池干构造进行了较为仔细的计算机正演模拟。各断层及叠加构造形态都是在进行了多次将计算的变形形态与实际资料相比较之后,又反复调整和修改断层参数后才得出的。计算输出的大池干平衡剖面如图8a-g及图9所示。

首先,SE向NW的挤压使得台阶状滑脱面 $F_3$ (位于P、T中)、 $F_4$ (位于P中)活动,组成背驮式(前裂式)背斜叠加构造,形态上表现为背形叠加(图8A-a),之后,在同样压力作用下,反向逆掩推覆构造 $F_1$ 出现,造成的地层变形与断层转折褶皱类似。 $F_1$ 的正向滑脱面 $F_1$ 位于志留系底部地层中。与 $F_1$ 伴生出现的突发变形带 $F_2$ (pop-up)使得 $P_1$ 、 $P_2$ 地层出现错动,向上转为顺层滑动,并逐渐消失(图8A-b、c)。

继 $F_1$ 之后,在同样应力场的作用下,反向破裂断层 $F_9$ 活动,在近地表处 $F_9$ 逐渐消失,表现有断层传播褶皱性质(图8A-d)。

台阶状断层 $F_5$ 、 $F_6$ 组合成背驮式双重构造。 $F_5$ 、 $F_6$ 产生于寒武系中(图8A-e)。背驮式基底双重构造( $F_7$ 、 $F_8$ 组合)产生于下寒武统中(图8B-f),因未见志留系有明显的错动显示,按Butler的观点, $F_7$ 、 $F_8$ 在 $F_5$ 和 $F_6$ 后形成(图8B-g、图9)。

还存在一种可能的情况,由于 $F_1$ 、 $F_9$ 具有较大位移量的持续作用, $F_1$ 下盘靠断层附近的地层可能出现拖曳现象,地层产状会变得直立甚至倒转,夹在 $F_1$ 、 $F_9$ 间的地层也可能产生转动现象,造成其中地层产状的陡峭形态(图10)。

## 3 可能的气藏富集

通过对大池干背斜的平衡剖面计算,我们分析得出以下结论:

1.  $F_1$ 形成的断层转折褶皱构成了大池干背斜的主体,但由于在其形背斜的轴部出现了近于出露地表的破裂逆断层,故保存条件较差,因此,其可能气藏应着眼于背斜的SE翼。

2.  $F_3$ 、 $F_4$ 组成的双重构造会使下二叠统、上二叠统及上覆地层在附近区域产生较强烈的变形,破裂构造相对发育,保存条件较好,在其形成背斜的SE翼因未受到 $F_1$ 的破坏,因

此, 获得了二叠系气井和石炭系气藏。

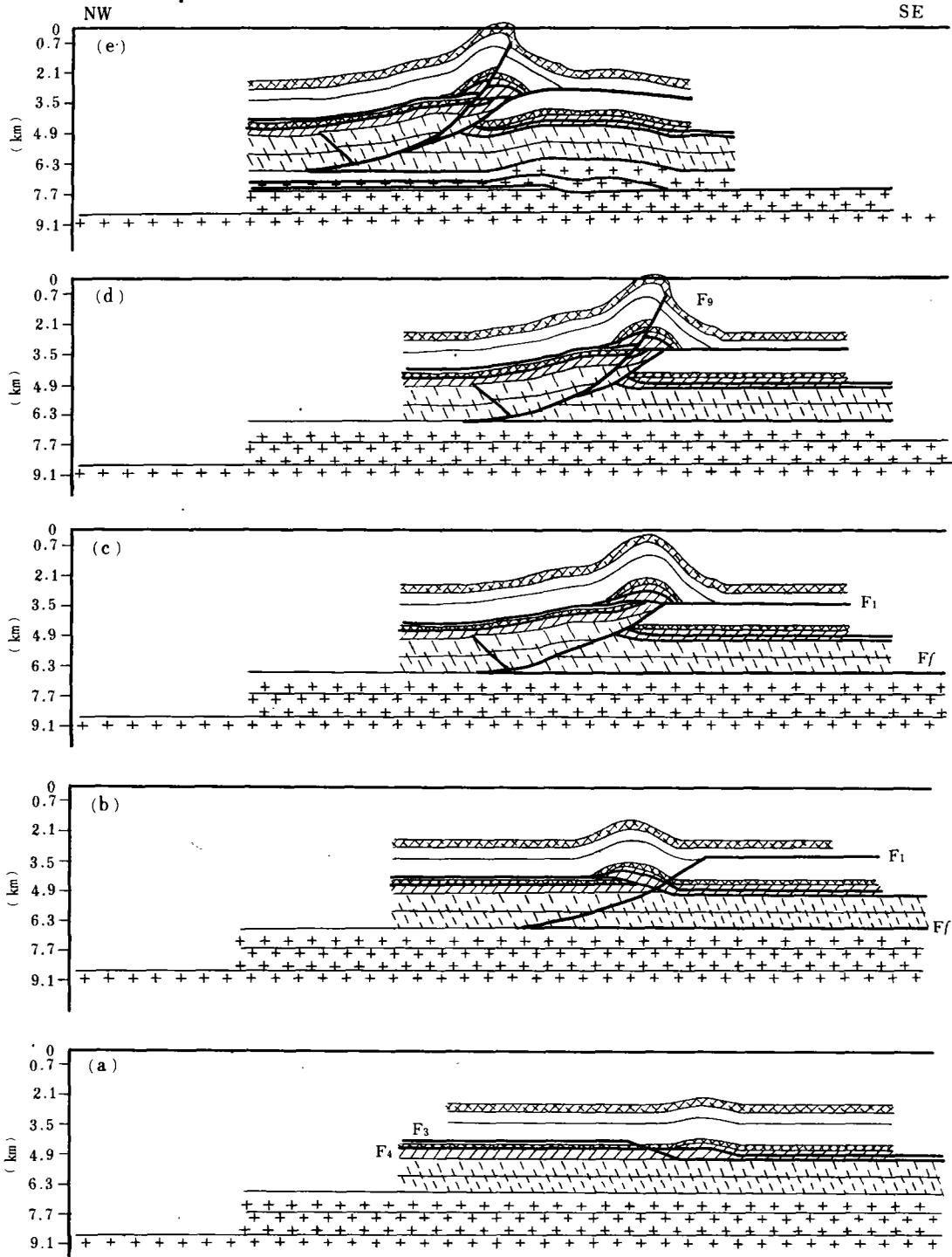


图 8A 川东大池干构造平衡演化剖面(a-e)

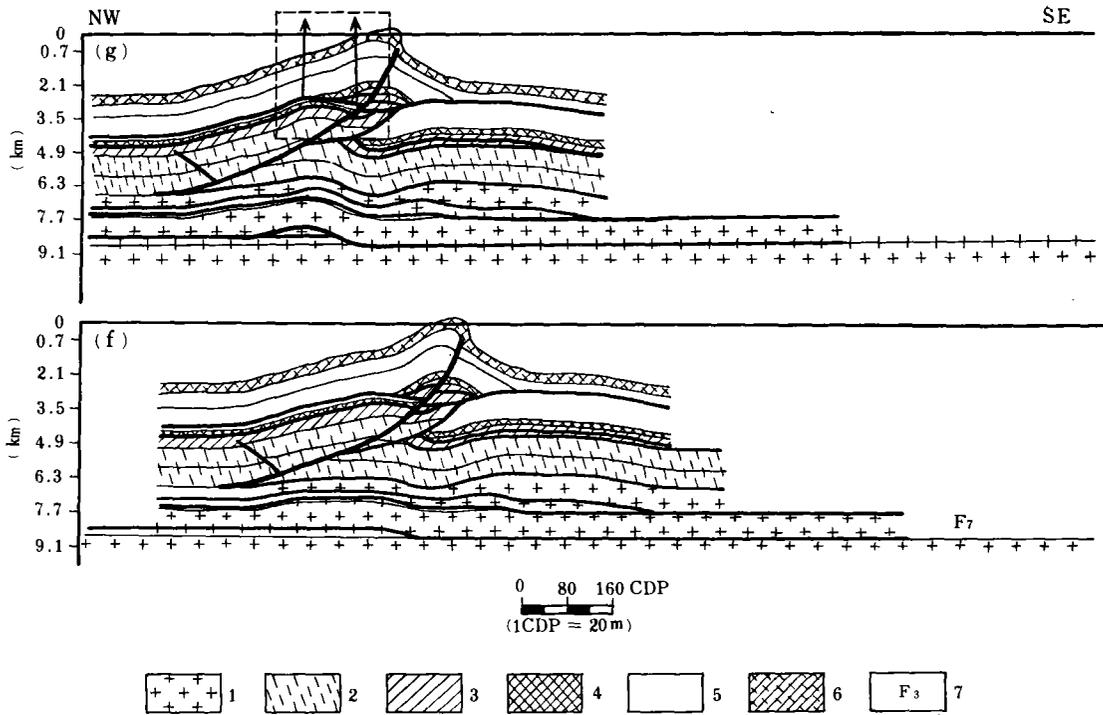


图 8B 川东大池干构造平衡演化剖面(f-g)

1. 震旦系-中奥陶统; 2. 志留系; 3. 下二叠统; 4. 上二叠统; 5. 中下三叠统; 6. 上三叠统须家河组; 7. 推覆断面及编号。

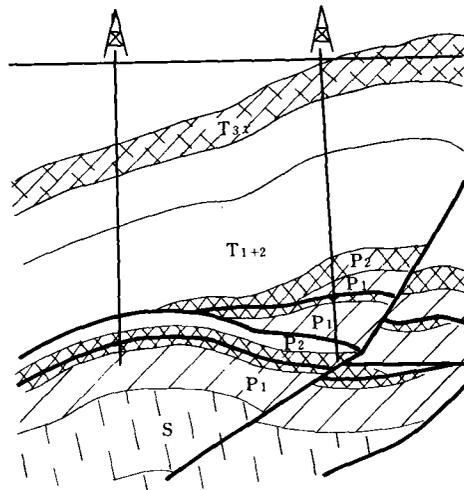


图 9 图 8B-g 方框放大图中, P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 的构造叠加形态

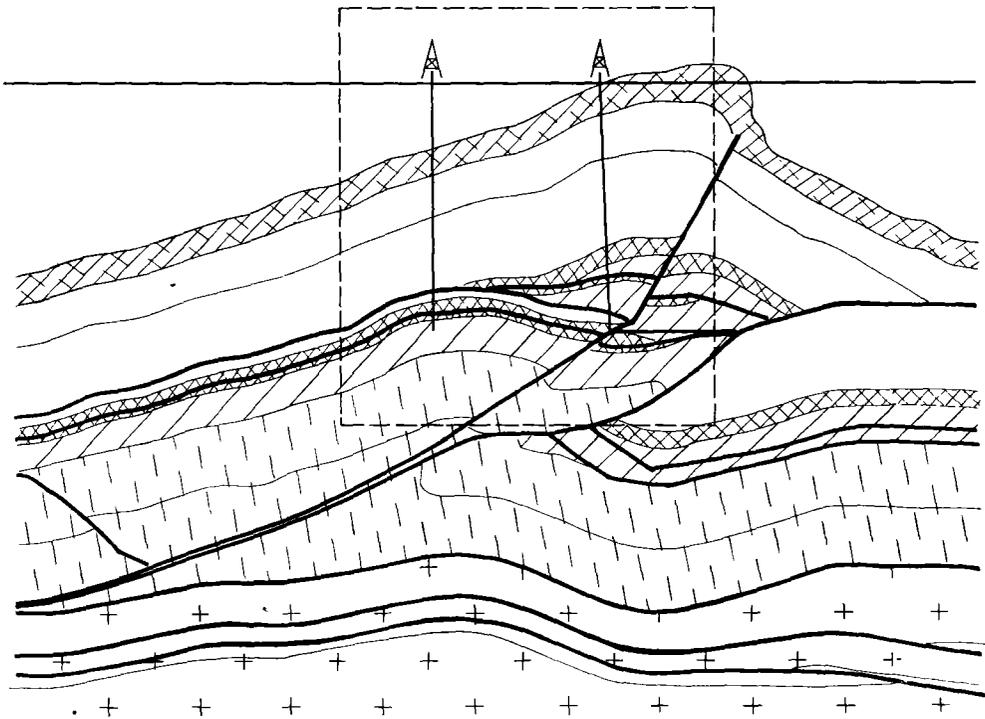


图10 图8-g可能出现的地层变形剖面

3. 与  $F_1$  对应的突发变形带  $F_2$  在切割石炭、二叠系后顺层滑动,其变形导致的裂隙组合具有良好的盖层保存条件,因此也可能在附近的石炭、二叠系中获得工业气藏。

4.  $F_5$  和  $F_6$  组成的双重构造变形非常强烈,由此产生的裂隙构造可能波及二迭系,因此具有良好的油气前景。

5.  $F_7$ 、 $F_8$  构成的双重构造位于基底部分,如果寒武系中部分地层有油气生成条件,其双重构造形成的背斜两翼发育良好的裂隙型储集岩,也可能成为天然气富集区域。

在本文写作过程中,得到施央申教授和鼓励;地质矿产部石油地质中心实验室孙肇才教授给予热心指导和关怀;四川石油管理局地质调查处余启明、何玉春高级工程师给予笔者大力帮助,在此表示衷心的感谢!

(收稿日期:1992年2月17日)

## 参 考 文 献

1. Bulter RWH. Thrust sequences, *Journal of the Geological Society* 1987; 144: 619~634
2. Contreras J, Suter M. Kinematic modeling of cross-sectional deformation sequences by computer simulation, *J. G. R.* 1990; 95: 21913~21929
3. Cruikshank KM, Neavel K E and Zho Zhao G. Computer simulation of growth of duplex structures, *Tectonophysics* 1989; 164: 1~12
4. Endignoux L, Moretti JL. The use of a forward kinematic model in the construction of balanced cross-section, *Tectonics* 1989; 9: 1249~1262
5. Lu Huafu, Dong Huogen et al. Types and origins of the nappes in outer LongMen Shan foreland basins, *Progress in geosciences of China* (1985-1988)——*Paper to 28th IGC* 1988
6. Siddans AWB. Finite strains patterns in same alpine nappes, *J. Struct. Geol.* 1983; 5: 441~448
7. Suppe J. Geometry and Kinematics of fault-bend folding, *American Journal of Science* 1983; 283: 684~721

## FORWARD BALANCED CROSS SECTION OF THE DACHIGAN STRUCTURE OF EAST SICHUAN

Chen Wei Shi Zejin Lu Huafu

(Dept. of Earth Sciences, Nanjing University)

Zeng Qing

(Institute of Petroleum Exploration and Development, Sichuan Bureau of Petroleum Administration)

### Abstract

The hangingwall deformation of the overthrust under severe compression may be revealed by using Suppe's fault-bend folding approach. On the assumption of the classical computation of the forward balanced cross section, the program presented in this paper for computing the forward balanced cross section is based on Suppe's geometric model. This program is extended not only to simplify the processing of the computation on the geometric fault, but also assist the user in gaining the parameters of the initial fault by William's inverse method. The certain forward balanced cross sections can be simulated once the number of faults and their structural interpretation models are given. In this paper, the balanced cross sections of the Dachigan Anticlinal Structure in East Sichuan is computed and plotted by this program.