

· 综述 ·

# 平衡剖面技术与地震资料解释

刘光炎\* 蒋录全

(四川石油管理局地质调查处)

## 摘 要

刘光炎,蒋录全. 平衡剖面技术与地震资料解释. 石油地球物理勘探,1995,30(5):833~844

地质剖面形成至今,一般都经历了数千百万年乃至数亿年的构造形变过程。但其面积(体积)、地层厚度、各标志层的长度在变形前后保持相等,即变形前后的剖面是平衡的。根据这些原则制作的平衡剖面可以作为检验地质构造解释是否正确合理的标准。本文简要介绍了平衡剖面技术及其发展,并论述了平衡剖面技术的正演法和复原法及其在地质解释中的应用。

主题词 平衡剖面 正演模拟 剖面复原 地震资料解释

## ABSTRACT

Liu Guangyan and Jiang Luquan. Balanced section technique and seismic data interpretation. *OGP*, 1995, 30(5): 833~844

Generally speaking, geological section has undergone structural deformation for several million years to several hundred million years. But the area, bed thickness and marker bed length remain unchanged; that is to say, the geological section keeps balanced before and after deformation. The balanced section plotted according to the principle can serve as the standard by which we can verify whether the interpretation of geological structure is reasonable. We sketch out balanced section technique and its development. We also describe the forward and backward methods of balanced section technique, and their applications in geological interpretation.

Subject heading: balanced section, forward modeling, section reconstruction, seismic data interpretation

## 引 言

平衡剖面技术是现代地学领域的一项重大成就,它在构造地质、石油地质与勘探以及盆地模拟应用方面,已被国外地质学家和勘探学家作为一种模型解释的重要工具。在地质和石油勘探中,剖面的平衡与否已成为检测地质构造解释是否正确合理的标准方法,引用 Butler(1987)的话来讲:“任何宏观构造剖面如果不进行平衡计算,其解释都是不确定的”。70年代末,平衡剖面技术应用到石油地质勘探中,并获得成功。1984年在法国召开的国际推覆构造会议上,平

\* Liu Guangyan, Division of Petroleum Geology Survey, Nanchong City, Sichuan Province, Postcode: 637000

本文于1994年10月24日收到。

平衡剖面理论被推举为现代构造地质学的重要成果之一,1989年在美国召开的第28届国际地质大会上,平衡剖面技术被公认为是地质研究与勘探的一种重要方法。

平衡剖面技术是60年代随着石油地质勘探工作的深入而产生的,后来逐渐应用到造山带、张性构造区和压性盆地的研究及地震资料解释中。Dahlstrom(1969)首先详细论述了平衡剖面的概念,后经众多学者深入研究,平衡剖面技术和理论趋向完善。特别是70年代末期薄皮构造机制(thin-skinned tectonics)的提出,平衡剖面技术得到了迅速发展,其间产生了恢复法、面积平衡法及剩余面积法等。80年代早期,Suppe等人系统阐述了断层转折褶皱(fault-bend folding)及其几何演化和运动学过程,使得人们更深刻的认识到了平衡剖面技术的长处。与此同时,Verrall等人提出了平衡剖面技术的反演法,并用它来推测地下断层等构造的几何形态,取得了明显的应用价值。80年代中期,国外地质、勘探学家开始研究用正演法制作平衡剖面,于80年代末(1990)得到了用正演法制作的正确平衡剖面,从而认识到正演法与其它方法相比有较突出的优点。目前,正演模型已发展成为重建地质剖面的几何演化过程和检测地震资料解释的一种主要方法。

## 平衡剖面技术简介

### 剖面平衡的主要思想及其编制原则

剖面平衡是一个基本的地质规律。当岩层长度或剖面面积在变形与未变形的两种状态下相等时,剖面是平衡的。若它们不相等,且这种不相等又无法解释,那么剖面就是不平衡的。一个不平衡的剖面其地质构造解释肯定是错误的,这就是平衡剖面的主要思想。

编制平衡剖面应遵循如下原则(Dahlstrom, 1969)。

(1)面积(体积)不变原则:变形前后地层所占的面积(二维空间)或体积(三维空间)不变。由于多数构造褶皱是在沉积后发生的,地层在变形前就已经受成岩压实作用,故成岩压实作用造成的面积(体积)损失可不予考虑。对比变形与未变形区域的同一种岩石,若密度(或孔隙率)基本不变,计算中构造压实作用也可忽略不计。

(2)岩层厚度不变原则:岩层发生褶皱时,不同岩层间只存在顺层剪切,因此,以同心圆状褶皱方式变形,即变形前后岩层厚度不变。

(3)剖面中各标志层的长度一致原则:若岩层间没有不连续面,则其恢复后的原始长度在同一剖面中应当一致。否则,在长层与短层间必有一不连续面。

(4)地层沿同一断层的位移量一致的原则,否则可能由下列原因造成:①断层传播褶皱作用,沿断层的位移逐渐转换为褶皱,因长度守恒,造成各层间的缩短量不一致;②断层发生分叉,位移量分散到各小断层上;③滑脱褶皱作用,其缩短机制与断层传播褶皱作用相同。

### 剖面平衡的主要方法

剖面平衡的方法较多,归结起来主要有三种,即正演法、复原法和反演法。

(1)正演法 所谓正演法就是由原始未变形剖面演化至经构造变形后的剖面。正演计算使用的主要变量是断面的几何形态、地层厚度、断层数目及位移量。它的优越性主要体现在可以快速建立若干个构造模式以检验一个地区可能存在的几种不同构造假说。在连续的模拟中,通过递增输入位移量,可以了解一个构造演化的几何过程和运动学特征,并对其进行检验。

(2)复原法(恢复法) 所谓复原就是由实际变形剖面复原至原始的、未经构造变形的剖面。复原中所用的数据取自变形剖面。根据平衡原则,用其中的长度和面积重建一条未变形的剖面,通过岩层的垂直位置,可以确定出每一层的长度段,也是唯一长度。计算时,给出每一层位的厚度,按一定的顺序,对每一地层均完成上述操作,然后连接各岩层段的端点,即可恢复出断层。面积平衡时要求指定所测量的每一个地区的边界。

复原时,整个变形剖面一次处理完成,无法了解其中间的复原过程。当然,复原可分成多步,一次只复原一部分剖面,经多次复原一条剖面,但这只适用于由多个独立的构造组成的剖面。可见,复原法存在一定的缺陷。

(3)反演法 此处指的反演法不同于一般所称的反演。平衡剖面技术中的反演法主要是为提供初始断层几何模型而提出的,即主要是用于反演断层。最先提出反演法的是 Verrall (1981),他利用断层上盘地层变形来推测地下犁式断层的几何形态。其基本思想是:当犁式断层发生时,上盘地层运动的水平分量保持不变,断层的落差和位移量随断层的倾角而变化,此法称作 Chervron 法。后来 Williams (1987)提出了滑线反演法,该法认为断层上盘物质运动时,运动轨迹为一系列与断层平行的曲线,在运动轨迹方向上位移量保持不变。Davison (1987)提出了地层长度平衡反演法,该法认为地层变形前后长度不发生变化,据此规律可反演断层。

## 平衡剖面技术在地震资料解释中的应用

### 正演法及其应用

#### 正演模拟策略

正演模拟策略如图 1 所示,图中各项内容说明如下。

(1)资料的收集、整理 了解研究区的沉积背景、构造格局、地层及其产状、断裂分布,从要解释的地震深度剖面和时间剖面上,获取尽可能多的信息,如地层、产状、不整合、波组关系等。同时尽可能多的收集研究区域邻区的地质、钻井、物探等资料。

(2)提出假设模型 根据掌握的资料,用与断层有关的褶皱理论(断层转折褶皱、断层传播褶皱等)提出初始假设模型,该模型应尽可能与所收集的资料吻合,否则,需考虑其它因素,进行适当的修改。

(3)产生初始平衡解 按选用的几何模型,进行平衡计算,求地层变形的速度场,进而获得变形地层,此平衡解代表某地质时期构造作用下的地层构造变形。

(4)对比修改 将产生的平衡解与实际资料对比,对不吻合处作适当的修改,有时需改变断层的形态和位置,重复上述过程,直到满足和实际资料吻合为止。

(5)最终成果 当平衡解满足我们所要求的精度时,既完善地解释了受多种条件制约的地震剖面,又对某些方面做出了合理的推测,较好的符合实际资料情况,这就获得了一张平衡的地质剖面,较小的局部异常可忽略不计。

#### 正演模拟计算流程

正演模拟采用的流程如图 2 所示。

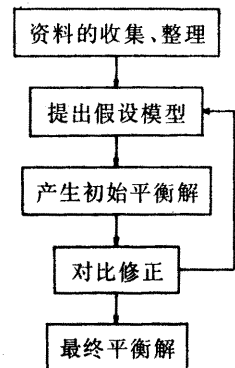


图 1 正演模拟策略

正演模拟应用实例

运用正演法制作平衡剖面,目前国内外都有许多比较典型的例子,此处我们分别引用国外和国内一个实例加以说明。

例1 在墨西哥湾挤压构造中的应用。所选构造位于墨西哥湾西北 Alaminos Canyon 地块大陆外斜坡,图3为一条北西—南东向地震剖面,其中显示出了使用正演模拟策略解释的构造。图4是根据图3的地震剖面突出显示了构造和地层特征,其中在构造部位对比出了5个明显的反射界面。反射界面①为 Challenger 层顶部中白垩统不整合面。

图5是平衡模型,绘出了所解释的 Alaminos Canyon 褶皱地质发育史。垂直比例尺等于水平比例尺,线  $a, a', a'', b, b'$  相同。图5a为构造原始状态,是一个简单冲断层生长断折褶皱,上升角为  $17^\circ$ ,沉积与隆起之比为 0.3;沉积与侵蚀之比为 0.8,滑距为 2km;图5b为再滑动 2km 后的构造,沉积与隆起之比保持不变(0.3),但无侵蚀,在图5a上局限在顶部的侵蚀面,现在部分滚动到翼上;图5c为再滑动 2km 后,后翼上削截的生长及生长前的地层滚动到褶皱的顶部,产生了不对称性及位于轴面  $a'$  之上的构造高点,其平坦的顶部被加宽,而现在的翼部长度的最大值,且不随以后的滑动而改变,断层下面的虚线为初期叠瓦状断层轨迹,其上升角为  $12^\circ$ ;图5d为叠瓦状断层上发生了另外 1km 的滑动,在两翼上产生了附加的弯折和生长沉积物中的前翼背斜;图5e为构造停止生长,生长后的盆地发生充填,形成一个上超的地层层序,接着在构造上披覆一个深

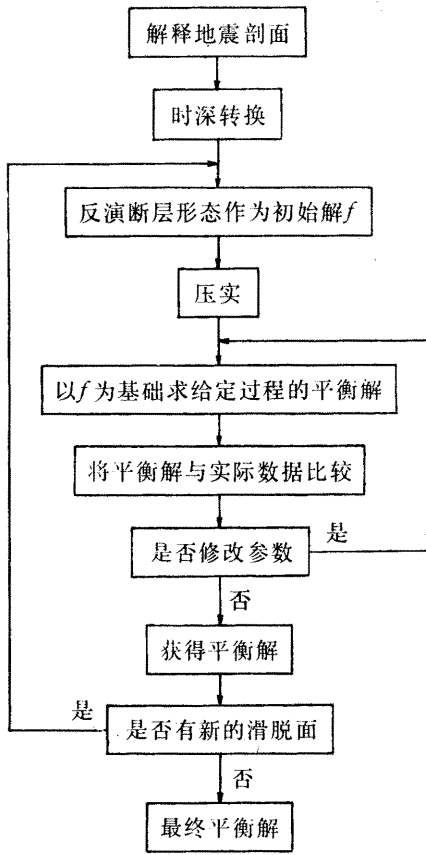


图2 正演平衡剖面制作流程

构造停止生长,生长后的盆地发生充填,形成一个上超的地层层序,接着在构造上披覆一个深

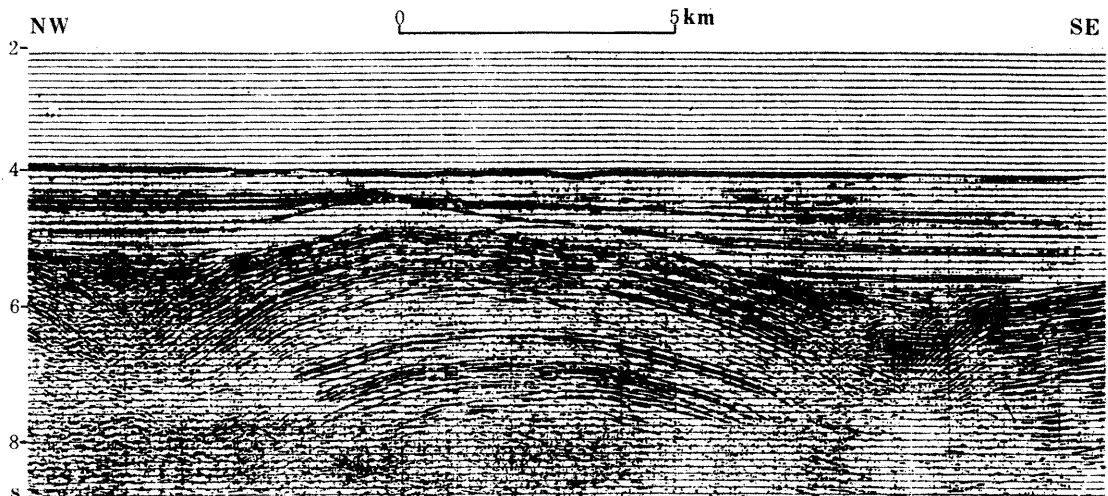


图3 Alaminos Canyon 地区一条 NW-SE 向偏移地震剖面

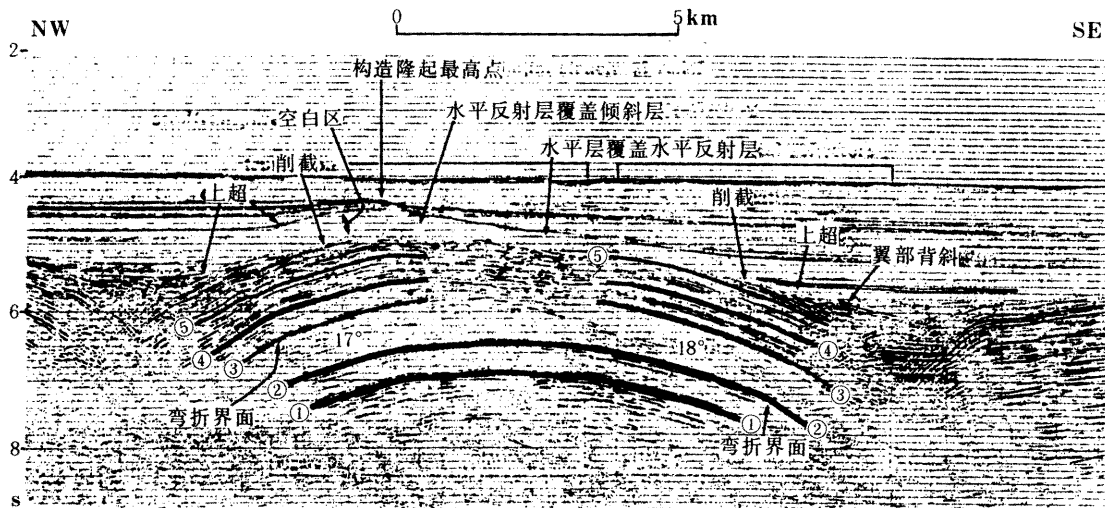


图 4 根据图 3 的地震剖面突出显示了构造和地层特征

海或半深海相沉积。

图 6 是最终平衡剖面与对比出的反射波及解释过的地震剖面的对比,可以看出正演结果与解释的地震剖面是基本一致的。

例 2 在四川龙门山山前带中的应用。四川中坝气田位于龙门山周缘前陆盆地推覆构造带前沿,图 7 为该区一条南东—北西向地震深度剖面,图 8 显示出了中坝背斜的构造演化过程:  $T_{3x}$  沉积前  $F_1$  断层开始活动,形成断层转折褶皱,使三叠系地层局部隆起,  $T_{3x}$  沉积后期,在  $T_{3x}$  隆起部位遭受剥蚀的基础上继续接受侏罗系及其以上地层的沉积(图 8a~图 8c),  $T_{3x}$  沉积后,持续的 NW 向挤压应力场使  $F_1$  重新活动,继承性的断层转折褶皱作用造成印支面局部隆起(图 8d)。 $F_2$  和  $F_3$  属背驮式反向逆掩构造,  $F_3$  首先形成,  $F_2$  继承了  $F_3$  的反向逆掩面,组成了紧闭的背形叠加褶皱形态(图 8e~图 8g)。 $F_4$  是一简单的断层转折褶皱,它的产生使得中坝背斜的 SE 翼再褶皱,并使  $F_1$  断层附近地层抬升,出现 CD 平坦段(图 8h~图 8i)。 $F_5$  以反向逆掩构造形式出现,形成于  $F_4$  之后,考虑到剖面 NW 段地层的明显隆起,  $F_5$  的正向滑脱面可能呈台阶状(图 8j~图 8k),相应的断坡背斜又叠加于早期的背形叠加背斜( $F_2$  和  $F_3$ )之上,使现今所见到的褶皱为复杂的复合形态。

### 复原法及其应用

#### 复原方法及策略

剖面的平衡复原方法主要有两种:等线长度法和等面积法。

**等线长度法** 假定剖面中所有地层单元的线长度在变形过程中保持不变,因此在复原状态中,受同样断层影响的所有上盘地层单元的长度应相等。等线长度法假定地层变形是由弯滑机制引起的,地层内部的穿透应力相对较小。

**等面积法** 适用于一些由于穿透应变作用导致地层厚度发生变化,而变形过程中体积(面积)保持不变的构造作用,即地层变形前后,其面积(体积)保持不变。

复原法制作平衡剖面的策略见图 9。

#### 复原法计算流程

复原法计算流程如图 10 所示。

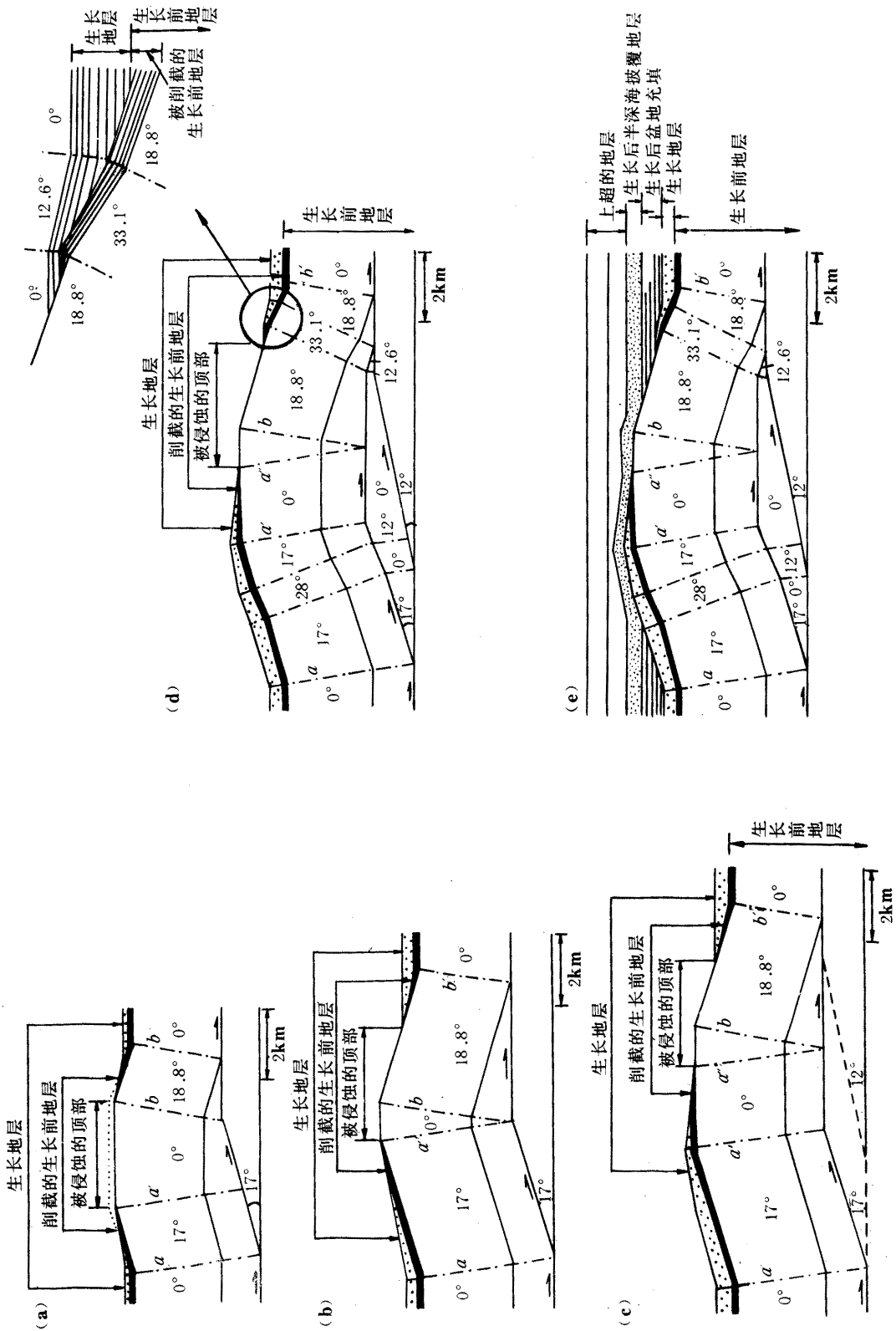


图 5 平衡模型

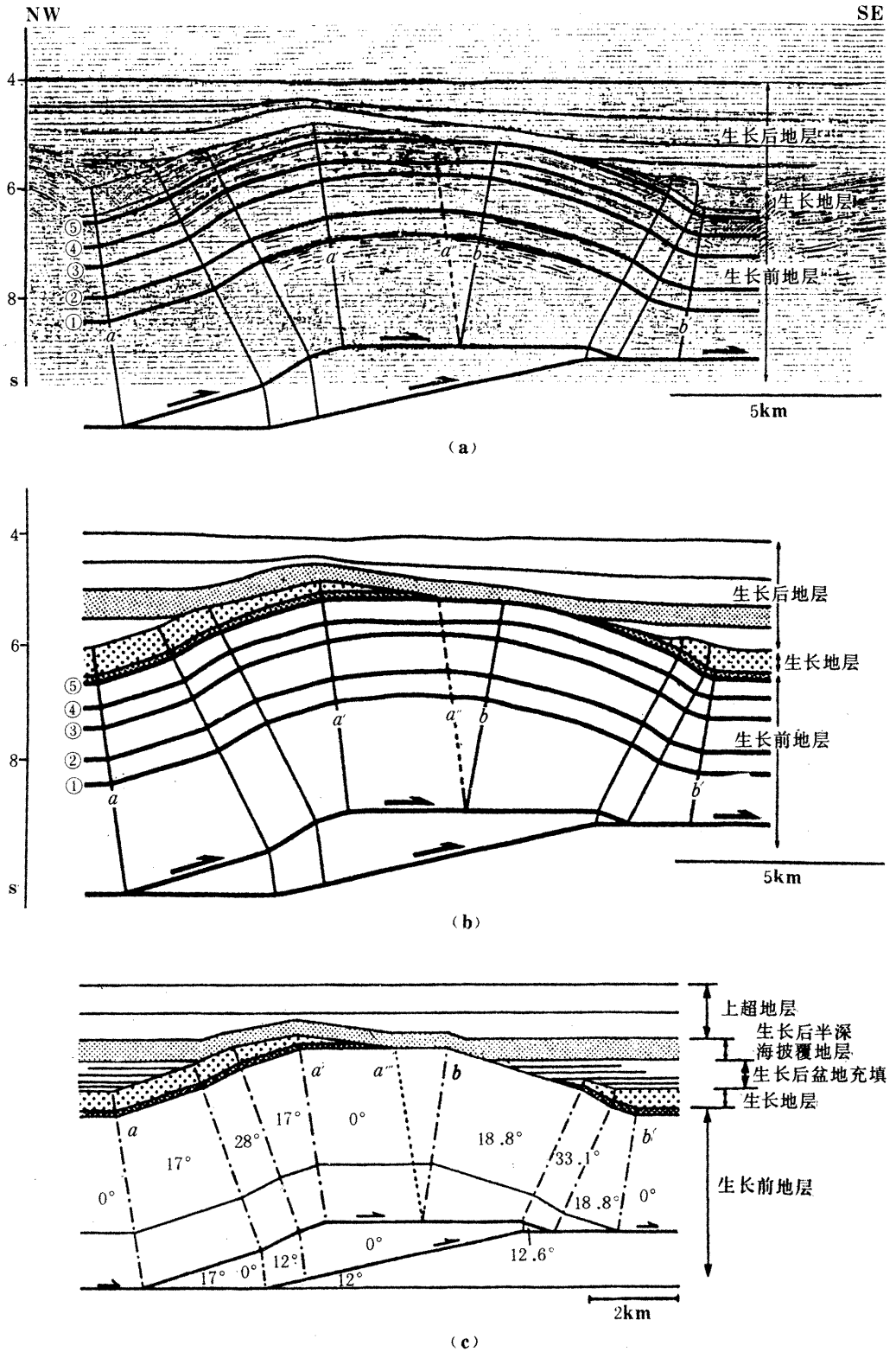


图 6 最终平衡模型(c)与对比出的反射(b)及解释的地震剖面(a)的比较

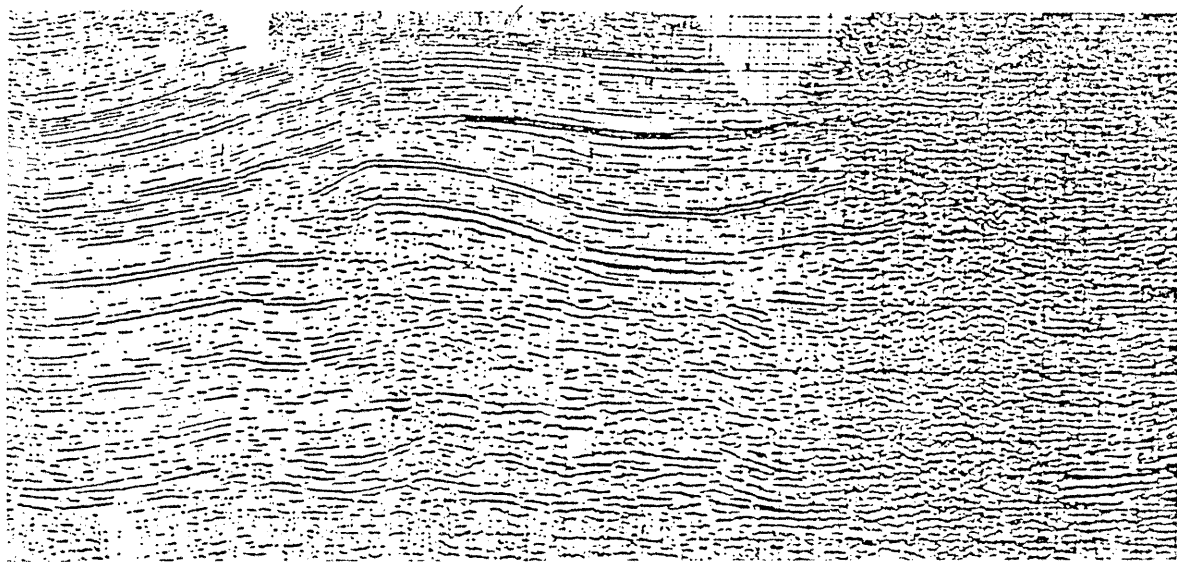


图 7 横穿中坝气田的地震深度剖面

#### 复原法应用实例

复原法制作平衡剖面经过 30 年的发展,已趋向完善,国外的应用实例很多,国内尚未见到应用实例。这里引用一国外典型实例加以说明。

图 11a 是解释后的时间偏移地震剖面,图 11b 是经时深转换后的解释过的深度剖面,图 11c 表示在层 *E* 和 *F* 面积不变的条件下,经去压实后的等线长度复原结果。显然,这种复原解释是不平衡的。图 11d 是经校正后(消除断层的水平错断和在 *D* 层下另加上地层长度)的等线长度复原剖面,其结果是平衡的。图 11e 是经转换和压实修正后,复原成变形的几何形状所产生的最终平衡解释。图 11f 是复原到 *B* 层顶面的剖面,代表不同时代的复原剖面。

## 平衡剖面技术应用现状

自 50 年代中期加拿大勘探地质学家应用平衡剖面技术以来,通过当今计算机应用技术和地震处理解释技术的结合,这项技术已成为解决复杂构造地质问题的有效方法。国外的许多石油公司在进行油气勘探过程中,将剖面的平衡解释作为一项必须的工作,并用来指导钻探生产。同时,国外许多石油公司相互合作,相继研制出了一些很有价值的应用软件,其中的 GEOSEC 软件系统和 LCACE 软件系统有一定的代表性。

GEOSEC 是基于图形开发的软件系统,是在工业标准 X 窗口和 OSF/Motif 图形用户接口环境下研制的,并可与 LandMark 地震解释系统相接,使解释工作在工作站上交互进行。它的主要强项之一就是帮助用户重新模拟解释剖面的演化过程,从而达到验证解释结果准确度的目的,使解释更加完善。其主要解释工具有 21 项,包括:三维数据投影;恢复和除压实同步进行;正演模拟和加压实同步进行;自动垂向/斜向滑动扩张恢复;压实作用的断层预测;交互多步断层扩张褶皱模拟;交互多步断层弯曲褶皱模拟;交互垂向/斜向滑动褶皱模拟等。由于该软件系统处于世界领先水平,故已被 50 多个国际石油公司正式用于进一步证实他们的构造解释



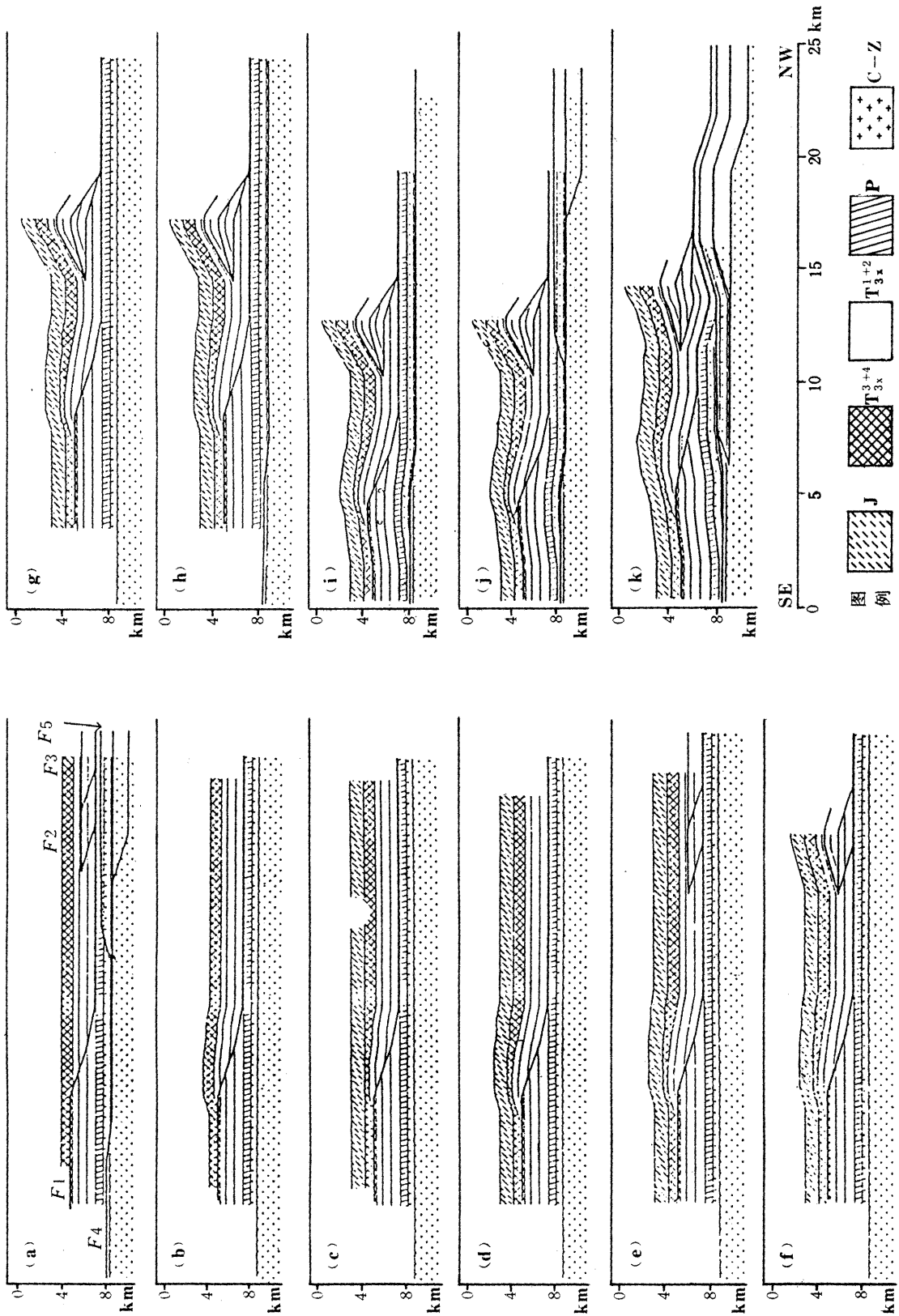


图 8 中坝背斜构造演化平衡剖面

的正确性。

LOCACE 软件系统是 AGIP、IFP、SNEA<sub>(P)</sub>、TOTAL-CFP 四家公司联合开发的,适用于剖面复原的应用软件,其主要优点是:①构造解释程序有利于快速精确地实现剖面平衡;②设计了六类不同的剖面复原方法,还考虑了压实效应;③利用各种剖面构制手段及多种测量工具可使解释后的地质剖面达到最优;④实现了人机联控;⑤可预先设计比例尺绘图;⑥提供多种手段,具灵活性等。

国内有关平衡剖面技术的介绍还不多,基本处于翻译国外文章、介绍有关知识的阶段,应用才刚刚起步。1994 年 2 月份在杭州召开了我国首次平衡剖面技术专题调研会。从目前来看,南京大学、浙江大学、南京地矿所、西南石油学院、江汉石油学院、四川石油地调处分别在四川盆地、准噶尔盆地、塔

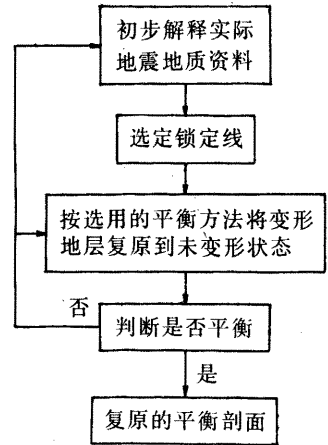


图 9 复原法制作平衡剖面策略

里木盆地、吐哈盆地和下扬子区进行了平衡剖面技术的应用研究。尽管海洋石油勘探开发研究中心与中国地质大学(北京)合作,共同研制了“OSES 系统”,有其一定的优越性。但该系统仅针对张性盆地的构造演化进行剖面复原模拟,降低了其应用范围,加之,目前还未见到有关用该系统处理解释的实际剖面,因而未受到其它单位的青睐。1994 年初,四川石油地调处与西南石油学院合作研制开发了平衡剖面技术应用软件,并在微机上获得成功。现正准备把该软件移植到 Sum 工作站上,实现人机联控式的平衡剖面解释验证工作。由于该软件包括了平衡剖面技术的两大方法——正演法和复原法,而绘图功能又极强,故平衡剖面的处理、解释极其灵活、方便,令解释人员得心应手。该软件不受构造范围的限制,可能代表了目前国内比较领先的技术水平。

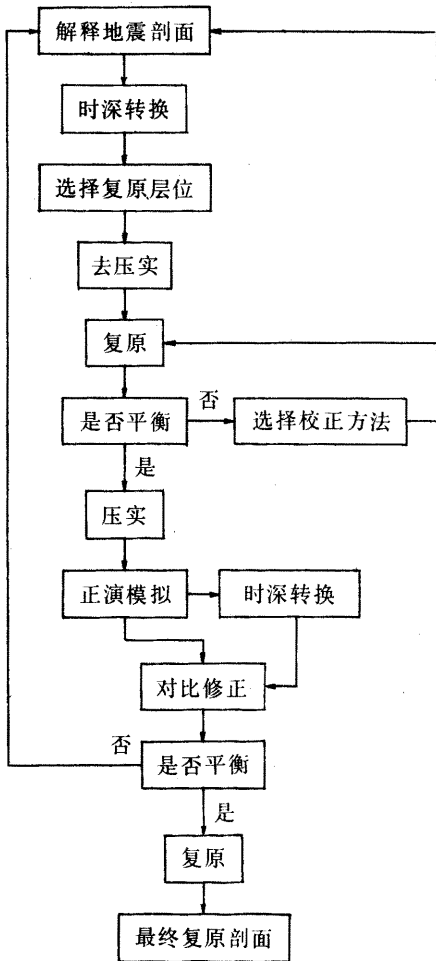


图 10 复原法产生平衡剖面流程图

### 结论与建议

平衡剖面技术适用的构造范围包括:①张性构造区;②压性构造区;③山前褶皱带;④逆冲褶皱带;⑤高陡构造区;⑥盐类褶皱带;⑦隐伏褶皱带;⑧滑脱褶皱带等。

平衡剖面技术的应用范围包括:①评价和修正地震解释;②把断层迹线投影到深度剖面;③更精确地描绘储集层的几何形状和范围;④精确地了解油

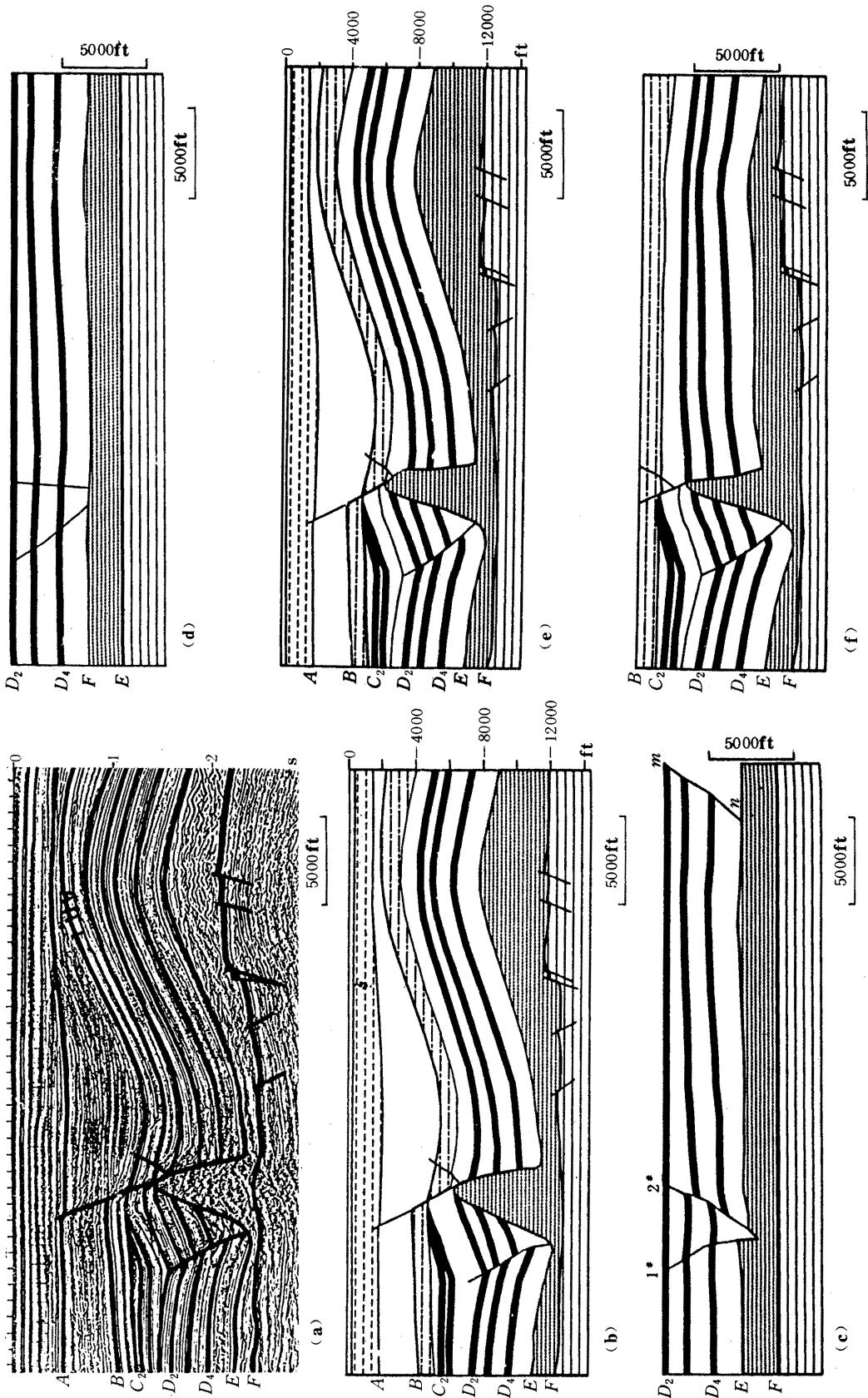


图 11 北海盐构造的复原和平衡

气藏的几何形状,并估算其容积;⑤发现新的勘探目标;⑥确定一个地区的变形史;⑦解释油气生成史、运移史和圈闭史;⑧指明可能的油气运移途径,运移和聚集的时间及可能的构造圈闭;⑨确定早期形成的圈闭是否存在完整性;⑩去压实后的复原平衡剖面可用于热熟化分析等。

综上所述,平衡剖面技术具有广泛的应用前景,针对目前国内应用现状,作者提出以下几点建议:

(1)平衡剖面技术应用软件的编制应使用C语言或FORTRAN语言,以便于移植到人机联作交互式的解释系统中;

(2)应投入一定的研究力量把平衡剖面技术与地震资料仿真技术结合起来,使其更直观、更合理;

(3)解释过程应综合运用平衡剖面技术的正演法和复原法,通过正演—复原或复原—正演的交替进行,更精确地了解研究区构造等地质演化状况,做出更合理的解释;

(4)国内各大油气田和地质勘探部门、应迅速推广、普及平衡剖面技术,用它验证地质解释的正确性,减少油气勘探中的盲目性、风险性。

本文在编写过程中,得到了西南石油学院陈伟博士的热情指教;四川地调处研究所高级工程师刘开时、吴希光对初稿进行了严格的审核,并提出许多宝贵意见,在此一并致谢!

#### 参 考 文 献

- 1 陈伟等. 平衡剖面计算机模拟及其应用, 科学出版社, 1993
- 2 Dahlstrom C D A. Balanced Cross Sections. *Canadian Journal of Earth Science*, 1969, 6: 743~757
- 3 Vans Mount, John Suppe et al. A forward modeling strategy for balancing cross sections. *AAPG*, 1990, 74 (5): 521~531
- 4 肖安成. 平衡剖面的正演模拟方法. 江汉石油学院学报, 1994, 16(1): 1~10
- 5 P B Jones 等. 利用计算机平衡剖面勘探构造—地层远景带. 国外油气勘探, 1993, 5(4): 407~489
- 6 Rowan M G. 有助于张性岩区地震解释的横剖面复原和均衡. 国外油气勘探, 1990, 2(3): 17~27
- 7 牟中海. 应用地震资料建立压性盆地平衡剖面. 石油地球物理勘探, 1992, 27(4): 498~504
- 8 石人骥译. 剖面复原和均衡作为地震解释的一种辅助手段. SEG 第 59 届年会论文集, 石油工业出版社, 1991: 935~936
- 9 John H Shaw, Stephen C Hooka, John Suppe. Structural trend analysis by axial surface mapping. *AAPG*, 1994, 79(5): 700~721
- 10 岳石. 国外逆冲构造学的进展概述. 国外地质, 1991, 6: 1~3
- 11 严又生译. GEOSSEC—提高地震解释的可能性, 石油地球物理勘探参考资料, 1993, 210(9): 1~3
- 12 Mitra S. Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution and hydrocarbon traps. *AAPG*, 1990, 74: 921~945
- 13 Bally A W. Seismic expression of Structural styles. *AAPG*, 1984
- 14 Mitra S. Equal-area balancing. *American Journal of Science*, 1989, 289: 563~599
- 15 平衡剖面计算机辅助设计软件——LOCACE. 石油物探信息(报), 1993年11月15日
- 16 平衡剖面技术专题研讨会. 石油消息(报), 1994年4月16日
- 17 张性盆地构造演化模拟系统(OSESM). 石油地震地质, 1992, 4: 封2