

# 平衡剖面技术在洼陷构造分析中的应用

——以临南洼陷古近系为例\*

李翔

(中国地质大学,北京 100083)

**摘要:**平衡剖面技术作为现代构造地质学领域的一项重大成就,在构造地质、石油地质与勘探以及盆地模拟方面应用广泛。该文在介绍平衡剖面技术的基础上,根据平衡剖面原理对临南洼陷研究区内的5条地震剖面进行了平衡剖面的恢复以及伸展参数的计算,对该地区的构造演化史进行了分析。研究表明,临南洼陷古近纪构造活动强烈,构造活动由早到晚基本具有由强减弱的趋势,孔店组沉积时期盆地的构造沉降和伸展活动最强,沙河街组一段到东营组沉积时期盆地的伸展活动趋于微弱,到新近纪盆地的伸展活动基本停止。

**关键词:**平衡剖面;构造演化;古近纪;临南洼陷

**中图分类号:**P618.130.1

**文献标识码:**A

运用平衡剖面技术对临南洼陷古近纪的构造发育史进行反演模拟,能够直观地再现地下构造的原始几何形态,迅速提供地震剖面的构造解释方案;能够为认识构造发育史、分析油气运移及聚集规律提供依据,同时可以把地质观点通过图形准确、直观地反映出来。其结果也可作为盆地模拟、油藏模拟、定量计算构造伸缩量等地质研究的一个参考。

## 1 地质背景

临南洼陷位于惠民凹陷西南部,属于惠民凹陷的次级构造单元。洼陷轴向为NEE向,其北部以临商断裂和中央隆起带为界与阳信和滋镇洼陷相隔;南部为临南斜坡带由一条反向调节断层(夏口断层)向鲁西隆起过渡,构成了北断南超的半地堑式洼陷。

临南洼陷作为惠民凹陷的一部分,其构造形成演化与渤海湾盆地其他地区具有共性,但也有其自身特点。临南洼陷是在古生代地台基底基础上形成的,古生代到新生代地层保存较全,古生代以后形成演化大体可以分为中生代断陷、孔店组—沙河街组四段沉积时期的斜坡、沙河街组三段—东营组沉积时期断陷和新近纪拗陷4个阶段<sup>[1]</sup>。

临南洼陷内部中生代时期断裂不发育,沉降中心西部表现为北厚南薄的不对称地堑,东部表现为在商河和夏口断层附近厚,洼陷中心薄的对称地堑;孔店组—沙河街组四段沉积时期是惠民凹陷裂陷阶段的早期,凹陷北部断裂活动剧烈而南部断裂活动较弱形成北断南超的半地堑箕状拗陷,此时临南洼陷处于箕状拗陷的缓坡带上,断裂不发育<sup>[2]</sup>,地层自北向南逐渐减薄沉积了一套滨浅湖相的粉、细砂岩与泥岩互层和火山碎屑岩;沙河街组三段—东营组时期,临商断裂带和夏口断裂带活动逐步增强,临南地区从凹陷中分离出来成为独立的洼陷,并成为原大洼陷范围内最主要的沉积中心,沉积了一套深湖暗色泥岩至扇三角洲—深水浊积扇砂岩;东营组末期盆地全面填充而消亡,之后盆地整体抬升遭受剥蚀<sup>[3]</sup>,新近纪盆地整体拗陷,沉积物披覆在古近纪地层之上,沉积了馆陶组和明化镇组的冲积——河流相碎屑岩。临南洼陷主要表现为洼陷中心厚,向四周减薄的拗陷型沉积。

## 2 平衡剖面技术

Dahlstrom<sup>[4]</sup>(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

收稿日期:2010-08-10;修订日期:2010-09-26;编辑:程光锁

作者简介:李翔(1986—),男,硕士研究生,现就读于中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业;E-mail:lxucugh@sohu.com。

论趋向完善。现在平衡剖面技术已被国内外地质学家和勘探学家作为一种模型解释的重要工具广泛应用于构造地质、石油地质与勘探以及盆地模拟等方面<sup>[5]</sup>。

平衡剖面基本原理认为,如果变形前后物质的体积不变,则在垂直构造走向剖面上体现为“面积不变”;如果变形前后岩层厚度保持不变,则转化为“层长不变”。所以,平衡剖面技术可以理解为是一种遵循岩层层长或面积在几何学上守恒的原则,将已变形的剖面恢复到未变形状态,或从未变形地层剖面依据变形原理得到变形剖面的方法<sup>[6]</sup>。

当对剖面进行平衡计算时,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,则剖面是平衡的。如果不相等,而且这种不相等又无法解释,那么剖面就是不平衡的。一条未作平衡检验的剖面是不可信的,不平衡剖面的地质构造解释则是错误的。平衡剖面也只是一种模式,不一定真实,只是满足了大量合理的限制条件,更接近实际<sup>[7]</sup>。

平衡剖面的计算方法主要可归纳为恢复法和正演模拟法。恢复法就是由实际形变剖面恢复至原始的、未经构造变形的剖面。正演模拟法就是由原始的未变形剖面演化至经构造变形后的剖面。其后平衡剖面技术又产生了产状法、面积平衡法及剩余面积法等。由于正演法实现起来复杂,涉及几何模型和变形模式的不确定性,所以目前广泛应用恢复法制作平衡剖面<sup>[8]</sup>。构造正演和反演主要通过为非运动学和运动学算法来完成。

## 2.1 非运动学算法

### 2.1.1 弯曲去褶皱

弯曲去褶皱法适用于平行褶皱,该算法是通过去褶皱顶层和它内部的平行滑动系统到水平基准面或假定的区域来实现的(图1)。即对由弯滑机制生成的褶皱进行恢复,去褶皱是围绕钉线(面)进行的,所有与钉线(面)相交的点在去褶皱过程中不受剪切或去褶皱作用。该算法的原则:①模板层在去褶皱方向上长度不变;②所有平行于模板层的层长在去褶皱方向保持一致;③同一褶皱带的柱形或尖顶褶皱的面积保持不变;④体积(对2D是面积)不变;⑤相对层厚度恒定,层间的不连续滑动将沿着模板层在特定的点改变层厚。

### 2.1.2 恢复到基准面

该算法允许地层被恢复到水平的或假定的区域

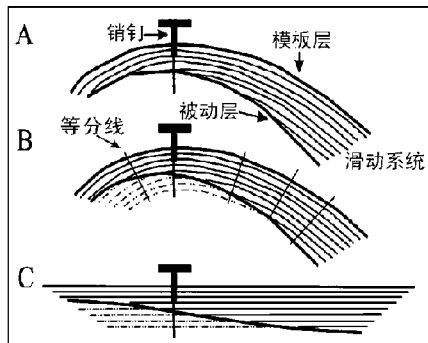


图1 弯曲去褶皱

A 待恢复褶皱;B 建立滑动系统,销钉位于褶皱顶部,垂直于层面。围绕销钉沿层面标记地层倾角平分线,该线与地层的交点为地层厚度;C 模板层和被动层围绕销钉完成去褶皱基准面,地层被垂直或斜线方式去褶皱(图2)。

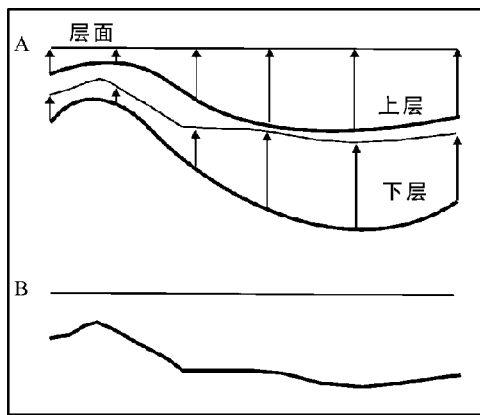


图2 恢复到基准面

A 垂直箭头为顶层恢复到水平面所经历的位移,底层将跟随顶层向上拉伸同样的距离;B 恢复后的顶、底层

该算法类似于通常所说的“层拉平”算法。原则:①变形前后的层体积不变;②变形前后的去褶皱方向的长度是变化的;③变形前后的层面积是变化的。

## 2.2 运动学算法

### 2.2.1 斜剪切

斜剪切算法是将断层上盘的变形特征与断层几何形态联系起来(图3)。斜剪切算法主要采用3个参数——移动方向、剪切矢量和水平断距来控制构造复原。在正演时是通过上盘拉开、指定剪切矢量和位移量来进行。斜剪切假定变形仅发生在断层上盘,沿着一系列平行的剪切钉线发生,这些钉线与断层面斜交,其大小由水平断距参数定义。在三维空间中,斜剪切算法能根据不同的水平断距剖面,将上盘沿该面向上复原到撕裂点。

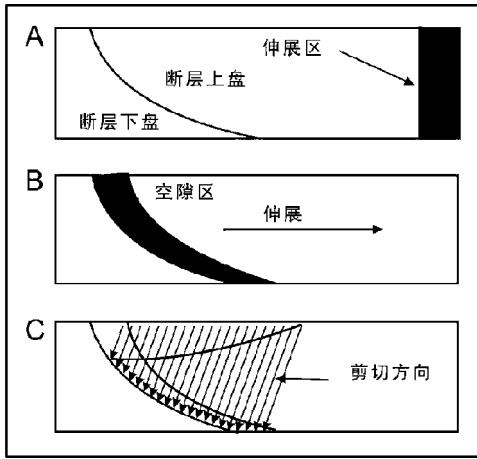


图3 斜剪切算法正演模型

A 初始阶段,黑色区域为拉长量;B 拉升后在上下盘之间产生一个假定的真空区,真空区的大小为伸展区的大小;C 断层上盘塌陷到断面上填补真空区,塌陷路径由剪切矢量控制

斜剪切算法的原则:①体积不变;②剪切矢量棒的长度不变,这个长度就是沿矢量方向断层面和上盘的标志层之间的距离。

### 2.2.2 弯曲滑动

弯曲滑动算法用来模拟在褶皱和逆冲带发现的断弯褶皱的几何和运动特征。当一个断块相向滑向另一断块时,不平的断层面肯定在其中的一个断块产生扭曲(假定变形限制在上盘之内)。该算法大部分基于 Suppe<sup>[9]</sup>等人的工作。弯滑算法应用于断层几何形态为断坪—断坡—断坪的构造样式,且斜面角度小于等于 30°。弯滑算法的原则:①上盘地层的体积不变;②下盘地层保持不变形且不运动;③上盘层长不变;④算法限制于具有单一的断坪—断坡—断坪形态的断层;⑤上盘层的真厚度不变;⑥假定在断层位移之前地层是水平和平行的;⑦假定层平行剪切。

### 2.2.3 断层平行流

断层平行流算法是基于 Egan 等人的工作,同时也基于颗粒层流(颗粒沿断层斜面流动)理论。断层面被分割成不连续的倾斜段,每一个倾角变化点标记一个平分线。流线是通过将不同等分线上的离断层等距离的点连接起来构成的,上盘地层的颗粒沿着这些与断层平行的流线运动(图4)。

该算法的原则:①不必计算轴面;②3D 上盘体积不变;③2D 上盘面积不变;④由于可以用角度剪切,所以前翼的体积和厚度可不变;⑤假设下盘不变形且不移动。

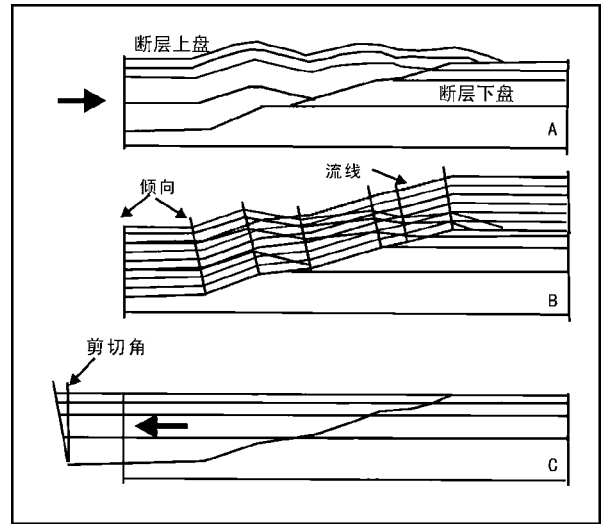


图4 断层平行流

A 现今的地层形态;B 断层面被分割成不连续的倾斜段,每一个倾角变化点标记一个平分线;C 恢复后的地层

该算法的目的是处理褶皱逆冲带中的复杂断层形态,这些构造变形多为层间平行剪切。同时,这一算法同样适用于拉伸构造环境,如犁状断层之上形成的宽缓滚动背斜构造。

### 2.3 复原剖面时需做的考虑

(1)恢复方向的判断。单方向的伸展,在做构造平衡恢复时,沿断层恢复上推的方向与伸展的方向相反。即每一个受正断层控制的断块沿着断面向上滑动到恢复的层位。其结果剖面的长度向伸展相反的方向缩短,缩短的长度就是各条断层水平断距之和。对于相向而掉的对掉断层结构的剖面,恢复时是以两侧向中间缩短。另外平衡剖面的剖面线较短时,也要考虑是否有另一翼对掉的情况,并根据总体情况来考虑恢复时地层的移动方向。

(2)在做平衡恢复时,平衡剖面的三要素,首先要考虑的是刚性块体的平衡,其次是塑性变形的平衡,最后是压实校正的平衡。一般情况下,主要是刚性块体的平衡。在伸展构造中典型的正断层平衡时也要注意塑性变形的影响,平衡恢复时,要注意塑性变形的剖面上面积的恢复,恢复后的断层不能人为出现逆断层的现象,否则要做适当调整。

(3)断层期和产状。断层向上的延伸一定要注意构造发育的期次,与上覆地层有不整合关系时,下覆发育的断层一定延伸到恢复期的顶面,代表着前一期构造的完整活动,而不能延伸停止到中间。对于掀斜断块产状恢复后,相应地断面产状也要做

调整,通常断面产状随着地层产状的恢复由缓变陡。

(4)在发育恢复的过程中,发现原解释的剖面存在不合理的地方,这时候要根据平衡的特点对原剖面做适当的修改,使其剖面符合平衡的特点。

### 3 临南洼陷古近系平衡剖面的恢复

在选取地震剖面的时候,剖面的成像质量、测线的走向及其和研究区的关系直接影响着解释结果和地质模型的合理性。在选取地震剖面时,应遵循如下的原则:①能够穿过研究区;②成像效果好;③有典型的构造;④垂直总体构造线走向。

研究区临南洼陷北至惠民凹陷中央隆起带,南至南部斜坡带,东至临邑以东,西至平原。研究区古近纪断层主要有 NE, NW 及近 EW 向 3 组<sup>[1]</sup>。从地震剖面上可以看出,古近系断裂较发育,至新近系,构造活动趋于平缓,断层活动相对较弱。

根据以上原则,针对研究区构造图(图 5),选取惠民凹陷的 5 条地震测线进行研究。依次命名为 Line 1 到 Line 5(图 5),Line 1 由西向东横贯惠民凹

陷中央隆起带偏南部分,向东延伸至东营凹陷;Line 2 与 Line 1 大致平行,呈东西向贯穿惠民凹陷南斜坡,向东延伸至东营凹陷;Line 3 位于盘河地区,为南北向的区域性隆起;Line 4 和 line 5 基本平行,呈南北向贯穿临南洼陷,北至中央隆起带,南至南部斜坡带。所选测线横穿临南洼陷,可用来研究洼陷的总体演化特征。通过对洼陷构造发育剖面的定量分析,确定剖面各发育时期的剖面长度和伸展量,计算其伸展率(表 1)。

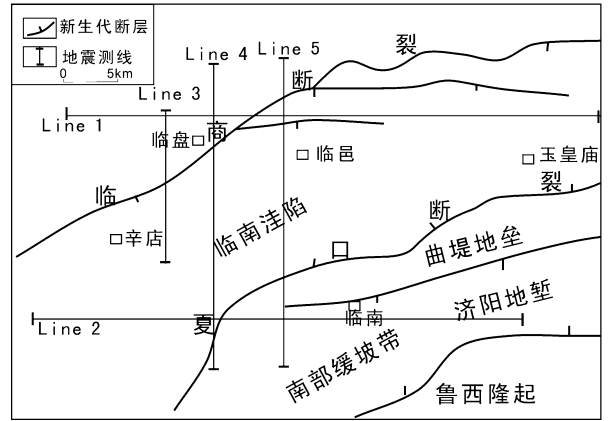


图 5 临南洼陷构造分区图

表 1 Line 1 到 Line 5 测线伸展量

| 编号     | 参数   | 孔店组     | 沙河街组<br>四段 | 沙河街组<br>三段 | 沙河街组<br>二段 | 沙河街组<br>一段 | 东营组     | 馆陶组     | 现今      |
|--------|------|---------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|
| Line 1 | L(m) | 45267.8 | 63017.4    | 64102.8    |            | 65960.3    |         | 66996.5 | 67307.5 |
|        | E(m) | 17749.6 | 1085.6     | 1857.5     |            | 1036.2     |         | 311     |         |
|        | e(%) | 39.2    | 1.73       | 2.90       |            | 1.57       |         | 0.46    |         |
| Line 2 | L(m) | 54278.0 | 57835.7    | 60291.5    |            | 61616.4    |         | 61892.5 | 61892.5 |
|        | E(m) | 3557.7  | 2455.8     | 1324.9     |            | 276.1      |         | 0       |         |
|        | e(%) | 6.55    | 4.25       | 2.20       |            | 0.45       |         | 0       |         |
| Line 3 | L(m) | 10075.5 | 11682.3    | 17883.4    | 19667.2    | 20330.0    | 20382.1 | 20633.3 | 20972.6 |
|        | E(m) | 1606.8  | 6201.1     | 1783.8     | 662.8      | 52.1       | 251.2   | 339.3   |         |
|        | e(%) | 15.9    | 53.8       | 10         | 3.37       | 0.26       | 1.23    | 1.64    |         |
| Line 4 | L(m) | 63029.1 | 66346.2    | 68917.8    |            | 70607.7    |         | 75016.1 | 75016.1 |
|        | E(m) | 3317.1  | 2571.6     | 1689.9     |            | 4408.4     |         | 0       |         |
|        | e(%) | 5.26    | 3.88       | 2.45       |            | 6.24       |         | 0       |         |
| Line 5 | L(m) |         | 41277.9    | 52950.4    | 53774.8    | 55163.5    |         | 56749.9 | 57000.7 |
|        | E(m) |         | 11672.5    | 824.4      | 1388.7     | 1586.4     |         | 250.8   |         |
|        | e(%) |         | 28.3       | 1.56       | 2.58       | 2.88       |         | 0.44    |         |

注:L为界面长度;E为伸展量;e为伸展率。

由表 1 和 5 条测线的构造演化剖面(图 6 为临南洼陷 4 号测线的构造演化剖面)可知,盆地古近纪的伸展活动从早到晚总体来说是依次减弱,孔店组沉积时期,盆地伸展量和伸展率较大,表明该时期

盆地构造沉降活动强,沙四段沉积时期盆地持续拉张,伸展量和伸展率整体较大,从沙三段沉积期开始盆地伸展率逐渐减小到新近纪几乎停止拉张,盆地构造活动减弱。

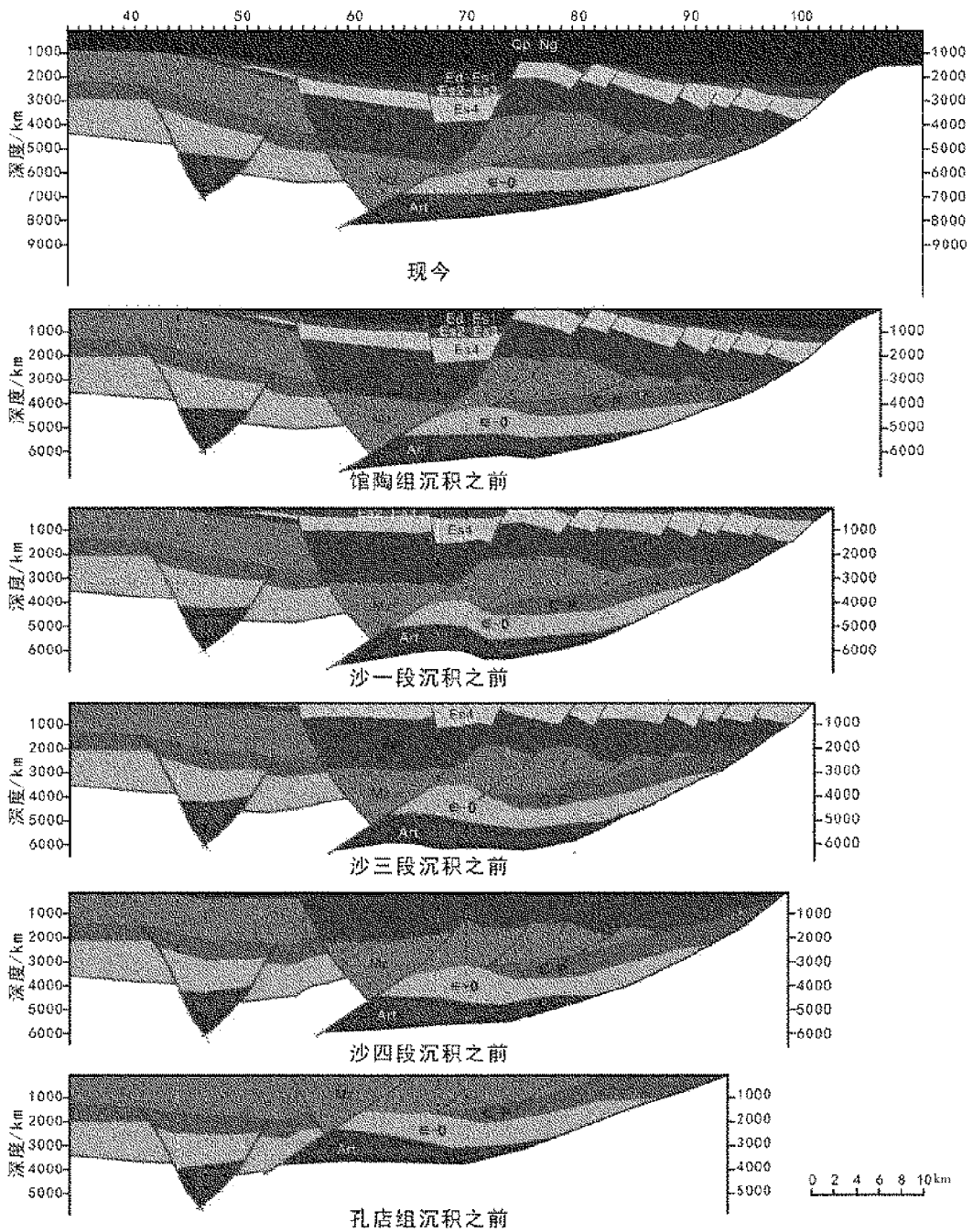


图6 Line 4 构造演化剖面图

由表1可以看出1、2号2条横向测线，4、5号3条纵向测线同一时期伸展量和伸展率变化较大，这主要是由于临南洼陷受到右旋剪切应力作用<sup>[2]</sup>，盆地内局部构造变化所致，另外也与平衡剖面恢复过程中一些参数的设置有关，剖面恢复过程中任何因素的改变都会影响分析结果，这在一定程度上显示出了平衡剖面恢复技术的局限性。3号测线处于中

央隆起带，故其伸展率总体较大。

#### 4 结语

(1)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等方面，已被国内外地质学家和勘探学家作为

一种模型解释的重要工具,为研究构造演化提供了很好的方法。

(2)平衡剖面技术作为地质构造研究与油气勘探工作的一项重要方法,尽管有许多优点,但也有其局限性:①平衡剖面技术依靠合理的地质模型和地震解释模型,在平衡剖面制作过程中,任何要素的改变都会影响地质分析的基础;②现今所采用的平衡几乎都为二维,一些文献中提出的三维研究也仅提供了一些研究思路,在现有的技术还不能进行合理的三维平衡;③剥蚀量的恢复只能做到地质恢复,不能进行实际的量化恢复。

(3)临南凹陷古近纪构造活动强烈,构造活动由早到晚具有由强减弱的趋势。孔店组构造沉降和盆地的伸展活动最强,沙河街组三段—东营组沉积时期伸展活动趋于微弱,新近纪构造伸展活动基本停止。

## 参考文献:

- [1] 何瑞武. 临南洼陷构造沉积演化及油气成藏研究[M]. 北京:地质出版社, 2008.
- [2] 郭兴伟,吴智平,杨小秋,等. 渤海湾盆地临南洼陷张扭构造演化及应力场数值模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 75-80.
- [3] 崔世凌,杨泽蓉,李鑫,等. 惠民凹陷构造样式及分布规律研究[J]. 石油物探, 2010, 49(2): 187-197.
- [4] DAHLSTROM C. D. A. Balanced cross sections[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, (6): 743-757.
- [5] 陈伟,卢华复,施央申. 平衡剖面计算机模拟及其应用[J]. 北京:科学出版社, 1993.
- [6] 张功成,梁慧社,徐宏,蔡希元. 平衡剖面正演模拟技术在松辽盆地构造分析中的应用[J]. 西安石油学报, 1999, 14(2): 1-2.
- [7] 张进铎. 平衡剖面技术在国内外油气勘探中的最新应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1857-1861.
- [8] 张向鹏,杨晓薇. 平衡剖面技术的研究现状和发展[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(2): 78-79.
- [9] Suppe, J. , Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science. 1983, 283: 684-721.

## Application of Balanced Section Techniques in Analyzing Depression Structures

### ——Setting Paleogene Linnan Depression as an Example

LI Xiang

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As an important technique in the study of tectonic evolution of basins, balanced section technique has been widely used in structural geology, petroleum geology, exploration and basin simulation. On the basis of introducing balanced section technique, according to the principle of balanced cross section, five main seismic sections in Linnan depression study area have been recovered and extensional parameters have been calculated. Tectonic evolution history of this region was analyzed as well. It was showed that Paleogene tectonic activity was strong in Linnan depression, tectonic activity became more and more weaker from morning till night, tectonic subsidence and stretching activities of this basin in Kongdian period was the strongest, extension activities in the basin became weaker during the first section of Shahejie formation and Dongying formation, and the extensional activities stopped in Neogene basin.

**Key words:** Balanced cross section; structural evolution; Eocene; Linnan depression