

平衡剖面技术原理及其研究进展

方石, 孙求实, 谢荣祥, 黄龙

吉林大学地球科学学院, 长春 130021

摘要 平衡剖面技术是通过几何学原则,在垂直构造走向的剖面上将变形构造全部复原成合理的未变形状态的一种模拟技术。它可以对地层构造演化进行定量、半定量的分析解释,是构造演化定量分析的重要手段,在油气勘探、盆地模拟等领域得到广泛应用。本文介绍了平衡剖面技术的发展历程、基本概念、原理及模拟过程的限制条件;论述了平衡剖面校正的方法;着重阐述了平衡剖面正演和反演制作方法。提出了平衡剖面技术的不足:平衡剖面技术测出的缩短量和缩短率精度有待提高;三维模拟的制作过程比较繁琐;应将地层岩性展布考虑进去,并纳入沉积相;地层厚度的精准度对平衡剖面技术的准确性影响很大。随着对平衡剖面技术研究的深入以及计算机技术的发展,平衡剖面技术在构造变形剧烈,地震资料品质较差的地区将得到更广泛的应用。

关键词 平衡剖面;盆地模拟;正演模拟;反演模拟

中图分类号 P315.2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.08.012

Principle and Progress in Balanced Section Technique

FANG Shi, SUN Qiushi, XIE Rongxiang, HUANG Long

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract The balanced section technique is a simulation technique about restoring deformation structure into original undeformation condition on the vertical structure, based on geometric conservation principle. It can quantitatively and semiquantitatively analyze the formation tectonic evolution, and access to a wide range of applications in the field of oil-gas exploration and basin modeling. The developing process, basic concept, principle and limiting conditions in simulating process of balanced section technique were introduced. The correcting methods of balanced section were discussed. The making methods of forward modeling and inverse modeling were emphatically elaborated. The insufficiency of the balanced section technique were presented: (1) The accuracy of shortening amount and shortening rate measured by the balanced section technique needs to be improved; (2) The production process of three-dimensional simulation is relatively complicated; (3) The spreading regularity of formation lithology sedimentary and facies should be taken into account; (4) The accuracy of the balanced section technique is largely influenced by the precision of the formation thickness. With deeper study on balanced section technique and the development of the computer technology, the balanced section technique is regarded as an effective method in particular area with violent structural deformation and poor seismic quality.

Keywords balanced section; basin modeling; forward modeling; inverse modeling

0 引言

构造演化过程的清晰与否对于盆地性质认识,断层活动规律找寻,盆地油气运移都有着重要意义。长期以来,人们对于地层构造演化仅限于定性分析,缺少定量分析的方法。平衡剖面技术填补了这一空白,它可对地层构造演化进行定量、半定量分析解释,经过平衡剖面满足了大量合理的限制

条件,更接近于实际变形过程和真实地况,被公认为地震剖面构造解释的验证标准之一和盆地构造分析的方法之一^[1-3]。

1 平衡剖面技术的发展历程

平衡剖面理论是在石油勘探的实践中逐渐形成的。从1910年Chamberlain首次利用平衡原理至今已经历了百余年

收稿日期:2011-12-19;修回日期:2012-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(40902057,40702027);吉林大学创新团队建设项目(201004001);中国地震局地质研究所开放实验室基金项目(LED0609)

作者简介:方石(中国科协所属全国学会个人会员登记号:S100700132M),副教授,研究方向为油气勘探、沉积学、构造热年代学,电子信箱:fs812625@vip.sina.com

时间。此间,平衡剖面技术取得了长足的发展,获得了许多重要结果。在理论方面,平衡剖面技术已从基本概念的研究发展到薄皮构造研究,并在构造演化和盆地模拟、伸展性区域的构造应力分析等方面有突出进展;实际地质工作中,平衡剖面技术在盆地模拟,构造解释合理性判断,以及压性与伸展性区域的构造应力分析等方面都得到广泛应用^[4]。以下是平衡剖面技术的发展过程。

1.1 平衡构想的提出

1910年,Chamberlain首次提出了平衡原理,他假定在系统构造变形时,上部地层剖面面积是恒定的^[5]。其后,1933年Rich在计算滑脱面深度时应用了平衡原理;1962年Gogul在计算造山带的缩短量时同样运用了该原理^[6]。

1.2 平衡剖面概念的确立

1969年,Dahlstrom^[7]在研究Appalachians构造区带中详细论述了平衡剖面概念,这是平衡剖面概念第一次被明确提出。其后,1979年Hossack^[8]将该方法应用于估算造山带地壳的缩短量。从此,该方法被推广地震地质解释。20世纪70年代末期,薄皮构造机制(thin-skinned tectonics)的提出使平衡剖面技术得到了快速发展,其间产生了恢复法、面积平衡法、剩余面积法等^[9]。80年代初,Suppe等^[10-11]详细论述了断层转折褶皱(fault-bend folding)的演化和运动学过程,使得平衡剖面技术的优越性充分体现出来。

1.3 剖面可平衡性的确立

1983年,Hossack^[8]对平衡剖面的选取进行了约束。他根据构造剖面的可平衡性将剖面分为4类:不平衡剖面、不能复原剖面、可复原或可承认剖面 and 有价值平衡剖面。认为对于一条构造剖面,掌握充分的剖面资料极为重要。在了解地表和地下资料数据的同时,还要对剖面所处的位置、走向、标志层(不易塑性变形且厚度稳定的岩层)有充足的掌握,对构造运动方式和构造规律(诸如地壳缩短或伸展方式、方向及变形顺序等)有充分的认识,在此基础上运用平衡剖面技术才能得到更接近真实的、有价值的平衡剖面^[12-13]。

1.4 正演和反演的诞生

20世纪80年代中期开始了用正演法制作平衡剖面研究,80年代末期得到用正演法制作的正确的平衡剖面^[3,14]。1983年,Verrall等提出平衡剖面技术反演法,并应用于推测地下断层等构造的几何形态,取得显著应用价值。相比于正演法,反演法具有计算量小、约束条件易于掌控等优点,因而得到了广泛认同,成为平衡剖面技术的一项重要应用^[3]。

1.5 平衡剖面技术在中国的发展

20世纪80年代以前,中国的平衡剖面研究相对较少,直到20世纪90年代,刘学锋等^[15](1998年)、张功成等^[16](1999年)、苏惠等^[17](2000年)、颜丹平等^[18](2003年)才将平衡剖面技术大量应用于国内主要含油气盆地的研究中。1994年,肖成安等^[19]从理论上研究正演平衡剖面技术;1995年,刘光炎等^[4]将正演平衡剖面技术应用在压性区域以及在地震地质解释上;2000年以后,国内对平衡剖面反演的应用有了长足的

发展,梁慧社等^[20](2002年)、杨济广等^[16](2006年)、李乐等^[21](2010年)、李伟等^[22](2010年)将其应用于油气勘探、盆地模拟、煤田勘探、地震解释等领域^[2,23-24]。

2 平衡剖面技术的原理及其限制条件

1983年,Elliott^[25]认为平衡剖面是通过几何学原则,在垂直构造走向的剖面上将变形构造全部复原成合理的未变形状态。1987年,Ramsay^[26]用图1形象地解释了平衡剖面的定义,图中天平的左侧为变形前岩层,右侧为变形后岩层,平衡剖面就是保持岩层变形前后质量的恒定。在地震解释实践中,平衡剖面技术作为一种重要的模型解释工具,将定性分析转化为定量计算,满足大量合理的限制条件,因而更接近于客观实际^[4,27-28]。

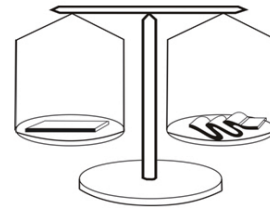


图1 平衡剖面概念原理

Fig. 1 Principle diagram of balanced section

平衡剖面技术的基础理论是物质守恒定律,即被平衡岩层变形前后体积不增不减,保持恒定。在封闭体系中,理想状态下地层在构造运动过程中只是形态发生改变,其体积保持不变。但是在真实地质环境中,由于地层的演化过程受到构造作用、气候、沉积、剥蚀等多种因素干扰,不可能达到完全理想状态,因此并不是任何地质剖面都适用平衡剖面技术进行分析。所有平衡都仅仅是一种逼近状态,这是由基本的几何原理决定的。即不可能将一个已知面积和其他参数的几何形态转变为具有相同面积几何参数的另一几何形态,而不使其中一个或者两个参数发生改变。任何剖面的平衡制作都涉及参数畸变,在制作平衡剖面时必须判断哪些畸变是可以接受的^[30-31]。平衡过程中,Elliott^[9]对剖面提出了两条验证准则,第一条是可接受性,即恢复后的地质剖面应该符合实际地质情况;第二条是合理性,即剖面恢复过程中要保持变形前后面积、体积和层长守恒,平衡后的剖面根据地壳的变形规律和物质守恒规律,可推导出一系列平衡剖面恢复的几何法则,通过几何法则限制,制约剖面解释的随意性^[7,27]。

2.1 面积守恒

地层在挤压作用中投影面积的缩短量应当等于该地层重叠所增加的面积;同样的,地层在拉张作用过程中,面积的增加量等于其断层的投影面积。变形前后只是地层形态发生了变化,其总面积没有变化(图2)^[7]。图中, h 为变形剖面厚度, A_1 为压缩减少面积, A_2 为地层重叠增加的面积, L_a 、 L_c 分别为变形后和前的地层长度。线性缩短量 $S=L_a-L_c$, $A_1=A_2=hS=h(L_a-L_c)$ 。面积守恒的前提条件是形变主要发生在沿构造运动方向

上,也就是平行构造方向上应变可忽略不计。这种条件在大多数前陆褶皱-冲断带是具备的。

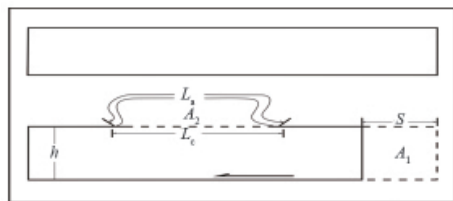


图2 面积守恒原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of area-conservation principle

2.2 层长守恒

层长守恒定理是在面积守恒的基础上简化而来的,其前提条件是变形过程中地层厚度无明显变化,只是发生了褶皱、断裂等作用,无透入性变形,因此在形变过程中各层长度一致(图3)^[7]。层长守恒在使用前首先须研究其使用条件,而确定地层是否发生过透入性变形是关键。对大部分前陆地带而言,该条件是适用的。

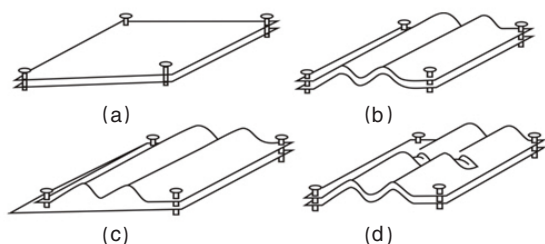


图3 层长一致原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of the strata-conservation principle

2.3 位移量守恒

位移量守恒定理主要应用于断块间的平衡。地层发生断裂后沿断裂面发生位移,理想状态下沿同一条断层的各对应层断距应当一致(图4)^[7]。因此在真实的地质环境中,如果发现断层断距不等,应进行去压实矫正,并根据实际情况做出合理解释。在同生断层中由于本身断距不守恒,不能应用断距一致原则。如果平衡过程中位移量不守恒,可能是由于以下原因所致:断层发生分叉,位移量分散到各小断层上;或者发生滑脱褶皱作用;或者断层传播褶皱作用,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^[32]。

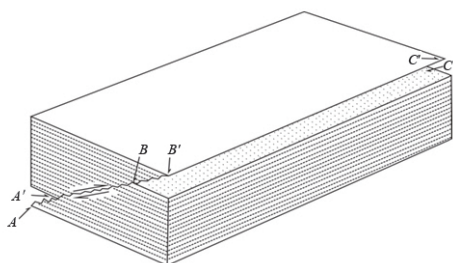


图4 位移量一致守恒原则示意

Fig. 4 Schematic diagram of the displacement conservation principle

2.4 缩短量一致

在挤压环境中,沿构造走向各剖面间的缩短量应大致相等。由于边界条件差异,构造形态常会沿走向发生变化,同时断层向两侧延伸一定距离后会变小消失。为保持造山带缩短量一致,一个断层的消失常伴随着另一个断层或褶皱的产生(图5)^[7]。该原则有利于进行剖面间相互验证。

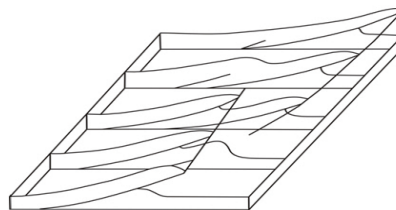


图5 缩短量一致原理示意

Fig. 5 Schematic diagram of the shortening amount conservation principle

3 平衡剖面计算中的校正

平衡剖面理论适用于封闭环境,即满足质量守恒定律。但在构造变形中,由于成岩压实作用、构造压实作用和压溶作用等现象存在,真实地质体变形前后体积必定发生变化^[8]。因此,在剖面平衡过程中需进行校正,排除这些因素对研究剖面的干扰^[33]。下面分类对干扰因素做进一步探讨^[34]。

3.1 成岩压实作用

沉积物埋藏时,由于失水和空隙的压实,体积损失可达50%。这种压实是单轴对称的,它使得地层的厚度减小。如果构造发生在成岩压实作用之后,由于变形前后地层厚度没有较大变化,它对平衡剖面计算的影响较小。当构造作用发生在成岩压实作用之前时,必须考虑压实作用。因为压实作用,地层厚度发生了变化,必然存在面积增减,在制作平衡剖面时须进行压实或者去压实。在推覆挤压区,推覆构造通常发生在沉积成岩作用后,压实作用的干扰相对次要,但在伸展构造的地区,压实校正是必不可少的^[32]。

3.2 构造压实作用

由于构造变形,可能使岩石受到进一步的压实。1969年,Ramsay^[29]发现泥岩变形为板岩后,密度可由2.5g/cm³增加到2.7—2.85g/cm³,相当于体积减少10%,他认为板岩在有限应变中可受到10%—20%的体积损失。但1977年Siddans在法国阿尔卑斯山的一个剖面中发现,从叶岩到板岩并没有密度变化。所以,可以认为变形前后岩石体积变化一般小于10%。为计算方便,平衡剖面时可假设构造压实为各向同性的体积损失。10%的体积损失将造成剖面上6.7%的面积损失^[32]。

3.3 压溶作用

1964年,Vol Plessman在研究劈理的岩石时发现,垂直压溶劈理可以造成20%—30%的压缩,局部可达50%。若压溶物质全部被溶液带走,可以造成相当显著的体积损失。但在真实地质体中,压溶的物质常常结晶后沉淀在低压处,总体积并未发生改变。由压溶作用造成的体积损失可能是垂直压溶

劈理单轴对称的。对具体地区,要估算具体的体积损失,需先估计压溶和沉积了多少物质。1983年,Siddan认为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^[3]。

3.4 剥蚀量恢复

地层的剥蚀厚度是制约盆地烃源岩演化史和油气成藏史的重要因素之一。主要的剥蚀厚度的恢复方法有:泥岩声波曲线法^[5]、不连续镜质体反射率曲线法^[6]、构造趋势法^[7]及最优化方法等。较常用的是构造趋势法,即根据区域上剥蚀厚度变化,或参考保存完整的剖面厚度对剖面进行剥蚀恢复。

3.5 塑性变形处理

地层中的软弱层常作为滑脱面存在,在挤压作用下,软弱层的塑性流动常导致褶皱核部塑性加厚。这种层厚变化改变了原始的沉积结构,必须进行校正。具体方法是首先确定塑性变形发生的时间,然后运用平衡剖面面积守恒原理进行厚层恢复,即利用塑性层总面积与岩层长度的比值求取平均厚度。考虑到变形中沿构造轴向的流动变形,实际应用中还须参考区域地层厚度变化进行校正。在剖面平衡和复原过程中以能干岩层为准,首先进行平衡恢复,建立基本格架后再将塑性地层合理地加入,形成完整剖面^[20]。

3.6 沿造山带走向的伸长

大量研究造山带中岩石应变测量的结果表明,它们在弗林图解上多属于变形应变椭圆,很可能沿其中间轴方向发生了延伸。假设变形前后体积不变,则可根据此估算沿中间轴方向的伸长量^[38]。

4 平衡剖面的正演与反演

平衡剖面技术可以提供正演和反演两种模拟过程。

4.1 正演模拟

正演模拟是指从未变形的状态向变形后的剖面模拟的过程。它可以通过对给定参数的改变,迅速地做出一系列变形剖面。1989年,Woodward提出正演模拟并不是具体地平衡一个剖面,而是根据研究者的思想去做出一个变形的剖面,用这个计算机制作的横剖面与真实的地质资料比较,然后作出取舍修改。在研究地层构造演化过程中存在多解性问题,对于同一条剖面,特别是构造变形剧烈、地震资料品质较差的剖面,不同研究者的解释会产生不同的结果。此时就需要平衡剖面技术给出权威判断,挑选出最符合地质规律的解释方案。正演模拟的优点在于可以快速建立若干个构造模式,检验一个地区可能存在的不同构造的假说。在连续模拟中,通过输入不同位移量,正演过程可以动态地展示构造变形历史,了解一个构造演化的过程和运动学特征,提供合理的解释模型,为研究油气藏的形成、演化提供依据^[3,29,32]。

正演模型的过程如下:首先提出一个可以模拟岩层的变形过程并再现地层的运动学特征的正演模型;然后依据各种限制条件修改原模型。根据断层有关的褶皱理论及区域地质资料提供的地层厚度设置变形前水平地层模型,并根据初始模型特征设置各断层的原始位置和形态。将原始地层和断层

的几何图形数值化后输入计算机,进行动态模拟变形过程并进行平衡计算,得到的变形剖面(平衡剖面)再与有关解释方案进行对比。常见的两者不符合的原因有两种情况,一是设置的断层形态和位置或断层活动幅度和先后与实际不符,因此需要修改断层参数或运动规律;二是初始模型本身存在解释上的错误,属于几何图形不合理的构造解释剖面,即本身属于“非平衡剖面”,因此需要重新调整解释方案,修改初始模型,并重新进行变形模拟和平衡计算。这样多次重复修正,逐渐逼近最终模型方案,使其既满足平衡原理又与观察数据吻合^[23,31]。图6给出了平衡剖面正演流程。

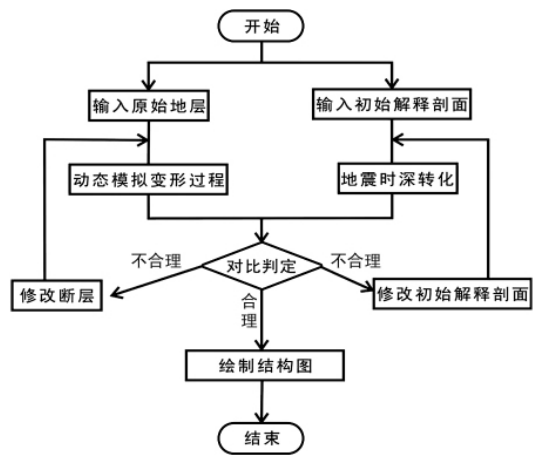


图6 平衡剖面正演流程

Fig. 6 Calculation procedure of balanced cross section

4.2 反演模拟

正演法的优点是模拟过程中可以修改、变动地层或断层参数,以判断多种不同构造类型组合的合理性,并可显示构造演化规律及提供多种中间过程参数^[31];缺点是正演过程计算量大,需要的基础资料多。平衡剖面技术现在更多的是应用于反演模拟。平衡剖面技术最早就是在压缩环境下的反演模拟中被提出的。反演模拟是从一条真实存在的、已变形的剖面入手,根据构造的形成顺序,将其恢复到未变形状态,在恢复过程中,必须检验剖面的合理性和可接受性,以避免解释的随意性,提高剖面解释的质量和效率^[3]。

在反演的实际操作中主要有以下4种方法:

(1) Chevron 制作法:认为对于犁式断层,在平衡剖面制作过程中,上盘地层运动的水平分量保持不变,断层的倾角控制断层的落差和位移量。

(2) 改进的 Chevron 制作法:认为上盘质点沿断层面的位移量保持不变,而断距和上下盘的地层落差受断面倾角控制^[30],当断层向下变为水平时,水平断距 h 增加而垂直落差大大减小。

(3) 滑线反演法:认为上盘物质运动时,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^[30]。

(4) 地层长度平衡反演法:假定地层变形前后长度不发生变化^[25],在拉伸或者挤压构造地区,沉积层基本遵循此变化

规律。

4.3 反演的制作过程举例

下面以拉张环境下的二维地震剖面为例,说明反演的制作过程。

4.3.1 准备过程

平衡剖面之前需进行前期准备工作。建立工区后,首先建立地层柱(确定地层的岩性组成、层速度等参数),然后采集(或解释)剖面,建立地质模型。

4.3.2 平衡过程

平衡过程中关键操作主要分为点编辑、线编辑,断距消除,层拉平及复制(或移动)。

(1) 点编辑和线编辑:点编辑是指对图形中的数据点进行增删、移动、调整等。线编辑是指对图形中的线进行位置的变化与增减。点、线编辑是平衡剖面操作中最基础的步骤,如果这些做得不好,将会影响或不能做断距消除。

(2) 断距消除:该过程为平衡剖面技术的核心,在进行断距消除前,需要进行时深转换(将地震剖面转换为地质剖面)和压实去压实校正^[40]。断距消除有垂直斜向滑移模式和弯滑褶曲模式两种基本模式。

垂直斜向滑移模式是根据拉张盆地中构造应力场特点模拟断层形成的。该模式是把地层从现今形变状态转换到原始沉积时的无断距平衡状态。具体而言,从形变的源状态到平衡的目标状态的模式转换可分为两种情况:①垂直/滑移转换(水平模式):将断层上盘(HW)首先被恢复为水平面,再以此水平面为目标参考面平衡下盘(FW)。当 HW/FW 不平衡或相关断层匹配不合理时,说明初始地震解释可能存在问题^[41]。②垂直/滑移转换(断裂模式):总是以位置最低的上盘的上部地层作源参考线,用次最低的下盘的上部地层作目标参考线进行平衡,与水平模式道理相同,当 HW/FW 不平衡或相关断层匹配不合理时,说明初始地震解释可能存在问题。

弯滑褶曲模式比较适用于有剪切作用的应力场下形成的断层,它一般先选后期发育的断层进行平衡,最终也是消除所有断距,达到反演构造发育史的目的^[39]。

(3) 层拉平:当某地层的断距被完全消除(平衡)之后,需要做层拉平,其过程类似于垂直/斜向滑移转换,具体步骤是先画一条和被拉平的源参考线同类型的水平目标参考线,然后与欲被拉平的整个模型作组合,最后完成层拉平。

(4) 复制和移动:对某地层进行完层拉平之后,需把该标准模型复制作为分析下部地层断裂的源地质模型。

一般情况下,一条剖面的断层构造发育史反演过程可以重复以上几个步骤操作,并结合具体情况灵活判断、应用不同模式转换实现的,如图7所示。

5 平衡剖面之不足

从1969年平衡剖面的概念第一次被提出,作为一门新兴技术得到了快速发展,并在实践中广泛应用,但其发展也依然存在一些不足。

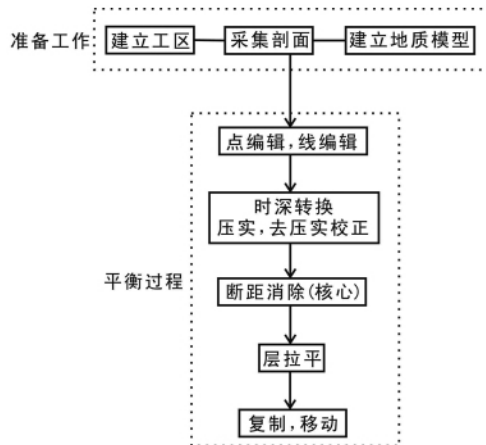


图7 拉张环境反演模拟流程

Fig. 7 Flow chart of conversion in extensional environment

由于真实环境中的各种未知性,使得解释结果与理论推导存在一定的差异,因而不能将平衡剖面作为唯一标准判断地震解释的准确性^[39]。剖面虽然平衡但不代表一定就是正确的,平衡的方法虽然合理但平衡后的剖面不一定是真实的。因而在地震解释过程中,应该合理地使用平衡剖面技术,既要考虑平衡剖面自身的机制和应用条件,又要满足地震解释的原理,使两者相互制约并印证,才能最大程度地减少地震解释的误差。

平衡剖面对较复杂地质体的解释方法,尤其是具体到微观层面存在多解性问题。不同研究者对具体问题的认识存在差异,并且细节上这种差异表现得更加明显。例如,一套地层在面平衡过程后,每个地层的变形都不一致,致使产状发生改变,此时就需要人为地对产状进行修改。因每人对于地质现象的认识不同,修改的结果自然有差异。再例如,剖面平衡过程中有时会出现资料不充分的现象,研究剖面未能囊括平衡所需全部信息。一些复杂的构造由于其变形极为严重,会导致很难推断出地层的原始展布规律。对于上述情况,现阶段的反演缺少规范的平衡标准。因此,需要通过研究者的主观思想对剖面进行平衡,必然导致平衡结果的多解性^[23,42-46]。

平衡剖面技术是基于物质守恒原理进行的正反演,而物质守恒定律的适用条件是理想的封闭环境。然而真实的地质体是开放的,研究过程中将忽略很多干扰因素,例如隐伏背斜和小断层的变形量,被剥蚀的上盘推覆体地层,山前基底卷入的逆冲断层和隐伏断层的实际位移量,这些因素都会影响研究地层的封闭性。如何排除外部环境对研究地层的干扰,现阶段还缺少量化的方法。

平衡剖面的原理和解释机制更适合于三维空间,并且平衡剖面软件的三维技术也已比较成熟,但由于有时研究区资料缺乏,而二维技术的工作量小且便于操作,平衡剖面的制作多使用二维的模拟软件,这会一定程度上影响了精度^[36]。应在保证精度的情况下,将三维模拟的制作过程简化。

一些平衡剖面软件在反演过程中,已将地层的砂地比作

为参数列入分析校对,但现阶段软件依然将每一地层当做均质处理分析,对整体地层的考虑过于简单。平衡剖面技术应把地层岩性展布考虑进去,并纳入沉积相,这对去压实矫正,滑脱、变形情况的讨论将会有极大的帮助。

在反演过程中,如果地层变形过于剧烈,致使每组地层的厚度均发生改变。这种情况下,无论运用体积守恒原理还是面积守恒原理都很难恢复出地层的原始厚度,地层的变化情况很难复原^[47-51]。

6 结论

平衡剖面技术作为一种辅助的模型解释工具,将地层的挤压和伸展模拟从定性分析提升到定量分析的层面。随着计算机技术的广泛应用,在地质资料解释中获得了快速的发展。剖面的平衡与否已经成为检测地质构造解释是否合理的方法,任何宏观的构造剖面如果不进行平衡计算,其解释都是不确定的^[52-55]。

平衡剖面也存在一定不足之处,该技术虽然大大减少了剖面解释过程中的随意性,不再仅凭借解释人员的主观经验进行推断,但平衡剖面技术测出的缩短量和缩短率精度仍有待提高。另外,平衡剖面技术是在多种假设条件下进行的,对地层厚度使用得准确合理与否也将直接影响到平衡剖面精度,因此需要用多种尺度应变测量数据核查其可靠性^[55-56]。

毋庸置疑,平衡剖面技术已经成为油气勘探领域中的一项重要重要的实用技术,对于正确判定地下构造,合理进行盆地恢复及进行资源量计算有着重要意义。平衡剖面技术本身也在不断地发展和完善,应用范围不断扩大,同时经历了由手工制作剖面向计算机模拟,由二维模拟向多维模拟的重要发展。相信随着对平衡剖面技术研究的不断深入,平衡剖面技术将会在油气勘探领域尤其是构造变形剧烈,地震资料品质较差的地区发挥更重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] 张向鹏. 地震拟地质平衡剖面技术的应用 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2007, 27(S): 64-66.
Zhang Xiangpeng. *Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2007, 27(S): 64-66.
- [2] 张向鹏, 杨晓薇. 平衡剖面技术的研究现状及进展 [J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(2): 78-80.
Zhang Xiangpeng, Yang Xiaowei. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(2): 78-80.
- [3] 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, 2007, 22(6): 1856-1861.
Zhang Jinduo. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(6): 1856-1861.
- [4] 刘光炎, 蒋录全. 平衡剖面技术与地震资料解释 [J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(5): 833-845.
Liu Guangyan, Jiang Luquan. *Oil Geophysical Prospecting*, 1995, 30(5): 833-845.
- [5] Corredor F O. Three-dimensional geometry and kinematics of the western thrust front of the eastern Cordillera, Columbia[J]. *AAPG SEPM*, 1996, 5: 29-30.
- [6] 任朝波, 漆立新, 丁文龙, 等. 平衡剖面技术在塔里木盆地阿克库勒凸起构造演化分析中的应用[J]. 新疆石油天然气, 2008, 2(4): 5-10.
Ren Chaobo, Qi Lixin, Ding Wenlong, et al. *Xinjing Oil & Gas*, 2008, 2(4): 5-10.
- [7] Dahlstrom C D A. Balanced cross sections [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1969, 6(4): 743-757.
- [8] Hossack J R. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review[J]. *Journal of the Geological Society*, 1979, 136(6): 705-711.
- [9] Elliott D. The construction of balanced cross-section [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2): 101-136.
- [10] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding [J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(7): 684-721.
- [11] Suppe J. Principles of structural geology [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [12] 宋鸿林. 平衡剖面及其地质意义[J]. 地质科技情报, 1985, 4(1): 18-28.
Song Honglin. *Geological Science and Technology Information*, 1985, 4(1): 18-28.
- [13] Davison I. Listric normal fault profiles: Calculation using bed length balance and fault displacement [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(2): 209-211.
- [14] Suppe J, Medwedeff D A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. *Eologicae Geologicae Helveticae*, 1990, 83: 409-454.
- [15] 刘雪峰, 孟令奎. 松辽盆地北部深层构造的平衡剖面研究[J]. 西安石油大学学报, 2004, 19(5): 11-17.
Liu Xuefeng, Meng Lingkui. *Journal of Xian Shiyou University: Natural Science Edition*, 2004, 19(5): 11-17.
- [16] 杨济广, 梅廉夫, 沈传波, 等. 平衡剖面技术在盆地构造分析中的应用进展及存在的问题[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 19-23.
Yang Jiguang, Mei Lianfu, Shen Chuanbo, et al. *Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(6): 19-23.
- [17] 苏惠, 曲丽萍, 李桂霞, 等. 东濮凹陷平衡剖面与构造演化研究[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 469-478.
Su Hui, Qu Liping, Li Guixia, et al. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000, 35(4): 469-478.
- [18] 颜丹平, 田崇鲁, 孟令波, 等. 伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义——以松辽盆地南部为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(3): 275-280.
Yan Danping, Tian Chonglu, Meng Lingbo et al. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(3): 275-280.
- [19] 肖安成. 平衡剖面的正演模拟方法 [J]. 江汉石油学院学报, 1994, 16(1): 1-6.
Xiao Ancheng. *Journal of Jiang Han Petroleum Institute*, 1994, 16(1): 1-6.
- [20] 梁慧社, 张建珍, 夏义平. 平衡剖面技术及其在油气勘探中的应用 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.
Liang Huishe, Zhang Jianzhen, Xia Yiping. *The balanced cross technology and its application of petroleum exploration*[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.
- [21] 李乐, 王静. 平衡剖面技术在构造复杂地区地震资料解释中的应用 [J]. 钻采工艺, 2010, 33(S): 76-78, 82.
Li Le, Wang Jing. *Drilling & Production Technology*, 2010, 33 (S): 76-78, 82.
- [22] 李伟, 吴智平, 侯旭波, 等. 平衡剖面技术在临清拗陷东部盆地分析中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 35-41.
Li Wei, Wu Zhiping, Hou Xubo, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(2): 35-41.
- [23] 梁顺军. 平衡观点与地震观点的解释效果分析与评价 [J]. 石油物探,

- 2002, 41(3): 377-384.
Liang Shunjun. *Geophysical Prospecting For Petroleum*, 2002, 41(3): 377-384.
- [24] Butler R W H. Thrust sequences [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 143(6): 857-634.
- [25] Elliott D. The construction of balanced cross-sections [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2): 101-103.
- [26] Ramsay J G. *Tectonics of the Helvetic Nappes*[M]. McClay K R, Price N J. Thrust and Nappe Tectonics. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1981, 9: 293-309.
- [27] 陈伟, 卢华复, 施央申. 平衡剖面计算机模拟及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Chen Wei, Lu Huaifu, Shi Yangshen. *Balanced cross-section computer simulation and its application*[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [28] Gibbs A D. Balanced cross section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics[J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2): 153-160.
- [29] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital-Zircon geochronology of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(7): 881-896.
- [30] Williams G, Vann I. The geometry of listric normal faults and deformation in their hangingwalls [J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9(7): 789-795.
- [31] 胡德昭, 徐鸣洁, 黄钟谨. 安徽无为盆地平衡地质剖面研究 [J]. 高校地质学报, 1996, 2(4): 431-436.
Hu Dezhao, Xu Mingjie, Huang Zhongjin. *Geological Journal of China Universities*, 1996, 2(4): 431-436.
- [32] 何为刚. 平衡剖面技术计算机模拟[D]. 成都: 成都理工大学, 2003.
He Weigang. *Computer simulation of the balanced cross section*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.
- [33] 周建勋. 同沉积挤压盆地构造演化回复的平衡剖面方法及应用[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 151-156.
Zhou Jianxun. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(2): 151-156.
- [34] 封从军, 鲍志东, 孙荫思, 等. 地震解释中构造及其陷阱的识别方法 [J]. 科技导报, 2010, 28(13): 62-67.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Sun Mengsi, et al. *Science & Technology Review*, 2010, 28(13): 62-67.
- [35] 杨斌谊. 焉耆盆地中生代构造演化与油气聚集 [D]. 西安: 西北大学, 2004.
Yang Binyi. *Tectonic evolution and petroleum accumulation in mesozoic and cenozoic Yanqi Basin*[D]. Xi'an: Northwest University, 2004.
- [36] 李永林. 新疆焉耆盆地构造演化与含油气系统研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2002.
Li Yonglin. *Research on structural evolution and petroleum system in Yanqi Basin, Xinjiang* [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2002.
- [37] 陈拥锋, 张渝昌, 江兴歌. 构造趋势法计算剥蚀量的计算机实现[J]. 江苏地质, 2007, 31(4): 344-347.
Chen Yongfeng, Zhang Yuchang, Jiang Xingge. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(4): 344-347.
- [38] 郝慧, 漆家福, 周建勋, 等. 塔木查格盆地南贝尔凹陷构造特征[J]. 科技导报, 2011, 29(9): 31-35.
Hao Hui, Qi Jiafu, Zhou Jianxun, et al. *Science & Technology Review*, 2011, 29(9): 31-35.
- [39] Davison I. Listric normal fault profiles: Calculation using bed length balance and fault displacement [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(2): 209-210.
- [40] 王运所, 刘亚洲, 张孝义, 等. 平衡剖面的制作流程及其地质意义[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(1): 28-33.
Wang Yunsuo, Liu Yazhou, Zhang Xiaoyi, et al. *Journal of Chang'an University: Earth Science Edition*, 2003, 25(1): 28-33.
- [41] 何明喜. 盆地走滑变形研究与古物构造分析[M]. 西安: 西北大学出版社, 1993.
He Mingxi. *Basin strike-slip deformation of structural analysis and antiquities*[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1993.
- [42] 胡斌, 齐丽军, 张辉, 等. 平衡剖面在焉耆盆地构造演化分析中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(4): 18-22.
Hu Bin, Qi Lijun, Zhang Hui, et al. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(4): 18-22.
- [43] 梅廉夫, 刘昭茜, 杨济广, 等. 湘鄂西_川东中生代陆内递进扩展变形——来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(2): 162-174.
Mei Lianfu, Liu Zhaoqian, Yang Jiguang, et al. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 162-174.
- [44] 夏在连, 史海英, 王馨. 下扬子盆地黄桥地区构造演化 [J]. 内蒙古石油化工, 2010(12): 137-139.
Xia Zailian, Shi Haiying, Wang Xin. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2010(12): 137-139.
- [45] 张锐, 郭召杰, 张志诚, 等. 天山北麓晚新生代独山子——安集海褶皱冲断带构造分析及其对河流改道的影响[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 215-219.
Zhang Rui, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, et al. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(3): 215-219.
- [46] 郑民, 孟自芳, 罗慎超, 等. 塔里木盆地乌山构造带构造演化时序及油气勘探意义[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 16-24.
Zheng Min, Meng Zifang, Luo Shenchao, et al. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 16-24.
- [47] 许怀智, 张岳桥, 刘兴晓, 等. 塔东南隆起沉积——构造特征及其演化历史[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1030-1045.
Xu Huaizhi, Zhang Yueqiao, Liu Xingxiao, et al. *Geology in China*, 2009, 36(5): 1030-1045.
- [48] 施泽进, 彭大钧, 施央申, 等. 苏北溱潼凹陷的拉张量研究及构造运动强度分析[J]. 大地构造与成矿学, 1994, 18(1): 43-52.
Shi Zejin, Peng Dajun, Shi Yangshen, et al. *Geotectonica et Metallogenia*, 1994, 18(1): 43-52.
- [49] 陈娟, 张庆龙, 王良书, 等. 松辽盆地长岭断陷盆地断陷期构造转换及油气地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1027-1035.
Chen Juan, Zhang Qinglong, Wang Liangshu, et al. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1027-1035.
- [50] 左代容. 文明寨油田复杂断块区构造演化与油气成藏 [J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 30-33.
Zuo Dairong. *Fault-Block Oil & Field*, 2009, 16(4): 30-33.
- [51] 程光锁. 准噶尔盆地南缘中段构造的平衡剖面研究 [J]. 地球学报, 2008, 29(5): 563-570.
Cheng Guangsu. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(5): 563-570.
- [52] Cooper M A, Garton M R, Hossack J R. The origin of the Basse Normandie duplex, Boulonnais, France [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2): 139-152.
- [53] Cooper M A. The calculation of bulk strain in oblique and inclined balanced sections[J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2): 161-165.
- [54] Cooper M A, Trayner P M. Thrust-surface geology: Implications for thrust-belt evolution and section-balancing techniques [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(3-4): 305-312.
- [55] McQuilin R. An introduction to seismic interpretation [M]. Fan Weicui, Hu Quanshan, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [56] 刘瑞红, 陈海云, 付建伟. 惠民凹陷盘河构造深层油气成藏条件研究 [J]. 科技导报, 2010, 28(4): 93-96.
Liu Ruihong, Chen Haiyun, Fu Jianwei. *Science & Technology Review*, 2010, 28(4): 93-96.

(责任编辑 朱宇)