

文章编号:1009-2722(2012)12-0046-06

平衡剖面技术在前陆冲断带 构造恢复中的应用 ——以准噶尔盆地西北缘为例

郭 峰^{1,2}, 侯树杰³, 刘如红⁴, 夏 斌⁵, 袁亚娟^{1,2}, 万志峰⁵

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国石化股份胜利油田分公司技术发展处, 山东东营 257000;

4 大庆油田勘探开发研究院海外中心, 黑龙江大庆 163712; 5 中山大学海洋学院, 广州 510275)

摘 要:平衡剖面技术是一种遵循几何守恒原则而反演地质构造演化过程的剖面、亦是恢复重建地质演化历史活动及过程的一种方法,同时也是构造演化定量分析的有效手段。准噶尔盆地西北缘是典型的前陆冲断带,由于其地质条件复杂、地震波速横向变化大等原因,故对该区构造演化及动力学机制研究与油气地质条件的分析一直不能深入进行,因而严重制约了油气勘探进程。针对以上症结所在,从技术层面提出了更好的利用平衡剖面技术进行构造演化恢复的方法,进而为深刻认识该区构造发育史、分析油气运移及聚集规律等提供了依据。通过平衡剖面恢复的结果表明,研究区经历了挤压—伸展—挤压三期构造运动,并由此构成了一个完整的构造旋回。其中,晚二叠世存在一个小幅度的快速挤压期,而三叠纪为整个构造演化中最强烈的构造挤压时期,其对该区构造演化及构造格架形成与油气运聚成藏等均具有重要影响和控制作用。

关键词:平衡剖面技术; 构造演化历史恢复; 前陆冲断带; 准噶尔盆地西北缘

中图分类号:P54 文献标识码:A

自从 Dahlstrom^[1]系统地提出了平衡剖面(balanced section)方法之后,该技术逐渐被地质学家们广泛使用,并在验证地震解释方案、构造变形恢复中起到了重要作用^[2-5]。

所谓平衡剖面技术就是通过分析区域构造背景,对解释剖面选用恰当的变形机制,运用几何学、运动学原理将剖面上的变形构造复原到初始沉积未变形状态的一种技术^[6,7]。通过该技术可

以直观地在剖面图上显示出各构造演化阶段构造变形的特征,通过测量剖面长度变化,可以计算出应变变量与应变速率等,这为定量分析构造演化史提供了更为准确的依据。

笔者以在准噶尔盆地西北缘地区做过的一些工作为基础,探讨前陆冲断带构造演化平衡剖面恢复的方法要点,希望能为今后研究该区构造演化史及分析油气运移及聚集规律提供一些参考依据。

1 方法

选择剖面线、构建地质剖面、编制平衡剖面、校正压实量、分析应变变量(率)与应变速率是平衡

收稿日期:2012-07-07

基金项目:国家自然科学基金(41102077);教育部博士点新教师基金(20110171120016)

作者简介:郭 峰(1985—),男,在读博士,主要从事含油气盆地分析工作. E-mail:guofeng_gig@qq.com

剖面分析法的 5 个关键步骤^[8,9]。对于前陆冲断带这种地质构造复杂、岩性横向变化大的地区,则需因地制宜地采取更有针对性的措施。

1.1 选择地震剖面

选择地震剖面要保证其地震测线方向与主构造运动方向相同,即所选择的地震剖面要垂直于区域性构造,例如深大断层、大规模褶皱的走向。笔者在综合应用地质、地球物理资料基础上,确定了研究区断裂发育主要以 NE 向为主,少量 NW 向断裂(图 1)。故选取与近 NE 向构造线垂直的 NW 向构造剖面作为平衡剖面恢复的原始剖面(见图 1 中测线位置),这样得到的恢复结果才能更加准确地反映主构造发育史,相应计算得出的缩短量(伸展量)才能反映研究区在区域应力作用下的最大形变量。

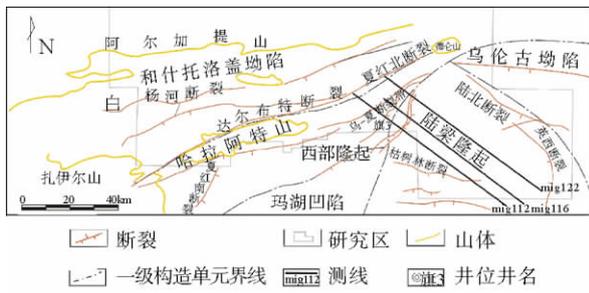


图 1 准噶尔盆地西北缘哈拉阿特山地区断裂分布

Fig. 1 Map showing the distribution of faults in Hala'alad Area, northwestern margin of Junggar Basin

1.2 构建地质剖面

准确的构建地质剖面是编制平衡剖面的基础。所建模型必须保证在平面上要充分利用地质图上展现的区域构造变形等信息;剖面上要体现各地震反射界面的反射特征;理论上要合乎冲断带构造变形理论。

地震剖面是构建地质剖面的原始依据。通过时—深转换,将剖面由时间域转化为深度域。在此过程中要综合运用钻井资料、地震分层数据,并结合地表地质调查资料以及重磁电等普通物探资料,这样得到的地质剖面才是比较准确的。由于前陆冲断带的复杂性在前文中已叙述,故此不

再赘述,本文在时—深转换时采用变速时—深转换方式。从速度谱等资料中拾取剖面不同深度的速度值,再利用 MOVE 软件中变速时—深转换模块,可得到相对较准确的地质剖面。变速时—深转换关系如下:

$$z = v_0 \cdot (e^{kt} - 1) / k$$

式中: z 为恢复后的深度, m;

v_0 为初始速度, m/s;

e 为自然对数;

k 为速度随深度变化率;

t 为单程旅行时, s。

在该式中,除 k 为变量外,其余皆为常量, k 可以根据速度谱确定。

1.3 编制构造平衡剖面

为约束平衡剖面的随意性,地质学家们在多年的实际工作中建立了一系列法则,来确保平衡剖面的准确性^[10-12]。这些法则主要有:

(1)面积守恒 剖面其变形前后面积不变,即:缩短面积要与地层叠置面积相同。

(2)层长守恒 变形前后的层长不变,前提是变形过程中岩层厚度不发生变化,只发生断裂、褶皱。

(3)位移量守恒 沿同一条断层,各相当层的位移应保持一致。

对于复杂的前陆冲断带,地层变形机制则更为复杂,不能死板地套用以上三原则进行构造恢复,需结合地质、地球物理资料,必要时还要采取数值模拟等技术手段,分析其变形机制,采取更有针对性的恢复方法,才可更真实地反映构造演化过程。

此外,除了以剖面的构造形态、岩性和埋深情况为依据来确定地层的变形机制,构造物理模拟实验也是一种有效的辅助验证手段^[13,14]。

1.4 校正压实量

岩石的压实曲线(即孔隙度随深度变化关系)是进行去压实校正必须的资料。已采用的去压实校正公式是基于 Sclater and Christie^[15]在北海盆地开展的工作,该公式假设孔隙度随深度变化呈指数衰减。该公式经多年验证,认为基本能满足构造演化恢复所需的精度要求。公式如下:

$$f = f_0 e^{-cz}$$

式中： f 为在某一深度处地层的现今孔隙度；

f_0 为地表处的初始孔隙度；

e 为自然对数；

c 为孔隙度—深度系数， km^{-1} ；

z 为深度， m 。

由于研究区的复杂性，在去压实校正过程中，先将剖面按岩性分割成段，然后对岩性相对统一的区段进行校正，最后再把校正后的各段重新拼接成完整剖面。该操作虽繁琐，但能将误差控制在各地层区段中，从而在根本上保证了结果的准确性^[16]。

2 应用研究实例

根据胜利油田新疆探区 2006 年的勘探资料，基于平衡剖面技术，对准噶尔盆地西北缘这一典型的前陆冲断带的构造演化史进行研究，通过缩短量和缩短速率的定量分析，揭示前陆冲断带的演化过程与发育历史。

研究区位于准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山（以下简称哈山）附近，平面上夹持于准噶尔盆地与和什托洛盖盆地之间，山体呈 NEE 向延伸，包含 4 个一级构造单元，由和什托洛盖坳陷、陆梁隆起、乌伦古坳陷、西部隆起组成（图 1），具有典型的前陆冲断带性质^[17,18]。

以图 1 中的 mig112 测线剖面作为实例介绍。研究剖面 mig112 呈 NW—SE 向，横跨陆梁隆起与西部隆起，由 SE 向 NW 先后穿过石西凹陷、石英滩凸起、乌夏断裂带。据胜利石油管理局地质录井公司 2005 年在测线东北部对新 1 井的录井资料，研究区主要地层有希贝库拉斯组（ C_1x ）、包古图组（ $C_{1+2}b$ ）、太勒古拉组（ C_2t ）、佳木河组（ P_1j ）、风城组（ P_1f ）、夏子街组（ P_2x ）、乌尔禾组（ P_2w ）、百口泉组（ T_1b ）、克拉玛依组（ T_2k ）、白碱滩组（ T_3b ）、八道湾组（ J_1b ）、三工河组（ J_1s ）、西山窑组（ J_2x ）、头屯河组（ J_2t ）、吐谷鲁组（ K_1tg ）、东沟组（ K_2d ）和红砾山组（ K_2h ）。由图 2 得出，该条地震剖面主要发育逆冲推覆构造，二叠—三叠系自盆缘向盆内加厚，中东段发育宽缓的褶皱构造。北部向 SE 逆冲，形成叠瓦式的冲断构造组合样式，旗 3 东段背斜发育其中，在剖面上二叠系与三叠系之间界面较清晰。三叠系与下伏地层间均呈不整合接触。

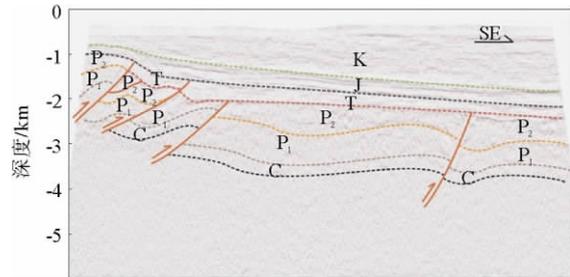


图 2 mig112 测线地震剖面

Fig. 2 The seismic profile of mig112 line

针对该区构造变形情况和剖面变形特征，在平衡剖面恢复过程中，对较老地层采用了“垂直”恢复法，在恢复过程中，保持地层面积不变、长度变化及各地层的垂直位移量一致；对较新地层采用了“弯滑”恢复法，恢复时，保持地层长度、面积和厚度都不变。从新到老、从上至下逐层回剥各套地层，得到各构造演化阶段的剖面形态（图 3）。

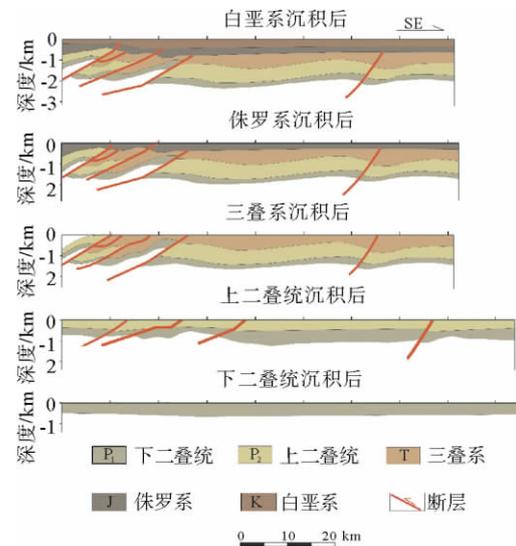


图 3 准噶尔盆地哈山地区 mig112 测线平衡剖面

Fig. 3 The balanced section of mig112 in Hala'alad Area, Junggar Basin

由图 3 平衡剖面可以看出，受海西运动影响，二叠系地层发生冲断变形，说明在晚二叠世挤压作用下，大断裂已初具雏形；三叠系沉积后，持续的挤压应力场突然增强，剖面长度大幅缩短，地层主要受北西段逆冲断层控制，剖面西北部地层发生褶皱，局部地区遭受剥蚀；侏罗纪后，研究区处于应力松弛阶段，挤压性环境逐渐减弱，地层小幅伸展，构造幅度变小；白垩系沉积后，研究区再次处于弱挤压应力控制下，发育较为平缓的褶皱，剖

面形态变化不大。

通过平衡剖面恢复可以直接观察各个演化阶段剖面形态。由于 MOVE 软件绘图区提供的标尺刻度较大,不够精细,故将得到的恢复结果导入 CorelDraw 软件中,通过该绘图软件的长度测量功能,测量出各演化阶段剖面长度数据。每相邻 2 个演化阶段的剖面长度之差,就是各沉积阶段的伸展(缩短)量,再除以该套地层的形成时间,就得出伸展(缩短)速率数据。以时间为横坐标,伸展(缩短)率为纵坐标,可得到缩短率—时间曲线(图 4)。本文中,某套地层的伸展(缩短)量、率的计算是以该套地层沉积之前的剖面长度作为参照,这样得出的伸展(缩短)量、率称为相对伸展(缩短)量、率。计算公式如下:

$$\Delta L = L_n - L_{n-1}$$

$$\beta = \Delta L / T_n$$

$$e = (L_n - L_{n-1}) / L_n$$

式中: L_n 为第 n 套地层的长度;

L_{n-1} 为第 n 套地层沉积之前的一套地层长度;

ΔL 为相对伸展(缩短)量;

β 为相对伸展(缩短)速率;

T_n 表示第 n 套地层沉积形成的时间;

e 为相对伸展(缩短)率。计算结果见表 1。

表 1 mig112、mig116 和 mig122 测线在各沉积时期的剖面长度、伸展(缩短)量、率表

Table 1 The length, amount of compressional (shortening) and the their proportions of mig112, mig 116 and mig122 in every sedimentary stage

剖面变化	沉积时期	mig112 测线	mig116 测线	mig122 测线
长度 /km	下二叠统沉积后	100.26	88.47	100.07
	上二叠统沉积后	98.63	85.79	96.02
	三叠系沉积后	85.26	73.23	82.57
	侏罗系沉积后	86.75	76.05	86.81
	白垩系沉积后	85.25	73.96	83.28
伸展 (缩短) 量/km	上二叠统沉积后	-1.63	-2.68	-4.05
	三叠系沉积后	-13.37	-12.56	-13.45
	侏罗系沉积后	1.49	2.82	4.24
	白垩系沉积后	-1.5	-2.09	-3.53
	合计	-15.01	-14.51	-16.79
伸展 (缩短) 率/%	上二叠统沉积后	-1.63	-3.03	-4.05
	三叠系沉积后	-13.56	-14.64	-14.01
	侏罗系沉积后	1.75	3.85	5.14
	白垩系沉积后	-1.73	-2.75	-4.07

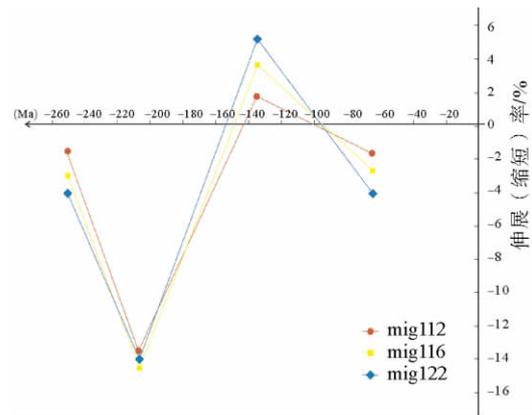


图 4 准噶尔盆地西北缘 mig112、mig116、mig122 测线缩短率—时间曲线

Fig. 4 Compression (extension) ratio-time curve of mig112, mig116 and mig122, in the northwestern margin of Junggar Basin

通过对 mig112 测线的复位平衡及伸展(缩短)率分析,表明了研究区存在三期构造变形。从二叠纪开始,研究区就进入挤压变形状态,晚二叠世为一个小幅快速挤压期;三叠纪沉积时期,研究区仍以挤压应力为主,总缩短量达最大,对应图 4 中伸展(缩短)率的峰值,说明在该时期的构造运动最强烈;侏罗纪沉积时期,压缩速率由负值逐渐变为正值,表明该时期该区从早侏罗世挤压应力环境转变为伸展应力环境;白垩纪沉积时期,应力场再次发生变化,变为原来的挤压应力,剖面长度小幅缩短。上述 3 期构造运动挤压—伸展—挤压,构成了一个完整的幕式构造旋回。

3 构造演化对油气运移的控制作用

各个构造演化阶段特别是在二叠纪末和三叠纪末形成了乌夏断裂带分布广泛的断裂、不整合面和渗透层,它们是油气的主要输导体系,并通过与扇体的有机结合成为油气运、聚、散的主控因素。深部断裂体系主要为一、二级断裂,主要发育在二叠系、三叠系内,乌夏断裂带油气以玛湖凹陷的风城组和乌尔禾组为烃源岩,沿着这些较大的逆断层进行运聚分配,沿二叠系、三叠系和侏罗系的不整合面侧向运移,主要聚集在三叠系、二叠系和侏罗系中,其中三叠系、二叠系油藏主要在海西期末成藏,侏罗系油藏主要在喜山期成藏,之后又

经历了进一步地调整和重新分配而形成现今的油气分布格局。

4 结论与认识

通过平衡剖面法,对准噶尔盆地西北缘这一典型的前陆冲断带的构造演化恢复工作表明,在复杂的前陆冲断带,要获取更加可靠恢复结果,可采取以下几种方法:①选择合适的地震剖面线;②采用变速时—深转换获取可靠的地质剖面;③对不同深度的地层,采用不同的变形机制恢复;④在去压实校正过程中,按岩性分段处理,减少由岩性横向变化大引起的误差。

恢复结果表明,研究区经历了3期构造运动,二叠、三叠纪挤压—侏罗纪伸展—白垩纪挤压,构成了一个完整的幕式构造旋回。三叠纪时期开始该区进入最为强烈的构造挤压时期,该时期形成的构造缩短量占总缩短量的80%以上。

研究区构造演化活动所形成的疏导体系是油气运、聚、散的重要通道,并对现今油气资源分布现状起到了关键作用。

参考文献:

- [1] Dahlstrom C D A. Balanced cross sections [J]. Canadian Journal of Earth Science, 1969, 6: 743-757.
- [2] 陈伟,卢华复,施央申,等.一种断层预测方法及其在正演平衡剖面制作中的辅助作用[J].南京大学学报,1993,29(3):477-484.
- [3] 蒋录全,刘光炎.平衡剖面技术综述[J].南方油气地质,1995,1(3):39-46.
- [4] 陈竹新,贾东,张愫,等.龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析[J].地质学报,2005,79(1):38-45.
- [5] 王亚东,方小敏,张涛,等.平衡剖面反映的柴西新生代变形对青藏高原隆升的响应[J].兰州大学学报(自然科学版),2009,45(6):28-35.
- [6] 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,2003,28(3):275-280.
- [7] 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.
- [8] 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):28-32.
- [9] 汤济广,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):19-22.
- [10] 常玉琴.平衡剖面技术在圈闭研究中的应用[J].吐哈油气,2005,10(2):115-118.
- [11] 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.
- [12] 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):1 856-1 861.
- [13] 王勇,熊伟,崔营滨.东营凹陷陡坡带构造演化物理模拟[J].断块油气田,2011,18(4):449-452.
- [14] 马宝军,漆家福,杨桥.沾车凹陷新生代盆地基底构造演化的物理模拟[J].西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(3):15-18.
- [15] Sclater J, Christie P. Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin [J]. Journal of Geophysical Research, 1980,85: 3 711-3 739.
- [16] 周建勋.同沉积挤压盆地构造演化恢复的平衡剖面方法及其应用[J].地球学报,2005,26(2):151-156.
- [17] 何登发,尹成,杜社宽,等.前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J].地学前缘,2004,11(3):91-101.
- [18] 孟家峰,郭召杰,方世虎.准噶尔盆地西北缘葱段构造新解[J].地学前缘,2009,16(3):171-180.

BALANCED CROSS-SECTION FOR RESTORATION OF STRUCTURAL EVOLUTION IN A FORELAND THRUST BELT; TAKING THE NORTHWESTERN MARGIN OF JUNGGAR BASIN FOR EXAMPLE

GUO Feng^{1,2}, HOU Shujie³, LIU Ruhong⁴, XIA Bin⁵, YUAN Yajuan^{1,2}, WAN Zhifeng⁴

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Technology Development Department, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China;

4 Overseas Research Center of Daqing Exploration and Development Institute, Daqing, Heilongjiang 163712, China;

5 School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The balanced cross-section is an effective tool for quantitative restoration of structural evolution under the guidance of a constant geometry. The northwestern margin of the Junggar Basin is a typical foreland thrust belt. Due to the complexity of geological conditions and the horizontal variation of seismic wave velocity, the study of tectonic evolution and its dynamic mechanism is not deep enough in the basin that constraints effective oil exploration. In order to obtain the reliable results, adequate methods should be adopted on the basis of actual geological conditions. For the reliable restoration of structural evolution by balanced cross-section in foreland thrust belt in northwestern China, 4 critical steps are suggested from technical point of view in this paper: Firstly it is necessary to select a suitable seismic line; Secondly, use variable velocity parameters in time-depth conversion to have reliable geologic profiles; Thirdly, adopt the flexural-slip mechanism for middle and upper strata, and then apply the vertical mechanism to deeper strata; Finally, decompact the strata by segment where the lithologic characters vary intensively in the horizon to decrease the decompaction errors. The northwestern margin of the Junggar Basin in Northwest China, which is a typical foreland thrust belt, is discussed in this paper as an example. The result suggests that the study area experienced a complete tectonic cycle consisting of three tectonic movements of compression-extension-compression. There is a rapid low amplitude compression stage in late Permian, and the strongest compression of tectonic evolution in Triassic. All the above has important impact on the formation of structural framework and the migration and accumulation of hydrocarbons.

Key words: balanced cross-section; restoration of structural evolution; foreland thrust belt; northwestern margin of the Junggar Basin