

文章编号: 1001-6112(2007)06-0633-04

# 利用平衡剖面快速判定盆地区域古构造应力方向

——一种分析古构造应力方向的新方法

佟彦明<sup>1,2</sup>, 钟巧霞<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 斯伦贝谢(中国)DCS, 北京 100004;  
3. 西南石油大学 经济管理学院, 成都 610500)

**摘要:** 确定古构造应力方向是盆地古构造应力场研究中一个非常重要的内容, 该文提出了一种分析盆地古构造应力方向的新方法。首先利用平衡剖面技术, 计算盆地在各地质时期不同方向上的形变率, 然后借鉴材料力学中利用应变花求取主应力方向的办法, 将盆地在 3 个不同方向上的形变率等同于应变花的 3 个线应变, 进而利用相应公式求得盆地的古构造应力方向。利用该方法求得胶莱盆地白垩纪莱阳期、青山期和王氏期的第一拉张主应力方向分别大致为北东—南西、北西—南东和南—北向, 这与由其他传统地质方法分析得到的结果对应性良好, 说明该方法是实际可行的。此外, 形变率在不同方向剖面上的变化趋势可反映盆地的力学性质, 因此该方法还有助于判定盆地类型和成盆机制。该方法具有方便、快捷的特点, 并且不受地层出露情况的制约。

**关键词:** 古构造应力方向; 古构造应力场; 平衡剖面; 白垩纪; 胶莱盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

## FAST DETERMINATION OF BASIN'S PALEO-TECTONIC STRESS DIRECTION BY BALANCED CROSS SECTION

—A NEW METHOD TO ANALYZE PALEO-TECTONIC STRESS DIRECTION

Tong Yanming<sup>1,2</sup>, Zhong Qiaoxia<sup>3</sup>

(1. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. Schlumberger (China) DCS, Beijing 100004, China; 3. School of Business Administration,  
Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** To determine the direction of paleo-tectonic stress is a very important matter for basin's paleo-tectonic stress field research. A new method has been brought forward to analyze paleo-tectonic stress direction. Firstly, the balanced cross section technique is applied to obtain basin's deformation rates in different directions during each geological stage. Then, the strain rosette method is employed to calculate principal stress direction in mechanics of materials. Further, basin's deformation rates in 3 different directions are equated with strain rosette's linear strains. At last, basin's paleo-tectonic stress directions are figured out using the relevant formulae from mechanics of materials. The directions of the 1st extensional principal stress during Laiyang, Qingshan and Wangshi stages in the Jiaolai Basin have been obtained by this method, approximately NE-SW, NW-SE and S-N respectively. These results accord with those from other traditional geological methods, illustrating the feasibility of the new method. Besides, the changing trend of deformation rates in sections with different directions can reflect basin's mechanical property, so this method is also helpful for analyzing basin type and basin-forming mechanism. Obviously, this new method is convenient and can fast produce results, and is not restricted by strata outcrop condition.

**Key words:** paleo-tectonic stress direction; paleo-tectonic stress field; balanced cross section; Cretaceous; the Jiaolai Basin

收稿日期: 2006-09-06; 修订日期: 2007-10-24。

作者简介: 佟彦明(1976—), 男(满族), 辽宁法库人, 博士, 主要从事油气储层沉积学、含油气盆地分析和油气勘探工作。

判定盆地所受的区域古构造应力的方向,是盆地古构造应力场研究中一个非常重要的内容,因为其不仅有助于盆地形成动力学的分析,而且有助于从整体上、本质上把握盆地内部的构造演化过程。

利用各种地质构造形变痕迹进行反推,仍是目前确定古构造应力方向时广为采用、较为准确的重要方法。常用的地质形变有共轭剪节理(断层、韧性剪切带)、雁行张节理系、纵弯褶皱、一组面理与一组 B 轴或 A 轴线理等<sup>[1]</sup>。另外,岩脉方向法和断层滑动矢量反演法也是常用的方法。但以上方法都必须以细致的野外工作为基础,因此耗时也相对较长;同时,都要求盆内及周缘有良好的地层露头,因此在对覆盖盆地开展工作时会受到很大限制。

本文利用能够反映盆地同沉积构造活动状况的平衡剖面技术(基于地震解释剖面),计算盆地在各地质时期不同方向上的形变率(伸长率或压缩率),然后借鉴材料力学中利用应变花(多轴电阻应变片)求取主应力方向的办法,求得盆地的古构造应力方向。并通过研究实例证明了该方法的有效性。

## 1 基本原理

### 1.1 关于平衡剖面

经典的平衡剖面理论强调,制作平衡剖面时要选取平行于构造运动方向,即垂直于构造带走向的剖面线。但这种理想条件在实际的盆地中往往难以得到满足,甚至是“不切实际”的<sup>[2]</sup>,因为很多盆地的构造展布都是多轴、多期古构造应力联合、叠加控制的产物。

平衡剖面的主要用途之一是用来作构造变形的定量分析<sup>[3]</sup>。对单轴应力控制的简单盆地,平行于构造运动方向(垂直于构造带走向)制作平衡剖面,可以保证恢复出来的剖面形变率最大。但这种情况意味着在制作平衡剖面之前,盆地的古应力方向及性质已知。然而多数情况下,盆地的构造带走向并不很明了,应力状态为未知。这时如果沿多个方向制作平衡剖面,就可以得到盆地在多个方向上的形变率。虽然在每个方向上所得到的形变率并不一定是最大的,并且互不相等(其中在与第一主应力方向夹角较小的剖面上所得到的形变率会较大,夹角较大者形变率会较小),但正因为如此,将不同方向上所反映出的形变率加以综合分析,就有可能得到盆地古构造应力状态的信息。

### 1.2 第一主应力方向的求取

这里的第一主应力,系指造成最大形变的主应力,为拉张或压缩应力。在材料力学中,对于平面

应力状态问题,要确定某点的第一主应力方向,只要利用电阻应变花测出通过该点的 3 个不同方向上的线应变,代入有关公式即可<sup>[4]</sup>。

如果已知平面上某点处的 3 个应变分量分别为  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ , 即一对呈正交关系的线应变和一个角应变,则该点处任一指定方向( $\alpha$ )上的线应变  $\epsilon_\alpha$  可由下式得出:

$$\epsilon_\alpha = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha \quad (1)$$

计算时应注意:1)一般设  $0^\circ$  的方向为  $x$  轴的方向;2)角度要从  $x$  轴算起,逆时针为正,顺时针为负;3)伸长线应变为正,缩短线应变为负;角应变顺时针为正,逆时针为负。

由式(1)可知,假如给定平面内一点 3 个不同方向的线应变(可由应变花求得),就可以建立 3 个像式(1)那样的独立方程,解此方程组,即可求得该点的应变分量  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ ,再结合如下所示的公式(2),就可以求出该点第一主应力  $\sigma_1$  的方向  $\beta$ 。

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{-\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (2)$$

式(2)中角度  $\beta$  的取法同式(1)。当  $\epsilon_x \geq \epsilon_y$  时,直接得到  $\beta$  值,而当  $\epsilon_x < \epsilon_y$  时,应将所得  $\beta$  值加减  $\pi/2$ 。比较  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$  时,应比较两者的绝对值大小。

类似地,如果能够计算出盆地在某地质时期 3 个不同方向上的形变率,将其等同于电阻应变花的 3 个线应变,依据上述公式就可以求得盆地的古构造应力方向。

## 2 研究实例

### 2.1 地质概况

胶莱盆地位于胶东半岛,为一白垩纪残留叠合陆相沉积盆地,东部跨越海阳和乳山入黄海(图 1)。盆地大致被牟平—即墨断裂带分割成东、西 2 个拗陷。西部拗陷南缘通过五莲断裂与胶南隆起(苏鲁造山带)相接,北界蜿蜒于胶北隆起之上,西部为郯庐断裂带中段的沂沭断裂带所截。该拗陷可进一步划分为诸城凹陷、柴沟地垒、高密凹陷、大野头凸起和莱阳凹陷<sup>[5~9]</sup>。盆地基底由太古界和元古界的变质岩系组成,沉积盖层的主体由下白垩统莱阳组、青山组、上白垩统王氏组组成,古近系的黄县组仅分布于盆地西北角的平度地区。胶莱盆地以往的各种基础地质研究和油气勘探工作主要集中于位于陆上的西部拗陷,所以该拗陷的资料比较丰富,而东部拗陷资料甚少。本文研究主要基于西部拗陷的地震叠偏剖面资料。

### 2.2 形变率及第一主应力方向

以西部坳陷的地震解释剖面为基础,应用据物理平衡剖面法开发的软件<sup>[10]</sup>,对不同方向上的多条地震剖面分别制作了平衡剖面。首先利用地震速度谱将时间剖面转化为深度剖面,然后选择盆地基底面、莱阳组顶面、青山组顶面和王氏组顶面作为不同时代的标志层进行长度平衡计算。回剥过程中考虑了剥蚀量恢复、岩性变化和压实校正,最后得到了这些剖面在各地质时期的形变量和形变率,并用其组合了 3 条剖面用以反映整个西部坳陷在 3 个方向上总的变化趋势。各标志层都表现为伸展应变(表 1)<sup>[5]</sup>。

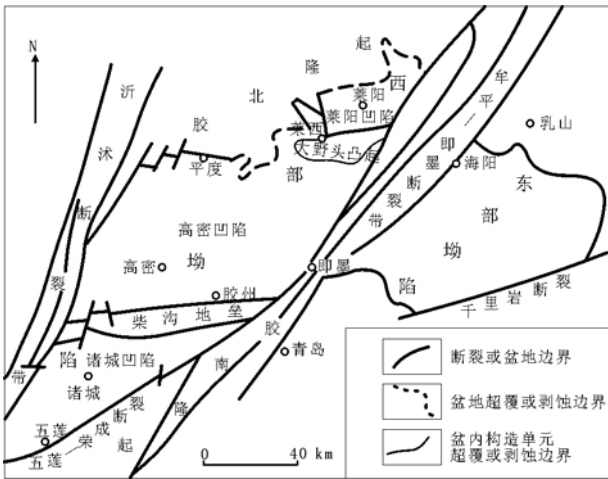


图 1 胶莱盆地构造分区

Fig. 1 Sketch map of tectonic division in the Jiaolai Basin

因为表 1 中西部坳陷的 3 条汇总、组合剖面都是各延伸方向上多条测线的组合,分别代表该方向上的综合、平均效应,并且覆盖了大半个盆地的范围,因此可以用来反映整个胶莱盆地的大体情况。将西部坳陷在 3 个方向上的伸展率等同于 3 个线应变,依据公式(1)和(2),可求得胶莱盆地在莱阳期、青山期和王氏期的第一(拉张)主应力方向(方位角)分别为:29.8°~209.8°,143.2°~323.2°,3.6°~183.6°,即大致为北东—南西向、北西—南东向和南—北向。

### 2.3 地质证据

上面所求得的胶莱盆地 3 个地质时期的第一主应力方向与由其他地质资料分析所得到的结果对应性良好。

莱阳期证据:关康等<sup>[11]</sup>利用 SHRIMP 锆石 U—Pb 测年技术,精确测定胶莱盆地北面胶北隆起郭家岭型花岗岩的年龄为 130~126 Ma,因此为莱阳期的产物。由图 2<sup>[11,12]</sup>可知,西部的郭家岭型花岗岩体规模小,不仅沿北东向断裂展布,而且岩体长轴也多为北东向;而中、东部的郭家岭型花岗岩体规模大,显示为北西向展布的较大单岩体连片分布的特点。以上说明该区该时期可能受双轴拉张应力场控制,第一拉张主应力方向为北东—南西向。

青山期证据:地质分析结果表明,青山期盆地西边界以外的沂沭断裂带和盆地内部的牟平—即墨断裂带都发生了强烈的张性活动<sup>[13,14]</sup>。该时期的侵入岩沿牟平—即墨断裂带呈北东向展布,沉降

表 1 胶莱盆地各地质时期各剖面的伸展量和伸展率

Table 1 Extension amounts and rates of cross sections during three stages in the Jiaolai Basin

剖面位置	剖面编号	延伸方位	基底原长/km	莱阳期		青山期		王氏期	
				伸展量/m	伸展率/%	伸展量/m	伸展率/%	伸展量/m	伸展率/%
诸城凹陷	708.4 <sup>1)</sup>	0°~180°	31.9	3 300	10.3	1 100	3.1	3 300	9.1
	172.9	90°~270°	42.6	2 929	6.9	881	1.9	3 205	6.9
	1 574.5 <sup>1)</sup>	32°~212°	27.5	6 100	22.2	600	1.8	4 800	14.0
高密凹陷	747.6 <sup>1)</sup>	0°~180°	40.3	3 600	8.9	1 200	2.7	10 100	22.4
	234.1	90°~270°	48.0	5 627	11.7	1 584	3.0	4 670	8.5
	1 616.0 S <sup>1)</sup>	32°~212°	18.5	1 600	8.6	700	3.5	3 300	15.9
	1 616.0 N <sup>1)</sup>	32°~212°	30.5	500	1.6	200	0.6	4 000	12.8
莱阳凹陷	810.2	0°~180°	8.0	1 354	16.9	1 604	17.0	1 406	12.8
	278.7	90°~270°	19.8	1 828	9.2	1 097	5.0	978	4.3
西部坳陷汇总	708.4+747.6+810.2	0°~180°	80.2	8 254	10.29	3 904	4.41	14 806	16.03
	172.9+234.1+278.7	90°~270°	110.4	10 384	9.40	3 562	2.95	8 853	7.12
	1 574.5+1 616.0(S+N)	32°~212°	76.5	8 200	10.72	1 500	1.77	12 100	14.03

1)据文献[7]。

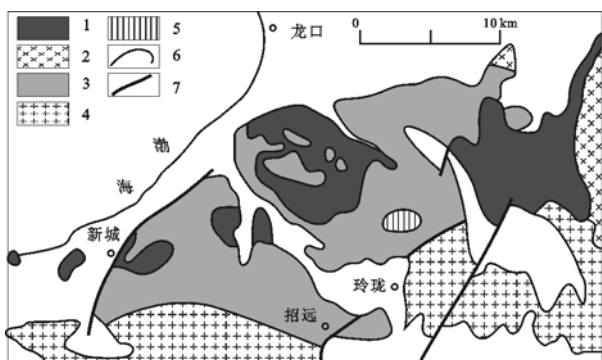


图2 胶莱盆地胶北隆起花岗岩类分布<sup>[11,12]</sup>

1. 郭家岭型花岗岩;2. 艾山型花岗岩;3. 玲珑型花岗岩;4. 漆家河型花岗岩;5. 罗山石榴石花岗岩;6. 地质界线或海岸线;7. 主要断层

Fig.2 Distribution map of granitoid in the Jiaobei Uplift, the Jiaolai Basin

中心位于即墨。以上说明胶莱盆地在该时期经受了北西—南东向的扩展作用。

王氏期证据:施炜等<sup>[15]</sup>通过对断层滑动矢量进行观测和分析,得出胶莱盆地在王氏期发生了近南—北向引张作用的认识。同时,盆地内部呈东—西向延伸的百尺河断裂、胶县断裂和平度断裂等控凹断裂在该时期都发生了强烈的同沉积伸展活动,也说明盆地发生了近南—北向伸展作用<sup>[5]</sup>。

### 3 讨论和结论

盆地在各地质时期不同方向上的形变率,除了可以用来求取主应力方向以外,还可通过分析形变率在不同方向剖面上的变化趋势来判定盆地的力学性质,例如单轴应力状态时形变率随剖面与主应力方向夹角的增大而减小,具体包括单轴拉张(或压缩)、双轴拉张(或压缩)、一轴拉张而另一轴压缩。进而有助于盆地类型和形成动力学的分析。例如,第一主应力为压缩应力时,盆地应为压性挠曲盆地;盆地受单轴拉张应力控制时,可能为裂陷盆地或拉分盆地,此时应根据盆缘断裂的性质、走向以及主应力的方向加以综合分析;盆地受双轴拉张应力控制时,应为裂陷盆地,并指示可能的深部成盆动力(如地幔热柱等)。通过对胶莱盆地各地质时期各方向剖面形变率(表1)<sup>[5]</sup>变化趋势的综合分析,可知该盆地在3个时期均受控于双轴拉张主应力,反映其裂陷盆地性质和可能的深部成盆动力。

地质研究与地球物理资料表明,胶莱盆地在各地质时期之末均发生了构造反转,盆地抬升遭受剥蚀。因此本文前面计算的只是各标志层伸展程度达到最大时的长度,并没有计算各地质时期之末构造反转所造成的缩短量,因而反映的只是胶莱叠合

盆地3个裂陷原型的古构造应力方向。但由基本原理部分可知,制作平衡剖面时如果同时计算出构造反转时期的压缩量,同样可以求得压缩主应力的方向。

本文的方法不仅可以用来求取盆地整体的区域古构造应力方向,而且也适用于盆地内部各构造单元古构造应力方向的判定。但当构造单元的面积较小时,结果误差可能会较大。

综上所述,利用平衡剖面技术求取盆地各地质时期不同方向上的形变率,代入相应公式加以计算和综合分析其变化趋势,不仅可以判定盆地的区域古构造应力方向,而且有助于盆地类型和成盆机制的分析。显然,该方法具有方便、快捷的特点,并且不受地层出露情况的制约,可用于快速判定盆地(特别是覆盖盆地)的古构造应力方向。

### 参考文献:

- 1 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘,1995,2(1—2):226~235
- 2 许浚远,王艳萍,王 磊等. 多轴水平拉伸盆地三维构造重建探讨[J]. 石油与天然气地质,1997,18(1):1~6
- 3 梁慧社,张建珍,夏义平. 平衡剖面及其在油气勘探中的应用[M]. 北京:地震出版社,2002. 2~3
- 4 邓承仪,成培江. 工程材料力学实验[M]. 北京:科学技术文献出版社,1997. 129~132
- 5 陆克政,戴俊生,陈书平等. 胶莱盆地的形成及演化[M]. 东营:石油大学出版社,1994. 33~144
- 6 刘 华,李 凌,吴智平. 胶莱盆地烃源岩分布及有机地球化学特征[J]. 石油实验地质,2006,28(6):576~585
- 7 李桂群,范德江. 胶莱盆地构造单元划分及其特征[J]. 青岛海洋大学学报,1994,24(2):239~246
- 8 胜利油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷六)胜利油田[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 491~505
- 9 翟慎德. 胶莱盆地形成演化与油气形成条件[D]. [学位论文]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2003
- 10 毛小平,吴冲龙,袁艳斌. 地质构造的物理平衡剖面法[J]. 地球科学,1998,23(2):167~170
- 11 关 康,罗镇宽,苗来成等. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地质科学,1998,33(3):318~328
- 12 关 康,罗镇宽,苗来成等. 郭家岭型花岗岩地球化学特征与金矿化的关系[J]. 地质找矿论丛,1997,12(4):1~8
- 13 戴俊生,陆克政,宋全友等. 胶莱盆地的运动学特征[J]. 石油大学学报(自然科学版),1995,19(2):1~6
- 14 Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. Tectonophysics, 2003, 363: 243~258
- 15 施 炜,张岳桥,董树文等. 山东胶莱盆地构造变形及形成演化:以王氏群和大盛群变形分析为例[J]. 地质通报,2003,22(5):325~334