

多轴水平拉伸盆地三维古构造重建探讨^{*}

许浚远 王艳萍 王磊 田玉刚 王皓 李惠芳
(中国地质大学石油系, 湖北武汉 430074)

现行的平衡剖面技术应用于盆地古构造重建在绝大多数情况下是偏离构造变形事实的, 绝大多数盆地构造变形属多轴水平拉伸的三维变形。三维变形古构造恢复一般应视为二维变形的某种叠加, 叠加方式视断裂总体变形特征而定。三维变形盆地中断裂可分为孤立断裂和各种断裂组合, 恢复时需分别处理。作为实例, 我们重建了汤原断陷早第三纪中期白垩系顶界三维古构造。

关键词 平衡剖面 多轴水平拉伸 盆地 三维古构造重建 汤原断陷

第一作者简介 许浚远 男 36岁 副教授(博士) 构造地质及石油地质

1 研究现状简评

自 Gibbs^[1]首次系统地将源于压缩构造区古构造重建的平衡剖面技术, 用于拉张构造区的古构造重建以来, 张性盆地古构造重建日益深入, 主要表现在重建的变形机制(模式)不断增多, 主要有恒水平位移模式^{**}、'岩层长度不变'模式^[2]、倾斜剪切模式^[3]、'恒位移'模式和'滑移线'模式^[4]。虽然 Wheeler 对'恒位移'模式和'滑移线'模式曾提出过质疑^[5], 指出它们与其前提条件——平面应变有矛盾, 遗憾的是此两模式至今仍有广泛的影响, 只是略作变通而已^[6, 7], 并未从根本上解决这一矛盾。此外, 就恢复变形时序而言, 较早期是按反演的方法, 近年来才出现正演^[8]。

迄今, 无论是应用何种变形机制进行正演或反演古构造, 均基于同一前提条件, 即平面应变或考虑压实影响的二维应变, 换言之, 盆地内各点变形过程中均沿同一个水平方向(即拉伸方向)运动, 属单轴水平拉伸。这一条件过于理想, 只有在盆地内发育一组走向平行的断裂时才能真正满足。事实上, 绝大多数张性盆地内的正断层分布是多组的, 甚至交织成为网络。著名的构造力学家 Mandl^[9]将之归因为多轴水平拉张(multi-axial horizontal extension)。宏观上若把正断层面看作连续介质中的一个面, 正断层错动方向是剪应力方向^[10, 11], 即使在均匀应力作用下, 由于剪切面(断层面)空间上产状不同, 其剪应力方向水平投影方向将是极不相同的, 拉伸变形应是多轴。因此, 绝大多数盆地拉伸变形不是单轴水平拉伸的剖面上的二维变形, 而是多轴水平拉伸的三维变形, 如果按单轴水平拉伸前提条件去重建多轴水平拉伸盆地古构造, 其结果与实际情形有较大的偏离, 甚至相去甚远。

* 国家自然科学基金资助项目(49502033)及'863'高科技项目资助

** Verall P. Structural interpretation with applications to North Sea problems. London: Course Notes JAPPEC, 1981

收稿日期: 1995-09-07 改回日期: 1996-06-06

新近,国外已出现三维古构造重建的术语,并在国内有相应的应用软件,但是该三维古构造恢复是先在一组平行于盆地的“统一拉伸方向”的剖面上,用平面应变原则进行二维恢复,然后再用“平剖图”作三维古构造显示,其本质是二维恢复。简言之,是“二维的恢复,三维的显示”。

总之,自 Mandl^[9]指出多数盆地属于多轴水平拉伸三维变形以来,除人们刚开始实验研究三维铲形断层上盘变形特征^[12],国内外没有一篇文献报道多轴水平拉伸盆地的三维古构造重建。诚然,拉张盆地三维古构造重建极为复杂,但古构造恢复从二维走向三维势在必行。为此,本文以依舒地堑汤原断陷为例,进行该断陷老第三纪期间白垩系顶界的古构造重建,主要目的是阐述多轴水平拉伸盆地基本思想,并引起同行对此问题的重视。

2 三维古构造重建方法

构造变形是质点运动的结果,恢复古构造就是恢复质点运动轨迹。二维古构造恢复中将质点运动限制在剖面内,三维古构造恢复则要考虑质点空间运动轨迹,因为质点运动的空间矢量可以分解成两个平面(如剖面)内矢量。因此,要恢复三维古构造,我们先在合适的剖面内恢复二维古构造,再将不同方向剖面二维古构造进行叠加,这便是我们三维古构造恢复的基本思想,如何选择合适的剖面便要据研究区具体断裂几何特征来确定。

2.1 孤立正断层

孤立正断层是指平面上存在两 endpoint (tip point),不与别的断层相交的正断层(图 1),这类断层常具有纯正断性质(可观的走滑分量必造成分支断层)。由于断层各段的断距不同和断层变形范围有限,上盘本身(不考虑与其它断层变形叠加)就属于三维变形,其变形恢复是不能据

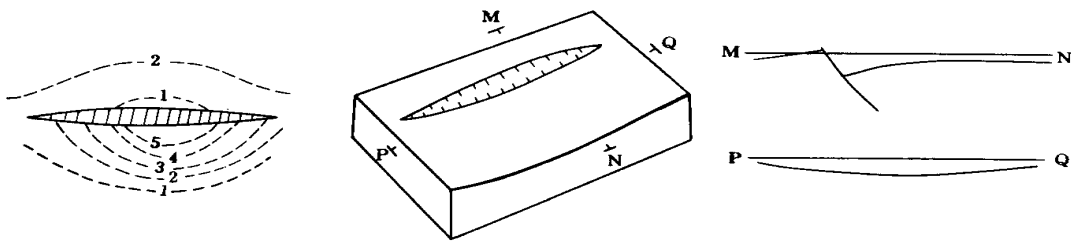


图 1 孤立断层

现行的平衡剖面技术进行的。例如,某地层被孤立断层错断的水平断距为 H ,即贴进断层的点被水平拉开 H ,但并不意味着远离该断层上盘所有的点都水平位移了 H ,事实上,距断层足够远的点根本没有水平位移。而现行的二维变形古构造恢复则认为上盘剖面上所有的点均水平位移了 H (或与之等效)(只有断层无限长时,才可以这样考虑)。孤立断层的水平断距沿走向是逐渐变化的,一般可以忽略断层上盘绕垂直于断层走向的水平轴的旋转,此时,其古构造恢复可采取下列步骤:(1)作一系列垂直于断层走向剖面,剖面族的方程为 $Ax + By + C = 0$ (不同的 C 代表不同的剖面),设剖面方向为 H ;(2)按现行的平衡剖面技术恢复剖面的韧性变形;(3)恢复水平位移,确定各剖面上盘各点 (x, y) 相对下盘的水平位移函数 $H(x, y)$,即联立解:

$$\begin{cases} H = H(x, y) \\ Ax + By + C = 0 \end{cases}$$

$H(x, y)$ 函数具有下列性质:(a) $\lim_{l \rightarrow \infty} H(x, y) = 0$, l 为所要恢复的地层界面各点距断点的水平

距离; (b) $H(xt, yt) = 0$, (xt, yt) 为端点坐标; (c) $H(0, 0) = H_0$, 即在断点处水平位移为断层的水平断距, 显然满足这些性质的函数甚多, 至于采取何种具体的形式要视断层上盘的力学性质, 变形机制等确定; (d) 厚度校正, 因断层一盘各点的水平位移有变化, 便产生应变 $e(x, y)$:

$$e(x, y) = \frac{\partial \vec{H}(x, y)}{\partial \vec{l}}$$

各剖面再按面积不变原则进行进一步校正。

孤立断层是许多断层组合中的基本元素, 上述变形恢复原则将在断层组合变形恢复中加以推广。

2.2 平行组合

由一系列近于平行的孤立断层组成(图 2), 其古构造恢复原则是作一系列垂直于这些断层走向剖面, 分别恢复每个断层的变形, 再将各个断层的变形进行叠加。值得注意的是, 在恢复一个断层的变形时, 将剖面中其它断层造成地层界面错开当作地层起伏来考虑, 即把含有其它断层的块体当作连续介质来考虑。

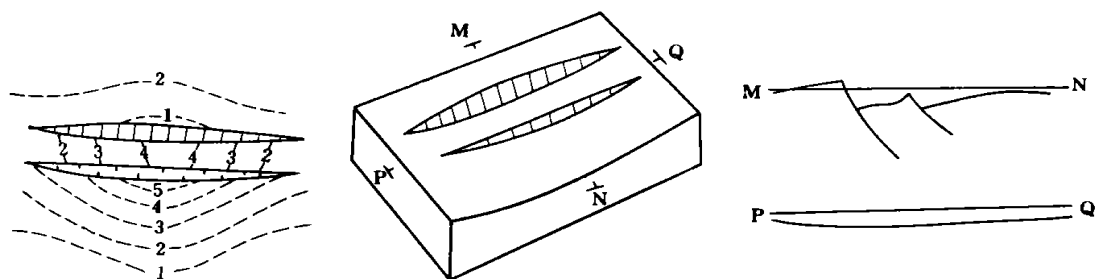


图 2 断层平行组合

2.3 叉状组合

一条断层常常分叉成两条以上的断层(图 3), 由于分叉的断层彼此不平行, 有走滑分量。出现走滑分量, 恢复的剖面方向不一定总是垂直于分叉断层的平均走向, 一般取上下盘对应点 (A 和 A') 连线作为上盘块体平均运动方向。但是, 如果分叉断层夹角不大(如小于 15°), 走向

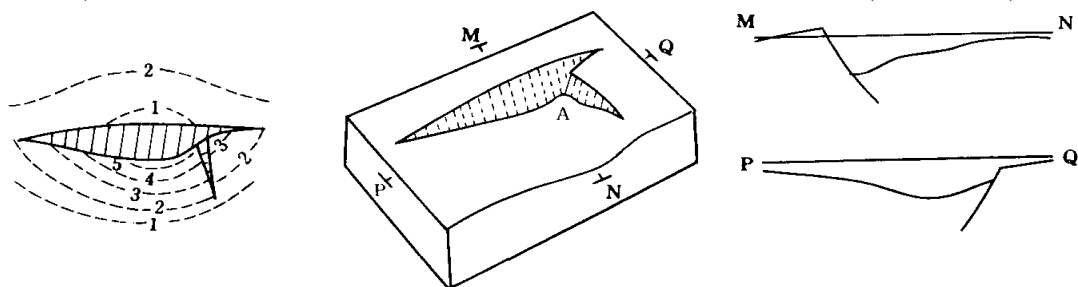


图 3 断层叉状组合

可以取它们总平均走向(两条断层为平分线)。值得注意的是, 有三维地震资料 A 和 A' 较易确定; 而在由二维地震资料制作的构造图上, 要格外注意 A 和 A' 的真实性(明显不真实时, 宁可

取垂直于分叉断层平均走向剖面进行恢复)。

2.4 断层网络

若干条断层相互切割和终止,断块在平面上呈被断层包围的多边形,可分为两种情况考虑。

2.4.1 新生断层网络

多是盖层滑脱型,断层网络中断层近于垂直相交,是双向拉伸的直接产物,拉伸轴分别垂直于两组断层,恢复这类断层的古构造时,先恢复被限止的断层的古构造变形(图 4 中 F_1),再恢复限止断层的变形(图 4 中 F_2)。

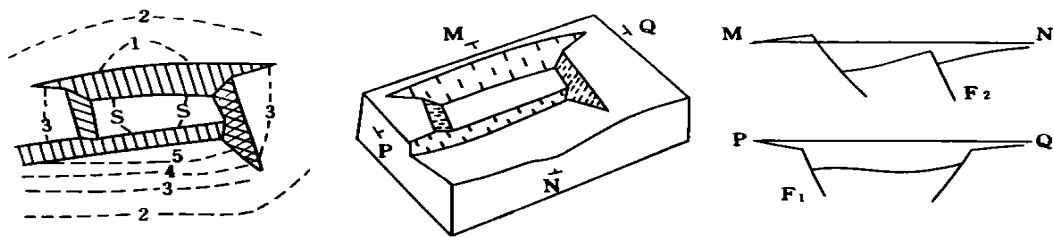


图 4 断层网络

2.4.2 继承性断层网络

多是基底卷入型,在盖层形成前就已存在。这类断层分布复杂,甚至“无章可循”,断层上下盘错动方向较难确定。如果有准确的地层界面资料且相应的对应点能找到,块体运动方向亦可用对应点连线方向,但对于许多地层界面,特别是遭长期剥蚀的基底顶界对应点不是真对应。此时为查明块体运动方向,须利用盆地(或凹陷)周边微构造(擦痕)和定向岩芯微构造资料进行简化应力张量(T_{ij})的反演:

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

据反演的 T_{ij} 和断层的产状便可以推算不同时期块体运动的方向。断裂网络活动接近单轴拉伸时(情形较少),则可较方便地应用几何资料确定拉伸方向(注意不是现行的垂直于主要构造线方向)^[13]。

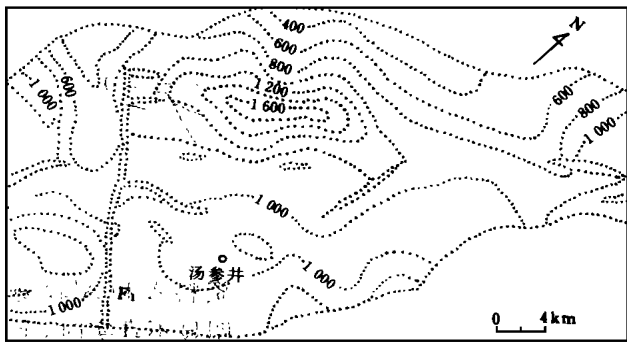


图 5 汤原断陷下第三系顶界等 T_0 图(m.s)

3 实例

图 5 和图 6 分别是汤原断陷 T_{2-2} (下第三系中部)和 T_3 (白垩系顶界)经归位等 T_0 图,它们被 NW 向,NE 向和近 SN 向三组断裂切割,断裂均属正断层和走滑正断层。显然,整个断陷内断层上下盘错动方向水平投影不同,即没有统一的拉伸方向,盆地形成过程中的拉伸变形属三维变形。按现行的二维古构造恢复方法进行古构造重建,其结果极

不真实。

断陷内 NW 向断层 F1 上下盘均有 NE 向断层发育, 前者限制了后者。NE 向断层为平行组合, 个别 NE 向断层分叉, 但分支断层夹角不大。近 SN 向断层为孤立的正断层。设孤立断层上盘变形为线弹性的, 沿垂直断层方向水平位移函数写成:

$$H(x,y)=(1-\frac{l}{kd_c})H_0$$

式中 d_c 为某条剖面(由剖面线方程 C 决定)距端点 (x_t,y_t) 的垂直距离, k 为系数(孤立断层上盘的变形域则为三角形域)。按照上节所讲的方法, 依次恢复近 SN 向, NE 向和 NW 向断层变形并将它们进行叠加, 便得白垩系顶界(T_3)在 T_{2-2} 形成时古构造图(图 7)。

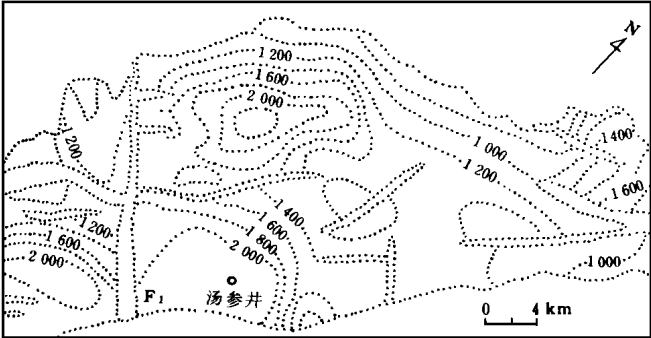


图 6 汤原断陷白垩系顶界等 T_0 图(ms)

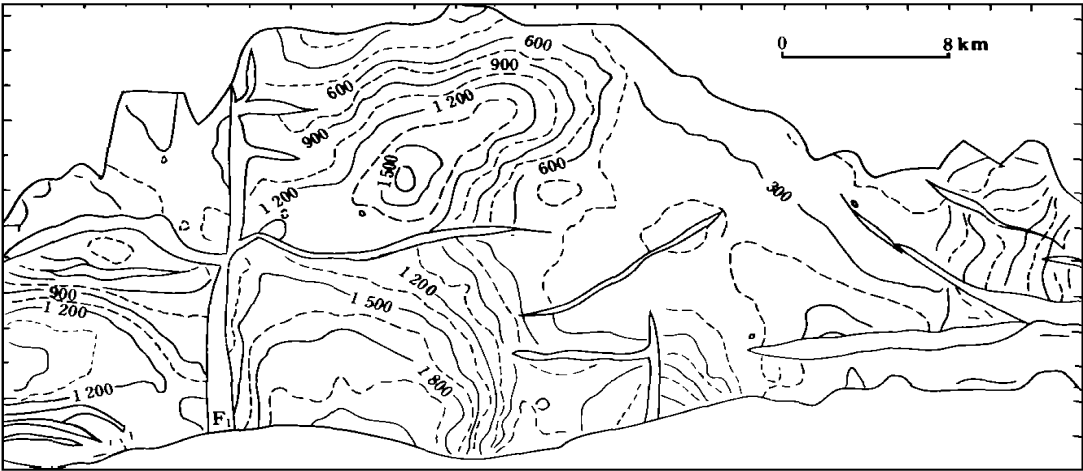


图 7 汤原断陷老第三纪中期白垩系顶界古构造图(m)

4 结 论

绝大多数拉伸盆地有多组正断裂发育, 构造变形一般属于多轴水平拉伸的三维变形, 用现行的平衡剖面技术恢复古构造是不切实际的。三维拉伸变形的盆地古构造恢复可以视为不同方向二维变形的某种叠加, 二维变形方向视断裂分布情况而定。汤原断陷 T_{2-2} 至 T_3 期间是典型多轴水平拉伸三维变形的盆地, 其发育断裂三组, 按照本文所提三维变形叠加思想可恢复 T_{2-2} 形成伊始 T_3 的古构造。

致谢: 感谢中国地质大学(武汉) 能源学院计算机房在上机上所给予的支持。

参 考 文 献

- 1 Gibbs A D. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5: 153 ~ 160
- 2 Davison I. Listric normal fault profiles: calculation using bed length balance and fault displacement. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8: 209 ~ 210
- 3 White N J, Jackson J A, McKenzie D P. The relationship between the geometry of normal faults and that of sedimentary layers on their hanging walls. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8: 897 ~ 999
- 4 Williams G, Vann I. The geometry of listric normal faults and deformation in their hanging walls. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9: 789 ~ 795
- 5 Wheeler J. Variable-thickness models of listric normal faults: the importance of area conservation. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9: 1 047 ~ 1 049
- 6 陈伟, 卢华复, 施央申. 平衡剖面计算机模拟及其应用(博士丛书). 北京: 科学出版社, 1993. 40 ~ 70
- 7 William F D. Geometric models of listric normal faults and rollover folds. *AAPG Bull*, 1991, 75: 1 609 ~ 1 625
- 8 Waltham D. Finite difference of sandbox analogues, compaction and detachment free deformation. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12: 375 ~ 381
- 9 Mandl D. Mechanics of tectonic faulting. *Journal of Structural Geology*, 1988, 10: 128 ~ 135
- 10 Etchecopar A, Vasseur G, Daigniers M. An inverse problem in microtectonics in the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 1981, 3: 51 ~ 65
- 11 Angelier D. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11: 37 ~ 50
- 12 Braun J, Batt G E, Scott D L, et al. A simple kinematics for crustal deformation along two- and three-dimensional listric normal faults derived from scaled laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16: 1 477 ~ 1 490
- 13 许浚远. 地堑两侧块体分离方向的确定. *石油实验地质*, 1994, 16: 334 ~ 338

RECONSTRUCTION OF 3-D PALEOSTRUCTURES OF MULTI-AXIS HORIZONTAL EXTENSIVE BASIN

Xu Junyuan Wang Yanping Wang Lei

Tian Yugang Wang Hao Li Huifang

(*Department of Petroleum, China University of Geosciences, Wuhan*)

Abstract

Current cross-section balancing technique is not suitable for the paleostructure reconstruction of most of extensive basins since they underwent 3-D deformation. The reconstruction of the 3-D deformed paleostructures should be considered as the superimposition of 2-D deformation. The faults in the 3-D deformed basins could be divided into isolated faults and fault complex, and they should be treated separately in reconstruction. As an example, the 3-D paleostructure of the boundary between Middle Eocene and Cretaceous in Tangyuan Depression is reconstructed and described in this paper.