

# 重力水平梯度矢量法在琼东南盆地基底断裂划分上的应用\*

刘兵<sup>1,2</sup>, 吴世敏<sup>1,3</sup>, 龙根元<sup>1,2</sup>, 郭翔艳<sup>1,2</sup>, 曾广东<sup>4</sup>

1. 中国科学院边缘海重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 4. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120

**摘要:** 基底断裂与盆地是一对相互影响的伴生构造, 断裂活动控制盆地内沉积填充和构造样式以及后期资源的分布。本文利用琼东南盆地 2'×2' 的自由空间重力异常, 在进行地形校正、布格异常校正得到布格重力异常的基础上求得重力水平梯度矢量。尝试利用重力水平梯度矢量对基底断裂进行划分并取得良好效果: 在盆地基底划分出 48 条断裂, 并将其分为 3 个等级, 其中一级断裂 5 条, 二级断裂 8 条, 三级断裂 35 条; 将确定的断裂与其他地质、地球物理方法(地震剖面)确定的断裂进行比较, 发现在主要格架上具有一致性; 重力水平梯度矢量法与其他解释方法比较具有成本低廉、方法简单、结果直观的优点。

**关键词:** 重力; 水平梯度矢量; 琼东南盆地; 基底断裂; 地震剖面

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)05-0074-07

## Studying basement fault division in Southeast Hainan Basin of the South China Sea using gravity horizontal gradient vector method

LIU Bing<sup>1,2</sup>, WU Shi-min<sup>1,3</sup>, LONG Gen-yuan<sup>1,2</sup>, GUO Xiang-yan<sup>1,2</sup>, ZENG Guang-dong<sup>4</sup>

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China; 3. Department of earth sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Institute of SINOPEC Shanghai Offshore Oil and Gas Company, Shanghai 200120, China

**Abstract:** Basement fault is an associated structure with the basin. The deposition in a basin and the tectonic style as well as the distribution of resources are determined by basement faults. On the basis of 2-minute Free Air Gravity anomaly database in the Southeast Hainan Basin of the South China Sea, the Bouguer anomaly is obtained after topography correction and Bouguer correction. The gravity horizontal gradient vector data are obtained from the analysis of the Bouguer anomaly. We are able to find 48 basement faults in the basin using the gravity horizontal gradient vector data, which are divided into three ranks, including five first rank faults, eight second rank faults, and 35 third rank faults. Comparing these findings with the results using other geological and geophysical methods such as seismic profiles, we find all results are consistent in terms of the main tectonic structure. However, the gravity horizontal gradient vector method has the advantages of being inexpensive, easy, and intuitive.

**Key words:** gravity; horizontal gradient vector; Southeast Hainan Basin; basement fault; seismic profile

在沉积盆地的研究中, 断裂在盆地演化中的重要性日益受到研究者的重视。基底断裂与盆地是一对相互影响的伴生构造, 空间上基底断裂作为盆地的重要边界控制盆地的展布和形态。在盆地发育时期, 断裂活动又可以控制盆地内沉积填充和构造样式以及后期资源的分布; 而盆地的发育又可以促进基底断裂的活化和再发育, 因此基底断裂是研究盆

地特征的一把重要的钥匙。

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘, 北部为海南岛, 南部为永乐隆起, 西界为红河走滑断裂在海域的延伸, 东部为莺歌海盆地, 是一个新生代陆缘拉张盆地(图 1)<sup>[1]</sup>, 大体上围绕海南岛南部呈北东向弧状展布, 具有两隆三坳的构造区划格局, 东西长 290km, 南北宽约 181km, 面积大约 6 万 km<sup>2</sup><sup>[1-4]</sup>。

收稿日期: 2009-12-22; 修订日期: 2010-01-07。卢冰编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411706-05); 中国石油化工股份有限公司委托项目(5220292)

作者简介: 刘兵(1984—), 男, 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 从事重磁数据的处理和分析。E-mail: liubing@scsio.ac.cn

通信作者: 吴世敏(1965—)。E-mail: wushim@mail.sysu.edu.cn

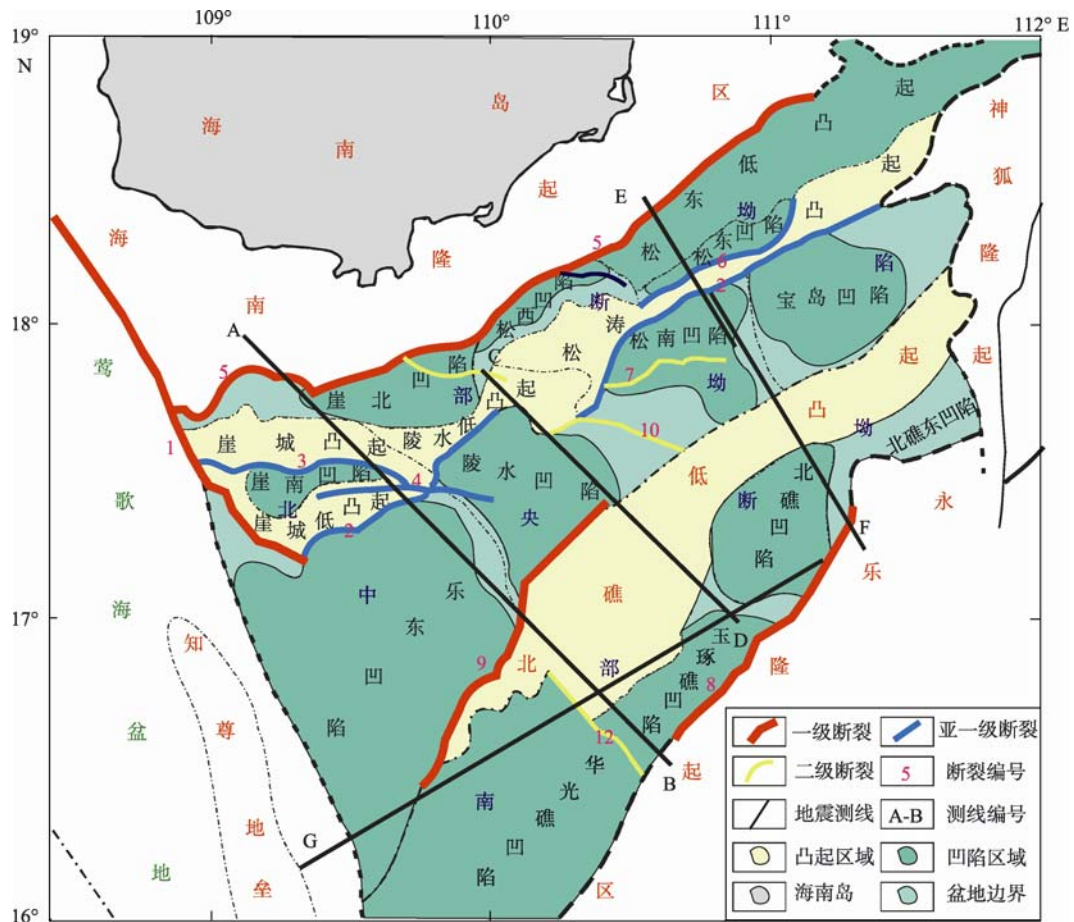


图 1 琼东南盆地地区构造及地震测线分布图

Fig. 1 Distribution map of tectonic structure and seismic profiles in the Southeast Hainan Basin

琼东南盆地被认为是具有广阔前景的石油探区<sup>[5-8]</sup>, 而目前对琼东南盆地断裂构造的研究主要还是从地震资料以及地层层序特征进行研究<sup>[9-12]</sup>。但是这些方法对于研究基底断裂, 地震剖面受探测深度以及覆盖面的局限性比较大。而利用重力异常来解释基底断裂是地质构造研究的主要手段之一。本文在对从美国地球物理数据中心获得的琼东南盆地 $2' \times 2'$ 航空重力数据进行地形校正、布格校正以及延拓处理的基础上, 采用求水平梯度矢量的方法提取延拓曲面上的重力异常梯度带, 从而清楚地显示了琼东南盆地的基底断裂构造分布。

## 1 区域地质概况

琼东南盆地是发育在南海西北部陆架上的新生代张性盆地, 经历了比较复杂的构造演化史<sup>[9]</sup>。盆地的基底主要为华南加里东褶皱带向海上的延伸, 岩性为前古近纪火成岩、变质岩及沉积岩, 包括花岗岩、混合岩、角砾岩、凝灰岩、安山玢岩、英安流纹岩及白云岩等<sup>[13]</sup>。

盆地内部受基底断裂控制, 形成了“三拗两隆”的双层结构, 具有“南北分带、东西分块、上下分层”的构造特点<sup>[14-16]</sup> (图 1)。

1) 南北分带: 以 2 号断裂带为界, 将盆地划分为北部断拗带(包括崖北凹陷、崖南凹陷、松西凹陷、松东凹陷以及崖城凸起、松涛凸起、陵水低凸起)和中央拗陷带(包括乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、北礁凹陷、宝岛凹陷和中央低凸起)。

2) 东西分块: 以盆地中部北西走向断层发育区(即陵水低凸起区)为界, 将盆地划分为东西两个具有不同构造走向的裂谷段。东部裂谷段以东北向构造为主, 西部裂谷段以东西向构造为主, 陵水低凸起区位于两者的构造复合部位, 为调节东西区构造变形的裂谷偏移带。

3) 上下分层: 以 T6 为界划分成上下两个构造层。下构造层古近纪属断陷、断拗结构, 由于构造变形(张性为主)强烈, 形成了一系列的半地堑、地堑、地垒、掀斜断块、断阶和隆起等构造形态; 上构造层新近纪和第四纪属拗陷结构, 盆地整体呈向

南倾的单斜形态, 上构造层断裂不发育。

## 2 水平梯度矢量法的原理

用重磁的方法来分析盆地基底断裂分布最常用的方法是对盆地的自由空间重力异常、布格重力异常、 $\Delta T$  磁异常、航磁化极异常进行异常分离(向上延拓及匹配滤波)和在研究原平面及延拓一定高度的各向水平方向导数以及二次垂向导数的基础上, 分析其线性特征、走向、错动、极值带以及区域分界线来划分断裂的位置、空间延伸展布以及规模。这种方法主要是以方向导数为判断依据<sup>[17-19]</sup>。

求异常场沿某个方向的水平方向导数, 可以找到基本垂直于该方向的异常梯度带的最大梯度位置, 该位置往往与异常体边界位置或者断裂构造位置相接近, 因此水平方向导数的最大值位置是标定异常体边界与断裂构造的主要依据。

如上所述, 因为水平导数与断裂方向具有正交关系, 因此不同方向的断裂可能分别呈现在不同方向的水平导数中, 同时又由于实际的断裂分布是曲折多变的, 它在不同方向的导数图中出现的面目可能有较大差异, 这给断裂的判读造成了一定的不便。因此人们提出了水平梯度的方法<sup>[20-24]</sup>。

水平梯度技术是最直观的导数法, 它是在提取重磁微量信息的基础上采用图像处理 and 图像解释的方法来划分断裂。分隔两个均质块体的纵向地质边界引起的重力水平梯度在这些边界的正上方最陡<sup>[25]</sup>, 而水平梯度法正是通过利用求取重力水平梯度异常极大值的特点来确定边界位置 [图 2, 公式(1)–(6)]。

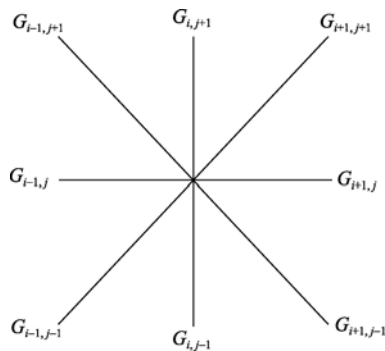


图 2  $3 \times 3$  网格计算  $G$  极大值<sup>[28]</sup>

Fig. 2 Computing  $G$  maximum using  $3 \times 3$  network

水平梯度  $g$  为:

$$g = \frac{\partial \Delta g}{\partial x} i + \frac{\partial \Delta g}{\partial y} j \quad (1)$$

其中  $\Delta g$  为某点的重力异常值,  $i, j$  为  $x$  (东西向)  $y$  (南北向) 方向上的单位矢量。

某点重力异常值  $\Delta g$  的梯度  $g$  是这样—个向量, 它的方向与取得最大方向导数的方向一致, 而它的模为方向导数的最大值。

由此可知, 梯度的模为:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

前人搜索水平梯度模的极大值<sup>[26-28]</sup>采用以下方法: 经前面处理已经得到了在规则网格上的水平梯度模  $G_{ij}$ , 对于网格上的所有交点(不包括最边缘的两行和两列)采用  $n \times n$  网格, 都可以沿着 4 个方向(即行、列及两个对角线方向)与最相邻的 8 个点做比较, 以找出是否有水平梯度模的极大值, 即检查下面 4 个不等式是否成立(图 2):

$$G_{i-1,j} < G_{i,j} < G_{i+1,j} \quad (3)$$

$$G_{i,j-1} < G_{i,j} < G_{i,j+1} \quad (4)$$

$$G_{i+1,j-1} < G_{i,j} < G_{i-1,j+1} \quad (5)$$

$$G_{i-1,j} < G_{i,j} < G_{i+1,j+1} \quad (6)$$

对于重力水平梯度图, 梯度的方向就是重力变化最大处的方向, 该方向垂直于高程等值线。等值线间距最小的地方梯度最大, 即坡度或斜坡最陡, 反之则坡度最缓。在图上的任何一点, 水平梯度矢量都可以用箭头表示, 箭头的方向代表梯度的方向, 箭头的大小正比于梯度的大小。本文中, 箭头的方向指向梯度的最大值方向(图 3)。

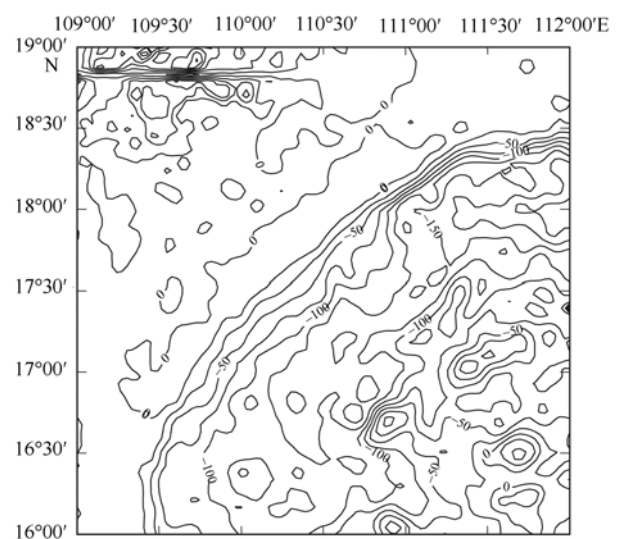


图 3 琼东南盆地布格重力异常分布图

Fig. 3 Map showing the Bouguer gravity anomalies of Southeast Hainan Basin

### 3 数据处理

将获得的  $2' \times 2'$  的卫星自由空间重力异常和水深数据<sup>[29]</sup>利用公式<sup>[30-33]</sup>计算得研究区的布格重力异常(图 4)。

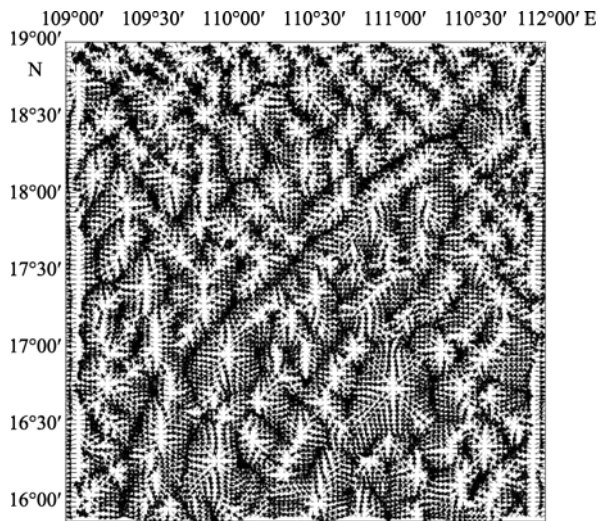


图 4 琼东南盆地重力水平梯度矢量图  
Fig. 4 Gravity horizontal gradient vector (HGV) map of the Southeast Hainan Basin

$$\text{陆地 } \Delta g_B = \Delta g_F - 0.0418\sigma h = \Delta g_F - 0.1116h \quad (7)$$

$$\text{海洋 } \Delta g_B = \Delta g_F + 0.0418(\sigma - \sigma_0)h' = \Delta g_F + 0.0686h' \quad (8)$$

其中  $\sigma$  为岩石密度, 取  $2.67\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $\sigma_0$  为海水层密度, 取  $1.03\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $h'$  是海水深度,  $h$  是地形高度,  $\Delta g_F$  为该点的自由空间重力异常,  $\Delta g_B$  为其布格重力异常。

根据各点的布格重力异常值, 运用公式求取相应的水平梯度矢量, 使用 Surfer8.0 软件绘制得到琼东南盆地重力水平梯度矢量图(图 3)。

图 3 中可以看出, 重力水平梯度矢量图的线性特征非常明显。由一致的箭头取向和长度所定义的重力域一般以箭头图形中的明显线性中断为界, 每一个这样的重力域, 都可解释为以断层为界的基岩地体<sup>[25]</sup>。因此, 描绘图 3 中的箭头指向特征, 我们得到琼东南盆地的基底断裂分布图, 共 48 条断裂(图 5)。

### 4 断裂分析

依据断裂的规模、性质, 结合琼东南盆地基底构造架构的具体问题, 将获得的 48 条断裂分为 3 类:

1) 主要断裂(一级断裂)。这类断裂在重力异常图上表现为巨大的重力梯度带或者不同场区的分界线, 主要断裂对区内构造格架的形成起主要控制作用。该类断裂一共有 5 条, 分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 。

2) 一般断裂(二级断裂)。这类断裂在重力异常图上有一定的规模, 对区内的构造格架起次要的控制作用, 这类断裂一共有 8 条, 分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ 。

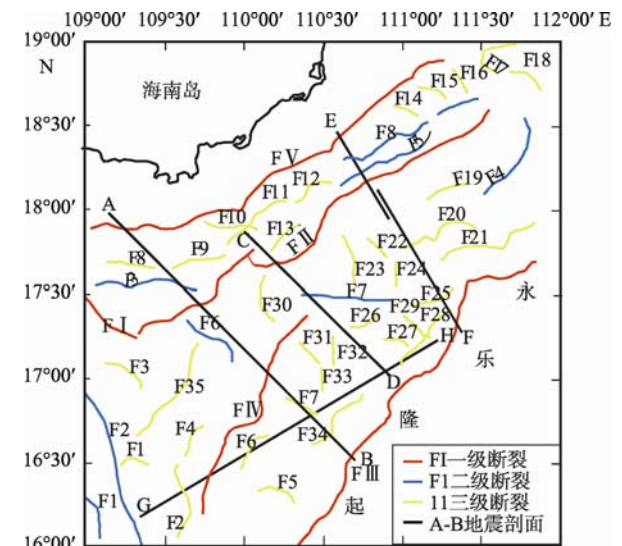


图 5 琼东南盆地断裂推断图  
Fig. 5 Faults distribution in the Southeast Hainan Basin obtained using gravity horizontal gradient method

制作用, 这类断裂一共有 8 条, 分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 、 $F_8$ 。

3) 局部断裂(三级断裂)。这类断裂在重力场中表现为扭曲、转折, 规模相对较小, 对构造格架有一定的改造作用。这类断裂一共有 35 条, 分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、.....、 $F_{35}$ 。

根据断裂的展布走向又可将这些断裂分为: 1)NE 向断裂; 2)NW 向断裂; 3)近 EW 向断裂; 4)弧形断裂。

为了验证得到的基底断裂分布图的正确性, 将本文划出的断裂与已知由其他地质、地球物理方法确定的断裂进行比较。

图 1 是根据二维反射地震剖面得到的区域构造图, 合并图 5 与图 1 得到图 6, 发现: 1)对于主要断

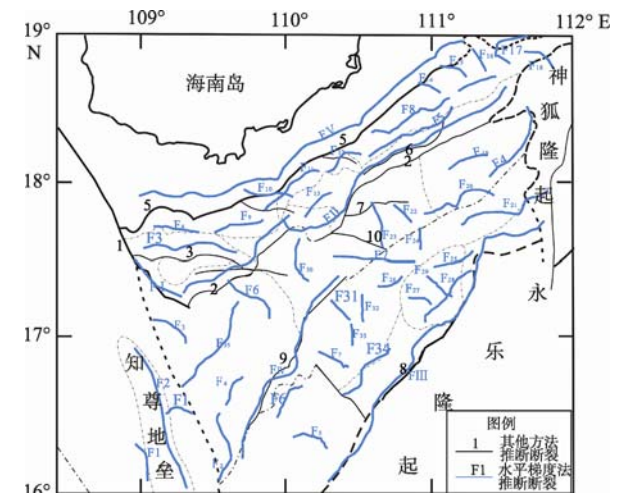


图 6 琼东南盆地断裂构造对比图  
Fig. 6 Map showing the fault structure comparison of the Southeast Hainan Basin

裂两者一致或基本一致,如 F 对应 1 号断裂, F 对应 2 号断裂, F 对应 8 号断裂, F 对应 9 号断裂, FV 对应 5 号断裂。2)本文确定的断裂在图 1 中没有显示,如  $F_1, F_2, F_{14}$  等,可能说明本方法覆盖面更广,揭示的深度更大。3)本文确定的部分断裂与其他地质、地球物理方法确定的断裂在位置、展布上有偏差,  $F_{10}$  应为崖北凹陷与松西凹陷的分界线,而本文确定的断裂却成近 EW 向展布,这可能是由盆地深部构造与观测数据间的偏差所导致。

地震反射剖面是众多地球物理方法准确性较高的方法,地震剖面得到的结果与测试数据的精确度有密切的关系。本文从已有的琼东南盆地地震剖面中选取了 4 条进行分析(图 7),这 4 条剖面贯穿了盆地内部主要的构造单元,因此具有一定的代表性,具有分析的价值。

对比推断的断裂跟分析地震剖面的结果(图 7),我们发现: 1)在主要构造格架上,两者具有一致性; 2)从地震剖面上划分的断裂要详细。由于重力场是

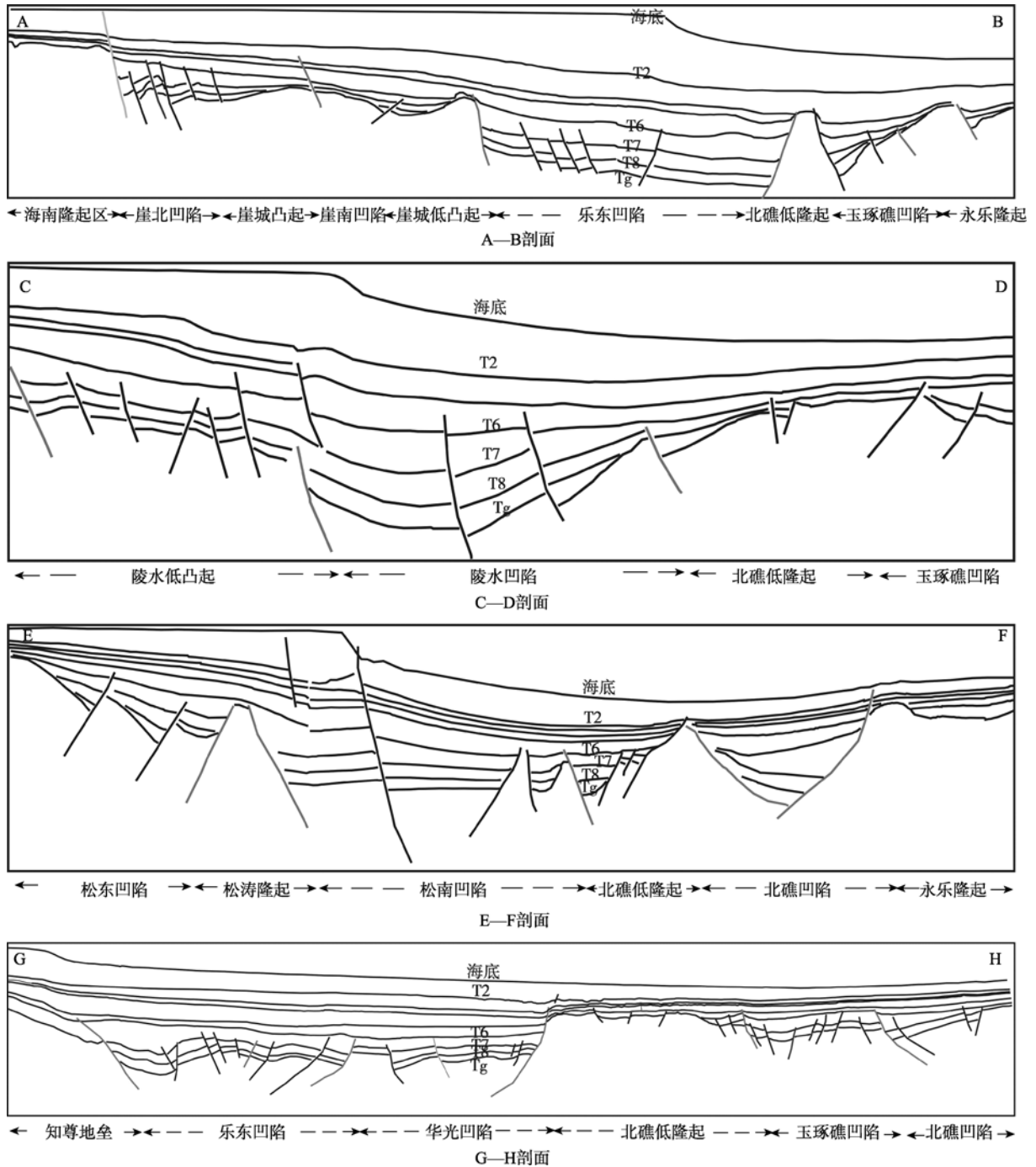


图 7 横穿琼东南盆地的地震反射剖面(蓝色为图 5 划分出的断裂)

Fig. 7 The interpreted seismic reflection profiles transversing the Southeast Hainan Basin

位场,对地下介质的物性反映具有综合性,而采用层序地层学分析后的地震剖面分辨率要高得多。图 5 与图 7 的所划分的断裂的一致性也进一步验证了本文采用水平梯度矢量法推断的断裂结果是正确的。

利用地震反射剖面来解释盆地内部构造特征是现在使用最多的方法,但是对于不同的地层得到的反射资料的品质是存在着区别的。如果出现盆地地质背景复杂,获得的地震反射资料品质较差、信噪比较低,反射波层次特征不明显等情况那么就很难清晰的反应盆地的构造形态;而对于重力处理的方法,由于重力场是位场,对盆地内部特征的反映具有综合性,本身就存在着多解性,另外,对重力数据水平求导的运算会显著放大局部干扰异常。因此两者得到的结果会存在不同也是正常。

## 5 结论

1) 本文运用重力水平梯度矢量法对琼东南盆地进行内部断裂构造的划分,判别出一级断裂 5 条,二级断裂 8 条,三级断裂 35 条,断裂的走向呈 NE 向,近 EW 向, NW 向以及弧形。

2) 将划分的断裂与其他地质地球物理方法以及地震反射剖面划分的断裂比较,发现在主要构造格架(一级断裂)基本一致,而在二级断裂及三级断

裂上存在偏差。这种偏差一方面是因为重力是位场,对地下介质的反映具有综合性,因此对低角度、深大位置的断裂的确定具有偏差。

3) 采用重力水平梯度矢量法相对其他解释断裂构造的方法有以下优点。

A. 成本低廉: 相对其他地质地球物理方法而言,可以廉价的提供有关盆地的内部断裂信息,而不用花费大量的地震测量费用;

B. 方法简单: 相对从等值线解释断裂的方法而言,水平梯度矢量法方法简单,断裂位置容易判读;

C. 结果直观: 从等值线解释的断裂不容易判断断裂的位置以及在空间的展布和延伸,具有很大的主观性,而用水平梯度矢量法则可以清晰的划分出断裂在空间上的展布和延伸的幅度,减小了误差。

4) 和其他重力反演方法一样,采用水平梯度矢量法解释基底断裂分布准确性受下面因素的影响。

A. 地下构造特征不能完全用二维模型进行描述;

B. 数据精度不够;

C. 由于地表及基底密度分布不均匀,所以地形校正以及布格校正可能不精确。

其中因素 A 是无法人为控制的, B、C 可以通过提高数据精度以及反复测试降低影响。

## 参考文献

- [1] 谢文彦, 张一伟, 孙珍, 等. 琼东南盆地断裂构造与成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 71-78.
- [2] 蔡乾忠. 中国海域油气地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 161-167.
- [3] 邱忠建, 龚在升. 中国油气勘探: 第四卷 近海油气区[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 911-963.
- [4] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验数据[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 1-9.
- [5] 万志峰, 夏斌, 何家雄, 等. 南海北部莺歌海盆地与琼东南盆地油气成藏条件比较研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 648-652.
- [6] 龚再升, 李思田, 谢承俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 5-24.
- [7] 龚再升, 杨甲明, 杨祖序, 等. 中国近海大油气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 195-223.
- [8] 周小鹰, 魏魁生. QDN 盆地层序地层及生储盖组合分析[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 244-248.
- [9] 李绪宣, 朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及油气输导[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- [10] SUN QILING, WU SHIGUO, YAO GENSHUN, et al. Characteristics and formation mechanism of polygonal faults in southeast hainan basin, northern south china sea[J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(1): 180-192.
- [11] 吴培康. 琼东南盆地半地堑充填模型[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(6): 1-7.
- [12] 于俊峰, 段如泰. 琼东南盆地 2 号断裂东带发育特征及形成机理[J]. 大地构造及成矿学, 2008, 32(3): 293-299.
- [13] 魏魁生, 崔早云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. 地球科学, 2001, 26(1): 59-66.
- [14] 李绪宣, 钟志洪, 董伟良, 等. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 713-721.
- [15] 李绪宣, 朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气疏导特征[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- [16] 何家雄, 施小斌, 阎贫, 等. 南海北部边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 129-135.
- [17] 王家林, 吴建生, 陈冰, 等. 珠江口盆地和东海陆架盆地

- 基底结构的综合地球物理研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 1-58.
- [18] 赵俊猛, 卢造勋, 姚长利, 等. 准噶尔盆地基底断裂的重磁学研究[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 132-143.
- [19] 于鹏, 王家林, 钟慧智, 等. 琼东南盆地基底结构综合地球物理研究[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(6): 443-450.
- [20] HOOD P. Gradient measurement in aeromagnetic surveying[J]. Geophysics, 1965, 30: 891-902.
- [21] HOOD P, MCCLURE P J. Gradient measurements in ground magnetic prospecting[J]. Geophysics, 1965, (30): 403-410.
- [22] Ramadass G, Rao S, Raja Mohammed, A. Analysis of gravimagnetic anomalies by horizontal gradients[J]. Journal of Earth System Science, 1986, 95(3): 343-349.
- [23] 唐仁敏, 张健. 利用重力梯度反演南海西南海盆深部构造[J]. 地质力学学报, 2006, 12(1): 49-54.
- [24] 马宗晋, 高祥林, 宋正范. 中国布格异常水平梯度图的判读和构造解释[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 106-114
- [25] EDWARDS D J, LYATSKY H V, BROWN R J. Interpretation of gravity and magnetic data using the Horizontal-gradient vector method in the western Canada basin. First Break, 1996, 14(6): 231-245.
- [26] 余钦范, 楼海. 水平梯度法提取重磁源边界位置[J]. 物探化探计算技术, 1994, 16(4): 363-367
- [27] 黄临平, 管志宁. 利用磁异常总梯度模确定磁源边界位置[J]. 华东地质学院学报, 1998, 21(2): 143-150
- [28] 赵希刚, 吴汉宁, 柏冠军, 等. 重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 414-421.
- [29] NOAA/NGDC.ETOPO2V2 Global Gridded 2-minute Database CD-ROM [EB/OL]. [2009-12-22]. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/%20global/relief/ETOPO2/ETOPO2v2-2006>.
- [30] 王家林, 王一新, 万明浩. 石油重磁解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 3-9.
- [31] 杨恬, 吴世敏, 刘海龄, 等. 南海西北部重磁场及其深部构造特征[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 364-370.
- [32] 杨恬. 南海西北部地球物理场特征及其构造意义[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2004: 1-66.
- [33] 吴湘杰. 珠江口盆地白云凹陷地质地球物理综合研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2005: 1-70.