

用重力三方向小子域滤波解释伊通盆地断裂

张凤旭^{1,2}, 刘万崧¹, 张兴洲^{2*}, 孟令顺¹, 张凤琴³

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130062

3. 吉林大学物理学院, 吉林长春 130023

摘要: 关于伊通盆地的断裂系统, 前人主要研究了边界断裂和盆地内的2号断裂的性质. 为了精细地解释盆地内其他断裂的基本性质, 利用重力场小子域滤波及三方向小子域滤波技术圈定了14条断裂的平面位置, 给出了伊通盆地平面断裂构造格架并描述了主要断裂的重力场特征. 在与其他地球物理资料(4条地震剖面和4条电阻率断面)的对比分析中, 除证实了已有的断裂外, 还验证了利用三方向小子域滤波技术最新发现的一些断裂, 证明了该方法技术的有效性. 阐述了14条断裂的基本性质, 重点研究了盆地内中央断裂的存在性和基本性质. 指出中央断裂是与盆地东南缘和西北缘两条断裂同期形成的主要控盆构造; 2号断裂向西与西拉木伦断裂相连, 盆地南部(2号断裂以南)基底与华北板块有关, 北部则属于东北微陆块复合基底.

关键词: 三方向小子域滤波; 伊通盆地; 中央断裂; 西拉木伦断裂; 地球物理勘探.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2009)04-0665-08

收稿日期: 2008-07-20

Explanation of Faulted Structure in Yitong Basin Using Three-Directional Small Subdomain Filtering

ZHANG Feng-xu^{1,2}, LIU Wan-song¹, ZHANG Xing-zhou^{2*}, MENG Ling-shun¹, ZHANG Feng-qin³

1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130062, China

3. College of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China

Abstract The predecessors mainly researched properties of boundary faults and secondary fault of the faulted system in Yitong basin. In order to explain the characteristics of other faults in this basin, the paper obtains the locations of 14 faults, rebuilds faulted structure pattern curve of this basin and describes the characteristics of gravity field of main faults using the techniques of small subdomain filtering and three-directional small subdomain filtering. The comparison with other physical geography data (4 seismic profiles and 4 electrical resistivity sections) proves that the new found faults by the three-directional small subdomain filtering are existent and ensures that the techniques used in this paper are valid. In the paper, we expatiate on the characteristics of 14 faults and mainly study the existence and property of mid-faults. The mid-faults with boundary faults of this basin are main faulted structure that controls the whole basin and formed in geologic epoch. The secondary faulted structure joints Xilamulun faulted structure and the basal of the south part of this basin (the south of the secondary fault) is related to Huabei plate, while the north of it is compound basal of Dongbei small plates.

Key words: three-directional small subdomain filtering; Yitong basin; the mid-fault; Xilamulun fault; geophysical prospecting.

0 引言

伊通盆地(图1)位于吉林省东部,属于郯庐断

裂带的北延部分,呈NE45°~55°方位展布于长春市与吉林市之间的狭长地带,为佳伊地堑的南段(万天丰,1995;王永春,2001;李献甫等,2002;李本才等,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40739905).

作者简介: 张凤旭(1969-),男,博士后,副教授,主要从事固体地球物理学研究. E-mail: zhangfx@jlu.edu.cn

* 通讯作者: 张兴洲, E-mail: zxxzhang@jlu.edu.cn

2003), 由南至北分别跨越梨树、伊通、双阳以及永吉等 4 县。伊通地堑东南方向为广阔的那丹哈达岭, 西北为大黑山山脉, 西南东辽河断裂与叶赫断隆相接, 东北第二松花江断裂与舒兰断陷相连, 盆地南北长约 160 km, 东西宽约 10 ~ 20 km, 总面积约为 2 200 km²。伊通盆地成盆前, 经历了加里东、海西、印支、燕山等构造旋回, 基底岩性主要为海西、燕山期花岗岩(李本才等, 2003)。根据盆地基底起伏、沉积物厚度和断裂构造活动特点, 盆地可划分为岔路河断陷、鹿乡断陷和莫里青断陷 3 个一级构造单元以及五星构造带等 10 个二级构造单元(王永春, 2001; 李本才等, 2003)(图 1)。

关于伊通盆地的断裂系统, 一些文献(王永春, 2001; 董亨茂, 2002; 李献甫等, 2002; 李本才等, 2003)主要集中在西北缘和东南缘两条边界断裂以及盆地内 2 号断裂(图 1)的性质研究上, 这三条断裂在布格重力异常中均表现为较大型的异常梯级带(图 2), 但对于盆地内其他断裂特征的描述, 未见有关文献记载。例如: 如果把 2 号断裂以南的盆地划分为鹿乡断陷和莫里青断陷两个一级构造单元, 这两个断陷单元间是否应该存在着分界线(如断层、接触带)? 盆地内较大的凹陷主要集中在西北部, 油气圈闭等构造带主要集中在东南部(图 1), 也就是说, 盆地沉积基底起伏由西北到东南逐渐减小, 这样的

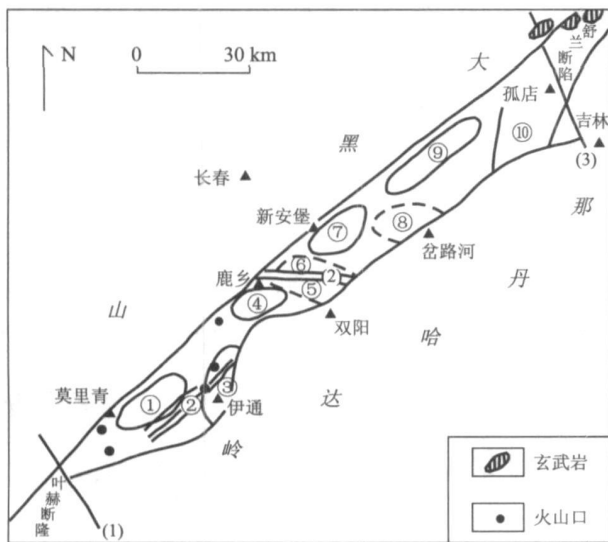


图 1 伊通盆地构造简图(王永春, 2001; 李献甫等, 2002; 李本才等, 2003)

Fig. 1 Geological structural map of the Yitong basin

- ①莫里青凹陷; ②马鞍山断阶带; ③尖山隆起带; ④大南凹陷; ⑤五星构造带; ⑥梁家构造带; ⑦新安堡凹陷; ⑧万昌构造带; ⑨太平凹陷; ⑩孤店斜坡带; (1)辽东河断裂; (2)2号断裂; (3)第二松花江断裂

起伏特征是否仅仅由于盆地的走滑、反转、沉降所引起? 除边界断裂外, 在盆地内是否还应该存在着其他 NE 向的断裂来协调(平衡)盆地走滑和伸展过程中所具有的运动学特点?

根据以上问题, 本文在前人工作的基础上, 利用 2006 年吉林油田采集的高精度重力异常数据(比例尺为 1 : 2 万), 采用小子域(杨高印, 1995)及三方向小子域滤波(张凤旭等, 2007a, 2007b)技术, 对盆地断裂构造的水平位置重新厘定, 研究盆地内断裂的精细结构。

小子域滤波法是杨高印(1995)提出的位场数据处理的一项技术, 是基于滑动平均法原理进行改进的一种低通滤波方法。三方向小子域滤波是张凤旭等(2007a)针对小子域滤波法难以检测出梯级带特征不明显或非梯级带特征的断裂构造的平面位置提出的, 此项技术是在小子域滤波的基础上, 根据位场 DCT 理论(Rao and Yip, 1990; 胡广书, 2003; 张凤旭等, 2005, 2006, 2007a, 2007b)和直立岩脉重力异常特征对布格异常中所表现的断裂构造的非梯级带特征(如异常等值线的同形扭曲等)进行改造, 突出三方向的异常梯级带表现形式, 为断裂构造的识别提供更丰富的信息。

1 伊通盆地布格重力异常的基本特征

如图 2 所示, 伊通盆地布格重力异常的总体走向以 NE 向为主, 异常幅值范围为 $-38 \times 10^{-5} \sim 14 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 其中西北缘和东南缘均为重力高值异常区, 梯度变化较陡, 其重力场差值达到 $52 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 这说明研究区西北缘和东南缘两侧存在较大规模的断裂; 梯级带中间为重力低值异常区, 梯度变化平缓, 而且叠加了多个呈串珠状、沿 NE50° 方向断续分布的局部重力低值异常。从图 1 中可以看出, 研究区自 WS 至 NE 主要分布有 5 个局部重力低值异常圈闭区, 分别为: 靠山重力低、马鞍山重力低、鹿乡重力低、新安堡重力低和孤店子西南侧桦皮厂重力低。

从整个盆地布格重力异常的形态看, 除盆地西北缘和东南缘两侧断裂以及 2 号断裂以较大型的梯级带形式表现外, 盆地内其他断裂表现不明显, 也就是说只利用本区布格重力异常等值线特征来较精确地圈定断裂的位置是困难的。

2 用小子域及三方向小子域滤波圈定伊通盆地断裂的平面位置

2.1 用小子域滤波圈定边界断裂的平面位置

小子域滤波能相对地增强区域异常间的界限特征,能以较高的分辨率保留异常中的区域特征,对具有梯级带特征的断裂构造平面位置的确定具有较高的分辨率(杨高印, 1995).根据小子域滤波的基本原理,采用 5×5 的滑动窗口,对伊通盆地布格重力异常(图 2)相比,可以看出,经小子域滤波处理后的异常梯级带(图 3)被明显地紧缩了,盆地边界断裂特征被明显增强,也就是说利用小子域滤波能够较准确地刻画西北缘和东南缘边界断裂的平面位置.同时以梯级带形式表现的 2 号断裂在图 3 中也有较明显的显示.

2.2 用三方向小子域滤波圈定盆地断裂平面位置

对于实测重力异常,断裂在平面等值线中不仅表现为梯级带形式,而且还表现为异常等值线同形扭曲、圈闭等值线突然变宽或变窄、异常轴明显错动等断裂构造的其他非梯级带特征(张凤旭等, 2007a, 2007b).小子域滤波对原始异常中具有梯级带特征的断裂构造位置的识别具有较高的分辨率,而对于断裂构造的非梯级带特征则无法识别.而三方向小子域滤波能够克服小子域滤波的这些缺点,针对于此,采用三方向小子域滤波技术对盆地断裂

平面位置进行刻画.

图 4 均以 5×5 滑动窗口为基础的滤波结果,与图 3 相比,图 4 的滤波结果不但对边界断裂表现清晰,而且丰富了盆地内断裂的信息,为盆地内断裂平面位置进行精细的刻画提供了基础.从图 4 中可以看出,正北方向小子域滤波结果(图 4a)主要突出了走向为 EW 方向的断裂,对于 NE 方向的断裂表现也比较清楚;正东方向小子域滤波结果(图 4b)突出了走向为 SN 方向的断裂,对于 NE 方向的断裂也有显示;NE 方向小子域滤波结果(图 4c)突出了走向为 NW 方向的断裂,同时对于 SN 方向的断裂表现也比较清晰.

2.3 伊通盆地平面断裂构造格架及重力场特征

前文利用三方向小子域滤波技术刻画了伊通盆地平面断裂位置,给出了伊通盆地平面断裂的基本格架(图 5).从图 5 中可以看出,利用三方向小子域滤波结果共划分出断裂 14 条,这些断裂的构造方向主要分为 NE、EW 和 SN 向三组,其中以 NE 向断裂构造最为醒目,多以梯级带形式显示. F_1 和 F_3 分别为盆地西北缘和东南缘边界断裂,它们在重力场中表现为较大型的重力梯级带; F_2 为 2 号断裂,在重力场中也以梯级带的形式表现; F_4 和 F_5 为盆地中央断裂,但它们在重力场中所表现的特征并不相同, F_4 表现为圈闭等值线突然变宽或变窄的特征(此特征表现并不明显), F_5 则以梯级带的形式出

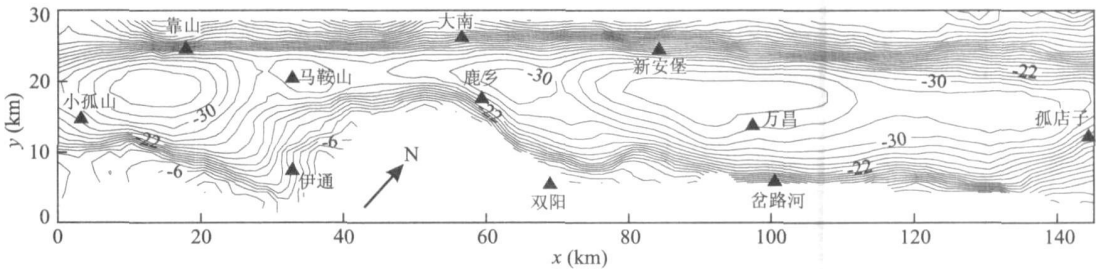


图2 伊通盆地布格重力异常(等值线间距: $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$)
Fig. 2 Bouguer gravity of Yitong basin

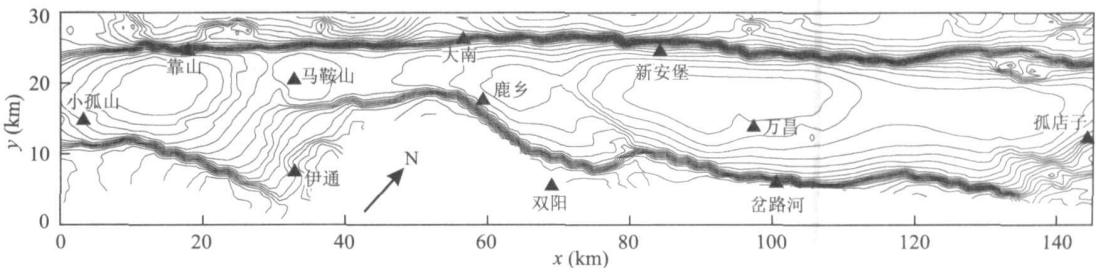


图3 小子域滤波结果

Fig. 3 Results of small subdomain filtering

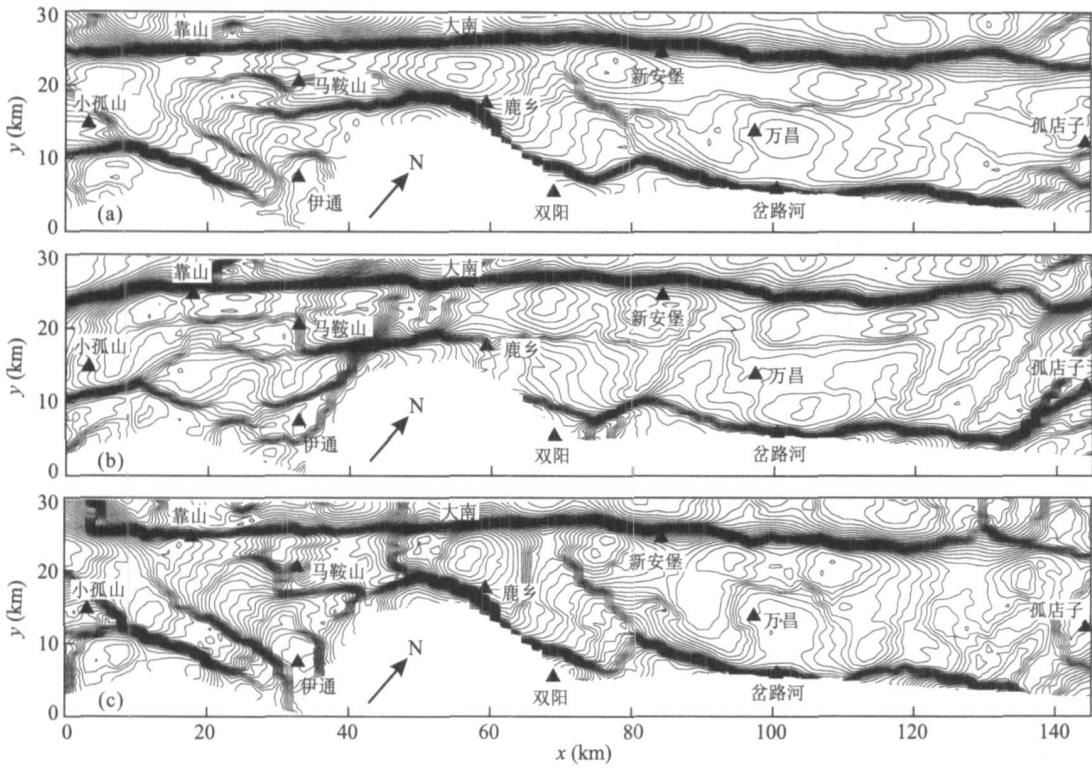


图 4 三方向小子域滤波结果

Fig. 4 Results of three-directional small subdomain filtering

a. 正北方向小子域滤波结果; b. 正东方向小子域滤波结果; c. NE 方向小子域滤波结果

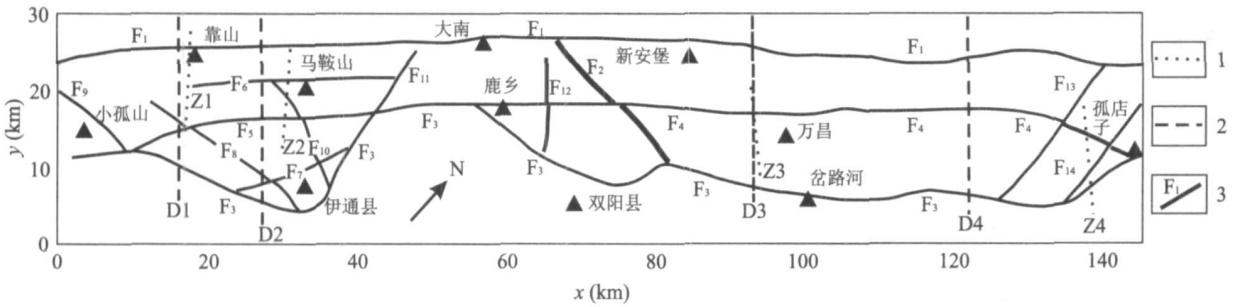


图 5 伊通盆地平面断裂构造格架

Fig. 5 Faulted structure pattern curve of Yitong basin

1. 地震测线位置; 2. CEMP 测线位置; 3. 断裂

现; 其余的断裂在重力场中各有自己的特征, 在此不一一赘述。

3 断裂划分的其他地球物理证据

为了验证利用三方向小子域滤波技术划分的伊通盆地断裂构造的有效性, 笔者收集了研究区 4 条地震剖面 and 4 条 CEMP 电性断面图进行对比分析。这些剖面和断面的具体位置见图 5 中的虚线。需要说明的是地震剖面位置是自上而下(图 6 中各剖面

在图 5 中的位置), 而 CEMP 电性断面是从下到上的(图 7 各断面在图 5 中的位置)。

3.1 地震剖面给出的证据

图 6 为利用 4 条地震剖面确定的断裂, 其中 Z1 线地震剖面(图 6a)在图 5 中与断裂 F₅、F₈ 相交, 综合考虑 4 条地震剖面中断裂的产状以及 F₅、F₈ 在重力场中的位置, 可以确认 Z1 线地震剖面中确定的断裂即为图 5 中的断裂 F₈; Z2 线地震剖面(图 6b)确定的断裂与图 5 中 F₆、F₁₀ 和 F₅ 相一致; 而 Z3 和 Z4 线地震剖面可以确认盆地中央断裂 F₄ 的存在性。

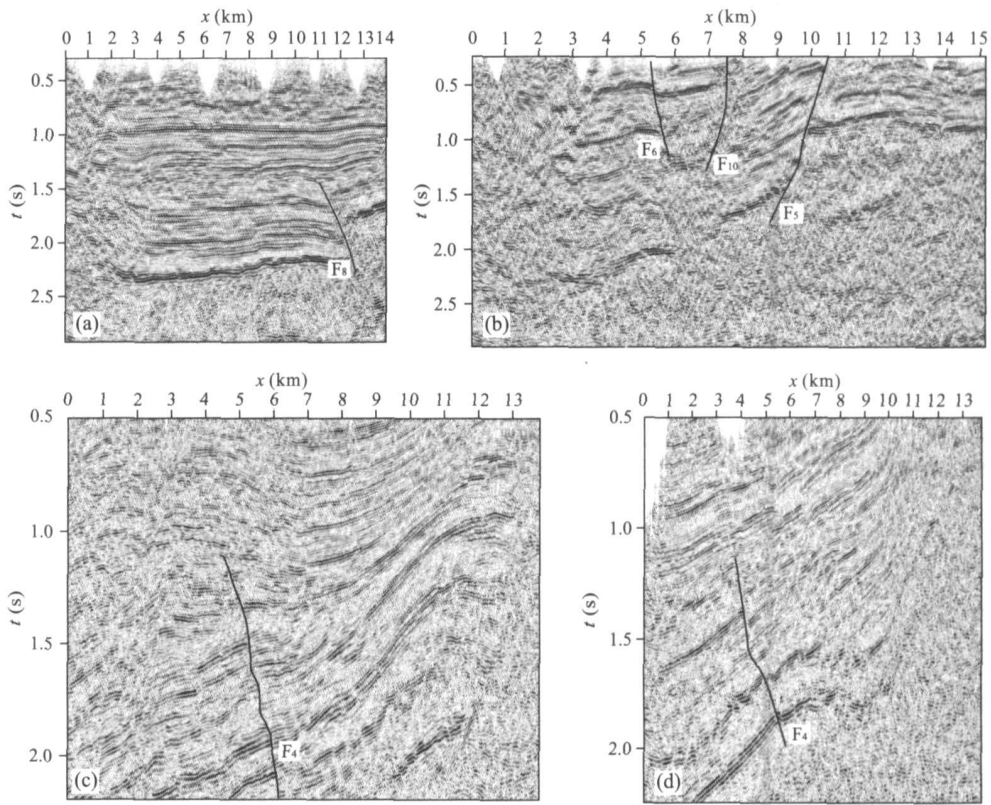


图 6 利用地震剖面确定的断裂(断面位置见图 5)

Fig. 6 Location of faulted structures based on seismic profile
a. Z1 线地震剖面; b. Z2 线地震剖面; c. Z3 线地震剖面; d. Z4 线地震剖面

3.2 电阻率断面给出的证据

由于西北缘边界断裂为高角度断裂, 其在地震资料中表现的断层面不清楚, 因此需利用电性剖面资料来进一步分析盆地边界断裂的平面位置, 同时佐证其他断裂的存在性。

图 7 为 4 条 CEMP 剖面二维反演电阻率断面图。根据断面电阻率的分布特征, D1 线电阻率断面(图 7a)可确定西北缘断裂 F₁、东南缘断裂 F₃ 和盆地中央断裂 F₅; D2 线电阻率断面(图 7b)除可以确定边界断裂外, 对 F₈、F₅ 和 F₆ 三条断裂也有明显的显示; D3 和 D4 线电阻率断面除可以确定两条边界断裂外, 还可以证实盆地中央断裂 F₄ 的存在性。显然, 以上断裂与图 5 中刻画的相关断裂一一对应。

4 断裂构造基本性质及动力学解释

4.1 盆地断裂构造的基本性质

综合伊通盆地重力场形态、三方向小子域滤波结果以及地震剖面和电阻率断面所显示的断裂特征, 对图 5 所划分的 14 条断裂的基本性质有如下

认识:

西北缘断裂 F₁ 为岩石圈断裂(王永春, 2001), 沿 NE 走向贯通整个盆地, 在重力场以及小子域滤波结果中未见其他走向的较大断裂对该断裂进行切割、改造和错动, 其断面的连续性相对较好。从西北缘断裂的整体看, 该断层属于高角度正断层, 断面倾角均大于 70°。据地质资料表明(董亨茂, 2002; 李献甫等, 2002), 西北缘地面露头的断层面存在水平方向擦痕, 且在靠山镇西北盆地边缘的花岗岩露头中, 存在 NE50°走向的断层, 断面的水平擦痕十分清晰, 指示右旋走滑活动, 推断该断层为走滑断层。

东南缘断裂 F₃ 也为岩石圈断裂(王永春, 2001), 已有的资料认为该断裂主体上为一伸展断裂, 在伸展过程中具有平移性质, 为一张性正断层(李献甫等, 2002)。但从盆地重力场特征及三方向小子域滤波结果来看, 该断层具有分段性, 在不同的断陷区有不同的性质。在莫里青和鹿乡断陷区, 根据电性剖面资料以及重力场特征可推断为高角度的张扭性断层, 且在不同段落断层的走向存在较大的差异; 在岔路河断陷区, 东南缘边界断层在三维地震剖面上存在非常清晰

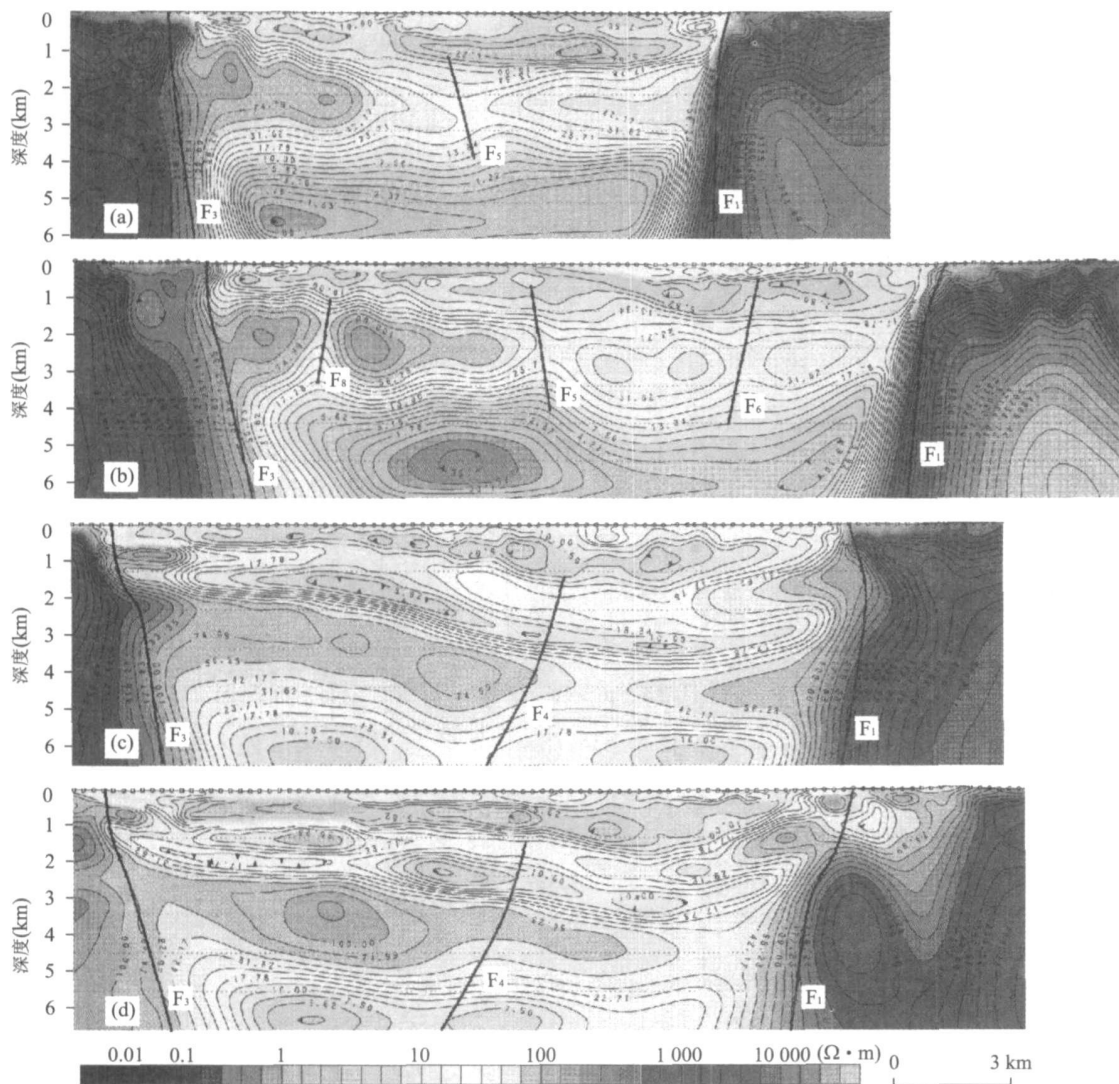


图 7 利用 CEMP 剖面二维反演电阻率断面图确定的断裂(断面位置见图 5)

Fig. 7 Location of faulted structures based on electrical resistivity sections inverted by CEMP profile

a. D1 线电阻率断面; b. D2 线电阻率断面; c. D3 线电阻率断面; d. D4 线电阻率断面

的断面波,为典型的铲式正断层(董亨茂,2002)。

2号断裂 F_2 位于盆地的中部,是盆地内最主要的一条同沉积滑动断裂(李献甫等,2002)。正北方向和 NE 方向的小子域滤波清晰地刻画了断层近 EW 的走向,根据地震资料及相关文献(王永春,2001;董亨茂,2002;李献甫等,2002;李本才等,2003)可以确认该断裂倾向为 NE,倾角 $45^\circ \sim 60^\circ$,且具有西陡东缓的特点。

盆地中央断裂为最新识别的断裂,分为 F_4 和 F_5 两段,这两段断层走向 NE,均收敛归并于东南缘边界断裂,除此外,这两段断裂的性质完全不同。 F_5 位于莫里青断陷区,在重力场中以梯级带的形式显现,小子域滤波和三方向小子域滤波结果均显示为

东南缘断裂在鹿乡断陷段的南延部分,在地震和电性剖面(图 6b 和图 7a、7b)中显示为高角度正断层,倾向 NW,在布格重力异常及三方向小子域滤波结果中有明显的挤压和剪切特征,因此可推断 F_5 为压剪性断层。 F_4 位于岔路河断陷区,该断层在重力场中表现并不明显,但在正北和正东方向小子域滤波结果中有较清晰的显示,在地震和电性剖面中该断层并未切穿岔路河组和齐家组地层,据此可推断该断裂为以张剪性为主的基底隐伏断裂,断层倾向 SE,倾角大于 70° 。

同样根据本次研究,研究区还可以确定 F_6 、 F_8 、 F_{10} 和 F_{11} 等断裂的性质。 F_6 为盖层断裂,走向 NE,与 F_5 平行,倾向 SE; F_8 走向 EW,倾向 SW,结合地

震和电性剖面, 可推断为基底隐伏断裂; F_{10} 为盖层断裂, 走向 EW, 倾向 NE; F_{11} 可视为东南缘断裂 F_3 在盆地的内延段, 走向 SN, 该断裂的发现, 证实鹿乡断陷和莫里青断陷间存在着分界线. 其他的断裂 (F_7 、 F_9 、 F_{12} 、 F_{13} 和 F_{14}) 可以利用重磁场特征及三方向小子域滤波结果确定其走向和延伸长度, 至于断层的倾向等尚需进一步研究.

4.2 构造动力学解释

从伊通盆地重力场特征看, 盆地基底的起伏情况具有两个重要特征: (1) 整个盆地的基底都有向 NW 倾斜加深的特点; (2) 伊通盆地的许多圈闭都分布在东南缘边界断裂附近(图 1). 这样的构造格局与盆地断裂, 尤其是边界断裂在形成和演化时期所具有的动力学机制密切相关.

对于边界断裂的活动演化历史, 一些学者认为主要经历了如下 3 个阶段(陈发景等, 1996; 王永春, 2001; 董亨茂, 2002; 李献甫等, 2002; 孙晓猛等, 2006): (1) 始新世是盆地形成和扩张阶段; (2) 渐新世表现为右旋压扭作用; (3) 新近纪则主要表现为挤压作用; 同时认为边界断裂在盆地形成和演化过程中西北缘和东南缘边界断裂存在着显著的差异, 西北缘边界断层是控盆断层, 控制着盆地的形成和演化, 而东南缘边界断层主要起协调作用.

本次研究成果表明, 盆地内中央断裂(F_4 和 F_5) 及 2 号断裂(F_2) 在盆地形成和演化过程中同样具有不可替代的作用, 具有重要的研究意义. 从盆地形成和演化所具有的动力学机制看, 中央断裂(F_4 和 F_5) 的存在性是必然的, 它是与盆地东南缘和西北缘两条断裂同期形成的主要控盆构造; 该断裂的发现为

盆地内较大的凹陷主要集中在西北部, 而油气圈闭等构造带主要集中在东南部的构造模式提供了合理的解释, 也为盆地走滑伸展的运动学特点提供了佐证. 2 号断裂 F_2 将盆地分为南北两部分, 是一条重要断裂带, 其南部构造复杂, 北部相对稳定, 南部基底 EW 向断裂发育, 盆地东界极不规则, 这样一种构造样式的差别, 反映了基底岩性的不同. 结合盆地区域地球物理场及地质资料(陈发景等, 1996; 孙晓猛等, 2006), 可推断 2 号断裂向西与西拉木伦断裂相接(如图 8 所示), 盆地南部基底与华北板块有关, 北部则属于东北微陆块复合基底, 这个认识可以解释盆地南部和北部基底岩性的差异性.

5 结论

本文利用三方向小子域滤波技术, 对伊通盆地断裂系统进行了重新划分, 给出了盆地平面断裂构造的基本格架, 在与地震剖面和 CEMP 电性剖面对比分析中, 验证了利用三方向小子域滤波技术划分的断裂构造的有效性, 同时也进一步说明, 与传统的小子域滤波技术相比, 三方向小子域滤波技术对确定断裂构造平面位置具有较高的分辨率, 计算过程具有良好的稳定性.

在综合考虑伊通盆地重力场特征、三方向小子域滤波结果以及地震剖面和电阻率断面所显示的断裂特征的基础上, 阐述了 14 条断裂的基本性质, 分析了盆地构造动力学机制, 得出如下结论: (1) 正东和北东方向小子域滤波结果证实鹿乡断陷和莫里青断陷间存在着分界线(F_{11}); (2) 中央断裂的识别, 完善了伊通盆地为走滑盆地所具有的动力学机制, 为盆地的走滑伸展性质提供了佐证; (3) 根据东北地区区域重力场特征及伊通盆地南北部构造差异性和基底特征(王永春, 2001; 李献甫等, 2002; 孙德等有, 2004; 孙晓猛等, 2006) 可推断 2 号断裂向西与西拉木伦断裂相连, 盆地南部基底与华北板块有关, 北部则属于东北微陆块复合基底.

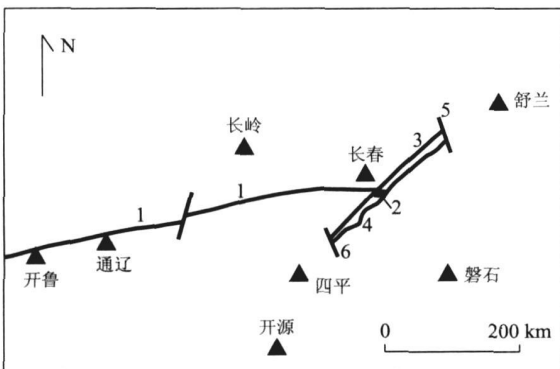


图 8 2 号断裂与西拉木伦断裂的关系示意

Fig. 8 Sketch map of relationship between the second fault and Xilamulun fault

1. 西拉木伦断裂; 2. 2 号断裂; 3. 伊通盆地西北缘断裂; 4. 伊通盆地东南缘断裂; 5. 第二松花江断裂; 6. 辽东河断裂

References

Chen, F. J., Zhao, H. L., Chen, Z. N., et al., 1996. Structural characteristics and geodynamic setting of Mesozoic and Cenozoic extensional basins in eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(4): 357–365 (in Chinese with English abstract).

Dong, H. M., 2002. The property and evolution of boundary

- faults of Yitong graben. *Journal of Geomechanics*, 8 (1): 35—42 (in Chinese with English abstract).
- Hu, G. S., 2003. Digital signal processing. Tsinghua University Press, Beijing, 363—375 (in Chinese).
- Li, B. C., Liu, H. Y., Du, H. X., et al., 2003. The petroleum system and accumulation in Yitong basin. *China Petroleum Exploration*, 8(3): 38—44 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Chen, Q. M., Zhang, X. H., et al., 2002. The Yitong graben: The structural features and evolution of a strike-slip fault basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 24(1): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Rao, K. R., Yip, P., 1990. Discrete cosine transform: Algorithms, advantages and applications. Academic Press, New York.
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. The final closing time of the west Lamulun River—Changchun—Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174—181 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Long, S. X., Zhang, M. S., et al., 2006. Discovery and timing of major thrustbelt in Jiamusi—Yitong fault zone. *Oil & Gas Geology*, 27(5): 637—643 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., 1995. Evolution of Tancheng—Lujiang fault zone and paleostress fields. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(5): 526—534 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. C., 2001. The petroleum system and hydrocarbon accumulation in Yitong graben. Petroleum Industry Press, Beijing, 14—16 (in Chinese).
- Yang, G. Y., 1995. A new technique for potential-field data processing: Small subdomain filtering. *Oil Geophysical Prospecting*, 30(2): 240—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. X., Meng, L. S., Zhang, F. Q., et al., 2006. A new method for spectral analysis of the potential field and conversion of derivative of gravity-anomalies: Cosine transform. *Chinese J. Geophys.*, 49(1): 244—248 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. X., Zhang, F. Q., Meng, L. S., et al., 2005. Using cosine transform for forward modeling and inversion of gravitational anomaly on density interface. *Oil Geophysical Prospecting*, 40(5): 598—602 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. X., Zhang, F. Q., Liu, C., et al., 2007a. A technique for elaborate explanation of faulted structures: Three directional small subdomain filtering. *Chinese J. Geophys.*, 50(5): 1543—1550 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. X., Zhang, F. Q., Meng, L. S., et al., 2007b. Magnetic potential spectrum analysis and calculating method of magnetic anomaly derivatives based on discrete cosine transform. *Chinese J. Geophys.*, 50(1): 297—304 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈发景, 赵海玲, 陈昭年, 等, 1996. 中国东部中、新生代伸展盆地构造特征及地球动力学背景. 地球科学——中国地质大学学报, 21(4): 357—365.
- 董亨茂, 2002. 伊通地堑边界断裂的性质与演化. 地质力学学报, 8(1): 35—42.
- 胡广书, 2003. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社, 363—375.
- 李本才, 刘鸿友, 杜怀旭, 等, 2003. 伊通盆地含油气系统与油气藏. 中国石油勘探, 8(3): 38—44.
- 李献甫, 陈全茂, 张学海, 等, 2002. 伊通地堑——走滑断陷盆地的构造特征及演化. 石油实验地质, 24(1): 19—24.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等, 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174—181.
- 孙晓猛, 龙胜祥, 张梅生, 等, 2006. 佳木斯—伊通断裂带大型逆冲构造带的发现及形成时代. 石油与天然气地质, 27(5): 637—643.
- 万天丰, 1995. 郯庐断裂带的演化与古应力场. 地球科学——中国地质大学学报, 20(5): 526—534.
- 王永春, 2001. 伊通地堑含油气系统与油气藏. 北京: 石油工业出版社, 14—16.
- 杨高印, 1995. 位场数据处理的一项新技术——小子域滤波法. 石油地球物理勘探, 30(2): 240—244.
- 张凤旭, 孟令顺, 张凤琴, 等, 2006. 重力位谱分析及重力异常导数换算新方法——余弦变换. 地球物理学报, 49(1): 244—248.
- 张凤旭, 张凤琴, 孟令顺, 等, 2005. 基于余弦变换的密度界面重力异常正反演研究. 石油地球物理勘探, 45(5): 598—602.
- 张凤旭, 张凤琴, 刘财, 等, 2007a. 断裂构造精细解释技术——三方向小子域滤波. 地球物理学报, 50(5): 1543—1550.
- 张凤旭, 张凤琴, 孟令顺, 等, 2007b. 基于离散余弦变换的磁位谱分析及磁异常导数计算方法. 地球物理学报, 50(1): 297—304.