

文章编号: 0253-3782(2006)06-0603-08

应用布格重力异常研究郯庐断裂构造^{*}

唐新功^{1, 2), *} 陈永顺¹⁾ 唐 哲³⁾

1) 中国北京 100871 北京大学地球物理系

2) 中国湖北荆州 434023 油气资源和勘探技术教育部重点实验室(长江大学)

3) 中国北京 100029 中国地震局地壳运动监测工程研究中心

摘要 使用布格重力资料对郯庐断裂带的中段部分(沂沭断裂带)进行了研究。结果表明, 郯庐断裂带莫霍面及地壳内界面均发生错断, 断裂带两侧地壳各界面起伏平缓。该结果与前人的郯庐断裂带是切穿地壳的深大断裂的认识相一致。在郯庐断裂带两侧, 地壳结构明显不同, 西侧沉积层较薄, 平均在5 km以下; 东侧多数在6 km以上; 在断裂带中央沉积物最薄, 大约为3~4 km。断裂带东侧莫霍面埋深浅, 大约为33~34 km; 西侧莫霍面埋深明显增加, 达到36~38 km。反映了莫霍面深度在断裂带附近整体是向西增加的。郯庐断裂带在重力场分布中则表现为一条宽度较大的线性布格重力异常梯度带。

关键词 郯庐断裂 重力 莫霍面
中图分类号: P312.1 **文献标识码**: A

引言

郯庐断裂带作为我国东部地区一条最重要的构造断裂带之一, 对我国东部区域构造、岩浆活动、矿产分布、地震活动都有重要的控制作用, 多年来一直引起地学工作者的研究兴趣。郯庐断裂带开始活动于中新生代, 其两侧的基底和盖层性质都存在着明显的差异, 从前寒武纪以来一直控制着两侧地块的演化(Okay, Sengor, 1992; Yin, Nie, 1993; Li, 1994; 袁学诚, 1995; 车自成等, 2002)。近几十年来, 在郯庐断裂及有关地区开展了一些深部探测工作, 如航磁、重力、大地电磁测深、深地震测深和地热的研究等, 虽然不是很深入, 但是已经揭示了郯庐断裂带的一些初步的地球物理场特征(国家地震局地质研究所, 1987)。

作为郯庐断裂带的主体部分——郯庐断裂中段(自山东昌邑至江苏嘉山, 长达近500 km)在第四纪以来活断层最发育, 是中国目前主要地震活动区域之一。历史强震($M \geq 6$)也都集中于中段(国家地震局地质研究所, 1987; Lin *et al*, 1998)。近年来, 人们对活断层的研究很重视(张培震等, 2003), 其原因之一是破坏性地震常常伴随活断层而发生。

前人认为郯庐断裂带是中生代华南板块和华北板块碰撞时, 华南板块的北端向北推挤时形成的巨型断层, 是华南板块与华北板块的缝合带(Xu *et al*, 1987; Yin, Nie, 1993), 沿着郯庐断裂带缝合带发生地壳缩短和左旋走滑(Mattauer *et al*, 1985)。满都拉—响水

* 国家自然科学基金杰出青年基金项目(40125011)资助。

2006-03-22 收到初稿, 2006-05-27 决定采用修改稿。

◆ 通讯作者. E-mail: tangxg@yangtzeu.edu.cn

地学断面穿过了临沂以东一带的断裂带, 分析结果表明其两侧地壳结构存在着明显差异(朱光等, 2002)。

冯锐等(1981)的地震面波研究表明, 郊庐断裂带中段所在的华北地区, 莫霍面起伏大, 在30~36 km之间; 岩石圈厚度相对较薄, 在80 km即可见到上地幔低速层的存在。区域重力场资料表明, 穿过郊庐断裂带时, 重力值变化不明显(马杏垣, 1987)。从航磁特征上, 郊庐断裂带表现为以线性剧烈变化的正航磁异常带(-200~300 nT)。穿过郊庐断裂带时往往显示高值, 可能代表了下面有火成岩的侵入(马杏垣, 1987)。地热资料表明, 郊庐断裂带热流值为中间高、两端低的特点。其中, 沂沐断裂带是高热流区(祖金华等, 1996)。

沂沐断裂带是郊庐断裂带中部的主体断裂带, 大致以NE20°的走向纵贯山东全境, 由4条断裂组成(Lin *et al*, 1998; Zhang *et al*, 2003a, b): 从西往东, 分别为鄌郚—葛沟断裂、沂水—汤头断裂、安丘—莒县断裂和昌邑—大店断裂。4条断裂的走向大致平行, 断层面近于陡立(Lin *et al*, 1998)。断裂带某些地段上地幔高导层相对上隆, 导致断裂带引张、下沉和接受沉积, 形成地堑或裂谷(Ma, Wu, 1987), 并且有火山活动(Zhang *et al*, 2003a, b)。

尽管目前已经使用了地球物理学方法和地球化学方法(包括深源包体研究, 见杨晓勇等, 1999文章), 但是人们对于郊庐断裂带及其邻区的深部地球物理场的研究至今仍然没有达成统一的认识(国家地震局地质研究所, 1987)。而且过去研究郊庐断裂带使用的重力资料往往是大范围的区域重力资料, 不能够反映郊庐断裂带深部的详细结构。为了深入了解郊庐断裂的浅层构造与深部构造的关系, 本文将在深地震测深(deep seismic sounding, 简称DSS)资料约束下, 使用重力学方法探讨郊庐断裂带中段的地下构造及其与地震活动性的关系。

1 重力资料

本文使用国家基础地理信息中心数据库的地面实测布格重力资料来反演郊庐断裂带的地壳结构。采用美国的GM-SYS商业软件进行模拟和重力反演。GM-SYS使用的算法是基于Talwani等(1959)的计算二维重磁场的迭代算法, 并利用Won和Bevis(1987)提出的改进算法, 使计算速度提高了一个数量级。

GM-SYS用于计算二维平层的地球模型的重力场响应, 即假设地球在y方向是无限延伸的, 并且沿剖面分别向正负方向延伸3 000 km以消除边界效应。该软件可以进行正演计算, 实时而快速地得到地球模型的重力场响应。由于重

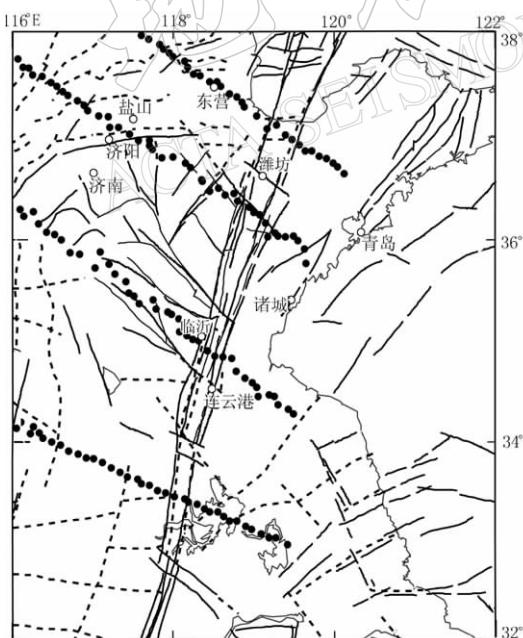


图1 郊庐断裂带中段及重力测线分布图。黑圆点为重力测点, 实线和虚线分别表示已知和隐伏断层

力方程通常是非线性的, 正演计算中使用线性方程来近似, 该软件使用马夸特法进行反演。

我们选择了4条跨过郯庐断裂带中段的重力测线(图1), 这4条测线横切了郯庐断裂带中段的4个不同部位, 其中3条与华北地区深地震测深测线Ⅲ线(海兴—丰镇)、Ⅳ线(诸城—托克托)、H-19线(泰安—隆尧—忻县)(国家地震局《深部物探成果》编写组, 1986)基本一致。这4条测线走向均为SE—NW, 从上至下依次为1~4号线。计算中沿断裂带分别向两侧延伸了50~100 km, 以减小边界效应。

据20世纪80年代的地震和重力资料(冯锐等, 1981, 1989), 华北板块的地壳结构主要分为4层, 各层密度分别为: 沉积层 2.30 g/cm^3 , 上地壳 2.67 g/cm^3 , 中地壳 2.80 g/cm^3 , 下地壳 2.90 g/cm^3 , 上地幔 3.30 g/cm^3 。本文将以此为分层原则, 并且对各层密度采用冯锐等(1981, 1989)给出的资料。在此初始模型基础上, 通过反复修改地质模型, 实现与观测重力异常值的拟合, 来获得测点处地壳构造的最佳密度分布特征。

2 重力结果及分析

各地层密度的取值见4条测线的模拟结果(图2~图5)。对于1号线, 选取了过郯庐断裂长约300 km的一段重力测线进行研究(图1)。断裂带位于山东昌邑附近, 东起下营, 西至羊角沟, 宽约37 km, 过郯庐断裂带共有5个重力测点(图2a)。在DSS剖面等资料约束下, 反演得到了断裂及周围地区的重力剖面界面深度分布图(图2b)。图2a示出计算的重力异常值与观测值吻合较好, 拟合误差(表1)非常小, 均小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。图中水平箭头指示为断裂带位置(宽度), 垂直箭头指示为断裂带在对应于重力异常曲线上的位置, 黑粗线为模型计算得到的重力异常值, 黑点为实测点的重力异常值。4条线的拟合误差见表1。

表1 沿4条重力测线的拟合标准误差

编号	拟合标准差	平均拟合标准差
1号线	0.447519	
2号线	0.065421	0.14656125
3号线	0.014329	
4号线	0.059187	

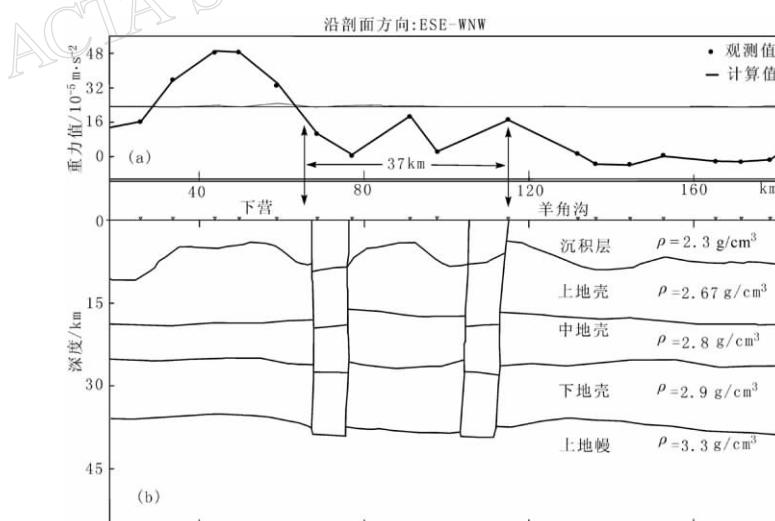


图2 1号线地壳结构模拟结果

(a) 计算重力值与观测重力值的拟合; (b) 重力剖面深度分布图

从图2可以看出,反演结果显示了该段测线在郯庐断裂带上东西两侧区域布格重力异常场差异比较明显。断裂带东南侧具有一个显著的正异常,而西北侧均处于负异常区。其最东段地处山东半岛山地边缘,布格异常有下降的趋势。重力测线在跨过郯庐断裂带时表现为锯齿状的急剧变化,这种局部的变化可能反映了断裂带上基底面的断裂或破碎现象,也可能反映了重力观测点不够密集。

2号线选择了济阳—诸城一段的重力资料进行研究。断裂带东起汪湖,西至马站,宽约44 km,共有5个测点穿过断裂带(图1)。反演结果如图3b所示,图中含义与图2相同。

从图3a,b可以看出,在郯庐断裂带两侧布格异常总体的差异亦然存在。其东南侧为正异常,西北侧为负异常。与1号线不同的是这里断裂带处的重力异常值明显偏高,接近 $20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。这一现象可能反映了断裂带在该处已经深切至上地幔,并且造成了深部高密度地幔物质沿着深大断裂的上涌,导致了该断裂带处较高的布格异常值。莫霍面深度在断裂带东侧沿海地区稍浅,约为33~35 km;而到西侧的鲁西隆起地区莫霍面深度则达到了38~40 km。在断裂带下约36~37 km,即地壳厚度由东向西总体表现为逐渐增加的过程,并非在郯庐断裂带上是个地壳厚度的突变带,郝天珧等(1997)的观点也证明了这一点。

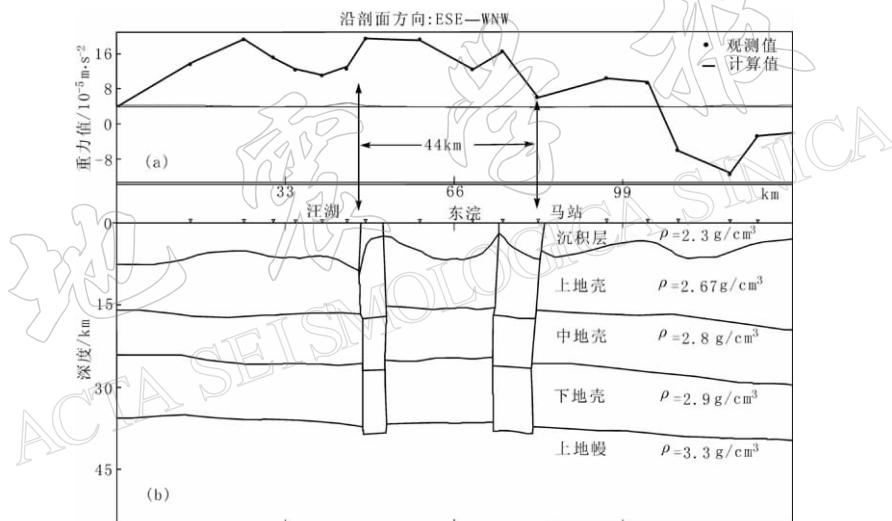


图3 2号线地壳结构模拟结果
(a) 计算重力值与观测重力值的拟合; (b) 重力剖面深度分布图

3号线的重力数据主要集中在临沂左右各150 km的测线上(图1)。断裂带东起临沭西至临沂,共有5个观测点穿过(图4a),宽约29 km,反演结果如图4b所示。

从图4可以看出,3号线在断裂带东侧地形为沿海平原,布格异常表现为起伏不大的正异常带,总体在 $20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 附近变化。断裂带西侧进入鲁西隆起区,布格异常下降为负异常。断裂带表现为更加清晰的布格异常高值,其位置与断裂带的宽度非常吻合。反演结果显示断裂带深切穿至上地幔,导致了地幔高密度物质上涌,造成了在该处的高布格重力异常。莫霍面和地壳各层起伏不大,在断裂带东侧沿海地区莫霍面稍浅,深度约为33~34 km,而西侧则为37~38 km,断裂带下约为36~37 km。

4号线大致在宿迁以南切过郯庐断裂,该处断裂带东起双沟,西至双庙,共有5个测

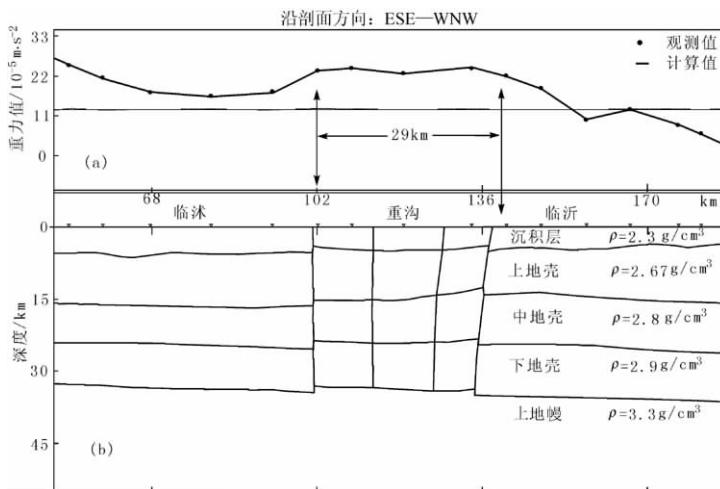


图 4 3 号线地壳结构模拟结果

(a) 计算重力值与观测重力值的拟合; (b) 重力剖面深度分布图

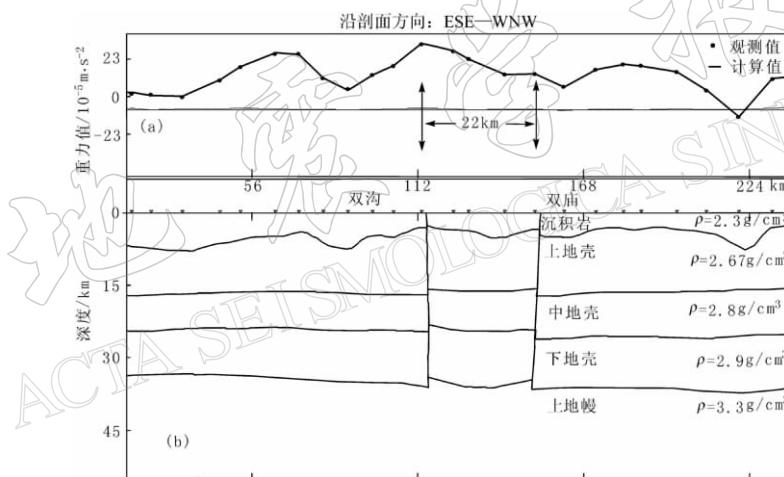


图 5 4 号线地壳结构模拟结果图

(a) 计算重力值与观测重力值的拟合; (b) 重力剖面深度分布图

点穿过, 其宽度变窄, 约 22 km. 反演结果如图 5b 所示.

从图 1 可以看出, 4 号线所在位置属于郯庐断裂带南段, 其布格重力异常没有特别的异常显示(图 5a), 表明了其断裂规模已经大大减小. 资料显示该段主要由两条主断裂组成, 断裂带具有逆断层性质(国家地震局地质研究所, 1987). 东段为淮北平原, 布格重力异常总体表现为平缓的正异常, 平均约为 $16 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. 该段上重力异常与前面几条线开始不同, 布格异常值中间高、两端低. 断裂带在重力场上表现也不突出, 与两侧地区差异不大, 但是反演得到的莫霍面西深东浅的现象仍然存在. 由于该段地处平原, 沉积层较厚, 平均厚度达到 5 km 以上. 这种宽缓的重力变化主要反映了基底面和莫霍面从东到西的缓慢变化.

3 讨论和结论

使用实测重力资料对郯庐断裂带中段进行了重力学研究, 综合上述 4 条测线的模拟结果, 可以看出郯庐断裂带中段具有以下几个特点:

1) 布格重力异常在 4 条测线上稍有不同, 但是其变化规律基本是相同的, 重力异常总体是断裂带东侧为重力高区, 而西侧为重力低区, 郯庐断裂带则处于这两个区域之间重力变化过渡带上. 在对应于鲁西隆起的泰山地区(4 号线), 莫霍面是本研究区最深的, 等值线中心的值达 39 km.

2) 虽然郯庐断裂带处在重力高和低的过渡地带, 但沿断裂带横向的重力异常的变化幅度却很小, 一般只有十几 10^{-5} m/s^2 , 这也反映了断裂带主要以平移活动为主, 垂直错动很小, 即具有大型走滑断层的性质.

3) 在本研究区的中段位置(2, 3 号线), 均显示出郯庐断裂带上的重力异常较两侧地区偏高, 这一现象可能代表了在该地段断裂带下高密度上地幔物质有略微上隆的现象.

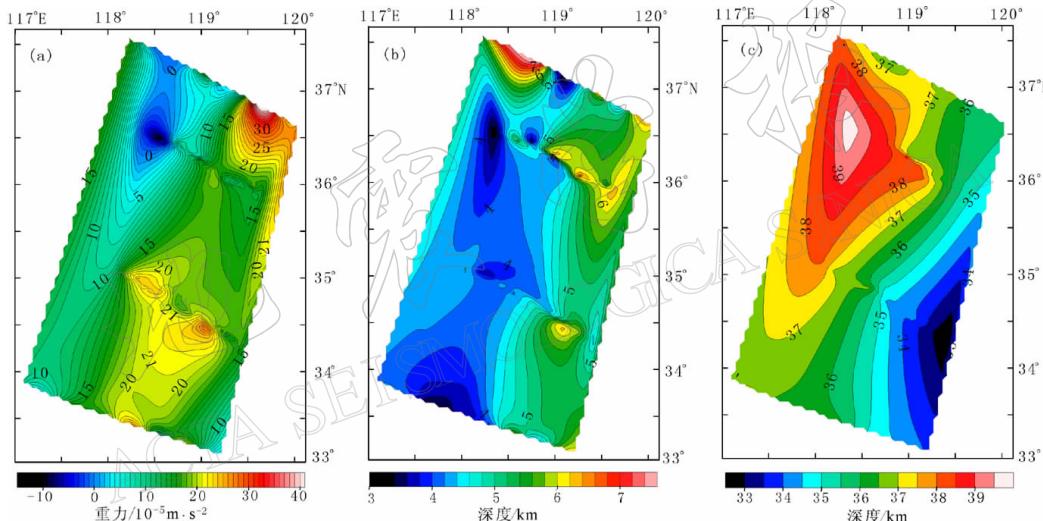


图 6 郯庐断裂带及其附近布格重力异常(a)、基底深度(b)和莫霍面深度(c)等值线图

图 6 给出了郯庐断裂带中段及邻区布格重力异常、基底深度和莫霍面的等值线图. 从图中可以看出, 在郯庐断裂带两侧地壳结构不同, 东面莫霍面埋深浅, 大约 33~34 km; 西侧莫霍面埋深明显增加, 达到 35~38 km. 在对应鲁西隆起处, 莫霍面深达 39 km 左右. 郯庐断裂带西侧的沉积层较薄, 平均在 5 km 以下, 而东侧多数在 6 km 以上, 在断裂带上方最浅, 仅为 3~4 km. 大地电磁测深(顾群等, 1980)和热流值测量(祖金华等, 1996; 白嘉启等, 1998; 何丽娟等, 2001, 车自成等, 2002)的结果以及在沿郯庐断裂带发现火山岩(从柏林等, 1977; 杨晓勇等, 1999)的现象都表明, 在郯庐断裂带内上地幔上涌, 地壳变薄, 但从重力资料上看, 并不是在郯庐断裂带所有地方都能够看到地壳明显减薄的迹象. 另外, 地震测深资料也没有显示断裂带内有地壳减薄的现象(国家地震局地质研究所, 1987). 由于郯庐断裂带在重力剖面上显示为重力梯度带的变化, 表明郯庐断裂带是一条以走滑为主的断层.

在郯庐断裂带中段的北部, 地壳深断裂与地表断裂一样, 主要由4条断裂面组成 (Zhang *et al.*, 2003a, b), 且都切穿了莫霍面。从图6还可以看出, 郊庐断裂带基本上沿36 km和37 km的地壳等厚线展布, 而这两条地壳等厚线在宿迁附近向蚌埠方向延伸, 然后转向嘉山, 再转向庐江方向。综上所述, 郊庐断裂带作为一条地质构造带是十分明显的, 它在重力场分布中表现为一条宽度较大的线性布格重力异常梯度带。

参 考 文 献

- 白嘉启, 王小凤, 冯向阳。1998. 郊庐断裂带地温场研究[J]. 地质力学学报, **4**(1): 78~88
- 车自成, 刘良, 罗金海。2002. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京: 科学出版社, 302~305
- 从柏林, 章雯华, 郑学正。1977. 我国东部中生代火山岩岩浆学及其地质意义[J]. 中国科学, (3): 245~259
- 冯锐, 朱介寿, 丁韫玉, 等。1981. 利用地震面波研究中国地壳结构[J]. 地震学报, **3**(4): 335~350
- 冯锐, 郑书真, 黄桂芳, 等。1989. 华北地区重力场预沉积层构造[J]. 地球物理学报, **32**(4): 385~398
- 顾群, 孙洁, 史书林, 等。1980. 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层[J]. 地震地质, **2**(2): 21~29
- 国家地震局《深部物探成果》编写组。1986. 中国地壳上地幔地球物理探测成果[M]. 北京: 地震出版社, 407
- 国家地震局地质研究所。1987. 郊庐断裂[M]. 北京: 地震出版社, 254
- 郝天珧, 刘伊克, 段昶。1997. 中国东部及其邻域地区地球物理场特征与大地构造意义[J]. 地球物理学报, **40**(5): 677~690
- 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸。2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征[J]. 自然科学进展, **11**(9): 966~969
- 马杏垣。1987. 中国岩石圈动力学纲要说明书[M]. 北京: 地质出版社, 76
- 杨晓勇, 刘德良, 陶士振。1999. 中国东部典型地幔岩中包裹体成分研究及意义[J]. 石油学报, **20**(1): 19~23
- 袁学诚。1995. 论中国大陆基底构造[J]. 地球物理学报, **38**(4): 448~459
- 张培震, 闵伟, 邓起东, 等。2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学(D辑), **33**(8): 705~713
- 朱光, 宋传中, 牛漫兰, 等。2002. 郊庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析[J]. 高校地质学报, **8**(3): 36~49
- 祖金华, 汪集旸, 吴乾番, 等。1996. 郊庐断裂带中段及其邻区的地热研究[J]. 中国地震, **12**(1): 43~48
- Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, *et al.* 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data[J]. *J Geophys Res*, **104**: 15 365~15 390
- Li Z X. 1994. Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of Tanlu fault[J]. *Geology*, **22**: 739~742
- Lin A, Miyata T, Wan T F. 1998. Tectonic characteristics of the entral segment of the Tancheng-Lujiang fault zone, Shangdong eninsula, eastern China[J]. *Tectonophysics*, **293**: 85~104
- Ma X Y, Wu D N. 1987. Cenozoic extensional tectonics in China[J]. *Tectonophysics*, **133**: 243~255
- Mattauer M, Matte P M, Tapponnier P, *et al.* 1985. Tectonics of the Qinling belts: Build-up and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, **317**: 496~500
- Okay A I, Sengor A M. 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China[J]. *Geology*, **20**: 411~414
- Talwani M, Sutton G H, Worzel J L. 1959. A crustal section across the Puerto Rico trench[J]. *J Geophys Res*, **64**(10): 1 545~1 555
- Won I J, Bevis M. 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines[J]. *Geophysics*, **52**(2): 232~238
- Xu J W, Zhu G, Tong W X, *et al.* 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench faults: a major shear system to the northwest of the Pacific ocean[J]. *Tectonophysics*, **134**: 273~310
- Yin A, Nie S. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia[J]. *Tectonics*, **12**(4): 801~813
- Zhang Y Q, Ma Y, Yang N, *et al.* 2003a. Cenozoic extensional stress evolution in North China[J]. *J Geodynamics*, **36**: 591~613

Zhang Y Q, Dong S, Shi W. 2003b. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. *Tectonophysics*, **363**(3): 243~258

BOUGUER GRAVITY STUDY OF MIDDLE SECTION OF TANLU FAULT

Tang Xingong^{1, 2)} Chen Yongshun¹⁾ Tang Zhe³⁾

1) Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

2) Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, China

3) Crust Movement Monitoring Engineering and Research Center, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: Although the Tanlu fault is one of the most important tectonic fault zones and active earthquake belts in eastern China, little is known about its deep structure. In this study, we use the existing Bouguer gravity data to study the middle section of the Tanlu fault zone, which is also known as the Yishu fault zone. Our gravity inversion results indicate that the Moho has an abrupt offset in depth at the Tanlu fault zone and it has a relatively smooth variation away from the fault zone. The crustal structures on both sides are different from each other. Sediment is thin on the west side with an average thickness of less than 5 km, while it is as thick as 6 km on the east side. The thinnest sediment (3~4 km) is at the fault zone. Moho depth increases from 33 to 34 km on east side and from 36 to 38 km on the west side. The Tanlu fault zone shows as a wide zone of linear gradient in the Bouguer gravity anomaly.

Key words: Tanlu fault; gravity; Moho discontinuity