www.cagsbuiletin.com www.地球学报.com

利用遥感、重力多源信息研究郯-庐断裂带 苏-鲁段构造特征

姜文亮¹⁾,张景发¹⁾,陈 丁²⁾,路晓翠²⁾,张 鹏³⁾,李丽梅³⁾

1)中国地震局地壳应力研究所,北京 100085;
 2)山东科技大学,山东青岛 266003;
 3)江苏省地震局,江苏南京 210014

摘 要:本文利用遥感与重力多源信息对郑庐断裂带苏鲁段构造特征进行了研究。应用构造地貌学方法分析 了断裂带晚第四纪构造活动及地貌特征;基于 Parker 界面反演法,利用变密度模型计算了莫霍面深度;随后 采用小波多尺度分析方法对局部重力场进行分离,进而分析研究了苏鲁段地壳密度非均匀性及深部地壳结 构。沿苏鲁段断裂带发育的水系错断、断层陡坎、地层错断、线性构造等构造地貌特征、表明了断裂带在晚 第四纪经历了明显的右旋逆冲走滑运动。通过对布格重力场的反演分析可知,郯庐断裂带苏鲁段底部莫霍面 深度差异比较大,断裂带错断了莫霍面,在临沭及泗洪地区存在强烈的莫霍面隆起与沿断裂带的上地幔与 软流层高密度物质上涌现像,西侧莫霍面深度最大达到 35 km。苏鲁段断裂带被数条 NW 向断裂错断,在地 表与深部都具有很明显的地质地貌与地球物理场特征。该区地壳介质密度具有显著的非均匀性特征,在中上 地壳部位最明显,上地壳断裂带产生的布格重力异常与地表地形及地质地貌特征具有很大的相关性。 关键词: 郯庐断裂带苏鲁段;构造地貌学;变密度模型;小波多尺度分析;深部构造特征 中图分类号:P627;P631.1 文献标志码:A doi: 10.3975/cagsb.2011.02.02

Tectonic Characteristics of Su-Lu Segment of the Tan-Lu Fault Zone Derived from RS and Gravity Multi-source Information

JIANG Wen-liang¹⁾, ZHANG Jing-fa¹⁾, CHEN Ding²⁾, LU Xiao-cui²⁾, ZHANG Peng³⁾, LI Li-mei³⁾

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration (CEA), Beijing 100085;
 Technique and Science University of Shandong, Qingdao, Shandong 252600;
 Jiangsu seismological bureaui, Nanjing, Jiangsu 210014

Abstract: Tectonic characteristics of Su-Lu segment of the Tan-Lu fault zone were studied in this paper. The method of tectonic geomorphology was used to study tectonic activity and geomorphological features of Su-Lu segment in late Quaternary. Moho depths were inversed using the variable density model. Meanwhile, wavelet multi-scale analytical method was applied to separating gravity fields, and the approximate depth of the field source was calculated by using the power spectrum analytical method. Then inhomogeneous features of crust density along Su-Lu segment were analyzed, and deep tectonic characteristics were studied. Geomorphological features, such as offset streams, fault scarps and linear tectonics, are developed along Su-Lu segment. These phenomena indicate that the Tan-Lu fault zone experienced strong right-lateral strike-slip movement in Late Quaternary. According to the Bouguer gravity field features, Moho depths undulate greatly, and Su-Lu segment cuts through the lithosphere. The uplift of the Moho occurs obviously beneath Linshu and Sihong areas, and the upwelling of high density materials of the upper mantle and asthenosphere occurs along the fault. On the west side of the fault, Moho depths reach 35 km. Su-Lu segment intersects other NW-striking faults. Geological and

收稿日期: 2011-01-21; 改回日期: 2011-03-16。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介:姜文亮,男,1982 生。助理研究员。主要从事遥感、重磁多源信息技术地学应用研究。E-mail:jiang_wenliang@163.com。

本文由中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(编号: ZDJ2007-1、ZDJ2010-11)和徐州市新城区、开发区 活断层探测与地震危险性评价项目联合资助。

geophysical characteristics are clear. The density structure displays inhomogenous features laterally along the fault. The Bouguer gravity anomalies produced by the upper crust are correlated with the surface geology and topographic features.

Key words: Su-Lu segment of Tan-Lu fault zone; tectonic geomorphology; variable density model; wavelet multi-scale analysis; deep structure

地震的发生与活动断层的分布有密切的关系, 对活动断层开展深入的研究工作,确定其在地表的 分布形态及晚第四纪的活动特征,掌握其在地壳深 部的发育特征,对地震研究工作具有非常重要的意 义。遥感技术的快速发展,为活动断层的地表调查 提供了新的技术手段,通过对断层所控制的晚第四 纪地形地貌的研究,可以对断层活动性产生新的认 识。而作为地质与地球物理学研究的传统方法,重 力学为研究地壳深部构造特征提供了技术手段。重 力资料能相对直观地从平面上反映地质体分布、断 裂构造的展布、深部构造以及基底坳隆特征等信息, 同时重力异常还包含着深度较大、分布较广的场源 信息。有效的位场分离方法可以帮助解释者从不同 角度认识重力异常特征,解释断裂。

然而,由于地学信息普遍存在模糊性、多解性 和不确定性,传统的单一技术方法无法全面真实地 揭示活动断层在地壳空间的发育特征,于是,人们 越来越重视多源地学信息的综合分析,其优点在于 充分利用各种资料,对所关注的问题进行多角度、 多层次的研究,揭示不同信息之间的相关性,克服 依靠单一数据资料解释引起的片面性,获取一些常 规方法无法获取的有用信息。因此,为了准确地把 握活动断层的几何形态与分布特征,在对断层进行 研究时,将遥感和重力技术充分结合在一起,将不 同技术方法获得的信息进行对比,联合解译,这可 以实现对活动断层的多角度、多层次的分析。

NNE向的郯庐断裂带是中国大陆东部一条巨大的构造带,自 1957 年航磁大调查中被发现以来,已 经有了四十余年的研究历史。在平面展布特征上, 郯庐断裂带表现为明显的分段性,许多学者针对郯 庐断裂带的分段特征,先后利用多种技术手段,开 展过深入的研究工作(郑朗荪等,1988;李家灵等, 1994a;施炜等,2003;张鹏等,2007)。本文所要研究 的范围位于郯庐断裂带的苏鲁段,其中山东段是郯 庐断裂带上活动性比较强的部位。尽管许多学者使 用了地球物理方法对苏鲁段开展过深入的研究(马 杏垣,1987;杜晓娟等,2005;唐新功等,2006),然 而由于数据比例尺比较小,所利用的位场分离方法 也比较传统,不能够完全反映郯庐断裂带深部的详 细结构,在对郑庐断裂带的研究方面,重力技术的 应用还具有很大的潜力可以发挥。因此,为深入了 解郑庐断裂的浅层构造及深部构造的关系,本文将 利用 15 m 分辨率的遥感影像与数据采样间隔为 2 km 的地面重力数据,应用构造地貌学法与重力位 场分离方法,对郑庐断裂带苏鲁段的地表与深部构 造特征进行研究。

1 断层研究多源信息提取技术介绍

利用遥感与重力多源信息进行活动断层的研究, 工作开展的深入程度除与所使用的数据分辨率及比 例尺有关外,还取决于所采用的数据处理分析方 法。在对郯庐断裂带的地表形态研究方面,我们将 构造地貌学方法与高分辨率遥感技术相结合,提取 第四纪活动特征有关的信息,对断层活动性进行研 究。在重力位场分离方面,不再基于传统的数据处 理分析方法,将充分应用小波多尺度分解与功率谱 分析方法,对断层的深部构造特征进行分析,并利 用变密度模型对莫霍面深度进行反演分析。

1.1 遥感断层构造信息提取

遥感技术为活动断层调查提供了快速有效的手 段,将遥感技术与构造地貌学方法相结合,可以对 断层第四纪以来的构造特征进行研究,从而对断层 活动性进行定性与定量分析。活动断裂通常控制了 第四纪地形地貌的发展,在地表留下比较直观的断 层活动证据。地形不仅可以指示断层的位置,也可 以记录断层位移的方向和位移量(江娃利,2008)。在 地貌特征方面,活动断层也具有比较明显的控制作 用,沿断裂带通常发育断层陡坎、洪积扇、阶地、 拉分盆地以及错断水系等构造地貌现象,这些地貌 单元对研究断层活动性具有很好的指示意义。通过 利用高分辨率遥感影像,可以对这些地貌单元进行 比较详细的判读,从而对断层第四纪活动特征进行 研究。

1.2 位场分离方法

重力场包含了岩石圈不同层次的场源信息,深 部场和浅部场信息叠加在一起,区域场和局部场信 息叠加在一起,因此在利用重力数据研究构造特征 时,需要采用合适有效的数据处理方法,进行重力 场异常信息的分离,提取出与研究对象相关的信息 部分,进而对场源所引起的局部场异常进行分析研 究,这是利用重力资料进行地质体反演和解释的关 键步骤(曾华霖,2005;刁博等,2007)。

近年来发展起来的小波分析方法,已经广泛地 应用于地球物理信号处理领域,许多学者已做过很 多有意义的探索和研究。侯遵泽、杨文采最初利用 小波多尺度分析对中国大陆布格重力异常进行了解 析,并取得了较好效果(侯遵泽等,1997);杨文采等 将小波分析应用于重力异常的分离和处理,为重力 异常的分离提出了新的途径(杨文采等,2001)。小波 多尺度分解方法能将信号分解成交织在一起的多种 尺度成分,并采用相应大小的空间域取样步长,获 得研究对象的不同细节,从而达到场分离的目的。 许多学者也应用小波方法开展了深入研究工作,证 明了该方法可以有效分解和重构三维地质体产生的 重力异常现象(陈冰,2004; 汪海洪,2005; 姜文亮等, 2010)。

经过小波多尺度分解,可以得到不同阶次的小 波变换逼近图像与小波变换细节图像。小波变换逼 近图像是对区域场布格重力异常信息的反映,主要 体现了深部场源所引起的较大规模的低频异常信息; 而小波变换细节图像是对局部场布格重力异常信息; 的反映,主要体现了浅部场源体引起的较小规模的 高频异常信息。目前人们知道小波多尺度分解的阶 数愈大,反映的场源深度愈深,至于各阶异常所对 应的具体场源深度尚不得而知。功率谱是 20 世纪 70 年代发展起来的一种重磁场解析处理方法 (Cianciare et al., 1976),在满足一定假设条件的前提 下,场源深度与功率谱之间存在一定的相关关系, 从而可以由功率谱曲线的斜率计算出相应场源的平 均埋深。根据此理论,可以计算小波变换图像所反 映的近似场源深度。

2 构造地貌特征分析

本文所研究部分位于郯庐断裂带的中段上,自 山东沂水县向南,过临沂、宿迁、泗洪,到嘉山。许 多学者对郯庐断裂带中段做了大量深入的研究.T.作, 包括断层几何结构、活动方式与地球物理场特征等。

苏鲁段郑庐断裂带整体呈 NNE 方向展布,具有 比较明显的线性构造特征。沿断裂带发育的错断水 系、冲沟、断层陡坎、构造线等构造地貌都比较清 晰地反映了断裂带的最新活动特征,其中沿山东段 的地貌遥感影像特征最清晰,反映了沂沭断裂带在 晚更新世以来的最新活动特征。 对于郑庐断裂带中段在更新世以来的活动方式, 前人也开展了许多研究工作。新生代以来的沂沐断 裂带,已经转化为一条右旋逆走滑性质的构造带(方 仲景等,1976;国家地震局地质研究所,1987;李家 灵等,1994b),晚更新世晚期以来,断裂带新活动主 要表现在安丘 - 莒县断裂上,它由多个独立的破裂 段组成,1668年郯城8.5级地震就发生在该断裂的中 段(方仲景等,1976;国家地震局地质研究所,1987; 高维明等,1988;李家灵等,1994a,b;晁洪太等, 1994a,b)。其他学者也对沂沐断裂带的安丘 - 莒县 断裂进行了研究,证实了断裂具有晚更新世晚期至 全新世早期的活动特征(江娃利等,1994;郭芳等, 1999; 王志才等,2005)。

2.1 山东段构造地貌特征分析

在山东境内, 郯庐断裂带主要由昌邑 - 大店断 裂、白芬子 - 浮来山断裂、沂水 - 汤头断裂、鄌郚-葛沟断裂 4 条近于平行的断裂组成,构成了郯庐断 裂带中段"两堑夹一垒"的结构。新生代以来裂谷 构造遭受挤压逐渐消亡,裂谷中的中生代地层强烈 褶皱隆起,从而转化为一挤压性质的右旋走滑构造 带,并产生了一条新的断裂,安丘 - 莒县断裂(李家 灵等,1989; 晁洪太等,1992)。

在山东段, 郑庐断裂带在莒南以北至安丘, 表 现出两堑加一垒的地貌特征, 在遥感图像上形成了 十分显著的线性构造特征, 并控制了沂河和沭河的 发育。根据各条断裂所表现出的影像特征, 可以发 现各断裂并不是一条连续的断裂带, 而是有许多不 同长度的次级断裂呈雁行状斜列组成。沿断裂带, 水平错断水系、洪积扇等一系列反映断裂走滑特征 的地貌现象非常发育。其中沂水 – 汤头与白芬子 – 浮莱山断裂对水系的影响作用最明显, 河流出现多 处右旋走滑错断(图)与冲沟现象。沿沂水 – 汤头断裂 的水系位错断距最大达到 1.5 km, 沿白芬子 – 浮来 山断裂的水系位错断距最大达到 1.8 km, 反映了晚 第四纪以来郑庐断裂带的右旋走滑活动特征。

安丘 - 莒南断裂是一条新生的构造带,是郯庐 断裂带中段晚更新世以来活动的最新证据(李家灵 等,1989; 晁洪太等,1992),断裂形成的构造地貌非 常发育。在遥感影像中,沿断裂可以发现水系断错、 冲沟、断层陡坎、地层断错、小型洪积扇、线性构 造等一系列构造地貌现象。郯城麦坡附近,断裂带 断错地层及断层陡坎现象在遥感影像中十分清晰, 长约 15 km。通过对该区域野外调查可知,断裂的 NE盘白垩系王氏组紫红色砂岩逆冲到SW盘上新世 红色粘土地层之上,造成地层的断错,并形成断层

145



图 1 郯庐断裂带水系位错图 Fig. 1 Offset streams along the Tan-Lu fault zone

a 图中沿沂水 - 汤头断裂的水系位错断距最大达到 1.5 km; b 图中沿白芬子 - 浮来山断裂的水系位错断距最大达到 1.8 km Offset of the stream along Yishui-Tangtou fault in a is about 1.5 km; Offset of the stream along Baifenzi-Fulaishan fault in b is about 1.8 km



图 2 麦坡断层陡坎 Fig. 2 Fault scarp along the Tan-Lu fault zone a 图为郯庐断裂带麦坡断层陡坎影像; b 图为野外观测到的陡坎地貌、镜向 S a shows fault scarp image of Maipo fault along the Tan-Lu fault zone; b shows fault scarp field photo, image towards the south

陡坎,以及跌水与冲沟现象,安丘-莒南断裂表现 为明显的右旋逆冲走滑运动,对于麦坡地震陡坎是 否为1668年郯城8.0级地震所致,目前仍存在争议。 山东境内在郯庐断裂带基础上,发育了多条 NW 向断裂, 从南至北由铜冶店-孙祖断裂、新泰-蒙 阴断裂、蒙山山前断裂与苍尼断裂, 在它们的共同 作用下郯庐断裂带呈斜列式展布, 这些断裂的生成 发育与沂沭断裂带有着密切关系。四条 NW 向断裂 对地形地貌具有很明显的控制作用, 控制了水系的 发育, 形成了冲沟、断错地貌、断层三角面等构造 地貌, 在遥感影像中具有清晰的反映, 反映了 NW 向断层晚第四纪以来的强烈活动性。这四条 NW 向 断裂的最新活动时期主要在晚更新世末 - 全新世初, 与沂沭带最新强烈活动时段相一致, 这表明鲁中地 区甚至更大范围内晚更新世 - 全新世初是地壳断裂 活动的重要阶段(晁洪太等, 1992)。

2.2 江苏段构造地貌特征分析

郑庐断裂带的江苏段也是由一系列近乎平行的 断裂组成,自西而东有纪集-王集断裂、墨河-凌 城断裂、新沂-新店断裂、马陵山-重岗山断裂、 山左口-泗洪断裂,这些断裂组成了琴键式构造。

江苏段郯庐断裂带是山东沂沭断裂带的南延, 从新沂向南,但两堑加一垒的构造地貌格局不复存 在,遥感影像特征断断续续,仅断裂带东侧的北段 影像较明显,南段较模糊,地表出露的构造地貌现 象比较弱,总体表现不如山东段清晰,现代水系及 地貌可以反映出断裂带的总轮廓。马陵山-重岗山 断裂为新生代以来产生的比较新的断裂(李起彤等, 1994; 晁洪太等,1994a),是江苏段最新活动的断裂, 在马陵山与南部重岗山可看到明显的构造地貌特 征。马陵山-重岗山断裂控制了马陵山东部边界, 沿断裂分布有串珠状水洼,野外调查中在马陵山东 侧发现了断层破碎带。

3 重力场分离分析

有关郯庐断裂带中段地球物理场特征,前人也 利用多种方法对此带开展了许多研究工作。冯锐等 (1981)的地震面波研究表明,郯庐断裂带中段所在 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,穿过郯庐断裂带 时,重力值变化不明显(马杏垣,1987)。唐新功等 (2006)利用布格重力资料对沂沭段断裂带进行了研 究,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,莫霍面深度 在断裂带附近整体是向西增加的。

本文首先在深地震测深资料的约束下,利用重 力数据对苏鲁段断裂带两侧莫霍面埋深进行计算。 随后采用小波多尺度分解方法,对区域及局部重力 场特征进行反演,研究深部地壳结构特征。研究中 对布格重力数据进行多阶次的小波多尺度分解,直 到分解得到的逼近图像中不再包含局部高频重力异 常信息。由于分解后得到的五阶逼近图像不再包含 小尺度的局部信息,因此能够反映莫霍面起伏产生 的区域重力异常,而与此对应的同阶次细节图像则 基本反映出下地壳底部至上地幔场源产生的重力异 常。之后,利用对数功率谱方法计算细节图近似场 源深度信息(表 1)。根据郯庐断裂带中段莫霍面起伏 在 34~35 km之间(唐新功等,2006),可知1~2 阶小 波细节图像反映了上地壳布格重力场异常特征,3 阶 小波细节图像反映了下地壳布格重力异常特征,5 阶 小波细节图像反映了下地壳底部至上地幔顶部布格 重力异常特征。

3.1 莫霍面反演分析

本文利用 Parker 密度界面反演法(Parker, 1973) 对莫霍面深度进行计算,该方法要求反演界面平均 深度值与界面上下密度差值,因此以深地震测深资 料作为约束条件(表 2)。以往该区利用重力资料对莫 霍面的反演均基于壳幔密度差为一常数,然而实际 中密度是随深度变化的,壳幔密度差也是变化的, 因此本文采用密度随深度呈指数变化的变密度模型 来反演莫霍面深度。假定地壳表层与地幔的密度差 为Δρ₀,壳幔密度差指数模型为:

$$\Delta \rho(Z) = \Delta \rho_0 e^{-\mu Z}$$

式中µ为变密度因子,Z为深度。

文中利用密度与 P 波速度的经验公式 $\rho = 0.77 + 0.32V_{p}$ (Berteussen, 1977)计算出不同

表1 各阶小波变换所反映的场源深度

Table 1 Depth reflected	by each wavelet transform
	近似场源深度 (km)
1 阶细节图像	3
2 阶细节图像	6
3 阶细节图像	12
4 阶细节图像	24
5 阶细节图像	38

表 2 地壳厚度、P 波速度、密度列表

Table 2	I mekness, I -wave velocity, density list		
	厚度 (km)	V _P (km/s)	密度 (g/cm ³)
沉积层	0.7~2.2	3.0~4.2	1.73~2.11
上地壳	10~13	5.9~6.0	2.66~2.69
中地壳	13~18	6.3	2.79
下地壳	5~8	6.8	2.95
上地幔顶部	-	8.0	3.33

层次的地壳密度(表 2)。以地震测深资料作为约束条件、计算得到该区最佳变密度因子为 0.035。

通过对布格重力数据进行上延 20 km 处理,得 到的布格重力异常图中基本去除了局部重力异常的 影响,根据对数功率谱计算,其反应的近似场源深 度约为 34 km,基本反映了莫霍面及上地幔引起的 布格重力异常,因此可以用来反演莫霍面深度图。 利用 Parker 密度界面反演计算得到了该区域莫霍面 深度图(图 3)。

对莫霍面深度图进行分析可知,在横向上莫霍 面深度有明显差异,地壳由西向东逐渐减薄,莫霍 面从东到西逐渐加深,并形成了一条 NNE 向展布的 过渡带呈舒缓波状延伸。沿断裂带,临沭和泗洪两 个地区存在莫霍面严重上隆现象,莫霍面深度约为 31 km;在郯庐断裂带西侧存在两个沉降中心,莫霍 面深度最大达到 35 km,其中北部的沉降中心位于 沂南 – 费县西侧,在地貌上该区为鲁中南隆起区, 该沉降中心为重力均衡调整作用所致。另一个比较 大的沉降中心位于五河附近,在地质单元上为阜阳



图 3 苏鲁段断裂带莫霍面深度图 Fig. 3 Depth of Moho along Su-Lu segment of Tan-Lu fault zone

- 固镇凹陷的东段。

3.2 区域场分析

在布格重力原平面图中, 郯庐断裂带中段表现 为一条 NNE 向延伸的重力梯级带, 东侧为布格重力 高异常,最高布格重力值达到25 mGal,西侧为布格 重力低异常,最低重力异常值为-15 mGal,反映了 郯庐断裂带两侧的区域重力场分布特征,也说明了 郑庐断裂带东侧莫霍面埋深小于西侧。在布格重力 异常小波多尺度分析逼近图中,由郯庐断裂带产生 的 NNE 向的重力梯度带也十分明显, 随着场源深度 的增加,沿布格重力异常具有一定的变化特征。在 1~3 阶小波逼近图中, 断裂带产生的重力梯度带呈 舒缓波状延伸、并形成了两个条带状布格重力高异 常圈闭现象,分别分布在临沭和泗洪地区,圈闭长 轴沿 NNE 方向展布, 与郯庐断裂带走向一致。在 4 阶逼近图中, 以临沭为中心的重力高异常圈闭现象 增大, 重力梯度带也逐渐变得平直。在 5 阶小波逼 近图中,局部重力异常现象消失,表现为重力梯级 带东部大范围的以东海为中心的布格重力高异常以 及西部的重力低异常。根据重力场的分析可知,地 壳厚度在郯庐断裂带两侧具有比较大的变化, 郯庐 断裂带构成了该地区重要的地球物理分界线。

3.3 局部场分析

对于小波细节图的分析,我们依由下而上的原 则进行。根据功率谱计算所得的近似场源深度,可 知 5 阶细节图主要反映了莫霍面至上地幔顶部产生 的布格重力异常特征。图中,沿郯庐断裂带形成的 密集的重力梯级带呈 NNE 向延伸, 局部地段呈近南 北向。沿断裂带分别产生了临沭和泗洪两个重力高 异常区,由于郯庐断裂带错断了岩石圈,沿断裂带 发生上地幔及软流层物质上涌, 莫霍面起伏也比较 强烈, 使得两个地区密度值大于周围其他地区, 故 表现为比较明显的重力高异常现象。航磁资料也证 明了郯庐断裂带在渤海湾地区也存在岩浆上涌现象, 切割非常较深(李文勇等, 2010)。在五河南部, 受 NW 向断裂错断影响, 郑庐断裂带重力梯级带发生 中断。在4阶细节图中由郯庐断裂带产生的比较连 续的重力梯级带消失,表现出沿断裂带分布的串珠 中重力高与重力低异常,反映了郯庐断裂带中段下 地壳的密度结构差异状况。其中以泗洪和临沂为中 心的两个重力高异常区仍然存在, 而在郯城至宿迁 段,表现为相对重力低异常现象,在宿迁地区,郯 庐断裂带被 NW 向无锡 - 宿迁断裂错断, 形成了 NW 向串珠状展布的布格重力异常圈闭, 而在郯城 附近产生了布格重力低异常圈闭。



图 4 布格重力异常 2 阶(a)与 4 阶(b)小波逼近变换图 Fig. 4 2nd(a)and 4th(b) order approximate images of wavelet multi-scale analyses F1-昌邑-大店断裂; F2-白芬子-浮来山断裂; F3-沂水-汤头断裂; F4-邮郚-葛沟断裂; F5-安丘-莒县断裂; F6-山左口-泗洪断裂;

F7-新沂-新店断裂; F8-墨河-凌城断裂; F9-纪集-王集断裂; F10-马陵山-重岗山断裂; F11-苍尼断裂; F12-蒙山山前断裂; F13-新泰-蒙阴 断裂; F14-无锡-宿迁断裂; F15-邵店-桑塘断裂; F16-淮阴-响水口断裂; F17-洪泽-沟墩断裂; F18-铜冶店-孙祖断裂; F19-阜阳-固镇蚴 陷南缘断裂

F1-Changyi-Dadian fault; F2-Baifenzi-Fulaishan fault; F3-Yishui-Tangtou fault; F4-Tangwu-Gegou fault; F5-Anqiu-Juxian fault; F6-Shanzuokou-Sihong fault; F7-Xinyi-Xindian fault; F8-Mohe-Lingcheng fault; F9-Jiji-Wangji fault; F10-Malingshan-Chonggangshan fault; F11-Cang-Ni fault; F12-Fault in front of Mengshan; F13-Xintai-Mengyin fault; F14-Wuxi-Suqian fault; F15-Saodian-Sangxu fault; F16-Huaiyin-Xiangshuikou fault; F17-Hongze-Goutun fault; F18-Tongyedian-Sunzu fault; F19-Southern fault of Fuyang-Guzhen depression

3 阶细节图中,沿郯庐断裂带分布的重力异常 现象逐渐复杂,反映了中地壳密度结构更加复杂。 郯庐断裂带受 NW 向与 NE 向断裂的影响更加明显, 其中在嘉山地区,NE 向的淮阴 – 响水口断裂错断了 郯庐断裂带,与之相关的重力异常现象也存在显著 的变化。以泗洪为中心的重力高异常圈闭开始表现 为 NNE 向延伸的细长条带状重力高,而两侧呈截然 不同的重力低异常,反映了中地壳仍然存在高密度 地幔物质的上涌。沂水至郯城段,形成了 NNE 向条 带状重力高异常圈闭,圈闭两侧形成重力梯级带, 重力高异常区与两侧的梯级带对应了沂沭断裂带

"两堑加一垒"的构造地貌现象。2 阶细节图与 3 阶细节图具有很大的相似性,但又具有更多的信息。由郯庐断裂带产生的重力异常现象呈高低相间 排列,展布在南北向上。除两段依然呈现为条带状 重力高异常之外, 郑庐至泗洪段的重力异常现象变 化最大, 断裂带两侧表现为重力高异常, 沿断裂带 则形成重力低异常现象, 反映了郑庐断裂带在晚白 垩世伸展作用下在苏皖地区控制形成了一系列断陷 盆地, 在该区主要为郑城 - 嘉山地堑式盆地(朱光等, 2001), 该断陷盆地主要发育于中地壳以上部位, 表 现为低密度结构区, 因此产生了条带状重力低异常 现象。受 NW 向无锡 - 宿迁断裂的影响, 郯城 - 嘉 山断陷盆地重力低异常发生大幅度的左旋位错, 断 裂同时错断了郑庐断裂带。鲁中地区, NW 向断裂产 生的重力异常现象与地表地形与地貌开始具有很大 的相关性, 并与沂沭断裂带的重力异常特征耦合在 一起。

1 阶细节图中,沿郯庐断裂带苏鲁段产生的布 格重力异常更加复杂,反映了断裂带在上地壳密度



图 5 布格重力异常 1-5 阶小波细节变换图 Fig. 5 1st to 5th-order detailed images of wavelet multi-scale analyses

结构的复杂性。沿断裂带形成了多个小规模条带状 重力高与重力低异常圈闭现象,重力高与重力低异 常之间形成了平直密集的重力梯级带。山东境内, 白芬子 - 浮来山断裂与沂水汤头断裂之间的地垒表 现为重力高异常,而沂沭断裂带的两个地堑则表现 为重力低异常现象,在鲁中南 NW 向断裂的影响下, 沂沭断裂带重力异常产生了不同程度的弯曲, 呈不 连续状延伸。江苏境内, 郯城 - 嘉山断陷盆地产生 的重力低异常现象依然存在, 断裂带的两侧则表现 为条带状重力高异常现象, 呈不连续状沿 NNE 向延 伸。在嘉山东地区, 淮阴 - 响水口断裂使得郯庐断 裂带重力高发生中断。

4 结论与认识

本文利用遥感与重力资料结合野外考察资料, 对苏鲁段郯庐断裂带晚第四纪地貌特征以及深部结 构特征进行了初步研究。应用构造地貌学方法,对 晚第四纪以来苏鲁段断裂带控制的地形地貌特征进 行了分析,研究了其活动特征;通过利用变密度模 型,对莫霍面深度进行了反演分析;采用小波多尺 度分解与功率普计算方法,对苏鲁段重力位场进行 了反演分析,对深部结构特征及密度的非均匀性进 行了初步分析。并得到如下认识:

(1)遥感图像中,沿郯庐断裂带苏鲁段形成了许 多构造地貌,包括水系错断、冲沟、地震陡坎、线 性构造等构造地貌现象。沿沂水 – 汤头断裂与白芬 子 – 浮来山断裂形成的水系位错反映了晚第四纪以 来郯庐断裂带表现为右行走滑运动,最大水系位错 分别为 1.5 km 和 1.8 km。麦坡地震陡坎反映了郯庐 断裂带晚更新世以来最新活动具有强烈的逆冲作 用。

(2)通过利用变密度模型对莫霍面深度进行计算 可知、断裂带两侧莫霍面深度差异比较大, 位于断 裂带上的临沭与泗洪莫霍面发生上降、莫霍面深度 仅为 31 km, 西侧莫霍面最大深度为 35 km, 形成莫 霍面东高西低的格局。通过对布格重力位场的反演 分析, 该区密度结构在横向上表现为非均匀性特征, 郯庐断裂带切断了地壳与上地幔,在布格重力异常 小波逼近图中表现为一条密集的重力梯级带、沿断 裂带存在上地幔及软流层高密度物质的上涌,其中 在临沭与泗洪地区上涌比较严重, 形成了临沭与泗 洪两个布格重力高异常中心, 郯城至泗洪北在伸展 构造作用下于中上地壳发育了规模比较大的断陷盆 地,在小波细节图中表现为条带状重力低异常现 象。此外、郯庐断裂带苏鲁段从北向南被数条 NW 方向的断裂错断,形成比较明显的分段现象。郯庐 断裂带构成了该区非常重要的地球物理分界线。

致谢:感谢江苏省地震局刘建达研究员、李起彤研 究员与范小平博士等提供的帮助及深地震测深资料; 研究中使用了中国地质大学(武汉)地球物理与空间 信息学院的重磁勘探软件(GMS3.0),对其实验室人 员所提供的帮助,在此表示感谢。感谢编辑与审稿 专家对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献:

晁洪太、李家灵、崔昭文、赵清玉.1992. 郑庐断裂带腾马-窑上 活断层的几何形态与破裂特征[C]//活动断裂研究(2),北京: 151

地震出版社: 208-217、

- 晁洪太、李家灵、崔昭文、赵清玉、1994a. 郑庐断裂带中段全新 世活断层的几何结构与分段[C]//动断裂研究(3),北京:地 震出版社:180-190.
- 晁洪太、李家灵、崔昭文、赵清玉、1994b. 郯庐断裂带中段全新 世活断层的特征滑动行为与特征地震[J].内陆地震,8(4): 297-304.
- 陈冰. 2004. 南海东北部新生代沉积盆地基底的地球物理特征及 其地质解释[D]. 上海: 同济大学.
- 刁博,王家林,程顺有、2007.重力异常小波多分辨分析分解阶次的确定[J].地球科学:中国地质大学学报,32(4): 564-568.
- 杜晓娟、孟令顺、张凤旭、孙晓猛. 2005. 利用重磁场研究郊庐 断裂及周边构造[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 35: 51-56.
- 方仲景, 计凤桔, 向宏发, 丁梦麟. 1976. 郊庐带中段第四纪断 裂活动特征与地震地质条件述评[J]. 地质科学, (4): 354-365.
- 冯锐,朱介寿,丁韫玉,陈国英,何正勤,杨树彬,周海南,孙克 忠、1981、利用地震面波研究中国地壳结构[J]. 地震学报, 3(4): 335-350.
- 高维明,郑郎荪,李家灵,林趾祥. 1988. 1668 年山东郯城 8.5 级 地震的发震构造[J]. 中国地震, 4(3): 9-15.
- 郭芳,杨主恩.1999. 沂沐活断层地表形迹的分形特征及其意义 [C]//活动断裂研究(7),北京:地震出版社:96-108.
- 国家地震局地质研究所. 1987. 郑庐断裂带[M], 北京; 地震出版社.
- 侯遵泽,杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析 [J]. 地球物理学报,40(1):85-95.
- 江娃利、2008. 试论地质学者的地震理念[J]. 地震地质, 30(1): 305-323.
- 江娃利,刘仲温,李成业.1994.山东沂沭断裂带全新世断层展 布及运动特征[C]//中国活动断层研究.北京:地震出版社: 146-153.
- 姜文亮, 张景发, 焦孟梅, 路静, 2010. 基于布格重力异常小波 多尺度分析方法研究首都圈地区构造特征[J]. 地质学报, 84(4): 457-466.
- 李家灵, 1989. 郊庐活断层——中国活断层图集[M]. 北京: 地震 出版社: 1-22.
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 赵清玉. 1994a. 郑庐活断层的分段及 其大震危险性分析[J]. 地震地质, 16(2): 121-126.
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 赵清玉, 1994b, 1668 年郯城 8 级地震 断层及其破裂机制[J], 地震地质, 16(3): 230-237.
- 李起形, 1994、 郑庐断裂带江苏段全新世活动新证据[C]//中国活 动断层研究, 北京: 地震出版社: 140-145.
- 李文勇,周坚鑫,熊盛青,郭志宏,徐剑春,周锡华,安战锋,李 冰,罗锋.2010. 从航空重力看郊庐断裂系(渤海)及其围区 构造几何学特征[J]. 地球学报,31(4):549-556.
- 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.
- 施炜,张岳桥,董树文.2003. 郑庐断裂带中段第四纪活动及其 分段特征[J].地球学报,24(1):11-18.

- 唐新功, 陈永顺, 唐哲. 2006. 应用布格重力异常研究郯庐断裂 构造[J]. 地震学报, 28(6): 603-610.
- 汪海洪. 2005. 小波多尺度分析在地球重力场中的应用研究[D]. 湖北: 武汉大学、
- 王志才, 贾荣光, 孙昭民, 石荣会, 晁洪太. 2005. 沂沭断裂带安 丘-莒县断裂安丘-朱里段几何结构与活动特征[J]. 地震地 质, 27(2): 212-220.
- 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎, 2001. 离散小波变换与重力 异常多重分解[J], 地球物理学报, 44(4): 534-541.
- 曾华霖.2005. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社.
- 张鹏,王良书、钟铠、丁增勇、2007、 郑庐断裂带的分段性研究 [J],地质评论, 53(5): 586-591.
- 郑朗荪、高维明、郑传贝. 1988. 郑庐断裂带的分段与沂沭断裂 的活动性[J]. 中国地震, 4(31): 123-129.
- 朱光,王道轩,刘国生,宋传中、徐嘉炜,牛漫兰.2001. 郯庐断 裂带的伸展活动及其动力学背景[J].地质科学,36(3): 269-278.

References:

- BERTEUSSEN K A. 1977. Moho depth determinations based on spectral ratio analysis of NORSAR long period P-waves. Phys[J]. Earth Planet. Interiors, 15: 13-27.
- CHAO Hong-tai, LI Jia-ling, CUI Zhao-wen, ZHAO Qing-yu. 1992. Geometric patterns and fracture characteristics of the active fault along the Tengma-Yaoshang segment of the Tan-Lu Fault Zone[C]//Research on Active Fault(2). Beijing: Seismological Press: 208-217(in Chinese).
- CHAO Hong-tai, LI Jia-ling, CUI Zhao-wen, ZHAO Qing-yu. 1994a. Geometry and segmentation of the Quaternary fault in the middle segment of the Tanlu Fault Zone[C]//Research on active fault(3). Beijing: Seismological Press: 180-190(in Chinese).
- CHAO Hong-tai, LI Jia-ling, CUI Zhao-wen, ZHAO Qing-yu. 1994b. Caracteristic slip and earthquakes on the Quaternary fault in the middle segment of the Tanlu Fault Zone[J]. Inland Earthquake, 8(4): 297-304(in Chinese with English abstract).
- CHEN Bing. 2004. Geophysical features and geological interpretation of Cenozoic sedimentary basin basement in the northeast area of south China Sea[D]. Shanghai: Tongji University(in Chinese with English abstract).
- CIANCIARE B, MARCART H. 1976. Interpretation of gravity anomalies by means of local power spectra[J]. Geophysical Prospecting, 24: 273-286.
- DIAO Bo, WANG Jia-lin, CHENG Shun-you. 2007. The confirmation of decomposition level in wavelet multi-resolution analysis for gravity anomalies[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 32(4): 564-568(in Chinese with English abstract).
- DU Xiao-juan, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-xu, SUN Xiao-meng. 2005. Study on Tan-lu Faul t Zone and adjacent

area by gravity and magnetic field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 35: 51-56(in Chinese with English abstract).

- FANG Zhong-jing, JI Feng-jie, XIANG Hong-fa, DING Meng-lin. 1976. Reviews on the Quaternary fault activities and seismological situation in the middle segment of the Tanlu Fault Zone[J]. Chinese Geology of Science, (4): 354-365(in Chinese).
- GAO Wei-ming, ZHENG Lang-shun, LI Jia-ling, DU Zhi-xiang.
 1988. Seismogenic structure of the 1668 8.5 Tancheng Earthquake in Shandong[J]. Earthquake Research in China, 4(3):
 9-15(in Chinese with English abstract).
- GUO Fang, YANG Zhu-en. 1999. Fractal characteristics and significance of the surface feature of the active Yishu Fault[C]// Institute of Geology, CEA(ed). Research on Active Fault(7).
 Beijing; Seismological Press: 96-108(in Chinese).
- HOU Zun-ze, YANG Wen-cai. 1997. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China[J]. Chinese J. Geophys.(Acta Geophysica Sinica), 40(1): 85-95(in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology, China Earthquake Administration. 1987. The Tanlu Fault Zone[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- JIANG Wa-li. 2008. Discussion on seismological principle of geologist[J]. Seismology And Geology, 30(1): 305-323(in Chinese with English abstract).
- JIANG Wa-li, LIU Zhong-wen, LI Cheng-ye. 1994. Movement characteristics and distribution of the Quaternary faults of the Yishu Fault Zone in Shandong[C]//Committee on Seismogeology of Seimological Society of China (ed). Research of active fault in China. Beijing: Seismological Press: 146-153(in Chinese)
- JIANG Wen-liang, ZHANG Jing-fa, JIAO Meng-mei, LU Jing. 2010. Research on structural characteristic in Capital area based on wavelet multi-scale method of Bouguer gravity anomaly[J]. Acta Geologica Sinica, 84(4): 457-466(in Chinese with English abstract).
- LI Jia-ling. 1989. Tan-Lu active Fault-Maps of Chinese active faults[M]. Beijing: Seismological Press: 1-22(in Chinese).
- LI Jia-ling, CHAO Hong-tai, CUI Zhao-wen, ZHAO Qing-yu. 1994a. Segmention of active fault along the Tancheng-Lujiang fault Zone and evaluation of strong earthquake risk[J]. Seismology and Geology, 16(2): 121-126(in Chinese with English abstract).
- LI Jia-ling, CHAO Hong-tai, CUI Zhao-wen, ZHAO Qing-yu. 1994b. Earthquake fault and its rupture mechanism of the 1668 Tancheng earthquake of M8[J]. Seismology and Geology, 16(3): 230-237(in Chinese with English abstract).
- LI Qi-tong. 1994. New evidence for the Holocene movement along

the Jiangsu segment of the Tancheng-Lujiang Fault zone[C]//Committee on Seismogeology, Seismological Society of China(ed). Research of active faults in China. Beijing: Seismological Press: 140-145(in Chinese).

- LI Wen-yong, ZHOU Jian-xin, XIONG Sheng-qing, GUO Zhi-hong, XU Jian-chun, ZHOU Xi-hua, AN Zhan-feng, LI Bing, LUO Feng. 2010. Tectonic Geometry of Tan-lu Faults in the Bohai Sea and Its Adjacent Areas Viewed from Airborne Gravity[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 549-556(in Chinese with English abstract).
- MA Xing-yuan. 1987. Outline of lithospheric dynamics of China-the explanation of lithospheric dynamics map[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PARKER R L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies.Geophys[J]. Geophys.J. R. Astron. Soc., 31: 447-455.
- SHI Wei, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen. 2003. Quaternary activity and segmentation behavior of the middle portion of the Tan-Lu Fault Zone[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(1): 11-18(in Chinese with English abstract).
- TANG Xin-gong, CHEN Yong-shun, TANG Zhe. 2006. Bouguer gravity study of middle section of Tanlu Fault[J]. Acta Seismologica Sinica, 28(6): 603-610(in Chinese with English abstract).
- WANG Hai-hong. 2005. Research of wavelet multi-scale analysis applied on earth gravity field[D]. Hubei: Wuhan University (in

Chinese with English abstract).

- WANG Zhi-cai, JIA Rong-guang, SUN Zhao-min, SHI Rong-hui, CAO Hong-tai. 2005. Geometry and activity of the Anqiu-Zhuli segment of the Anqiu-Juxian fault in the Yishu fault zone[J]. Seismology and Geology, 27(2): 212-220(in Chinese with English abstract).
- YANG Wen-cai, SHI Zhi-qun, HOU Zun-ze, CHENG Zhen-yan. 2001. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomaties[J]. Chinese J. Geophys, 44(4): 534-541(in Chinese with English abstract).
- ZENG Hua-lin. 2005. Gravity field and gravity prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Peng, WANG Liang-shu, ZHONG Kai, DING Zeng-yong. 2007. Research on the segmentation of Tancheng-Lujiang Fault Zone[J]. Geological Review, 53(5): 586-591(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Lang-shun, GAO Wei-ming, ZHENG Chuan-bei. 1988. Segmentation of Tancheng-Lujiang Fault Zone and activity of Yishu fault[J]. Earthquake Research in China, 4(3): 123-129(in Chinese).
- ZHU Guang, WANG Dao-xuan, LIU Guo-sheng, SONG Chuan-zhong, XU Jia-wei, NIU Man-lan. 2001. Extrensional activities along the Tan-Lu Faule Zone and its geodynamic setting[J]. Chinese Journal of Geology, 36(3): 269-278(in Chinese with English abstract).

"首都圈深孔地应力测量与实时监测台网建设"取得 阶段性重要成果

2011 年 3 月 4—5 日,中国地质科学院地质力学研究所组织召开了"首都圈深孔地应力测量与实时监测 台网建设"阶段性成果汇报座谈会。项目负责人谭成轩研究员汇报交流了前期已取得的成果,经与参会专家 研究讨论后提出了下一步工作建议和部署。

通过 2008—2010 年的工作,"北京地区主要活动断裂工程地质稳定性评价与地应力测量"项目在首都 圈的北京平谷、北京十三陵、北京西郊、河北昌黎等北部地区分别开展了深孔(500~800 m)地应力测量与实 时监测工作,已初步揭示首都圈北部地区地壳浅表层现今主应力状态随深度的变化规律,并获得连续的地 应力大小相对变化的实时监测数据,为首都圈地震地质研究积累了宝贵的资料。

"十二五"期间,研究人员将继续在首都圈西、南和东部地区选择 5 个关键构造部位进行深孔地应力测 量与实时监测,构建完善首都圈深孔地应力测量与实时监测台网,填补首都圈深孔地应力测量与实时监测 台网的空白,揭示首都圈现今地应力环境。为服务首都经济社会建设及地质安全评价增加一份保障。

赵文津院士对该项工作给予了高度评价,指出深孔地应力测量与实时监测工作是探索深部地壳活动的 重要方法,对地震预测预报具有重要意义,但需进行长期稳定的地应力数据实时监测与积累,并希望将李四 光的地质力学思想发扬光大。

本刊编辑部

采编

万方数据