

基于遥感、重磁多源信息研究茅山断裂带构造特征*

付萍杰^{1,2}, 张景发¹, 王鑫¹, 高敏^{1,2}, 王冬雷³, 刘军³

(1. 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室), 北京 100085; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;
3. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 通过遥感影像数据判读了茅山断裂带构造地貌特征, 利用小波多尺度分解方法研究了茅山地区的布格重力异常, 在进行场源分离的基础上深入研究了茅山断裂带地壳深部的空间展布特征。通过重力异常分析可知, 茅山断裂带在中地壳以上由茅西断裂、茅东断裂以及茅山断块3部分组成, 随着地壳深度的增加逐渐合为一条断裂带, 茅山断裂带沿重力高异常与重力低异常之间的重力梯级带分布; 航磁异常显示, 地壳浅部火山喷发物质侵入断裂, 且地壳深部同时具有岩浆侵入断裂现象; 通过重力异常小波细节图进一步证明了溧阳地震与茅山断裂带和南渡—金坛断裂带之间的联系。

关键词: 遥感影像; 茅山断裂带; 布格重力异常; 航磁异常图; 小波多尺度分解

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)04-0576-08

0 引言

茅山断裂带出露于江苏南部茅山地区, 北起金坛石门塘, 向南南西经金坛致和、陶家洼、溧阳竹箐煤矿、曹山林场、茅山林场、溧水陆家、高淳种桃山、茨山头, 继而进入安徽郑村和宣城敬亭山东麓, 断续出露约 134 km, 主体位于江苏省境内, 在遥感图像上可以发现其呈“S”形展布, 由茅西断裂、茅东断裂以及两者所夹持的茅山断块组成, 总体走向北北东, 倾向南东, 倾角由缓到陡。茅西断裂形成于晚侏罗世之后、晚白垩世之前(江苏省地质矿产局, 1984), 位于茅山山脉西侧山麓, 走向 30°, 总长 110 km。茅东断裂于晚白垩世以后第三纪时形成, 伴生的北西、北北西向张性及张扭性断裂亦较发育(江苏省地质矿产局, 1984), 倾向南东, 倾角上陡下缓。茅东断裂与金坛—南渡断裂共同控制了所夹持的中新生代沉积盆地——直溪桥断陷盆地和桡溪港断陷盆地(黄润生, 曹建忠, 2010), 其东侧则为金坛—溧阳隆起, 而深洼部分则是该地区的地震频繁活动区。茅山断块形成于志留系—三叠系, 宽约 4 km, 走向 30°, 长约 50 km, 夹持在茅西断裂和

茅东断裂之间。该区域曾发生过数次 4~6 级地震, 特别是 1974 年、1979 年在茅山断裂带中段相继发生 5.5 级和 6.0 级地震, 是重点监测地区之一(陈文凯等, 2006)。

以前对于茅山断裂带的研究都侧重于运用构造地质知识、遥感影像解译等(张永康, 孙竞雄, 1982; 陈文凯等, 2006; 孙竞雄, 韦国钧, 1985), 利用小波多尺度分解的方法几乎没有研究。侯遵泽和杨文采(1997)首次将小波多尺度分析应用到中国大陆布格重力异常数据处理中, 取得了较好的效果。作为研究地质构造和岩石圈结构的有效方法之一, 重力方法既可以体现出地质体的纵向分层, 也可以体现出地壳介质的横向密度的非均匀性。因此, 重力数据可以直观的反映出地质体分布、断裂构造的展布以及深部构造特性等信息, 同时还包含了深度较大、分布较广的场源信息。由于重力异常是不同密度、不同深度、不同规模以及不同形态地质体所产生的重力场的叠加, 所以应对重力异常信息进行分离, 继而提取有关信息。近年来发展起来的小波分析法已经广泛的应用于地球物理信号处理, 本文经过小波多尺度分解得到了 1~4 阶重力小波细节图, 解译茅山断裂带深部构造, 所采用的布格重力数据为 1:20 万,

* 收稿日期: 2014-07-25.

基金项目: 郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究(2012BAK19B04-01)和“苏州市新城区开发区活断层探测与地震危险性评价”项目共同资助。

数据网格间距 2 km × 2 km，研究区范围（31°20′~32°00′N，119°00′~119°30′N）。

1 茅山断裂带遥感构造地貌特征

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特征研究相结合，可以对断层第四纪以来的构造特征进行研究。活动断裂在地表留下比较直观的断层依据，沿断裂带通常发育洪积扇、断层陡坎、断层崖、断层三角面山、拉分盆地等构造地貌现象，利用遥感影像可以对这些地貌单元进行比较详细的判读（姜文亮等，2011；陈丁等，2011），同样这些地貌单元在三维立体图中表现的更为直观。

茅山断块在 TM 影像上表现为北北东走向的隆起的山脉（图 1），茅山断裂带由茅西断裂、茅东断裂以及茅山断块组成，断裂沿山脚与凹陷过渡区域分布，笔者将茅山断裂带分为 3 段来描述。其中，火龙地—周家段处发育有大面积的洪积扇地貌景观，可以观测到断层三角面，茅西断裂洪积扇面积较小，断层三角面发育，由于断裂两侧地貌特征的不同，断裂两侧光谱分辨率不同引起的色调差异都很明显，Google Earth 影像中在北镇街附近可看到断层崖地貌（图 2a 中 TM 影像中白色框表示局部断层崖地貌图位置）。白马镇—杜公庙

段发育有小面积的洪积扇，残山呈线状断续排列，断裂两侧地质地貌特征有很大的变化，茅西断裂沿两侧山脉之间的山谷穿过，断裂两侧发育有断层三角面，在 Google Earth 影像中高茅棚附近表现的比较清晰（图 2b 中 TM 影响中白色框表示局部断层三角面地貌图位置）。狸桥镇—码头村段与其两侧地质地貌景观差异明显，一侧为隆起的山脉，断崖陡峭，另一侧为湖泊，影像中表现出不同的色调（图 2c）。这些现象在 TM 影像图与三维立体图中表现的都比较明显（图 2），遥感图像是二维视图，通过叠加 DEM 可以获得三维效果图，三维立体图具有立体感强、形象逼真，能清晰的突出平面图像上表现不出来的一些地表景观变化，可以借此来分析地形和地貌特征。

2 茅山断裂带重磁异常特征分析

小波变换细节图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。利用小波变换方法对研究区布格重力数据进行处理，可以得到对应的小波变换细节图，通过小波变换细节图可以对该区主要地质单元进行研究，特别是对断层的深部延伸规模、埋藏深度进行推测。利用对数功率谱方法（王文睿等，2009；申宁华等，1986；殷秀华等，1999；楼海，王椿镛，2005；张先，赵丽，2007；Jiang *et al.*，2004；杨宇山等，2003；Sari, Salk，2006；刁博等，2009；姜文亮，张景发，2012）对小波 1~4 阶细节图场源深度进行了计算，从表 1 中可知，1~2 阶小波细节图像反映了上地壳布格重力异常特征，3 阶小波细节图像反映了中地壳布格重力异常特征，4 阶小波细节图像反映了下地壳布格重力异常特征。

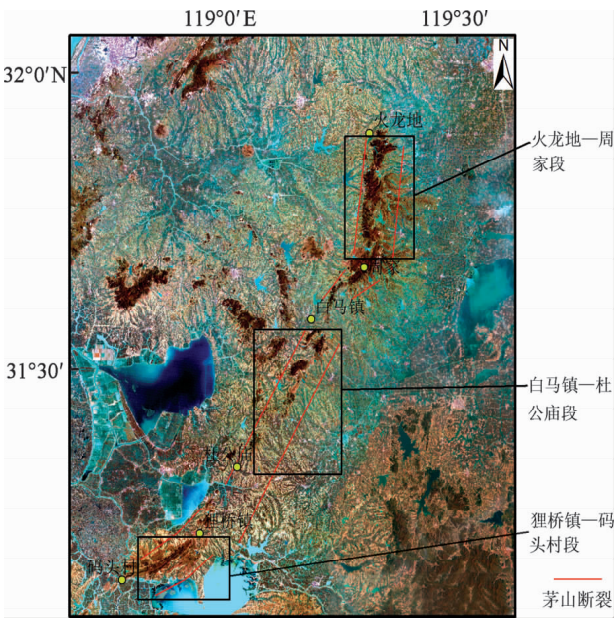


图 1 茅山地区 TM 影像

Fig. 1 Image of TM along the Maoshan regions

表 1 各阶小波变换细节反映的场源深度
Tab. 1 Depth of field source reflected by each of wavelet transform detail

阶次	近似场源深度/km
1 阶细节	2 ~ 3
2 阶细节	5 ~ 6
3 阶细节	11 ~ 12
4 阶细节	24 ~ 25

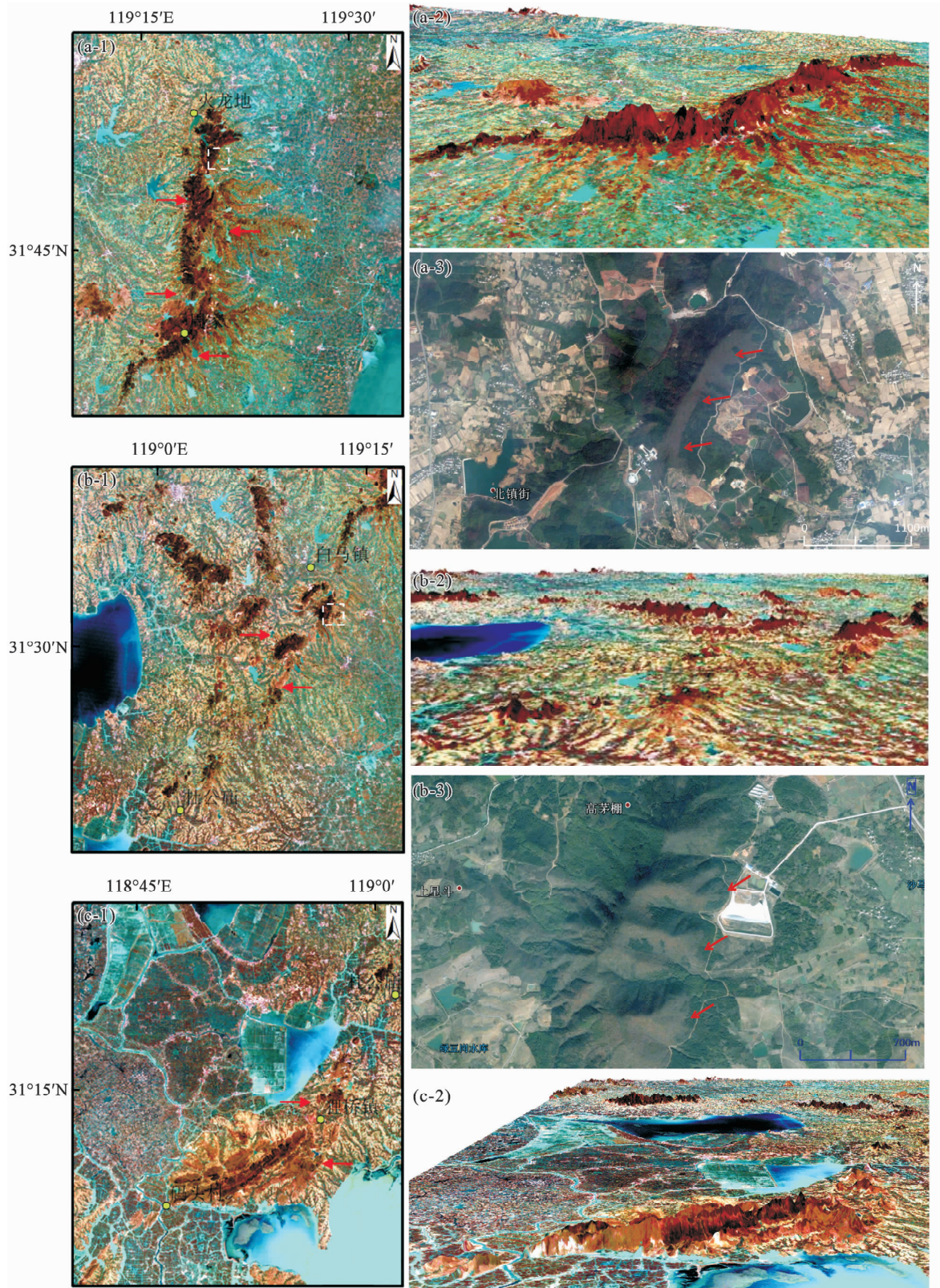


图2 茅山断裂带分段 TM 影像、三维立体图与 Google Earth 影像

(a) 火龙地—周家段 (局部断层崖影像来自 Google Earth); (b) 白马镇—杜公庙段 (局部断层三角面影像来自 Google Earth); (c) 狸桥镇—码头村段

Fig.2 Images of TM, 3D stereogram and Google Earth of each section of Maoshan Fault Zone

(a) Huolongdi—Zhoujia section (the image of local fault cliff is from Google Earth); (b) Baima town—Dugongmiao section (the image of local fault triangle is from Google Earth); (c) Liqiao Town—Matou Village section

2.1 茅山断裂带布格重力异常小波细节特征分析

图3为茅山断裂带布格重力异常图,从图中可知茅山断裂带区域重力异常数值变化范围在 $(-32.1 \sim 11.9) \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ 之间,断裂带沿北北东方向两侧具有比较明显的重力异常特征,两侧存在密集的重力高与重力低圈闭现象,断裂沿重力高与重力低之间的密集等值线过渡带分布。茅山断裂带异常特征与地表地形地貌特征具有很大的相关性,断裂带东侧有明显的两个重力低异常圈闭,圈闭区为桤溪港凹陷和直溪桥凹陷,还有一个重力高异常圈闭区为金坛—南渡隆起。

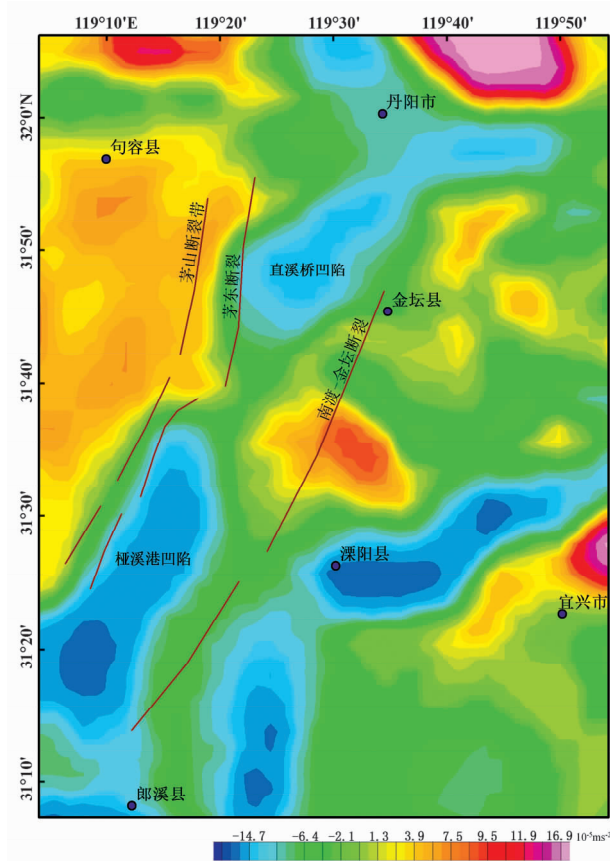


图3 茅山断裂带布格重力异常图

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly of Maoshan Fault Zone

在1阶重力小波变换细节图中(图4a),重力异常数值变化范围在 $(-11.3 \sim 10.5) \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ 之间,布格重力异常比较规律,断裂沿北北东方向分布。从图4中可以看出茅山断裂带的3个组成部分。断裂带北东部分,茅西断裂沿重力高异常与重力低异常之间的重力梯级带分布,断裂东侧为重力高的异常茅山断块,呈线状分布,茅东断裂东北部沿断陷盆地内部分布,中

部地区沿两侧重力高异常所夹的重力梯级带分布,西南部沿断陷盆地内部分布。由茅西断裂与茅东断裂所在的重力梯度带可以发现,茅东断裂处的重力等值线比较密集,推测茅东断裂比茅西断裂倾角要大。中间部位断裂带在两个高重力异常的圈闭区之间穿过,为遥感影像中白马镇—杜公庙段的线状残山。断裂带的西南部分沿串珠状的重力低异常圈闭及边缘分布,该串珠状重力低异常圈闭为桤溪港凹陷。断裂带西南角方向沿重力高异常圈闭区边缘分布,结合遥感影像初步分析该地区为湖泊。1阶小波变换细节图所揭示的场源深度大约在地表2~3 km,主要反映了地表附近的低密度介质分布状态(路晓翠等,2012)。

在2阶重力小波变换细节图中(图4b),重力异常数值变化范围在 $(-5.6 \sim 5.9) \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ 之间,布格重力异常较规律,断裂带沿北北东方向分布,茅东断裂沿断陷盆地与茅山断块之间的重力梯级带分布,茅东断裂重力等值线密集现象比茅西断裂更加突出,茅西断裂和茅东断裂表现得更为明显,茅山断块重力异常值明显升高,范围明显扩大,茅东断裂的东部直溪桥凹陷重力异常圈闭区范围有所扩大。断裂带中间部分西侧异常值明显升高。桤溪港凹陷不再呈串珠状分布,而是连在了一起成为重力低异常圈闭区,可能在这个时期断层发生了重新活动(王官福,张文治,1992),茅东断裂首先是沿桤溪港凹陷边缘重力梯级带分布,然后西南方向沿直溪桥凹陷边缘重力梯级带分布,西南角湖泊重力高圈闭区范围有所扩大。南东方向不规则的重力高异常圈闭区为金坛—南渡隆起。金坛—南渡隆起位于茅山断裂带东侧,该隆起西侧边缘重力梯级带延伸的为南渡—金坛断裂带,该断裂带为北东方向,与茅山断裂带一起控制了直溪桥凹陷和桤溪港凹陷。2阶小波变换细节图所揭示的场源深度大约在5~6 km,主要反映了上地壳介质的分布状态。

在3阶重力小波变换细节图中(图4c),重力异常数值变化范围在 $(-8.2 \sim 9.9) \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ 之间,布格重力异常圈闭区明显,范围有所扩大。从图中可以看出茅东断裂与茅西断裂分界已不是太明显,断裂带中间部分两侧的重力高异常区合并在一起,直溪桥凹陷和桤溪港凹陷圈闭区再次扩大,两个凹陷的中段异常有所变化,为浮山—瓦屋山一带的北西向上第三系方山组玄武岩浆活

动带的叠加与改造,或者为上第三系的浅盐丘的反映(路晓翠等,2012)。金坛—南渡隆起重力高异常区范围扩大,形状规则,与西侧的隆起区相连。3阶小波变换细节图所揭示的场源深度大约在12~13 km,主要反映了中地壳介质的分布状态。

在4阶重力小波变换细节图中(图4d),重力异常数值变化范围在 $(-7.4 \sim 6.9) \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ 之间,布格重力异常圈闭区很明显,茅东断裂与茅西断裂合并为一条断裂,沿重力异常密集梯度带分

布。断裂带西侧为重力高异常圈闭区,东侧为重力异常低圈闭区的直溪桥凹陷和桡溪港凹陷,但是直溪桥凹陷重力低圈闭区范围扩大而桡溪港凹陷重力低圈闭区范围有所减小,推测直溪桥凹陷比桡溪港凹陷延伸深度大。4阶小波变换细节图所反映的场源深度为24~25 km,表明场源深度已达到了下地壳,据此可以推断茅山断裂带和南渡—金坛断裂带为规模较大的控制性断裂,且两条断裂已经切穿了上地幔。

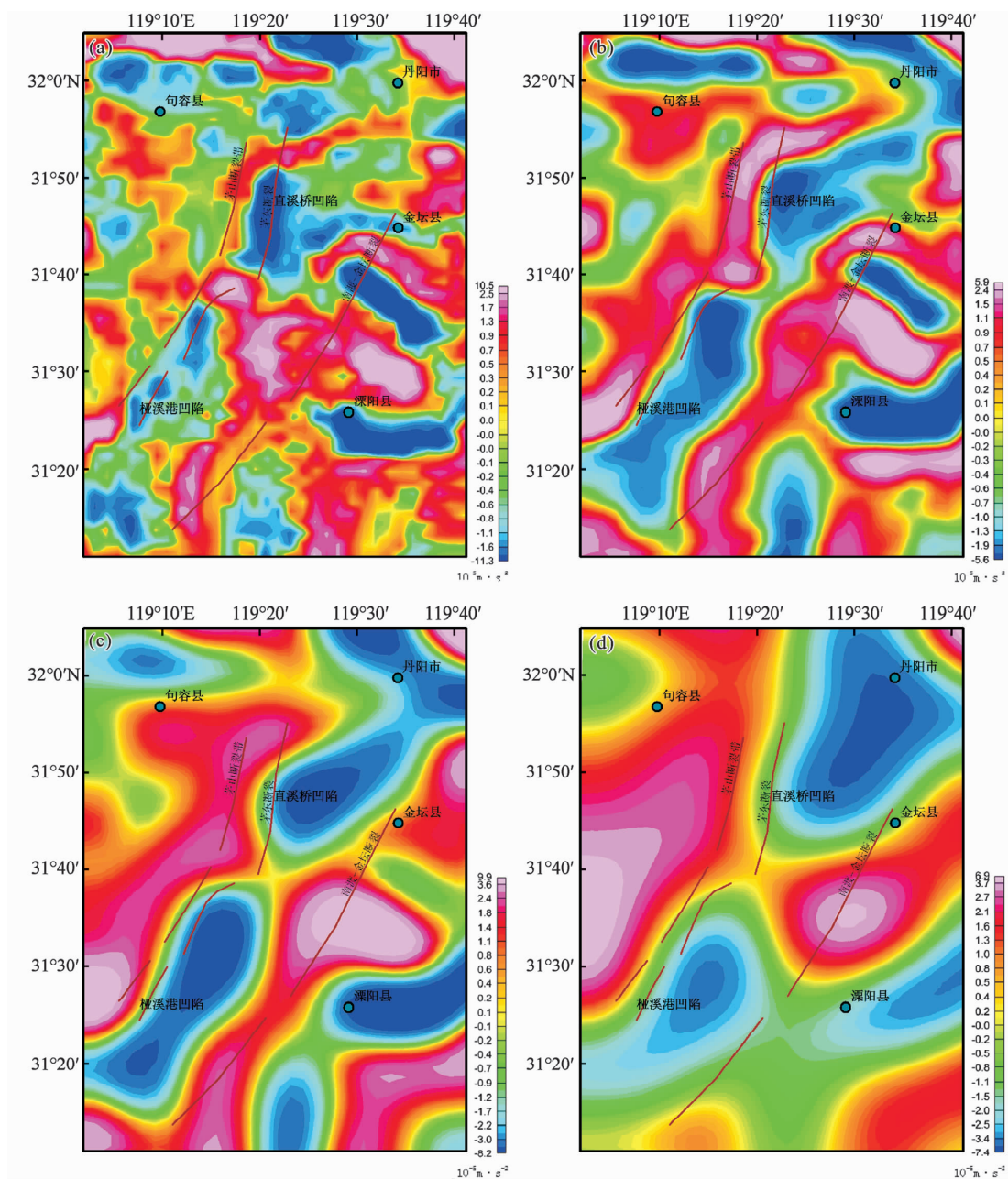


图4 茅山断裂带布格重力异常1阶(a)、2阶(b)、3阶(c)和4阶(d)小波变换细节图
Fig. 4 The approximation of the first order (a)、the second order (b)、the third order (c) and the forth order (d) wavelet transform detail of the Bouguer gravity anomalies of Maoshan Fault Zone

2.2 茅山断裂带航磁异常特征分析

在航磁异常图（图5）上，茅山断裂带表现为北北东向正高磁异常，异常最高值可达 500 nT，恰位于凹陷盆地处。在航磁2、3、4阶细节图上也可以发现这种现象。且在2、3阶细节图上带内形成了明显的环状磁异常面貌，即断裂带外侧为环形串珠状磁异常，环内为正高磁异常。

研究图5可知，断裂带为正高航磁异常，呈线性分布，正高磁异常被环状的串珠状负低磁异常所包围，可以看出茅山断裂带处在低磁异常的断陷盆地内。正高磁异常反映了茅山断裂带中茅山断块的基底隆起，可能会有岩浆物质的侵入，其周围分布着大量的负低串珠状磁异常，可能是火山喷发后物质沿断裂缝隙的侵入（黄润生，曹建忠，2010；孙竞雄，韦国钧，1985）。

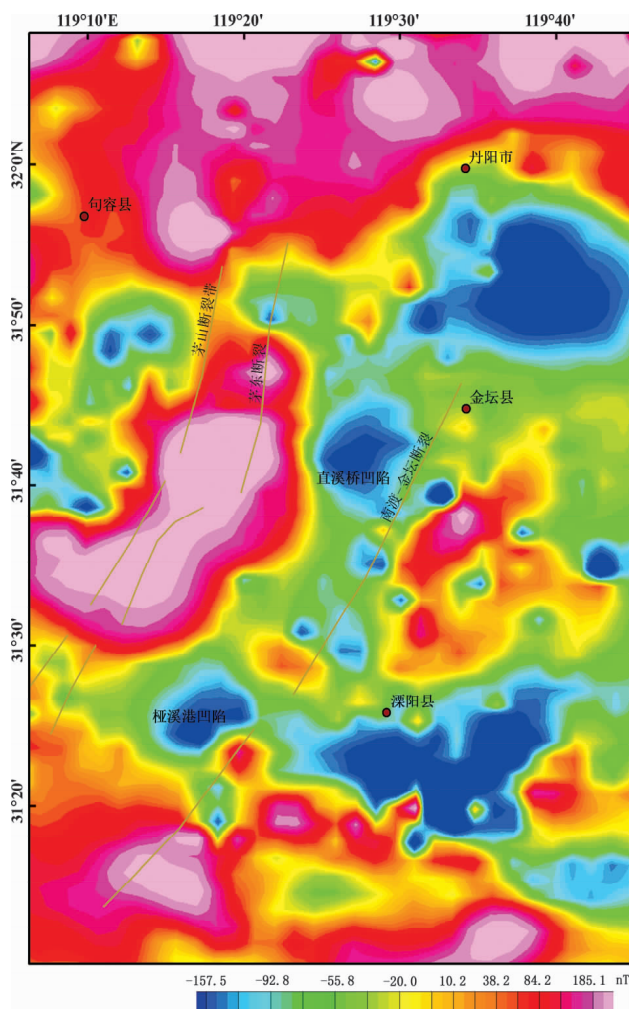


图5 茅山断裂带航磁异常 ΔT 图

Fig. 5 ΔT image of aeromagnetic anomalies of Maoshan Fault Zone

3 溧阳地震与茅山断裂带的关系

1979年7月9日，江苏省溧阳县发生6级地震，该地区于1974年4月22日发生过一次5.5级地震（秦大正，1982），两次地震的震中位置相距3 km，震源深度也相当，可视为同源地震，2012年5月22日在溧阳地区又发生了 $M2.5$ 地震，此次地震造成溧阳当地有感。许多地震专家曾进行过深入的地震现场考察和分析研究工作，其中较为统一的结论是认为这两次地震的发生与茅山东侧断裂带和南渡一金坛断裂的活动有关（叶洪等，1980；谢瑞征等，1979；胡连英，徐学思，2001）。此次地震发生的构造部位就是在茅山断裂带茅东断裂的西侧断陷盆地——“直溪桥—桤溪港”凹陷内（叶洪等，1980；侯康明等，2012）。溧阳震区从西到东有：云合一白马凹陷，莫霍面（M）界面埋深为33 km；青山—芳山—竹箴桥隆起，M界面埋深为30 km；汤桥—上沛凹陷，M界面埋深为32 km；河口—庆丰隆起，M界面埋深为29 km（梁中华等，1984）；大溪—前马凹陷，M界面埋深为35 km。这些隆起与凹陷条带之间常为M界面埋深变化较大的梯度带，该梯度带又往往与断裂构造带有关。如云合一白马凹陷带与青山—芳山—竹箴桥隆起带的过渡带，恰好就是茅山东侧断裂（梁中华等，1984）。本文用小波多尺度方法推断茅山断裂带和南渡一金坛断裂切穿上地幔，两条断裂带倾向相对，规模相当，而震源区恰巧就处在两个断裂带之间的盆地内，直溪桥凹陷和桤溪港凹陷规模较大，埋深较深，被两条断裂带所控制。在航磁异常图中，通过对断裂带及周围航磁异常的研究分析，推断该地区存在的岩浆侵入以及火山运动，尤其是上沛附近的火山喷发带也是溧阳地震的主要活动地带（孙竞雄，韦国钧，1985）。

4 结论与讨论

本文利用遥感影像研究茅山地区构造地貌特征，三维立体图较直观的反映了断裂带的存在，并利用小波多尺度分解的方法对茅山断裂带地区重力场进行场源分离，并对场源分离后的不同深度、不同规模以及不同密度的地壳结构进行了深

入分析,结合莫霍面深度分析了溧阳地震与两条断裂带的联系,取得了比较好的效果。

(1) 茅山断块在 TM 影像上表现出色调明显的隆起区,在 Google Earth 影像中清晰的见到了断层崖、断层三角面的存在。茅山断裂带沿北北东方向呈“S”形状分布,断裂带两侧色调差异很大,地形地貌有很大的不同,发育有大量的洪积扇,断裂带中段还有线状的残山堆积。

(2) 茅山断裂带重力异常数值变化范围在 $(-32.1 \sim 11.9) \text{ ms}^{-2}$ 之间,总体表现为规模宏大的北北东方向重力梯度带上,该断裂由上陡下缓的茅西逆断层、倾角较陡的茅东正断层以及茅山断块组成,茅东断裂比茅西断裂倾角要陡,在地壳深处茅东断裂与茅西断裂合为一条断裂。

(3) 重力小波细节图中解释了茅山断裂带与南渡一金坛断裂带共同控制的直溪桥凹陷和桠溪港凹陷以及他们之间的过渡带,直溪桥凹陷比桠溪港凹陷埋深较深。

(4) 航磁异常图推断岩浆物质以及火山喷发的存在进一步验证了茅山断裂带与南渡一金坛断裂带都切穿了上地幔,为规模宏大的控制性断裂,加上两条断裂所控制的断块凹陷区,对溧阳地区的地震有着很重要的影响。

参考文献:

- 陈丁,张景发,朱鲁,等. 2011. 徐州废黄河断裂带的空间展布与活动性研究[J]. 地震地质,33(1):68-73.
- 陈文凯,张景发,姜文亮,等. 2006. 基于 TM 和 DEM 的茅山地区断裂构造解释[J]//中国地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集[C],67-74.
- 刁博,王家林,程顺有. 2009. 基于重力异常连续复小波变换的断裂分析[J]. 石油物探,48(3):303-306.
- 侯康明,熊振,李丽梅. 2012. 对江苏省溧阳 2 次破坏性地震发震构造的新认识[J]. 地震地质,34(2):310-311.
- 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.
- 胡连英,徐学思. 2001. 江苏溧阳地震孕育和发生的地质因素剖析[J]. 江苏地质,25(1):11-16.
- 黄润生,曹建忠. 2010. 江苏茅山推覆构造带的分析与研究[J]. 地质

- 学刊,34(1):6-9.
- 江苏省地质矿产局. 1984. 江苏省及上海市区域地质志[M]. 北京:地质出版社,669-680.
- 姜文亮,张景发,陈丁,等. 2011. 利用遥感、重力多源信息研究郯庐断裂带苏鲁段构造特征[J]. 地球学报,32(2):143-153.
- 姜文亮,张景发. 2012. 首都圈地区精细地壳结构——基于重力场的反演[J]. 地球物理学报,55(5):1646-1661.
- 梁中华,唐荣余,宋建军,等. 1984. 溧阳震区地壳深部结构的探测与研究[J]. 地震地质,6(4):71-78.
- 楼海,王椿镛. 2005. 川滇地区重力异常的小波分解与解译[J]. 地震学报,27(5):515-522.
- 路晓翠,张景发,朱鲁,等. 2012. 利用小波多尺度分解研究郯庐断裂带苏鲁段构造[J]. 地球物理学进展,27(1):58-67.
- 秦大正. 1982. 长江中下游地区断块构造及其边界活动断裂和溧阳地震[J]//中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断裂[M]. 北京:地震出版社,100-114.
- 申宁华,李春华,张贵宾,等. 1986. 用康滇大陆古裂谷带地区航磁异常计算居里深度[J]. 地球物理学报,29(5):496-502.
- 孙竞雄,韦国钧. 1985. 江苏西南部茅山推覆构造的基本特征[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,6(3):80-87.
- 王官福,张文治. 1992. 华北陆台北缘重磁异常的地质解释[J]. 物探与化探,16(1):31-37.
- 王文睿,李斐,鄢建国,等. 2009. 月球重力异常的小波多尺度分析[J]. 地球物理学报,52(7):1693-1699.
- 谢瑞征,朱永正,裴然忠. 1979. 江苏地震构造的基本特征及地震趋势探讨[A]//中国地震学会. 第一次全国地震科学学术讨论会论文摘要汇编[C].
- 杨宇山,李媛媛,刘天佑,等. 2003. 小波细节的微分特征及其在重力场断裂分析中的应用[J]. 地质与勘探,39(1):41-44.
- 叶洪,张文郁,于之水,等. 1980. 1979 年溧阳 6 级地震震源构造的研究[J]. 地震地质,2(4):27-38.
- 殷秀华,黎益仕,刘占坡. 1999. 南北构造带北段重磁异常的对应分析[J]. 地震地质,21(4):371-374.
- 张先,赵丽. 2007. 功率谱用于计算不同尺度磁性体场源深度的分析[J]. 物探与化探,31(S1):53-56.
- 张永康,孙竞雄. 1982. 江苏西南部中生代断块构造的基本特征[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,3(4):32-41.
- Jiang W. L., Wang X., Tian T., et al. 2014. Detailed crustal structure of the North China and its implication for seismicity[J]. Journal of Asian Earth Sciences,81(2):53-64.
- Sari C., Salk M. 2006. Sediment thickness of the western Anatolia graben structures determined by 2D and 3D analysis using gravity data[J]. Journal of Asian Earth Sciences,26(1):39-48.

Tectonic Characteristics of Maoshan Fault Zone Derived from Remote Sensing and Gravity and Magnetic Multi-source Information

FU Ping-jie^{1,2}, ZHANG Jing-fa¹, WANG Xin¹, GAO Min^{1,2}, WANG Dong-lei³, LIU Jun³

(1. *Key laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China*)

(2. *Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China*)

(3. *Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, Shandong, China*)

Abstract

Based on the remote sensing images data, we interpreted the tectonic geomorphic feature of earth surface of Maoshan Fault Zone. Then we studied the bouguer gravity anomaly at Maoshan area by use of the method of wavelet multi-scale decomposition, and deeply analyzed the spatial distribution of the deep crust of the Maoshan Fault Zone on the basis of separation of field and source. The analyze result of bouguer gravity anomaly shows that Maoshan fault zone is composed of Maoxi fracture, Maodong fracture and Maoshan fault block above the middle crust, and they combine to one fracture with the increasing of the depth of the crust. The Maoshan Fault Zone distributes along the gravity gradient zone between the high and low gravity anomalies. The aeromagnetic anomalies shows that volcanic eruption material invaded the fault in the shallow of crust and the magma simultaneously invaded the fault in the deep of crust at the same time. We further prove the connection of Liyang earthquake and Maoshan Fault zone and Nandu-Jintan Fault Zone through gravity anomaly wavelet detail image.

Key words: remote sensing images; Maoshan Fault Zone; bouguer gravity anomaly; aeromagnetic anomaly; wavelet multi-scale decomposition