

文章编号: 0253-3782(2006)05-0504-09

北京地区航磁异常的多尺度 分解及断裂研究^{*}

张 先¹⁾,[†] 赵 丽¹⁾ 刘天佑²⁾ 杨宇山²⁾

1) 中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心

2) 中国武汉 430074 中国地质大学地球物理与空间信息学院

摘要 在对北京地区航磁异常及地质构造特征进行定性分析的基础上, 对北京地区航磁异常运用小波多尺度分解方法进行了数据处理, 并对北京市区的两条主要断裂, 即北东向的顺义—良乡断裂和东西向的板桥—八宝山—通县断裂的空间分布及其对地震的影响进行了重点探讨和分析。

关键词 北京地区 航磁异常 多尺度分解 断裂研究

中图分类号: P315.72⁺¹ **文献标识码:** A

引言

多年来, 中国地震局一直把首都圈作为重点地震监测区, 研究程度之高居全国首位; 而北京地区处于首都圈的核心地区, 北京市的断裂分布与活动是地震监测与防震减灾工作的焦点。本课题利用小波变换技术对北京地区航磁异常进行多尺度分解, 并在此基础上对北京市区的主要断裂进行探讨。

1 北京地区地质构造背景及航磁异常特征

北京地区位于中朝准地台燕山台褶带的中段。根据新生界底板的埋深和第三系的发育情况, 北京地区在地质上可分为 3 个单元, 即京西隆起、北京坳陷、大兴隆起, 北京市区则处于北京坳陷之内。北京坳陷西北以高丽营—黄庄断裂与京西隆起为界, 东南以通县—南苑断裂与大兴隆起为界。北京坳陷内部也具有横向非均一性, 自北向南由顺义凹陷、来广营隆起、丰台凹陷、坨里—良乡凸起等一系列次级构造组成。北京市区基本上位于丰台凹陷的范围内。1985 年国土资源部航空物探遥感中心, 完成了面积约 5 000 km² 的北京市区及近郊区的 1/10 万正交网络航磁测量, 获得了较高精度的航磁资料, 为研究北京地区的地质构造与结构提供了宝贵资料。我们选用这次航测的成果(即 115°42'E~116°43'E, 39°40'N~40°13'N 的 1/10 万的航磁资料)作为本课题数据处理及研究的基础。

北京地区除西部京西隆起有中生界、古生界及震旦亚界地层出露外, 其余大部分地表被第四系覆盖。新生界至元古界基本上为无磁性沉积层。太古界变质岩系具有明显的磁

* 国家发展与改革委员会“城市活断层试验探测”(2004-1138)资助。中国地震局地球物理勘探中心科技论著 0512。
2005-11-23 收到初稿, 2006-06-14 决定采用修改稿。

† 通讯作者。E-mail: zhangxian6164@sina.com

性, 构成了研究区内磁性结晶基底。燕山期北京地区岩浆活动较为强烈, 形成了诸多酸性-中基性火成岩体(鲍亦冈等, 2001)。太古界变质岩系引起的基底异常与火成岩体的强磁异常共同构成了本区的主要磁场分布。研究区内磁场大致由镇边城—高崖升高磁场区、温泉升高磁场区、大安山负磁异常区、房山升高磁场区、大兴—通县平静负磁场区及长辛店—顺义局部异常发育的变化磁场带所组成。以下简述之。

镇边城—高崖升高磁场区位于研究区之西北角, 由一北东向的升高背景磁场上分布有数个近于圆形或椭圆形的局部异常组成, 最大峰值为 460 nT。根据地质资料推断, 该区升高的磁场背景及规模、强度较大的局部异常是由埋藏较浅的太古界磁性基底及隐伏的中酸性岩体引起。温泉升高磁场区位于研究区中部略偏北的部位, 区内有几个近圆形外貌特征的异常组成。大者有数百平方公里, 小者不到 10 km²。其中, 以强度和范围均较大的温泉异常最为典型。该异常近椭圆形, 长轴北东东向, 范围为 15 km×18 km, 峰值在 900 nT 以上, 梯度一般为 150 nT/km。推测这个异常是由中酸性-中基性的复式岩体引起的, 磁性强的可能是中基性岩体的反映, 视磁化强度变化范围在 $500 \times 10^{-2} \sim 2000 \times 10^{-2}$ A/m。大安山负磁场区位于测区中部的西端, 向西延出测区, 以缓慢变化的负磁场为主, 最大负值达 -110 nT。对比地质图, 该区负磁场背景应当是较厚的上元古界、古生界沉积盖层与太古界弱磁性基底的综合反映。房山升高磁场区位于测区的西南隅, 以升高的正值背景及似圆形的岩体异常为主。尤其是磁场区东部具有典型的中酸性岩体异常的特点, 异常近于圆型, 峰值达 560 nT。与地质图对比, 该异常与房山花岗闪长岩体相吻合。通过地表磁测检验, 可以肯定似圆形异常是地表所见花岗闪长岩体的反映。该磁场区西部以背景值普遍升高为特征, 一般强度为 100~150 nT, 在此背景场上展布有幅度仅 10~30 nT 的局部异常, 它们的分布没有一定的规律。推测是下伏的太古界磁性基底引起了正背景磁场, 沉积层中所含的火成岩侵入体引起了背景场上散布的局部异常。大兴—通县平静负磁场位于研究区之东南部, 负磁场背景平稳缓变, 全区几乎没有局部异常。负磁场中心位于南苑东北约 5 km, 负磁场峰值为 -160 nT, 推测本区背景磁场是前寒武纪无磁性岩石及弱磁性基底的反映。长辛店—顺义局部异常发育的变化磁场带呈北东方向展布, 长 60 余公里, 宽约 20 多公里, 几乎斜穿整个研究区。异常带西北界位于坨里—八宝山—四道口—牛栏山一线。东南界位于良乡—酒仙桥—顺义一线, 是整个研究区内磁场最为复杂, 局部异常特别发育的地区。按地质构造划分, 这一北东向异常带属于北京坳陷范畴之内。北京坳陷属于一种张性沉陷带, 沿北东向的沉陷带内发育有一系列中生代火山岩的侵入。另外, 从构造上沉陷带内从北到南依次分布有顺义凹陷、来广营凸起、丰台凹陷、坨里—良乡凸起等次一级构造。航磁异常图上显示, 顺义以北展示一北东东向负异常应当是顺义凹陷基底构造的反映。来广营—顺义显示北东向异常带, 长 20 km, 宽 3~6 km, 一般强度在 150 nT 以上, 峰值在 200 nT 以上。推测这一异常反映的应是侏罗系火山岩侵入体, 也是来广营凸起基岩构造的反映。在异常带的西南部长辛店附近有一北东向宽缓正异常, 长 14 km、宽 6.5 km, 峰值为 70 nT。推测该正异常亦为白垩系之下, 中侏罗世火山岩的反映。在来广营正异常与长辛店正异常之间的北东向负场应当是丰台凹陷基底构造的反映。

以上是研究区内的主要磁场分布及地质构造特征。从航磁异常平面图上亦可看到, 各个异常区和不同地质构造单元之间通常以磁场线性边界或磁场梯度陡变带相隔, 这些特征往往反映为断裂存在的标志。在磁场平面图上还有几处表现为等值线的水平错动, 这是较

新断裂构造在磁场上的一种特殊标志。另外，某些基底张性断裂往往成为中生代火山岩脉侵入的通道，形成了类似串珠状的异常带。所以根据磁场的定性分析和地质资料的推断，大致确定出北京地区深浅部断裂有20多条（图1）^①。

其中，北东向断裂有：沿河城断裂、军响一下店断裂、西窑—阳坊断裂、高丽营—东北旺断裂、高丽营—黄庄断裂、顺义—良乡断裂、顺义—磁家务断裂、西坝河—宣武门断裂、顺义北—东沙屯断裂、青云店—牛堡屯断裂、南苑—通县断裂。

北西向断裂有：崔村—枯柳树断裂（或称小汤山断裂）、南口—孙河断裂、马池口—来广营断裂（或称沙河断裂）、清河—朝阳门断裂、朱各庄断裂、镇边城—四家山断裂。

南北向断裂有：西沙各庄—大红门断裂带、北苑—城东南角断裂、天竺—双桥断裂、板桥—黄山店断裂、顺义—牛栏山断裂。

东西向断裂有：万寿山—长店断裂、板桥—八宝山—通县断裂、长操南断裂及北安—坨里断裂。

对以上诸多断裂不再一一论述，我们只想把研究的目光聚焦到穿越北京市区的两条主要断裂，即顺义—良乡断裂和板桥—八宝山—通县断裂上。下面拟通过小波变换等数据处理方法对这两条断裂进一步研究。

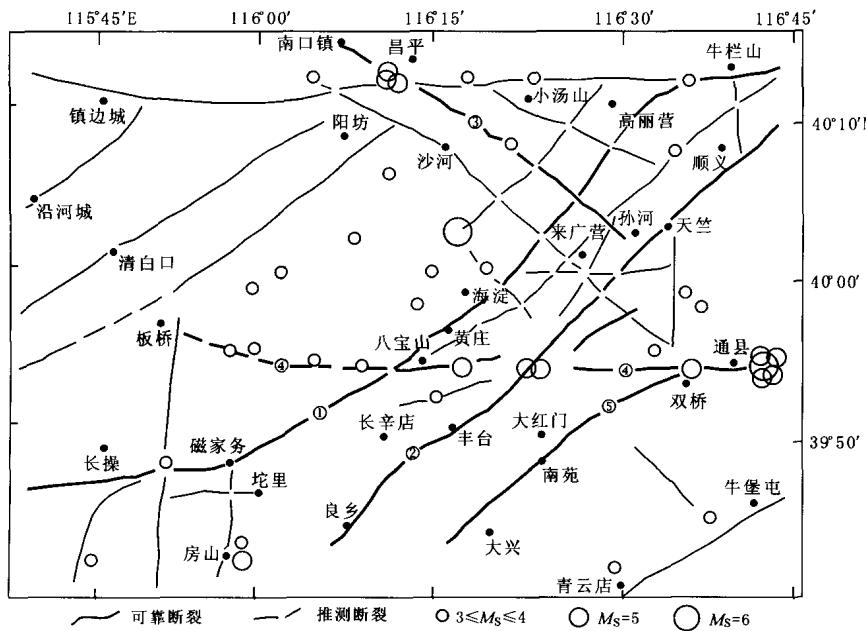


图1 北京地区断裂及震中分布图

- ① 高丽营—黄庄断裂；② 顺义—良乡断裂；③ 南口镇—孙河断裂；
- ④ 板桥—八宝山—通县断裂；⑤ 南苑—通县断裂

2 小波多尺度分解方法原理及数据处理简介

我们运用小波分析的原理对北京地区航磁异常进行多尺度分解（侯遵泽，杨文采，1997；高德章等，2000）。其基本原理如下：

^① 费鼎，成士兴. 1985. 北京地区航空磁测报告. 地质矿产部航空物探总队.

设 $\{v_j\}_{j \in Z}$ 是一个一维多尺度分析, 其尺度函数为 ϕ , 小波函数为 φ , 记 $v_j^2 = v_j \otimes v_j$, 则 $\{v_j^2\}_{j \in Z}$ 构成一个二维多尺度分析, 其尺度函数为

$$\Phi(x, y) = \phi(x)\phi(y) \quad (1)$$

小波函数为

$$\Psi^1(x, y) = \phi(x)\varphi(y) \quad (2)$$

$$\Psi^2(x, y) = \varphi(x)\phi(y) \quad (3)$$

$$\Psi^3(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (4)$$

设函数 $f(x, y) \in v_{J_1}^2$, 根据小波多尺度分解方法原理, 有

$$f(x, y) = A_{J_1} f(x, y) = A_{J_1+1} f(x, y) + \sum_{\epsilon=1}^3 D_{J_1+1}^\epsilon f(x, y) \quad (5)$$

这里

$$A_{J_1+1} f(x, y) = \sum_{m_1, m_2 \in Z} C_{J_1+1, m_1, m_2} \Phi_{J_1+1, m_1, m_2} \quad (6)$$

$$D_{J_1+1}^\epsilon f(x, y) = \sum_{m_1, m_2 \in Z} d_{J_1+1, m_1, m_2}^\epsilon \Psi_{J_1+1, m_1, m_2}^\epsilon \quad (7)$$

而

$$C_{J_1+1, m_1, m_2} = \sum_{k_1, k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} C_{J_1, k_1, k_2} \quad (8)$$

$$d_{J_1+1, m_1, m_2}^\epsilon = \sum_{k_1, k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} C_{J_1, k_1, k_2} \quad (9)$$

$$d_{J_1+1, m_1, m_2}^2 = \sum_{k_1, k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} C_{J_1, k_1, k_2} \quad (10)$$

$$d_{J_1+1, m_1, m_2}^3 = \sum_{k_1, k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} C_{J_1, k_1, k_2} \quad (11)$$

其中

$$h_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi\left(\frac{x}{2}\right) \sqrt{\phi(x-k)} dx \quad (12)$$

$$g_k = (-1)^{k-1} \bar{h}_{1-k} \quad (13)$$

对式(5)还可以继续分解, 分解到第 $J_2 - J_1$ 步, 有

$$f(x, y) = A_{J_2} f(x, y) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} \sum_{\epsilon=1}^3 D_j^\epsilon f(x, y) \quad (14)$$

$$A_j f(x, y) = \sum_{m_1, m_2 \in Z} c_{j, m_1, m_2} \Phi_{j, m_1, m_2} \quad (15)$$

$$D_j^\epsilon f(x, y) = \sum_{m_1, m_2 \in Z} d_{j, m_1, m_2}^\epsilon \Psi_{j, m_1, m_2}^\epsilon \quad (16)$$

$$j = J_1 + 1, \dots, J_2$$

假设二维航磁异常场为 $\Delta T(x, y) = f(x, y)$, 航磁异常分解表达式可简记为

$$\Delta T = A_4 G + D_1 G + D_2 G + D_3 G + D_4 G \quad (17)$$

式中, $D_1 G \sim D_4 G$ 为 1~4 阶小波变换异常细节, $A_4 G$ 为 4 阶小波变换异常逼近。本文中笔者依据上述小波多尺度分解方法原理对北京地区航磁异常进行了数据处理, 并对 1~4 阶小波变换细节进行了径向对数功率谱分析, 求取了其对应的场源深度(张昌达等, 1991), 结果见图 2a~d。

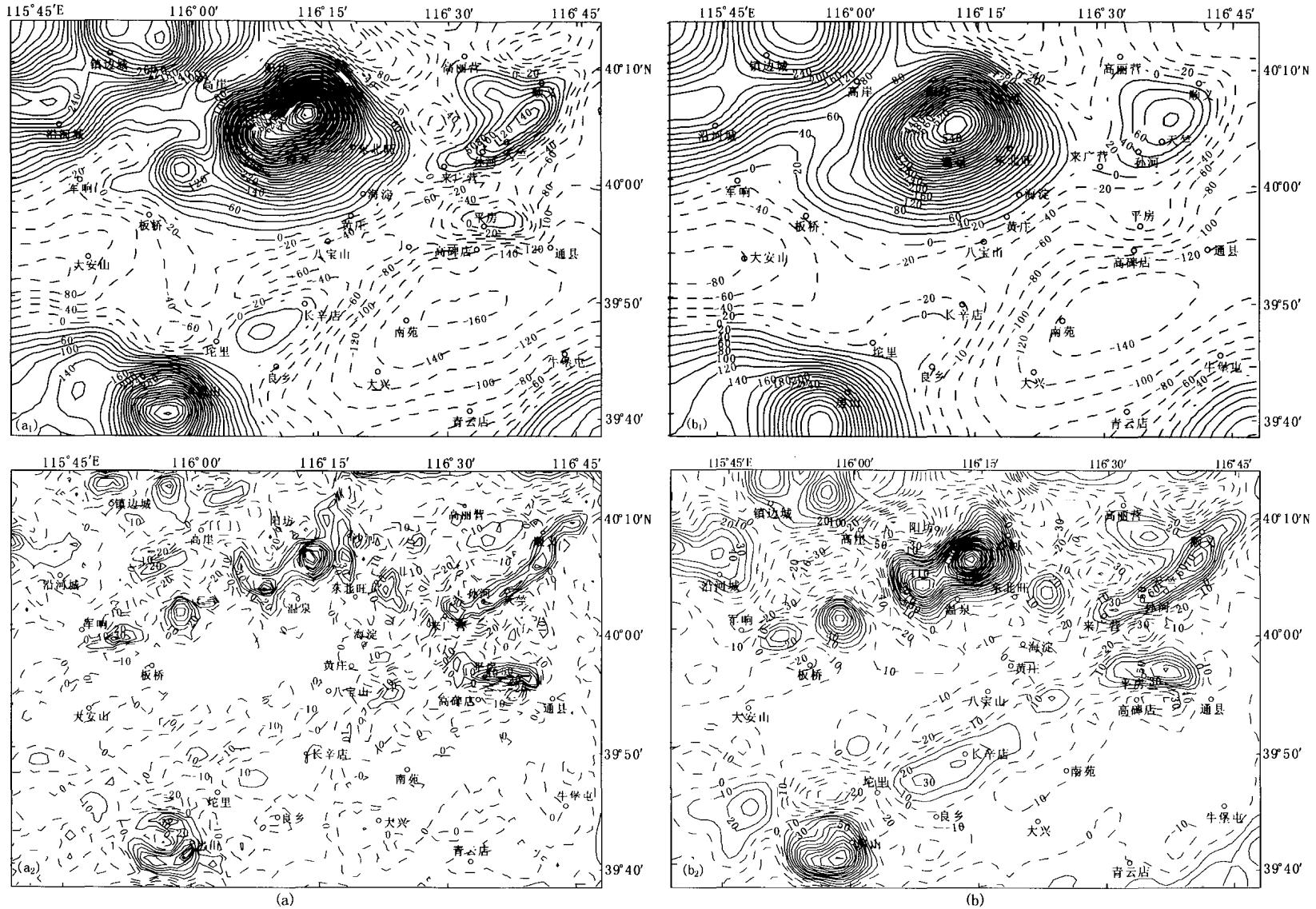


图 2a, b 北京地区航磁异常的多尺度分解. (a) 小波多尺度分解 1 阶逼近(a₁)和 1 阶细节(a₂); (b) 小波多尺度分解 2 阶逼近(b₁)和 2 阶细节(b₂)

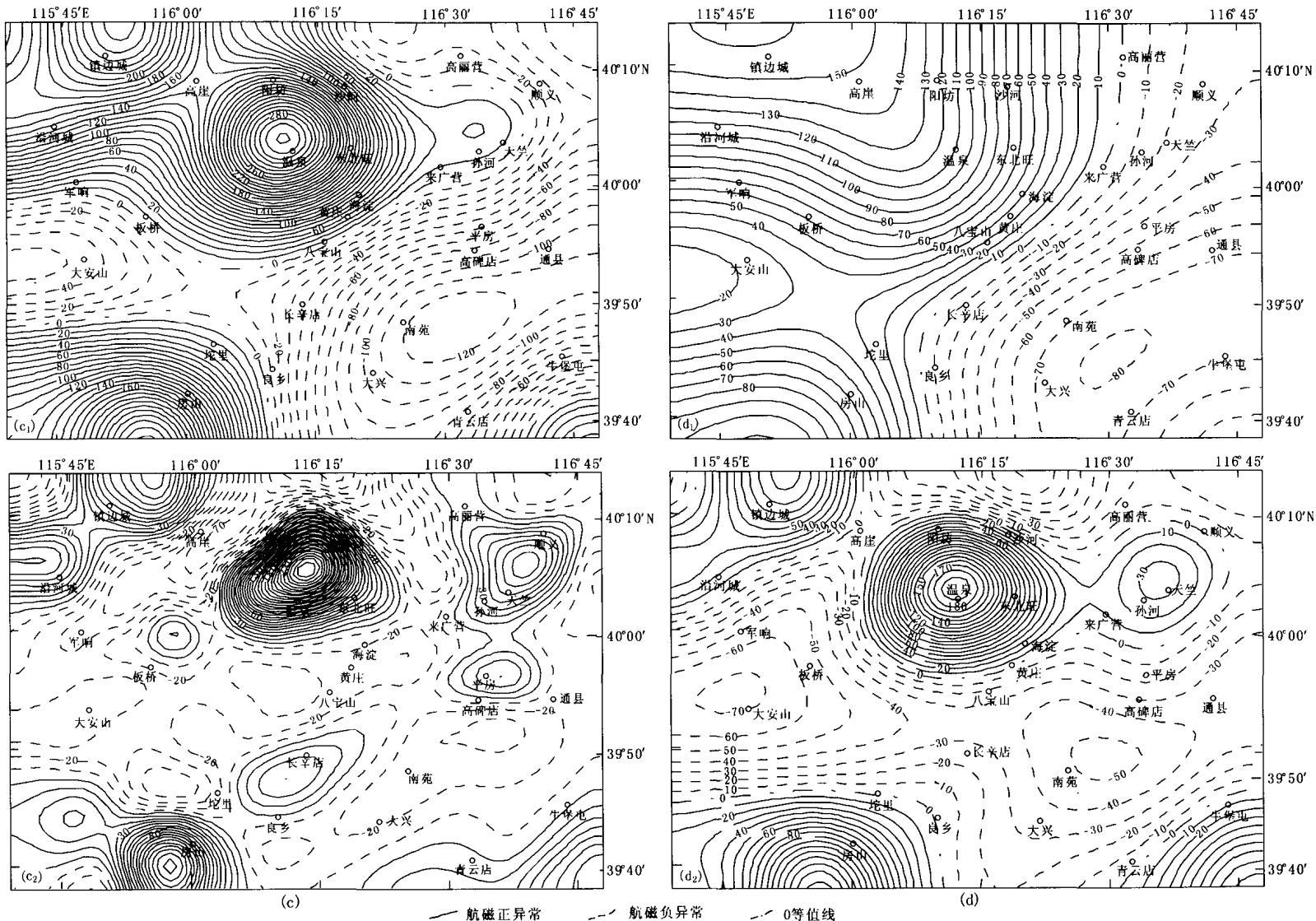


图 2c, d 北京地区航磁异常的多尺度分解. (c) 小波多尺度分解 3 阶逼近(c₁)和 3 阶细节(c₂); (d) 小波多尺度分解 4 阶逼近(d₁)和 4 阶细节(d₂)

3 结果分析与讨论

从北京地区航磁异常图经小波多尺度分解后, 得到了北京地区航磁异常的 1~4 阶逼近图(图 2a₁~d₁)和 1~4 阶细节图(图 2a₂~d₂)。1~4 阶逼近图反映了分解后相应的航磁区域场; 1~4 阶细节图则反映了分解后相应的航磁异常的局部场。从 1 阶细节图(图 2a₂)上看出异常圈闭尺度比较小, 分布离散, 杂乱而无规律, 功率谱分析 1 阶细节场源深度为 1.35 km(图 3)。它实际上大多是北京地区浅层火成岩侵入体的反映。1 阶逼近图实际上反映了滤掉浅层火成岩干扰后北京地区航磁异常的区域场。从 1 阶逼近图(图 2a₁)中我们发现, 穿越北京市区的两大断裂, 即北东向的顺义—良乡断裂及东西向的板桥—八宝山—通县断裂清晰可见。顺义—良乡断裂自顺义东侧沿北东方向南下, 穿越北京市区, 沿东南方向延伸直到良乡, 全程约 65 km。小波分解的 2, 3 阶细节图上这条北东向断裂仍清晰可辨, 4 阶细节图上该断裂不复存在。根据功率谱分析结果: 2 阶细节场源深度为 3.72 km, 3 阶细节场源深度为 8.23 km, 4 阶细节场源深度为 15.69 km(图 3)。说明这条断裂从地表一直向下延伸, 终止于 8.23 km 以下和 15.69 km 以上的深度。北京地区上地壳三维细结构层析成像研究结果表明, 这条断裂可能在 11 km 左右深度收敛(王夫运等, 2005)。本文的计算与这一结果基本一致。

从小波分解 2, 3 阶细节图上看, 通县向西进入北京市区有一条东西向断裂, 这条断裂先后被北东向的顺义—良乡断裂、顺义—磁家务断裂拦截, 并未向西延伸至八宝山和板桥。从 1978 年北京地震地质会战中绘制的 1/10 万地质构造图^①上看, 这条断裂从通县向西穿越北京市区, 在北京城西莲花池以北拐向东南方向, 并入了北东向的顺义—良乡断裂带内。但从小波分解的 4 阶细节图上(磁源深度为 15.69 km)清晰地显示, 通县—八宝山—板桥为一穿越北京市区的东西向断裂(图 2)。北京地区基底埋深大约为 2~4 km, 上地壳埋深约 12 km(孙武城等, 1988)。我们认为, 板桥—八宝山—通县这条东西向断裂是一条延深至中地壳的断裂, 但在浅层它整体埋深并不一致, 断裂东部埋藏较浅, 断裂西部埋藏较深, 其深部实际为一条东西贯通的深断裂。说明尽管北京地区北东、北北东向构造比较发育, 但它们只是在基底和上地壳的范围内占有优势, 在中地壳实际上还是古老的燕山东向构造起着控制作用。这条东西向深断裂的存在与否尚有待于人工地震测深的进一步验证。从历史地震的分布情况看, 北东向的顺义—良乡断裂历史上仅发生过 3~4 级地震 5 次; 而东西向的板桥—八宝山—通县断裂发生过 3~4 级地震 6 次, 5~6 级地震 8 次, 6~7 级地震 2 次。其中, 有两次 5 级地震发生在北京市区内。所以无论是地震的频度还是强度, 后者都比前者大得多。这也不难理解, 从计算功率谱结果看, 顺义—良乡断裂基本上属于上地壳断裂, 板桥—八宝山—通县断裂则属于中地壳断裂。而后者对地震的孕育作用及地震能量的聚积都显然大于前者。另外, 从北京地区地震发生的时间统计来看, 自 1057 年以来北京地区地震活动比较频繁, 仅 5 级以上地震就发生 6 次, 其中最短的时间间隔为 19 年, 最长时间间隔为 460 年, 平均时间间隔为 135 年。目前距上次北京西北郊的 6.5 级地震的发生已近 260 年。首都圈的优势震源深度为 10~12 km(高文学, 马瑾, 1993), 而上述贯穿北京市区的两条主要断裂均切割这个深度, 所以这两条断裂的存在与活动是北京市区

^① 北京市地震地质会战第二专题, 国家地震局地震地质大队. 1978. 北京地区构造与震中分布图.

地震安全的一大隐患。它们在首都地区地震预报和防震减灾工作中占据着至关重要的地位。因为断裂是构造上的薄弱地带，不仅是地震孕育、地应力集中和能量释放的场所，而且在周边地震发生时断裂带往往导致地震波振幅加大及振动时间的延长，同时地震波在地层中传播时遇到断层面会产生变异，发生复杂的折射、反射和衍射，从而造成地震运动的局部激化，大大加重地震灾害。

4 结语

利用航磁异常所以能够识别和分辨断裂，主要是因为在断裂两侧往往存在着一定的磁性差异；另外由于断裂错动产生的台阶式构造也会形成一定的磁异常。但由于深部断裂的磁异常频率较低、且尺度不大，又受到上覆盖层中高频磁异常的干扰，往往给我们的推断解释造成一定的困难。有时即使能够识别和分辨，对其空间分布状态也无从作出判断。譬如从北京地区航磁异常图结合地质资料，前人在进行定性解释中也推断了顺义—良乡断裂及通县—八宝山—板桥断裂^①，但对其下延深度及赋存状态却不得而知。为了解决这些问题费鼎和民士兴也曾做了延拓和滤波处理，而采用向上延拓和高通滤波虽然能够突出和反映深部构造的异常，但上层的磁场或多或少被保留下来，会对我们的推断解释造成影响。另外，上延高度及滤波参数与场源深度之间至今尚缺乏严格的数学关系，人们只是凭经验认为上延高度或滤波的波长越大反映的场源深度越深，且上延磁场图所反映的地质构造的深度，比上延高度值要小。仅此仍无法定量地确定深部断裂的空间分布。本课题采用小波分析的方法对北京地区航磁异常进行多尺度分解。不同尺度的细节异常突出了不同深度局部断裂构造的信息，我们又采用功率谱分析的方法求取了细节异常所反映的场源深度。这样就可以观察到深部断裂在不同深度的平面展布，了解其三维空间分布状况。研究结果及部分成果的人工地震测深方法的验证表明，这种方法较好地揭示了深部断裂的赋存状态，其计算精度可靠，较传统的延拓、滤波等航磁数据处理方法有更高的分辨率。我们期望本文的研究结果不仅能为北京地区地震预报及防震减灾工作提供科学依据，而且期待这种研究方法的运用能够为今后利用航磁资料研究深部构造方面有所启迪和帮助。

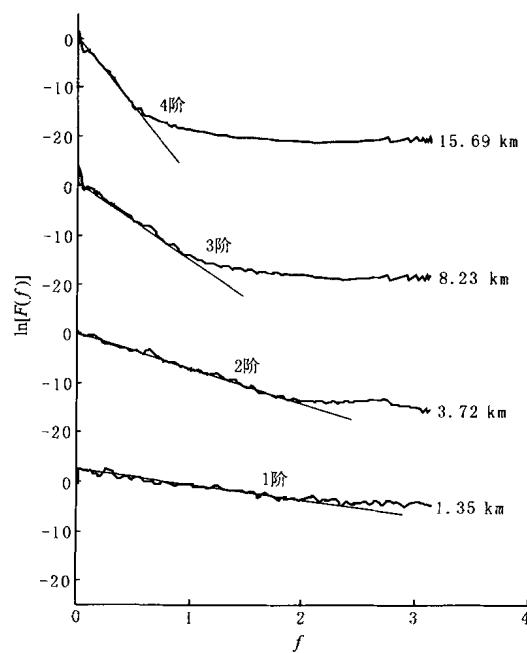


图3 北京地区航磁异常小波多尺度
分解1~4阶细节径向功率谱

参 考 文 献

鲍亦冈, 刘根锋, 王世发, 等. 2001. 北京地质百年研究[M]. 北京: 地质出版社, 215~255

^① 费鼎, 成士兴. 1985. 北京地区航空磁测报告. 地质矿产部航空物探总队.

- 高德章, 侯遵泽, 唐建. 2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解[J]. 地球物理学报, 43(6): 842~849
高文学, 马瑾. 1993. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京: 地震出版社, 52~129
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
孙武城, 祝治平, 张利, 等. 1988. 对华北地壳上地幔的探测与研究[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 中国大陆深部构造的研究与进展[C]. 北京: 地震出版社, 19~37
王夫运, 张先康, 陈祺福, 等. 2005. 北京地区上地壳三维细结构层分析成像[J]. 地球物理学报, 48(2): 359~366
张昌达, 刘天右, 曲赞. 1991. 磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 45~49

MULTI-SCALE WAVELET SEPARATION OF AERO-MAGNETIC ANOMALY AND STUDY OF FAULTS IN BEIJING AREA

Zhang Xian¹⁾ Zhao Li¹⁾ Liu Tianyou²⁾ Yang Yushan²⁾

1) Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

2) Institute of Geophysics and Geomagnetics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper, through a multi-scale separation of the aeromagnetic anomaly by using the wavelet transform technique, we reprocessed the aeromagnetic data in Beijing area and analyzed the aeromagnetic anomaly qualitatively, combined with the geological structure features in the area. In particular, we studied the spatial distributions of the two main faults called Shunyi-Liangxiang fault and Babqiao-Babaoshan-Tongxian fault which cross through the central Beijing area stricken in the NE and EW directions, respectively. The influences of these two faults on earthquakes have also been discussed in this paper briefly.

Key words: Beijing area; aeromagnetic anomaly; multi-scale separation; fault analysis