

北京地区主要活断层活动参数的重力反演*

董运洪, 刘 峡, 韩月萍, 杜雪松, 塔 拉

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 采用 1991 ~ 1999 年首都圈重力测网的重力测量资料, 根据地质调查结果确定断层初始运动模型, 利用稳健一贝叶斯最小二乘方法反演北京地区 4 条活断层的活动参数 (走滑、倾滑、引张)。反演结果表明: 在 1991 ~ 1999 年间, 北京地区活断层的运动性质均以走滑和垂直升降为主, 兼有伸展特征, 但运动速率都不大, 约为 2 mm/a。北京地区北西走向断层反演的运动特征为左旋走滑正断层, 北东走向断层反演的运动特征为右旋走滑正断层。

关键词: 首都圈重力测网; 活断层活动参数; 重力反演; 稳健一贝叶斯最小二乘法

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)03-0379-06

0 引言

地震的孕育、发生往往与活动断层的运动紧密相关, 因此, 活动断层及其定量化研究一直是地震研究的前沿和热点。长期以来, 地质学、地震学中开展断层现今活动的研究较多。地质学研究断层过去长期活动历史, 获得断层的地表特征, 得到以地质年代为单位的平均运动量; 地震学研究地震破裂的同震变化, 反映断裂活动瞬间过程。

断层运动既有深部物质的迁移运动, 又有浅部的位移运动, 前者引起局部密度的变化, 后者引起局部形状的变化, 二者都会引起局部的重力场变化 (白志明等, 1999)。近年来的理论和实际测量表明, 断层位错会引起断层周围的局部重力场变化, 利用局部重力异常可以反演断层地质活动参数 (Steketee, 1958; Okada, 1985; 高锡铭, 王威中, 1989; 黄建梁等, 1995; Okubo, 1991, 1992; Sun *et al.*, 1996; 申重阳等, 1996; 向文, 李辉, 1999)。高精度的重复重力测量能获取局部重力场的动态变化, 利用其测量结果反演断层的活动参数 (走滑、倾滑、引张), 可以定量化研究断层的现今运动过程 (黄建梁等, 1995; 向文, 李辉, 2000; 申重阳等, 2001; 谈洪波等, 2008)。

北京地区第四纪活动断层与第四纪凹陷的展布密切相关, 主要以 NE 和 NW 走向为主, 包括较大规模的断层 11 条, 其中 NE 走向 8 条, NW 走向 3 条。目前, 较普遍的观点是, 全新世仍然活动的断层主要是南口山前断层、黄庄—高丽营断层 (中北段)、南口—孙河断层和顺义—良乡断层 (北段) (邱泽华等, 2007)。本文利用首都圈重力测网 1991 ~ 1999 年的 9 期重复重力测量数据, 用稳健一贝叶斯最小二乘方法反演上述四条断层的活动参数 (走滑、倾滑、引张), 及其运动的时间变化分布特征。

1 基本原理

利用局部重力场变化反演断层活动参数, 可归结为一个断层位错反演问题。在利用局部重力异常反演断层活动参数时, 与断层运动无关的局部密度异常源都会对观测数据加以影响和干扰, 稳健估计着力于估值的实际抗干扰性和可靠性 (申重阳等, 2002), 所以本文采用稳健一贝叶斯最小二乘方法进行反演。

首先建立矩形位错模型 (图 1), 位错面长度为 L , 宽度为 W , 顶边埋深为 d , 倾角为 δ 。取断层走向为 X_1 轴的方向, 当 $0 < \delta < \pi/2$ 时, 用 U_1 ,

* 收稿日期: 2013-12-04.

基金项目: 地震行业科研专项 (201308009), 中国地震局地震科技星火计划 (XH12069) 和中国地震局地震研究所所长基金项目 (IS201166001) 联合资助。

U_2 和 U_3 分别代表断层上盘相对于下盘任意位错的走滑、倾滑和张性错动分量。各错动分量在整个断层面上假定是一致的, 断层顶部埋深可以是任意值。

设一反演工作坐标系 (图 2), 将其原点置于地面, x 轴指向正东, y 轴指向正北, 以断层顶部地表迹线 (或投影线) 中点标示断层的位置 $S(s_x, s_y, 0)$ (黄建梁等, 1998; 申重阳等, 2002)。则地面上任一点的重力布格异常可表示为

$$\Delta g_i = \Delta g(x, y, 0; U_1, U_2, U_3, \delta, L, W, dt, \alpha, s_x, s_y). \quad (1)$$

式中, x, y 为测点在反演坐标系中的坐标; dt 为断层顶部的深度, α 为断层坐标系 X_1 轴与 y 轴的夹角 (即断层的方位角)。

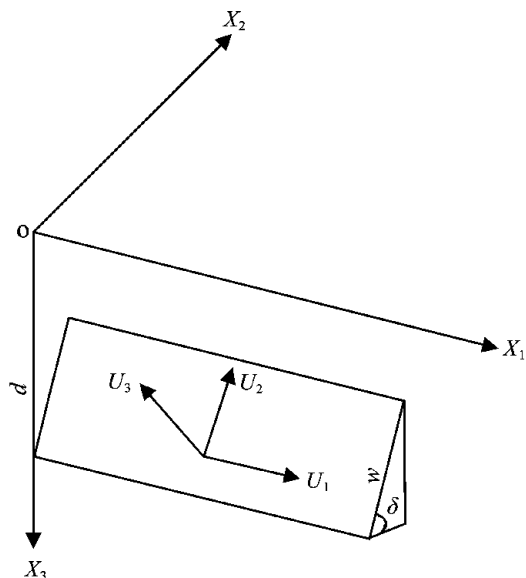


图 1 矩形断层位错模型

Fig. 1 Dislocation model of a rectangle fault

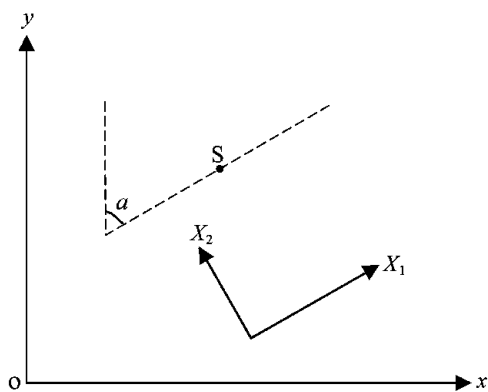


图 2 反演坐标系示意图

Fig. 2 Sketch map of coordinate system of the inversion

2 数据和反演结果

2.1 流动重力数据

首都圈流动重力监测网始建于 20 世纪 80 年代初, 主要目的是通过监测首都圈重力场的动态变化, 研究和跟踪首都圈强化监视区的地震活动, 并应用于该地区的地震预测。该测网的重力测量, 都是采用 LCR-G 型重力仪完成, 观测精度约为 $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。本文收集了首都圈地区 1991 ~ 1999 年 9 期流动重力测量资料, 资料观测时间分别是: 1991 年 5 月、1992 年 4 月、1993 年 2 月、1994 年 5 月、1995 年 5 月、1996 年 5 月、1997 年 5 月、1998 年 4 月和 1999 年 5 月。使用 LGADJ 软件 (中国地震局实用化攻关推广的应用软件) 对各期观测资料进行平差处理 (刘冬至等, 1991; 李辉, 1991), 采用以香山绝对重力点为起算点的经典间接平差方法。香山绝对重力点点位稳定, 外界干扰影响小, 有高精度的绝对观测值, 有利于提取监测区域内可靠的重力变化信息。需要说明的是所用各期重力资料, 均进行了地下水干扰改正处理。

2.2 活动断层初始模型

北京地区的活动断裂较为发育, 按其性质和展布方向主要分为北西向和北东向 (高文学, 马谨, 1993)。根据北京地区断层全新世活动特点及断层分布特征, 本文选取具有典型代表意义, 全新世仍然活动的北西向和北东向共 4 条断层作为研究目标, 具体为, 北西向断层 (南口—孙河断层) 和北东向断层 (南口山前断层北段 (琉璃庙—上口段)、黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段), 断层模型和重力测点的位置如图 3 所示。

北西向的南口—孙河断层属于张家口—蓬莱断裂带上的一个活动断裂, 是贯穿北京地区的一条主要构造活动带 (高文学, 马谨, 1993; 车兆宏, 1994)。北东向的南口山前断层为军都山隆起与京西丘陵平原区的分界断层, 在构造上处于北东向太行山构造带与东西向燕山构造带的交接部位, 深浅部的地质构造环境较为复杂, 是首都圈地区具有发震危险性的一条断层。黄庄—高丽营断层纵贯北京地区中部, 北起怀柔附近, 南至河北省的涞水, 长达 140 km, 走向 $N20^\circ \sim 30^\circ E$, 倾

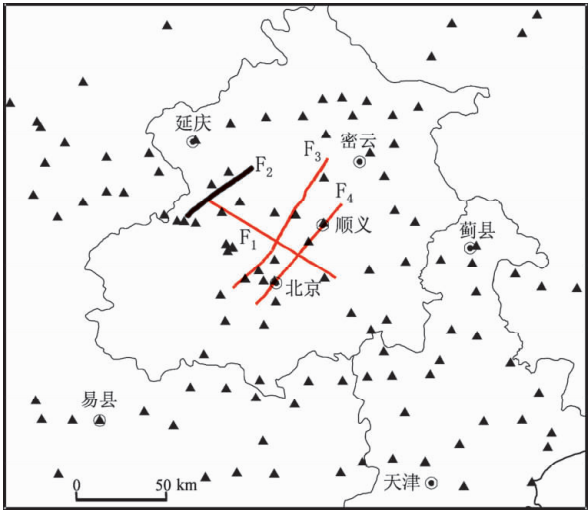
向 SE，倾角 $49^{\circ} \sim 68^{\circ}$ ，分为南段、中段和北段，主要表现为正断倾滑性质，中段和北段在全新世有活动的痕迹（焦青等，2005，2006；高战武等，2010），南段和中北段基本以 NW 向的永定河断裂为界，本文研究该断层的中北段。顺义—良乡断裂是北京拗陷内部一条长达 100 km 的规模较大的断裂，总体走向 $N25^{\circ} \sim 30^{\circ}E$ ，倾向 SE，倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，断距达数百米至 1 000 m 以上，表现为倾

滑正断运动（林传勇等，2006；高战武等，2010）。它大致以 NW 向的永定河断裂为界，分南、北两段。北段经北京城区，向 NE 延伸到顺义城北牛栏山，沿潮白河至密云甲山一带，80 km，本文研究该断层的北段。

综合地质研究成果，给出本文所研究的 4 条反演断层的简化初始模型和运动参数（表 1），断层宽度均假设为 30 km。

表 1 活动断层模型及初始运动参数
Tab. 1 Initial motion parameters of the active faults model

断层	长度/km	宽度/km	走向/ $^{\circ}$	倾向倾角/ $^{\circ}$	U_{10}/mm	U_{20}/mm	U_{30}/mm
南口—孙河断层	75	30	NW50	SW70	+2.0	-2.0	+1.0
南口山前断层北段	35	30	NE45	SE60	-2.0	-2.0	+1.0
黄庄—高丽营中北段	80	30	NE30	SE60	-2.0	-2.0	+1.0
顺义—良乡断层北段	50	30	NE30	SE65	-2.0	-2.0	+1.0



F_1 ：南口—孙河断层； F_2 ：南口山前断层北段（琉璃庙—上口段）；
 F_3 ：黄庄—高丽营断层中北段； F_4 ：顺义—良乡断层北段

图 3 断层模型和重力网点分布图（红色实线代表断层，三角形代表重力测点）

Fig. 3 The model of faults and the distribution of gravity network (the red solid lines denote fault segments, the triangles represent gravity measurement points)

2.3 反演结果

理论分析和经验计算表明，位错引起的重力变化随测点距断层的距离衰减很快，在与断层相距 1.5 倍断层长度的位置，重力变化已经很小（黄建梁等，1998），本文按照这个原则选取参加反演的重力点。4 条断层参加反演的重力点个数具

体为：南口—孙河断层共 58 个重力点，南口山前断层北段共 15 个重力点，黄庄—高丽营中北段共 37 个重力点，顺义—良乡断层北段共 38 个重力点。本文研究的是断层的运动特征，所以只对断层活动参数 U_1 ， U_2 ， U_3 进行反演，断层参数初值如表 1 所示。使用稳健—贝叶斯反演方法和首都圈重力测网 1991 ~ 1999 年的重复重力数据，反演得到南口—孙河断层、南口山前断层北段（琉璃庙—上口段）、黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段的运动参数，反演结果示于表 2（时间单位为 a ， U_1 、 U_2 、 U_3 的单位为 mm）。以 1991 年为基期，各断层运动的时间变化结果见图 4。

地质调查数据表明，南口—孙河断层走向为 $NW50^{\circ}$ 左右，倾向为 $SW70^{\circ}$ （高文学，马谨，1993；车兆宏，1994；焦青等，2005；高战武等，2010）。从反演结果得到的南口—孙河断层运动的时间滑动图（图 4a）可看出，走滑分量 U_1 的值为正，表示断层的上盘相对于下盘向南东（SE）方向运动，即断层是左旋运动；倾滑分量 U_2 的值为负，表示断层的上盘相对于下盘向南西（SW）方向运动，即断层是正断层运动；拉张分量 U_3 运动方向为正，但较小，代表断层做较弱的拉张运动。综上分析，用重力资料反演所得，1991 ~ 1999 年，南口—孙河断层运动性质以左旋走滑和倾滑为主，是兼有拉张运动的正断层。

表 2 活动断层运动参数反演结果

Tab. 2 Inversion results for motion parameters of active faults

时间	南口—孙河断层			南口山前断层			黄庄—高丽营中北段			顺义—良乡断层北段		
	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
1992	1.66	-2.07	1.1	-1.96	-2.05	1.04	-1.68	-2.12	1.34	-1.79	-2.24	1.44
1993	1.92	-1.91	0.74	-1.92	-1.82	0.79	-1.85	-1.69	0.52	-2.1	-1.84	0.70
1994	1.92	-1.77	0.62	-1.75	-1.79	0.83	-1.10	-1.25	1.48	-2.21	-1.72	0.62
1995	1.86	-1.92	0.95	-1.66	-2.10	1.12	-2.14	-1.71	0.32	-2.33	-1.53	0.19
1996	1.76	-2.09	1.29	-1.6	-2.32	1.28	-1.77	-2.45	1.64	-2.02	-2.35	1.73
1997	2.31	-2.01	1.10	-2.19	-2.31	1.22	-2.2	-2.19	1.25	-1.76	-1.97	0.98
1998	1.63	-2.05	1.08	-1.75	-2.08	1.07	-1.54	-1.75	1.16	-1.86	-2.13	1.34
1999	2.43	-2.04	1.02	-2.37	-2.13	1.12	-2.55	-2.08	0.81	-2.16	-1.74	0.57

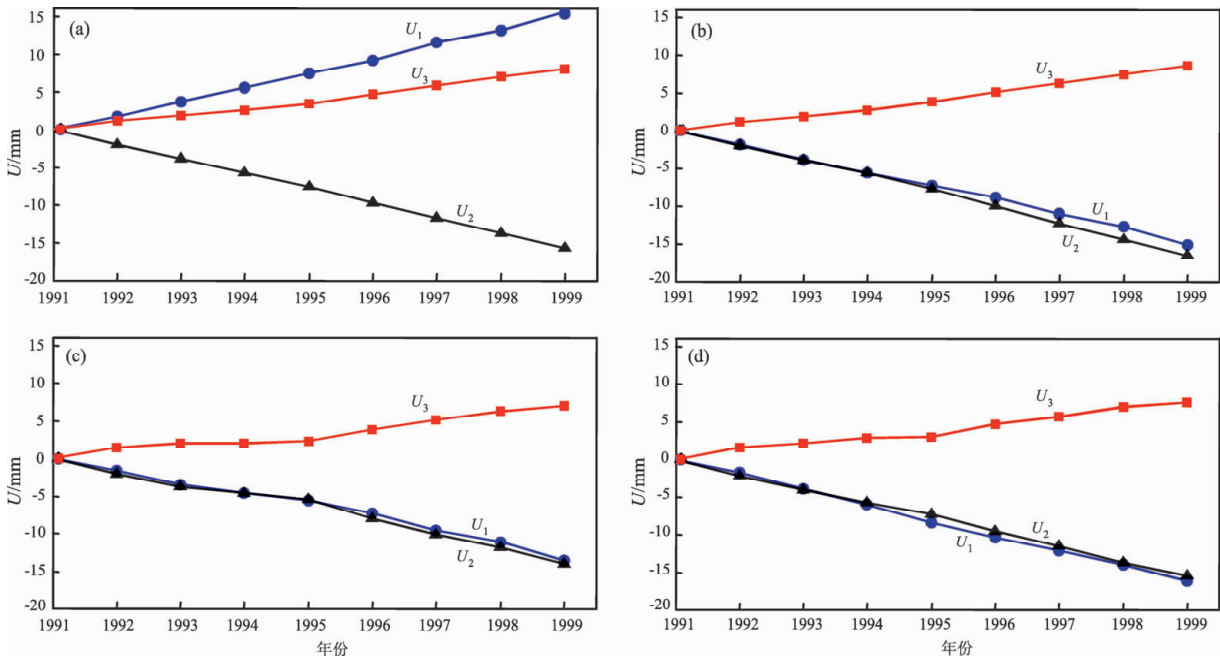


图 4 断层运动的时间滑动图 (U_1 走滑, U_2 倾滑, U_3 张性)

(a) 南口断层; (b) 南口山前断层北段; (c) 黄庄—高丽营断层中北段; (d) 顺义—良乡断层北段

Fig. 4 The time slip distribution of faults movement (U_1 : strike-slip, U_2 : dip-slip, U_3 : tensile-dislocation)

(a) Nankou Fault; (b) the north segment of Nankou-Shanqian Fault; (c) the middle and north segments of Huangzhuang-Gaoliying Fault; (d) the north segment of Shunyi-Liangxiang Fault

地质调查数据表明, 南口山前断层北段的走向为 NE45°, 倾向为 SE60° (高文学, 马谨, 1993; 焦青等, 2005)。由反演结果得到的南口山前断层北段运动的时间滑动图 (图 4b) 可以看出, 走滑分量 U_1 的值为负, 表示断层的上盘相对于下盘向南西 (SW) 方向运动, 即断层是右旋运动; 倾滑分量 U_2 的值为负, 表示断层的上盘相对于下盘向南东 (SE) 方向运动, 即断层是正断层运动; 张性运动 U_3 运动方向为正,

但数值较 U_1 、 U_2 小, 表示断层有较弱的拉张运动。综上分析, 重力资料反演所得, 南口山前断层北段反演的运动性质以右旋走滑和倾滑为主, 是兼有拉张运动的正断层。同样从图 4c、d 可以得出黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段反演所得到的断层运动性质与南口山前断层北段的运动性质一致, 即黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段的运动性质均为以右旋走滑和倾滑为主, 是兼有拉张运动的正断层。

3 讨论和结论

本文采用稳健—贝叶斯最小二乘方法,利用首都圈重力测网1991~1999年重力异常数据,反演获得了北京地区具有代表意义的北西向断层(南口—孙河断层)和北东向断层(南口山前断层北段、黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段)的活动参数的时间滑动分布。主要讨论和结论为:

(1) 本文利用重力异常数据反演北京地区断层运动特征为:北东向断层(南口山前断层北段、黄庄—高丽营断层中北段和顺义—良乡断层北段)为右旋走滑兼正断运动,北西向断层(南口—孙河断层)为左旋走滑兼正断运动。反演所得4条断层的运动性质与华北块体所受北东东—南西西向主压构造应力(陈连旺等,1999;曹学伟等,2010)作用效果一致。

(2) 在1991~1999年期间,本文反演研究的4条断层运动性质均以垂直升降和走滑为主,兼有伸展特征,但运动速率都不大,约为2 mm/a。申重阳等(2001)利用GPS数据反演华北断层,给出的结果为:华北地块区主要断裂带的走滑运动速率介于0.03~3.2 cm/a之间,主体分布1.0~2.0 cm/a;其倾滑运动速率介于0.9~8.3 cm/a之间,主体分布1.0~2.8 cm/a,一般大于走滑运动速率;其张裂运动速率介于0.04~3.5 cm/a之间,主体分布0~0.8 cm/a,华北地块区主要断层现今运动是以垂直升降运动为主,兼有走滑、伸展特征。郭良迁等(2003)利用跨断层资料研究结果显示,北京地区断层的水平形变平均速率为2.48 mm/a。比较可得,本文利用重力数据反演的结果与经典大地测量研究结果很相近,这表明本文的反演结果是正确的。

(3) 采用稳健—贝叶斯最小二乘方法,以地质调查资料为基础,使用重力异常数据,反演得到断层活动参数,为量化研究断层现今运动特征提供了一种新方法,随着重力资料观测精度的进一步提高,可望获得更好的结果。

本文利用重复重力数据,使用稳健—贝叶斯最小二乘方法反演断层的活动参数,初步得到断层现今的运动特征,其中存在的问题:该方法需

要有地质调查资料或其它大地测量结果为反演断层给定初值并进行限定约束。因为稳健—贝叶斯最小二乘方法是局部反演算法,只有给定合适的初值和限差(或先验方差),才能较好的收敛,得到较好的反演结果。如何减少反演对初值的依赖性,增强反演结果的稳定性和实用性,有待进一步深入研究。

参考文献:

- 白志明,王椿镛,申重阳.1999.不同产状断层错动的地表重力变化和形变[J].地震学报,21(6):634~641.
- 曹学伟,石杏喜,刘仲秋.2010.大地测量反演华北地区构造应力场[J].测绘通报,(5):42~44.
- 车兆宏.1994.南口—孙河断层活动性研究[J].地震地质,16(2):114~120.
- 陈连旺,陆远忠,张杰,等.1999.华北地区三维构造应力场[J].地震学报,21(2):140~149.
- 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.
- 高锡铭,王威中.1989.表面垂直位移和重力变化引起的大地水准面形变[J].地球物理学报,32(6):686~694.
- 高战武,陈棋福,黄金莉,等.2010.北京地区主要活动断裂深部速度结构特征及强震构造分析[J].震灾防御技术,5(3):271~280.
- 郭良迁,薄万举,杨国华.2003.华北地区断裂带的现代形变特征[J].大地测量与地球动力学,23(2):29~36.
- 黄建梁,李辉,李瑞浩.1995.点源位错引起的重力、位势及其梯度变化[J].地震学报,17(1):72~80.
- 黄建梁,申重阳,李辉.1998.断层地质位错模型的局部重力异常稳健反演分析[J].地震学报,20(1):86~95.
- 焦青,邱泽华,范国胜.2005.北京地区八宝山—黄庄—高丽营断裂的活动与地震[J].大地测量与地球动力学,25(4):50~54.
- 焦青,邱泽华.2006.北京平原地区主要活动断裂带研究进展[A]//中国地震局地壳应力研究所.地壳构造与地壳应力文集(18)[M].北京:地震出版社,72~84.
- 李辉.1991.地震重力监测网统一平差模型的建立[J].地壳形变与地震,11(增刊):68~74.
- 林传勇,陈孝德,罗华春,等.2006.北京顺义—前门—良乡断裂探槽的微观分析及其启示[J].地震地质,28(4):561~577.
- 刘冬至,李辉,刘绍府.1991.流动重力测量数据处理系统—《LG-ADJ》[M].北京:地震出版社,339~350.
- 邱泽华,唐磊,阚宝祥,等.2007.用钻孔应变观测研究北京地区活断层的现今活动[J].地震地质,29(4):716~728.
- 申重阳,吴云,王琪,等.2002.云南地区主要断层运动模式的GPS数据反演[J].大地测量与地球动力学,22(3):46~51.
- 申重阳,吴云,杨少敏,等.2001.华北地块内部主要断层运动模型的GPS数据反演分析[J].地壳形变与地震,21(4):33~42.
- 申重阳,朱思林,蒋福珍,等.1996.重力和形变资料联合反演地壳密度时间变化的一种方法[J].地壳形变与地震,16(3):14~21.

- 谈洪波,申重阳,李辉. 2008. 断层位错引起的地表重力变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,28(4):54-62.
- 向文,李辉. 1999. 重力场与构造应力场内在关系的理论研究[J]. 地壳形变与地震,19(1):32-36.
- 向文,李辉. 2000. 活动断层运动的重力场反演[J]. 地壳形变与地震,20(3):11-16.
- Okada Y. . 1985. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half space[J]. Bull. Seism. Soc. Am. ,75:1135-1154.
- Okubo S. . 1991. Potential and Gravity Changes Raised by Point Dislocation[J]. Geophys J. Int. ,105:573-586.
- Okubo S. . 1992. Gravity and Potential Changes due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. J. Geophys. Res. ,97:7137-7144.
- Steketee J. A. . 1958. On Volterra's Dislocations in a Semi-infinite Elastic Medium[J]. Can. J. Phys. ,36:192-205.
- Sun W. ,Okubo S. ,Petr V. . 1996. Global Displacements caused by Point Dislocations in a Realistic Earth Model[J]. Journal of geophysical research,101(B4):8561-8577.

Gravity Inversion of Active Parameters of Main Active Fault in Beijing Area

DONG Yun-hong, LIU Xia, HAN Yue-ping, DU Xue-song, TA La
(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract

Using the repeated gravity data of the Capital Circle Gravity Network from 1991 to 1999, combined with the initial movement model of the fault determined by geological investigation results, we invert the active parameters (strike-slip, dip-slip and tensile-dislocation) of four active faults in Beijing area by Robust-Bayesian least-square estimation method. The inversion results show that the active fault in Beijing was dominated by strike and slip and vertical lifting motions with extension motion from 1991 to 1999, however their movement rates were small which were about 2 mm/a. The inversed movement characteristic of the faults in NW trend are sinistral strike-slip normal fault, and the faults in NE trend are dextral strike-slip normal fault.

Key words: Capital Circle Gravity Network; active parameters of the active fault; gravity inversion; Robust-Bayesian least-square estimation