

直立断层平动和旋转运动引起的重力变化^{*}

段虎荣, 崔进业

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要:以断层下盘左端点为旋转基点, 定义断层扭张 (W_1)、扭转 (W_2)、扭翘 (W_3) 3 种旋转模式, 将其与断层走滑 (U_1)、倾滑 (U_2)、张裂 (U_3) 3 种平移模式相结合共同描述断层在空间中的运动。利用三维角点法计算直立断层平移和旋转在不同组合模式下引起的地表同震重力变化。结果表明: 断层在单一转动模式下产生的重力变化分布以断层为轴线对称分布, 断层在同一转动模式与不同平移模式组合的重力变化的响应程度不同。当断层处于 W_1 转动模式时, 与 U_2 平移组合模式引起的重力变化最为显著; 当断层处于 W_2 转动模式时, 与 U_3 平移组合模式的重力变化最为显著; 而断层在转动 W_3 模式时, 与 U_3 平移组合模式的重力变化分布形态由 U_3 模式向外扩张运动原因所致。断层在混合转动与混合平动组合运动模式下引起的地表重力变化分布, 其主体分布与混合转动模式的分布一致, 同时呈现出混合平动模式的响应。

关键词: 平移断层; 旋转断层; 重力变化; 三维角点法

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0474-08

0 引言

近年来频繁的大地震给人类的生命和财产安全带来极大威胁, 尽管人们对于地震的成因还没有完全的认识, 但是大地震与活断层之间的关系一直倍受关注, 也日益明显。学者们利用位错理论很好地解释了许多地面平移现象 (Ben-Menahem *et al.*, 1969, 1970; Lee, 1929)。然而, 地壳旋转运动也是一个普遍现象。1897 年印度西隆特大地震后, Oldham (1899) 观察到 George Inglis 纪念碑相对基座旋转了 15° 。Reid (1910) 研究了 1906 年旧金山地震产生的旋转效应, 观察到大角度旋转有可能不是由经典弹性理论中地震 a 波旋转分量的传播所造成的, Todorovska 和 Trifunac (1990) 对上述旋转效应作了新的分析, Lee (1929) 首次在中国发现了地壳旋转结构。

目前位错理论虽然能够成功地解释一些地壳形变的实际现象, 但是单纯的位错理论难以解释区域地壳转动现象, 而断层向错理论能够对位错理论进一步补充和完善。与向错相关的研究初步成果有: 用立体投影表示旋转断层、矩形向错环

的应力场分布、GPS 及应力场与块体旋转的关系等 (Ding *et al.*, 1987; Lin, 1957; 许才军等, 2000; Xie, 2004)。从模型上, 武艳军 (2013) 和张永志等 (2013) 推导了无限弹性介质空间内断层转动与地面水平位移、垂直位移的关系, 并结合向错-位错模型在渭河盆地进行了试验计算研究 (Li, *et al.*, 2012; Okabe, 1979)。关于断层与重力方面的研究, 许多学者做了大量有意义的工作, 利用重力资料识别断裂构造已有的许多成功事例, 更为接近实际的断裂构造模型可用 2 个铅垂台阶或 2 个倾斜台阶的组合来逼近。段虎荣等 (2015, 2016) 利用直立长方体模型、三维角点法模拟断层走滑、倾滑、张性运动模式分别引起的重力变化分布, 并与 Okada 位错模型计算结果对比分析 (Okubo, 1989)。随着空间测地技术的发展, 获取的地面变形场及重力数据的分辨率和精度都越来越高, 迫切需要从三维空间运动学角度来精细描述空间运动状态, 以便更准确地解释地表观测结果。上述学者对断层的空间运动学的研究, 大多数局限于单纯平动模式或者单纯转动模式, 鉴于此, 笔者将研究断层的三维空间平动和转动与地表重力变化的关系。

^{*} 收稿日期: 2016-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金 (41304013, 51674195) 与西安科技大学博士基金 (2014QDJ054) 联合资助。

1 基本理论与方法

1.1 三维角点法计算三度体运动引起的重力变化

从理论上讲，对任意形状的三度体，只要它满足一定的条件，就可以由许多四面体来逼近，若误差保持在一定的范围内，其逼近程度取决于划分的四面体多少与角点的取法。下面主要讨论四面体运动产生的重力变化计算。设四面体 ABCD 在 XYZ 坐标系坐标已知（图 1），根据位基础理论，则坐标原点 O 处的重力异常的计算如式（1）所示。

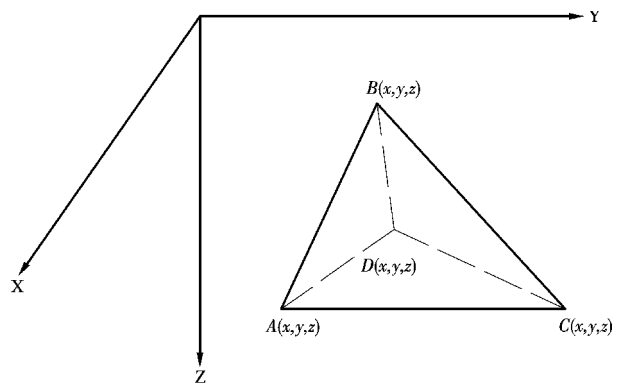


图 1 任意四面体的示意图
Fig. 1 Schematic representation of an arbitrary tetrahedron

$$\Delta g = G\sigma \iiint_V \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dy dz \tag{1}$$

式中：G 为万有引力常数，σ 为四面体的剩余密度，利用高斯公式，式（1）可变为：

$$\iiint_V \frac{\partial R}{\partial z} DV = \iint_S R \cos\phi \tag{2}$$

将式（1）的体积分变成包围该物体的表面积分，式中：ds 为面积元；cosϕ 为面积元 ds 的外法线与 Z 轴之夹角的余弦。将式（2）左端与式（1）对比可知：

$$\frac{\partial R}{\partial z} = \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \tag{3}$$

$$R = \int \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dz = \frac{-1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \tag{4}$$

将式（4）代入到式（2），并考虑式（1）有：

$$\Delta g = G\sigma \iint_S \frac{-1 \cos\phi}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} ds = G\sigma \sum_{i=1}^n \phi_i \cdot I_i \tag{5}$$

$$I_i = \iint_{S_i} \frac{-1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} ds \tag{6}$$

式中：n 为四面体的三角形个数；ϕ_i 为第 i 个三角形的外法线与 Z 轴之夹角；S_i 为第 i 个三角形的面积。若四面体 ABCD 在空间进行平移或者转动后，其在坐标系中为另外一个四面体 A'B'C'D'，根据式（5）可以计算四面体运动前后产生重力变化：

$$dg = \Delta g - \Delta g' \tag{7}$$

1.2 直立断层转动引起的重力变化

在普遍情况下，断层在空间的运动可能是通过断层上盘相对下盘的空间平动同时又相互转动角度的方法形成的，这样的线性组合既具有断层平动的特征，又有断层转动的特征。在经典的位错理论中，描述断层平动是 Okada 位错模型。断层位错引起的地面重力变化可表示关于平动分量为参数的函数，这里不再详述。本文采用 2 个直立长方体来模拟断层的上下两盘，建立三维空间直角坐标系来描述断层，如图 2 所示，定义断层走向为 X 轴，垂直于断层走向为 Y 轴，Z 轴垂直于地面并规定向下为正。本文选择断层底部左端点为旋转基点，过旋转基点且平行各坐标轴的直线为旋转轴，当断层在 XY 平面上的转动为 W₁，在 XZ 平

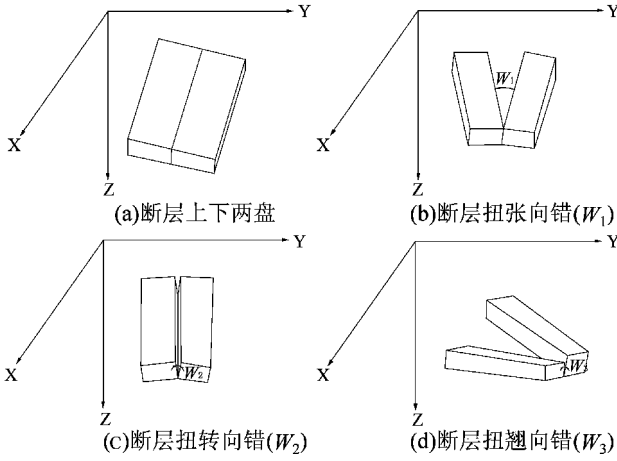


图 2 直立断层模型描述断层转动示意图
Fig. 2 The disclination described by a vertical fault model

面上的转动为 W_2 ，在 YZ 平面上的转动为 W_3 ，则断层向错引起的地面重力变化可表示为 $F = f(w_1, w_2, w_3)$ 。为方便描述，用 U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示断层的走滑、倾滑、张裂等平移运动，用 W_1 、 W_2 、 W_3 分别表示断层的扭张、扭转、扭翘等转动运动，下同。

在图 2 中设断层上盘、下盘几何结构均可视为一空间六面体，当断层几何参数长度 $Length$ 、宽度 $Wide$ 、深度 $Depth$ 、走向 α 、倾角 δ 被给定后，断层的上下盘在空间描述的角点为 P_{L1} ， P_{L2} ， P_{L3} ... P_{L8} ， P_{R1} ， P_{R2} ， P_{R3} ... P_{R8} ，可将断层的上下盘分别分解为 4 个四面体来代替，则地面观测点 P 的重力值 g_A ，可根据 (5) 式计算；当断层上下盘旋转角度 W 后，首先确定旋转后的断层上下盘角点坐标，其次根据 (5) 式计算观测点 P 的重力值 g_B ，则断层旋转前后观测点 P 的重力变化为：

$$\Delta g = g_B - g_A \tag{8}$$

由于断层上、下盘的顶点坐标是关于长度 $Length$ 、宽度 $Wide$ 、深度 $Depth$ 、走向 α 、倾角 δ 等参数的函数， W_1 ， W_2 ， W_3 为断层转动分量，故断层转动引起的重力变化如下：

$$\Delta g = F(length, Wide, Depth, \alpha, \delta, W_1, W_2, W_3) \tag{9}$$

2 直立断层转动产生的重力变化数值模拟

2.1 试验设计参数选取

为了直观理解和认识由断层转动引起的地表同震重力变化的影响，假设在弹性半无限空间均匀介质中进行直立断层的数值模拟实验。设计介

质密度为 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ ，介质泊松比为 $\nu = 0.25$ ，自由空气重力梯度 $\beta = 0.309 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，取单条断层参数为：断层左端点坐标 ($X = 2.5 \text{ km}$ ， $Y = 0.0 \text{ km}$)，断层长度 $L = 5 \text{ km}$ ，断层宽度 $W = 5 \text{ km}$ ，断层顶部到地表垂直距离为 $Depth_1 = 1 \text{ km}$ 。断层方位角 $\alpha = 90^\circ$ ，断层倾角 $\delta = 90^\circ$ ，断层的三维旋转参数理论值为 $W_1 = 0.1^\circ$ ， $W_2 = 0.1^\circ$ ， $W_3 = 0.1^\circ$ ，计算点取值范围 ($-5 \text{ km} \leq X \leq 15 \text{ km}$ ， $-10 \text{ km} \leq Y \leq 10 \text{ km}$) 间隔为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ，共计 441 个计算点。

2.2 断层单一模式产生的重力变化

绘制断层单一模式转动产生的重力变化图，见图 3。图中横纵轴分别表示地面点所处的空间 (单位：km)，等值线为断层转动引起的重力变化分布场，黑色线条为断层位置。如图 3a 所示，断层在扭张 (W_1) 转动模式引起的重力变化场呈现以断层走向为轴的对称的扇形分布，重力变化的数值可解释为拉张区域物质向外侧流出导致重力减小，而压缩区域物质流入导致重力变化增加，重力变化值区域为 $[-240, 20] \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。图 3b 为断层在扭转 (W_2) 模式引起的重力变化场呈现以断层走向为轴的对称分布，同样可用压缩区域物质流入重力变化值增大解释，重力变化值区域为 $[-360, 80] \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。图 3c 为断层在扭翘 (W_3) 模式引起的重力变化，以断层左端点为中心表现出四象限分布，其中在断层右端区域的重力变化明显强于左端区域，左端区域的重力变化为右端区域补偿效应，重力变化值区域为 $[-110, 110] \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。断层在扭张 (W_1)、扭转 (W_2) 所产生的重力变化呈现以断层为轴线的对称分布，而扭翘 (W_3) 转动模式下所产生

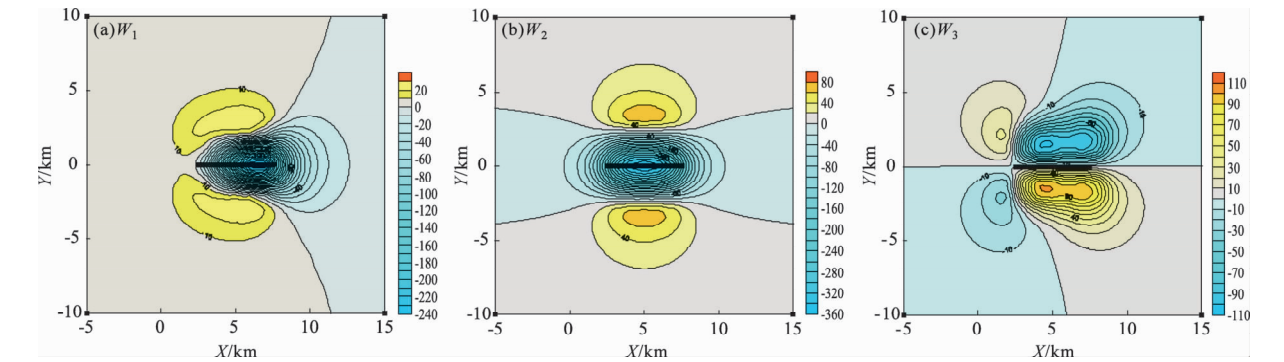


图 3 断层单一模式转动引起的地面重力变化 (单位： 10^{-8} m/s^2)

Fig. 3 Gravity changes caused by single rotational movement mode (unit: 10^{-8} m/s^2)

的重力变化均呈现以断层为轴线的负对称分布。3种模式均可通过拉张区域物质向外侧流出导致重力减小，而压缩区域物质流入导致重力变化增加。

2.3 混合模型断层的转动产生的重力变化

绘制断层的组合转动引起的地表重力变化图，见图4。图中 W_{12} 模式为 W_1 、 W_2 组合模式， W_{13} 模式为 W_1 、 W_3 组合模式， W_{23} 模式为 W_2 、 W_3 组合模式， W_{123} 模式为 W_1 、 W_2 、 W_3 组合模式。图4a为断层在 W_{12} 模式引起的地面重力变化分布，沿断层走向对称，但相较于单一模式的 W_1 和 W_2 重力变化量值增加，整体呈现 W_2 模式的特征。图4b为断层在 W_{13} 模式引起的地面重力变化的特征，也表现出对 W_1 和 W_3 特征的继承性，重力变化分布的对称性不够明显，但四象限分布依然存在，其

中二、四象限的重力变化值为正，一、三象限的重力变化值为负，其对应于 W_3 模式。图4c为断层在 W_{23} 模式引起的地表重力变化分布，其变化幅度均大于单一模式，表现出了非对称性，从顺着断层方向自左向右看去，重力场变化为负值的区域向左扭转，体现出了 W_2 起主导作用的结果，而在断层周围出现一些弯曲线，表示出断层扭错的结果，体现了 W_3 作用的结果。图4d为断层在 W_{123} 模式引起的地面重力变化分布，类似于 W_{23} 的结果，在 W_{23} 的基础上由于 W_1 的作用，沿断层走向从左到右，表现出影响范围逐渐扩大的趋势，且其变化幅度也为以上所有情况下最大的。当断层同时具有2种以上的转动模式时，以断层左端点为基点的转动引起的地面重力变化分布由其转动模式确定。

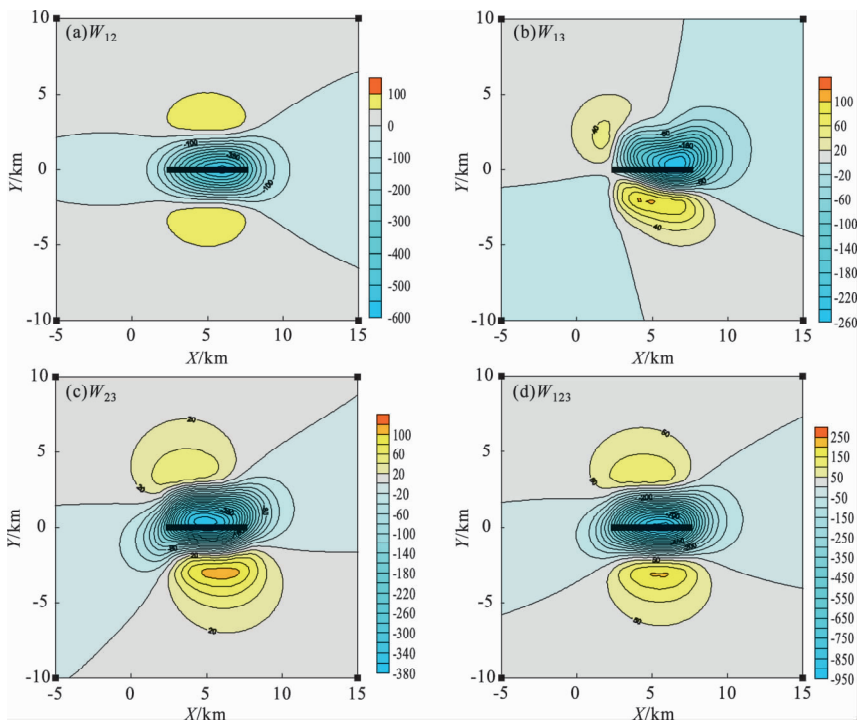


图4 断层的组合转动引起的地面重力变化（单位： 10^{-8} m/s^2 ）

Fig. 4 Gravity changes caused by mixed rotational movements modes (unit: 10^{-8} m/s^2)

3 直立断层平移和旋转运动产生的重力变化

3.1 断层在同一转动模式与不同平移模式组合的重力变化

采用2.1节试验设计参数绘制图5，其中， $U_1 = 4 \text{ m}$ ， $U_2 = 4 \text{ m}$ ， $U_3 = 4 \text{ m}$ 。在图5a~c中断层在

$W_1 + U_1$ 、 $W_1 + U_2$ 模式下产生的重力变化分布不具有对称性，而 $W_1 + U_3$ 模式具有对称性，但是3种组合模式的重力变化空间分布均保持了 W_1 模式的断层中心区域负值特征，其中在 $W_1 + U_1$ 模式下，正值区域的非对称现象正是断层 U_1 （走滑）模式的响应，相对 W_1 模式重力值变化最大值为 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。在 $W_1 + U_2$ 模式下，重力变化分布是以断层为分界线正负两部分的结构，原先在断层的

左边正值区域部分, 被 U_2 (倾滑) 作用所抵消, 使得断层右侧部分正值明显增大, 相对 W_1 模式重力值变化最大值为 $80 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。在 $W_1 + U_3$ 模式下, 重力变化的对称分布, 是因为 U_3 模式本身是以断层为对称轴的对称运动所致, 相对 W_1 模式重力值变化最大值为 $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。在图 5d ~ f 中断层在 $W_2 + U_1$ 、 $W_2 + U_2$ 、 $W_2 + U_3$ 模式下产生的重力变化空间分布, 三者均基本保持了 W_2 运动模式下的重力负值区域, 其中 $W_2 + U_1$ 、 $W_2 + U_3$ 模式基本为对称分布, $W_2 + U_1$ 模式呈现的断层两侧有扭转现象正是断层 U_1 (走滑) 模式的响应, 相对 W_2 模式重力值变化不明显, $W_2 + U_2$ 模式断层两侧的正值区域差异是 U_2 模式 (倾滑) 的体现, 相对 W_2 模式重力值变化为 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。 $W_2 + U_3$ 模

式为对称分布, 是因为断层 U_3 模式与 W_2 模式的结果均是以断层为轴对称分布, 两者组合这种对称分布明显加强, 相对 W_2 模式重力值变化为 $120 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。而在图 5g, h, i 中断层在 $W_3 + U_1$ 、 $W_3 + U_2$ 、 $W_3 + U_3$ 三种模式下产生的重力变化空间分布, 均基本保持了 W_3 运动模式下的负对称分布, $W_3 + U_3$ 模式的重力变化空间分布相对于 $W_3 + U_1$ 、 $W_3 + U_2$ 差异较大, 与 U_3 模式的空间向外扩张运动原因所致。

总之, 断层在同一转动模式与不同平移模式组合的重力变化的响应程度不同, 在 W_1 模式下 U_2 模式的重力变化最为显著, 在 W_2 模式下 U_3 模式的重力变化最为显著, 在 W_3 模式下 U_3 模式的重力变化最为显著。

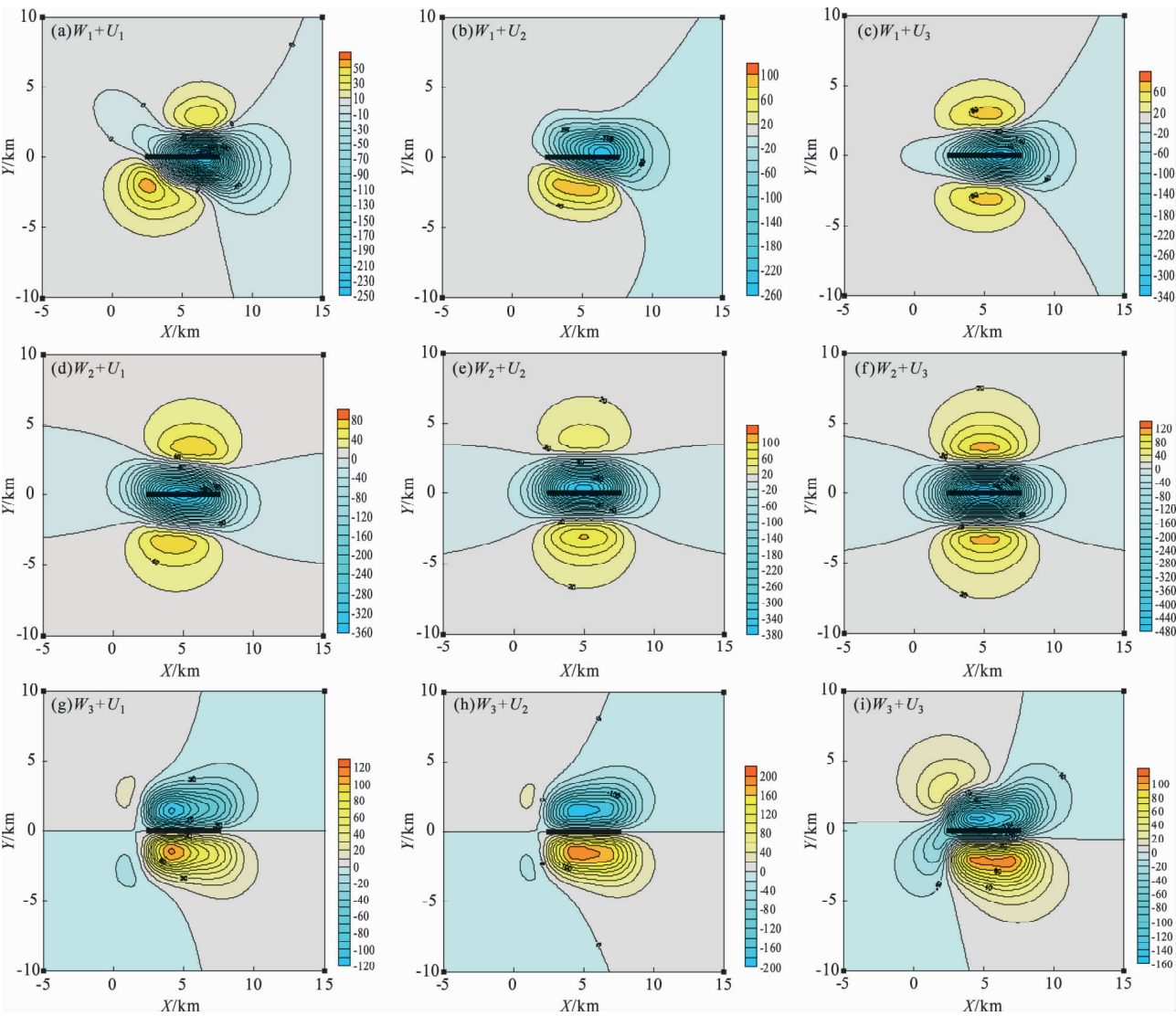


图5 断层平移和运转组合模式引起的地面重力变化 (单位: 10^{-8} m/s^2)
Fig. 5 Gravity changes caused by single rotational and mixed translational movements modes (unit: 10^{-8} m/s^2)

3.2 混合转动模式与混合平动模式组合的重力变化

绘制断层混合转动模式与混合平动模式组合引起的地面重力变化图，如图6所示。断层在 $W_{12} + U_{12}$ 模式下重力变化分布整体与 W_{12} 组合模式的分布具有一致性，其中断层两侧正值区域分布错动体现 U_1 模式的作用，而数值大小不均则是体现 U_2 模式的作用。断层在 $W_{13} + U_{13}$ 模式下重力变化分布

整体与 W_{13} 组合模式分布一致，断层两侧正值分布不均体现 U_{13} 模式的作用。 $W_{23} + U_{23}$ 模式下重力变化分布整体与 W_{23} 组合模式分布一致，断层两侧正值分布错动体现 U_3 模式的作用，数值大小不均体现 U_2 模式的作用。断层在 $W_{123} + U_{123}$ 模式下重力变化分布整体 W_{123} 模式分布一致。断层在混合转动模式与混合平动模式下，基本保持了混合转动模式的主体分布，同时呈现出混合平动模式的响应。

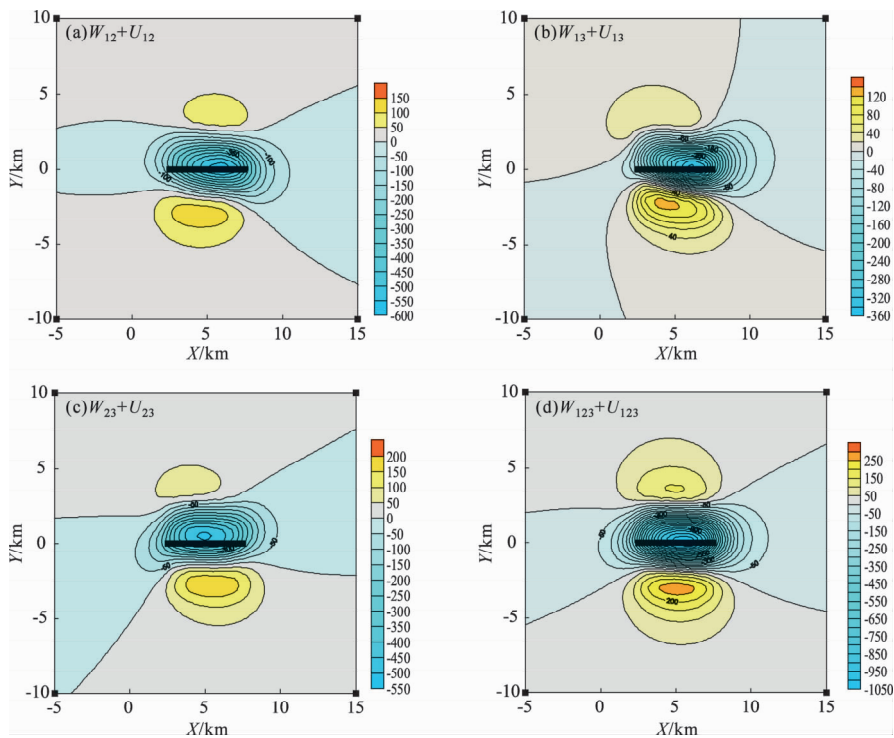


图6 断层混合转动模式与混合平动模式组合引起的地面重力变化（单位： 10^{-8} m/s^2 ）
Fig. 6 Gravity changes caused by mixed rotational and mixed translational movements modes (unit: 10^{-8} m/s^2)

4 讨论与结论

关于断层空间运动的描述，可用断层平动与转动2种组合方式来表示，断层平动即断层位错已相当成熟，而关于断层的转动可以说是位错理论的进一步补充，目前尚处于初期研究阶段。这里强调一下，文中断层转动是指断层上盘的相对转动，并非指断层整体的转动。描述断层转动时，其转动基点与转动轴的空间位置必须严格规定。本文选择断层底部左端点旋转基点，过旋转基点且与平行各坐标轴的直线为旋转轴，定义了断层扭张(W_1)、扭转(W_2)、扭翘(W_3)3种旋转模

式来表示，其描述可能与实际断层运动情况存在较大差异。基于三维角点法计算断层平动与转动产生的重力变化，建立了复杂运动模型与地表重力变化的关系。若研究地震的成因问题时涉及到孕震区的长期能量积累需要对震间复杂断层运动引起的重力效应进行研究，因此该问题将在以后的论文中专门阐述。
断层运动是相对于一定的空间参考基准而言，本文为简化模型，将断层的走向、倾向设置为平行或垂直于相应的坐标轴，研究了直立断层平移和旋转运动引起的重力变化分布。断层运动引起的重力变化分布与断层运动模式、选定的断层参数、介质的性质以及基点的选取等因素有关。在

相同的条件下对断层向错运动进行了数值模拟,可以得出如下结论:

(1) 断层在同一转动模式与不同平移模式组合,其重力变化的响应程度不同。在转动 W_1 模式下,与平移 U_2 模式组合下的重力变化最为显著;在转动 W_2 模式下,与平移 U_3 模式组合下的重力变化显著;在转动 W_3 模式下,与 U_3 平移模式组合的重力变化分布形态及 U_3 模式向外扩张运动因素有关。

(2) 断层在混合转动模式与混合平动模式下,基本保持了混合转动模式的主体分布,同时呈现出混合平动模式的响应。

参考文献:

- 段虎荣,崔进业,杨凡. 2016. 断层向错引起的地表重力变化研究[J]. 大地测量与地球动力学,36(9):761-765.
- 段虎荣,杨凡. 2015. 铅垂断层向错引起的地表重力变化[J]. 大地测量与地球动力学,35(4):627-631.
- 武艳军. 2013. 渭河盆地断层滑动和转动与地表变形关系的研究[D]. 西安:长安大学.
- 许才军,董力祥,李志才. 2000. 华北地区地壳形变的 GPS 及地震矩张量反演分析[J]. 武汉测绘科技大学学报,25(6):471-475.
- 张永志,张永,武艳军,等. 2013. 断层转动与地表变形关系研究[J]. 大地测量与地球动力学,33(2):8-12.
- BEN - MENAHEM A, SINGH S J, SOLOMON F. 1969. Solomon Static Deformation of a spherical earth model by internal dislocations[J], Bull Seism Soc Am,59(2):813-853.
- BEN - MENAHEM A, SINGH S J, SOLOMON F. 1970. Solomon Deformation of an homogeneous earth model by finite dislocations[J], Rev Geophys Space Phys,8(3):591-563.
- DING D H, ZHANG D H, REN Q. 1987. The stress field of a rectangular twist disclination loop in a planar phase boundary[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), (4):120-122.
- LEE J S. 1929. Some characteristic structural types in eastern Asia and their bearing upon the problem of continental movements[J]. Geological Magazine,66(11):501-522.
- LI Z H, LUO Z C, ZHONG B. 2012. Gravity modeling and analyzing based on 3D Delaunay triangulation algorithm[J]. Chinese J Geophys,55(7):2259-2267.
- LIN H T. 1957. Determination of rotational fault plane[J]. Science in China:Mathematics,6(1):169-177.
- OKABE M. 1979. Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies[J]. Geophysics,44(4):730-741.
- OKUBO S. 1989. Gravity change caused by fault motion on a finite rectangular plane[J]. Journal of the Geodetic Society of Japan,35(2):159-164.
- OLDHAM R D. 1899. Report of the great earthquake of 12th June 1897[M]. Memoirs of the Geological Survey of India.
- REID H F. 1910. The California earthquake of April 18,1906[R]. Washington D C:Report of the State Investigation Commission, The Mechanics of the Earthquake.
- TODOROYSKA M I, TRIFUNAC M D. 1990. Note on excitation of long structures by ground waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 116(4):952-964.
- XIE X S. 2004. Discussion on rotational tectonic stress field and the genesis of circum - Ordos landmass fault system[J]. Acta Geologica Sinica,17(4):464-472.

Gravity Changes Caused by Vertical Fault Translational and Rotational Movements

DUAN Hurong, CUI Jinye

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

In this paper, three rotation modes of fault twist (W_1), torsion (W_2), and warp (W_3) are defined by the rotation basis of the left end point of the footwall, and with three translation modes of fault strike – slip (U_1), dip – slip (U_2), and extension/press (U_3) together to describe the movement of faults in space. The three – dimensional corner point method is used to calculate the gravity changes caused by different combinations of translation and rotation of vertical faults. The conclusion is that the variation distribution of the gravity change field produced by the fault in the single rotation mode is symmetrically distributed along the fault axis. The response of the fault in the same rotational mode is different from that of the different translation modes. When the fault is in the W_1 rotation mode, the gravity changes caused by the combination mode with U_2 is most significant. When the fault is in the W_2 rotation mode, the gravity changes caused by the combination mode with U_3 is most significant. But in the W_3 mode, the gravity distribution of the U_3 translation combined mode is caused by the outward expansion of the U_3 model. The distribution of the ground gravity changes caused by the combined movement mode of the mixed rotation and the mixed translation, and its distribution of the principal distribution is consistent with that of the mixed rotation mode, while exhibiting a hybrid translational mode response.

Keywords: translation fault; rotation fault; gravity changes; three-dimensional corner method