

白云. 地震断层滑动对地质形变的测绘研究[J]. 华南地震, 2018, 38(1):108-113. [BAI Yun. Surveying and Mapping of Geological Deformation by Seismic Fault Slip[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1):108-113.]

地震断层滑动对地质形变的测绘研究

白 云^{1,2,3}

(1. 青海省环境地质勘查局, 西宁 810007; 2. 青海省环境地质重点实验室, 西宁 810007;
3. 青海省地质环境保护和灾害防治工程技术研究中心, 西宁 810007)

摘要: 传统断层自主剖分技术进行地震断层滑动对地质形变的测绘研究时, 未考虑走滑位移量、倾滑位移量和张开位移量对地质形变测绘研究的影响, 无法对差异断层转动角下的地质变形情况实施有效测绘, 提出基于矩形位错模型的地质形变的测绘研究方法, 采用矩形断层位错模型通过点源位错公式, 获取地震断层滑动时地质形变的走滑位移量、倾滑位移量和张开位移量; 基于地震矩形断层三维滑动对地表产生的位移进行测绘时, 获取各位移量同地面形成的三维位移场, 采用二维高斯-勒让德求积计算断层三维位移场转动形成的地表位移, 实现地质形变的测绘研究。实验结果表明, 所提方法可对不同矩形断层转动角下的地质变形情况进行准确测绘, 实际应用价值高。

关键词: 地震断层滑动; 矩形断层; 位错模型; 旋转角; 地质形变; 测绘

中图分类号: P315.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2018) 01-0108-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.015

Surveying and Mapping of Geological Deformation by Seismic Fault Slip

BAI Yun^{1,2,3}

(1. Qinghai Provincial Bureau of Environmental Geological Survey, Xining 810007, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Environmental Geology, Xining 810007, China; 3. Qinghai Province Geological Environmental Protection and Disaster Prevention Engineering and Technology Research Center, Xining 810007, China)

Abstract: The influence of the slip displacement, the dip displacement and the opening displacement on the geological deformation study is not considered when the traditional fault autonomous segmentation technology is carried out in the surveying and mapping of geological deformation by seismic fault slip. It is impossible to effectively map the geological deformation under the rotation angle of the differential fault, and put forward the model based on the rectangular dislocation. The method of surveying and mapping geological deformation by using the formula of the point source dislocation by the rectangular fault dislocation model to obtain the strike slip displacement, the dip displacement and the opening displacement of the geological deformation when the seismic fault slips, and to obtain the displacement and the ground shape when the displacement of the ground

收稿日期: 2017-12-08

作者简介: 白云(1985-), 男, 在职研究生, 工程师, 主要从事测绘工程研究。

E-mail: dz644325123@163.com.

surface is measured by the three-dimensional slip of the seismic rectangle fault. The three-dimensional displacement field formed by the two-dimensional Gauss-Legendre quadrature is used to calculate the surface displacement formed by the rotation of the three-dimensional displacement field of the fault, so as to realize the surveying and mapping of the geological deformation. The experimental results show that the proposed method can accurately survey the geological deformation under different rotation angles of rectangle faults and has high practical application value.

Keywords: Seismic fault slip; Rectangular fault; Dislocation model; Rotation angle; Geological deformation; Mapping

0 引言

地震往往会引起地质断层的滑动,在提供丰富的矿产资源的同时导致毁灭性的灾难^[1]。火山喷发、海啸等等都离不开地质断层的滑动,建筑工程也会受到来自断层的干扰^[2]。地震频发,断层滑动引起的地质形变逐渐受到地震专家的重视,如何高效的实现地质形变的测绘成为广泛关注的议题。

以往国内外相关人员研究地震断层滑动对地质形变测绘的干扰时,通常采用的方法主要有:文献[3]采用卫星热红外遥感技术检测地震断层活动情况,进而分析地质变形状态,但是该方法容易受到温度等气候条件的干扰,地质形变测绘结果存在较高的波动性;文献[4]通过断层自主剖分技术对地震滑动情况进行分析,进而研究地质的形变情况,其主要用于研究地质层分布均匀的地质形变,具有一定的局限性;文献[5]研究了平直断层黏滑过程热场演化及失稳部位分析过程,为地震地质形变测绘提供了可靠的分析依据,然而该研究过程仅针对平直断层的地质形变进行了研究,对于地质形变测绘结果不够全面。

针对上述问题,文章提出基于矩形位错模型的地质形变的测绘研究方法,根据矩形位错模型获取走滑、倾滑、张开方向三个角度矩形位错量相应的位移场^[6],基于上述变量引用二维高斯-勒让德求积公式计算断层三维滑动形成的地表位移,实现地质形变的测绘研究。实验结果表明:本文方法可以用于实际的地震断层滑动对地质形变的测绘研究工作。

1 基于矩形位错模型的地质形变的测绘研究

1.1 矩形断层位错模型

图1描述了矩形位错模型,定义其灰色部分

的矩形长用 L 描述、宽用 W 描述,采用点源位错公式获取相应的形变场^[7],采用 $x-\zeta'$ 、 $y-\eta'\cos\delta$ 、 $d-\eta'\sin\delta$ 描述 x 、 y 、 d , 获取积分变换,用公式(1)描述:

$$\int_0^L d\zeta' \int_0^W d\eta' \quad (1)$$

文章通过 Sato 与 Matsu'ura 的方法获取化简公式(2):

$$\begin{cases} x-\zeta'=\zeta \\ p-\eta'=\eta \end{cases} \quad (2)$$

积分(2)最终变换为积分(3):

$$\int_x^{x-L} d\zeta \int_p^{p-W} d\eta \quad (3)$$

根据 Chinnery 方法获取的积分用 \parallel 描述为: $f(\xi, \eta) \parallel = f(x, p) - f(x, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W)$, 变换矩形断层长宽的数值,只需该公式右侧的 x 大小。从走滑、倾滑、张开方向三个不同角度考虑矩形位错量相应的位移场。

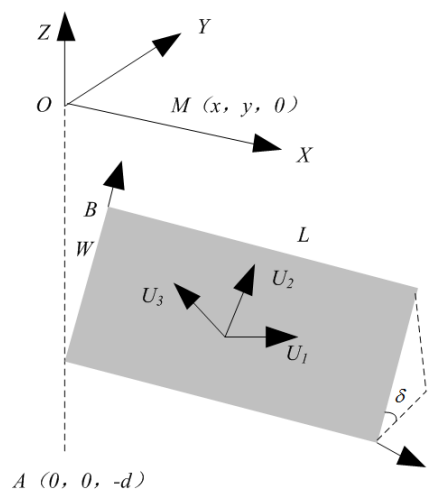


图1 矩形位错模型

Fig.1 Okada dislocation model

从走滑角度考虑, 矩形位错量相应的位移场用公式(4)描述:

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi q}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \end{cases} \quad (4)$$

从倾滑角度考虑, 矩形位错量相应的位移场用公式(5)描述:

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \end{cases} \quad (5)$$

从张开方向角度考虑, 矩形位错量相应的位移场用公式(6)描述:

$$\begin{cases} u_x = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R(R+\xi)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \\ u_y = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{q\xi}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \\ u_z = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} - \cos \delta \left\{ \frac{q\xi}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_5 \sin^2 \delta \right] \end{cases} \quad (6)$$

根据上述积分公式获取走滑、倾滑、张开方向三个不同角度考虑矩形位错量相应的位移场, 为地质形变的测绘提供参数依据。

1.2 基于地震矩形断层三维滑动对地表产生的位移进行测绘

图2描述了断层滑动的三种方式, 其中 X 轴描述断层的走向, Y 轴描述垂直于断层的走向, Z 轴描述垂直于地面走向的同时途径断层的左下方顶点^[8]。三种滑动方式对应的旋转角分别用 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 表示。分析图2能够看出, U_1 表示断层旋转得到的走滑位移量, U_2 表示倾滑位移量, U_3 表示张开位移量, 其中, U_1 、 U_2 、 U_3 与 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 存在函数关系, 用公式(7)描述:

$$\begin{cases} U_1 = r_1 (1 - \cos \omega_1) + r_2 (1 - \cos \omega_2) \\ U_2 = r_2 \sin \omega_1 + r_3 (1 - \cos \omega_3) \\ U_3 = r_2 \sin \omega_2 + r_3 \sin \omega_3 \end{cases} \quad (7)$$

其中, 矩形断层面 Q 点与不同旋转轴之间的长度分别用 r_1 、 r_2 、 r_3 表示。

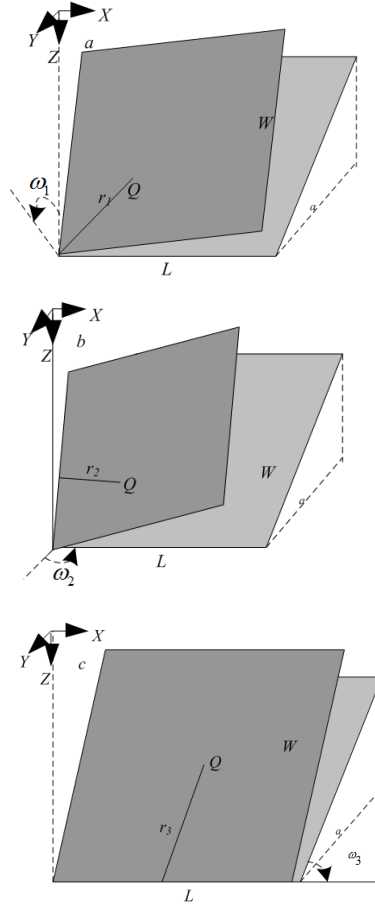


图2 矩形断层的三种滑动方式

Fig.2 Three modes of sliding of a rectangular fault

公式(8)描述了矩形断层上随机点同地面点之间的位移关系^[9]:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} U_j \left[\lambda \delta_{ik} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k d\Sigma \quad (8)$$

其中, 拉梅常数用 λ 、 μ 描述, $d\Sigma$ 表示面元^[10], 与其垂直的余弦用 ν_k 描述。

根据 1.1 小节获取的走滑、倾滑、张开方向不同角度矩形位错量相应的位移场, 令 $\xi_1 = \xi_2 = 0$, $\xi_3 = d$, 结合公式(8)获取向错走滑分量同地面形成的三维位移场^[11]如公式(9)所示:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3x^2 q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3XDQ}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (9)$$

向错倾滑分量同地面形成的三维位移场^[12]如公式(10)所示:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xpq}{R^5} + I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3ypq}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3dpq}{R^5} + I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (10)$$

向错张开分量同地面形成的三维位移场^[13]如公式(11)所示:

$$\begin{cases} u_x^0 = \frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xq^2}{R^5} - I_3 \sin^2 \alpha \right] \Delta S \\ u_y^0 = \frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3yq^2}{R^5} - I_1 \sin^2 \alpha \right] \Delta S \\ u_z^0 = \frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3dq^2}{R^5} - I_5 \sin^2 \alpha \right] \Delta S \end{cases} \quad (11)$$

上述公式中, I_1^0 、 I_2^0 、 I_3^0 、 I_4^0 、 I_5^0 的计算方法如公式(12)所示:

$$\begin{cases} I_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \\ I_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \\ I_5^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p = d \sin \delta + y \cos \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2 \end{cases} \quad (13)$$

设置 $x=\xi$, $y=\eta \cos \delta + q \sin \delta$, $d=\eta \cos \delta - q \sin \delta$, $p=\eta$, 结合公式(9)、(10)、(11)引用二维高斯-勒让德求积公式^[14]计算断层三维位移场转动形成的地表位移^[15], 如公式(14)所示:

$$\begin{cases} u_x = u_x^1 + u_x^2 \\ u_y = u_y^1 + u_y^2 \\ u_z = u_z^1 + u_z^2 \end{cases} \quad (14)$$

不同断层同地表间的位移用公式(15)描述:

$$\begin{cases} u_x = \sum_{i=1}^n u_x^i \\ u_y = \sum_{i=1}^n u_y^i \\ u_z = \sum_{i=1}^n u_z^i \end{cases} \quad (15)$$

上述过程基于获取各位移量同地面形成的三维位移场, 引用二维高斯-勒让德求积公式计算断层三维滑动形成的地表位移, 实现地质形变的测绘研究。

2 实验分析

实验为验证本文方法是否可以有效进行地震断层滑动对地质形变的测绘研究, 将本文方法用于某地震的单一断层滑动区域进行仿真分析, 实验从不同矩形断层转动角分析本文方法的有效性, 实验过程中为了判断本文方法中断层旋转角 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 不同对地表测绘中水平形变和空间分布的影响, 将 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 取不同值进行模拟分析, 图3、图4和图5分别表示在地层倾角为 60° 时, 不同角度的 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 模拟结果。

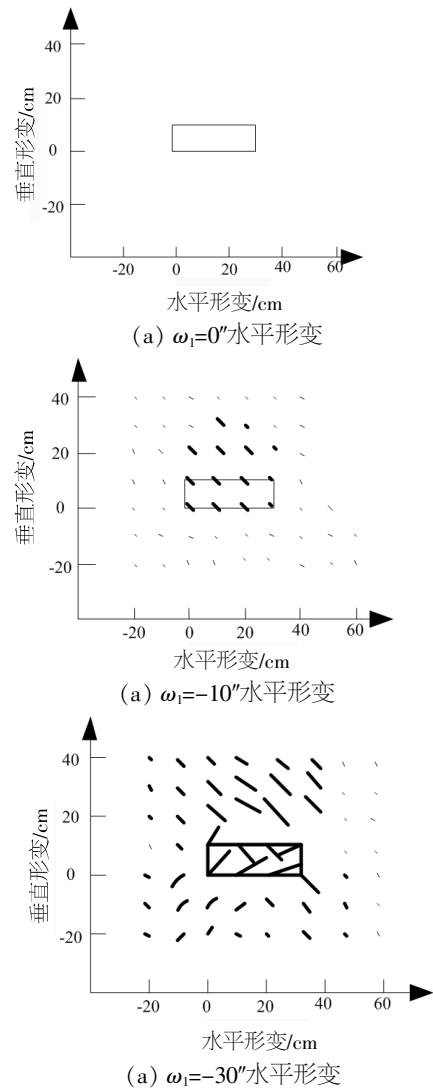


图3 不同 ω_1 旋转角对地表水平形变的测绘影响

Fig.3 Mapping effects of different rotation angles ω_1 on horizontal deformation of ground surface

分析图 3(a)可知, 本文方法在研究地震断层滑动对地质形变的测绘影响时, 当 ω_1 旋转角为 0 时, 地表没有发生任何水平形变, 从图 3 中(b)和(c)可以看出, 随着旋转角的不断增大, 图中的黑色线条的长度和颜色逐渐加深, 且在发生断层附近处的线条长度相较距断层稍远处的线条长度较长, 与此同时线条的方向也发生一定程度的偏移。将图像从中间分成上下两部分, 对比可知图像上部区域的线条长度和深度要高于下部, 表明随着旋转角的提升, 同一位置处的水平形变变化值发生增大现象而其方向基本无变动, 分析断层及其周边地区的水平形变变化量大于远处的水平形变, 从图像上部水平位移形变大于下部的位移结果可知, 地震断层下部对地质形变的影响较明显, 说明本文方法可用于进行地质形变的测绘研究工作中。

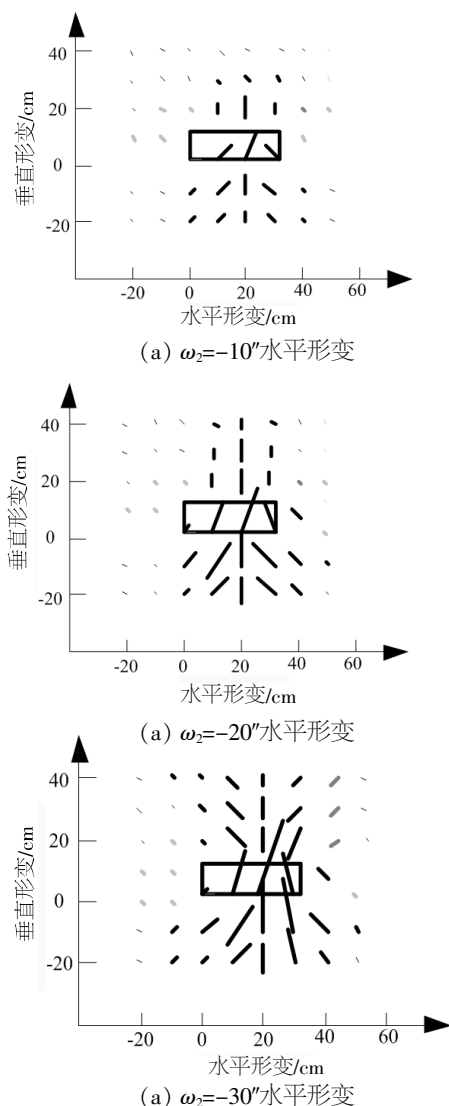


图 4 不同 ω_2 旋转角对地表水平形变的测绘影响

Fig.4 Mapping effects of different rotation angles ω_2 on horizontal deformation of ground surface

分析图 4 中的三幅图, 本文方法在研究地震断层滑动对地质形变的测绘影响时, 随着 ω_2 旋转角度的不断增大, 图中黑色曲线的长度不断增长, 且曲线的方向也没发生变化, 同样将图像分为上下两部分, 对比看出图像上部曲线较下部长度就较短, 该结果表明随着 ω_2 旋转角的不断增加, 处于同一水平位置处的水平形变值逐渐提升且方向保持不变, 同样在断层区域附近的水平形变值略高于远处的水平形变代表地震断层的滑动可改变水平形变的方向, 根据实验结果本文方法对水平形变的分析可知, 断层上部分对地表的影响较大。

分析图 5 中三幅图, 本文方法在研究地震断层滑动对地质形变的测绘影响时, ω_3 同 ω_2 和 ω_1 相同, 黑色曲线长度均逐渐增长、方向基本保持不变且在断层发生附近位置的曲线较长, 局部分析来看上半区域的曲线较长, 说明断层上部曲线较长对地表水平形变的影响较大。

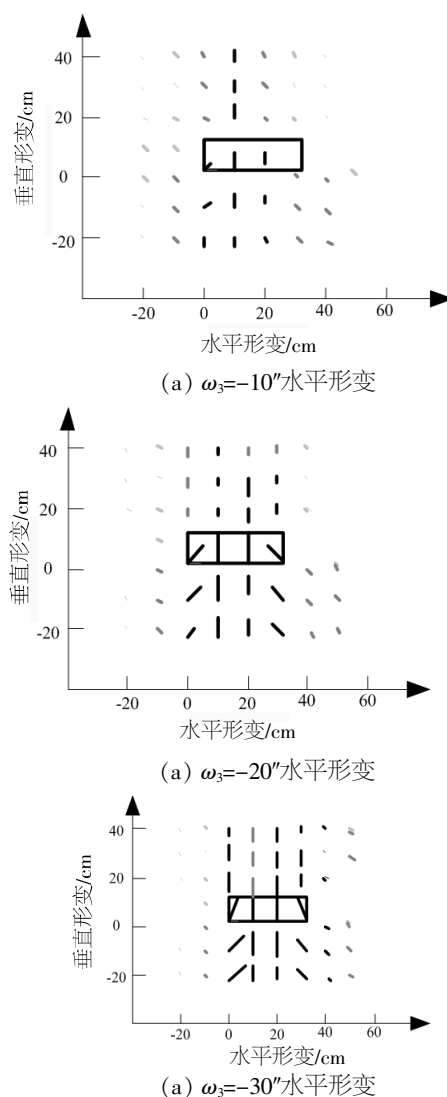


图 5 不同 ω_3 旋转角对地表水平形变的测绘影响

Fig.5 Mapping effects of different rotation angles ω_3 on horizontal deformation of ground surface

综合实验对本文方法中、和对地表水平形变的分析结果可以得出,本文方法可从不同断层旋转角对地质形变的测绘结果进行分析,说明本文方法可以用于实际的地震断层滑动对地质形变的测绘研究工作中,具有较高的应用价值。

4 结语

文章为了准确研究地震断层滑动对地质形变的测绘影响,基于矩形断层位错模型,采用点源位错公式获取来自走滑、倾滑、张开三个不同方向的矩形位错量,基于不同方向的矩形位错量,文章进行地震矩形断层三维滑动在地表产生的位移测绘分析,通过对地震矩形断层转动三种方式的不同旋转角进行分析,得到不同断层旋转后的走滑位移量、倾滑位移量和张开位移量,基于各分量同地面形成的三维位移场,采用二维高斯-勒让德求积公式计算断层三维位移场转动形成的地表位移,得到地震滑动对地质形变的测绘影响结果。实验结果说明,所提方法可有效的进行地震断层滑动对地质形变测绘的水平形变测绘研究,提高地震后地质测绘结果的准确性。

参考文献:

- [1] 信春雷,高波,闫高明,等. 跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗震措施研究[J]. 振动工程学报,2016,29(4): 694-703.
- [2] 冉勇康,李彦宝,杜鹏,等. 中国大陆古地震研究的关键技术与案例解析(3)——正断层破裂特征、环境影响与古地震识别[J]. 地震地质,2014,36(2): 287-301.
- [3] 张璇,张元生,张丽峰. 卫星热红外遥感在地震预测和断层活动中的应用研究进展[J]. 地质论评,2016, 62(2): 381-388.
- [4] 毕研磊,张永志,曹海坤,等. 利用断层自动剖分技术反演汶川 $M_w7.9$ 地震滑动分布[J]. 地震研究,2017,40(2): 211-215.
- [5] 任雅琼,马瑾,刘培洵,等. 平直断层黏滑过程热场演化及失稳部位识别的实验研究[J]. 地震地质,2016,38(1): 65-76.
- [6] 常博. 基于可变有限元算法的轨道车辆抗震设计[J]. 电子设计工程,2016,24(14): 7-11.
- [7] Zheng Y,Zhang R,Gu S. A new PPP algorithm for deformation monitoring with single-frequency receiver[J]. Journal of Earth System Science,2014,123 (8):1 919-1 926.
- [8] Tong X,Smith-Konter B,Sandwell D T. Is there a discrepancy between geological and geodetic slip rates along the San Andreas Fault System? [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2014,119(3):2 518-2 538.
- [9] 赵静,牛安福,李强,等. 陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 地震研究,2016,39(3):351-358.
- [10] 张永志,张本平,王卫东,等. 基于向-位错模型的同震断层运动反演——以龙门山断层为例[J]. 地球学报,2016,37(3):294-300.
- [11] 杨九元,祝意青,徐云马,等. 鲜水河断裂运动引起地表形变的向-位错模型模拟[J]. 大地测量与地球动力学,2017, 37(7):692-696.
- [12] 王洪友,杨红磊,彭军还,等. 利用干涉技术定权建立巴姆地区三维形变场[J]. 测绘科学,2015,40(3):36-41.
- [13] 宋小刚,申星,姜宇,等. 通过 InSAR 与 GPS 数据融合获取汶川地震同震三维形变场[J]. 地震地质,2015,37(1): 222-231.
- [14] 胡宗达,杨长春,矣雷阳,等. 基于非限制性结构的地震动加速度计仿真设计[J]. 计算机仿真,2016,33(1): 127-132.
- [15] Khodaverdian A,Zafarani H,Rahimian M. Long term fault slip rates,distributed deformation rates and forecast of seismicity in the Iranian Plateau [J]. Tectonics,2016,34 (10):2 190-2 220.