

汶川地震震前与同震断层滑移的比较分析¹

梁向洲 郝圣旺

(燕山大学建筑工程与力学学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要 本文利用 GPS 观测的 1999—2007 年汶川震前 3 期地表变形数据和 2008 年汶川同震地表变形数据, 结合地震位错理论, 通过高斯变换和坐标旋转建立断层模型, 运用遗传算法, 反演了龙门山断裂带断层震前 3 期和同震滑动参数。结果表明龙门山断层震前 3 期平均走滑位移为 -5.39mm , 倾向位移为 2.66mm , 与同震断层滑移相比较, 发现震前断层的滑移趋势与同震断层滑移一致, 均为逆冲兼右旋的挤压运动。比较震前 3 期逆冲方向的滑移量, 发现逆冲滑移有加速的现象。并根据震前和同震的断层滑动量估算了汶川地震复发周期。

关键词: GPS 断层滑移 震前 同震 汶川地震

引言

地震通常都伴随断层的滑移, 长期构造运动产生地壳变形, 当变形超过断层的承受临界值时, 断层就会发生滑动破坏。断层滑移是理解震源机制和发震机理的重要参数(刘畅等, 2014)。目前对断层滑移的研究大多集中于同震滑移, 由于地表断层破裂数据不能反映断层的真实滑移, 李志才等(2009)和王阅兵等(2012)根据 GPS 观测的地表同震变形数据, 通过对断层同震滑移的反演计算, 分析地震的发震类型和破坏特征, 并据此理解震源机制。震前断层滑动是与地震的孕育和发生直接关联的物理现象。所以, 震前断层滑移与同震参数的比较分析是理解和进行地震预测的一个具有明显物理背景的分析方法。

基于此, 本文以汶川地震为背景, 利用中国地壳运动观测中心提供的 1999 年至 2001 年、2001 年至 2004 年、2004 年至 2007 年共 3 期的 153 个固定站点 GPS 测量数据(水平精度 2mm , 垂直精度 6mm)分析震前地表变化的变化趋势, 采用遗传算法反演震前 3 期断层滑移参数, 并将震前断层滑移参数与同震测量的 38 个 GPS 站点数据反演得到的同震断层参数进行比较, 分析震前断层滑移与同震断层滑移的关联。

1 基金项目 国家自然科学基金(11672258)、河北省自然科学基金(D2015203398)和 973 计划(2013CB834100)

[收稿日期] 2016-04-11

[作者简介] 梁向洲, 男, 生于 1991 年。硕士研究生。主要从事地震断层滑移与地震前兆的研究。

E-mail: liangxiangzhou@foxmail.com

1 断层位置与 GPS 测站布置

汶川地震震后地质考查表明(焦青等, 2008; 刘静等, 2008; 李勇等, 2008), 此次地震由中央断裂带、山前江油-灌县断裂带和山后茂汶-汶川断裂带等多条断层同时参与地震断层破裂过程, 但中央断裂带为主要断裂带, 其走滑和倾滑位移较大, 山前和山后断裂带倾滑运动很小, 可以忽略, 仅考虑其走滑运动, 因此本文将中央断裂带作为模型研究对象。断层位置与 GPS 测点分布如图 1 所示, 根据断层位置, 将其拟合为一条直线, 将断层视为平面, 且断层面上的位移是均匀分布的。资料显示(陈运泰, 2008), 断层破裂长度在 300km 左右, 通过地质考察等方式(李海兵等, 2008; 张培震等, 2008) 得到汶川地震主断裂带断层近地面倾角为 60° — 70° , 断层在 20km 处断层随深度向下逐渐变缓。根据这些背景资料, 本文选取断层长度 $L=300\text{km}$, 倾角 $\theta=60^{\circ}$, 断层深度 $D=20\text{km}$ 作为模型形状参数。

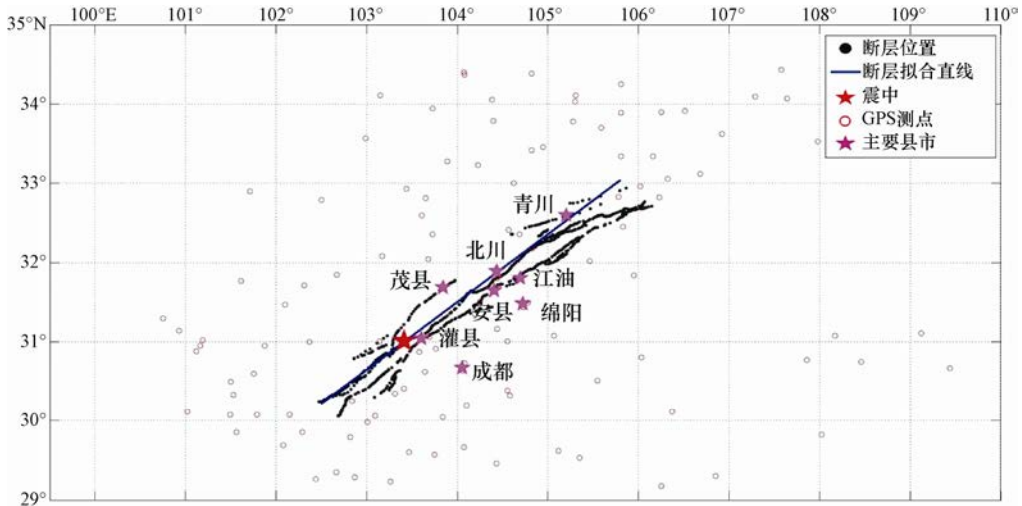


图 1 断层位置与 GPS 测点分布图

Fig. 1 Location offault and GPS measurements

2 震前 3 期断层滑移参数

2.1 震前断层参数计算方法

断层滑移参数的计算通常采用反演算法(徐果明, 2003)。采用图 2 所示的断层位错模型, 图中垂直方向坐标轴的原点 $z=0$ 定义在地表平面, d 为震源深度。断层长、宽分别为 L 和 W , 倾角为 θ 。 x 轴平行于断层走向。 U_1 、 U_2 、 U_3 分别代表断层上盘相对于下盘的走滑、倾滑和张引位错分量。

为了提高断层位错反演的精度, 本文采用所有 GPS 测量点的 3 个方向测量值和模型值差的绝对值作为目标函数值, 即:

$$M = \sum_{i=1}^n (|u_x^i - u_{x0}| + |u_y^i - u_{y0}| + |u_z^i - u_{z0}|) \quad (1)$$

式中, M 为目标函数值, n 为 GPS 测点数量, u_x^i 、 u_y^i 、 u_z^i 为 GPS 测量的实际地表位移数据。

u_{x0} 、 u_{y0} 、 u_{z0} 是基于图 2 的断层位错模型，由断层初始参数 U_1 、 U_2 、 U_3 计算得到的各 GPS 测点对应的地表位移值。所以，目标函数值 M 越接近于 0，模型计算出的地表位移值 u_{x0} 、 u_{y0} 、 u_{z0} 越接近 GPS 实测位移值 u_x^i 、 u_y^i 、 u_z^i ，反演得到的断层滑移参数 U_1 、 U_2 、 U_3 就越精确。本文采用遗传算法（周明，1999；雷英杰，2014）求解断层滑移参数 U_1 、 U_2 、 U_3 。遗传算法是一种仿生算法，它把待求参数编制成一组二进制代码，将这组编码看作一个个体，并随机产生包含一定数量个体的种群，编制目标函数并将目标函数值经过变换得到适应度值，即评价种群中个体值与真实值的差异程度的标准。将种群中适应度值高的个体保留下来，对这些个体进行选择、交叉、变异等运算形成新的种群，并用种群中适应度高的个体代替原种群适应度低的个体，经过多次重复迭代使种群中个体值接近真实值。

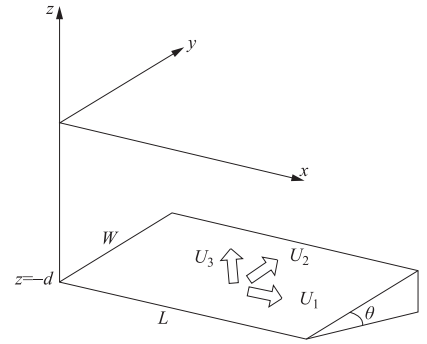


图 2 断层位错模型

Fig. 2 Fault dislocation model

在整个算法中的关键步骤是基于位错模型（Steketee, 1958；Okada, 1985；1992）计算断层滑动参数 U_1 、 U_2 、 U_3 对应的地表变形 u_{x0} 、 u_{y0} 、 u_{z0} 。根据点源位错模型，断层内一点位错对地表产生的影响可以表示为：

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (2)$$

式中， u_i 为地表某点位移，下标 $i=x, y, z$ ， Δu_j 为位错点位移，下标 $j=1, 2, 3$ ， $k=3$ ， $n=1, 2$ ， j, k, n 上标与下标含义相同，1, 2, 3 分别对应于 U_1 、 U_2 、 U_3 三个方向（如图 2 所示）。 δ_{jk} 是 Kronecker 张量（当 $k=j$ 时 $\delta_{jk}=1$ ，当 $k \neq j$ 时， $\delta_{jk}=0$ ）， λ 、 μ 为拉梅参数， v_k 为断层面法向分量方向余弦， u_i^j (u_i^n ， u_i^k) 表示在点 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 处振幅为 F 的点震源的 j (n ， k) 分量在点 (x_1, y_1, z_1) 处产生的 i 分量位移。

由点源位错计算公式（2）沿断层面积分，可得有限矩形位错公式。

2.2 模型验证

下面，通过一个模拟断层来校验本文算法。已知断层滑移等参数列于表 1，其中 L 为断层长度， W 为断层宽度， d 为断层深度， θ 为断层倾角， U_1 、 U_2 、 U_3 为断层 3 个方向的滑移。据此计算地表位移分量，选取其中 5 组数据（表 2）进行分析。然后，基于这 5 组数据，利用遗传算法反演断层滑动参数，结果列于表 3。计算结果与给出的断层参数一致。为进一步说明计算效果，图 3 示出了反演计算中目标函数演化过程。可以看出，目标函数收敛迅速，较好地趋近 0 且并未有波动趋势，表明本文算法的稳定性和较好的收敛效果。

表 1 模拟断层参数

Table 1 Simulation of fault parameters

断层参数	L/km	W/km	d/km	$\theta / ^\circ$	U_1/m	U_2/m	U_3/m
数值	9	6	7	85	0.5	0.2	0.1

表 2 断层正演结果

Table 2 Forwardsolution of fault parameters

编号	x/m	y/m	u_x/m	u_y/m	u_z/m
1	1000	2000	-0.0951	-0.0304	-0.0664
2	2000	2000	-0.0948	-0.0333	-0.0666
3	5000	3000	-0.0905	-0.0465	-0.0589
4	-2000	3000	-0.0949	-0.0192	-0.0575
5	-1000	1000	-0.0426	-0.0069	-0.0409

表 3 断层反演结果

Table 3 Inversion result of fault parameters

编号	目标函数值	U_1'/m	U_2'/m	U_3'/m
1	6.35E-04	0.5001	0.2001	0.1001
2	1.70E-05	0.5000	0.2002	0.0995
3	5.92E-05	0.5000	0.2002	0.0994
4	3.50E-07	0.5000	0.2001	0.0996
5	1.00E-03	0.5001	0.1997	0.1007
平均值	-	0.5000	0.2001	0.0999

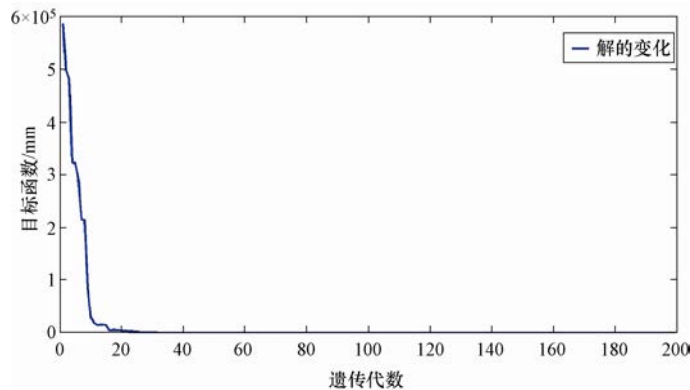


图 3 目标函数的演化过程

Fig. 3 Evolution of objective function

2.3 震前三期断层滑移特征

将 GPS 测量的震前 3 期地表位移数据进行高斯换算和坐标旋转,把大地坐标系转换到以断层下缘线为水平轴的平面坐标系中。利用变换后的地表位移以及上述计算模型反演龙门山断层 1999 年到 2007 年震前 3 期滑动位移的累积量和断层同震滑移量。震前 3 期的时间(以年为单位)为:第一期 1999.771—2001.678,时间间隔 1.907 年;第二期为 2001.678—2004.583,时间间隔 2.905 年,第三期为 2004.583—2007.579,时间间隔 2.996 年。

从震前 3 期的目标函数演化过程(图 4)可以看出,3 期结果均收敛较好,其中 3 期的目标函数值分别为 0.0231mm、0.0261mm、0.0283mm,平均每个测点每个方向的误差小于 $1 \times$

10^{-4} mm，同震目标函数值为 3.93×10^{-2} m，每个测点每个方向的误差小于 10^{-3} m，震前 3 期和同震反演误差均小于 GPS 测量数据的误差，故反演结果可靠。

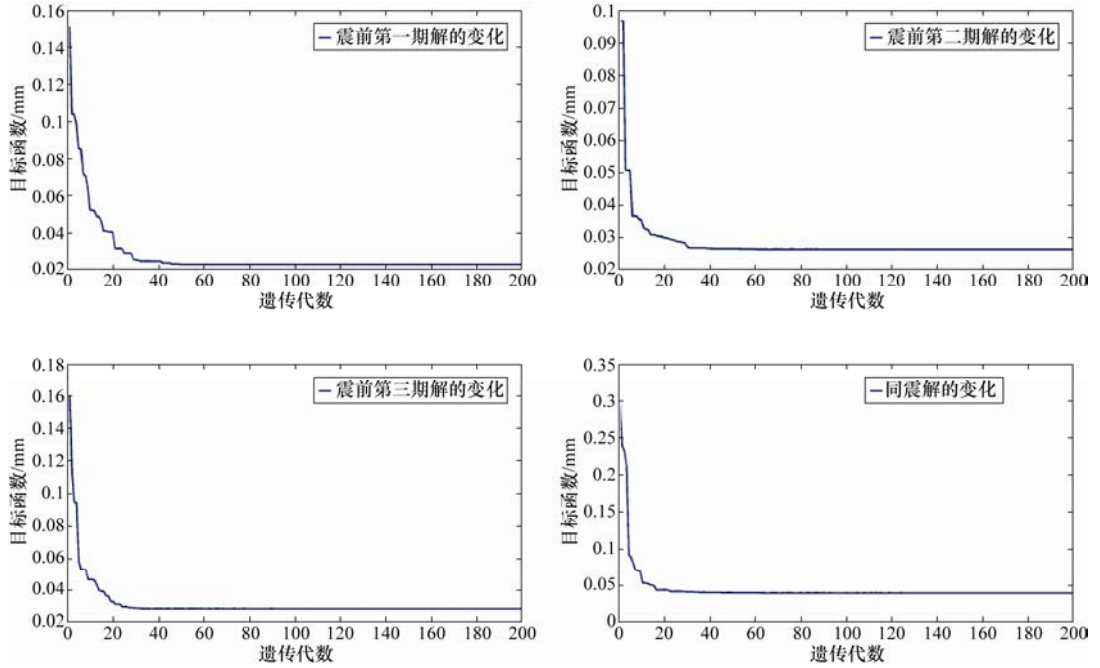


图 4 震前三期和同震目标函数的演化过程

Fig. 4 Evolution of the pre-earthquake and coseismic objective function

同震断层附近地表位移如图 5 所示，同震反演断层走滑位移为 -3.029m，倾向位移为 4.725m。震后地质考察结果显示（吴珍彦等，2008；刘健等，2012），中央断裂带中，映秀

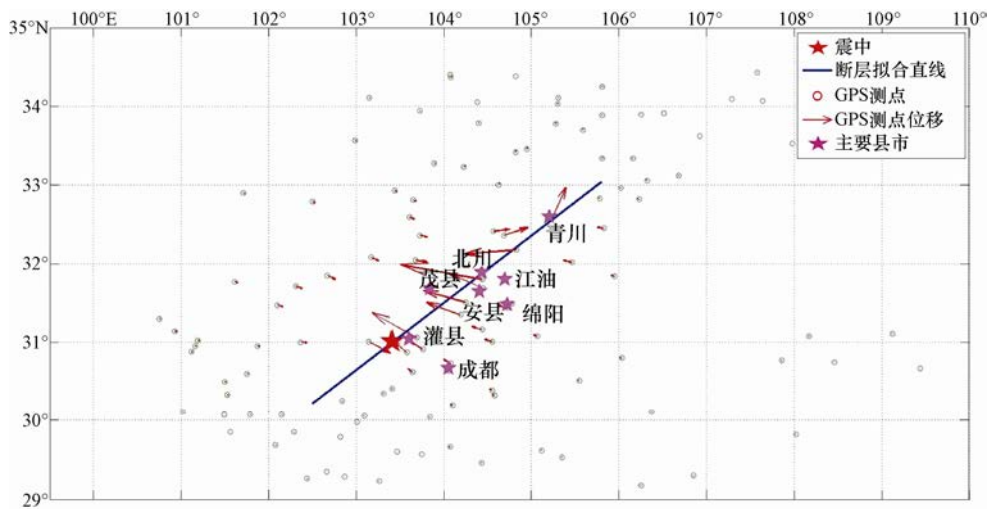


图 5 同震断层附近 GPS 测点位移矢量图

Fig. 5 Coseismic deformation displacement of GPS measurements near the fault

至北川断裂带平均逆冲位移为 6.4m, 北川至青川断裂带逆冲为 5m, 映秀至北川破裂带垂直位移量从 0.2m 到 11m 不等, 伴随的右旋平均水平位移量为 2—3m。所以, 同震断层反演结果与地质观测结果相符合。陈运泰等 (2008) 通过地震波反演得出, 断层平均逆冲位错为 5m, 断层平均走滑位错为 2m, 与本文的结果基本一致。

另一方面, 根据断层滑移参数可以计算地震矩:

$$M_0 = \mu \times S \times D \quad (3)$$

式中, μ 为断层的刚性系数 (本文取为 $3 \times 10^{10} \text{Pa}$), S 为断层面积 (根据断层模型求出断层面积为 $S = L \times d / \sin \theta = 300 \times 10^3 \times 20 \times 10^3 / \sin 60^\circ = 6.93 \times 10^9 \text{m}^2$), D 为断层标量滑移。基于本文反演结果, $D = \sqrt{3.029^2 + 4.725^2} = 5.613 \text{m}$, 于是求得 $M_0 = 1.17 \times 10^{21} \text{J}$, 根据矩震级公式:

$$M_w = \frac{2}{3} \times \lg M_0 - 6.06 \quad (4)$$

计算得矩震级 $M_w = 7.985$ 。所以, 本文反演的结果与根据地震波计算的矩震级为 $M_w = 7.9$ (张勇等, 2008) 基本相当。

为了与同震滑移数据进行对比, 了解震前滑移与地震的关联, 表 4 给出了震前 3 期的断层滑移的反演结果。可以看出, 震前 3 期总的平均走滑速率为 -5.39mm/a , 倾向速率为 2.66mm/a , 断层有逆冲和右旋走滑的趋势。由于走滑位移会受到断层两端的约束, 而倾向位移不受地表约束更易发生滑动, 所以从震前断层滑移参数分析可知, 断层的倾向滑移以逆冲为主。这与震后观测结果及上述同震反演结果 (逆冲和右旋运动) 一致。这个结果可能预示着, 可以通过震前断层的运动趋势来推测地震发生时断层的破坏形式。

进一步地, 断层震前各期的反演结果 (表 4) 表明, 震前第一、二、三期的年均走向滑移分别为 5.76mm/a 、 5.44mm/a 、 4.97mm/a , 逐渐减小。而倾向的年均滑移分别为 2.29mm/a 、 2.66mm/a 和 3.02mm/a , 显示上升趋势。这表明断层的矢量运动方向从以走滑为主的右旋运动逐渐偏转到以倾向滑移为主的逆冲运动。该趋势预示着断层在未来地震时可能发生以逆冲为主的破坏, 这与汶川地震时断层发生的巨大逆冲滑移相一致。

表 4 龙门山断层震前 3 期反演结果

Table 4 Inversion result of pre-earthquake fault parameters

量	U_1/m	U_2/m
震前第一期滑移	-10.98	4.37
震前第二期滑移	-15.80	7.73
震前第三期滑移	-14.89	9.06
震前第一期年均滑移	-5.76	2.29
震前第二期年均滑移	-5.44	2.66
震前第三期年均滑移	-4.97	3.02
震前 3 期平均滑移	-5.39	2.66

龙门山断层震前和同震的滑移参数可以反映地震的能量累计和释放量, 进而能够估算汶川地震的复发周期。龙门山断裂带晚第四纪以来地貌学的研究结果显示 (马保起等, 2005),

茂汶-汶川断裂、北川-映秀断裂和江油-灌县断裂晚第四纪逆冲滑动速率的总和约为 1mm/a 左右。龙门山断裂带历史上没有超过 7 级的地震, 6 级以上地震只有 3 次, 由于地震震级相差一级释放的能量相差很大, 所以忽略复发周期内地震释放的能量, 由于临近地震, 后 2 期的逆冲滑动有加速趋势, 故将第一期逆冲滑动速率 2.29mm/a 作为长期积累量, 每年平均释放量为 1mm/a , 用积累量与释放量之差计算净积累量为 1.29mm/a , 利用断层平均滑动位移 4.725m 与断层的滑动速率的净积累量之比计算得到地震复发周期为 3700 年, 地质学估计的地震复发周期为 2000—10000 年 (谢富仁等, 2008; 李玉江等, 2012)。

3 结论

(1) 本文计算了震前 3 期断层滑移积累量, 断层平均走滑速率为 -5.39mm/a , 倾滑向速率为 2.66mm/a , 与同震相比, 断层运动形式一致, 都为逆冲兼右旋的滑动。

(2) 比较震前 3 期的滑移速率, 从第一、二期到第二、三期逆冲滑移速度增加, 说明逆冲方向有加速的趋势, 断层滑移加速方向和地震发生时断层的滑动形式一致。

(3) 根据震前、同震断层滑移和地质资料, 利用断层同震逆冲滑移与震前断层滑动速率的净积累量推算了汶川地震的复发周期, 结果表明汶川地震复发周期为 3700 年。

参考文献

- 陈运泰, 2008. 汶川特大地震的震级和断层长度. 科技导报, **26** (10): 26—27.
- 陈运泰, 许力生, 张勇等, 2008. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告. 北京: 中国地震局地球物理所.
- 焦青, 杨选辉, 许丽卿, 2008. 汶川 8.0 级地震前后龙门山断裂活动特征浅析. 大地测量与地球动力学, **28** (4): 7—11, 31.
- 雷英杰, 2014. MATLAB 遗传算法工具箱及应用. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 李海兵, 付小方, VAN DER WOERD J. 等, 2008. 汶川地震 (M_S 8.0) 地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. 地质学报, **82** (12): 1623—1643.
- 李勇, 周荣军, Densmore A. L., 2008. 映秀-北川断裂的地表破裂与变形特征. 地质学报, **82** (12): 1688—1706.
- 李玉江, 陈连旺, 2012. 汶川 M_S 8.0 地震大震复发周期的研究进展. 地球物理学进展, **27** (2): 455—463.
- 李志才, 张鹏, 金双根, 蒋志浩, 温扬茂, 2009. 基于 GPS 观测数据的汶川地震断层形变反演分析. 测绘学报, **38** (2): 108—113.
- 刘健, 熊探宇, 赵越, 张永双, 陈群策, 2012. 龙门山活动断裂带运动学特征及其构造意义. 吉林大学学报 (地球科学版), **42** (S2): 320—330.
- 刘静, 张智慧, 文力等, 2008. 汶川 8 级大地震同震破裂的特殊性及构造意义——多条平行断裂时活动的反序型逆冲地震事件. 地质学报, **82** (12): 1707—1722.
- 柳畅, 石耀霖, 朱伯靖, 程惠红, 杨小林, 2014. 地壳流变结构控制作用下的龙门山断裂带地震发生机理. 地球物理学报, **57** (2): 404—418.
- 马保起, 苏刚, 侯治华等, 2005. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率. 地震地质, **27** (2): 234—242.
- 王阅兵, 金红林, 付广裕, 2012. Yabuki&Matsu'ura 方法在汶川 M_W 7.9 地震反演中的应用. 地震, **32** (2): 121—128.

- 吴珍汉, 张作辰, 2008. 四川汶川 M_S 8.0 级地震的地表变形与同震位移. 地质通报, **27** (12): 2067—2075.
- 谢富仁, 张永庆, 张效亮, 2008. 汶川 M_S 8.0 级地震发震构造大震复发间隔估算. 震灾防御技术, **3** (4): 337—344.
- 徐果明, 2003. 反演理论及其应用. 北京: 地震出版社.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等, 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, **51** (4): 1066—1073.
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 周成虎, 陈运泰, 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, **38** (10): 1186—1194.
- 周明, 1999. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社.
- Okada Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace. Bulletin of the Seismological Society of America, **75**(4):1135—1154.
- Okada Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, **92**(2):1018—1040.
- Steketee J. A., 1958. On volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. Canadian Journal of Physics, **36**(2):192—205.

Comparsion of Pre-earthquake and Coseismic Fault Slip of the 2008 Wenchuan Earthquake

Liang Xiangzhou and Hao Shengwang

(School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract In order to get the acknowledge about the pre-earthquake fault slip and its relationship with coseismic slip of the 2008 Wenchuan Earthquake, this paper inverts the GPS measurements from 1999 to 2007 and the coseismic measurements to infer the pre-earthquake and coseismic slip characteristics of Longmenshan fault. The earthquake dislocation theory and the genetic algorithm are used in the inversion. It is shown that the mean strike-slip from 1999 to 2007 is about 5.39 mm, and the dip slip is almost 2.66 mm. This pre-earthquake slip tendency is consistent with the coseismic reverse and right-lateral slip. The results of the dip slips occurred in 1999 to 2001, 2001 to 2004 and 2004 to 2007 before the 2008 Wenchuan Earthquake indicate that the dip slip is accelerating with time. This acceleration slip may be a precursor of earthquake. Finally, based on the inversion results of the pre-earthquake and coseismic fault slip, we estimate the recurrence period of Wenchuan earthquake.

Key words: GPS; Fault slip; Pre-earthquake; Coseismic; Wenchuan Earthquake