

基于三维数据的微粒群反演汶川地震同震滑动

刘杰¹

1 西安培华学院,西安市常宁大街 888 号,710125

摘要:采用 2008-05-28 汶川大地震的 GPS 三维同震形变数据,运用微粒群算法,结合位错理论模型,反演龙门山断裂的三维滑动速率。结果表明,龙门山主山前边界大断裂、龙门山后山大断裂、龙门山主中央大断裂均呈现逆冲特征,其中,龙门山主中央大断裂还具有右旋走滑趋势;龙门山主中央大断裂的滑动速率最大,且断层的滑动速率与地表同震位移具有同步响应特征。

关键词:汶川地震;龙门山断裂;反演;微粒群算法;断层滑动速率

中图分类号:P312;P315

文献标识码:A

2008-05-12 的汶川 8.0 级地震发生在青藏高原东缘与四川盆地交界地带,斜跨北东走向的龙门山断裂带上。龙门山断裂带自东北向西南沿四川盆地边缘分布,沿断裂带青藏高原推覆在四川盆地之上,该断裂带主要由 3 条断裂组成,自西往东分别是汶川-龙门山后山大断裂、龙门山主中央大断裂和龙门山主山前边界大断裂。断裂带总体走向为 30°~50°,倾向 NW,倾角为 50°~70°,绵延长约 500 km,宽达 70 km,规模巨大。

龙门山断裂带发育历史悠久,且具有多期活动,是我国南北地震构造带的重要组成部分。该断裂带对解释青藏高原东部动力学与南北地震带的形变有着非常重要的意义,同时还与川西油气田的形成关系密切。王二七等^[1]对龙门山断裂带印支期左旋走滑运动进行研究,并分析其大地构造的成因。唐文清等^[2]利用 GPS 技术监测鲜水河、龙门山断裂的活动情况,并对其运动特征进行分析和解释。刘树根等^[3]分析研究龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降。李勇等^[4]分析龙门山断裂带的地质背景,研究汶川地震的地表破裂,并定量计算龙门山主干断裂的逆冲速率和走滑速率。本文将微粒群优化算法(particle swarm optimization, PSO)引入到三维数据联合反演汶川地震同震滑动速率中,以期得到一些有益的结论。

1 汶川 8.0 级地震龙门山断裂带附近同震水平及垂直位移特征

为理解和认识龙门山断裂带实际断层活动与

形变场的关系,利用地震预测研究所中国地壳运动观测网络数据中心 2008-05-28 处理计算得到的汶川地区 2008 年 89 个 GPS 观测点的三维位移场同震观测数据进行分析,并将滑动速率归化到局部参考坐标下,结果见图 1~2。

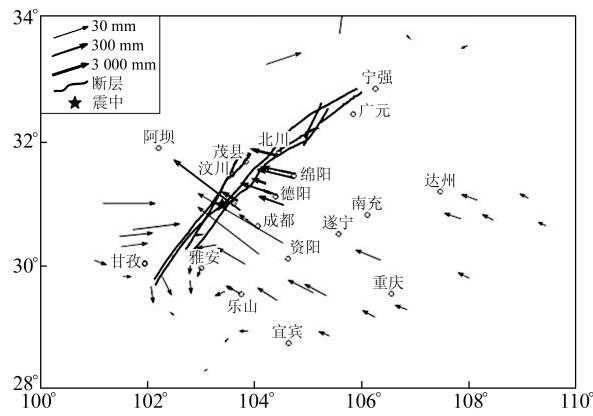


图 1 实测 GPS 速率场
Fig. 1 Displacement field observed by GPS

由于受到印度洋板块和欧亚板块的强烈挤压作用,青藏高原快速隆升的同时也向东、向北移动,在此遇到四川盆地刚体的阻挡,当断层错动大于断层强度时,诱发了这次逆冲挤压型断层地震。由图 1 可见,GPS 水平位移速率场以龙门山断裂带为中线,形成了相互挤压的格局^[5]。此次同震观测,水平位移最大处位于龙门山断裂的中部及北部的北川一带,最大可达 2.4 m 左右。从图 2 可以看出,实测 GPS 垂直位移以龙门山断裂带中北部的北川县一带的垂直位移量最大,以北川县一带为中心,垂直位移量向四周衰减。

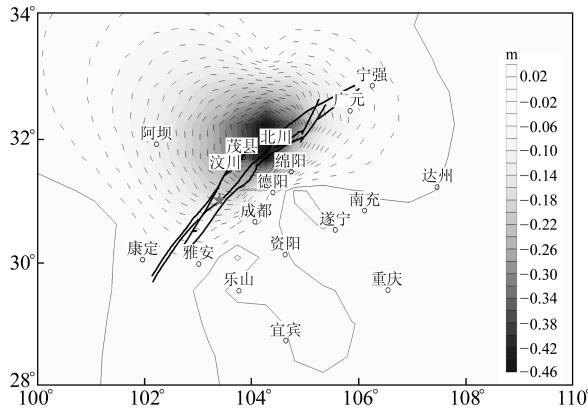


图 2 实测 GPS 垂直形变场
Fig. 2 Vertical deformation field observed by GPS

2 微粒群(PSO)算法的原理和方法

微粒群优化算法(PSO)将每个个体看作一个微粒,它在 D 维搜索空间中以一定速度飞行,其飞行速度由个体的飞行经验和群体的飞行经验进行动态调整。假设群体中有 $n+1$ 个微粒,那么,微粒 i 在第 j 维位置与速度的更新公式如下^[6-8]:

$$v_{ij}(k+1) = v_{ij}(k) + c_1 r_{1j} [p_{ij}(k) - x_{ij}(k)] + c_2 r_{2j} [g_j(k) - x_{ij}(k)] \quad (1)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \quad (2)$$

如图 3 所示,微粒 i 从位置 X_1 移动到位置 X_2 的过程中,微粒 i 在 3 个速度(V_1 是微粒 i 自身的速度, V_2 是微粒 i 此时的个体极值 p_{best} 方向上的速度, V_3 是微粒 i 此时的全局极值 g_{best} 方向上的速度)的共同作用下,以速度 V 到达位置 X_2 。如此迭代,微粒将逐步靠近最优点,实现最优化过程。

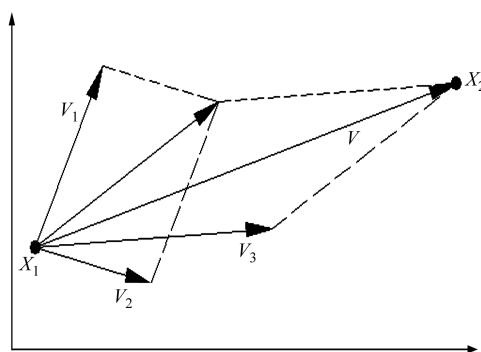


图 3 微粒二维空间搜索示意图
Fig. 3 Particle search in two-dimensional space

3 GPS 三维数据反演龙门山断裂滑动速率

地面 GPS 观测的三维位移场与断层参数之间的关系可通过位错理论模型(图 4)来表示为^[9-10]:

$$u_i = f(\xi, \eta, \zeta, U_j, L, W, d, \varphi) \quad (3)$$

式中, $u_i (i=x, y, z)$ 为地面观测的三维位移场速率,以地面断层走向为 X 轴,地面的垂线方向为 Z 轴,在地面内垂直于 X 轴和 Z 轴的直线为 Y 轴, φ 为断层的倾角, L 、 W 、 d 分别为断层的长、宽和下底面深度, $U_j (j=1, 2, 3)$ 为矩形断层面上盘相对于下盘分别在走向、倾向和法向的滑动分量。

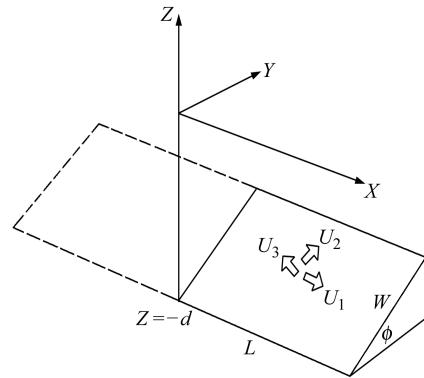


图 4 矩形位错模型
Fig. 4 Rectangle dislocation model

3.1 三维数据反演模型

地球动力学过程十分复杂,一种运动往往造成多种响应结果。因此,为了更加合理地解释断层的运动过程,从多方面反映断层的运动特征,采用三维数据对断层滑动速率进行反演^[11]。设目标函数为:

$$\min \Phi(P) = \sum_{j=1}^n [u_j(P) - u_j(O)]^2 \quad (7)$$

式中, n 为观测值个数, $u_j(P)$ 为第 j 个观测点上通过位错理论模型由断层参数计算出的位移, $u_j(O)$ 为通过 GPS 观测获得的第 j 个点的水平及垂直位移, $\Phi(P)$ 为目标函数或适应度。式(7)可描述为,在三维空间中找一个向量,使目标函数 $\Phi(P)$ 的值最小。

3.2 断层模型的选取

为使模型更接近真实断层,采用断层微分思想^[12],根据断裂的分布排列等几何特征进行断裂形态的几何分段:将龙门山主山前边界大断裂、龙门山后山大断裂、龙门山主中央大断裂分成若干个子断层^[13]。通过查阅相关资料^[13-15],设置每个子断层单元的位置参数和几何参数,见表 1。其中经纬度分别为每个子断层单元的中心坐标。将待反演计算的每个子断层单元 3 个位错量(U_1 , U_2 , U_3)的初始值都取在 $[-5, 5]$ (单位 m/a)。

基于位错理论模型,采用微粒群算法,利用汶川地区 2008 年的 89 个 GPS 观测点的三维位移场同震观测数据,对龙门山断裂的三维滑动速率进行反演分析,反演结果见表 2。

表1 子断层参数

Tab. 1 Sub-fault parameters

	经度 /°	纬度 /°	长度 /km	宽度 /km	深度 /km	走向 /°	倾向 /°
龙门山主山前边界大断裂	102.786	30.199	72.418	45	20	45	65
	103.264	30.704	73.031	45	20	45	65
	103.764	31.201	57.947	45	20	45	65
	104.185	31.622	84.914	45	20	45	65
	104.448	31.845	78.673	45	20	45	65
	104.917	31.938	57.259	45	20	45	65
	104.945	32.067	67.722	45	20	45	65
	105.007	32.158	12.663	45	20	45	65
	105.236	32.305	89.636	45	20	45	65
龙门山后山	102.142	29.793	114.114	40	20	40	65
	102.838	30.625	57.658	40	20	40	65
	103.217	31.029	46.993	40	20	40	65
	103.476	31.389	63.851	40	20	40	65
龙门山中央大断裂	102.158	29.698	84.175	45	20	40	65
	102.637	30.332	55.323	45	20	40	65
	103.136	30.814	61.808	45	20	40	65
	103.626	31.178	57.060	45	20	45	65
	104.004	31.577	79.587	45	20	50	65
	104.562	32.113	83.823	45	20	50	65
	105.292	32.547	67.161	45	20	50	65

表2 反演结果

Tab. 2 Inversion results

断裂名	$U_1/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$	$U_2/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$	$U_3/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$
龙门山主山前边界大断裂	-0.465 1	-0.909 5	-0.561 2
	-0.752 3	-1.245 8	-0.465 6
	-1.096 9	-1.645 7	-0.680 1
	-0.787 8	-1.398 1	0.196 8
	-0.667 5	-1.862 1	0.090 9
	-0.647 2	-1.720 7	-0.520 3
	-0.478 1	-1.372 8	-0.196 7
	-0.405 4	-0.891 2	-0.225 8
	-0.287 3	-0.726 6	-0.188 9
龙门山后山大断裂	-0.205 3	-0.884 6	-0.161 5
	-0.510 3	-1.127 1	-0.341 6
	-0.764 6	-1.478 5	-0.112 5
	-0.688 4	-1.757 2	-0.231 3
	-1.757 8	-1.331 6	-0.136 1
	-2.016 1	-2.257 5	-0.224 3
龙门山主中央大断裂	-2.633 4	-2.817 1	-0.295 9
	-2.842 2	-2.592 2	-0.381 2
	-2.321 9	-2.704 1	-0.128 5
	-1.037 3	-2.030 2	-0.013 7
	-1.348 9	-1.247 1	-0.425 8

3.3 反演结果分析

分析上表数据发现,所研究的3条断裂的倾滑分量相较其他2个分量略大,且均呈现逆冲特征。其中,龙门山主中央大断裂的走滑分量也有显著特征,呈现右旋走滑的趋势,这与震后野外考察结果相一致^[15-16]。3条断裂中,龙门山主中央大断裂的滑动速率最大,近3 m/a,而此断裂正是发震断裂。分析各断裂反映地震性质的倾滑分量发现,3条断裂的最大倾滑分量均发生在同震位

移最大的子断层区域。

本文所用微粒群算法反演龙门山断裂深部滑动结果与郝明等^[17]、王敏^[18]、许才军等^[19]的研究成果趋势上完全一致,说明微粒群算法反演断层滑动速率的有效性;在数值上,与部分成果略有区别,这与断层模型的选取和观测数据密切相关,也将作为下一阶段的研究重点。

4 结语

1)汶川M_S8.0地震前后,龙门山地区地壳水平运动存在一定的差异性,在北川、德阳、绵阳等地,水平速率很大,可达其他地区(如龙门山断裂东南地区)水平速率的10~100倍。同震水平位移呈沿龙门山断裂带相互挤压的格局。

2)汶川M_S8.0地震引起北川附近地表垂直位移巨大,同震垂直位移沿断裂带分布。

3)龙门山主山前边界大断裂、龙门山后山大断裂、龙门山主中央大断裂均呈现逆冲特征,其中,龙门山主中央大断裂还具有右旋走滑趋势。

4)发震断裂-龙门山主中央大断裂的滑动速率最大。且断层的滑动速率与地表同震位移具有同步响应特征。

参考文献

- [1] 王二七,孟庆任,陈智梁,等.龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J].地学前缘,2001,8(2):375-384 (Wang Erqi, Meng Qingren, Chen Zhiliang, et al. Early Mesozoic Left-Lateral Movement along the Longmenshan Fault Belt and Its Tectonic Implications[J]. Earth Science Frontiers, 2001,8(2):375-384)
- [2] 唐文清,刘宇平,陈智梁,等.基于GPS技术的活动断裂监测——以鲜水河、龙门山断裂为例[J].山地学报,2007,25(1):103-107(Tang Wenqing, Liu Yuping, Chen Zhiliang, et al. Monitoring of Faults Activity Based on GPS[J]. Journal of Mountain Science, 2007,25(1):103-107)
- [3] 刘树根,罗志立,戴苏兰,等.龙门山冲断带的隆升和川西平原盆地的沉降[J].地质学报,1995,69(3):204-214 (Liu Shugen, Luo Zhili, Dai Sulan, et al. The Uplift of the Longmenshan Thrust Belt and Subsidence of the Western Sichuan Foreland Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1995,69(3):204-214)
- [4] 李勇,黄润秋,周荣军,等.龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J].工程地质学报,2009,17(1):3-16(Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, et al. Geological Background of Longmenshan Seismic Belt and Surface Ruptures in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(1):3-16)
- [5] 刘杰.微粒群算法反演断层滑动速率[D].西安:长安大学,2011(Liu Jie. Three-Dimension Slip Velocity of Faults Inversed by Particle Swarm Optimization[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011)

- an University, 2011)
- [6] Kennedy J, Eberhart R C. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm [C]. World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Piscataway, 1997
- [7] 刘杰, 张永志, 张秀霞, 等. 基于 GPS 数据的粒子群算法反演断层三维滑动速率[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 40-42 (Liu Jie, Zhang Yongzhi, Zhang Xiuxia, et al. 3D Fault Slip Velocity Inversion by Using Particle Swarm Optimization Algorithm from GPS Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 40-42)
- [8] Eberhart R C, Shi Y H. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, 2001
- [9] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half Space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4): 1135-1154
- [10] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040
- [11] 刘杰, 张永志. GPS 重力数据的微粒群算法联合反演断层三维滑动速率[J]. 测绘科学, 2011, 36(4): 95-97 (Liu Jie, Zhang Yongzhi. Fault Slip Velocity Inversion by Using the Particle Swarm Optimization Algorithm with GPS and Gravity Data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4): 95-97)
- [12] 谈洪波, 申重阳, 李辉. 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, 2008, 28(4): 54-62 (Tan Hongbo, Shen Chongyang, Li Hui. Characteristics of Surface Gravity Changes Caused by a Fault or Faults Dislocation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(4): 54-62)
- [13] 马寅生, 龙长兴, 谭成轩, 等. 四川汶川 M_s8.0 级地震同震变形特征和分段性[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2076-2085 (Ma Yinsheng, Long Changxing, Tan Chengxuan, et al. Co-Seismic Deformation Features and Segmentation of the M_s8.0 Wenchuan Earthquake in Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(12): 2076-2085)
- [14] 《活动断裂研究》编委会, 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究: 理论与应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1998 (Editorial Committee of Research on Active Fault, Institute of Geology, CEA. Research on Active Fault: Theory and Application [M]. Beijing: Seismological Press, 1998)
- [15] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 M_s8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629 (Xu Xiewei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. The M_s8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 597-629)
- [16] 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 2009, 54(7): 944-953 (Tectonic Model of the Great Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(7): 944-953)
- [17] 郝明, 王庆良, 崔笃信, 等. 根据 GPS 和水准资料反演 2008 年汶川地震同震破裂模型[J]. 地震研究, 2012, 35(3): 323-329 (Hao Ming, Wang Qingliang, Cui Duxin, et al. Co-Seismic Rupture Model of Wenchuan M8.0 Earthquake in 2008 Inversed from GPS and Precise Leveling Observation Data [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(3): 323-329)
- [18] 王敏. 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5.12 汶川大地震破裂空间分布[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2519-2526 (Wang Min. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Wenchuan Great Earthquake Constrained Using GPS Co-seismic Displacement Field [J]. Journal of Geophysics, 2009, 52(10): 2519-2526)
- [19] 许才军, 刘洋, 温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 M_w7.9 地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 195-201 (Xu Caijun, Liu Yang, Wen Yangmao. M_w7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 38(3): 195-201)

Coseismic Slip of Wenchuan Earthquake Inversed by Particle Swarm Optimization Algorithm Using Three-Dimensional Data

LIU Jie¹

¹ 西安理工大学, 888 春晓街, 西安 710125, 中国

Abstract: Using the three-dimensional coseismic formation GPS data of Wenchuan earthquake in 2008, combined with the dislocation model, the three dimensional velocity of Longmenshan fault is inversed by PSO. The result shows that: Longmenshan Shanyan, Longmenshan Houshan, and Longmenshan Zhongyang faults are reverse faults. Longmenshan Zhongyang fault has dextral character. The greatest velocity is at Longmenshan Zhongyang fault. The slip velocity of the fault corresponds with coseismic dislocation on earth.

Key words: Wenchuan earthquake; Longmenshan fault; inversion; particle swarm optimization algorithm (PSO); fault slip rate

About the author: LIU Jie, lecturer, majors in the application of particle swarm optimization algorithm in geodesy, E-mail: liujie_may@126.com.