

渭河盆地断裂活动速率的粒子群算法反演

张永志, 徐海军, 王卫东, 刘杰, 山锋

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:渭河盆地是我国典型的断陷盆地,是中国大陆地裂缝活动、地面沉降活动最剧烈的地区之一。本文利用 2004—2007 年间的 GPS 数据,采用粒子群算法与位错理论模型相结合,对渭河盆地主要断裂的三维滑动速率进行了反演计算分析。结果表明:(1)断裂活动性质与地质测量方法获得的结果基本一致:除韩城—华县断裂以张裂为主外,渭河盆地主要断裂均以正倾滑为主,并具有走滑特征,呈张裂的运动趋势;(2)从滑动速率来看,秦岭北侧大断裂速率最大,可达 4.5 mm/a。固关—宝鸡断裂活动最小,活动速率仅为 1 mm/a 左右;(3)在趋势上与现有的地质资料基本一致,以 EW 向断裂活动最强,NE 方向较强,而 NW 方向较弱,并且分布上呈现南强北弱的特征。

关键词:渭河盆地;粒子群算法反演;断层滑动速率;位错模型;GPS 数据

中图分类号: P227 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)04-0322-04

Inversion on Slip Velocity of Main Faults in Weihe Basin by Particle Swarm Optimization Algorithm with GPS Data

ZHANG Yong-zhi, XU Hai-jun, WANG Wei-dong, LIU Jie, SHAN Feng

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Weihe Basin is a typical fault basin, and is one of the strong underground fissures and ground subsidence regions in China. In this study, by using the particle swarm optimization algorithm combined with the dislocation model. The three dimension slip velocity of main faults are computed in Weihe Basin by using GPS data observed from 2004 to 2007. The results show that (1) characteristics of faults activity are consistent with geological results basically, except Hancheng—Huaxian opening fault, all other faults are normal dip faults; (2) the slip velocity of Qinling northern margin fault is the largest, about 4.5 mm/a, and that of Guguan—Baoji fault is the smallest, about 1 mm/a; (3) the activity of faults are strongest in EW direction, moderate in NE direction and weakest in NW direction. The characteristics of distribution is stronger in southern area and weak in northern area of the basin.

Key words: Weihe Basin; Particle swarm optimization algorithm inversion; Fault slip velocity; Dislocation model; GPS data

0 引言

活动断裂既是地壳活动最敏感的“传感器”,又是应力释放的“窗口”。在弹性介质中,断层的错动与断层周围的地表形变存在确定的物理关系。显然,地壳运动和应力释放引起的地质灾害与断层的

运动有着密切的关系^[1]。根据地表的 GPS 观测数据反演研究地壳内部断裂活动,认识断层滑动的动力过程,是大地测量研究的主要问题之一。对此国内外已有一些相应的研究,如 Lisowski 等利用电子

收稿日期:2011-04-12

基金项目:国家自然科学基金(40674001);国土资源大调查项目(1212010914015);中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2010ZY016);长安大学基础研究支持计划专项基金资助;陕西省自然科学基金研究计划项目(2011JM5005)

作者简介:张永志(1961—),男(汉族),教授,博士生导师,主要从事地壳形变、重力测量、INSAR、GPS 测量等的教学与研究。

测距仪、GPS 和 VLBI 数据对 1989 年 Loma Prieta 地震的同震形变进行了联合反演^[2]; Heki 利用 GPS 观测资料采用位错理论模型对板内地震的震后断层的无震滑动进行了反演研究^[3]; 张希等人利用 1999—2004 年的 GPS 与水准数据, 结合三维负位错模型联合反演了青藏东北缘断裂的主要参数, 讨论了断层活动与孕震的关系^[4]。

渭河盆地地处中国重要的大地构造分界位置上, 北接鄂尔多斯台地, 南邻秦岭褶皱带, 东缘山西隆起带, 北端与鄂尔多斯西南边界弧形断裂束相接, 是中国大陆强震活动区之一, 历史上地震繁多, 它的地裂灾害也备受瞩目。研究该地区活动断裂的动力学机制, 对分析地震和地质灾害的成因机理以及地震和地质灾害预测预报等有重要意义^[1]。本文利用粒子群算法结合位错理论, 采用渭河盆地 2004—2007 年的 GPS 观测数据对该地区主要断层的三维滑动速率进行反演分析。

1 带惯性权重的粒子群反演算法

粒子群算法将每个个体看作是在 D 维搜索空间中的一个没有重量和体积的粒子^[5], 并在搜索空间中以一定的速度飞行。该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。为了改善基本 PSO 算法的收敛性能, Shi 与 Eberhart 首次在速度进化方程中引入惯性权重^[6], 假设群体中有 $n+1$ 个粒子, 则粒子 i 在第 d 维的位置与速度更新公式如下:

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

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

其中, c_1, c_2 是粒子运动的加速度(也称学习因子), 分别调节全局最好粒子和个体最好粒子飞行的最大步长; r_{1j}, r_{2j} 是 $[0, 1]$ 之间的随机数; ω 称为惯性权, 在搜索过程中可对其进行动态调整。

2 渭河盆地主要断层运动模型的粒子群算法反演分析

2.1 地面三维位移场速率与断层活动关系

断层活动参数与地面三维位移场之间的关系可通过位错理论模型来表示^[7-9](图 1)

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

式中, $u_i (i = x, y, z)$ 表示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

断层倾角; L, W, d 分别表示断层的长、宽和下底面深度; $U_j (j = 1, 2, 3)$ 分别表示矩形断层面上盘相对于下盘分别在走向、倾向和张开发方向的滑动量。

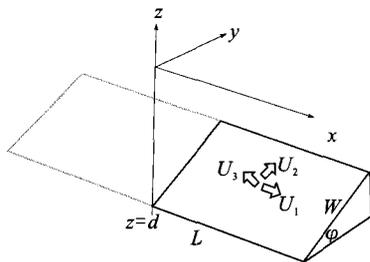


图 1 矩形位错模型

Fig. 1 Rectangle dislocation model.

2.2 渭河盆地主要断层与 GPS 数据分布关系

为了理解和认识渭河盆地实际断层活动与地面 GPS 观测的地面形变的关系, 我们收集了渭河盆地的部分 GPS 数据。GPS 位移速率场的参考框架为 ITRF2000。利用 GMT 软件对该地区的数值高程数据, 断层数据和 2004—2007 年渭河盆地的 GPS 观测数据进行统一处理, 获得相对于欧亚板块的地表 GPS 水平运动速率场、该地区主要断层分布、地形分布的关系如图 2。图中, 红色线段为该地区的主要断裂; 箭头表示 GPS 速率, 箭头长度表示 GPS 速率大小, 箭头方向表示该地区地壳运动方向。从图 2 的 GPS 速率结果可以看出, 研究区西部主要受甘青块体向东挤压的影响, 渭河盆地及其周边的地壳运动主要以向东南方向运动为主。渭河盆地西部地区的断裂分布主要以北西向为主, 而东部地区在盆地内的断裂以北东向为主, 盆地南部的山区以北西西向为主。

从图中还可以看出, 渭河盆地的断裂整体表现出一种不连续的逆时针旋转运动特征。

3 渭河盆地主要断裂滑动速率的反演结果分析

为深入理解渭河盆地实际断裂活动与地面观测的三维形变场的关系, 本文采用粒子群算法, 以及渭河盆地 2004—2007 年间观测的 GPS 数据对该地区主要断裂的三维滑动速率进行了反演计算分析。让 20 个随机粒子在三维空间 (U_1, U_2, U_3) 中飞行搜索, 最终输出反演结果, 如表 1 所示。

从渭河盆地各断裂的反演结果可以看出, 除韩城—华县断裂以张裂为主外, 渭河盆地主要断裂均以正倾滑为主; 北东向断裂如乾县—蒲城断裂、临潼—长安断裂、韩城—华县断裂同时具有右旋走滑

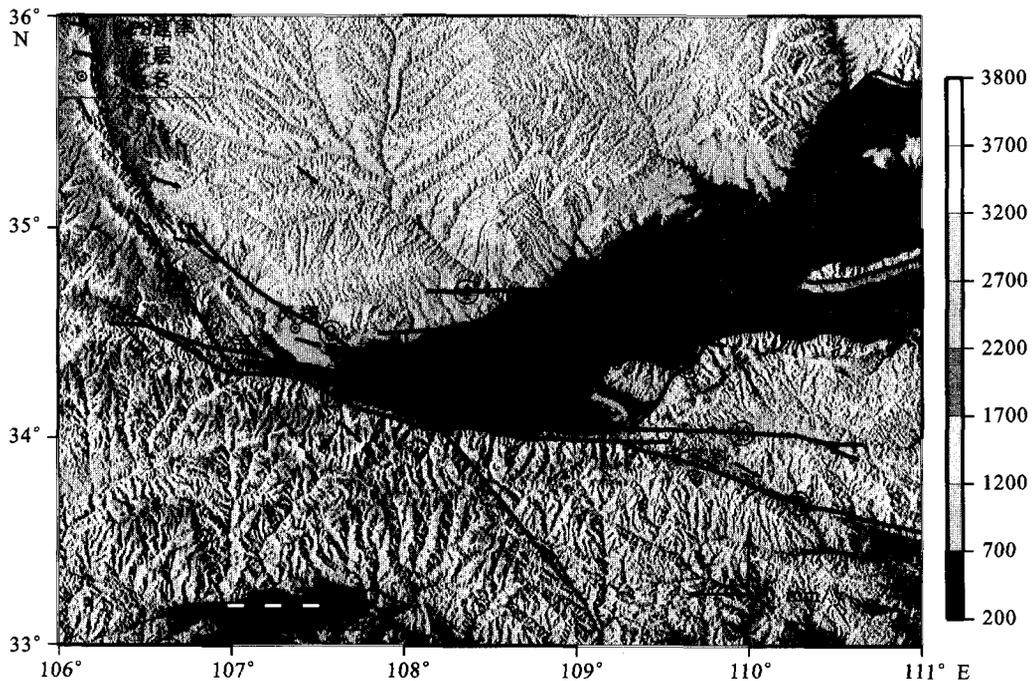


图 2 渭河盆地 GPS 观测位移与主要断裂分布(2004—2007)

Fig. 2 Distribution of Displacement velocity observed by GPS and faults in Weihe Basin (2004—2007).

表 1 渭河盆地主要断裂三维滑动速率的 GPS 数据反演结果

断裂段 ^[11]	走滑速率/ [mm·a ⁻¹] 负为右旋	倾滑速率/ [mm·a ⁻¹] 负为逆冲	张裂速率/ [mm·a ⁻¹] 负为挤压
④口镇—关山断裂	2.163 2	3.023 8	1.230 6
③岐山—马召断裂北段	0.827 9	1.911 6	0.980 7
③岐山—马召断裂南段	1.026 8	2.032 8	0.964 1
⑦临潼—长安断裂北段	-1.225 4	2.856 78	1.740 7
⑦临潼—长安断裂南段	-2.032 7	2.97	1.995 5
⑩铁炉子断裂西段	2.103 8	3.675 9	0.805
⑩铁炉子断裂东段	2.265 8	3.882 9	1.800 6
⑨华山北侧断裂西南段	1.753 8	3.380 4	1.575 6
⑨华山北侧断裂东段	1.928 7	2.981 7	0.866 5
⑧韩城—华县断裂	-1.297 5	1.926 7	2.604 2
②商县—丹凤断裂	1.785 2	2.461 7	1.256 9
②固关—宝鸡断裂	0.491 7	1.609 3	1.186 8
⑥渭河断裂西段	1.268 6	3.754 7	1.087 5
⑥渭河断裂东段	1.783 2	3.778 8	1.497 9
①秦岭北侧大断裂西段	2.275 4	3.783 1	2.041 7
①秦岭北侧大断裂中段	2.596 5	4.015 6	2.301 6
①秦岭北侧大断裂东段	2.927 2	4.581 4	2.252 6
⑤乾县—蒲城断裂西段	-2.103 5	2.815 4	1.921 8
⑤乾县—蒲城断裂东段	-1.379 5	2.964 8	0.753 8

特征。其它断裂具有左旋走滑特征。GPS 数据反演的断裂运动性质与构造地质结果趋势上基本一致^[1,10]。从滑动速率来看,秦岭北侧大断裂速率最大,可达 4.5 mm/a;铁炉子断裂、渭河断裂较大,平均滑动速率为 3 mm/a;华山北侧断裂、口镇—关山断裂、长安—临潼断裂、乾县—蒲城断裂次之;韩

城—华县断裂,商县—丹凤断裂,岐山—马召断裂活动较小;固关—宝鸡断裂活动最小,仅为 1 mm/a 左右。在趋势上与现有的地质资料基本一致,以 EW 向断裂活动最强,NE 方向较强,而 NW 方向较弱,分布上呈现南强北弱的特征^[10]。但在数值上与地质学得出的结果略有差异,这也表明在反演过程中由于断层参数往往难以获得准确的数值,从而在某种程度上影响了反演结果。另外,地质方法获得的断层滑动速率是上百万年时间尺度的平均值,而 GPS 反演结果只是近三年时间尺度上的平均值,二者之间在理论上也存在一定的差异。

4 结论与认识

通过地面实测 GPS 数据采用粒子群算法对渭河盆地主要断裂的三维滑动速率的反演计算分析,本文得出如下结论和认识:

(1) 渭河盆地主要断裂,除韩城—华县断裂外,其他断裂均以正倾滑为主,兼具走滑特征,呈张裂趋势。其中,临潼—长安断裂、韩城—华县断裂、乾县—蒲城断裂呈现右旋特征,其它均为左旋走滑。

(2) 从数值上看,该地区的活动断裂以 EW 向断裂活动最强,NE 方向较强,并且在分布上呈现南强北弱的特征。在趋势上与现有的地质资料基本一致,只是数值略有差异。

[参考文献]

- [1] 彭建兵,张骏,苏生瑞,等.渭河盆地活动断裂与地质灾害[M].西安:西北大学出版社,1992.
- [2] Lisowski M, W H Prescott, J C Savage, et al. Geodetic estimate of coseismic slip during the 1989 Loma Prieta, California, earthquake[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, 17:1437-1440.
- [3] Heki K, Miyazaki S, Tsuji H. Silent fault slip following an interplate earthquake at the Japan Trench[J]. *Nature*, 1997, 386:595-597.
- [4] 张希,江在森,王双绪,等.青藏块体东北缘 GPS 与水准资料的三维负位错联合反演[J]. *国际地震动态*, 2007, 7:61-66.
- [5] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [A] // *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation [C]*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001: 81- 86.
- [6] Parsopoulos K E, Plagianakos V P, Magoulas G D, et al. Improving particle swarm optimizer by function "stretching" [A] // Hadjisavvas N, Pardalos P. *Advances in Convex Analysis and Global Optimization [G]*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 445-457.
- [7] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *BSSA*, 1985, 82:1018-1040.
- [8] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *BSSA*, 1992, 82:1018-1040.
- [9] 陈运泰,黄立人,林邦慧,等.用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式[J]. *地球物理学报*, 1979, 22(3):201-216.
- [10] 李永善,等.西安地裂及渭河盆地活动断层研究[M].北京:地震出版社,1992.
- [11] 马杏垣,丁国瑜,高文学,等.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989.
- [12] 乔宝成,李勇,董顺利,等.汶川 $M_s 8.0$ 地震中央断裂北段地表破裂特征[J]. *西北地震学报*, 2009, 31(4):333-338.
- [13] 马博琳,李勇,董顺利,等.汶川地震震中映秀地区地表破裂特征[J]. *西北地震学报*, 2009, 31(4):339-343.
- [14] 胡亚轩,崔笃信,张希,等.用 GPS 数据反演分析海原断裂带分段活动特征[J]. *西北地震学报*, 2009, 31(3):227-230.

* * * * *
更 正

《西北地震学报》2011 年 33 卷增刊第 175 页作者单位一栏中原“1. 大连理工大学 建筑工程学部土木工程学院岩土工程研究所, 山东 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 山东 大连 116024”有误, 更正为“1. 大连理工大学 建筑工程学部土木工程学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024”。