

用 GPS 数据反演分析海原断裂带分段活动特征^①

胡亚轩, 崔笃信, 张 希, 王 雄

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要:首先应用 1999—2007 年的 GPS 观测资料分析海原断裂带的运动特征, 看出期间该断裂带 GPS 站点运动速度由南向北逐渐衰减, 在 NWW 和 NE 走向断层两盘的运动差异较为明显, 断层的活动以走滑运动为主。然后依据地质、地球物理等资料给出反演参数初值, 利用水平形变资料对断裂三段的走滑速率及断层下界深度进行反演。结果为从西到东断裂带各段走滑速率分别为 8.25 mm/a、5.49 mm/a 和 5.97 mm/a, 断层底部深度依次为 22.8 km; 13.3 km; 11.1 km。综合分析认为毛毛山—老虎山断裂运动速度明显高于海原断裂速度, 在速度变化梯度较大的毛毛山断裂存在 6 级以上地震空区, 推测具有发生强震的危险性。

关键词: 海原断裂带; GPS 资料; 反演; 滑动速率

中图分类号: P315.2; P227

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0227-04

Inversion and Analysis on the Active Characteristics of Subsections of Haiyuan Fault Belt Using GPS Data

HU Ya-xuan, CUI Du-xin, ZHANG Xi, WANG Xiong

(No. 2 Monitoring Center of China Earthquake Administration, Xi'an, 710054, China)

Abstract: The active characteristics of Haiyuan fault belt are analyzed using GPS data during 1999—2007 firstly. The surveying data show that the movement rates of those GPS sites become decreasing from south to north, especially the rates on two sides of the NWW and NW direction faults have big difference, and the fault movement is mainly strike-slip. Then the initial parameters of inversion are given based on the information of geology and geophysics. The slipping rates and depths of three subsections of Haiyuan fault belt are inversed with constrains of GPS profiles data. The result show that the rates from west to east are 5.49 mm/a, 5.97 mm/a and 8.25 mm/a respectively and the depths are 22.8 km, 13.3 km and 11.1 km respectively. Through comprehensive analysis on the GPS data and parameters of the fault it is concluded that the movement rate on Maomaoshan—Laohushan fault segment is faster than that on Haiyuan fault segment. Maomaoshan fault has big rate grads where also is earthquake vacancy ($M_L > 6.0$), so this region exists risk of strong earthquake.

Key words: Haiyuan faults; GPS data; Inversion; Slip-rate

0 引言

海原断裂带是青藏高原东北缘最引人注目的弧形活动构造带之一, 由一系列倾向不同的次级左旋走滑段组成, 主要有冷龙岭断裂、毛毛山断裂, 老虎

山断裂、海原断裂(狭义)等几段^[1](图 1)。向西与祁连山主干走滑断裂相接。海原断裂带走滑活动时早、活动量大, 长期以走滑活动为主, 为区域内规模较大的边界断裂, 具有较大的切割深度。古地震

^① 收稿日期: 2009-01-05

基金项目: 地震科学基金(A07132), “十一五”国家科研计划支撑项目子专题(2006BAC01B02-02-03)

作者简介: 胡亚轩(1970—), 女(汉族), 陕西西安人, 硕士, 副研究员, 主要从事地壳形变研究。

探槽开挖以及历史地震记载等资料表明,海原断裂带也是一个强震十分活跃的地区^[2-4]。仅在上个世纪海原断裂带就曾发生过两次 8 级以上的大震:其中海原断裂带东段 1920 年发生的海原 $M_s8.5$ 地震,在地表形成了长约 237 km 的地表破裂带,最大水平左旋位移 11 m^[5];西段古浪地区在其南倾分支逆断裂上发生的 1927 年古浪 M_s8 地震地表破裂带以逆冲挤压为主,长度仅 21 km,最大垂直位移 5.7 m^[6]。另外 1990 年 10 月 20 日还在附近发生了景泰、天祝 6.2 级地震。显示出该断裂现今的强烈活动。

青藏高原东北缘的研究成果很多,得到的海原断裂的走滑速率差异很大。Lasserre 通过研究地形地貌的特征和测年确定断层滑动速率,速率为 8 ± 4 mm/a 至 12 ± 4 mm/a 的量级^[7-8];而国家地震局地质研究所等、袁道阳等、何文贵等研究结果表明,海原断裂带的左旋走滑速率一般在 2~6 mm/a 之间^[5,9,10-13]。田勤俭等研究认为海原断裂带 10~5.4

MaB. P. 时期的走滑速率约为 6.5 mm/a;1.6 MaB. P. 以来的走滑速率约为 5 mm/a,则海原断裂带 10 MaB. P. 以来的平均走滑速率约为 5.8 mm/a^[14]。另一种方法是用大地测量方法来确定。中国地壳运动观测网络工程的 GPS 观测结果表明,海原断裂带南北两侧表现为比较显著的左旋运动特征,其远场位移所揭示的海原断裂左旋活动速率只有 5~6 mm/a^[15],与中国学者利用地质地貌方法确定的断层活动速率比较一致;张希等用负位错模型反演的滑动速率在 1~2 mm/a^[16],与 Lasserre 等的结果同样存在很大差异,可能与数据的应用及模型的选取有关。

本文研究范围在 $102.1^\circ \sim 106.8^\circ E, 35.8^\circ \sim 37.6^\circ N$ 之间。应用 1999—2007 年 GPS 观测资料分析断裂带的运动特征,依据地质资料给定断层的部分几何参数;依据 GPS 观测资料以及其它研究成果给定反演初值;应用断层位错模型反演各断层的滑动速率和断层深度,了解断裂带各段的活动特点。

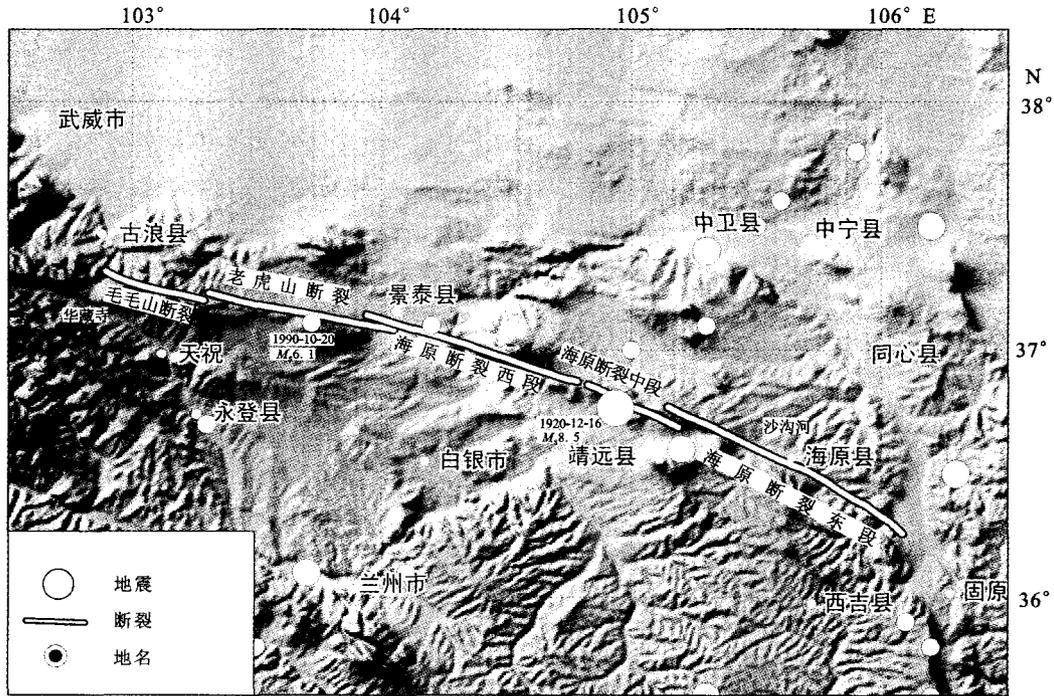


图 1 海原断裂带断层分布图

Fig. 1 The distribution of Haiyuan Faults.

1 水平形变观测资料及分析

1.1 水平形变观测资料

海原断裂带的形变异常对地震的反映较好^[17],近年来许多监测研究工作在此开展。本文应用的观测数据包括徐锡伟、王庆良等依托科技部的重点平台项目、国家自然科学基金课题、中法合作项目建立的古

浪—永登 GPS 剖面、景泰—白银 GPS 观测剖面 1999 年、2004 年、2005 年 3 期观测数据及“中国地壳观测网络工程”区域站 1999 年、2001 年、2004 年、2007 年在该地区的 GPS 观测数据,分析点位共 50 个。

各点位 GPS 观测数据经过 GAMIT/GLOBK

软件解算出运动速率。其中 GAMIT 数据处理时利用中国大陆及周边约 10~15 个 IGS 站,用相似变换法计算速度,即通过对坐标和速度的平移和旋转

实现 ITRF 参考框架,最后求得扣除欧亚板块旋转的影响后的速度值作为区域地壳运动的速度场,见图 2,速度误差一般在±0.5~3.0 mm/a。

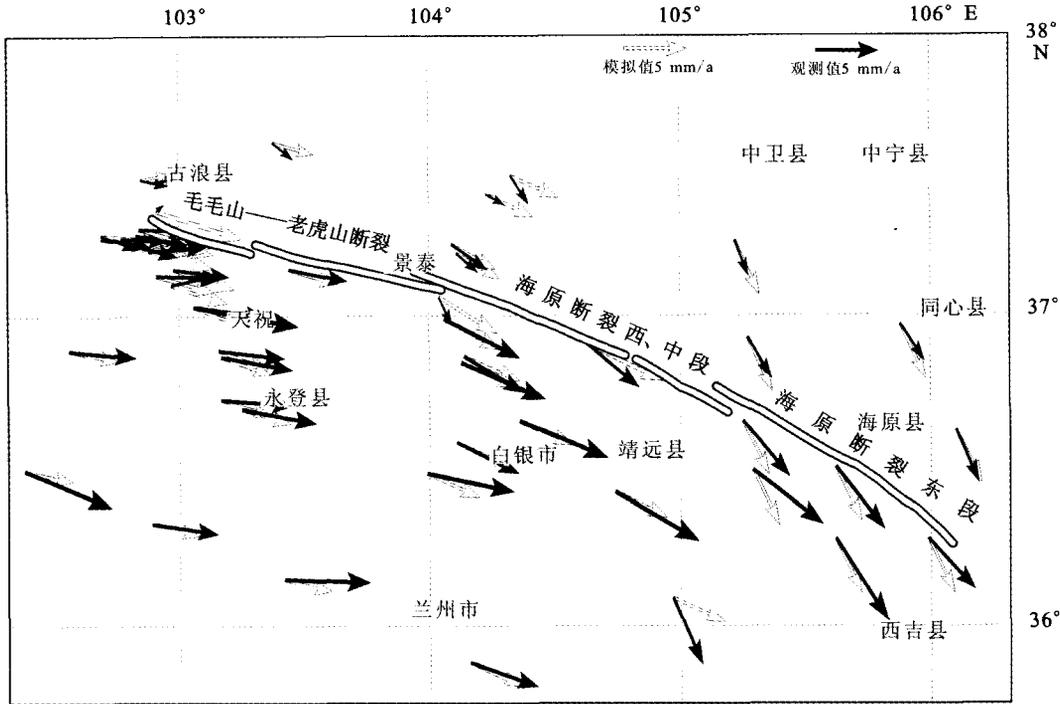


图 2 海原断裂带 GPS 水平运动观测值与模拟值的比较

Fig. 2 Comparison of GPS horizontal movement between the survey values and the simulated result along Haiyuan faults belt.

1.2 水平形变分析

海原断裂带次级断裂很多,又具有分段活动的特点。闵伟等对海原活动断裂带破裂行为特征的研究认为,海原断裂带由 11 条次级剪切断层组成,断裂走向在海原以西为 280°~290°,海原以东为 320°。组成断裂带的 11 条次级剪切断层的规模和活动情况差别很大,规模大的断层活动强烈,位移量也大。在规模大的断层之间是规模小、累积位移量也小的断层^[18]。张培震等提出海原断裂带由 9 条次级断层和位于其间的拉分盆地或推挤构造所组成^[19]。本文依据断层走向情况,将主要断层分为三段,即图 1 中毛毛山断裂和老虎山断裂合为一段,分析长度 183 km,倾角 85°;海原断裂带西段和中段合为一段,长度 122 km,倾角 87°;海原断裂带东段为一段,长度 164 km,倾角 89°。

为了更好地分析断层的运动方式,对断层地面运动速率依据断层走向进行旋转,得到断层坐标系下各点的运动速率分量,见图 3。

另外求出各点 X 分量与 Y 分量的比值(表 1),可以看出绝大部分点位比值大于 1.732(tan(60°)),

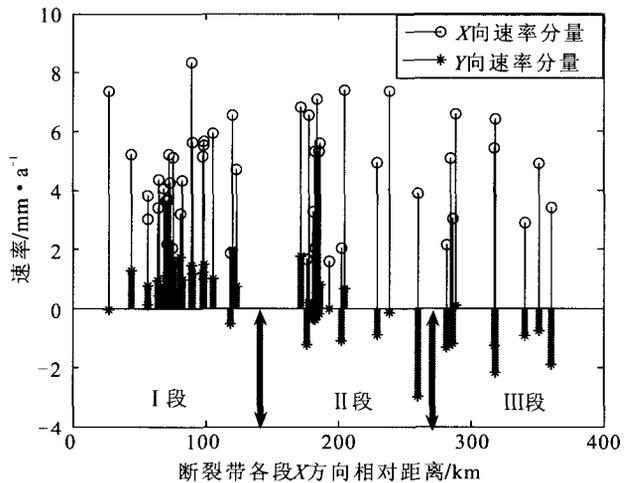


图 3 断层坐标系下断裂带两侧点位的速率分量剖面图

Fig. 3 The movement rates of sites on both sides of the fault in the fault coordinate system.

断裂运动以走滑运动为主。

综合图 2、3 及表 1,可以看到 1999—2007 年期间断层的活动以走滑运动为主;GPS 站点运动速度由南向北是逐渐衰减的,在 NWW 和 NE 走向断层

两盘的运动差异较为明显。

表1 各点运动速率分量比值统计表

判据	点位个数	比例
比值小于1的点位	1	8%
比值小于1.732的点位	3	
比值大于1.732的点位	46	92%

2 断层参数反演及分析

依据以上资料情况,应用 Okada 位错模型,采用遗传算法进行反演。该模型假设弹性半空间地壳里有一个矩形断层,断层的走滑、倾滑和张性错动分量分别为 U_1 、 U_2 和 U_3 ;断层的底部深度为 d ;长与宽分别为 L 、 W ;倾角为 δ ;走向 α 。由弹性位错理论求

表2 海原断裂位错模型反演结果

断裂名称	起点坐标		终点坐标		走滑速率 /[mm·a ⁻¹]	深度/km	拟合残差/mm
	E/°	N/°	E/°	N/°			
毛毛山—老虎山断裂	102.1	37.6	104.1	37.1	8.25	22.83	
海原断裂西、中段	103.9	37.1	105.2	36.7	5.49	13.39	1.59
海原断裂东段	105.1	36.8	106.1	36.3	5.97	11.06	

从图2可以看出利用模型反演的理论位移与实际观测结果基本相似。整个断裂带从西到东段走滑速率分别为 8.25 mm/a、5.49 mm/a 和 5.97 mm/a,毛毛山—老虎山断裂运动速度明显高于海原断裂速度。Lasserre 用地质地貌方法计算的毛毛山—老虎山断裂滑动速率为 12 ± 4 mm/a,海原断裂 8 ± 2 mm/a,上述计算结果与此下界值相当;也与甘卫军等根据 GPS 资料正演的结果^[21]、袁道阳等、何文贵及田勤俭等的研究结果比较接近。断层底部深度从西到东依次为 22.8 km、13.3 km、11.1 km,与该地区地壳厚度沿该断裂带由西向东逐渐变小的趋势基本一致^[22]。另外,该带周围的地震资料统计表明,绝大多数地震的震源深度在 25 km 以内^[21];大地电磁测深研究结果表明海原、固原和西吉等地壳内存在两层低阻层,分别分布在十几公里及 20~28 km,反演结果与此也较为一致^[5]。

理论位移与实际观测结果的差异一方面模型存在很大的局限性,譬如形状,介质的差异性;另一方面海原断裂周围的断层活动对点位速率也有影响,如断裂北侧的点位活动受北侧断层活动的影响,甘卫军计算得到香山—天景山断裂及天桥沟—黄羊川断裂明显小于海原断裂及老虎山断裂^[21],这也说明断层两侧点位速率差异较大的原因。

3 结论

得由于断层错动在地表引起的 GPS 观测点 (x, y) 的形变 $f(x, y)$ ^[20]:

$f = (x, y) = f(L, W, d, \delta, \alpha, \xi_1, \xi_2, U_1, U_2, U_3, x, y)$
式中, (ξ_1, ξ_2) 为断层面左下角点的区域平面直角坐标。

假定断层皆破裂到地表,参考地质资料给定断层的走向、倾向等参数,地表位移为三段断层共同运动的结果。对各断层的走滑速率、断裂的下界深度等参数进行反演,结果如表2及图2。拟合残差计算采用公式

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta\Delta}{n \times 2 - 1}}$$

通过对海原断裂带的 GPS 观测资料分析和断层参数的反演,可以看出该断裂在 1999—2007 年期间 GPS 站点运动速度由南向北是逐渐衰减的,东西走向断层两盘的运动差异较为明显,断层的活动仍以走滑运动为主。

反演结果表明毛毛山—老虎山断裂运动速度明显高于海原断裂速度,是速度变化梯度较大的地方;从大震分布(图1)来看毛毛山断裂又是6级以上地震的空区,距今约800年来没有发生6.5级以上地表破裂的地震,因此该断裂及附近地区具有发生强震的危险性。

[参考文献]

- [1] 邓起东. 中国活动断裂[M]. 北京:地震出版社,1982:80-300.
- [2] 国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所,祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [3] 国家地震局国际合作司编. 中法合作活断层对比研究[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [4] 董治平,程建武,康庆强,等. 祁连山构造带中强地震前震活动探讨[J]. 西北地震学报,2008,30(1):49-55.
- [5] 国家地震局地质研究所,宁夏地震局等. 海原活动断裂带[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [6] 刘洪春,贾云鸿,陈永明,等. 1927年古浪8级地震地表破裂带研究[A]//活动断裂研究[G]. 北京:地震出版社,1995:79-91.

- [10] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社,2004:42-184.
- [11] Y L Xu, W S Zhang, J M Ko, et al.. Pseudo-excitation method for vibration analysis of wind-excited structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999,83: 443-454.
- [12] 陈贤川,赵阳,董石麟. 基于虚拟激励法的空间网格结构风致抖振响应分析[J]. 计算力学学报,2006,23(6):684-689.
- [13] Y L Xu, Q He, J M Ko. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation[J]. Engineering Structures,1999,21:13-148.
- [14] 赵岩,林家浩,郭杏林. 桥梁滞变非线性随机地震响应分析[J]. 计算力学学报,2005,22(2):145-182.
- [15] 建筑抗震设计规范(GB50011·2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [16] 白国良,朱丽华. 基于现行抗震规范的 Kanai-Tajimi 模型参数研究[J]. 世界地震工程,2004,20(3): 114-118.
- [17] 薛素铎,王雪生,曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报,2003,36(5):5-10.
- [18] 陈国兴,金永彬,宰金珉. 高层建筑随机地震反应的简捷计算[J]. 南京建筑工程学院学报,1999,(1):29-37.

(上接 230 页)

- [7] Lasserre C, Morel P H Gaudem Y, et al.. Post-glacial left slip-rate and past occurrence of $M > 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault (Gansu, China) [J]. J. Geophys. Res., 1999,104(B4):17633-17651.
- [8] Lasserre C, Tapponnier P, Gaudem Y, et al.. Fast late Pleistocene slip-rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China[J]. J Geophys. Res., 2002,107(B11): ETG 4-1-4-15.
- [9] 袁道阳,刘百箴,吕太乙. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. 地震地质,1997,19(1):1-7.
- [10] 何文贵,刘百箴,吕太乙,等. 老虎山断裂带的分段性研究[J]. 西北地震学报,1994,16(3):67-72.
- [11] 何文贵,刘百箴,袁道阳,等. 毛毛山断裂带晚第四纪活动特征[A]//海原断裂带研究(5)[G]. 北京:地震出版社,1996:63-77.
- [12] 何文贵,刘百箴,袁道阳,等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报,2000,22(1):91-96.
- [13] 袁道阳,张培震,刘百箴,等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报,2004,78(2):270-278.
- [14] 田勤俭,丁国瑜,申旭辉. 拉分盆地与海原断裂带新生代水平位移规模[J]. 中国地震,2001,17(2):167-175.
- [15] 王敏,沈正康,牛之俊,等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑),2003,33(增刊):21-32.
- [16] 张希,江在森,王琪,等. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报,2005,27(6):622-628.
- [17] 陈兵,江在森,马文静,等. 青藏块体东北缘断层形变与中强地震[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(4):49-55.
- [18] 闵伟,张培震,邓起东,等. 海原活动断裂带破裂行为特征研究[J]. 地质论评,2001,47(1):75-81.
- [19] 张培震,闵伟,邓起东,等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学(D辑),2003,33(8):705-713.
- [20] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1985,75(94): 1135-1154.
- [21] 甘卫军,程朋根,周德敏,等. 青藏高原东北缘主要活动断裂带 GPS 加密观测及结果分析[J]. 地震地质,2005,27(2):177-187.
- [22] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地相应研究[J]. 西北地震学报,2007,29(4):319-325.