

山西断裂带跨断层形变观测资料动态特征分析^{*}

贾晓东¹⁾ 武艳强²⁾ 闫伟³⁾ 杜雪松⁴⁾

(1) 辽宁省地震局, 沈阳 110031
(2) 中国地震局预测研究所, 北京 100036
(3) 中国地震台网中心, 北京 100045
(4) 中国地震局第一监测中心, 天津 300180

摘 要 利用多种分析方法对山西断裂带跨断层形变观测资料进行了分析。长趋势分析结果表明,山西断裂带南北两段以拉张变形为主,中段以剪切变形为主。时间分段结果表明,1989—2000年间,位于山西断裂带中部的下达枝、代县、广胜寺3个测点出现断层逆继承性转折变化,断层垂直运动速率绝对值明显减小,反映下达枝、代县和广胜寺地区断层活动呈闭锁状态。另外,跨断层形变观测资料和GPS应变率场结果均表明山西断裂带以近NW向拉张变形为主,但由于观测尺度不同,在量值上二者不具有可比性。

关键词 跨断层形变;山西断裂带;时空分段特性;逆继承性;GPS应变率场

中图分类号:P315.72⁺5

文献标识码:A

DYNAMIC ANALYSIS OF SHANXI FAULT ZONE CROSS-FAULT DEFORMATION OBSERVATIONAL DATA

Jia Xiaodong¹⁾, Wu Yanqiang²⁾, Yan Wei³⁾ and Du Xuesong⁴⁾

(1) *Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang* 110031
(2) *Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing* 100036
(3) *China Earthquake Networks Center, Beijing* 100045
(4) *First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin* 300180

Abstract On the basis of analysis of the fault-crossing deformation observation data on Shanxi fault zone, this paper discussed the deformation characteristics of the zone. According to the long-term trend analysis, tensional deformation has been the main deformation of both the north and the south part of the Shanxi fault. On the middle part shearing is the main deformation. The time subsection results indicates that from 1989 to 2000, faulting inverse inheritance turning changes appeared in three stations: Xiadazhi, Daixian, Guangsheng temple, in the central part of Shanxi fault zone. In the same time, the absolute value of the fault's vertical movement rate significantly reduced, which reflects a locking condition of the fault activity in Xiadazhi, Daixian, Guangsheng temple area. In addition, the fault-crossing deformation observation data and GPS strain rate field results indicate that the Shanxi fault deformed mainly with a near NW tensional deformation. However, as the different observation dimension, the value between them are not be comparable.

Key words: cross fault deformation; Shanxi faults zone; spatio-temporal subsection characteristics; inverse inheritance; GPS strain rate field

* 收稿日期:2011-09-11

基金项目:中国地震局地震科技星火计划(XH12011Y);中国地震局监测预报司合同制定向跟踪任务(2011020203)

作者简介:贾晓东,男,1980年生,工程师,主要从事地形变地震分析预报和研究工作. E-mail: jxd_dx@163.com

1 引言

山西地震活动带主要活动断裂为 NNE、NE 和 NEE,它们既控制了每个盆地的主要边界,也控制了盆地的发育;次要的活动断裂为 NW、NWW 向断裂。断陷盆地之间被横向隆起所隔,以太原盆地为中心,南北对称分布,中间为剪切段,南北两段为拉张带。震源机制解结果表明,山西断陷带南北两端为拉张带,中部断层活动仍然以拉张型正断层为主^[1],反映出山西断陷带整体的张性活动。郭良迁等^[2]研究结果显示,大同盆地相对两侧山地向北北东向位移,总体上具有张扭性;忻代盆地南北两部分具有相对张扭性运动;太原盆地相对两侧山地具有走滑运动;临汾盆地南北两部分相对具有走滑运动。王秀文^[3]研究山西断裂带的水平运动特征,整体呈现逆时针的差异运动,主压应力场的方位角约为 72°,断裂两侧不存在明显的走滑运动。

跨断层形变观测提供了地壳运动的量化结果。谢觉民^[4]将形变资料和地质构造展布联系进行分析,认为在 1984—1987 年期间,大同-阳高盆地未呈现确切的断裂活动迹象,各段测线的高差剖面图没有出现可能表明断裂位移的阶梯变化,表明在这一时段断裂处于闭锁状态。李杰^[5]利用跨断层形变观测年速率比值对大同震前时空微动态特征进行分析,表明震源区速率比值较小似处于闭锁状态。已有的研究表明^[2,6]山西断裂带南部各点运动一致性较好,中部显示正断运动,但量值不大;北部地区活动情况复杂,大同-应县地区东侧断裂呈左旋活动,西侧断裂呈右旋活动。在有跨断层观测期间,山西带的地震活动表现出明显的分段特征。其中,1989 年 10 月 $M_s6.1$ 大同-阳高地震的发生,标志着山西地震带的地震活动进入了新的活跃时段。其后 5 级左右的地震较为活跃。

从地震形变角度来看,我们更关心的是差异运动,对于山西带这样一个断层多、走向各异、介质条件差别大的地区,分析该带的差异运动对地震预测是极为重要的。本文利用山西断裂带跨断层形变观测资料,在对跨断层形变曲线基本特征进行分析的基础上,重点讨论了该区垂直形变的分段性特征。

2 资料概况

跨断层形变观测台站或流动测点见图 1。这些测点最早从 20 世纪 70 年代观测,最短的也有 10 年以上的观测资料,观测精度优于 $\pm 0.45\text{ mm/km}$ 。根据已有研究,共选取 13 个形变场地(台站)16 条跨断层测项分析断层垂直形变活动特征(表 1)。

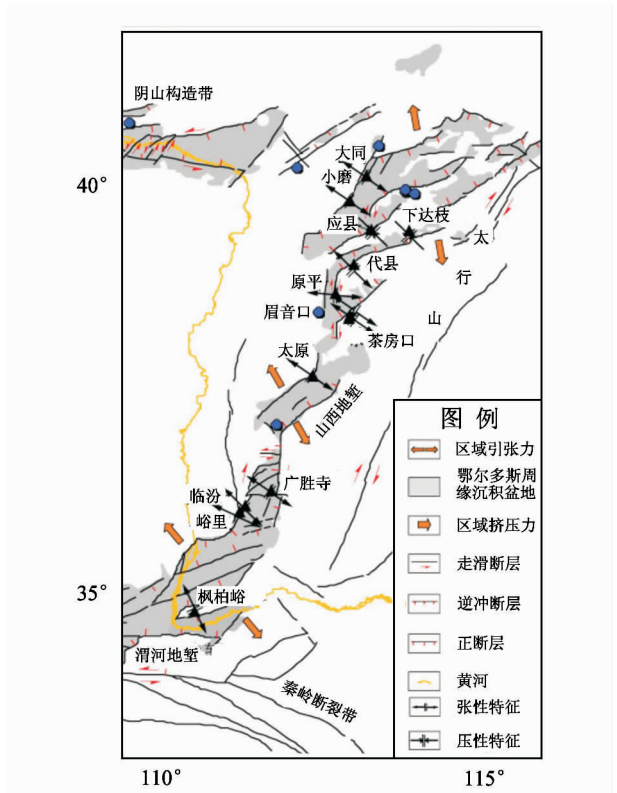


图 1 山西跨断层形变观测点的分布
Fig. 1 Distribution of cross-fault deformation observation stations in Shanxi

3 山西断裂带跨断层形变观测异常提取及分析

考虑山西断裂带跨断层形变观测最早为 1972 年,结合山西断裂带中强地震平静-活跃-平静特点^[7],对山西断裂带跨断层形变观测数据分 3 个时段进行分析:第一时段,1989 年前,中强地震平静时段;第二时段,1989—2000 年,中强地震活跃时段;第三时段,2000—2010 年底,中强地震平静时段。

3.1 原始数据分析

大同 3-1 测段(图 2(a)),自观测以来表现为持续张性变化,在 3 个时段均表现为与地质构造背景运动一致的继承性特点,但在进入第二、第三时段后有明显的加速特征;小磨 2-1 测段(图 2(b)),自观测以来表现为持续的张性变化,在 3 个时段上均表现为与地质构造背景运动一致的继承性特点,异常主要表现为第二时段中强震前明显的继承性加速异常;应县 1-3 测段(图 2(c)),自观测(第二时段)以来逆继承性活动特性明显,在第二时段中强震前有明显的短期异常变化;下达枝 1-3 测段(图 2(d)),第一时段继承性变化,在进入第二活跃时段前发生逆继承性变化转折,并在第二、三时段持续逆继承性变化特征;茶房口 2-1 测段(图 2(e)),自观

表 1 山西跨断层形变测点概况

Tab.1 Overview of cross-fault deformation observation stations in Shanxi

测点名称	位 置		测点所跨断层概况			资料时段
	经度(°)	纬度(°)	断层名称	断层产状	断层活动性质	
大同	113.23	40.13	口泉断裂	NE34°/SE∠72°	右旋正走滑	1986-01—2010-12
小磨	113.00	39.83	口泉断裂	NE30°/SE∠60°	右旋正走滑	1984-01—2010-12
应县	113.22	39.48	恒山山前断裂	NE50°/NW∠67°	正走滑	1992-02—2010-10
下达枝	113.88	39.47	恒山断裂	NE50°/NW∠67°	正断层	1983-06—2010-12
代县	113.05	39.05	五台山山前断裂	NE54°/NW∠67°	正断层	1985-01—2010-12
原平	112.78	38.70	五台山山前断裂	NE 23°/NW∠85 - 90°	正断层	1979-12—2010-12
茶房口	113.00	38.43	系舟山山前断裂	NE50°/NW∠60 °	正断层	1979-12—2010-12
眉音口	112.98	38.40	系舟山山前断裂	NE50°/NW∠60°	正断层	1979-12—2010-12
太原	112.43	37.70	交城断裂	NE50°/SE∠40 - 80°	正断层	1987-01—2010-12
广胜寺	111.80	36.30	霍山山前断裂	NE15 - 20°/NW∠70°	右旋正走滑	1972-08—2010-12
临汾	111.37	36.08	罗云山山前断裂	NE30°/SE∠70°	右旋正走滑	1985-01—2010-12
峪里	111.33	36.05	罗云山山前断裂	NE30°/SE∠70°	右旋正走滑	1980-01—2010-12
枫柏峪	110.65	34.83	中条山山前断裂	NE30°/NW∠79°	右旋正走滑	1984-02—2010-12

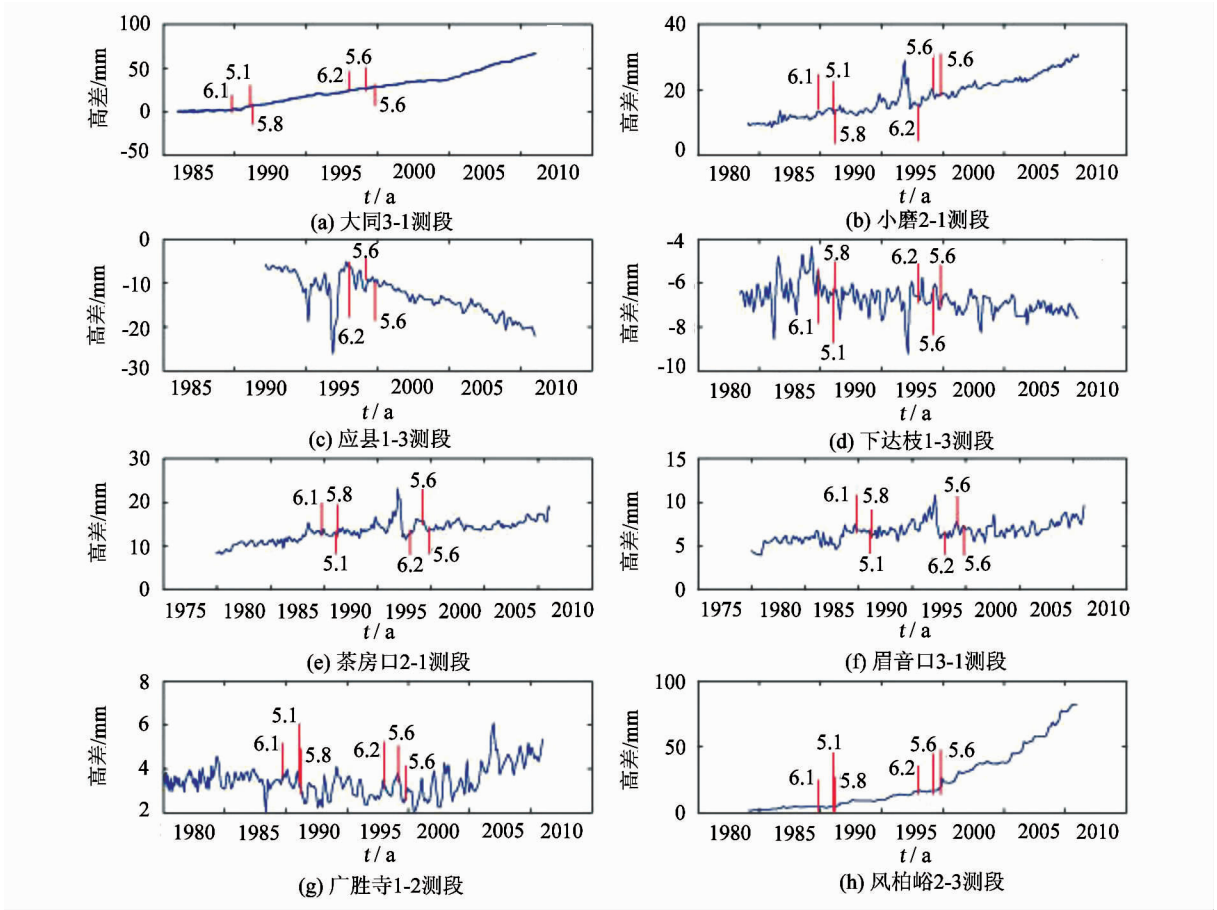


图 2 跨断层观测曲线

Fig.2 Cross-fault observation curves

测以来总体表现为继承性变化特点,在第二时段中强震前有明显的短期异常变化;眉音口 3 - 1 测段(图 2(f)),自观测以来总体表现为继承性变化特点,第二时段中强震前有明显的短期异常变化;广胜寺 1 - 2 测段(图 2(g)),地震活跃的第二时段逆继承性变化特性显著,进入第三时段后转向为继承性变化并持续加速;风柏峪 2 - 3 测段(图 2(h)),自观测以来持续继承性变化,进入第三时段后有明显的持续加速。

由原始数据图示法结果看,山西断陷带断层活

动以继承性正断运动为主,与背景资料有很好的—致性,13 个场地、16 条跨断层测线中仅有位于恒山北麓断裂上的应县、下达枝 2 个测段显示断层活动为逆继承性逆断运动。在空间上,山西断裂带中段下达枝、原平、茶房口、眉音口的变化速率较小,表现出一定的变形闭锁特性,区域内中强震前短期异常变化显著,是区域中强地震敏感测点;山西断裂带南、北两段测点曲线趋势变化明显,表现为明显的持续张性变化,与地质构造背景具有很好的一致性,但中强震前短期异常变化不明显。分时段结果显示:第一个时段继承性变化特征明显,短期异常不显著;第二个时段,逆继承性转折变化明显,短期异常明显增多,并多出现在中强震前;第三时段,与第一时段特征相似,继承性趋势变化特征明显,短期异常不显著。

3.2 断层垂直运动速率分析

以断层上盘的测点为基准点计算各测段的垂直形变速率,速率为正时表示正断张性,为负时表示逆断压性。在计算过程中,利用最小二乘直线拟合求出了断层活动速率,结果见表 2。

表 2 断层垂直运动速率(单位:mm/a)
Tab.2 Vertical movement of the fault(unit:mm/a)

测点	跨断层形变观测资料		地质调查结果	
	速率	断层活动性质	速率	断层活动性质
大同	2.57 ±0.00	张性	3.6	右旋正走滑
小磨	0.70 ±0.02	张性	3.6	右旋正走滑
应县	-0.63 ±0.05	压性	1.0	正走滑
下达枝	-0.04 ±0.00	压性	0.34	正断层
代县	0.06 ±0.00	张性	1.12	正断层
原平	0.004 ±0.009	张性	1.12	正断层
茶房口	0.20 ±0.01	张性	1.48	正断层
眉音口	0.08 ±0.01	张性	1.48	正断层
太原	1.91 ±0.00	张性	1.38	正断层
广胜寺	0.02 ±0.00	张性	0.69	右旋正走滑
临汾	1.25 ±0.00	张性	0.15	右旋正走滑
峪里	0.21 ±0.00	张性	0.15	右旋正走滑
枫柏峪	2.75 ±0.09	张性	2.7	右旋正走滑

表 2 结果表明:山西断裂带南北两段拉张带垂直形变速率明显大于中段;计算结果反映的断裂带断层活动特性以继承性正断运动为主,均与地质调查结果具有很好的一致性(图 1);以下达枝、代县为分界南北两侧断层垂直运动速率明显增强,表现出明显的分段差异活动。

4 垂直运动速率时空分段特性分析

4.1 时间分段特征分析

第一时段反映断层具有一致性较好的继承性正

断运动,但速率较小(表 3);第二时段,下达枝、代县、广胜寺 3 个测点出现断层逆继承性转折变化,断层垂直运动速率绝对值明显减小,反映山西断裂带断层活动差异变化局部地区断层活动趋于闭锁的状态;第三时段仍有应县、下达枝、原平 3 个测点反映断层逆继承性运动,其中下达枝延续第二时段变化,应县、原平为断层活动继承性转折变化为逆继承性。

4.2 空间分段特征分析

图 3 为分时段计算出的断层活动速率,从图 3 可以看出其结果较好地反映了山西断裂带张压特性;第二时段出现空间分布相对集中的逆继承性变化并出现中强地震活跃,空间集中位置主要为中强震频发的大同盆地、忻代盆地南部;第三时段逆继承性变化空间分布更趋于集中,主要位于山西断裂带南段大同盆地、忻代盆地南部的恒山断裂、恒山山前断裂、五台山山前断裂,但与第二时段的中强地震频发不同,中强地震异常平静。

4.3 与 GPS 结果的对比分析

根据中国大陆地壳观测网络 1999—2007 年区域网结果^[8,9],采用最小二乘配置球面方法计算得到的山西带主应变率结果见图 4。将第三时段跨断层结果与 GPS 结果对比,发现二者差别明显,主要表现在:1)GPS 主应变率反映出整个山西带以近 NW-NS 向拉张为主,且由南到北拉张变形由弱到强的变化特征;2)跨断层结果表明南北两端的拉张变形的强度高于中段。差异的原因可能在于二者所代表的变形的空间范围大小不同所致。

5 认识与讨论

1)山西断裂带跨断层形变观测长趋势曲线和垂直运动速率反映断层活动特性与背景资料具有很好的一致性,表明跨断层形变观测能够反映断层活动的真实特性,表现为:以下达枝、代县、原平为分界南北两侧断层活动性质为张性正断,与断裂带两端受 NW、NWW 向拉张的构造应力一致;中部断层垂直运动速率较小,与断裂带中段正断走滑并受 W-WNN 向区域应力场主压应力具有一致性,反映局部地区断层闭锁活动状态。

2)山西断裂带跨断层形变观测分区段、分时段分析结果与背景资料存在差异性,即部分测点反映断层活动的逆继承性特点,表现为:空间上,主要分布于山西断裂带南段大同盆地、忻代盆地南部的恒山断裂、恒山山前断裂、五台山山前断裂;时间上,逆继承性变化在第二时段集中,第三时段更趋于集中,但第二时段中强地震频发,异于第三时段的中强地

表 3 断层垂直形变速率分时段统计结果(单位:mm/a)

Tab.3 Sub-period statistical results of fault's vertical deformation rate(unit:mm/a)

测点	第一时段(1989 年前)		第二时段(1990—2000 年)		第三时段(2000—2010 年)	
	速率	背景特性	速率	背景特性	速率	背景特性
大同	0.48 ± 0.01	继承性	2.58 ± 0.01	继承性	3.48 ± 0.01	继承性
小磨	0.19 ± 0.09	继承性	0.71 ± 0.12	继承性	0.99 ± 0.04	继承性
应县			0.44 ± 0.28	继承性	-0.76 ± 0.02	逆继承性
下达枝	0.19 ± 0.06	继承性	-0.024 ± 0.025	逆继承性	-0.04 ± 0.01	逆继承性
代县	0.09 ± 0.01	继承性	-0.002 7 ± 0.001 3	逆继承性	0.08 ± 0.00	继承性
原平	0.19 ± 0.07	继承性	0.15 ± 0.04	继承性	-0.04 ± 0.02	逆继承性
茶房口	0.45 ± 0.04	继承性	0.28 ± 0.09	继承性	0.22 ± 0.03	继承性
眉音口	0.17 ± 0.03	继承性	0.08 ± 0.04	继承性	0.16 ± 0.02	继承性
太原	0.78 ± 0.01	继承性	3.87 ± 0.00	继承性	7.74 ± 0.00	继承性
广胜寺	0.09 ± 0.09	继承性	-0.02 ± 0.02	逆继承性	0.23 ± 0.02	继承性
临汾	1.42 ± 0.01	继承性	1.00 ± 0.00	继承性	1.22 ± 0.00	继承性
峪里	0.18 ± 0.01	继承性	0.12 ± 0.02	继承性	0.38 ± 0.02	继承性
枫柏峪	0.62 ± 0.05	继承性	1.51 ± 0.05	继承性	5.41 ± 0.16	继承性

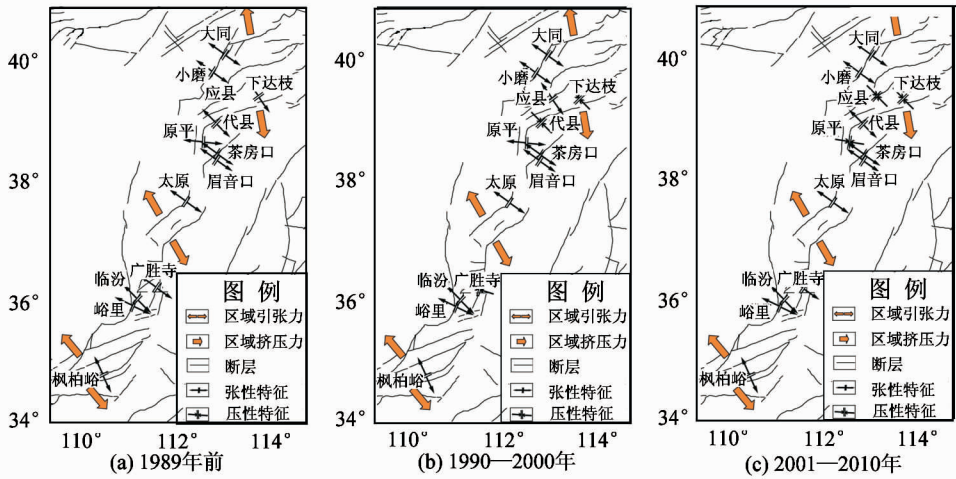


图 3 分时段资料结果反映的断层活动特性

Fig.3 Fault activity characteristics in different period

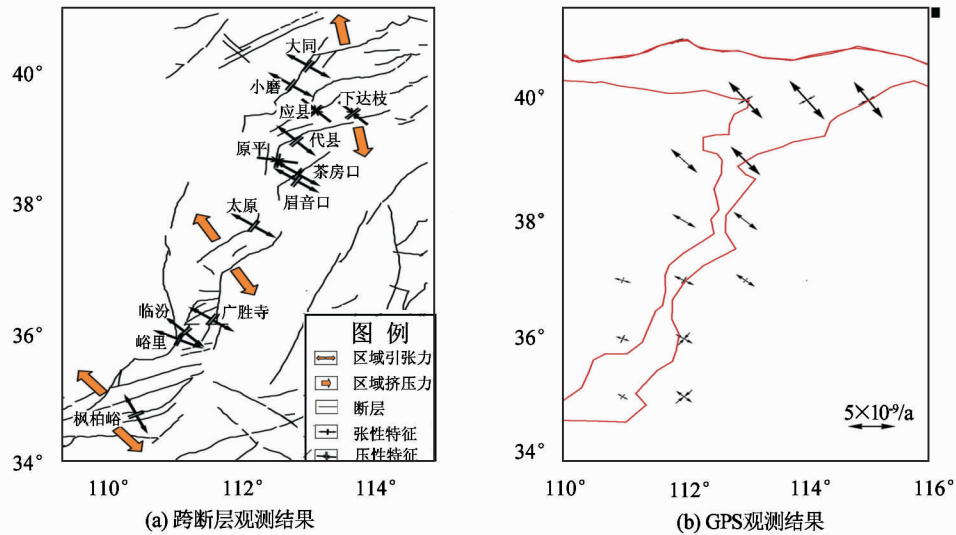


图 4 跨断层观测结果与 GPS 观测结果

Fig.4 Comparison between results of principal strain rates from cross-fault and GPS observation