

李强,王紫燕. 台湾造山带主要断层闭锁程度与滑动亏损特征[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 48–53. [LI Qiang, WANG Ziyan. The Blocking Degree and Slip Deficit Characteristics of the Main Faults in the Taiwan Orogenic Belt [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 48–53]

台湾造山带主要断层闭锁程度与滑动亏损特征

李 强, 王紫燕

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 利用2016—2018年GPS水平速度场数据, 基于块体旋转与块体边界断层闭锁的负位错模型, 反演了台湾造山带主要断层的闭锁程度和滑动亏损, 并讨论了断层的强震危险性。结果显示: 该区域纵谷断裂北段、狮潭断层、四季断层和潮州断层闭锁程度相对较强, 其他断层闭锁程度较弱; 结合滑动亏损分布和历史强震活动特征, 分析认为纵谷断裂北段、四季断层和潮州断层强震危险性值得关注。

关键词: 断层闭锁; 滑动亏损; 台湾地震; 台湾造山带; GPS速度场

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0048-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.07

The Blocking Degree and Slip Deficit Characteristics of the Main Faults in the Taiwan Orogenic Belt

LI Qiang, WANG Ziyan

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on the negative dislocation model of the block rotation and fault locking of the boundary, the paper inverted the blocking degree and the slip deficit of the main faults in the Taiwan Orogenic Belt by using the GPS horizontal velocity field data from 2016 to 2018, and discussed the strong earthquake risk of the faults. The results show that the high locking concentrate on the northern segment of the Longitudinal Valley fault, Shitan fault, Siji fault and Chaozhou fault. The locking degree of others is relatively low. Combining the slip deficit distribution and the characteristics of the historical strong earthquakes in this region, it is concluded that risk of strong earthquakes of the northern segment of the Longitudinal Valley fault, Siji fault and Chaozhou fault should be paid more attention.

Keywords: Fault locking; Slip deficit; Taiwan earthquake; Taiwan Orogenic Belt; GPS velocity field

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2020010201)

作者简介: 李强(1985-), 男, 工程师, 主要从事地球动力学研究。

E-mail: liqiangies@126.com

0 引言

台湾造山带位于亚欧板块与菲律宾海板块碰撞汇聚部位,是世界上最年轻、最活跃的造山带^[1],也是研究弧-陆碰撞及板块俯冲过程的天然实验场^[2]。菲律宾海板块以约 80 mm/a 的速率快速向欧亚板块运动^[3],在台湾东北部区域,沿琉球海沟俯冲到欧亚板块之下^[4];而在台湾南部区域,俯冲方式发生转换,由欧亚板块沿马尼拉海沟俯冲到菲律宾海板块之下^[5]。在这种特殊的背景动力环境作用下,台湾造山带具有强烈的构造变形以及频繁的地震活动^[6]。

断层闭锁程度和滑动亏损是断层运动中应变积累状态的深部反映,也是直观上认识未来断层强震危险性的重要参考。自 McCaffrey^[7]提出块体旋转和边界闭锁的负位错模型后,国际上基于 GPS 数据,利用该方法进行断层闭锁程度及滑动亏损的研究迅速兴起^[8-10]。近年来,国内研究人员也相继对多个地区的断层开展了闭锁程度和滑动亏损特征方面的工作,如喜马拉雅主逆冲断层^[11]、龙门山断裂带^[12-14]、红河断裂带^[15]、郯庐断裂带中南段^[16]等。相关研究表明,通过反演断层闭锁程度与滑动亏损,进行地震危险性分析,对于中长期尺度的强震地点预测,具有重要意义。

台湾造山带内断层分布广泛,在该区域内,与断层闭锁程度和滑动亏损相关的研究也有一定

程度的开展,如李海艳等^[17]利用 1992—1999 年 GPS 数据反演了纵谷断裂闭锁程度,显示其北段处于强闭锁状态,南段闭锁程度较弱;Chang 等^[18]利用 2014—2016 年 GPS 数据,对该区域多个断层进行闭锁程度及滑动亏损反演,并基于结果对部分断层发震能力进行了评估。由于 2006 年台湾恒春海域 7.2 强震后,台湾地区 7.0 级以上强震平静时间至今已超 15 年,为百年来最长平静时间,而强震长时间平静有利于应力积累和强震孕育。因此,对台湾造山带区域主要断层闭锁程度与滑动亏损进行重新研究十分必要。本文利用 2016—2018 年中国台湾地区的 GPS 水平速度场数据,基于块体旋转与断层闭锁的负位错模型,反演台湾造山带主要断层现今闭锁程度与滑动亏损,并结合历史强震活动,探讨有关断层的强震危险性。

1 数据和方法

1.1 GPS 速度场数据

利用台湾地震科学中心网站(<https://tec.eearth.sinica.edu.tw/index.php>)给出的 2016—2018 年 427 个 GPS 连续观测站的位移时间序列结果,基于 Nikolaidis^[19]的时间序列模型(公式(1)),求得模型中各参数值并计算模型预测值,得到所有台站的年变信息,进而得到 2016—2018 年 GPS 水平速度场结果(图 1)。

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{H_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{H_h} h_j H(t_i - T_{hj}) \tau_{id} + \sum_{j=1}^{H_k} k_j \exp\left(-\frac{(t_i - T_{kj})}{t_j}\right) H(t_i - T_{kj}) + v_i \quad (1)$$

式(1)中,第一、二项代表线性变化,可视为震间期地壳运动速率;第三至六项代表年周期及半年周期变化;第七项代表地震造成的同震位移或更换仪器导致的偏移;第八项为震后地壳运动速率的改变量;第九项代表震后的指数衰减变形,其中 H 为阶梯函数, τ_i 为松弛时间;最后一项为测误

差,各参数具体的定义见 Nikolaidis^[19]。

1.2 反演方法

反演采用 McCaffrey^[7]提出的模型方法,利用 GPS 速度场数据可以同时反演块体旋转运动与块体边界断层的闭锁系数,其原理如下:

$$V_i(X) = \sum_{b=1,B} H(X \in \Delta_b) [\mathbf{R} \Omega_b \times X] \cdot \mathbf{i} - \sum_{k=1,F} \sum_{n=1,N_k} \sum_{j=1,2} \phi_{nk} G_{ij}(X, X_{nk}) [\mathbf{h} \Omega_f \times X_{nk}] \cdot \mathbf{j} \quad (2)$$

式(2)中, X 为 GPS 站点位置; $V_i(X)$ 为站点 X 的速度; B 为块体数目, Δ_b 为 b 块体模型区域的子集(若点 X 在块体 b 内 $H=1$, 否则 $H=0$); I 为 i 方向速度单位矢量; $\mathbf{R} \Omega_b$ 为块体 b 相对于参考框架的欧拉

极; $\mathbf{h} \Omega_f$ 为下盘 f 相对于上盘 h 的欧拉极; F 为断层数量; N_k 为所定义断层 k 的节点数; X_{nk} 为断层 k 上节点的位置; ϕ_{nk} 为断层 k 的节点 n 的闭锁系数; j 为断层面 j 方向的单位矢量; $G_{ij}(X, X_{nk})$ 为格林函

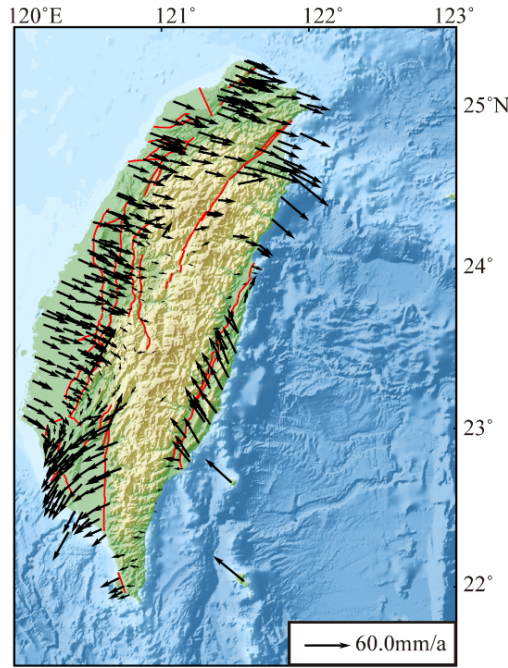


图1 2016—2018(ITRF2000)年GPS速度场结果

Fig.1 The GPS velocity fields from 2016 to 2018(ITRF2000)

数,即断层面上节点 X_{nk} 处 j 方向上的单位滑动速率引起的地表位置 X 处 i 方向的速度分量;公式右端第一部分代表块体旋转项,第二部分代表断层闭锁产生的影响。闭锁系数 ϕ_{nk} 乘以断层长期滑动速率,即可得到断层滑动亏损速率。

若同时考虑块体内部存在均匀应变(包括由于块体内部断裂滑动等因素引起的变形),利用Savage等^[20]给出的公式(3)可得到由于块体内均匀应变引起的东向速率 $V_\varphi(\varphi, \theta)$ 和北向速率 $V_\theta(\varphi, \theta)$:

$$\begin{aligned} V_\varphi(\varphi, \theta) &= e_{\phi\phi} \text{Re} \sin \theta_o (\varphi - \phi_o) + e_{\phi\theta} \text{Re} (\theta - \theta_o) \\ V_\theta(\varphi, \theta) &= e_{\phi\theta} \text{Re} \sin \theta_o (\varphi - \phi_o) + e_{\theta\theta} \text{Re} (\theta - \theta_o) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, φ 为经度, θ 为纬度,Re是地球平均半径, $e_{\phi\phi}$, $e_{\phi\theta}$, $e_{\theta\theta}$ 为均匀应变张量(由反演获得), (ϕ_o, θ_o) 为块体中心坐标。综合利用式(2)与式(3),则地壳运动速度场为存在均匀应变的弹性块体旋转与块体边界断层闭锁共同作用的结果。通过模拟退火方法,在最小化 χ_n^2 的原则下,估计出各参数最优值,其中

$$\chi_n^2 = [\sum_{i=1,n} (r_i / f \sigma_i)^2] / \text{dof} \quad (4)$$

式(4)中, n 为所有观测数据的数量, dof 为自由度(即所有观测数据的数量减去自由参数的数量), r_i 为模型的残差(数据的观测值与模型值之差), σ_i 为数据标准差,由于GPS数据的误差通常会被低估^[21],可以使用 f 作为数据误差比例因子,使模型

能包含被低估的数据误差(若有不同类型的约束数据联合反演时,也可用来平衡不同类型数据的影响)。当 f 取值合适时,会使 $\chi_n^2 \approx 1$,此时表明模型与数据和假定的数据误差之间刚好具有一致性,模型能够充分地解释数据。

2 反演过程

实际反演过程基于defnode负位错程序^[7]完成。defnode程序反演前需要先对研究区域进行块体划分、设置块体属性、断层倾角。其中块体划分要考虑多种因素,如区域地质背景、区域地壳运动特征、断裂带展布和块体空间尺度等。根据上述因素,并参考前人的划分方案^[17],本文将研究区域划分为14个块体,具体如图2a所示。同时由于台湾造山带构造变形剧烈,块体内部考虑存在均匀应变。台湾造山带地区主要断层包括纵谷断裂、潮州断层、旗山断层、四季断层、宜兰断层、南崁断层、梅山断层、大尖山—觸口断层、车笼埔断层及狮潭断层。将这些断层设置为块体边界且为参与反演闭锁参数的断层,而其余块体间的边界设置为自由边界。断层的倾角和倾向参考Chang等^[18]给出的模型进行设置(表1),由于纵谷断裂长度较长,且其倾角走向有所差异,故分成南北两段处理。

在给定的参数模型条件下, 经过试算 $f=5$ 时, 反演得到 $\chi^2_n=1.02$, 说明此时模型能够较好地拟合GPS观测数据, 反演得到的模型速度场预测值和观测值对比结果(如图2b)也显示, 模型预测的速度场总体上与观测值相符。闭锁程度及滑动亏损分布结果如图3所示。

表1 断层参数
Table 1 Faults parameters

断裂名称	倾向	倾角/(°)
纵谷南段	SE	30 ~ 60
纵谷北段	SE	30 ~ 60
潮州断层	E	60
旗山断层	SE	58
四季断层	SE	60
宜兰断层	SE	60
南崁断层	NE	60
梅山断层	SE	75
大尖山觸口断层	SE	40
车笼埔断层	E	30
狮潭断层	SE	50

3 结果分析

3.1 断层闭锁程度分析

断层闭锁程度通常用闭锁系数表示, 当闭锁系

数为1时, 表示断层闭锁程度最高, 断层完全闭锁; 当断层闭锁系数为0, 表示断层不闭锁, 断层完全蠕滑。一般情况下, 闭锁系数在两者之间, 表示部分锁定。图3a结果显示, 纵谷断裂南北两段闭锁程度差异明显, 纵谷断裂北段闭锁程度明显强于南段。在纵谷断裂北段, 在18 km深度处, 闭锁系数仍可达0.8, 到24 km深度处降至0.7。而在纵谷断裂南段8 km深度处, 闭锁系数即降至0.7, 18 km深度处降至0.1, 闭锁程度极弱, 断层近乎处于蠕滑状态。纵谷断裂是欧亚板块与菲律宾海板块的缝合带, 该断裂构造活动强烈, 吸收了约一半的板块间相对运动速率^[22]。纵谷断裂南段在2003年发生了1次7.0级地震, 与目前反演得到的闭锁程度较低的结果相符。在1990年之前的40年内, 纵谷断裂北段发生5次7级以上强震。但近30年来却一直处于7级以上强震缺震状态, 长期强震平静有利于断层的应力积累, 这与反演得到纵谷北段闭锁状态相对较强的结果相符。除纵谷断裂北段外, 四季断层、潮州断层和狮潭断层也显示存在相对较强的闭锁程度。狮潭断层闭锁系数在12 km深度处达到0.8以上, 且该断层周边存在较多次级断层, 错综复杂, 其强闭锁状态值得关注。四季断层和潮州断层在15 km深度处闭锁系数为0.8, 自1900年以来, 这两条断层未发生过7.0级以上强震, 且6.0级以上地震数量也较少, 因此它们的强闭锁特征也值得关注。区域其他断层闭锁程度均较弱, 东北部的宜兰断层于1994年发生过7.0级地震, 反演结果显示在深度7 km处闭锁系数即降至0.8以下, 与相对较弱

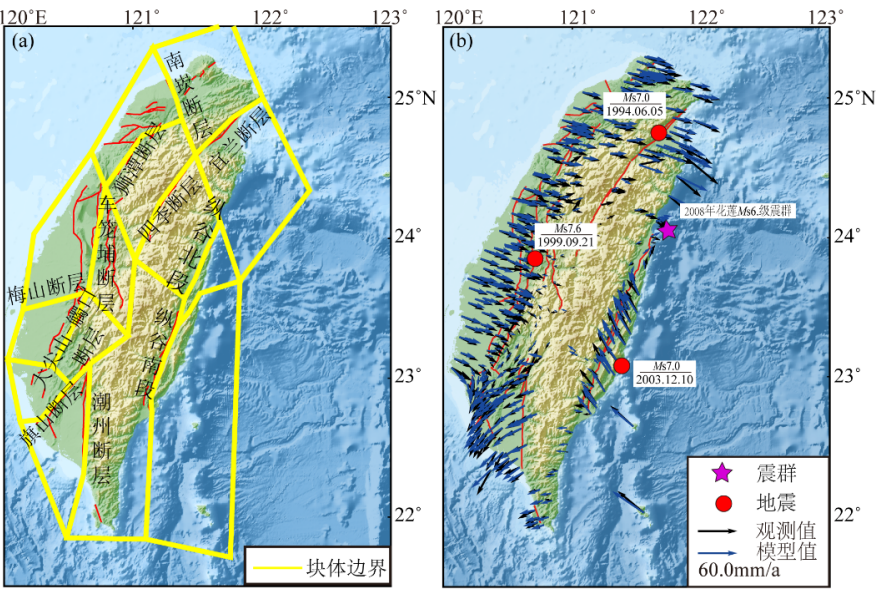


图2 块体划分(a)和模拟值与观测值对比(b)
Fig.2 Block division(a)and comparison of simulated and observed velocities(b)

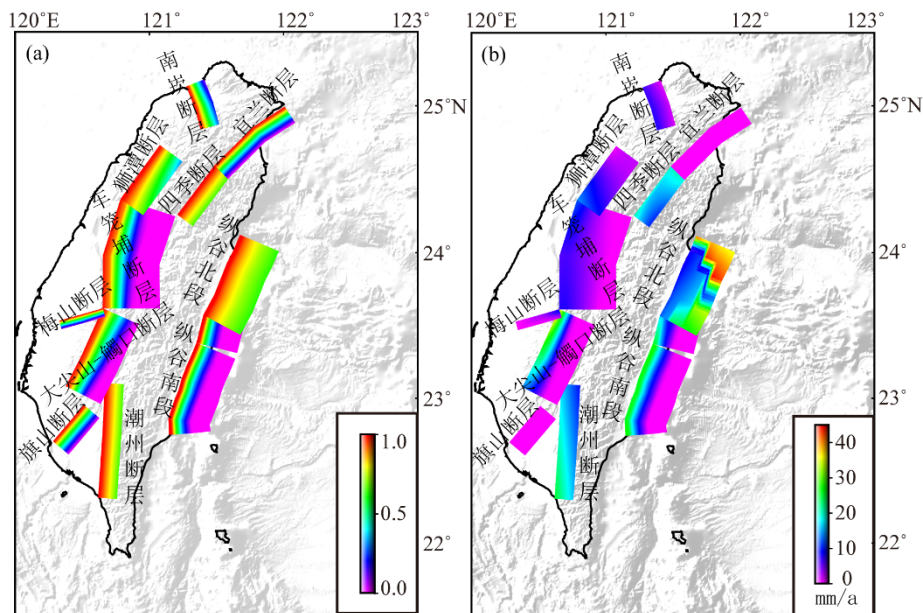


图3 闭锁程度和滑动亏损分布

Fig.3 The distribution of faults locking degree and faults slip-deficit

的应力积累状态对应。北部的南崁断层，同样在深度7 km处闭锁系数即降至0.8以下。中部的车笼埔断层则是1999年集集7.6级地震的发震断层，集集地震是中国台湾地区近百年来陆域最大，并造成重大伤亡的破坏性地震。反演结果显示，集集地震后，车笼埔断层目前闭锁程度相对较弱，蠕滑特征仍然显著。区域南部的梅山断层、大尖山—觸口断层和旗山断层闭锁程度较弱，仅存在5 km深度以上的浅部闭锁，断层深部均以蠕滑为主。

3.2 断层滑动亏损速率与强震危险性分析

断层应变积累的速度快慢，可以用滑动亏损速率来描述，图3b结果显示，四季断层和潮州断层深部滑动亏损速率最大值在20 mm/a左右，显示了相对较快的应变积累，同时它们也是闭锁程度相对较高的断层，未来强震危险性也值得关注。纵谷断裂北段虽然滑动亏损速率最大，但显示深部亏速率大于浅部，可能不是真实的特征，存在受到海域内其他复杂隐伏断层影响的可能。近年来，纵谷断裂北段及其附近的花莲海域，中等强度地震不断，特别是2018年2月还发生了一组6级地震震群，进一步表明该区域应力状态可能已处于较高水平，同时考虑到纵谷断裂北段是强闭锁段，因此该断层未来强震危险性依然相对较高，纵谷断裂南段和大尖山—觸口断层仅浅部存在较高的滑动亏损速率；其他断层滑动亏损速率均较小，应变积累速率相对较慢。

4 结论

(1)台湾造山带现今强闭锁断层为纵谷断裂北段、狮潭断层、四季断层和潮州断层，存在高滑动亏损的断层为四季断层和潮州断层。

(2)纵谷断裂北段、四季断层和潮州断层为强闭锁，且四季断层和潮州断层存在高滑动亏损，结合历史强震活动，分析认为这些断层强震发生的危险性相对较高。虽然狮潭断层的闭锁程度也相对较强，由于其滑动亏损速率较低，因此断层的应变积累速率相对较慢。

(3)本文利用GPS速度场数据分析了台湾造山带的强震危险性，由于台湾造山带构造复杂，对该区域断层强震危险程度的更深入分析，还需借助多种地球物理观测做进一步研究。

参考文献

- [1] Huang Z C, Wang L, Zhao D P, et al. Upper mantle structure and dynamics beneath Southeast China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2010, 182(3): 161–169.
- [2] 李志伟, 胥颐, 郝天珧, 等. 台湾地区的壳幔P波速度和 V_p/V_s 波速比结构研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(9): 1191–1199.
- [3] Yu S B, Chen H Y, Kuo L C. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area[J]. Tectonophysics, 1997, 274(1): 41–59.
- [4] Ai Y, Chen Q F, Zeng F, et al. The crust and upper mantle

- structure beneath southeastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 260(3/4): 549–563.
- [5] Kim K H, Chiu J M, Pujol J, et al. Three-dimensional V_p and V_s structural models associated with the active subduction and collision tectonics in the Taiwan region[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 162(1): 204–220.
- [6] Wu F T, Ross Z E, Okaya D, et al. Dense network, intense seismicity and tectonics of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 2016, 692(Pt.B): 152–163.
- [7] McCaffrey R. Crustal block rotations and plate coupling[M]// Stein S, Freymueller J T eds. *Plate boundary zones*. Washington D.C.: AGU, 2002: 101–122. .
- [8] Vigny C, Simons W J, Abu S, et al. Insight into the 2004 Sumatra–Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia[J]. *Nature*, 2005, 436(7048): 201–206.
- [9] McCaffrey R, Qamar A I, King R W, et al. Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific northwest[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1315–1340.
- [10] Manaker D M, Calais E, Freed A M, et al. Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(3): 889–903.
- [11] 赵静, 江在森, 牛安福, 等. 喜马拉雅主逆冲断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(12): 1756–1764.
- [12] 赵静, 占伟, 任金卫, 等. 汶川地震后龙门山断层中段愈合过程的GPS时间序列反演[J]. *测绘学报*, 2021, 50(1): 37–51.
- [13] Zhao J, Ren J W, Liu J, et al. Coupling fraction and relocking process of the Longmenshan Fault Zone following the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geodynamics*, 2020(137): 101730.
- [14] Zhao J, Yuan Z Y, Ren J W, et al., Acceleration of deep slip along the Longmenshan fault plane before the 2008 M 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022(10): 830317.
- [15] 鲁小飞, 谭凯, 赵斌, 等. 汶川地震前后红河断裂闭锁程度和滑动亏损研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(5): 464–469.
- [16] 李腊月, 李玉江, 张风霜, 等. 郯庐断裂带中南段闭锁特征与地震危险性分析[J]. *地质学报*, 2020, 94(2): 138–150.
- [17] 李海艳, 邵志刚, 马宏生, 等. 基于形变观测分析中国台湾东部花东纵谷断层运动特征[J]. *地学前缘*, 2018, 25(1): 240–251.
- [18] Chang W L, Ching K E, Lee C H, et al. Earthquake potential of active faults in Taiwan from GPS observations and block modeling[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(6): 1274–1286.
- [19] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System[D]. San Diego: University of California, 2002.
- [20] Savage J C, Gan W, Svarc J L. Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B10): 21995.
- [21] Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. Noise in GPS coordinate time series[J]. *Journal of Geophysical Research* 1999, 104(B2): 2797–2816.
- [22] Yu S B, Kuo L C. Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 2001, 333(1): 199–217.