



利用带倾角断层形变公式研究川滇块体东边界断裂带形变特征

邹镇宇¹ 江在森¹ 武艳强² 张 龙³ 崔月菊¹

1 中国地震局地震预测研究所地震预测重点实验室,北京,100036

2 中国地震局第一监测中心,天津,300180

3 中国地震局地球物理研究所,北京,100081

摘要:在经典的走滑位移公式的基础上进行改进,引入断层倾角信息,使其反映了走滑断层倾角对地表形变的影响。由于断层倾角的存在使得震间位移曲线的中心是以断层面闭锁-滑动分界在地表的投影为中心,并且此处形变变化最大;公式中的倾角项表示拟合的断层倾角,体现了断层出露地表处与断层闭锁-滑动分界的整体偏移,其值往往小于近地表倾角测量值。以改进的公式作为断层剖面分析的拟合公式,应用于汶川地震前后川滇块体东边界主要走滑断裂形变特征的剖面分析研究中,得到的拟合结果与其他方法得到的结果具有较好的一致性。改进公式比原公式更客观地反映了断层的形变状态,但由于针对单条断层的剖面拟合受多种因素的影响,拟合结果需结合实际情况作进一步分析。

关键词:震间形变;走滑断层;断层倾角;川滇块体东边界

中图分类号:P542

文献标志码:A

利用GPS速度场作剖面分析是研究断裂带形变特征的常用方法^[1-7]。经典的走滑位移公式^[8]从位错理论得到走滑断层的震间形变分布符合反正切函数特征,因此常用于剖面分析中震间形变走滑分量的拟合,从拟合结果可得到断层的滑动速率和闭锁深度。如Beon等^[1]利用反正切函数拟合了死海断裂带北、中、南3段的走滑分量,得到3段断裂系统的闭锁深度;Paul^[5]利用反正切函数拟合了1999年土耳其伊兹米特7.5级地震,得到震前闭锁深度为8 km,同震破裂位移为3.6 m;魏文薪等^[6]利用反正切函数拟合了小江断裂带的滑动速率。目前的剖面分析一般直接应用经典走滑公式,不考虑断层倾角对地表的影响,而实际断层都有一定的倾角(即便是走滑断层在近地表可能近乎直立,但深部还是会具有一定程度的倾角)。对于加入倾角信息的走滑公式,邹镇宇等^[7]给出了带倾角信息的走滑位移公式,并讨论了倾角对地表位移的影响。本文在此基础上进一步讨论了引入倾角的物理含义及其与实际断层

倾角之间的关系,并利用带倾角的走滑位移公式研究了汶川地震前后川滇块体东边界的主要走滑断裂,包括鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带和小江断裂带的形变特征。

1 带倾角走滑断层震间形变公式及其物理含义

基于位错理论,Savage等^[8]给出了走滑断层的震间形变公式。此公式基于半无限空间均匀介质位错理论,以断层面上边沿作为原点,断层一般不可出露地表。而实际中,断层的闭锁状态可能很复杂,对于震间形变而言,一般认为断层在距地表一定深度是闭锁的,闭锁深度以下的断层面可以自由滑动。由此可以认为,实际断层的闭锁与滑动分界就相当于位错理论中的断层上边沿。因此在研究震间形变时,可将位错理论得到的公式应用于出露地表的断层形变分析中。

收稿日期:2017-09-06

项目资助:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2016IES0203);地震行业科研专项经费(201508010);川滇国家地震监测预报实验场(2018010227)。

第一作者:邹镇宇,博士,主要从事地壳形变分析研究。407124082@qq.com

通讯作者:江在森,博士,研究员。jiangzaisen@126.com

1.1 带倾角的走滑断层震间形变公式

将位错中的断层坐标原点移至实际断层的出露地表处,得到改进的走滑断层震间形变公式:

$$u_y = \frac{s}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x - d_{\text{offset}}}{d} \right) \quad (1)$$

式中, s 为断层两者块体的相对滑动速率; d 为断层的闭锁深度; x 为离开断层的距离; u_y 为平行于断层的走滑分量; $d_{\text{offset}} = d / \tan \delta$, δ 为断层倾角。 d_{offset} 为实际断层的闭锁与滑动分界点相对于断层出露地表点的偏移量,当 $\delta = 90^\circ$ 时, $d_{\text{offset}} = 0$, 式(1)退化为经典的走滑断层震间形变公式^[8]。经过改进的走滑断层震间形变公式体现了实际断层倾角对地表形变的影响^[8]。本文在文献[7]的基础上进一步分析了式(1)的物理含义。

1.2 公式(1)的物理含义

图 1 所示的模型表示断层深浅部的闭锁状态与地表形变分布的关系,模型中断层沿走向无限延伸,模型沿垂直方向向下无限延伸,AB 表示断层滑动-闭锁的分界,AB 以上为断层的闭锁段,AB 以下为断层的滑动段。当断层闭锁段处于完全闭锁状态时,无论断层倾角如何变化,块体的相对运动导致地表形变的分布,相对于 AB 在地表的投影 CD 而言,是中心对称的(即图 1 中的地表红色曲线以 CD 为中心对称分布)。由此说明,由于断层倾角的存在,滑动段上下盘块体的体积(黑色虚线以下的上下盘部分)虽不相同,但对于地表形变的贡献是相等的,即无论断层倾角如何变化,地表的形变分布曲线中心都以 AB 在地表的投影 CD 为对称中心,曲线都为反正切函数。邹镇宇等^[7]采用位错理论公式模拟了带倾角的走滑断层地表形变场,利用带倾角公式拟合,结果相对误差在 1×10^{-10} 量级,表明了改进后公式的正确性。当断层倾角为 90° 时,改进公式退化为原公式;当断层倾角不为 90° 时,断层出露地表 EF 与 CD 之间的距离 d_{offset} 反映了断层倾角的大小,CD 到 AB 的距离 d 是倾角为 δ 的闭锁深度。而实际中由于断层是随深度倾角逐步减小的曲面,所以需进一步讨论改进公式得到的倾角与实际断层倾角之间的关系。

1.3 改进公式(1)中倾角的物理含义

如图 2 中,AB 表示地表面,FOD 表示真实断层曲面,其中 FO 为闭锁段,OD 为滑动段。由图 1 分析可知,无论断层形态如何,只要在闭锁点 O 以下发生走滑运动,则对于地表而言,都是以 O' 为对称中心。AO' 面与 BO' 面的形变为对称变化。对于曲面断层,近地表的倾角 $\angle BFE$ 非常陡峭,

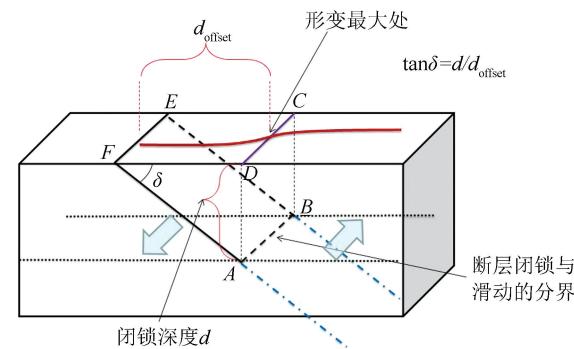


图 1 一般倾角的走滑断层位错示意图

Fig.1 Displacement Diagram of Strike-Slip Fault with General Dip Angle

随着断层变深,倾角逐渐变缓。在 O 点,断层状态由闭锁转为滑动,相当于是平面断层 FO 的作用,地表形变满足平面断层 FO 的位错结果,所以利用地表位移拟合出的倾角应是 $\angle OFB$ 。而 $\angle OFB < \angle BFE$, $\angle BFE$ 是近地表的断层倾角, $\angle OFB$ 是断层出露处与闭锁-滑动分界面的连线与地表的夹角,称为拟合断层倾角。很明显,拟合断层倾角小于近地表的断层倾角。所以对于震间地表形变,在断层完全闭锁时,拟合的平面断层 FO 与实际曲面断层对地表位移的影响是等价的。由此可知,改进公式计算得到的倾角反映了断层闭锁与滑动的分界和断层出露地表处在地表的投影距离,其值可能小于断层近地表的倾角值。

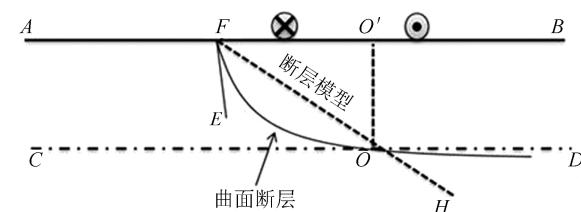


图 2 拟合倾角偏小的模型示意图

Fig.2 Model Schematic of Fitting Lower Dip Angle

1.4 带倾角公式与原公式^[8]的对比

由上文可知,走滑断层由于断层倾角的影响,其地表的形变曲线中心不一定在断层出露地表的位置上。如果用不带倾角的公式(式(1)中倾角为 90°)进行拟合,由于曲线中心偏离了断层出露地表处,拟合算法会使得拟合曲线变宽,从而导致拟合得到的闭锁深度变深,偏离了断层真实的闭锁深度。利用数值进行模拟,先生成滑动速率为 10 mm/a、闭锁深度为 15 km、倾角为 45° 的站点走滑位移,然后用原函数^[8]进行拟合,得到的拟合式为: $y = 10.7847 \cdot \tan(x/23.3673)$ 。从数学式中可以得到,滑动速率的拟合值与原值基本一致,而闭锁深度的拟合值深于原值 15 km(见图 3)。

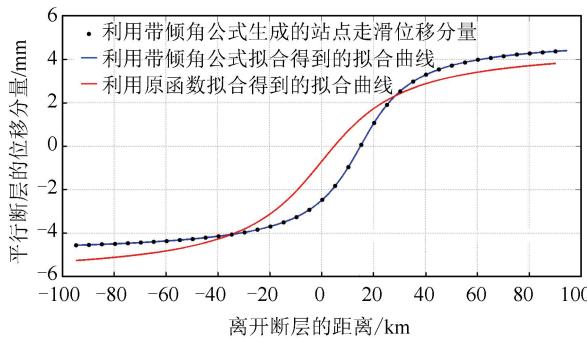


图3 利用原函数拟合倾角不为90°的形变曲线的数值模拟(倾角45°)

Fig.3 Numerical Simulation of Deformation Curve with a Dip Angle of 45° by Using Original Function

2 川滇块体东边界主要断裂带的断层倾向与闭锁深度研究

利用已有的GPS站点速度场,以反正切公式为基本公式,对GPS站点速度平行于断层的分量进行拟合,可得到式(1)中 s 、 d_{offset} 和 δ 的拟合值,其中 s 、 d_{offset} 和 δ 是反映断层面的主要参数。偏移项 d_{offset} 反映了滑动-闭锁分界偏离地质活动断裂分布上的断层线(断层出露地表线)的距离。而且断层闭锁深度 d 、 δ 和 d_{offset} 这三者之间存在本构关系。实际影响断层两侧变形的不对称性(在不考虑介质差异情况下)主要在于断层滑动-闭锁分界偏离断层地表出露线距离的大小 d_{offset} ,而影响断层两侧变形的衰减快慢则取决于断层闭锁深度 d 的大小。由于实际中断层两侧块体不仅存在相对运动,也可能存在往某方向共同运动的特性,所以需要对式(1)进行必要的扩展,即引入项 s_0 , s_0 表示断层两侧块体的共同运动速度,则式(1)可变为:

$$u_y = s_0 + \frac{s}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x - d_{\text{offset}}}{d} \right) \quad (2)$$

进一步对式(2)统一参数符号为:

$$u_y = b_1 + \frac{b_2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x - b_3}{b_4} \right) \quad (3)$$

式中, $b_1 \sim b_4$ 为拟合参数, b_1 即为 s_0 ,表示断层两侧块体作为整体(同步)的移动速率; b_2 即为 s ,表示断层两侧块体远端的相对速率(即两侧块体的相对速率); b_3 表示地表形变中心距离断层出露地表处的距离,即 d_{offset} ; b_4 表示断层的闭锁深度 d 。

利用多期GPS速度场对式(3)进行拟合,得到不同时期的川滇块体东边界主要走滑断裂的 d 与 d_{offset} 。

以式(3)为拟合数学表达式,利用GPS速度

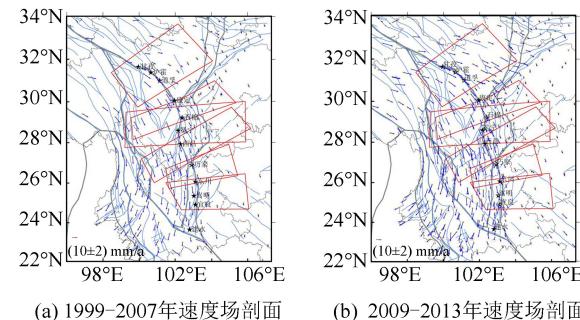
场对断层作剖面分析,拟合结果在原公式^[8]的基础上加入了偏移项 d_{offset} ,从而将原公式^[8]以断层出露地表线为原点,扩展为以断层滑动-闭锁分界在地表投影线为原点的认识,使得式(3)作剖面分析拟合得到的断层形变参数结果从理论上更能反映出断层的实际形变状态。

2.1 基本构造

川滇地块地处青藏高原东南缘,是中国大陆强震集中、频度较高的地区之一。印度板块-欧亚板块碰撞带的东端阿萨姆顶点沿北北东向楔入青藏块体,导致其物质向东流动。川滇地块受到华南地块阻挡使其沿南东向推挤,是川滇地块构造运动和地震活动的主要动力源。块体在此力源下呈现近南东向的滑移挤出,形成一系列以走滑为主的深大断裂,从北到南主要为鲜水河断裂、安宁河断裂、则木河断裂和小江断裂^[9-13]。前人在此地区已开展过许多研究^[14-16]。

2.2 模型拟合结果

根据川滇块体东边界断裂的几何特征,参考赵静等^[16]、闻学泽^[17]的结果对川滇块体东边界断裂从北到南依次划分为甘孜一道段、康定—石棉段、石棉—西昌段、西昌—巧家段、巧家—东川段和东川—宜良段。对此6段断裂作剖面,利用1999—2007年和2009—2013年的GPS速度场数据(图4),以平行于断层方向速度分量,利用式(3)进行剖面拟合,可分别得到不同时期、不同断裂的 b_1 、 b_2 、 b_3 和 b_4 ,从而得出6组拟合参数(表1)。



(a) 1999—2007年速度场剖面 (b) 2009—2013年速度场剖面

图4 川滇块体东边界及各段剖面

Fig.4 Eastern Boundary of Sichuan-Yunnan Block and Every Segment

2.3 结果分析

从表1可以得到:①川滇块体东边界断裂作为整体(同步)的运动速率约为10 mm/a(相对于中国大陆),其中甘孜一道段速率较快,石棉—西昌段速率较慢;②各断裂均为左旋运动,块体相对滑动速率基本为10 mm/a(甘孜一道段2009

表 1 各主要走滑断裂的拟合参数

Tab.1 Fitting Parameters of the Major Strike-Slip Faults

区域名称	时期	$b_1/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$b_2/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	b_3/km	b_4/km	角度/(°)
甘孜—道孚段	1999—2007 年	-10.791	12.172	16.659	36.786 2	65.635
	2009—2013 年	-13.931	2.134	-5.423	2.151	21.635
康定—石棉段	1999—2007 年	-10.201	13.614	-2.725	30.360 0	84.870
	2009—2013 年	-9.525	13.065	9.024 7	>36	77.142
石棉—西昌段	1999—2007 年	-8.894	12.820	10.166	>36	80.465
	2009—2013 年	-8.718	13.306	24.841	>36	66.002
西昌—巧家段	1999—2007 年	-9.707	10.285	41.462	19.138	24.777
	2009—2013 年	-8.277	12.507	67.584 5	32.509	25.688
巧家—东川段	1999—2007 年	-10.310	12.717	-4.323	36.300	83.208
	2009—2013 年	-9.550	9.890	3.440	16.553	78.259
东川—宜良段	1999—2007 年	-9.672	8.841	-0.844	13.440	86.406
	2009—2013 年	-9.044	10.325	-3.571	22.109	80.823

注: $b_2 > 0$, 块体左旋运动; $b_2 < 0$, 块体右旋运动; $b_3 > 0$, 断层向川滇块体外部倾; $b_3 < 0$, 断层向川滇块体内部倾

—2013 年的值偏低, 为 2.134 mm/a , 是由于巴颜喀拉块体受汶川地震震后效应的影响); ③各断裂的 $b_3(d_{\text{offset}})$ 和 b_4 (闭锁深度) 呈现不同的特点。

2.3.1 甘孜—道孚段

GPS 数据点南西侧分布于川滇块体内部, 北东侧分布于巴颜喀拉块体内部靠近龙门山断裂。从 1999—2007 年的剖面拟合得到断层的闭锁深度约 36 km , d_{offset} 偏移约 16 km , 断层整体向北东向倾。图 5、图 6 分别为利用 1999—2007 年和 2009—2013 年速度场得到的各段剖面拟合结果。从图 5(a)可以看到, 汶川地震前, 尽管鲜水河断裂北北东侧的 GPS 站点受到龙门山断裂孕震晚期的影响, 但鲜水河断裂仍然可以一定程度地控制近场 GPS 站点的运动状态; 2009—2013 年的剖面拟合得到的闭锁深度以及 d_{offset} 似乎都不合理, 从剖面结果(图 6(a))中推测原因, 可能是由于处于北北东侧的 GPS 站点受到汶川地震的震后影响, 平行鲜水河断裂方向加速过程明显, 其中靠近龙门山断裂的站点相较于远场, 其加速程度更加明显, 站点运动分布处于较为分散的状态, 所以不能得到很好的拟合结果。同时也进一步表明, 通过实测资料作函数拟合, 用地壳运动处于相对稳定时段的资料拟合所得到的闭锁深度 d 及因断层倾斜引起的断层变形中心偏移量 d_{offset} 才可能更接近于实际。

2.3.2 康定—石棉段

从 1999—2007 年的剖面拟合得到闭锁深度约 30 km , d_{offset} 约 2 km , 计算的断层倾角约为 84° , 说明康定—石棉段的断层近乎垂直(见图 5(b)); 由 2009—2013 年的剖面拟合得到的闭锁深度有很大程度的变深, 倾角基本垂直(图 6(b))。震间应变积累时, 断层的闭锁深度应为

缓慢渐变量, 短时间大幅变深的原因可能是由于断裂北东东侧的 GPS 站点受到汶川地震震后的影响, 也可能是由于新增的 GPS 站点位移对结果产生一定程度的影响。由计算结果可认为汶川地震之后, 康定—石棉段的闭锁深度有所加深。

2.3.3 石棉—西昌段

从 1999—2007 年的剖面拟合得到石棉—西昌段(安宁河断裂)的闭锁深度大于 36 km , d_{offset} 约 15 km , 倾向东侧, 此结果似乎与易桂喜等^[14]关于低 b 值区处于断裂带西侧的结果不一致, 可能原因是由于安宁河断裂两侧的 GPS 站点分布不均(断层东侧的 GPS 站点明显多于西侧的站点)。西侧站点太少, 不能很好控制曲线的形态, 导致结果向站点较多的东侧偏移(图 5(c))。2009—2013 年的剖面结果显示, 安宁河断裂的闭锁深度依然很深, d_{offset} 有所增大(图 6(c)), 可能与 2009—2013 年站点的加密有关, 也有可能与康定—石棉段的原因类似, 受到汶川地震震后的影响, 加之安宁河断裂所处地区的断裂系统复杂, 结果可能是在汶川地震震后效应的背景下, 同时受到多条断裂的综合影响。

2.3.4 西昌—巧家段

从 1999—2007 年的剖面拟合得到西昌—巧家段(则木河断裂)的闭锁深度约 20 km , d_{offset} 偏大, 约为 41 km (图 5(d)); 2009—2013 年的拟合结果显示, 闭锁深度约 32 km , d_{offset} 依然较大, 约为 67 km (图 6(d))。则木河断裂处于大凉山次级块体的西边界, 距离大凉山断裂较近, 推测较大的 d_{offset} 可能是因为则木河的脆韧转换带距离断层出露地表处的水平距离较远导致的结果, 也有可能是受到大凉山断裂的影响, 但基本可以从地表结果得到则木河断裂的断层面向近东侧倾的结论。

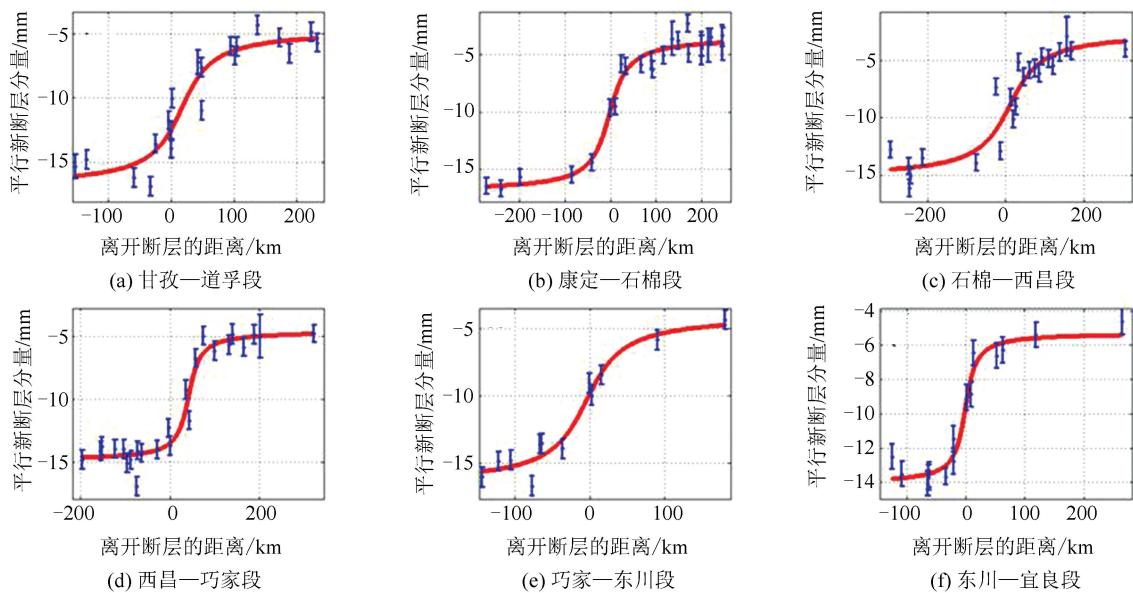


图5 利用1999—2007年速度场得到各段的剖面拟合结果

Fig.5 Velocity Field Fitting Results of Cross-Sectional Segments from 1999 to 2007

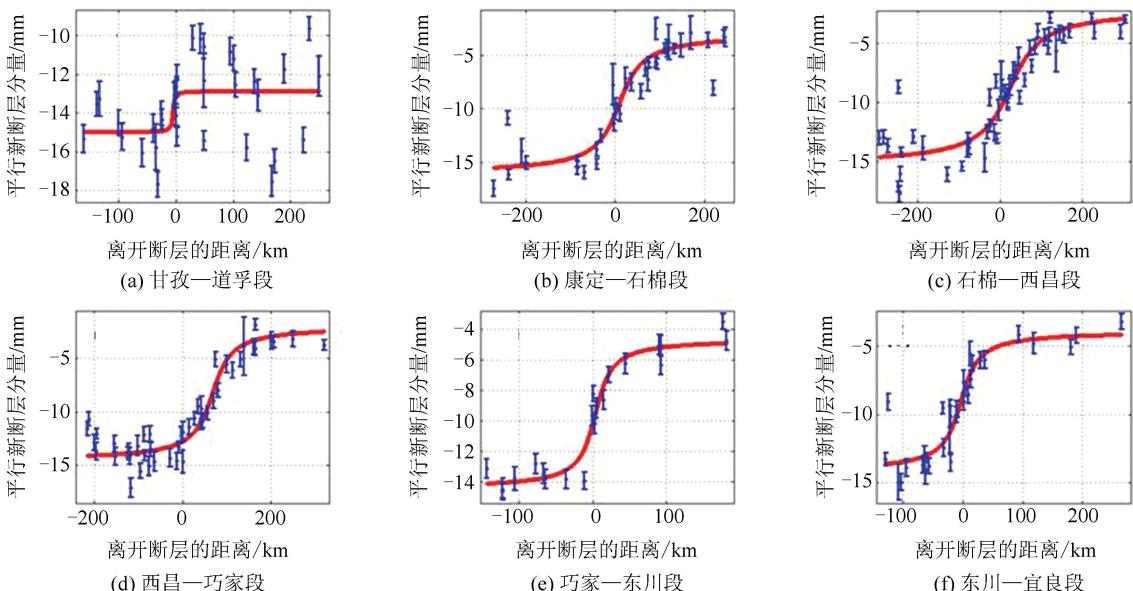


图6 利用2009—2013年速度场得到各段的剖面拟合结果

Fig.6 Velocity Field Fitting Results of Cross-Sectional Segments from 2009 to 2013

2.3.5 巧家—东川段和东川—宜良段(小江断裂带)

从1999—2007年的剖面拟合得到小江断裂北段闭锁深度约36 km, d_{offset} 很小, 拟合得到的断层倾角约83°, 可认为断层近乎垂直(图5(e))。2009—2013年的拟合结果显示, 小江断裂北段闭锁深度约11 km, 倾角值也较大, 断层面近乎垂直(图6(e))。闭锁深度变浅的结果并不能肯定小江断裂北段的应变积累量大幅度降低。由于2009—2013年加入新的站点, 将2009—2013年相比于1999—2007年新增点去掉, 再作剖面拟合(图7(c))。表2结果显示, 虽然去掉新增点的速率相比于1999—2007年有所变化, 但由于去掉新增点后, 近场站点减少, 导致拟合闭锁深度的结果比原始2009—2013年的拟合结果变大, 说明近场站点对控制断层近场形变起到重要作用, 2009—2013年新增的断层近场站点是导致拟合闭锁深度大幅变小的一个主要因素。小江断裂南段两期数据的拟合结果差别不大, 汶川地震后拟合的闭锁深度略大于震前拟合结果, 断层倾向近乎垂直, 略向西倾(图5(f)、图6(f))。此结果与易桂喜等^[14]低b值区分布于断裂带西侧的结果和赵

静等^[16]负位错反演得到的结果具有一定的一致性。小江断裂南段的两期 GPS 速度场站点在断层两侧分布均匀,尤其 2009—2013 年这期数据,

基本符合了近场站点密集、远场站点控制变形宽度的特点。结果表明,嵩明凹凸体对地表形变具有一定的控制作用。

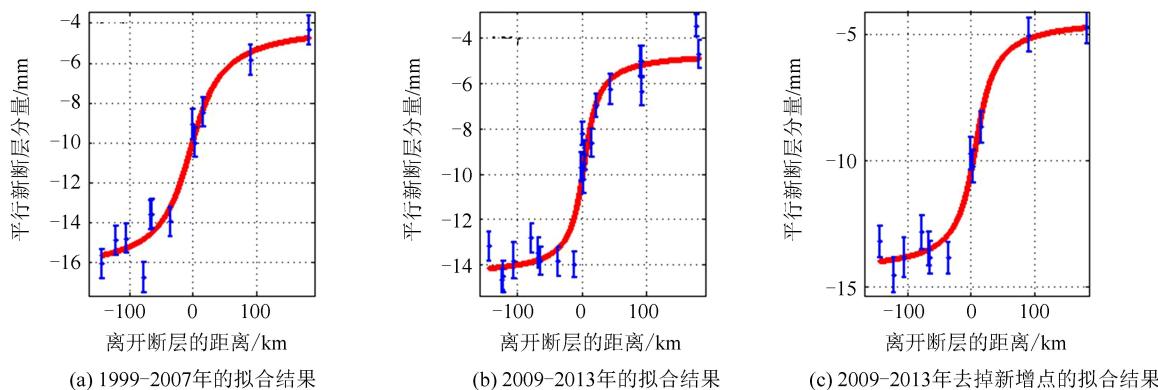


图 7 巧家—东川段的拟合结果比较

Fig.7 Fitting Results of Qiaoja-Dongchuan Segment in Each Period

表 2 巧家—东川段的拟合参数

Tab.2 Fitting Parameters of the Qiaoja-Dongchuan Segment

区域名称	时期	b_3 /km	b_4 /km	角度/(°)
	1999—2007 年	-4.323	36.300	83.208
巧家—东川段	2009—2013 年	3.440	16.553	78.259
	2009—2013 年 (去掉新增点)	7.109	22.457	72.436

2.4 讨论

利用带倾角公式对川滇块体东边界各主要走滑断裂的 GPS 速度场进行拟合,相比于原公式得到的拟合结果更加丰富,结果更贴近于实际。而且方法简单直观,所得结果与其他人研究的结果具有一致性,计算结果具有一定的参考意义。

但由于地壳运动的复杂性,单纯地利用一个简单公式研究断层真实的形变特征还是不够的。首先,剖面分析理论上应是以垂直于断层的一条线上的 GPS 站点进行研究,但如此能选取到的站点数目非常少,所以实际中选取多边形(一般是四边形)的剖面区域进行研究,而这样做就忽略了平行于断层方向的断层运动差异,这种情况在图 5(a)、图 5(c)、图 5(f)与图 6(a)、图 6(c)至图 6(e)中有所体现,近场个别站点的运动速率大于等于远场的站点速率,推测可能是由于区域选取宽度较宽,平行于断层运动的差异较为明显所导致。另外,地震的震后效应有可能也会对拟合结果产生影响,比如图 6(a)的巴颜喀拉块体中的站点速率处于大范围的分散状态,明显与震间的形变特征不符,由于 GPS 速度场为 2009—2013 年(汶川地震震后)的数据,研究区域靠近龙门山断裂带,推测结果可能是受到汶川地震的震后影响比较明显。此外,多条断层的叠加效应也是影响拟合结

果的重要因素,如图 6(c)、图 6(d)的剖面跨过安宁河断裂、则木河断裂、大凉山断裂、马边断裂等,多条断裂的叠加效应可能会使得断层近场近似线性递增的部分变宽,由此使得对拟合的闭锁深度变深;另外,图 5(a)、图 5(f)和图 6(b)至图 6(d)、图 6(f)中,断层西侧(即川滇块体的区域)远场有个别站点的速率明显小于其他远场站点的速率,原因可能是由于此断裂带西侧的其他断裂带对此站点的作用使其运动偏离了此断裂带的形变状态。目前的公式尚未涉及区域介质的影响,也就忽略了断层两侧可能存在的介质差异会导致断层两侧的运动存在的差异。

3 结语

Savage 和 Burford^[8]带倾角的走滑位移公式由经典公式以地质活动断裂分布图上的断层线为跨断层剖面坐标原点。公式中增加了反映断层倾斜影响的参数,其中由于断层倾角的存在使得震间位移曲线中心以断层闭锁滑动分界在地表的投影处为中心,同时也是形变变化最大的地方。公式中的倾角项表示拟合的断层倾角,体现了断层出露地表处和断层闭锁与滑动分界的整体偏移程度,其值小于近地表的倾角值是合理的。因此实际拟合中,用 d_{offset} 反映拟合的倾角大小,理论上可以通过地表形变得到断层的闭锁状态以及断层面拟合的断层倾角大小。

以式(3)作为剖面分析的拟合公式,利用 1999—2007 年的速度场数据得到的 d_{offset} 很小,说明断层倾角近乎垂直(除了西昌—巧家段,其结

果可能受到大凉山次级块体多条断层的综合影响程度较大)。利用2009—2013年的速度场数据得到的断层倾角距离汶川地震震中较近的断裂(甘孜—道孚段往南至西昌—巧家段)受汶川地震影响较大,结果出现较大偏差;而距离汶川地震震中相对较远的小江断裂,受其影响相对较小,表明震后效应也可能是影响剖面拟合结果的另一个主要因素。因此,类似纯函数模型拟合计算,由于尚未考虑介质的差异、地震震后和多断裂系统等方面的影响,所给出的闭锁深度只具有相对参考意义,即闭锁深度 d 值大的断层相比于 d 值小的断层,其真实的闭锁深度可能更大,但拟合得到的 d 值本身可能与真实的闭锁深度有差距。因此,应以纯函数模型的拟合结果作为参考,利用多种手段作进一步的分析。

参 考 文 献

- [1] Beon M L, Klinger Y, Amrat A Q, et al. Slip Rate and Locking Depth from GPS Profiles Across the Southern Dead Sea Transform[J]. *Journal of Geophysical Research, Part B: Solid Earth*, 2008, 113: B11403, DOI:10.1029/2007JB005280
- [2] Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, et al. Slip Rates and Recurrence Intervals of the Longmen Shan Active Fault Zone and Tectonic Implications for the Mechanism of the May 12 Wenchuan Earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1 066-1 073 (张培震, 徐锡伟,闻学泽,等.2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J].地球物理学报,2008, 51(4):1 066-1 073)
- [3] Jiang Zaisen, Fang Ying, Wu Yanqiang, et al. The Dynamic Process of Regional Crustal Movement and Deformation Before Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 505-518(江在森,方颖,武艳强,等.汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J].地球物理学报,2009, 52(2):505-518)
- [4] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Yang Guohua, et al. Deformation Characteristics of North Section of North-South Seismic Zone in Recent Period [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 045-1 048 (武艳强,江在森,杨国华,等.南北地震带北段近期地壳变形特征研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2012, 37(9): 1 045-1 048)
- [5] Paul S. Earthquake and Volcano Deformation[M]. Princeton: Princeton University Press, 2010
- [6] Wei Wenxin, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Motion Characteristics of Major Faults in East Boundary of Sichuan-Yunnan Block Obtained with GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 041-1 044 (魏文薪,江在森,武艳强,等.利用GPS数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动特性[J].武汉大学学报·信息科学版,2012, 37(9):1 041-1 044)
- [7] Zou Zhenyu, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Improvements for the Strike/Dip-Slip Displacement Theory Formula of General Dip Fault[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(3): 460-463(邹镇宇,江在森,武艳强,等.针对一般倾角的走滑/倾滑位移理论公式的改进[J].大地测量与地球动力学,2015, 35(3): 460-463)
- [8] Savage J C, Burford R O. Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California [J]. *Journal of Geophysical Research, Part B: Solid Earth*, 1973, 78(5): 832-845
- [9] Xiang Hongfa, Guo Shunmin, Xu Xiwei, et al. Active Block Division and Present-Day Motion Features of the South Region of Sichuan-Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22 (2): 253-264(向宏发,虢顺民,徐锡伟,等.川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J].地震地质,2000, 22 (2): 253-264)
- [10] Xie Furen, Su Gang, Cui Xiaofeng, et al. Modern Tectonic Stress Field in Southwest Yunnan, China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(1):17-23 (谢富仁,苏刚,崔效锋,等.滇西南地区现代构造应力场分析[J].地震学报,2001, 23(1):17-23)
- [11] Hong Hanjing, Yu Yong, Tao Wei, et al. Dynamic Analysis of Continental Meizoseismal Region in China[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(1): 11-22 (洪汉净,于泳,陶玮,等.中国大陆强震区的形成及其动力学分析[J].地震地质,2003, 25(1): 11-22)
- [12] Xu Xiwei, Cheng Guoliang, Yu Guihua, et al. Tectonic and Paleomagnetic Evidence for the Clockwise Rotation of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(1): 61-70(徐锡伟,程国良,于贵华,等.川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据[J].地震地质,2003, 25(1): 61-70)
- [13] Cheng Wanzheng, Diao Guiling, Lü Yipei, et al. Focal Mechanisms, Displacement Rate and Mode of Motion of the Sichuan-Yunnan Block[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(1): 71-87(程万正,刁桂苓,吕弋培,等.川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式[J].地震地质,2003, 25(1): 71-87)
- [14] Yi Guixi, Wen Xueze, Su Youjin. Study on the Potential Strong-Earthquake Risk for the Eastern

- Boundary of the Sichuan-Yunnan Active Faulted-Block, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1 719-1 725 (易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 川滇活动地块东边界强震危险性研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1 719-1 725)
- [15] Zhang Xi, Cui Duxin, Wang Wenping, et al. Using GPS Data to Analyze Horizontal Movement and Strain Accumulation in Sichuan-Yunnan and Its Vicinity Before and After the Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Seismological Research*, 2008, 31 (S1): 464-470 (张希, 崔笃信, 王文萍, 等. 利用 GPS 资料分析汶川地震前后川滇及其邻区水平运动及应变积累 [J]. 地震研究, 2008, 31(S1): 464-470)
- [16] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Niu Anfu, et al. Study on Dynamic Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit in the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 872-885 (赵静, 江在森, 牛安福, 等. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动亏损动态特征研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 872-885)
- [17] Wen Xueze. Character of Rupture Segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe Fault Zone, Western Sichuan [J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 239-249 (闻学泽. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征 [J]. 地震地质, 2000, 22(3): 239-249)

Deformation Characteristics of the Eastern Boundary Fault Zone of Sichuan-Yunnan Block Using the Deformation Formula of Seismic Fault with Dip Angle

ZOU Zhenyu¹ JIANG Zaisen¹ WU Yanqiang² ZHANG Long³ CUI Yueju¹

1 Key Laboratory of Earthquake Forecasting, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 The First Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

3 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: Fault dip angle is introduced to reflect the impact of surface displacement of strike-slip dip angle based on classic strike-slip displacement formula. Due to the dip angle of the fault, surface projection is the interface between locking and sliding motion on the fault, where deformation varies greatly. The dip term in the formula represents the fitting dip angle, which represents the overall offset of the surface and the locking-sliding boundary on the fault, and its value is often smaller than the near-surface measurement of dip angle. It was applied in the profile analysis of the main strike-slip fault deformation characteristics of the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan block before and after the Wenchuan earthquake by using the improved formula as the fitting formula of the fault profile analysis. The fitting results obtained are consistent with those obtained by other methods. The improved formula reflects the deformation of the fault more objectively than the original one. Because the profile analysis for a single fault is affected by many factors, the fitting results have to be further analyzed in actual situations.

Key words: interseismic deformation; strike-slip fault; fault dip angle; eastern boundary of Sichuan-Yunnan block

First author: ZOU Zhenyu, PhD, specializes in crustal deformation analysis. E-mail: 407124082@qq.com

Corresponding author: JIANG Zaisen, PhD, professor. E-mail: jiangzaisen@126.com

Foundation support: Basic Research Business Special Project of Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, No. 2016IES0203; Earthquake Research Special Funds Project, No. 201508010; Experimental Field of Sichuan-Yunnan Earthquake Monitoring and Forecasting, No. 2018010227.