

陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究^{*}

赵 静^{1,2}, 牛安福², 李 强³, 苑争一²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045; 3. 福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要: 基于 1999 ~ 2007 年、2009 ~ 2013 年两期中国大陆 GPS 水平速度场数据, 使用 DEFNODE 负位错程序反演计算了汶川地震前后陇西块体周边断层——海原—祁连山断裂、六盘山断裂、庄浪河断裂和西秦岭北缘断裂的断层闭锁程度与滑动亏损动态空间分布, 并讨论了汶川地震对块体周边断层的影响和可能存在的强震危险段。结果表明, 汶川地震后西秦岭北缘断裂中西段闭锁程度有所减弱、中东段闭锁程度有所增强, 地震可能对其有一定影响; 在汶川地震前后, 其它断裂的断层闭锁程度没有发生明显改变, 地震可能对其影响较弱。目前冷龙岭断裂、金强河断裂、庄浪河断裂、六盘山断裂、西秦岭北缘断裂中西段部分区域的闭锁程度较强, 闭锁深度约为 20 ~ 25 km, 结合地质尺度的断层地震空区等结果, 分析认为上述断裂可能为地震危险段。汶川地震前后陇西块体周边平行断层滑动亏损速率中, 除庄浪河断裂为右旋滑动亏损以外, 其它断裂均为左旋滑动亏损; 陇西块体周边垂直断层滑动亏损速率则均为挤压。

关键词: 陇西块体周边断层; DEFNODE 负位错反演; 断层闭锁; 滑动亏损

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2016)03-0351-08

0 引言

位于南北地震带北段的陇西块体是被青藏高原及海原—六盘山断裂带围限的菱形块体, 周围分布着海原—祁连山断裂带、六盘山断裂带、庄浪河断裂带和西秦岭北缘断裂带等(田勤俭等, 2002), 其中海原—祁连山断裂带以强烈的左旋走滑为特征, 兼具由南向北的逆冲分量; 六盘山断裂带位于海原—祁连山断裂带的东端, 以挤压逆冲运动为主, 其北段兼具左旋走滑运动; 西秦岭北缘断裂带为一条大型左旋走滑断裂(袁道阳等, 2004); 庄浪河断裂带以挤压运动为主, 右旋走滑运动并不明显(侯康明等, 1999; 袁道阳等, 2002)。综合考虑地震发生时间和中长期预测的时间尺度, 南北地震带北段可能发生 $M_s \geq 7$ 地震的 6 个破裂空区中有 4 个位于陇西块体内部及周边(M7 专项工作组, 2012); 根据近 400 多年 $M_s \geq 6.5$ 地震的应变能累积释放速率估计, 南北地震带北段目前的应变能积累相当于一次 8 级地震所需能量, 因此存在发生 $M_s \geq 7$ 大地震的危险背景(M7 专项工作组, 2012); 陇西块体周边历史上曾发生过包括 1920 年海原 8.5 级地震在内的多次 7 级以上强震, 但自

1955 年以来, 其周边地区仅发生了 1990 年青海共和 7.0 级地震, 强震背景突出; 汶川地震后, 陇西块体及周边区域应变积累增强, 其中 2013 年岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震发生在陇西块体南部临潭—宕昌断裂附近, 2016 年门源 $M_s 6.4$ 地震发生在陇西块体西北部冷龙岭断裂附近。因此汶川地震后陇西块体周边断层的闭锁程度、运动特征、强震危险段落的判定等成为亟待解决的科学问题, 有必要对其进行研究。

地壳内部断层闭锁深度、不同位置的闭锁程度和滑动亏损分布会对地壳表面尤其是断层附近区域的变形产生很大影响, 它们是影响发震断裂带应变积累的重要因素, 因此能在很大程度上反映断裂带的地震危险性(赵静等, 2015)。鉴于此, 本文利用 1999 ~ 2007 年、2009 ~ 2013 年两期中国大陆 GPS 水平速度场数据, 研究了汶川地震前后陇西块体周边断层的闭锁程度和滑动亏损空间分布等动态变化特征, 并将震前和震后结果进行对比分析, 从不同时空尺度讨论了汶川地震对该区域断层的可能影响; 最后结合地震空区分布、 b 值剖面、GPS 站速度剖面及高应变能积累断层等结果综合分析判定了陇西块体周边断层的地震危险段。

^{*} 收稿日期: 2016-01-13.

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH15049Y, XH16044)和国家自然科学基金(41330314)共同资助。

1 DEFNODE 负位错反演方法基本原理

本文反演采用 DEFNODE 程序 (McCaffrey, 2002, 2007), 该程序假定块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变及块体边界由于断层闭锁产生的滑动亏损而引起的地表弹性变形之和。若块体内部不存在整体均匀应变, 理论表达式如下:

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

式中各参数的定义参考 McCaffrey (2002) 和赵静等 (2012) 文献。

若块体内部存在整体均匀应变, 应变率的计算采用 Savage 等 (2001) 给出的式 (2)。此时模型原理为式 (1) 加式 (2), 其中式 (2) 表示块体内部均匀应变引起的速度量值大小。

$$\begin{bmatrix} V_\lambda \\ V_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \theta_0 \Delta \lambda & R \Delta \theta & 0 \\ 0 & R \sin \theta_0 \Delta \lambda & R \Delta \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_\lambda \\ \dot{\varepsilon}_{\lambda\theta} \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中各参数的定义参考赵静等 (2013b) 文献。

利用 GPS 水平速度场数据反演块体旋转、块体内部均匀应变和断层闭锁程度等参数的过程中, 参数拟合的不符值可由式 (3) 表征, 其中各参数的定义参考 McCaffrey (2002) 和赵静等 (2012, 2013a) 文献。

$$\chi_n^2 = [\sum_{i=1}^n (r_i / f \sigma_i)^2] / \text{dof}. \quad (3)$$

为得到使 χ_n^2 达到最小的一组最佳参数值, 本反演程序使用网格搜索和模拟退火算法求解, 并通过不断改变 f 值大小进行逐步择优, 寻求最满意的 f 值, 进而保证 $\chi_n^2 \approx 1$, 此时模型能够最佳地解释观测数据。

2 最优模型设置

根据相关研究成果 (葛伟鹏等, 2013; 魏顺民等, 2000; Loveless, Meade, 2011), 研究区域以海原—祁连山断裂带、六盘山断裂带、庄浪河断裂带和西秦岭北缘断裂带为中心, 包含陇西块体、鄂尔多斯块体、西秦岭块体、西宁块体、阿拉善块体、祁连山块体, 其中祁连山块体是一部分, 并未包含整个地块 (图 1, 红色粗线代表建立模型时包

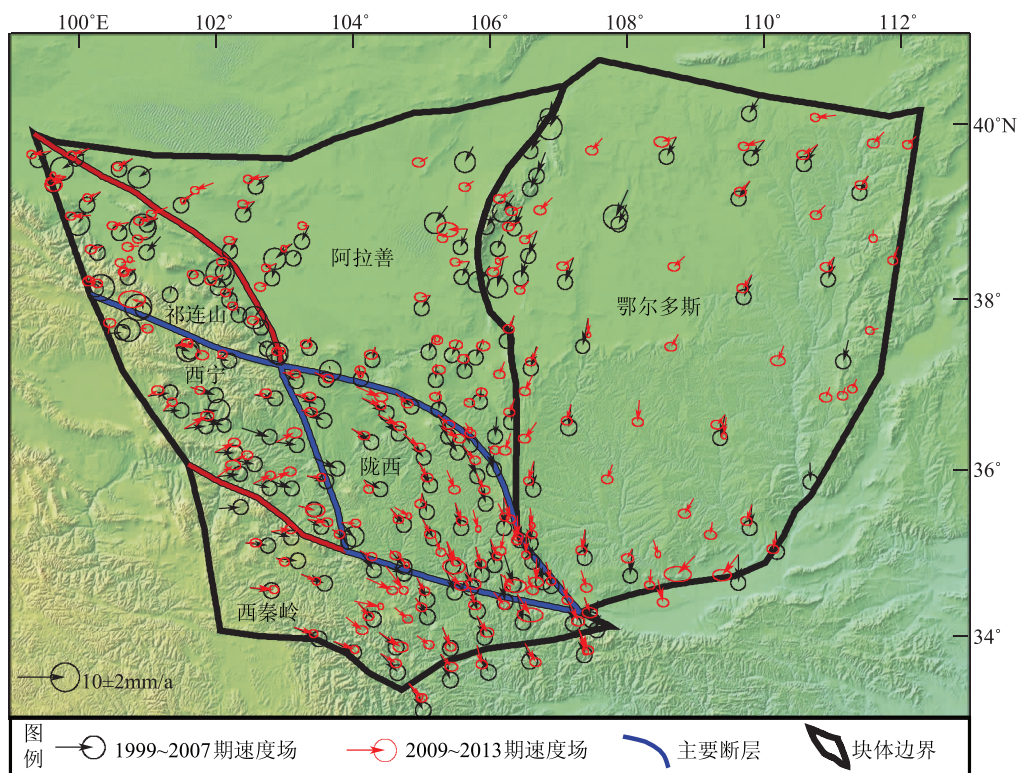


图 1 陇西块体周边区域两期 GPS 速度场结果与主要断层

Fig. 1 The two periods of GPS velocity field and main faults around the Longxi Block and its adjacent area

含但最终结果并未给出的断层)。

GPS 速度场约束方面, 1999 ~ 2007 年有 180 个 GPS 测点参与反演; 2009 ~ 2013 年有 218 个 GPS 测点参与反演。反演过程中, 沿各条断裂带走向共有 6 条等深线, 深度依次为 0.1、5、10、15、20 和 25 km。

断层结构设置时, 以李强等 (2014)、万永革等 (2009) 和张希等 (2003, 2005, 2007, 2008) 的研究成果为主要参考, 其中张希等 (2003, 2005, 2007, 2008) 对本文研究区域进行了长期的跟踪研究, 因此其断层模型对本文中断层结构设置具有较高的参考意义; 同时还参考构造地质研究成果 (王永成, 刘百箴, 2001; 向宏发等, 1998)、

深地震测深剖面结果 (李英康等, 2014; 王海燕等, 2012)、地壳电性结构研究结果 (金胜等, 2012) 和 MapSIS 软件中有关断层结构信息。综合分析上述研究结果, 断层结构设置如下: 六盘山断裂每条等深线上有 4 个节点, 断层倾角为 45°; 毛毛山—老虎山—海原断裂每条等深线上有 10 个节点, 断层倾角为 50°; 西秦岭北缘断裂每条等深线上有 12 个节点, 断层倾角为 60°; 庄浪河断裂每条等深线上有 6 个节点, 断层倾角为 60°; 河西走廊北侧断裂与武威—天祝断裂每条等深线上有 13 个节点, 断层倾角为 40°; 托莱山—冷龙岭—金强河断裂每条等深线上有 5 个节点, 断层倾角为 50°。具体不同学者所得到的断层倾角见表 1。

表 1 断层倾角

Tab. 1 Dip angle of the fault

断层名称	断层倾角 (不同参考文献结果)
六盘山断裂	45° (李强等, 2014); 45° (万永革等, 2009); 25° ~ 65° (向宏发等, 1998)
毛毛山—老虎山—海原断裂	60°左右 (金胜等, 2012); 30° ~ 70° (王海燕等, 2012); 40° ~ 80° (王永成, 刘百箴, 2001); 65° ^① ; 40° ~ 67° (张希等, 2003); 45° ~ 59° (张希等, 2005); 41° ~ 57° (张希等, 2008)
西秦岭北缘断裂	60° (万永革等, 2009); 65° ~ 67° (张希等, 2007); 47° ~ 61° (张希等, 2008)
庄浪河断裂	72° ~ 77° (张希等, 2003); 37° ~ 45° (张希等, 2005); 32° ~ 45° (张希等, 2007); 30° ~ 63° (张希等, 2008)
河西走廊北侧断裂与武威—天祝断裂	39° (张希等, 2008); 45° ~ 70° (MapSIS 软件); 40°左右 ^②
托莱山—冷龙岭—金强河断裂	65° (李强等, 2014); 37° ~ 65° (张希等, 2003); 28° ~ 41° (张希等, 2007)

本文将断层闭锁程度 (Φ) 与滑动亏损分布设置为深度 z 的函数, 表达式如下 (McCaffrey, 2007; Wang *et al.*, 2003):

$$\Phi(z) = 1.0, (z \leq Z_1), \quad (4)$$

$$\Phi(z) = \frac{\exp(-z'/\gamma) - \exp(-1/\gamma)}{1 - \exp(-1/\gamma)}, \quad (5)$$

其中, $z' = (z - Z_1)/(Z_2 - Z_1) (Z_1 < z < Z_2)$

$$\Phi(z) = 0.0, (z \geq Z_2). \quad (6)$$

其中, γ 为控制 Φ 变化图形的参数, Z_1 为断层完全闭锁的深度, Z_2 为断层蠕滑的深度。在转换区域 (Effective Transition), 如果 γ 非常小, Φ 的快速下降发生在 Z_1 附近, 越靠近底部下降速率越慢; 如果

γ 较大, Φ 基本从 1 线性降低到 0 (Wang *et al.*, 2003), 图 2 给出了 3 种不同 γ 值 Φ 的变化情况。

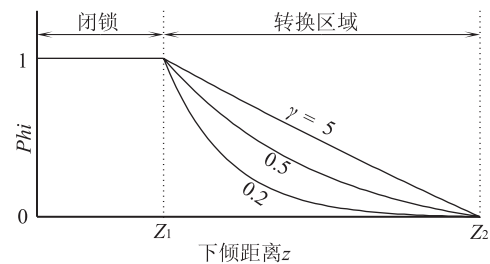


图 2 3 种不同 γ 值情况下转换区域闭锁程度随深度分布 (据 Wang 等 (2003) 改绘)

Fig. 2 Φ distribution in the transition zone varied with depth under the condition of three different values of the shape factor γ (modified based on Wang *et al.* (2003))

① 张培震. 2012. 中国大陆活动地块与边界带动力过程.

② 张培震. 2015. 中国大陆活动地块与边界带动力过程.

模型设置时, 根据前人的相关研究 (Wang *et al.*, 2003), 将 γ 值设为 0.5, 并保持不变, Z_1 、 Z_2 初始值分别设为 2 km、5 km, 并且作为参数同时参与反演; 因为本文设定的断层深度为 25 km, 因此 Z_2 的最大值为 25 km, 同时本文设定 Z_1 的最小值为 2 km (假定地表至 2 km 深度处均为完全闭锁)、最大值为 20 km。根据反演结果, 不断调整 Z_1 和 Z_2 的值, 直到寻找到每列节点处 Z_1 和 Z_2 的最优值, 然后将此 Z_1 和 Z_2 值作为模型参数并保持不变, 进行反演计算得到最终结果。

由于陇西块体、西秦岭块体、西宁块体、阿拉善块体和祁连山块体相对较小, 因此本文假定其内部变形主要由断层闭锁引起, 而其内部整体均匀应变忽略不计; 虽然鄂尔多斯块体较大, 但其整体刚

性较好, 因此其内部整体均匀应变也可忽略不计, 所以此次反演仅采用公式 (1), 以 χ_n^2 为标准寻求最佳模型。反演过程中, 首先将与周围其它测点运动趋势明显不同的点删除, 然后通过多次试算, 得到了最优模型, 其中 1999 ~ 2007 年最优模型中 GPS 速度场误差权重因子 f 取为 1.00, 此时 $\chi_n^2 \approx 0.888$ (观测值个数为 360, 自由度为 292); 2009 ~ 2013 年最优模型中 GPS 速度场误差权重因子 f 取为 1.77, 此时 $\chi_n^2 \approx 0.996$ (观测值个数为 436, 自由度为 368)。为了更好地说明模型择优和拟合效果, 图 3 给出了最优模型的拟合残差分布, 结果显示两期 GPS 速度场的所有测点速度残差值都较小, 基本处在误差范围之内, 这表明模型拟合较好。

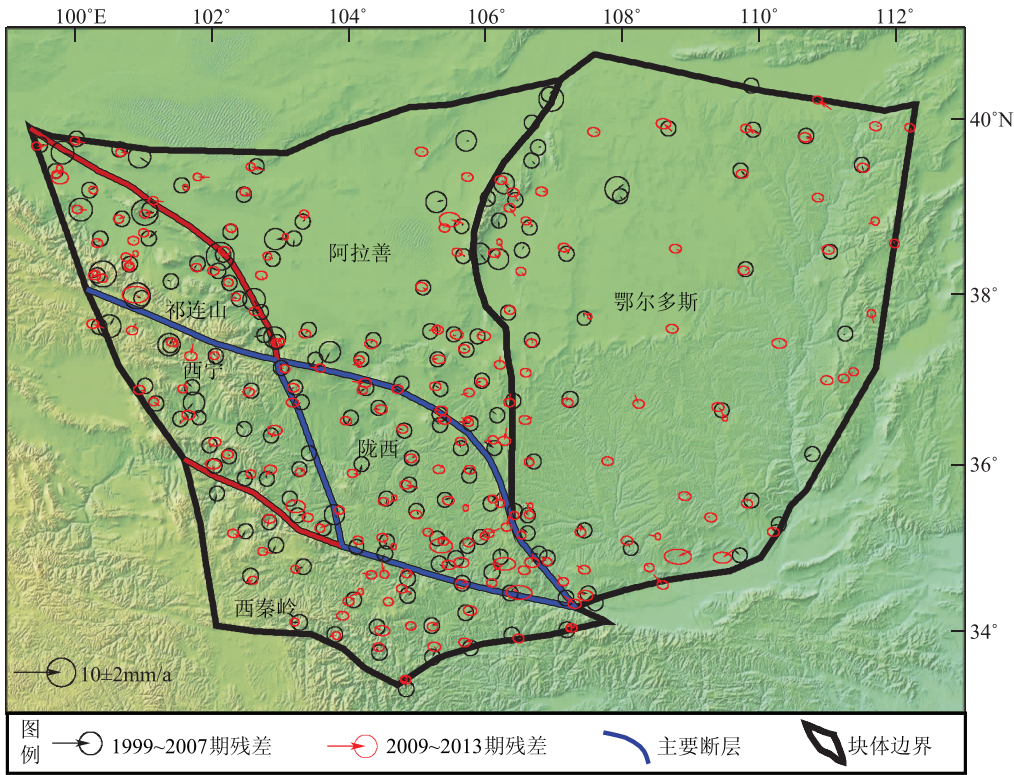


图 3 陇西块体周边区域两期最优模型的速度残差

Fig. 3 Residual of velocities of optimal models in two periods around the Longxi Block and its adjacent area

3 汶川地震前后断层闭锁程度三维分布

通过多次反演计算, 得到 2008 年汶川地震前 (图 4a) 和地震后 (图 4b) 陇西块体周边断层闭

锁程度的空间动态变化分布。综合分析两期反演结果, 认为汶川地震可能对西秦岭北缘断裂有一定影响, 地震后西段闭锁程度有所减弱、中东段闭锁程度有所增强, 而其它断裂受汶川地震影响可能较弱, 地震前后断层闭锁程度没有发生明显改变。整体来看, 冷龙岭断裂、金强河断裂、庄浪河断裂、

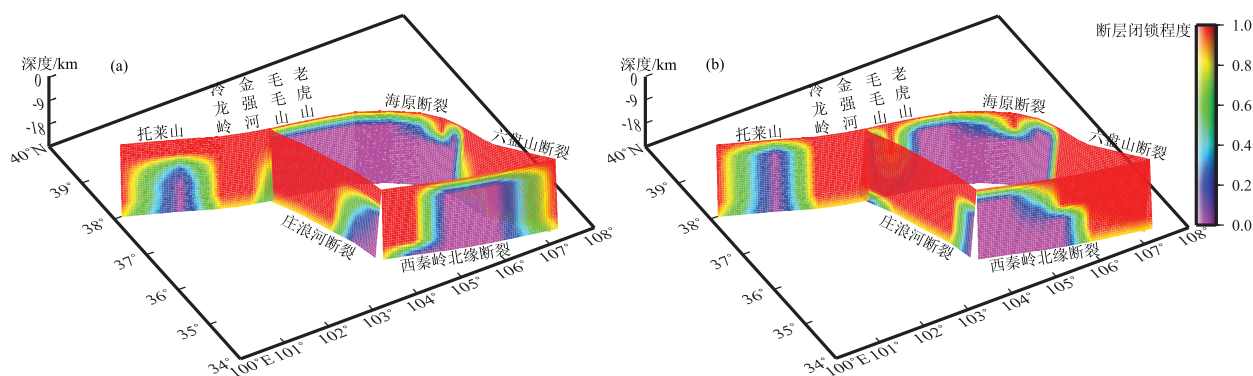


图4 1999~2007年(a)及2009~2013年(b)陇西块体周边断层闭锁程度结果
Fig. 4 Locking degree of the faults around the Longxi Block during 1999 and 2007 (a)
and during 2009 and 2013 (b)

六盘山断裂、西秦岭北缘断裂中西段部分区域的闭锁较强,闭锁深度约为20~25 km,可能为地震危险段;托莱山断裂只有地表浅部闭锁,且汶川地震后闭锁程度有所减弱;毛毛山—老虎山—海原断裂基本为持续蠕滑状态。

将计算得到的1999~2007年陇西块体周边断层闭锁程度(图4a)结合大地震破裂空区判定图(M7专项工作组,2012)综合分析可知,冷龙岭—金强河断裂强闭锁区域基本对应天祝—大靖地震空区;六盘山断裂强闭锁区域基本对应六盘山南段—西秦岭东段地震空区;西秦岭北缘断裂中西段强闭锁区域基本对应西秦岭中西段地震空区。另外,根据重新定位的地震资料得到的 b 值剖面显示六盘山断裂带中段在17~25 km的深度上存在异常低 b 值区,反映该处的深部断层面存在较高的应力积累(M7专项工作组,2012);六盘山断裂带中南段、西秦岭北缘断裂带西段GPS站速度剖面图像与汶川地震前横跨龙门山断裂带的地壳形变图像(杜方等,2009)极为相似,反映该段已经闭锁(M7专项工作组,2012);海原断裂带GPS站速度剖面图像反映海原断裂带尚处于开放状态,说明该断裂带自1920年发生8.5级特大地震破裂以来,断层面还未完全重新耦合(M7专项工作组,2012);祁连山构造带东段及其与庄浪河断裂、海原断裂的交汇区域可能具有相对高应变能积累背景(张希等,2003,2007);六盘山断裂带在汶川地震以后变形差异不大,表现出很好的继承性,因此该断层存在较强的应变积累背景(武艳强等,2012)。本文反演所得断层闭锁程度与上述地震空区、 b 值剖面、GPS站速度剖面及高应变能积累断层等结果对

应较好。

断层在震间期的闭锁是逐步由浅到深的缓慢过程,几年间应该不会有突出变化,而汶川地震可能使西秦岭北缘断裂带附近受到的构造应力加载有了变化,使得断裂带附近GPS测点运动速率发生变化,这就导致负位错反演得到的断层闭锁程度和闭锁深度发生了变化,所以断层闭锁程度和闭锁深度的变化不一定是真实情况的反映(赵静等,2015)。同时,滑动亏损速率变化的信息应该是真实的,它能够反映断层在大地震前后的一个调整运动情况。

4 汶川地震前后断层滑动亏损速率三维分布

图5所示结果表明汶川地震前后陇西块体周边平行断层滑动亏损速率中,只有庄浪河断裂为右旋滑动亏损(负值),而其它断裂均为左旋滑动亏损(正值)。其中,庄浪河断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为2.9 mm/a,在震后约为2.8 mm/a;托莱山断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为5.4 mm/a,在震后约为4.8 mm/a;冷龙岭断裂和金强河断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为5.9 mm/a,在震后约为5.2 mm/a;六盘山断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为2.6 mm/a,在震后约为3.2 mm/a;西秦岭北缘断裂中西段完全闭锁部分亏损速率在震前约为0.7 mm/a,中东段完全闭锁部分亏损速率在震后约为2.0 mm/a,相对来说,该断裂是震后闭锁程度和滑动亏损速率变化最大的一条断裂。

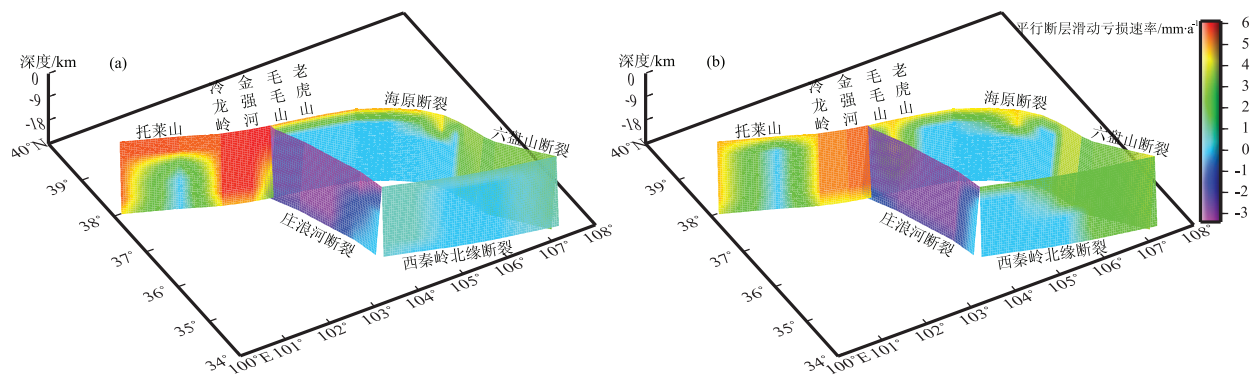


图 5 1999 ~2007 年 (a) 及 2009 ~2013 年 (b) 陇西块体周边平行断层滑动亏损速率结果
Fig. 5 Parallel fault slip deficit rate around the Longxi Block during 1999 and 2007 (a) and during 2009 and 2013 (b)

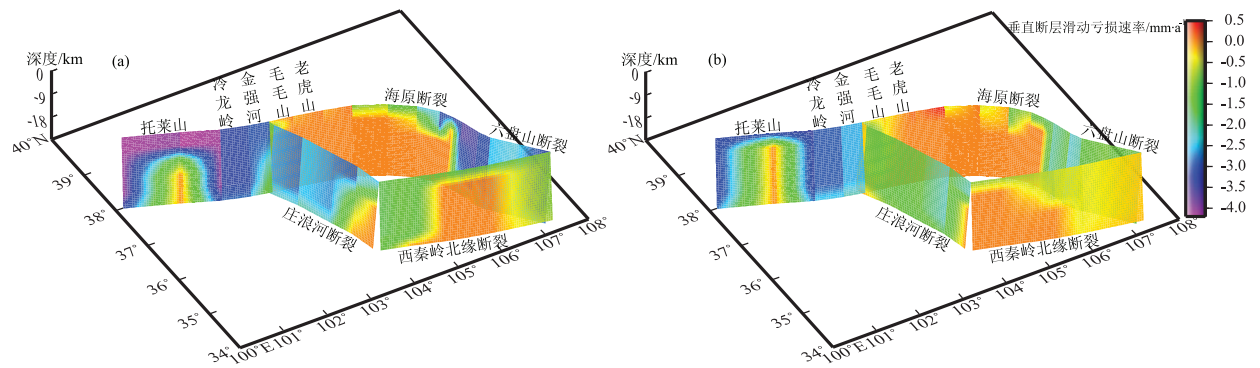


图 6 1999 ~2007 年 (a) 及 2009 ~2013 年 (b) 陇西块体周边垂直断层滑动亏损速率年结果
Fig. 6 Vertical fault slip deficit rate around the Longxi Block during 1999 and 2007 (a) and during 2009 and 2013 (b)

由图 6 可知汶川地震前后陇西块体周边垂直断层滑动亏损速率均为挤压(负值)。其中,庄浪河断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为 2.7 mm/a ,在震后约为 1.7 mm/a ;托莱山断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为 4.1 mm/a ,在震后约为 3.4 mm/a ;冷龙岭断裂和金强河断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为 3.2 mm/a ,在震后约为 2.7 mm/a ;六盘山断裂完全闭锁部分亏损速率在震前约为 2.7 mm/a ,在震后约为 1.7 mm/a ;西秦岭北缘断裂中西段完全闭锁部分亏损速率在震前约为 1.7 mm/a ,中东段完全闭锁部分亏损速率在震后约为 0.4 mm/a ,相对来说,该断裂也是震后变化最大的一条断裂。

5 结论

本文利用 1999 ~2007 年和 2009 ~2013 年两期

中国大陆 GPS 水平速度场数据,使用目前在国际上应用较为广泛的 DEFNODE 负位错反演程序研究了汶川地震前后陇西块体周边断层的闭锁程度和滑动亏损空间分布动态变化特征,并讨论了汶川地震对该区域断层的可能影响;最后结合地震空区分布、 b 值剖面、GPS 站速度剖面及高应变能积累断层等多种结果综合分析判定了陇西块体周边断层的强震危险段。

(1) 汶川地震可能对西秦岭北缘断裂有一定影响。地震后西秦岭北缘断裂中西段闭锁程度有所减弱、中东段闭锁程度有所增强,而其它断裂地震前后断层闭锁程度没有发生明显改变;汶川地震前后西秦岭北缘断裂平行和垂直断层滑动亏损速率在所有研究断层中也是变化最大的。

(2) 将 1999 ~2007 年陇西块体周边断层闭锁程度与地震空区综合分析可知,冷龙岭—金强河断裂强闭锁区域基本对应天祝—大靖地震空区;六盘

山断裂强闭锁区域基本对应六盘山南段—西秦岭东段地震空区；西秦岭北缘断裂中西段强闭锁区域基本对应西秦岭中西段地震空区，这在一定程度上说明了本文反演结果的可靠性。

(3) 汶川地震前后陇西块体周边平行断层滑动亏损速率中，除了庄浪河断裂为右旋滑动亏损（负值）以外，其它断裂均为左旋滑动亏损（正值）；陇西块体周边垂直断层滑动亏损速率均为挤压（负值）。

(4) 冷龙岭断裂、金强河断裂、庄浪河断裂、六盘山断裂、西秦岭北缘断裂中西段部分区域的闭锁较强，闭锁深度约为 20 ~ 25 km，结合地震空区分布、*b* 值剖面、GPS 站速度剖面及高应变能积累断层等结果综合分析认为上述断裂可能为地震危险段。

参考文献：

- 杜方，闻学泽，张培震等. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报, 52(11): 2729 – 2738.
- 葛伟鹏，王敏，沈正康等. 2013. 柴达木—祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究[J]. 地球物理学报, 56(9): 2994 – 3010, doi:10.6038/cjg20130913.
- 魏顺民，江在森，张崇立. 2000. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究[J]. 地震地质, 22(3): 219 – 231.
- 侯康明，石亚缪，张忻. 1999. 青藏高原北部 NNW 向构造活动方式及形成年代[J]. 地震地质, 21(2): 127 – 136.
- 金胜，张乐天，金永吉等. 2012. 青藏高原东北缘合作—大井剖面地壳电性结构研究[J]. 地球物理学报, 55(12): 3979 – 3990.
- 李强，江在森，武艳强等. 2014. 利用 GPS 资料反演海原—六盘山断裂带闭锁程度与滑动亏损分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 39(5): 575 – 580.
- 李英康，高锐，米胜信等. 2014. 青藏高原东北缘六盘山—鄂尔多斯盆地的地壳速度结构特征[J]. 地质论评, 60(5): 1147 – 1157.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中—长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 田勤俭，丁国瑜，申旭辉. 2002. 青藏高原东北隅强震构造模型[J]. 地震, 22(1): 9 – 16.
- 王永革，沈正康，盛书中等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 31(2): 128 – 139.
- 王海燕，高锐，尹安等. 2012. 深地震反射剖面揭示的海原断裂带深部几何形态与地壳形变[J]. 地球物理学报, 55(12): 3902 – 3909.
- 王永成，刘百箴. 2001. 祁连山中段断裂的地震危险性分析[J]. 西北地震学报, 23(4): 330 – 338.
- 武艳强，江在森，闫伟等. 2012. 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), 37(9): 1045 – 1048.
- 向宏发，魏顺民，张秉良等. 1998. 六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征[J]. 地震地质, 20(4): 321 – 327.
- 袁道阳，刘百箴，张培震等. 2002. 兰州庄浪河断裂带的新构造变形与地震活动[J]. 地震学报, 24(4): 441 – 444.
- 袁道阳，张培震，刘百箴等. 2004. 青藏高原东北缘第四纪活动构造的几何图形与构造转换[J]. 地质学报, 78(2): 270 – 278.
- 张希，江在森，王琪等. 2003. 1999 – 2001 年青藏块体东北缘地壳水平运动的非震反位错模型及变形分析[J]. 地震学报, 25(4): 374 – 381.
- 张希，江在森，王琪等. 2005. 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, 27(6): 620 – 629.
- 张希，江在森，王双绪等. 2007. 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, 7: 61 – 66.
- 张希，张晓亮，王双绪等. 2008. 青藏块体东北缘近期地壳水平运动与应变积累[J]. 大地测量与地球动力学, 28(4): 12 – 16.
- 赵静，江在森，武艳强等. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 55(9): 2963 – 2972, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.
- 赵静，江在森，武艳强等. 2013a. Defnode 负位错模型反演结果的可靠性和稳定性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 33(1): 21 – 24.
- 赵静，武艳强，江在森等. 2013b. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J]. 地震学报, 35(5): 681 – 691.
- 赵静，江在森，牛安福等. 2015. 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, 58(3): 872 – 885, doi:10.6038/cjg20150316.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotations and plate coupling[M]// Stein S, Freymueller J. Plate Boundary Zones, AGU Geodynamics Series.
- McCaffrey R. 2007. DEFNODE User's Manual Version [M/OL]. (2007 – 10 – 25) [2010 – 08 – 20]. http://web.pdx.edu/~mccaf/www/defnode/defnode_071025.html.
- Loveless J P, Meade B J. 2011. Partitioning of localized and diffuse deformation in the Tibetan Plateau from joint inversions of geologic and geodetic observations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 303(1 – 2): 11 – 24, doi:10.1016/j.epsl.2010.12.014.
- Savage J C, Gan W J, Svarc J L. 2001. Strain accumulation and rotation in the eastern California Shear Zone [J]. J Geophys Res, 106(B10): 21995 – 22007.
- Wang K L, Wells R, Mazzotti S, et al. 2003. A revised dislocation model of interseismic deformation of the Cascadia subduction zone[J]. J Geophys Res, 108(B1): 2026, doi:10.1029/2001JB001227.

Study on Dynamic Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit in the Faults around the Longxi Block

ZHAO Jing^{1,2}, NIU Anfu², LI Qiang³, YUAN Zhengyi²

(1. *Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China*)

(2. *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*)

(3. *Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

Abstract

By using GPS horizontal velocity field data during 1999 ~ 2007 and 2009 ~ 2013 periods and the negative dislocation model of DEFNODE, we inverted the dynamic spatial distribution of fault locking and fault slip deficit in the faults around the Longxi Block before and after the Wenchuan earthquake, such as Haiyuan-Qilian Mountain Fault, Liupan Mountain Fault, Zhuanglang River Fault, and north fringe fault of west Qinling Mountain. Then we discussed the influence of Wenchuan earthquake on the faults and analyzed the seismic potential sections combining with seismic gaps and some other research. The results show that the Wenchuan earthquake possibly has some influence on the north fringe fault of west Qinling Mountain, because its middle-western segment is locked weekly and its middle-eastern segment is locked tightly after the earthquake. The locking of the other faults are almost same before and after the Wenchuan earthquake, which means that the earthquake has little influence on these faults. At present, Lenglongling Fault, Jinqiang River Fault, Zhuanglang River Fault, Liupan Mountain Fault and middle-western segment of the north fringe fault of west Qinling Mountain are locked tightly and their locking depth is about 20 ~ 25 km. These faults are seismic potential segments considering seismic gaps along the faults in the geological scale. The parallel fault slip deficit in the faults around the Longxi Block are all sinistral strike-slip deficit except that the Zhuanglang River Fault is dextral strike-slip deficit before and after the Wenchuan earthquake, and the vertical fault slip deficit of the faults are all compression deficit.

Key words: the faults around the Longxi Block; negative dislocation inversion of DEFNODE; fault locking; slip deficit