

文章编号:1001-1595(2011)06-0703-07

## 汶川地震 GPS 形变约束的破裂分段特征及滑移

谭 凯, 乔学军, 杨少敏, 王 琪

中国地震局地震研究所 地壳运动与地球观测实验室, 湖北 武汉 430071

### Rupture Characteristic and Slip Constrained by GPS Coseismic Deformation Induced by the Wenchuan Earthquake

TAN Kai, QIAO Xunjun, YANG Shaomin, WANG Qi

Crustal Movement Laboratory, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

**Abstract:** In order to study the Wenchuan  $M_w 7.9$  earthquake rupture characteristic and slip, the dense GPS coseismic deformation is modeled by using simulated annealing algorithm based on uniform elastic half-space model. It's showed that the GPS coseismic deformation can be modeled well using at least five rupture segments from Yingxiu to Beichuan combined with one rupture segment from Guanxian to Jiangyou, and the result is better than one which is inferred from seismic wave data or InSAR data. The rupture along Yingxiu-Beichuan is 255~294 km in length. The south segment can be separated into the upper and the lower two layers, and is 30 km depth characterized by dip-slip reverse faulting. The mid-segment characterized by right lateral oblique faulting and dip-slip reverse faulting, and the north segment characterized by right lateral oblique faulting. The shortest earthquake recurrence interval is 3 000-year at Yingxiu segment. The rupture depth 14 km of upper layer is probably the locking depth along the Longmenshan fault. The Wenchuan earthquake maybe arised from block relatively moving and extrusion, slipping at depth or locking at shallow, and break out at weakness.

**Key words:** Wenchuan earthquake; GPS; coseismic deformation; Lonmenshan Fault; geometry characteristic

**摘 要:** 为了解 2008 年汶川地震破裂分段特征及滑移, 采用弹性位错模型和模拟退火算法, 数值模拟汶川震区密集的 GPS 同震形变。结果表明, GPS 同震形变场至少需要用铲状的位于映秀—北川之间的五个断裂加上灌县—江油断裂来模拟。该模型对 GPS 数据的符合程度与汶川地震滑动分布模型相当, 基本反映了汶川地震破裂特征。映秀—北川断裂总长 255~294 km。南段以逆冲为主, 分上下两层, 最深达 30 km。中段右旋走滑和逆冲都很大, 而北段以右旋走滑为主。映秀段地震周期最短为 3 000 a。破裂上层深度 14 km 可能是龙门山中央断裂的闭锁深度。汶川地震可能源于相邻块体的相对运动和挤压、深部滑脱或浅部闭锁, 在薄弱构造处首先爆发地震。

**关键词:** 汶川地震; GPS; 同震形变; 龙门山断裂; 分段特征

中图分类号: P223 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40974012; 40974011); 国家科技支撑计划(2008BAC35B04-5); 中国地震局地震研究所所长基金(IS201116013); 地震科学联合基金(606001)

## 1 引 言

龙门山推覆构造带是中国大陆南北地震构造带中段的重要组成部分, 由后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂组成, 右旋走滑兼逆冲运动性质。跨龙门山区的 GPS 观测表明其现今地壳缩短速率在 3 mm/a 以内<sup>[1]</sup>。用不同时期的 GPS 资料可以获取龙门山地区同震形变、震后形变和震间形变场, 进而研究断裂分段几何形状、同震滑动分布、震后和震间活动方式等。

2008 年 5 月 12 日, 四川汶川  $M_w 7.9$  地震发生在龙门山中央断裂和前山断裂带上, 造成巨大

的损失。地质调查结果表明前山灌县—江油破裂长 72 km 以上, 纯逆冲性质。中央映秀—北川地表破裂至少 240 km, 基本呈直线展布, 从映秀逆冲逐渐过渡到青川的走滑运动<sup>[2]</sup>。虽然地质调查可以最直观地得到地表破裂位置和位错量, 但是其采样点不连续, 特别是从岳家山到清平和高川采样点很少, 很难准确判定逆冲、走滑变换点, 对断层深部几何形状和倾角也无法了解。因而很多学者只能从造山过程推测“龙门山断裂下部倾角逐渐平缓, 与铲状断裂类似”<sup>[2-3]</sup>。

矩张量解给出汶川震源深达 14~19 km, 破裂面平均倾角 35°, 以逆冲为主沿倾向西北的断

层向上扩展。重新精密定位的余震基本分布在 5~20 km 深度的上层地壳<sup>[4]</sup>, 暗示了破裂的最大深度。基于地震波的滑动分布和破裂过程反演, 一般先根据震源机制解或地质调查结果给出的破裂位置和几何形状<sup>[5]</sup> 构建离散化的断层模型, 然后反演各小断裂的滑动分布和破裂过程。其预先给出的破裂位置、分段和形状一般表征粗略的平均特征。

中国地壳运动观测网络项目组<sup>[6]</sup> 公布了远场 122 个 GPS 同震形变数据, 基本展现了南段逆冲、中段逆冲兼走滑、北段走滑的趋势。根据 GPS 数据既可以直接研究断裂分段转折特征和滑移, 也可以细致刻画断裂滑动分布。然而目前用 GPS 数据研究汶川地震破裂的文献, 一般直接采用地质或 InSAR 资料给出的破裂位置并假设其深部几何形状<sup>[7-8]</sup>, 然后将断层离散化反演其滑动分布。文献<sup>[7]</sup> 采用其他学者用地震波反演得到的断层位置和形状, 初始模型只有一个断层, 比较粗糙。文献<sup>[8]</sup> 综合其他学者用地质和 InSAR 资料得到的研究结果将发震断裂分为灌县、北川和青川三段, 初始断层模型的精度有所提高。

近场密集的高精度 GPS 数据的约束可以明显提高地震断裂位置、形状和滑动分布参数研究的精度。断裂分段几何特征和滑动分布在同震形变研究中同样重要, 而表征断裂分段几何特征的断层模型在震后形变、震间长期构造运动研究中具有更为实际的应用<sup>[9-10]</sup>。因此, 地震破裂位置、水平分段和垂直转折特征既是深入研究地震破裂过程的基础, 也对震间应变积累释放的研究具有重要意义, 表征了一定的构造活动特征。本文以更密集的大地测量观测为基础, 用非线性反演方法研究汶川地震破裂几何特征, 了解地震深部破裂的位置、倾角及滑动量, 为汶川地震滑动分布、破裂过程、震后形变时空演化、震间构造应变积累释放、高原隆升和造山模式等研究提供参考。

## 2 GPS 数据

汶川地震发生后, 中国地震局地震研究所除了完成中国地壳运动观测网络项目组安排的监测任务, 还对国家大地测量 A 级和 B 级点进行 GPS 观测, 流动站观测时段在 36~70 h。在断层两侧还新建 20 个连续 GPS 站。所有测站都用双频 GPS 接收机采集数据, 例如 Ashtech Z12、Trimble 5700、Trimble R7、Trimble R8、Leica GX1200。用

GIPSY GPS 软件, 联合周边地区 IGS 固定站统一解算、处理, 获得汶川地震水平同震形变约 420 个(图 1)。367 个 GPS 点与地震破裂的距离在 300 km 以内。其他 53 个 GPS 点离开地震破裂的距离在 300~650 km 之间, 形变观测值一般在 10 mm 以内, 与汶川地震弹性位错形变模拟值大致相当, 说明这 53 个观测值反映了真正的同震形变信息, 可以用于约束地震破裂模型。经统计分析, 90% 的测站, 其经向形变中误差在 5 mm 以内, 纬向变形中误差在 3 mm 以内, 而垂向中误差在 10 mm 以内。为了保障数据整体质量, 本文使用 420 个点的水平形变, 并挑选了离断层较近、观测数据较多、精度较高的 190 个垂向形变参与研究, 垂直形变中误差一般在 5 mm 以内。由 GPS 同震水平形变可以初步判断, 断层以右旋走滑为主, 兼有逆冲分量。将 GPS 同震形变投影到走向上, 显示映秀段逆冲大于走滑, 都江堰—北川段逆冲走滑都较大, 而青川段走滑量大于逆冲。在断层附近形变量很大, 位于上盘的点 H035 形变达 2.42 m。

中国地壳运动观测网络项目组的成果是用 GAMIT GPS 软件解算得到, 在文献<sup>[6]</sup> 中公布了 122 点, 在文献<sup>[11]</sup> 中公布了 158 个点。本文的 420 个点包含这 158 个点, 但是用 GIPSY GPS 软件对 420 个点统一解算。GIPSY 和 GAMIT 两套软件解算结果的相同点最大形变差值在 3 cm 以内, 说明两套数据是一致的。

## 3 地震破裂几何特征反演

### 3.1 弹性位错模型和反演方法

令矩形断层几何特征参数矢量(位置、长度、宽度、深度、倾角、走向)为  $g$ , 滑动参数矢量为  $s$ , 用文献<sup>[12]</sup> 的模型可以计算断层破裂引起的地表形变  $f$

$$f = f_1(g, s) \quad (1)$$

式中,  $f_1$  表示断层几何形状参数与地表形变之间的非线性函数关系。如果断层几何形状已知, 则转变为表征滑动参数与地表形变之间的线性函数关系  $f_2$

$$f = f_2(s) \quad (2)$$

相应的, 根据形变观测值反演断层几何形状和滑动量的问题分为非线性反演和线性反演两大类。非线性反演过程中保持非线性函数关系, 采用模拟退火算法、遗传算法或者比较简单的格网

搜索方法,搜索寻找使形变模拟值与观测值最佳符合的断层几何形状和滑动量。线性反演假定断层几何形状已知,将复杂的非线性问题变为简单的线性问题,直接用线性代数求解最佳断层滑动量;其假定的断层几何形状可以是非线性反演的结果,也可以是地质、测震学研究结果。但是地质调查无法知道断层深部几何形状,远场测震结果往往不够精细,所以根据形变观测值进行非线性反演就具有重要的意义。

令模型计算形变矢量  $f_1(g, s)$  与观测形变矢量  $d$  的残差矢量为  $r$

$$r = f_1(g, s) - d \quad (3)$$

最优断层参数矢量  $(g, s)$  应该使地面点计算形变矢量与观测形变矢量的不符值最小。目标函数观测值不符值采用加权残差平方和

$$wrms = r^T \Sigma^{-1} r \quad (4)$$

式中,  $\Sigma$  是形变矢量协方差矩阵,忽略观测值之间的相关系数,则变为对角矩阵,对角元素为形变中误差的平方。

此处采用模拟退火算法<sup>[13]</sup>对目标函数进行搜索寻优。在某控制参数  $T$  (称为温度) 下,当前解为  $i$ , 对应的目标函数为  $E_i$ , 在邻域产生新解  $j$ , 对应的目标函数为  $E_j$ , 模拟退火算法接受新解  $j$  的准则称为 Metropolis 准则: 如果  $\exp\left(\frac{E_i - E_j}{T}\right) > \text{rand}$  (0, 1), 以  $j$  取代  $i$  成为当前解。其中  $\text{rand}(0, 1)$  为 0~1 间均匀分布的随机数。温度  $T$  从较大值徐徐降低, 开始时  $T$  值大, 可能接受较差的恶化解; 随着  $T$  值的减小, 只能接受较好的恶化解; 最后在  $T$  值接近于零时, 就只能接受优化解了。

模拟退火算法的最优解往往在某个关键温度附近获得<sup>[14]</sup>。可以根据文献<sup>[13]</sup>或者<sup>[14]</sup>的方法求得模拟退火的关键温度  $t_c$ , 然后让温度从  $t_c + 1$  慢慢降到  $t_c - 1$ , 这样可以较快找到全局最优解。

### 3.2 地震破裂模型构建和反演结果

灌县—江油断裂走向单一, 破裂相对短而浅<sup>[2]</sup>, 所以将其看做单一矩形断裂, 其出露位置固定, 长度可以给予很小的活动范围, 主要考虑其长度、倾角、深度和滑动量。

映秀—北川断裂比较复杂, 需要根据同震形变特征、数值模拟效果、地质调查结果、余震分布情况, 构建沿走向与倾向的分段转折都比较合理的数个断裂段, 并给出合理的先验信息和搜索上下界。

首先尝试将映秀—北川断裂当做一个断裂,

模拟退火寻优结果显示, 断层中部观测值的模拟效果较好, 表现出倾滑和右旋走滑量比较平衡的运动趋势, 而南部和北部观测点的模拟效果较差。再尝试将其用两个断裂进行模拟, 观测值拟合程度稍有提高, 但还是不能使南部和北部观测值同时模拟得很好。如果将映秀北川断裂分成三段, 则可以兼顾南部、中部、北部观测值的模拟效果。这与同震形变观测值分区特征一致, 也与地质调查特征相同, 反映了南部逆冲、中部逆冲走滑与北部走滑的变化特征。

青川破裂很少, 但还有不少地震活动, 可作为映秀—北川断裂上的第四断裂段。将 GPS 同震形变投影到倾向上, 北部形变剖面比较连续, 与单一倾角断裂的形变剖面特征一致; 而南部 (特别是映秀段) 的形变剖面中间有错动, 暗示南部破裂比较复杂。况且余震向西北延伸到汶川、理县一带。所以在映秀段, 宜用上下连接的两个断裂段来模拟。这样映秀—北川断裂由五个断裂段组成: 上部四个断裂段和下部一个断裂段。

首先在较大的范围内进行模拟退火寻优, 所得断层走向在  $224^\circ \sim 227^\circ$  间, 断层上边界迹线与地质调查很接近。

为了关注深部特征变化, 将映秀—北川断裂的出露位置、走向用地质资料进行很强的约束 (即给予很小的活动范围), 主要考虑各段长度、倾角、深度和滑动量。所有断裂段约束为右旋走滑和逆冲, 不考虑张性位错分量。断裂下边界深度不独立, 需要根据宽度和倾角计算。映秀断裂段水平位置独立, 北川、南坝、青川相邻断裂连接。非线性反演最优结果如表 1。根据最优断裂模型计算的形变模拟值与观测值的比较如图 1 所示, 最优破裂模型的空间展示如图 2 所示。

结果显示中央断裂带至少分为四段, 从南部映秀到北川、南坝、青川的倾角逐渐变大, 相邻断裂段走向有  $4^\circ \sim 10^\circ$  的变化。映秀—北川断裂最优模型长 267 km。映秀断裂上层和下层总宽度约 66 km, 以逆冲为主, 兼有少量走滑。北川、南坝断裂逆冲和走滑大致相当, 青川断裂段走滑为主。灌县江油断裂逆冲为主。

根据标量地震矩公式

$$M_0 = \mu A D \quad (5)$$

式中,  $\mu$  为岩石剪切模量;  $A$  为断裂面积;  $D$  为断裂滑动量。一般岩石剪切模量  $\mu = 3.0 \times 10^{10}$  Pa, 则最优模型计算的地震矩  $M_0 = 8.3499 \times 10^{20}$  Nm。

按照文献[15]矩震级的定义

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7 \quad (6)$$

则大地测量观测估算的汶川特大地震矩震级

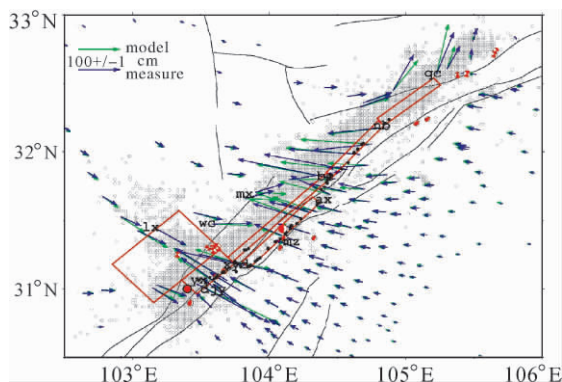
$$M_w = 7.92。$$

表 1 断裂段参数的搜索上下界、最优模型和置信区间

Tab. 1 Searching ranges, best models and confidence intervals of rupture segment parameters

断裂	长/km	宽/km	深/km	倾角/(°)	走向/(°)	X 坐标/km	Y 坐标/km	走滑/cm	倾滑/cm	备注
映秀上层	30.000	5.000	N	30.000	220.000	0.000	19.000	-100.0	300.0	下界
	36.109	20.836	14.147	42.763	227.116	9.355	19.407	-271.1	634.6	最优区间
	(-3,+3)	(-4,+5)		(-6,+9)	(-3,+0.9)			(-11,+89)	(-87,+54)	
映秀下层	40.000	50.000	N	80.000	228.000	30.000	50.000	-300.0	700.0	上界
	40.000	0.00	N	9.000	N	N	N	-120.0	200.0	下界
	63.615	45.23	29.577	19.947	227.116	-29.094	41.721	-95.3	260.4	最优区间
	(-3,+4)	(-8,+4)		(-10,12)				(-12,+21)	(-54,+21)	
北川	100.000	50.00	N	45.000	N	N	N	-50.0	300.0	上界
	90.0	5.000	N	50.596	223.439	N	N	-600.0	100.0	下界
	97.505	8.244	6.620	53.423	224.947	62.674	60.116	-482.7	583.2	最优区间
	(-5,+9)	(-2,+10)	(-1,+1)	(-3,+4)	(-1,+1.5)			(-81,+95)	(-91,+30)	
南坝	150.0	50.000	N	57.596	226.439	N	N	-100.0	650.0	上界
	50.0	8.0	N	40.0	220.0	N	N	-600.0	100.0	下界
	54.962	9.799	8.131	56.075	220.01	114.072	115.715	-428.1	438.7	最优区间
	(-3,+8)	(-1,+5)	(-1,+1)	(-5,+7)	(-0.01,+2)			(-32,+41)	(-61,+18)	
青川	70.0	16.0	N	88.0	228.0	N	N	-100.0	650.0	上界
	50.0	5.0	N	50.0	218.0	N	N	-550.0	0.0	下界
	50.954	20.221	18.649	67.257	229.152	150.362	155.508	-423.3	191.9	最优区间
	(-0.9,+6)	(-4,+0.9)		(-8,9)	(-3,+0.9)			(-33,42)	(-31,+11)	
彭灌	85.0	21.0	N	88.0	230.0	N	N	-100.0	500.0	上界
	71.0	8.139	N	33.000	222.6	60.000	40.000	-1.0	80.0	下界
	71.725	8.456	4.605	33.000	222.6	62.716	48.491	-0.2	80.4	最优区间
	(-0.7,+3)	(-0.3,+5)						(-0.4,+30)		
	75.0	30.139	N	33.000	222.6	70.000	50.000	0.0	150.0	上界

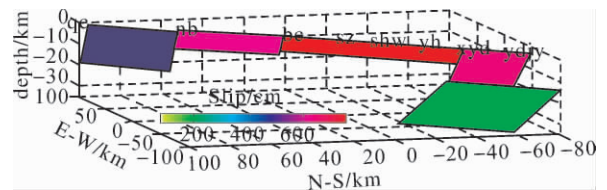
注:下界指搜索下边界,上界指搜索上边界,最优指最优值,区间指置信区间。N 指该参数不独立,没有给出其搜索范围进行搜索,而是根据其他参数直接计算。断层 X、Y 坐标定位于断层下边界中点。坐标原点的地理坐标是 103.4°E,31°N



蓝箭头:GPS形变观测值;绿箭头:GPS形变模拟值;红四边形:发震断层在水平面投影;黑点:破裂地质调查点;震源机制圈:半个月主要地震;灰圆圈:3个半月内余震;yx:映秀;dji:都江堰;xyd:小鱼洞;mx:绵竹;ax:安县;bc:北川;nb:南坝;qc:青川;lx:理县;wc:汶川;mx:茂县。发震断层上边界基本与地质破裂点一致。映秀段裂向西北的理县延伸凸出,与3个半月内的余震分布特征一致

图 1 最优模型破裂水平分段转折特征、GPS 形变观测值和模拟值

Fig. 1 Best fitting fault horizontal geometry characteristic and GPS data postfit residuals



yx:映秀;dji:都江堰;xyd:小鱼洞;yh:荃华;hw:汉旺;js:雎水;sz:桑枣;bc:北川;nb:南坝;qc:青川

图 2 最优破裂模型几何形状及滑移

Fig. 2 Best fitting fault geometry and slip

### 3.3 数据误差检验与置信区间确定

一般观测数据存在误差,为了检验数据误差对反演结果的影响,令某个观测值的中误差为  $m_i$ ,将所有观测数据加上  $(-2m_i, +2m_i)$  之间的一个随机数,作为观测值噪声干扰,重复 40 个模拟退火过程。然后将各参数结果按大小排列,去掉最小的 2.5% 和最大的 2.5%,得到每个参数的 95% 置信区间。另外,还采用文

献[13]的方法<sup>[13]</sup>估算置信区间,所得结果落在上节得到的置信区间内,说明不同方法得到的置信区间基本一致。中央断裂总长 255~294 km。由于对各断裂段的走向和位置作了较强的约束,所以各断裂段走向、长度、位置变化不大,虽然各断裂滑动量变动较大,但是基本符合南部逆冲、中部逆冲兼走滑与北部走滑的分布特征。

#### 4 讨 论

地震破裂模型包含破裂几何形状参数(长度、宽度、深度、倾角、走向、水平位置)和滑动参数(走滑、倾滑和张性滑动量),不同数据和方法给出的模型各有特点。文献[5]用远场地震波数据反演得到比较简单的单一矩形断层模型,破裂位置与地质资料差别较大。文献[16]根据地质考察资料确定破裂地表位置,其破裂位置、深度和倾角的选择具有较大的不确定性。因而这两个模型几何形状的不确定性将会对滑动分布产生较大的影响。文献[11]用 InSAR 数据确定地表破裂位置,并用到远场 158 个 GPS 数据,假设映秀段破裂结构分上部逆冲断层和下部滑脱层,假设上部逆冲断层宽度为 28 km,下部滑脱层倾角为 0°,用牛顿法解算六个倾角代表的破裂几何特征值,在理论上较为严密。本文用地质资料对破裂位置进行较强的约束,以密集的高精度 GPS 数据反演破裂几何形状参数,为进一步的滑动分布反演提供合理的破裂几何形状特征值。其结果与地质资料和 GPS 显示的形变特征一致。

本文数据原集(420 点)包含一个数据子集(158 点),对应于文献[11]的数据集(158 点)。以不符值中误差 RMS 衡量破裂模型对数据的拟合程度,令不符值中误差

$$RMS = \sqrt{\frac{r^T r}{n}} \quad (7)$$

式中, $r$  为形变模拟值与形变观测值之差; $n$  为数据量。

根据其他模型提供的参数,计算 GPS 点形变模拟值,与观测值比较得到残差  $r$ 。这些模型对两套数据的拟合程度如表 2。本文断裂模型侧重于描述断层倾角、深度等几何形状参数,其他模型主要刻画滑动分布,因而不符值的大小并不说明两种模型的优劣,而只为了说明本文模型对 GPS 数据的符合程度与其他划分较小的断裂滑动分布模型相当。因此,本文模型基本反映了汶川地震

破裂特征,可以作为同震破裂滑动分布、震后和震间断层活动研究的依据。

表 2 不同破裂模型对两套数据集的拟合残差中误差  
Tab. 2 Two set data postfit RMS of different rupture models

	文献[5] 模型	文献[16] 等模型	文献[11] 模型	本文 模型
断裂数/个	155	134	673	6
数据子集(158 点)RMS/cm	15.8	6.7	5.8	5.2
数据原集(420 点)RMS/cm	20.1	9.9	9.3	8.8

映秀段与北部各段性质差距较大,主要是深度和宽度都较大,深达 25~32 km 左右,分上下两层。尽管映秀段上下两层的搜索边界有重合区域,但是最佳结果的上层倾角较大,下层倾角较小,推测下层可能趋向水平。这与许多学者推断的龙门山推覆滑脱构造模型接近。也许上层代表完全闭锁的上地壳层,其闭锁深度为 14 km 左右,是应变积累大而首先爆发地震的地方。

因此推测,龙门山中央断裂以及平行的后山茂汶断裂、前山彭灌断裂可能向下归于统一的低角度滑脱层,形成一个由多条倾向北西叠瓦状逆断层组成的推覆构造,由于青藏高原物质东向挤出,川西北块体向龙门山断裂挤压。中央断裂是高原与华南块体的分界,在其上部形成闭锁积累应变。映秀断裂段处于整条断裂的前锋,小倾角特点使其更易于破裂。龙门山中央断裂段各段的倾角和走向逐渐变化特点,使得转接处的映秀和北川应力较大,也很容易诱发破裂。通过龙门山周期性的破裂,调节巴颜喀拉与华南两地块间缩短变形。

假设岩石剪切模量  $\mu = 3.0 \times 10^{10}$  Pa,根据映秀、北川、南坝、青川、彭灌各段的面积和平均同震滑动量,用公式(6)可以得到汶川地震中各段破裂的震级。假设从上一次地震到这一次地震的地震周期里,断裂以固定的长期滑动速率滑动并积累形变,然后在本次地震中释放掉所有积累的滑动变形,则各段地震复发周期  $T$  等于各段破裂的平均同震滑动量  $S$  除以其长期滑动速率  $V$ 。

$$T = \frac{S}{V} \quad (8)$$

式中, $T$  是地震复发周期; $S$  是同震滑动量,根据本文同震形变场反演得到; $V$  是震间断层长期滑动速率,可以用震间 GPS 地壳运动速度求得,或者用地质调查资料获得。本文主要研究汶川同震

形变及同震破裂滑动特征(例如同震滑动量  $S$ ),所以对震间地壳运动速率  $V$  就直接引用其他学者的研究成果。映秀和北川拥有震间 GPS 和地质资

料,南坝和青川只有震间 GPS 估算的长期滑动资料(表 3)。由表 3 可知,映秀和北川地震周期最短,但也在 3 000 年以上,南坝地震周期最长。

表 3 最优模型断裂段长期构造滑动与地震复发周期

Tab. 3 Secular slip rates and earthquake recurrence intervals of best fitting fault segments

断裂	走向 /(°)	倾角 /(°)	面积 /km <sup>2</sup>	地震滑动 /cm	$M_0$ /Nm	$M_w$	长期构造滑动量 (GPS,地质)/mm	地震复发周期 (GPS,地质)/1 000 年
映秀上层	227.116	42.763	752.369	690.1	1.558e20	7.4	2.2/1.2	3.1/5.7
映秀下层	227.116	19.947	2 877.260	277.3	2.394e20	7.6		
北川	224.947	53.423	803.783	757.0	1.826e20	7.5	2.2/1.2	3.4/6.3
南坝	220.01	56.075	538.579	613.0	0.990e20	7.3	0.8	7.6
青川	229.152	67.257	1 030.353	464.8	1.437e20	7.4	0.8	5.8
彭灌	222.6	33.000	606.445	80.4	0.146e20	6.7	0.2	4.0

断层长期构造滑动量据文献[11];其他数据为本文研究结果

## 5 结 论

本文以 GPS 同震形变为约束,采用弹性位错模型和模拟退火算法,对 2008 年汶川地震的发震断层几何形状进行反演。结果表明,GPS 同震形变场不能很好地用单一断裂位错模型来模拟,而至少需要用铲状的映秀—北川 5 个断裂加上灌县—江油断裂来模拟,该模型对 GPS 数据的符合程度与其他断裂滑动分布模型相当,基本反映了汶川地震破裂特征。从映秀到青川破裂分为四段,总长 255~294 km。南部映秀破裂段以逆冲为主,分上下两层断裂,下层倾角趋向平缓,最长达 30 km。映秀到北川的中部断裂段右旋走滑和逆冲都很大,而北川到青川断裂以右旋走滑为主。断裂南段、中段、北段的倾角逐渐变大,相邻断裂段走向有 4°~10°的变化。青藏高原物质东向挤出,川西北块体向龙门山断裂挤压,引起周期性的地震。映秀和北川地震周期最短,但也在 3 000 年以上。映秀断裂段处于整条断裂的前锋,小倾角特点使其更易于破裂。龙门山中央断裂的闭锁深度 14 km。可以认为板内构造地震的动力直接来源于相邻块体的相对运动和挤压,岩石圈深部蠕滑或者局部闭锁,在浅部闭锁区的薄弱结构处首先爆发地震。

## 参考文献:

- [1] WANG Q, ZHANG P, FREYMUELLER J, et al. Present-day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. *Science*, 2001, 294: 574-577.
- [2] XU Xiwei, WEN Xueze, YE Jianqing, et al. The  $M_s$  8.0

Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 597-629. (徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 597-629.)

- [3] ZHANG Peizhen, XU Xiwei, WEN Xueze, et al. Slip Rate 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): 1066-1073. (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): 1066-1073.)
- [4] ZHANG Ruiqing, WU Qingju, LI Yonghua, et al. Focal Depths for Moderate-sized Aftershocks of the Wenchuan  $M_s$  8.0 Earthquake and Their Implications[J]. *Science in China: Series D*, 2008, 51(12): 1694-1702. (张瑞青, 吴庆举, 李永华, 等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1234-1241.)
- [5] ZHANG Yong, FENG Wanpeng, XU Lisheng, et al. Spatiotemporal Rupture Process of the 2008 Great Wenchuan Earthquake[J]. *Science in China: Series D*, 2009, 52(2): 145-154. (张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1186-1194.)
- [6] Working Group of the Crustal Motion Observation Network of China Project. Coseismic Displacement Field of the 2008  $M_s$  8.0 Wenchuan Earthquake Determined by GPS[J]. *Science in China: Series D*, 2008, 38: 1195-1206. (国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川  $M_s$  8.0 级地震的同震位移场[J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1195-1206.)
- [7] LI Zhicai, ZHANG Peng, JIN Shuangen, et al. Wenchuan Earthquake Deformation Fault Inversion and Analysis Based on GPS Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(2): 108-113. (李志才, 张鹏, 金

- 双根,等. 基于 GPS 观测数据的汶川地震断层形变反演分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 108-113.)
- [8] XU Caijun, LIU Yang, WEN Yangmao.  $M_w 7.9$  Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(3): 195-201. (许才军, 刘洋, 温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川  $M_w 7.9$  级地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 195-201.)
- [9] TAN Kai, LI Jie, WANG Qi. Lithospheric Rheological Structure Constrained by Geodetic Data in Altay [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50, (6): 1713-1718. (谭凯, 李杰, 王琪. 大地测量约束下的阿尔泰山岩石圈流变结构 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (6): 1713-1718.)
- [10] TAN Kai, WANG Qi, WANG Xiaoqiang, et al. Analytic Models and Space-time Distribution of Postseismic Deformation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(4): 23-26. (谭凯, 王琪, 王晓强, 等. 震后形变的解析模型和时空分布特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 23-26.)
- [11] SHEN Zhengkang, SUN Jianbao, Zhang Peizhen, et al. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers during the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Nature Geoscience, 2009, 2: 718-728.
- [12] OKADA Y. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75: 1135-1154.
- [13] CERVELLI P. Using Geodetic Data to Infer the Kinematic and Mechanical Properties of Deformation Source on Kilauea Volcano, Hawaii[D]. Stanford: Stanford University, 2002.
- [14] BASU A, FRAZER L N. Rapid Determination of the Critical Temperature in Simulated Annealing Inversion[J]. Science, 1990, 249: 1409-1412.
- [15] HANKS T C, KANAMORI H. A Moment Magnitude Scale[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84 (B5): 2348-2350.
- [16] WANG Weimin, ZHAO Lianfeng, LI Juan, et al. Rupture Process of the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of Sichuan, China[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(5): 1403-1410. (王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-04-20

修回日期: 2011-09-05

第一作者简介: 谭凯(1972—),男,博士,副研究员,研究方向为大地测量与地球动力学。

First author: TAN Kai(1972—), male, PhD, associate professor, majors in geodesy and geodynamics.

E-mail: whgpstan@hotmail.com

## (上接第 702 页)

Institute of Astronomy and Physical Geodesy, Technical University of Munich, 2000.

- [12] PAIL R, PLANK G. Assessment of Three Numerical Solution Strategies for Gravity Field Recovery from GOCE Satellite Gravity Gradiometry Implemented on a Parallel Platform [J]. Journal of Geodesy, 2002, 76 (8): 462-474.
- [13] PAIL R, PLANK G. GOCE Gravity Field Processing Strategy [J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 2004, 48 (2): 289-309.
- [14] RUMMEL R, GRUBER T, KOOP R. High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy[C]// Proceedings of the Second International GOCE User Workshop, "GOCE, The Geoid and Oceanography". Frascati: ESA-ESRIN, 2004.
- [15] XU Xinyu, LI Jiancheng, WANG Zhengtao, et al. The Simulation Research on the Tikhonov Regularization Applied in Gravity Field Determination of GOCE Satellite Mission[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 465-470. (徐新禹, 李建成, 王正涛, 等. Tikhonov 正则化方法在 GOCE 重力场求解中的模拟研究 [J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 465-470.)
- [16] XU Xinyu, WANG Zhengtao, ZOU Xiancai, et al. The Research on Analysis and Simulation of Satellite Gravity Gradiometry Error of GOCE [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 71-75. (徐新禹, 王正涛, 邹贤才, 等. GOCE 卫星重力梯度测量误差分析及其模拟研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30 (2): 71-75.)
- [17] XU Xinyu, LI Jiancheng, JIANG Weiping, et al. The Fast Analysis of GOCE Gravity Field [C]// International Association of Geodesy Symposia: Observing Our Changing Earth. Berlin: Springer, 2009, 133: 379-385.

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-12-06

修回日期: 2011-02-23

第一作者简介: 徐新禹(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为卫星大地测量。

First author: XU Xinyu (1978—), male, PhD, lecturer, majors in satellite geodesy.

E-mail: xyxu@sigg.whu.edu.cn