

汶川地震地形形变监测与分析

白贵霞¹, 程传录², 郭春喜², 王小瑞², 马新莹²

(1. 陕西省测绘局, 陕西 西安 710054; 2. 国家测绘局 大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 地形形变监测与分析对于研究汶川地震对震区及青藏板块地形变化的影响有重要意义。通过收集相关监测点的汶川地震前后地形形变数据, 采用统一模式进行数据处理, 将震前与震后的形变监测成果归算到 ITRF2005 参考框架和 2008.363(2008 年 5 月 12 日) 历元, 计算得到震中区域的大地基准造成严重破坏, 监测点形变位错, 水平位移量达 243 cm, 沉降量达 68 cm, 隆起量达 36 cm。并对汶川地震地形形变监测进行分析, 认为位于“映秀镇—北川—青川”断裂带西侧块体呈现向东南方向移动并呈现隆起趋势; 东侧块体向西北方向移动并呈现下沉趋势; 北侧块体向东北方向移动, 南侧块体向西南方向移动, 块体两侧形成了明显挤压形态。上述研究为进一步揭示汶川地震产生的机理和龙门山断裂带的活动提供了良好基础。

关键词: 龙门山断裂带; 汶川地震; 形变监测; 参考框架

中图分类号: P227 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)02-0205-06

Analysis and Monitoring of Crustal Deformation in Wenchuan Earthquake

BAI Gui-xia¹, CHENG Chuan-lu², GUO Chun-xi², WANG Xiao-rui², MA Xin-ying²

(1. Shaanxi Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geodetic Data Processing Center, State Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Analysis and monitoring of crustal deformation are of significance to study the influence of Wenchuan Earthquake to the topographical change of seismic region and Qinghai-Tibet Plate. Observation data of crustal deformation before and after Wenchuan Earthquake in related monitoring stations were collected. Based on uniform model, the data of monitoring of crustal deformation before and after Wenchuan Earthquake were calculated to ITRF2005 reference frame and 2008.363 epochs (May 12, 2008). The result showed that the geodetic datum of epicenter area was damaged seriously; the deformation of monitoring stations had been deformed and dislocated with horizontal displacement of 243 cm, settlement of 68 cm and uplift amount of 36 cm. In addition, deformation monitoring of Wenchuan Earthquake was discussed. The result showed that the west block of “Yingxiuzhen-Beichuan-Qingchuan” fault zone had moved to the southeast and had taken on an uplift trend; the east block had moved to the northwest and had taken on a downward trend; the north block had moved to the northeast, the south block had moved to the southwest, both sides of blocks formed a clear extruded shape. The results laid a solid foundation for revealing the mechanism of Wenchuan Earthquake and the movement of Longmen Mountain fault zone.

Key words: Longmen Mountain fault zone; Wenchuan Earthquake; crustal deformation monitoring; reference frame

0 引言

龙门山断裂带^[1-3]位于扬子地块西北边缘, 沿

着四川盆地西北缘底部切过, 整个断裂带绵延长约 500 km, 宽达 70 km, 西南起自四川泸定附近, 沿着北东方向延伸经汶川、都江堰、北川、阳平关、勉县

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室项目(200839)

作者简介: 白贵霞(1964-), 男, 河北正定人, 高级工程师, 从事大地测量理论与应用研究。E-mail: baigx@sohu.com

进入秦岭,呈现 45°角北东走向的深大断裂带,长期构成中国东西两部分的重要地质分界线,重力上也显示一个极为清楚的梯级带。龙门山断裂带是地震多发地带,1657 年 4 月 21 日,爆发了有记录以来最大的 6.2 级地震。此后 300 多年间,这条断裂带再未发生超过 6 级的强震,一直是科学家们最为关注的地带。2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,断裂带中部汶川县发生了 8.0 级大地震,波及中国大部分地区,造成大量的人员伤亡和财产损失^[4-6],引起了大范围的地表变形。

1 监测网及布测情况

监测网由华东华中区域大地水准面精化陕西省 GPS 控制网、川滇大地水准面精化四川省 GPS 控制网、甘肃省 GPS 控制网及中国地壳运动观测网络构成(图 1、2)。

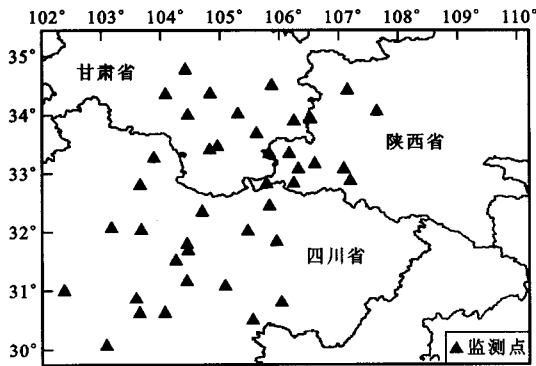


图 1 监测点位分布
Fig. 1 Distribution of Monitoring Points

1.1 震前资料情况

为了分析研究汶川地震地形形变情况,收集了震前陕西汉中、甘肃陇南和龙门山断裂带周边的大地控制点观测资料(图 3)。

(1)陕西汉中:陕西省测绘局于 2005~2006 年实施了陕西省 GPS 的 B、C 级网项目,其中,陕西汉中 GPS 控制网于 2006 年 5、6 月观测,GPS 的 B 级网和 C 级网采用同步环模式观测,B 级网观测 3 个时段,每时段 23.5 h,C 级网观测时间长度为 8~24 h。收集到陕西汉中 11 个 GPS 控制点的观测数据和结果资料。

(2)甘肃陇南:甘肃省测绘局于 2005 年实施了甘肃省 GPS 的 C 级网及大地水准面精化项目,收集了甘肃陇南地区 9 个 C 级网点的成果,观测时间为 2005 年 12 月。

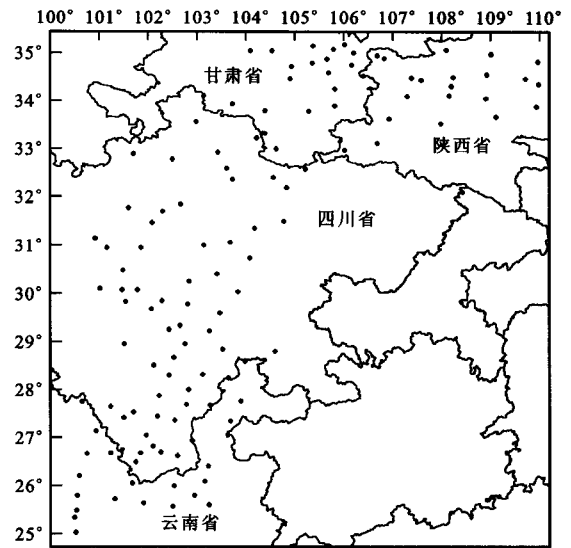


图 2 中国地壳运动观测网络区域网点分布
Fig. 2 Regional Distribution Outlets of Crustal Movement Observation Network in China

项目	汶川地震前											汶川地震后					
	2005		2006		2007				2008			2008					
	11	12	5	6	3	4	5	6	7	3	4	5	5	6			
甘肃省地震局																	
陕西省地震局																	
四川省地震局																	
中国地震局																	

图 3 汶川地震前后监测点观测统计
Fig. 3 Observation Statistics of Monitoring Stations Before and After Wenchuan Earthquake

(3)龙门山断裂带:四川省测绘局于 2008 年开展了川滇大地水准面精化项目,在 5 月 12 日之前已在震区附近获得了大量观测数据。四川省 GPS 的 B、C 级网采用同步环模式观测,其中 B 级网观测 23.5 h,C 级网观测 12 h。收集了龙门山断裂带周边四川省 B 级网 16 个点、C 级网 5 个点及 2 个区域 GNSS 连续运行站的震前观测资料。

(4)中国地壳运动观测网络工程:中国地震局、国家测绘局及中国人民解放军总参谋部测绘局实施了中国地壳运动观测网络工程,其中 2007 年 3~7 月在龙门山断裂带、陕西南部及甘肃南部进行了区域网观测,观测时间长度为 3 d×24 h,此次收集到 145 个点的观测数据。

1.2 震后资料情况

根据已收集到的震前观测资料情况,国家测绘局组织有关部门对陕西南部、甘肃南部及龙门山断裂带周边等重点区域的大地控制点进行了野外测

量。在龙门山断裂带周边地区选取了四川省 GPS 控制网 21 个点,陕西南部选取了陕西省 GPS 控制网 11 个点,甘肃南部选取了甘肃省 GPS 控制网 9 个点,使用 GPS 双频接收机与扼流圈天线进行了同步观测,观测时间长度为 $2\text{ d}\times 24\text{ h}$,获得了 41 个大地控制点的震后观测数据。与此同时,中国地震局在龙门山断裂带及周边地区进行了区域网观测,观测时间长度为 $3\text{ d}\times 24\text{ h}$,此次收集到 145 个点的震后观测数据(图 3)。

2 数据处理方案与框架点

2.1 数据处理方案

利用震前和震后两期观测数据,采用同一参考框架与历元和统一的数据处理模式,计算两期成果之差,得到大地控制点的位错,以此研究大地控制点的形变问题^[7-8]。

数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件,利用国际 GPS 服务跟踪(IGS)精密星历,估计卫星钟差、接收机钟差、电离层与对流层延迟、卫星和接收机天线相位中心等各种改正,以中国及周边地区 IGS 站为框架点,估计其坐标和速度场,选择 ITRF2005 参考框架^[9-14]和 2008.363(2008 年 5 月 12 日)参考历元进行数据处理。

主要参数设置:

卫星轨道:IGS 精密星历,且固定;卫星截至高度角: 15° ;数据采样间隔:15 s;对流层改正模型:采用 Saastamoinen 模型进行标准气象改正;观测值:采用消除电离层后的组合观测值;坐标约束:GPS 连续运行站给予 2~3 个中间误差的约束;数据解算模式:周跳自动修复技术。

2.2 选择框架点

汶川周边大地控制点形变监测数据分析的关键是选择稳定的基准点。为此分析了汶川周边地区的全球 IGS 站数据,最后选取巴林(BAHR)、中亚(KIT3)、关岛(GUAM)、新加坡(NTUS)、日本(USUD)、俄罗斯(IRKT)、上海(SHAO)及乌鲁木齐(URUM)8 个稳定的 IGS 站为基准站,分析中国 GPS 基准站的稳定性。

首先利用中国 GPS 基准站的基线解文件,合并了每周 7 d 的协方差阵文件,在合并文件的基础上进行多年成果的联合处理和平均,得到了周解坐标时间序列。通过时间序列可看出各基准站点位运动特征信息,同时为进一步细化点位在水平方向的运动变化,将坐标时间序列在北、东方向上进行分解,称之为坐标分量时间序列,图 4 为 1999~2008 年泸州和咸阳 GPS 基准站各方向位移量随时

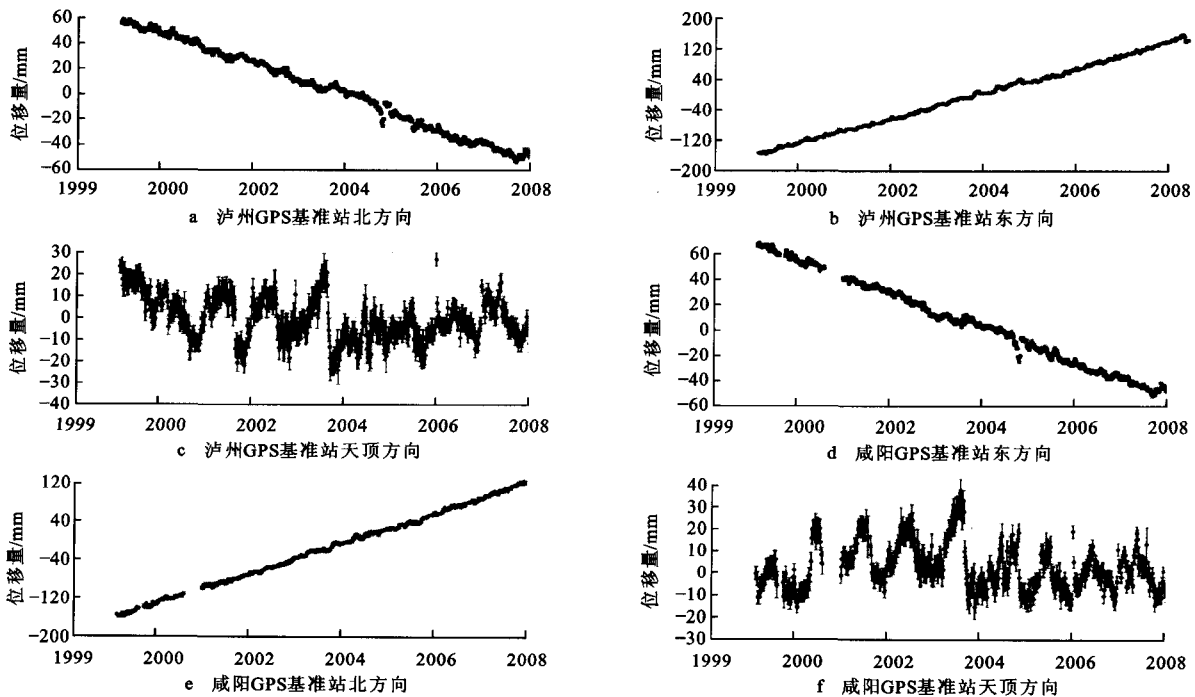


图 4 泸州和咸阳 GPS 基准站北、东、天顶方向位移量随时间变化

Fig. 4 Time-variation of Displacement in North, East and Zenith Directions for Luzhou and Xianyang GPS Reference Stations

间变化分布状况。

汶川地震中,离震中最近的泸州和咸阳 GPS 基准站的坐标分量变化,其中泸州站在震后的 4 周内坐标北分量与震前有 11 mm 左右的变化,坐标东分量与震前也有 6 mm 左右的变化。咸阳 GPS 基准站坐标北分量的变化幅度也达到了 4.5 mm。表 1 给出了中国部分 GPS 基准站震后位移量。从总体上看中国 GPS 基准站的连续运行保持了良好的稳定性,虽有地震引起的跳变,但是在量级上对于坐标框架整体上影响不大。

表 1 中国部分 GPS 基准站地震后位移量

Tab. 1 Displacement of Part GPS Reference Stations After the Earthquake in China

至震中 距离/km	位移量/mm		站名
	北方向	东方向	
310	11.5	-5.6	泸州
650	4.5	-1.0	咸阳、下关、昆明
1 000	2.4	-2.5	武汉
1 200	4.0	-4.4	拉萨
1 300	2.6	-4.5	广州
1 500	1.3	-1.5	北京
2 400	1.0	-0.4	长春

经分析,汶川周边地区西宁、盐池、西安、郑州、武汉及昆明等 6 个比较稳定的 GPS 基准站作为汶川地震地形形变监测的框架点。

2.3 确定框架点坐标

基于全球 IGS 站和国内 GPS 基准站的基线解文件(不含 5 月 12 日数据),在巴林、中亚、关岛、新加坡、日本、俄罗斯、上海及乌鲁木齐等 8 个全球 IGS 站的控制下,求得西宁、盐池、西安、郑州、武汉及昆明等 6 个 GPS 基准站的 ITRF2005 参考框架、2008.363 历元的坐标,以此作为框架点的起算坐标。

3 结果分析

3.1 精度统计

由表 2、3 可知,水平分量精度平均值优于 ±2.0 mm,垂直分量精度平均值优于 ±7 mm,但个别点精度较差,分别是甘肃地区的 DS30 点和陕西岐山境内的 D073 点,主要原因是周边植被遮挡较多,造成观测条件较差。

3.2 结果统计

利用震后与震前处理结果之差得到形变监测点的位移量(图 5)。从统计结果可知:

表 2 框架点坐标精度统计

Tab. 2 Coordinate Frame Precision Statistics

统计项	北方向误差	东方向误差	天顶方向误差
最小值/mm	0.8	0.9	3.2
最大值/mm	1.3	1.3	7.9
平均值/mm	1.0	1.1	4.0

表 3 形变监测点在汶川地震前后精度统计

Tab. 3 Precision Statistics of Deformation Before and After the Wenchuan Earthquake in Monitoring Stations

项目	汶川地震前			汶川地震后		
	北方向 误差	东方向 误差	天顶方向 误差	北方向 误差	东方向 误差	天顶方向 误差
最小值/mm	0.5	0.6	2.2	0.2	0.3	1.0
最大值/mm	1.9	2.7	14.5	6.7	23.3	45.3
平均值/mm	0.8	0.9	3.9	1.2	1.5	6.6

(1)南北方向位移量最大值为 101.0 cm,最小值为 -37.9 cm;东西方向位移量最大值为 68.4 cm,最小值为 -237.9 cm;天顶方向沉降量最大值为 32.4 cm,最小值为 -67.5 cm。位移量最大的点是 H035(北川),达 242.5 cm,沉降量最大的点也是 H035(北川),达 67.5 cm。

(2)位移量大于 100 cm 的是 G122(小金山)、H044(绵竹)、H010(青川)、G126(甘家包)、H049(都江堰)、H033(南坝)及 H035(北川)点,主要分布在北川、安县、绵竹、平武、江都和青川地区;沉降量大于 10 cm 的是 H035(北川)、H033(南坝)、G126(甘家包)、G122(小金山)、G246(香积寺)、H050(卧龙)及 H049(都江堰)点,主要分布在北

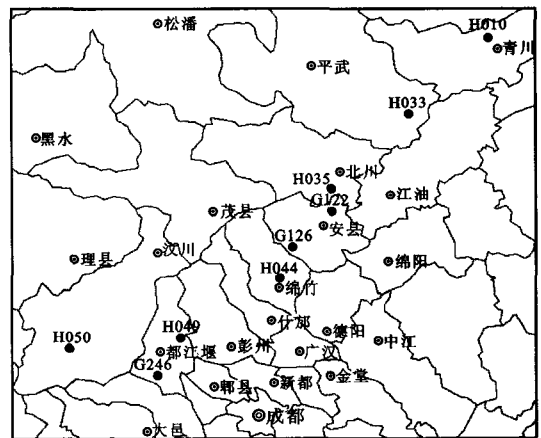


图 5 位移量和沉降量较大的监测点分布

Fig. 5 Distribution of Monitoring Stations in which the Displacement and Settlement were Large

川、安县、绵竹、平武和都江堰地区。

3.3 形变分析

3.3.1 水平位移分析

从监测点位移(图6)可知:①位移量较大监测点主要分布在以“映秀镇—北川—青川”为轴心、呈现45°夹角的长带上;②以“映秀镇—北川—青川”为界线,西侧块体上的监测点向东南方向运动,而东侧块体上的监测点向西北方向运动。

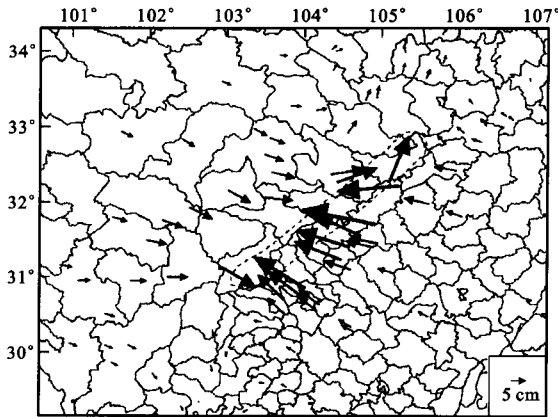


图6 监测点位移矢量

Fig. 6 Displacement Vector of Monitoring Stations

利用监测点的位移矢量数据,采用克里金(Kriging)模型内插生成汶川地震块体运动矢量图(图7)。从图7可知,“映秀镇—北川—青川”断裂带西侧块体上的物质向东南方向运动,东侧块体上的物质向西北方向运动,块体两侧形成了明显挤压形态,且东侧位移的量级更大,导致断裂带北端青川周边的物质向东北方向运动,而断裂带南端的物质则向南西方向运动。分析其原因是印度板块向亚洲板块俯冲,造成青藏高原快速隆升,高原物质

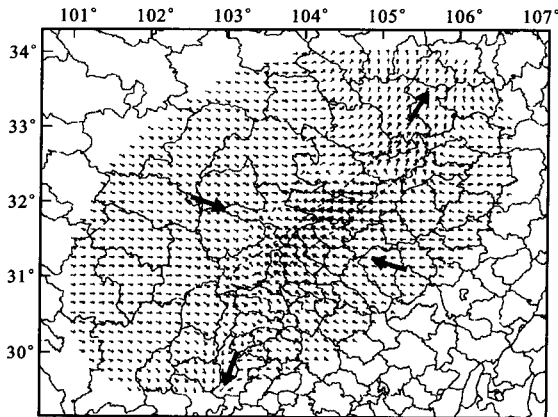


图7 汶川地震块体运动矢量

Fig. 7 Motion Vector of Wenchuan Earthquake Block

向东缓慢流动,在高原东缘沿龙门山构造带向东挤压,遇到四川刚性地块的顽强阻挡,造成构造应力能量的长期积累,最终在龙门山“映秀镇—北川”地区突然释放。断裂带东西两侧的相互作用通过监测点的位移量和方向得到了非常好的呈现。

从图8可知,位移量超过5 cm主要分布在以“映秀镇—北川—青川”为轴心呈椭圆状,约150 000 km²,位移量最大值分布在北川。

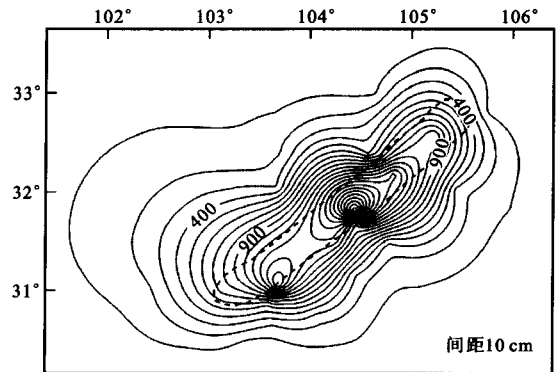


图8 位移量等值线

Fig. 8 Displacement Isoline

3.3.2 沉降分析

从图9、10可知:①沉降量较大的监测点主要分布在以“映秀镇—北川—青川”为轴心的45°夹角的长带上;②“映秀镇—北川”断裂带呈现沉降趋势,沉降量大于5 cm的区域约32 000 km²,沉降量最大值分布在北川,而青川周边呈现隆起趋势,隆起量大于5 cm的区域约12 000 km²;③“映秀镇—北川—青川”断裂带西部块体呈现隆起趋势,而东部块体呈现沉降趋势,但是幅度不大,在厘米量级。

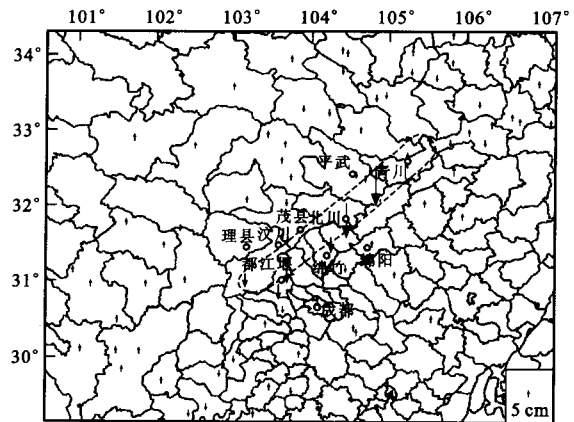


图9 监测点沉降

Fig. 9 Settlement of Monitoring Stations

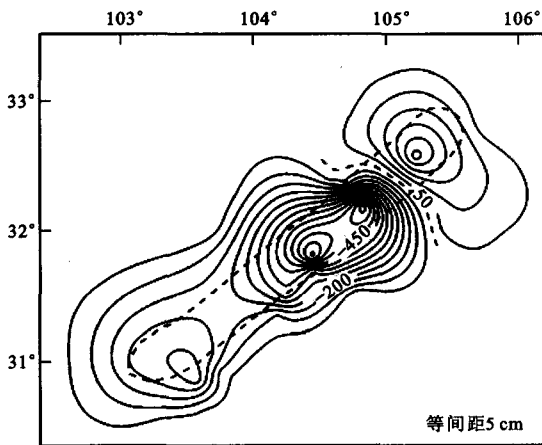


图 10 沉降量等值线
Fig. 10 Settlement Isoline

4 结语

(1)从中国 GPS 基准站时间序列分析,汶川地震对四川周边的基准站造成了一定的影响,较远的站变化较小。泸州点距离震中较近,位移变化较明显,北方向位移量约 1 cm,东方向位移量约 0.6 cm,高程方向变化不显著;中国大地原点受地震影响不显著,基本稳定。虽然本次地震波及范围较广,但对中国大部分地区的大地基准影响不明显,从变化的量级上还不足以对中国坐标框架骨干网造成较大影响。

(2)汶川地震对灾区沿“映秀镇—北川—青川”断裂带方向 500 km、宽 300 km 范围内的大地基准造成严重破坏,震中区域的监测点水平位移量达 243 cm,最大值分布在北川,位移量超过 5 cm 的区域约 150 000 km²;沉降量达 68 cm,最大值分布在北川,沉降量大于 5 cm 的区域约 32 000 km²;隆起量达 36 cm,最大值分布在青川,隆起量大于 5 cm 的区域约 12 000 km²。

(3)位于“映秀镇—北川—青川”断裂带西侧块体上的监测点呈现向东南方向移动,东侧块体上的监测点向西北方向移动,而北侧的监测点向东北方向移动,南侧的监测点向西南方向移动。块体两侧形成了明显挤压形态,且东侧位移的量级更大;

块体东侧监测点基本上呈现下沉趋势,西侧监测点基本上呈现隆起趋势。

(4)汶川地震是青藏板块受印度板块的碰撞,高原物质向东缓慢流动,沿龙门山构造带向东挤压,遇到四川盆地刚性地块的顽强阻挡,造成构造应力能量的长期积累,形成隆起而引发逆冲地震,最终在龙门山北川—映秀地区突然释放。

参考文献:

- [1] 彭建兵,马润勇,范文,等.汶川大震的科学思考[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):1-29.
- [2] 安其美,丁立丰,王海忠,等.龙门山断裂带的性质与活动性研究[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):115-119.
- [3] 焦青,杨选辉,许丽卿,等.汶川 8.0 级地震前后龙门山断裂活动特征浅析[J].大地测量与地球动力学,2008,28(4):7-11.
- [4] 刘建新,赵国辉.“5·12”汶川地震典型桥梁震害分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(2):92-97.
- [5] 朱元祥,李航飞,孙东晓.“5·12”汶川地震后陕西宝鸡陈仓区建筑物震害调查与分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(2):116-120.
- [6] 郭婷婷,徐锡伟,于贵华,等.川西地区农村民居建筑物震害调查与分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(3):59-64.
- [7] 程传录,王文利,郭春喜,等.2000 国家大地坐标系下三角网平差技术研究[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):432-436.
- [8] 郭春喜,王斌,程传录,等.珠穆朗玛峰高程测量[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):106-110.
- [9] 陈俊勇,杨元喜,王敏,等.2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J].测绘学报,2007,36(1):1-8.
- [10] 党亚民,陈俊勇.国际大地测量参考框架技术进展[J].测绘学报,2008,33(1):33-36.
- [11] 党亚民.GPS 和地球动力学进展[J].测绘科学,2004,29(2):77-79.
- [12] 程传录,郭春喜,路军,等.基于跟踪站模式下的 GPS 技术应用[J].测绘科学,2003,28(3):57-58.
- [13] 陈俊勇,郭春喜,程传录,等.利用 GPS 技术测定珠峰高程变化及其北坡地壳变形的初步分析[J].武汉大学学报:信息科学版,2007,32(1):1-5.
- [14] 程传录,郭春喜,王小瑞.关于国家高精度 GPS(B 级)网成果的使用问题[J].测绘科学,2005,30(5):31-32.