

汶川地震震后形变的 GPS 反演

丁开华^{1,2} 许才军¹ 温扬茂¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 中国地质大学(武汉)信息工程学院,武汉市鲁磨路 388 号,430074)

摘要:通过对汶川地震震后震区附近的 GPS 连续站资料的高精度数据处理,获得各测站的时间序列。利用时间序列分析,求得震后松弛时间约为 38 d,并获得各测站的震后位移。基于粘弹性松弛模型,对震后位移进行了模拟,反演出龙门山地区地壳的弹性层厚度的最佳估值为 45 km,粘弹性层的粘滞系数的最佳估值为 1.8×10^{19} Pa·s,该结果与地震学以及地球物理学等给出的结果基本一致。

关键词:汶川地震;震后形变;GPS;粘滞系数

中图分类号:P227

汶川地震发生后,来自不同学科领域的学者们对其开展了相应的研究,特别是同震形变方面。文献[1]利用全球数字地震台网记录到的地震波反演了该地震的破裂过程和断层面上的同震位移分布;文献[2]利用地表破裂带展布、同震地表变形和同震位移测量数据构建了汶川地震三维构造模型;文献[3-5]利用 InSAR 数据获得了该地震的同震形变场;文献[6-7]利用 GPS 资料反演了该地震的同震位移;文献[8]结合重力资料模拟了该地震的同震位移;文献[9]结合 GPS 资料和 InSAR 资料反演了断层的几何构造及滑动分布,并用同震滑动分布和滑移速率估计了该地震的复发周期。同时,学者们对汶川地震的孕育环境、成因以及应力变化对周围活动断层的影响等方面开展了大量的研究工作^[2,10-14]。

然而,汶川地震造成的震后变形、震后效应的机制以及震后效应所反映的岩石圈的地壳结构等问题,都是值得研究的。对这些问题的探讨,将有助于进一步探究汶川地震的成因、汶川地震的活动及分布与龙门山断裂地壳结构和横向变化的关系等科学问题。

本文利用汶川地震震后在龙门山地区收集到的 GPS 连续观测资料,通过高精度数据处理与时间

序列分析,获得其震后形变场,并基于粘弹性模型反演了该区的流变学参数。

1 GPS 数据处理与分析

1.1 GPS 资料与数据处理

龙门山地震带处于贺兰山-龙门山陡变带南段,其西北为青藏高原厚壳厚幔区,东南为四川盆地薄壳薄幔区,从龙门山前陆盆地向西部高原地壳厚度急剧增厚,形成一个莫霍面向西倾斜的陡变带^[2]。其内发育有汶川-茂汶断裂、映秀-北川断裂与灌县-彭县断裂等几条主干断裂。汶川地震的主震就发生在几条主干断裂中活动性最强的映秀-北川断裂上。

本文对在汶川地区收集到的 GPS 数据资料进行了高精度的数据处理。站点的分布如图 1 所示,表 1 给出了各测站详细的观测信息,其中 CA-OP、H033、H035、MCHI、SD07、WENC、WOLO 和 ZHJG 等 8 个站的资料来自于中国地震局,其他数据来自武汉大学。

将龙门山地区附近稳定的 IGS 永久性连续观测站与在该区布设的连续观测站相结合,形成动态观测网。由于 IGS 跟踪站构成了一个大尺

收稿日期:2012-12-08。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41074007,40974017,40974011);中国博士后科学基金资助项目(20110491229);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目(100110);中央高校基本科研业务专项基金资助项目(CUGL100233,114035);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100141120033)。

表1 汶川地震震后GPS观测资料的基本信息

Tab.1 Information About Postseismic GPS Data

站名	经度 / (°)	纬度 / (°)	资料间隔/d	资料起止时间
CAOP	103.40	31.25	106	08sep17-08dec31
H033	104.83	32.18	169	08may31-08dec20
H035	104.44	31.80	126	08may16-08oct04
MCHI	103.47	31.32	168	08jun28-08dec31
SD07	102.44	31.14	100	08may29-08dec31
WENC	103.59	31.48	168	08jun03-08dec31
WOLO	103.18	31.03	215	08may31-08dec31
ZHJG	103.72	32.32	174	08jun25-08dec31
ACXL	104.43	31.63	107	08dec25-09apr10
DIEX	103.68	32.04	65	08dec28-09mar03
GUEG	102.97	31.05	106	08dec26-09apr10
HAN2	104.16	31.46	44	08dec30-09mar21
MXJY	103.85	31.67	104	08dec28-09apr10
NANX	103.70	31.56	90	08dec28-09mar28
SEEG	103.42	31.94	99	08dec28-09apr09
TAOP	103.46	31.56	99	09jan01-09apr10

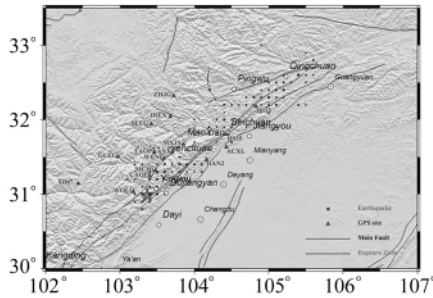


图1 龙门山断裂带的构造背景、汶川地震分布及震后观测的GPS站点分布图

Fig.1 Tectonic Background of Longmen Shan Faults, Location of Wenchuan Earthquake, and Distribution of GPS Sites

度、相对稳定、高精度的控制网,既可以有效地保持参考框架的统一、稳定,又可以在此基础上严密、可靠地获得各连续站点的位置和位移速率^[15]。具体步骤如下。

1) 用GIPSY软件处理原始数据获得单日解。采用无基准算法,直接利用JPL提供的无基准轨道和钟差,并加入大气改正(采用GMF模型)、潮汐改正(采用Tpxo7.0模型)等模型,将单日的固定站、连续站观测数据联合处理,解算各个测站的三维坐标及其方差-协方差。选用了13个IGS站(BJFS、CHAN、DAEJ、HYDE、IRKT、KIT3、KUNM、NTUS、POL2、SHAO、ULAB、URUM和WUHN)作为固定站,历元间隔为30s,截止高度角为15°。

2) 将单日解归化至统一的坐标基准。本文选ITRF2000作为统一的坐标系统,通过利用所

选用的IGS站作为公共测站进行坐标参数转换,将各单日解旋转至该参考框架上。

3) 整网动态平差。将所有统一参考框架下的单日解通过最小二乘平差解算出各站点在ITRF2000下的三维地心坐标和运动速率,以及对应的测站坐标和速率估值的方差-协方差。

4) 生成各测站的时间序列。利用平差后的测站坐标文件提取出每一测站的单日坐标信息,进而生成各测站的时间序列文件,为后续的时间序列分析做准备。

1.2 时间序列分析

震后GPS观测的时间序列可以体现震后弛豫,各分量的时间序列大致呈对数衰减^[16]。为了计算某一特定时刻的震后变形总量,必须使用恰当的函数来描述这一形态,并计算测站的震后变形。对于震后7个月的数据,采用式(1)来描述其衰减过程:

$$y(t_i) = d \ln(1 + (t_i - t_{eq})/\tau) \quad (1)$$

其中, $y(t_i)$ 表示GPS测站某分量的时间序列; d 为测站的震后变形幅值; t_i 和 t_{eq} 分别表示观测时刻和地震时刻; τ 为松弛时间。

由于各个测站在震后的衰减并不一致,本文选用了在断层两边观测时间较长的ZHJG、H035、MCHI和WOLO4个测站作为代表测站,根据其观测资料,利用式(1)采用单纯形法进行回归分析,求得震后松弛时间约为38d。图2显示了上述4个测站的拟合情况。

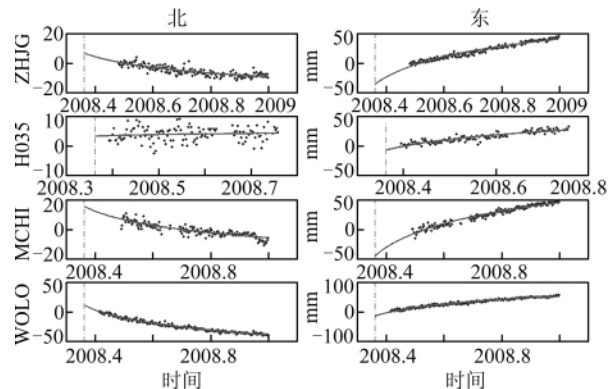


图2 GPS站点的数据拟合情况图

Fig.2 Fitting Between Observed and Modeled Daily Coordinates of GPS Sites

对于之后的资料,若采用式(1)计算其震后变形,则时间序列的初值、线性运动趋势项以及余震的影响都无法体现,可能影响到对这些测站震后位移的估计,因此,采用式(2)来计算其震后变形^[17]:

$$y(t_i) = a + b(t_i - t_{eq}) + \sum_{j=1}^m C_j H(t_i - T_{c_j}) + v_i \quad (2)$$

其中, a 代表测站的起始坐标; $b(t_i - t_{eq})$ 以此类推代表震后地壳运动的线性变化; $\sum_{j=1}^M C_j H(t_i - T_{c_j})$ 表示余震对时间序列造成的影响, 其中 $H(t)$

为阶跃函数; $d \ln(1 + (t_i - t_{eq})/\tau)$ 描述震后变形的对数衰减趋势; v_i 为残差项。

表 2 给出了经时间序列分析之后获得的各测站在震后的三维位移。

表 2 汶川地震震后 GPS 站点的三维位移
Tab. 2 3D Postseismic Displacement of GPS Sites

站名	经度 / (°)	纬度 / (°)	D_E /mm	D_N /mm	D_U /mm	Sig_ D_E /mm	Sig_ D_N /mm	Sig_ D_U /mm
CAOP	103.40	31.25	70.5	-16.5	-42.1	2.7	2.1	16.3
H033	104.83	32.18	23.9	-1.7	-5.7	3.1	2.4	12.4
H035	104.44	31.80	21.9	0.7	17.5	3.3	2.3	12.6
MCHI	103.47	31.32	15.2	-5.4	44.4	4.6	3.1	12.4
SD07	102.44	31.14	4.6	-3.7	3.1	2.6	1.9	11.4
WENC	103.59	31.48	19.3	-6.8	26.6	2.9	2.0	12.6
WOLO	103.18	31.03	19.7	-25.7	44.1	2.8	2.0	11.6
ZHJG	103.72	32.32	39.0	-8.2	-10.9	3.1	2.2	14.1
ACXL	104.43	31.63	18.0	9.7	130.1	3.1	2.3	10.6
DIEX	103.68	32.04	31.2	-11.1	24.2	2.4	1.8	8.2
GUEG	102.97	31.05	47.2	-23.0	17.8	3.2	2.6	19.8
HAN2	104.16	31.46	-77.3	49.6	239.3	2.9	2.0	10.4
MXJY	103.85	31.67	40.1	-14.2	28.3	3.0	2.2	9.4
NANX	103.70	31.56	52.1	-20.0	45.9	3.3	2.4	12.0
SEEG	103.42	31.94	47.2	-18.5	12.7	3.3	2.5	12.8
TAOP	103.46	31.56	55.2	-25.6	28.0	3.4	2.6	17.8

2 龙门山地区的地壳结构反演

在求得汶川地震震后形变场的基础上, 利用同震形变研究给出的断层参数可以对孕育了汶川地震的龙门山地区的地壳结构进行分析。上地壳/下地幔的粘弹性松弛模型通常被用来解释地表观测到的震后位移^[7,18]。

本文使用 Wang 等的 PSGRN/PSCMP 程序来计算汶川地震因粘弹性层的应力松弛所造成的地表位移^[17]。该程序把地震破裂面离散成许多离散的点, 通过这些点的点位错利用线性叠加的方法计算同震和震后变形。采用 Hashimoto 等^[19]利用 ALOS/PALSAR 图像通过同震形变反演得到的断层模型。假设龙门山地区的地壳结构为 Maxwell 体, 并参考川滇地区的地壳结构和热流结构的研究成果^[11,19,20], 对龙门山地区的地壳结构进行了设置, 如表 3 所示, 其中, H 和 h 分别表示上地壳、下地壳/上地幔的厚度。基于粘弹性模型, 以 GPS 观测得到的地表位移作为约束, 使用网格搜索法在参数取值区间中搜索出残差平方和最小的值, 进而反演出弹性层厚度及粘弹性层粘滞系数的最优估值。

图 3 显示了粘弹性模型计算得到的震后水平位移与 GPS 观测得到的水平位移间的拟合情况。

表 3 龙门山地区的地壳模型

Tab. 3 Crustal Layer Model in Longmen Shan Region

分层	厚度 /km	P 波速 / (km · s ⁻¹)	S 波速 / (km · s ⁻¹)	密度 / (kg · s ⁻³)	粘滞系数 / (Pa · s)
上地壳	0 < h < [30, 70]	5.80	3.32	2 800	∞
下地壳 / 上地幔	$H > h$	7.50	4.00	3 250	[10 ¹⁷ , 10 ²¹]

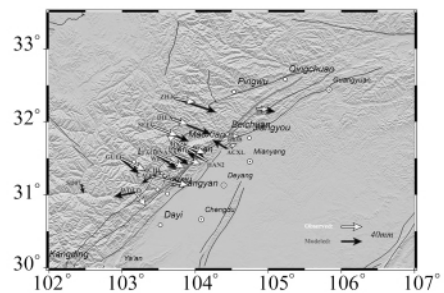


图 3 粘弹性模型计算的震后水平位移

Fig. 3 Horizontal Component of Postseismic Displacement Inverted by Viscoelastic Model

图 4 显示了弹性层厚度、粘弹性层粘滞系数以及残差平方和之间的关系。结果表明, 弹性层的最佳厚度为 45 km 左右, 弹性层的最佳粘滞系数约为 1.8×10^{19} Pa · s。

3 分析与讨论

反演结果显示: 运动趋势大体上一致, 但在断

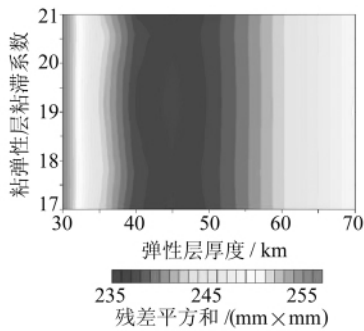


图4 弹性层厚度、粘弹性层粘滞系数与残差平方和的关系图

Fig. 4 Relationship Between Depth of Elastic Layer, Viscosity of Viscoelastic Layer, and Residual Sum of Squares

层的西南端有较大的差异,如点 WOLO、CAOP 等,这可能是由于模拟计算所采用的断层模型过于简单造成的;速率的量值除了上盘离断层线最远的点 ZHJG、DIEX、SEEG 以及下盘点 HAN2 的差别较大之外,在其他点上较吻合,而这些较大的差异的产生主要有两个方面的原因:① 本文所收集到的 GPS 数据的数量和空间分布有限,而且时间跨度不长,这对获取准确可靠的震后形变是一个很关键的制约因素。另外,引起震后位移的机制除了粘弹性松弛之外,还有震后余滑和孔隙弹性回弹等,而且在震后初期很难将粘弹性松弛与震后余滑等区分开,这需要借助长时间的震后观测资料。② 在进行粘弹性模拟时,采用的断层模型过于简单,将破裂带分为 8 段予以描述,而实际上,破裂带除了更复杂之外,还存在着另一条近平行的地表破裂带^[1,21]。此外,本文仅采用了两层的地壳结构,这也会对模拟的结果造成一定影响。

尽管本文采用的 GPS 资料有限,地壳模型简单,但是反演出的弹性层厚度及粘弹性层粘滞系数等流变学参数与其他学科给出的结果仍具有一定的可比性^[22-23]。本文反演的弹性层厚度与上述研究结果基本一致,反演得到的粘弹性层的粘滞系数与张晁军等^[18]利用粘弹性模型拟合炉霍地震震后的跨断层形变曲线得到的下地壳粘滞性系数为 10^{19} Pa·s 量级的结果吻合。

参 考 文 献

[1] 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 汶川 Ms8.0 级地震的同震位移动场[J]. 中国科学:地球科学, 2008, 38(10): 195-1206

[2] Xu Xiwei, Wen Xueze, Yu Guihua, et al. Co-seismic Reverse and Oblique-slip Surface Faulting Gen-

erated by the 2008 Mw7.9 Wenchuan Earthquake, China[J]. Geology, 2009, 37: 515-518

- [3] 孙建宝, 梁芳, 沈正康, 等. 汶川 M_S8.0 地震 InSAR 形变观测及初步分析[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 789-795
- [4] 许才军, 林敦林, 温扬茂. 利用 InSAR 数据的汶川地震形变场提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1138-1142
- [5] 许才军, 江国焰, 王浩, 等. 基于 GIS 的 InSAR 结果分析方法及在汶川 Mw7.9 级地震同震解释中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 379-383
- [6] 许才军, 刘洋, 温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 Mw7.9 级地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 195-201
- [7] 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] 申重阳, 李辉, 谈洪波. 汶川 8.0 级地震同震重力与形变效应模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 6-12
- [9] Shen Zhengkang, Sun Jianbao, Zhang Peizhen, et al. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers During the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Nature Geosci, 2009, 2:718-724
- [10] 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿, 等. 龙门山岩石圈地壳三维结构及汶川大地震成因浅析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 357-365
- [11] 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008 年 5 月 12 日 M_w7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学:地球科学, 2009, 39(5): 537-545
- [12] 韦伟, 孙若味, 石耀霖. 青藏高原东南缘地震层析成像及汶川地震成因探讨[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(7): 831-839
- [13] 解朝娣, 朱元清, Lei Xinglin, 等. M_s8.0 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(6): 688-698
- [14] Wang Qi, Qiao Xuejun, Lan Qigui, et al. Rupture of Deep Faults in the 2008 Wenchuan Earthquake and Uplift of the Longmen Shan[J]. Nature Geosci, 2011, 4:634-640
- [15] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学:地球科学, 2001, 31(7): 529-536
- [16] Hsu Y, Yu S, Chen H. Coseismic and Postseismic Deformation Associated with the 2003 ChengKung Taiwan, Earthquake [J]. Geophys J Int, 2009, 176: 420-430
- [17] Wang R, Lorenzo M F, Roth F. A Semi-analytical Software PSGRN/PSCMP for Calculating Co- and

- Post-seismic Deformation on a Layered Viscoelastic-gravitational Half-space[J]. Computers and Geosciences, 2006, 32: 527-541
- [18] 张晁军, 曹建玲, 石耀霖. 从震后形变探讨青藏高原下地壳粘滞系数[J]. 中国科学:地球科学, 2008, 38(10): 1 250-1 257
- [19] Hashimoto M, Enomoto M, Fukushima Y. Coseismic Deformation from the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Derived from ALOS/PALSAR Images [J]. Tectonophysics, 2010, 491(1-4): 59-71
- [20] 王椿楠, Mooney W D, 王溪莉, 等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 2002, 24(1): 1-16
- [21] 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:地球科学, 2008, 10: 1 186-1 194
- [22] Xu Yi, Li Zhiwei, Huang Runqiu, et al. Seismic Structure of the Longmen Shan Region from S-wave Tomography and Its Relationship with the Wenchuan Ms_{8.0} Earthquake on 12 May 2008, Southwestern China[J]. Geophys Res Lett, 2010, 37: 2 304
- [23] Zhang Zhongjie, Wang Yanghua, Chen Yun, et al. Crustal Structure Across Longmenshan Fault Belt from Passive Source Seismic Profiling[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36: L17310
-
- 第一作者简介: 丁开华, 博士, 主要研究方向为大地测量联合反演的模型及算法, GPS 数据处理与应用。
E-mail: khding@163.com

Postseismic Deformation Associated with the 2008 Wenchuan Earthquake by GPS Data

DING Kaihua^{1,2} XU Caijun¹ WEN Yangmao¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

Abstract: By high precision data processing, we obtain the coordinate time series of GPS continuous observation stations, which were located in the seismic area along the Longmen Shan Fault after the 2008 Wenchuan earthquake. Through the time series analysis, the postseismic relaxation time is 38 d, and postseismic displacements of these stations are obtained simultaneously. Based on the viscoelastic relaxation model, the thickness of the elastic layer and the coefficient of viscosity of the viscoelastic layer in Longmen Shan area, are inverted by simulating the observed postseismic displacements. The preferred values of the thickness of the elastic layer and the coefficient of viscosity of the viscoelastic layer are 45 km and 1.8×10^{19} Pa · s separately, which are in general accord with the results obtained by seismological and geophysical methods.

Key words: Wenchuan earthquake; postseismic deformation; GPS; coefficient of viscosity

About the first author: DING Kaihua, Ph. D., majors in the model and algorithm in geodesy joint inversion, data processing and application of GPS.

E-mail: khding@163.com

本刊编委关泽群教授因病去世

关泽群, 男, 1957 年生, 上海同济大学教授, 博士生导师, 《武汉大学学报·信息科学版》编委, 于 2013 年 1 月 6 日因病去世, 享年 56 岁。