

川滇地区地壳应变场的 GPS 与地震矩张量联合反演研究

丁开华¹ 许才军¹

(1 武汉大学测绘学院地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:利用川滇地区 1903~2003 年间的 84 个地震矩张量和 1998~2004 年间 214 个 GPS 站速度观测值,采用方差分量估计方法确定联合反演中地震矩张量与 GPS 站速度值之间的权比例因子,计算分析了川滇地区的地壳应变场。结果表明:① 采用方差分量估计确定联合反演中权比例因子的方法,得到的 GPS 站速度观测值的权比例因子为 0.833,较地震矩张量的权比例因子 0.167 大,充分体现出分布相对合理的高精度 GPS 观测值在反演中的重要性;② 川滇地区的应变场大致表现出如下的特征:主应变方向在 30°N 以北的区域为东西向;30°N 以南、100°E 以西的区域为北东向;30°N 以南、100°E 以东的区域为北西向。

关键词:川滇地区;地壳应变场;联合反演;赫尔默特方差估计

中图法分类号:P227; P228.42

川滇地区处于中国大陆西南边陲、青藏高原东南侧一个特殊的地理环境之中,有着复杂的地形条件和特殊的地质构造,且与稳定的华南板块相邻^[1]。由于川滇地区特殊的地质构造造成了该区地震活动具有强度大、频度高、分布广、震源浅和灾害重的特点,因此,该地区成为地壳形变与地震研究的有利地区之一。阚荣举等^[2]根据强震震源机制解和地震地表破裂带资料,提出了以鲜水河断裂、安宁河断裂和小江断裂为东界、金沙江断裂和红河断裂为西界所围限的川滇菱形块体向南南东相对移动的推论;陈智梁等^[3]利用 1991~1997 年多期 GPS 观测资料揭示出西南地区顺时针构造旋转和块体边界断裂的非均匀滑动的特征;王琪等^[4]根据 GPS 观测结果揭示了川滇菱形块体向南南东方向的总体运动和顺时针旋转的特征;独知行等^[5]利用 GPS 数据和主应力方向数据联合反演了川滇地区的边界力;乔学军等^[6]分析了川滇地区各活动块体的运动场和应力场。本文主要采用方差分量估计方法确定联合反演中两类观测值之间的权比例因子,分析了川滇地区的现今地壳运动和应变特征。

1 利用方差分量估计方法确定权比例因子的联合反演方法

采用 GPS 数据、地震矩张量,由双三次贝塞尔样条函数联合反演地壳运动速度场、应变率场^[7,8]。联合反演模型的目标函数可以表示为:

$$\min = \lambda \sum_{i,j,p,q=1}^N (\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}^{\text{fit}} - \tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}^{\text{obs}}) (\boldsymbol{Q}_1)_{ij,pq}^{-1} (\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{pq}^{\text{fit}} - \tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{pq}^{\text{obs}}) + (1 - \lambda) \sum_{i,j=1}^M (\boldsymbol{u}_i^{\text{fit}} - \boldsymbol{u}_i^{\text{obs}}) (\boldsymbol{Q}_2)_{ij}^{-1} (\boldsymbol{u}_j^{\text{fit}} - \boldsymbol{u}_j^{\text{obs}}) \quad (1)$$

式中, $\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}^{\text{fit}}$ 为由双三次贝塞尔样条函数模型求出的与地震矩张量相关的平均应变率值; $\tilde{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}^{\text{obs}}$ 为由地震矩张量求出的平均应变率值; $\boldsymbol{u}_i^{\text{fit}}$ 为由双三次贝塞尔样条函数模型求出的速度场; $\boldsymbol{u}_j^{\text{obs}}$ 为由 GPS 观测得出的速度场; $(\boldsymbol{Q}_1)_{ij,pq}^{-1}$ 为地震矩张量求出的平均应变率值的先验权阵,为其相应的应变率协因数矩阵 $(\boldsymbol{Q}_1)_{ij,pq}$ 的逆阵; $(\boldsymbol{Q}_2)_{ij}^{-1}$ 为 GPS 速度场的先验权阵,为其对应的协因数矩阵 $(\boldsymbol{Q}_2)_{ij}$ 的逆阵; M 、 N 分别为 GPS 观测值和网格的个数; λ 为反演时分配给地震数据的权比例因子,且 $\lambda \in [0,1]$ 。

为了表达的简练,用向量来表示式(1),有:

$$y = \lambda V_1^T P_1 V_1 + (1 - \lambda) V_2^T P_2 V_2 \tag{2}$$

式中, $V_1 = \tilde{\epsilon}^{fit} - \tilde{\epsilon}^{obs}$; $V_2 = u^{fit} - u^{obs}$; $P_1 = Q_1^{-1}$; $P_2 = Q_2^{-1}$ 。

设观测方程为:

$$V_1 = B_1 X - l_1, V_2 = B_2 X - l_2 \tag{3}$$

其中, B_1 和 B_2 分别为地震矩张量和 GPS 速度场相对于未知向量 X 的系数矩阵向量; l_1 和 l_2 分别为地震矩张量和 GPS 速度场的观测向量。

为使目标函数值 y 取极值,对参数向量 X 求导,并令其为零,得:

$$\frac{\partial y}{\partial X} = 2\lambda V_1^T P_1 B_1 + 2(1 - \lambda) V_2^T P_2 B_2 = 0 \tag{4}$$

$$S = \begin{bmatrix} n_1 - 2\text{tr}(N^{-1} N_1) + \text{tr}(N^{-1} N_1)^2 & \text{tr}(N^{-1} N_1 N^{-1} N_2) \\ \text{tr}(N^{-1} N_1 N^{-1} N_2) & n_2 - 2\text{tr}(N^{-1} N_2) + \text{tr}(N^{-1} N_2)^2 \end{bmatrix}$$

$$N = B^T P B = B_1^T P_1 B_1 + B_2^T P_2 B_2 = N_1 + N_2$$

$\hat{\theta} = [\hat{\sigma}_{0_1}^2 \quad \hat{\sigma}_{0_2}^2]^T, W_{\theta} = [V_1^T P_1 V_1 \quad V_2^T P_2 V_2]^T$
 n_1 和 n_2 分别为地震矩张量、GPS 速度场观测量的个数。

式(7)的解为:

$$\hat{\theta} = S^{-1} W_{\theta} \tag{8}$$

在实际应用中,需要迭代计算,每次反演前,需重新定权 $P_i^k = (c/\sigma_{0_i}^2) P_i^{k-1}$, c 为任意正常数, $i = 1, 2$,直到平差后各类单位权方差相等为止,或通过必要的检验认为其比值等于 1 为止。最后可根据下式求权比例因子^[9]:

$$\lambda = \frac{\prod_j (c/\hat{\sigma}_{0_1}^2)_j}{\sum_i (\prod_j (c/\hat{\sigma}_{0_i}^2)_j)} \tag{9}$$

($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, \dots$)

式中, $(c/\hat{\sigma}_{0_i}^2)_j$ 表示第 j 次方差分量估计中对第 i 类权的修正因子。

2 反演结果分析

在研究区域内,根据该区内的地震、地质构造

表 1 反演得到的权比例因子 λ 、拟合残差平方和 SSM 以及验后单位权中误差 $\hat{\sigma}_0$

Tab. 1 Inverted Weight Scaling Factor λ , Sum of Squared Misfit and A Posterior Standard Error of Unit Weight $\hat{\sigma}_0$

数据类型	数据个数	λ	SSM	$\hat{\sigma}_{0_1}/10^{-9} \cdot a^{-1}$	$\hat{\sigma}_{0_2}/10^{-9} \cdot a^{-1}$	$\hat{\sigma}_0/10^{-9} \cdot a^{-1}$
地震数据	84	—	7.755 8	—	—	0.140 7
GPS 数据	214	—	92.325 8	—	—	0.485 3
联合	84+214	0.167	111.178 6	0.532 7	0.532 5	0.532 6

注: $\hat{\sigma}_{0_1}, \hat{\sigma}_{0_2}$ 分别为地震数据、GPS 数据联合反演得到的验后单位权中误差。

从表 2 可以看出,仅用地震数据或 GPS 数据及上述两类数据联合反演得到的速度场及应变率场的情况如下:① 在速度及其分量的平均值的比较上,联合反演所得到的速度介于仅用地震数据

即 $\lambda B_1^T P_1 V_1 + (1 - \lambda) B_2^T P_2 V_2 = 0 \tag{5}$

进而根据上式构成反演时的法方程:

$$[\lambda B_1^T P_1 B_1 + (1 - \lambda) B_2^T P_2 B_2] X = \lambda B_1^T P_1 l_1 + (1 - \lambda) B_2^T P_2 l_2 \tag{6}$$

从法方程(6)可以看出,在 λ 的取值区间 $[0, 1]$ 内给定一个值,就可以求得一组参数向量 X 。

对于式(3)形式的反演问题,可以用方差分量估计来确定不同类观测值的权比例因子。令两类观测值的初始单位权方差分别为 $\sigma_{0_1}^2$ 和 $\sigma_{0_2}^2$,则其与残差平方和的关系可表示成:

$$S \hat{\theta} = W_{\theta} \tag{7}$$

 $2 \times 22 \times 1 \quad 2 \times 1$

其中,

背景将区域划分为 84 个不规则的网格。采用收集到的来自哈佛大学全球地震中心矩张量目录 (Harvard CMT Catalog) 在 1903~2003 年间的 84 个地震矩张量,和来自中国地壳观测网在 1998~2004 年间 214 个以华南块体为参考的 GPS 速度值,作为联合反演的数据,如图 1 所示。

采用上述的考虑权比例因子的联合反演方法,在确定权比例因子的同时,求出了川滇地区地壳运动的速度场和形变场。

从表 1 可以看出:① 仅用地震数据反演所得到的拟合残差平方和及验后单位权中误差是最小的,这要归因于地震数据要比仅用 GPS 数据及上述两类数据联合反演时所用的数据少,且在平差前,用地震数据求应变率时,为了保证应变率场连续,对地震数据进行了相应的平滑处理^[7];② 联合反演中,通过方差分量估计后,GPS 数据占有的权比重($1 - 0.167 = 0.833$)要比地震数据的权比重(0.167)大得多,这是由于 GPS 的观测精度高,且在研究区域内分布相对均匀合理的原因。

和仅用 GPS 数据反演所得的速度之间,且更接近于仅用 GPS 数据反演所得的速度;仅用地震数据反演得到的速度与仅用 GPS 数据反演得到的速度相差很大;② 在主应变率方向、第一主应变率

和第二主应变率平均值的比较上,联合反演所得的结果同样介于仅用地震数据和仅用 GPS 数据反演所得的结果之间,且更接近于仅用地震数据反演所得的结果;仅用 GPS 数据反演得到的应变率场与仅用地震数据反演得到的应变率场相差很大。因此,仅用地震数据不能很好地反演出速度场,仅用 GPS 数据也不能很好地反演出应变率场,而本文采用方差分量估计方法估计加权比例因子的联合反演方法既可以很好地拟合速度场,又可以兼顾应变率场的信息,合理地进行多类数据

表 2 反演得到的速度场及应变率场的平均值

Tab. 2 Average of Inverted Velocity Field and Strain Rate Field

数据类型	速度场/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$			应变率场		
	V	V_1	V_2	$A/(\text{°})$	$E_1/10^{-9} \cdot \text{a}^{-1}$	$E_2/10^{-9} \cdot \text{a}^{-1}$
地震数据	0.60	0.16	0.37	92.04	14.56	-14.16
GPS 数据	0.73	0.05	-0.38	71.61	44.58	-51.39
联合	0.71	0.15	-0.33	75.72	21.50	-20.39

注： V 、 V_1 和 V_2 分别为拟合的速度值及东方向和北方向的分量值； A 为第一主应变率的方向； E_1 和 E_2 分别为第一和第二主应变率值。

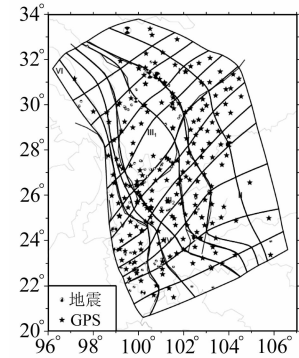


图 1 在研究区域内划分的不规则网格以及地震、GPS 点的分布

Fig. 1 Distribution of Plotted Irregular Grids, Earthquakes and GPS Sites in Study Area

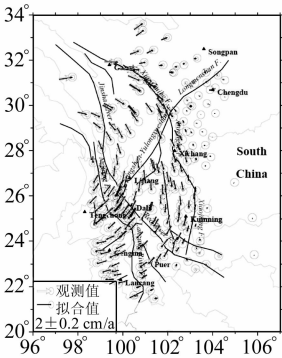


图 2 相对于华南板块的 GPS 观测值和拟合值

Fig. 2 Observed and Modeled Velocity Field on GPS Sites, Relative to South China Block

的实质性融合,因而要优于一般的联合反演方法,更优于单一数据的反演方法。

从图 2 可以看出,在各 GPS 测站上,其拟合值与观测值符合得很好,且拟合值的误差要比观测值的误差小。从图 3 可以看出,在 $1^\circ \times 1^\circ$ 规则网格点上拟合得到的速度有着明显的变化趋势:在西藏东部向北东方向运动,到川西一带转为向南东方向,再到云南西部转为向南西方向运动,即有着顺时针旋转的运动,且活动由北往南、由西往东逐渐衰减,这与陈智梁^[3]、王琪^[4]、乔学军^[6]用 GPS 数据所揭示的该区域的运动图像是一致的,同时与独知行等^[5]用 GPS 数据和主应力观测资料以及钟锺等^[10]利用航磁、重力数据等求得的该区域的运动特征也是相符的。从图 4 可以看出,龙门山块体有着近东西向的压应变,滇东块体以北西向的压应变为主导,康滇块体的压应变方向大致为北北西向,印支块体和腾冲-宝山块体都以北东向的压应变为主,藏东块体的应变方向主要为北北东或北东向,这与用三维有限元模拟方法得到的川滇地区的应力场分区特性是一致的^[11]。

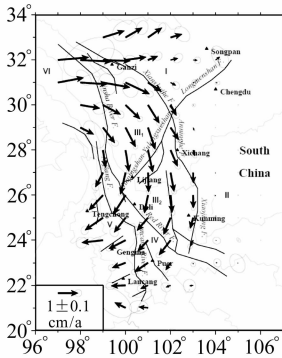


图 3 $1^\circ \times 1^\circ$ 规则网格反演的速度场(相对于华南板块)

Fig. 3 Inverted Velocity Field in $1^\circ \times 1^\circ$ Regular Grids, Relative to South China Block

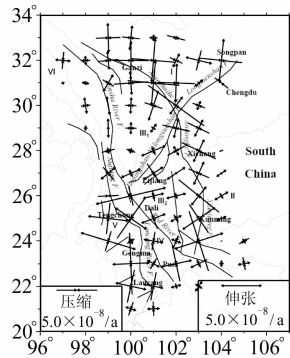


图 4 $1^\circ \times 1^\circ$ 规则网格反演的应变率场

Fig. 4 Inverted Strain Rate Field in $1^\circ \times 1^\circ$ Regular Grids

3 结 语

本文采用方差分量估计加权比例因子的联合反演方法可以合理地进行多类数据的实质性融合。目前,川滇地区整体上呈顺时针旋转运动,且运动由西向东、由北向南逐渐减弱;川滇地区主压应变方向大致可分为 30°N 以北的区域为东西向; 30°N 以南、 100°E 以西的区域为北东向; 30°N 以南、 100°E 以东的区域为北西向。造成川滇地区呈顺

时针运动以及主应变方向变化的原因可以认为是受印度板块碰撞的青藏高原内部物质向东南方向运动时受到稳定的华南板块的阻挡,进而向西南方向运动所引起的。

参 考 文 献

[1] 苏有锦, 秦嘉政. 川滇地区强震活动与区域新构造活动的关系[J]. 中国地震, 2001, 17(1): 24-34

[2] 阚荣举, 张四昌, 宴风桐. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 96-107

[3] 陈智梁, 张选阳, 沈凤, 等. 中国西南地区地壳运动的 GPS 监测[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 851-854

[4] 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(D 辑), 2001, 31(7): 529-536

[5] 独知行, 刘经南. 利用 GPS 位移和主应力方向观测资料进行川滇地区边界力的联合反演研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(2): 162-166

[6] 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 川滇地区活动地块现今形变特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 805-811

[7] Holt W E, Haines A J. Velocity Fields in Deformation Asia from the Inversion of Earthquake-released Strains[J]. Tectonics, 1993, 12(1): 1-20

[8] Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, et al. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault Slip Rates and Global Positioning System observations[J]. JGR, 2000, 105(B8): 19 185-19 209

[9] Xu Caijun, Ding Kaihua, Wang Hua. Research on Stochastic Modeling in the Joint Inversion of Space-geodetic Data and Seismic Moment tensor for Deformation Field in Chinese Continent[C]. Dynamic Planet 2005, Cairns, Australia, 2005

[10] 钟锴, 徐鸣洁, 王良书, 等. 利用航磁、重力资料研究川滇地区大陆变形特征[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): 1 089-1 094

[11] 陈化然, 陈连旺, 马宏生, 等. 川滇地区应力场演化与强震间相互作用的三维有限元模拟[J]. 地震学报, 2004, 26(6): 567-575

第一作者简介: 丁开华, 博士生. 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

Current Crustal Strain Field in the Sichuan-Yunnan Area
by Joint Inversion of GPS and Seismic Moment Tensor

DING Kaihua¹ XU Cajun¹

(1 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: By using 84 seismic moment tensors, collected from the Harvard centroid moment tensor between 1903 and 2003, and 214 GPS velocity observations, collected from the crustal motion observation network of China between 1998 and 2004, we fix the weight scaling factor of these two kinds of data in the joint inversion through Helmert method of variance components estimation (VCE), and invert for current crustal motion in Sichuan-Yunnan area. Meanwhile, on the basis of the analysis of inverted results, the following views are concluded. ① By using VCE, the weight scaling factor of GPS observations with a value of 0.833 is higher than that of seismic data, with a value of 0.167. It shows the importance of GPS observations with high accuracy and relatively uniform distribution in joint inversion. ② The crustal strain field in Sichuan-Yunnan area shows that the direction of compression strain is EW in the areas above 30°N and below 30°N, NE in the west of 100°E, and NW in the east of 100°E, which is accordance with other studies.

Key words: Sichuan-Yunnan area; crustal strain field; joint inversion; Helmert method of variance components estimation (VCE)

About the first author: DING Kaihua, Ph. D candidate, majors in the model and algorithm in geodesy joint inversion, data processing and application of GPS.
E-mail: khding@163.com