

粒子群算法在多种数据联合反演断层三维滑动速率的应用研究*

Application of Particle Swarm Optimization Algorithm in 3D Fault Slip Velocity Inversion based on Multi-data

刘 杰¹, 王宏宇², 山 锋³

(1. 西安培华学院, 陕西 西安 710125; 2. 国家测绘地理信息局第一大地测量队, 陕西 西安 710000;
3. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710000)

摘 要: 建立多种大地测量数据联合反演的数学模型。利用青藏高原东北缘地区的 GPS、水准、重力三种观测数据, 结合附有 LDW 策略的惯性权重的粒子群算法, 反演龙首山断裂的三维滑动速率。结果表明: 龙首山断裂主要以右旋、逆冲为主, 兼具挤压趋势, 且具有空间分布不均匀性的特征。相比单一数据的反演结果, 多种数据联合反演更具稳定性和规律性。

关键词: 位错模型; 粒子群算法; 联合反演; 三维滑动速率; 龙首山断裂

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0153-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.028

LIU Jie¹, WANG Hongyu², SHAN Feng³

(1. Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, China; 2. The First Geodesic Surveying Brigade of NASMG, Xi'an 710000, China; 3. Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Mathematical model for joint inversion of various geodetic data is established. Using the three observation data of GPS, leveling, and gravity in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, combined with the inertial weighted particle swarm algorithm with LDW strategy, we inverted the 3D slip rate of the Longshoushan fault. The results show that the Longshoushan fault is mainly right-handed and thrust, and has a tendency of extrusion. The fault activity has the characteristics of uneven spatial distribution.

Keywords: dislocation model; particle swarm optimization; joint inversion; three-dimension slip velocity; Longshoushan fault

0 引言

随着现代空间大地测量技术的进步和观测手段的多样化, 从使用传统的常规的光学测量仪器到先进的精密电子测量设备, 我们能够获得丰富且高质量的地表形变信息数据, 这些数据极大地开阔了人

们的视野, 也丰富了人们解释地表及内部运动变化的方法, 从而使得联合反演日益成为解释地球各种运动变化的强有力工具。

地球的动力学过程非常复杂, 一种运动往往造成多种响应结果。而地表的观测结果是地壳受力和地壳内本身存在深大断层活动等等的综合响应。因此, 采用多种数据联合反演更能够从多方面反映断层的运动性质, 使我们能够从多角度观察它, 衡量它, 从而更合理解释断层的运动过程。多种数据联合反演由于其相对于单一数据反演的优越性而受到广泛重视, 如张希等^[1]利用青藏东北缘块体的 GPS 和水准数观测资料, 实现了三维负位错联合反演, 综合研究了该区活动块体边界断裂的应变积累

* 基金项目: 陕西省教育厅 2021 年度一般专项科研计划项目: (SJS2023YB083)。

作者简介: 刘杰 (1986—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 大地测量反演。

收稿日期: 2023-12-16

研究与应用

状况及分段特征;黄勇等^[2]以多源观测为约束,利用近场 GPS、InSAR 同震位移和强震观测数据联合反演 2017 年九寨沟 MS 7.0 地震发震断层的几何形状和破裂模型,并初步分析其地震成因;刘琦等^[3]利用 GPS、水准和强震动观测资料联合反演 2013 年芦山 7.0 级地震同震滑动分布;孟国杰等^[4]联合近场 GPS 测站 1-Hz 运动学位移、强震仪加速度波形和全球台站 P 震相波形作为约束,以时空滑动分布约束条件和 ABIC 模型参数选择方法,反演 2008 年汶川 MS 8.0 地震的震源时空破裂过程,给出了能够综合反映震源破裂过程的统一模型。

为丰富联合反演的非线性算法研究,本文将基于位错模型,利用粒子群算法,采用水准及 GPS 数据与重力数据联合反演龙首山断裂的三维滑动速率。

1 多种数据联合反演的数学模型

在进行多种数据联合反演中,有两个比较关键的步骤:一是由于反演数据是具有不同量纲的观测量,所以要在数据预处理时进行数据归一化,也就是把不同观测量化成无量纲的量;二是确定两类数据在反演中所占的权比,即确定权比例因子 λ , 以使反演结果更为合理。如果各类观测值之间权比例因子不合理,将使联合处理后验后单位权方差有偏,并且影响反演参数估值方差最小性^[5-6];独知行^[7]详细讨论了联合反演模型中相对权比的优化反演,并把权比例因子作为待定参数与其他未知参数向量一起反演。

采用这种反演方案,假设有模型 $d_1 = G_1(m)$ 、 $d_2 = G_2(m)$ 、 $d_3 = G_3(m)$ 其中,三种模型 G_1 、 G_2 和 G_3 都是相同参数 m 的反映,而 d_1^{obs} 、 d_2^{obs} 和 d_3^{obs} 是不同类型的观测数据。那么附有相对权比的两类数据联合反演模型可以表示为

$$\lambda_1 \| d_1^{obs} - G_1(m) \| + \lambda_2 \| d_2^{obs} - G_2(m) \| + \lambda_3 \| d_3^{obs} - G_3(m) \| \rightarrow \min \quad (1)$$

式中: $\| \cdot \|$ 表示 \cdot 的范数; λ 为权比例因子,其取值范围是 $[0, 1]$, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。 λ_i 的大小反映了该类数据对运动的响应程度。当 $\lambda_i = 1$ 时,上述模型就变成第 i 种数据单独反演。

2 粒子群算法原理

2.1 基本粒子群算法原理

粒子群算法源于对鸟类捕食行为的研究,是将

每个个体看作是在 D 维搜索空间中的一个没有重量和体积的微小粒子,并在搜索空间中以一定的速度飞行。该飞行速度由个体飞行经验和群体飞行经验进行动态调整^[8]。假设群体中有 n 个粒子,则由 n 个粒子组成的群体 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 设 $x = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 为粒子 i 的当前位置; $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 为粒子 i 当前飞行的速度; $pbest_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 为粒子 i 所经历的最好位置,也就是粒子 i 所经过具有最好适应值位置,称为个体最好位置;设 $f(X)$ 为最小化目标函数,则粒子 i 当前最好位置由下式表达:

$$\text{若 } f(X_i(k+1)) \geq f(pbest_i(k)), pbest_i(k+1) = pbest_i(k);$$

$$\text{若 } f(X_i(k+1)) < f(pbest_i(k)), pbest_i(k+1) = X_i(k+1)。$$

而 $gbest = (g_1, g_2, \dots, g_D)$ 为整个粒子群迄今为止搜索到的最好位置,称为全局最好位置。当然, $f(gbest(k)) = \min \{f(pbest_0(k)),$

$$f(pbest_1(k)), \dots, f(pbest_n(k))\}$$

而粒子 i 在 j 维位置与速度更新公式如下:

$$v_{ij}(k+1) = v_{ij}(k) + c_1 r_{1j} [p_{ij}(k) - x_{ij}(k)] + c_2 r_{2j}(k) [g_j(k) - x_{ij}(k)] \quad (2)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \quad (3)$$

式中: i 为粒子 i ; j 为粒子第 j 维; k 为计算第 k 代; c_1 、 c_2 为粒子运动的加速度(也称学习因子); c_1 为调节粒子向自身最好位置飞行步长; c_2 为调节粒子向全局最好位置飞行步长; r_{1j} 、 r_{2j} 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。为防止粒子远离搜索空间,粒子的每一维速度 v_j 都会被设置在 $[-v_{j, \max}, v_{j, \max}]$ 之间。假设将搜索空间第 j 维定义为区间 $[-x_{j, \max}, x_{j, \max}]$, 则通常 $v_{j, \max} = kx_{j, \max}$, $0.1 \leq k \leq 1.0$, 每一维都用相同设置方法。

2.2 带惯性权重的粒子群算法原理

为了进一步改善基本 PSO 算法的收敛性能,1998 年, Eberhart 与 Shi Y 在 IEEE 国际进化计算学术会议上发表了题为“ A Modified Particle Swarm Optimizer”的论文,首次在 PSO 速度更新方程中引入惯性权重^[9-10], 即:

$$v_{ij}(k+1) = wv_{ij}(k) + c_1 r_{1j} [p_{ij}(k) - x_{ij}(k)] + c_2 r_{2j}(k) [g_j(k) - x_{ij}(k)] \quad (4)$$

研究与应用

式中： w 为惯性权重。而基本 PSO 算法是惯性权重 $w=1$ 的特殊情况。惯性权重 w 使粒子保持运动惯性，使其有扩展搜索空间趋势，有能力探索新区域。从式 (4) 可以看出， w 越大，则粒子飞行速度越大，粒子将以较大的步长进行全局探测； w 越小，则粒子速度步长越小，粒子将趋向于进行精细局部搜索。

文内采用的惯性权值是 Shi 提出的线性递减权值 (linearly decreasing weight 简称 LDW) 策略，即

$$w = (w_{ini} - w_{end})(K_{max} - k)/K_{max} + w_{end} \quad (5)$$

式中： K_{max} 为最大迭代次数； k 为当迭代次数， w_{ini} 为初始惯性权值； w_{end} 为迭代至最大次数时的惯性权值。典型取值 $w_{ini}=0.9$ ， $w_{end}=0.4$ 。如果 $w=0$ ，则粒子速度只取决于它当前位置 $pbest$ 和 $gbest$ ，其本身没有记忆。假设一个粒子位于全局最好位置，它将保持静止。此时，其他粒子将飞向它本身最好位置 $pbest$ 和全局最好位置 $gbest$ 加权中心，直至整个群体收敛到全局最好位置。如果 $w \neq 0$ ，则粒子有扩展搜索空间的趋势，从而针对不同搜索问题，可调整算法全局和局部搜索能力。

3 龙首山断裂的粒子群算法反演分析

3.1 龙首山断裂区域的地质背景及观测资料

龙首山断裂总体呈 NW 或 NWW 方向，延伸于青藏东北缘，全长约 150 km。青藏东北缘是青藏块体、阿拉善块体和鄂尔多斯块体的汇聚部位，由于它处于急剧隆升中的青藏高原东北部前锋部位，使得这一地区成为构造运动最为活跃、地震活动最为频繁地带之一。本世纪以来该区已经发生 6 次大于等于 8 级的地震，它们的发生与该地区活断裂运动有关，许多地震地质学家一直认为该地区地区活动断裂系中的某些地段仍是今后可能发生强震地区。因此对青藏东北缘活断层的研究不仅可以分析青藏高原动力学机制，而且对区域工程建设、地震危险性分析、地震预测等都具有重要意义。

为深入理解该地区断层活动与地面水平位移、高程变化和重力变化之间关系，本文分别利用青藏东北缘 2001~2004 年 GPS 和水准数据，2003~2004 年的重力数据对该地区龙首山断裂的三维滑动速率进行反演分析。选取龙首山断裂作为研究对象，基本特征^[11-12]

见表 1。

表 1 断层的基本特征
Table 1 The basic characteristics of a fault

走向/°	倾角/°	性质	地貌特征
N50°W	SW60-80	逆冲兼右旋	沿祁连山、南山山前展布，山体错位、洪积扇、裙和阶地发育

3.2 多种数据联合反演数学模型

采用把权比例因子作为待定参数和与其他未知参数向量一起反演的反演模型，利用地面 GPS 数据、水准数据和重力变化数据联合反演共同认识龙首山断层运动的性质，给出联合反演模型

$$\lambda_{gps} \sum_{gps} (U^{obs} - U(m))^2 + \lambda_{gravity} \sum_{gravity} (G^{obs} - G(m))^2 + (1 - \lambda_{gps} - \lambda_{gravity}) \sum_{leveling} (H^{obs} - H(m))^2 = \min \quad (6)$$

其中，

$$U^{obs} = \frac{u^{obs} - u_{min}^{obs}}{u_{max}^{obs} - u_{min}^{obs}} \quad U(m) = \frac{u(m) - u(m)_{min}}{u(m)_{max} - u(m)_{min}}$$

$$G^{obs} = \frac{g^{obs} - g_{min}^{obs}}{g_{max}^{obs} - g_{min}^{obs}} \quad G(m) = \frac{g(m) - g(m)_{min}}{g(m)_{max} - g(m)_{min}}$$

$$H^{obs} = \frac{h^{obs} - h_{min}^{obs}}{h_{max}^{obs} - h_{min}^{obs}} \quad H(m) = \frac{h(m) - h(m)_{min}}{h(m)_{max} - h(m)_{min}}$$

式中： λ_{gps} 为水平位移观测值在目标函数中权重； $\lambda_{gravity}$ 为重力变化观测值在目标函数中权重； u^{obs} 、 h^{obs} 、 g^{obs} 分别为地面水平位移、高差和重力变化实测值； $u(m)$ 、 $h(m)$ 、 $g(m)$ 为利用位错模型分别计算地表水平位移、垂直位移和重力变化； g_{max}^{obs} 、 g_{min}^{obs} 、 $g(m)_{max}$ 、 $g(m)_{min}$ 分别为重力观测值和模拟值最大、最小值； u_{max}^{obs} 、 u_{min}^{obs} 、 $u(m)_{max}$ 、 $u(m)_{min}$ 分别表示水平位移观测值和模拟值最大、最小值； h_{max}^{obs} 、 h_{min}^{obs} 、 $h(m)_{max}$ 、 $h(m)_{min}$ 分别表示垂直位移观测值和模拟值的最大、最小值。

利用断层微分原理，将龙首山断层分为 25 个子断层，子断层参数见表 2。

表 2 龙首山子断层参数
Table 2 Sub-fault parameters of Longshoushan

经度/°	纬度/°	长度/km	宽度/km	深度/km	走向/°	倾角/°
98.074 4	40.151 0	31.436 6	30	20	-50	75
98.376 3	39.987 9	25.430 1	30	20	-50	75
98.623 1	39.859 5	15.887 3	30	20	-50	75
98.797 6	39.809 7	18.047 7	30	20	-50	75

研究与应用

续表

经度 /°	纬度 /°	长度/km	宽度 /km	深度 /km	走向 /°	倾角 /°
98.998 0	39.758 3	18.110 9	30	20	-50	75
99.200 8	39.711 5	21.752 7	30	20	-50	75
99.447 2	39.663 2	32.876 9	30	20	-50	75
99.822 0	39.599 0	20.913 3	30	20	-50	75
100.044 4	39.521 7	21.620 5	30	20	-50	75
100.282 8	39.458 6	17.034 9	30	20	-50	75
100.467 7	39.403 1	12.569 1	30	20	-50	75
100.602 1	39.358 6	17.971 3	30	20	-50	75
100.785 1	39.280 4	29.270 4	30	20	-50	75
101.095 9	39.174 0	14.621 4	30	20	-50	75
101.256 8	39.132 5	13.291 1	30	20	-50	75
101.408 7	39.112 4	12.102 4	30	20	-50	75
101.545 2	39.087 2	5.593 0	30	20	-50	75
101.607 1	39.072 4	4.453 6	30	20	-50	75
101.657 6	39.064 1	11.047 4	30	20	-50	75
101.776 6	39.027 5	14.904 8	30	20	-50	75
101.937 5	38.979 2	7.755 8	30	20	-50	75
102.023 4	38.959 2	17.107 8	30	20	-50	75
102.201 8	38.892 7	11.774 5	30	20	-50	75
102.316 8	38.836 1	19.617 6	30	20	-50	75
102.506 2	38.739 5	29.161 6	30	20	-50	75

将 λ_{gps} , λ_{gravity} 作为未知数, 采用矩形位错模型, 结合附有 LDW 策略的惯性权重的粒子群算法反演断层参数的方法, 与断层参数同时反演。让 20 个粒子在五维空间 ($U_1, U_2, U_3, \lambda_{\text{gravity}}, \lambda_{\text{gps}}$) 搜索, 最终输出反演结果, 见表 3。

表 3 龙首山断裂滑动速率的 GPS、水准、重力三种数据的联合反演结果

Table 3 Inversion results of 3D displacement velocity of Qilianshan fault by GPS, leveling and gravity data

经度 /°	纬度 /°	走滑速率 / (mm/a)	倾滑速率 / (mm/a)	张裂速率 / (mm/a)	相对权比 (λ_{gps})	相对权比 (λ_{gravity})
98.074 4	40.151 0	-1.794 8	-0.483 0	-0.533 4	0.082 1	0.318 2
98.376 3	39.987 9	-1.580 5	-1.423 6	-0.399 8	0.086 7	0.301 1
98.623 1	39.859 5	-0.689 4	-0.820 6	-0.760 6	0.093 2	0.347 9
98.797 6	39.809 7	-0.661 1	-0.291 4	-0.693 1	0.082 3	0.367 4
98.998 0	39.758 3	-0.576 3	-0.782 0	-0.690 3	0.096 4	0.417 9
99.200 8	39.711 5	-0.632 7	-0.838 1	-0.749 2	0.100 2	0.392 6
99.447 2	39.663 2	-1.087 4	-1.069 2	-0.027 4	0.103 5	0.388 5
99.822 0	39.599 0	-1.257 6	-0.478 8	-0.017 2	0.092 3	0.368 9
100.044 4	39.521 7	-1.185 7	-1.248 9	-0.491 7	0.116 8	0.352 3

续表

经度 /°	纬度 /°	走滑速率 / (mm/a)	倾滑速率 / (mm/a)	张裂速率 / (mm/a)	相对权比 (λ_{gps})	相对权比 (λ_{gravity})
100.282 8	39.458 6	-0.631 0	-1.591 7	-0.392 5	0.012 3	0.366 2
100.467 7	39.403 1	-1.046 9	-1.151 2	-0.270 4	0.103 3	0.316 4
100.602 1	39.358 6	-1.097 7	-1.062 0	-0.232 1	0.123 6	0.369 9
100.785 1	39.280 4	-1.096 7	-1.145 8	-0.593 4	0.201 8	0.290 1
101.095 9	39.174 0	-1.193 3	-1.277 3	-0.442 5	0.170 2	0.301 3
101.256 8	39.132 5	-1.166 7	-1.429 2	-0.682 7	0.122 3	0.338 4
101.408 7	39.112 4	-1.089 3	-1.593 4	-0.535 7	0.182 8	0.298 3
101.545 2	39.087 2	-1.039 4	-1.488 4	-0.403 5	0.176 2	0.310 9
101.607 1	39.072 4	-1.095 9	-1.557 2	-0.668 7	0.102 7	0.318 4
101.657 6	39.064 1	-1.000 1	-1.460 1	-0.108 8	0.120 3	0.301 3
101.776 6	39.027 5	-1.086 2	-1.354 6	-0.651 9	0.142 7	0.289 2
101.937 5	38.979 2	-1.091 3	-1.168 9	-0.417 9	0.138 2	0.301 3
102.023 4	38.959 2	-1.070 1	-1.080 2	-0.664 9	0.227 3	0.293 2
102.201 8	38.892 7	-1.313 2	-1.094 8	-0.477 6	0.110 8	0.332 3
102.316 8	38.836 1	-1.286 3	-1.116 2	-0.323 4	0.101 2	0.310 9
102.506 2	38.739 5	-1.065 9	-1.493 8	-0.535 2	0.123 5	0.300 2

3.3 单一数据反演

为了讨论多种数据联合反演解释运动有效性和稳定性, 采用同样断层参数, 给出利用 GPS 数据单独反演断层滑动速率反演结果, 见表 4。

结合表 3、表 4 反演结果可以看出, 龙首山断裂以右旋走滑, 逆冲运动为主, 兼具挤压的趋势, 且具有空间分布不均匀性的特征。这与断层运动性质与构造地质结果^[11-12]、业成之^[13]、张希等^[14]论述的趋势基本一致。为方便比较, 将表 3、表 4 数据整理列于表 5。

表 4 GPS 数据反演

Table 4 Inversion results by GPS data

经度 /°	纬度 /°	走滑速率 / (mm/a)	倾滑速率 / (mm/a)	张裂速率 / (mm/a)
98.074 4	40.151 0	-0.098 3	-0.183 3	-0.102 2
98.376 3	39.987 9	0.003 6	0.053 7	-0.005 3
98.623 1	39.859 5	-1.893 4	-0.273 1	-0.012 7
98.797 6	39.809 7	-0.080 2	-0.222 4	-0.127 3
98.998 0	39.758 3	-0.297 2	0.012 4	-0.229 1
99.200 8	39.711 5	-0.201 4	-0.123 7	-0.023 4
99.447 2	39.663 2	-0.512 9	-0.131 5	-0.159 2
99.822 0	39.599 0	-0.060 4	-0.074 7	0.003 1
100.044 4	39.521 7	-0.137 0	-0.007 3	-0.121 3
100.282 8	39.458 6	-0.533 6	-0.026 2	-0.009 4
100.467 7	39.403 1	-0.647 9	0.220 9	-0.134 1

续表

经度 /°	纬度 /°	走滑速率 / (mm/a)	倾滑速率 / (mm/a)	张裂速率 / (mm/a)
100.602 1	39.358 6	0.001 2	-0.087 1	-0.001 6
100.785 1	39.280 4	-0.102 4	-0.175 0	-0.105 2
101.095 9	39.174 0	-0.211 1	-0.158 1	-0.021 8
101.256 8	39.132 5	0.007 7	-0.201 7	-0.592 1
101.408 7	39.112 4	-0.036 5	-0.168 2	-0.102 8
101.545 2	39.087 2	-0.264 9	-0.128 1	-0.025 1
101.607 1	39.072 4	-0.388 5	-0.012 5	-0.037 2
101.657 6	39.064 1	-0.482 1	-0.309 2	-0.163 7
101.776 6	39.027 5	-0.258 5	-0.427 9	-0.226 3
101.937 5	38.979 2	-0.659 2	-0.479 1	-0.237 8
102.023 4	38.959 2	-0.625 1	-0.486 5	-0.187 2
102.201 8	38.892 7	-0.472 3	-0.281 2	-0.062 1
102.316 8	38.836 1	-0.973 1	-0.712 3	-0.317 2
102.506 2	38.739 5	-0.821 3	-0.754 2	-0.378 3

表 5 反演结果比较
Table 5 Comparison of inversion results

反演内容	GPS、水准、重力数据联合反演 (附有相对权比)/(mm/a)	GPS 数据单独反演
走滑速率范围	-1.794 8~ -0.576 3	-1.893 4~ 0.007 7
倾滑速率范围	-1.591 7~ -0.291 4	-0.754 2~ 0.220 9
张开速率范围	-0.108 8~ -0.017 2	-0.378 3~ 0.003 1

分析表 5 可知, 采用三种数据联合反演所得结果, 与地质学方法得出龙首山断裂 1.1 mm/a 的平均运动速率基本符合, 略有差异^[12], 这可能与子断层的选取、断层几何参数的确定有关。而采用 GPS 数据单独反演所得结果规律性不明显, 数据含有较大扰动, 与地质学方法得出的运动速率相差较大。

4 结论

本文利用粒子群算法, 结合 GPS、水准、重力数据, 分析了青藏高原东北缘龙首山断裂的定量运动模型, 得到以下结论:

(1) 从反演结果规律看, 该断裂运动性质与构造地质结果基本一致。龙首山断裂主要以右旋、逆冲为主, 兼具挤压趋势, 且具有空间分布不均匀性的特征。

(2) 从反演结果数值看, 使用三种数据联合反演比单一数据反演结果稳定, 与地质学结果更为接近。

(3) 在利用大地测量数据反演时, 各种数据对待反演断裂带是否有较好覆盖, 这对反演结果也有

比较大的影响。同时, 在多种数据联合反演中, 各种数据与断层分布关系也影响着该数据在反演结果中所占的权重。

参 考 文 献

- [1] 张希, 江在森, 王双绪, 等. 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, 2007 (7): 61-66.
- [2] 黄勇, 陈威, 李琦, 等. 基于 GPS、InSAR 和强震数据联合反演 2017 年九寨沟 MS7.0 地震同震滑动分布 [J]. 大地测量与地球动力学. 2020 (6): 565-570.
- [3] 刘琦, 闻学泽, 邵志刚. 基于 GPS、水准和强震动观测资料联合反演 2013 年芦山 7.0 级地震同震滑动分布 [J]. 地球物理学报. 2016 (6): 2113-2125.
- [4] 孟国杰, 苏小宁, 王振, 等. 利用近场高频 GPS、强地面运动和远场地震波形数据联合反演 2008 年汶川 MS 8.0 地震的震源时空破裂过程 [J]. 地震, 2018, 2: 11-27.
- [5] 陶本藻. 测量统计数据分析 [M]. 北京: 测绘出版社, 1992.
- [6] 张朝玉. 大地测量反演若干理论问题研究 [D]. 博士学位论文, 武汉大学, 2006.
- [7] 独知行, 欧吉坤, 靳奉祥, 等. 联合反演模型中相对权比的优化反演 [J]. 测绘学报, 2003, 32 (1): 15-19.
- [8] SHI Y, EBERHART R. IEEE Int. Conf. On Evolutionary Computation [C], Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1998, 69-73.
- [9] SHI Y, EBERHART R C. Proceedings of the Seventh Annual Conference on Evolutionary Programming [C], Washington D. C., 1998, 591-600.
- [10] SHI Y, EBERHART R C. Proceeding of the Congress on Evolutionary Computation [C], Washington D. C., 1999, 1945-1950.
- [11] 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山-河西走廊活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1993, 157-159.
- [12] 丁国瑜, 蔡文伯, 等. 中国岩石圈动力学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 1991, 106-114.
- [13] 业成之. 祁连山北缘断裂带的现代构造运动 [J]. 地震地质, 1990, 12 (3): 275-281.
- [14] 张希, 江在森, 王双绪, 等. 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, 2003, 25 (4): 374-381.