

# 多面函数法研究鲜水河地区 现今地壳垂直运动\*

陶本藻 杜方

摘 要

本文采用美国 Hardy 教授提出的多面函数模型,并考虑地壳垂直形变速率面的复杂性、不规则性,以及获取速率面信息的水准点分布的不均匀性,选取正双曲函数作核函数,选取光滑因子 $\delta=0$ ,对鲜水河地区1965~1988年的多期水准复测资料进行了计算,获得了鲜水河地区现今地壳垂直形变速率面的预测结果,较好地反映了鲜水河走滑断裂的现今地壳垂直形变及应变积累的特征。

【关键词】 多面函数;地壳垂直运动;鲜水河断裂

## 1 引 言

鲜水河断裂带位于青藏高原东侧,是世界大型走滑断裂之一,卫星照片、航空照片都反映出该断裂的线状展布,有清晰的断层迹线,其总体走向为 $N40^{\circ}\sim 50^{\circ}W$ ,断裂带全长300多公里,展布于四川省境内的甘孜——炉霍——道孚——康定间。鲜水河断裂带之所以有如此清晰的断层迹线,原因有三点:第一断层伴有垂直差异运动,垂直差异运动使断层沿线产生许多断层崖;第二,断层岩石经受了多次强烈地震,因而断层的位错大,造成断层岩石产状不一致;第三,断层活动引起产生各种断层槽地、断层谷、断层盆地等沿断裂分布。由此可知,鲜水河断裂是伴有强烈垂直差异活动的大型走滑断层,因此,研究鲜水河地区的现今地壳垂直形变,对揭示断裂带的新构造活动特征具有重要的价值。

为此,本文采用美国 Hardy 提出的多面函数模型<sup>[5]</sup>,对鲜水河地区的现今地壳垂直形变进行了计算分析,获得了较可靠的地壳垂直形变信息,并对这些形变信息作了地球动力学解释,表明鲜水河走滑断裂新构造与地壳垂直运动相吻合。

收稿日期:1991-03-22

\* 国家自然科学基金资助项目

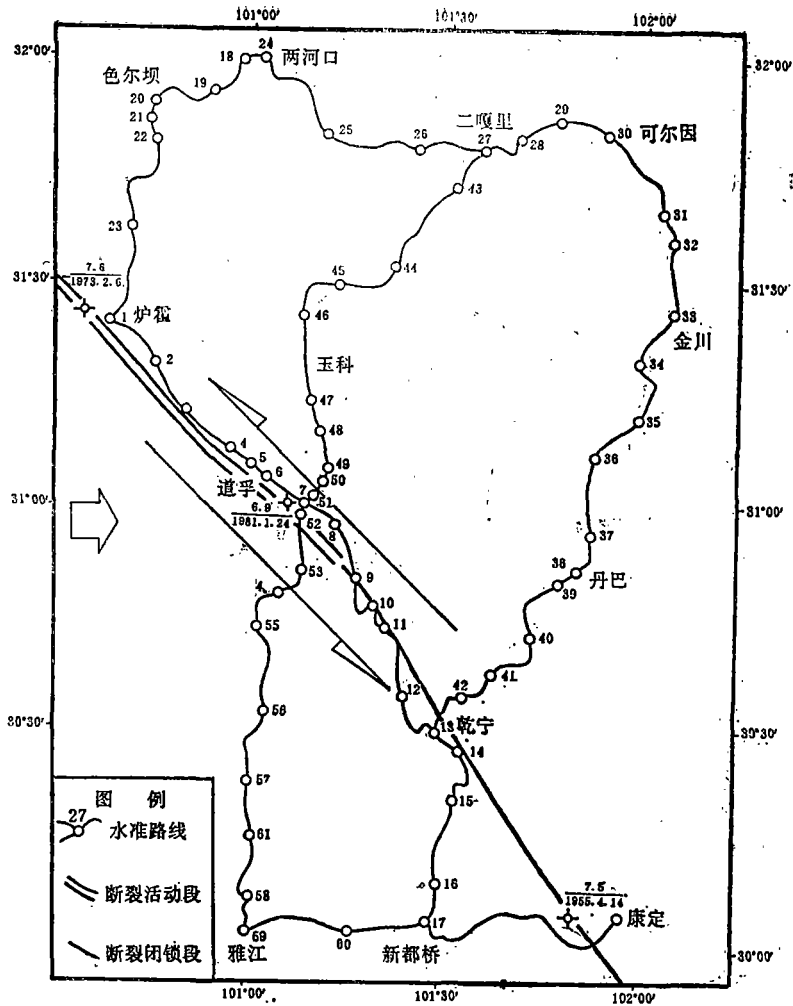


图 1

## 2 动态平差模型

### 4.1 资料概况

朝水河地区地壳垂直形变监测网主要用于监测该地区的大型走滑断裂，断裂的展布与监测网布设见图 1。虽然受山区布网条件的限制，但监测网能基本覆盖鲜水河主干断裂。鲜水河垂直形变监测网最早施测是在 1973 年炉霍地震发生后，最新成果是 1988 年由西安第二测量大队施测，1973~1987 年的多期成果均由四川省地震测量队施测，成果均达 I 等精度要求。在炉霍至两河口间最早成果采用了 1965 年国家测绘局施测的 II 等成果，测量成果满足 II 等精度要求。

### 4.2 动态平差模型

考虑到鲜水河地区的构造运动，对多期复测成果平差采用线性单点速率模型，考虑了水

准点点位坐标随时间的变化。采用这一模型有如下假设前提：

- (1) 在自身观测时刻( $t$ )无垂直运动发生)
- (2) 不同时刻点的运动可以线性模拟。

在满足假设前提的情况下，动态平差可以选用线性单点速率模型。

设参考时刻为  $t_0$ ，观测时刻为  $t$ ，则  $i$  到  $j$  两点间高差的观测方程可表达为：

$$h_{ij,t} = x_j - x_i + \dot{x}_j(t - t_0) - \dot{x}_i(t - t_0) + \Delta_{ij,t} \quad (1)$$

式中， $x_i$ 、 $x_j$  分别为  $t_0$  时刻  $i$ 、 $j$  点的高程参数； $\dot{x}_i$ 、 $\dot{x}_j$  分别为  $i$ 、 $j$  点的高程速率参数。

本文假定鲜水河地区的点场运动满足上述的假设前提，这一假定是否成立，也就是说动态参数选择是否正确、动态模型是否符合鲜水河地区的点场运动，需对动态平差结果进行动态参数的假设检验。

### 4.3 动态参数的假设检验

由(1)式可写出线性单点速率模型的一般表达式：

$$V = AX + BS - l \quad (2)$$

式中， $X$  为  $t_0$  时刻的高程参数， $S$  为速率参数，则有原假设：

$$H : [0 \ I] \begin{bmatrix} X \\ S \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

按线性假设法<sup>[7]</sup>有： $\Omega_H = \Omega + R$  (4)

式中  $\Omega$  是由(2)式单独平差所得残差平方和， $\Omega_H$  是联合(2)、(3)式平差所得的残差平方和， $R$  是考虑原假设(3)后产生的如下二次型：

$$R = S^T Q_S^{-1} S = S^T P_S S \quad (5)$$

$F$  统计量为：

$$F = \frac{S^T Q_S^{-1} S / t}{\Omega / (u - 2t)} \sim F(t, u - 2t) \quad (6)$$

在显著水平  $\alpha$  下，若该检验不能通过，否定原假设  $H_0$ ，有  $S \neq 0$ ，这以总体上表明动态平差模型中，加入高程速率参数是显著的，进而说明该区域存在形变。

## 3 用多面函数描述速率面

按线性单点速率模型进行水准网的动态平差，由(1)式可求出平差中的每个水准点的高程速率参数。为了进一步研究监测网区的地壳垂直形变，分析区域形变总趋势，可以根据动态平差结果，建立全区的形变模型，进行区域的速率面预测。为了使二维面与动态平差求得的垂直运动速率相配置，理论上可以使用任意近似的内插函数。地壳垂直形变速率面是一种较为复杂的不规则曲面，下面选用美国 Hardy 提出的多面参数进行描述。其理论依据是：任何数学面 and 任何不规则的光滑表面，均可由数学上定义的多个表面的总和以任意精度逼近。即任意的速率表面上某点  $(x, y)$  处的速率  $S(x, y)$  可表达为：

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^u \alpha_i Q(x, y; x_i, y_i) \quad (7)$$

式中,  $u$  为所取结点的个数;  $R(x, y; x_j, y_j)$  为核函数;  $\alpha_j$  为待定系数。

核函数理论上可以任意选用, 但根据试验结果, 应选取正双曲面函数作为核函数,

$$Q(x, y; x_j, y_j) = [(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + \delta]^{1/2} \quad (8)$$

式中:  $\delta$  称为光滑因子。(7)式的矩阵形式为:

$$S_1 = Q \alpha \quad m \geq u \quad (9)$$

$S$  为  $m \times 1$  向量, 选择  $u$  个结点, 则  $Q$  为  $m \times u$  矩阵, 待定系数  $\alpha$  为  $u \times 1$  向量。将(9)式代入误差方程(2):

$$V = AX + BQ \alpha - l \quad m \geq t \quad (10)$$

方程秩亏数为2, 选取固定高程和速率基准, 使  $A$ 、 $B$  矩阵满秩。

在  $V^T P V = \min$  的原则下, 得法方程:

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P (BQ) \\ (BQ)^T P A & (BQ)^T P (BQ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P l \\ (BQ)^T P l \end{bmatrix} \quad (11)$$

令:

$$\begin{aligned} N_{11} &= A^T P A, & N_{12} &= A^T P (BQ) = N_{21}^T, \\ N_{22} &= (BQ)^T P (BQ); & W_x &= A^T P l; & W_\alpha &= (BQ)^T P l \end{aligned}$$

得:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_\alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

按分块矩阵求逆, 并令:

$$M = N_{22} - N_{21} N_{11}^{-1} N_{12};$$

$$\bar{W}_\alpha = W_\alpha - N_{21} N_{11}^{-1} W_x$$

则有:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} N_{11}^{-1} + N_{11}^{-1} N_{12} M^{-1} N_{21} N_{11}^{-1} & -N_{11}^{-1} N_{12} M^{-1} \\ -M^{-1} N_{21} N_{11}^{-1} & M^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是可求得:  $\hat{\alpha} = M^{-1} \bar{W}_\alpha$  (14)

$$\hat{X} = N_{11}^{-1} W_x - N_{11}^{-1} N_{12} \hat{\alpha} = \hat{X}' - N_{11}^{-1} N_{12} \hat{\alpha} \quad (15)$$

式中,  $\hat{X}'$  为不设速率参数时, 高程参数的解向量。

$\hat{\alpha}$ 、 $\hat{X}$  的协因数矩阵分别为:

$$Q_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}} = M^{-1} \quad (16)$$

$$Q_{\hat{X}\hat{X}} = Q_{\hat{X}'\hat{X}'} - N_{11}^{-1} Q_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}} N_{12} Q_{\hat{X}'\hat{X}'}^T \quad (17)$$

推算速率面上任意未知点  $(x_p, y_p)$  上的速率值由下式确定:

$$S_p = Q_p \hat{\alpha} \quad (18)$$

式中,  $Q_p$  为  $1 \times u$  向量;  $S_p$  的协因数为:

$$Q_{S_p S_p} = Q_p Q_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}} Q_p^T \quad (19)$$

## 4 计算结果

鲜水河区地壳垂直形变监测网1965~1988年成果按时间段拼成三期构成闭合环网, 各期成果相对独立, 三期拼环成果均符合限差要求, 采用成果是可靠的。

表 1 平差结果及动态参数的总体检验结果

期号	平差中心年	平差精度	自由度 $f_1$	自由度 $f_2$	$F$	$F_{\alpha}$	检验结果
1	76.5	1.829	60	6	8.059		$S \neq 0$
2	82.0	1.089	60	6	13.011	1.388	$S \neq 0$
3	86.7						

为了提取不同时间段的形变信息, 将一、二期和二、三期分别选用模型(1)式进行动态平差, 平差结果及动态参数的总体检验结果见表1, 动态参数的检验均拒绝原假设 $H_0$ :

$S = 0$ , 即有 $S \neq 0$ , 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 从总体上表明: 鲜水河地区不同时间段内都存在

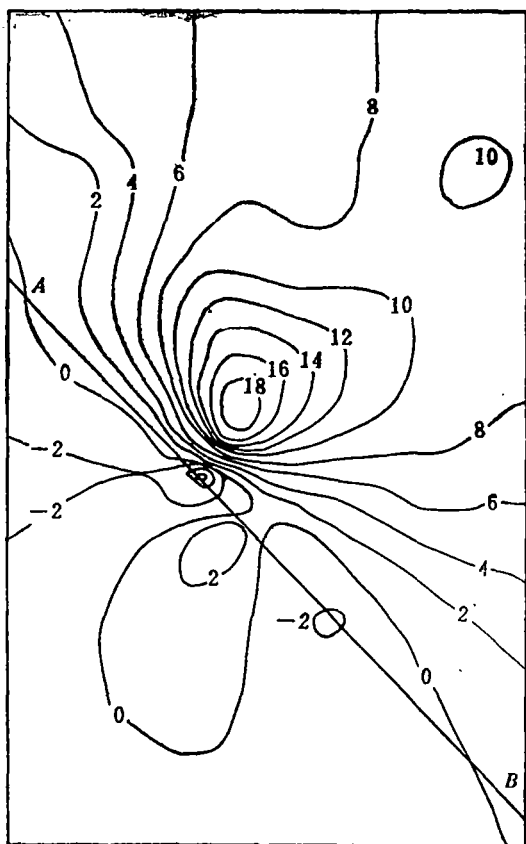


图 2 多面函数模型绘制的速率等值线图  
(76年至82年, 单位: mm/a)

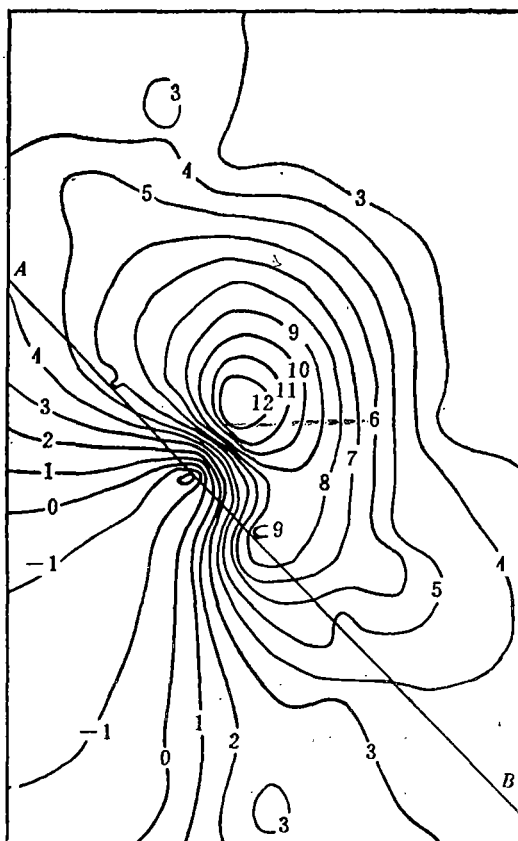


图 3 多面函数模型绘制的速率等值线图  
(82年至86年, 单位: mm/a)

注: 图的纵横比例尺均为1:20956. 图中小点为水准点、AB为断层迹线

表 2 线性单点速率模型和多面  
函数模型计算结果(78~82年)  
单位 mm/a

点号	$\hat{S}_i$	点号	$\hat{S}_i$
1	1.101	31	9.450
2	2.072	32	8.731
3	0.819	33	9.656
4	1.156	34	8.763
5	3.470	35	8.417
6	7.072	36	8.978
7	-6.403	37	6.669
8	-3.696	38	6.336
9	2.873	39	4.525
10	-3.433	40	1.707
11	-1.277	41	-0.342
12	-1.621	42	-2.746
13	-1.539	43	7.670
14	-1.432	44	8.919
15	-1.338	45	10.798
16	-0.903	46	13.007
17	-1.889	47	16.888
18	5.371	48	19.391
19	4.383	49	19.162
20	3.742	50	15.578
21	2.072	51	13.780
22	1.329	52	-4.051
23	0.688	53	3.163
24	5.542	54	2.088
25	7.788	55	2.310
26	7.419	56	1.244
27	7.555	57	0.926
28	9.123	58	-0.211
29	7.863	59	-1.485
30	10.873	60	-0.221
		61	0.276

表 3 线性单点速率模型和多面  
函数模型计算结果(82~86年)  
单位 mm/a

点号	$\hat{S}_i$	点号	$\hat{S}_i$
1	4.797	31	2.030
2	6.068	32	2.133
3	5.700	33	2.255
4	5.391	34	2.069
5	4.553	35	2.910
6	4.503	36	2.392
7	-5.569	37	4.288
8	3.443	38	4.494
9	10.103	39	3.477
10	9.162	40	6.941
11	8.090	41	5.724
12	5.507	42	4.496
13	5.186	43	4.162
14	5.179	44	6.950
15	2.696	45	8.375
16	2.801	46	8.249
17	2.803	47	10.809
18	4.391	48	13.694
19	3.626	49	11.262
20	3.825	50	7.807
21	4.458	51	4.502
22	5.772	52	2.978
23	4.750	53	2.141
24	4.182	54	0.989
25	2.640	55	-0.217
26	2.672	59	-0.080
27	2.577	57	0.068
28	2.026	58	0.056
29	2.881	59	0.091
30	2.575	60	3.447
		61	0.179

有明显的地壳垂直运动。平差计算得到的各时间段的高程速率反映了实际各水准点的运动。

第一、二期(1976~1982年)各水准点高程速率 $S$ 的拟合值 $\hat{S}$ 列于表2。第二、三期(1982~1986年)各水准点高程速率 $S$ 的拟值 $\hat{S}$ 列于表3。相应绘制的高程速率面等值线图见图2和图3,选择结点正好与所有具有独立速率信息的水准点重合,光滑因子 $\delta=0$ 。

## 5 现今地壳垂直运动及其地球动力学解释

### 5.1 鲜水河断裂带沿带形变及应变积累

根据计算结果(表2和表3),以及对照图1和多面函数预测的速率面等值线图2、图3展现了鲜水河地区不同时期1976年~1982年和1982年~1986年的现今地壳垂直形变总貌。

从图对照可以直接看出鲜水河断裂带沿带的地壳垂直差异运动,1976年~1982年沿带垂直运动速率在东南部位(水准点9、10、11、12、13号一带)和北西段(水准点1、2、3、4号一带)都较平缓,东南段速率为 $-3\sim 2\text{mm/a}$ ,北西段速率 $1\sim 2\text{mm/a}$ 。中段通孚附近(水准点7号附近)有较大的垂直差异运动,出现一个下沉区,下沉中心约达 $7\text{mm/a}$ ,主要包含有1981年1月24日的道孚6.9级地震的应变调整,即道孚地震后应力松弛,应变重新调整。1982年~1986年速率面沿带形成东南段和北西段两个速率上升区,东南段从 $-3\sim 2\text{mm/a}$ 增至 $5\sim 10\text{mm/a}$ ,北西段以 $1\sim 2\text{mm/a}$ 增至 $4\sim 6\text{mm/a}$ ,可以看出这两个上升区东南段的上升速率略高于北西段的上升速率,表明北西段由于近期几次强震的发生,使断裂错动贯通,其地球物理场主要以水平蠕滑为主,同时伴有一定量的垂直运动,其速率约为 $4\sim 6\text{mm/a}$ 。而道孚以南到乾宁段是较特殊的地带,正是鲜水河断裂带的滑动段和闭锁段的交汇处,地壳垂直上升速率较大,达到 $5\sim 10\text{mm/a}$ ,表现出断裂闭锁段附近的应变积累的特点,这种形变特征与该区所受区域应力场的作用有关,来自鲜水河区域西侧压力作用,同时区域受到东西面块体的阻挡,因而在主断层南上形成侧压应力,侧压应力在断层面上可分解成两组力,一组是剪切应力,主要控制着断层破裂滑动段的断层水平蠕滑;另一组就是正压应力,主要控制着断裂带,尤其是断裂闭锁段的垂直方向的运动,从而造成闭锁段的应变能不断积累,即表现在断裂带闭锁段的垂直运动,形成特殊构造区域的应变能聚集。由此可知在断裂闭锁段的地球物理场主要以垂直运动为主,由于特殊的闭锁环境,断层不发生无震的断层蠕滑,但更具有潜在的地震危险性,使得断裂中南至东南段具有压性和压扭性的特征。

### 5.2 道孚地震后的均衡调整

从多面函数预测的速率面等值线图2和图3可看出,断裂中段道孚附近,断裂上盘存在一垂直形变上升区,这一上升区与前所述的断裂闭锁段的上升区有构造上的区别,因为这一上升区是发生在该断层的蠕滑段的断层上盘,与1981年1月24日发生的道孚6.9级地震震中区的下沉区有构造上的联系,道孚地震下沉区的中心并不位于断裂的下盘,而是位于距地震断层破裂面 $2\sim 3$ 公里的断层上盘,即沉降中心位于第四纪盆地中心,这种地壳垂直运动的一升一降表明道孚地震后,造成地壳物质密度的不均匀调整,使得地壳内部物质重新分布,而形成的震后重力效应的动力学过程。从变化量上看1982年~1986年无论是上升还是下沉的

速率值低于1976年~1982年的速率值,说明震后的均衡调整是长期的,并且是递减的,将逐步达到新的物质密度平衡。

### 5.3 断裂的现今垂直形变模式

鲜水河断裂带总体走向北 $40^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ 西,断层面大多倾向北东,而且断层面较陡,也就是断层倾角较大,大约为 $70^{\circ}$ 左右。从多面函数预测的垂直形变速率面等值线图2和图3,表现出断层两盘在区域力场的作用下,断层的北东盘(断层上盘)总体相对南西盘(断层下盘)是上升的,显然区域的形变总趋势反映出了该区域的应力状态。同时断层两盘相对差异活动在断裂带各段又有较明显的不同,从图3地震活动相对平静期的多面函数预测,断裂北西段有一定量的断层上、下盘的垂直差异运动,但运动速效不大,约为 $1\sim 2\text{ mm/a}$ ,属断裂滑动段的无震滑动,垂直形变速率面反映出的无震滑动的量级与跨断层的短水准测得结果一致<sup>[6]</sup>,说明鲜水河走滑断层的无震滑动不仅仅表现在水平方向,而且也表现在垂直方向,据文献[6]的短基线和短水准资料推算,断层北西炉霍至道孚一带的断层无震滑动水平与垂直滑动比约为 $5:1$ 。在断裂东南的闭锁段,从垂直运动速率面的等值线图3可看出,断层

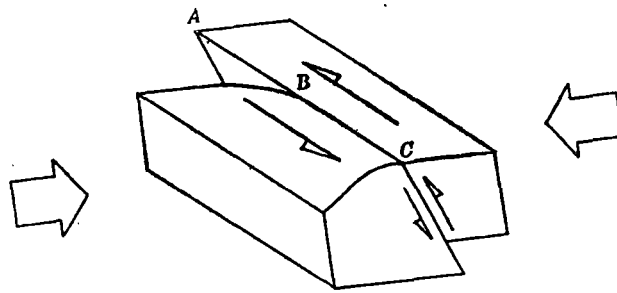


图4 鲜水河走滑断裂现今活动模型

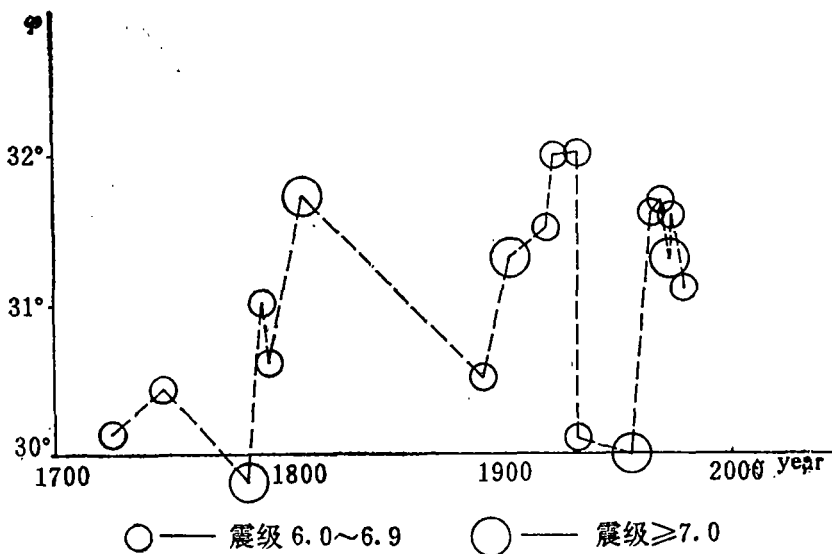


图5 鲜水河断裂带地震活动迁移图



两盘间几乎没有差异活动，而是断层两盘同时产生较明显的垂直上升运动，表明在区域力场的作用下，断裂闭锁段双盘（断层上、下盘）的受压隆起，而且量级达5~10mm/a，从而造成断裂闭锁段的应变能不断积累。鲜水河断裂带的这种现今地壳垂直活动，正展现出了鲜水河走滑断裂的特点。为此，可以用图4来描述该断裂的现今活动方式即鲜水河断裂带是伴有垂直差异活动的走滑断层，图中AB段是现今地震发生，断裂破裂贯通而形成的断层滑动段；BC段则为现今断裂闭锁段，形成应变能聚集环境。

#### 5.4 断裂活动与地震

根据历史地震记载，鲜水河断裂一直是世界上最活跃的断裂之一，自有记载的1725年以来，在该断裂带上就发生了近40次5级以上的地震，其中大于7级的强震达6次之多，而且强震的发生沿断裂带具有明显的迁移特点，见图5地震震中位置沿地理纬度绘制的迁移图。

根据前面的分析，现今鲜水河断裂北西滑动段垂直方向运动速率远小于闭锁段的受压隆起区的上升速率，可能表明断裂北西滑动段在压应力的作用下，地震断层面正在逐步强化，形成断层活动段的重新胶结，进而造成断裂的新闭锁段的产生。当然，这种强化胶结过程是缓慢而长期的构造过程。而现今的断裂闭锁段，则由于应变能的不断积累，当闭锁断层面的切应力超过摩擦力和抗剪强度时，便发生断裂的非稳态扩展——主震的发生，即出现闭锁段断层的“再次活化”，也就是说已胶结的断层重新破裂活动，而形成新的断裂滑动段。

鲜水河断裂是大型走滑断裂，断裂延伸达300多公里，但每次沿断裂发生的主强震，只是在断裂的有限长度上出现活动，也就是说一次主强震的发生，地震断裂的破裂长度是有限的。该断裂在统一力场的作用下，便会形成上述的断裂闭锁、滑动段的交替迁移，该断裂的这一活动方式，正好表现出该断裂带主强震的发生地点沿断裂迹线迁移的特点，这种特点可以在图5中直观看出。

## 6 结 束 语

综上所述，利用多面函数研究鲜水河区的多期水准复测资料，获得了鲜水河断裂带重要的现今地壳垂直形变信息：

(1)在鲜水河地区地震相对平静期，应变能在鲜水河断裂级闭段聚集，形成强震可能发生的危险区；

(2)地壳垂直运动速率面，反映出1981年1月24日道孚6.9级强震后的地壳物质密度的均衡调整；

(3)鲜水河走滑断裂的活动是伴有垂直差异运动的走滑断裂，在断裂的滑动段也存在垂直方向的断裂无震滑动；

(4)地壳垂直形变信息反映的断裂活动方式，与该断裂的主强地震的迁移活动相吻合。

#### 参 考 文 献

[1] 陶本藻，于正林，王新洲等。全国复测水准网动态平差方法的研究。武汉测绘科技大学(87—02—01课题报告)，1990年。

- [ 2 ] 陶本藻. 自由网平差与变形分析, 测绘出版社, 1984年。
- [ 3 ] 李庆海, 陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 1982年第一版, 1990年第二版。
- [ 4 ] Günter W. Hein. 1986: A model comparison in vertical crustal motion estimation using leveling data. NOAA Technicat Report NOS 117 NGS 35, Nation Geodetic Information Centre, NOAA, Rockville, MD.
- [ 5 ] Hardy R L. 1978: The application of mutiguadric equations and point mass anomaly models to crustal movement studies, NOAA Technical Report NOS 76 NGS11, National Geodetic Information Centre, NOAA, Rockville, MD.
- [ 6 ] 刘本培, 李建中. 鲜水河断裂带的形变监测与研究. 地震监测与预报方法清理成果汇编 (大地形变分册), 地震出版社, 1990年。
- [ 7 ] 陶本藻. 测量数据统计分析与变形分析. 武汉测绘科技大学, 1987年。

## Reseach on the Verical Crustal Movememnt in Xianshuihe Area at Present Time with Multiguadric Function

*Tao Benzao Du Faug*

### Abstract

Being used the multiguadric function suggested by Hardy professor of U.S.A, in this paper, and being considered the complexity and the irregularity of the velocity surface of vertical crustal movement and the inhomogeneity of the distribution of the benchmarks that the information of velocity surface are obtained from, a hyperboloid is selected as a kernel function and a glossy coefficient  $\delta$  is decided to be equal zero. The calculation are done for the leveling network from 1965 to 1988 repeated over several periods. The forecasted results of the velocity surface of the vertical crustal movement are got in Xianshuihe area nowadays. It shows fairly the feature of the vertical deformation of the crust and of the strain accumulation in Xianshuihe area in these days.

**【Key Words】** multiguadric function, vertical crustal movement, xianshuihe fracture