

文章编号: 0253-3782(2005)06-0610-10

活动断裂带构造变形定量分析^{*}

江在森¹⁾ 牛安福²⁾ 王 敏¹⁾ 黎凯武¹⁾
方 颖¹⁾ 张 希³⁾ 张晓亮³⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100036 中国地震台网中心

3) 中国西安 710054 中国地震局第二监测中心

摘要 为了把较高空间分辨率区域的 GPS 观测资料用于强震地点预测, 提出了活动断裂带构造变形定量分析方法。该方法主要通过沿断裂带主断层线两侧划分若干形变单元, 求解各单元的几何变形和相对错动参数等, 定量估算断裂带各分段滑动及应变速率; 进一步基于断裂带整体变形的协调性, 确定可能存在的异常段及其性质和程度。利用 1991—2001 年 GPS 速度场资料对川滇块体东边界带的实例分析显示, 则木河一小江断裂的冕宁—宁南—东川一带, 为主断层活动相对闭锁而左旋剪应变积累速度较高的异常段。

关键词 活动断裂带 构造变形 GPS 强震地点预测

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A

引言

全球卫星定位系统——GPS 等空间大地测量技术能够给出大范围、整体性的高精度地壳运动观测结果, 显著提高了对大区域的地壳运动观测能力。近 10 多年来把空间大地测量资料用于全球性的板块运动、大区域的块体运动和有关重点监测区的高分辨率地壳运动、构造形变场的监测和研究(朱文耀等, 2003; Wang *et al.*, 2001; 黄立人等, 2003a; 顾国华等, 2001; 周硕愚等, 2000; 江在森等, 2001, 2003a, b; 杨国华等, 2001, 2003), 已成为地学研究的一个热点。利用中国大陆 GPS 观测资料研究大区域和局部区域应变率场等研究也开展了不少工作(黄立人, 王敏, 1999; 江在森等, 2000, 2003a; 杨国华等, 2002; 李延兴等, 2001; 许才军等, 2002; 杨少敏, 王琪, 2003; 沈振康等, 2003; 李延兴等, 2003), 近几年的强震大都发生在应变率场的高值异常区, 特别是分解为不同方向的剪应变率分布的分析, 反映了区域应变率场的分析与主干断裂带构造变形背景联系起来更有意义(江在森等, 2001, 2003a; 杨少敏, 王琪, 2003)。这些研究结果表明, 从 GPS 观测结果中能够提取对强震地点预测有用的信息, 但大区域应变率场给出的异常区的范围较大, 仍难以对强震地点预测提供更好的参考依据。国家重点基础研究项目《大陆强震机理与预测》提出了“活动地块动力学”假设, 活动地块的边界也是晚第四纪以来强烈活动的深大断裂带, 是长期构造运动中构造变形显著的地带。利用 GPS 观测结果研究活动地块的运动和变形也开

* 科技部社会公益研究重点项目(2004DIA3J010)和国家“十五”重点科技攻关项目(2004BA601B01-02-01)资助。
2004-09-29 收到初稿, 2005-10-09 收到修改稿并决定采用。

展了不少工作(李延兴等, 2001, 2003; 黄立人, 郭良迁, 2003; 许才军, 温扬茂, 2003), 初步得出了活动地块的整体变形强弱与强震活动的统计关系。由于大地震通常发生在剧烈变形的活动地块边界带上, 而研究块体边界带或大断裂带上的构造变形的分布, 已开展的区域地壳运动速度场或区域水平应变率场的研究, 以及活动地块整体运动、变形研究所提供的信息仍显不足。因此, 本文探索利用具备较高空间分辨率(测点分布较密集)的区域 GPS 观测资料, 定量分析活动地块边界带或大断裂带变形的非均匀分布和确定高应变积累段的方法。

1 块体边界带构造变形定量分析的思路和方法

根据对构造地震的基本认识: 大地震的孕育、发生, 要有弹性应变能积累过程, 且应具备发生破裂错动的条件。局部区域弹性应变的积累来自区域地壳运动, 而只有相对软弱的地带, 如既存的断裂上才具备发生大的破裂错动的条件。因而研究大地震地点预测问题, 需要把地壳运动观测资料与地质构造背景相结合。基于区域介质连续假设建立的应变率场, 反映 NE 与 NW 方向、EW 与 SN 方向剪切变形的第一剪应变率、第二剪应变率的空间分布, 结合不同区域的主干断裂, 反映了与断裂带构造变形背景相一致的剪应变率高值异常区更具有危险性(江在森等, 2001, 2003a)。但基于连续变形假设的区域应变率场不能把断层带相对运动与地壳纯变形区分开, 其反映应变积累仍然是不确切的。为了更好地判定一个断裂带上可能发生强震的异常段, 不仅要了解这个断裂带是否活动显著, 还要分析断裂带构造形变的非均匀分布是否形成局部弹性应变率高值异常。断裂带上已发生的 7 级以上大地震破裂尚未贯通的部分——破裂空段通常是长期地震预测的地震危险段, 而正在强烈活动的断裂带上的闭锁段就可能成为未来 7 级地震的破裂段, 这就需要把地壳运动过程中的纯变形(即应变)与断层蠕滑等不同的信息分离开, 这样才能确定处于相对闭锁的高应变积累段。由于断裂带的相对运动和变形具有整体上的协调性, 它受控于大区域块体之间的相对运动。基于断裂带区域形变分析, 既要检测出局部异常段, 也要从断裂带整体变形的协调与平衡来确定异常段及其危险性。基于这样的基本思路, 本文从沿断裂带上的几何变形和错动参数的分段分析, 探索一套较简捷的断裂带构造形变定量计算的分析方法。

1.1 沿块体边界带变形单元的划分

依据地质专家研究结果确定断裂带的主断层线, 以主断层线为轴线两侧对称划分变形单元。假设每一单元内的变形有一致性, 用一组变形参数来描述。划分单元大小原则上是要考虑反映沿断裂带变形的不均匀性, 但它也受限于 GPS 点的分布密度。为便于不同单元变形状态的比较, 最好各单元尺度大体一致。

1.2 变形单元几何应变参数计算

假设把主断层面和地面点的运动投影到局部区域的地平面上(图 1)。图 1 中, O 点为计算

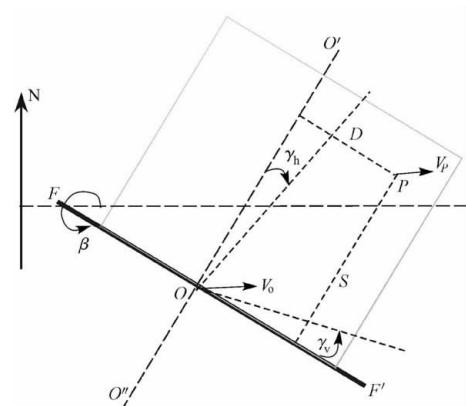


图 1 主断层一侧形变单元示意图

单元在主断层上的边缘点，其水平位移速度为 \mathbf{V}_O ，在单元内离开断层线任一点 P 点的水平位移速度为 \mathbf{V}_P ，可表示为 O 点的位移速度与单元变形引起 P 点相对 O 点的位移速度之和，即

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{V}_O + \mathbf{D}_\epsilon \quad (1)$$

式中， \mathbf{D}_ϵ 表示应变引起 P 点的位移速度。设断裂带边缘一定宽度的应变是均匀的。 V_{Oh} ， V_{Ov} 为 O 点沿断层线的 OF' 方向和垂直断层线的 OO' 方向的水平位移速率（规定 OO' 总在 OF' 的左侧）； V_h ， V_v 为 P 点沿断层方向和垂直断层方向的水平位移速率。沿断裂方向的水平正应变率 ϵ_h 、扭动应变率 γ_h （反映垂直断层线段的扭动）和垂直断裂方向的水平正应变率 ϵ_v 和扭动应变率 γ_v （反映平行断层线段的扭动）。根据几何变形关系，有

$$\begin{bmatrix} V_h \\ V_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Oh} \\ V_{Ov} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_h & \gamma_h \\ \gamma_v & \epsilon_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， S 为 P 点离开断层线的距离， D 为 P 点偏离直线 OO' 的距离。由于断层走向与位移观测值的坐标方向相差一个角度，设其夹角为 β 。据式(2)可推导出东向、北向位移速度 V_E 和 V_N 速率观测方程

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Oh} \\ V_{Ov} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D\cos\beta & S\cos\beta & -D\sin\beta & -S\sin\beta \\ D\sin\beta & S\sin\beta & D\cos\beta & S\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_h \\ \gamma_h \\ \gamma_v \\ \epsilon_v \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， V_{Oh} ， V_{Ov} ， ϵ_h ， γ_h ， ϵ_v 和 γ_v 为待定参数。以 GPS 水平运动速度值为 V_E ， V_N 的观测值，只要有 4 个以上的观测点（每点有东向、北向观测值），就可通过最小二乘求解出未知参数。 γ_h ， γ_v 是分别反映垂直断层方向的线段和沿断层方向线段发生的扭动，属于单方向的剪应变。平行断层的 FF' 方向与垂直断层的 OO' 方向之间的纯剪应变率 γ_{hv} 为

$$\gamma_{hv} = \gamma_h + \gamma_v \quad (4)$$

计算单元的转动速率 ω 为

$$\omega = \gamma_h - \gamma_v \quad (5)$$

获得以上与断层活动直接相联系的应变参数后，计算变形单元的最大剪应变、主应变及其主轴方位与断层之间的夹角等也可根据应变计算的有关公式计算。

1.3 沿断层方向、垂直断层方向滑动速率及断层错动速率计算

以上给出了断层线一侧任一形变单元的应变参数计算方法。对于主断层线相对称的另一侧形变单元应变参数的计算，将 O 点重合，但对主断层线的取向要旋转 180° ，即以 OF 代表断层线方向，以 OO' 代表垂直断层线方向，用相同的计算公式进行计算。由于计算主断层线两侧对称形变单元所用的是统一基准下的位移速度场观测结果，由两侧分别计算的 O 点水平运动速率差实际上就是反映断层的滑动速率，这样可方便地得出断层滑动参数。设断层一侧沿断层方向和垂直断层方向的水平位移速率为 $V_{Oh(1)}$ 和 $V_{Ov(1)}$ ，断层另一侧沿断层方向和垂直断层方向的水平位移速率为 $V_{Oh(2)}$ 和 $V_{Ov(2)}$ ，考虑两侧断层方向相差 180° （即正向相反），主断层沿走向水平滑动速率为

$$G_h = V_{Oh(1)} + V_{Oh(2)} \quad (6)$$

垂直断层线方向的水平滑动速率为

$$G_v = V_{Ov(1)} + V_{Ov(2)} \quad (7)$$

断层错动速率为

$$G_F = \sqrt{G_h^2 + G_v^2} \quad (8)$$

G_h , G_v , ϵ_h , ϵ_v , γ_{hv} 是与参考基准无关的量, 而单方向剪应变 γ_h 和 γ_v 的绝对量值是受参考基准旋转影响的。

1.4 断裂带扭动率、扩张(汇聚)率和扭错率的计算

断裂带扭动率是跨越断裂带一定宽度所发生的总的扭动形变速率, 记为 T_F

$$T_F = \gamma_h S + G_h \quad (9)$$

式中, S 为断裂变形带的宽度。断裂带扩张(汇聚)率是跨越断裂带一定宽度所发生的总的扩张(汇聚)形变速率, 记为 E_F

$$E_F = \epsilon_v S + G_v \quad (10)$$

断裂带扭错率用来综合反映断裂带活动强弱, 记为 M_F

$$M_F = \sqrt{T_F^2 + E_F^2} \quad (11)$$

1.5 断裂带变形性质及强度分析

按以上公式计算的与断层线方向的平行、垂直方向的正应变 ϵ_h 和 ϵ_v 及垂直断层方向的滑动速率 G_v 、断裂带扩张(汇聚)率 E_F , 均以取正值表示伸张或扩张, 取负值表示压性或汇聚。与断层线方向平行剪应变率 γ_h 扣除单元旋转后的纯剪应变率 γ_{hv} 及断层水平滑动速率 G_h 、断裂带扭动率 T_F , 均以取正值表示右旋剪切、滑动或扭动, 取负值表示左旋剪切、滑动或扭动。可分别取断层上某一段两侧对称形变单元垂直、平行主断层线的正应变率、剪应变率各参数的均值来代表断裂带这一段的应变参数。这样计算各段的正应变率和剪应变率及滑动速率, 可分析断裂带应变的不均匀性。还可分别取两侧全部形变单元的应变率参数均值进行比较, 来反映主断层线两侧的变形差异性。取断裂带各分段扭动率 T_F 和扩张(汇聚)率 E_F 及扭错率 M_F 的均值作为断裂带的总扭动率、总扩张(汇聚)率及总扭错率, 用来反映断裂带构造活动强度。

1.6 断裂带变形异常强度比

通过沿主断层线两侧各单元应变率及断层滑动速率、断裂带扭动率及扩张率等的定量计算, 可发现应变速率高而断层滑动速率低的相对闭锁段。为了定量计算各分段构造变形异常程度, 定义两个判定断裂带变形异常程度的指标。剪切变形异常强度比, 即跨断裂带沿走向方向总带扭动变形率 T_F 中剪应变率 γ_h 引起的变形速率所占的比重, 记为 S_A

$$S_A = \frac{\gamma_h S}{T_F} = \frac{\gamma_h S}{\gamma_h S + G_h} \quad (12)$$

如果考虑扣除计算单元自转动影响后的纯剪应变率 γ_{hv} 引起的变形速率所占的比重, 则

$$S_{A'} = \frac{\gamma_{hv} S}{\gamma_{hv} S + G_h} \quad (13)$$

扩张变形异常强度比, 即垂直断裂方向正应变 ϵ_v 引起的变形速率与断裂带扩张率 E_F 之比, 记为 E_A

$$E_A = \frac{\epsilon_v S}{E_F} = \frac{\epsilon_v S}{\epsilon_v S + G_v} \quad (14)$$

应变率异常强度比, 即沿断裂方向剪应变率 γ_h 、垂直断裂方向正应变 ϵ_v 引起的总变形量与断裂带扭错率 M_F 之比, 记为 T_A

$$T_A = \frac{S \sqrt{\gamma_h^2 + \epsilon_v^2}}{M_F} \quad (15)$$

S_A , E_A 和 T_A 的取值在 0~1 之间。当取值趋近于 0, 表示跨断裂带的形变量主要是由主断层面滑动造成的; 当 S_A , E_A 和 T_A 取值趋近于 1, 表示主断层面趋于闭锁, 跨断裂带的形变量主要是由应变造成的。

1.7 断裂带变形协调比与异常

在大区域构造应力场的持续作用下, 一个区域内的地壳相对运动和变形具有整体协调性, 反映到一条断裂带上的变形也具有协调性。这种协调性, 使得沿断裂带各单元的变形参数表现为总体上的一致性或者是渐变的(如受 NE 向构造应力场作用的近 EW 向断裂带的基本变形方式为较一致的左旋剪切)。这就构成了断裂带变形的基本趋势。如果某一段的变形参数值与其它段落的变形参数值有显著差异, 与相邻段比有突变, 则可视为异常段。为了定量描述断裂带某一段落变形的协调性与异常程度, 进一步定义任一分段的某一变形参数与整个断裂带上同一变形参数均值之差再与均值之比, 作为变形协调异常比, 如断裂带剪应变协调异常比, 可记作 $A_{D_{\gamma(i)}}$

$$A_{D_{\gamma(i)}} = \frac{\gamma_{h(i)} - \bar{\gamma}_h}{\bar{\gamma}_h} \quad (16)$$

式中, $\bar{\gamma}_h$ 为断裂带全部计算单元沿断裂方向剪应变率的均值, $\gamma_{h(i)}$ 表示第 i 段的剪应变率。实际意义是反映某一单元的剪应变率偏离整个断裂带剪应变的程度。其它各变形参数的协调异常比可照此例计算。

1.8 强震危险性综合分析

1) 强地震通常发生在构造活动强烈的断裂带(或块体边界带), 且断裂局部段落处于相对闭锁的高应变积累状态。从断裂带变形参数来看, 断裂带扭错率 M_F (对于走滑断裂可重点看扭动率 T_F , 对于挤压断裂可主要看汇聚率 E_F)的量值应当比较高, 反映跨断裂带的变形量比较大。

2) 当断裂带相对运动和变形比较均匀、协调, 未出现局部闭锁, 不容易形成局部弹性应变积累。即使断裂带整体构造活动强度较高, 断裂带也不具备发生大地震的破裂条件。这时变形参数具有一致性, 各分段变形参数协调异常比 $A_{D_{\gamma(i)}}$ 应当趋近于 0。当局部段落的变形与断裂带整体变形不协调时, 部分变形参数协调异常比 $A_{D_{\gamma(i)}}$ 较大, 才作为变形异常区段。

3) 进一步就要看应变率异常强度比 T_A (走滑型断裂可重点看剪切变形率异常强度比 S_A , 挤压逆冲断裂可重点看扩张变形率异常强度比 E_A), 看其取值是否接近于 1, 反映断裂带的主断层是否处于相对闭锁。

4) 从断裂带各分段和断层两侧多种变形参数的非均匀有序分布, 结合断层破裂错动模式, 有可能进一步判定断裂带具体段落的强震危险段。如当某一段的剪应变率高且主断层处于相对闭锁(剪应变率异常强度比高), 如果沿断层方向的正应变率 ϵ_h 数值在主断层两侧形成张(正)、压(负)与压、张对称的四象限分布, 根据组合模式等理论认识(郭增建, 秦保燕, 1979), 则表明该段的走滑破裂的变形背景条件已具备, 就更有理由判定为强震危险段。

2 川滇地块东边界带的构造变形量算结果

由于活动地块边界带是几何结构各异、宽度变化不同的变形带或活动构造带,而《大陆强震机理与预测》项目2003年给出的活动地块边界是利用活动构造带的宽度来勾画活动边界带几何形状的(张培震等,2003)。利用GPS资料进行活动边界带分析时,首先需要确定活动边界带的主断层线。本文对川滇地块东边界带进行分析时,根据地质学家较一致的认识,以鲜水河—则木河—小江断裂为川滇地块东边界的主断层。根据“2000国家GPS控制网”中国大陆速度场解算的结果(王敏等,2005),再以川滇地块东边界两侧相对运动的平衡为约束条件,用欧拉模型参数扣除区域整体运动后,获得了川滇地区1991—2001年GPS点速度场(图2)。根据GPS点的分布密度,沿主断层线取7个分段(图2中AB—GH),以主断层线为轴线西侧、东侧外延100 km取形变单元,对各分段的断层滑动率及西侧、东侧应变率参数的计算结果见表1,各分段的应变率及变形异常强度比计算结果见表2。

表1给出的川滇地块东边界各分段两侧形变单元的计算结果,各单元的应变率相差比较

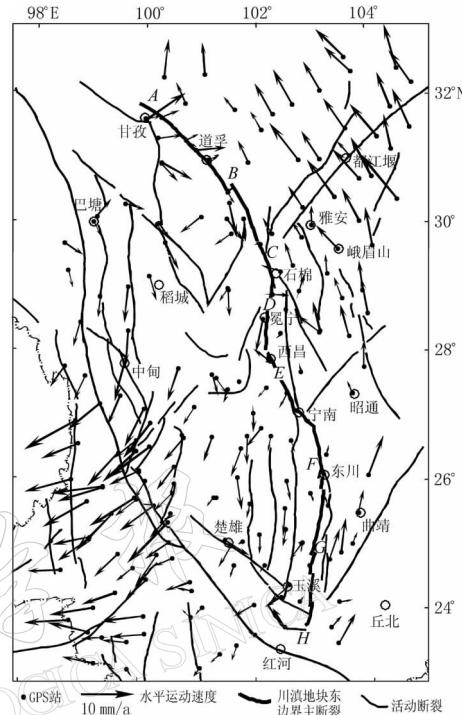


图2 川滇地区GPS站水平相对运动速度与活动断裂分布图

表1 川滇地块东边界分段滑动率及其两侧单元应变率 应变率单位: $10^{-8}/\text{a}$

段标记	$G / \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$		ϵ_h		ϵ_v		γ_h		γ_v		γ_{hv}		单元GPS点数	
	G_h	G_v	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E
AB	-7.1 ±1.7	-1.2 ±1.7	-0.6 ±0.8	0.0 ±0.8	6.4 ±2.3	-0.7 ±2.3	-1.7 ±2.3	0.8 ±2.3	-3.2 ±0.8	-2.2 ±0.8	-4.9 ±2.5	-1.4 ±2.4	14	6
BC	-7.2 ±2.0	-1.7 ±2.7	-2.6 ±2.3	2.0 ±0.6	7.1 ±5.3	-1.5 ±1.5	1.0 ±4.0	-3.2 ±1.1	-3.6 ±3.2	0.4 ±0.8	-2.6 ±5.1	-2.8 ±1.4	8	6
CD	-3.9 ±1.9	-1.0 ±3.0	-2.0 ±1.7	0.6 ±1.0	-0.2 ±4.7	2.9 ±2.1	-7.4 ±3.0	-1.0 ±1.4	-1.1 ±2.5	1.7 ±1.4	-8.4 ±3.9	0.7 ±1.9	7	8
DE	-1.6 ±1.8	2.3 ±2.9	-3.4 ±1.0	1.6 ±1.2	-0.7 ±3.5	-5.0 ±3.3	-2.0 ±2.2	-6.7 ±2.0	-0.5 ±1.8	-3.7 ±1.9	-2.4 ±2.8	-10.4 ±2.7	8	6
EF	-0.8 ±1.2	-0.7 ±1.9	1.1 ±0.5	-0.1 ±0.6	0.7 ±1.8	9.4 ±7.4	-3.1 ±1.1	-11.7 ±4.8	1.2 ±0.8	1.1 ±0.9	-2.0 ±1.4	-10.7 ±4.8	8	4
FG	-5.2 ±1.3	-0.4 ±2.1	-0.8 ±0.9	-1.3 ±1.0	0.1 ±2.8	1.2 ±3.8	-3.0 ±1.5	-2.4 ±2.3	-1.7 ±1.4	-0.2 ±1.6	-4.7 ±2.1	-2.5 ±2.8	8	8
GH	-6.5 ±2.2	2.2 ±3.2	0.0 ±1.2	0.0 ±1.3	-2.1 ±3.9	3.1 ±3.2	0.7 ±2.9	-2.3 ±2.2	-1.0 ±1.7	-0.9 ±1.9	-0.3 ±3.3	-3.2 ±2.9	7	9

表 2 川滇地块东边界分段应变率与变形异常强度比 应变率单位: $10^{-8}/\text{a}$

段标记	ϵ_h	ϵ_v	γ_h	γ_v	γ_{hv}	S_A	$S_{A'}$	T_A	E_A
AB	-0.3	2.8	-0.4	-2.7	-3.2	0.09	0.40	0.46	0.78
	± 0.6	± 1.6	± 1.6	± 0.6	± 1.7				
BC	-0.3	2.8	-1.1	-1.6	-2.7	0.19	0.36	0.43	0.71
	± 1.2	± 2.8	± 2.1	± 1.6	± 2.7				
CD	-0.7	1.3	-4.2	0.3	-3.9	0.62	0.60	0.62	0.66
	± 1.0	± 2.6	± 1.6	± 1.4	± 2.2				
DE	-2.5	-2.8	-4.3	-2.1	-6.4	0.80	0.85	0.75	0.65
	± 0.8	± 2.4	± 1.4	± 1.3	± 2.0				
EF	0.5	5.0	-7.4	1.1	-6.3	0.94	0.93	0.93	0.91
	± 0.4	± 3.8	± 2.4	± 0.6	± 2.5				
FG	-1.1	0.6	-2.7	-1.0	-3.6	0.44	0.51	0.44	0.70
	± 0.7	± 2.3	± 1.4	± 1.1	± 1.8				
GH	0.0	0.5	-0.8	-1.0	-1.7	0.15	0.28	0.17	0.24
	± 0.8	± 2.5	± 1.8	± 1.3	± 2.2				

大, 基于计算单元内变形均匀解算出的部分参数的中误差也比较大. 这可能反映了断裂带变形的复杂性, 也可能反映了目前 GPS 观测的随机误差是不可忽视的. 不过, 这一结果仍提供了一些较为清晰的断裂带变形信息.

1) 川滇地块东边界主断层具有一致的左旋滑动(表 1 中水平滑动率 G_h 均为负值), 不同段落左旋滑动率量值相差较大. 在 AB, BC, CD 各段(炉霍—康定—石棉一带), 断层左旋滑动速率为 $-3.9 \sim -7.2 \text{ mm/a}$. 但在 DE, EF 两段(冕宁—宁南—东川一带), 断层滑动速率很低, 分别为 $1.6, 0.8 \text{ mm/a}$ 以下, FG, GH 两段又分别达到 $5.2, 6.5 \text{ mm/a}$. 这可能反映了断层带上不同段的摩擦阻力或介质强度有显著差异.

2) 沿断层走向的剪应变率也表现为一致的左旋剪切(表 2 中 γ_h 均为负值), 其不均匀分布与断层滑动率大体相反, 在 CD, DE, EF 各段为高值段. 主断层垂直方向的正应变以张应变为主(表 2 中 ϵ_v 除 DE 段为负值呈压性外, 其它各段均为张性).

3) 若以 150 km 为断裂带显著变形带的宽度, 按照表 1 给出的主断层左旋滑动率和表 2 给出的左旋剪应变率来计算断裂带各分段的左旋扭动速率 T_F 约为 $8 \sim 11 \text{ mm/a}$. 这反映该断裂带整体变形具有较好的协调性, 但跨断裂带扩张率 T_F 的协调性不好, 不同段上扩张、汇聚不一.

4) 剪切变形异常强度比 S_A 和 $S_{A'}$ 等高值异常段(反映断层活动相对闭锁的高应变率积累段)为 DE, EF 两段. 多种基于区域介质连续的应变率场结果, 都显示了川滇东边界特别是鲜水河断裂带为最大剪应变率的高值异常区(杨国华等, 2002; 江在森等, 2003a; 沈振康等, 2003), 而本文这一计算结果, 通过考虑主断层滑动因素后所分辨出真正呈现高应变率的异常段在冕宁—宁南—东川一带. 鲜水河断裂带的最大剪应变率及左旋剪应变率高实际上是主断层滑动引起的, 而非真正的剪应变积累.

5) 若从表 1 给出的主断层两侧沿断裂带走向的正应变率 ϵ_h 的分布来看, 西侧的 BC, CD, DE 各段压应变率相对较高(平均值为 -2.6×10^{-8}); 而 EF, FG, GH 各段或呈张性或压应变率较低. 而东侧沿断裂走向的正应变 ϵ_h 分布与西侧大致反对称, BC, CD, DE 各段呈张性(平均值为 1.4×10^{-8}), EF, FG, GH 各段平均来看略显压性. 这样的有序分布

也显示了在断裂带左旋剪切活动的整体变形中, 由于喜德—巧家一带主断层的相对闭锁造成应变分布有序图象, 符合组合孕震模式给出的平推型孕震应力场分布理论模式。

目前我们还不十分清楚川滇地块东边界变形差异性的原因。据历史地震资料, 自 1725 年以来在鲜水河断裂 AB, BC 段共发生 7 级以上地震 8 次, 其中 7.5~7.7 级地震就有 4 次。1900 年以来发生 7 级以上地震 4 次, 其中 7.5 和 7.6 级以上地震各一次(1955 年, 7.5 级; 1973 年, 7.6 级)。FG, GH 段 1789 年以来发生 7 级以上地震 5 次, 其中 7.8 和 8.0 级地震各 1 次(1970 年, 7.8 级)。而 CD, DE, EF 段上 1733 年以来发生 7 级以上地震 2 次, 包括在分段点 F 附近的 1733 年东川 7.7 级地震, 西昌附近的 1850 年 7.5 级地震。1900 年以来没有发生 7 级以上地震。也许近代大地震破裂对断裂带仍有影响, 导致运动变形方式的不一致。

3 讨论和结论

1) 由于地壳运动过程中区域形变场、应变场的不均匀分布, 显著的构造变形往往集中在具有一定宽度的活动地块边界带或活动构造带。活动断裂带(含断裂边缘一定区域)的变形包含应变(纯变形)部分和主断层蠕滑部分。本文提出的专门针对断裂带构造变形分析的方法, 根据活动断裂带主断层分布, 通过以主断层线为轴向两侧延伸划分变形单元, 进行几何应变速率和主断层蠕滑率等多种变形参数的解算, 与区域形变应变场分析方法的不同点在于, 根据断裂带区域观测点间的相对位移, 力图把活动断裂带主断层的蠕滑与边缘区域的弹性应变(纯变形)区分开, 并且直接计算沿断层走向、垂直断层方向的剪应变速率、正应变速率等各种应变参数, 与区域应变速率场分析中通过 NE 与 NW 及 EW 与 NS 方向的第一剪应变速率、第二剪应变速率和主应变速率等来分析与区域主干断裂活动背景的关系的做法相比, 应当是更贴近断裂带的构造变形。

2) 由于本文提出的断裂带构造变形定量分析方法是通过最小二乘直接解算的方法, 只要划定了计算单元, 就可获得唯一解。但开展这样计算的单元划分依赖于观测点分布密度, 要有多余观测值才能求解, 这不同于反演计算。但这一方法的简化模型参数用来反映断裂边缘一定区域的变形, 并没有从理论模型上去逼近真实, 没有考虑变形随着离开断层的距离的非线性衰减, 而是作为平均处理的, 所以对断裂边缘区变形的表达并不严密, 也难免由于观测点分布的不规则对变形参数的计算结果带来一定偏差。但通过这样一条断裂带进行分析, 得出断裂带构造变形分段差异的定性、定量描述是有参考意义的。

3) 由于活动断裂带的构造变形受控于区域地壳运动整体的协调性, 包括地块之间的相互运动, 断裂带整体构造变形具有协调性。因而可通过分析各分段不同变形参数之比值是否协调, 以及从断裂带整体变形协调性来分析异常段, 以识别出断层活动相对闭锁且应变积累速度较高的潜在危险段。

4) 利用 1991—2001 年 GPS 资料给出的速度场数据, 对川滇地块东边界带构造变形的分段计算分析表明, 断裂带上不同段落的变形特征的确有很大差异。断裂带部分段落可能表现为介质强度较弱或断层摩擦阻力较小, 以断层蠕滑为主, 或者说变形集中在主断层较窄范围内。而有的段则处于相对闭锁状态, 跨主断层相对运动不显著而处于弹性应变积累状态。川滇地块东边界具有整体协调性的左旋剪切活动, 则木河一小江断裂带上的冕宁—宁南—东川一带处于断层活动相对闭锁且剪应变积累速度较高的异常区段, 而鲜水河断裂

带特别是北段目前的活动则以主断层的蠕滑为主，弹性应变积累速度不高。

感谢闻学泽、田勤俭研究员对活动构造分析方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 顾国华, 申旭辉, 王敏. 2001. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, **23**(4): 362~369
- 郭增建, 秦保燕. 1979. 震源物理[J]. 北京: 地震出版社, 52~59
- 黄立人, 王敏. 1999. 构造块体的相对运动和应变[J]. 地壳形变与地震, **19**(2): 17~26
- 黄立人, 郭良迁. 2003. 地球表层运动和变形的 GPS 描述[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 17~21
- 黄立人, 符养, 段五杏. 2003a. 由 GPS 观测结果推断中国大陆活动构造边界[J]. 地球物理学报, **46**(5): 609~615
- 黄立人, 杨国华, 王敏. 2003b. 用速度场得到的华北地区活动块体及变形[J]. 地震学报, **25**(1): 72~81
- 江在森, 张希, 陈文胜, 等. 2000. 地形变资料求解应变值的尺度相对性问题研究[J]. 地震学报, **22**(4): 352~359
- 江在森, 张希, 崔笃信, 等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, **44**(5): 636~644
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003a. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, **46**(3): 352~358
- 江在森, 张希, 祝意青, 等. 2003b 昆仑山口西 8.1 级地震前区域构造变形背景[J]. 中国科学, D 辑, **33**(增刊): 163~172
- 李延兴, 黄诚, 胡新康, 等. 2001. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. 地震学报, **23**(6): 565~572
- 李延兴, 杨国华, 李智, 等. 2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学, D 辑, **33**(增刊): 65~81
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, **10**(增刊): 93~100
- 王敏, 张祖胜, 徐明元, 等. 2005. 2000 国家 GPS 大地控制网的数据处理和精度评估[J]. 地球物理学报, **48**(4): 817~823
- 许才军, 董立祥, 施闯, 等. 2002. 华北地区 GPS 地壳应变能密度变化率场及其构造运动分析[J]. 地球物理学报, **45**(4): 497~506
- 许才军, 温扬茂. 2003. 活动地块运动和应变模型辨识[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(3): 50~55
- 杨国华, 谢觉民, 韩月萍. 2001. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制[J]. 地球物理学报, **44**(5): 645~653
- 杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 2002. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场[J]. 地震学报, **24**(4): 337~347
- 杨国华, 韩月萍, 王敏. 2003. 中国大陆几个主要地震活动区的水平形变[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(3): 42~49
- 杨少敏, 王琪. 2003. 昆仑山 8.1 级地震前中国大陆的构造应变背景[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(3): 61~65
- 张培震, 邓启东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, D 辑, **33**(增刊): 12~20
- 周硕愚, 吴云, 秦小军, 等. 2000. 基于多种 GPS 数据研究福建及邻近海域 1994~1997 年地壳水平运动[J]. 地球物理学报, **43**(40): 471~479
- 朱文耀, 符养, 李彦, 等. 2003. ITRF2000 全球无整体旋转约束及最新全球板块运动模型 NNR-ITRF2000VEL[J]. 中国科学, D 辑, **33**(增刊): 1~11
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Jeffrey T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements[J]. Science, **294**: 574~577

QUANTITATIVE ANALYSIS FOR TECTONIC DEFORMATION ON ACTIVE RUPTURE ZONES

Jiang Zaisen¹⁾ Niu Anfu²⁾ Wang Min¹⁾ Li Kaiwu¹⁾
Fang Ying¹⁾ Zhang Xi³⁾ Zhang Xiaoliang³⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) Second Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xian 710054, China

Abstract: On the basis of the regional GPS data with a higher spatial resolution, we present a quantitative analysis method for tectonic deformation of active rupture zones in order to predict the location of forthcoming great earthquakes. Firstly we divide the main fault area into certain deformation units; then derive the geometric deformation and relative displacement parameters of each unit; and finally quantitatively estimate the slip and strain rates in each segment of the rupture zone. Furthermore, by comparing the consistency of deformation in all segments of the whole rupture zone, we can determine the possible anomalous segments as well as their properties and amplitudes. In analyzing the east boundaries of Sichuan-Yunnan block with reference to the GPS velocity data in the period of 1991—2001, we have discovered that the Mianning-Ningnan-Dongchuan segment on the Zemuhe-Xiaojiang fault zone is relatively locked and the left-lateral shear strain rate here is higher.

Key words: active rupture zone; tectonic deformation; GPS; prediction for great earthquake location