

# GPS 初步结果揭示的中国大陆水平 应变场与构造变形

江在森<sup>1</sup> 马宗晋<sup>2</sup> 张希<sup>3</sup> 王琪<sup>4</sup> 王双绪<sup>3</sup>

1 中国地震局分析预报中心,北京 100036

2 中国地震局地质研究所,北京 100029

3 中国地震局第二监测中心,西安 710054

4 中国地震局地震研究所,武汉 430071

**摘要** 根据中国大陆不同来源的多个 GPS 区域监测网 1991~1999 年间的观测资料和“中国地壳运动观测网络”基本网 1998~2000 年的观测资料,联合处理得到中国大陆地壳水平运动速度场结果,通过最小二乘配置法建立中国大陆水平运动速度场模型,获得了基于连续介质假设的中国大陆水平应变场(或称为视应变场)初步结果.分析了水平运动、应变场空间分布特征及其与强震的关系,并简要分析了 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级大地震的区域构造变形背景.结果表明:中国大陆中西部构造变形强烈,应变速率值高,又以青藏块体及其边缘和新疆西部最为显著.除川滇、新疆西部外,大部分地区的近东西向断裂存在左旋剪切变形,近南北向的断裂存在右旋剪切变形.而东部地区构造变形相对较弱.强震通常发生在剪切应变率的高值区及其边缘,尤其是与构造变形背景相一致的剪应变率高值区.昆仑山口西 8.1 级地震发生在最显著的东西向左旋剪切应变率高值区,从该区域的应变状态分析,具备近东西向断裂产生巨型走滑破裂错动的构造变形背景.

**关键词** 水平应变场 构造变形 昆仑山口西 8.1 级地震 中国大陆

**文章编号** 0001-5733(2003)-0352-07 **中图分类号** P313 **收稿日期** 2002-02-19,2003-01-20收修定稿

## HORIZONTAL STRAIN FIELD AND TECTONIC DEFORMATION OF CHINA MAINLAND REVEALED BY PRELIMINARY GPS RESULT

JIANG ZAISEN<sup>1</sup> MA ZONGJIN<sup>2</sup> ZHANG XI<sup>3</sup> WANG QI<sup>4</sup> WANG SHUANGXU<sup>3</sup>

1 Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

2 Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China

3 The Second Monitoring Center, China Seismological Bureau, Xian 710054, China

4 Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan 430071, China

**Abstract** From the observations of various GPS networks during 1991~1999 and basic network of China Crustal Movement Observation Network during 1998~2000 in China Mainland, the united solution of horizontal velocities have been calculated in this paper. On the basis of assumption of continuous medium a model of horizontal velocity field is established with the aid of the least square collocation, and the preliminary results of horizontal strain fields (or called apparent strain fields) of China Mainland are presented. The characteristics of spatial distribution of horizontal motion and strain field, and their relationship with strong earthquakes are analyzed. A brief analysis is given for tectonic deformation background of the  $M_S$  8.1 earthquake on the west of

**基金项目** 国家自然科学基金项目(49834020)和国家重点基础研究发展规划项目(G1998040703).

**作者简介** 江在森,男,1956年生,研究员.1982年毕业于武汉测绘学院大地测量系.主要从事大地测量、地震预测及现今地球动力学等方面研究工作. E-mail: bright@seis.ac.cn

Kunlun mountain pass on Nov. 14, 2001. The results show that strong tectonic deformation and high strain rate exist in the mid-western China Mainland, being the most remarkable in Qinghai-xizang block and its margins and western Xinjiang. In most of areas, except Sichuan-Yunnan and western Xinjiang, the nearly east-westward faults show sinistral shear deformation, while the nearly south-northward faults show dextral shear deformation. However the eastern China Mainland shows weaker tectonic deformation. Strong earthquakes occurred in the high-value region and its margins of shear strain rate, especially in the high-value region of shear strain rate in accordance with tectonic deformation background. The  $M_s$  8.1 earthquake on the west of Kunlun mountain pass occurred in the most obvious high-value region of east-westward sinistral shear strain rate, and this region had tectonic deformation background that nearly east-westward fault produced dislocation of huge strike-slip rupture from the situation of strain.

**Key words** Horizontal strain field, Tectonic deformation, The  $M_s$  8.1 earthquake on the west of Kunlun mountain pass, China Mainland.

## 1 引言

中国大陆现今构造运动与变形相当强烈,一直是国际地学界研究大陆构造运动及地球动力学的前沿热点。全球定位系统 GPS 给出大范围地壳运动的高精度定量观测结果,对推动大陆构造变形研究的深入具有十分重要的意义,使中国大陆构造的现今运动与变形研究进入了一个新的阶段<sup>[1-6]</sup>。能否根据 GPS 观测结果来建立中国大陆的应变(速率)场?2000 年 12 月在提交“2001 年度全国地震趋势会商会”的地震形势报告中,马宗晋等人作了这样的尝试<sup>1)</sup>,而 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级大地震恰好发生在反映东西向左旋剪切应变的第二剪切应变率负值区的最高值区(当时作为具有发生强震应变积累背景的地区),说明这方面的工作有深入开展的前景。本文根据 1991~2000 年 GPS 资料解算的中国大陆水平运动速度场的结果<sup>[2,6]</sup>,基于连续介质假设,借助最小二乘配置法通过建立水平运动速度值经验协方差函数获得水平运动速度场模型,建立了中国大陆水平(视)应变场。在此基础上概要分析大陆水平运动的整体性特征,重点分析了水平应变场与构造变形空间特征,及其与强震活动的关系。

## 2 资料及处理方法

自 20 世纪 80 年代末开始在中国大陆的川滇、青藏、华北、河西、新疆等区域逐步建立了 GPS 监测

网,但这些网的控制范围和观测点很有限,直到 1998 年之前,由于各个区域 GPS 监测网是相对独立的,并没有按一定的密度形成对整个中国大陆的空间控制。1998 年大型科学工程“中国地壳运动观测网络”建网,并开始了基本网 81 个站的观测,初步构成了对全国一二级块体的地壳运动观测控制能力。本文利用上述不同来源的 GPS 观测资料整体处理结果(由王琪用 GIPSY/OASIS - 软件处理<sup>[6]</sup>)获得的观测点水平运动速度数据(剔除可能有粗差的观测点后,共 331 个点),建立中国大陆的水平(视)应变率场。

### 2.1 确定中国大陆整体水平运动速率场经验协方差函数

考虑到观测点的空间分布不均匀性问题,地应变资料求解的应变具有空间尺度的相关性<sup>[7]</sup>,即只有在测点密集的区域才能分辨出局部更显著的应变,而测点稀疏的区域只能获得相对测点跨度的平均应变。因此,文中采用先通过最小二乘配置的空间信号拟合推估法,由观测点群水平运动速度值获得拟合推估的水平运动速度场模型,再基于此模型求解应变场。用最小二乘配置根据空间有限的观测点进行观测信号的空间拟合推估,关键在于根据观测信号协方差分布确定协方差函数<sup>[8,9]</sup>。图 1 给出了中国大陆 GPS 观测点水平运动速率协方差(综合 EW、NS 两个分量)的空间分布情况。图中采样点是由距离相近的点组计算的协方差取均值而获得的。由于 GPS 观测点的分布很不均匀,经过取平均值后的协方差采样点的分布仍不很规则。近距离的互协

1) 马宗晋,陈鑫连等. 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”工程中心.“中国地壳运动观测网络”工程 2001 年度地震形势报告,2001 年度全国地震趋势会商会,2000.

方差与自协方差约相差 36%，这反映根据观测点给出的水平运动速率观测值建立整个区域的水平运动速度场，总体上观测信号约有 36% 属于随机误差的扰动。从图 1 中看到在接近 1500km 处协方差转入负值。而作为经验协方差函数，要求在超出一定距离后其取值趋近于零。若由限定 1500km 处协方差接近于零为条件，对采样点拟合，可得到图中  $p2$  高斯型函数曲线，相应地需要加入信号的 36% 的随机误差进行滤波，这样处理得到的水平运动速率场过于平缓。为了兼顾反映速度场空间分布的不均匀性，我们选曲线  $p1$  ( $k = 0.0016$ ) 作为实际计算时采用的高斯型经验协方差函数，加入相对于 25% 信号幅度的随机误差作信号滤波。这样获得的水平运动速度场属于较大空间尺度的低频的速度场，即观测点群速度值的某些局部剧烈变化可能被平滑掉。

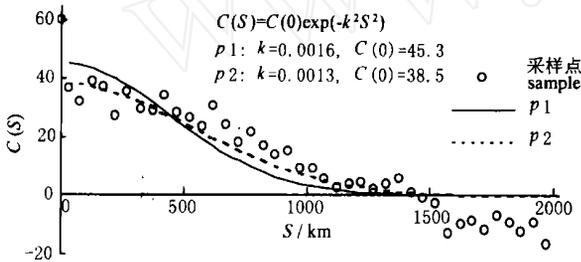


图 1 中国大陆 GPS 观测站水平运动速度协方差 - 距离分布及经验协方差函数  $C(S)$  表示和距离有关的协方差

Fig. 1 Covariance-distance distribution and empirical covariance function of horizontal velocities of GPS stations in China Mainland

2.2 用最小二乘配置进行大区域应变场整体解算

在文献[10]中介绍了利用最小二乘配置法通过经验协方差函数，建立位移场模型，再通过求偏导整体解算视应变场的方法。由于这套方法计算公式是平面直角坐标系的，因此采用了高斯投影或等面积投影，把 GPS 站点的坐标和运动速度矢量都投影到平面直角坐标系之后进行计算。当研究区域较大时，需要考虑投影平面经、纬线方向（表示正 WE 和 SN）与投影平面直角坐标  $X、Y$  轴向的偏差角，才能使所计算的有关应变参数有确切的方向含义。这样，假设某监测网共有  $m$  个测点， $L = (u_1, u_2, \dots, u_m, v_1, v_2, \dots, v_m)^T$  为位移观测值。其经纬度坐标为  $(L_i, B_i)$ ，相应投影平面  $X, Y$  坐标值  $x_i, y_i, i = 1, \dots, m$ 。设计算点  $i$  所在子午线切线方向与投影平面直角坐标系  $Y$  轴方向夹角为  $\alpha_i$ ，修正到

实际指向正 WE 和 SN 方向的相应直角坐标系的坐标值为  $x_i, y_i$ 。假定对  $x$  向与  $x$  向位移， $y$  向与  $y$  向位移间协方差，建立参数取值分别为  $f_{xx}(0), k_1; f_{yy}(0), k_2$  的高斯型经验协方差函数，而  $x$  向位移与  $y$  向位移的协方差为零，令

$P = (p_1, \dots, p_m, q_1, \dots, q_m)^T = (C_{tt} + C_{nn})^{-1} L$ ，则研究区域任一点的水平位移可表示为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(u, u_1), \dots, c(u, u_m), 0, \dots, 0 \\ 0, \dots, 0, c(v, v_1), \dots, c(v, v_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_m \\ q_1 \\ \dots \\ q_m \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$E$  向和  $N$  向两位移分量求正 WE、SN（计算点经、纬线切线）方向偏导为

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \sum_{i=1}^m \{ -2k_1^2(x - x_i)f_{xx}(0)e^{-k_1^2d_i^2}p_i \cos \alpha_i - 2k_1^2(y - y_i)f_{xx}(0)e^{-k_1^2d_i^2}p_i \sin \alpha_i \}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \sum_{i=1}^m \{ 2k_1^2(x - x_i)f_{xx}(0)e^{-k_1^2d_i^2}p_i \sin \alpha_i - 2k_1^2(y - y_i)f_{xx}(0)e^{-k_1^2d_i^2}p_i \cos \alpha_i \}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \sum_{i=1}^m \{ -2k_2^2(x - x_i)f_{yy}(0)e^{-k_2^2d_i^2}q_i \cos \alpha_i - 2k_2^2(y - y_i)f_{yy}(0)e^{-k_2^2d_i^2}q_i \sin \alpha_i \}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \sum_{i=1}^m \{ 2k_2^2(x - x_i)f_{yy}(0)e^{-k_2^2d_i^2}q_i \sin \alpha_i - 2k_2^2(y - y_i)f_{yy}(0)e^{-k_2^2d_i^2}q_i \cos \alpha_i \}, \quad (5)$$

根据应变的定义，由(2)~(5)式即可求出计算区内任一点的应变张量。由于文中在计算中是假定地壳介质为连续介质，对实际上存在的块体边界或断层相对运动等都没有考虑，所给出的这种应变场可称为视应变场。

3 中国大陆应变场与构造变形特征

3.1 水平运动特征

用最小二乘配置按以上的高斯型经验协方差函数及式(1)建立的中国大陆地壳水平运动速度场模型，每  $2^\circ \times 2^\circ$  取一网格点，给出的速度场分布如图 2a。此图所勾画的中国大陆水平运动图像与 GPS 观测站运动速度图(文献[6]中图 2)总体上是一致的，由于经过滤波，其空间变化更规则。与文献[11]双

三次样条函数反演所得同样  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  网格点的相应结果(文献[11]中图 2)比较一致,但本文结果反映的空间变化稍平缓些. 中国大陆地壳运动的空间差异西部显著大于东部. 中国西部总体上表现为近 SN-NE 向的压性运动和近 EW-NW 向的张性运动. 喜马

拉雅带 N-NE 向运动速率最大,向北逐渐衰减. 这种衰减不同区间很不一致. 水平运动方向自西向东逐渐往东南偏转,偏转最显著的区域是西藏东南与川滇地区,即印度板块东触角附近区域,形成了一种顺时针旋转的运动态势.

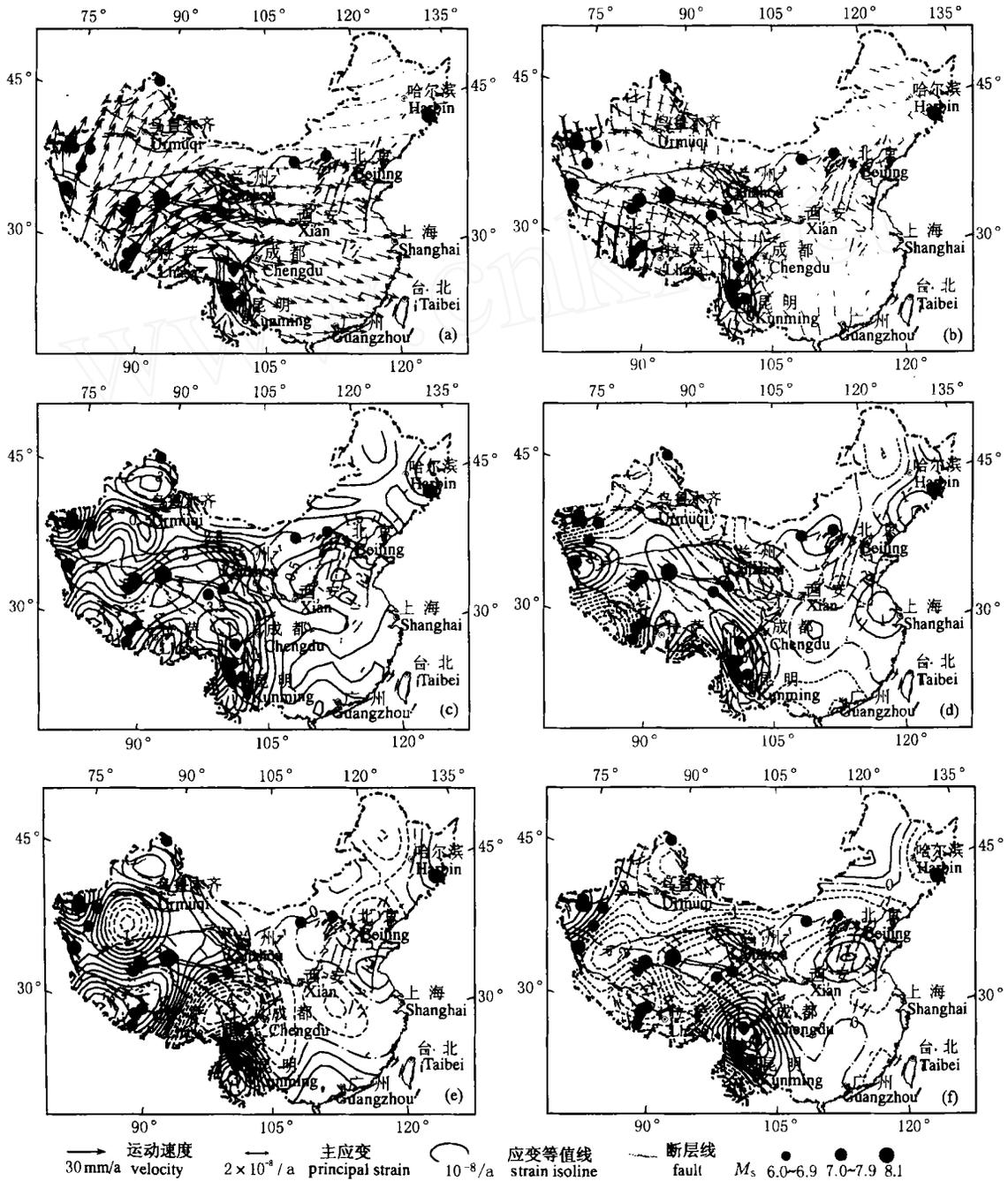


图 2 中国大陆地区地壳水平运动及视应变场分布图

(a) 地壳水平运动速度图(模型结果);(b) 主应变率;(c) 最大剪切应变率( $\dot{\gamma}_2$ );

(d) 面膨胀率;(e) 第一剪应变率( $\dot{\gamma}_1$ );(f) 第二剪应变率.

Fig. 2 The distribution of horizontal crustal movement and apparent strain field in China Mainland

### 3.2 应变场特征

为了便于分析,文中仍按每  $2^\circ \times 2^\circ$  一个网格点给出中国大陆主应变率分布图 2b(用两对正交箭头表示主应变率,两端为箭头表示张,两端为箭尾表示压). 中国西部的主压应变率的优势分布方向为 NE-SN 向,与由双三次样条函数反演所得主应变率图<sup>[12]</sup>相比(由于文献[11]中主应变图有误,这里只与文献[12]比较),除在川滇地区存在一定程度差异外,在大部分地区是一致的,与震源机制反演得出的应力场主应力方向<sup>[13]</sup>也是一致的. 而西藏东南与川滇地区特殊的水平运动形式,形成了主压应变率方向在这里从 NE-EW-ES-NS 逐渐偏转以致扭转了近  $180^\circ$ ,大体上是环绕印度板块东触角和青藏高原东缘阻挡带而偏转的,这是很有意义的现象. 这种主应变方向的变化与水平运动速度方向(文献[2,6]及本文图 1)变化具有协调性,且大体与这一区域震源机制解及其反演给出的应力场方向变化一致<sup>[13~16]</sup>. 但双三次样条函数反演的结果<sup>[12]</sup>未反映出这种特殊的变化,在此区域主压应变基本上为 NE 向(与川滇地区的应力场主压应力方向是不一致的),这可能反演模型选择有关.

若把最小二乘配置给出的主压应变率矢量对接起来,从喜马拉雅边界带开始,可以分出几路压应变作用的方向,一是自西向东拉萨至昆明一带主压方向形成的一个半圆环旋回;第二是中部主压应变沿 NE 向延伸,直至祁连、阿拉善;第三是沿 NW-SN 向延伸直至新疆(但中间衔接不好).

图 2c 给出的中国大陆最大剪应变率分布也显示西(部)强东(部)弱的特征,青藏块体地区最大剪应变率高值区范围相当大,块体中部从西藏南部至格尔木 NE 向分布有一很大范围的应变率值大于  $3.5 \times 10^{-8}/a$  高值区;其次是川滇地区;新疆西部乌恰一带也是最大剪应变率值大于  $3.5 \times 10^{-8}/a$  的区域.

图 2d 为面膨胀应变率等值线图(图 2d~f 中,对正值、负值和零值区的等值线分别用实线、短虚线和长虚线表示). 其中 3 个面膨胀压缩高值区都在中国西部的西边界和南边界,可能是中国大陆水平运动的边界动力作用的反映. 但青藏块体中部大部分区域为张性区,这是值得研究的问题.

为了通过视应变场来分析构造变形特征,我们分别计算了 NE 与 NW 向剪应变(称为第一剪应变,记为  $\gamma_1$ )和 EW、SN 向剪应变(称为第二剪应变,记为  $\gamma_2$ ).  $\gamma_1$  以 NE 向左旋剪切和 NW 向右旋剪切为

正值;  $\gamma_2$  以 SN 向左旋剪切和 EW 向右旋剪切为正值. 这样可以根据不同区域的主干断裂带的走向,分别查看第一剪应变率和第二剪应变率的情况,便于了解当前的应变状态与断裂带长期构造变形的关系.

图 2e 中不同区域的正负值交替出现,没有很明显的优势. 中国西部共有 5 个  $\gamma_1$  相对高值区(正值、负值都考虑),3 个正值区对应的 6 级以上地震的数量多于负值区对应的地震. 但这不一定表明只有正值(NE 向左旋剪切和 NW 向右旋剪切)才有地震危险,很可能要结合分析区域主要构造的走向以及构造运动背景. 事实上,从喜马拉雅往北至祁连的几条主要且较为平行的断裂近似东西向分布,而云南地区红河、曲江断裂近似于 NW 向分布(图中反映右旋剪切变形较高值,与构造运动背景一致),四川鲜水河断裂呈现与构造运动背景一致的 NW 向左旋剪切变形;新疆西部西昆仑北缘断裂近似于 NW 向(反映与构造背景一致的右旋剪切变形)、南天山断裂带西段也近似于 NE 向分布,其左旋剪切比右旋剪切稍明显些(与本区多条断裂的构造性质基本相符).

图 2f 给出的第二剪应变率分布在中国大陆中西部(除新疆西部,川滇地区外)大部分地区及华北很大范围内均表现为负值区(图中虚线区域),反映了中国大陆构造变形场有相当大范围的近东西向断裂带以左旋剪切变形为主,而近南北向断裂带以右旋剪切变形为主.

## 4 水平视应变场与昆仑山口西 $M_s$ 8.1 等强震活动的关系

上述水平应变场各种应变参数的空间分布图中给出了 1995 年以来 6 级以上地震的震中分布. 大多数的 6 级以上地震发生在最大剪应变率、第一剪应变率、第二剪应变率的高值区或其边缘. 最大剪应变率分布图(图 2c)中,川滇地区的高值区可能与那里特殊的水平旋转运动有关,喜马拉雅中部的高值区及新疆乌恰一带的高值区可能一方面反映了动力边界活动,另一方面也可能与那里 GPS 观测点相对密集有关. 而青藏块体内部的跨羌塘、昆仑、柴达木几个次级块体的大范围剪应变率高值区则是十分突出的应变率异常区,东昆仑、西昆仑东段及玉树断裂附近震级偏大.

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震是中

国境内近 50 年来最大震级的地震。全国地震台网测定的微观震中为  $36.2^{\circ}\text{N}, 90.9^{\circ}\text{E}$ 。余震分布和宏观考察表明,这次大地震的破裂是单侧发展的,仪器定位给出的微观震中只是起始破裂点。根据宏观考察结果,最大破裂错动区大约在  $93.2^{\circ}\text{E}$ 。其破裂方式基本上是纯走滑错动。破裂长度相当长,约  $425\text{km}^{[16]}$ ,比通常 8 级地震的破裂长度要长得多。而这次地震就发生在图 2c 中这一大规模的最大剪应变率 ( $3.5 \times 10^{-8}/\text{a}$ ) 高值区内,震中位于该高值区的北部边缘。由图 2f 可见,8.1 级地震发生的最大破裂(宏观震中)区恰好位于整个中国大陆第二剪应变率负值区的最高值区。从应变场反映的 EW 向左旋剪应变背景与大地震发生的近 EW 向左旋走滑错动是相当一致的。看到 GPS 观测给出的最大剪应变率、第二剪应变率的极值区都偏于发震断层的南侧,也反映出高应变积累主要在主干断裂南侧,正是这样的构造变形背景下,这次大地震的破裂错动才是以断裂南盘向东的错动为主。总之,中国大陆尤其是西部 2001 年昆仑山口西 8.1 级、1997 年西藏玛尼 7.5 级、1996 年新疆西昆仑附近 7.1 级等十多次地震大多发生在与主要断裂构造运动背景相一致的剪切应变高值区或其边缘。另外,从图 2d 给出的面膨胀应变率分布来看,强震活动与面膨胀应变率压性区或张性区的分布没有很明显的关系,其中发生 8.1 级地震的区域是面膨胀应变率的张性区;结合图 2b 主应变率分布图,这里的 NW 向主张应变率的确大于 NE 向主压应变率。这样的区域应变场背景又恰好与典型的走滑型破裂 3 个主轴压应力分布一致,即是 NE 向压应力最大, NW 向压应力最小,垂直向压应力介于二者之间。而 NW 向的主张应变率量值高于 NE 向的主压应变率,反映了地平面内这两个相互垂直方向的应力差异突出。正是在这样的区域构造变形背景下,才有利于左旋破裂错动的大规模发育,可以使震前积累的剪应变较充分释放。这也助于理解这次 8.1 级地震的破裂长度较长以及余震的震级强度偏低等问题。

## 5 讨论和初步结论

应用最小二乘配置空间信号拟合推估法,由 2000 年前的 GPS 观测结果所给出的中国大陆应变场空间分布表明,西部地区的应变率量值明显高于东部。剪应变率量值较高的区域主要分布在青藏块体及其边缘和新疆西部。中国西部的中部地区主压

应变优势方向为 NE 向,反映了印度板块向北偏东方向的推挤作用影响。主压应变轴自西向东逐渐向东偏转,尤其在藏东南至川滇,主压应变轴呈现 NE-WE-ES-NS 连续偏转。另外,首当其冲受印度板块推挤影响的青藏块体内部大部分地区的面膨胀应变呈张性,这些是有待深入研究的问题。

初步分析中国大陆应变场空间分布与强震活动的关系表明,强震通常发生在区域(视)应变场剪应变的高值区或其边缘,尤其是与区域主干断裂构造运动相一致的剪应变率高值区。可以通过计算第一、第二剪应变率,结合区域构造分布来分析判定与强震孕育有关的应变积累背景。强震活动与应变场的面膨胀应变率压性区和张性区的分布关系不甚明显。

基于连续介质的假设,应用最小二乘配置法通过经验协方差函数建立水平运动速度场模型所求解的水平应变率场的空间分布,能够较客观地反映 GPS 观测点所揭示的一定空间尺度应变场的特征,对中、长期强震危险区预测有参考意义。虽然把中国大陆这样一个大的区域作为连续介质的假设不符合实际,但在构造断裂错综复杂, GPS 观测点在许多区域的分布密度不够的条件下,这样处理不失为一种简便而有效的方法,或者说是一级近似的概要表现。需要指出的是,应用最小二乘配置法通过经验协方差函数建立速度场模型,是反映相对较大空间尺度的低频的速度场,对观测点群所反映的某些局部剧烈变化有可能被平滑掉,而有些测点过于稀疏的区域的推估结果亦有可能失真。中国大陆整体应变场的解算尚有待观测网的扩建和资料的丰富,以及解算方法引入不连续块体组合场,使结果更趋实际。这样将提供更为精细的应变场解算结果,为地震预测提供更为精细的基础资料。

## 参考文献

- [1] 马宗晋,陈鑫连,叶叔华等. 中国大陆现今地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, 2001, 46(13): 1118 ~ 1120  
MA Zongjin, CHEN Xinlian, YE Shuhua, et al. GPS study of current crustal movement of China Mainland. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(13): 1118 ~ 1120
- [2] 王 琪,张培震,牛之俊等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. 中国科学(D 辑), 2001, 31(7): 529 ~ 536  
WANG Qi, ZHANG Peizhen, NIU Zhijun, et al. Current crustal movement and tectonic deformation of China Mainland. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(7): 529 ~ 536
- [3] 朱文耀,程宗颐,王小亚等. 中国大陆地壳运动的初步研究. 中国科学(D 辑), 1997, 27(5): 385 ~ 389

- ZHU Wenyao, CHENG Zongyi, WANG Xiaoya, et al. Preliminary study on crustal movement of China Mainland. *Science in China (Series D)*, 1997, **27**(5):385~389
- [ 4 ] 朱文耀,王小亚,程宗颐等. 利用 GPS 技术监测中国大陆地壳运动的初步结果. *中国科学(D 辑)*,2000, **30**(4):394~400
- ZHU Wenyao, WANG Xiaoya, CHENG Zongyi, et al. Preliminary result of crustal movement of China Mainland monitored by using GPS technology. *Science in China (Series D)*, 2000, **30**(4):394~400
- [ 5 ] 张 强,朱文耀,程宗颐等. 中国地壳各构造块体运动模型的初建. *科学通报*,2000, **45**(9):960~967
- ZHANG Qiang, ZHU Wenyao, CHENG Zongyi, et al. Preliminary establishment of tectonic block motion model of China Crust. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(9):960~967
- [ 6 ] Wang Qi, Zhang Pei-zhen, T Jeffrey, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 2001, **294**:574~577
- [ 7 ] 江在森,张 希,陈文胜等. 地形变资料求解应变值尺度相对性问题研究. *地震学报*,2000, **22**(4):352~359
- JIANG Zaisen, ZHANG Xi, CHEN Wensheng, et al. Study on scale dependence of strain value obtained from crustal deformation data. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **22**(4):375~383
- [ 8 ] [奥]赫尔墨特·莫里茨著,宁津生等译. 高等物理大地测量学. 北京:地震出版社,1984.50~125
- M Helmut (author). Ning Jing-sheng, et al (translators). *High Physics Geodetic Survey*. Beijing: Seismology Press,1984.50~125
- [ 9 ] 张 希,江在森. 用最小二乘配置获得地形变应变场动态图像的几个问题研究. *地壳形变与地震*,1999, **19**(3):32~39
- ZHANG Xi, JIANG Zaisen. Study on some questions of dynamic pictures of crustal deformation and strain fields obtained by the least square collocation. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1999, **19**(3):32~39
- [ 10 ] 江在森,张 希,陈 兵等. 华北地区近期水平运动与应力应变场特征. *地球物理学报*,2000, **43**(5):657~665
- JIANG Zaisen, ZHANG Xi, CHEN Bing, et al. Characteristics of recent horizontal movement and strain-stress field in the crust of North China. *Chinese J. Geophys.*, 2000, **43**(5):657~665
- [ 11 ] 杨少敏,游新兆,杜瑞林等. 用双三次样条函数和 GPS 资料反演现今中国大陆构造形变场. *大地测量与地球动力学*, 2002, **22**(1):68~75
- YANG Shaomin, YOU Xinzhao, DU Rui-lin, et al. Contemporary horizontal tectonic deformation fields in China inverted from GPS observation. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, **22**(1):68~75
- [ 12 ] 杨少敏. 双三次样条函数拟合法和中国大陆构造形变场研究 [硕士学位论文]. 武汉:中国地震局地震研究所,2002
- [ 13 ] 杜兴信,邵辉成. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场. *地震学报*,1999, **21**(4):354~360
- DU Xingxin, SHAO Huicheng. Inversing present-day tectonic stress field of China Mainland from focal mechanism solutions. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, **21**(4):354~360
- [ 14 ] 周硕愚,帅平,郭逢英等. 中国福建及其边缘海域现时地壳运动定量研究. *地震学报*,2000, **22**(1):66~72
- ZHOU Shuoyu, SHUAI Ping, GUO Fengying, et al. A quantitative research for present-time crustal motion in Fujian Province, China and its marginal sea. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **22**(1):75~83
- [ 15 ] 崔效锋,谢富仁. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究. *地震学报*,1999, **21**(5):513~522
- CUI Xiaofeng, XIE Furen. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in Southwest China and its adjacent area. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, **21**(5):562~572
- [ 16 ] Xu Xi-wei, Chen Wen-bin, Ma Wen-tao, et al. Surface rupture of the Kunlunshan earthquake ( $M_s8.1$ ), Northern Tibetan Plateau. China. *Seismological Research Letters*, 2002, **73**(6):883~892