

文章编号: 1671-8860(2004)09-0768-04

文献标识码: A

# 长江三峡 GPS 处理结果和应变背景场

杜瑞林<sup>1,2</sup> 乔学军<sup>1,2</sup> 杨少敏<sup>1,2</sup> 王琪<sup>1,2</sup>

(1 中国地震局地震研究所, 武汉市洪山侧路 40 号, 430071)

(2 中国地震局地壳应力研究所, 北京市德外西三旗, 100085)

**摘要:**采用 Bernese GPS Software 4.2 对长江三峡工程诱发地震监测系统 GPS 监测网络 1998~2003 年的 6 期观测数据进行了处理, 结果表明, 三峡库区与华南块体的水平相对运动在  $0 \sim 3\text{mm/a}$  ( $\pm 0.1 \sim \pm 2.0\text{ mm/a}$ ); 蓄水导致的垂直形变区域主要集中在茅坪-香溪-巴东库段, 近岸点垂直沉降的量级在  $10 \sim 35\text{mm}$  左右, 最大峰值区域香溪约  $35\text{mm}$  ( $\pm 8.6\text{mm}$ ), 垂直形变沿远离库中心方向迅速衰减。采用贝塞尔双三次样条函数模型拟合该地区的应变率, 推算各类水平应变场, 结果表明, 蓄水前各种应变背景在  $10^{-9}/\text{a} \sim 10^{-10}/\text{a}$  量级。作为构造稳定地区, 三峡库区近期因蓄水导致大规模形变, 从而诱发中强地震的可能性不大。

**关键词:**三峡水库; 蓄水; GPS; 形变; 水平应变场

中图法分类号: P228.42

2003 年 6 月 1 日, 长江三峡水库开始开工建设以来的首次正式蓄水, 短短十几天里, 水位迅速抬升到  $135\text{m}$ , 水体荷载净增约  $100\text{亿 m}^3$ , 巨大的水体荷载造成的库盆形变和库岸的差异运动, 以及由此产生的工程安全、诱发地震、边坡稳定问题是各界关心的焦点。有关理论模拟的研究参见文献[1~6]。本文就这一问题给出了 GPS 的实测结果, 并对库区的应变背景进行了分析。

## 1 观测与数据处理

长江三峡 GPS 监测网 1998 年建成, 是长江三峡工程诱发地震监测系统的组成部分, 由巴东(BADN)、兴山(GUFU)GPS 固定观测站和 21 个 GPS 流动观测站组成。蓄水前(2003 年 5 月)又建立长岭(CHLN)、茅坪(MAOP)、大金坪(DAJP)、卢家山(LUJA)和茶店子(CHAD)5 个临时 GPS 固定站, 并增加银杏沱(YINX)、太平溪(TPXN)、郭家坝(GUOJ)、香溪(XAXI)4 个流动观测站, 使得全网测站总数达到 32 个, 主要集中在宜昌-巴东的三峡水库库段, 站间平均间距约  $15\text{km}$ , 分布基本均匀, 并控制了三峡工程的主要敏感区域和库首区的各主要断层(图 1)。全网截至目前已进行了 6

期 GPS 流动观测(1998、1999、2000、2001、2003/5、2003/6), 观测采用 Ashtech Z-12 和 AOA Benchmark 两种接收机, 并全部采用 Choke-ring 天线。1~4 期流动观测每测站观测时间不少于  $96\text{h}$ , 第 5~6 期观测分别在 2003 年三峡水库首次蓄水前后进行, 每测站观测时间累计不少于  $60\text{h}$ 。所有观测采样间隔均为  $30\text{s}$ , 卫星截止高度角为  $10^\circ$ 。

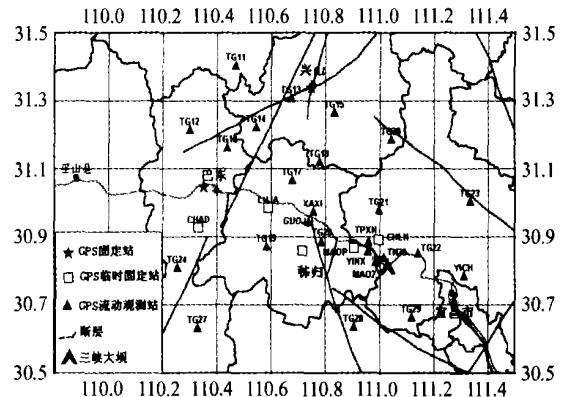


图 1 长江三峡 GPS 监测网

Fig. 1 GPS Network in the Three Gorges Area

本文采用瑞士伯尔尼大学研制的 Bernese GPS Software 4.2 对所获取的 6 期观测数据进行了处理。Bernese 软件的处理步骤具体见文献[7~

9]。为了提高处理精度, 伯尔尼软件中引进多种模型改正, 如固体潮汐改正和电离层改正, 在对流层改正的基础上, 进一步求对流层参数, 采用十分有效的求解相位观测值模糊整周数的 QIF(准无电离层影响的模糊整周解算法)等方法。对于 Bernese 软件所给出的每周周平差结果, 利用同时参加处理的各 IGS 站在 ITRF00 参考框架下的坐标和速度, 通过 7 参数转换, 将单个测站的处理结果旋转至统一的参考框架(ITRF00), 所选用的 IGS 站有位于中国境内的 SHAO、WUHN、LHAS、URUM、BJFS、KUNM、CHUN, 以及中国大陆周边地区的 POL2、KIT3、SE-

LE、KSTU、TSKB、TAEJ、GUAM、IRKT、NTUS、USUD、I-ISC 等。

为了检验结果的可靠性, 还采用 GIPSY 软件对同样的数据进行了对比处理, 处理结果与 Bernese 结果基本一致。

## 2 处理结果

图 2 给出了部分 GPS 测站东西向、南北向和垂直向的时间序列。

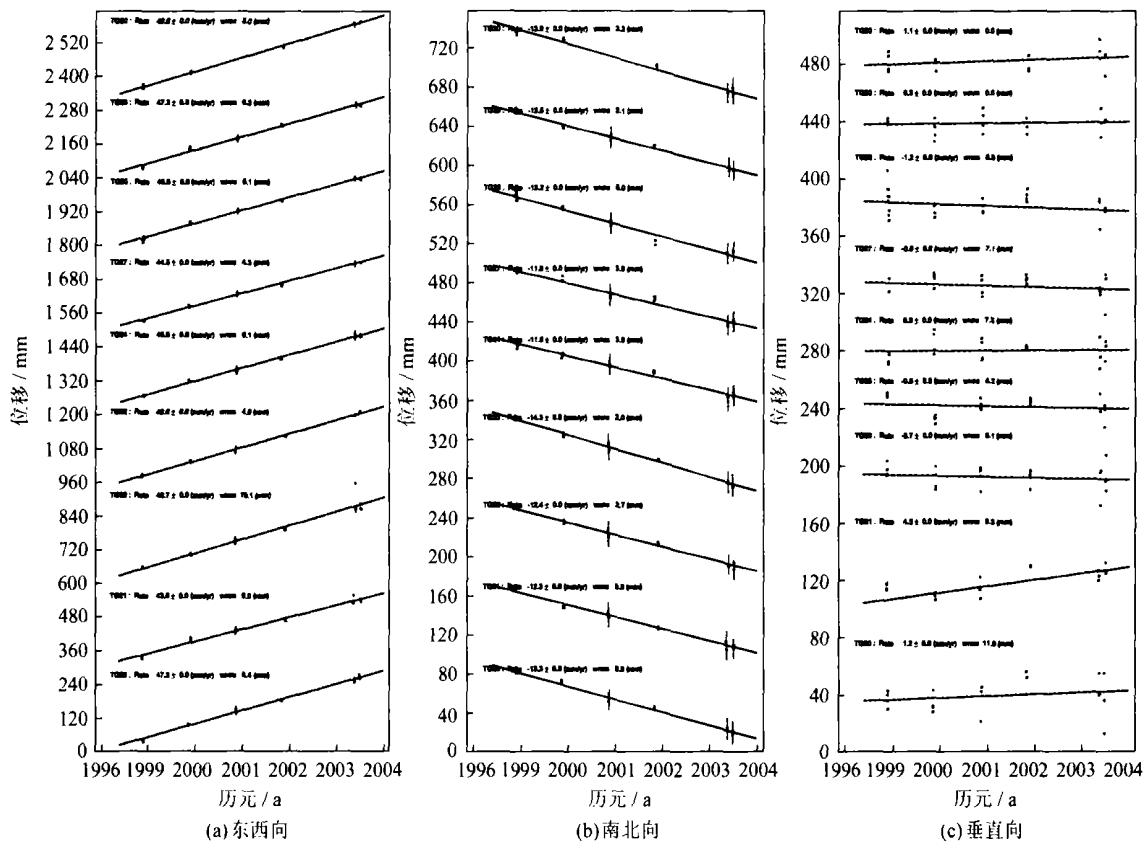


图 2 部分 GPS 测站的时间序列

Fig. 2 Time Series of Several GPS Stations

Bernese 软件所给出的测站坐标的标称精度 RMS 水平向为  $1\sim3$  mm, 垂直向为  $3\sim6$  mm, 站间基线定位精度一般都优于 2mm; 而 GIPSY 软件结果为东西向、南北向优于  $3\sim5$  mm, 垂直向优于  $9\sim12$  mm。与 GIPSY 软件相比, Bernese 对误差的估算较为乐观。以上两种软件的处理结果与中国地壳运动观测网络 GPS 数据处理结果定位精度<sup>[10]</sup>一致, 甚至稍优, 可以满足地壳形变研究的需要。

从数据处理中得到了三峡 GPS 监测网各测站在 ITRF00 框架中的水平运动速率, 其中各测站

东西向的运动速率在  $32.8\sim35.4$  mm/a 之间 ( $\pm 0.50\sim\pm 1.80$  mm/a), 南北向在  $-12.2\sim-14.3$  mm/a 之间 ( $\pm 0.52\sim\pm 1.83$  mm/a), 平均值与朱文耀<sup>[11]</sup>利用 3a 多的连续数据给出的武汉站水平运动速率(东西向  $33.6\pm 0.3$  mm/a, 南北向  $-12.8\pm 0.2$  mm/a, ITRF00 框架)相当。

对测站间基线的统计结果表明, 各 GPS 测站 5a 来相对于 BADN 固定站基线长度复测的变化在  $0.02\sim6.42$  mm 之间 ( $\pm 0.26\sim\pm 1.44$  mm), 这一结果既包含了 5a 来 GPS 测站监测到的相对运动, 也包含了蓄水造成的水平位移量。GPS 测量结果

还显示, 各测站与华南块体的水平相对运动在 0 ~ 3mm/a ( $\pm 0.1 \sim \pm 2.0$  mm/a), 表明三峡地区 GPS 测站间的水平相对运动微弱, 蓄水造成的水平形变较小, 这与华南块体的构造稳定性直接相关。

GPS 的垂向误差一般是水平向的 2~3 倍, 但 GPS 还是可以反映足够大(5mm 以上)的地壳垂直形变。封二彩图 1 给出了蓄水前后三峡库区各 GPS 测站高程变化的监测结果。这一结果反映了蓄水造成地壳垂直位移的基本状况: 垂直向主要变形区域出现在坝址和香溪库段, 其垂直沉降分别达到 21.9mm 和 34.5mm, 近岸点的沉降值一般约在 10~35mm, 垂直形变表现为随距库心的距离增大而减小, 与文献[2, 3]中 180m 水位的模拟结果趋势类似。本文的实测结果与 Wang<sup>[4]</sup> 按 138m 水位所作的模拟结果相比具有明显的一致性: 出现垂直形变峰值的范围能够对应, 在坝址附近的 TPXN 和 YINX 等测站, Wang<sup>[4]</sup> 的数值模拟结果沉降约为 28mm, Bernese 软件处理获取的 GPS 实测结果为 17.8mm 和 21.9mm。

GPS 实测结果表现为垂直沉降随距库中心距离的增加而迅速减小, 认为可能是因为 135m 的蓄水高程水体荷载的净增量还不是足够大, 作用范围比较有限, 加之蓄水后的 GPS 观测在 6 月 17 日~7 月 9 日期间进行, 观测尚不能很好地反应蓄水造成的地壳形变的滞后效应。

### 3 应变率场

利用 GPS 测量结果和美国纽约州立大学的反演程序<sup>[12, 13]</sup>, 采用贝塞尔双三次样条函数模型拟合了蓄水前三峡地区的速度场, 推算各类水平应变率。

借用欧拉转动方程, 球面上任一点的三维速度场  $u(\hat{x})$  可以通过一个连续的转动矢量函数  $W(\hat{x})$  来表示, 即

$$u(\hat{x}) = rW(\hat{x}) \times \hat{x} \quad (1)$$

式中,  $r$  为地球半径;  $\hat{x}$  为地表某点的径向单位矢量, 可表达为经纬度的函数;  $W(\hat{x})$  可表达为曲线格网节点上的双三次样条函数<sup>[14]</sup>, 而节点间的  $W(\hat{x})$  值及其偏导数值利用曲线格网节点上双三次样条函数内插确定。在解算  $W(\hat{x})$  的过程中, 水平速度场  $u(\hat{x})$  模型在最小二乘意义上最佳逼近 GPS 测站速度。水平应变率场的三个分量 ( $\epsilon_{\theta\theta}, \epsilon_{\phi\phi}, \epsilon_{\psi\psi}$ ) 可表达为转动矢量函数  $W(\hat{x})$  的微分:

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r}\Theta \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta} = -\Phi \cdot \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\phi\phi} = \frac{1}{r \cos \theta}\Phi \cdot \frac{\partial u}{\partial \phi} = \frac{\Theta}{\cos \theta} \cdot \frac{\partial W}{\partial \phi} + \frac{u_r}{r} \quad (3)$$

$$\epsilon_{\psi\psi} = \frac{1}{2} \left( \Theta \cdot \frac{\partial W}{\partial \theta} - \frac{\Phi}{\cos \theta} \cdot \frac{\partial W}{\partial \phi} \right) + \frac{u_r}{r} \quad (4)$$

式中,  $\Phi$  和  $\Theta$  分别为指向东、北方向的单位矢量。一般而言, 可忽略垂直速度分量  $u_r$  对水平应变率的影响。

在计算过程中, 直接利用大地坐标计算了  $0.2 \times 0.2^\circ$  网格节点的各类水平应变率场(封二彩图 2)。彩图 2(a)为反演得到的水平速度模型; 彩图 2(b)中箭头的方向代表主应变率的方向, 带箭头直线的长短代表主应变率的大小, 主应变场表明三峡库首区外围属北西向的压缩为主, 年相对变化率约为  $2.0 \times 10^{-10}$ ; 第一剪应变 ( $\epsilon_{\theta\theta} - \epsilon_{\phi\phi}$ ) (彩图 2(c)) 在  $-1.6 \times 10^{-10}/a \sim 1.2 \times 10^{-10}/a$  之间; 第二剪应变  $2\epsilon_{\phi\phi}$  (彩图 2(d)) 以正值为主, 从 0 增至  $3.6 \times 10^{-10}/a$ ; 最大剪应变  $\sqrt{(\epsilon_{\theta\theta} - \epsilon_{\phi\phi})^2/4 + \epsilon_{\psi\psi}}$  (彩图 2(e)) 在  $0.2 \times 10^{-10}/a \sim 1.8 \times 10^{-10}/a$ ; 面膨胀率  $(\epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{\phi\phi})/2$  在  $-9.0 \times 10^{-9}/a \sim 5.0 \times 10^{-9}/a$  之间。结果表明, 三峡库区各种水平应变率均在  $10^{-9}/a \sim 10^{-10}/a$  量级, 属相对构造运动背景十分微弱的地区。

### 4 结语

1) 利用 Bernese 软件对三峡地区的 6 期 GPS 测量数据进行处理, 获取了三峡库区的水平运动和因蓄水而造成的库区地壳形变结果: 水平形变小, 表明块体内部水平相对构造运动微弱; 因水库蓄水导致的垂直形变较为明显, 垂直变形的主要区域集中在坝址至香溪近岸库段, 垂直沉降的量级在 10~35mm。

2) 利用纽约州立大学的反演程序和双三次样条方法对 GPS 测量结果的反演表明: 三峡库区蓄水前各种应变背景在  $10^{-9}/a \sim 10^{-10}/a$  量级, 属相对构造运动十分稳定的地区。

3) 从 GPS 形变测量结果与 Wang 等所作的数值模拟结果的比较来看, 蓄水所引起的形变短期内属上地壳的弹性响应, 三峡库区近期因蓄水导致大规模形变而诱发中强地震的可能性不大。蓄水后, 水体荷载所产生的效应除导致库盆、库岸的差异运动, 改变地壳及断层应力环境外, 还会增大孔隙压力建议, 并通过加强渗流作用, 改变岩石和断层摩擦系数。上述效应在地壳形变中的反应还需要一个滞后期, 还需进一步加强后续的观测和研究。

## 参 考 文 献

- 1 高士均. 长江三峡地区地壳应力场与地震. 北京: 地震出版社, 1992. 79~114
- 2 曾心传, 高士均, 陈永成, 等. 三峡水库水压应力场、形变场和孔压场的研究. 见: 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态和环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 585~595
- 3 中国科学院测量与地球物理研究所一室三峡组. 三峡地区重力场和应力场研究. 见: 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程地质地震专题论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 596~612
- 4 Wang H S. Surface Vertical Displacements and Level Plane Changes in the Front Reservoir Area Caused by Filling the Three Gorges Reservoir. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B6): 211~220
- 5 Wang H S, Hsu H T, Zhu Y Z. Prediction of Surface Horizontal Displacements and Gravity and Tilt Changes Caused by Filling the Three Gorges Reservoir. Journal of Geodesy, 2002, 76: 105~114
- 6 Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads. Rev. Geophys., 1972, 10: 761~797
- 7 Astronomical Institute University of Beme. Bernese GPS Software. Version 4.2, 2001
- 8 Gu G H, Wang R B, Sun H J, et al. Results of GPS Surveys for Crustal Defomation in North China and Their Implications to Earthquake Geology. Seismology and Geology, 1999, 21(2): 98~104
- 9 郑作亚. Bernese GPS 4.2 版本数据处理软件的介绍与探讨. 中国科学院上海天文台年刊, 2003(24): 143~149
- 10 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 中国地壳运动观测网络. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88~93
- 11 朱文耀, 王小亚, 付养, 等. 基于 ITRF2000 的全球板块运动模型和中国的地壳运动. 地球物理学报, 2002, 45(增刊): 197~203
- 12 Holt E W, Chamorro N, Le Pichon X. Velocity Field in Asia Inferred from Quaternary Fault Slip Rates and Global Positioning System Observations. Geophys. J. Res., 2000, 105
- 13 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
- 14 Haines A J, Jackson J A, Holt W E, et al. Representing Distributed Deformation. Continuous Velocity Fields. Sci. Rep. 98/5. Inst. Geol. and Nucl. Sci., Wellington, New Zealand, 1998

第一作者简介: 杜瑞林, 副研究员。现从事 GPS 和地壳形变研究。  
E-mail: whgps@public.wh.hb.cn

## Results of the Crustal Deformation by GPS Survey and Horizontal Strain Rate Fields in the Three Gorges Area

*DU Ruilin<sup>1,2</sup> QIAO Xuejun<sup>1,2</sup> YANG Shaomin<sup>1,2</sup> WANG Qi<sup>1,2</sup>*

(1 Institute of Seismology, CBS, 40 Hongshan Road, Wuhan 430071, China)

(2 The Institute of Crustal Dynamics, CSB, Dewai Xisanqi, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Bernese GPS Software 4.2 is used to analyze GPS data from six repeated surveys occupied by the GPS network of the Three Gorges Reservoir Induced Earthquake Monitoring System from 1998 to 2003. The result shows that the crustal deformation in the Three Gorges Reservoir area is less active with a marginally measurable rate of 0 and 3 mm/a ( $\pm 0.1 \sim \pm 2.0$  mm/a) with respect to stable South China. Whereas, The vertical subsidence is about 10 mm to 35 mm alongshore after impoundment. We have simulated present-day GPS velocity solution with a bi-cubic spline interpolation function to estimate the horizontal strain rate fields before impoundment. The result shows that the tectonic deformation background of the Three Gorges area is slight (the horizontal strain rate is about  $10^{-9}/a$  to  $10^{-10}/a$ ).

**Key words:** Three Gorges Reservoir; impoundment; GPS; deformation; horizontal strain rate fields

**About the first author:** DU Ruilin, associate researcher. His research fields are GPS and crustal deformation.

E-mail: whgps@public.wh.hb.cn

(责任编辑: 晓平)

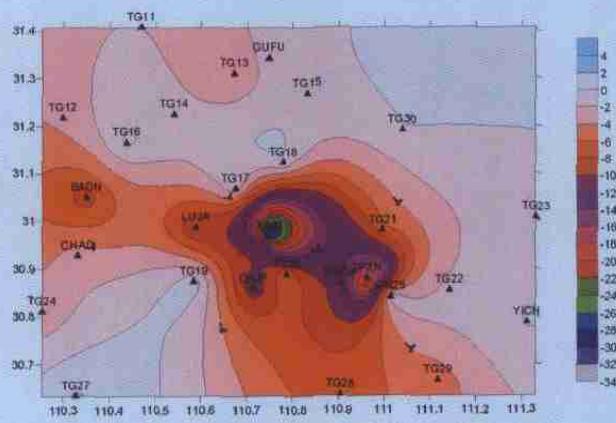


图1 Bernse软件处理获取的蓄水前后垂直形变 / mm  
Fig.1 The Results of Vertical Subsidence After the Impoundment by GPS

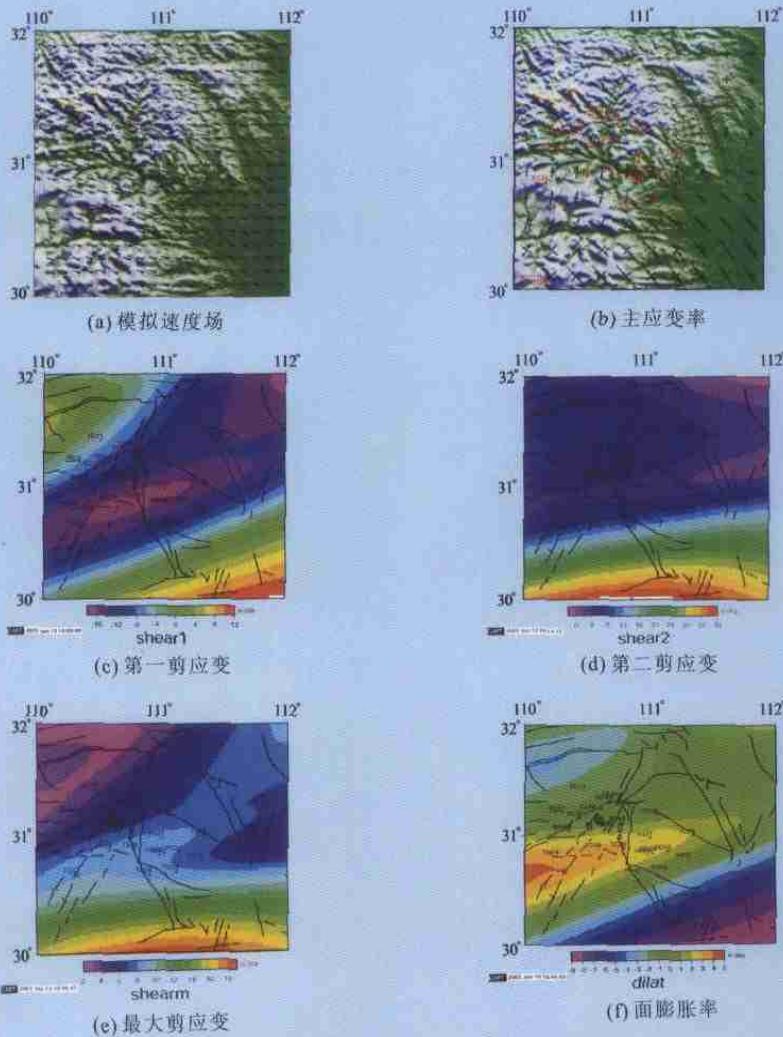


图2 三峡地区各类水平应变率场  
Fig.2 Horizontal Strain Rate Fields in Three Gorges Area