

文章编号: 0253-3782(2000)05-0449-08

# 利用 GPS 资料研究区域地壳应力场变化与地震活动关系<sup>\*</sup>

张永志<sup>1)</sup> 崔笃信<sup>1)</sup> 王 琪<sup>2)</sup> 朱桂芝<sup>1)</sup>

1) 中国西安 710054 中国地震局第二地形变监测中心

2) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

**摘要** 推导了地球内应力场变化与地面位移场和重力变化的关系; 讨论了利用地面位移变化速率来计算地球内应力场变化的边界元方法; 最后, 利用中国新疆伽师地区的 GPS 观测资料, 对该地区地壳内的应力场变化进行了计算, 并分析和讨论了该地区地壳内的局部应力场变化与地震活动和断层构造活动的关系.

**关键词** GPS 资料 边界积分 地壳应力场变化 地震活动

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>7

文献标识码: A

## 引言

科学技术的发展, 特别是空间测地技术的发展(Tralli, Timothy, 1988), 使通过 GPS (global positioning system) 观测精确获得地球表面地形变连续观测资料成为可能. 空间技术能够观测到地球内部应力场变化在地面的形变响应分布; 以及构造应力缓慢作用过程中, 地壳中的某些形变和运动特征. 如 Snay 等(1991)采用 GPS 资料, 研究了与 Loma Prieta 地震有关的水平形变. 我国学者在利用 GPS 资料研究地壳形变和地质块体间的相对运动中也取得了初步结果. 例如用 GPS 资料研究我国华北地区和青藏高原的地壳形变和地质块体间的相对运动(黄立人, 郭良迁, 1998; 宋成骅等, 1988)、利用 GPS 资料研究我国云南丽江 7.0 级地震前的地壳形变和地质块体间的相对运动(王琪等, 1998). 黄立人等(1999)利用华北地区 GPS 资料, 采用有限元方法计算了华北地区地壳中的应力场分布. 本文则采用了边界积分方法(Brebbia, 1983)和伽师地区的 GPS 资料, 研究地壳应力场变化分布, 并作了一些理论和应用探讨.

## 1 无限弹性介质中 Navier 方程的基本解

由弹性理论得各向同性线弹性介质的应力和位移的关系为

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金(49774214)和国家“九五”科技攻关项目(96-913-07)共同资助.  
1999-10-14 收到初稿, 2000-05-15 收到最后修改稿并决定采用.

式中,  $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ 、 $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ;  $\lambda$ ,  $\mu$  为拉梅常数.

应力平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)并整理得

$$(\lambda + \mu)u_{j,j} + u_{i,jj} + b_i = 0 \quad (3)$$

方程(3)称为 Navier 方程. 在无限三维弹性介质中的基本解为

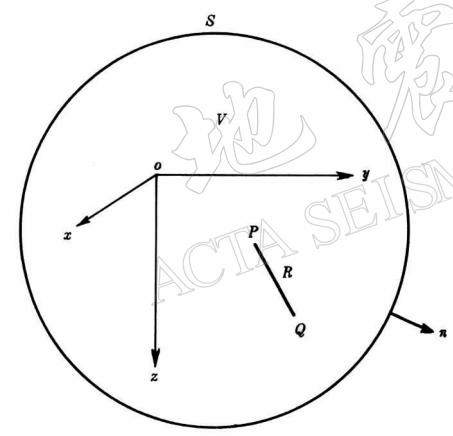
$$U_{kj}(P, Q) = \frac{1+\nu}{8\pi E(1-\nu)R} [(3-4\nu)\delta_{ij} + \mathbf{r}_k \mathbf{r}_i] \quad (4)$$

式中,  $E$  为扬氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $R$  为  $P$ ,  $Q$  两点间的距离,  $\mathbf{r}_i$  为  $P$ ,  $Q$  两点间的  $i$  方向的方向余弦,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

## 2 边界积分方程与内点应力公式

如图 1 所示,  $\mathbf{n}$  为曲面  $S$  的单位外法线向量, 向量  $\mathbf{a}$  在  $V$  内与  $S$  面上连续、可微. 由 Gauss 公式有



$$\int_V \mathbf{a}_{i,j}(Q) dV_Q = \int_S \mathbf{a}(Q) \mathbf{n}_i(Q) dS_Q \quad (5)$$

任取两连续可微的位移场  $\boldsymbol{\alpha}(Q)$ ,  $\boldsymbol{\beta}(Q)$  和应力场  $\boldsymbol{\sigma}[\alpha]$ ,  $\boldsymbol{\sigma}[\beta]$ , 则有

$$\int_V \{\boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij,j}[\alpha] + \boldsymbol{\beta}_{i,j}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\beta]\} = \int_S \boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij,j}[\alpha] \mathbf{n}_j(Q) dS_Q \quad (6)$$

式中,  $i, j$  为哑指标, 可互换

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\beta}_{i,j}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] &= \frac{1}{2} \{\boldsymbol{\beta}_{i,j}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] + \\ \boldsymbol{\beta}_{j,i}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ji}[\alpha]\} = \frac{1}{2} [\boldsymbol{\beta}_{i,j}(Q) + \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\beta}_{j,i}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ji}[\alpha]] \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] \quad (7)$$

$$\text{即 } \boldsymbol{\beta}_{i,j}(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] = \boldsymbol{\epsilon}_{ij}(\beta) \boldsymbol{\sigma}_{ji}[\alpha] \quad (8)$$

将式(8)带入式(6)得

$$\int_V \{\boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij,j}[\alpha] + \boldsymbol{\epsilon}_{ij}(\beta) \boldsymbol{\sigma}_{ji}[\alpha]\} dV_Q = \int_S \boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] \mathbf{n}_j(Q) dS_Q \quad (9)$$

同样的推导可得

$$\int_V \{\boldsymbol{\alpha}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij,j}[\beta] + \boldsymbol{\epsilon}_{ij}(\alpha) \boldsymbol{\sigma}_{ji}[\beta]\} dV_Q = \int_S \boldsymbol{\alpha}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\beta] \mathbf{n}_j(Q) dS_Q \quad (10)$$

由 Maxwell-Betti 互易定理

$$\int_V \boldsymbol{\epsilon}_{ij}(\alpha) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\beta] dV_Q = \int_V \boldsymbol{\epsilon}_{ij}(\beta) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] dV_Q \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)减去式(10)得

$$\int_V \{\boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij, j}[\alpha] - \boldsymbol{\alpha}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij, j}[\beta]\} dV_Q = \int_S \{\boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] - \boldsymbol{\alpha}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\beta]\} \mathbf{n}_j(Q) dS_Q \quad (12)$$

将应力平衡方程  $\boldsymbol{\sigma}_{ij, j} + \mathbf{b}_i = 0$  代入式(12)并整理得

$$\int_V \{\boldsymbol{\alpha}_i(Q) \mathbf{b}_i[\beta] - \boldsymbol{\beta}_i(Q) \mathbf{b}_i[\alpha]\} dV_Q = \int_S \{\boldsymbol{\beta}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\alpha] - \boldsymbol{\alpha}_i(Q) \boldsymbol{\sigma}_{ij}[\beta]\} \mathbf{n}_j(Q) dS_Q \quad (13)$$

在式(13)中, 我们取  $\boldsymbol{\beta}_i$  为单位点荷载引起的位移, 即

$$\mathbf{b}_i(\beta) = \delta_{ik} \Delta(x_m - y_m) \quad (14)$$

式中,  $\Delta(x_m - y_m)$  是 Dirac  $\delta$ - 函数, 它的特性是  $\Delta(x_m - y_m) = 0$ . 当  $x_m \neq y_m$  时

$$\int_V \Delta(x_m - y_m) dV_Q = 1$$

和

$$\int_V f(y) \Delta(x_m - y_m) dV_Q = f(x) \quad (15)$$

则式(13)变为

$$\mathbf{u}(P) = \int_S \mathbf{U}_{ki}(P, Q) \mathbf{t}_i(Q) dS_Q - \int_S \mathbf{u}_i(Q) \mathbf{T}_{ki}(P, Q) dS_Q + \int_V \mathbf{U}_{ki}(P, Q) \mathbf{b}_i(Q) dV_Q \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{U}_{ki}$ ,  $\mathbf{T}_{ki}$  分别为应变核函数和应力核函数, 在无限弹性介质内为

$$\mathbf{U}_{ki}(P, Q) = \frac{1 + \nu}{8\pi E(1 - \nu)R} [(3 - 4\nu)\delta_{ki} + \mathbf{r}_k \mathbf{r}_i]$$

$$\mathbf{T}_{ki}(P, Q) = \frac{1}{8\pi E(1 - \nu)R^2} [(1 - 2\nu)(\mathbf{n}_i \mathbf{r}_k + \mathbf{n}_k \mathbf{r}_i) - \mathbf{n}_m \mathbf{r}_m (1 - 2\nu)\delta_{ki} + 3\mathbf{r}_k \mathbf{r}_i] \quad (17)$$

$\mathbf{t}_i$  和  $\mathbf{u}_i$  分别为  $S$  上的面力和位移. 通过对式(16)中的矢量位取极限, 得边界上位移与应力的积分关系为(严更, 丁方明, 1986)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \mathbf{u}(Q') = & \int_S \mathbf{U}_{ki}(Q', Q) \mathbf{t}_i(Q) dS_Q - \int_S \mathbf{u}_i(Q) \mathbf{T}_{ki}(Q', Q) dS_Q + \\ & \int_V \mathbf{U}_{ki}(Q', Q) \mathbf{b}_i(Q) dV_Q \end{aligned} \quad (18)$$

将式(16)代入式(1)得内部应力公式为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_{ij}(P) = & \int_S \mathbf{D}_{kij}(P, Q) \mathbf{t}_k(Q) dS_Q - \int_S \mathbf{u}_k(Q) \mathbf{S}_{kij}(P, Q) dS_Q + \\ & \int_V \mathbf{D}_{kij}(P, Q) \mathbf{b}_k(Q) dV_Q \end{aligned} \quad (19)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{kij}(P, Q) = & \lambda \delta_{ij} \mathbf{U}_{mk, m} + \mu (\mathbf{U}_{jk, j} + \mathbf{U}_{jk, i}) = \\ & \frac{1}{8\pi E(1 - \nu)R^2} [(1 - 2\nu)(\mathbf{r}_i \delta_{jk} + \mathbf{r}_j \delta_{ki} - \mathbf{r}_k \delta_{ij}) + 3\mathbf{r}_i \mathbf{r}_j \mathbf{r}_k] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{kij}(P, Q) = & \lambda \delta_{ij} \mathbf{T}_{mk, m} + \mu (\mathbf{T}_{jk, j} + \mathbf{T}_{jk, i}) = \frac{E}{8\pi(1 - \nu^2)R^3} \{3\mathbf{n}_m \mathbf{r}_m [(1 - 2\nu)\mathbf{r}_i \delta_{ij} + \\ & \nu(\mathbf{r}_j \delta_{jk} - \mathbf{r}_j \delta_{ki}) - 5\mathbf{r}_i \mathbf{r}_j \mathbf{r}_k] + 3\nu(\mathbf{n}_i \mathbf{r}_j + \mathbf{n}_j \mathbf{r}_i) \mathbf{r}_k + (1 - 2\nu)(3\mathbf{n}_k \mathbf{r}_i \mathbf{r}_j + \\ & \mathbf{n}_i \delta_{jk} + \mathbf{n}_j \delta_{ki}) - (1 - 4\nu)\mathbf{n}_k \delta_{ij}\} \end{aligned} \quad (21)$$

设

$$U_{ki}(P, Q) = G_{ki, jj}(P, Q) - \frac{G_{kj, ji}(P, Q)}{2(1-\nu)} \quad (22)$$

则式(16)右边第3项为

$$B_k(P) = \int_V \left( G_{ki, jj}(P, Q) - \frac{G_{kj, ji}(P, Q)}{2(1-\nu)} \right) b_i(Q) dV_Q \quad (23)$$

当体力变化率为常数时, 可化为边界积分公式

$$B_k(P) = b_i(Q) \int_S \left( G_{ki, j}(P, Q) - \frac{G_{kj, i}(P, Q)}{2(1-\nu)} \right) n_j dS_Q \quad (24)$$

式中

$$G_{ki}(P, Q) = \frac{(1+\nu)R\delta_{ij}}{4\pi E} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)得

$$B_k(P) = \int_S p_k(P, Q) dS_Q \quad (26)$$

式中

$$\begin{aligned} p_k(P, Q) &= \frac{1+\nu}{4\pi E} \left[ n_m r_m b_k - \frac{b_m r_m n_k}{2(1-\nu)} \right] \\ S_{ij}^*(P, Q) &= \lambda \delta_{ij} p_{mk, m} + \mu (p_{jk, j} + p_{jk, i}) = \\ &= \frac{1}{8\pi R} \left[ n_m r_m (b_i r_j + b_j r_i) + \frac{1}{1-\nu} \{ \nu \delta_{ij} (n_m r_m b_s r_s - b_m n_m) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} [b_m r_m (n_i r_j + n_j r_i) + (1-2\nu)(b_i n_j + b_j n_i)] \} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

最后, 得到利用地面观测位移场计算弹性地球内任一点的应力场的计算公式为

$$\sigma_{ij}(P) = \int_S D_{kij}(P, Q) t_k(u) dS_Q - \int_S u_k(Q) S_{kij}(P, Q) dS_Q + \int_S S_{ij}^*(P, Q) b_k(Q) dS_Q \quad (28)$$

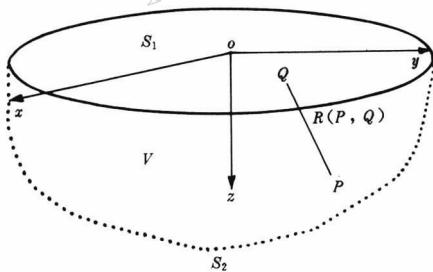
从上述推导过程和式(28)看出, 只要知道地面  $S$  上边界条件(如位移函数、面力函数)和体力函数, 我们可通过积分方程(18)和内部应力公式(28)计算弹性地壳内任意点  $P$  的应力.

图 2 模拟区域场源关系的半无限空间模型  
分方程可分解为

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(P) &= \int_{S_1 + S_2} D_{kij}(P, Q) t_k(u) dS_Q - \int_{S_1 + S_2} u_k(Q) S_{kij}(P, Q) dS_Q + \\ &\quad \int_{S_1 + S_2} S_{ij}^*(P, Q) b_k(Q) dS_Q \end{aligned} \quad (29)$$

由于面  $S_2$  离计算应力点的距离为无限远,  $P, Q$  两点的距离  $R(P, Q)$  趋于无穷大

从以上的理论推导和分析可知, 地面的位移(场)和地球内的应力(源), 通过两点间的积分核函数相联系, 场源之间的距离越远, 他们之间的相互影响越小.

### 3 区域模型时间变化模型

为研究区域内实际地面观测到的位移场和重力场变化与地壳内应力场变化的关系, 我们讨论如图 2 所示的半无限空间模型. 公式(28)的积分方程可分解为

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(P) &= \int_{S_1 + S_2} D_{kij}(P, Q) t_k(u) dS_Q - \int_{S_1 + S_2} u_k(Q) S_{kij}(P, Q) dS_Q + \\ &\quad \int_{S_1 + S_2} S_{ij}^*(P, Q) b_k(Q) dS_Q \end{aligned} \quad (29)$$

$$\lim_{R(P, Q) \rightarrow \infty} \mathbf{D}_{ij}(P, Q) \rightarrow 0 \quad \lim_{R(P, Q) \rightarrow \infty} \mathbf{S}_{kij}(P, Q) \rightarrow 0 \quad \lim_{R(P, Q) \rightarrow \infty} \mathbf{S}_{ij}^*(P, Q) \rightarrow 0 \quad (30)$$

故式(29)的积分方程可变为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_{ij}(P) = & \int_{S_1} \mathbf{D}_{kij}(P, Q) \mathbf{t}_k(\mathbf{u}) dS_Q - \int_{S_1} \mathbf{u}_k(Q) \mathbf{S}_{kij}(P, Q) dS_Q + \\ & \int_{S_1} \mathbf{S}_{ij}^*(P, Q) \mathbf{b}_k(Q) dS_Q \end{aligned} \quad (31)$$

将式(31)两边对时间求导并忽略核函数随时间变化的影响得

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij}(P) = \int_{S_1} [\mathbf{D}_{kij}(P, Q) \dot{\mathbf{t}}_k(\mathbf{u}) - \dot{\mathbf{u}}_k(Q) \tilde{\mathbf{S}}_{kij}(P, Q) + \dot{\mathbf{b}}_k(Q) \tilde{\mathbf{S}}_{ij}^*(P, Q)] dS_Q \quad (32)$$

同理由式(18)可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}(Q') = & \int_S \mathbf{U}_{ki}(Q', Q) \dot{\mathbf{t}}_i(\mathbf{u}) dS_Q - \int_S \dot{\mathbf{u}}_i(Q) \mathbf{T}_{ki}(Q', Q) dS_Q + \\ & \int_{S_1} \mathbf{U}_{ki}(Q', Q) \dot{\mathbf{b}}_i(Q) dS_Q \end{aligned} \quad (33)$$

## 4 新疆伽师地区的 GPS 资料计算结果分析

为应用 GPS 观测来研究实际区域地壳中的应力场变化分布与地震活动分布之间的关系, 在不考虑体力变化的情况下, 我们采用新疆伽师地区的 GPS 观测资料对应力场变化进行了计算分析, 计算步骤如下:

(1) 将伽师地区 GPS 资料以喀什为参考基准点, 采用 Gamit 精密数据分析软件进行处理, 并根据两期结果计算出各观测点的位移变化率.

(2) 采用公式(33), 以位移场为边界条件, 建立边界元素之间的线性代数方程组, 即将研究区域的边界  $S_1$  剖分为  $M$  个单元, 那么, 在整个边界上的积分可以近似地等于  $M$  个边界单元的积分之和, 即

$$\frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}(Q') = \sum_{e=1}^M \int_{S_1} \mathbf{U}_{ki}(Q', Q) \dot{\mathbf{t}}(\mathbf{u}) dS_Q - \sum_{e=1}^M \int_{S_1} \dot{\mathbf{u}}_i(Q) \mathbf{T}_{ki}(Q', Q) dS_Q \quad (34)$$

(3) 采用高次单元法, 及设每个边界单元上有  $n$  个节点, 全部单元上共有  $N$  个节点, 则边界上的位移和面力分量变化分别为

$$\dot{\mathbf{u}} = \sum_{m=1}^N \mathbf{N}^m \dot{\mathbf{u}}_j^m \quad \dot{\mathbf{t}} = \sum_{m=1}^N N^m \dot{\mathbf{t}}_j^m \quad (35)$$

式中,  $\dot{\mathbf{u}}_j^m$  和  $\dot{\mathbf{t}}_j^m$  分别为位移和面力在第  $m$  个边界节点处的变化值,  $N^m$  为形函数. 将式(35)代入式(34)并记

$$\tilde{\mathbf{U}}_{ij}^{mm} = \sum_{e=1}^M \int_{S_e} \mathbf{U}_{ij}^n N^m dS \quad \tilde{\mathbf{T}}_{ij}^{mm} = \sum_{e=1}^M \int_{S_e} \mathbf{T}_{ij}^n N^m dS + \frac{1}{2} \delta_{ij} \delta_{mm} \quad (36)$$

则式(34)可写成

$$\sum_{m=1}^N \tilde{\mathbf{T}}_{ij}^{mm} \dot{\mathbf{u}}_j^m = \sum_{m=1}^N \tilde{\mathbf{U}}_{ij}^{mm} \dot{\mathbf{t}}_j^m \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

6] 写成矩阵形式

$$[\tilde{\mathbf{T}}] \langle \dot{\mathbf{u}} \rangle = [\tilde{\mathbf{U}}] \langle \dot{\mathbf{t}} \rangle \quad (37)$$

在位移变化已知的情况下, 通过方程(37)可计算出边界节点的面力变化.

(4) 在不考虑体力变化的情况下, 将边界节点上的位移和面力变化代入式(33), 即可

计算地壳内任意点的应力场变化。在存在断层的单元时，我们采用块体单元法(Shi, Goodman, 1985; 任青文, 余天堂, 1999)，即将不同的块体和断层看成具有不同弹性模量的单元，通过他们的等效弹性模量来进行核函数计算。

伽师地区的 GPS 点位分布与地质构造如图 3 所示：伽师地区西南部的地质构造主要有北西向的西昆仑北缘断裂、阿格勒达坂断裂等；北部有北东向的托特拱拜孜断裂和柯坪断裂等，其主要地震活动也以这两种分布的断层为核心，特别是在这两组断层汇合附近的

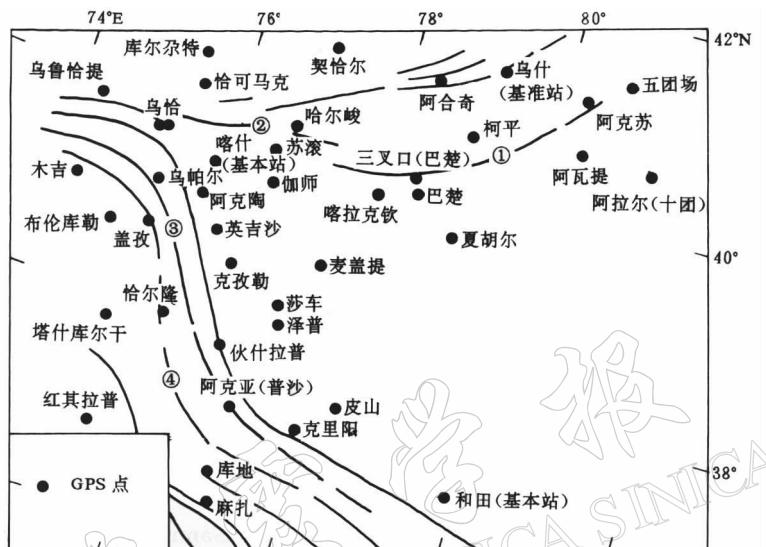


图 3 伽师地区 GPS 网点与地质构造分布示意图

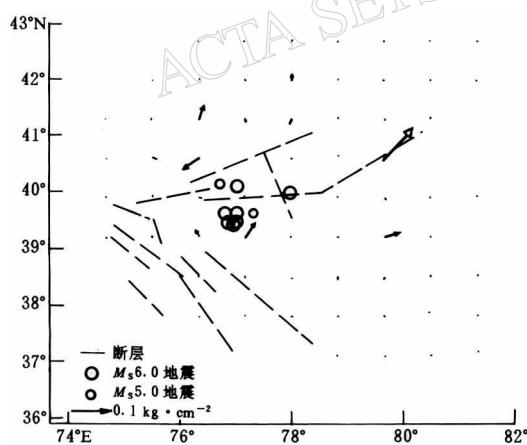


图 4 伽师地区应力场年变化率矢量与中强地震活动分布(1997 年 1 月~1998 年 12 月)

向的应力大小变化分布, 图 5b 为纬度方向的应力大小变化分布. 最大应力变化为  $0.686 \times 10^4 \text{ Pa}$ , 大约为华北地区最大应力变化(黄立人等, 1999)的 2 倍.

喀什、伽师等地区，地震活动异常强烈。尤其在1997年1月～1998年12月间，在伽师地区发生多次 $M_s > 6.0$ 的地震。

由 GPS 资料计算得伽师地区地壳 15 km 深处应力年变化矢量图分布如图 4 所示。从图 4 整体上看，整个区域的主压应力变化呈现出从西南向东北变化的格局，这与中国大陆受印度板块的挤压方向基本一致。从局部看，在伽师中强地震活动区的两侧，沿断层构造的应力场变化明显大于其它地区，而且方向相反，呈现左旋剪切的变化特征。这说明了局部应力场变化与地震活动有关。应力场水平分量大小变化分布如图 5a, b 所示。图 5a 为经度方

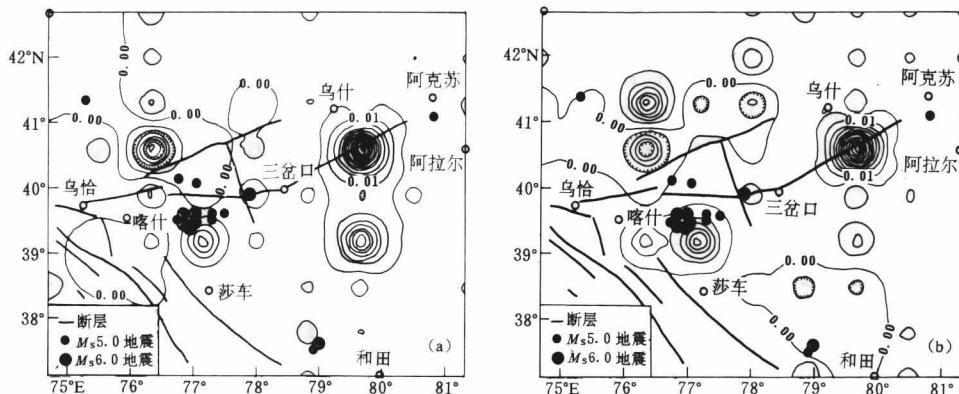


图 5 伽师地区应力场年变化率与地震活动分布(1997 年 1 月~1998 年 12 月).

图中有毛边的等值线为负变化, 没有毛边的等值线为正变化

(a) 东西方向应力年变化率; (b) 南北方向应力年变化率

从图 5a, b 可以看出, 在经度方向、纬度方向的应力大小变化主要发生在地震区的两侧和断层附近, 这说明伽师地区的应力场局部变化主要与该地区的地震活动与断层活动有关. 另一方面, 在地震区的北面, 应力场呈现负的变化; 而在地震区的南面, 应力场呈现正的变化. 这种区域应力场变化的不平衡, 可能是该地区持续发生多次中强地震的主要原因.

## 5 讨论与结论

通过理论分析和实际 GPS 观测资料的计算分析, 结果表明: ① 边界单元法通过核函数将地面的位移场与地球内的应力场相联系, 具有物理意义明确, 计算简单等优点; ② 新疆伽师地区的 GPS 观测资料计算结果表明, 应力变化较大的区域主要为断层附近和地震活动区, 特别是在 1997 年 1 月~1998 年 12 月间发生多次  $M_s > 6.0$  地震的伽师地区, 沿断层构造的应力场变化明显大于其它地区, 而且方向相反, 呈现左旋剪切的变化特征. 另一方面, 在地震区的北面, 应力场呈现负的变化; 而在地震区的南面, 应力场呈现正的变化. 这种区域应力场变化的不平衡, 可能是该地区持续发生多次中强地震的主要原因.

## 参 考 文 献

- 黄立人, 郭良迁. 1998. 华北(北部)地区的地壳水平运动特征及其模型——GPS 测量结果的初步分析[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 20~27
- 黄立人, 马青, 郭良迁, 等. 1999. 华北部分地区水平变形的力学机制——三维有限元和 GPS 复测结果的分析[J]. 地震学报, 21(1): 50~56
- 任青文, 余天堂. 1999. 块体单元法的理论和计算模型[J]. 工程力学, 16(1): 68~77
- 宋成骅, 许才军, 刘经南, 等. 1998. 青藏高原块体相对运动模型的 GPS 方法确定与分析[J]. 武汉测绘科技大学学报, 23(1): 22~25
- 王琪, 赖锡安, 游新兆, 等. 1998. 红河断裂的 GPS 监测与构造应力场[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 49~56
- 严更, 丁方明. 1986. 边界单元法基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 219
- Brebbia C A. 1983. *Progress in Boundary Element Methods*, Vol. 2[M]. London: Pentech Press, 303

- Shi Genghua, Goodman R E. 1985. *Block Theory and Its Application to Rock Engineering* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc, 295~324
- Snay R A, Neugebauer H C, Prescott W H. 1991. Horizontal deformation associated with the Loma Prieta earthquake [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**(5): 1 647~1 659
- Tralli M D, Timothy H D. 1988. A few parts in 108 geodetic baseline repeatability in Gulf of California using the global positioning system (GPS)[J]. *Geophys Res Lett*, **15**(4): 353~356

## RELATIONSHIP BETWEEN REGIONAL STRESS FIELD VARIATION AND EARTHQUAKE ACTIVITIES FROM GPS DATA

Zhang Yongzhi<sup>1)</sup> Cui Duxin<sup>1)</sup> Wang Qi<sup>2)</sup> Zhu Guizhi<sup>1)</sup>

1) Second Crustal Deformation Monitoring Center, China Seismological Bureau, Xi'an 710054, China

2) Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan 430071, China

**Abstract:** The relationship between the earth stress field, earth surface displacement field and the gravity variation is deduced. Algorithms based the boundary element method to compute the earth stress variation using the earth surface displacement is discussed. The stress field variation in Jiashi region, Xinjiang, China is obtained from the GPS data observed in 1997 and 1998, respectively, and the relationship among the local stress field variation, seismic activities and fault tectonic activities is discussed.

**Key words:** GPS data; boundary integral method; crustal stress field; seismic activities