

跨断层形变的慢时变结构分析与异常识别初探

张 希¹ 唐红涛¹ 贾 鹏¹ 巩守文¹

(1 中国地震局第二监测中心,西安市西影路 316 号,710054)

摘 要:将自适应控制理论引入跨断层流动形变分析。利用甘肃及与宁夏、青海交界的监测区内石灰窑口、红柳峡、窝子滩、扁都口、南营 5 个场地典型观测曲线,构建慢时变前兆系统结构,研究其与 6 级左右及 6 级以上地震孕育-发生过程的可能关系。可显示震前中短期阶段最大特征根模 1.0 以上异常,异常识别较原始观测曲线分析减少了人为性与经验性,也反映出断层形变前兆系统结构的动态变化和自适应性。

关键词:跨断层形变;慢时变系统结构;震例分析

中图法分类号:P227.1

甘肃及与宁、青交界的祁连山-海原-六盘山断裂带及西秦岭构造区布设有约 50 处跨断层短水准场地,测线跨度一般数百 m,并于 20 世纪 80 年代末起在每年的 3、7、11 月观测,2004~2008 年曾加密为两月一期。其形变测值时序变化能反映所控制断层段落的运动变化过程,具有强震中短期前兆预测意义^[1-4](1995 年永登 5.8 级、2000 年景泰 5.9 级震前观测到显著异常,成功预报^[2-3])。尽管如此,对跨断层形变观测结果识别异常仍是地震预报的难点^[5]。以往提取的一系列异常指标^[6-9],如反映某两期变化相对正常变幅之比的形变强度比^[7-8]、增加正-逆断区别的特征强度^[9],作为基准的正常变幅基本为常量;而视变化量超出了 2 倍均方差为异常^[2]也存在类似问题,与观测曲线可能分阶段(趋势方向或幅度等)动态演变的实际情况有差异。即使构建动态基值线,也不能管得太久,距建模时段越远偏差越大,其原因就是前兆系统本身的结构发生了变化。

岩石力学实验显示,应力-应变曲线具有分段特性。在持续应力作用下,岩石从微观结构改变到宏观结构破坏的过程,必然伴随着物质属性和物理结构的变化^[10];蠕变曲线也有类似特性。故前兆观测系统结构不是定常系统。鉴于其观测序列不是快速跳动、改变的,可视为慢时变系统。

本文将自适应控制理论^[11]引入跨断层流动形变分析,首次利用监测区内映震效果较好、最短

震中距十几至数十 km 的石灰窑口(对应 2003-10-25 民乐 6.1 级地震)、红柳峡(对应 2002-12-14 玉门 5.9 级地震)、窝子滩(对应 1995-07-22 永登 5.8 级、2000-06-06 景泰 5.9 级地震),映震效果好、震中距约 300 km 的扁都口(对应 1995 年永登地震),以及映震效果偏弱的南营共 5 个典型场地资料(图 1),构建观测曲线反映的慢时变前兆系统结构、识别异常。

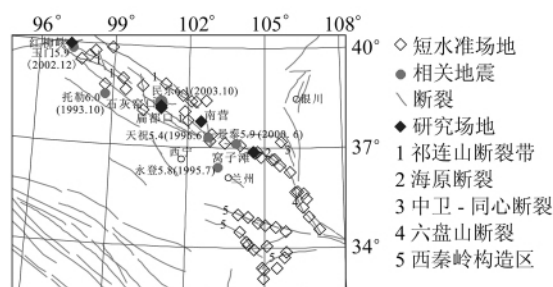


图 1 甘肃及与宁、青交界区跨断层形变场地
与相关构造、地震分布

Fig. 1 Distribution of Cross-fault Sites and Related Fractures and Earthquakes in Gansu and Its Boundaries Meeting Qinghai, Ningxia

1 慢时变系统模型构建

1.1 慢时变系统构建的思路和意义

慢时变系统构建的思路来源于自适应系统控

收稿日期:2013-02-21。

项目来源:中国地震局星火计划资助项目(XH12072)。

制理论^[11],其研究对象是具有不确定性的系统,其中包含一些未知和随机因素,基于一定的数理模型和性能指标综合而成。其中模型参数是对系统结构的描述,可根据对象的输入输出数据,不断地辨识和修正这些参数。随着系统辨识的不断推进,模型会变得越来越接近于实际;而基于这种模型综合出来的控制作用也将随之不断改进,故具有一定的自适应能力^[11-14]。本文对该模型探索研究,期望应用于同样含不确定因素,又可能获得震前中短期阶段震源区及其周边构造活动、应力应变状态改变或其扰动影响等微动态信息的跨断层形变观测。

1.2 跨断层流动形变慢时变系统模型构建

借鉴文献^[11]用差分方程建立参数模型,描述跨断层形变观测的输入输出系统。即对每条观测曲线,将输入函数 $g(t)$ 划分为若干时段,每个时段(针对每两个月一观测值的跨断层形变曲线,可近似于观测时刻 t_k 的输入函数 $u(k)$)用一个阶跃函数近似表示($u(k) = b^k u(1)$,其中 $u(1)$ 是单位阶跃函数, b^k 为该时段的跃度、未知量),则输入输出系统的动态过程可表述为:

$$y(k) + a_1^k y(k-1) + \cdots + a_n^k y(k-n) = b^k u(1) \quad (1)$$

这里, n 为系统阶数; $y(k), y(k-1), \cdots, y(k-n)$ 为第 k 个时刻及向过去推 n 个时刻的断层形变观测

$$\begin{pmatrix} a_1^k \\ a_2^k \\ \vdots \\ a_n^k \\ b^k \end{pmatrix}, \mathbf{A}_{m(n+1)} = \begin{pmatrix} -\sqrt{\rho_1} y(n+1-1), -\sqrt{\rho_1} y(n+1-2), \cdots, -\sqrt{\rho_1} y(n+1-n), \sqrt{\rho_1} \\ -\sqrt{\rho_2} y(n+2-1), -\sqrt{\rho_2} y(n+2-2), \cdots, -\sqrt{\rho_2} y(n+2-n), \sqrt{\rho_2} \\ \vdots \\ -\sqrt{\rho_m} y(n+m-1), -\sqrt{\rho_m} y(n+m-2), \cdots, -\sqrt{\rho_m} y(n+m-n), \sqrt{\rho_m} \end{pmatrix}$$

$\rho_1 = \lambda^{m-1}, \rho_2 = \lambda^{m-2}, \cdots, \rho_m = \lambda^{m-m} = 1$ 。利用最小

二乘原理,求使目标函数 $J_m = \sum_{k=n+1}^{n+m} \varepsilon^2(k)$ 最小的

解 $\mathbf{X}_{n+1}, \mathbf{X}_{n+1} = (\mathbf{A}_{m(n+1)}^T \mathbf{A}_{m(n+1)})^{-1} \mathbf{A}_{m(n+1)}^T \mathbf{Y}_m$ 。 \mathbf{X}_{n+1} 为 $n+1$ 阶向量(这里的下标均为向量或矩阵阶数), m 则由 1、2 逐渐增大(直至最后一个观测值)。

具体计算时, m 由 1、2 逐渐增大,若每次都重新求逆并计算 $(\mathbf{A}_{m(n+1)}^T \mathbf{A}_{m(n+1)})^{-1} \mathbf{A}_{m(n+1)}^T \mathbf{Y}_m$, 计算量大且费时(跨断层形变数据数百个)。本文应用文献^[11]中第 31~36 页公式,采用实时递归估计法对 m 逐个计算(下标仍为矩阵或向量阶数,右上标为递归次数),即

$$\mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^0 = \alpha^2 \mathbf{I}_{(n+1) \times (n+1)}$$

其中, $\alpha = 10^{308}$ 是计算机允许的最大值; $\mathbf{I}_{(n+1) \times (n+1)}$ 为单位矩阵,则初始状态为:

值; $a_1^k, a_2^k, \cdots, a_n^k, b^k$ 为该时刻模型时变参数(未知、待定)。 $k, k-1, \cdots, k-n$ 时刻必须等间隔。鉴于监测区 2004~2008 年加密为两月观测一期,期间受到汶川 8 级震前大尺度应力场强化扰动及同震影响^[4,15],加上景泰、民乐等地震前也曾加密观测,为尽可能利用断层活动全部观测信息,本文对 4 月一期的时段进行线性内插,使观测序列时间间隔完全统一为每 2 个月一期,以方便计算。

利用实时递推估计法求解模型时变参数。引入遗忘因子 λ (大于 0、小于 1 的常数),对老数据不断进行截尾(使老数据权重逐渐降低,其作用程度变得越来越弱,直至基本不起作用),保持对参数的校正能力。同时加窗口滑动(也即前面提到的在线辨识,不断地修正参数)求解时变参数,得到系统模型中时变参数序列 $\{a_1^k\}, \cdots, \{a_n^k\}$ 和 $\{b^k\}, k = n+1, n+2, \cdots$ 。具体计算时,将式(1)转化为 m 阶线性误差方程如下:

$$y(k) + \varepsilon(k) = -a_1^k y(k-1) - \cdots - a_n^k y(k-n) - b^k, k = n+m, m = 1, 2, \cdots \quad (2)$$

写成矩阵形式则为:

$$\mathbf{Y}_m + \mathbf{E}_m = \mathbf{A}_{m(n+1)} \mathbf{X}_{n+1} \quad (3)$$

$$\text{其中, } \mathbf{Y}_m = \begin{pmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(n+m) \end{pmatrix}, \mathbf{E}_m = \begin{pmatrix} \varepsilon(n+1) \\ \varepsilon(n+2) \\ \vdots \\ \varepsilon(n+m) \end{pmatrix}, \mathbf{X}_{n+1} =$$

$\mathbf{X}_{(n+1)}^0 = (0, \cdots, 0)^T; \mathbf{S}_{(n+1)}^1 = (-y(n+m-1), -y(n+m-2), \cdots, -y(n+m-n), 1)^T, m = 1$ 递推公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{(n+1)}^{m+1} &= \mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^m \mathbf{S}_{(n+1)}^{m+1} [\lambda + (\mathbf{S}_{(n+1)}^{m+1})^T \mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^m \mathbf{S}_{(n+1)}^{m+1}]^{-1} \\ \mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^{m+1} &= \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^m - \mathbf{K}_{(n+1)}^{m+1} (\mathbf{S}_{(n+1)}^{m+1})^T \mathbf{P}_{(n+1) \times (n+1)}^m] \\ \mathbf{X}_{(n+1)}^{m+1} &= \mathbf{X}_{(n+1)}^m + \mathbf{K}_{(n+1)}^{m+1} [y(n+m+1) - (\mathbf{S}_{(n+1)}^{m+1})^T \mathbf{X}_{(n+1)}^m] \end{aligned} \quad (4)$$

通过建模和上述计算,可以获得随 m 增大而改变的时变参数序列 $a_i^k, i = 1, \cdots, n$ 。而系统“失稳”过程分析,则是本文分析前兆异常的重点,需求解动态过程即式(5)所示的特征方程的根:

$$1 + a_1^k z^{-1} + a_2^k z^{-2} + \cdots + a_n^k z^{-n} = 0 \quad (5)$$

这是复平面 z 上的方程,对应 n 个特征根序列 $\{\lambda_j$

$=c_j+d_ji, j=1,2,\cdots,n\}$,可能是实根($d_j=0$),也可能是复根($d_j\neq 0$),统称为系统的闭环极点。自控工程设计,正是利用闭环极点位置的改变来改善系统稳定性及其动态性能;前兆系统分析则相反,是利用根轨迹来分析系统的“失稳”过程及与地震前兆异常的关系。按李亚普诺夫定理^[13]——线性离散系统渐近稳定的充分必要条件是特征根都在单位圆内,即视最大特征根模 $\max_j(\sqrt{c_j^2+d_j^2})\leq 1$ 为系统稳定,否则可能为异常。

1.3 阶数与遗忘因子的选择依据

自适应控制^[11]中通常取遗忘因子 $\lambda=0.90\sim 0.99$,但对最短两月才观测1次的跨断层形变资料, λ 不宜太大。经试算, λ 取值较大时,参与计算的时段长,拟合曲线相对平滑,更突出总体趋势;取得较小时,对细节变化的跟踪能力较好。引入遗忘因子是为了使老数据作用逐渐减弱,用于强震预测时应考虑其孕震时间尺度或强震时间间隔。本文研究给定计算公式为 $\lambda^{nT}\approx 0.01$ (只剩原来权重1.0的1%,作用程度基本为零), T 、 n 分别为时间间隔(年)、每年观测值个数(每年6期)。相关构造区(祁连山-海原断裂带及其附近)发生、前兆表现相对明显的6级左右及6级以上地震分别为1990年景泰6.2级、1995年永登5.8级、2000年景泰5.9级以及2002年玉门5.9级、2003年民乐6.1级地震,前3次地震间隔时间都是5a;后两次地震很可能是监测区外昆仑山口西8.1级大震调整影响、促进提前和相对集中释放的结果^[16],即使不算2004年至今9a的平静也有4.3a的平均间隔,综合分析后统一取5a的时间间隔, λ 即为0.87。而上述异常判定准则须在能够求得复平面上每个特征根时才能实现,若阶数 n 太高(5及5以上),无现成公式,需借助因式分解、迭代计算等途径,求根困难且可能仅是近似解,慢时变分析方法的可操作性、通用性弱。本文对监测区多数观测曲线尝试后认为, $n=3,4$ 即可达到较好的拟合效果,一般情况下 $n=4$ 拟合均方根更低,故统一取 n 值为4。

1.4 复平面上特征根求解方法

一元四次方程 $X^4+bX^3+cX^2+dX+e=0$, $b,c,d,e\in R$,是以下两个一元二次方程的解:

$$2X^2+(b+M)+2(y+\frac{N}{M})=0$$

$$2X^2+(b-M)+2(y-\frac{N}{M})=0$$

其中, $M=\sqrt{8y+b^2-4c}$; $N=by-d$, $M\neq 0$ 。 y 是

一元三次方程 $8y^3-4cy^2-(8e-2bd)y-e(b^2-4c)-d^2=0$ 的任一实根,而一元三次方程可用盛金公式^[17]求解。

2 研究区典型观测曲线的慢时变系统结构异常分析

利用映震效果较好的红柳峡、石灰窑口、扁都口、窝子滩及映震效果偏弱的南营共5个场地观测曲线,构建前兆系统结构,分析其与6级左右及6级以上地震孕育发生过程的可能关系。

1) 石灰窑口(B-水西)段。该场地位于祁连山断裂带中段,趋势向下反映逆断变化,观测曲线(图2(a)黑线)对2003-10-25民乐6.1级地震反映最好(2002年至震前显著加速-转折,震中距仅32km);1994~1995年反向尖点突跳可能属1993-10-20发生的100km外托勒6.0级地震影响;2008-05-12(监测区外、震中距约700km)汶川8.0级震前也出现跳变增大情况。慢时变拟合效果尚好(图2(a)灰虚线)。最大特征根模(大于1.0视为异常)时序变化见图2(b),对民乐震前异常状态反映最好(异常出现4次即持续8个月,量值较高);托勒震后(永登震前)异常也出现多次;汶川震前、2006年出现的短暂异常不排除震区周围大尺度区域应力场强化或扰动影响的可能性;2000-06景泰5.9级(距场地300余km)震前异常则很弱。若定义大于1.0的最大特征根模出现至少4次(即使4个月测一期,实际观测异常也至少出现了2次)为A类、1~3次为B类异常,可对其程度进行强、弱区分,则民乐震前、托勒震后异常为A类异常,而汶川与景泰震前异常降为B类,反映场兆甚至远场扰动信息。

需说明的是,本文用的是线性动态方程,结构相对简化,图2(a)已显示与原始观测曲线总体趋势、形态的一致性,拟合均方根0.14mm也小于监测区平均0.3mm左右的观测误差(一致性稍差的时段仅占小部分。推测有两种原因:一是线性模型的相对简化,导致观测曲线中某些振荡频繁、高低陡变的时段一致性弱;二是当观测曲线出现显著加速、转折、跳变时,鉴于该时刻拟合值由之前的观测值序列推估所得,差异大则系统偏离正常状态,即反映“异常”,如图2(a)中2006年尖点突跳)。其他场地观测曲线(图3(a)~图6(a))也如此。

2) 红柳峡(基西-基南)段。该场地位于祁连山断裂带西段,向下变化表示逆断特性(图3

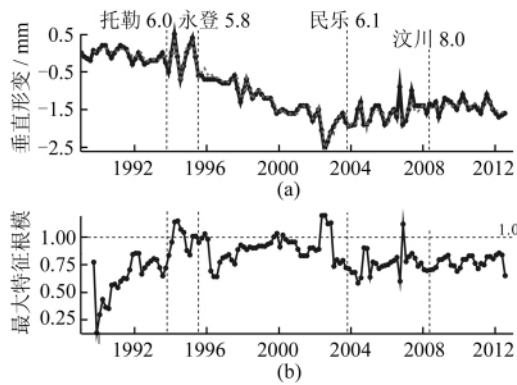


图 2 (a)石灰窑口(B-水西)段观测曲线(黑线)与慢时变拟合值(灰虚线)(b)最大特征根模时序曲线
Fig. 2 (a)Observational Curve (Black Line) and Slow Time-varying Simulation Result (Grey Dashed) at (B-Shuixi) Segment of Shihuiyaokou Site (b)Time-varying of Modules of the Maximum Latent Roots

(a)),对 1993 年托勒同震变化、2002-12-14 玉门(震中距仅 18 km)与 2008 年汶川震前异常反映较好(反向正断突跳)。慢时变拟合均方根差为 0.13 mm(小于观测误差),最大特征根模时序变化见图 3(b),对玉门地震前后、汶川(震中距约 1 200 km)震前异常反映明显,属 A 类异常,托勒同震、1998 年出现的异常(可能与 1997 年 1 000 km 外玛尼 7.5 级大震影响有关)持续性弱。

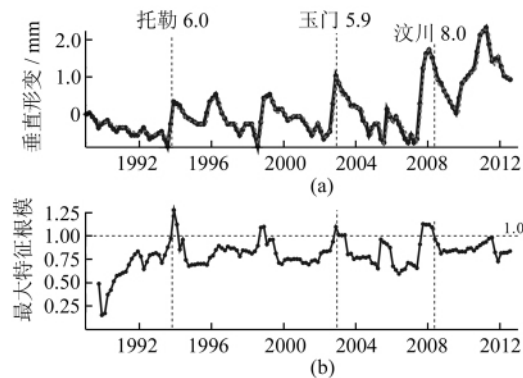


图 3 (a)红柳峡(基西-基南)段观测曲线(黑线)与慢时变拟合值(灰虚线)(b)最大特征根模时序曲线
Fig. 3 (a)Observational Curve (Black Line) and Slow Time-varying Simulation Result (Grey Dashed) at (Jixi-Jinan) Segment of Hongliuxia Site (b)Time-varying of Modules of the Maximum Latent Roots

3) 窝子滩(205-206)段。该场地位于海原断裂西段,观测曲线图 4(a)呈长趋势逆断型下降,1995 年永登 5.8 级、1996 年天祝 5.4 级、2000 年景泰 5.9 级(震中距 60~135 km)甚至不排除 2008 年汶川 8.0 级(震中距 600 多 km)震前“趋势加速转折”。最大特征根模时序变化见图 4(b)(拟合均方根 0.32 mm,与监测区 0.3 mm

左右的观测误差持平,结果合理),对这 4 个震例都有反映,其中永登震前异常持续最久、量值较高(A 类异常);其他地震前异常程度稍弱(B 类),可能与永登震后相对之前十几年观测曲线波动略增、系统逐渐适应有关。1992 年初异常原因不明,2006 年 1 月异常不排除与 205 点冰冻的关系,之前数年最大特征根模都出现上升趋势,不排除反映应变能长期积累信息的可能性;近期出现 A 类异常,有预测意义。

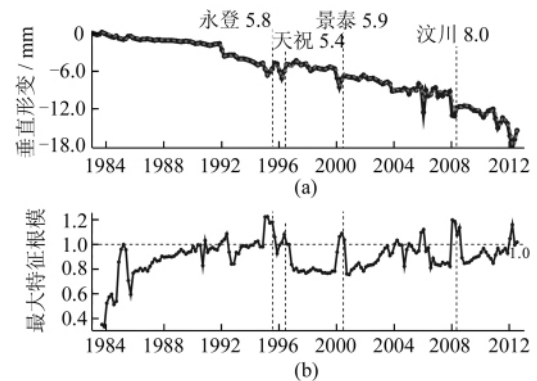


图 4 (a)窝子滩(205-206)段观测曲线(黑线)与慢时变拟合值(灰虚线)(b)最大特征根模时序曲线
Fig. 4 (a)Observational Curve (Black Line) and Slow Time-varying Simulation Result (Grey Dashed) at (205-206) Segment of Wozitan Site (b)Time-varying of Modules of the Maximum Latent Roots

4) 扁都口(B-A2)段。该场地位于祁连山断裂带中段,正断特性(曲线上升)为主,观测曲线图 5(a)在永登震前出现过显著逆断性转折-阶跃现象。慢时变拟合均方根 0.36 mm(接近监测区 0.30 mm 左右的平均观测误差,结果合理),最大特征根模曲线图 5(b)显示震前显著 A 类异常。

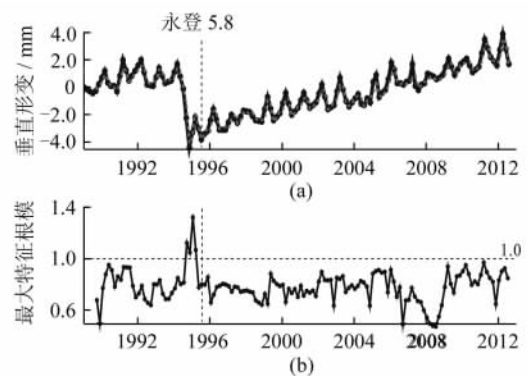


图 5 (a)扁都口(B-A2)段观测曲线(黑线)与慢时变拟合值(灰虚线)(b)最大特征根模时序曲线
Fig. 5 (a)Observational Curve (Black Line) and Slow Time-varying Simulation Result (Grey Dashed) at (B-A2) Segment of Biandukou Site (b)Time-varying of Modules of the Maximum Latent Roots

5) 南营(6-4)段。该场地位于祁连山断裂带东段,观测曲线图 6(a)呈上升(正断)趋势,变化相对平稳;而最大特征根模曲线图 6(b)则显示出永登、景泰、民乐甚至不排除汶川震前或震后 B 类弱异常,比原始观测曲线明显(慢时变拟合均方根 0.17 mm,小于监测区 0.3 mm 左右的平均观测误差)。

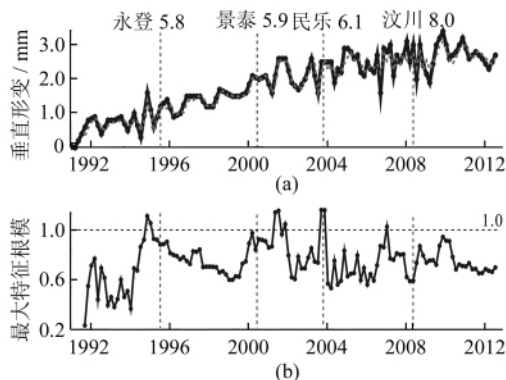


图 6 (a)南营(6-4)段观测曲线(黑线)与慢时变拟合值(灰虚线)(b)最大特征根模时序曲线

Fig. 6 (a)Observational Curve (Black Line) and Slow Time-varying Simulation Result (Grey Dashed) at (6-4) Segment of Nanying Site (b)Time-varying of Modules of the Maximum Latent Roots

3 结 语

本文将自适应控制理论引入跨断层形变分析,首次利用甘肃及与宁、青交界监测区内石灰窑口、红柳峡、窝子滩、扁都口、南营 5 个典型场地资料,构建观测曲线反映的慢时变前兆系统结构,识别异常。结果表明:① 慢时变系统结构分析方法对上述场地观测所得、可能与强震孕育-发生有关的前兆异常反映较好,异常识别、异常程度分类判定较原始观测曲线更为直观,减少了人为性或经验性;在反映断层形变前兆系统结构的动态变化和自适应性方面,较以往形变指标也有所改进。② 根据所在构造区 6 级左右及 6 级以上地震发生时间间隔推算遗忘因子,拟合结果合理、映震效果较好,对预测未来地震有利;而窝子滩场地近期异常明显。目前分析只是初步,所选场地仅是监测区场地总数的 1/10,今后还需更广泛、深入地研究。

参 考 文 献

[1] 江在森,祝意青. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层变形与重力场动态图像特征[J]. 地震学报, 1998, 20(3): 262-271

[2] 江在森,丁平,王双绪,等. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京:地震出版社,2001:44-46, 87-105

[3] 王双绪,江在森,陈文胜,等. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报,2001,23(2): 151-158

[4] 张希,崔笃信,张四新,等. 地形变观测揭示的汶川 Ms8.0 级地震同震响应与影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(10):1 204-1 209

[5] 邱泽华. 关于地震前兆的判据问题[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(Supp):1-5

[6] 陈兵,江在森,赵振才. 中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究[J]. 中国地震,2000,16(1):77-85

[7] 张希,江在森,王双绪,等. 断层形变的应变强度比动态图像与震例综合研究[J]. 地壳形变与地震,2001,21(2):37-42

[8] 张希,薛富平,王双绪,等. 大姚、民乐-山丹地震前的中短期前兆[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(4):57-63

[9] 张希,薛富平,贾鹏. 甘肃及边邻地区断层形变特征强度时序变化与强震关系[J]. 国际地震动态,2010(10):43-48

[10] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(三)——强震孕育地震活动与地壳形变异常及机制[J]. 地震学报,1996,18(2):170-178

[11] 韩曾晋. 自适应控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,1983

[12] 刘幸,刘潇. 自适应控制系统的发展与应用[J]. 物联网技术,2011,1(7):61-63

[13] 韩正之,陈彭年,陈树中. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社,2011:31-36

[14] 姚海涛,朱福喜,陈海强. 一种自适应的 PSO 粒子滤波人脸视频跟踪方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(4):492-495

[15] 牛安福,张凌空,闫伟,等. 汶川地震前南北地震带中北段地形变化特征的研究[J]. 地震,2009,29(1):100-107

[16] 张希,王双绪,张晓亮,等. 昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响[J]. 地球学报,2010,31(1):32-42

[17] 范盛金. 一元三次方程的新求根公式与新判别法[J]. 海南师范学院学报(自然科学版),1989,2(2): 91-98

第一作者简介:张希,研究员。主要从事地壳形变与地球动力学研究。

E-mail:zhgx_ivy@sina.com

Identification of Abnormity and Analysis of Slow Time-Varying Structure for Cross-fault Deformation

ZHANG Xi¹ TANG Hongtao¹ JIA Peng¹ GONG Shouwen¹

(1 The Second Monitoring and Application Center, CEA, 316 Xiying Road, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using 5 typical observational curve at sites such as Shihuiyaokou, Hongliuxia, Wozitan, Biandukou and Nanying, in the monitoring area of Gansu Province and its boundaries with Ningxia and Qinghai Provinces, the slow time-varying precursor system is constructed, the abnormity is identified, and the possible relationship between the abnormity and preparation of earthquakes around or over 6.0 magnitude are researched. The results show that at the medium and short-term phase before these earthquakes, the maximum module of latent root exceeded 1.0. This method reduced factitious or experiential identification of abnormity relative to analysis of observational curve, also reflects dynamic variation and adaptive features of precursor system structure for cross-fault deformation.

Key words: cross-fault deformation; slow time-varying system structure; analysis of earthquake examples

About the first author: ZHANG Xi, professor, majors in crustal deformation and geodynamics.

E-mail: zhgx_ivy@sina.com

.....
(上接第 678 页)

change and spatial distribution of vegetation coverage in Shaanxi Province are analyzed by means of maximum value composites (MVC), one-dimensional linear regression and differential approach. The results show that the yearly maximum NDVI of Shaanxi Province is on the whole improved from 1998 to 2008, but the inter-annual change trend of the monthly maximum NDVI has a great difference among different months, the changes during the adjacent two years of both the yearly maximum NDVI and the monthly maximum NDVI have a great difference, and the vegetation degradation and improvement appear fluctuantly. The change of vegetation coverage is obviously during 1998 to 2008, and the vegetation is best in August and September. Vegetation coverage of most regions is increased, the obviously increased regions mainly appear in northern parts of Shaanxi Province (southeast parts of Yulin and north part of Yan'an), in south central of Baoji, parts of Xi'an, Shangluo, Ankang are also improved.

Key words: erosion; remote sensing; normalized difference vegetation index; vegetation coverage; maximum value composites; Shaanxi Province

About the first author: CHEN Xuexiong, Ph. D candidate, majors in remote sensing and 3S integration, soil erosion assessment based on GIS.

E-mail: chenxx0505@126.com