

43-51
用大地形变判定强震危险区的指标体系
及河西地区垂直形变场演化 p315.5

崔笃信 江在森 王双绪

(中国地震局第二地形变监测中心, 西安 710054)

摘要 提出了表征地壳垂直形变场定量特征的地壳垂直运动准加速度及体积变化率两个新指标, 利用甘肃河西地区70年代以来的5期复测水准资料计算了地壳剪切变形率、扩张变形率、体积变化率、速率增量、准加速度等各项指标, 并分析了这些指标与强震危险区判定的关系, 系统地研究了该地区垂直形变场的演化过程。

主题词 地壳形变, 地壳运动, 地震危险区, 甘肃, 河西地区

1 引言

目前描述地壳垂直形变的量主要有形变速率和速率梯度, 它们均属于运动学范畴。在利用这两个指标预报地震时, 经常出现漏报和误报的现象, 所以, 研究利用大地形变资料判定地震危险区的新指标及研究各指标之间的关系, 建立更全面的指标体系变得十分必要。地壳剪切变形分量和扩张变形分量不仅能够反映地壳变形程度, 而且能够反映地壳的变形类型^[1]; 它们的大小与基准无关, 测量的累积误差也很小, 因而更能客观地反映地壳的变形程度。此外本文还提出了地壳垂直运动准加速度和体积变化率两个新指标。垂直运动准加速度是速率随时间的变化, 它近似于地壳垂直运动加速度, 具有动力学意义; 地壳体积变化率是指地壳在垂直方向上发生变形而引起的地壳体积的变化, 它们均从不同的侧面反映了地壳的变形程度。甘肃河西地区是历史上的地震多发区, 多年来被列为重点监测区。本文利用该地区70年代以来5期水准复测资料对上述指标进行综合计算、分析, 系统地研究了该地区20年来垂直形变场的演化过程试图得出上述指标体系与判定强震危险区的关系。

2 方法概述

2.1 地壳剪切变形分量和扩张变形分量

地壳构造运动有3种主要形式: 地壳某地段上的平行移动、绝对刚体的旋转运动和纯粹变形。后一种形式具有两个独立的要素——体积(或面积)的相对变化(扩张变形)和形态畸变(剪切变形)。其剪切变形分量 γ 和扩张变形分量 θ 可根据以下两式^[1]求得

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{V_k - V_{k-1}}{S_{k, k-1}} + \frac{V_{k+1} - V_k}{S_{k, k+1}} \right) \quad (1)$$

收稿日期: 1997-01-02

第一作者简介: 崔笃信, 男, 1962年4月生, 工程师, 现主要从事地理信息系统的应用研究。

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{V_k - V_{k-1}}{S_{k,k-1}} - \frac{V_{k+1} - V_k}{S_{k,k+1}} \right) \quad (2)$$

式中 V_{k+1} , V_k , V_{k-1} 分别为地面上相邻3个点的垂直运动速率, $S_{k,k-1}$ 和 $S_{k,k+1}$ 为相邻两个点之间的水平距离.

以上描述地壳垂直剖面变形的剪切变形分量和扩张变形分量只与地壳垂直运动速率的相对变化有关, 与速率的大小无关, 因而与速率的基准无关. 它们的误差只与相邻点有关, 避免了长距离测量误差的积累, 因而更能客观地描述地壳变形程度. 实际上 γ 近似等于速率函数的方向导数, 在速率变化等值线的法线方向上取得最大值, 这时 γ 值就是速率梯度. 通过地面上任一点可以作若干个剖面. 据研究^[2], 以 γ 和 θ 中各自的最大值代表该点周围的变形程度, 此值更能清晰、细致地反映地壳的变形情况, 即

$$\gamma = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) \quad (3)$$

$$\theta = \max(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \quad (4)$$

2.2 地壳垂直运动准加速度

地壳垂直运动准加速度是指地壳垂直运动速率随时间的变化

$$A = \frac{V_2 - V_1}{\Delta T} \quad (5)$$

其中 V_1 是前一时间段的速率, V_2 是后一时间段的速率, ΔT 为时间增量. 因为加速度

$$a = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{V_2 - V_1}{\Delta T} \quad (6)$$

所以, A 近似等于地壳运动加速度. 本文把 A 称为地壳垂直运动准加速度. 根据牛顿定律, 物体运动加速度与其所受力成正比, 因此, A 的大小反映了地壳所受力的大小.

如果 V_1 为整个时间段的平均速率, V_2 为各分时间段的平均速率, 那么速率增量 ΔV 可定义为

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (7)$$

它反映了地壳在各时间段相对于整个时间段速率的变化, 同时也从另一角度反映了地壳所受力的变化.

2.3 地壳体积变化率

若把研究区划分成若干个等水平截面积的小方块(如 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$), 假设其中任一立方体只在垂直向上的方向上发生体积变化, 则体积变化为

$$\Delta V = V' - V$$

$$\Delta V = \iint_D h'(x, y) d\sigma - \iint_D h(x, y) d\sigma$$

式中 $h'(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 分别为 T' 和 T 时刻的高程函数.

用梯形数值积分法得:

$$\Delta V = \frac{\Delta L^2}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h'_{ij} + h'_{ij+1}) - \frac{\Delta L^2}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h_{ij} + h_{ij+1})$$

$$= \frac{\Delta L^2}{2} \sum \sum [(h'_{ij} - h_{ij}) + (h'_{ij+1} - h_{ij+1})]$$

令

$$h'_{ij} - h_{ij} = \Delta h_{ij} = \nu_{ij} \Delta t$$

$$h'_{ij+1} - h_{ij+1} = \Delta h_{ij+1} = \nu_{ij} + \Delta t$$

$$\Delta V = \frac{\Delta L^2}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\nu_{ij} + \nu_{ij+1}) \Delta t$$

$$\text{体积变化率} \quad \Delta V_t = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta L^2}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\nu_{ij} + \nu_{ij+1})$$

式中 V 为原来的体积, V' 为变化后的体积, ν 为地壳运动速率, 这样就计算出体积变化率的空间分布。

3 利用大地形变指标体系判定地震危险区的实例

甘肃河西地区有 1972、1979、1983、1989、1995 年共 5 期复测水准资料, 构成 1972~1979、1979~1983、1983~1989、1989~1995 年 4 个分时间段和 1972~1995 年一个总时间段, 先对数据进行分段速率拟稳平差^[3], 求得各时间段的平均速率, 再用多面函数进行拟合, 求出各时间段的速率面函数。把研究区域划分为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的网格, 求出各点的剪切变形分量、扩张变形分量和体积变化率、准加速度和速率增量, 并绘制了等值线图(图 1~图 5)。

3.1 剪切变形分量、扩张变形分量与形变速率的关系

由(1)、(2)两式可知, 地壳剪切变形分量与速率在水平方向上的变化成正比, 地壳扩张变形分量与速率差的相对变化成正比, 它们与速率的大小无关。因此, 地表上升或下沉速率最大的地方不一定是剪切变形分量和扩张变形分量最大的地方; 如图 1b 和图 3a 中的青石嘴西北, 是地壳上升强烈的地方, 而不是剪切变形和扩张变形最大的地方; 速率等值线最密集的地方(即形变速率高梯度区)一般是剪切变形最大的地方, 如图 1b 和图 3a 中的青石嘴以北及图 1c 和图 4a 中的民乐西北部; 形变速率等值线弯屈率最大的地方是地壳扩张变形最大的地方, 如图 1c 和图 4b 中的天祝-武威一带。因此, 地壳剪切变形分量和扩张变形分量反映了地壳的变形类型, 显示了地壳形变速率图不能完全反映的信息。

3.2 地壳体积变化率与形变速率的关系

地壳体积变化率与形变速率的绝对值成正比, 所以, 地壳体积变化率最大的地方是地壳下沉或上升强烈的地方, 如图 1a 和 2d 中青石嘴以北, 但它与形变速率相比又具有不同的物理意义, 用它能整体地定量地表征一个监测区(或一个单元体)的地壳垂直运动强度; 另外, 多种震源模式研究表明, “强震孕育过程中可出现不止一次的非弹性膨胀”扩容, 如果垂直形变监测点足够密时, 通过地壳一定尺度的垂向体积变化率分布的研究, 可能对强震危险区的跟踪判断有重要意义。

3.3 地壳剪切变形、扩张变形、体积变化率、准加速度与地震危险区判定的关系

在 4 个时段中, 1972~1979 年(图 1a 和图 2)是河西地区地壳剪切变形、扩张变形和体积变化率最小的时段, 没有剪切变形大于 0.15, 扩张变形大于 0.06 的区域。在此期间和之后 6 年中该地区未发生过 6.0 级以上的地震。1979~1983 年, 河西地区的 3 项指标都很高(表 1), 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震就发生在剪切变形分量值大于 0.3 所围成的区域内(图 3), 在扩张变形最大区域及体积变化率最大区域边缘, 在准加速度的正值区。1983~1989 年, 4 项指标高值区的面积较大, 虽没有出现剪切变形值大于 0.2 的区域, 但天祝周围出现扩张变形较高的区域(图 4); 而该区域地壳准加速度为正值, 1990 年发生了天祝-景泰 6.2 级地震。1989~1995 年, 与上一时段相比 4 项指标的值都有所下降, 但在天祝-景泰一带出现了较小规模的高剪切变形区(图 5), 在武威-天祝以北为准加速度正值区, 1995 年和 1996 年, 在该区域内先后发生了 5.8 和 5.4 级地震。

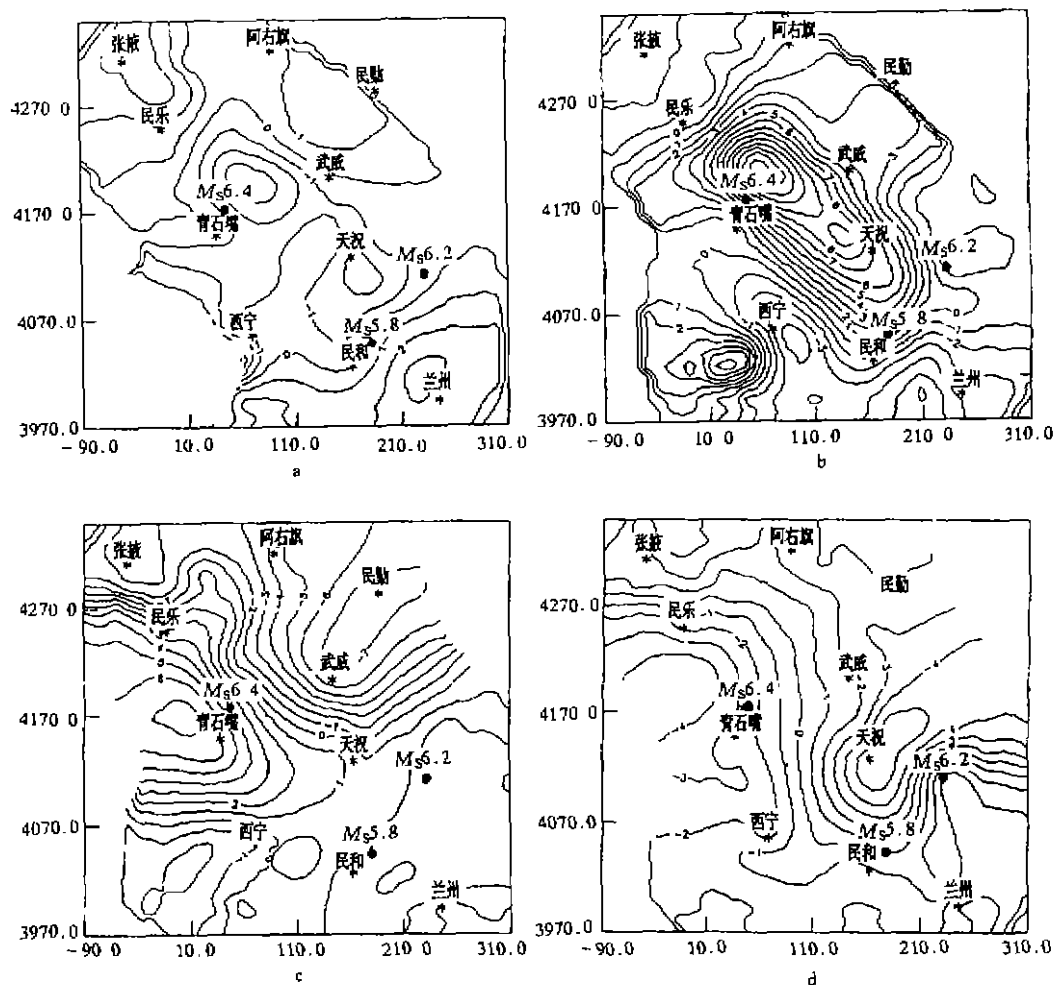


图1 甘肃河西地区垂直形变速率等值线

Fig. 1 Isoline of vertical deformation rate in Hexi area, Gansu.

a 1972~1979; b 1979~1983; c 1983~1989; d 1989~1995

4 河西垂直形变场演化过程

4.1 垂直形变场演化过程

1972~1979年(图1a和图2), 张掖-民乐以北走廊盆地相对于祁连山缓慢上升, 其速率为1~2 mm/a, 祁连山东段大范围下沉, 速率为2~4 mm/a, 全区剪切变形大于0.1、扩张变形大于0.06的区域很小, 该时间段的速率增量表现为山区变小而盆地变大的形态. 因此, 该时段地壳在进行较弱的逆继承性构造运动.

1979~1983年(图1b和图3), 祁连山构造带东段以7~15 mm/a的速率上升, 形成了民乐至民和以东剪切变形大于0.15的高剪切变形带, 青石嘴以北为最大, 值达0.30; 走廊盆地相对于祁连山大范围下沉. 该时间段的速率增量表现为山区为正而盆地为负的形态. 因此, 该时段地壳呈强烈的继承性构造运动.

1983~1989年(图1c和图4), 1986年发生了门源6.4级地震, 震中位于上一时段的高剪

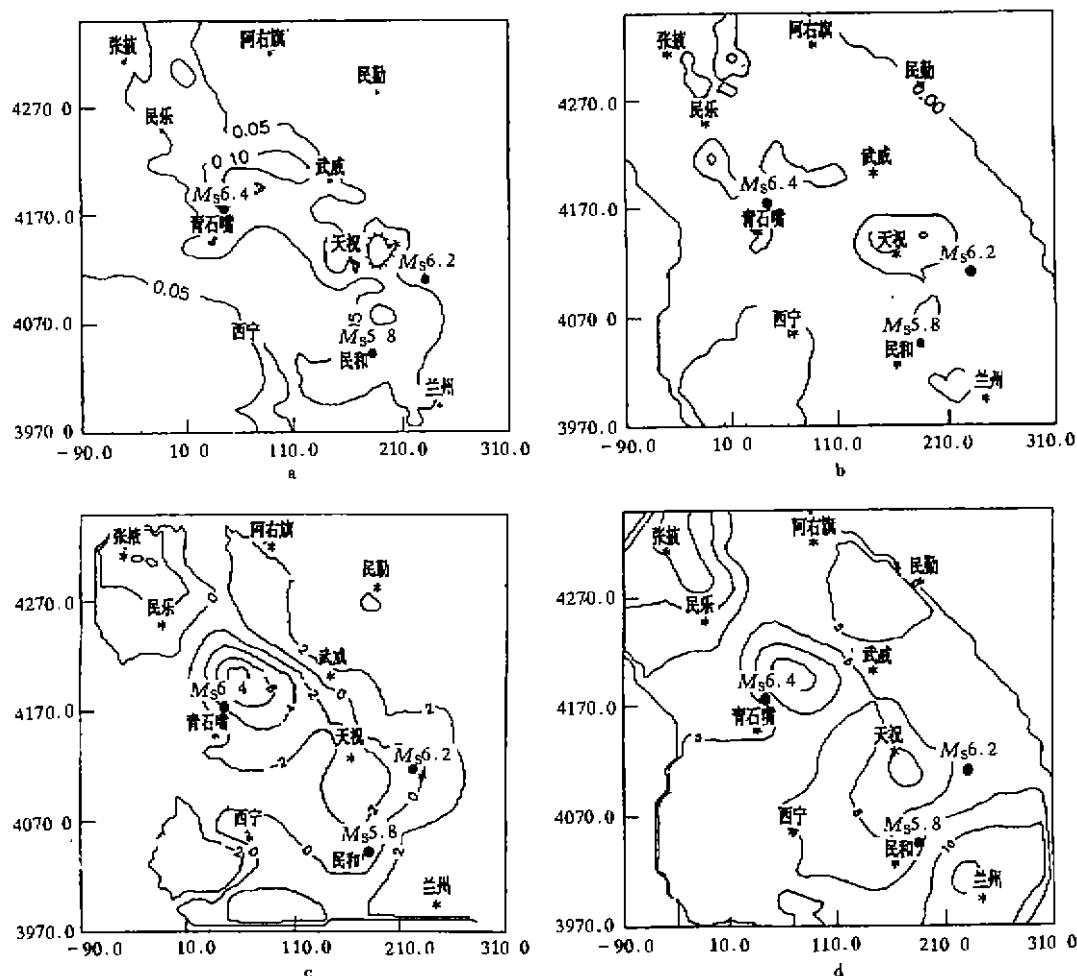


图2 甘肃河西地区垂直形变等值线(1972~1979)

Fig.2 Isolines of vertical deformation in Hexi area(1972~1979).

a 剪切变形; b 扩张变形; c 速率增量; d 体积变化率

切变形区,地震发生后异常隆起区消失,但形态与前一时段大致相同.祁连山构造带仍大规模上升,速率为 $3\sim 6\text{ mm/a}$,而盆地大部分以 $3\sim 6\text{ mm/a}$ 的速率下沉,沿着构造带形成了值大于 0.1 的较高剪切变形带.由图可看出,与上一时段相比,形变速率、剪切变形和扩张变形值亦有所减小,该时间段的速率增量表现为山区为正而盆地为负的形态.因此,该时段继承性运动有所减弱.1990年,在高剪切变形带东端的天祝和景泰之间发生了 6.2 级地震.

1989~1995年(图1d和图5),形变场整体趋势发生逆转,全区整体形变特征为:祁连山构造带相对下沉,速率为 $2\sim 4\text{ mm/a}$,而走廊拗陷带相对上升,速率为 $2\sim 5\text{ mm/a}$,为明显的逆继承性构造运动.另外在天祝周围出现了一北东向、速率大于 5 mm/a 的形变隆起区,该区的剪切变形和扩张变形值较大,1995和1996年先后在天祝和永登发生了 5.8 和 5.4 级地震.但该区整体的形变速率、剪切变形和扩张变形量都不大,所以,该时段的地壳运动还是较弱的.

4.2 地壳垂直形变与区域应力场

应力的作用使地壳产生变形,反过来,地壳的形变也能反映应力场的变化,特别是地壳运动速率的变化,它更能反映地壳受力的变化.甘肃河西地区位于青藏块体和阿拉善块体的交接

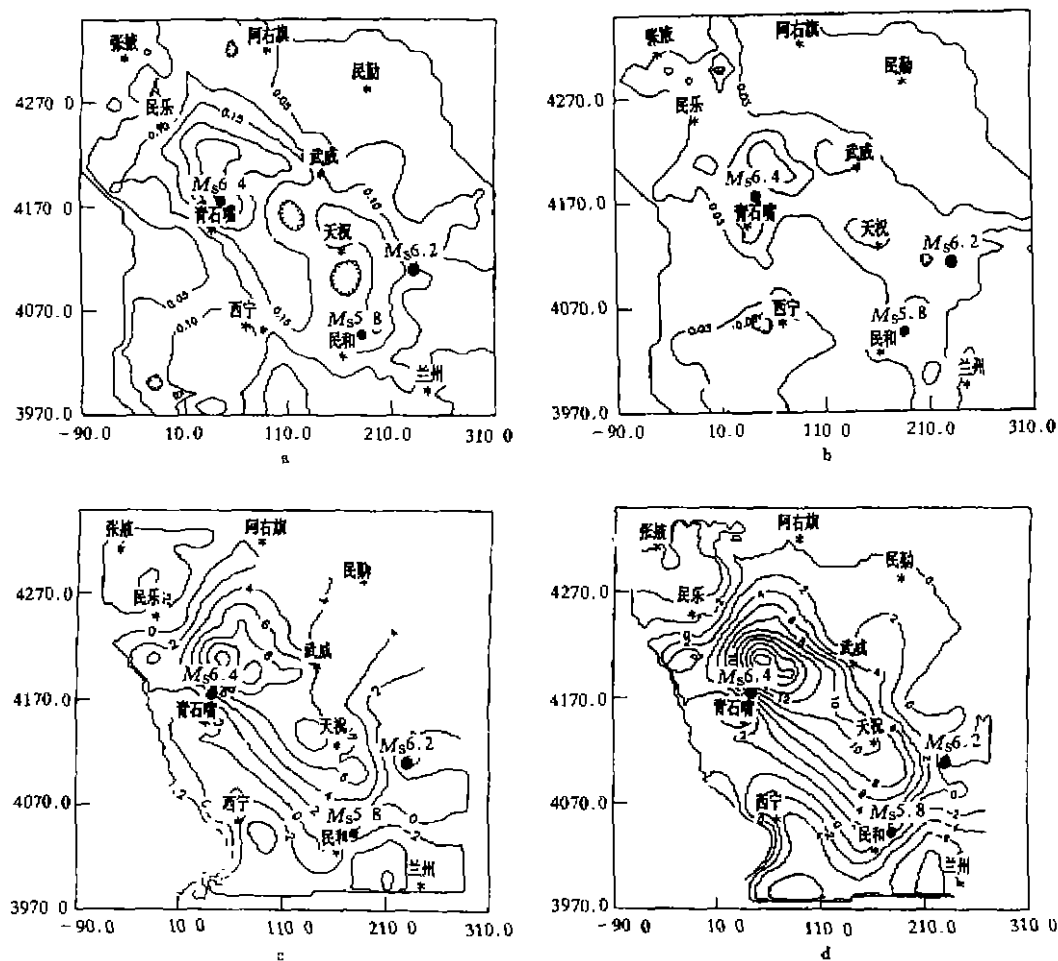


图3 甘肃河西地区垂直形变等值线(1979~1983)

Fig.3 Isolines of vertical deformation in Hexi area(1979~1983).

a 剪切变形; b 扩张变形; c 速率增量; d 准加速度

带上,其外力主要来源于青藏块体向东北方向的推挤作用.1972~1979年,地壳运动主要表现为山区下沉而盆地上升的逆继承性构造运动.该时段形变的各项指标在所有时段中为最小(表1).地震活动处于平静期,所以,该时段地壳应力相对较弱,是应力的调整阶段.1979~1983年,地壳运动主要表现为山区急剧上升和盆地下沉的继承性构造运动;地壳形变速率、剪切变形量和扩张变形量都是所有时段中最大的,与前一时段相比,这一时段准加速度在大部分地方为正值(图3d),说明该区域有比重力大且方向相反的外力作用.因此,该时段地壳应力场增强.1983~1989年,地壳运动仍表现为山区上升而盆地下沉的继承性构造运动,但速率有所减小;剪切变形量和扩张变形量与上一时段相比亦有所减小;与前一时段相比,准加速度在大部分地方为负值(图4d),这是由于地震的发生使应力得到局部释放而且地壳受重力作用占主导地位的结果,该时段区域应力场有所减弱.1989~1995年,地壳运动趋势发生逆转,变为山区缓慢上升而盆地下沉的逆继承性构造运动.剪切变形和扩张变形值均大幅度减小,但仍略大于第一时段的值;在盆地的大部分地区地壳运动准加速度为正,而在山区为负(图5d),这与重力

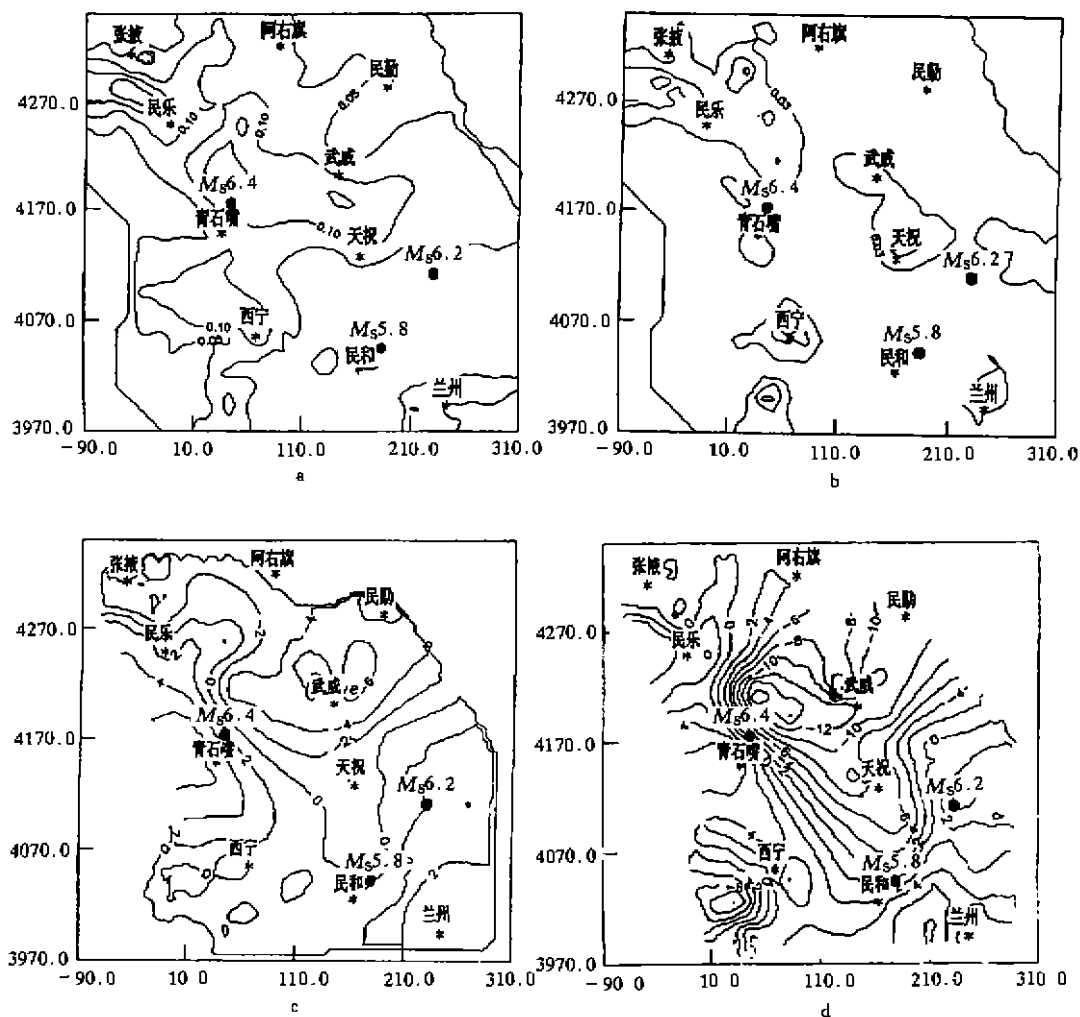


图4 甘肃河西地区垂直形变等值线(1983~1989)

Fig. 2 Isolines of vertical deformation in Hexi area (1983~1989).

a 剪切变形; b 扩张变形; c 速率增量; d 准加速度

的变化趋势基本一致^[4]。可以设想,该时段青藏块体向北推挤的作用减弱,原来上升的山区,在重力的作用下转而下沉,促使软流层向山根的两边流动,因而,山区的重力值变小,而盆的变大。以上事实说明,该时段的区域应力场减弱,今后发生强震的可能性小,而发生中小地震的地区应在盆地及其与山区交接地带,1995和1996年两次中强地震的发生就是一个例证。

5 结论

(1) 甘肃河西地区1972~1979年呈现逆继承性构造运动,1979~1983年为剧烈的继承性构造运动,1983~1989年为继承性构造运动(强度有所减弱),1989~1995年为逆继承性构造运动,应力场处于调整阶段。

(2) 地壳运动的剪切变形分量、扩张变形分量、准加速度、体积变化率以及形变速率分别具有不同的物理意义,既互相区别又互相联系。地壳运动的剪切变形和扩张变形分量分别表征两

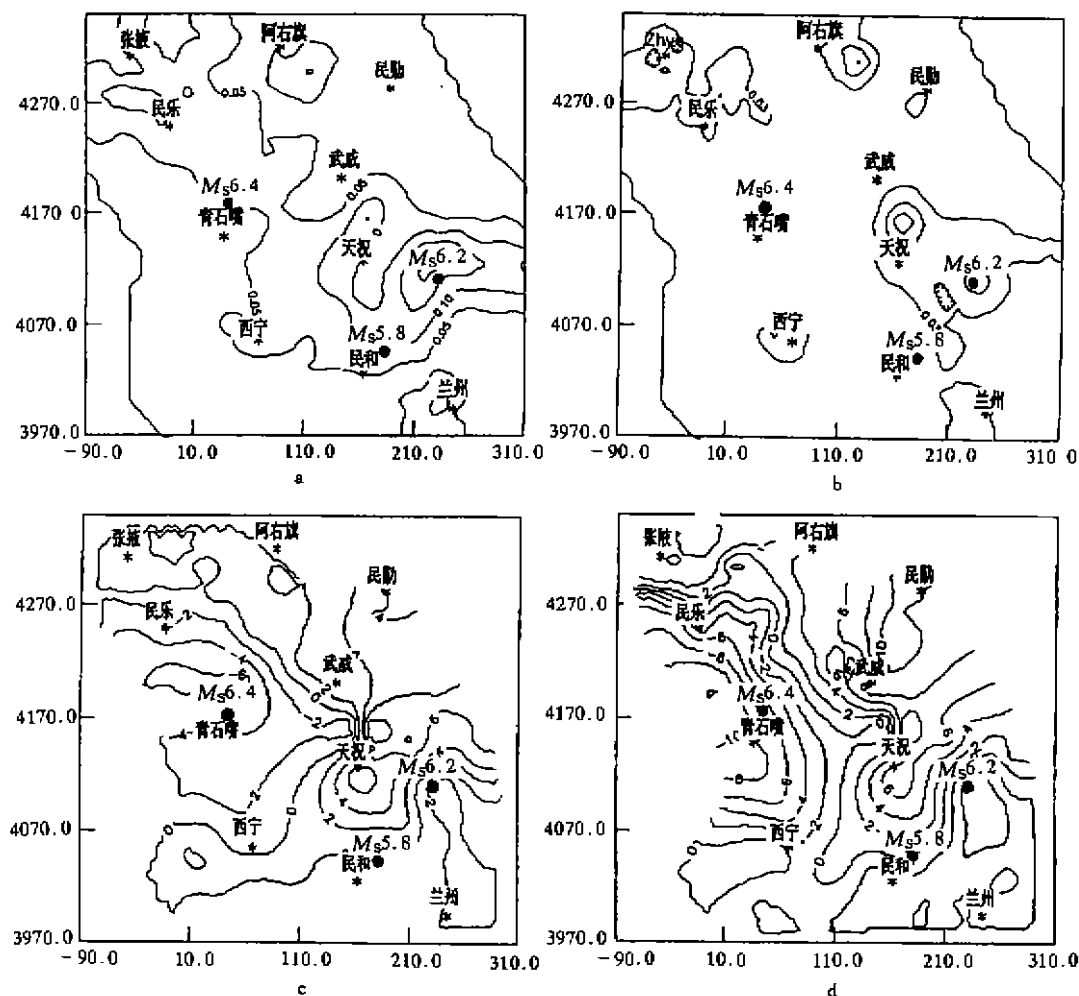


图5 甘肃河西地区垂直形变等值线(1989~1995)

Fig.2 Isolines of vertical deformation in Hexi area(1989~1995).

a 剪切变形; b 扩张变形; c 速率增量; d 准加速度

表1 甘肃河西地区垂直形变场整体特征参量

时段	剪切变形分量 ($\times 10^{-6}$)		扩张变形分量 ($\times 10^{-6}$)		体积变化率 ($\times 10^{-6}$)		准加速度 (mm/a ²)		地震 ($M_s > 5.5$)
	最大值	单位面积 平均值	最大值	单位面积 平均值	最大值	单位面积 平均值	最大值	单位面积 平均值	
1972~1979	0.10	0.05	0.10	0.02	10	4.42			
1979~1983	0.30	0.12	0.15	0.03	60	11.67	18.12	4.47	1986-08-26 门源 6.4
1983~1989	0.25	0.07	0.15	0.03	35	8.87	16.24	4.88	1990-10-20 天祝 6.2
1989~1995	0.20	0.07	0.20	0.02	20	7.18	10.11	4.24	1995-07-02 永登 5.8

注:表中所取最大值范围直距不小于20 km

种地壳变形类型、准加速度能够反映地壳受力状况,体积变化率则反映了地壳体积的变化,它们是全面描述地壳形变特征的要素。

(3) 地震一般发生在地壳垂直运动准加速度正值区,在剪切变形或扩张变形最大的区域

内或其附近,而且往往距剪切变形最大区更近.

(4) 当一个较大地区同时存在准加速度为正值、剪切变形大于 0.15、扩张变形大于 0.06、体积变化率大于 20,或存在其中一项或几项时,可以认为该地区有发生中强以上地震的可能,其存在的项数越多,预测的可信度越高.

(5) 在所有指标中,地壳剪切变形分量对发震地点及时间的判断信度最高,在 0.6 以上.其次是扩张变形分量和体积变化率.准加速度对于地点的判定信度较高,它的大小对震级判定作用不大.

(6) 对于发震时间的确定尚有较大的困难,要结合其它短临手段来判定.

参考文献

- 1 Н. П. БИРКОВ. 现代地壳运动的定量特征与地震区划的任务. 地震地质译丛, 1981, 3(6): 1~5.
- 2 崔笃信. 利用复测水准资料寻求反映地壳纯变形的定量指标. 地壳形变与地震, 1994, 13(1): 60~65.
- 3 江在森. 水准网的分段速率整体平差. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(1): 10~15.
- 4 祝意青. 北祁连地区地震前重力场变化特征. 地壳形变与地震, 1996, (2): 58~62.

INDEX SYSTEM FOR DECIDING STRONG EARTHQUAKE RISK AREA BY GEODETIC DEFORMATION DATA AND EVOLUTION OF VERTICAL DEFORMATION FIELD IN HEXI REGION

CUI Duxin JIANG Zaisen WANG Shuangxu

(No. 2 Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi'an 710054)

Abstract

In this paper, two new indices, quasi-acceleration of crustal vertical movement and crustal volume change rate, are presented, which will describe the characteristics of crustal vertical deformation field. The crustal shear deformation, extension deformation, quasi-acceleration and volume change rate are calculated by using leveling data in Hexi area, Gansu since 1970s. The relation between these indices and earthquake risk region judgment is analyzed systematically. The procedure of crustal deformation field evolution in Hexi area is studied.

Key words Crustal deformation, Crustal movement, Seismic risk region, Gansu, Hexi region