

南北地震带北段强震形变异常特征与预测指标研究^①

王双绪, 张 希, 祝意青, 张晓亮, 张四新, 薛富平

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要:利用南北地震带北段及附近地区上世纪 70 年代以来的区域水准、跨断层短测线和 90 年代以来的 GPS、流动重力等监测资料, 结合地质构造和监测区发生的几次 6 级左右及以上震例, 采用定性与定量相结合的方法分析研究了与地震有关的构造形变异常的基本特征及可能的机理, 初步总结了基于这些不同尺度(类型)的构造形变异常进行强震中期预测的一些指标判据。

关键词: 南北地震带北段; 强震形变异常特征; 预测判据

中图分类号: P315.725 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2012)02-0105-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0105

Study on the Characteristics of Strong Earthquake Deformation Anomalies and Forecasting Index in the North Segment of the South-north Seismic Belt of China

WANG Shuang-xu, ZHANG Xi, ZHU Yi-qing, ZHANG Xiao-iang, ZHANG Si-xing, XUE Fu-ping
(Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using the regional leveling, fault-crossing short survey since 1970s, and GPS, mobile gravitation observation data since 1990s in the north segment of the south-north seismic belt of China, combining with geologic structure and recent earthquakes ($M_s \geq 6.0$) in this area, the basic characteristics of structure deformation anomalies related to strong earthquakes in the area and possible mechanism are analyzed and studied in quantitative and qualitative ways. In different scale(kind), the strong earthquake prediction index criterions based on the structure deformation anomaly are summarized.

Key words: The North segment of the south-north seismic belt of China; Characteristics of deformation anomaly with strong earthquake; Forecasting criterions

0 引言

地震是地壳运动过程中能量长期积累和突然释放的结果。在当前的科学认识水平下, 进行强地震预测最大的困难之一是发震地点的判定。因而最大限度地利用不同尺度类型的地壳形变观测资料, 从中获取现代地壳运动变形的动态变化信息, 结合地质构造结构和已有震例, 研究与地震有关的形变异常特征, 对未来强震预测十分重要。但由于中国大

陆构造系统复杂, 不同构造环境、动力作用条件下的地震本身存在差异, 难于建立普适性的理论模型来解决地震预测问题, 而只能针对具体构造进行。

南北地震带北段位于祁连山地块和鄂尔多斯地块的交汇部位, 区域地质构造复杂, 祁连山—海原主边界断裂、六盘山汇聚构造断裂、香山—天景山断裂、青铜峡—同心—固原断裂、贺兰山断裂、西秦北缘断裂等构造活动断裂广布, 历史地震活动水平高强度大^[1]。本区地壳形变监测开始于 20 世纪 70 年

① 收稿日期: 2011-02-28

基金项目: 中国地震局监测预报司“南北地震带北段大震危险性跟踪研究”和“中国大陆 7、8 级地震危险性中长期预测研究”项目
作者简介: 王双绪(1959—), 男(汉族), 陕西岐山人, 研究员, 现从事地壳形变地震预测与地球动力学研究。

代,至今已获得了大量的区域性地形变(水准网、GPS网)、跨断层短测线流动形变、流动重力等监测资料^[2]。监测区及附近先后发生了1986年青海门源6.4级、1990年青海共和7.0级和甘肃景泰6.0级、1995年甘肃永登5.8级、2000年景泰5.9级、2002年玉门5.9级、2003年青海德令哈6.6级和2003年甘肃民乐6.1级等较强地震。依此为基础,本文全面利用这些不同尺度(类型)的地壳形变监测资料,结合地质构造和监测区发生的几次6级左右及以上震例,采用定性分析与定量(以GPS、区域水准观测位移为地表约束,进行基于块体和断裂构造的非震负位错模型^[3]反演计算,分析块体和断层运动变形状态)相结合的方法,分析研究区域震前构造形变异常的基本特征,研究与地震有关的高应变积累闭锁区段以及可能的机理;进而结合流动重力和断层形变异常,初步总结研究基于区域构造形变异常进行强震中期预测的指标判据。

1 与地震有关的区域水平运动变形背景异常特征

1.1 GPS资料使用与处理概况

南北地震带北段及附近的GPS监测网(空间范围:33°~41°N,98°~108°E)由20世纪90年代初建

立的河西(C)网和“中国地壳运动观测网络”区域网、“973”项目加密观测网构成,自1993年建网观测以来已有数期复测资料积累。GPS数据处理时,首先对各期观测结果进行GAMIT精密解算;其次用GLOBK求解出相邻两期资料组成的时间段的水平位移速度值(相对全球参考框架),并通过基准转换(扣除区域整体平移和旋转),获得本区域相对水平运动速率分布;第三,由位移与应变的关系求解出水平变形场视应变参数^[4],建立反映区域现今水平运动与变形的应变场图像(限于篇幅,文中只列出了部分应变场图像);最后,以GPS观测位移为地表约束,建立基于区域断裂构造的非震负位错模型进行反演计算,分析研究与地震有关的高应变积累闭锁区段。

1.2 区域性水平运动变形背景与地震

根据南北地震带北段及附近地区10多年GPS资料得到的形变应变场分布,水平运动变形动态特征表现为:①现今运动状态总体上呈与地质背景较一致的挤压逆冲和旋转为主的继承性运动,且运动和变形空间分布具有显著的不均匀性,主要边界断裂附近运动和变形强烈、远离则衰减,形成一定宽度的变形带(区)。②甘宁青地区1999—2001年相对1993—1999年运动强度有所减弱(可能与青藏块体

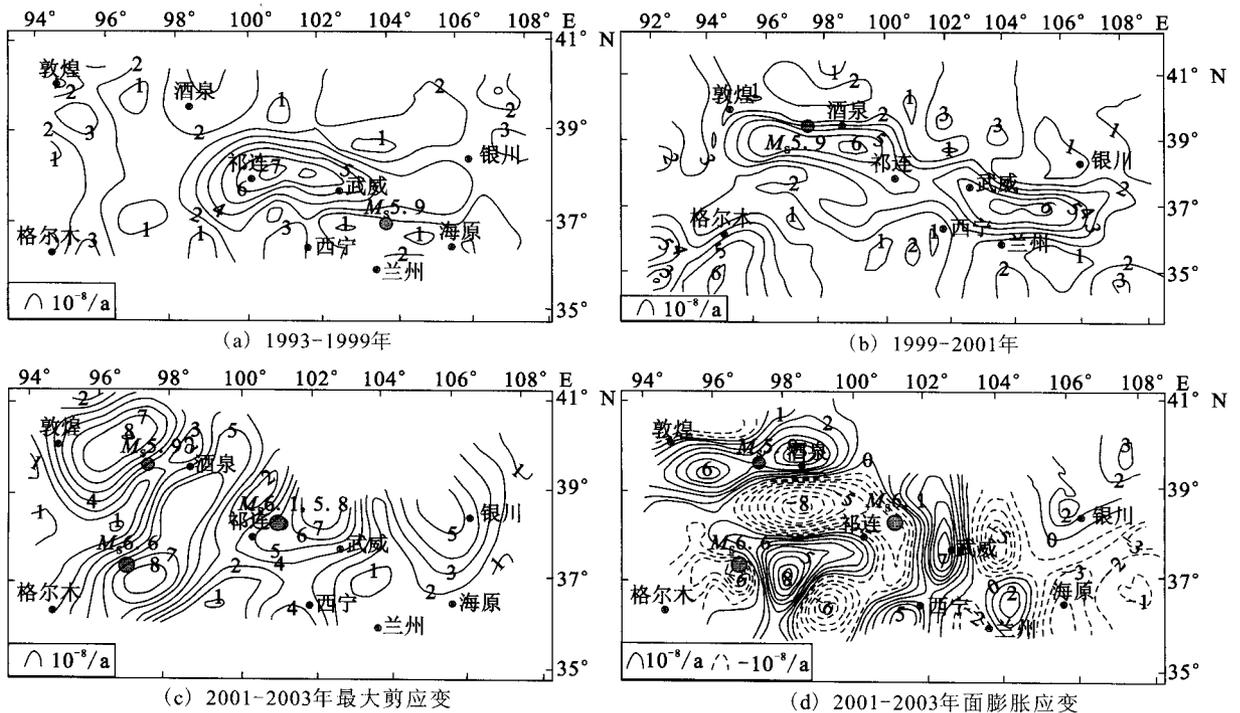


图1 南北地震带北段GPS水平形变应变场最大剪应变分布图(单位:10⁻⁸)
(2003年资料为德令哈6.6级和民乐6.1级地震前观测)

Fig. 1 Distributing map of GPS level deformation strain field in the north segment of the south-north seismic belt of China(unit: 10⁻⁸).

表 1 南北地震带北段 GPS 水平运动变形高应变背景异常与地震

GPS 测区	资料时间段	发生的地震	区域应变场背景异常特征
南北地震带北段 (甘宁青)	1993-1999	1995 年 7 月永登 5.8 级; 2000 年 6 月景泰 5.9 级	震中位于祁连山断裂带东段、与断裂活动背景一致剪切应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}/a$ 的高值区附近
	1999-2001	2002 年 12 月玉门 5.9 级	震中位于祁连山断裂带西段、与断裂活动背景一致剪切应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}/a$ 的高值区附近
	2001-2003	2003 年 4 月德令哈 6.6 级; 2003 年 10 月民乐 6.1 和 5.8 级	震中分别位于柴达木地块北部、祁连山断裂带中段剪切应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}/a$ 的差异带及面膨胀应变张、压交界带

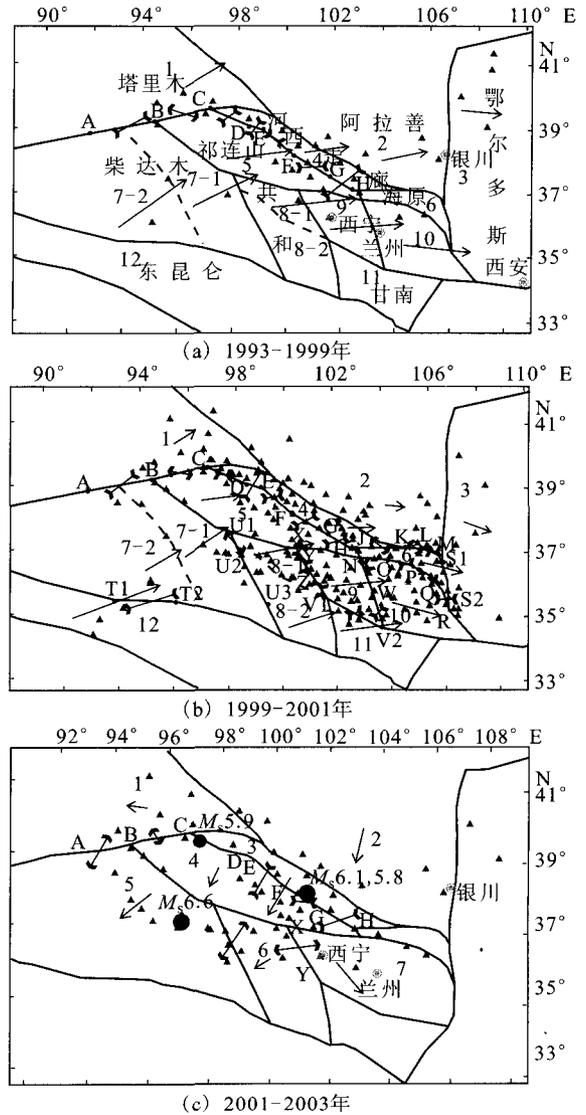
内部 2001 年 11 月昆仑 8.1 级大震孕育有关); 2001-2003 年相对 1999-2001 年运动趋势又有所变化 (测区西部出现与 NE 向挤压背景相反的张性运动)、水平形变差异性显著增强和强震的频发 (2002 年玉门 5.9 级、2003 年德令哈 6.6 级和民乐 6.1 级), 反映了昆仑 8.1 级大震动力对本区的影响^[5]。

③GPS 资料积累以来, $M_s \geq 6.0$ 地震大多发生在活动块体边界与构造一致的挤压剪切 (剪切应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}/a$) 的高应变区 (带) 及面膨胀应变张、压交界附近地区 (表 1、图 1, 水平运动矢量图见文献^[5])。这反映了与强震有关的水平运动变形状态呈现与活动地块及断裂构造有关的挤压剪切应变分布特征。

1.3 以水平位移速率为约束的非震负位错模拟结果分析

南北地震带北段 (甘宁青地区) 左旋剪切构造主要有阿尔金断裂带北东段、东昆仑断裂、海原-祁连山断裂和西秦岭北缘断裂等; 次级右旋剪切构造主要有: 鄂拉山断裂、日月山-拉脊山断裂和民勤-武威-庄浪河断裂; 挤压汇聚构造为六盘山、拉脊山、祁连山西端与阿尔金交汇地带, 以及由这些断裂构造分割、围限的活动地块。

根据非震负位错模型能够将地表位移与区域深部的多个块体与其边界断层联系起来、反演确定块体边界断层带的相对闭锁区特点^[3], 将 1993-1999 年和 1999-2001 年资料区域划分为 12 个块体、25 条断层段, 而把 2001-2003 年资料区域 (范围较小、且资料时段跨 2001 年 11 月昆仑 8.1 级大震, 因而要使每个块体上有尽可能多的多余观测点) 划分为 7 个块体、8 条断层段 (图 2)。分别建立负位错模型进行模拟计算, 得到块体平移和旋转运动量、边界断层锁定位错量、年均地震矩 M_0 与年均应力降 S_d 等参量。模拟结果和震例分析可见: 在 GPS 资料覆盖的时空范围内, 监测区 6 级左右及以上地震多发生在沿块体边界断裂带的高应变积累 (或显著增强) 的锁定区段及其附近, 尤其是强锁定区段 (锁定位错量 $\geq 2.0 \text{ mm/a}$ 、地震矩 $\geq 4 \times 10^{17} \text{ Nm/a}$ 、应力降 $\geq 4 \times 10^3 \text{ Pa/a}$) 与邻近的弱锁定区段的交汇区域、高压性



●震中 / 块体边界 10 mm/a 块体 2 mm/a 断层张性锁定
 ▲GPS 站点 CD 断层段 平移 断层压性锁定
 (图中大写的英文字母表示主要断层段。如: A-B-C 为阿尔金断裂北东段; C-D-E-F-G-H 为祁连山北缘及皇城塔尔庄断裂; H-J-K-L 为香山天景山断裂; N-O-R 为海原断裂; N-W-V 为庄浪河断裂; X-Y-Z 为日月山断裂; P-Q 为鄂拉山断裂)

图 2 南北地震带北段 (甘宁青地区) 不同时段水平形变的非震负位错模型反演结果
 Fig. 2 The inversion models of negative dislocation in the north segment of the south-north seismic belt of China.

锁定段与张性锁定段之间的交汇区域,以及定位错量及特性差异显著的断层交汇部位;特别是当某个活动地块与相邻地块的边界锁定强度差异较大,其运动变形的非协调性增强时,周边断裂部位形成的高应变积累地段发震可能性更大。

2 与地震有关的区域垂直形变背景异常特征

2.1 区域水准资料使用与处理概况

南北地震带北段及附近区域水准监测网由祁连山—河西走廊网(甘肃西部及甘青交界地区)、宁北

网(宁夏黄河以北地区)、西海固网(宁夏黄河以南地区)、兰天武网(甘肃东南部地区)等子网组成。从20世纪70年代以来复测期数一般有5~7期,复测周期平均为5年左右(长者近10年)。资料处理时,首先对相邻两期资料组成的时间段统一采用分段线性速率动态拟稳平差模型^[2],求得不同时段水准点垂直运动速率;再借助最小二乘配置,建立测区垂直形变场动态图像。在此基础上,建立以垂直位移为约束的非震负位错模型进行反演计算,得到反映的构造块体及其边界断层运动和梯度场的演化图像,分析高应变能积累部位和锁定能量强度^[6]。

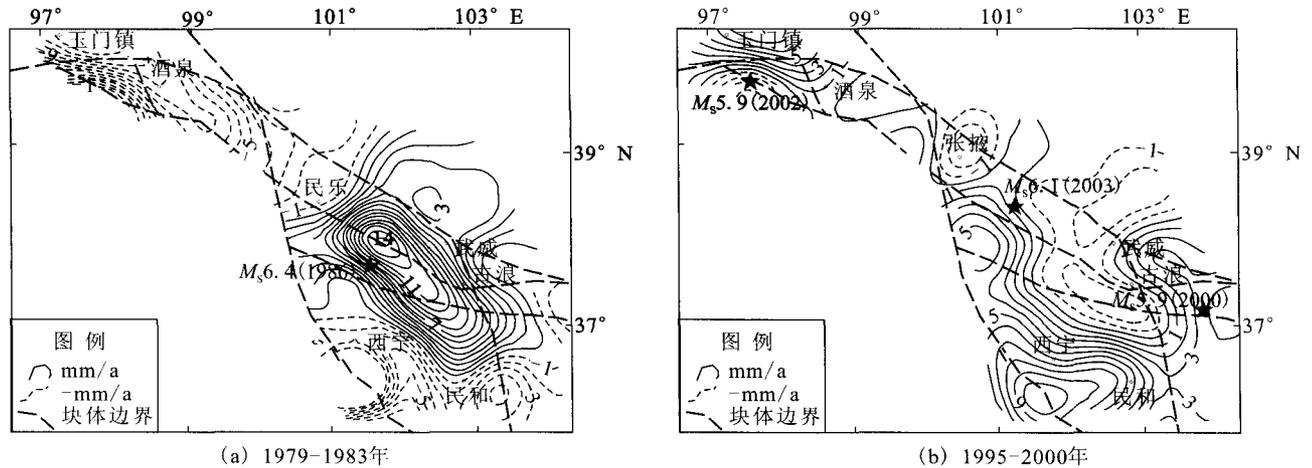


图3 南北地震带北段附近部分时段垂直形变速率等值线图(以祁连山—河西测区为例,单位:mm/a)

Fig. 3 Contour map of vertical deformation velocity in part periods in the north segment of the south-north seismic belt of China(taking Qilianshan—Hexi area as example)(unit: mm/a).

表2 南北地震带北段区域水准监测区垂直形变异常背景与地震

水准监测区	资料时间段	地震情况	垂直形变异常背景特征
南北地震带北段(甘宁青交界)监测区	1979—1983年	1986年门源 M _s 6.4	与祁连山主构造断裂走向一致的高梯度形变带
	1983—1989年	1990年景泰 M _s 6.2	祁连山东段高梯度形变带转折
	1989—1995年	1995年永登 M _s 5.8	祁连山东段局部隆起附近的形变梯度带
		2000年景泰 M _s 5.9	祁连山东段局部隆起附近的形变梯度带
	1995—2000年	2002年玉门 M _s 5.9	祁连山构造断裂西段高梯度形变带
		2003年民乐 M _s 6.1	祁连山主构造断裂中段高梯度形变带转折

2.2 强震前区域性垂直形变背景异常特征

通过对南北地震带北段及附近区域垂直形变监测区中强以上震例研究表明,6级左右及以上地震通常发生在与构造相关的垂直形变隆起区(最大直径大于60 km,速率大于5 mm/a)、垂直差异高梯度带(空间梯度大于0.3 mm/a·km⁻¹)等背景异常区附近(表2、图3,限于篇幅只列出1979—1983年和1995—2000年两个资料时段);尤其是7级强震的孕育过程,在监测网控制的范围内通常出现大面积背景形变异常^[7]。另外,还可看到从区域垂直形变背景异常出现(有时还取决于复测时间)距6级以上

地震(特别是7级)发生大约需要数年或更长时间。这也反映孕育强震的应变能积累需要一定的时间过程,区域性垂直形变背景异常往往只具有中长期至中期意义。

进而根据区域水准监测区主要构造和测线分布情况,对本区1979—1983年、1983—1989年、1989—1995年、1995—2000年四个时段垂直形变速率,建立11个块体、15条断层段的负位错模型。通过反演计算,得到区域断裂锁定位错量以及模型梯度场(图4)。分析负位错反演结果与震例看出,南北地震带北段的祁连山—河西测区及附近6级左右及

以上地震多发生在:①模拟的垂直形变梯度场高值区(尤其是梯度率 $\geq 6 \times 10^{-8}$ /a·km 的区域直径能达到 50~100 km 甚至更大的高值区)及其边缘附近;②块体边界强锁定段(位错量 ≥ 3 mm/a)或显著

加强段及附近。尤其是强锁定或显著加强段与相对弱锁定、不锁定或明显减弱段之间的交汇部位。就判定强震地点而言,锁定位错量、梯度场高值区的结合具有预示意义。

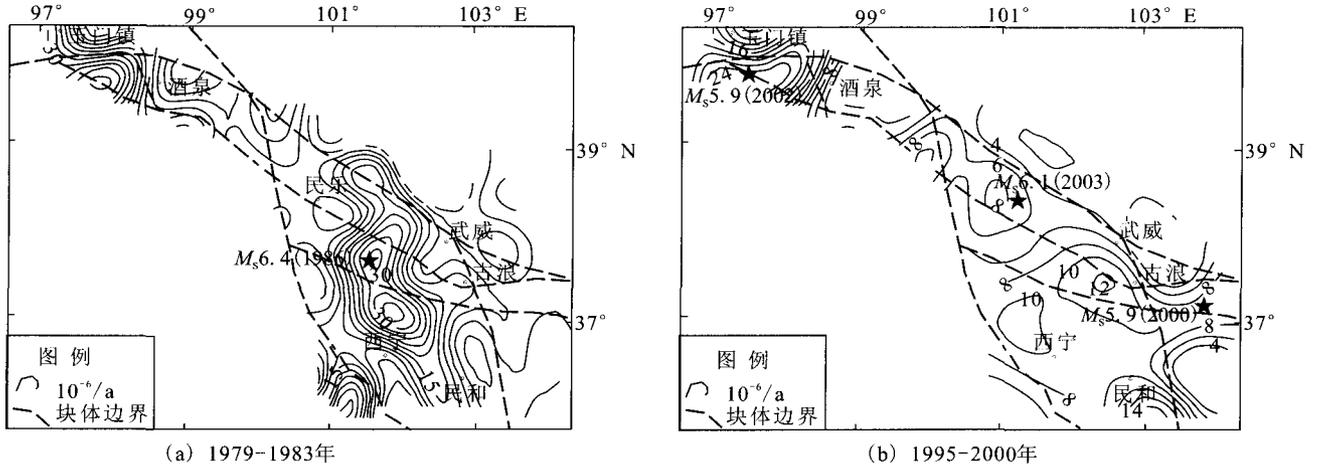


图 4 南北地震带北段附近部分时段非震负位错模拟的模型梯度场分布

Fig. 4 Distribution of model gradient field of negative dislocation in the north segment of the south-north seismic belt of China.

3 流动重力重复观测反映的强震前中期异常特征

3.1 区域流动重力资料使用与处理概况

地震是地壳构造活动的一种形式,地震孕育发生会引起一定范围地球物理场的变化,尤其是重力场的变化。这种变化可以在区域性精密重力重复观测中反映出来。在南北地震带北段附近的祁连—河西地区流动重力监测网(范围 $N36.0^{\circ} \sim 40.0^{\circ}$ 、 $E 99.5^{\circ} \sim 104.5^{\circ}$),有测点 150 余个,重力监测用 LCR-G 型重力仪,复测周期大多为 1 年,部分为半年,自 1992 年以来已积累了多期重力复测资料。在重力监测区域先后发生了 1995 甘肃永登 5.8 级、2000 年景泰 5.9 级、2003 年民乐 6.1 级和 5.8 级等较强地震。观测资料的处理采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件(LGADJ)统一起算基准进行整体拟稳平差计算^[8],求得区域重力场的相对变化(限于篇幅,文中只给出了部分与 6 级左右地震发生时间有关的 1992—1994 年、1996—2000 年、2001—2003 年和 1992—2004 年的变化图象)。

3.2 流动重力强震前的中期异常特征

根据我们对研究区近 20 年流动重力复测资料反映的构造活动与相应时段监测区 6 级左右地震活动分析认为,较长时间尺度的重力场变化背景,与本

区新构造运动的继承性、尤其是活动断裂构造密切相关,祁连山主干断裂等大型块体边界带以及断裂的交汇部位往往出现重力变化等值线密集或形态转折,且基本上表现为山区重力负值、盆地重力正值变化格局;而 1 年至几年尺度的区域重力场变化具有时空分布的不均匀性,重力波动和异常变化能够在一定程度上反映与地震有关的区域应力场作用下的断层活动,即在总的重力场变化趋势背景上形成局部重力异常区及其伴生的重力变化梯度带,中强以上地震均发生在区域重力场变化剧烈的背景之下。1995 年永登 5.8 级、2000 年景泰 5.9 级和 2003 年民乐 6.1 级地震分别发生在 1992—1994 年、1996—2000 年和 2001—2003 年区域重力场局部异常区(大于 $50 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$)及其附近。进一步分析本区重力场时空变化与地震活动的关系认为:①在空间分布上,地震发生前监测区均出现区域性的重力异常变化及与构造活动断裂走向基本一致的高梯度带,并在震中或邻区产生局部重力变化异常区(图 5 (b)、(c)、(d));②在时间序列上,地震发生前,重力段差和重力测点变化先是增强,然后反向减弱,在反向过程中发震(上述几次地震前重力测点变化都有这种现象)。

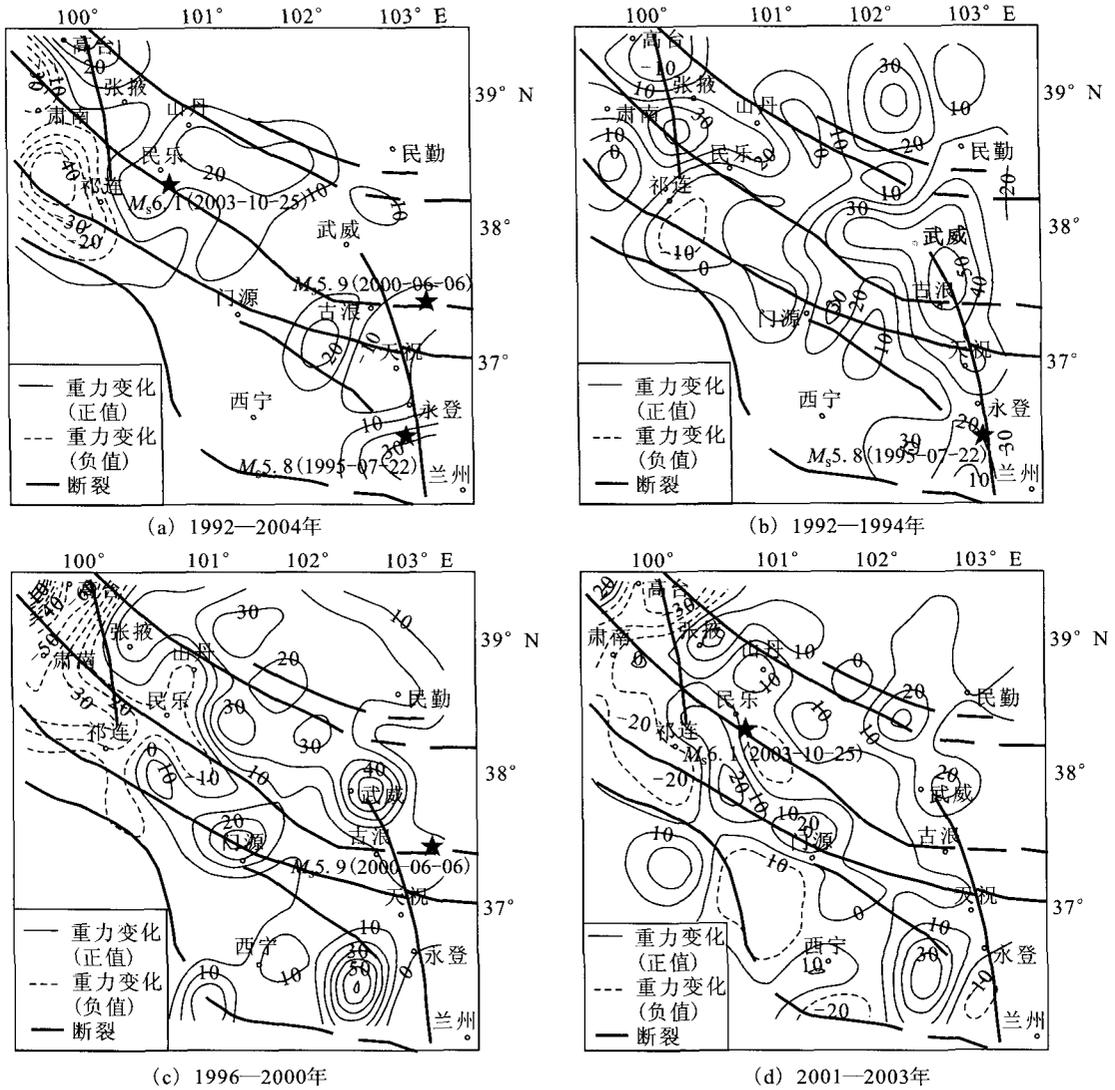


图 5 祁连—河西地区重力变化等值线图(单位: 10^{-8} ms^{-2})

Fig. 5 The isograms of gravity variation in Qilianshan—Hexi area (unit: 10^{-8} ms^{-2}).

4 跨断层短测线流动观测反映的强震中短期异常特征

4.1 中强以上地震前跨断层短测线观测时变异常特征

断层是构造活动显著的分界面,一个构造区域不同断裂之间、同一条断裂的不同段落之间断层活动的差异能够直观地反映该区域构造断裂活动与应变积累状况。跨断层流动形变监测研究作为一种有效的中期—中短期前兆手段,可以对监测区内地震发生进行一定程度的预测。南北地震带北段的甘宁青地区建立了 60 多处跨断层短水准、短基线流动观测场地(分布范围: $33^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$, 场地分布图略),至今已积累了近 40 年的观测资料。区内发生的几次中强以上地震前均观测到了不同程度和

形态的断层形变异常。这些异常形态大多具有一定的“趋势性积累—加速—转折”的 α 、 β 、 γ 相阶段性变化特征,如:1986 年门源 6.4 级地震前的扁都口跨断层基线(图 6(a)),1995 年永登 5.8 级地震前的乌鞘岭短水准(图 6(b)),1990 年景泰 6.2 级、1995 年永登 5.8 级、2000 年景泰 5.9 级地震前的窝子滩和大大水头短水准(图 6(c)、(d)),2002 年玉门 5.9 级和 2003 年民乐 6.1 级前的石灰窑口短水准(图 6(f));且从异常加速至转折出现的时间也有所不同(有的达 1 年以上、有的只有数月),但从转折至发震大多只有数月甚至更短。还有一些距震中较远、甚至不在同一构造断裂上呈持续时间较短(震前数月)的突跳尖点形异常,如,1995 年永登 5.8 级和 2000 年景泰 5.9 级地震前的六盘山短水准(图 6(e)),这种突跳形异常的空间分布范围和异常幅度较大。据此分析

认为,地震并不一定发生在形变幅度最大的部位,但断层形变异常呈现“趋势积累-加速-转折”变化特

征的地段及附近,往往是强震容易发生的场所。

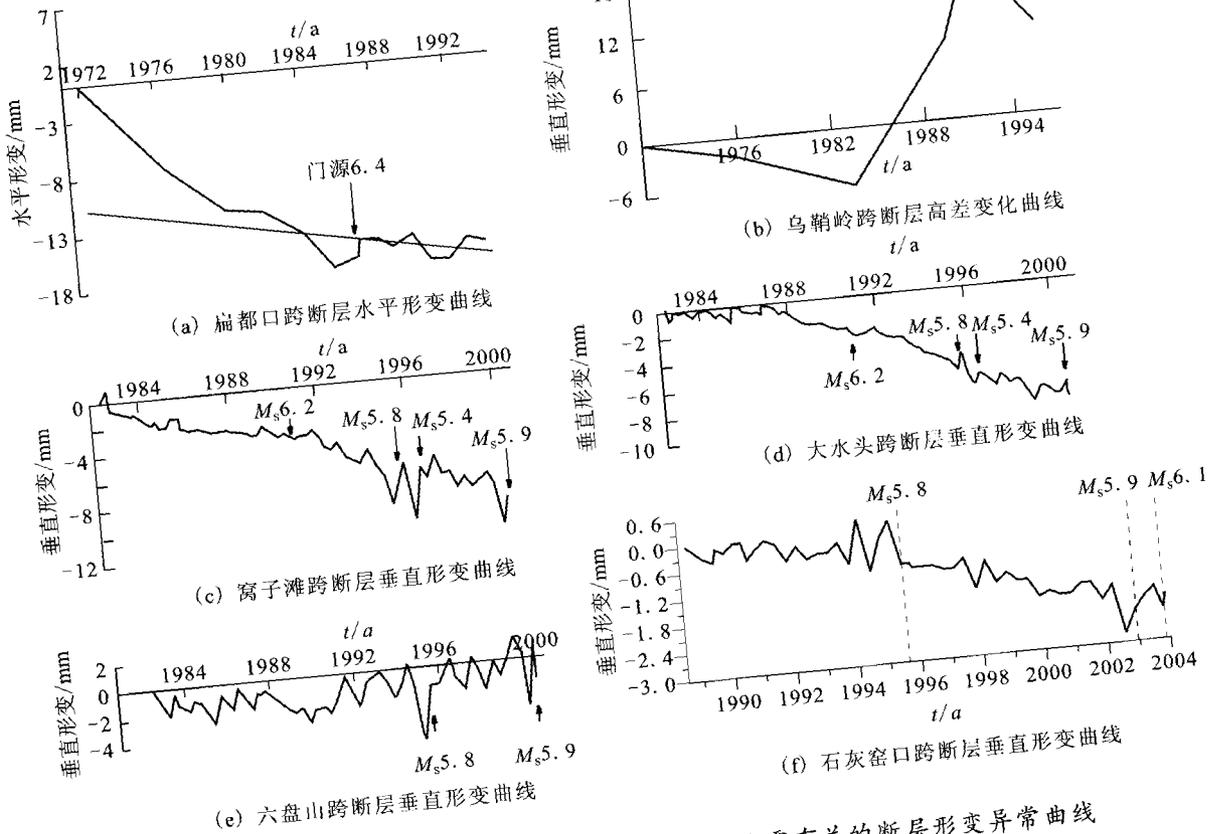


图6 南北地震带北段附近与几次中强以上地震有关的断层形变异常曲线
Fig. 6 Some fault deformation curves related to the development and occurrence of some moderate-strong earthquakes in the north segment of the south-north seismic belt of China.

4.2 断层形变应变信息异常动态与中短期地震危险性

断层形变应变强度比指标是我们在“九五”以来建立并逐步完善的、衡量断层形变应变强度的无量纲信息。其定义为某场地跨断层测段单期年变(相对上年同期)位移梯度(对水准资料)或线应变(对基线资料)与正常平均年变幅度(多年来较正常的各期年变位移梯度或线应变绝对值的均值)之比,这样既可直观、定量地表征断层形变应变类信息实时变化的强弱,又能使不同场地、不同测段的值具有可比性和统一性^[9]。据对南北地震带北段监测区中强以上震例研究,应变强度比绝对值超过动态均值线为异常,超过得越多则异常越显著,其后1年或数月发震危险性愈大(图7(a))。尤其对单个场地而言,形变应变强度比信息在震前变化异常(绝对值大于2.0)更明显。如:石灰窑口跨断层短水准是跨祁连山北缘断裂距民乐-山丹6.1级地震最近的场地(约30

km),在震前3个月内出现显著 SR_T 异常(SR_T 绝对值达4.0以上,大大超过2.0,图7(b)),较原始观测曲线(变化幅度偏低)明显得多。因而,断层形变应变强度比作为一种中短期指标可以在判断区域应力应变积累程度和地震危险性方面发挥作用。

5 与强震有关的区域构造形变异常特征与预测判据

在大区域板块构造活动动力背景下研究我国大陆尤其是西部现今地壳运动和地震动态,是多年来的重要课题。我们利用大地形变进行强震预测研究的基本出发点。尤其对南北地震带北段-青藏块体东北缘地带而言,印度板块向北碰撞欧亚大陆引起青藏块体北东向运动及其在块体边界产生的挤压、逆冲、旋扭作用是本区构造和地震活动的主要动力环境,因此我们将GPS高应变区段、区域水准垂直形变异常与重力、断层形变等中短期异常相结合,

研究与强震有关的区域构造形变异常特征与预测判据的基本思路为:在基本统一的大区域构造应力场背景下,当块体及边界断裂相对水平运动比较平稳和顺畅时,不容易发生具有趋势积累的显著垂直运动;当块体边界水平运动受阻时,容易引起有趋势积

累性的显著垂直运动,它们就以异常隆升区、高梯度形变带、重力变化高梯度带和断层活动异常等形态表现出来了,因而只有那些边界活动受阻闭锁地带容易形成应力相对集中、高应变积累而可能孕育强震。

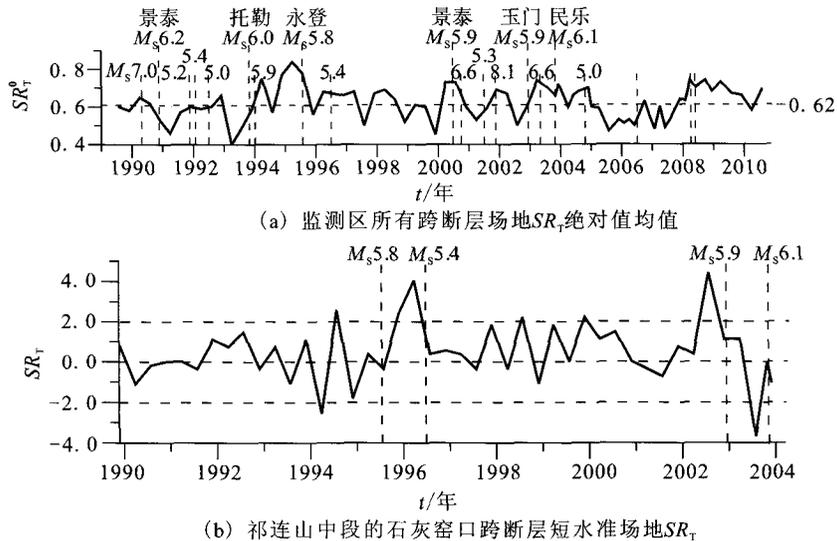


图7 南北地震带北段及附近监测区断层形变应变强度比 SR_T 时变曲线

Fig. 7 Time-curve of SR_T in the north segment of the south-north seismic belt of China.

在上述基础上,我们根据南北地震带北段及附近区域构造形变异常形态和幅度、数值模拟得到的定量结果及其与中强以上地震活动的关系研究,6级左右及其以上地震前,区域构造形变异常特征和预测判据主要如下:

(1) 区域性垂直形变异常判据:①异常隆起区直径60 km以上,垂直形变速率 ≥ 5 mm/a;②与活动断裂构造走向基本一致的垂直形变密集带空间梯度 ≥ 0.3 mm/a·km;③断裂交汇部位区域垂直向应变率 $\geq 0.10 \times 10^{-6}$ 。

(2) 区域性水平形变异常判据:根据水平位移与应变关系得到的水平视应变场最大剪应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}$ /a、面膨胀率绝对值 $\geq 2 \times 10^{-8}$ /a的压性区,应变等值线分布集中、与构造走向较为一致。

(3) 基于非震负位错模型模拟反演的异常判据:①反映高应变积累的锁定区段:块体边界断裂负位错量 ≥ 2.5 mm/a、负位错地震矩 $\geq 4 \times 10^{17}$ Nm/a或负位错应力降 ≥ 4 kPa/a;尤其是强锁定段与邻近的弱锁定段的交汇区、高压性锁定段与张性锁定段之间的交汇区或弱过渡段,反映高应变能积累或闭锁。②与区域主干断裂构造运动背景相一致的剪切变形显著增强区(带)块体最大剪应变率 $\geq 4.5 \times 10^{-8}$ /a、面膨胀应变率绝对值 $\geq 2.5 \times 10^{-8}$ /a。

(4) 断层形变较长时间积累背景上的趋势转折、断层异常活动分段差异显著地段,断层形变应变强度比指标大于2.0的高值异常区。

(5) 空间上区域重力异常变化与构造活动断裂走向基本一致的升降差异高梯度带,以及局部重力变化异常大于 50×10^{-8} ms $^{-2}$ 以上;时间演化上,地震发生前重力先是增强,然后反向减弱,在反向中发震。

上述5个方面异常背景综合配套时,未来发生强震的危险性更大。

6 结论与讨论

(1) 南北地震带北段及附近地区6级左右及以上地震的构造形变异常特征主要体现在:区域垂直运动变形呈现与构造有关的异常隆起区、垂直形变高梯度带分布,以及负位错反演的梯度场空间非均匀性;水平运动变形呈现与活动地块及断裂构造有关的、以剪切变形为主的高应变集中区(带),以及块体边界断层锁定强度的显著差异性;重力异常变化与构造活动断裂走向基本一致的升降差异高梯度带;断层形变较长时间积累背景上的趋势转折、异常活动分段差异显著等。

(2) 在现今地壳形变监测时空范围内,区域强

烈挤压剪切变形带、垂直形变高梯度带、块体边界强锁定段,是判断未来强震发生构造部位的背景性预测判据;重力异常变化与断层形变趋势转折等异常形态可作为判断强震中短期危险性的判据。

(3) 由于现有的 GPS、水准网等区域性地形变复测间隔一般为数年(尤其区域水准网复测周期更长)、各种监测资料时间不同步,重力和跨断层监控范围比较有限,加之形变资料积累时间段内监测区可供总结的强震震例也十分有限,因而本文研究总结的强震前区域构造形变异常特征和判据只具有中期背景意义。

[参考文献]

- [1] 魏顺民,江在森,张崇立. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究[J]. 地震地质,2000,22(3):219-230.
- [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.
- [3] 张希,江在森,王琪,等. 青藏高原北部地区构造变形特征及与强震关系[J]. 地球物理学进展,2004,19(2):363-371.
- [4] 江在森,张希,王双绪,等. 利用地形变观测测量求解地壳水平应变场的方法[J]. 地震,1999,19(1):41-48.
- [5] 王双绪,张希,张晓亮. 昆仑 $M_s 8.1$ 地震前青藏块体北、东缘水平运动变形的关联特征[J]. 中国地震,2005,21(1),41-49.
- [6] 张希,张四新,王双绪,等. 北祁连—河西地区地壳垂直运动的时空演化负位错模型与强震地点预测[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(1):40-46.
- [7] 巩守文. 共和 6.9 级地震垂直形变场位错模式及其演化特征的研究[J]. 地震学报,1993,15(3):289-295.
- [8] 祝意青,胡斌,张永志. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震,1999,19(1),71-77.
- [9] 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.