

1986 年门源地震($M_s 6.4$)过程地形变 演化特征及块体模型解析

陈 兵, 江在森, 张四新, 张晓亮, 薛富平

(中国地震局第二地形变监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要:分析了 1986 年门源 6.4 级地震震源周边地区不同尺度跨断层形变在地震过程中的演化特征, 依据非连续变形数值分析方法 (DDA) 模拟了震源破裂过程引起的地表垂直位移速率变化. 分析表明, 地表跨越断层的剖面形变变化是垂直和水平载荷共同作用的结果, 而垂直力源的影响可能是引起本次地震形变变化的主要因素. 这与地质构造分析和震源机制结果是吻合的.

关键词:不连续变形分析 (DDA); 位移载荷法; GPS 块体运动

中图分类号: P315.72⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)03-0240-06

0 引言

1986 年 8 月 26 日青海省门源县冷龙岭主峰附近的北祁连主干断裂上发生了 6.4 级地震. 震中区位于祁连—河西地形变重点监测区内, 该地区及其周边分布着跨断层短水准、短基线, 大面积长水准网等测量手段. 地震前后各手段均出现比较明显的中期和短期前兆反映, 认真分析、研究其变化形态的物理意义, 对认识青藏块体东北缘地区中强地震前后地壳运动的前兆特征及其孕震机理, 都具有重要意义.

1 地壳形变演化特征

1.1 断层形变异常特征

图 1 是青藏块体东北缘地区跨断层测量场地分布情况. 震中区附近的场地有大梁、童子坝、扁都口、九条岭, 后三个场地在 1980~1990 年间有观测资料, 其中扁都口场地的基线、水准资料在 1986 年门源地震前后出现较为显著的同步中短期前兆异常(图 2).

在 1971~1981 年的 10 年间, 扁都口场地断层运动一直保持准线性变化. 基线变化平均速率 -1.22 mm/a; 1981~1983 年曲线偏离常态, 速率减缓为 -0.1 mm/a; 1983~1985 年速率增大为 -1.6 mm/a; 1985~1986 年 7 月曲线转向, 断层转为拉张状态, 速率为 $+0.2$ mm/a; 8 月 26 日发生地震, 9 月份复测显示断层继续拉张, 速率增大至 5.4 mm/a, 这其中可能包含着同震效应. 之后恢复为稳态波动, 平均速率 -0.17 mm/a. 经历了趋势累积—加速—回返—发震的完整过程, 呈现出比较典型的 $\alpha-\beta-\gamma$ 三阶段形态. 水准形态与之类似, 震前同样出现加速变化, 但地震发生在加速阶段, 这可能和水准变化与应变的间接性有关.

1.2 大面积垂直形变变化特征

地震前后, 中国地震局第二地形变监测中心分别在 1979、1983、1986、1989 和 1995 年进行了大面积水准复测, 其中经过门源 6.4 级地震震中附近的测线是民乐—西宁线. 资料显示, 自 20 世纪 70 年代末以来, 河西地区以九条岭、冷龙岭地区为中心形成一个快速隆起区(图 3), 最大隆起速率达到 17 mm/a. 从测量

收稿日期: 2002-06-05

基金项目: 地震联合基金课题(101118)、“大陆强震机理与预测”课题(G1998040403)共同资助.

作者简介: 陈兵(1966—), 男(汉族), 河南洛阳人, 高级工程师, 主要从事地壳形变与地震预报工作.

剖面看, 测线跨越三条断层, 地震发生于 F_2 与 F_3 交汇部位. 形变剖面显示: 在跨 F_3 断裂处, 1979 年前变形缓慢而均匀; 1979 ~ 1983 年出现局部隆起; 1983 ~ 1986 年 (跨越震时) 出现反向变化; 1986 ~ 1989 年震后继续隆起, 之后恢复 (图 5). 由于复测时间跨度较长, 它反映的变化过程比较粗略, 但其阶段性与断层形变特征基本吻合.

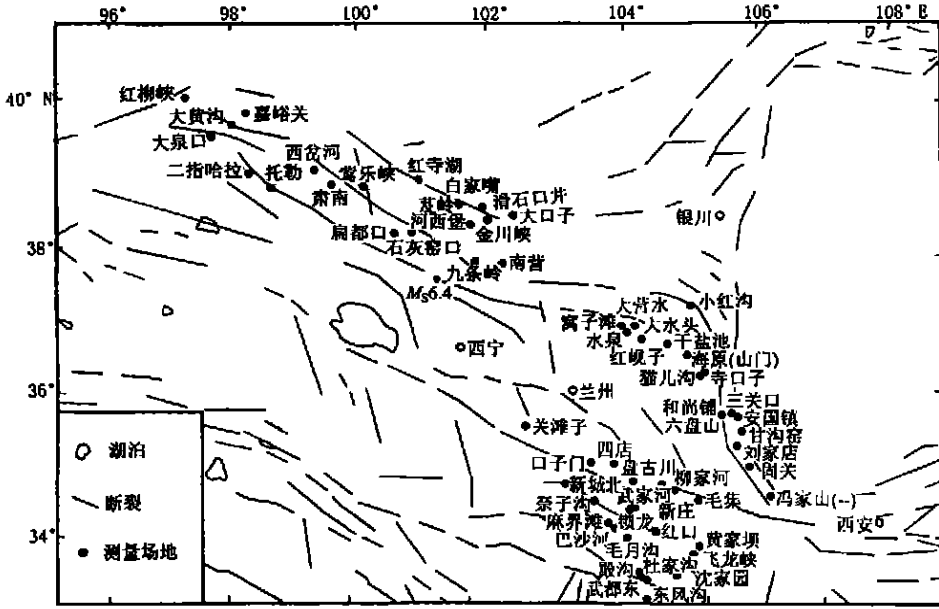


图 1 青藏块体东北缘跨断层测量场地分布图

Fig. 1 Distribution of measurement sites of across-fault deformation on northeastern margin of Qinghai-Tibet block.

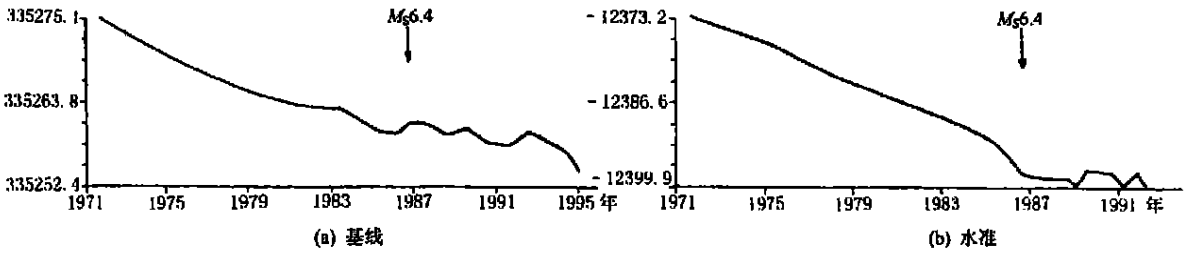


图 2 扁都口跨断层形变变化曲线

Fig. 2 Deformation curves of Biandukou across-fault site.

综合大面积和跨断层两种资料分析, 震前地面垂直和水平运动变形均与孕震过程呈现非常密切的相关性. 初步研究认为是垂直和水平力联合作用的结果, 但在临近发震的短期阶段, 是哪种力起主要作用? 地震前后跨断层形变的这种典型变化特征到底反映了什么样的震源过程? 我们试图通过非连续变形数值模拟对其进行探讨.

2 块体非连续变形分析 (DDA) 基本原理

不连续变形分析——DDA 方法是美籍华人石根华博士提出的一种平行于有限元方法的数值分析法^[2], 它能够计算块体系统不连续面的错位、滑动、开裂及旋转等非连续介质大位移、大变形的静、动力分

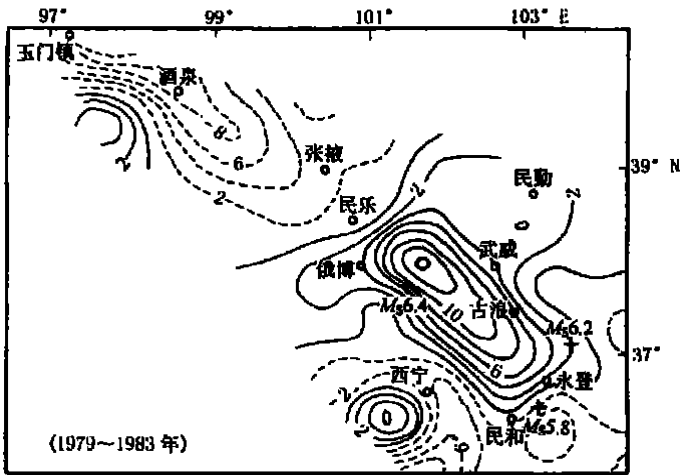


图3 河西—祁连地区垂直形变速率等值线图
(1979~1983)(张四新, 2001)

Fig. 3 Contour of vertical deformation rate in
Hexi-Qilian region(1979-1983).

析等传统有限元方法难以解算的问题, 很多学者运用这一方法, 在考虑断裂、块体因素的 GPS 水平数据反演研究方面做了大量工作. 陈兵等^[3]利用华北、甘青、川滇等地区 GPS 观测资料进行了块体运动、应力应变场的研究; 秦小军等^[4]探讨了大尺度、小位移构造块体的研究方法; 张晓亮等^[5]研究了拟围压(外围位移约束)状态下的块体划分、运动及变形特征. 上述工作主要着眼于大范围地壳构造水平形变方面的研究. 本文拟利用长水准垂直形变资料, 研究断层局部垂直运动的可能机理及其与地震孕育的关系, 以拓展 DDA 方法的应用范围.

DDA 采用块体(而非节点)的自由度作为未知量, 依据最小势能原理建立联立方程^[2]. 在每个块体处处具有常应力与常应变的假设前提下, 块体中任意一点 (x, y) 的位移 $(u,$

$v)$ 可用 6 个位移变量表示:

$$[D_i] = (u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})^T \quad (1)$$

(u_0, v_0) 是块体内指定点 (x, y) 的刚体平移; r_0 是以 (x, y) 为转动中心的块体的转角; $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 是块体的正应变和剪应变. 点 (x, y) 的总位移是由所有变量引起的位移之和. 块体变形矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = [T_i] [D_i] \quad (2)$$

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

它是块体变形的全一阶近似式.

假定块体系统内含有 n 个块体, 则联立平衡方程具有如下形式

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 K_{ij} 是一个 6×6 阶子矩阵; D_i 代表块体 i 的变形变量; F_i 是块体 i 分配到六个变形变量的载荷.

根据测量形变值求解块体系统应力与块体运动位移, 即在观测点上给定位移约束, 相当于施加一个广义载荷, 我们称之为“位移载荷法”.

3 门源 6.4 级地震断裂剖面垂直形变的模拟

数值模拟的目的不是为了计算精确的应力和应变量级, 在不清楚形变与地震的理论关系之前, 变形的绝对数值并没有多少实际意义. 我们关心的是其相对变化以及所反映的可能物理过程. 因此, 根据研究区断层分布状况, 选取断层 F_2, F_3 作为研究对象, 建立横跨断层的垂直剖面二维块体模型. 因为地表之下的构造情况不明, 块体的划分带有较大的盲目性, 因此我们对研究区采用带一定随机度的自动剖分, 然后根据断层分布进行人工调整. 靠近断层部位适当加密, 用平行断面的小单元来模拟断层附近的弱化破碎带. 由于水准剖面计算时是以坐标原点速率为零作为归算前提的, 因此取块体系统左边界为固定约束块

体, 其位移约束强制为零. 祁连山断裂为北西西走向、以逆冲为主兼具走滑的压扭断裂, 由印度板块推挤引起的青藏块体内部应力场在其东北缘地带为北东向, 两者近乎垂直. 因此外部载荷抽象为右侧边界施加从下向上渐减的水平挤压力, 底部则施加水平与垂直两种作用力来模拟地下物质流动对地壳的拖曳与上拱作用(图 4).

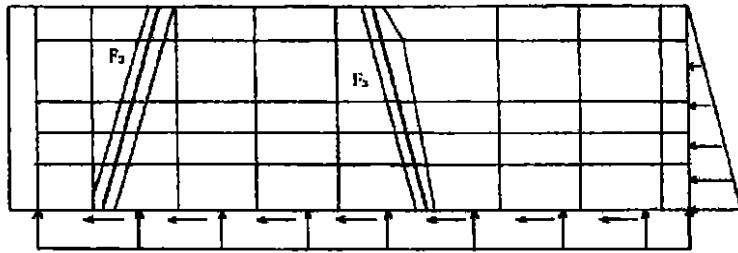


图 4 门源 6.4 级地震断裂剖面块体及载荷分布图

Fig. 4 Section blocks and system loads on fault for Menyuan earthquake ($M_s6.4$).

为模拟地表垂直位移速率的演化过程, 在 F_3 断层局部分别进行水平和垂直卸载来代表地震的应力松弛. 从初步得到的模拟结果来看(图 6), 垂直卸载得到的过程可以分为四个阶段:

- ① 在加载过程中, 自由表面垂直位移速率逐步上升, 地震前达到峰值(图 6(a));
- ② 松弛(地震)时, 速率减小, 出现反向(图 6(b));
- ③ 松弛后, 仍有一定幅度的加速(图 6(c));
- ④ 加速峰值达到震前峰值的 1/2 强, 然后衰减(图 6(d)).

这一结果与长水准测量得到的断层剖面在 1979 ~ 1983 年、1983 ~ 1986 年、1986 ~ 1989 年和 1989 ~ 1995 年四个时期的速率变化形态(图 5)基本一致. 而水平卸载则无法再现上述过程, 这在一定程度上表明垂直方向的作用主导了地震孕育的过程, 并且与震源机制解得到的 P 轴仰角为 50° 的结果是吻合的.

4 结论与讨论

中国大陆西部应力场主要受印度板块挤压作用的控制. 在印度板块增强的推挤作用下, 青藏块体内部北东向作用力增大, 使其东北缘地区

区域地壳呈较强的继承性运动, 山体上升, 两侧盆地下沉, 区域水平应力场逐步强化, 这是地震发生的大背景. 大地电磁测深资料表明^[6], 祁连山断裂带中东段的武威地区存在岩石圈深根区. 岩石圈底部软流层沿增强的北东方向加速对流, 由于深根区的阻挡, 在其西南侧聚集, 形成垂直方向的作用力. 其位置与河西—祁连山中东部隆起异常区较为一致^[7]. 震源机制解结果显示, 河西—祁连山中东部地区自 1979 年至 1990 年发生了 6 次 5.5 级以上地震中, 大部分 P 轴仰角较大, 平均达到 50° 以上^[7]. 这也表明来自垂直方向的影

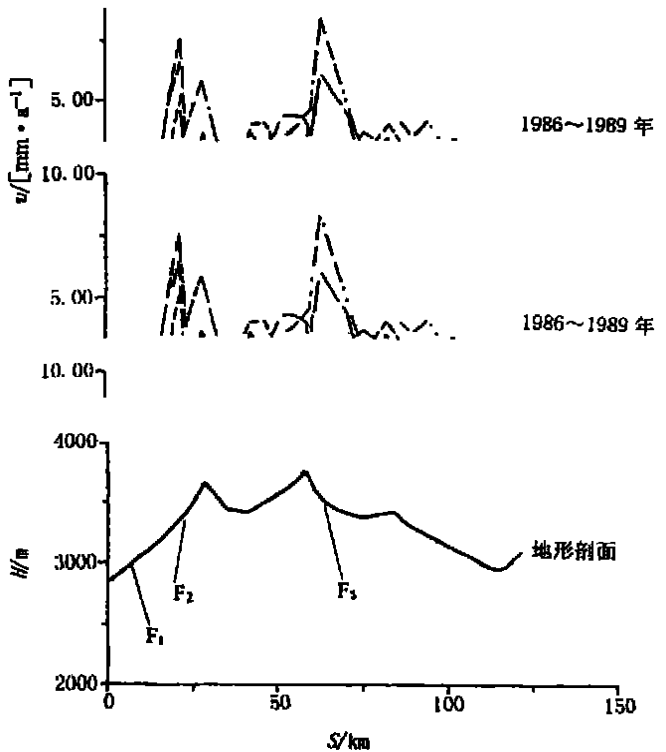


图 5 门源 6.4 级地震长水准剖面形变变化图

Fig. 5 Deformation change of level section in Menyuan earthquake ($M_s6.4$).

响可能是该区断层运动的控制力量, 这是地震发生的局部小环境.

数值模拟的结果同样比较真实地反映了上述动力过程. 计算表明, 地表垂直位移增大有两种原因: (1) 断层附近的弱化物质(破碎带)随应力增大而被挤出上升, 这是非弹性变形; (2) 断层附近的弹性块体在水平、垂直双重应力作用下的弹性变形. 门源地震的发生可能是在青藏块体北东向应力场整体加强的背景下, 震中附近局部区域垂直方向应力强化引起的, 这种力可能是地下物质的上涌引起的垂向作用, 也可能是由于构造几何关系而使水平力方向在断层附近发生旋转而变为近垂向作用. 地表形变过程为两者联合作用的结果. 将模拟结果与地球物理和震源机制资料对比分析, 我们认为垂向作用可能是地震发生的主要因素.

模拟结果还表明, 地震后断层附近并非完全松弛, 仍有不小的应力作用在已经滑动弱化的区域, 并使之继续变形. 直到这部分应力释放之后, 形变才会恢复平静. 这在 1990 年共和 7.0 级地震后垂直形变测量资料中得到了同样的反映^[8].

本项研究结果是在一个相当简化的模型上得到的, 而且我们仅就垂直方向的变化进行了对比分析, 没有考虑水平方向的变形特征(没有实际观测资料), 因此模拟结果与实际地震过程不可避免地存在着偏差. 但就其所再现的观测事实来说, DDA 方法在孕震物理机制研究方面有着一定的应用价值.

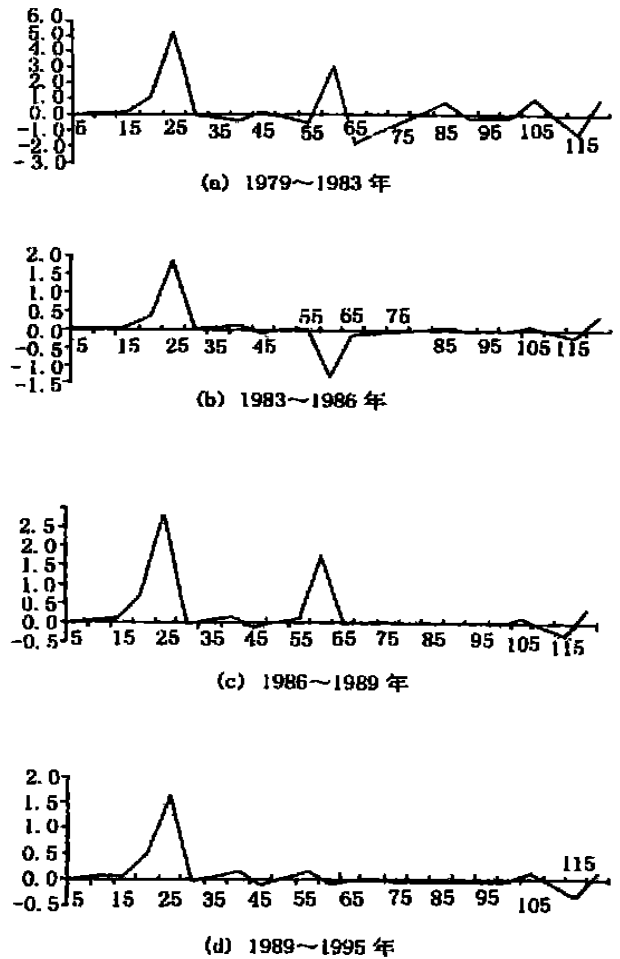


图 6 门源 6.4 级地震块体模拟形变变化图

Fig. 6 Simulation deformation change of block model of Menyuan earthquake ($M_s6.4$).

[参考文献]

- [1] 张四新, 江在森, 等. 北祁连—河西地区垂直形变场演化与地震活动关系研究[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(2): 70—76.
- [2] 石根华. 块体系统不连续变形数值分析新方法[J]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [3] 陈兵, 江在森, 等. 利用非连续变形数值方法研究块体运动及其应力场初探[J]. 地壳形变与地震, 2000, 20(1): 38—42.
- [4] 秦小军, 等. 断层及其周边块体系统非连续运动与变形模拟[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(2): 17—24.
- [5] 张晓亮, 江在森, 陈兵, 等. 对青藏东北缘现今块体划分、运动及变形的初步研究[J]. 地壳形变与地震, 2002, 22(1): 63—67.
- [6] 国家地震局《深部物探成果编写组》. 中国地壳上地幔地球物理探测成果[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [7] 王庆良. 河西—祁连山中部地区垂直力源形成机制及其对地震的触发作用[J]. 地壳形变与地震, 1993, 13(4): 57—63.
- [8] 王庆良, 巩守文, 等. 由 1990 年共和 7.0 级地震震后垂直形变求得的地球介质有效弛豫时间和粘滞系数[J]. 地震学报, 1993, 19(5): 480—485.

DEFORMATION FEATURES OF MENYUAN EARTHQUAKE ($M_s 6.4$, 1986) AND BLOCK MODEL ANALYSIS

CHEN Bing, JIANG Zai-sen, ZHANG Si-xin, ZHANG Xiao-liang, XUE Fu-ping

(*The Second Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi'an 710054, China*)

Abstract: The evolution features of cross-fault deformation in different scales during seismogenic process near epicenter of Menyuan earthquake ($M_s 6.4$, August 26, 1986) is analyzed. Based on theory of Discontinues Deformation Analysis (DDA) the Displacement Loading Method is applied to simulate vertical displacement velocity change due to focal rupture. The result shows that combination of vertical and lateral force produce the deformation change on earth surface, and the former may be more important.

Key words: Discontinues deformation analysis (DDA); Displacement loading method; GPS; Block movement

(上接 225 页)

STUDY OF SIMULATION FOR THE EVOLUTION OF STRESS FIELD ON NORTH—SOUTH SEISMIC BELT IN CHINA

CAO Xue-feng¹, YIN Jing-yuan^{1, 2}, YANG Li-ming³

(1. *Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China;*

2. *Laboratory of Tectonic Physics, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;*

3. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Using finite element method, the time-space evolution of stress field on North—south Seismic Belt and adjacent region is simulated, considering the geological structures and designing the model with viscosity characteristic. Through simulated calculation of evolution of stress field affected by 100, 010 years accumulated loading, it is found that the joint continuous effect from India—Australia plate, Philippine plate and Pacific plate determines the disturbance quantity of the stress state on the belt after the creep deformation has approached steady state. The phenomenon of seismic echo on North—south Seismic Belt is a synthetic reaction to the external loads (plate boundary force) after the regional stress field reaches a equilibrium state.

Key words: North—south Seismic Belt; Numerical simulation; Body stress; Seismic echo