

地壳形变与地震预测研究

地震出版社

YINGBIAN YU DIZHEN YUQI YANJIU
DIZHIAN



薄万举 杨国华 郭良迁
王若柏 孙少安 谢觉民

著

地壳形变 与地震预测研究

地震出版社

中国地震局 95-09 项目资助

56.25 5600

地壳形变与地震预测研究

薄万举 杨国华 郭良迁 著
王若柏 孙少安 谢觉民

地震出版社

2 0 0 1

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳形变与地震预测研究 / 薄万举等著. —北京: 地震出版社, 2001.6
ISBN 7-5028-1749-2

I. 地... II. 薄... III. 地壳形变-关系-地震预报-研究 IV. P315.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 51295 号

地壳形变与地震预测研究

薄万举 杨国华 郭良迁 王若柏 孙少安 谢觉民 著

责任编辑: 王 伟

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路 9 号 邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993 传真: 68423031

门市部: 68467991 传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029 传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2001 年 6 月第一版 2001 年 6 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 260 千字

印张: 10.25

印数: 001~500

书号: ISBN 7-5028-1749-2/P·1045 (2247)

定价: 30.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

内 容 提 要

本书为作者十多年来在地壳形变与地震预测研究领域里的主要研究成果，其中有部分成果已陆续在一些期刊上发表，部分成果尚未发表过，大部分是在“八五”和“九五”期间完成的。

书中内容紧扣题目，以地形变资料为基础分别给出了大面积水准、GPS、断层形变、水系变化显示的构造形变、台站形变、流动重力测量等方法用于地震预测的研究结果，针对不同资料的特点，分别进行了地形变前兆信息提取及地震预测的研究。全书共分十章，前五章侧重对中长期地震预测的研究；后五章侧重对中短期地震预测的研究。

本书可供大地形变测量、地形变灾害预测、地震预报、地球物理学和地球动力学等有关学科的科研人员及大专院校的师生参考。

前 言

地震是地壳破裂或断层快速滑动的一种表现形式。地壳的介质介于弹性和塑性之间,因此,地壳应力场发生变化,在导致地壳破裂或断层滑动并最终发生地震之前必然会产生地壳的变形。由于地壳介质的不均匀性及地壳应力场变化的复杂性,导致地壳变形在时空分布上具有高度的复杂性。《地壳形变与地震预测研究》以地壳变形时空分布规律探索其用于地震预测的方法、理论与可能性,寻找地壳形变与地震孕育发生的内在联系,为攻克“地震预报”这一世界难题做了大量尝试性的应用研究工作,并且取得了一系列的新进展。

本书由薄万举主笔,研究工作由薄万举、杨国华、郭良迁、王若柏、孙少安和谢觉民共同完成。本书共分十章,第一章为大面积水准显示的大地形变场及其研究,主要由杨国华、郭良迁和薄万举完成;第二章为GPS资料分析与研究,由郭良迁、杨国华和薄万举完成;第三章为跨断层形变台点资料研究,由薄万举、郭良迁完成;第四章为地壳形变与水系变迁的研究,由王若柏、郭良迁和薄万举完成;第五章为地质构造与大地形变的综合研究,由薄万举和郭良迁完成。以上五章是地壳形变与地震中长期预测的研究。第六章为准连续型大地形变前兆信息提取方法的研究,由薄万举、谢觉民完成;第七章为跨断层形变信息提取方法的研究,由薄万举、郭良迁完成;第八章为流动重力测量前兆信息及其提取方法的研究,由孙少安和薄万举完成;第九章为多台多手段综合前兆提取方法的研究,由薄万举和郭良迁完成;第十章为大地形变测量中短期前兆标志体系及预报方法的研究,由薄万举完成。本书在研究过程中得到了中国地震局监测预报司、中国地震局科技发展司和中国地震局第一地形变监测中心的大力资助,由谢觉民研究员进行审查,并提出了若干宝贵的修改意见,樊智勇、华彩虹、韩月萍、罗三明、周伟为本书的完成做了大量的辅助工作,在此一并表示感谢!

著 者

2001年4月

目 录

第一章 大面积水准显示的大地形变异常场	(1)
§ 1.1 信息提取方法	(1)
§ 1.2 几个重要震例的形变场演化	(4)
§ 1.3 用大面积水准资料对全国大地形变场的研究	(10)
第二章 GPS 资料分析与研究	(15)
§ 2.1 资料概况	(15)
§ 2.2 资料处理过程及方法	(15)
§ 2.3 主要研究结果	(20)
§ 2.4 结语	(31)
第三章 断层形变资料研究	(32)
§ 3.1 华北跨断层形变测量资料的全时空扫描	(32)
§ 3.2 断层活动速率空间分布与地壳应力状态	(37)
§ 3.3 讨论	(42)
第四章 地壳形变与水系变迁	(43)
§ 4.1 前言	(43)
§ 4.2 研究工作的主要内容	(44)
§ 4.3 邢台和唐山两地震区的初步研究结果	(46)
§ 4.4 华北平原地表水系的统计	(49)
§ 4.5 华北地区地壳形变基本场问题的研究	(54)
§ 4.6 华北平原地震危险区的研究	(57)
§ 4.7 结束语	(59)
第五章 地质构造与大地形变的综合研究	(60)
§ 5.1 中国大陆地质构造与地震活动概况	(60)
§ 5.2 大地形变研究的主要结果	(63)
§ 5.3 大地形变中长期地震预报指标体系	(64)
§ 5.4 全国中长期地震危险区预测	(65)
§ 5.5 危险区预测效益评价的研究	(67)
第六章 准连续型大地形变前兆信息的提取方法	(69)
§ 6.1 方法优选过程简述	(69)
§ 6.2 前兆信息提取方法——斜率差信息法	(70)
§ 6.3 扫描检验与优化	(73)
§ 6.4 讨论与结论	(80)
第七章 跨断层形变前兆信息提取方法研究	(82)
§ 7.1 方法优选过程简述	(82)
§ 7.2 前兆信息提取方法	(82)

§ 7.3 效能评价	(92)
第八章 重力前兆信息及其提取方法	(94)
§ 8.1 方法优选过程简述	(94)
§ 8.2 重力前兆信息提取方法和过程	(95)
§ 8.3 效能评价	(108)
第九章 多台多手段综合前兆信息提取方法	(110)
§ 9.1 方法优化简述	(110)
§ 9.2 多台多手段综合前兆信息提取方法	(110)
§ 9.3 全时空扫描结果的统计及效能评定	(124)
第十章 大地形变测量中短期前兆指标体系及预报方法	(125)
§ 10.1 指标的优化、筛选、组合及指标体系的建立	(125)
§ 10.2 预报方法的筛选与总结	(138)
§ 10.3 综合方法的扫描与效能评价	(138)
§ 10.4 对孕震模式的探讨	(151)
参考文献	(153)

第一章 大面积水准显示的大地形变异常场

§ 1.1 信息提取方法

1.1.1 多基准比较

地壳形变测量的主要任务是监测地壳形变和运动,具体观测元素是地表点位置的变化。显然,这些观测量都是相对量,只有假定某一点不动,才能确定另一点的相对变化量,因此,地形变分析时时处处都存在一个参考基准问题。现已有多种确定参考基准的方法,如经典静态基准(假定某一个点不动)、拟稳基准(假定某一组点相对稳定)、广义逆基准(假定总体形变后点位坐标重心不变),等等。通常的做法是根据实际工作需要选定一个相对最好的方法。地壳形变与地震活动的关系十分复杂,事先难以确定的因素很多,因此,只选用一种方法有可能损失有用的信息,使我们难以了解地壳运动的真实全貌,故在此采用了多种基准同时做对比分析,针对特定应用实例,筛选出相对较好的有一定代表性的一至两种方法作为最后结果。尽管这样做增加了工作量和最后得出结论的难度,但促使我们考虑的因素更多、更全面,相信其最后结论可能更为接近真实情况。以晋冀蒙地区 1992~1998 年期间地壳垂直运动形变场为例,图 1-1 为均衡基准,图 1-2 为静态(北京)基准。由图 1-2 看出整个区域形变量并不突出,由图 1-1 看出易县—涑水地区出现了 8mm/a 的隆起,这使我们提高了警惕,我们怀疑作为静态基准的北京原点很可能并不是静态的。因此,本章的研究结果认为,对易县、涑水、天津、北京一带应给予高度重视,该区域具有中长期孕震背景。

1.1.2 均衡基准法

均衡基准是在假定大范围内地壳上升与下降的物质总量相等的前提下所建立的一种基准方法,当地壳运动较为活跃,难以判定相对稳定点时,该方法显示出了较高的优越性。图 1-1 中之所以显示上升区域较多,是因为在均衡计算时包含了辽宁地区,该图只给出了研究区域的一部分。事实上,考虑的面积越大,均衡基准给出的结果越可靠。

1.1.3 滑动滤波及多核函数法

为削弱人类活动等干扰的影响,在大面积形变资料处理中,采取空间滑动滤波的方法去掉大部分高频噪声信息,然后用多核函数拟合的方法进行处理,将会取得比较好的结果。

空间滑动滤波的数学模型为

$$\begin{cases} \tilde{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \\ \tilde{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \\ \tilde{V}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V(x_i, y_i) \end{cases} \quad \begin{aligned} (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 &\leq R^2 \\ R &= 10 \text{ km} \end{aligned} \quad (1-1)$$

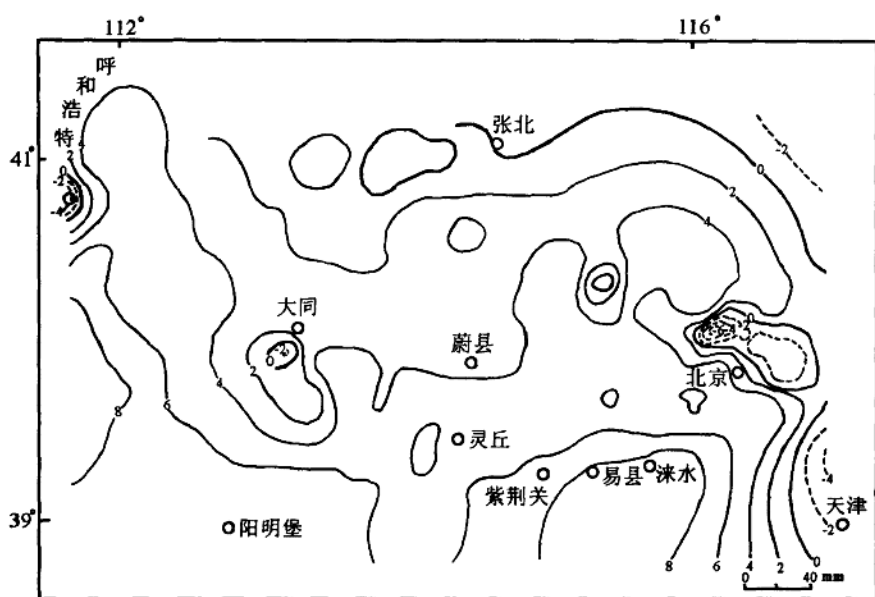


图 1-1 晋冀蒙部分地区地壳垂直运动速率图 (1992~1998 年, 均衡基准)

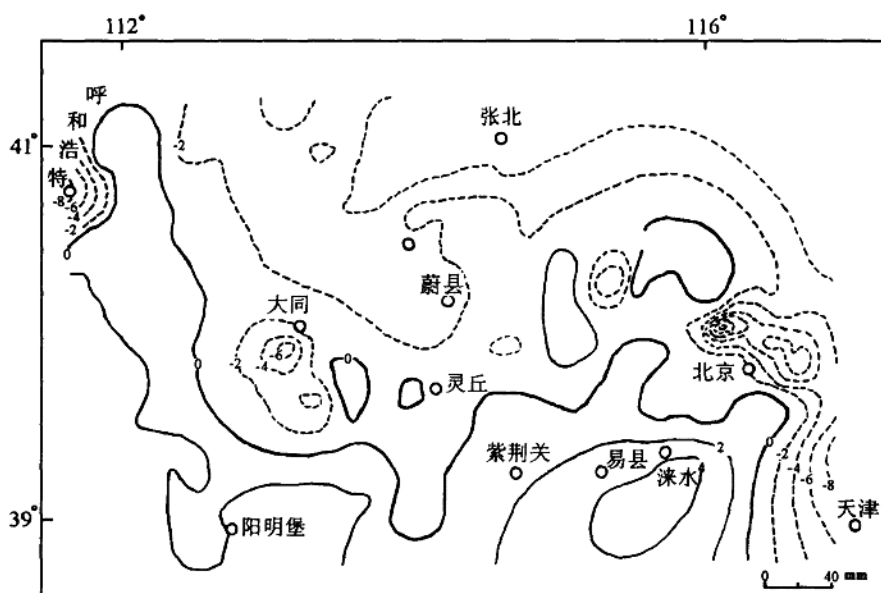


图 1-2 晋冀蒙部分地区地壳垂直运动速率图 (1992~1998 年, 北京静态基准)

式中, $\bar{p}_j$ 为 $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$ 点的滑动滤波值(一般指垂直运动速率); (x_i, y_i) 为半径为 R 的圆的范围内第 i 个采样点的坐标。

经式(1-1)滤波后用多核函数拟合:

$$f(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sum C_i Q_i(\tilde{x}, \tilde{y}) \tag{1-2}$$

其中

$$Q_i(\tilde{x}, \tilde{y}) = \left[(\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + (\tilde{y} - \tilde{y}_i)^2 \right]^{\frac{1.5}{2}} + 1$$

式中, Q_i 为 (x_i, y_i) 处的核函数; C_i 为第 i 个核函数的系数; $f(\tilde{x}, \tilde{y})$ 为拟合值。

通过式(1-1)和式(1-2)处理的大面积水准资料可较好地平滑掉地表噪音的影响, 可得到较为光滑合理的拟合曲面。

1.1.4 异态运动速率函数法

数学模型为

$$f_{DT_i}(x, y) = f_{dt_i}(x, y) - f_D(x, y) \tag{1-3}$$

式中, $f_D(x, y)$ 为常态运动速率函数, 它代表地壳在较长时段内的趋势运动分量, 只有观测历史较长的地区, 才能用前面所提到的多核函数法得到常态运动速率函数; $f_{dt_i}(x, y)$ 为综合运动速率函数, 通常由新测资料与其前面较近的一期观测结果进行计算得到, 显然它包括近期地壳运动与长期背景性运动趋势偏离的信号, 也包含代表常态运动的趋势信号, 故称其为综合运动速率函数; f_{DT_i} 为异态运动速率函数, 显然, 综合信息减去常态信息, 应该等于异常信息, 可用于分析地壳运动的异常程度, 故称其为异态运动速率函数。

1.1.5 多期动态图像的演绎推理

以上各种信息提取方法各有长处, 不同区域因观测周期、次数和分析目的的不同可选用不同方法, 如判定异常基准困难, 资料复测次数较少, 可用多基准比较的方法进行综合分析; 施测面积大, 难以确定稳定的起算点可选用均衡法; 而滑动滤波及多核函数法是纯数学的处理, 可较好地去掉高频噪声并给出较好的拟合曲面, 在各种方法中均可以引用。当某个区域有多期复测资料, 并有典型震例时, 选用同一种基准、同一种方法给出动态系列图像, 分析图像的演化过程、几何特征, 从而研究其与地震孕育过程可能存在的内在联系, 称为多期动态图像的演绎推理法, 随着资料的积累和高新技术在大地测量领域的应用与发展, 动态图像演绎推理方法将越来越广泛地用于地震预报研究。

1.1.6 形变梯度法

垂直形变(或者垂直形变速率)梯度是单位距离内的形变差异量(或者速率差异量)。它是矢量。同一地点不同方向上的梯度值不同。在垂直于等值线展布的方向上的梯度值最大, 而平行于等值线展布方向上的梯度值最小。某测点最大垂直形变梯度值是研究地壳活动和地震关系具有重要意义的参量。垂直形变梯度值不受计算时基准点选择的影响。

我们在求每点的最大垂直形变速率梯度(以下简称垂直形变梯度)时, 使用了等效梯度公式(以单位距离内横穿过的等值线条数表示):

$$T = \frac{L}{A} \approx \frac{na}{a^2} = \frac{n}{a} \quad (1-4)$$

式中, T 为等效垂直形变梯度值; A 为单位正方形面积; L 为单位正方形面积内形变速率等值线的总长度; a 为单位正方形的边长; n 为单位距离 a 内横穿的等值线条数。

使用等效垂直形变梯度公式时, 当垂直形变速率等值线的展布都与单位正方形的一边垂直时, 求出的等效垂直形变梯度与实际的形变梯度相同。当形变速率等值线延伸不都与单位正方形的一边垂直, 或者形变速率等值线弯曲延伸时, 则单位面积中形变速率等值线的总长度 L 大于形变速率等值线都与单位正方形的一边垂直时的总长度, 求出的等效垂直形变梯度值大于实际垂直形变梯度值。这种情况常常出现在形变速率等值线的转折处。以往的研究表明, 等值线转折处也是地震容易发生的地方, 等效垂直形变梯度值在一定程度上反映了局部应力场的不均匀性和地壳介质的不均匀程度。因此, 对分析构造活动, 用于地震活动性预测来说, 等效垂直形变梯度信息比其严格定义的梯度值给出的信息更具有实用价值。等效垂直形变梯度值在本质上还是反映了垂直形变梯度的变化, 所以本文仍称其为垂直形变梯度。

计算是使用计算机在 GIS 城市之星(Citystar)平台上进行的。以 1/600 万中国大陆 1951~1990 年的垂直形变速率等值线图^[1]为基础, 先将形变速率等值线图数字化, 再进行统计计算。以 11.81km×11.81km 为一点, 并分别进行了 9×9 和 3×3 的平滑处理, 然后绘制出等效垂直形变速率梯度图, 结果将在后面陆续给出。

§ 1.2 几个重要震例的形变场演化

1.2.1 海城地震

利用前面给出的各种信息提取方法, 对大面积复测资料较多的地区结合典型震例进行了研究, 利用动态图像演绎推理的方法给出了综合研究结果, 进行了系统地分析和解释。

为了研究 1975 年海城 7.3 级地震前后大地形变场的演化过程, 我们收集了辽东地区的大面积水准测量资料, 从前面提到的各种信息提取方法中筛选了适当的方案对资料进行了处理。1957~1971 年的垂直运动速率见图 1-3, 1976~1981 年的垂直运动速率见图 1-4。

因该区域历史资料较少, 只给出了这两张形变图。其中图 1-3 显示, 海城地震前该区域存在一明显隆起, 垂直形变速率最大值达 5mm/a, 震中位于隆起区的边缘。从经验上分析, 该区隆起速率偏低, 可能有两个原因: 第一是震前 4 年多无复测资料, 这期间可能存在更明显的异常变化, 但因与震时形变和震后形变混在一起, 难以给出定量分析; 第二是在 1957~1971 年长达 14 年时间内, 地壳的运动不可能是线性的, 如果震前存在不均匀的垂直加速形变, 在长达 14 年时间取平均, 就很难充分显示出其隆起应有的量级。尽管如此, 仍然显示出了一个总形变量达 50 多 mm 的隆起区, 震中位于隆起区的边缘, 这一现象与多年用大面积形变进行地震前兆研究的结果和结论是相吻合的。图 1-4 给出典型的四象限分布的形变图像特征, 震中位置近于中心点, 这一图像反映了海城地震后地壳形变的调整过程, 其剧烈程度和典型程度比图 1-3 明显得多。其北面的大面积下沉预示着地壳呈现松弛与调整的状态, 原有的高梯度带消失, 出现新生隆起和沉降区是原有形变场在震后调整的一种反映, 震后形变量大于震前的例子很多, 而且海城地震前的观测时间段不理想, 影响

了图 1-3 所显示的震前形变异常图像的典型程度。

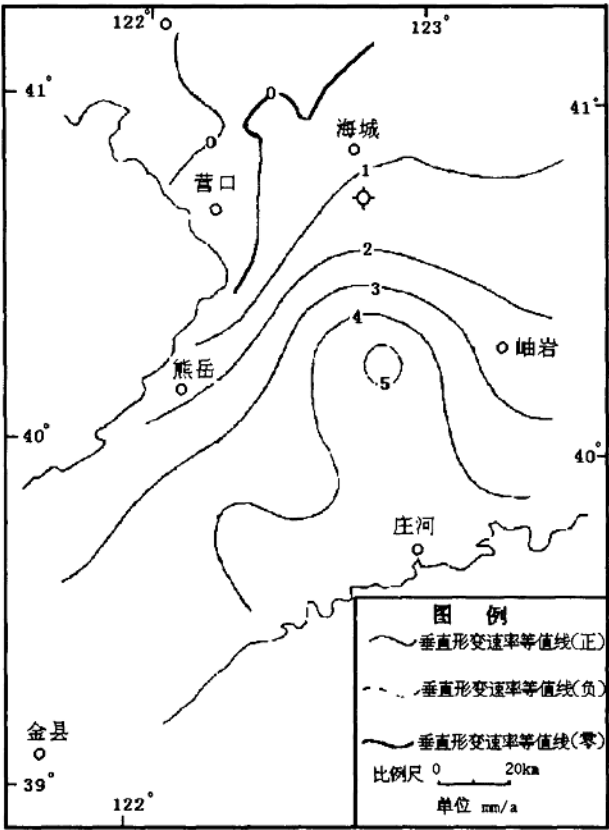


图 1-3 辽东地区地壳垂直运动速率图 (1957~1971 年)

1. 2. 2 唐山地震

唐山位于首都圈地区，是我国地震重点监视区之一，复测资料比其它地区多。但每次复测的路线及覆盖区域不同，每次给出的形变图像覆盖的范围也不一样。这次研究共给出了含唐山地区的四幅垂直形变图，见图 1-5 至 1-8。

从图 1-5 看出 1966~1972 年在唐山地区出现了惟一的形变高梯度带，年速率高达 12mm/a，而 1976 年唐山 7.8 级地震恰好发生在这一梯度带上。图 1-6 给出了 1971~1975 年间的垂直形变速率图，与图 1-5 相比，唐山至宁河间的形变高梯度带仍然存在，而唐山地区出现一个惟一的零值区。这次资料覆盖区域小得多，用任何一种方法确定起算基准都比较困难，同时受到天津地区沉降的严重干扰，故这里只分析其相对变化特征。因此，相对周围沉降来讲，唐山地区零值区实际上是一个明显的相对隆起区，而 1976 年唐山 7.8 级地震就发生在这一隆起区的边缘，在唐山至宁河的高梯度带上，年速率差达到了 10mm/a 以

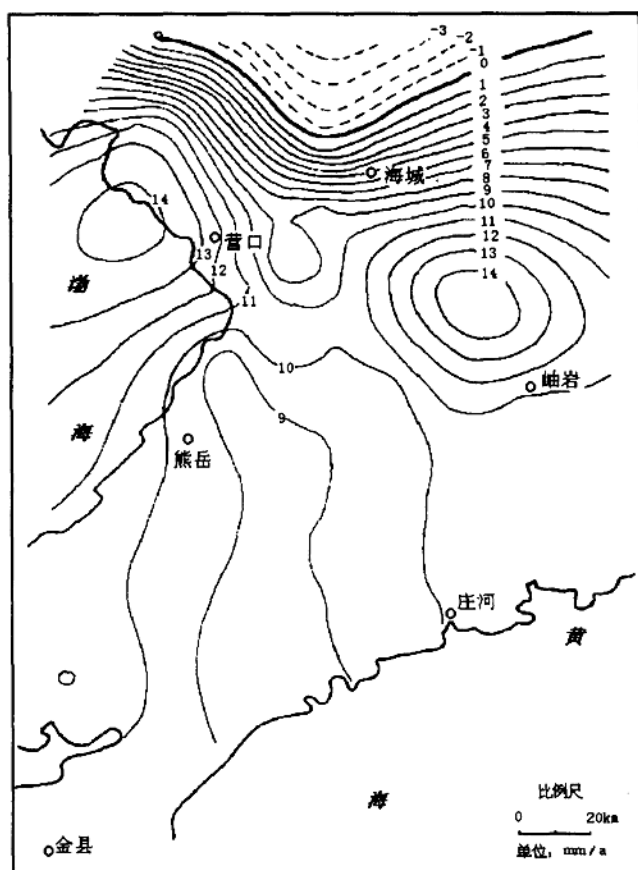


图 1-4 辽东地区地壳垂直运动速率图(1976~1981 年)

上。图 1-7 给出了 1972~1983 年间的垂直形变图像, 该图像仍显示唐山附近垂直形变梯度较大, 但比起前两幅图所示的形变量小得多, 说明唐山地震释放了大量的能量, 震时形变抵消了大部分震前形变。图 1-8 为 1975~1976 年的垂直形变图像, 具有四象限分布特征, 隆起区变成了凹陷区反映的是震时形变。其特点是大面积沉降, 震中区升降反向, 反映了地震释放能量后地壳呈现的一种松弛状态; 另一个特点是量级特别大, 达数百毫米, 一是发震断层错动引起, 二是多年应力积累所引起的形变量突然释放, 必然表现为年变速率大幅度升高。

1.2.3 大同地震

在 1989 年大同 6.1 级地震前, 原国家地震局恰好在该区域测完一期长水准, 遗憾的是分析结果快出来的时候, 地震已经发生了(图中年代是整个测区测量时间的中心年代)。图 1-9 和图 1-10 分别给出了华北地区(含大同地区)在大同地震前后的异地地壳垂直运动速率图。

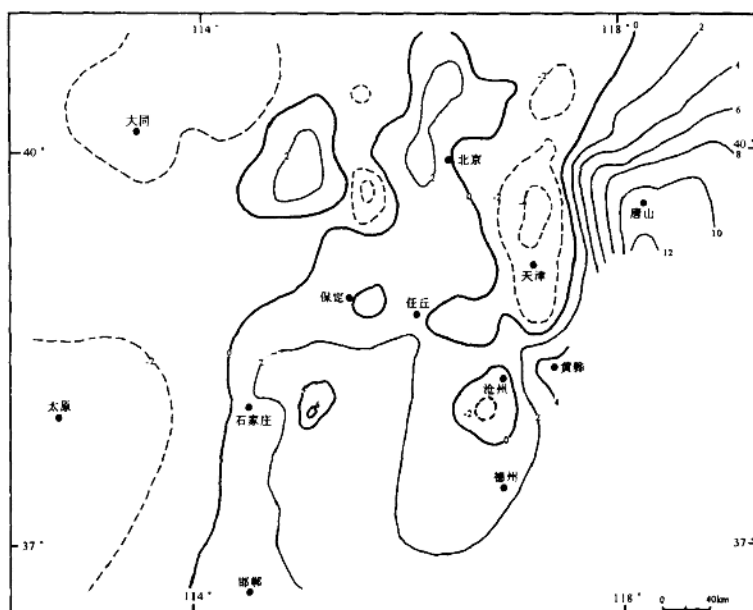


图 1-5 华北部分地区地壳垂直运动速率图(1966~1972 年, 单位: mm/a)

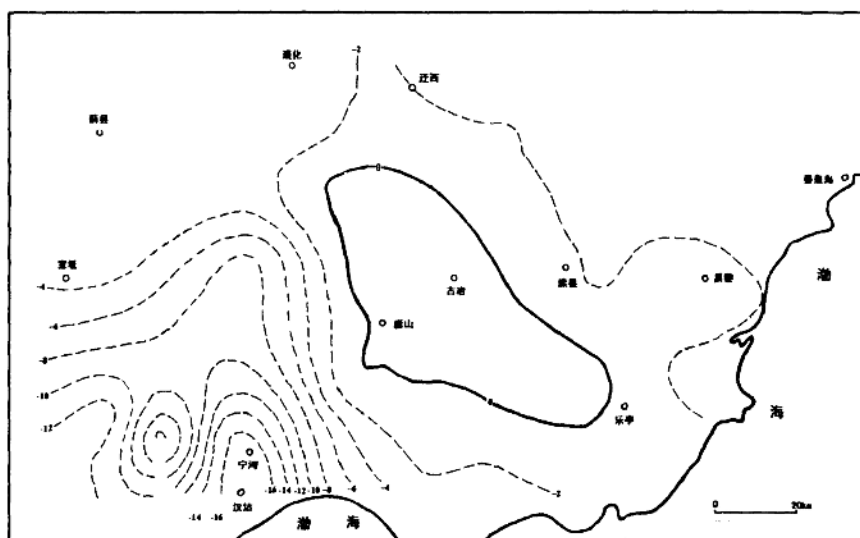


图 1-6 唐山地震前地壳垂直运动速率图(1971~1975 年, 单位: mm/a)

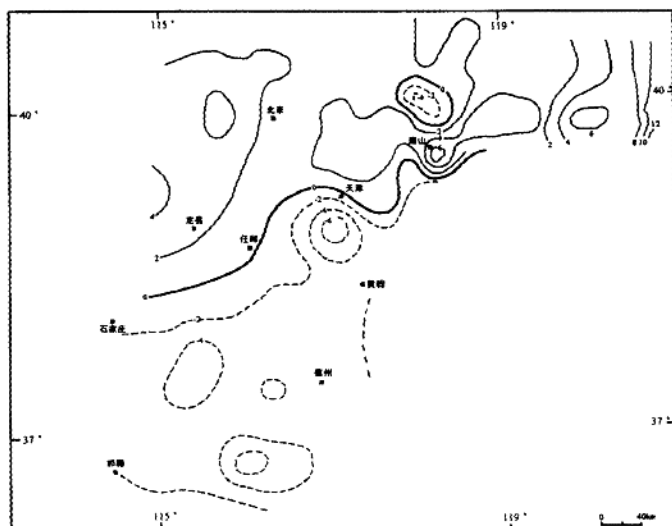


图 1-7 华北部分地区地壳垂直运动速率图(1972~1983 年, 单位: mm/a)

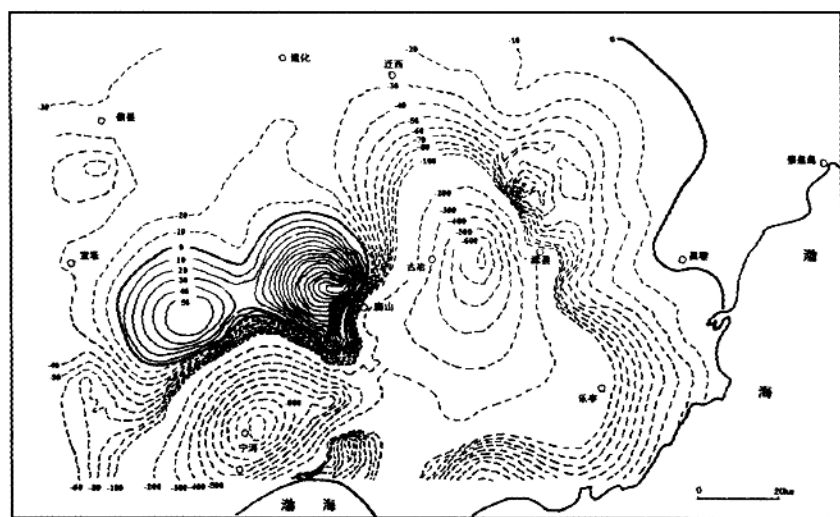


图 1-8 唐山地震前后垂直形变速率图(1975~1976 年, 单位: mm/a)

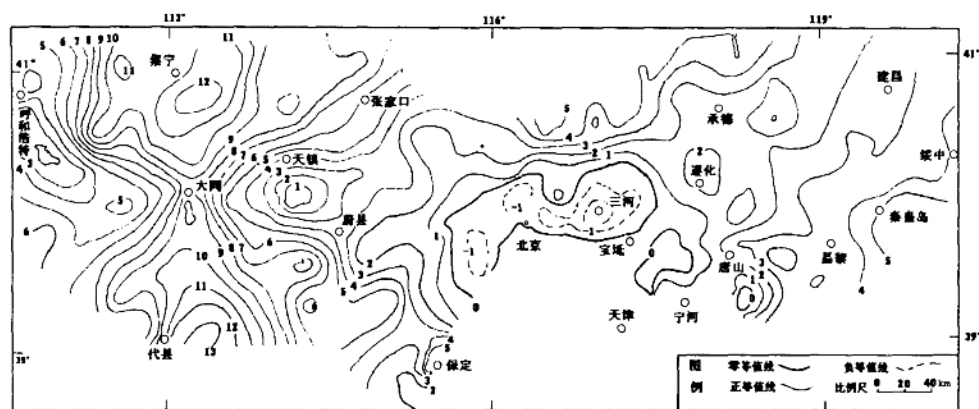


图 1-9 1983~1988 年华北地区(大首都圈)异态垂直运动速率图 (单位: mm)

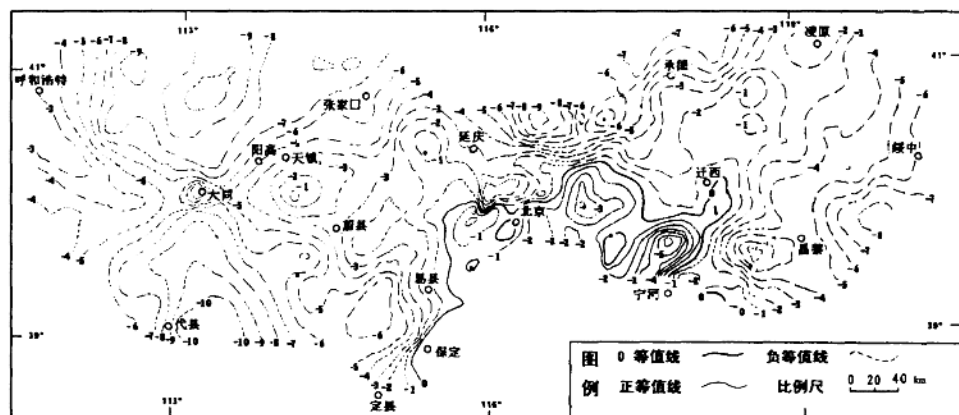


图 1-10 1988~1992 年华北地区(大首都圈)异态地壳垂直运动速率图 (单位: mm)

图 1-9 显示, 在大同地震前, 以大同为中心出现了十分典型的四象限分布特征, 上升速率达 8mm/a 以上, 图 1-10 显示出, 华北地区呈现大面积沉降(均以地壳长期趋势活动背景为基准), 说明地震后地壳活动的松弛和恢复状态, 大同地区形变等值线亦呈四象限分布特征。

1.2.4 讨论

以上三个震例显示了一个共同的特点, 即震前都存在垂直形变高梯度带或四象限分布特征, 年速率可达 8mm/a 以上(海城地震例外, 可能因观测时段不理想, 年速率值被平滑的后果); 震后均存在大幅度松弛性恢复, 并呈典型的四象限分布。这一研究结果对用大地形变测量手段进行地震前兆研究并用于中长期地震预报有着十分重要的实际意义。

§ 1.3 用大面积水准资料对全国大地形变场的研究

1.3.1 全国地壳垂直形变图及其研究结果

1985 年原国家地震局主持编绘了一张全国垂直形变速率图^[1], 到 90 年代, 补充了部分新的资料, 绘制了第二张全国垂直形变速率图(图 1-11)。

基于图 1-11, 在“八五”期间已经给出了不少的研究结果^[2], “九五”期间在此基础上开展了进一步深入研究, 除了结合地质构造对形变等值线进行了分区研究外, 还进行了全国垂直形变梯度场的研究和梯度信息与地震活动关系的研究。结合其它方面的研究结果, 给出了全国新的地震危险区的划分。在研究中我们还发现, 中国大陆地壳升降活动呈北西向条带相间的分布特征(深色表示沉降), 并且由西南向东北有逐步减弱的趋势。

这一分布特征可能是印度板块和欧亚板块碰撞, 造成以北东向主压应力场为主作用的结果。东部图像比西部复杂一些, 可能是太平洋板块和菲律宾板块叠加作用的影响。

1.3.2 全国地壳垂直形变梯度的研究

利用 1.1.6 小节给出的方法和式(1-4)对图 1-11 所示的全国垂直形变速率图进行了等效梯度计算, 以 $11.8\text{km} \times 11.8\text{km}$ 为一个采样点, 以 9×9 的点阵取平均做空间滑动, 给出的全国垂直形变梯度图见图 1-12; 以 3×3 的点阵取平均滑动, 其垂直形变梯度图见图 1-13。

由图 1-12 看出, 经 9×9 点阵平滑后的最大垂直形变梯度等值线与地形地貌主要构造的分布及走向比较一致, 例如, 与显示中国大陆主要地质构造格架的图 5-1 比较, 阴山—燕山构造带、南北构造带、新疆块体与青藏块体交界的构造带和郯庐构造带等都是形变梯度等值线较密集的条带。此外, 形变梯度等值线还近似勾画出了华北、东北和新疆等几个较大盆地的轮廓, 反映了大陆地壳基底趋势运动在空间分布上存在的差异, 有利于判定可能存在的地壳活跃区段, 进而给出可能存在的地震带的分布。图 1-13 是经 3×3 点阵平滑后得到的地壳垂直形变梯度图, 因其平滑面积小, 更充分的显现出了地壳运动局部不均匀的特征, 便于判定可能存在的孕震危险区。

顺便指出, 张郢珍等基于第一张全国垂直形变速率图已经做了中国大陆垂直形变速率梯度与强震危险区的研究工作^[3]。我们这次除用更新的资料以外, 计算方法和模型也有很大的改进, 并在 Citystar 地理信息系统平台上给出了计算结果和图件。

1.3.3 标准梯度信息与地震活动

变形破裂实验表明, 地震往往发生在剪应力较大的地应力集中地区。在地壳中, 应力集中区一般是应变较显著的地带。同样, 剪应力较大的地区也是剪应变(包括垂直剪应变和水平剪应变)较强烈的地区。垂直形变梯度是垂直剪应变强弱的反映^[4], 也是垂直剪应力大小的反映。垂直形变梯度变化与地震活动有着密切的关系。

基于上述认识, 用公式

$$x_i = nk \frac{T_i}{\sum_{j=1}^n T_j} \quad (1-5)$$