

地形变场与现代地壳垂直运动及 地震活动关系初探 (I)

——地形变场的计算方法和物理意义

郭维栋¹, 汤懋苍²

(1. 南京大学大气科学系, 江苏 南京 210093)

(2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 地震与地壳形变有着密切的关系, 但台站地倾斜资料空间连续性不好. 为此在场分析的基础上, 利用逐步订正法将地倾斜观测资料内插到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬度网格点, 引入曲面总曲率的概念计算格点上的 Gauss 曲率, 并推广到格点化的有限区域上得到表征曲面形态和变形强度的地表形变场. 结果表明: 该方法可以合理地弥补资料不连续的缺陷, 并在地表形变场上捕捉到一些关键的地表形变特征, 如地凸区、地凹区、鞍形场等. 为地震分析和预报中如何拓展和利用大范围时空信息提供了一种有益的思路.

关键词: 地倾斜; 网格化; 总曲率; 地形变场

中图分类号: P315.72⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0021-06

0 引言

地壳在形变过程中会产生应力集中并引发地震, 故地震与地壳形变的关系最为直接, 从来受到地震预报探索者的重视^[1]. 通常采用点面结合的办法进行研究. 一方面, 在地质构造的重要部位上设立台站做定点观测, 用地倾斜仪等连续测定垂直和水平方向的应变; 另一方面, 在面上重复进行大地水准、基线和三角等测量, 以监控大范围的地形变.

地倾斜观测只是研究地形变垂直方向的相对运动, 其量值为单位长度上的垂直形变量, 以角度的最小单位“角秒”表示. 由于地壳形变的量级很小, 有些地震的前兆异常幅度仅有 $0.1'' \sim 0.01''$, 即 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (弧度) 左右, 为此需要高灵敏度的观测仪器捕捉这样微弱的信息. 另外在地倾斜观测中干扰因素很多, 温度、气压、固体潮汐、地表负荷等的改变都会带进记录中, 必须合理地加以排除^[2, 3]. 20 世纪 80 年代以来, 通过台址条件的改善和提高仪器的灵敏度和稳定性两大方面的努力, 我国建设了第二代地形变观测台网 (以地倾斜观测为主), 其中国家基本台 42 个, 地方区域台 124 个. 已达到清晰正确测定固体潮汐的目标.

收稿日期: 2001-04-24

基金项目: 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室 (LASG) 开放课题及中国博士后科研基金资助.

作者简介: 郭维栋 (1972-), 男 (汉族), 青海格尔木人, 在站博士后, 现主要从事地球系统各圈层相互作用与全球变化的研究.

由于我们目前得到的资料是逐月地倾斜(EW向、NS向)2个分量的净变化,时空连续性都不好.这是因为在设台址时,将重点放在监测活动断层上,而且通过我国几十年来大地形变与地震关系的研究认识到:我国各地区的(大)地震前大面积地形变异常的强度(持续时间、范围、速率、梯度等)相差较大,很难给出一个普遍适用的数量标准.异常只是相对周围地区和该地区以往年代而言,必须结合地质构造的背景条件才能判定.为了弥补测站资料时空不连续的缺陷,我们引入了场分析方法将测站资料内插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的经纬度网格点上,得到一连续的地表形变场,可以反映出一些地表形变特征,如地凸区、地凹区、鞍形场等,为利用地形变资料进行地震预报开辟了新的思路.

1 资料收集与数值计算

1.1 资料收集

我们仅收集到1984~1992年间有限的地倾斜资料,均来自国家基本台.遗憾的是只有1987~199年间有35个以上观测台站,1986年为23个,其余年份则不足23个,见表1.图1是1984~1992年我国有过地倾斜观测的台站分布.为保证分析结果的可靠性,我们选取1986~1990年间中国大陆 97°E 以东, 42°N 以南的地形变场作为本文的研究对象.

表1 1984~1992年逐年有资料的台站数

1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
5	10	23	37	36	37	36	15	12

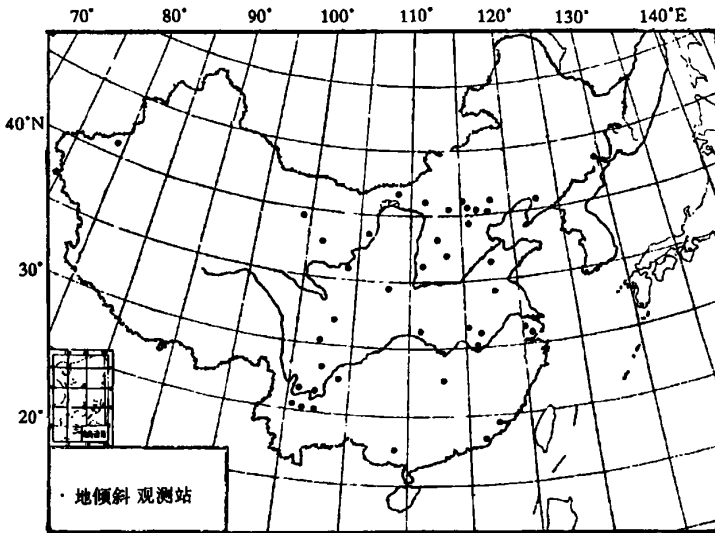


图1 1984~1992年地倾斜测站分布

Fig. 1 Distribution of stations observing ground tilt during 1984~1992.

1.2 曲面总曲率的数值计算方法

我们采用了胡泽勇设计的差值方法^[4]将测站资料内插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的经纬度网格点,网格化方法为逐步订正插值法.在获得初始网格点值时扫描半径取为100 km,然后根据测站密度逐渐加大,使扫描范围内有3个以上的测站;在订正网格点值时扫描半径取为500 km,然后每次

缩小 150 km, 经过 4 次订正得到我们所需的网格点值. 方法中的权重系数与测站和网格点之间的距离平方成反比, 能反映非线性的分布特征. 从利用该方法所作的几项工作和我们得到的结果看, 效果是令人满意的^[4,5].

为表征三维曲面弯曲变形的形态和程度, 引入曲面的 Gauss 曲率(总曲率)的概念. 由微分几何可知^[6]: 为了研究曲面在空间的弯曲性, 有必要引进所谓曲面的第二基本形式.

如果曲面用显式方程

$$z = f(x, y) \tag{1}$$

给定(这里 x, y 相当于纬向和经向), 其第二基本形式 φ_2 是:

$$\varphi_2 = \frac{rdx^2 + 2sdx dy + tdy^2}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \tag{2}$$

其中: $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}.$

由于曲面在已知点 $P(x, y)$ 的弯曲性可以由曲面离开它的切平面的速度来决定, 曲面的第二基本形式 φ_2 正表明了曲面与切平面的差异的特征.

在不同的方向曲面以不同的速度离开切平面, 所以用曲面上用不同曲线的曲率来决定曲面的弯曲性是很自然的. 先考虑通过曲面法线的任一平面与曲面的截线, 即法截线. 显然, 在曲面上一点 P 有无数多条法截线. 如图 2 所示, 在点 P 给定了切线 PT , 通过切线 PT 与曲面法线 PN 引平面 TPN , 以这个平面与曲面的截线记作 C^0 , 它的切线必定在曲面的切平面上, 这是因为一切曲面曲线的切线都在切平面上. 但 PT 又是这 2 个平面的交线, 因此, PT 就是 C^0 的切线. 总之, 在一个给定点 P 总可以作出给定切线 PT 在点 P 相切的一条确定的法截线.

法截线的曲率($1/R$)称为曲面在点 P 依给定方向的法曲率. 在曲面上每一点 P 的切平面上有两个互相垂直的方向, 使得所对应的法曲率达到最小值或最大值, 称为曲面在点 P 的主曲率 $1/R_1$ 和 $1/R_2$. 当切线绕点 P 从第一个主方向徊转到第二个主方向时, 法曲率从其最小值 $1/R_1$ 单调地增加到它的最大值 $1/R_2$.

为了探讨曲面的弯曲性, 起重要作用的是主曲率的乘积所决定的量, 称总曲率或高斯(Gauss)曲率, 记为:

$$k = \frac{1}{R_1 R_2} \tag{3}$$

k 的符号由 $1/R_1$ 和 $1/R_2$ 的符号来确定, 从而可以由 k 的符号来决定曲面在所考虑的点的邻近的结构.

对我们所关心的问题, 相当于曲面以显式 $z = f(x, y)$ 给出, 则曲面上任一点处的高斯曲率 k :

$$k = \frac{(rt - s^2)}{(1 + p^2 + q^2)^2} \tag{4}$$

式中: $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}.$

对格点资料, 用差分法求出各格点处 k 的数值解. 其中 $P_{i,j} \approx \partial z / \partial x, q_{i,j} \approx \partial z / \partial y$ 就是该点 EW 向和 NS 向地倾斜的正切值. 对于 $r_{i,j}, s_{i,j}, t_{i,j}$ 均可用中间差格式求出其数值解(以 EW 表示东西向倾角, 以 NS 表示南北向倾角).

$$r_{i,j} = \frac{-(\tan EW_{i+1,j} - \tan EW_{i-1,j})}{2\Delta x} \tag{5}$$

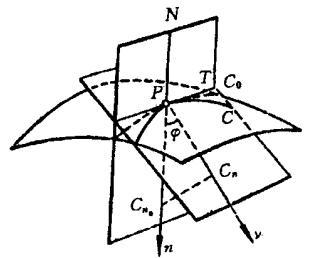


图 2 曲面的法截线示意图

Fig. 2 Sketch map of a normal to a curve surface.

$$t_{i,j} = \frac{-(\tan NS_{i,j+1} - \tan NS_{i,j-1})}{2\Delta y} \tag{6}$$

$$s_{i,j} = -\frac{1}{2} \left[\frac{(\tan EW_{i,j+1} - \tan EW_{i,j-1})}{2\Delta y} + \frac{(\tan NS_{i+1,j} - \tan NS_{i-1,j})}{2\Delta x} \right] \tag{7}$$

$$k_{i,j} = \frac{(r_{i,j} \times t_{i,j} - s_{i,j}^2)}{(1 + p_{i,j} \times q_{i,j})^2} \tag{8}$$

经过上述离散化和数值差分计算后,我们便可由式(8)得到研究区域内每个格点上逐月总曲率的值(单位: $1.0E-20/km^2$). 类似地,将各季度内(以 12 月至次年 2 月为冬季,余此类推)的地倾斜变化累计起来,还可以得到格点上逐季的总曲率的值.

2 地形变场的获取及其物理意义

由 k 的符号来决定曲面在所考虑点邻近的结构,有以下 3 种可能的情况:

(1) 在给定点的总曲率 $k > 0$

$1/R_1$ 与 $1/R_2$ 同号,这种点叫椭圆点. 曲面在该点的邻近位于切平面的同一侧,曲面沿所有方向都朝同一侧弯曲. 曲面在点的邻近象碗的形状(图 3a).

(2) 在给定点的总曲率 $k < 0$

$1/R_1$ 与 $1/R_2$ 异号,这种点叫做双曲点. 所对应的 2 条法截线中有一条朝 \vec{n} 的负侧弯曲,另一条朝 \vec{n} 的正侧弯曲. 总之,当 $k < 0$ 时,曲面在点的邻近象马鞍的形状(图 3b).

(3) 在给定点的总曲率 $k = 0$

这时, $1/R_1, 1/R_2$ 中至少有一个等于零. 这种点叫做抛物点. 对应于第一主方向的法截线朝 \vec{n} 的正侧弯曲,另一条法截线一般以该点为拐点,从它的切线的一侧朝另一侧弯曲. 由于这时除 $1/R_2 = 0$ 外, $1/R_1$ 总取正值,所以曲面在这一点邻近象半马鞍的形状(图 3c). 这种情况本身极少出现,我们的分析中几乎没有遇到.

从数学上讲,如果具有相同形态的点连续分布,则这种形态可以推广到它们组成的有限区域上. 本文的计算结果表明,相同形态的格点往往连续分布. 而且因为形变很小,相当于地表形变构成的曲面上的曲线近乎平直. 认为网格间不会有别的形态间断,在物理上也是可信的. 因此可以将研究区域按形态划分为若干种典型的形变区域. 应该指出,此处地形变场格点值的高低实际是地形变率强弱的反映,不直接是形变高差. 在地形变和地震研究中,有意义的是形变速率或形变梯度,即应变能积累区. 所以这样的地形变场可以满足我们的研究之需.

作为个例,给出 1989 年 9 月的地形变场(图 4). 从图中可见本月在我国东部存在 5 块地凸区:内蒙

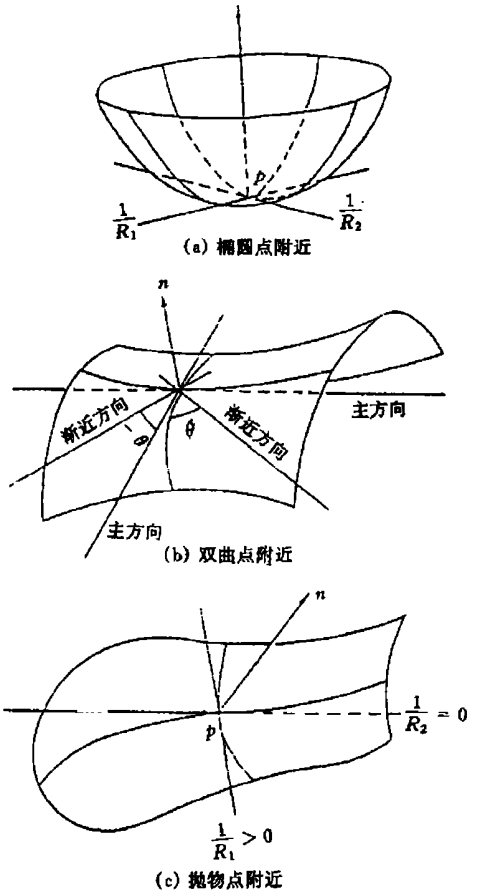


图 3 曲面形态

Fig. 3 Sketch maps of 3 dimensional curve surface.

中北部、黄河上游、晋豫之间、滇北和江西中部; 同时存在 5 块地凹区, 晋蒙之间、川鄂之间、桂北、苏鲁与苏皖之间. 本月在川西发生了 6.6 级地震, 震中位于两地凸区之间. 下个月(10 月)大同发生了 6.1 级强震, 它亦位于两地凸区之间的边缘地带. 文献[7] 中进一步将本月地形变场与同期地温场作了对比, 发现地形变场上的地凸/凹区与地温高/低值区分别有很好的对应. 地形变、地温、地震的配置关系符合“地热涡”的概念模型^[8].

3 小结

引入场分析的方法不仅可以合理地弥补测站资料时空不连续的缺陷, 而且计算得到的地表形变场还可以很好地反映某些关键的地表形变特征, 如地凸区、地凹区、鞍形场等, 物理意义清晰合理. 地形变场上的地凸/凹区与地温场上的高/低温区分别有很好的对应. 地形变、地温、地震的配置关系符合“地热涡”的概念模型. 本文结果表明引入场分析的方法不仅对我们要研究的问题是适用的, 还为地震分析和预报中如何拓展和利用大范围时空信息提供了一种有益的思路.

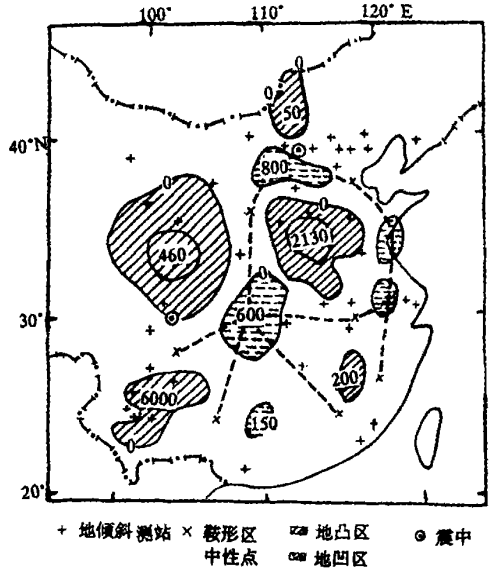


图 4 1989 年 9 月地形变场
Fig. 4 The earth deformation field in Sep. 1989.

[参考文献]

[1] 梅世蓉, 冯得益, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
 [2] 冯锐. 地倾斜与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1978.
 [3] 国家地震局科技监测司. 地震监测与预报方法清理成果汇编, 重力、地倾斜分册[C]. 北京: 地震出版社, 1989.
 [4] 胡泽勇. 中蒙地温、降水资料的网格化处理及一些初步分析结果[J]. 高原气象, 1994, 13(2): 162—168.
 [5] 范新岗, 胡泽勇. 中、蒙浅层地热通量场的计算及其结果分析[A]. 见: 灾害性气候及农业和水资源研究文集[C]. 1993.
 [6] 方德植. 微分几何[M]. 北京: 人民教育出版社, 1964.
 [7] 郭维栋, 汤懋苍. 我国地形变场的统计特征及与地温场的相关[J]. 高原气象, 1999, 18(1): 79—87.
 [8] Tang M C, Gao X Q. Some statistical characteristics of Geothermal Vortex in China during 1980—1993 (II) [J]. Science in China (Ser. D), 1997, (40): 569—576.

**STUDY ON THE EARTH DEFORMATION FIELD AND ITS RELATION WITH
CRUSTAL VERTICAL MOVEMENT AND EARTHQUAKE CRUSTAL
VERTICAL MOVEMENT AND EARTHQUAKE (I)**

——Numerical expression and physical meaning of deformation field

GUO Wei-dong¹, TANG Mao-cang²

(1. *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

2. *Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, CAS, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Relationship between earthquake and the earth deformation field is studied based on the viewpoint of field analyses. Deformation fields are obtained by introducing a series of numerical calculation steps in processing ground tilt data. The results show that the methods are capable of making up the shortcomings of the lack of data. Some typical deformation states on the earth surface are well reflected by earth deformation field such as convex/concave areas. The field analyses method also provides a useful idea for how to get and utilize large-scale spatial-temporal information in earthquake observation and prediction.

Key words: Ground tilt; Numerical calculation; Gauss curvature; Earth deformation field

(上接 20 页)

**THE APPLICATION OF F-K ANALYSIS IN CONSTRUCTION
OF SHANGHAI SEISMIC ARRAY**

TONG Yu-xia, ZHU Yuan-qing

(*Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China*)

Abstract: F-K analysis can be used in processing data of seismic array, and getting detailed information on seismic wave field. This approach can separate seismic signals which arrive the array almost at same moment, and identify the type of wave with different velocity. All those are helpful to distinguish complex seismic wave. Mainly the procedure of F-K analysis and application in Shanghai Seismic Array are discussed.

Key words: F-K analysis; Seismic array