

## 四分量钻孔应变观测的实地相对标定\*

邱泽华<sup>1)</sup> 石耀霖<sup>2)</sup> 欧阳祖熙<sup>1)</sup>(1) 中国地震局地壳应力研究所,北京 100085  
(2) 中科院研究生院,北京 100039)

**摘 要** 提出钻孔应变观测的实地标定问题有相对标定和绝对标定两层涵义;讨论了四分量钻孔应变观测的相对标定的归一化新方法:将前人标定应力观测的方法用于应变观测,一方面大大简化了计算公式,另一方面提出轮流以每个元件为标准计算灵敏度而后取平均值的方法,在统计上更为合理;并以昌平台 RZB-1 型钻孔应变观测为例进行实际应用,取得了令人满意的结果。

**关键词** 钻孔应变观测 四分量钻孔应变仪 绝对标定 相对标定 元件灵敏度

**中图分类号**:P315.62

**文献标识码**:A

RELATIVE IN-SITU CALIBRATION OF 4-COMPONENT  
BOREHOLE STRAIN OBSERVATIONQiu Zehua<sup>1)</sup>, Shi Yaolin<sup>2)</sup> and Ouyang Zuxi<sup>1)</sup>(1) *Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085*  
(2) *Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039*)

**Abstract** Two meanings of in-situ calibration of borehole strainmeters, namely relative calibration and absolute calibration, are identified. In this paper, a new method of relative calibration for 4-component strainmeter is put forward with a case studying on the observations of Changping station and satisfied results have been obtained. Compared with previous formulae for strainmeters, the new method is much more simple and more statistically reasonable. We calculated the transducer sensitivity by taking the four components as the standard in turn and the mean as the final result.

**Key words**: borehole strain observation, 4-component borehole strainmeter, relative calibration, absolute calibration, transducer sensitivity

## 1 引言

目前在国际上,以美国的板块边缘观测(PBO)计划为标志,钻孔应变观测得到研究人员空前的重视<sup>[1]</sup>。中国的钻孔应变观测是在钻孔应力观测的基础上发展起来的<sup>[2]</sup>,在未来的“十·五”期间也将有

很大的发展<sup>[3]</sup>。在地震预报中,人们关注的是应变观测曲线的相对变化,但在研究中<sup>[4]</sup>,就必须说明应变变化量的实际大小。这就涉及钻孔应变观测的实地标定问题。

一般地,人们希望通过解决钻孔应变观测的标定问题从观测读数获得应变变化。显然这是一个至

\* 收稿日期:2004-08-24

基金项目:国家自然科学基金(40374011);地震科学联合基金(1040037)

作者简介:邱泽华,男,研究员,主要从事地球动力学、地震、地应力-应变观测等方面的研究

关重要的基本问题。文献[5~9]都讨论过钻孔应力观测的标定问题,一方面主要是说明地面上的标定与地下不同,另一方面提出可以利用互相垂直方向应力之和为不变量的特点对四分量不同元件应力观测进行互检。在标定问题上,钻孔应力观测与钻孔应变观测有很大区别。我们提出,钻孔应变观测的标定问题有两层涵义:第一,可以认为实地标定是相对室内标定而言的。室内标定是对仪器(元件)的标定,标定结果是元件的灵敏度,即观测读数与实际孔径相对变化的比例系数。人们需要知道室内标定结果在钻孔中是否可用,需要进行怎样的校正,由此提出实地标定问题。这种标定可称为实地相对标定;第二,由测值换算出孔径相对变化以后,仍然不能直接给出应变变化,还要利用理论固体潮等依据对与钻孔周围介质的弹性有关的参数进行标定,然后由相关公式求出应变变化<sup>[10~13]</sup>,这种标定可称为实地绝对标定。

本文以昌平台 RZB-1 型钻孔仪应变观测<sup>[14]</sup>为例,讨论四分量钻孔应变观测的实地相对标定问题。

## 2 基本公式

目前,一般的钻孔分量应变仪实际直接测量给出的是孔径相对变化。根据“钻孔加衬模型”<sup>[15,16]</sup>,当远处有均匀水平主应变  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  时,钻孔的  $\theta$  方向的理论孔径相对变化为:

$$S = A(\epsilon_1 + \epsilon_2) + B(\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2(\theta - \varphi) \quad (1)$$

这里  $S$  即一般实际观测给出的数值。其中  $\varphi$  是  $\epsilon_1$  的方位角,而  $A$  和  $B$  与套筒内径、套筒外径、围岩等效杨氏模量和泊松比、套筒材料的杨氏模量和泊松比有比较复杂的关系。 $\theta$  方向的线应变  $\epsilon_\theta$  应满足公式:

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2(\theta - \varphi) \quad (2)$$

这里用  $R_i$  代表元件  $i$  的观测读数,  $K_i$  代表元件  $i$  的灵敏度,则元件  $i$  的孔径相对变化的测值为:

$$S_i = K_i R_i \quad (3)$$

我们知道,对于各向同性弹性介质,要确定平面应变状态,只要观测该平面内 3 个方向的孔径相对变化。这 3 个方向的孔径相对变化测值是相互独立的。对于四分量探头,有 4 个方向的测值可供使用,可构成 4 种包含 3 个方向的孔径相对变化测值的组合。这 4 个方向的测值不是相互独立的。它们之间的关系,可用一个非常简单的公式给出。

将两个互相垂直方向的孔径相对变化的测值  $S_1$  和  $S_3$  分别用公式(1)表示并相加,可得:

$$S_1 + S_3 = 2A(\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (4)$$

同理,有:

$$S_2 + S_4 = 2A(\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (5)$$

于是得 4 组测值之间的简单关系:

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4 \quad (6)$$

将公式(3)代入(6),得:

$$K_1 R_1 - K_2 R_2 + K_3 R_3 - K_4 R_4 = 0 \quad (7)$$

这就是说,当 4 个方向的元件同时记录到 4 个读数时,它们之间的关系与各个元件的实际灵敏度有关。我们就是要利用这种关系来对元件进行实地标定。公式(7)只含一次项,严格说来这种标定只能确定灵敏度之间的相对大小,因而称为相对标定。在这种相对标定中,任意取其中 1 个未知相对灵敏度等于 1,就可以解出其它 3 个未知相对灵敏度。例如公式(7)两边同除以  $K_1$ ,得:

$$k_{11} R_1 - k_{21} R_2 + k_{31} R_3 - k_{41} R_4 = 0 \quad (8)$$

其中,  $k_{11} = K_1/K_1 = 1$ ,  $k_{21} = K_2/K_1$ ,  $k_{31} = K_3/K_1$ ,  $k_{41} = K_4/K_1$ 。数学上,只要有 3 次记录,就可以求出  $k_{21}$ ,  $k_{31}$  和  $k_{41}$ 。但实际上,这样得到的结果是不可靠的。请注意,这里的读数  $R_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 都可以看成列向量。我们可以利用大量的观测值来统计确定  $k_{21}$ ,  $k_{31}$  和  $k_{41}$ 。

但是,这样的解法仍然存在一个问题,就是所有元件并不对称。如果有一个元件的灵敏度非常稳定可靠,那么取它为 1 就可能给出相当理想的结果。然而我们其实无法判断是否存在这样的元件,甚至难以确定哪个元件比其它的好。这样,当被取为 1 的元件灵敏度出现问题时,就会导致结果的不准确。我们解决这个问题的方法是:分别取所有 4 个元件的灵敏度为 1,依次对  $k$  进行求解,然后取平均值。

仿照公式(8)分别在公式(7)两边同除以  $K_2$ ,  $K_3$  和  $K_4$ ,得:

$$k_{12} R_1 - k_{22} R_2 + k_{32} R_3 - k_{42} R_4 = 0 \quad (9)$$

$$k_{13} R_1 - k_{23} R_2 + k_{33} R_3 - k_{43} R_4 = 0 \quad (10)$$

$$k_{14} R_1 - k_{24} R_2 + k_{34} R_3 - k_{44} R_4 = 0 \quad (11)$$

其中  $k_y = K_i/K_j$  ( $i, j=1,2,3,4$ )。利用公式(8)~(11)求解元件的相对灵敏度,取平均值(仍然用  $K$  表示):

$$K_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} \quad (i=1,2,3,4) \quad (12)$$

这样求出的相对灵敏度将为确定值,大小都在 1 附近,仍然满足公式(7)。

## 3 计算实例

我们所用的资料实际上是将电量读数乘以“格值”后得到的未经校正的观测孔径变化。这里仍然将它视为读数,再利用公式(6)对观测进行标定,给

出标定灵敏度。这也正是我们在处理四分量应变观测数据中要做的事情。由此也可以理解相对标定给出的相对灵敏度在 1 附近,实际上也有其合理性。

根据公式(4)和(5),两个垂直方向的测值相加与面应变值是对应的。将  $R_1$  和  $R_2$  以及  $R_3$  和  $R_4$  分别相加,就得到两条面应变观测曲线(图 1)。非常重要,两条面应变观测曲线的变化是基本一致的。这就说明了理论公式(6)的准确性,也说明了昌平台的 RZB-1 四分量应变仪确实观测到应变变化,并且有非常高的可靠性。

因为仪器已经安装多年,可以认为没有零漂情况,所以图中曲线变化可以认为是应变变化的反映。需要指出的是,气压和水位的变化虽然一般可以看成干扰,但是其直接造成的结果也是应变变化。对照应变和气压曲线可知,应变曲线的较大变化往往是气压变化造成的。我们的研究不考虑是否构造应变变化,因而这种干扰不用排除。

连续钻孔应变观测的对象是应变的变化,因而需要用观测值的增量来进行标定。这是线性问题,公式(7)对于增量同样成立。

2003 年 1 月之前,昌平台的 RZB-1 型分量钻孔应变仪的观测一直不很稳定。尽管探头看起来工作正常,但是井上记录仪器经常发生接触问题,影响了观测数据质量。2003 年 1 月更换井上仪器以后,该应变仪工作稳定,取得了良好的连续观测数据。

我们根据公式(8)~(11),对昌平台 2003 年 2 月到 11 月的正点值数据进行了计算。对于某一个公式,计算结果总的说来是相当稳定的。对于不同月份,不同元件标定灵敏度的相对大小是非常一致的。总体上看起来标准差都比较大。但是这里应该考虑到标定灵敏度的数值相对很小,当个别“坏”数据非常大(甚至超过几个量级)时,就会造成比较大的影响。标准差比较大主要是这些“坏”数据造成的。

根据公式(12),我们最终计算出相对标定灵敏度(表 1)。检验这种计算结果的方法是将它们应用于实际,校正观测资料。图 1 是校正前昌平台 RZB-1 四分量应变仪 2003 年 11 月份的面应变观测增量曲线。图 2 给出校正后的面应变观测增量曲线。对照两图可以看出校正后的两条体应变观测曲线比较校正前更为相似。我们对所有 2003 年 2~11 月份的两条体应变观测曲线进行了校正分析,结果见表 2。对比各月份校正前后的相关系数和平均残差,可以看出,校正后的数据比较校正前有明显的改善。

表 1 相对标定灵敏度的最终计算结果

Tab. 1 Final relative calibration results

公式	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
(8)	1	1.055 85	0.657 55	0.653 07
(9)	0.524 38	1	0.555 54	0.515 83
(10)	0.972 85	1.461 17	1	0.782 62
(11)	1.019 77	1.728 16	0.804 98	1
相对灵敏度	0.879 25	1.311 29	0.754 52	0.737 88

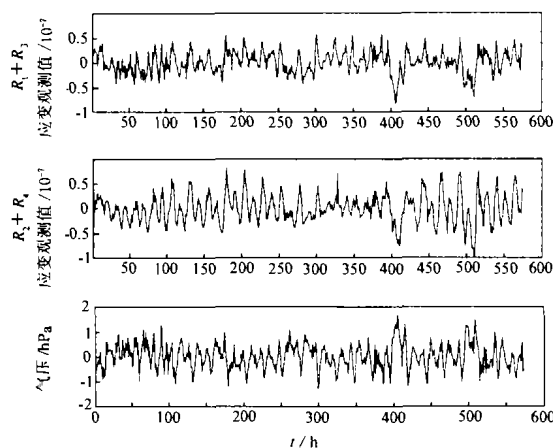


图 1 校正前的面应变观测增量曲线

Fig. 1 Incremental curves of area strain recordings before calibration correction

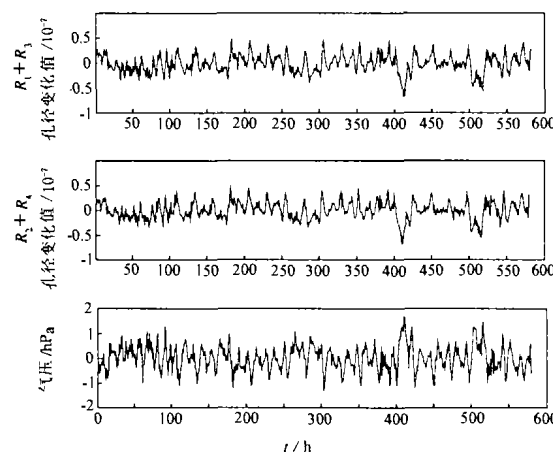


图 2 校正后的面应变观测增量曲线

Fig. 2 Incremental curves of area strain recordings after relative calibration correction

## 4 结语

本文指出钻孔应变观测的标定问题有两层涵义:第一,可以认为实地标定是相对室内标定而言的,是对仪器(元件)灵敏度的标定,称为相对标定;第二,由测值换算出孔径相对变化以后,还要利用理论固体潮等依据对与钻孔周围介质的弹性有关的参数进行标定,从而给出应变变化,称为绝对标定。

我们将前人标定应力观测的方法用于应变观

表 2 校正前后两条体应变观测曲线相关性对比

Tab. 2 Correlations between two body strain curves before and after relative calibration correction

月份	相关系数		平均残差/(10 <sup>-8</sup> )	
	校正前	校正后	校正前	校正后
2 月	0.788 3	0.905 0	1.496 0	0.410 6
3 月	0.766 4	0.981 6	1.564 6	0.338 4
4 月	0.687 0	0.935 2	1.962 8	0.579 5
5 月	0.673 2	0.950 0	1.790 5	0.524 2
6 月	0.695 6	0.890 0	1.682 3	0.717 1
7 月	0.498 2	0.696 6	0.198 7	0.085 6
8 月	0.275 3	0.392 7	0.282 7	0.164 9
9 月	0.929 5	0.930 2	0.214 1	0.080 6
10 月	0.646 7	0.975 4	0.187 7	0.038 8
11 月	0.615 8	0.970 9	0.189 3	0.037 6

测,一方面大大简化了计算公式,另一方面又提出轮流以每个元件为标准计算灵敏度而后取平均值的方法,在统计上更为合理。以往还没有文献给出任何将面应变设为不变量对四分量应力或应变观测进行实地标定的结果,我们以昌平台 RZB-1 型钻孔应变观测仪为例进行实地应用,首次给出了实地标定结果。

## References

- 邱泽华,石耀霖.国际钻孔应变观测的发展现状[J].地震学报,2004,26(增刊).
- Qiu Zehua and Shi Yaolin. Developments of borehole strain observation outside China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(Supp.), (in Chinese)
- 邱泽华,张宝红.我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状[J].国际地震动态,2002,6:5~9.
- Qiu Zehua and Zhang Baohong. Current situation of the seismological networks for borehole stress-strain precursor surveillance[J]. Recent Developments in World Seismology, 2002, 6: 5~9. (in Chinese)
- 邱泽华,谢富仁,苏恺之,欧阳祖熙.发展钻孔应变观测的战略构想[J].国际地震动态,2004,1:7~14.
- Qiu Zehua, Xie Furen, Su Kaizhi and Ouyang Zuxi. New era of borehole strain observation[J]. Recent Developments in World Seismology, 2004, 1: 7~14. (in Chinese)
- 邱泽华,石耀霖.地震造成远距离应力阶变的观测实例[J].中国科学,2003, 33(增刊):60~64.
- Qiu Zehua and Shi Yaolin. Observations of remote coseismic stress step-changes[J]. Science in China(Series D), 2003, 33(Supp.): 60~64. (in Chinese)
- 张超.钻孔法地应力测量中元件率定的若干力学问题[A].见:中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队编,地应力测量的原理和应用[C].北京:地质出版社,1981, 204~222.
- Zhang Chao. Quantitative stress analysis of stress measurement by piezomagnetic method and discussions on the related mechanic problems[A]. Principles and Application of Ground Stress Measurement[C]. Beijing: Geological Press, 1981, 204~222. (in Chinese)
- 黄福明.探头与井壁接触问题的研究[A].见:国家地震局科技监测司编,地震监测与预报方法清理成果汇编(重力、地倾斜、地应力分册)[C].北京:地震出版社,1989, 280~284.
- Huang Fuming. Studies on the contact between stress sensors and borehole wall[A]. Methods of Earthquake Monitoring and Forecasting (Division of Gravity, Tilt and Stress)[C]. Beijing: Seismological Press, 1989, 280~284. (in Chinese)
- 蒋企.测量灵敏度的井下率定[A].见:国家地震局科技监测司编,地震监测与预报方法清理成果汇编(重力、地倾斜、地应力分册)[C].北京:地震出版社,1989, 262~265.
- Jiang Qi. Downhole calibration of measuring sensitivity [A]. Methods of Earthquake Monitoring and Forecasting (Division of Gravity, Tilt and Stress)[C]. Beijing: Seismological Press, 1989, 262~265. (in Chinese)
- 韩德润.四分向探头测量结果的互检实验[A].见:国家地震局科技监测司编,地震监测与预报方法清理成果汇编(重力、地倾斜、地应力分册)[C].北京:地震出版社, 1989, 276~279.
- Han Derun. Self checking of the measurements of four component stress-meter [A]. Methods of Earthquake Monitoring and Forecasting (Division of Gravity, Tilt and Stress)[C]. Beijing: Seismological Press, 1989, 276~279. (in Chinese)
- 石耀霖,范桃园.地应力观测井中元件标定及应力场计算方法[J].地震,2000,20(2):101~106.
- Shi Yaolin and Fan Taoyuan. Borehole in-situ calibration of stress sensors and calculation of variation of stress field during long term observation [J]. Earthquake, 2000, 20(2): 101~106. (in Chinese)
- 欧阳祖熙,张宗润.钻孔应变仪与井壁耦合方法的研究[A].地壳构造与地壳应力文集(2)[C].北京:地震出版社,1988, 1~10.
- Ouyang Zuxi and Zhang Zongrun. Studies of method for coupling strain gauge with borehole wall[A]. Works on Crustal Movements and Seismic Structure (2)[C]. Beijing: Seismology Press, 1988, 1~10. (in Chinese)
- 骆鸣津,顾梦林,李安印,睢建设.用引潮力进行钻孔应变-应力的原地标定[J].地壳形变与地震,1989,9(4): 51~62.
- Luo Mingjin, Gu Menglin, Li Anyin, et al. Borehole strain-stress calibration in the same place by use of tidal generation force[J]. Crustal Deformation and Earth-

- quake, 1989, 9(4): 51—62. (in Chinese)
- 12 陈沉俊, 杨修信. 双衬套应变测量的计算[J]. 华北地震科学, 1990, 8(4): 80—89.
  - 12 Chen Yuanjun and Yang Xiuxin. Calculations of strain observation in the borehole with two cases[J]. North China Earthquake Sciences, 1990, 8(4): 80—89. (in Chinese)
  - 13 欧阳祖熙, 李秉元, 贾维九, 张宗润. 一种钻井式地应力测量系统[A]. 地壳构造与地壳应力文集(2)[C]. 北京: 地震出版社, 1988, 11—20.
  - 13 Ouyang Zuxi, Li Bingyuan, Jia Weijia, et al. A borehole type instrument for monitoring of changing stress field in earth's crust[A]. Works on Crustal Movements and Seismic Structure [C]. Beijing: Seismological Press, 1988, 11—20. (in Chinese)
  - 14 Hart R H G, Gladwin M T, Gwyther R L, Agnew D C, Wyatt F K. Tidal calibration of borehole strain metrics; removing the effects of small-scale inhomogeneity [J]. JGR, 1996, 101(B11): 25 553—25 571.
  - 15 潘立宙. 测量地应力的钻孔变形法[A]. 见: 中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队编, 地应力测量的原理和应用[C]. 北京: 地质出版社, 1981, 1—47.
  - 15 Pan Lizou. Borehole deformation method of ground stress measurement[A]. Principles and Application of Ground Stress Measurement [C]. Beijing: Geological Press, 1981, 1—47. (in Chinese)
  - 16 潘立宙. 与地应力测量有关的几个公式的推导和讨论[A]. 见: 中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队编, 地应力测量的原理和应用[C]. 北京: 地质出版社, 1981, 163—203.
  - 16 Pan Lizou. Derivation of several formulas with their applications to in-situ stress measurements[A]. Principles and Application of Ground Stress Measurement [C]. Beijing: Geological Press, 1981, 163—203. (in Chinese)
- 
- (上接第 107 页)
- 与地球动力学, 2002, 22(1): 56—62.
- 11 Zhang Qiuwen, Zhang Perzhen, Wang Chen, et al. Quasi-periodically clustering earthquake recurrence in some seismotectonic belts of China Continent[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(1): 56—62. (in Chinese)
  - 12 任俊杰, 陈虹. 东昆仑断裂带地震复发周期与发震概率研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 51—56.
  - 12 Ren Junjie and Chen Hong. Research on recurrence interval and probability of medium and large earthquake at eastern Kunlun fault zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 51—56. (in Chinese)
  - 13 焦明若, 张国民. 地震中短期前兆某些特征的研究[J]. 地震, 2000, 20(3): 29—36.
  - 13 Jiao Mingruo and Zhang Guomin. Research on characteristics of medium-short-term seismic precursors[J]. Earthquake, 2000, 20(3): 29—36. (in Chinese)
  - 14 牛安福, 张晶, 延旭东 等. 西南地区强震前后地壳变形异常强度场特征研究[J]. 地震, 2002, 22(1): 61—69.
  - 14 Niu Anfu, Zhang Jing, Yan Xudong, et al. Study on the characteristics of anomaly deformation field around strong earthquakes in Southwest China area[J]. Earthquake, 2002, 22(1): 61—69. (in Chinese)
  - 15 张国民. 我国地震监测预报研究的主要科学进展[J]. 地震, 2002, 22(1): 1—8.
  - 15 Zhang Guomin. The main science advance of earthquake monitoring and prediction in China[J]. Earthquake, 2002, 22(1): 1—8. (in Chinese)
  - 16 宋治平, 徐平, 薛艳. 华北地区震群活动的阶段性特征[J]. 地震, 2001, 21(1): 47—52.
  - 16 Song Zhiping, Xue Ping and Xu Yan. Stage-by-stage characteristics of earthquake swarm activity in the North China region[J]. Earthquake, 2001, 21(1): 47—52. (in Chinese)
  - 17 范燕, 车兆宏. 南北地震带北段及其两侧断层现今活动性[J]. 地震, 2001, 21(2): 87—93.
  - 17 Fan Yan and Che Zhaozhong. The fault activity in recent time along northern section of North-South seismic belt and its both sides[J]. Earthquake, 2001, 21(2): 87—93. (in Chinese)
  - 18 刘蒲雄, 陈永恩, 高伟, 等. 大震前地震活动图像演变及中期向短期过渡的地震活动性标志[J]. 地震, 1997, 17(2): 113—125.
  - 18 Liu Puxiong, Chen Yong'en, Gao Wei, et al. Evolution of seismicity patterns before strong earthquakes and short-term indicator of seismic precursors[J]. Earthquake, 1997, 17(2): 113—125. (in Chinese)
  - 19 张国民, 李丽. 强震成组孕育、成组发生过程中相互影响的研究[J]. 地震, 1997, 17(3): 221—231.
  - 19 Zhang Guomin and Li Li. On group features of the strong earthquake preparation and occurrence and their correlation[J]. Earthquake, 1997, 17(3): 221—231. (in Chinese)
  - 20 高维明, 任利生. 环渤海地震危险区的初步研究[J]. 地震, 1997, 17(3): 249—256.
  - 20 Gao Weiming and Ren Lisheng. Preliminary study on the risk area of earthquake around Bohai sea[J]. Earthquake, 1997, 17(3): 249—256. (in Chinese)