

震源区的应变调整与水氡变化*

唐顺善 杨家凤
(天津市地震局)

摘要

1976年唐山地震后,随着一系列余震的发生,震源区进行应变调整。根据贝尼奥夫公式,可由唐山地震序列求出震源区相对应变变化过程。此过程与震源区内一水准观测点所测的垂直形变相对变化基本一致。震源区内水氡的变化与相对应变相关。据此相关性进一步讨论提出,震源区内水氡在主震后的上升可能与震源区应变调整、含水岩层宏观裂隙累积增长有关。

一、引言

主震发生后,产生一系列余震,震源区进行应变调整。余震活动时间往往长达数年以上。1976年唐山地震前后,京津唐地区积累了多个井孔的地下水氡含量(以下简称水氡)资料,震后又取得了大量的余震资料。本文试图从地震序列和定点水准观测资料求得震源应变调整的相对应变变化过程,分析伴随应变调整的水氡变化特征,进一步讨论震源区的水氡变化与相对应变变化的关系。

二、相对应变的计算

主震后的一系列余震活动是震源继续释放应变的过程。伴随着这一过程的进行,震源区地面产生调整运动。因此,我们可由地震序列和震源区的地形变两种途径探讨震源的应变释放调整过程。

1. 由地震序列进行相对应变的计算

据贝尼奥夫的计算方法,地震时释放的应变量 ϵ 与地震波能量的平方根 \sqrt{E} 成正比^[1]:

$$\epsilon = \frac{1}{c} \sqrt{E} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{2} p \mu v}$$

p 为发射地震波能量与岩石破裂滑动释放总能量之比 ($p < 1$), μ 为岩石弹性常数, v 为震源体积。对一指定断裂,若假定 p 为常数,则 c 亦为常数。

* 1980年3月3日收到初稿; 1980年9月30日收到修改稿。

若地震时将震前积累的弹性应变能全部释放, 则震前积累的应变 ε_0 等于地震时的应变 ε :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon$$

由式(1)得

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c} \sqrt{E} \quad (2)$$

若震源体的弹性应变能通过一地震序列予以释放, 则震前的总应变 ε_0 等于全序列每次地震时释放的总应变之和, 即:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \sqrt{E_i} \quad (3)$$

在地震序列中, 当第 x 次地震发生前夕的应变量为 ε_x , 则 ε_x 等于震前总应变与已释放应变之差, 即:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_0 - \sum_{i=1}^{x-1} \frac{1}{c} \sqrt{E_i} \\ &= \frac{1}{c} \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{E_i} - \sum_{i=1}^{x-1} \sqrt{E_i} \right) \\ &= \frac{1}{c} \sum_{i=x}^n \sqrt{E_i} \end{aligned} \quad (4)$$

由(3)、(4)式可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x / \varepsilon_0 &= \frac{1}{c} \sum_{i=x}^n \sqrt{E_i} / \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \sqrt{E_i} \\ &= \sum_{i=x}^n \sqrt{E_i} / \sum_{i=1}^n \sqrt{E_i} \end{aligned} \quad (5)$$

我们将 $\varepsilon_x / \varepsilon_0$ 定义为相对应变量并用百分比(%)表示。它所表示的意义是: 在第 x 次地震的前夕, 震源体所具有的应变量占震前总应变的百分比。如果地震序列已知, 则按式(5)可求出地震活动期间任一时刻的相对应变值。

从截止于 1979 年 12 月 31 日的唐山地震目录中取 $M_L \geq 3.0$ 的地震组成一个序列, 将每一地震震级换算为地震波能量的平方根, 分月计算月内各次地震波能量平方根的和,

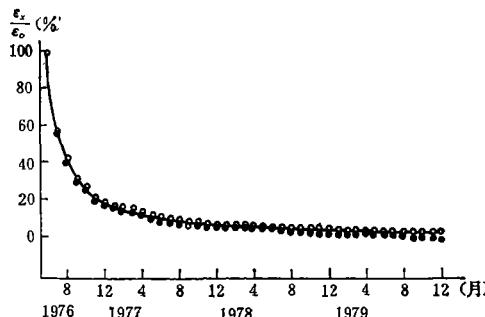


图 1 由唐山地震序列计算的相对应变变化过程
(图中 ● 为包括残余能量的计算值; ● 为不计残余能量的计算值)

表 1

年	月	$\sum_{i=1}^n \sqrt{E_i}$ (10^6 焦耳)	不包括假定残余能量		包括假定残余能量	
			$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \sqrt{E_{ij}})$ (10^6 焦耳)	$\varepsilon_x / \varepsilon_0$ (%)	$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \sqrt{E_{ij}})$ (10^6 焦耳)	$\varepsilon_x / \varepsilon_0$ (%)
1976	6		772.8235	100.00	791.6235	100.00
	7	343.5960	429.2275	55.54	448.0275	56.60
	8	116.9401	312.2874	40.41	331.0874	41.82
	9	87.7050	224.5824	29.06	243.3824	30.74
	10	31.2406	193.3418	25.02	212.1418	26.80
	11	50.6791	142.6627	18.46	161.4627	20.40
	12	10.3829	132.2798	17.12	151.0798	19.08
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	11					
	12					
1977	1	12.2022	120.0776	15.54	138.8776	17.54
	2	3.6797	116.3979	15.06	135.1979	17.08
	3	15.6742	100.7237	13.03	119.5237	15.10
	4	5.5003	95.2234	12.32	114.0234	14.40
	5	24.1713	71.0521	9.19	89.8521	11.35
	6	6.5781	64.4740	8.34	83.2740	10.52
	7	6.6086	57.8654	7.49	76.6654	9.68
	8	1.5458	56.3196	7.29	75.1196	9.49
	9	3.3176	53.0020	6.86	71.8020	9.07
	10	3.1030	49.8990	6.46	68.6990	8.68
	11	6.2280	43.6710	5.65	62.4710	7.89
	12	4.4496	39.2214	5.08	58.0214	7.33
1978	1	0.3639	38.8575	5.03	57.6575	7.28
	2	0.7521	38.1054	4.93	56.9054	7.19
	3	2.4100	35.6954	4.62	54.4954	6.88
	4	3.3457	32.3497	4.19	51.1497	6.46
	5	1.1977	31.1520	4.03	49.9520	6.31
	6	2.2041	28.9479	3.75	47.7479	6.03
	7	1.7770	27.1709	3.52	45.9709	5.81
	8	1.2493	25.9216	3.35	44.7216	5.65
	9	0.3623	25.5593	3.31	44.3593	5.60
	10	1.2022	24.3571	3.15	43.1571	5.45
	11	0.8180	23.5391	3.05	42.3391	5.35
	12	3.0762	20.4629	2.65	39.2629	4.96
1979	1	0.9245	19.5384	2.53	38.3384	4.84
	2	1.7120	17.8264	2.31	36.6264	4.63
	3	3.1678	14.6586	1.90	33.4586	4.23
	4	1.2890	13.3696	1.73	32.1696	4.06
	5	2.0940	11.2756	1.46	30.0756	3.80
	6	0.7178	10.5578	1.37	29.3578	3.71
	7	0.2712	10.2866	1.33	29.0866	3.67
	8	3.4667	6.8199	0.88	25.6199	3.24
	9	4.7154	2.1045	0.27	20.9045	2.64
	10	0.2675	1.8370	0.24	20.6370	2.61
	11	1.3969	0.4401	0.06	19.2401	2.43
	12	0.4401	0.0000	0.00	18.8000	2.37

按式(5)逐月算出各月的相对应变值(表1)。

由于唐山地震当前尚未完全平静,今后还可能发生多次 $M_L \geq 3.0$ 的地震。为此假定,1979年底以后,唐山震源体内还残存有相当于 $M_s = 6.5$ 的地震能量,则包括此假定残余能量所计算的相对应变值也列入表1中。由于假定的残余能量与已经释放的能量相比数量很小,因此包括与不包括假定残余能量所计算的结果差异甚小(图1)。

表 2

年	月	$H_s + \Delta H$ (毫米) (实测高差)	H_s (毫米) (实测高差—稳定高差)*	$\varepsilon_s / \varepsilon$ (%)
1976	6	179.0	61.0	100.00
	7	156.1	38.1	62.46
	8	140.2	22.2	36.39
	9	131.2	13.2	21.64
	10	128.8	10.8	17.70
	11	127.9	9.9	16.23
	12	127.9	9.9	16.23
1977	1	127.3	9.3	15.24
	2	126.7	8.7	14.26
	3	126.3	8.3	13.61
	4	停 测	—	—
	5	127.1	9.1	14.92
	6	126.0	8.0	13.11
	7	125.5	7.5	12.30
	8	125.2	7.2	11.80
	9	125.6	7.6	12.46
	10	126.0	8.0	13.11
	11	停 测	—	—
	12	125.2	7.2	11.80
1978	1—8	停 测		
	9	121.4	3.4	5.57
	10	122.1	4.1	6.72
	11	121.4	3.4	5.57
	12	121.3	3.3	5.41
1979	1	120.9	2.9	4.75
	2	119.9	1.9	3.11
	3	120.0	2.0	3.28
	4	119.6	1.6	2.62
	5	119.4	1.4	2.30
	6	119.6	1.6	2.62
	7	120.5	2.5	4.10
	8	121.4	3.4	5.57
	9	121.2	3.2	5.25
	10	120.3	2.3	3.77
	11	120.8	2.8	4.59
	12	120.4	2.4	3.93

* 稳定高差假定为 $\Delta H = 118.0$ 毫米

2. 由定点水准观测资料计算相对应变

在唐山地震活动期间,位于震源区的宁河水准点(图 5)测得南北向高差(月均值)变化如图 2 所示。假定水准测线两个端点的高差变化所代表的地壳形变如图 3 所示。由 s 点起算,以深度为 h ,宽度为 b ,长度为 l 的地壳块体,假定无水平形变,在地震活动期间总的体积变化量 ΔV 为:

$$\Delta V = \frac{1}{2} H_0 l b \quad (6)$$

总的体积应变 ε 为:

$$\varepsilon = \Delta V / \frac{1}{2} (h + h + \Delta H) l \cdot b = H_0 / 2h + \Delta H \quad (7)$$

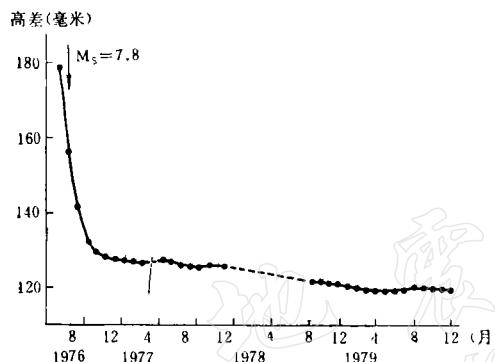


图 2 唐山地震后宁河水准点南北向高差变化

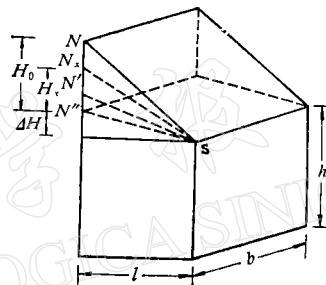


图 3 宁河水准点地壳形变示意图

(S, N 分别为南北端点。假定 S 不动, N 为震前实测标高, N' 为震后实测最低标高, N'' 假定为地震平静后标高, N_s 为任一实测标高)

当北端点的标高变为 N_s 时,相应的体积应变 ε_s 为:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{2} H_s \cdot l \cdot b / \frac{1}{2} (h + h + \Delta H) \cdot l \cdot b = H_s / 2h + \Delta H \quad (8)$$

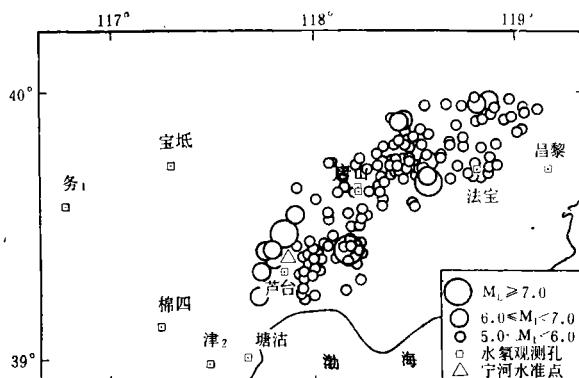
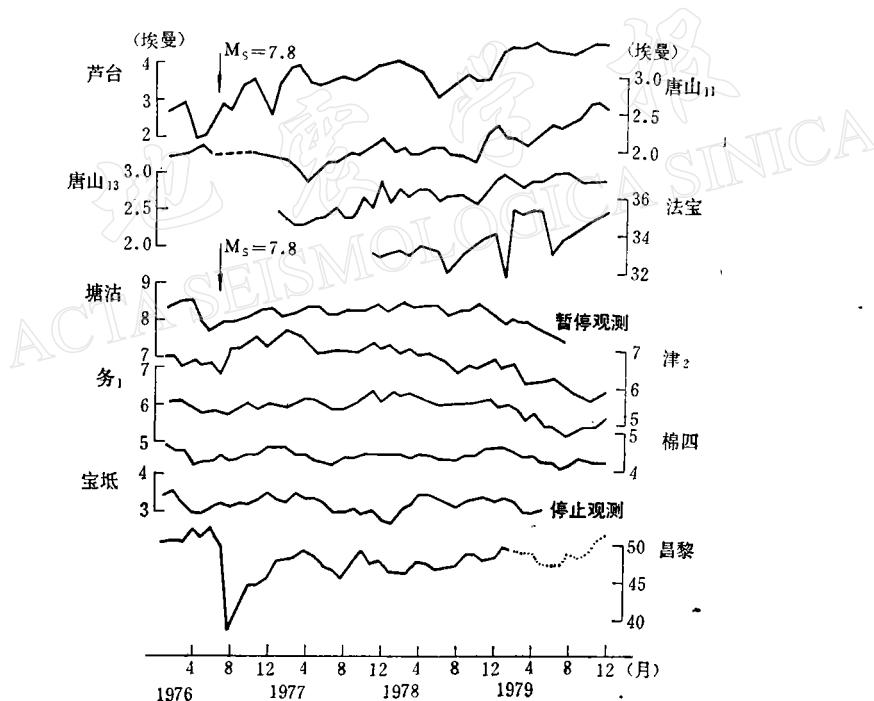
由式(7)、(8)得:

$$\varepsilon_s / \varepsilon = \frac{H_s}{2h + \Delta H} / \frac{H_0}{2h + \Delta H} = H_s / H_0 \quad (9)$$

由宁河水准点南北向高差变化资料用式(9)算出的相对应变值列入表 2。

三、震后水氡变化特征

在唐山地震区及其邻近地区 1976 年至 1979 年底,在稳定观测条件下,有连续两年以上水氡观测资料的井孔共 10 口(图 4)。其中芦台井、唐山 11 号井、唐山 13 号井及法宝井位于余震区,其余六口在余震活动区之外(图 4)。如果假定余震活动区即为震源区,则前四个井孔为源内水氡观测孔,余震区外的六口井就是源外水氡观测孔。将源内与源外各孔震后水氡变化对比于图 5。由此可以看出,源外观测孔在唐山地震后,随着时间的推延,水氡逐步下降或稳定在一定的幅度内而无明显上升。位于源内的各孔却与此相反,与

图4 唐山地震 $M_L \geq 5.0$ 余震震中及水氡观测孔、水准观测点分布图图5 唐山地震后震源区内外水氡变化对比图
(昌黎井的虚线段为变更测定方法后由对比实验结果换算的值)

震前相比,震后水氡不仅没有降低,反而有较大幅度的上升。这是震后震源区内水氡变化区别于源外的特征。除此之外,震后震源区水氡的上升变化还有以下两个特征:

1. 水氡的趋势性上升与震源区相对应变变化相关。将源内四个井孔的水氡变化与相对应变(由地震序列计算的结果)变化对比于图6,从中看出,随着相对应变的平缓下降,水氡反而逐步上升。将芦台、唐山11、唐山13、法宝四个井孔水氡月均值与相对应变值(地震序列计算值)计算相关系数(表3),则每一井孔的相关系数绝对值都大于99%可信度的临界相关系数。显然,震源区内的水氡变化与应变调整变化相关。

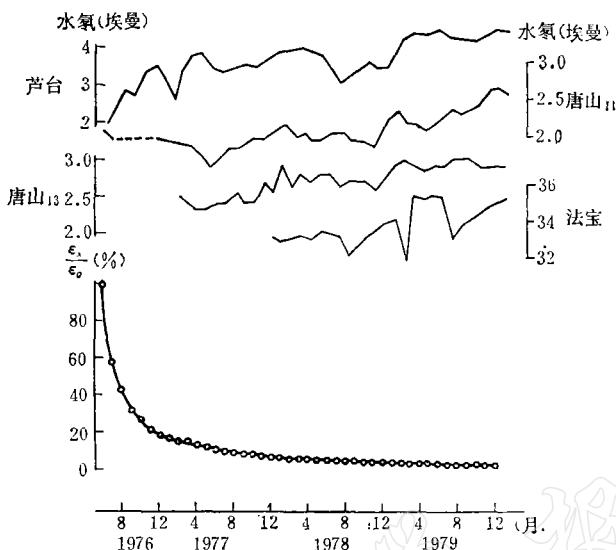


图 6 水氢与相对应变变化过程的对比

表 3

井孔	计算时段	样本个数	相关系数	99% 可信度 临界相关系数
芦台	1976. 6.—1979. 12.	43	-0.63	0.3925
唐山 11	1977. 1.—1979. 12.	35	-0.74	0.4182
唐山 13	1977. 1.—1979. 12.	36	-0.82	0.4132
法宝	1977. 12.—1979. 12.	25	-0.55	0.4869

2. 上升幅度大, 持续时间长。以芦台井为例, 1976 年上半年水氢月均值为 2.5 埃曼左右, 1979 年底已上升到 4.5 埃曼, 上升幅度达 80%, 超过了唐山地震前京津唐地区水氢的最大异常幅度。震后持续上升变化的时间长达三年半之久, 在震前的变化中也是少见的。

四、讨 论

1. 相对应变的两种计算结果的一致性问题

如前所述, 震源的应变变化过程可用相对应变量随时间的变化来近似描述。在本文中我们所定义的相对应变, 可以分别由地震序列资料和定点水准的连续观测资料计算得出。对唐山地震用地震序列资料和宁河水准点的观测资料所计算的相对应变变化过程对比于图 7, 由此可见, 两种计算结果基本一致。

应当指出, 虽然两种计算方法所得的相对应变都是反映震源应变调整过程的指标, 但它们所代表的应变部位是不同的。用地震序列的计算, 是把震源作为一个整体来看待的。尽管有些地震可能是发生在不同的断裂分支上, 但式 (5) 是把所有的地震当作由同一震

源断裂面上发生的。因此用式(5)所计算的相对应变变化过程是代表了整个震源体的综合应变变化过程。用宁河水准测量资料所计算的相对应变,只能代表水准测线所在局部地块近地面部分的应变变化。震源应变场的理论研究和我国几次大地震的地面形变观测资料表明,由地震而引起的地形变在空间上的分布是不均匀的^[2-5]。本文所计算的两种相对应变变化基本一致,这表明虽然震源区内各点的应变变化幅度差异很大,但各点应变调整的相对速率是基本一致的,即应变调整运动在震源区内具有相对的同步性。这一结果是否具有普遍性,理论上的探讨和实际观测资料的验证都有待继续深入的工作。

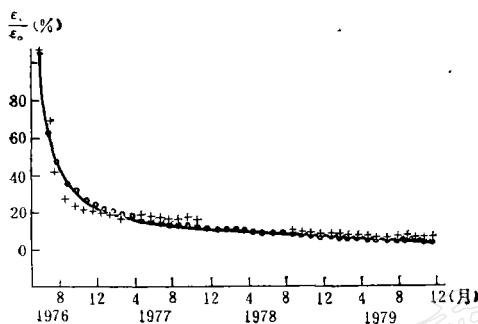


图7 由地震与形变两种资料计算的相对应变的比较

(图中○为地震资料计算值; +为形变资料计算值)

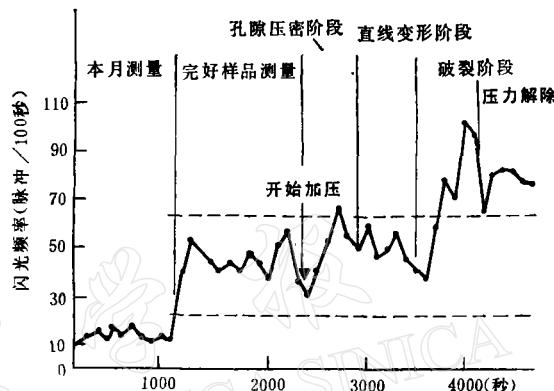


图8 岩石加压前后及破裂过程的连续测氡曲线

2. 震后水氡变化机理的讨论

如前所述,震源区内水氡的变化与相对应变有明显的相关关系。这种相关性是属于巧合还是表明水氡的变化与应变调整运动有着本质的联系。为此,我们对震后水氡变化的机理进行讨论。地下水中的氡一是来源于围岩中生成的氡;另一来源是溶于水中的镭衰变生成的氡。震源区内观测孔震后水氡长时间、大幅度上升,这就需要从这两个途径向水中不断补充氡。岩石破裂与氡含量变化关系的实验结果表明:岩石样品在受力作用后,在孔隙压密阶段氡射气虽有所增加,但氡射气的大幅度增长是在破裂形成之后^[6](图8)。因此,裂隙可能是地下水取得氡气补充的主要途径。含水层围岩裂隙的形成,一方面使围岩中封存的氡沿裂隙迁移出来,进入水中,另一方面增加了水与围岩的接触面积,有利于氡的母体——镭在水中的溶解,从而使水中由镭衰变生成的氡也有所增加。

伴随地震产生的裂隙面,可能是地震断层面,也可能是不发生地震的裂隙面。水氡观测孔含水层埋藏较浅,其深度一般浅于震源深度。因此,震源断层面直接断通含水层的可能性较小。然而当深部岩块发生快速错动产生地震时,必然牵动上复岩层(包括含水层)产生相应的调整运动或变形。由于运动的急剧和组成岩层物质的不均,在不同物质的交界处就可能产生裂隙面。我们把由于地震而产生的各种裂隙面统称为宏观裂隙。综上所述,既然裂隙是增加水氡的主要途径,震源区内伴随地震活动产生宏观裂隙的可能性又客观存在,因此,可以认为:震源区的应变调整,大量产生宏观裂隙,裂面尺度的扩大和裂隙数量的累积增长,可能是引起震源区水氡上升的主要原因。水氡变化的裂隙机制也可能是水氡与相对应变相关的实质。

五、小 结

1. 由唐山地震序列和宁河水准点观测的垂直形变资料, 均可求出反映震源应变调整变化的相对应变变化过程。虽然两种资料计算结果的含义不同, 然而所计算的相对应变变化过程基本一致。有可能是震源应变调整运动同步性的反映。对唐山地震所得的这一结果是否具有普遍性还有待继续研究。

2. 唐山地震后, 震源区内水氡大幅度长时间的趋势上升, 是区别于源外水氡变化的特征, 而且源内水氡的上升变化与震源区的相对应变变化相关。

3. 根据岩石破裂与氡含量变化的实验结果和震后水氡变化特征的分析, 初步认为, 震后震源区的应变调整, 含水层围岩裂隙的扩大和数量的累积增长, 可能是震后水氡长时间持续上升变化的主要原因。正因如此, 不能把水氡震后的趋势上升与震前的趋势异常等同视为地震的前兆信息。

本文得到尹集刚、范广伟两同志的帮助, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] H. Benioff, Crustal strain characteristics derived from earthquake sequences, *Trans. Amer. Geoph. Union.*, **32**, 4, 1951.
- [2] 陈运泰等, 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程, 地球物理学报, **18**, 3, 1975.
- [3] 国家地震局地震测量队, 1966 年邢台地震的地形变, 地球物理学报, **18**, 3, 1975.
- [4] 国家地震局地震测量队, 1970 年云南通海地震的地形变特征, 地球物理学报, **18**, 4, 1975.
- [5] 国家地震局地震测量队, 海城 7.3 级地震的地形变, 地球物理学报, **20**, 4, 1977.
- [6] 北京市地震队水化学组, 岩石破裂与氡含量变化关系的实验研究, 地球物理学报, **20**, 4, 1977.

STRAIN ADJUSTMENT IN THE EARTHQUAKE SOURCE REGION AND THE VARIATION OF RADON CONTENT IN WATER

TANG SHUNSHAN YANG JIAFENG

(Seismological Bureau of Tianjin)

Abstract

After the Tangshan Earthquake of 1976, strain adjustment took place in the earthquake source region by the occurrence of a series of aftershocks. The relative strain changes in the earthquake source region may be calculated from the energies of the aftershocks by the Benioff's formula. On the whole, these changes are consistent with those obtained from the vertical deformation observed at a geodetic levelling point within the earthquake region. The correlation between the variations of the radon content in water and the changes of relative strain is rather good. Further discussion based on such observations suggests that the increase in radon content in water after the main shock may be related to the strain adjustment in the earthquake source region and the cumulative increase of macroscopic fractures of the water bearing rock formations.