

# 唐山地震前后的应力变化

曹新玲 李自强 刘建中

(国家地震局地球物理研究所)

## 摘 要

在距唐山地震震源约百公里的大港油田,以水压致裂法,在深度1000—4000米之间,测定了69次地应力值,对比了1973—1980年大地震前后八年内的应力值变化。

在主震前,构造应力场出现明显变化:(1)水平应力梯度降低,即在最大与最小水平主应力方向呈现应力松弛;(2)水平应力与深度的相关系数降低,即构造应力场受到扰动;(3)断层滑动系数增高,断层出现无震蠕动。此外,结合地质构造与应力测量结果,对唐山地震发生过程中的一些异常现象,如无震蠕动、地下水位变化、浅层和外围地区的应力松弛,以及应力沿断层面向深层和闭锁区的转移等,进行了分析和讨论。

## 一、引言

讨论唐山大地震前后震源区附近深部地应力的变化,对认识地震的发生过程是很有意义的。为此,我们选择了大震前唯一进行深井水压致裂工作的大港地区,来测量地震前后的应力变化。该区距震中约一百公里,距宁河仅几十公里,它的地下应力变化是反应大地震震源区边缘地下应力状态的一个窗口。

我们选取了大港地区1973年至1980年共69次压裂资料,测定了深度1000米至4000米的地下应力值(见表2)。据此,进一步做出了水平应力梯度值随时间的变化,应力与深度相关系数的变化和反应断层滑动的参数的变化等结果。

本文还结合地质构造和应力测量结果,分析了唐山地震孕育和发生过程中出现的无震蠕动,地下水位变化,浅层和外围地区的应力松弛以及应力沿断层面向深层和闭锁区的转移过程等。通过应力的测定和分析,加深了对唐山地震发生过程的认识。

## 二、断层滑动和无震蠕动

### 1. 断层滑动条件

根据拜尔利(Byerlee)定律<sup>[1]</sup>,断层的滑动条件为:

$$\left. \begin{aligned} \tau &\geq 0.85\sigma_n \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha \\ \sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

从上式可以导出:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \geq \frac{0.85}{\sin 2\alpha - 0.85 \cos 2\alpha} \quad (2)$$

其中:  $\tau$  为剪应力,  $\sigma_n$  为有效法向应力,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为最大、最小水平主应力的有效值,  $\alpha$  是最小水平主应力和断层面的夹角。

由(2)式可以看出,其右侧由断层参数决定。对确定的断层来说,则为一定值;其左侧由应力条件决定。设  $K = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$ , (2) 式右侧最小值是 0.65, 最大值是 1。因此  $K > 0.65$  时,走向接近最大剪切应力方向的断层就会滑动,  $K$  值越大,断层产生滑动的可能性越大,故我们以  $K$  作为描述断层滑动的一个参数。根据我们深部应力测量结果,华北平原的  $K$  值随深度的增加而减小(图 1)。浅部  $K$  值大,断层容易发生相对滑动,促使浅层应力沿断面向深部转移。深部  $K$  值小,断层不易发生滑动。因此,更容易积累能量。

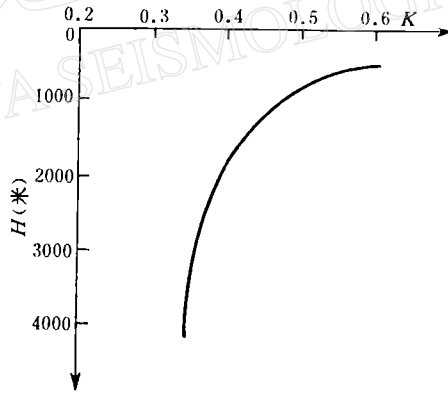


图 1 华北平原滑动系数曲线

Fig. 1 Curves of slip coefficient in Northern China plain

$K$  值不仅随深度变化,而且在地震前、后亦随时间变化。从大港地区  $K$  值的年变化中可以看到,唐山地震前的 1976 年上半年,其  $K$  值高达 0.92 (表 3、图 4)。这说明震源区贮存的应变能已接近于饱和和临界状态,处于该应力场下的断层,可产生走向滑动。

## 2. 无震蠕动

地壳形变测量数据表明,唐山地震前(1969 年至 1973 年期间),在唐山断层观测到断层走向、倾向蠕动速度分别为 22 厘米/年及 1.7 厘米/年。蓟运河断层蠕动速度分别为 24.1 厘米/年及 8.0 厘米/年。这说明唐山地震前存在明显的无震蠕动<sup>[2]</sup>。这种现象正是由于唐山地区受华北应力场的控制和影响,  $K$  值震前已很高,致使断层相对滑动,产生无

震蠕动, 从而形成浅部应力的松弛状态。

浅部应力松弛状态, 也可从地下水位的变化得以验证。

众所周知, 岩石裂隙和地下水相通, 地下水位升降反映孔隙压变化。根据岩石力学理论

$$\frac{\delta V}{V} = \bar{\beta} \delta P \quad (3)$$

式中:  $V$  为整个体积,  $\delta V$  为体积变化,  $\delta P$  为围压变化,  $\bar{\beta}$  为岩石不排水时压缩系数。

由于  $\bar{\beta} \delta P = \beta_D (\delta P - \delta P_P) + \beta_S \delta P_P$ , 所以 (3) 式变成

$$\delta P_P = \frac{\bar{\beta} - \beta_D}{\beta_S - \beta_D} \delta P \quad (4)$$

式中:  $\beta_D$  是岩石排水时压缩系数,  $\beta_S$  是岩石基质的压缩系数,  $\delta P_P$  是孔隙压变化,  $\frac{\bar{\beta} - \beta_D}{\beta_S - \beta_D}$  为常数。(4) 式说明孔隙压变化与围压变化成正比。因此, 水位变化势必反映围压变化。

我们从图 2 和表 1 中可以看到, 唐山地震前有井水水位下降的趋势异常<sup>[3]</sup>, 它反映了浅层应力下降。临震时, 深层运动速度加快, 浅层与深层的相互作用发生倒转。于是, 水位发生回升, 甚至出现大幅度升高现象。

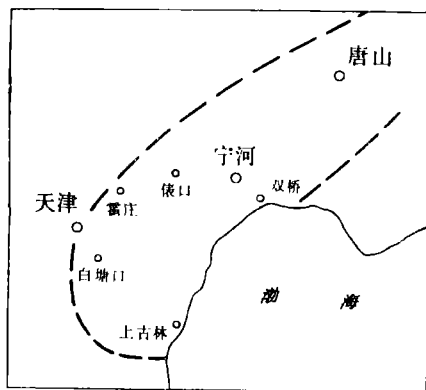


图 2(a) 井位示意图

Fig. 2 (a) Distribution of water wells

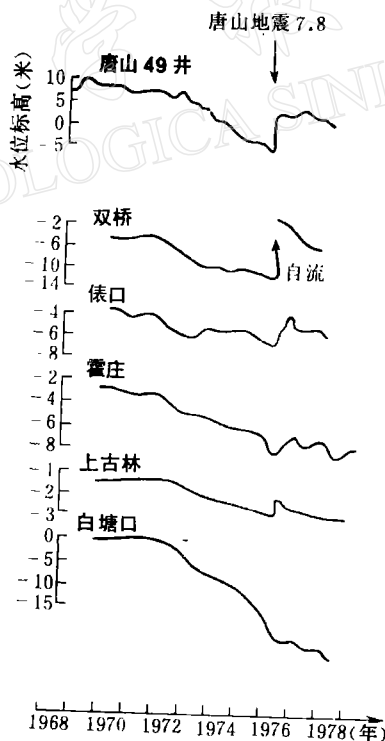


图 2(b) 水位图

Fig. 2 (b) water level chart

以上分析表明, 唐山地震孕震过程中, 由于反映断层滑动的参数  $K$  值增大, 断层出现无震蠕动现象, 形成浅层应力松弛, 致使地下水位下降, 这一切促使应力从浅层沿断层面向深层转移, 从而为孕育大地震创造了条件。

表 1

井 名	震中距 (公里)	井深 (米)	水位 埋深 (米)	趋势异常		短期异常		临震异常		震后变化	
				开始时间	速率 (米/月)	开始时间	速率 (米/月)	开始时间	异常形态	幅度(米)	异常形态
唐山市人民公园	<20	250	30	1973年 1 月	0.38下降	1976年 5 月	0.72剧降	7月27日	回升	>10	强烈上升
唐山市郊郑庄子(山 049)	<20	200	20	同上	同上	同上	0.68剧降	同上	同上	>10	同上
唐山市水泥厂	<20	200	60	1973年 1 月	0.45下降	同上	0.95剧降	同上	同上		同上
唐山市电厂	<20	204	20	1973年 2 月	0.37下降	1976年 4 月	0.56剧降	同上	同上	>8	同上
汉沽双桥	55	64	13	1972年 1 月	0.25下降	1976年 5 月	0.40剧降	7月21日	转缓-上升	>13	形成自流
宁河侯口	69	68	7	同上	0.11下降	同上	0.64剧降	7月20日	同上	2.26	急剧上升
天津霍庄	90	95	8	1972年 3 月	0.10下降	1976年 4 月	0.60剧降	7月19日	同上	0.60	同上
天津白塘口	104	648	22	1972年 1 月	0.34下降	1976年 6 月	0.90剧降	7月20日	同上	0.13	突降
天津上古林	112	43	3	1972年 5 月	0.04下降	1976年 4 月	0.07剧降	同上	同上	0.97	急剧上升
辽宁盘山	360	951	4	1975年秋	下降	1976年4、5月	明显上升	7月22日	明显下降	>1.0	同上

三、断层闭锁和应力集中区

欧亚板块的东部边界应力处于一个相对稳定状态<sup>[4]</sup>，一方面由于欧亚大陆的塑性形变使应力降低，另一方面太平洋板块的作用补充了塑性形变过程中损失的应力，从而使板块边界保持稳定应力。因此，中国东部大陆的应力分布处于一个经常的调整过程中。断层两盘所起作用也不一样，直接受到太平洋板块作用的一盘是断层蠕动的主动盘。当断层存在着闭锁区时(如图 3 所示的模型)， $A_1$  盘直接受到外力的作用，发生沿箭头所示方向的移动。平衡时， $A_1$  盘作用在闭锁点  $A$  的剪应力  $\tau_{xy_1}$  是压剪应力，闭锁点  $A$  作用在  $A_2$  盘上的剪应力是拉剪应力，二者的绝对值相等。这时  $B_1$  区形成一个压应力集中区， $B_2$  区形成一个拉应力集中区。

以这种模式分析，唐山地震的前后，唐山断层东南盘是直接受太平洋板块作用的主动

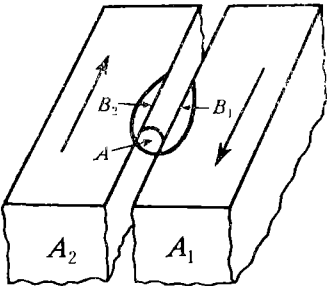


图 3

盘。由于孕震过程存在断层闭锁区,因此造成断层东南侧,唐山、滦县、宁河一带形成压应力集中区和地面隆起现象。与此相反,断层西北侧出现拉应力集中区和地面下降趋势。但由于菱形块体的西北端翘起,所以孕震过程中的东南侧上升、西北侧下降趋势不十分明显。而地震过程中,应变能释放,闭锁区消失。因此,震后唐山断层西侧出现垂直形变的不对称,断层西北侧明显上升,东南侧明显下降。

表 2

1973	H	1150	1169	1228	1595	1741	2094	2595		
	S <sub>1</sub>	286	285	357	392	417	445	775		
	S <sub>2</sub>	198	197	228	275	274	354	461		
1974	H	914	1035	1561	1620	2245	2269	2496	2571	3021
	S <sub>1</sub>	261	448	600	604	735	641	691	897	1039
	S <sub>2</sub>	161	268	322	408	420	488	435	511	594
1975	H	1019	1032	1365	1480	1653	2515	2722	2962	
	S <sub>1</sub>	380	308	298	420	764	751	821	863	
	S <sub>2</sub>	229	198	198	258	430	451	501	591	
1976	H	1027	1041	1116	1366	1366	1387	1393	1423	1541
	S <sub>1</sub>	319	504	547	478	479	580	780	518	850
	S <sub>2</sub>	191	292	304	296	291	335	411	292	479
震前	H	2035	2441	2583	2590	2695	2802			
	S <sub>1</sub>	773	694	633	870	1089	746			
	S <sub>2</sub>	453	432	394	505	596	484			
1976 震后	H	1055	1070	1096	1376	1628	1911			
	S <sub>1</sub>	713	380	310	771	599	750			
	S <sub>2</sub>	345	216	193	404	323	427			
1977	H	2218	2297	2655	2782	2851	3136			
	S <sub>1</sub>	772	458	659	829	529	770			
	S <sub>2</sub>	431	350	466	478	385	514			
1978	H	2196	2210	2450	2472	2855	3958			
	S <sub>1</sub>	782	647	518	569	981	1349			
	S <sub>2</sub>	470	411	355	372	565	752			
1979	H	1293	1345	3293	3826	3849	3897			
	S <sub>1</sub>	377	385	911	1059	1189	1160			
	S <sub>2</sub>	244	225	579	683	690	680			
1980	H	1391	2090	3454	3599	3664	3845			
	S <sub>1</sub>	228	492	1050	1274	1375	1238			
	S <sub>2</sub>	199	324	645	725	747	720			

H:测井深度,单位(米); S<sub>1</sub>:最大水平主应力,单位(巴); S<sub>2</sub>:最小水平主应力,单位(巴)

大港地区应力测量(表 2)表明,该区位于断层主动盘闭锁区前缘部分,分析其应力结果发现,水平主应力总是随深度呈线性增加,但梯度值是不稳定的。唐山地震前(1976 年上半年),梯度值明显减小(表 3、图 4)。这表明,震前闭锁区前缘地下水平主应力呈现松弛状态,促使应力沿断层面向唐山、宁河一带闭锁中心区水平转移。外围区应力松弛,闭

表 3

时间 \ 应力系数	$S_1 = a_1 + b_1 H$				$S_2 = a_2 + b_2 H$				K
	$b_1$	$\pm \Delta b_1$	$r_1$	$\pm \Delta r_1$	$b_2$	$\pm \Delta b_2$	$r_2$	$\pm \Delta r_2$	
1973	0.277	0.043	0.920	0.042	0.170	0.010	0.987	0.007	0.43
1974	0.296	0.042	0.935	0.031	0.174	0.022	0.947	0.025	0.45
1975	0.282	0.058	0.890	0.055	0.186	0.029	0.937	0.031	0.36
1976 (1—6)	0.213	0.059	0.710	0.104	0.105	0.030	0.630	0.132	0.92
1976 (7—12)	0.306	0.235	0.545	0.252	0.197	0.092	0.730	0.154	0.36
1977	0.119	0.440	0.277	0.363	0.108	0.139	0.610	0.219	0.42
1978	0.418	0.108	0.889	0.064	0.203	0.049	0.901	0.057	0.51
1979	0.295	0.037	0.992	0.005	0.177	0.006	0.999	0.001	0.43
1980	0.456	0.089	0.982	0.010	0.232	0.029	0.993	0.004	0.38

r:相关系数

锁区应力集中加强,使震源区应变能增加储存。

从以上分析可见,唐山地震孕育过程中,既存在在应力由浅部向深部的转移,也存在应力从外围向闭锁区的转移。因此,在唐山、滦县、和宁河地区同时出现了3应力集中,但主要应力集中区在唐山附近。

#### 四、主应力与深度相关系数的降低

如果把地下岩层考虑成匀质,各向同性的弹性体,在忽略体力和地层表面应力的情况下,应力平衡时,应力分布满足下列方程组<sup>[5]</sup>:

平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

形变连续方程:

$$\left. \begin{aligned} (1 + \nu) \nabla^2 \sigma_x + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} &= 0 \\ (1 + \nu) \nabla^2 \sigma_y + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} &= 0 \\ (1 + \nu) \nabla^2 \sigma_z + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} &= 0 \\ (1 + \nu) \nabla^2 \tau_{xy} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} (1 + \nu) \nabla^2 \tau_{xz} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x \partial z} &= 0 \\ (1 + \nu) \nabla^2 \tau_{yz} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y \partial z} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} X_v &= \sigma_x \cdot l + \tau_{xy} \cdot m + \tau_{xz} \cdot n \\ Y_v &= \tau_{yx} \cdot l + \sigma_y \cdot m + \tau_{yz} \cdot n \\ Z_v &= \tau_{zx} \cdot l + \tau_{zy} \cdot m + \sigma_z \cdot n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ,  $l, m, n$  为方向余弦,  $X_v, Y_v, Z_v$  为作用在边界上的外力, 在  $z = 0$  时, 即在地表上,  $X_v = 0, Y_v = 0, Z_v = 0$ .

假定三个主应力中有一个主应力在竖直方向上, 同时水平方向上的应力没变化, 从上面方程组中可以解出:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= B_1 z \\ \sigma_y &= B_2 z \\ \sigma_z &= -\rho g z \\ \tau_{xy} &= B_3 z \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $B_1, B_2, B_3$  是常数,  $\rho$  是岩石密度,  $g$  是重力加速度.

可求出水平主应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{B_1 + B_2 + \sqrt{(B_1 + B_2)^2 + 4B_3^2} - 4B_1B_2}{2} H \\ \sigma_2 &= \frac{B_1 + B_2 - \sqrt{(B_1 + B_2)^2 + 4B_3^2} - 4B_1B_2}{2} H \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为最大、最小水平主应力,  $H$  是深度. 由此表明, 主应力是深度的线性函数.

震前, 由于断层深部和浅部运动的不同步, 扰乱了构造应力场的平衡, 使主应力与深度的相关系数显著降低, 它可能反映了存在一个水平应力梯度场, 存在应力集中区与松弛区这一事实. 因此, 主应力与深度相关系数的降低可以作为预报地震的参考标志之一.

如表 3、图 4 所示, 我们对大港地区计算了主应力与深度的相关系数  $r$ . 结果表明, 震前, 水平主应力与深度的相关系数逐年降低, 直至 1977 年宁河 6.2 级地震后, 才开始恢复. 这说明, 相关系数的变化与地震发生过程存在某种对应关系. 可能震前应力状态出现了不寻常的变化, 扰乱了固有的应力场, 使其失去了原有的平衡, 导致了应力转移, 这与大地震的孕育过程是有关的.

总之, 通过应力场的计算和分析表明, 唐山地震孕育过程中, 浅部断层蠕动与深部断层滑动不同步, 应力经历了一个从浅层向深层, 从外围向闭锁区的转移和集中过程. 伴随着这个过程, 出现了地下水位的趋势性变化以及主应力与深度相关系数降低的现象.

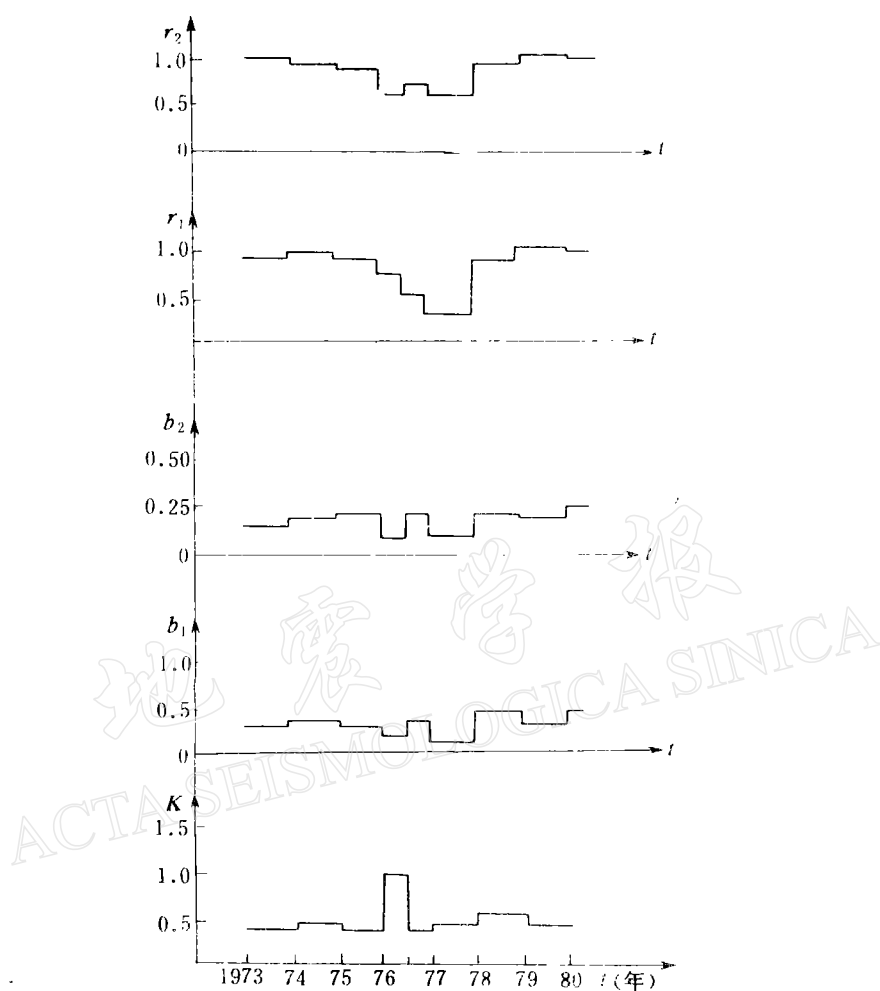


图 4 应力各有关参数随时间的变化

Fig. 4 Temporal variation in various parameters of stress

以水压致裂法测定地震前、后地应力变化,只是第一次尝试。从唐山震例说明,开展这项工作还是有一定意义的。

### 参 考 文 献

- [1] Byerlee, J. D., Friction of rocks, *Pure Appl. Geophys.*, **116**, 615, 1978.
- [2] 张郅珍,唐山地震前地壳的异常隆起及无震蠕动,地震学报, **3**, 1, 11—22, 1981.
- [3] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组,一九七六年唐山地震,地震出版社, 1982.
- [4] 汪素云、陈培善,中国及郊区现代构造应力场的数值模拟,地球物理学报, **23**, 1, 35—45, 1980.
- [5] 王龙甫,弹性理论,科学出版社, 1978.



## THE VARIATION OF REGIONAL STRESS BEFORE AND AFTER THE 1976 TANGSHAN EARTHQUAKE

CAO XINLING LI ZIJIANG LIU JIANZHONG

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

### Abstract

In the Dagang oil field about 100 km from the source region of the 1976 Tangshan earthquake, 69 in-situ stress measurements have been made by the hydrofracturing method to show variations of stress at depths of 1000—4000 meters within 8 years from 1973—1980 before and after this main shock.

The state of tectonic field prior to the major earthquake was changed as follows:

1. The gradient of horizontal stresses decreased, that is, the state of stress relaxed in the directions of maximum and minimum principal horizontal stresses.
2. The correlation coefficient between horizontal stresses and depth decreased, that is, the in-situ tectonic stress field was disturbed.
3. The fault slip coefficient increased, and aseismic creep appeared on the fault.

Besides, in combining geological structure and the result of stress measurements, some anomalous phenomena of the seismogenetic process of the Tangshan earthquake, such as the aseismic creep, variation in ground water level, the stress relaxation in shallower layers and around the source region, the stress transfer along the fault plane to deeper layers and closed regions etc. are also analysed and discussed.