

京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征*

许忠淮 刘玉芬 张郢珍

(国家地震局地球物理研究所) (国家地震局)

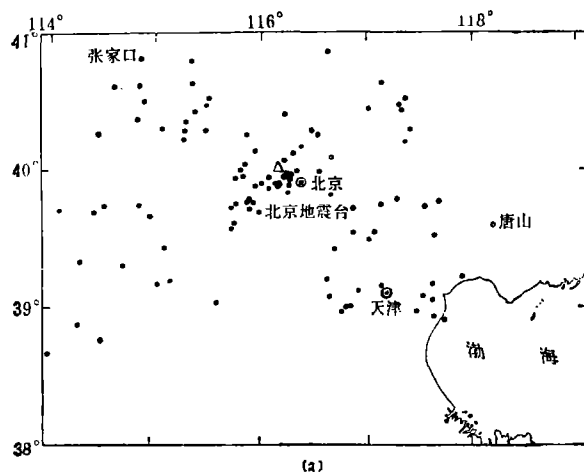
摘 要

根据1960年至1977年京、津、唐、张地区地震P波初动方向资料求出平均节面解,给出判别结果可信度的曲线。推断本区构造应力场最大主压应力轴方向为北东 65° — 75° ,最小主压应力轴方向为北西 15° — 25° ,中等主应力轴基本直立,应力场方向显现出均匀性和稳定性。估计地壳岩石的断层角不小于 27° 。推断引起本区地震的原因是受水平附加张力的作用。未发现唐山大震前平均节面解的显著改变。

单个地震的P波初动方向记录包含了该次地震震源动力过程的信息,而离散分布于某一区域内的多个地震的P波初动方向记录的总和则包含着该区域的构造应力场和地壳介质性质的某些信息。本文根据京、津、唐、张地区近十余年来地震的P波初动方向的记录,分析了本区地震释放应力场的方向,探讨了产生本区地震的构造应力场的某些特征。

一、资 料

所研究的地区范围见图1(a)或图2(a)。我们搜集了1960年至1977年7月发生在该区的622个 $M_L < 5$ 的地震在区域地震台上记录到的782个初动符号。北京新区域地震台网是1966年4月建立的。1966年4月以前的106个符号中,除43个符号及相应震中



* 1978年6月21日收到。

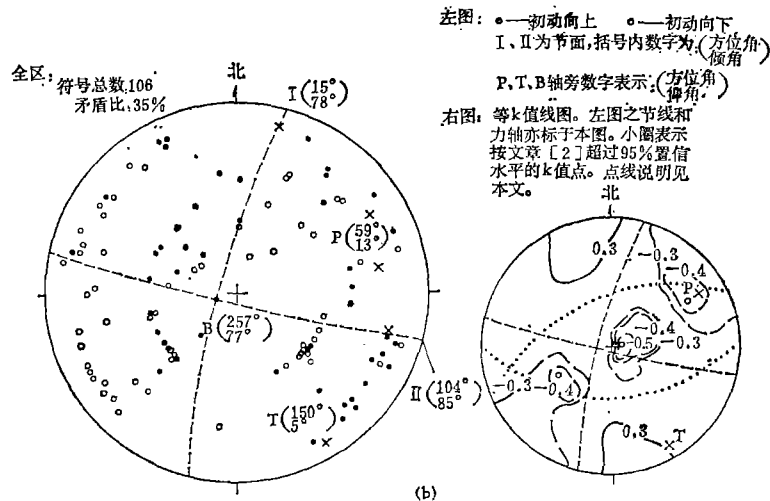
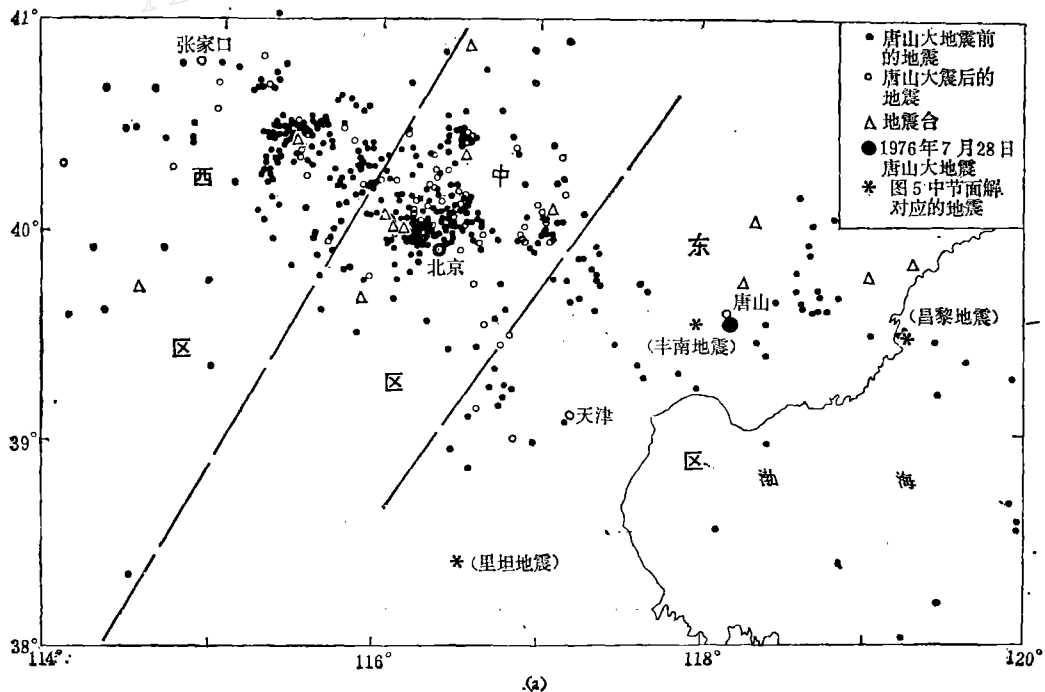


图 1

- (a)——1960年—1966年4月取用地震震中分布图($1.5 < M_L < 5.0$)
(b)——1960年—1966年4月全区小震初动在平均震源球面上的分布
(左)及相应的等k值线(右)。(本图及以后各图皆用上半球投影)

位置取自1959年3月至1961年7月期间工作的旧北京区域台网外,其余皆取自北京地震台单台哈林式地震仪的三分向光记录,震中由单台方位角法测定。1966年4月以后数据来自本区诸地震台在不同时段内三分向短周期地震仪的记录,台站分布见图2(a)。此外,我们还利用了1976年7月28日唐山大地震的部分较大余震的初动方向记录。



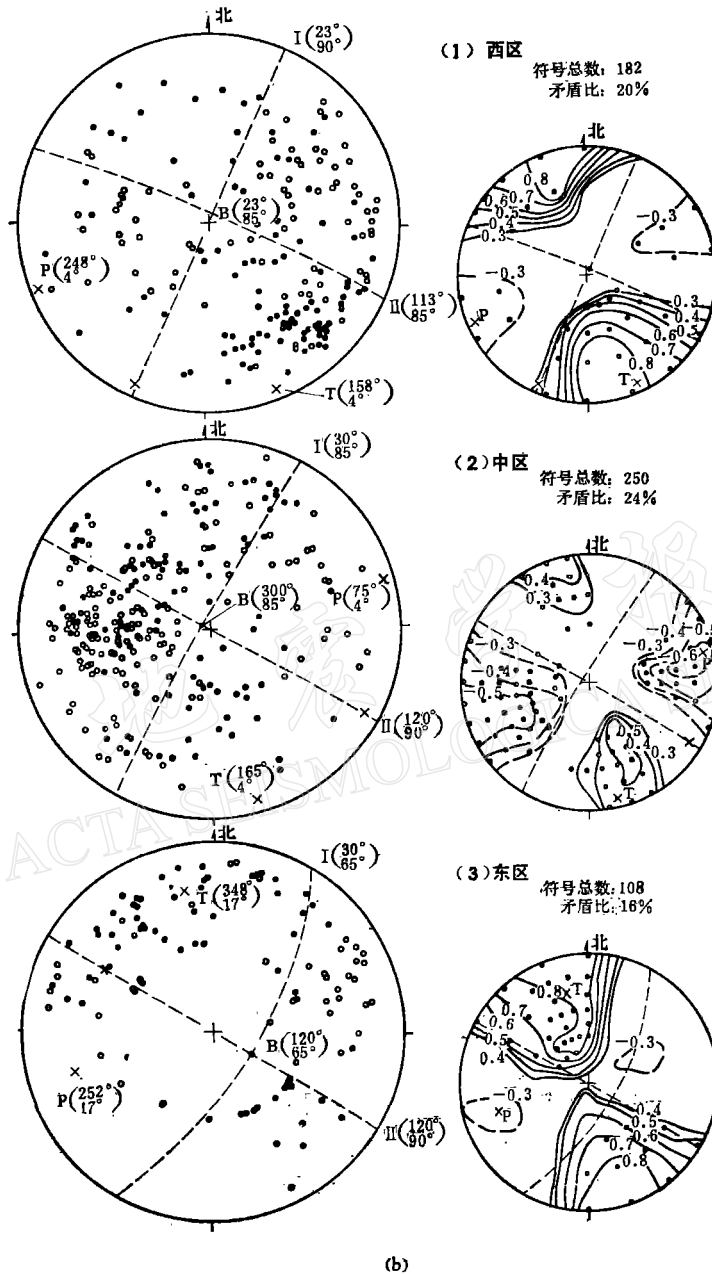


图 2

- (a)——1966年4月—1977年7月取用地震震中分布图 ($0.5 \leq M_L < 5.0$).
- (b)——1966年4月—1976年7月(唐山大地震前)各区地震的综合节面解及相应的等 k 值线图。(说明同图 1(b)).

地震仪上三个分向的P波初动符号同时读取,再参考震中位置来判断垂直向记录的初动方向标定是否正确,以减少错误符号的机会。一律取清晰的初至起始。由于在近震记录上一般难以判别后续震相中与震源发出的初动相对应的相位,故后续震相一律不取。

二、方 法

采用文献[1]和[2]的方法测定与多个地震相应的某种“平均震源”的节平面及相应力轴的方向。结果一律用上半震源球面的乌尔夫网投影表示。台站相对于震中的方位角 A_z 由平面震中图测得,射线离源角 i_h 由 $i_h = \tan^{-1}(\Delta/h)$ 测定, Δ 是震中距, h 是震源深度。震中位置和震源深度取自国家地震局地球物理研究所地震值班室的地震目录。对未给出震源深度的地震一律取本区小地震的平均震源深度 $h \approx 15$ 公里。参考本区已有的地壳速度分布结果,取与 P_n 震相相应的 $i_h \approx 50^\circ$ 。

因我们着重研究离散分布于本区的各地震所反映的本区总体应力场的特征,而不关心某一团地震所反映的个别地点的特点,故凡在同一地点形成“系列”的一串地震而初动符号相同者,只取其中的一个符号,其余不取。

分析一组地震平均释放应力场的方法主要是在由多个震源迭加的某“平均震源球面”上找出使矛盾符号成为最少的一组正交节平面,并给出相应的矛盾符号比 $\phi = \text{矛盾符号数}/\text{总符号数}$,然后按双力偶点源模式由节面位置求出这组地震平均释放应力场的 P (最大主压应力)轴、 T (最小主压应力)轴和 B (中等主压应力)轴的位置。所得节面在乌尔夫网上皆以虚线表示。另外,对唐山大地震前的资料还用安芸敬一在文献[2]中给出的平滑初动的方法做了分析。该法求出震源球面上各点的数值 $k = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}$ 的分布, N^+

和 N^- 分别是落入以该点为心、以角距离 45° 为半径的圆形区域内的正号数和负号数,然后在乌尔夫网上连出等 k 值线来。 k 值的正极值区和负极值区分别对应于平均释放应力场的 T 轴和 P 轴在震源球面上的大致出头点(图 1_(b) 和图 2_(b))。最后结果应按两种方法加以综合判断。

三、结 果

对资料按时间分三段进行分析,分述结果如下:

(1) 从 1960 年到 1966 年 4 月。这段时间内数据不多,只得到全区的一个总结果,见图 1。因资料质量较差,故最佳节面解的矛盾符号比例高达 35% (图 1_(b) 左),相应的等 k 值线分布亦不规则(图 1_(b) 右)。但结合最佳节面解和等 k 值分布图仍可看出,这段时间内本区总体释放应力场的 P 轴为北东东向, T 轴为北北西向,二轴基本水平。关于结果是否可信,下面分析。

(2) 1966 年 4 月至 1976 年 7 月唐山大震前。该时段内数据较多,我们将全区分成西、中、东三区(图 2_(a)) 加以分析,结果见图 2_(b)。中区地震较多,最小震级 $M_L \approx 0.5$ 。东区范围大,而可用地震数则较少。由图 2_(b) 可见,三个区释放应力场的总特征一致, B 轴皆直立, P 、 T 轴方向类似。东区节面 I 似乎稍有倾斜,但参照等 k 值分布图看,似难下结论。

(3) 1976 年 7 月 28 日唐山大震后至 1977 年 7 月。这段时间内,用唐山余震区外的

地震求得了一个总结果, 见图 3(a)。由该图可见, 唐山大地震并未改变余震区外地震的破裂面方向分布。至于余震区内, 图 3(b) 给出主震后一个月内较大余震的平均节面解。该图表明, 早期余震之平均节面方向与大震前本区地震相比, 稍向东偏转了一个角度, 断

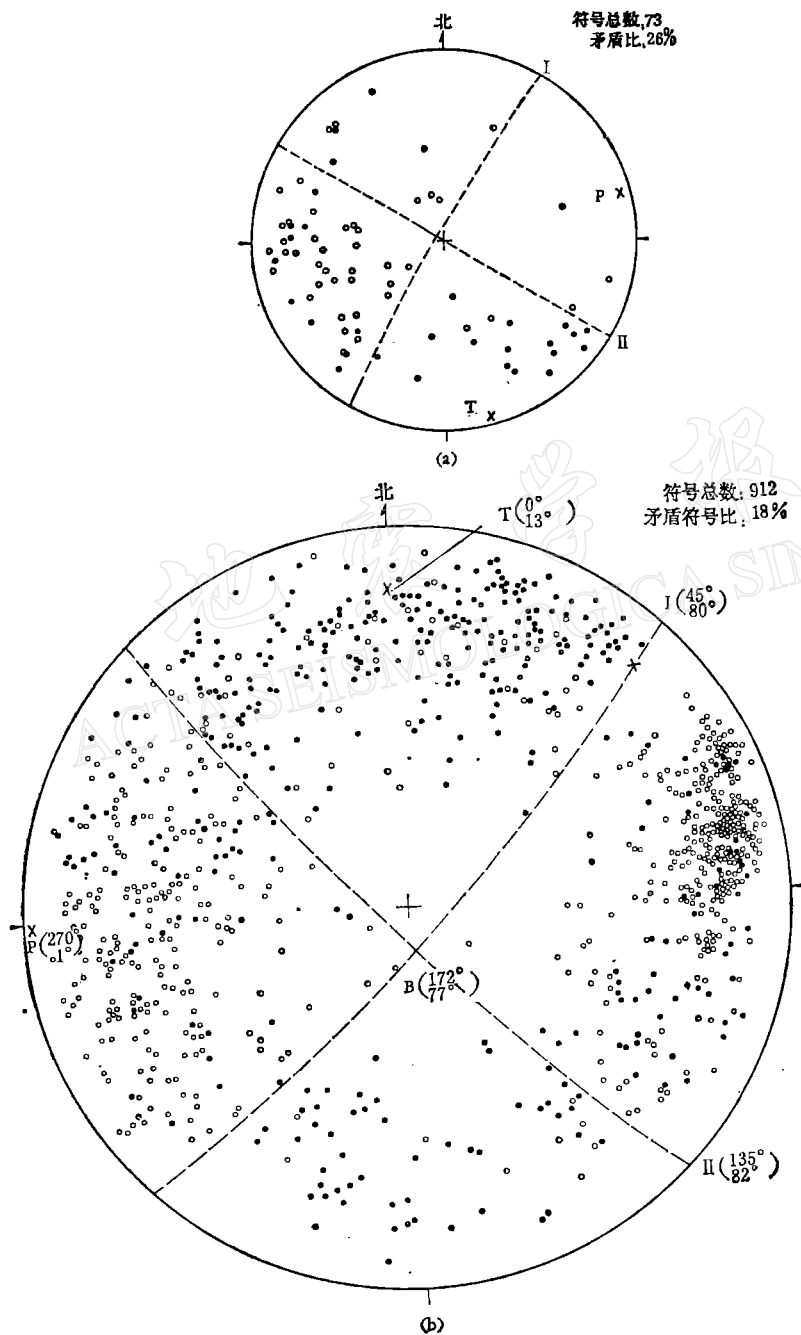


图 3

- (a)——1976 年 8 月(唐山大震后)至 1977 年 7 月唐山大震余震区外地震的综合节面解。这里标出的节面及力轴位置是沿用图 2(b)中区的结果, 震中分布见图 2(a)
- (b)——1976 年 3 月 31 日至 8 月 31 日唐山 195 个余震 ($M_L \geq 3.3$) 的综合节面解

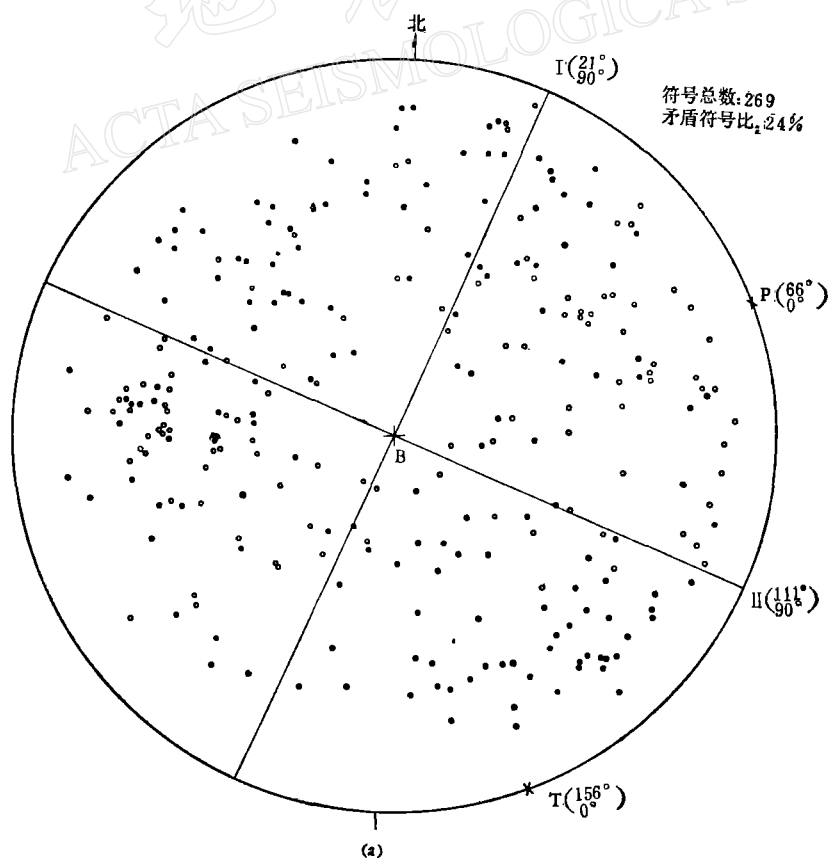
面仍是直立的。早期较大余震节面解的矛盾符号比较少,说明破裂面方向比较规则。至于后期余震节面是否变化了,需另作专门研究。

(4) 图 4(a) 给出 1966 年 4 月至 1973 年 12 月全区地震的平均节面解,图 4(b) 给出 1974 年 1 月至 1976 年 7 月唐山大震前全区地震的平均节面解,前后二段时间的结果相当一致。此外,表 1 给出唐山大震前十年每年全区取用的符号总数及相对于图 2(b) 中结果的矛盾符号数,历年矛盾符号所占比例绘于图 4(c)。这些结果表明,基于已有资料的精度,就全区而言,还难以看出唐山大震前本地区地震破裂面的方向有什么特征性的变化。

(5) 我们求平均节面解时所用地震的震级 M_L 从 0.5 到 5 级。为考察较大地震与较

表 1 各年取用符号总数及矛盾符号数

年份	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
符号总数	64	28	63	60	22	21	43	7	57	128	44
矛盾符号数	16	7	11	9	1	4	11	1	11	24	11
矛盾符号比例(%)	25	25	17	15	5	19	26	14	20	19	25



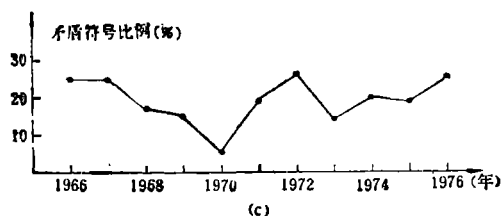
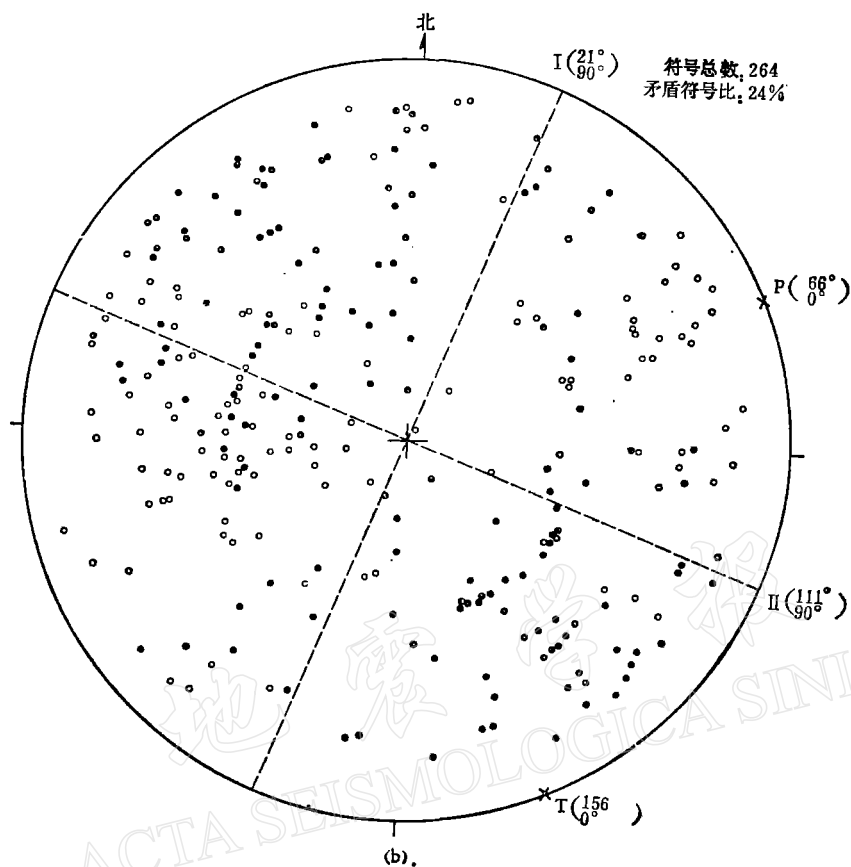


图 4

- (a)——1966 年 4 月至 1973 年 12 月全区地震(震中分布见图 2(a)) 综合节面解。
 (b)——1974 年 1 月至 1976 年 7 月全区地震(震中分布见图 2(a)) 综合节面解
 (c)——各年矛盾符号比例变化曲线

小地震是否有共同的破裂面方向,图 5(a) 给出全区 17 个 $M_L \geq 3.5$ 的地震之平均节面解,图 5(b)、(c)、(d) 还列举了本区三个较大地震的单个地震的节面解。图 5 说明大、小地震的破裂面方向相似。

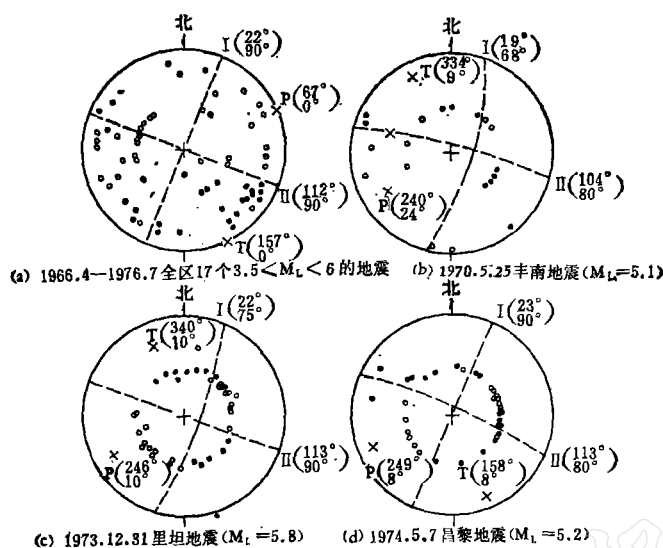


图5 较大地震的节面解
(本图(b)、(c)、(d)三地震位置见图2(a))

四、结果的可信度

求最佳节面位置时,矛盾符号比 ϕ 最高为50%。对一定的符号总数 N , ϕ 达到多高则平均节面的存在就不可信了呢?今作如下检验。

若震源是随机向外发射正号和负号的,则相对于任何给定的不太复杂的分布图象而言,在震源球面上某点获得与该图象符合的点和矛盾的点的概率将各为1/2,于是 N 个符号中恰出现 n 个矛盾符号的概率由二项分布给出为

$$P_N\{n\} = C_N^n \left(\frac{1}{2}\right)^n \left(\frac{1}{2}\right)^{N-n}$$

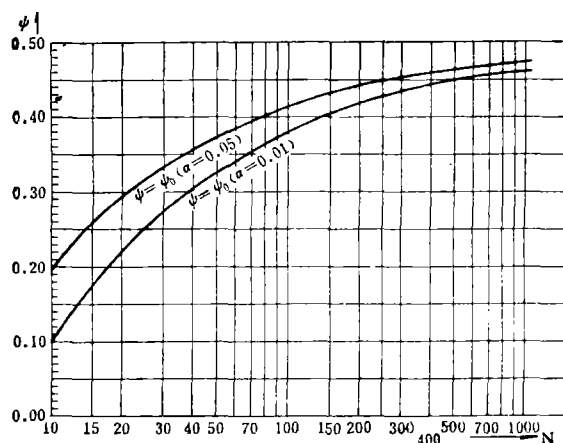
矛盾比 ϕ 不超过 $\phi_0 \equiv (n_0/N)$ 的概率为

$$P_N\{\phi \leq \phi_0\} = P_N\{n \leq n_0\} = \sum_{i=0}^{n_0} C_N^i \left(\frac{1}{2}\right)^N$$

令 $P_N\{\phi \leq \phi_0\} = \alpha$,则可求得置信限为 $(1 - \alpha)$ 而否定随机模型的 ϕ_0 值。图6给出 $\alpha = 0.01$ 和0.05的 ϕ_0 值曲线。对一定的 N , ϕ 值落在曲线下方则结果可信。不难看出,图1(b)左图1966年4月前的节面解,虽然 ϕ 达35%,但对 $N = 106$ 而言,结果仍是可信的。可是,若认为图1(b)右图中心附近的负极值区相应于 P 轴出头点,相应节线以图中点线表示的话,则 ϕ 将达45%,超出了置信限,故这组解不可信。可见,单用平滑初动法有时也会出现不稳定的结果。

五、推断构造应力场的方向

按双力偶点源模式,设震前、震后震源区的应力张量分别为 \mathbf{T} 和 \mathbf{T}' ,则地震引起的应

图 6 矛盾符号比 ψ 的置信限曲线

力变化为

$$\Delta \mathbf{T} = \mathbf{T} - \mathbf{T}' = \begin{pmatrix} \Delta \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta \sigma \end{pmatrix}.$$

最后的张量是在释放应力场 $\Delta \mathbf{T}$ 的主轴 (即 P 、 B 、 T 轴) 坐标中的表示式, $\Delta \sigma$ 是地震引起的应力降 (产生地震波的应力降只是其中一小部分), $\Delta \mathbf{T}$ 大小和方向皆可测定, 但 $\Delta \mathbf{T}$ 、 \mathbf{T} 及 \mathbf{T}' 可以是主轴方向各不一样的张量, 故对单个地震来讲, 不能随意认为 $\Delta \mathbf{T}$ 的 P 、 B 、 T 三轴就是发震地点构造应力场的主轴方向^{[3][4]}.

但是, 在一定条件下还是可以由多个地震的平均 P 、 B 、 T 三轴方向去推断某区构造应力场的方向的. 对一个大地区总可将其分成若干内部应力状态相对均匀的分区, 总可用一确定的张量描述某分区的总体应力状态. 某些应力实地测量结果表明, 地应力的大小和方向可在相当大的地区内显出一致性^[5]. 今设描述京、津、唐、张地区总体构造应力状态的最大、中等和最小主 (压) 应力轴分别为 T_1 、 T_2 和 T_3 . 地下浅部必有一主轴近似取地表垂线方向, 本区哪个主轴与地表垂直呢? 假定地震是发生在均匀弹性介质中的剪破裂, 则破裂面必通过构造应力场的主轴, 这时地震的 B 轴与 T_2 轴重合. 但均匀介质的假定不一定成立, 故单个地震的 B 轴会与 T_2 有偏离. 可是, 当地震是离散分布于全区且数目较多时, 则可认为它们的平均 B 轴是指向 T_2 的方向的. 本区平均 B 轴皆基本直立, 说明地表垂线是 T_2 轴.

至于同在水平面内的 P 、 T 和 T_1 、 T_3 的关系, 山川宜男^[1]指出, 由于断层角 θ 一般小于 45° , 故单个地震的 P 、 T 轴也会与 T_1 、 T_3 有系统偏转, 但因离散分布的多个地震有可能落在夹角为 2θ 的共轭剪破裂面上, 其平均的 P 、 T 轴仍可指向 T_1 和 T_3 方向. 按本文结果推断, 本区构造应力场的 T_1 轴方位为北东 65° — 75° , T_3 轴方位为北西 15° — 25° (图 2(b), 图 4(a), 4(b)).

六、可能是张力引起本区地震

有人认为^[6], 地壳内单纯由均衡重力引起的无构造运动的平衡状态应为 T_3 轴直立,

而 T_1 和 T_2 轴水平, 且 $T_1 = T_2$. 而本区的实际构造应力场是 T_2 直立, T_1 和 T_3 水平. 什么样的“加载”方式才能使 T_2 由原来的水平转为直立呢? 下层局部上拱不大可能, 因直接上拱的顶部将各向受张, 一般会有 T_1 直立, $T_2 = T_3$ 水平, 这时易出现张性正断层. 此外, 本区存在相当好的平均节面解, 这说明本区地震的破裂面具有规则定向排列的特性. 而局部上拱应使破裂面呈某种辐射对称性, 这与本区的实际情况是不符的. 某侧受水平挤压亦不可能, 因受挤压的水平向要变为 T_1 轴, T_2 直立不变, 这时易出现逆断层. 要使 T_2 转为直立, 大量出现作为本区特征的走滑型地震, 看来只能是某侧受水平附加张力才行^[7].

若无构造运动的平衡状态是受三轴等压的某种“标准状态”, 则当某侧受挤压时亦会出现走滑断层, 但这时出现逆断层和走滑断层的机会各半, 而本区逆断层型地震几乎未见, 看来受周围地块挤压造成本区地震的解释难成立.

七、对断层角的估计

若多个地震的断层面形成夹角为 2θ 的两组共轭面, 则用双力偶模式求平均节面解时, 断层角 $\theta \approx 45^\circ$ 必然会成为出现矛盾符号的原因, 如图 7(a). 在两组共轭面发震概率相等的情况下, 由图 7(a) 易见, 这一因素造成的矛盾符号比 ϕ_1 就简单地等于 $(90^\circ - 2\theta)/2 \times 90^\circ$ (分子正比于一象限的矛盾符号数, 分母正比于一象限的符号总数).

我们得出的多数平均节面解的矛盾符号比 ϕ 在 20% 左右, 若此矛盾比全由断层角因素引起, 则由图 7(b) 得相应的 $\theta \approx 27^\circ$. 事实上, 必然还会有其它原因引起矛盾符号, 故单由断层角因素引起的矛盾比 ϕ_1 必比 20% 低. 由此可粗略估计本区地震的断层角不会

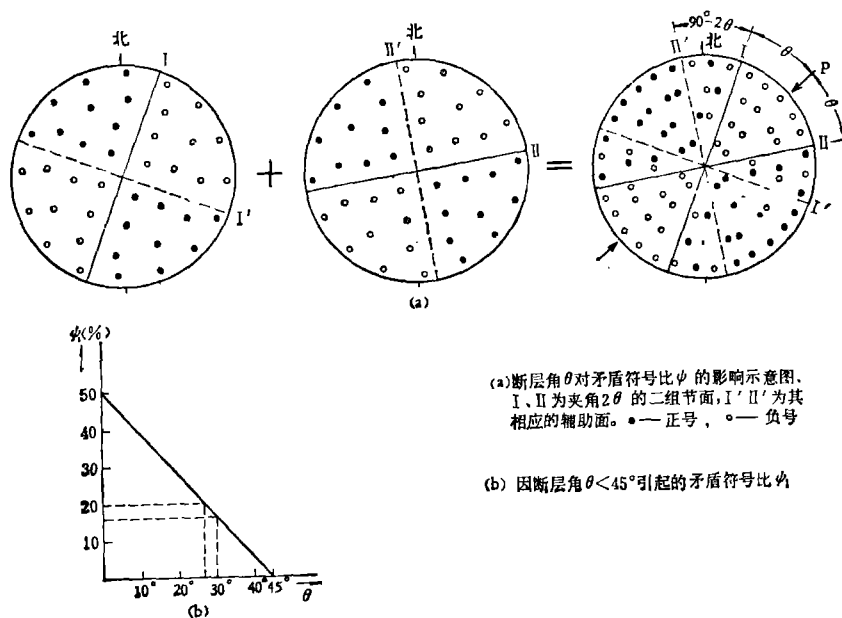


图 7

低于 27° 。这与高压下岩石实验结果接近^[8]。

图 8 绘出华北地区的内圈等震线方向性明显的强震, 等震线长轴的方位分布。该图所示的两组优势方向与本区地震的二平均节面方向接近。由二组长轴的平均方位角估算的断层角 θ 分别为 39° (当取 $M \geq 6 \frac{1}{2}$) 和 37° (当取 $M \geq 6$)。精度虽差, 但至少可看出华北强震的断层角不会太小, 这也支持了京、津、唐、张地区断层角以 27° 为下限的估计。

若近似认为库仑-莫尔破裂条件可用于地壳岩石, 则由 $\mu = 1/\tan 2\theta$ 可估计地壳介质的摩擦系数 μ 。若取 $\theta \approx 30^\circ$, $\mu = 1/\sqrt{3} \approx 0.6$ 。 θ 增大, μ 值要降低。

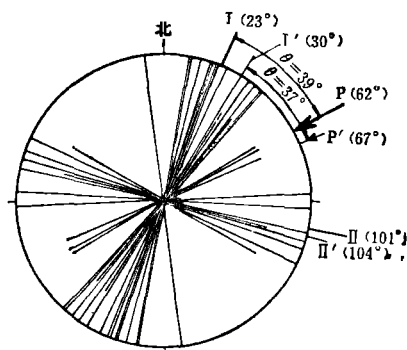


图 8 华北地区 $M \geq 6 \frac{1}{2}$ (长线) 及 $M \geq 6$ (包括短线) 的地震等震线长轴方位分布图。

(I, II 和 I', II' 分别为前、后二者的平均方位; P 及 P' 为二者相应的最大主压应力轴)

八、构造应力场的稳定性

前人早发现许多地区在某一地质时期中形成的一组构造常有定向排列的特征^{[6],[7]}, 并由此分析构造应力场具有均匀性和稳定性。地震资料的历史比起地质时期来只是短暂的一瞬, 因而产生地震的构造应力场在某些地区显出均匀性和稳定性, 这是毫不足奇的。本区 1960 年以来的地震资料正是显出了这一特性, 时间逾千年的历史地震资料亦显出这一特性。看来, 构造应力场总方向的改变是以地质时期的单位来衡量的, 与这种改变相应的物理过程也一定是极为缓慢的过程。

但是, 并不排斥局部地区构造应力场在短时间里亦表现出某种程度的变化, 探索这种变化正是地震预报的目的。不过, 目前的资料常使人难以将这种真实变化从随机波动中分辨出来, 对唐山大震前全区释放力场的考察即如此。

感谢北京市地震队华祥文同志和河北省地震局的同志对本项工作的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] 李钦祖等, 由单台小地震资料所得两个区域的应力场, 地球物理学报, 16, 49—61, 1973.
- [2] K. Aki (安芸敬一), Earthquake generating stress in Japan for the years 1961 to 1963 obtained by smoothing the first motion patterns, Bull. Earthq. Res. Inst., 44, 447—471, 1966.
- [3] N. Yamakawa (山川宜男), Stress Fields in Focal Regions, J. Phys. Earth, 19, 347—353, 1971.
- [4] D. P. McKenzie, The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stress, B.S.S.A., 59, 591—601, 1969.
- [5] B. C. Hainson, The state of stress in the earth's crust, Rev. Geophys. Space Phys., 13, 3, 350—352, 1975.
- [6] 李四光, 地质力学概论, 科学出版社, 1973.
- [7] E. M. Anderson, The Dynamics of Faulting, Oliver & Boyd Ltd., Edinburgh, 1951.
- [8] R. M. Stesky et al., Friction in faulted rock at high temperature and pressure, Tectonophysics, 23, 177—203, 1974.

ON THE CHARACTERISTIC OF DIRECTION OF THE EARTHQUAKE STRESS FIELD AROUND THE BEIJING AREA

Xu Zhong-huai, Liu Yu-fen,

*(Institute of Geophysics, State
Seismological Bureau)*

Zhang Ying-zhen

(State Seismological Bureau)

Abstract

The composite nodal-plane solutions of the earthquakes occurred in the area around Beijing during 1960 to 1977 are obtained on the basis of *P* wave onset data and also the confidence curves of the results. The directions of the maximum and minimum principal stresses are given as NE 65°—75° and NW 15°—25° respectively, whereas that of intermediate stress is nearly vertical. They appear to be uniform and stable in the entire area. The fault angle of the crustal rock is estimated not less than 27°. It is inferred that the earthquakes in the area are caused probably by the action of additional horizontal tension. No significant variation of the composite nodal-plane solutions was found before the great Tangshan earthquake.