

# 论确定地震震源深度的地震 宏观方法及其解答

段 星 北

(北京 中关村 911 楼 110 号, 100086)

## 摘 要

作者基于在近场震源不能视作点源的认识, 分析导出了相当于线、面源辐射场的深度公式, 进而对源的类型不予作假定, 将源指标的几何扩散率  $n$  作为特定参数, 导出了一个物理意义明确且普遍化的震源深度公式。该公式的诸种解法中, 以计算方法较准确, 精度高; 作图求解有较直观的优点, 但准确性差, 精度低; 图算法仅作为获取粗略值和考察数据的均匀性用。用该公式对我国发生的一些不同震级的地震的震源深度进行了计算, 经对比, 效果很好。利用计算所得震源类型, 初步研究了这些地震的震源几何学, 并且首次给出了宏观地震震源深度测定值的标准误差。

## 一、引 言

利用宏观地震资料确定震源深度的问题, 早已有人进行了研究, 并相继提出了一些计算公式。1925年, F. Gassmann 提出著名的公式<sup>(1)(2)</sup>:

$$\frac{I_0 - I_1}{3} = \log \sqrt{1 + (r_1/h)^2} + qh(\sqrt{1 + (r_1/h)^2} - 1) \quad (1)$$

式中  $q = k \log e$ ,  $K$  为吸收系数。但该公式迄今无解。一些学者略去吸收项提出一些公式, 其中以 B. Gutenberg 和 C. F. Richter<sup>(3)</sup> 导出的公式

$$h = r_{1.5} / \sqrt{10^{\frac{I_0 - 1.5}{3}} - 1} \quad (2)$$

最为引人注目。但式中把有感烈度下限定为  $1.5^\circ$ , 对此颇有争议。因此公式 (2) 无法使用。1957年 闵子群<sup>(4)</sup> 将公式 (2) 改造为

$$h = r_1 / \sqrt{10^{\frac{I_0 - h}{3}} - 1} \quad (3)$$

式中  $I_1 = 4^\circ$ ,  $r_1 = r_1$  公里。这样使得 (2) 式成为可用公式, 且不失其原意。郭增建<sup>(5)</sup> 使用了 (3) 式及其附加定义, 并首次讨论了震中烈度的准确性对震源深度值的影响。1958年作者在

编辑中国地震目录时，曾对 (3) 式进行过验证，发现应用该式除普遍将震源深度定得过深外，利用同一地震各圈等震线所确定的深度值很不一致。随后不久，E. X. Саваренский 和梅世蓉<sup>(6)</sup> 提出公式：

$$h = r_i / \sqrt{10^{\frac{I_0 - I_i}{2.5}} - 1} \quad (4)$$

他们推导 (4) 式除了参考 (2) 式外，主要依据 A. Blake 在 1941 年提出的公式<sup>(2,3)</sup>

$$h = r_i / \sqrt{10^{\frac{I_0 - I_i}{2}} - 1} \quad (5)$$

由于 (5) 式的推导有含混之处，致使许多学者不敢使用。作者对 (4) 式也进行过验证，发现除了该式仍有 (3) 式所含的两大缺点外，对于震源较深的地震，用其计算出的深度偏浅。因公式中根号下指数项指数的变化对震源深度值的改变影响太大了。由此，作者试图通过演算，寻求公式 (3) 的来由及它应含有的物理意义，从而推导出适用的公式。

## 二、公式 (3) 的物理意义

根据 (3) 式作出图 1。因为地震烈度为非物理量，是个等级数字，所以只有用它对应的

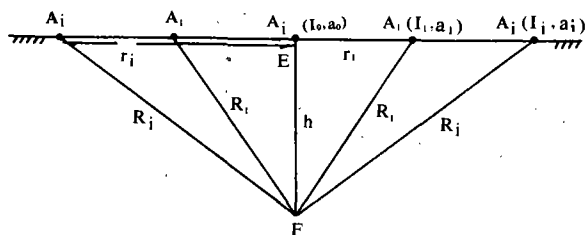


图 1

物理量——地震加速度  $a$  (也可应用它对应的地面最大位移) 来进行推演。设震源 F 的地震总加速度  $T_0$  随  $\sqrt{R}$  扩散，到震中 E 已降为  $a_0$ ，扩散到地面  $A_1$  降为  $a_1$ ，直到  $A_i$  降为  $a_i$ ，因此有：

$$\frac{T_0}{\sqrt{h}} = a_0, \quad \frac{T_0}{\sqrt{R_1}} = a_1,$$

$$\dots, \quad \frac{T_0}{\sqrt{R_i}} = a_i, \quad (6)$$

即 
$$a_0 \sqrt{h} = a_1 \sqrt{R_1} = \dots = a_i \sqrt{R_i} = T_0 \quad (7)$$

由 (7) 式有 
$$\frac{a_0}{a_i} = \frac{\sqrt{R_i}}{\sqrt{h}} \quad (8)$$

根据文献 [3]， 
$$a = 10^{\frac{I - I_0}{2.5}} \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (8) 式，将公式两端平方两次，整理后得出：

$$h = r_i / \sqrt{10^{\frac{I_0 - I_i}{0.75}} - 1} \quad (10)$$

(10) 式已具有公式 (3) 的形式，但其根号内指数项的指数比 (3) 式的大 4 倍。因此须进一步假设：震源 F 的  $T_0$  随距离 R 扩散，到震中 E 降为  $a_0$ ，到  $A_i$  已降为  $a_i$ ，因此有：

$$a_0 h = \dots = a_i R_i = T_0 \quad (11)$$

即 
$$\frac{a_0}{a_i} = \frac{R_i}{h} \quad (12)$$

将 (9) 式代入，平方式之两端，整理后得出：

$$h = r_i / \sqrt{10^{\frac{I_0 - I_i}{1.5}} - 1} \quad (13)$$

可以证明它相当于线、面源辐射场的深度公式，但比(3)式根号下指数项的指数大了2倍。因此再假设：震源F的T<sub>s</sub>随距离的平方扩散，即

$$a_0 h^2 = \dots = a_s R_s^2 = T_s \quad (14)$$

或

$$\frac{a_0}{a_s} = \frac{R_s^2}{h^2} = \left(\frac{r_s}{h}\right)^2 + 1 \quad (15)$$

将(9)式代入得：

$$h = r_s / \sqrt{10^{\frac{t_0 - t_s}{s}} - 1} \quad (16)$$

这就是公式(3)。由于它是从标准点源辐射场导出的，与地震宏观场不适应，因地震宏观场为线、面源或多个线、面源组合而成的复杂震源辐射场。这说明文献〔3〕对(2)式取 $t_s = 1.5^\circ$ ,  $r_s = r_{1.5}$ 的原委，尽管在文献〔3〕中未指出其公式只适用于点源。

### 三、宏观地震震源深度公式

由上面推导过程可以认为，任何预先设定震源类型再导出的震源深度公式都是不准确的，用这些公式计算出的震源深度不是偏深，就是偏浅。只有根据实际的宏观场来推演适应它的公式，才有可能得出准确的结果。由于场源类型不同，公式中根号下指数项的指数变化是很大的。因此作者首先认为震源物理量的几何扩散率必须从实际的观测资料计算出来。其次指数项的整个指数与经验的几何扩散率有密切联系。很有可能在确定经验扩散率的同时也确定了根号内指数项的整个指数。

设震源F的物理量随 $R^n$ 扩散，即

$$a_0 h^n = \dots = a_s R_s^n = T_s \quad (17)$$

$$\frac{a_0}{a_s} = \frac{R_s^n}{h^n} \quad (18)$$

将(9)式用于上式后，求该式两端n次方根，而后再将该式两端平方，整理后得

$$h = r_s / \sqrt[10^{\frac{t_0 - t_s}{s}} - 1] \quad (19)$$

(19)式即为作者导出的宏观地震震源深度公式。当 $n=2$ 时，得出(3)式；当 $n=1.6$ 时，得出(4)式；当 $n=1.783$ 时，得出(5)式；当 $n=1-2$ 时，得出(5)式中 $s=1.5-3.0$ ；当 $n=1.2$ 时，得出Н. В. Шубалин的正常地震公式；当 $n=2$ 时，得出Н. В. Шубалин的深震震源深度公式；当 $n=2.2$ 时，得出С. В. Медведев的新公式。

对(19)式的求解方法有计算方法、作图求解和图算法3种。

将(19)式改写为

$$h \sqrt[10^{\frac{t_0 - t_s}{s}} - 1] = r_s \quad (20)$$

展开上式左边根号，取其首项并无损(19)式之精度，得

$$h 10^{\frac{t_0 - t_s}{s}} = r_s \quad (21)$$

两端取对数：

$$\log r_i - \log 10^{\frac{I_0 - I_i}{3n}} = \log r_i \quad (22)$$

$$\log h + \frac{(I_0 - I_i)}{3n} = \log r_i \quad (23)$$

令  $\log h = H$  ,  $\frac{1}{3n} = N$  , (24)

则  $H + (I_0 - I_i)N = \log r_i$  . (25)

(25) 式是前两种求解方法的基本公式，制作算图用 (22) 式。

1、计算方法

(1) 只有两圈等震线的情况

由 (25) 式得方程组：

$$\left. \begin{aligned} H + (I_0 - I_i)N &= \log r_i \quad ; \\ H + (I_0 - I_{i-j})N &= \log r_{i-j} \quad . \end{aligned} \right\}$$

式中  $i, j = 1, 2, 3, \dots, K$ ，但  $j \neq i$ ，而  $j < i$ 。

$$D = \begin{vmatrix} 1 & (I_0 - I_i) \\ 1 & (I_0 - I_{i-j}) \end{vmatrix} = I_i - I_{i-j} \quad ;$$

$$D_H = \begin{vmatrix} \log r_i & (I_0 - I_i) \\ \log r_{i-j} & (I_0 - I_{i-j}) \end{vmatrix} = (I_0 - I_{i-j}) \log r_i - (I_0 - I_i) \log r_{i-j} \quad ;$$

$$D_N = \begin{vmatrix} 1 & \log r_i \\ 1 & \log r_{i-j} \end{vmatrix} = \log r_{i-j} - \log r_i \quad ;$$

$$\left. \begin{aligned} H_0 &= \frac{D_H}{D} = \frac{(I_0 - I_{i-j}) \log r_i - (I_0 - I_i) \log r_{i-j}}{(I_i - I_{i-j})} \quad ; \\ N_0 &= \frac{D_N}{D} = \frac{\log r_{i-j} - \log r_i}{(I_i - I_{i-j})} \quad . \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

由此得出  $h = 10^{H_0}$  ,  $n = 1/3N_0$  . (27)

(2) 有三圈以上等震线情况

令 (25) 式的残差  $\delta_i$  为：

$$\delta_i = \log r_i - H - (I_0 - I_i)N \quad , \quad (28a)$$

则  $\Sigma \delta_i^2 = \Sigma [\log r_i - H - (I_0 - I_i)N]^2$  .

式中  $\Sigma = \sum_{i=1}^k$  ,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$  .

由  $\frac{\partial(\Sigma \delta_i^2)}{\partial H} = 0$

得： $KH + N \Sigma (I_0 - I_i) = \Sigma \log r_i$  , (29)

由  $\frac{\partial(\Sigma \delta_i^2)}{\partial N} = 0$

得： $H \Sigma (I_0 - I_i) + N \Sigma (I_0 - I_i)^2 = \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i$  . (30)

$$D = \begin{vmatrix} k & \Sigma (I_0 - I_i) \\ \Sigma (I_0 - I_i) & \Sigma (I_0 - I_i)^2 \end{vmatrix} = K \Sigma (I_0 - I_i)^2 - [\Sigma (I_0 - I_i)]^2 \quad ;$$

$$D_H = \begin{vmatrix} \Sigma \log r_i & \Sigma (I_0 - I_i) \\ \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i & \Sigma (I_0 - I_i)^2 \end{vmatrix} = \Sigma (I_0 - I_i)^2 \Sigma \log r_i - \Sigma (I_0 - I_i) \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i \quad ;$$

$$D_N = \begin{vmatrix} k & \Sigma \log r_i \\ \Sigma (I_0 - I_i) & \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i \end{vmatrix} = K \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i - \Sigma (I_0 - I_i) \Sigma \log r_i.$$

$$H_0 = \frac{D_N}{D} = \frac{\Sigma (I_0 - I_i)^2 \Sigma \log r_i - \Sigma (I_0 - I_i) \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i}{K \Sigma (I_0 - I_i)^2 - [\Sigma (I_0 - I_i)]^2}, \quad (31)$$

$$N_0 = \frac{D_N}{D} = \frac{K \Sigma (I_0 - I_i) \log r_i - \Sigma (I_0 - I_i) \Sigma \log r_i}{K \Sigma (I_0 - I_i)^2 - [\Sigma (I_0 - I_i)]^2}. \quad (32)$$

根据误差的传播求  $H_0$  和  $N_0$  的标准误差  $\delta H_0$  和  $\delta N_0$ ，显而易见：

$$\delta H_0 = \sqrt{\frac{\Sigma \delta H_i^2}{k-1}} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \Sigma_{j=1}^k \left[ \frac{\partial H_0}{\partial (\log r)_j} \delta (\log r)_j \right]^2},$$

$$\delta N_0 = \sqrt{\frac{\Sigma \delta N_i^2}{k-1}} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \Sigma_{j=1}^k \left[ \frac{\partial N_0}{\partial (\log r)_j} \delta (\log r)_j \right]^2}.$$

式中偏差：
$$\delta (\log r)_j = \log r_j - [H_0 + (I_0 - I_j) N_0]. \quad (28b)$$

此处将脚标  $i$  改为  $j$  是为了避免再次求和与原来的求和发生误会。 $j=1, 2, 3, \dots, K$ ，将  $H_0$  和  $N_0$  的表达式代入前两式中得出：

$$\delta H_0 = \sqrt{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{\Sigma_{j=1}^k [(\Sigma (I_0 - I_i)^2 - (I_0 - I_j) \Sigma (I_0 - I_i)) \delta (\log r)_j]^2}{K \Sigma (I_0 - I_i)^2 - [\Sigma (I_0 - I_i)]^2}}, \quad (33)$$

$$\delta N_0 = \sqrt{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{\Sigma_{j=1}^k [(K(I_0 - I_j) - \Sigma (I_0 - I_i)) \delta (\log r)_j]^2}{K \Sigma (I_0 - I_i)^2 - [\Sigma (I_0 - I_i)]^2}}. \quad (34)$$

在上两式中作者没有像文献 [7] 中那样，按经典方法将  $\delta (\log r)_j$  用它的绝对值平均或均方根值代替，以便将  $\delta (\log r)_j$  从求和号下分离出来，这样确是把 (33)、(34) 式化简了，但也引入误差。作者认为本来是为计算误差，在计算过程中引入新的误差是不可取的。如  $H_0$  和  $N_0$  确是最佳值，则  $\Sigma_{j=1}^k \delta (\log r)_j \approx 0$ ，实际上它已成为计算结果是否正确、和哪圈等震线误差大的重要指标，是绝不能代替的。根据误差的传播由 (27) 式求出  $h$  和  $n$  的标准误差：

$$\left. \begin{aligned} \delta h_0 &= \frac{\partial h}{\partial H_0} \delta H_0 = 2.303 h \delta H_0, & \delta n_0 &= \frac{\partial n}{\partial N_0} \delta N_0 = \frac{1}{3N_0} \delta N_0. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

最后得震源深度 
$$h = h \pm 2.303 h \delta H_0 \text{ (公里);}$$

几何扩散率 
$$n = n \pm \frac{1}{3N_0} \delta N_0. \quad (36)$$

## 2、作图求解法

(25) 式在  $(H, N)$  坐标系中为一直线。一圈等震线确定一条直线， $K$  圈等震线则确定  $K$  条直线，因各圈等震线  $I_i$  不同， $r_i$  各异，故必然是两两相交，其交点数为  $C_2^k = \frac{k!}{(k-2)!2!} =$

$n$ ，沿坐标轴读出各交点的  $H_i, N_i$ ，则  $H_0 = \frac{1}{n} \Sigma_{i=1}^n H_i$ ， $N_0 = \frac{1}{n} \Sigma_{i=1}^n N_i$ 。然后求  $dH_i = H_0 -$

$H_i$ ， $dN_i = N_0 - N_i$ ，则  $\delta H_0 = \sqrt{\frac{\Sigma dH_i^2/n - 1}{n-1}}$ ， $\delta N_0 = \sqrt{\frac{\Sigma dN_i^2/n - 1}{n-1}}$ 。再将上述结果代入 (27) 和 (36) 式中就得到了解答。

## 3、图算法 (Nomography)

应用图算法首先须作出算图 (或量板)。作者应用

$$\log r_i - \log 10^{\frac{I_0 - I_i}{3}} = \log h \quad (22)$$

来制作算图。因为一个地震只有一个震源深度，所以无论用那一圈等震线的  $(r_1, I_1)$  来测定，其结果都应当一致，即 (22) 式中  $\log r_1$  与  $\log 10^{\frac{I_0 - I_1}{3n}}$  之差为一常数  $\log h$ 。取纵轴为  $\log r_1$ ，令  $r_1 = 10^{\frac{I_0 - I_1}{3n}}$ ，横轴表示  $(I_0 - I_1)$ 。取  $n = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8$ ，

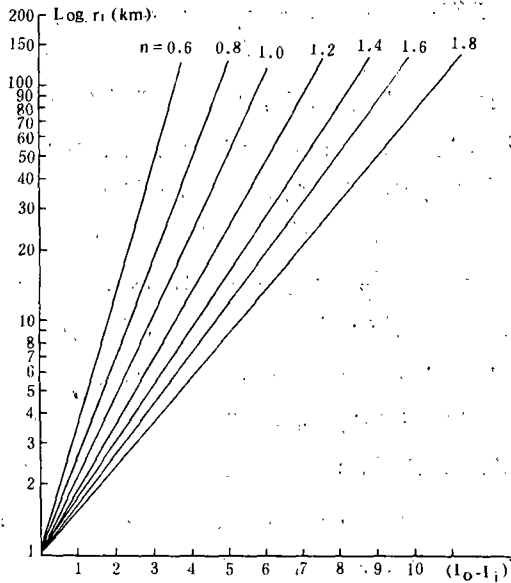


图 2

则可以在此半对数坐标系中，绘出以  $n$  为参数的 7 条直线族。纵轴下半轴标上  $\log h$ ， $h$  的数值朝下方增大。这样就作出  $(n, h)$  算图，如图 2。它是一族从原点向外辐射的直线。将刻有座标轴线的透明板置于图上，使两座标轴线重合。在透明板上画出由待求地震的  $(r_1, (I_0 - I_1))$  所确定的一系列点子。保持透明板上纵轴与算图上纵轴平行，上下左右移动透明板使其上点群落在算图的一条直线上或两条直线之间，读出点群所在的  $n$  值和透明板上横轴所截出算图纵轴下半轴上数字，即为震源深度。在本文中，此图算法仅能得出粗略值，因此只作为考察数据的均匀性时用。

### 四、实例和结果对比

#### 1、实例和结果对比

##### (1) 1960 年 11 月 13 日延庆上马坡 $M_L = 3.3$ 地震

该次地震发生后，本文作者同其他同志一起进行了现场调查。图 3 为根据调查资料绘制的该次地震等震线图。其参数分别为  $I_0 = 4.5^\circ$ ， $r_1 = 3.8$  公里， $r_3 = 12.5$  公里。震源错动面走向北西，倾向北东。将上述参数代入 (26) 式得： $H_0 = 0.3212$ ， $N_0 = 0.5171$ ，再代入 (27) 式得： $h = 2.1$  公里， $n = 0.65$ ，准面源。用 (3) 式算得： $h_4 = 5.6$  公里， $h_3 = 8.5$  公里。用 (4) 式算得： $h_4 = 5.0$  公里， $h_3 = 7.2$  公里。

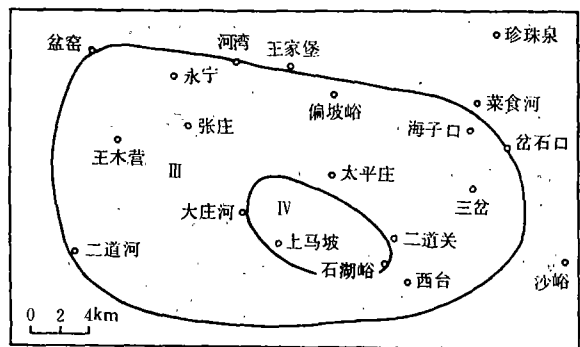


图 3 1960 年 11 月 13 日延庆上马坡地震等震线图  
Fig. 3 Isoseismal curves of the Shangmapo earthquake, Yanqing, Beijing on Nov. 13, 1960.

##### (2) 1960 年 11 月 28 日通县杨闸 $M_L = 3.0$ 地震

该次地震后本文作者曾前往调查。图4为宏观等震线图，其  $I_0 = 5^\circ$ ， $r_5 = 1.2$  公里， $r_1 = 4.1$  公里， $r_3 = 10.7$  公里， $r_2 = 20.5$  公里。震源错动面略呈椭圆形，长轴走向NW，长约3公里，朝箭杆河方向倾斜。将上述参数代入(31)、(32)、(27)、(28b)、(33)、(34)和(36)式，算得： $h = 1.9 \pm 0.11$  公里， $n = 1 \pm 0.03$ ，标准面源。用(3)式算得： $h_1 = 3.8$  公里， $h_3 = 5.6$  公里， $h_2 = 6.8$  公里。用(4)式算得： $h_1 = 3.3$  公里， $h_3 = 4.6$  公里， $h_2 = 5.3$  公里。

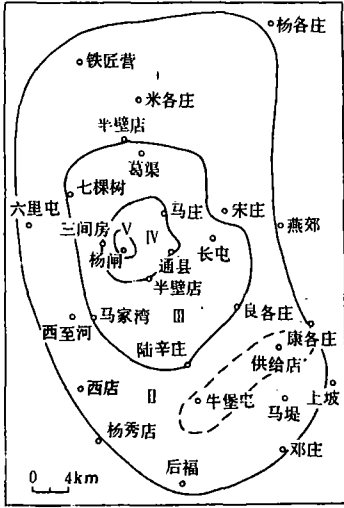


图4 1960年11月28日北京通县地震等震线图  
Fig. 4 Isoseismal curves of the Tongxian earthquake, Beijing on Nov. 28, 1960

该次地震的资料取自文献[8]。其参数  $I_0 = 12^\circ$ ， $r_{10} = 119.0$  公里， $r_9 = 164.8$  公里， $r_8 = 247.7$  公里， $r_7 = 380.7$  公里。根据10度等震线长轴和最宽处短轴之纵横比，参照1920年海原  $M = 8.5$  地震的震源错动面，扣除二者能量差异及大地围压差异后，推断其震源错动面由长轴走向NE长约7公里、短轴走向NW长约4公里的两错动面正交成T字形震源。将宏观场参数代入(31)等式算得： $h = 54.3 \pm 0.95$ ， $n = 2.0 \pm 0.03$ ，脐点源。用(3)式算得： $h_{10} = 62.6$  公里， $h_9 = 56.5$  公里， $h_8 = 54.7$  公里， $h_7 = 56.5$  公里。用(4)式算得： $h_{10} = 51.9$  公里， $h_9 = 44.0$  公里， $h_8 = 39.8$  公里， $h_7 = 38.6$  公里。这表明，对于震源较深的地震，用(4)式计算得出的深度偏浅。经仪器

(3) 1830年6月12日河北磁县彭城  $7\frac{1}{2}$  级地震

该次地震的主要资料是本文作者和郭履灿调查获得的(图5)。该次地震属走滑型地震，其参数  $I_0 = 10.5^\circ$ ， $r_{10} = 9.7$  公里， $r_9 = 23$  公里， $r_8 = 41.5$  公里， $r_7 = 89.5$  公里， $r_6 = 161$  公里，震源错动面走向NWW，长19公里，近于直立。将上述参数代入(31)等式，算得： $h = 7.4 \pm 0.34$  公里， $n = 1.1 \pm 0.02$ ，面源。用(3)式算得： $h_{10} = 14.2$  公里， $h_9 = 15.6$  公里， $h_8 = 17.2$  公里， $h_7 = 24.2$  公里， $h_6 = 29.1$  公里。用(4)式算得： $h_{10} = 12.7$  公里， $h_9 = 13.3$  公里， $h_8 = 13.8$  公里， $h_7 = 18.2$  公里， $h_6 = 20.4$  公里。

由上述三次地震的计算结果可以看出，用(3)、(4)式计算得出的震源深度都偏大，而且用各圈等震线计算出的深度值都不一致，差异也较大。

(4) 1950年8月15日西藏察隅、墨脱  $M = 8.6$  地震

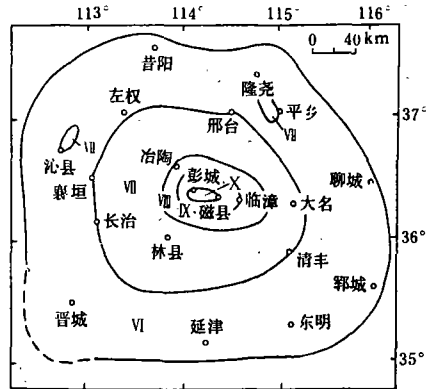


图5 1830年6月12日河北磁县彭城大震等震线图  
Fig. 5 Isoseismal curves of the Pengcheng earthquake, Cixian, Hebei on June 12, 1830

测定，该次地震震源深度为 100 公里。但是该次地震造成大范围地面严重破坏，山川变易，震中烈度已超过  $12^\circ$ 。而  $10^\circ$  区内绝不会出现山川变易的，说明该深度与宏观现象不对应。该次地震宏观场宽广，确是深震，本文给出的深度与宏观现象较符合。

2、作图求解

对上述延庆上马坡、杨闸和彭城三次地震分别作图求解。

将延庆  $M_L=3.3$  地震宏观场参数代入 (25) 式，得到两条直线：

$$H+0.5N=0.58; H+1.5N=1.097.$$

作图 (图 6a)，上述两条直线相交，沿 (HN) 座标轴读出交点座标为  $H_0=0.321, N_0=0.52$ ，代入 (27) 式得  $h=2.1, n=0.64$ ，与计算结果一致。

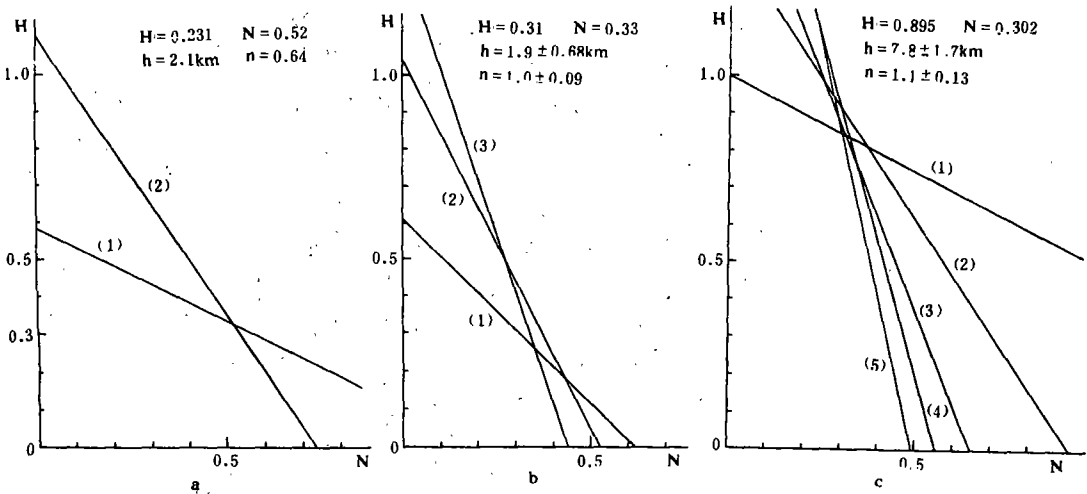


图 6 a. 1960 年延庆上马坡  $M_L=3.3$  地震  
 b. 1960 年通县杨闸  $M_L=3.0$  地震  
 c. 1830 年河北磁县彭城  $M=7\frac{1}{4}$  地震

根据通县杨闸  $M_L=3.0$  地震的宏观场参数可得三条直线：

$$H+N=0.6128; H+2N=1.029; H+3N=1.312.$$

作图 (图 6b) 求得三个交点，它们的座标分别为： $H_1=0.47, N_1=0.287; H_2=0.26, N_2=0.26; H_3=0.187, N_3=0.43$ 。将  $H_0=0.33, N_0=0.31, \delta H_1=0.147, \delta N_1=0.09$  代入 (27) 式和 (36) 式得： $h=1.9\pm 0.68, n=1\pm 0.09$ 。上述结果与计算结果类似，但精度低。

根据彭城  $7\frac{1}{2}$  级地震的宏观场参数，由 (25) 式得 5 条直线：

$$H+0.5N=0.978; H+1.5N=1.362; H+2.5N=1.618; H+3.5N=1.952; H+4.5N=2.207.$$

作图 (图 6c) 得 10 个交点，其平均值为： $H_0=0.8949, N_0=0.3024$ ，求出  $\delta H_1=0.0952, \delta N_1=0.0367$ ，将其代入 (27) 式和 (36) 式得： $h=7.8\pm 1.71; n=1.1\pm 0.03$ 。与计算结果相比，深度不准确，误差太大，n 值的误差也较大。

3、中国九次大震的震源深度

利用本文提出的公式，计算了中国九次大震的震源深度，见表 1。利用这些地震的震源类



型,初步研究了它们的震源几何学(表1)。

表1 中国九次大震的震源深度

发震时间	地点	M	$I_0$	k	h公里	震源几何学	参考
1902年8月22日	新疆阿图什	$8\frac{1}{4}$	$11.5^\circ$	3	$1.1 \pm 0.01$ $13.8 \pm 0.34$	走向 $N45^\circ E$ ,近直立,走滑型	(8)
1906年12月23日	新疆沙湾南	8.0	$11^\circ$	5	$1.3 \pm 0.01$ $6.9 \pm 0.17$	走向 $NWW$ ,倾向 $NE$ ,长37公里	(8)
1920年12月16日	宁夏海原	8.5	$12^\circ$	6	$1.4 \pm 0.02$ $15.2 \pm 0.42$	一走向 $S68^\circ E$ ,长37公里,一走向 $N64^\circ W$ ,长37公里,相交,一齐倾向 $SW$	(8)
1927年5月23日	甘肃古浪	8.0	$11^\circ$	5	$1.3 \pm 0.02$ $9.9 \pm 0.19$	走向 $N43^\circ W$ ,倾向 $NE$ ,长35公里	(8)
1931年8月11日	新疆富蕴	8.0	$11^\circ$	4	$1.1 \pm 0.03$ $10.8 \pm 0.43$	走向 $NW$ ,长66公里,略朝西倾斜	(8)
1950年8月15日	西藏察隅墨脱	8.6	$12^\circ$	4	$2.0 \pm 0.03$ $54.3 \pm 0.95$	一走向北东长7公里,一走向北西长4公里,正交成T形	(8)
1556年1月23日	陕西华县	$8\frac{1}{4}$	$11.5^\circ$	7	$1.4 \pm 0.02$ $14.1 \pm 0.42$	走向 $NNE$ ,朝渭河倾斜,长50公里	(8)
1668年7月25日	山东郯城莒县	$8\frac{1}{2}$	$12^\circ$	5	$1.4 \pm 0.02$ $18.6 \pm 0.63$	走向 $N14^\circ E$ ,倾向 $NEE$ ,长138公里	(4)
1679年9月2日	河北三河平谷	8.0	$11^\circ$	5	$1.0 \pm 0.03$ $5.5 \pm 0.37$	走向 $N27^\circ E$ ,长34公里,近直立,走滑型	(4)

注: K表示等震线圈数; n为几何扩散率。

## 五、结论

本文得出的宏观地震震源深度公式是一个普遍化的公式,比其他公式含有较多一些的信息。利用该公式,通过计算能给出震源类型,结合宏观场可以粗略地探索震源的几何学。其求解方法以计算法较准确,精度高;作图求解直观,但准确性差,精度低;图算法仅作为获取粗略值和考察数据的均匀性时用。利用该公式算出的9个大震及其他几个地震的震源深度的结果显示,该公式解答准确,精度高。因此该公式可在实际中运用。本文还首次给出宏观地震震源深度值的标准误差。

本文在写作过程中得到冯锐教授的鼓励和帮助,谨此致谢。

(本文1991年8月14日收到)

## 参考文献

- [1] F. Gassmann, Die Makroseischen Intensitätender Schweizerischer Nahbeben in Zusammenhang mit Registrierungen in Zürich, Jahresberd Schweiz Erdbebedienter, 1925 (Zurich).
- [2] A. Blake, On the estimation of focal depth from macroseismic data, B. S. S. A., Vol. 31, pp. 225-231, 1941.
- [3] B. Gutenberg and C. F. Richter, Earthquake magnitude, intensity, energy and accuracy, B. S. S. A., Vol. 32, pp163-191, 1941.

- [4] 闵子群, 中国强烈地震综合等震线图的编制, 地球物理学报, Vol. 6, No. 1, 1957.
- [5] 郭增建, 1556 年 1 月 23 日关中大地震, 地球物理学报, Vol. 6, No. 1, 1957.
- [6] E. X. Сахаренский, 梅世蓉, 关于中国境内地震活动性研究, 地球物理学报, Vol. 8, No. 1, 1959.
- [7] Y. 毕尔, 误差理论简引, 杨肇燊译, 科学出版社, P34-39, 1958.
- [8] 顾功叙等, 中国地震目录, 科学出版社, 1983.

## ON THE METHOD FOR DETERMINATION OF EARTHQUAKE FOCAL DEPTH BASED ON THE MACROSEISMIC DATA AND ITS SOLUTIONS

Duan Xingbei

(4 Entrance No. 110, Building 911, Zhongguancun, Beijing 100086, China)

### Abstract

Based on a point of view that the near-field seismic source can't be considered as a point source, the author derived a formula for focal depth corresponding to the line and plane sources from their radiant field as follows:

$$h = r_i \sqrt{10^{\frac{I_0 - I_i}{1.5}} - 1}$$

Where,  $I_0$  is the seismic intensity at epicentre,  $I_i$  the intensity at observation point  $i$ , and  $r_i$  the radius of the isoseismal curves defined by the intensity  $I_i$ , the index  $n$  of geometrical diffusivity within macroseismic field is a variable parameter. For  $n=2$ , it is G-R-Min formula, for  $n=1-2$  corresponds to  $S=1.5-3.0$  in Blake formula,  $n=1.78$ , Blake formula et al. And importantly, first gave the value of macroseismic focal depth to a standard error in the world.