断层崖形成年代的数学模拟计算

侯康明 韩有珍 张守杰

(国家地震局兰州地震研究所)

摘要 本文在对物质扩散方程进一步推导的基础上,分别用数学方程模型 I、I、I对发育在昌马断裂带中、东段的单一型地震断层崖和复合型地震断层崖 剖面进行了拟合计算。并用最大坡值一断距(tg0s—2a)图分析了阿尔金断裂带和 昌马断裂带上分布的离散型断层崖。结果求得:昌马断裂带断层崖的物质扩散系数 K值为2.1~3.4m²/10³a。阿尔金断裂带上发育有4组距今年龄分别为0.6 ka、2-2.7 ka、4 ka和 6--6.6 ka的地震断层崖。

主题词: 断层陡坎 断层年代 数学模拟 地震断层 阿尔金断裂带

1 前言

由断层作用产生的陡崖斜坡地形形态是活动构造的一种良好标志。通过对这些广泛分 布在活断层上的不同时期、不同类型的断层崖形成时代的研究,可以对断层的活动时间、复 发周期及位移速率给出定量结果,以弥补由其它测年方法,如 C¹⁴法、热释光法确定年代所需 资料的不足。

利用物质扩散方程对实测断层崖剖面进行数值拟合可以求得一个地区的物质扩散系数 K 值。K 值表征了该地区斜坡地形侵蚀与堆积作用的速度。但不同地区的 K 值是不同的。如 美国盆地一山脉区洪积扇标准的 K 值大致为 1. 1m²/10³a⁽¹⁾;我国西部地区贺兰山东麓的 K 值大致为 1. 5m²/10³a⁽²⁾;榆木山北麓的 K 值大致为 3. 3±1. 7m²/10³a⁽³⁾。笔者在本文中介绍 了昌马地区的计算结果,K 值为 2. 1~3. 4m²/10³a。可以看出,到有了这些 K 值,就可方便地 对该区的古地震断层崖的形成年代作出概略的估计。

2 断层崖演化过程的数学模型

物质扩散方程之所以能对进入稳定状态的断层崖斜坡地形形态进行拟合,求取年代学 信息,其理由是因为扩散方程的解恰好是一个误差函数,该函数的曲线形态与真实斜坡地形 形态极为相似(图 1)。

首先该研究的基本假设是:经剥蚀过程而产生的物质将沿断层崖斜坡的下坡方向传输 (沿 x 坐标方向),其物质运移速率与地形梯度呈正比关系,即:

$$\dot{M} = -K \frac{\partial u}{\partial x} \tag{1}$$

国家地震局地震科学联合基金课题



图1 误差函数 $er f(\xi)$ (实线)及负指 数函数 $e^{-\eta^2}$ (虚线)曲线

Fig. 1 Curves of error function
$$er f$$
 (\$) (solid line) and
negative exponential function $e^{-\eta^2}$ (dotted line).

在均匀扩散方程中将 K 看作为常数,是不随 x、 t、u及型变化的常系数。但事实上K值是随地区和时间变化的函数。如要是这样,方程(3)将 变成非线性方程,它的解很可能不存在。但从某一地区来讲,可以认为断层崖是分布在相同 的地质地貌环境中,介质和气侯条件很相近,因此从统计学的角度可将 K 值作为一级近似,

$$K \simeq K/\rho$$
 (4)

M是物质沿下坡方向运移的速率, 金是垂直于

质是局部守恒的。 $\frac{\partial M}{\partial x}$ 与 $\frac{\partial u}{\partial t}$ 应满足如下关系式:

 $\rho \frac{\partial u}{\partial t} dx = -\frac{\partial \dot{M}}{\partial r} dx$

式中ρ为物质密度。将(1)式代入(2)式则得:

 $\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (K' \frac{\partial u}{\partial x}) = 0$

在建立该数学模型时,又假定坡面上的物

地形等高线的地形梯度,K为物质扩散系数。

将(4)式代入方程(3)可得:

式中 a 为断层陡坎的半

即:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \tag{5}$$

K 为物质扩散系数,量纲为 m²/10³a。方程(5)指出,当地形上凸时,将经受剥蚀,反之,地形 下凹时,就会形成沉积盆地,接受堆积。地形变化速率依赖于地形曲率,当K值相同时,地形 变化明显的断层崖要比地形平缓的断层崖下降速度快。

2.1 垂直陡坎的数学模型(模型I)

汉克斯印对直形陡坎的数学模型进行了推导,其初始定解条件为一阶跃函数,即:

$$u = \begin{cases} a + \beta x & x \ge 0 \quad t = 0 \\ -a + \beta x & x \le 0 \quad t = 0 \end{cases}$$

断距, \beta 为远场坡角(\beta=tgth)。代入(5)式得:

$$u(x,t) = a \cdot erf[x/2(Kt)^{\frac{1}{2}}] + \beta x$$
(6)

式中的 $\operatorname{er} f(\mathbf{x}/2(\mathbf{Kt})^{1/2})$ 是变量 $\mathbf{x}/2(\mathbf{Kt})^{\frac{1}{2}}$ 的误差函数 P

$$rf[\frac{x}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}}] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{x^{-2}\sqrt{Kt}} e^{-\eta^{2}} d\eta$$
(7)

为求得最大坡度值与年龄的关系,对(6)式求导:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{a}{\sqrt{\pi Kt}} e^{-\frac{x}{4Kt}} + \beta$$

显然,剖面在 x=0 处,其坡度值最大,

$$\frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{a}{\sqrt{\pi Kt}} + \beta \tag{8}$$

式中^{du}/x=o为陡坎的最大坡度值。

$$\theta_s = tan^{-1} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} \right)$$

原始坡度,又称远场坡度:

(2)

(3)

$$\theta_f = tan^{-1}\beta$$

西北地震学报

图 2 给出了坡角 θ、远场坡角 0、断距 2a 及陡坎高度 2H 之间的断层陡坎几何图。

其中由于存在非零远场坡角,因此陡 坎的断距 2a 与陡坎高度 2H 具有如下非 线性几何关系:

$$H = a/(1 - \frac{\tan\theta_f}{\tan\theta_s}) \tag{9}$$

2.2 非垂直陡坎的数学模型(模型 I)

在大多数情况下,由于断层面初始倾 角并非是垂直的,因此伴随大地震形成的 1始边值各件应为一创性函数

断层陡坎,其初始断面是具有一定角度的,即初始边值条件应为一斜坡函数:

$$u = \begin{cases} ax & |x| \leq x_1 \\ \pm a + (x \mp x_1)\beta & |x| \geq x_1 \end{cases}$$

我们对这一定解条件下的方程(5)重新进行推导(推导过程省略)得:

$$u(x,t) = \left(\frac{Kt}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} (\alpha - \beta) \left[e^{-\left(\frac{x+x_1}{2}\right)^2} - e^{-\left(\frac{x-x_1}{2}\right)^2} \right] + \frac{(\alpha - \beta) \cdot x - \beta x_1 + \alpha}{2} \cdot erf\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{Kt}}\right) + \frac{\alpha + \beta x_1 - (\alpha - \beta)x}{2} \cdot erf\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{Kt}}\right) + \beta x$$
(10)

式中 a 为半断距, β 为坡角, α 为休止角(α = tg θ_s ,即 tg30[•])。图 3 给出了该解的函数 图象。

图 2 断层陡坎几何图

Fig. 2 Geometric pattern of fault scarp.

该模型较前一模型更符合实际情况, 其初始值为可调参数,可对斜坡地形形态 作出更精确的拟合。

2.3 非齐次均匀扩散数学模型(模型 II)

复合型断层崖是指经多次断错事件而 形成的一类斜坡地貌。它包含了多次地震 事件的累积垂直位移量,所以它的高度明

显大于单一事件型断层崖。如果仍用上述单一型事件模型去拟合,其误差将非常大。为此需 要给出一个具有连续断层作用的数学模型,如果将方程(5)变成带位移速率 A 的非齐次均 匀扩散方程就能满足这一条件:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = A \tag{11}$$

其中 A 是断层崖的增高速率,单位为 m/103a。汉克斯给出的初始定解条件为:

$$u = \begin{cases} a + \beta x & x \ge 0 \quad t = 0 \\ -a + \beta x & x \le 0 \quad t = 0 \end{cases}$$

其解为:

$$u(x,t) = a + At \cdot erf\left[\frac{x}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}} + \frac{Ax^{2}}{2K} \{erf\left[\frac{x}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}}\right] - sgn(x)\} + \frac{Ax}{K} (\frac{Kt}{\pi})^{\frac{1}{2}} e^{-x^{2}/4Kt} + \beta x \quad (12)$$

$$\vec{x} + sgn(x) = +1 \quad x > 0$$

$$sgn(x) = -1 \quad x < 0$$





第2期

a和A对所有的x点都是正值。对(12)式求导得最大坡度值:

$$\frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{at^{-\frac{1}{2}}}{(\pi K)^{1/2}} + \frac{2At^{\frac{1}{2}}}{(\pi K)^{1/2}} + \beta$$
(13)

式中第二项将会使坡度变陡,断层崖的断错量将按速率(2A)增高。

3 用模型(I)和(I)对单一型陡坎剖面的拟合结果

单一型地震陡坎是指由一次地震作用形成的坎状地貌,其特点是高度小,坡面较光滑,

没有明显的坡折现象。沿昌马断裂带中段的红窑 子、红沟一带均可见到一组坡度较缓的古地震陡 坎,它们切过洪积扇面,形成断距为2.4~3.7 m 的斜坡地貌。我们用扩散方程模型(Ⅰ)和(Ⅱ)对 其中实测的7条剖面进行了拟合计算。并对陡坎 自由面后退的时间进行了估计(见表 1,图 4)。如 图 4 所示,实测曲线与理论计算点拟合偏差非常 小。其中1、2、3号剖面位于红沟东,高度较小,所 得 Kt 值在 4.3~5.5 之间变化,取 K 值为 2.1 m²/10³a。由不稳定过程(自由面后退)估计的年龄 大约在 0.32~0.42 ka 间变化。因此该陡坎形成 于距今 2.4~3 ka 间。4、5、6、7 号剖面位于红窑 子,由表1表明其形成年代为2.1~2.2 ka。可见 上述7条陡坎是同一次地震的产物。该次地震发 生的时间与文献[5]中提到的距今约1968年的一 次地震的年代相当。

4 最大坡值一断距(tgθs-2a)图分
 析结果

大量的野外资料表明,在昌马断裂、阿尔金断 裂带上还分布着一些数据点比较离散的单一型断 层陡坎。用这些资料对断层陡坎最大坡值一断距 (tg0,-2a)图进行了分析。图 5a,5b 分别是用模型 I和 I 对昌马断裂带的离散陡坎所作的分析.图



5c 和 5d 是对阿尔金断裂带所作的分析。从图 5a 和 5b 中可以看到数值点主要集中分布在 Kt=3~4、Kt=5 和 Kt=8~9 这 3 条曲线上。取 K=2. $1m^2/10^3a$.可求得这些离散陡坎的年 龄分为 3 组:1.4—1.9 ka;2.4 ka;3.8—4.3 ka。其中第一组与前述 7 条剖面的年龄是一致 的。由图 5c 和 5d 所示的阿尔金断裂带上离散陡坎的断距一坡值图可以看出,数据点主要集 中在 Kt=1、3~4、6、9~10 这几条曲线上。它们代表了 4 次古地震事件的年代。根据文献 〔6〕取阿尔金断裂的 K 值为 1.5m²/10³a。求得这 4 次古地震陡坎的年龄应分别距今为:0.6 ka、2~2.7 ka、4 ka 和 6~6.6 ka。

71



图 5 最大坡值—断距(tgt,-2a)图



复合型断层崖是指 多次断错事件形成的一 类斜坡地貌。它包含了 这些断层事件的累积垂 直位移量。所以复合型 断层崖的高度明显的比 单一型断层崖的高度要 大,其相应的坡角也大, 因为新的断层错动使原 已变缓的坡角再次恢复 到初始陡立状态。然后 在岩土扩散作用控制 下,重新经历不稳定过 程的剥蚀阶段。另外,复 合型断层崖剖面因有多 次位错事件的迭加而使 原已简单的陡坎形态趋 于复杂化,最典型的特 征表现为断层崖坡度间 断,出现明显的坡折现 象。在昌马断裂带中、东 段的月牙大坂、大泉口 一带分布着典型的复合 型断层崖。

5.1 月牙大坂复合型 断层崖

月牙大坂断层崖高 4.?-5.3 m.可见4段 明显的坡折现象(见图 6)。最下面的高角度坡 面(55[·]~60[·])起因于 1932年昌马7.6级地 震。其它还可见10[·]~ 14[·]、16[·]~18[·]和24[·] ~26[·]3组坡折面。通过 用扩散方程模型■对实

剖面描述			模型 I 拟合结果				不稳定过程时间估计			模型Ⅰ拟合结果					
剖面 编号	断距 (m)	远场 坡角	初始角	K ₁ t ₁	K1 (m²/10³a)	t ₁ (10 ³ a)	cote	c ₀ (m/10 ³ a)	t _í (10 ³ a)	x 1 (m)	θs	θf	K ₂ t ₂	K_2 (m ² /10 ³ a)	t ₂ (10 ³ a)
1	2.4	5.	90.	5.6	2.1	2.6	1.7	4	0. 42	2.2	30 .	5.	4.3	2.1	2.00
2	2.6	3.	90.	4.5	2.1	2.1	1.6	4	0.40	2. 2	30 .	3.	5.0	2.1	2.30
3	2.0	3-	90.	5.0	2.1	2.3	1.3	4	0. 32	1.8	30 .	3.	5.5	2.1	2.60
4	3. 7	<u>5</u> .	90 -	5.6	2.1	2. 7	2.3	4	0.58	3. 1	30 .	3.	3.4	2.1	1.62
5	3.4	5.	90.	4.8	2.1	2.3	2.1	4	0.52	3.0	30.	4.	3. 5	2.1	1.67
6	2.6	3. 5 °	90.	4.8	2.1	2.3	1.7	4	0. 52	2.2	30.	3.	3. 5	2.1	1.67
7	3. 1	5.	90.	4.8	2.1	2.3	2. 2	4	0.52	2. 9	30.	3.5.	3. 5	2.1	1.67

表1 红沟、红窑子地震陡坎参数及数值拟合结果

1、2、3号剖面位置在红沟东,4、5、6、7号剖面位置在红窑子。

cn为陡坎自由面后退速度;tf是自由面后退时间。

剖面	断距 (2-)	远场		剖面	模型■拟合计算结果						
编号	(m)	拔角	第一期	第二期	京三期	第四期	第五期	第六期	Kt	K(m ²)	t(k a)
1	11.0	2.	5 - 7 -	12.	17 *	21 .		62 ·	43.68	2.48	17.6
2	11. 0	2.	6.	912.	15.	1820.		55.	43.68	2.48	17.6
3	10.2	2.	5.	9·-13·	1612.	19.		60.	40.25	3.10	12.8
4	10.3	2 ·	8.	12 .	15.	18 - 21 -	27 •		40.25	3.10	12.8
5	10.5	2•	5. 7.	12 .	14 •17 •	18.	25 ·		40. 25	3.10	12.8
6	6.0	2 -	6.		14 •	18.			32.24	3.40	9.4
7	6.0	2 ·	62.	11 12.	17.	19.			32.24	3. 40	9.4
8	6.2	2.	5·7·		14 - 15 -	18 19.			32.24	3.40	9.4

表 2 大泉口复合型断层剖面坡角分期及拟合计算结果统计表

测剖面的拟合,其结果较为理想,偏差小。这4条剖面的 Kt 值均为 17.64。依据在该断层下 开挖探槽进行古地震研究所取得的最早古地震年龄为 8.4 ka,求得 K 值为 2.1 m²/10³a。由 剖面显示的 4 段坡折现象可以推测该复合型断层崖是由 4 次地震事件形成的,其中 3 次为 发生在全新世的古地震。

5.2 大泉口复合型断层崖

大泉口复合型断层崖分布在昌马断裂带的东段,它具有高度大、延伸长、保留完整等特点,是一组难得的古地震遗迹。

由图 7 和表 2 给出的 8 条剖面可将 断层崖高度分为 3 组:11 m、10.2— 10.5 m 和 6~6.2 m。在整个剖面上由 于坡度间断而形成了较为明显的坡折现 象。若按坡角划分,可认为这些断层崖至 少是由 6 次地震事件形成的。另外根据 1932 年昌马地震断层崖的断距仅为 1.5 ~2 m 这一事实可以说明这组断层崖按 其高度至少代表了 6~7 次震级与昌马 地震相当的错动事件。

用模型 II 对其进行拟合计算的结果 示于表 2。其中 Kt 值分为 3 组:43.68、 40.25 和 32.24。根据这些断层崖下面的 古地震探槽资料,最早的古地震崩积楔 年龄为 33,600±1,430a(无机碳年龄). 若换算成有机碳年龄则为17,600± 1,430a。按 后者计算求得 K 值为 2.48m²/10³a。其它两组 K 值也是根据 C¹⁴资料计算出来的。考虑到大泉口断层 崖主要发育在第四纪松散沉积物中、具 有年代新、固结度差、易遭受冲刷侵蚀等 特点。因此 K 值应比美国西部区和阿尔



金山都要高。这样就可将它的物质扩散系数 K 值确定为 2.4~3.4m²/10³a。

6 讨论及结论

利用物质扩散方程对不同类型的古地震断层崖进行数值拟合以求取年代学信息的方法 是一种经济、方便、准确的断代法。它可以弥补C¹¹等其它测年方法资料不足的缺陷。

通过对扩散方程的推导证明了模型 I 是模型 I 的特例。再次对模型 I 的修改,减少了断 层崖年代 t 和物质扩散系数 K 值的估算误差。

计算结果表明,发育在未固结洪积层内的断层崖,其物质扩散系数K值为2.1~3.4m²/10³a。对离散性断层崖资料的分析表明,阿尔金断裂上发育有4组距今年龄分别为0.6ka、2





- 图 7 大泉口复合型断层崖实测剖面形态拟合图 a.实测点; b.拟合计算点; c.剖面校正点
- $1. \ 2a = 11. \ 0m, Kt = 43. \ 68m^2, \ \theta_f = 2^{+}, \\ \theta_{s1} = 21 \ \circ \ ; \ 2. \ 2a = 11. \ 0m, Kt = 43. \ 68m^2, \\ \theta_f = 2^{+}, \\ \theta_{s2} = 17^{+}; \ (h_{s1} = 2)^{+}, \\ \theta_{s3} = 17^{+}; \ (h_{s3} = 1)^{+}, \\ \theta_{s3} = 10^{+}, \\ \theta_{s4} = 1$
- 3. 2a = 10.2m, $Kt = 40.25m^2$, $\theta_f = 2^{\circ}$, $\theta_{s3} = 27^{\circ}$; 4. 2a = 10.3m, $Kt = 40.25m^2$, $\theta_f = 2^{\circ}$, $\theta_{s1} = 27^{\circ}$;
- 5. 2a = 10.5m, $Kt = 40.25m^{\circ}$, $\theta_t = 2^{\circ}$, $\theta_{s5} = 25^{\circ}$; 6. 2a = 6m, $Kt = 32.24m^{\circ}$, $\theta_f = 2^{\circ}$, $\theta_{s6} = 14^{\circ}$;
- 7. 2a=6m, Kt=32. $24m^2$, $\theta_f=2$, $\theta_{s7}=19$; 8. 2a=6. 2m, Kt=32. $24m^2$, $\theta_f=2$, $\theta_{s8}=19$.

Fig. 6 The fitted pattern of measured sections for the composite fault scarp in Daquankou. ~2.7 ka、4 ka 和 6~6.6 ka 的古地震陡坎。昌马断裂上有 3 组古地震陡坎,其年代分别距今 1.4~1.9 ka、2.4 ka 和 3.8~4.3 ka。

参考文献

- 1 T. C. Hanks. Modification of wave-cut and faulting-controlled landforms. J. G. R., 1984, 89(B7)
- 2 P.L. 汉考克,等. 活断层特性. 地震出版社, 1992
- 3 P. Tapponnier. Active thrusting and folding in Qilianshan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. Earth and planetary science letters, 1989
- 4 黄昭.断层崖形态识别与大震重复间隔.祁连山一河西走廊活动断裂系.地震出版社,1993
- 5 Hou Kangming. Horizontal displacement of the Changma fault zone and an estimation of its strong earthquake recurrence interval. E. R. C., 1992, 6(2)

(下转 81 页)

ANALYSIS ABOUT THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS ALONG CONTINENTAL MARGIN OF SOUTHEASTERN FUJIAN AND THE STRUCTURAL SURROUNDINGS OF STRONG QUANZHOU OVERSEA EARTHQUAKE

Lu Haojiang, Lei Tucheng. Chen Huiqiong and Yang Zhihui

(Seismological Bureau of Fujian Province)

Abstract

Since late Pleistocene, the activity of fault blocks along continental margin has been characterized by elevation and subsidence movements. The strong overseas earthquake occurring in Quanzhou on December 29, 1604, related closely to fault block activity in the area. In this paper, we analysed the relation and discussed the dislocating way of hypocentral fault surface of this strong earthquake.

Subject words: Continental margin, Fracture structure, Source process

(上接第75页)

MATHEMATICAL MODEL CALCULATION OF FAULT SCARP AGE

Hou Kangming. Han Youzhen and Zhang Shoujie

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB)

Abstract

On the basis of further deduction of diffusion equation, the profiles of single-shock and multi-shock fault scarps along middle and eastern segments of Changma fault zone are fitted and calculated by using mathematical equation models I, I and I. The disperse fault scarps along the Altun fault zone and Changma fault zone are analyzed by using the maximum slope value-fault throws ($tg\theta s-2a$) pattern. The results show that for the fault scarps of Changma fault zone the mass diffusion coefficient K=2. 1-3. $4m^2/10^3a$ and along Altun fault zone there are 4 sets of seismic fault scarps whose ages are 0.6 ka, 2-2. 7 ka, 4ka and 6-6. 6 ka respectively.

Subject words: Fault scarp, Fault chorn, Mathematical modeling, Earthquake fault, Altun fault zone