

## Research Article

# Review the Parameters of Historical Strong Earthquakes in Tianshui and Its Surrounding Areas

Wu Qing\*

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, #5 Minzu University South Road, Haidian District, Beijing, China

**ARTICLE INFO****Article History**

Received 3 March 2020

Accepted 25 March 2020

**Keywords**Historical strong earthquake  
elliptical intensity distribution  
model  
magnitude  
macro-epicenter**ABSTRACT**

There is a high intensity and frequency of earthquake occurrence in Tianshui and its surrounding areas and it is very important to study on the historical strong earthquakes occurred in that area for knowing about the seismicity and earthquake risk prevention. This paper proposed an elliptical intensity distribution model based on modern events with both instrument records and macro investigation records that suitable for the western region of China, then estimated the historical strong earthquake parameters in Tianshui and its surrounding areas.

## 天水及周边地区历史强震参数复核

吴清

中国地震局地球物理研究所北京市海淀区民族大学南路5号北京, 100081, 中国

**关键词**历史强震  
椭圆烈度分布模型  
震级  
宏观震中**摘要**

天水盆地及其周边地区是地震发生强度和频度均极高的地区, 研究该地区发生过的历史强震对于掌握天水及周边地区地震活动性规律和地震风险防控非常重要。本文通过既有仪器测定记录又有宏观考察数据的现代大震资料建立适用于中国西部地区的椭圆烈度分布模型, 进而对天水及周边地区历史强震参数进行估算复核。

© 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.

This is an open access article distributed under the CC BY-NC 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 1. 引言

天水盆地处于南北活动构造带中段北端, 西秦岭断裂带和祁连山-六盘山断裂带的交汇处附近, 也是青藏高原东北缘与黄土高原接壤地带, 是地震发生强度和频度均极高的地区。有史料记载以来, 天水盆地及周边附近地区发生过734年天水西7级地震、1654年天水南8级地震、1718年通渭7级地震等7级以上大震, 7级以下中强地震也发生频繁。由于地震仪器记录的历史较短, 不足以在短时间、小尺度范围内弄清楚天水及周边地区地震活动规律, 因而对历史地震的研究非常重要。尤其是6.5级以上的历史强震, 其参数的不确定性, 将直接对地震活动性规律和地震安全性评价等问题产生重大影响, 对地震风险防控非常重要。

吴清等[1]根据6.5级以上强震烈度分布特征, 提出了基于烈度数据点的考虑断层破裂长度的烈度椭圆分布模型, 在此基

\*Email: [wuqing908@sina.com](mailto:wuqing908@sina.com)

础上联立椭圆数学方程确定了强震参数估计方法, 并采用蒙特卡洛方法定量分析了所得参数的不确定性。该方法计算得到的震级精度在1级以内, 震中计算精度可达2类。本文采用此方法, 建立了适用于中国西部地区震级大于等于6.5级地震的烈度椭圆分布模型, 并对天水及周边地区的5个历史大震基本参数进行了估算。本文模型基于既有仪器测定记录又有宏观考察数据的现代大震建立, 对天水及周边地区历史强震的重建和参数的校核具有重要意义。

## 2. 中国西部地区强震烈度椭圆分布模型

### 2.1. 强震烈度估计等值线拟合

我国目前公开发表的烈度调查资料大多采用等震线的形式分布, 原始烈度调查点通常难以获得。本文选取已经出版的《中国震例(1966-2002)》[2-10], 2008年后的强震烈度资料

从中国地震局官方网站的地震专题上获取 (<http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/index.html>), 收集了20世纪60年代以来中国西部地区所发生的震级大于等于6.5级地震的等震线图, 提取了其中既有仪器测量数据又有宏观烈度调查数据的现代地震资料(表1), 并将烈度分布图数字化。这些地震的等震线图上部分明确标示了宏观烈度调查点位置; 对于未明示烈度调查点的, 本文将能在等震线图上明确获取烈度信息的城、县、镇、村所在地作为烈度点。经数字化配准后获取各地震烈度点的空间分布。

考虑中心点和方向性的椭圆参数方程为:

$$\begin{cases} x_i = R_a \cdot \cos t_i \cdot \cos \theta - R_b \cdot \sin t_i \cdot \sin \theta + x_0 \\ y_i = R_a \cdot \cos t_i \cdot \sin \theta + R_b \cdot \sin t_i \cdot \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $(x_p, y_p)$  为椭圆上点的坐标,  $(x_0, y_0)$  为椭圆中心坐标;  $\theta (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$  是椭圆长轴逆时针与  $x$  轴正方向的夹

表1 地震数据及各烈度区椭圆烈度估计等值线长、短半轴长度和椭圆中心

序号	发震时间(年-月-日)	宏观震中		烈度区	烈度估计等值线		椭圆中心直角坐标		仪器震级 ( $M_s$ )	参考地点
		Log( $^{\circ}$ E)	Lat( $^{\circ}$ N)		长半轴 $R_a$ (km)	短半轴 $R_b$ (km)	$x_0$	$y_0$		
1	1970-01-05	102.683	24.017	X	24.45	8.25	0	0	7.7	云南通海
				IX	28.68	14.75	0	0		
				VIII	36.28	24.55	0	0		
				VII	55.43	40.99	-3.90	-2.27		
				X	21.95	4.3	0	0		
2	1973-02-06	100.533	31.483	IX	27.5	6.2	0	0	7.6	四川炉霍
				VIII	41.62	11.1	0	0		
				VII	54.82	22.15	-4.97	0.62		
				VI	84.57	45.75	-2.41	8.0		
				IX	25.6	14.1	0	0		
3	1996-02-03	100.267	27.083	VIII	49.2	18.2	0	0	7.0	云南丽江
				VII	62.0	35.0	0	0		
				VI	88.2	54.9	0	0		
				VIII	24.52	6.75	0	0		
				VII	33.42	14.57	0	0		
4	2000-01-15	101.1	25.6	VI	60.46	30.27	0	0	6.5	云南姚安
				VIII	7.45	7.0	-1.11	1.28		
				VII	16.85	15.49	2.02	7.10		
				VI	33.92	28.59	0.24	6.15		
				V	54.65	51.75	3.17	5.45		
5	2000-09-12	99.53	35.4	XI	33.6	19.87	0	0	6.6	青海兴海
				XI	34.5	16.83	0	0		
				X	122.6	35.54	78.7	71.5		
				IX	158.75	38.71	100.8	85.7		
				VIII	200.69	67.07	7.76	-108.20		
6	2008-05-12	103.4	31	VII	220.94	77.26	65.57	82.53	8.0	四川汶川
				VI	392.81	151.40	100.63	84.86		
				VIII	23.06	6.74	0	0		
				VII	23.26	20.12	0	0		
				VI	54.61	54.31	0	0		
7	2008-10-06	90.3	29.8	IX	18.12	0.83	26.66	-9.00	6.6	西藏当雄
				VIII	40.79	8.53	5.26	0.42		
				VII	60.68	19.90	8.05	0.33		
				VI	101.34	52.49	18.20	-16.64		
				IX	11.45	3.57	-0.59	-0.28		
8	2010-04-14	96.6	33.2	VIII	27.30	12.34	-0.75	-11.23	7.1	青海玉树
				VII	45.53	21.28	-4.22	-22.09		
				VI	68.67	61.72	-14.36	-36.84		
				VIII	18.52	7.45	-6.71	7.23		
				VII	37.83	22.42	-6.60	5.75		
9	2013-04-20	103.0	30.3	VI	72.84	48.47	0.26	1.61	6.6	甘肃岷县
				IX	6.75	4.68	10.53	-1.94		
				VIII	11.08	10.48	7.52	-2.66		
				VII	21.15	17.38	5.54	-0.21		
				VI	54.54	38.23	-4.26	-2.22		
10	2013-07-22	104.2	34.5	VIII	9.84	8.53	0	0	6.6	云南景谷
				VII	19.74	18.51	0	0		
				VI	49.93	44.22	0	0		
				VIII	21.65	12.02	-8.39	0.03		
				VII	40.70	29.41	0	0		
11	2014-08-03	103.3	27.1	VI	76.24	51.93	0	0	6.5	新疆皮山
				VII	40.70	29.41	0	0		

角； $R_a$ 、 $R_b$ 分别为椭圆长半轴和短半轴长度， $t_i(0 \leq \theta \leq 2\pi)$ 为椭圆上各点所对应的参数。

吴清等[1]根据我国现代大震资料统计拟合了地震破裂长度-震级关系式

$$\begin{aligned} \lg L &= -1.9227 + 0.4691 \cdot M \\ \sigma &= 0.5099 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $M$ 为震级， $L$ 为地表破裂长度。据此可以估计相应震级的地震可能伴随的地表破裂长度 $L$ 。以式(2)约束椭圆强震烈度分布模型，要求最内圈烈度估计等值线椭圆长轴要大于由公式(2)估计的地表破裂长度即

$$2R_a > L \quad (3)$$

对于既有仪器测量数据又有宏观调查烈度数据的现代地震，可获得地震的宏观震中位置 $(x_0, y_0)$ 、极震区走向 $\theta$ 和烈度点坐标 $(x_i, y_i)$ 。根据各烈度区调查点的空间分布 $(x_i, y_i)$ ，结合(1)式和(3)式利用最小二乘原理采用通用全局优化算法拟合出各烈度区椭圆估计等值线长半轴和短半轴 $R_a$ 和 $R_b$ ，由此获得各烈度区的椭圆烈度估计等值线。由于地震的宏观震中并不一定是该地震各烈度区的几何中心，因此对某些地震需要同时拟合出各烈度区的几何中心 $(x_0, y_0)$ 。这里烈度估计等值线长轴方向均取极震区走向 $\theta$ 。

以各自宏观震中坐标为原点(0,0)，将各地震对应烈度点都换入平面直角坐标系。表1给出了拟合所得的各地震各烈度区椭圆烈度估计等值线的长半轴和短半轴长度，拟合烈度估计等值线几何中心不同于宏观震中的也同样列在了表1中。表1中拟合烈度估计等值线的椭圆几何中心与宏观震中重合的，坐标即为(0,0)；几何中心与宏观震中不重合的，具体列出。

图1是 2013年7月22日甘肃岷县6.6级地震烈度估计等值线拟合结果，以宏观震中为平面坐标原点。图中小三角是烈度数据点，椭圆长轴方向为极震区走向，烈度估计等值线是对原始烈度点空间分布进行最小二乘拟合所得，可以看到烈度估计等值线趋向于原始烈度点空间分布的平均估计。

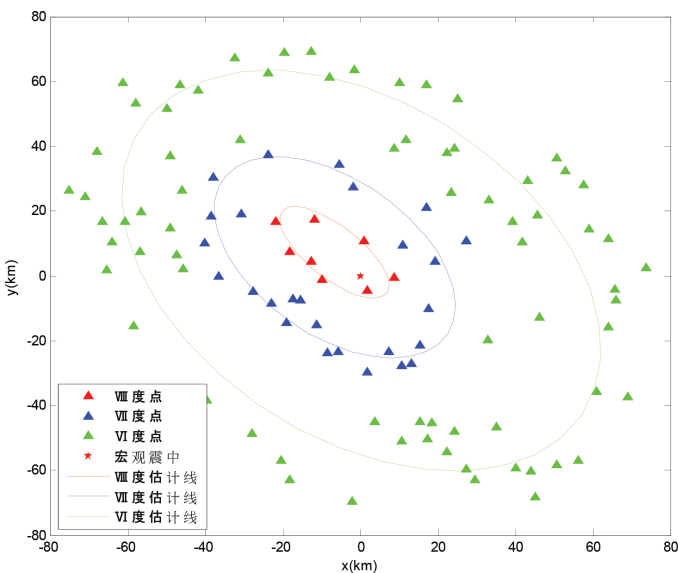


图1 | 2013年7月22日甘肃岷县6.6级地震烈度估计等值线分布图。

## 2.2. 中国西部地区强震烈度分布模型

本文据陈达生等[11]关于地震烈度椭圆衰减关系长短轴统一回归的思想，采用如下烈度分布模型：

$$I = a + b \cdot M + C_1 \log(R_a + R_{0a}) + C_2 \log(R_b + R_{0b}) + \varepsilon \quad (4)$$

式中， $I$ 为地震烈度， $M$ 为震级；系数 $a$ 、 $b$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 均为回归常数； $R_{0a}$ 、 $R_{0b}$ 分别为椭圆长、短轴两方向烈度近场饱和因子； $\varepsilon$ 为回归分析中表示不确定性的随机变量，通常假定为对数正态分布，其均值为0，标准差为 $\sigma$ 。该模型在震中处的烈度值随震级的变化率为常数 $b$ ，而中间距离仍保持长短轴烈度的差别，同时在远场也使烈度分布成圆形。需要强调指出的是，这里 $R_a$ 、 $R_b$ 分别是烈度 $I$ 的烈度估计等值线长短半轴长度，不再是等震线的长、短半轴长度。

将表1中各地震各烈度区的烈度估计等值线，按照公式(4)进行最小二乘统计回归。由于拟合的烈度估计等值线已经是对烈度点分布的综合估计，所以没有采取近场补点。但为了体现远场区发震构造影响消失，烈度分布趋于圆形的特点，汪素云等[12]提出取有感范围的半径作为远场控制点，有感烈度值通常为III-IV度，在计算中取为3.5度，称为远场补点。这里提出的有感半径有外包线的性质，而本文烈度模型主要是对烈度分布的综合估计，因此计算时远场控制烈度取为3度。有感半径与震级的关系见表2。

由原始烈度点拟合得到烈度区的估计等值线，进而统计回归得到地震烈度分布模型，其中 $I_a$ 为长轴方向， $I_b$ 为短轴方向：

$$I_a = 4.1428 + 1.821M - 5.1339 \lg(R_a + 25) \quad (5)$$

$$I_b = 0.4550 + 1.821M - 3.8636 \lg(R_b + 8) \quad (6)$$

$$\sigma = 0.692$$

## 3. 强震参数估计方法及验算

### 3.1. 强震参数估计方法

吴清等[1]给出了强震参数估计方法：

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{(x_i - x_0) \cdot \cos(\theta) + (y_i - y_0) \cdot \sin(\theta)}{\left( \frac{C_{1a} + C_2 \cdot M + \varepsilon - I_i}{10^{c_{3a}}} - R_{0a} \right)} \right]^2 \\ & + \left[ \frac{(x_i - x_0) \cdot \sin(\theta) - (y_i - y_0) \cdot \cos(\theta)}{\left( \frac{C_{1b} + C_2 \cdot M + \varepsilon - I_i}{10^{c_{3b}}} - R_{0b} \right)} \right]^2 = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

表2 | 有感半径与震级的关系[12]

R(km)	340	390	450	520	600	690	800	900	1100
M	$6\frac{1}{2}$	$6\frac{3}{4}$	7	$7\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{3}{4}$	8	$8\frac{1}{4}$	$8\frac{1}{2}$

式中,  $C_{1a}$ 、 $C_{1b}$ 、 $C_2$ 、 $C_{3a}$ 、 $C_{3b}$ 、 $R_{0a}$ 、 $R_{0b}$ 由烈度分布模型统计回归可得, 见式(5)(6)。 $(x_i, y_i, I_i)$ 为烈度数据点,  $(x_0, y_0)$ 为震中,  $M$ 为震级,  $\theta$ 为方向。若已知一个地震的多个烈度信息点 $(x_i, y_i, I_i)$ , 带入到(7)式, 即可联立方程组求得震中 $(x_0, y_0)$ 、震级 $M$ 和方向 $\theta$ 。有4个未知数, 则至少需要4个方程确定一组解, 但 $x_0$ 与 $y_0$ 不是相互独立的, 因此在已知烈度分布模型下, 3个烈度信息点就能确定一组震中、震级和方向。烈度信息点增多, 变成求解超定非线性方程组, 采用通用全局优化法的数值计算方法寻求最优解, 可非常直观的求得地震宏观震中位置、震级和方向。

参数估计方程是以椭圆数学方程为基础, 因此用于计算的烈度点不能分布于一条或接近于一条直线上, 否则在极端情况下将造成方程无解, 或所得数值解不满足地震参数的物理意义。

由于在建模过程中, 8.0级以上特大地震的资料太少, 因此本方法只适用于6.5~8.0级的历史强震, 对于8.0级以上的特大地震需要另行讨论。

中国大陆的地震绝大部分发生在地壳以内, 其震源深度差别不大[13], 因此本文暂不考虑震源深度对烈度分布的影响。

## 3.2. 震例验算

### 3.2.1. 内符检验

带入由1.2节得到的强震烈度分布模型系数, 公式(7)即变为:

$$\frac{[(x_i - x_0) \cdot \cos(\theta) + (y_i - y_0) \cdot \sin(\theta)]^2}{\left(10 \frac{4.1428 + 1.821 \cdot M - I_i}{5.1339} - 25\right)^2} + \frac{[(x_i - x_0) \cdot \sin(\theta) - (y_i - y_0) \cdot \cos(\theta)]^2}{\left(10 \frac{0.4550 + 1.821 \cdot M - I_i}{3.8636} - 8\right)^2} = 1 \quad (8)$$

为了验证此算法的可行性, 以参与强震烈度分布模型拟合的其中8个地震为例, 将各自的烈度数据点 $(x_i, y_i, I_i)$ 直接带入到方程(8)中进行试算, 计算时所有烈度点以各自地震的宏观震中为原点(0,0)转换到平面坐标下, 计算结果见表3。

由表3可以看到, 参与验算的8个地震, 计算震级与仪器震级的差值不超过0.5级, 计算震中到宏观震中的距离不超过10km, 由此可见此方法对参与模型拟合的地震集是可行的。

### 3.2.2. 外推检验

为了验证地震参数估计方程的外推有效性, 我们提取了3个没有参与模型拟合的强震烈度数据点, 将所有烈度数据点以各自地震的宏观震中为原点(0,0)转换到平面坐标下 $(x_i, y_i, I_i)$ , 然后直接带入到方程(8)中进行验算, 计算结果见表4。

由表4同样可以看到, 参与验算的3个地震, 计算震级与仪器震级的差值不超过0.5级, 计算震中到宏观震中的距离不超过15km, 由此可见此方法外推也是可行的。

与吴清等[1]得到的适用于全国的烈度分布模型相比, 由适用于西部地区的烈度分布模型估算得来的地震参数较为准确。

## 4. 天水及周边地区历史大震参数估计

通过前面的分析, 本文建立了一套适用于中国西部地区的烈度分布模型, 以此来估算天水及周边地区几个7.0级以上历史大震, 结果见表5。历史大震的烈度数据点均从《中国历史地震图集》(明、清时期)[14-15]中提取。由表5可以看到, 计算震级与图集震级相差不超过0.5级, 计算震中与图集震中相差不超过30km。由此可见, 《中国历史地震图集》里给出的强震参数还是比较可靠的。

## 5. 结论与讨论

本文建立了适用于中国西部地区的椭圆烈度分布模型, 并对天水及周边地区5个历史强震进行了地震参数估算, 结果表明《中国历史地震图集》里给出的强震参数还是比较可靠的。此方法对历史强震参数的估定颇为有效, 直接利用烈度数据点, 跳过对等震线的勾画, 处理过程直接明了, 一定程度上减少了主观不确定性, 提高了科学性。

本文旨在通过既有仪器测定记录又有宏观考察数据的现代大震建立参数估计模型, 但现代大震资料毕竟有限。模型是原型的抽象和简化表征, 与任何一个真实地震之间都存在偏差。随着技术的发展、科学的进步以及基础数据的积累, 需要对模型不断的改进以期更接近真实情况。

表3 | 内符验算计算结果

发震时 (年-月-日)	宏观震中		仪器震级 ( $M_s$ )	计算震级 ( $M_s$ )	计算震中平面坐标		$\Delta M$	$\Delta R$ (km)	参考地点
	Log(°E)	Lat(°N)			$x_0$	$y_0$			
1996-02-03	100.27	27.08	7.0	7.4	2.45	-3.35	0.4	4.15	云南丽江
2000-01-15	101.1	25.6	6.5	6.6	7.91	3.47	0.1	8.63	云南姚安
2000-09-12	99.53	35.4	6.6	6.2	0.02	7.75	-0.4	7.75	青海兴海
2010-04-14	96.85	33.06	7.1	7.0	1.1	-1.27	-0.1	1.68	青海玉树
2013-04-20	103.0	30.3	7.0	7.0	-2.51	-4.71	0	5.33	四川芦山
2013-07-22	104.2	34.5	6.6	6.7	-5.16	6.32	0.1	8.15	甘肃岷县
2014-08-03	103.3	27.1	6.5	6.8	8.2	-2.9	0.3	8.69	云南鲁甸
2014-10-07	100.5	23.4	6.6	6.6	2.16	-2.92	0	3.63	云南普洱

注:  $\Delta M$ : 计算震级-仪器震级;  $\Delta R$ : 计算震中到宏观震中平面距离。



表4 | 外推验算计算结果

发震时间 (年-月-日)	宏观震中		仪器震级 ( $M_s$ )	计算震级 ( $M_s$ )	计算震中平面坐标		$\Delta M$	$\Delta R$ (km)	参考地点
	Log( $^{\circ}E$ )	Lat( $^{\circ}N$ )			$x_0$	$y_0$			
1974-05-11	103.92	28.2	7.1	6.8	-0.44	-0.61	-0.3	0.75	云南大关
1995-10-24	100.25	25.88	6.5	7.0	-3.55	-1.71	0.5	3.94	云南武定
1996-03-19	101.15	25.95	6.9	7.0	-7.99	-8.49	0.1	11.65	新疆阿图什

注:  $\Delta M$ : 计算震级-仪器震级;  $\Delta R$ : 计算震中到宏观震中平面距离。

表5 | 天水及周边地区历史大震参数估算结果

发震时间 (年-月-日)	图集宏观震中		图集震级 ( $M_s$ )	计算震级 ( $M_s$ )	计算震中平面坐标		$\Delta M$	$\Delta R$ (km)	参考地点
	Log( $^{\circ}E$ )	Lat( $^{\circ}N$ )			$x_0$	$y_0$			
1352-04-26	105.3	35.6	7.0	7.2	-24.6	-14.2	0.2	28.4	甘肃会宁东南
1654-07-21	105.5	34.3	8.0	8.2	13.5	-2.41	0.2	19.8	甘肃天水南
1718-06-19	105.2	35.0	7.5	8.0	-5.57	-5.56	0.5	7.87	甘肃通渭南
1879-07-01	104.7	33.2	8.0	8.2	8.58	-21.82	0.2	23.4	甘肃武都
1927-05-23	102.7	37.5	8.0	8.2	2.16	-2.69	0.2	3.45	甘肃古浪

注:  $\Delta M$ : 计算震级-图集震级;  $\Delta R$ : 计算震中到图集宏观震中平面距离。

### 致谢

本文由科技部基础资源调查专项(2018FY100504)资助。

### 参考文献

[1] 吴清, 高孟潭, 基于烈度数据点的历史强震参数估计研究. 中国地震 2016;32:11-27.

[2] 张肇诚, 罗兰格, 李海华等, 中国震例(1966-1975). 北京: 地震出版社; 1988.

[3] 张肇诚, 罗兰格, 李海华等, 中国震例(1976-1980). 北京: 地震出版社; 1990a.

[4] 张肇诚, 罗兰格, 李海华等, 中国震例(1981-1985). 北京: 地震出版社; 1990b.

[5] 张肇诚, 郑大林, 罗平等, 中国震例(1986-1988). 北京: 地震出版社; 1999.

[6] 张肇诚, 郑大林, 徐京华等, 中国震例(1989-1991). 北京: 地震出版社; 2000.

[7] 陈棋福, 郑大林, 车时, 中国震例(1992-1994). 北京: 地震出版社; 2002a.

[8] 陈棋福, 郑大林, 刘桂萍等, 中国震例(1995-1996). 北京: 地震出版社; 2002b.

[9] 陈棋福, 郑大林, 高荣胜, 中国震例(1997-1999). 北京: 地震出版社; 2003.

[10] 陈棋福, 郑大林, 车时等, 中国震例(2000-2002). 北京: 地震出版社; 2008.

[11] 陈达生, 刘汉兴, 地震烈度椭圆衰减关系. 华北地震科学, 1989;7:31-42.

[12] 汪素云, 武宦英, 华北地区地震烈度的衰减关系, 中国地震区划文集. 北京: 地震出版社; 1993. p. 185 - 91.

[13] 刘百箴, 郑文俊, 郭华等, 活断层工作方法在中早期历史地震研究中的作用. 中国地震 2002;18:283-8.

[14] 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学中国历史地理研究所, 中国历史地震图集(明时期). 北京: 地图出版社, 1989.

[15] 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学中国历史地理研究所, 中国历史地震图集(清时期). 北京: 中国地图出版社, 1990. Available from: <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/index.html>