

1556年陕西省华县大震的地震地质条件

侯建军

(北京大学地质系)

摘 要

本文论述了华县大震高烈度区断裂的现代活动性,分析了区域新构造应力场,指出了华县大震发生的构造部位,估算了华县地震区的发震周期,并结合有限元计算,初步探讨了地下应力状态与华县大震的关系。

一、概 况

1556年陕西省华县发生了八级地震,地表破坏严重。等震线北疏南密,九度区范围包括现今陕西省的西安、临潼、渭南、华县、华阴和山西省的永济、运城等地,呈现与汾渭盆地形态相似的新月形(图1)。高烈度区等震线长轴方向与近东西向活动断裂展布方向一致。

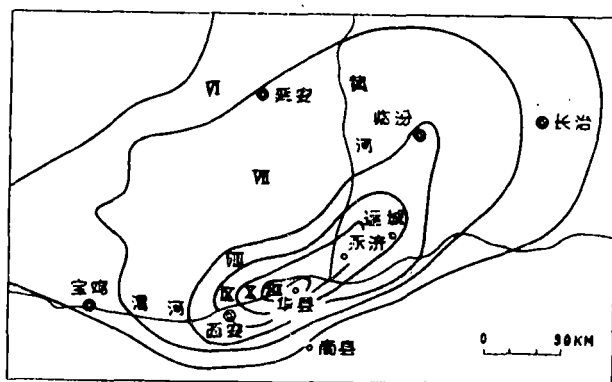


图1 1556年1月23日陕西华县地震等震线

Fig.1 Isoseismal map of the Huaxian earthquake ($M=8$)
on January 23, 1556 in Shanxi Province.

二、震区主要活动断裂

华县大震区活动断裂十分发育, 主要有近东西向、北西向和北东向三组, 现代活动十分强烈。这些断层的晚近活动性均表现为正断性质, 有的为正断兼走滑型(图2)。

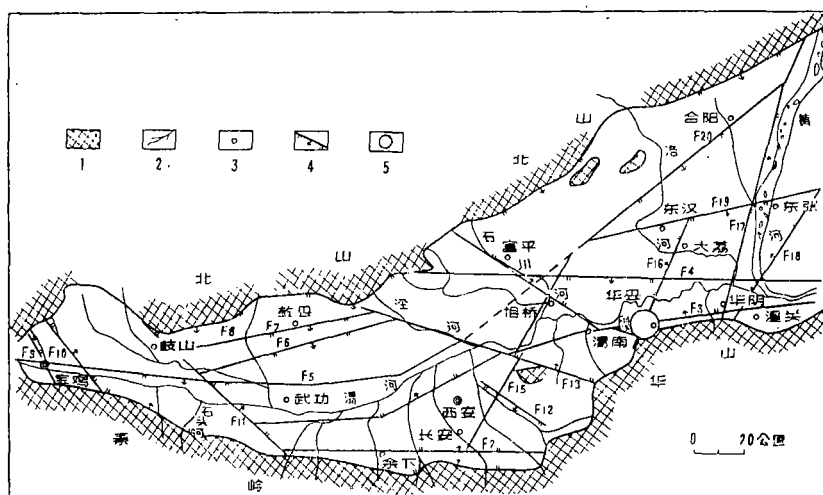


图2 渭河盆地主要活动断裂分布图

1. 山地 2. 河流 3. 地名 4. 活动断裂及编号

F ₁ 秦岭北麓断裂	F ₆ 扶风—礼泉断裂	F ₁₁ 哑柏断裂	F ₁₆ 赤水—大荔断裂
F ₂ 余下断裂	F ₇ 乾县断裂	F ₁₂ 渭河断裂	F ₁₇ 黄河断裂
F ₃ 渭南南岸断裂	F ₈ 北山南麓断裂	F ₁₃ 泾河断裂	F ₁₈ 潼关—中条山西麓断裂
F ₄ 口镇—关山断裂	F ₉ 金陵河断裂	F ₁₄ 赤水—瓜坡断裂	F ₁₉ 东汉—东张断裂
F ₅ 渭河北岸断裂	F ₁₀ 千阳河断裂	F ₁₅ 长安—相桥断裂	F ₂₀ 合阳断裂

Fig.2 Main active fractures in the Weihe basin.

1. 华山北麓活动断裂(F₁): 近东西走向, 断面向北倾, 倾角76度。该断裂在地貌上构成了陡峻的华山山地与渭河平原的分界线。断裂北盘强烈下降, 第四纪沉积厚度最大达千余米; 南盘强烈上升, 断层陡崖及坡度转折十分清晰, 沟谷深切成V型谷和嶂谷, 跌水现象屡见不鲜, 如图3所示。该断层陡坎有五个明显的坡度转折, 对应于上游的三级阶地和两级河漫滩, 相对于华山峪口的高度分别为1米、2.2米、10.2米、46.2米和106.2米。表明断层至少有五次新活动, 断层南盘上升时使华山峪侵蚀基准面下降而发生溯源侵蚀, 形成裂点和阶地。近华山峪口的三个裂点与断层陡坎三个较低的坡度转折一一对应, 向上游由于河流弯曲较大, 不易进行对比。但断层陡坎较高处的两个坡度转折, 仍可与较高的两级阶地进行对比。发源于华山的其它河流也有这种现象, 但不如华山峪清晰。考虑到八级大震的突然错动量可达八米^[1], 在华县县委招待所东侧南北向的地震陷落沟最深处已近10米, 因此认为华山北麓断层陡坎在10.2米高度处的转折(相对2.2米高度处坡度转折的高差为8米)是华县大震的结果, 它所对应的河流裂点现已溯源侵蚀了140米的距离, 平均溯源侵蚀速率为0.33米/年。华山峪自源头到山前长度为4公里, 据此计算出华山峪的发育历史为1万2千多年。表明华山北麓断裂全新世以来垂向活动频繁且剧烈。更高处的坡度转折可能为断层几次活动的结果, 只是时间相对较长, 断层陡坎剥蚀较大, 不易测出其微小的坡度转折。

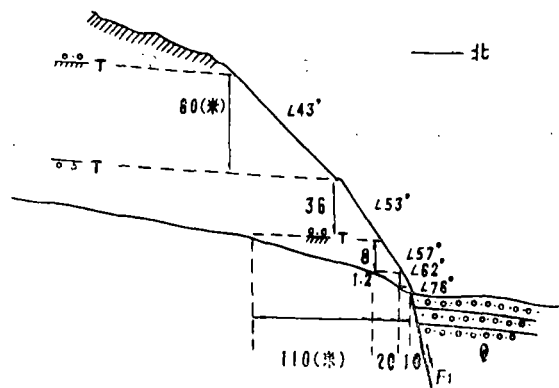


图3 华山峪阶地、裂点与断层陡坎坡度转折对比图

Fig.3 Comparison between Huashanyu terrace, fracture points and turning of fault slope.

华山北麓断裂的水平运动十分强烈，主要表现在断错水系上。源于华山的河流由南向北流，出山口后大多数河流有向西的扭曲现象（表1）。

华山北麓断错水系的统计

表1

河流名称	源头至峪口距离(米)	扭曲距离(米)	扭曲性质	河流历史(万年)	平均扭动速率(厘米/年)	备注	河流名称	源头至峪口距离(米)	扭曲距离(米)	扭曲性质	河流历史(万年)	平均扭动速率(厘米/年)	备注
华山峪	4000	200	反扭	1.2	1.7	带*号的河流表示现在已人工改道	柳峪	5500	无		1.6		河流历史是据华山峪裂点的溯源侵蚀速率推算的
仙峪	10000	600	反扭	3.0	2.0		葱峪	6500	无		1.9		
台峪*	2500	150	反扭	0.7	2.0		方山峪*	7000	200	反扭	2.1	1.0	
瓮峪	8000	无		2.4			构峪	7500	无		2.2		
竹峪	5500	250	反扭	1.6	1.6		白崖峪*	5500	400	反扭	1.6	2.5	
大夫峪	15000	无		4.5			小夫峪	13000	450	反扭	3.9	1.2	

由表1看出，较大的河流发育历史较长，扭曲距离也较大。断层的总平均扭动速率为1.7厘米/年，据此估算出华县大震时断层水平扭动距离至少应大于7.3米（实际应远大于7.3米，因是按河流发育以来的平均扭动速率计算的，未考虑地震时突然的水平扭动）。

源于华山的少数河流穿过该断层时无扭曲现象，可能受局部地形、人为因素等的影响。

2.渭河南岸活动断裂（F₃）：近东西走向，断层面向北倾斜，为高角度正断层。断层各段在地貌上表现不一。临潼—渭南段，构成渭南黄土台源与冲积平原的分界线。据地质部第三普查勘探队资料*，断层两盘第三系厚度差1400米，第四系厚度差97.3米。华县—华阴段，地貌上无明显反映，7波段卫星照片上显示为一条黑而粗的条带。渭河南岸支流赤水河、遇仙河、石堤河、罗纹河和长涧河等，开始筑堤的连线与该断层走向线一致。赤水河穿过断层时，由砾石河漫滩突变为砂泥河漫滩。华县赤水镇西赤水河公路桥，位于断层的下降盘，可见新桥建于老桥之上。华县大震的最高烈度区等震线长轴方向也与断层走向线吻合。断层再向东沿潼关黄土台源北缘延至河南灵宝盆地。沿渭河南岸断裂地震活跃，自东向西有1569年和1789年风陵渡两次5级地震、华县793年6级、1556年8级和1558年5级地震，临

*地质部第三普查勘探队，汾渭盆地石油普查阶段地质成果报告，1977。

潼北1568年5.5级地震等,反应了断裂的现代活动性与控震性。

3. 赤水—瓜坡北西向断裂(F_{14})和潼关源西缘—中条山西麓北东向断裂(F_{18}): 这两条活动断裂在地貌上分别构成了渭河冲积平原与渭南黄土台源、潼关黄土台源的分界线,它们所挟持的地块(华县—华阴一带),现代强烈下沉,沼泽洼地甚多,渭河穿过这两条断层时,阶地位相突变(图4、表2)。在渭南和潼关两处,发育有三级阶地,其中第一级阶地由全新世沉积物组成,第二级和第三级阶地由更新世沉积物组成。而华县—华阴段只发育一级低阶地,由全新世沉积物组成,更新世沉积物埋入地下,表明这两条断层均作反差运动。中国科学院地理研究所^[2]在渭南南岸支流沱河上游第二级阶地(相当于渭河的第二级阶地)底部,挖到几块轻度炭化的木头,经国家地震局地质研究所 C^{14} 测定,绝对年龄为 23100 ± 850 年。据此推算出自第二级阶地形成以来,赤水—瓜坡断裂和潼关源西缘—中条山西麓断裂反差运动速率为0.26厘米/年。

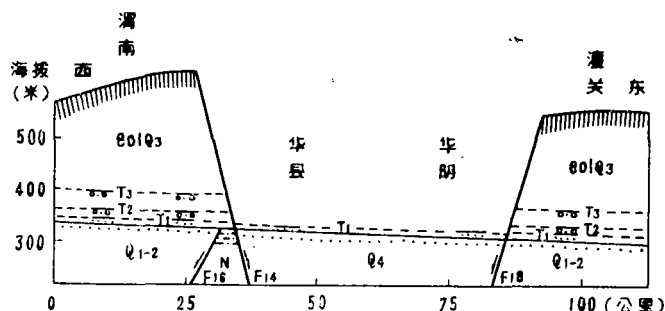


图4 渭河南岸阶地位相图(渭南—潼关)

Fig.4 The distribution of terraces of the South bank of Weihe River.

4. 赤水—大荔北东向活动断裂(F_{18}): 西南起赤水镇,向东北经孝义、龙池、羌白至大荔西,走向北东 35° 。在地貌上,渭河的赤水至孝义段沿断层发育(见图2),孝义至大荔表现为长条形积水洼地。在地层上,新第三系与第四系直接呈断层接触(见图4)。

渭河南岸阶地(渭河—潼关段) 表2

阶地时代	河流高度 级数	点		
		渭南	华县—华阴	潼关
Q4	T1	11米	6—10米	10米
Q3	T2	27米	无	26米
Q2-3	T3	60米	无	70米

三、区域新构造应力场

华北断块区新生代以来构造应力场主压应力作用方向为北东—南西向。渭河盆地位于华北断块区西南端,构造应力场作用方式与整个华北区一致,这可从以下得到证实。

1. 河流流向的统计分析

河流流向的高度规律性,是受现代构造应力场所控制的;河流流向的随机性,是其它因湍影响的结果。因此,我们统计了渭河及其支流的流向,定出四个最优方位(图5),即 0° 、 30° 、 100° 和 130° 方向。根据实际分析,认为 0° 和 100° 这两个最优方位主要是反映了渭河及其一级支流的流向,而 30° 和 130° 方向则主要反映了更次级支流的流向。因而将 0° 和

100°、30°和130°进行了配套,考虑到渭河盆地近东西向断裂的反扭运动,区域主压应力方向应在北东—南西象限,由此得出主压应力方向为50°和80°。

2.震源机制解和地壳形变测量

渭河盆地及邻区的震源机制解资料表明,主压应力方向与宏观现象一致,为北东—南西向主压应力,压应力轴仰角较大。张应力轴一致性较好,为北西—南东向,近于水平(表3)。

地壳形变测量资料如韩城基线场跨北东向断层的测量*,反映断层具有顺扭运动,表明了主压应力方向为北东东向。

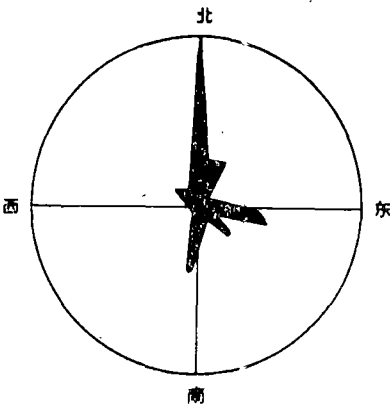


图5 渭河及其支流流向玫瑰图

Fig.5 Rose diagram of flowing directions of Weihe River and its tributaries branches

陕西、山西1965—1977部分地震震源机制解 表3

发震时间	震源位置		震级 (M)	A 节 面			B 节 面			P 轴		T 轴		N 轴	
	震 中 位 置	震源深度 (km)		走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	走向	仰角	走向	仰角	走向	仰角
1965.1.13	山西恒曲	10	5.5	10	NW	64	91	SW	72	72	28	321	6	59	57
1967.12.18	山西蒲县	30	5.4	125	NE	80	82	NW	71	40	21	308	7	201	68
1971.9.30	山西河津	30	3.3	23	NW	65	94	SW	53	246	46	147	8	50	43
1972.8.30	陕西凤翔西北	19	2.4	90	N	40	139	SW	65	275	63	28	15	124	25
1973.2.14	陕西陇县	23	3.0	19	NW	45	74	SE	60	218	58	319	8	54	30
1973.8.26	山西河津南		2.2	22	NW	65	98	SW	65	241	39	150	2	58	52
1973.12.2	陕西合阳、大荔	20	2.4	55	NW	65	101	SW	34	288	62	162	17	85	21
1974.4.27	陕西韩城		2.0	44	NW	40	88	SE	58	288	66	339	10	73	22
1974.5.31	陕西陇县	32	3.7	84	SE	34	150	NE	75	94	52	218	25	321	30
1975.12.25	陕西渭南北	29	2.3	30	NW	44	73	SE	55	220	66	323	6	56	23
1976.1.22	陕西淳化		2.5	52	NW	55	127	SW	70	266	37	5	12	103	48
1976.2.8	陕西淳化		3.1	42	NW	65	121	SW	66	262	36	172	0	81	53
1977.1.31	山西忻县北		4.0	43	SE	45	319	SW	85	82	26	191	34		

(据陕西省地震综合队)

四、华县大震发生的构造部位及发震周期的估算

华县大震震中位于华县至赤水镇一带,地貌上处于华山山地、渭南黄土台源和冲积平原

* 国家地震局第二测量队,关中地形变与地震形势估计,1980。

的交接部位。这些地貌单元分别受华山北麓断裂和赤水—瓜坡断裂的控制。从华县大震等震线的形状看,高烈度区等震线长轴方向与渭河南岸断裂走向线一致,可能反映华县大震的发震构造是渭河南岸断裂。从活动断裂的水平运动来看,在区域北东东向主压应力作用下,近东西向的渭河南岸断裂为反扭运动,北东东向的赤水—大荔断裂为顺扭运动,在它们的交汇部位—华县一带构成应力闭锁区。从深部构造特征看,在渭河盆地内部康腊面深度为18公里,向南北两侧加深至20公里*,表明康腊面有一北东东向的隆起。莫霍面在盆地中心深度为37公里,向南北两侧加深^[8],与康腊面形态相似,即呈近东西向的隆起。近年来渭河盆地及邻区地震的震源深度一般都在地下20公里左右(见表3),即在康腊面附近,表明地壳垂向上的分层及莫霍面和康腊面上拱时引起的层间滑动,对地震有一定的控制作用。因此认为,震区地壳垂向上分层和近东西向渭河南岸断裂与北东东向赤水—大荔断裂的交汇,是华县大震的构造条件,区域北东东向主压应力的作用和莫霍面、康腊面的上拱是华县大震的动力条件。

华县大震是历史上少见的大地震,距今已有400多年的历史了,会不会重复发生、发震周期有多长?这是人们十分关切的问题。我们根据公式

$$T = D / \bar{V}$$

进行估算,式中: T 为发震周期, D 为一次地震的错动量, $\bar{V}$ 为断层的平均位移速率。暂以华山北麓断层的总错动量(指华县大震时的突然错动量,应大于10.8米)及平均水平运动速率(1.7厘米/年)为依据,求得发震周期大于635年。若能求出华县大震的发震断层—渭河南岸断层的平均运动速率及地震时的位移量,期望能得到更准确的发震周期。

五、有限单元的模拟计算

上面定性分析了华县大震的构造背景,认为近东西向断裂和北东东向断裂的交汇部位,是地震发生的有利部位。但在相似的构造条件下,为什么八级大震发生在华县,这就促使我们从地下应力的分布方面来考虑。因此,进行了有限单元的模拟计算,试图从相对定量的角度来解释华县大震的成因。

1. 区域边界和区内构造骨架的选取

强震的孕育与发生主要受区域应力场控制,计算时以较小的构造单元作为独立的构造应力场更为合适*。因而我们取渭河盆地作为一个独立的构造单元,以控制渭河盆地边界的大断裂作为区域边界。南取秦岭北麓断裂(F_1)作为固定边界,北边以北山南麓断裂(F_2)、东边以黄河断裂(F_{17})西边以哑柏断裂(F_{11})作为受力边界。区内取与华县大震有关的主要活动断裂作为构造骨架,并将相邻同方向的断裂合并在一起,作为一个断裂带来考虑,断裂带宽度取6公里。按有限元计算的要求,把区域划分成四边形和三角形两种单元(图6)。

2. 材料的力学参数和边界上作用力的选取

* 地质部航空物探大队, 1:200万泛华北地区深部磁性块体平均深度图(初稿), 1979。

* 罗焕炎等, 邢台地震与唐山地震的有限单元分析, 1979。

参照文献〔4〕和〔5〕, 将断层带以外, 视为均匀弹性体, 取杨氏模量 $E = 8.3 \times 10^5$ 公斤/厘米², 泊松比 $\nu = 0.25$, 断层带内岩石经过错动, 杨氏模量取得低一些, 但仍将其视为各向同性体, 取 $E = 3.0 \times 10^5$ 公斤/厘米², $\nu = 0.25$ 。

近年来, 渭河盆地及邻区地震的震源深度均在地下10到30公里范围内(见表3), 因此取地下15公里深处的一层地壳所受水平作用力, 模型未考虑时间因素和铅直方向上的作用力。参照文献〔4〕取区域最大主压应力 $\sigma_3 = -6000$ 公斤/厘米², 最小主压应力 $\sigma_1 = -2000$ 公斤/厘米²。考虑到我们所求出的最大主压应力方向的变化范围, 取北东50°、70°和90°三个方向的最大主压应力分别计算, 进行对比分析。

基本数据选定后, 我们采用了NONSAP程序〔8〕, 在FELIXC—512型计算机上进行了计算。

3. 计算结果

破坏性地震往往发生在应力集中部位, 特别是剪应力的集中部位。因此, 我们将计算得出的剪应力值绘制成图(见图6)以便分析。当最大主压应力方向取北东50°时, 盆地东部

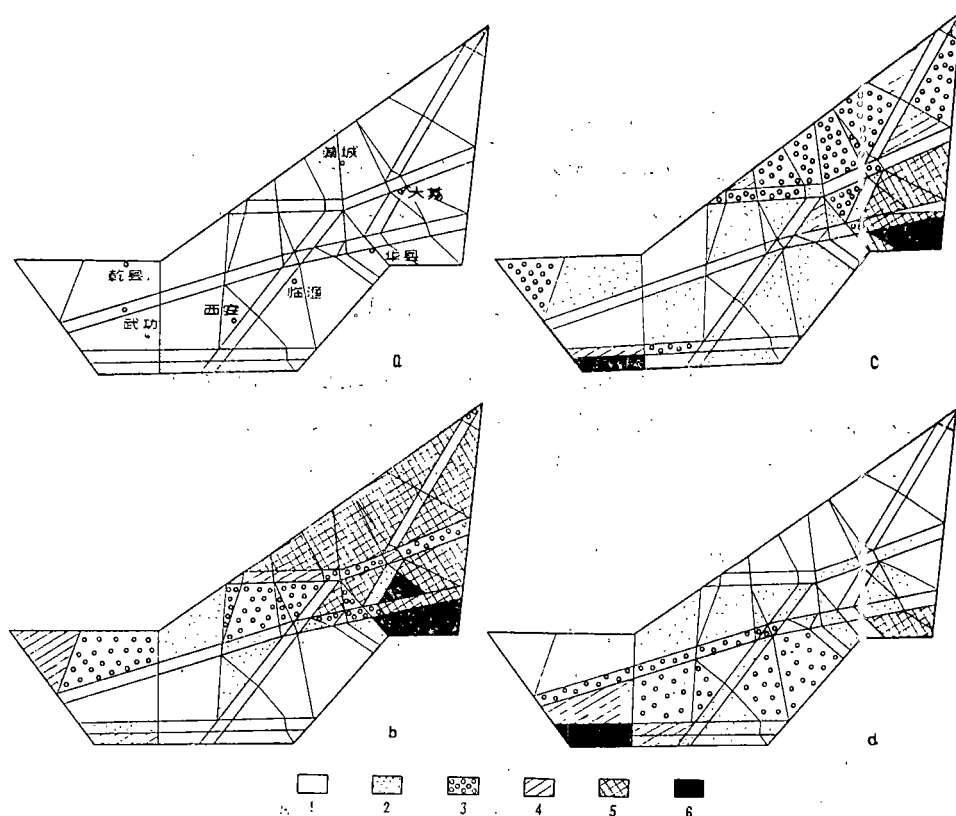


图6 渭河盆地有限单元模型

1. 小于500 2. 500—1000 3. 1001—1500 4. 1501—2000 5. 2001—3000 6. 大于3000

a. 有限单元网格 b、c、d分别为北东50°、70°和90°方向的最大主压应力作用下模型中最大剪应力值的分布

Fig.6 The model of the finite element of Weihe basin.

剪应力相对集中, 尤其是华县一带, 剪应力高度集中, 盆地西部剪应力值较小。当主压

应力方向取北东 70° 时, 华县一带剪应力仍较集中。当主压应力取 90° 方向时, 盆地东部剪应力值较小, 西南部地区剪应力值增大。因此认为, 在区域北东 50° 和 70° 方向主压应力作用下, 盆地东部地震危险性大于西部, 华县一带剪应力最为集中, 与实际情况符合较好。在区域 90° 方向主压应力作用下, 盆地东部剪应力值较小, 与实际情况符合不好。因而, 这从反面证明了区域主压应力方向应为北东 50° 至 70° 。

由上看出, 各单元的剪应力值, 随着主压应力作用方向的改变而变化。因此, 准确测量现今区域主压应力的作用方向, 并进行相应的有限单元模拟计算, 有利于确定未来地震的发震部位。

参加部分野外调查的有北京大学地质系毕业生李文浩、陈健、张彦山、郭敬、张建国、焦亦凡和韩竹君。北京大学地质系兰腊宝老师对有限元的计算给予了具体帮助, 欧阳青老师对本文给予了精心指导, 西安地质学院王景明老师也给予了指导和帮助, 在此一并致谢。

(本文1984年3月26日收到)

参 考 文 献

- [1] 郭增建、秦保燕, 震源物理, 地震出版社, 1979.
- [2] 中国科学院地理研究所渭河研究组, 渭河下游河流地貌, 科学出版社, 1983.
- [3] 张文佑等, 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模型, 地质学报, Vol.57, №1, 1983.
- [4] 王仁等, 华北地区地震迁移规律的数学模拟, 地震学报, Vol.2, №1, 1980.
- [5] 马瑾等, 唐山地震与地震危险区, 地震地质, Vol2, №2, 1980.
- [6] 杨景春等, 史前地震及其鉴别标志的几个问题, 史前地震与第四纪地质文集, 陕西科学技术出版社, 1982.
- [7] Ai Nanshan, Li Yulong, Scheidegger, A. E. and Xu Shuying, The Neotectonic Stress Field in the Regions of Shanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai (China), Rock Mechanics 14, 1981.
- [8] Bathe, K. T. et al., Static and Dynamic Geometric and Material Nonlinear Analysis, Sesm Report, №74—4, 1974.

THE SEISMIC AND GEOLOGIC CONDITIONS OF
THE EARTHQUAKE IN HUAXIAN, SHANXI
(M=8.0, JAN. 23, 1556)

Hou Jianjun

(*Department of Geology, Beijing University*)

This paper relates to the recent and present rupture activities in the maximum intensity area of the Huaxian great earthquakes (M=8.0, Jan. 23, 1556) and makes an analysis of neotectonic stress field. It tells the tectonic sites where the earthquake occurred, estimates the period of earthquake occurrence in this area and probes by means of the finite element method into the relation between the underground stress and the Huaxian great earthquake.