

## 延怀盆地设定地震浅析

文彦君

(宝鸡文理学院 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:**通过延怀盆地构造背景、新构造活动、古地震等资料的分析,综合构造应力场模拟、构造类比、大震离逝率、孕震蓄能等因素及由经验公式推断的研究结果,对延怀盆地设定地震相关参数进行了研究。结果表明,延怀盆地设定地震的震级上限为7,发震断层为方家冲—营门矿段断层,震源深度为10 km左右。

**关键词:**设定地震;震级上限;发震断层;延怀盆地

**中图分类号:** P315.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2008)02-0159-04

## Preliminary Study on Scenario Earthquake in Yanqing - Huailai Basin

WEN Yan-jun

(Key Lab of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating in Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Science, Shaanxi Baoji 721013, China)

**Abstract:** Through analyzing the data of tectonic background, neo-tectonic movement, paleoearthquake, based on the research results by the means of tectonic stress field simulation, seismogenic structure similarity, strong earthquake elapsing rate, quake-breeding and energy-storing condition, et al., the scenario earthquake parameters in Yanqing - Huailai Basin are preliminarily studied. The result shows that the maximum magnitude of scenario earthquake is 7, on the seismogenic fault of Fangjiachong - Yingmenkuang, and focal depth is about 10 km.

**Key words:** Scenario earthquake; Maximum magnitude; Seismogenic fault; Yanqing - Huailai basin

## 0 引言

目前,区域地震危险性研究的一个重要方向是利用区域地震活动的历史资料,对区域内的中长期大震进行概率性或确定性预测,进而以地球物理学、地震地质理论为基础,结合活动断层活动、地壳结构等资料,综合研究该区域的设定地震,为区内及周边重大工程的抗震设防和加固提供一定依据。

本文在前人研究基础上对延怀盆地设定地震进行了综合研究,初步确定了设定地震的震级上限、发震断层及震源深度。

## 1 延怀盆地地震危险性

延怀盆地地震危险性前人研究比较深入,已有

大量成果,本文主要进行资料的归纳总结。

## 1.1 区域构造背景及新构造运动概况

延怀盆地位于NE向山西地震带与NW向张家口—蓬莱地震带交汇位置。地震活动及区域形变场分析表明山西地震带北部地区今后几年内可能成为地震能量释放区<sup>[1]</sup>;地震活动特征表明张家口—蓬莱地震带西区发生7级以上强震的可能性较大<sup>[2]</sup>。

热田深井资料表明延怀盆地片麻岩基底已经十分破碎。第四纪以来盆地内部新构造差异运动强烈,如:延庆盆地的第四系沉积物厚达2 000 m以上。盆地内断层发育,NE向、NW向及NNE东向三组活动断裂带多处交汇,使得应力易于集中<sup>[3]</sup>(图1)。

收稿日期:2007-10-09

基金项目:国家自然科学基金(40471053);陕西省重点实验室项目(05JS40)及宝鸡文理学院重点科研项目(ZK0796)

作者简介:文彦君(1978-),男(汉族),陕西宝鸡人,讲师,主要从事区域地震危险性 & 灾害地质等方面的研究。

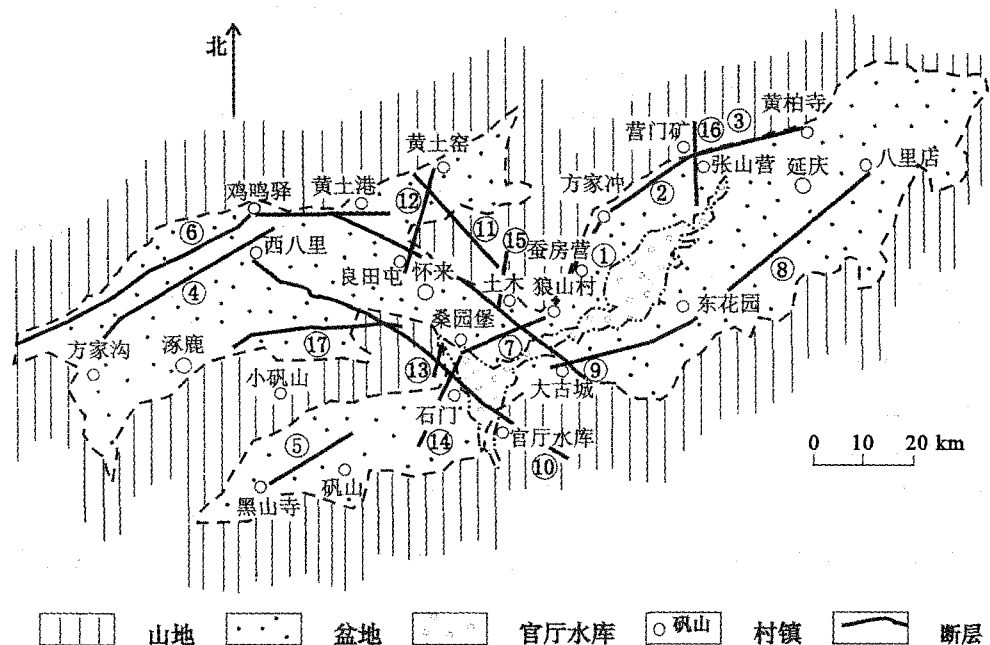


图1 延怀盆地主要断层分布(据吴子荣等(1979);冉勇康等(1991);程绍平等(1995)改编)

Fig. 1 Distribution of major faults in Yanqing - Huilai basin.

延怀盆地断层活动从1987年开始进入了强烈活动时段并持续至今。怀来—涿鹿盆地北缘断层、狼山断层和张山营(大西山)断层等扭动速率平均为相对平静时段的5~6倍<sup>[4]</sup>。该地区的地壳垂直形变异常分布突出,等值线分布密集,规律性好,部分活动断层形成了明显的梯度带,反映了地壳应变快速变化或加强。参照唐山地震时的地壳变形,本区已具有大震来临的前兆特征<sup>[5]</sup>。

## 1.2 区域地震活动性分析

截止到1994年3月31日有历史或现代仪器记录的4.7级以上地震共23个,6级以上地震4个:294年6级、1337年6.5级、1484年6¾级及1720年6¾级地震<sup>[6-7]</sup>,震级最大的为1720年沙城6¾级地震。4.7级以上地震空间上主要分布在NW和NE向活动断层及其交汇部位、差异运动强烈地段<sup>[7]</sup>。

根据1980—2004年的小震定位研究结果,延怀盆地小震活动主要集中在延怀盆地北缘断裂等深断裂下部,很可能是延伸至莫霍面的深断裂带在地壳上部脆性破裂的响应,具有深部构造背景,反映了延怀盆地最新的构造变动,表明该区发生较强烈地震的可能性有所增加<sup>[8]</sup>。

## 1.3 地壳深部构造特征

### 1.3.1 壳幔结构分析

目前,研究地壳及上地幔结构的地球物理方法日趋先进<sup>[9]</sup>,据前人研究延怀盆地地震区与邢台、

海城及唐山地震区都具有地幔上隆、壳内和上地幔顶部有低速-高导层分布;中下地壳内有高角度深断裂;波速比、岩石密度、温度等不均匀分布等异常现象<sup>[6]</sup>。这表明上地壳岩石成分不均匀,断裂发育程度高,应力易于集中。

### 1.3.2 地壳深部磁性构造特点分析

研究区居里等温面在怀来、涿鹿盆地的深部为一明显的隆起,地表有温泉出露。地壳在水平方向上由不同磁性地壳块体拼接镶嵌而成,而地震多发生在块体边界。研究区不同磁性地壳块体的构造运动为应力的积累、调整和释放提供了一定的条件<sup>[10]</sup>。

## 2 设定地震的构造应力场模拟方法研究

由以上分析可知,延怀盆地有发生大震的危险性。本文利用有限元方法模拟构造应力场,以初步确定延怀盆地设定地震的相关参数<sup>[11]</sup>。

### 2.1 模拟中的库仑剪破裂准则

一般认为剪切破裂是华北地区地壳岩石发生破裂而引起地震的主要形式。库仑剪破裂准则主要研究岩石发生剪切破裂时各种应力之间的相互关系,数学表达式为

$$\tau = S_0 + \mu\sigma \quad (1)$$

其中 $\tau$ 和 $\sigma$ 为作用于剪破裂面上的剪应力和正应力, $S_0$ 为内聚力强度, $\mu$ 为内摩擦系数。可见内聚力

强度低,剪应力数值大,正应力相对较小都是利于地震发生的因素。而且由于活动断裂  $S_0$  和  $\mu$  值均较小,因此断层活动所需的剪应力比形成新断裂要小得多。

### 2.2 华北北部强震危险区的主要标志

根据上面的分析,前人给出了华北北部强震危险区的主要标志<sup>[12]</sup>:

- (1) 最大剪应力相对集中的高值区;
- (2) 围压相对较小的引张区;
- (3) 可能发震的断裂的走向同临界走向断裂相近或相同。

临界断裂走向是指走向与最大主压应力  $\sigma_1$  夹角为  $\alpha_0$  的断裂,也可以说该断裂的法向与最小主压应力  $\sigma_2$  的夹角为  $\alpha_0$ 。其中  $\alpha_0$  满足如下关系:

$$\tan \beta = \mu \quad (2)$$

$$\beta = 90^\circ - 2\alpha_0 \quad (3)$$

库仑剪破裂定律如图2所示。由于地质研究中以压应力为正,所以图中  $\sigma_1$  为最大主压应力。华北北部地区  $\mu = 0.5 \sim 0.7$ <sup>[12]</sup>, 带入上式可得  $\alpha_0 = 27^\circ \sim 31^\circ$ 。

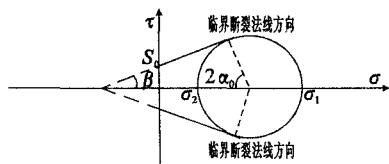


图2 岩石库仑剪破裂准则示意图

Fig.2 Sketch of Coulomb criteria of shear fracture in rock.

### 2.3 发震断层

假定延怀盆地的构造应力场随深度变化不大<sup>[12]</sup>,采用平面有限元模型的构造应力场模拟结果表明,延怀盆地最小主压应力方向为  $325^\circ$  左右。对区内剪应力集中的两条断层进行比较(表1),可知设定地震发震断层为狼山—黄柏寺断层的第二段落,应力集中部位邻近营门矿及张山营<sup>[13]</sup>。

表1 延怀盆地未来可能发震断层分析

断层名称	最大剪应力 /[N·m <sup>-2</sup> ]	最大主应力 /[N·m <sup>-2</sup> ]	断层走向与最大 主应力方向夹角 (即断裂法向与最小 主压应力方向夹角)
狼山—黄柏寺断裂	$5.68 \times 10^6$	$3.88 \times 10^5$	$27^\circ \sim 33^\circ$
鸡鸣驿—黄土港断裂	$4.79 \times 10^6$	$1.09 \times 10^5$	$8^\circ$

### 2.4 震级上限及其他震源参数

从工程安全的角度出发,采用经验调整法确定设定地震的震级上限。延怀盆地有历史记录的最大震级为  $6\frac{3}{4}$  级,由此确定的最大震级为  $7\frac{1}{4}$  级<sup>[13]</sup>。

根据中国地震目录的记载,延怀盆地及其附近地区浅源地震的震源深度在  $10 \sim 25$  km 范围内。

## 3 设定地震的活断层理论研究

利用活动断层的定量参数进行地震危险性评估,可初步预测未来发生地表破裂型地震的地点和震级上限,对发震的危险程度作出一定的评价。

### 3.1 设定地震发震断层的确定

活断层理论综合考虑潜在震源区的地质构造、强震离逝及其他因素来确定地震危险性最大的潜在震源区,即发震断层。除了活断层定量参数,本文将强震构造标志纳入考虑。延怀盆地属于山西地堑系地震构造区,强震构造标志主要有<sup>[14]</sup>:

- (1) 盆地主控断裂带上差异或升降运动幅度最大的地段;
- (2) 两段断裂斜列阶区的转折部位;
- (3) 弧形断裂中曲率最大处的盆地一侧;
- (4) 水平剪切分量较大的断裂或断层段落上。

延怀盆地各断层或断层段落的地震危险性分析结果可总结如表2。

在评价可能的发震断层时,主要考虑强震离逝率的影响,再加入强震构造标志因素,用活断层理论确定的地震发生地点为方家冲—营门矿段断层及方家冲—狼山段断层。

### 3.2 设定地震震级上限的确定

#### 3.2.1 构造类比法的结果

华北北部地区  $M \geq 7$  地震发生的地震构造特征有:NE 向深断裂附近;与 NW 向断裂相交的 NE 向断层上;地壳内低速体的上方<sup>[14]</sup>。延怀盆地内的怀涿盆地北缘断裂和延矾盆地北缘断裂均为 NE 深断裂,以沿多个面的脆—韧性剪切错动为主,易于积累应变,发生中强地震,且与 NW 向张家口—蓬莱地震带断裂交汇<sup>[7]</sup>。同时,延怀盆地下方地壳中存在低速体<sup>[15]</sup>,由此可将震级上限定为  $7 \sim 7.5$  级。

#### 3.2.2 潜在震源区孕震蓄能条件的结果

延怀盆地实际历史地震间隔与计算的危险区内能量积累、释放过程基本一致,即6级以上地震复发间隔符合“时间可预报模型”(图3)。1967年7月28日5.4级地震所释放的能量仅占积累能量的10%,延怀盆地所积累的能量水平已超过1720年  $6\frac{3}{4}$  级地震前,具备发生同等大小地震的蓄能条件,滞后时间越长,可能震级越大<sup>[7]</sup>。当然,该结果是基于构造长期平稳加载的假设,其正确性有待于实践检验及进一步研究。

表2 延怀盆地主要活动断裂的定量参数与地震危险性评估(据文献[7],有改动)

断裂名称	段落长度 /km	滑动速率 /[mm·a <sup>-1</sup> ]	古地震复发间隔/ka	同震位移量/m	最近一次古地震的离逝时间/ka	大震离逝率	强震构造标志	近期危险程度
杏林堡-小水峪	17.5	0.38~0.5	9.4±1.9	2	1720年地震	0.03	无	C
小水峪-黄土窑	8.5	0.41~0.55	7.1	1.5	1.6	0.22	无	C
永丰堡-鸡鸣驿	6.5	0.27~0.31	?	?	Q <sub>3</sub>	?	(1)	B
鸡鸣驿-黄土港	8	0.22~0.53	11.3±5.8	0.5	2.88	0.25	(1)(2)(4)	C
沈庄-长瞳	15	0.31~0.43	6.98±4.5	0.9~1.8	5.8~3	0.63	(1)	B
屈家窑-黄柏寺	11.5	0.36	6.4±0.5	1.56~1.84	6.6	>1	无	A
黄柏寺-营门矿	12	0.58	5±1.1	1.35~3.0	1484年	0.1	(1)	C
营门矿-方家冲	11	0.24	7.0±2.5	0.75~1.4	>4.9	>0.7	(1)	B-A
方家冲-狼山	13.5	0.32	9.5±0.5	3.64	9.46	1.0	(2)	A
狼山-矾山	22	0.38	10.8	0.9~2.2	1337年	0.06	(2)	C
燕王沟-水沟	17.5	0.2	6.65±0.45	0.8~1.6	10.8	1.6	无	A
桑干河	32	0.36		>0.9	27.5	次生	无	
沙城-新保安	32	0.19	7.6±0.4	1	1720年	0.037	(3)	C

\* 近期危险程度主要考虑强震离逝率:A(>1);B(0.5~1);C(<0.5),仅作为有长期危险背景的段落;“?”代表缺乏定量资料。

表3 延怀盆地地震发生地点和震级上限的综合比较

地震发生地点	构造应力场模拟及库仑准则		大震离逝率和地震构造类比法			综合结果	
	方家冲—营门矿段断层		方家冲—营门矿段断层及狼山—方家冲段断层				
方法	经验调整法		构造类比法		孕震蓄能	经验公式法	
震级上限	7.25级		7~7.5级		6.75级		6.5级
					段落破裂	级联破裂	7级

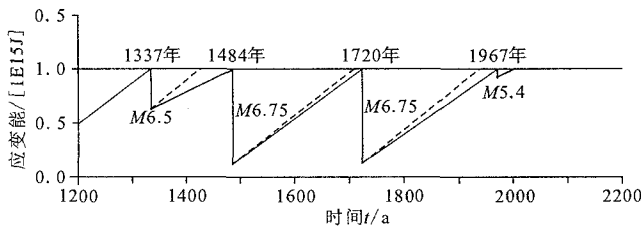


图3 延怀盆地历史地震能量-时间关系示意图(据文献[7],有改动,虚线表示应变能积累过程)

Fig.3 Energy-time relation of historical earthquakes in Yanhuai basin.

3.2.3 活断层参数的经验公式法的结果

根据前人的研究,地震震级和活动断层的地震破裂参数存在着密切的相关关系。其经验式拟合如下<sup>[16]</sup>:

$$M_w = 5.12 + 1.16 \lg(L) - 0.2 \lg(S) \quad (4)$$

(所有断层类型)

式中L为断层长度(km);S为滑动速率(mm/a)。将狼山—方家冲段断层和方家冲—营门矿段断层的参数分别代入式(4),得到两者的震级上限分别为M<sub>w</sub>=6.4~6.5和M<sub>w</sub>=6.5<sup>[7]</sup>。考虑多个断层联合破裂产生震级更大的地震,将延庆盆地北缘断层的总长度代入式(4),得到整个断裂的震级上限为M<sub>w</sub>=7.2。

4 讨论

(1) 不同理论的综合比较

构造应力场模拟方法确定设定地震发震断层与活断层理论相比,考虑因素较为单一,但由于能够更细致地区分各条断层的应力状态,可以作为辅助因素。同样,用经验调整法确定震级上限,也应当与活断层理论的结果综合考虑,得出最终的结论。具体的比较如表3。

(2) 震源深度的确定

怀来地震台网记录的1995年7月到1996年期间的地震多数沿延庆—矾山次级盆地北缘断裂密集地线状排列,延伸到8~10 km深度;其他地震沿隐伏的NW向黄土窑—土木断裂和沙城—新保安断裂带上,延伸到12 km深度附近。震源分布表明,10 km到地表的地壳上部具有脆性变形特征,即为断层粘滑错动;10~25 km深度范围内地震个数明显减少,而且震源分散、范围加宽,具有脆—韧性错动特征,是发生中强地震的有利部位<sup>[7]</sup>。

从深浅构造关系来看,延怀盆地浅部与深部的断裂之间具有密切的相关性。深震反射剖面的研究表明,延怀盆地下部存在一个近直立的从浅部断层向延伸到深部韧性剪切变形带的构造<sup>[7]</sup>,且盆地下部10 km深度附近存在低速体。基于上面的结果,震源深度可初步确定为10 km,即上地壳上下部的界限。

(下转 183 页)

### 3.2.2 2000年9月12日青海省兴海6.6级地震前兆空间综合异常度的演化过程

对2000年9月12日青海省兴海6.6级前6个月的综合异常度进行了时空扫描。空间划分单元内以5个测项同时出现异常作为该次地震空间异常累加的判定标准。计算结果显示震前3~4个月空间综合异常度明显升高,高值区存在扩散-向震中集中-发震-扩散的过程。空间综合异常度的最高值大于0.3,并且持续2~3个月可作为进入短期的指标;空间综合异常度的最高值大于0.5,可作为发生6级以上地震进入短临(1个月)的条件。

从图5中可见,2000年5月开始空间综合异常度出现大于0.3的单元,高值区分布在兴海西北及民勤以北地区;6月份异常区范围较大,主要分布在祁连中东段;景泰5.9级地震后异常度继续上升,8月份在兴海地区形成明显的高值集中区;9月份异常度迅速下降到0.3以下。通过对兴海6.6级地震前兆异常空间演化过程来看该方法对中强地震地点的判定效果较好,可提高短期(3~6个月)异常发震地点的准确性。

## 4 结语

通过对青藏高原北部地区定点前兆台网中强地震前兆反映能力定量化计算,分震级给出研究区域

内5、6、7级地震前兆异常的空间分布。在研究区内主要运用时间综合度方法提取中强地震的发震时间,空间综合异常度来判定地点,两者同时使用对中、强地震的发震时间和发震地点的判定效果较好。此外,该方法在本研究区域内提出,时间综合度计算时异常测项从 $i=1$ 起算,空间划分单元内异常测项从 $i \geq 5$ 起算。用于其他地区进行中强地震预报时,参数的取舍应结合各地的具体情况而定。

### [参考文献]

- [1] 国家地震局科技监测司.地震监测与预报方法清理成果汇编,综合预报分册[G].北京:地震出版社,1989.
- [2] 国家地震局科技监测司.地震预报方法实用化研究文集,综合预报专辑[G].北京:地震出版社,1991.
- [3] 中国地震局预测预防司.大陆地震预报的方法和理论——中国“八五”地震预报研究进展[M].北京:地震出版社,1998.
- [4] 罗兰格,韩渭宾,刘耀炜,等.强地震中短期预报方法及其效能研究[M].北京:地震出版社,2002.
- [5] 罗兰格,孙佩卿.地震综合效应场函数及其在地震预报中的应用(一)[J].华北地震科学,1994,12(3):1-16.
- [6] 罗兰格,孙佩卿.地震综合效应场函数及其在地震预报中的应用(二)[J].华北地震科学,1994,12(4):1-8.
- [7] 车兆宏,孙土宏.中短期强震危险地点的跟踪预测[J].地震,1996,16(4):363-371.
- [8] 牛安福.地壳变形的突变性与地震短期预报 国际地震动态,2002,14(2)10-12.

\*\*\*\*\*  
(上接 162 页)

### [参考文献]

- [1] 王秀文,赵新平,赵丽华,等.山西地震带形变应变场及中强地震危险性分析[J].地震,2001,21(1):14-24.
- [2] 傅征祥,刘杰,刘桂萍.张家口-蓬莱断裂带的中长期强地震危险性研究[J].中国地震,2000,16(4):335-341.
- [3] 吴子荣,袁宝印,孙建中.延-怀盆地新构造与地震[J].地震地质,1979,1(2):46-55.
- [4] 车兆宏.首都圈断层活动性研究[J].华北地震科学,1993,11(2):23-33.
- [5] 王若柏,杨国华,耿士昌,等.北京地区地壳形变及其动态特征[J].地震地质,1994,16(1):1-9.
- [6] 刘昌龄,嘉世旭,刘明军,等.延庆-怀来盆地大震危险性分析研究[J].地震学报,1997,19(5):517-523.
- [7] 徐锡伟,吴卫民,张先康,等.首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M].北京:科学出版社,2002.
- [8] 李乐,陈棋福,陈颢.首都圈地震活动构造成因的小震精定位分析[J].地球物理学进展,2007,22(1):24-34.
- [9] 黄耕,李清河,孙业君,等.江苏及邻区地壳上地幔结构研究[J].西北地震学报,2006,28(4):369-375.
- [10] 刘明清,刘敏,张先,等.延庆-怀来地区地壳深部磁性构造与地震的研究[J].华北地震科学,1994,12(3):53-58.
- [11] 章纯.中国东部地区地震活动与构造应力场关系的有限元数值模拟[J].西北地震学报,2007,29(3):230-234.
- [12] 黄福明,马廷著,李群芳,等.华北北部构造应力场[J].中国地震,1995,11(2):121-131.
- [13] 文彦君,郑文涛.延怀盆地现代构造应力场模拟与官厅水库大坝地震安全性初探[J].地震地质,2004,26(1):141-152.
- [14] 陈国星,任利生.首都圈地震危险区划分及未来强震地点预测[J].地震,1994,14(S1):125-135.
- [15] 祝治平,张先康,张建狮,等.北京-怀来-丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构研究[J].地震学报,1997,19(5):499-505.
- [16] Anderson J G, Wesnousky S G, Stirling M W, et al.. Earthquake size as a function of fault slip rate[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1996,86(3):683-690.