

西安地区活动断裂活动性的 Fuzzy-Grey 模式评价

孙芳强^{①②} 苏生瑞^① 彭建兵^①

(①长安大学地质工程与测绘学院 西安 700054)

(②中国地质调查局西安地质调查中心 西安 700054)

摘要 对活动断裂的活动强度进行研究,不仅是预测地震的发生、减轻地质灾害的基础,也是城市工程设计的核心问题。本文基于断裂活动性评价所具有的模糊性和灰色性特点,将模糊数学与灰色系统有机结合,提出了断裂活动性评价的模糊综合评判模型,确定了梯形隶属函数,并采用“活动性标志的相对值大,权重大”的原则确定了各个指标的权重,最终获得了断裂活动性的评判结果。利用该模式对西安地区活动断裂的活动性进行了评价,结果表明:临潼—长安断裂活动性最强,其次是渭河断裂、咸阳断裂,余下一铁炉子断裂活动性最弱。

关键词 活动断裂 活动性 模糊 灰色 梯形隶属函数

中图分类号:P642 **文献标识码**:A

FUZZY-GREY MODEL ASSESSMENT FOR ACTIVITY OF FAULTS IN XI'AN

SUN Fangqiang^{①②} SU Shengrui^① PENG Jianbing^①

(①College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054)

(②Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an 710054)

Abstract Estimating the activity of faults is not only the basis to predict earthquake and to reduce geological disasters, but also is the core issue of urban engineering design. Based on fuzzy and grey characteristics in assessment of fault activity, a fuzzy-grey model of assessment is proposed in the frame work of fuzzy mathematical theory associated with grey system. This paper establishes the fuzzy integrate assessment model and decides a trapezoidal membership function using the fuzzy mathematics. The power of each factor is decided with the principle that the relative value of activity symbol is larger, the power is greater. This model is applied to the assessment of fault activity in Xi'an area. The result shows that the activity of Lintong-Chang'an fault is the strongest and that of Yuxia-Tieluzi fault is the weakest.

Key words Active fault, Activity, Fuzzy, Grey, Trapezoidal membership function

1 引言

由于地震的发生以及各类地质灾害的分布与发

展都与活动断裂的活动性密切相关^[1-2],而且随着我国国民经济建设的发展,一些大型工程建设项目相继投入建设,愈来愈需要评价和研究区域地壳的稳定性,因而对活动断裂的活动强度进行研究,不仅

* 收稿日期:2009-05-31;收到修改稿日期:2009-11-02.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(4053021).

第一作者简介:孙芳强,主要从事地质工程方面研究. Email:sunfq2003@126.com

是地震预测、减轻各类地质灾害的基础,也是城市工程安全设计的核心问题。对断裂活动性进行评价,确定活动断裂的活动强度,对预测各种地质灾害的分布规律,减轻由于各类地质灾害引起的损失具有重要的意义。

西安地裂缝是世界上最著名的城市地质灾害,自20世纪50年代以来,在西安城区发现的地裂缝已达13条之多,给城市建设带来了一系列灾害^[3-6]。前人研究表明,断裂活动较强的地方,地裂缝的活动性也就显得比较强烈,活动断裂的活动大小控制着地裂缝运动速率和规模。对断裂活动性进行评价,确定活动断裂的活动强度,对预测西安地区各种地质灾害的分布规律具有重要的意义。

国内外学者大都用单一活动指标来评价活动断裂的活动强度^[7-12]。冯国才等人在研究断裂与矿山地质动力灾害的关系时用综合指标法评价了断裂的活动强度^[13],综合指标法就是给各个活动标志进行打分求和,这种方法具有一定的主观性;韩军等人用模糊综合评判的方法来研究活动断裂的活动性^[14],这种方法中隶属函数采用模糊正态函数来求取,操作起来相当复杂,不易推广应用。活动断裂的

活动性是一个多因素影响的系统,各个单因素指标分级本身具有模糊性,而且活动断裂的活动等级间有渐变特征,某一种活动标志的微小变化不会引起活动断裂活动性强度的明显改变,因而活动性的强弱评价又具有灰色特性,而 Fuzzy-Grey 模式评价体系能很好地解决这些问题,并在地下水环境质量评价中得到了很好的应用^[15]。Fuzzy-Grey 模式评价体系中的效果测度采用模糊数学中的梯形隶属函数,而对各因素的权重系数的确定采用“活动性标志的相对值大,权重大”的原则,改进了活动断裂活动性的评判方法,使活动断裂活动性的评价更加简便、准确和合理。

2 西安地区活动断裂的特征及判别标志

西安地区泛指以西安为中心,西起兴平,东至渭南,南起秦岭山前,北至泾阳口镇一带。区内断裂发育,按其展布方向主要有近东西向秦岭山前断裂(F_1)、余下一铁炉子断裂(F_2)、骊山北侧断裂(F_3)、口镇—关山断裂(F_4);北东东向渭河断裂(F_5);北

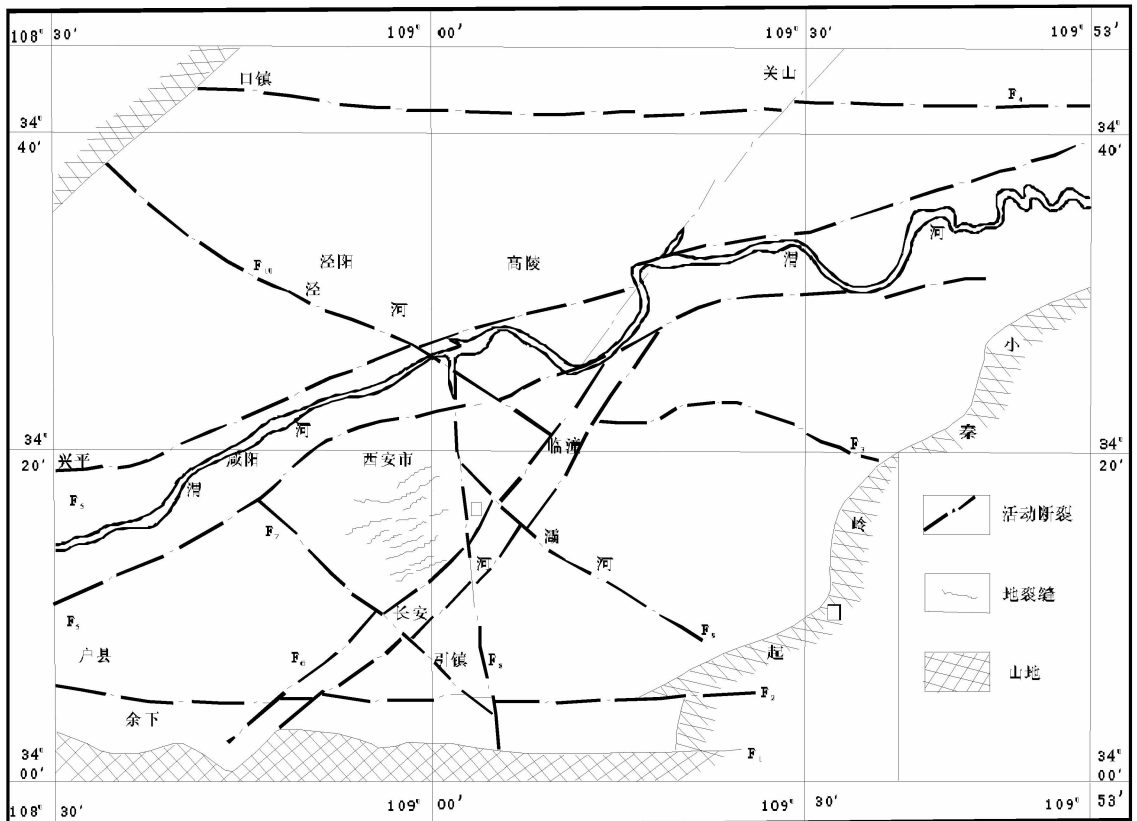


图1 西安地区活动断裂分布图

Fig. 1 Distribution of active faults in Xi'an area

东—北北东向临潼—长安断裂(F_6)、北西向咸阳断裂(F_7)、灞河断裂(F_9)、泾河断裂(F_{10})及北北西向泾河—引镇断裂(F_8)等(图1)。西安市地裂缝单条以 $70^\circ \sim 80^\circ$ 作北东方向延伸,整体组成一轴向北北东的地裂缝群。它们被严格地控制在由泾河—引镇断裂、临潼—长安断裂、咸阳断裂、渭南南岸断裂所围限的西安市次级构造块体的东南部。活动断裂大多继承于构造断块的差异运动,成为地应力作用集中的地带,构成了历史和现代的地震活动地带,形成了显著的地壳变形和构造地貌形态,同时也是现代的地球物理和地下水化学异常带。

断裂的活动性可根据年平均活动速率、地震情况、地貌特征等十几种标志来判别,为了准确评价其活动性,不同的研究尺度需要选择不同的评价指标。根据西安地区活动断裂的研究现状,为既能从本质上反映断裂的活动特性,又利于利用现有资料进行科学、定量地反映断裂活动程度,本次活动断裂活动性评价,选择具有较强的代表性,又容易获取的活动性标志来反映活动断裂的强弱程度,即活动断裂年平均活动速率 V 、活动断裂的长度 L 、活动断裂与最大主应力的夹角 σ 、活动断裂与最大剪应力法线方向的夹角 τ 、活动断裂的震级 M 。并参照前人的研究成果^[13-14],对各种判别指标进行活动性强弱分级(见表1)。

表1 活动断裂单因素分级指标

Table 1 Grade indexes of each factor for the active faults

活动性判别标志	活动性分级		
	强	中	弱
$V/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	>1	0.1 ~ 1	≤0.1
L/km	>100	40 ~ 100	≤40
$\sigma/(\circ)$	>60	30 ~ 60	≤30
$\tau/(\circ)$	>60	30 ~ 60	≤30
M	>6	3 ~ 6	≤3

3 活动断裂活动性评价的 Fuzzy-Grey 模式

整理断裂活动性评价的参数,把断裂活动性指标按活动性属性分为形变属性和力学属性指标。首先对每一种活动属性类别进行评价,然后计算各种属性的权重系数,采用综合加权法就可得到每条活动断裂的活动性级别。

3.1 对单一活动性属性类别评价

把活动断裂作为事件 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$, n 为活动断裂的个数,活动断裂活动性分级标准(见表1)作为对策集 $S = \{I, II, III\}$,活动性指标作为目标集 $t = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ (N 为指标的个数),得到决策矩阵:

$$D_k^{(t)} = \begin{bmatrix} r_{11}^{(t)}/s_{11} & r_{12}^{(t)}/s_{12} & r_{13}^{(t)}/s_{13} \\ r_{21}^{(t)}/s_{21} & r_{22}^{(t)}/s_{22} & r_{23}^{(t)}/s_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{n1}^{(t)}/s_{n1} & r_{n2}^{(t)}/s_{n2} & r_{n3}^{(t)}/s_{n3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$k = 1, 2, \dots, h$ (h 是断裂活动性属性类别的个数)

由于断裂活动性分级标准 S 具有模糊性,模糊数学中的隶属函数通常采用三角形隶属函数、正态分布隶属函数和梯形隶属函数,不同的隶属函数的代表了不同的系统特性。通过分析活动断裂各指标的分布特点,同时兼顾简洁有效的原则,效果测度 r_{ij} 采用模糊数学中的梯形隶属函数。

$$r_{i1}^{(t)} = \begin{cases} 1 & 0 \leq c_i^{(t)} \leq s_1^t \\ -\frac{c_i^{(t)} - s_2^{(t)}}{s_2^{(t)} - s_1^{(t)}} & s_1^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \\ 0 & s_2^{(t)} \leq c_i^{(t)} \end{cases} \quad (2)$$

$$r_{i2}^{(t)} = \begin{cases} \frac{c_i^{(t)} - s_1^{(t)}}{b_2^{(t)} - b_1^{(t)}} & s_1^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \\ -\frac{c_i^{(t)} - s_3^{(t)}}{s_3^{(t)} - s_2^{(t)}} & s_2^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_3^{(t)} \\ 0 & c_i^{(t)} \leq s_1^{(t)}, c_i^{(t)} \geq s_3^{(t)} \end{cases} \quad (3)$$

$$r_{i3}^{(t)} = \begin{cases} 1 & c_i^{(t)} \geq s_3^{(t)} \\ -\frac{c_i^{(t)} - s_3^{(t)}}{s_3^{(t)} - s_2^{(t)}} & s_2^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_3^{(t)} \\ 0 & c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \end{cases} \quad (4)$$

由(2)~(4)式,就求得了效果测度决策矩阵 $D_k^{(t)}$, $t = 1, 2, \dots, N$; $k = 1, 2, \dots, h$ 。

然后确定各指标的权重系数,从而确定全部指标的重要程度,评价每一种活动标志对断裂活动性造成的影响程度。权重系数可以采用层次分析法或专家打分等方法来确定,这些方法均是基于对活动断裂的各指标间进行比较,然后根据不同指标的重要程度进行赋值,进而确定权重系数,具有一定的主观性。在对地下水环境质量进行评价时,汪家权等^[15]将水质污染程度的灰色性和水质标准之间存

在的模糊性两者有机地结合在一起,构建了地下水环境质量评价 Fuzzy—Grey 方法。由于活动断裂的活动性具有与地下水环境质量具有类似的特征,即既有活动程度的灰色性,又有活动标志分级之间存在的模糊性,所以,本文借用地下水水质评价中权重赋值的方法,即以 $s_3^{(t)}$ 为基准,小于该值时统一赋值为 1,大于该值时以 $s_3^{(t)}$ 为基准作为增幅赋值。这种权重赋值方法能反映断裂活动性评价指标值的波动特点,而且所得到的权重系数比较客观,更重要的是体现了“活动性标志的相对值大,权重重大”的原则,所确定的权重系数更加合理。具体权重确定方法如下:

$$W_i^{(t)} = W_i^{(t)} / \sum_{i=1}^N W_i^{(t)}, \quad (5)$$

$$W_i^{(t)} = \begin{cases} 1.0 & c_i^{(t)} \leq s_3^{(t)} \\ \frac{c_i^{(t)}}{b_1^{(t)}} & c_i^{(t)} \geq s_3^{(t)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $W_i^{(t)}$ 为第 i 个活动断裂单一活动标志属性中第 t 项指标的权重; $s_3^{(t)}$ 为单一活动标志中第 t 项指标的第 III 级标准值; $c_i^{(t)}$ 为第 i 个活动断裂单一活动标志中第 t 项指标的活动性指标值; $W_i^{(t)}$ 为第 i 个活动断裂单一活动标志中第 t 项指标归一化后的权重。

由式(5)~(6),求得单一活动标志效果测度综合决策矩阵:

$$D_k^{(\Sigma)} = (r_{ij}^{(\Sigma)} / s_{ij})_{n \times m} \quad (k = 1, 2, \dots, h) \quad (7)$$

$$r_{ij}^{(\Sigma)} = \sum_{t=1}^N W_i^{(t)} \cdot r_{ij}^{(t)} \quad (8)$$

3.2 综合评价

对每一个活动断裂每一种活动标志中的每项指标分别求出其对三级活动性的权重,权重确定方法为:

$$f_{ij}^{(t)} = \begin{cases} 1.0 & c_i^{(t)} \leq s_j^{(t)} \\ \frac{c_i^{(t)}}{s_j^{(t)}} & c_i^{(t)} \geq s_j^{(t)} \end{cases} \quad (9)$$

则各个活动断裂每种活动属性对每一级活动性标准占总活动性标志的权重 I_k 为:

$$I_k = \frac{\sum_{i=1}^N f_{ij}^{(t)}}{\sum_{k=1}^h \sum_{i=1}^N f_{ij}^{(t)}} \quad (10)$$

那么断裂活动性综合评价效果测度综合决策矩

阵为:

$$D^{(\Sigma)} = (D_k^{(\Sigma)} \times I_k)_{n \times m}^{(\Sigma)} \quad (11)$$

根据局势最优原则,可得出各条活动断裂的活动性级别,再由活动性级别反推出每一活动断裂的主要活动标志属性类型。通过效果测度决策矩阵可以很清楚地知道每一条活动断裂活动性所属级别,又可以知道哪一种类型的活动判别标志对该活动断裂活动性影响最大。由最后的效果测度综合决策矩阵能够得出每条活动断裂活动性的强弱次序。

4 西安市活动断裂活动性评价

把西安市活动性指标按活动性属性分为形变属性和力学属性指标(见表 2)。形变属性指标为断裂的长度和断裂活动速率;力学属性指标为最大主应力与断裂的夹角、最大剪应力法线方向与断裂的夹角、断裂震级。

表 2 西安市活动断裂活动性标志特征

Table 2 Characteristics of active fault activity in Xi'an area

断裂名称	活动性评价指标				
	力学属性			形变属性	
	$\sigma/(\circ)$	$\tau/(\circ)$	M	L/km	$V/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
秦岭山前断裂(F_1)	28.00	17	1.50	66.00	2.00
余下一铁炉子断裂(F_2)	27.00	18	1.50	69.00	0.42
骊山北侧断裂(F_3)	30.00	15	0.80	25.00	0.60
口镇—关山断裂(F_4)	27.00	18	2.50	92.00	0.75
渭河断裂(F_5)	8.00	37	8.00	100.00	0.66
临潼—长安断裂(F_6)	18.00	63	7.50	160.00	2.40
咸阳断裂(F_7)	69.00	24	7.50	43.00	0.10
泾河—引镇断裂(F_8)	67.00	68	1.50	56.00	0.08
灞河断裂(F_9)	64.00	19	6.50	44.00	0.06
泾河断裂(F_{10})	58.00	13	2.50	83.00	0.12

4.1 对单一活动性标志属性类别评价

以力学标志属性指标为例,则有事件集 $M = \{\text{断裂 } F_1, \text{断裂 } F_2, \dots, \text{断裂 } F_{10}\} = \{m_1, m_2, \dots, m_{10}\}$, 对策集 $S = \{\text{强, 中, 弱}\} = \{s_1, s_2, s_3\}$, 目标集 $t = \{\sigma, \tau, M\} = \{c_1, c_2, c_3\}$ 。

4.1.1 单项指标权重的确定

对表 2 中的不同断裂的指标数据以 $s_3^{(t)}$ 为基准进行标准化处理,并同式(5)、(6)求出权重 $W_i^{(\sigma)}$ 、 $W_i^{(\tau)}$ 、 $W_i^{(M)}$,结果见表 3。

表3 力学标志活动性指标权重

Table 3 Rating of mechanical index

断裂	σ	τ	M
F ₁	0.333	0.333	0.333
F ₂	0.333	0.333	0.333
F ₃	0.333	0.333	0.333
F ₄	0.333	0.333	0.333
F ₅	0.204	0.251	0.545
F ₆	0.179	0.375	0.446
F ₇	0.397	0.172	0.431
F ₈	0.405	0.413	0.182
F ₉	0.402	0.189	0.409
F ₁₀	0.491	0.254	0.254

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.12 & 0.12 \\ 0.60 & 0.34 & 0.34 \\ 0.60 & 0.30 & 0.30 \\ 0.60 & 0.23 & 0.23 \\ 0.62 & 0.35 & 0.35 \\ 0.45 & 0.17 & 0.17 \\ 0.63 & 0.74 & 0.74 \\ 0.62 & 0.71 & 0.71 \\ 0.61 & 0.76 & 0.76 \\ 0.60 & 0.55 & 0.55 \end{bmatrix}$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.88 & 0.88 \\ 0.40 & 0.66 & 0.66 \\ 0.40 & 0.70 & 0.70 \\ 0.40 & 0.77 & 0.77 \\ 0.38 & 0.65 & 0.65 \\ 0.55 & 0.83 & 0.83 \\ 0.37 & 0.26 & 0.26 \\ 0.38 & 0.29 & 0.29 \\ 0.39 & 0.24 & 0.24 \\ 0.40 & 0.45 & 0.45 \end{bmatrix}$$

$$D^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.04 & 0.12 \\ 0.16 & 0.40 & 0.34 \\ 0.20 & 0.28 & 0.37 \\ 0.30 & 0.19 & 0.23 \\ 0.61 & 0.20 & 0.14 \\ 0.92 & 0.00 & 0.03 \\ 0.53 & 0.13 & 0.25 \\ 0.32 & 0.13 & 0.53 \\ 0.51 & 0.15 & 0.23 \\ 0.46 & 0.10 & 0.44 \end{bmatrix}$$

4.1.2 单项指标评价

由式(1)~(3)求出目标集的效果测度 $r_{ij}^{(\sigma)}$ 、 $r_{ij}^{(\tau)}$ 、 $r_{ij}^{(M)}$,再由式(1)、(7)、(8)可求得力学指标属性类别的效果测度决策矩阵 $D_1^{(\Sigma)}$ 。

同理,按照上述步骤可以求出活动断裂的形变标志属性类别的效果测度综合决策矩阵 $D_2^{(\Sigma)}$ 。

4.2 西安市活动断裂活动性综合评价

由式(9)~(10)可分别求得力学属性类别和形变属性类别占总活动性指标的权重 I_k :

把 $D_1^{(\Sigma)}$ 、 $D_2^{(\Sigma)}$ 、 I_1 、 I_2 代入式(11),得到活动断裂活动性综合决策矩阵 $D^{(\Sigma)}$ 为:

$$D_1^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.54 & 0.06 & 0.40 \\ 0.82 & 0.00 & 0.18 \\ 0.83 & 0.00 & 0.17 \\ 0.41 & 0.00 & 0.59 \\ 0.81 & 0.00 & 0.19 \\ 0.46 & 0.03 & 0.51 \end{bmatrix}$$

$$D_2^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} 0.96 & 0.04 & 0.00 \\ 0.39 & 0.61 & 0.00 \\ 0.51 & 0.40 & 0.09 \\ 0.76 & 0.24 & 0.00 \\ 0.72 & 0.28 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.03 & 0.49 & 0.48 \\ 0.17 & 0.46 & 0.36 \\ 0.05 & 0.60 & 0.35 \\ 0.46 & 0.18 & 0.36 \end{bmatrix}$$

根据最佳局势挑选原则,西安市各活动断裂的活动性从强到弱的次序为: $F_6 > F_5 > F_7 > F_9 > F_1 > F_{10} > F_8 > F_4 > F_3 > F_2$,即临潼—长安断裂活动性最强,其次是渭河断裂、咸阳断裂,余下一铁炉子断裂活动性最弱。

5 结论

(1) 本文应用 Fuzzy-Grey 模式对断裂活动性进行评价,充分考虑了活动断裂活动等级的灰色性,又考虑了活动判别指标之间的模糊性,克服了以往断裂活动性评价中存在的不足,使评价结果更加客观。

(2) Fuzzy-Grey 模式中的梯形隶属函数既反映了活动断裂各指标的分布特点,同时兼顾了简洁有效的原则;权重系数采用以 $s_3^{(i)}$ 为基准,小于该值时统一赋值为1,大于该值时以 $b_3^{(i)}$ 为基准作为增幅赋值,既具有简便性、稳定性、一致性,更重要的是体现了“活动性标志的相对值大,权重大”的原则。

(3) 西安市各活动断裂的活动性从强到弱的次序为: $F_6 > F_5 > F_7 > F_9 > F_1 > F_{10} > F_8 > F_4 > F_3 > F_2$ 。即临潼—长安断裂活动性最强, 其次是渭河断裂、咸阳断裂, 余下一铁炉子断裂活动性最弱。

参 考 文 献

- [1] 彭建兵, 张骏, 苏生瑞, 等编著. 渭河盆地活动断裂与地质灾害 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
Peng Jianbing, Zhang Jun, Su Shengrui et al. Active Faults and Geological Hazards in Weihe Basin. Xi'an: Northwest University Press, 1992.
- [2] 陕西省地质矿产局. 西安地区区域地壳稳定性与地质灾害评价和研究 [R], 1990.
Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. Evaluation and Study of Regional Crustal Stability and Geological Hazards of Xi'an Area, 1990.
- [3] 李永善等编著. 西安地裂与渭河盆地活断层研究 [M]. 地震出版社, 1992.
Li Yongshan et al. Research on Ground Fissures in Xi'an Region and Active Faults in Weihe Basin. Beijing: Earthquake Press, 1992.
- [4] 张家明. 西安地裂缝研究 [M]. 西北大学出版社, 1990.
Zhang J iaming. Research on ground fissures in Xi'an Region. Xi'an: Northwest University Press, 1990.
- [5] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题 [J]. 工程地质学报, 2007, **15**(04): 433~440.
Peng Jianbing, Fan Wen, Li Xi'an et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the fen -wei basin. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(04): 433~440.
- [6] 苏生瑞, 李慧荣. 发震断裂上覆土层破坏机制及破裂扩展规律的试验研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2002, **13**(01): 48~53.
Su Shengrui, Li Huirong. Experimental study on the failure mechanism and fractures propagation in soil layers overlying causative faulting. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, **13**(01): 48~53.
- [7] R. B. Mosley, M. Y. Menetrez. The influences of diffusion and advective flow on the distribution of radon activity within USEPA's soil chamber [J]. Environment International, 2002, **22**(Suppl. 1): 521~533.
- [8] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan Basin [J]. Nature, 2008, **454**: 509~511.
- [9] 李传友, 张培震, 张剑玺, 等. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪活动表现与滑动速率 [J]. 第四纪研究, 2007, **27**(01): 54~63.
Li Chuanyou, Zhang Peizhen, Zhang Jianxi et al. Late-Quaternary activity and slip rate of the western Qinlin fault zone at huangxiang-gou. Quaternary Science, 2007, **27**(01): 54~63.
- [10] 王伟涛, 贾东, 李传友, 等. 四川龙泉山断裂带变形特征及其活动性初步研究 [J]. 地震地质, 2008, **30**(04): 969~979.
Wang Weitao, Jia Dong, Li Chuanyou et al. Preliminary investigation on deformation characteristics and activity of Longquanshan fault belt in Sichuan. Seismology and geology, 2008, **30**(04): 969~979.
- [11] 谷懿, 葛良全, 王广西等. 汶川地震震后大成都地区断裂带活动性氡气测量分析评价 [J]. 工程地质学报, 2009, **17**(03): 296~300.
GU Yi, GE Liangquan, WANG Guangxi et al. Analysis and evaluation of faults activities in Chengdu region with radon concentration measurements after Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(03): 296~300.
- [12] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等编著. 天山活动构造 [M]. 北京: 地震出版社. 2000.
Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen et al. Active tectonics of the Tianshan Mountain. Beijing: Seismic Publishing House, 2000.
- [13] 冯国才, 李强, 吴宏之. 断裂活动与矿山地质动力灾害研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, **13**(02): 17~19.
Feng Guocai, Li Qiang, Wu Hongzhi. Research on fault action and geological dynamics hazards in mining. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, **13**(02): 17~19.
- [14] 韩军, 张宏伟. 地质动力区划中断裂活动性的模糊综合评判 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, **18**(02): 101~105.
Han Jun, Zhang Hong-wei. Fuzzy integrated estimation of fault activity in geology dynamic zoning. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, **18**(02): 101~105.
- [15] 汪家权, 刘万茹, 钱家忠. 地下水环境质量评价 Fuzzy-Grey 模式 [J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(01): 73~77.
Wang Jiaquan, Liu Wanru, Qian Jiazhong. Fuzzy-Gey model for assessment of groundwater environmental quality. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(01): 73~77.