

文章编号：1006-6616(2004)01-0057-08

# 模糊聚类分析在西安市区域地壳 稳定性评价中的应用

杨建军<sup>1,4</sup>, 谢振乾<sup>2</sup>, 郑宁平<sup>3</sup>

(1. 西北大学地质系, 陕西 西安 710082; 2. 西安市地震局, 陕西 西安 710001;  
3. 陕西省国土资源信息中心, 陕西 西安 710054, 4. 陕西省国土资源厅, 陕西 西安 710082)

**摘要**：通过对西安市区域地壳稳定性与地质灾害评价和研究所取得的地质、物探、测量、模拟实验等方面的成果资料的分析，综合考虑内、外动力地质作用及介质条件等因素，选择了6种影响西安市区域地壳稳定性的主要因素作为稳定性评价的指标体系，运用模糊数学方法进行了该区的区域地壳稳定性评价与分区，将西安市地壳稳定性划分为次较不稳定、较不稳定和不稳定三级共10个区域。在此基础上，对西安市城市建设与发展规划提出了指导性的建议。

**关键词**：地壳稳定性；模糊聚类分析；城市建设规划；西安

**中图分类号**：P542                      **文献标识码**：A

在地质构造背景上，西安处于巨厚新生界覆盖的复式地堑型盆地中部，其活动断裂发育，地裂缝、地面沉降等地质灾害频繁，历史地震活动强烈，对城市建设及规划布局影响较大。为科学地评价西安市区域地壳稳定性并作出详细分区，为城市规划建设提供基础地质依据，本文在分析前人已取得的地裂缝<sup>[1]</sup>、地震、地面沉降<sup>[2]</sup>等方面的成果基础上，结合笔者多年来从事西安地区区域地壳稳定性与地质灾害评价和研究工作所取得的新成果，运用模糊数学方法对西安市进行了稳定性评价与分区，对西安市的城市建设和发展提出了指导性的建议。

## 1 区域地壳稳定性评价考虑的主要方面

区域地壳稳定性是内、外动力地质作用强弱程度及区域介质条件的综合体现<sup>[3,4]</sup>。因此在进行稳定性评价与分区时，主要考虑构造稳定性、岩土体稳定性、地面稳定性三方面的影响。构造稳定性是区域地壳稳定性评价中最主要的部分，是内动力地质作用强弱程度的表现形式之一，在进行区域地壳稳定性评价时主要考虑：断层产状、性质、规模、复合关系、现

收稿日期：2003-12-29

作者简介：杨建军(1962-),男,博士生,高级工程师,主要从事地球物理及地壳稳定性研究。

E-mail: jjyang5124@sina.com

今活动性、地震活动特征以及与活动断裂的关系、地形变场特征、断层现今位移特征、现今地应力特征、深部构造特征、应变能密度分布特征等。岩土体稳定性即介质稳定性，取决于岩土体本身的性质和结构条件。地面稳定性是外动力地质作用强弱程度的表现形式之一，是指诸如风化、剥蚀、水土流失、崩塌、滑坡等的发育程度，以及由此而形成的地貌类型及其特征等。

通常，构造稳定性是区域地壳稳定性评价的第一因素，其次为岩土体及地面稳定性。

## 2 西安地区区域地壳稳定性的总体评价

### 2.1 构造稳定性评价

根据历史地震研究和区域地质构造背景分析，西安市具有发生 5 级以上地震的构造条件。

西安市位于该区现今活动性最强的临潼-长安断裂带附近之下降盘，市中心在该断裂带北西侧约 8km 处。另外，由灞河断裂、河断裂等所组成的北西向断裂组的北西段通过该区东、西部及城区附近。研究表明，这两组走向的断裂（NE 和 NW 向）均属发震断裂，在它们的交汇部位或它们与其他方向断裂的交汇部位附近，历史上常有中强地震发生。据国家地震烈度区划，西安市地震基本烈度为Ⅷ度，草滩  $6\frac{1}{4}$  级地震震中烈度为Ⅸ度。西安市地震烈度小区划研究资料表明，区内 100 年超越概率为 10%，地面运动加速度峰值北部、东部为 275 伽，南部、西部为 225 伽，总体表现为东北部较高，西南部较低。

研究表明，西安市北东向展布的 13 条地裂缝与临潼-长安断裂活动有关<sup>[5]</sup>。深部探测资料证实，位于西安市北部的渭河南岸断裂、东南部的临潼-长安断裂皆为深切基底的断裂。重力资料反演结果表明，西安附近为地幔隆起最高点，其东侧及南北两侧有莫合面扭曲带、陡变带。大地电磁测深资料表明，本区地下 10~20km 处存在一巨厚低阻（高导）层。据数值模拟（有限元）计算结果，该区最大主应力值为 4.5~5MPa，最大剪应力值为 1.3~1.5MPa，应力异常主要集中在断裂交汇部位，最大主应力方向与渭河南岸断裂、临潼-长安断裂走向一致。

### 2.2 土体稳定性评价

该区北部为渭河河漫滩及一级阶地，组成物质为黄土状土、亚砂土、亚粘土夹含砾砂层。西部古河道发育，除表层有少量黄土状土外，均为亚砂土、亚粘土夹砂层。这些地段地下水埋藏浅，具备产生震害砂土液化的工程地质条件，故稳定性较差。城区附近主要为冲积的亚砂土、亚粘土及黄土层，也有一些组成黄土残塬的黄土，具中湿陷、中压缩，土体稳定性一般较好。但城区普遍存在 2~4m 厚的人工填土。

### 2.3 地面稳定性评价

西安市东南缘黄土塬边时有滑坡发生，稳定性较差。市区因开采地下水而形成特殊地面沉降区，急剧下沉集中在区内的马旗寨—鱼花寨—三爻村—十里铺所围限的范围内，下沉速率达 40~80mm/a，且逐年加大，并出现多处漏斗区（点），如辛家庙、桃园路、后村等，同时也大大加速了地裂缝的活动和扩展。

综上所述，西安市总体上为相对不稳定区。但从工程地质条件和地面稳定性看，西边较东边要好一些。

### 3 区域地壳稳定性模糊评判与分区

#### 3.1 评价指标体系及数量化

根据西安市具体特点，选取了地震活动性、断裂活动性、地应力、地裂缝等 6 种影响稳定程度的主要因素，作为该区地壳稳定性评价的指标体系，各指标的量化标准见表 1。

表 1 西安市地壳稳定性评价指标数量化评分准则

Table 1 Quantitative criteria of evaluation indices of crustal stability in Xi'an City

评价 指标	分数线		
	10~7	7~4	4~1
地震 ( $f_1$ )	$I=7^{\circ}\sim 8^{\circ}$ , $M\leq 5.5$ , $n\leq 2$ , $M_{max}< 5$ , $\Sigma E< 3.2\times 10^{17}$	$I=8^{\circ}$ $M=5.5\sim 6.5$ , $n=3\sim 10$ , $M_{max}=5\sim 6$ , $\Sigma E=3.2\times 10^{17}\sim 1.3\times 10^{19}$	$I>8^{\circ}$ , $M\geq 6.5$ , $n>10$ , $M_{max}>6$ , $\Sigma E>1.3\times 10^{19}$
活动断裂 ( $f_2$ )	无活动断裂分布或仅有稀疏且规模小的断裂分布，断裂现今活动性较弱，重磁异常分布均匀，地壳完整性好	活动断裂发育，且靠近规模较大的活动断裂带，断裂活动明显，位于重磁异常梯级带附近，地壳完整性较好	活动断裂发育，位于规模大的断裂带上，断裂现今活动明显，活动量级大，对地震、地热、地形变等均有控制作用，为重磁异常梯级带，地壳破碎，完整性差。
地应力 ( $f_3$ )	应力分布均匀，远离最大剪应力异常区，最大剪应力值 $\leq 1.3\text{MPa}$	应力分布较均匀，位于最大剪应力异常区附近，局部有可能出现小面积异常区，最大剪应力值一般为 $1.3\text{MPa}$ 左右	有明显的剪应力异常区存在，应力分布不均匀，异常区最大剪应力值 $>1.5\text{MPa}$ 或 $<1.3\text{MPa}$
地裂缝 ( $f_4$ )	无地裂缝或仅有规模小、活动弱的隐伏地裂缝	有地裂缝存在，且有较明显的活动显示	地裂缝发育，以群、带出现，现今活动明显，有一定破坏性
土体类型 ( $f_5$ )	中粗砂、砂砾卵石，黄土或黄土状土	黄土、黄土状土	粉细砂、亚砂土、亚粘土、黄土状土或人工填土
地壳升降率，砂土液化及滑坡等 ( $f_6$ )	地壳升降均匀，速率为 $0\sim 2\text{mm/a}$ ，远离形变梯度带，无古河道及滑坡，并远离砂土液化区	地壳升降较均匀，速率为 $2\sim 4\text{mm/a}$ ，或靠近形变梯度带，特殊沉降区，有古河道，部分为震害砂土液化区 ( $<5\%$ ) 或靠近大面积砂土液化灾害区，有滑坡点或靠近滑坡发育区	地壳升降不均匀，速率大，一般大于 $4\text{mm/a}$ ，有形变梯度带，特殊沉降区点，大面积砂土液化 ( $15\%\sim 50\%$ )

#### 3.2 稳定性区块划分及模糊评判

在考虑到影响西安市地壳稳定性的 6 种主要因素的同时，为了给出西安市不同地段的地壳稳定性的量级概念，笔者选用了模糊数学评判方法。首先根据该区的构造条件、地震活动性、地壳结构、深部地质、地裂缝发育程度等，将该区划分为 10 个待评区（亚段、亚区）（见图 1），以编号  $\text{II}_{\text{al}}^{1-1}$  等表示亚段，以编号  $\text{I}_{\text{al}}^{1-1}$  等表示亚区。为计算直观、方便，计算中采用了  $B_1$ 、 $B_2$  等代替之，即： $B_1$ ：临潼—西候村冲击亚砂土、亚粘土及黄土亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{1-1}$ ）； $B_2$ ：毛西—长安与北西向断裂复合亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{1-2}$ ）； $B_3$ ：申店—黄良洪积扇、黄土塬亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{1-3}$ ）； $B_4$ ：新村—草堂营与东西向断裂复合洪积扇亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{2-1}$ ）； $B_5$ ：斜口—灞桥隐伏地裂缝分布亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{3-1}$ ）； $B_6$ ：十里铺—鱼花寨地裂缝、地面沉降分布亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{3-2}$ ）； $B_7$ ：郭杜镇—秦渡镇地裂缝、古河道分布亚段（ $\text{II}_{\text{al}}^{3-3}$ ）； $B_8$ ：新筑镇—徐家湾北西向断裂展布、砂土液化亚区（ $\text{I}_{\text{al}}^{1-3}$ ）； $B_9$ ：北徐寨—三桥砂土液化、古河道亚区（ $\text{I}_{\text{al}}^{1-2}$ ）； $B_{10}$ ：北田村

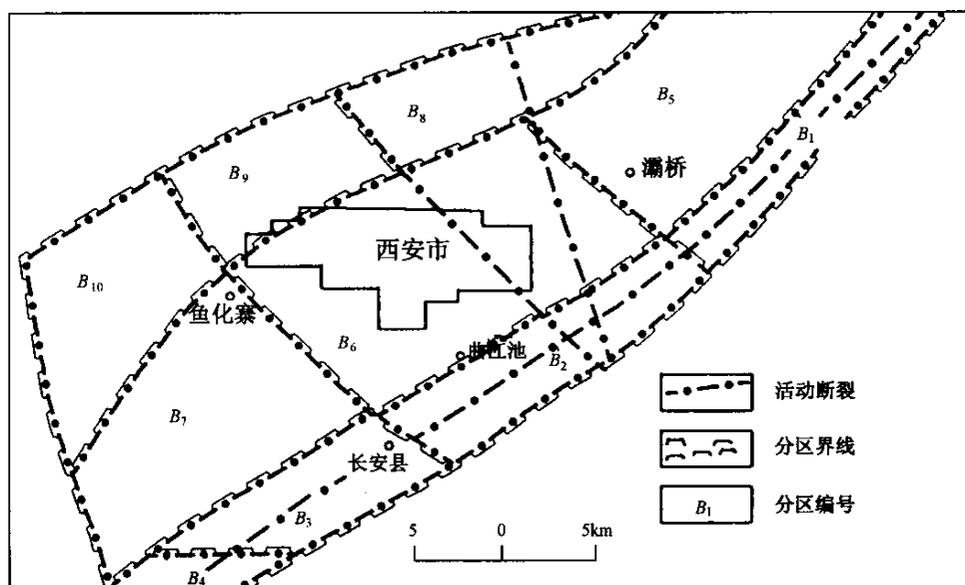


图1 西安市地壳稳定性模糊评价待评区划分略图

Fig.1 Regionalization of fuzzy evaluation of crustal stability in Xi'an City

—普贤寺古河道、黄土台塬亚区 ( $I_{al}^{1-3}$ )

将每个待评区作为一个评价对象 ( $B_i, i=1, 2, \dots, 10$ ), 依据表1的评分准则, 我们组织各学科专家对该区进行认真分析对比后, 采取综合打分的办法, 给出每个待评区中6个评价指标 ( $f_j, j=1, 2, \dots, 6$ ) 的得分, 这样每个待评区  $B_i$  相对于6个评价指标  $f_j$  就有一个质量状态矩阵, 所有待评区的质量状态矩阵共同构成了全区的总质量矩阵  $R(B_i, f_j) = [X_{ij}]$  (其中  $i=1, 2, 3, \dots, 10, j=1, 2, 3, \dots, 6$ ), 这里  $i$  为待评区的个数,  $j$  为评价指标数。即:

$$R(B_i, f_j) = [X_{ij}] = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \\ \left. \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \\ B_9 \\ B_{10} \\ B_k \end{matrix} \right\} & \begin{pmatrix} 2 & 3 & 3 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 2 & 3 & 4 & 5 & 4 \\ 6 & 4 & 6 & 8 & 7 & 8 \\ 8 & 3 & 4 & 8 & 8 & 8 \\ 3 & 5 & 4 & 7 & 5 & 6 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 4 & 3 \\ 6 & 6 & 7 & 7 & 6 & 5 \\ 2 & 5 & 3 & 8 & 3 & 4 \\ 2 & 5 & 4 & 8 & 3 & 4 \\ 7 & 7 & 8 & 8 & 3 & 6 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3-1)$$

同样, 假设一种理想的稳定地区, 其每一评价指标得分均为10 (见式(3-1)中的  $B_k$ ,  $k=1, 2, \dots, 6$ ), 并以此作为聚类中心, 对于每一个评价指标按照下列公式<sup>[6]</sup>进行计算:

$$\begin{cases} r_{ij} = d_{ki} / (d_{kj} + d_{ki}) \\ r_{ji} = 1 - r_{ij} \\ r_{ii} = 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

其中： $d_{ki} = |b_k - b_i|$

$d_{kj} = |b_k - b_j|$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 10, j=1, 2, 3, \dots, 10$  )

式 (3-2) 中  $r_{ij}$  为对角线为 1 的对称互补矩阵,  $b_i, b_j$  为同一评价指标 (即矩阵  $[X_{ij}]$  中的同一列) 中不同待评区相对应的得分数,  $d_{ki}, d_{kj}$  为第  $i, j$  (这里的  $i, j$  在矩阵  $r_{ij}$  中,  $i$  为矩阵中的行,  $j$  为矩阵中的列; 对于  $b_i, b_j$  而言, 均指同一评价指标中的待评区的得分数, 按照其对应的角码取值即可) 个待评区与理想的稳定地区的得分数之差,  $b_k$  为理想的稳定地区的得分数, 在此均为 10。

这样分别求出各待评区中不同评价指标对聚类中心  $B_k$  的相对隶属度模糊相关矩阵：

$$R(f_j) = [r_{ij}] \text{ (其中 } i = 1, 2, 3, \dots, 10, j = 1, 2, 3, \dots, 6)$$

由此便可得到每一评价指标对聚类中心  $B_k$  的相对隶属度模糊相关矩阵  $R(f_1), R(f_2), \dots, R(f_6)$  共 6 个, 对于每一个矩阵  $R(f_j)$ , 选取不同的截距  $\lambda$  值 ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ), 若  $r_{ij} \geq \lambda$ , 计其为 1,  $r_{ij} < \lambda$ , 计其为 0, 矩阵的对角线除外, 以首先达到全行为 1 的截距所对应的行 (段、亚段) 对聚类中心的隶属度最小, 并计其序号为 1, 然后逐渐降低  $\lambda$  值, 分别计其序号为 2、3、4、... 等。这样便得到每一评价指标相对于聚类中心的隶属度 (限于篇幅, 计算过程从略), 序号越小, 隶属度越小, 表明稳定程度越差, 反之亦然。

根据公式  $\mu_{B_i}(f_i) = m / \sum m$  (式中:  $m$  为各待评区的序号 (隶属度) 之和,  $\sum m$  为所有待评区的序号总和), 可求得各待评区相对聚类中心的隶属度 (表 2)。

表 2 不同评价指标及各评价区对聚类中心的隶属度

Table 2 Subordination degree of different evaluation indices and areas to the clustering center

序号 \ 指标	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$m$	$m / \sum m$
分区								
$B_1 (\text{II}_{a1}^{1-1})$	1	2	1	3	4	4	15	0.081
$B_2 (\text{II}_{a1}^{1-2})$	3	1	1	2	3	2	12	0.065
$B_3 (\text{II}_{a1}^{1-3})$	4	3	3	5	5	5	25	0.135
$B_4 (\text{II}_{a1}^{2-1})$	5	2	2	5	6	5	25	0.135
$B_5 (\text{II}_{a1}^{3-1})$	2	4	2	4	3	4	19	0.103
$B_6 (\text{II}_{a1}^{3-2})$	2	3	2	1	2	1	11	0.059
$B_7 (\text{II}_{a1}^{3-3})$	4	5	4	4	4	3	24	0.130
$B_8 (\text{I}_{a1}^{1-1})$	1	4	1	5	1	2	14	0.076
$B_9 (\text{I}_{a1}^{1-2})$	1	4	2	5	1	2	15	0.081
$B_{10} (\text{I}_{a1}^{1-3})$	5	5	5	5	1	4	25	0.135

为了将待评区对于聚类中心的隶属度直观地反映到区域稳定性评价中来, 笔者根据常用的模糊算子 (这里是根据西安市的实际情况, 在经过试验后选取的模糊算子):

$$\mu_1 = (\mu B)^{1/4}, \mu_2 = [(\mu B)^{1/4}]^{1/4}, \mu_3 = \{[(\mu B)^{1/4}]^{1/4}\}^{1/2}$$

求得各待评区对于不同稳定性级别的隶属度 (表 3), 已达到次较不稳定级别的待评区

不再计算较不稳定级别的隶属度, 依此类推。在表 3 中, 笔者根据该区实际, 并结合计算结

表 3 西安市地壳稳定性模糊聚类一览表

Table 3 Summary of fuzzy clustering of crustal stability in Xi'an City

分区 编号	$m/\sum m$	模糊算子		
		次较不稳定 ( $\mu_1$ )	较不稳定 ( $\mu_2$ )	不稳定 ( $\mu_3$ )
$B_1 (II_{al}^{1-1})$	0.081	0.533	[0.624]	
$B_2 (II_{al}^{1-2})$	0.065	0.505	0.599	[0.774]
$B_3 (II_{al}^{1-3})$	0.135	[0.606]		
$B_4 (II_{al}^{2-1})$	0.135	[0.606]		
$B_5 (II_{al}^{3-1})$	0.103	0.567	[0.653]	
$B_6 (II_{al}^{3-2})$	0.059	0.493	0.588	[0.767]
$B_7 (II_{al}^{3-3})$	0.130	[0.600]		
$B_8 (I_{al}^{1-1})$	0.076	0.525	[0.617]	
$B_9 (I_{al}^{1-2})$	0.081	0.533	[0.624]	
$B_{10} (I_{al}^{1-3})$	0.135	[0.606]		

注: [0.606] 中的括号表示本区已达到对应的稳定性级别。

果综合考虑, 经过试验和研究, 选取 0.6 进行聚类。这样将西安市 10 个待评区稳定性划分为次较不稳定、较不稳定和不稳定 3 个级别 (图 2)。

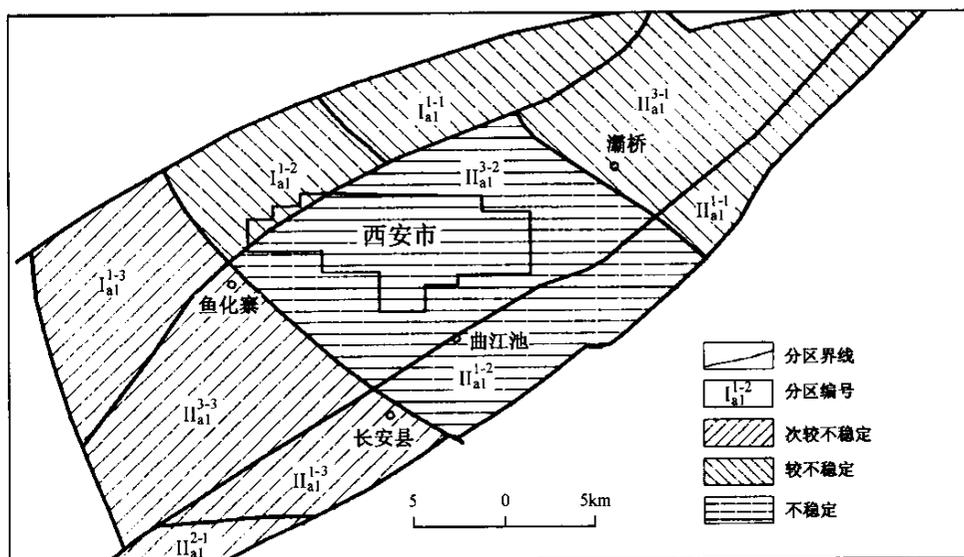


图 2 西安市地壳稳定性分区图

Fig.2 Regionalization of crustal stability in the Xi'an City

## 4 对西安市城市发展规划的建议

(1) 西安市总体处于次较不稳定—不稳定区范围，西南部稳定性相对较好，地震基本烈度为Ⅷ度，市区北临渭河，其河漫滩、一级阶地、二级阶地是砂土液化的工程地质条件，东南部受临潼-长安断裂影响较大，故城市建设应向西部及西南部发展。

(2) 由于市区及市郊地裂缝发育，同时也有地面沉降出现，故工程设施应平行地裂缝带，在地裂缝带间布设，并根据建筑物的类型、性质，合理选择避让距离。对必须跨地裂缝的建筑设施（地下电缆、各种管道、地铁等），应采取严格的技术防护措施。地裂缝带（一般 3~8m）可作为林带、花园绿化场地。

(3) 西安市区松散沉积巨厚，靠近活动断裂带，地裂缝带密集成群，区域稳定性较差，一般不宜兴建高层—超高层建筑，尽管如此，在市区除地面沉降中心、地面运动峰值加速度较大等地段外，地裂缝带间的相对稳定区仍可划分出相对稳定的安全岛，兴建高层建筑或其他重大工程设施。

## 5 结语

随着我国城市化进程的加快及城镇建设的快速发展，区域地壳稳定性评价与研究在城市建设、发展规划及大型工程建设中的作用也愈来愈重要。区域地壳稳定性评价和研究逐渐由定性向半定量、定量方面发展，模糊数学、灰色理论等数学方法及现代信息技术等逐渐被应用。笔者依据在西安市开展区域地壳稳定性研究所取得的成果，对西安市城市建设和发展规划提出的建议只是方向性的，在实施工程前必须进行大比例尺详细勘察，防止和减少失误。

该项目得到了熊润清、杨家骑、周立功教授级高级工程师的悉心指导和大力支持，本文承蒙西北大学吴汉宁教授悉心审阅，谨致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 李永善, 等. 西安地裂缝 [M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [2] 沈小珍. 西安地区地面沉降形成原因的初步探讨 [J]. 上海地质, 1981 (1).
- [3] 李兴唐. 城市区域地壳稳定性评价原则 [J]. 水文地质工程地质, 1987 (6).
- [4] 吴树仁, 陈庆宣, 孙叶. 我国区域地壳稳定性研究的新进展 [J]. 地质力学学报, 1995 (1).
- [5] 张宝增, 谢振乾, 等. 西安地区地壳稳定性基本估价 [J]. 陕西地质, 1989 (1).
- [6] 吴望明, 陈永义, 等. 应用模糊集方法 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.

## APPLICATION OF THE FUZZY CLUSTERING ANALYSIS IN THE EVALUATION OF REGIONAL CRUSTAL STABILITY IN XI'AN CITY

YANG Jian-jun<sup>1 A</sup>, XIE Zhen-qian<sup>2</sup>, ZHENG Ning-ping<sup>3</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710082, Shaanxi;

2. Xi'an Seismological Bureau, Xi'an 710001, Shaanxi;

3. Information Centre of Land and Resources of Shaanxi Province, Xi'an 710054, Shaanxi;

4. Shaanxi Provincial Department of Land and Resources, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

**Abstract** : The authors carried out the evaluation and study of the regional crustal stability and geological hazards in Xi'an City. A wealth of data was gained in geology, geophysical prospecting, surveying and model experiments. According to an analysis of these data and considering such factors as the endogenic and exogenic dynamic geological processes and medium conditions, six principal factors affecting the crustal stability in Xi'an City are selected as a system of the stability evaluation indicators and the fuzzy mathematic method is applied to make a regional crustal stability evaluation. The authors divide the crustal stability in Xi'an City into three grades, sub-unstable, relatively unstable and unstable, and ten areas. On that basis, some guidance suggestions for the urban construction and development plan in Xi'an City are put forward in this paper.

**Key words** : crustal stability; fuzzy clustering; urban construction and development plan