

# 模糊相似选择 在确定泥石流沟危险雨情区上的应用

姚 令 侃

(西南交通大学)

## 提 要

本文的目的是研究对无足够雨量观测资料的泥石流沟, 如何确定其发生泥石流临界雨量值的问题。为此应用模糊相似选择的方法, 以已知临界雨量值的泥石流沟作为比较样本, 对于任何一条泥石流沟, 可由其地面条件与比较样本之间相似程度的分析, 定出临界雨量值的可能范围, 即该泥石流沟的危险雨情区。

作为软性防治措施的关键, 暴雨泥石流的预报研究日益得到重视, 而泥石流临界雨量的确定, 又是对降雨泥石流进行可能性预报首先必须解决的问题。目前, 对有长期雨量观测资料的泥石流沟, 通过对雨量资料的分析即可确定泥石流暴发的降雨临界值, 对于无足够雨量观测资料的大量泥石流沟则无能为力。当然, 由于自然地理环境、地质地貌、土壤岩性、固体物质储备情况等条件的不同, 每条泥石流沟的临界雨量值是有差异的, 但是地面条件相似的泥石流沟暴发泥石流的所需降雨条件也应类同。利用这种相似关系, 对无雨量观测资料的泥石流沟, 若能找到地面条件相似的另一条已知临界雨量值的泥石流沟, 以其临界雨量值作为参考标准而大致确定出本沟临界雨量的范围, 作为本沟的危险雨情区, 还是可能的。对于泥石流形成运动而言, 泥石流系统是一个非确定性系统, 其初始状态是由许多因素所组成的模糊集合。泥石流沟的地面条件, 是模糊初始场中的主要部分。两条泥石流沟地面条件的相似是三维空间中多个物理量之间的相似, 这种相似也只能是在模糊概念下的相似, 显然用精确数学来处理这种相似性是不适合的。我们在沈寿长导师的指导下, 采用模糊相似选择的方法, 以有足够雨量观测资料的泥石流沟作为比较样本, 对于任何一条泥石流沟, 则都可以由反映其流域特征的各个因子计算出该地面条件和各比较样本之间的相似程度, 并以相似度足够高的比较样本的临界降雨条件作为参考标准, 通过推理分析从而确定出该泥石流沟的危险雨情区。

## 一、模糊相似选择判定泥石流沟地面条件优先相似度的方法

### (一) 比较样本和相似因子的选择原则

比较样本的选择标准有两条: 其一, 必须是有较长期雨量观测资料的泥石流沟; 其二, 这些沟应具有一定的代表性。据此, 我们在研究中选择了蒋家沟等5条沟作为比较样本, 编号为 $A_0-A_4$ 。

相似因子的选择原则是：其一，该因子与泥石流发生关系密切；其二，彼此相关性强的几个因子中，只能选择一个。据此，在征求部分专家意见的基础上暂定为6个，编号 $C_1—C_6$ 。

选择的比较样本中各相似因子的数值列于表1。

表1

沟名	流域面积 ( $\text{km}^2$ ) $C_1$	主沟平均比降 (%) $C_2$	形成区山坡平 均坡度(度) $C_3$	形成泥石流 主要岩性 $C_4$	滑塌总面积率 (%) $C_5$	固体物质储备 量( $10^4\text{m}^3$ ) $C_6$
蒋家沟 $A_0$	45.10	152	36.5	2	26.5	74,800.0
柳湾沟 $A_1$	1.97	290	24.0	2	15.2	1,040.0
火烧沟 $A_2$	1.98	480	33.0	2	17.2	1,700.0
三滩 $A_3$	1.50	425	35.0	1	2.7	77.5
大盈江 浑水沟 $A_4$	4.50	136	35.0	3	20.6	5,170.6

注：表中形成泥石流主要岩性一栏中的数字代表意义如下：1—硬岩；2—软硬岩相间；3—软岩或土。

### (二) 以大桥河浑水沟作为固定样本的分析

现以大桥河浑水沟作为固定样本，记为 $A_k$ ，用模糊相似选择法来确定5个比较样本 $A_0—A_4$ 与 $A_k$ 的相似程度。 $A_k$ 的相似因子数值列于表2。

表2

相似因子	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
大桥河浑水沟 $A_k$	26.20	136	31.8	3	25.7	15,000.0

对于固定的一个因子 $C_i$ ，定义：

$$D_i = |X_i - X_k| \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4)$$

其中： $X_i$ 是 $A_i$ 中关于给定因子的特征值。

$$\text{又令 } r_{ij} = \begin{cases} \frac{D_i}{D_i + D_j} = 1 - r_{ji} & (i, j = 0, 1, 2, 3, 4) \\ 0 & (\text{若 } i = j) \end{cases}$$

据这一公式可计算出关于6个因子 $C_1—C_6$ 的6个模糊相关矩阵中的所有元素 $r_{ij}$ ，得相关矩阵如下：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.56 & 0.56 & 0.57 & 0.53 \\ 0.44 & 0 & 0.50 & 0.50 & 0.47 \\ 0.44 & 0.50 & 0 & 0.50 & 0.47 \\ 0.43 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0.47 \\ 0.47 & 0.53 & 0.53 & 0.53 & 0 \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0.91 & 0.96 & 0.95 & 0 \\ 0.09 & 0 & 0.69 & 0.65 & 0 \\ 0.04 & 0.31 & 0 & 0.46 & 0 \\ 0.05 & 0.31 & 0.51 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0.62 & 0.20 & 0.41 & 0.41 \\ 0.38 & 0 & 0.13 & 0.29 & 0.29 \\ 0.80 & 0.87 & 0 & 0.73 & 0.73 \\ 0.59 & 0.71 & 0.27 & 0 & 0.50 \\ 0.51 & 0.71 & 0.27 & 0.50 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0.50 & 0.50 & 0.67 & 0 \\ 0.50 & 0 & 0.50 & 0.67 & 0 \\ 0.50 & 0.50 & 0 & 0.67 & 0 \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0.94 & 0.92 & 0.97 & 0.88 \\ 0.60 & 0 & 0.45 & 0.69 & 0.33 \\ 0.80 & 0.55 & 0 & 0.73 & 0.38 \\ 0.30 & 0.31 & 0.27 & 0 & 0.18 \\ 0.12 & 0.67 & 0.62 & 0.82 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0.19 & 0.18 & 0.20 & 0.14 \\ 0.81 & 0 & 0.49 & 0.52 & 0.41 \\ 0.82 & 0.51 & 0 & 0.55 & 0.42 \\ 0.80 & 0.48 & 0.48 & 0 & 0.40 \\ 0.86 & 0.59 & 0.58 & 0.60 & 0 \end{pmatrix}$$

有了6个相关矩阵后，再就每一个矩阵顺序由大至小地选取 $\lambda$ 值， $\lambda \in [0, 1]$ 。以首先达到除对角线元素外全行为1的 $\lambda$ 截矩阵所对应的比较样本和 $A_k$ 最为相似，并记以序号1。然后删除该比较样本所对应的行列再降低 $\lambda$ 值，依次采取相似比较样本号，并分别记以序号“2”，“3”，“4”，“5”。

例如对 $R_1$ 矩阵，依次取 $\lambda = 0.53, 0.52, 0.5$ ，则得 $A_0$ 序号为1， $A_4$ 序号为2， $A_1, A_2, A_3$ 序号为3。用同样方法计算 $R_2-R_6$ ，结果列于表3。

表3

比较样本	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$\sum_{i=1}^6 C_i$
蒋家沟 $A_0$	1	2	3	2	1	5	14
柳沟 $A_1$	3	3	4	2	4	3	19
火烧沟 $A_2$	3	5	1	2	3	2	16
三滩 $A_3$	3	4	2	3	5	4	21
大盈江浑水沟 $A_4$	2	1	2	1	2	1	9

对于各个比较样本，某个相似因子序号越小，则说明与固定样本对应因子的相似程度越高。

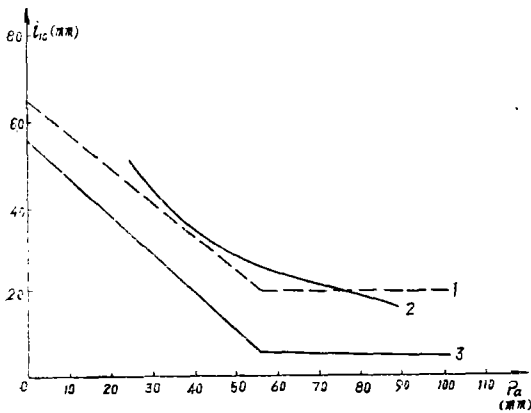
$\sum_{i=1}^6 C_i$ 则表示了6个相似因子综合起来的相似程度，哪条沟和数越小，则说明从整体上看该沟地条件与大桥沟浑水沟越相似。

由表3可见，5个比较样本中，大盈江浑水沟与大桥河浑水沟最为相似，蒋家沟次之。有了由模糊相似选择对地面条件相似性的结论，现再考察这3条沟临界雨量值之间的关系如何。两条临界雨量线之间的接近程度，选择两条曲线所围成的面积作为衡量标准，考察情况见图1和图2。为了比较，这3条沟由模糊相似选择所得地面条件相似度结果和临界雨量线接近程度结果列于表4。

表 4

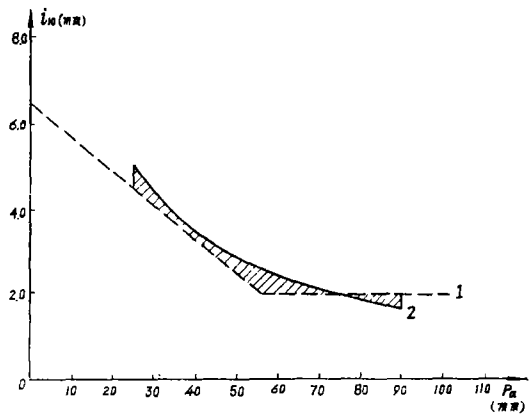
组 合 关 系	地面条件相似优先度 $\sum_{i=1}^n C_i$	二条临界雨量线所围面积
大桥河浑水沟与大盈江浑水沟	9	1.9
大桥河浑水沟与蒋家沟	14	9.2

由表 4 可见，地面条件相似优先度高的泥石流沟，其临界雨量线确实也与大桥河浑水沟的临界雨量线更为接近。利用这个固定样本临界雨量线为已知的特例，证明了这两类不同物理量的相似度之间是正关联的函数关系，该结论即成为以下有关应用问题讨论的理论基础。



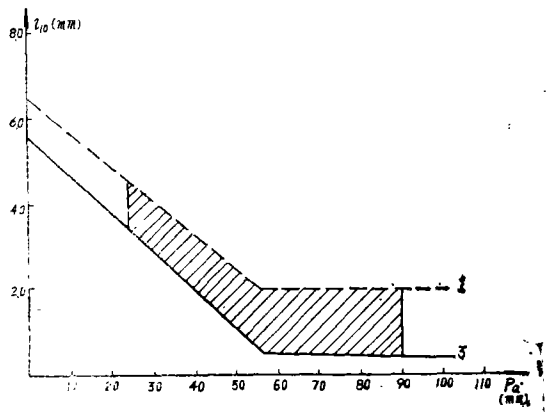
- 1—大桥河浑水沟泥石流暴发临界线
- 2—大盈江浑水沟泥石流暴发临界线
- 3—蒋家沟泥石流暴发临界线
- $i_{10}$ ——10分钟暴雨强度
- $P_a$ ——前期降水量

图 1 大桥河浑水沟、大盈江浑水沟、蒋家沟  $i_{10}$  和  $P_a$  与泥石流暴发关系图



大桥河浑水沟和大盈江浑水沟泥石流暴发临界雨量线所围成的面积

图 2—1



大桥河浑水沟和蒋家沟泥石流暴发临界雨量线所围成的面积

图 2—2

## 二、模糊相似选择确定泥石流危险雨情区的方法

在实际应用中，为了减少气候类型、地震活动等区域性的影响，比较样本以选在与固定样本同一地区为好。为此，我们所选用的泥石流沟都限于西北地区。比较样本定为4个，由于资料限制，相似因子只选了5个，见表5。

表5

沟名	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
火烧沟 $A_0$	1.98	480	33	2	17.2
南小河沟 $A_1$	36.20	30	32	3	0.4
柳湾沟 $A_2$	1.97	290	24	2	15.2
纸坊沟 $A_3$	18.93	60	35	3	13.0

注：表中 $C_1 - C_5$ 的定义同表1。

### (一) 泥湾沟危险雨情区的确定

这里以泥湾沟作为固定样本，其相似因子情况列于表6。

表6

相似因子	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
泥湾沟 $A_{k1}$	10.30	230	26	2	22.3

据式(1)解得各比较样本与泥湾沟比较后所得优先相似度如表7。

表7

比较样本号	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$\sum_{i=1}^5 C_i$
$A_0$	1	4	3	1	1	10
$A_1$	3	3	2	3	4	14
$A_2$	3	1	1	1	2	8
$A_3$	2	2	4	2	3	13

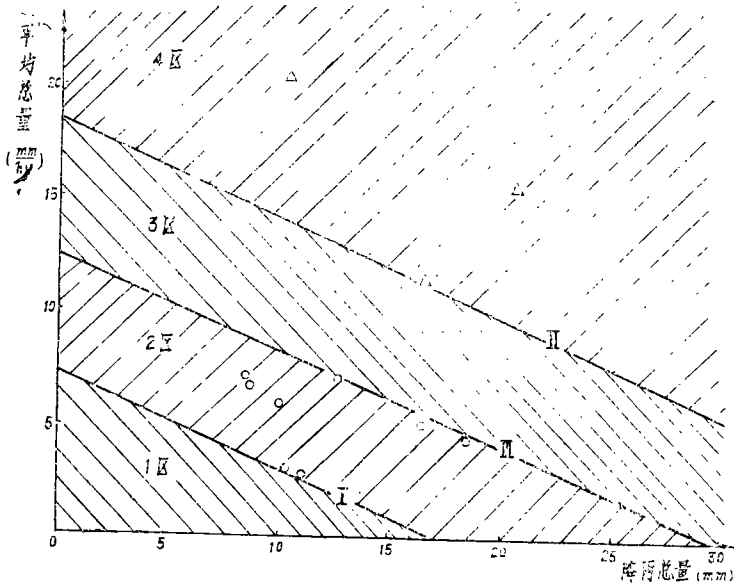
在确定序号的计算中，所采用的相似水平 $\lambda$ 值如表8。

由表7可知，4个比较样本中，柳湾沟与泥湾沟最为相似，火烧沟次之。再由表8可知，柳湾沟与火烧沟平均相似水平一个是0.71，一个是0.61，均大于0.5，那么这两条沟均可作为确定泥湾沟危险雨情区的参考标准。

表 8

比较样本	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	均 值
A <sub>0</sub>	0.50	0.44	0.53	0.99	0.50	0.61
A <sub>1</sub>	0.24	0.53	0.54	0.50	0.30	0.42
A <sub>2</sub>	0.50	0.74	0.75	1.00	0.57	0.71
A <sub>3</sub>	0.49	0.54	0.44	0.50	0.56	0.50

根据地面条件相似分析的结论，又由地面条件相似度和临界雨量线相近度之间的正关联关系，初步判断泥湾沟的临界雨量线必须满足与柳湾沟的差距小于与火烧沟的差距这一原则。现假定泥湾沟临界雨量线与柳湾沟临界雨量线不相交，则泥湾沟临界雨量线只可能位于柳湾沟临界线的上方或下方，且上界不可能超过柳湾沟与火烧沟临界线所夹区域的平分线，即图 3 所示的 I 区和 II 区。



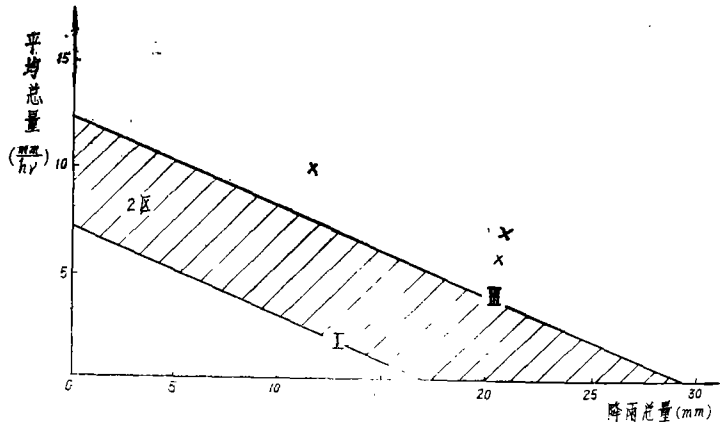
- —— 柳湾沟发生泥石流雨量点
- △ —— 火烧沟发生泥石流雨量点
- I —— 柳湾沟临界雨量线
- II —— 火烧沟临界雨量线
- III —— I、II 曲线所围区域的平分线

注：由于资料限制，这里只能以柳湾沟和火烧沟发生泥石流雨量点群的外包络线，近似地作为它们的临界雨量线。

图 3 由最相似和次相似的比较样本临界雨量线划分的分区图

为了进一步确定泥湾沟临界线到底是在 I 区还是 II 区，则需进行以下分析：

1、严重度分析。采用《水土保持通报》1986年第 1 期谭炳炎老师所提出的泥石流沟严重程



×——泥湾沟发生泥石流雨量点

图4 泥湾沟危险雨情区

度的数量化综合评判法给固定样本和相似度最高的比较样本打分，结果柳湾沟评分为35，泥湾沟评分为31（因资料限制都只用了7项因素）。评判结果，说明柳湾沟严重程度大于泥湾沟。

2、泥石流暴发频率分析。查历史资料说明，柳湾沟发生泥石流频率为一年几次至十几次，泥湾沟为一年几次。这两条沟都位于甘肃武都县内，说明在降雨条件接近的情况下柳湾沟暴发泥石流频率高于泥湾沟。

综合以上两点分析得出结论，泥湾沟发生泥石流所需的雨量比柳湾沟大，那么其临界雨量线只可能位于Ⅰ区。

最后的结论是泥湾沟的危险雨情区确定为Ⅰ区。

危险雨情区的意义为，若雨量点落在危险雨情区以下，则肯定不会发生泥石流；若雨量点落在区域内，则泥石流可能发生也可能不发生，并且发生的概率沿区域纵向递增；若雨量点落在区域之上，则泥石流肯定发生。显然，若危险雨情区的带宽足够窄，在实际应用上就具有与泥石流暴发临界雨量线的同样作用。

图4为泥湾沟已经发生的几场泥石流降雨量点的分布情况。由于并没有雨量点落到危险雨情区以下。故认为由以前资料的验证结果表明，由模糊相似选择所确定的危险雨情区是正确的。

有关泥湾沟危险雨情区的确定问题已讨论完毕。全部过程可总结为两个步骤：第一，由地面条件模糊相似优先度的计算得出危险雨情区的大致范围；第二，对固定样本和优先相似程度最高的比较样本特征进行分析，最后由推理确定出危险雨情区。

### （二）洪水沟和山背后沟危险雨情区的确定

为了进一步验证该方法的正确性，再选两条沟进行分析。本节以洪水沟作为固定样本 $A_{k2}$ 、山背后沟为固定样本 $A_{k3}$ ，相似因子情况列于表9，优先相似度的计算结果列于表10。

表9

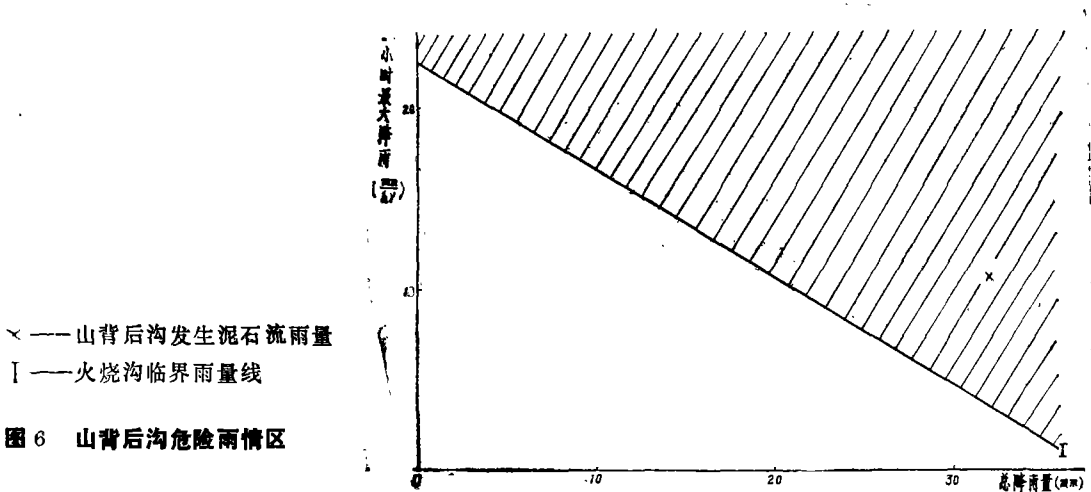
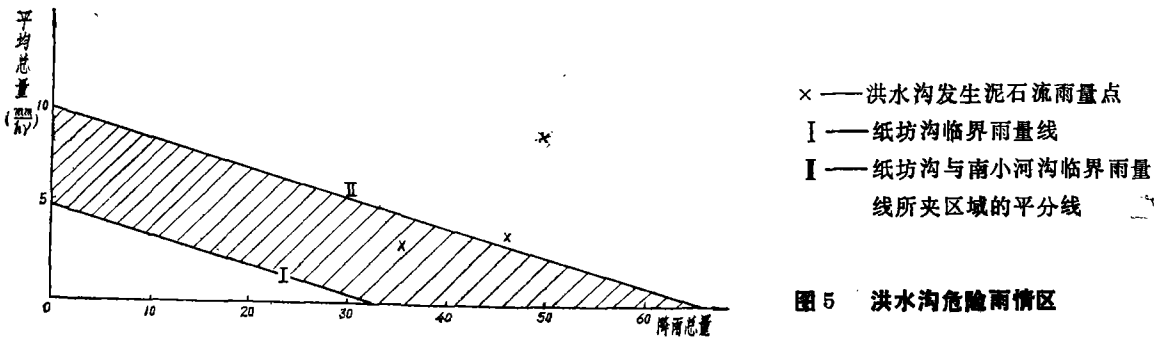
相似因子	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
洪水沟 $A_{k2}$	12.15	100	40	3	6.2
山背后沟 $A_{k3}$	2.18	310	33	2	9.1

由表10知，纸坊沟与洪水沟最为相似，南小河沟次之。且查得 $A_3$ 与 $A_1$   $\lambda$ 平均值均 $>0.5$ ；火烧沟与山背后沟最为相似，柳湾沟次之，且查得 $A_0$ 与 $A_2$   $\lambda$ 平均值均 $>0.5$ 。

表 10

比较样本号	以 $A_{k_2}$ 作为固定样本时的	以 $A_{k_3}$ 作为固定样本时的
	$\sum_{i=1}^5 C_i$	$\sum_{i=1}^5 C_i$
$A_0$	14	8
$A_1$	10	16
$A_2$	14	10
$A_3$	6	12

有了上述地面条件相似度的结果后，同理，再进行严重度和泥石流暴发频率的分析，最后确定出洪水沟和山背后沟的危险雨情区如图5、图6所示。



### (三) 影响精度诸因素的分析

从以上所分析的几条沟可看到，有的沟危险区是一条带状区域，有的沟则是仅有下界的无穷



大区域，而我们期望的是每条沟都是一条越窄越好的带子，故需对影响精度的原因进行分析。

用模糊相似选择法计算出的相似优先度，仅具有限于在比较样本中讨论的相对概念。目前在数学上也还无法得出所谓绝对相似度来，所以只能用相似度较高的比较样本的临界雨量线来控制危险雨情区的上下限。这样能否保证危险雨情区的精度，就取决于作为参考标准的比较样本是否理想。究竟比较样本达到什么标准才算理想，目前还很难给出定量描述。在实际应用中，若能保证比较样本的一定数量和代表性，选择作为参考标准的比较样本具有较明显优势的平均相似水平，则一般来说，确定出的危险雨情区还是有价值的。

地面条件的特征是由相似因子来体现的。相似因子是否选择得当也会直接影响本方法的应用效果。我们选择因子时受到资料范围的很大限制，这些相似因子是否妥当尚有待探讨。此外每一个因子对泥石流发生影响程度不一样，在考虑诸因子综合作用时，每个因子的权重也应不同。本文中是采用诸因子平权的方式计算的。若根据实际情况分析给以每个因子权数，则可能会收到更为满意的效果。

我们认为，解决相似因子的选择、加权等问题，目前以采用德尔菲（Delphi）方法，KJ，方法等专家评议的方法为妥。

### 三、模糊相似选择应用于暴雨泥石流预报的展望

统计预报一直是泥石流预报研究中主要使用的方法，但统计预报要求以一定数量的输入、输出记载资料为基础，这个条件对大多数泥石流沟都不具备，所以使它的应用范围受到很大限制。

模糊相似选择方法可以部分地弥补这个缺陷，把有限的少数沟谷的统计资料引伸到大量的无资料的泥石流沟上去指导预报，故我们对模糊相似选择方法进一步的发展方向比较注意，下面专门作一点讨论。

相似理论分析一直在水文、气象等学科的研究中得到广泛的应用，在泥石流预报的研究中也早就是专家们进行主观预报所使用的主要方法之一。模糊相似选择法确定泥石流沟危险雨情区的过程，基本上是模拟专家判别的思维过程，即对提供的信息，运用以前所积累的知识进行对比处理，再经过逻辑推理作出决策。整个判别过程既有数值计算也有逻辑推理。数值计算中的许多因素是由专家经验决定的，逻辑推理使用的则主要是试探性的专家知识，若用计算机实现整个过程，现已初步具备了一个专家系统的模式。专家系统实质上是一种经验模拟系统，我在“暴雨泥石流预报可行性与可达水平初探”一文中，已在理论上讨论了各种预报方法对泥石流预报的适用性，提出现阶段建立泥石流预报的专家系统比选择别的预报途径在技术上具有明显的优越性这一观点。虽然目前在本学科专家系统尚是国内外无人涉足的领域，但对专家系统的物质基础即电子计算机技术的应用方面已有了一定的进展。铁道科学院西南研究所谭炳炎老师已完成了1,000多条泥石流沟档案的计算机存储工作，对模糊数学、数量化理论等数学工具在泥石流危险度的判别方面已有研究成果。综上所述，不妨大胆预言，建立一个泥石流预报的专家系统，其拥有一个由一定数量比较样本和逻辑规则所构成的知识库，以逐时的天气预报或实测雨量值作为动态输入，并以模糊相似比较作为主要推理手段，在技术上应是完全可望在近期实现的。

APPLICATION OF THE METHOD OF FUZZY SIMILARITY SELECTION  
IN DETERMINING THE DANGEROUS ENVELOPED AREA OF  
RAINFALL CONDITION IN DEBRIS FLOW GULLIES

Yao Lingkan

*(Southwest Communication University)*

**Abstract**

This paper discusses the problem of the way to determine the value of beginning rain causing debris flow when sufficient observed rainfall data for the gully concerned are not available. The method of fuzzy similarity selection is applied for this purpose by making use of some debris flow gullies as models for comparison whose value of beginning rain causing debris flow are known. For any debris flow gully, the possible range of the value of beginning rain can be determined by analysing the degree of similarity in geomorphic conditions between the investigated gully and the models, the range of which would likely be the dangerous enveloped area of rainfall condition of that gully.



(上接第62页)

loss, collapsing, slop sliding, debris flow, mountain torrents and so on, which cause great loss in economy, and damage fields and houses terribly every year, threatening the safety and property of the local residents. The harness measures are to stablize the gully slope and sliding mass of the slope, to block the loosening solid material coming from branch ditches and upper reaches, to dredge the channels and protect the section for flood to come through, and to construct new channels in order to lead the mountain torrents and debris flow into predetermined section for the harmfulness to be avoided or reduced.