

# 降雨泥石流形成要素的分析

——灰色系统理论在处理德尔菲法调查结果上的应用

姚 令 侃

(铁道部科学研究院西南研究所)

## 摘 要

本文介绍试用德尔菲法确定降雨泥石流形成要素的调查结果和用灰色系统理论对专家意见进行归纳的过程。这次调查,共征询了53名专家的意见。在处理调查结果时,应用了灰色统计法对专家们的意见进行归纳,并利用对实测资料进行灰色关联度分析所得结论作为决策参考依据。最后确定了11个泥石流形成要素,并根据其重要性分成三类。

## 前 言

泥石流的形成机理,是泥石流学科中最重要的研究项目之一。它是剖析泥石流形成发展过程的关键,也是开展泥石流防治和预测预报工作的依据。但是目前,这还是研究中的薄弱环节,亟待充实提高,有所突破。要想定量地掌握泥石流的形成条件,无论建立何种形式的模式,首先必须解决的问题,是从众多因素中找出对泥石流形成起主要作用的因素,并确定其重要性的相对地位。对于泥石流形成运动而言,泥石流系统具有结构不确定性、信息难分辨性和系统中含未知或不确知信息的特点,直接参与泥石流形成的各自然因素数量众多,影响各异,而且相互制约。由于目前本学科理论研究和实践技术水平的限制,要想单纯用理论推导方式和数学解析手段来解决这个问题,是极其困难的,这就迫使我们寻求其它的途径。这是一个方面。另一方面,对于泥石流形成这一自然现象,野外观测非常困难,有关的实际资料数据极为缺乏,于是专家的知识 and 经验就成为重要的资料来源了。怎样合理地收集和 处理这类资料,则是我们必须研究的课题。

德尔菲方法是集中专家智慧的一种流行的方法,其特点不是把专家召集在一起开会讨论,而是事先按需要回答的问题编写一个意见征询表,送给专家们,要求他们以书面形式回答,然后用统计方法来归纳专家意见。无数实践已证明,这是一种优良格式化的收集专家意见的方法。为此,我在沈寿长导师的指导下,借1986年10月全国泥石流学术会议专家汇集之机,应用德尔菲方法进行了一次以确定降雨泥石流形成要素为目的的专家调查。在处理专家调查意见时,对单凭专家意见不能完全确定的问题,利用对实测资料进行灰色关联度分析所得结论作为决策参考依据。最后应用灰色统计法对专家意见进行归纳,确定出11个泥石流形成的要素,并根据其重要性将它们分为三类。

## 一、德尔菲法的调查情况

1、确定本次调查内容的指导思想。泥石流的形成条件,目前还只是定性地归因于陡峻地形、

松散物质储备和水源动力这三大类因素；对于降雨泥石流而言，水源动力即降雨条件。对任何一条泥石流沟，前两类因素都是该流域的固有特征，这些固有特征一般通过一次野外调查即可全部确定。而泥石流发生的临界降雨条件，则是由固有特征所决定的属性，目前它的数值都是由对足够的雨量观测资料分析后所确定的，因为绝大多数的泥石流沟都不具备这个条件，所以它们的形成条件无法确定。显然，对于无足够雨量观测资料的泥石流沟，若能知道促使泥石流发生的这三类因素的组合关系，那也就等于掌握了所有的形成条件。这就向我们提示了一种可能的泥石流形成的数学模型，即对任何一条泥石流沟，以其固有特征作为已知量，临界降雨条件作为未知量，只要能找到由这些已知量推求未知量的函数关系 $F$ ，那么该沟的泥石流形成条件就都可以确定了。我在《水土保持通报》1986年第6期“模糊相似选择在确定泥石流沟危险雨情区上的应用”一文中，已提出了建立这种函数式 $F$ 的初步方案。如何寻求一个具有普遍适用性的函数式 $F$ ，就是我们下一步的研究目标。为此，首先需要进行的工作就是确定哪些固有特征应作为 $F$ 的已知量，这就是我们进行本次调查的目的。基于上述指导思想，我们确定了这次调查的内容，编制了一个专家意见调查表。表中罗列了地理、地貌、地质等方面的19个因素，要求专家们在其中选出与降雨泥石流发生关系最为密切的因素，对选出的因素还要求给出其重要性的权数。

**2、德尔菲专家组成员情况及专家意见初步统计结果。**本次调查德尔菲法专家组由从事地理、地貌、水文气象、水利工程、铁道和道路工程等专业的53名泥石流工作者组成，其人数之多、专业之广泛都是前所未有的。专家组中各类人员的构成情况列于表1。专家意见用中心意向统计法进行统计，所得初步结果列于表2。

表1

职称或工作部门	相当于副研究员以上的高级技术人员	相当于助理研究员的中级技术人员	相当于实习研究员的初级技术人员	在科学研究部门工作的人员	在生产建设部门工作的人员	在高等院校工作的人员
占总人数的百分比	39%	49%	12%	52%	34%	14%

表2

因素	流域面积		流域气候类型	相对高差	主沟平均比降	形成区沟槽比降	形成区沟槽横断面特征	形成区沟槽纵断面特征	形成区山坡平均坡度	堵塞程度	植被覆盖率	形成泥石流主要岩性	覆盖层厚度	固体物质补给方式	滑塌总面积率	滑塌区坡度	固体物质储备量	人类不合理活动	构造特征	地震
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
选择人数	19	24	14	24	13	2	4	20	5	21	22	5	25	17	5	40	27	17	5	
权重平均值(%)	11.7	17.6	19.3	18.5	18.1			15.6		13.9	15.7		16.2	14.4		22.9	12.7	19.5		
权重标准偏差值(%)	3.6	6.5	12.2	7.6	5			8.8		4.6	4.6		7.8	7.6		6.1	6.3	8.3		

注：表中仍按专家意见调查表中的次序列出所有因素，筛选掉的因素未统计权重值。有4位专家只选择了要素，未给出权重，他们的意见仍统计在选择人数一栏。

由表 2 可见, 编号为 6、7、9、12、15、19 的因素, 选择人数少于总人数的 10%。这些专家意见统计结果表明, 它们不是重要因素, 故这 6 个因素被筛选掉了, 以下的讨论将在剩下的 13 个因素进行。

## 二、灰色关联度分析在筛选相关因子上的应用

在我们所研究的问题中, 若参与的因子过多, 且因子之间又有较强的相互联系, 就会减小各因子的相对影响, 以至降低主导因子的作用。我们希望用一定数量的因子反映尽可能多的信息量, 这样在几个相关性很强的因子中, 只宜选择与泥石流形成关系最密切的一个作为它们的代表。

经第一步筛选后剩下的 13 个因素中, 相对高差、主沟平均比降和形成区沟槽比降这三个因素, 都反映了泥石流流体拥有的势能条件, 彼此相关性很强。从对专家意见调查表的统计过程也发现, 极少有人同时在这 3 项因素中选择 2 项或 3 项, 这说明专家统计意向认为, 这 3 项因素中只选择 1 项为好。这里所要讨论的就是如何从它们中间选出最有代表性的 1 项。

从表 2 可看到, 这 3 个因素的权重平均值非常接近, 从选择人数上看, 选择主沟平均比降的人明显地较选择其余两项的人要多, 但仅据此就作出取舍决定似乎理由尚不够充分。因此, 我们希望利用实测资料对这 3 项因素进行比较分析, 以提供更多的决策依据。在因素分析中常用的数理统计方法, 要求大量的数据和较典型的分布规律, 这恰是目前我们拥有的资料所无法满足的, 必须寻求其它的数学方法。前言中已谈到, 泥石流系统具有系统中含未知或不确知信息的特点, 故它是一个灰色系统, 可应用灰色系统理论进行分析。又因为用灰色关联度进行因子分析, 不要求数据有大量样本和典型分布的前提条件, 故我们决定采用它来处理本章的问题。

首先我们必须确定衡量这 3 项因素对形成泥石流重要性的定量指标。前面已谈到, 表 2 中的因素都是泥石流沟流域的固有特征, 发生泥石流临界雨量值是由此特征所决定的属性。在降雨条件相同的前提下, 当然哪条沟的临界雨量值越小, 则该沟越容易发生泥石流。从这个角度上看, 临界雨量值的大小, 反映了泥石流发生可能性的大小, 因此可以选择这 3 个因素对临界雨量值的影响程度作为衡量它们对泥石流形成重要性的指标。

由于我们目前可利用的只有少量野外观测资料, 为了应用灰色关联度理论, 还必须先作这样的假定, 即假定我们所研究的对象是一个固定特征可变的泥石流系统。该系统流域特征在  $K_1$  状态下取蒋家沟的各个数值, 在  $K_2$  状态下取大桥河泥石流的各个数值, 如此等等。这样处理并不影响我们所要讨论的问题的实质, 但由此将各个互不相关的泥石流沟的资料变成了一组有序的数列。在完成了上述准备工作以后, 可以开始进行灰色关联度分析。

因临界雨量值必须由前期降雨和激发雨强这两个指标共同决定, 为了同时反映这两个指标, 故选择临界雨量线与座标轴所围成的面积作为参考数列  $\{X_0(K)\}$ , 而以相对高差、主沟平均比降和形成区沟槽比降分别记为序列  $\{X_1(K)\}$ 、 $\{X_2(K)\}$ 、 $\{X_3(K)\}$ , 以考察它们与参考数列  $\{X_0(K)\}$  的灰色关联度。首先列出已经过标准化处理后的各数据序列如表 3 所示。

据表 3 可算出

$$\min_i \min_k \left| X_0(K) - X_i(K) \right| = 0.11$$

$$\max_i \max_k \left| X_0(K) - X_i(K) \right| = 3.59$$

表3

序列K	蒋家沟 K <sub>1</sub>	大桥河沟 K <sub>2</sub>	大盈江浑水沟 K <sub>3</sub>	加马其美沟 K <sub>4</sub>	三滩沟 K <sub>5</sub>	大寨子沟 K <sub>6</sub>
临界雨量线所围面积 X <sub>0</sub> (K)	0.42	0.58	0.35	0.09	4.25	0.32
相对高差X <sub>1</sub> (K)	1.50	1.76	0.60	1.04	0.66	0.44
主沟平均比降X <sub>2</sub> (K)	0.63	0.38	0.57	1.09	1.77	1.55
形成区沟槽比降X <sub>3</sub> (K)	0.69	0.26	0.46	1.57	1.51	1.51

(谭万沛：“降雨泥石流的临界雨量研究”，第二届全国泥石流学术会议论文)

取分辨系数 $\xi = 0.5$  再利用关联系数公式

$$\xi_{0i}(K) = \frac{\min_i \min_k |X_0(K) - X_i(K)| + \xi \max_i \max_k |X_0(K) - X_i(K)|}{\max_i \min_k |X_0(K) - X_i(K)| + \xi \max_i \max_k |X_0(K) - X_i(K)|}$$

$$= \frac{1.91}{|X_0(K) - X_i(K)| + 1.80}$$

求得关联 度序列为

$$\xi_{01} = \{0.66 \quad 0.64 \quad 0.93 \quad 0.69 \quad 0.35 \quad 0.99\}$$

$$\xi_{02} = \{0.95 \quad 0.95 \quad 0.95 \quad 0.68 \quad 0.45 \quad 0.63\}$$

$$\xi_{03} = \{0.92 \quad 0.90 \quad 1.00 \quad 0.58 \quad 0.42 \quad 0.64\}$$

$$\text{最后据关联度计算公式 } \gamma_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(K) \quad \xi_{0i}(K) = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 \xi_{0i}(K)$$

$$\text{得 } \gamma_{01} = 0.71 \quad \gamma_{02} = 0.77 \quad \gamma_{03} = 0.74$$

关联度的排序为 $\gamma_{02} > \gamma_{03} > \gamma_{01}$

由上式可知,主沟平均比降与临界雨量线所围面积的关系最为密切,即由实测资料分析结果表明,它对泥石流形成可能性影响较其余两个因素为大。由于这一结论与专家调查的趋势是相吻合的,故我们现在有理由作出决定了,即在这3个因素中,选出主沟平均比降作为代表,而其余两个因素就被筛除了,以下的讨论限于在剩下的11个因素中进行。

### 三、灰色统计法在归纳专家意见上的应用

由前述工作已筛选出11个要素,本章将进行确定它们相对重要性地位的工作。从表1可见,权重标准偏差值都比较大,这说明专家的意见比较分散,这时若仍用权重平均值来表征调查结果已属不妥。为了充分利用各方面的指标和各种情况的信息,归并每个专家的意向,我们决定采用灰色统计法对调查意见进行统计归纳。

灰色统计法的原理为,若记I, II, III, ...为各个专家小组,划分小组的原则是,凡是意见相同的专家均划为一组。

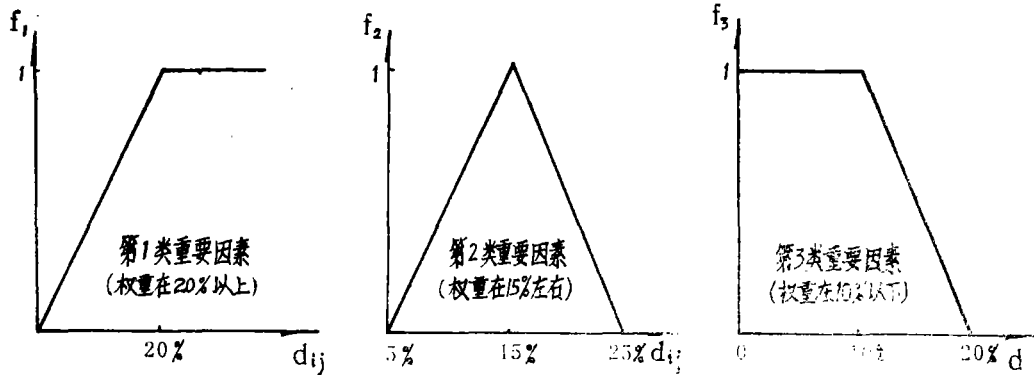
1\*, 2\*, 3\*, ...为待定权重类别的各个因素,

1, 2, 3, ...为因素的权重类别,

记 $d_{ij}$ 为第 $i$ 个专家小组对 $j$ 号因素所给的权重值,  $i \in \{I, II, III, \dots\}$ ,  $j \in \{1^*, 2^*, 3^*, \dots\}$ 。所谓灰色统计法, 是在给出 1, 2, 3, ... 各种因素的权重类别的标准函数后, 以 $d_{ij}$ 作为基本数据来确定 I, II, III, ... 全体对某个因素归纳为 1, 2, 3, ... 各类标准权重类别的灰色权 $\gamma_{ij}$ ,  $i \in \{1^*, 2^*, 3^*, \dots\}$ ,  $j \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 。

灰色统计法可分 4 步进行。

**第1步 定出 1, 2, 3, ... 各权重类别的标准函数。** 本问题规定为如下图所示的三类标准函数



**第2步 确定灰色统计数。** 对每个因素据 $d_{ij}$ 通过标准函数查出函数值 $f_K(d_{ij})$ , 记 $N^{(i)}$ 为第 $i$ 个

专家小组人数,  $i \in \{I, II, III, \dots\}$ , 则有 
$$n_{jK} = \sum_{i=1}^{\omega} f_K(d_{ij}) N^{(i)}$$

$$j = 1^*, 2^*, 3^*, \dots, 11^*$$

$$i = I, II, III, \dots, \omega$$

$$K = 1, 2, 3$$

$n_{jK}$ 即为第 $j$ 号因素属于第 $K$ 类权重类别的灰色统计数。

**第3步 确定灰色权。** 令第 $j$ 号因素的灰色统计数  $n_j = \sum_{k=1}^3 n_{jK}$ , 则各专家小组 (即 I, II, III, ... 的全体) 对第 $j$ 号因素主张属第 $K$ 类权重类别的灰色权为

$$\gamma_{jK} = \frac{n_{jK}}{n_j}$$

$$j \in \{1^*, 2^*, 3^*, \dots\}, K \in \{1, 2, 3\}$$

**第4步 判断因素所属权重类别。** 对于第 $j$ 号因素, 若有  $\max \{ \gamma_{j1}, \gamma_{j2}, \gamma_{j3} \} = \gamma_{jK}$ , 则灰色统计结果为第 $j$ 号因素属第 $K$ 类重要因素。

下面以第 1 号因素流域面积的统计过程说明上述步骤。

首先将专家小组分组情况、小组意见和由第一步所得标准函数值列于表 4。

由第 2 步得灰色统计数为

$$n_{11} = 0.4 + 5 \times 0.5 + 0.8 = 3.7$$

$$n_{12} = 7 \times 0.5 + 0.9 + 5 + 0.7 = 10.1$$

$$n_{13} = 2 + 7 + 0.6 + 5 \times 0.5 + 0.2 = 12.3$$

由第 3 步得灰色权

表4

专家小组	小组人数	小组所给权重 $d_{i1}$	$f_1(d_{i1})$	$f_2(d_{i1})$	$f_3(d_{i1})$
I	2	5%	0.0	0.0	1.0
II	7	10%	0.0	0.5	1.0
III	1	14%	0.4	0.9	0.6
IV	5	15%	0.5	1.0	0.5
V	1	18%	0.8	0.7	0.2

$$n_1 = n_{11} + n_{12} + n_{13} = 28.1$$

$$\gamma_{11} = \frac{n_{11}}{n_1} = 0.14, \quad \gamma_{12} = \frac{n_{12}}{n_1} = 0.37, \quad \gamma_{13} = \frac{n_{13}}{n_1} = 0.47$$

由第4步判断 $\max\{\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}\} = \gamma_{13}$

则得灰色统计法归纳专家意见结果为, 流域面积属于第3类重要因素。

同理可算得所有因素的统计结果如表5所示。

表5

因素	$\gamma_{i1}$	$\gamma_{i2}$	$\gamma_{i3}$	$\max\{\gamma_{ik}\}$	重要性类别
流域面积	0.14	0.37	0.47	0.47	3
流域气候类型	0.44	0.29	0.21	0.44	1
主沟平均比降	0.50	0.29	0.21	0.50	1
形成区山坡平均坡度	0.34	0.28	0.38	0.38	3
植被覆盖率	0.26	0.38	0.35	0.38	2
形成泥石流主要岩性	0.31	0.39	0.30	0.39	2
固体物质补给方式	0.46	0.23	0.31	0.46	1
滑塌总面积率	0.24	0.30	0.46	0.46	3
固体物质储备量	0.67	0.27	0.06	0.67	1
人类不合理活动	0.22	0.30	0.47	0.47	3
构造特征	0.40	0.35	0.26	0.40	1

表5已列出各因素的重要性类别。由表中可以看到,即使是同一类别的因素,决定它们的灰色权并不相同,如固体物质储备量属于第1类重要因素的灰色权为0.67,而构造特征的灰色权为0.40。这说明,专家们认为前者的重要性较后者为大。为了使这种信息也能得到反映,我们在下表中根据这样的原则排序,即第1、2类重要因素以 $\gamma_{i1}$ 的大小决定序号,第3类重要因素以 $\gamma_{i2}, \gamma_{i3}$ 之和的大小决定序号,这样得表6。

表6把筛选出来的11个因素根据其重要性分成了3类,同时每个因素的序号又表明了它在这11个因素中的相对地位。这就作为我们这次以确定泥石流形成要素为目的的德尔菲法的第一轮调查的结果。

表6

重要性类别	序号	因素
第1类重要	1	固体物质储备量
	2	主沟平均比降
	3	固体物质补给方式
	4	流域气候类型
	5	构造特征
第2类重要	6	形成泥石流主要岩性
	7	植被覆盖率
第3类重要	8	形成区山坡平均坡度
	9	滑塌总面积率
	10	人类不合理活动
	11	流域面积

## 结束语

我们对泥石流形成机理的认识,是受本学科科学技术发展水平限制的。在泥石流学科理论研究和实验技术水平逐步发展中,在人们对这一自然现象的认识逐步深化过程中,我们只能在一定范围内,相对确定各因素对泥石流形成的影响程度。表6可作为现阶段人们对此问题认识深度的一种反映。

德尔菲方法是一种在国外相当流行的方法,它不仅被广泛地应用于预测、决策领域,而且是一种可以广泛地用来收集一部分人的各种意见的实用方法。灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授1982年在国际上首先提出来的,它是控制论的观点和方法延伸到社会、经济系统的产物,也是自动控制科学与运筹学等数学方法相结合的结果。实践表明,它是一个很有发展前途的数学分支。这次我们大胆地进行了在泥石流研究中应用德尔菲方法和

灰色系统理论的尝试,不足之处在所难免。现将这次调查的分析过程和归纳结果向大家请教,希望能为进行下一轮的调查打下基础,对本学科研究方法的发展有所裨益。

(在此向应邀参加调查的各位老师、专家致谢,工作中承蒙谭炳炎、谭万沛老师指导,深表感谢。)

## ANALYZING THE MAIN FACTORS IN THE FORMING OF TORRENTIAL RAIN DEBRIS FLOW

—Applying Grey Systems Theory [in Dealing With  
the Findings of an Investigation by the Delphi Method

*Yao Lingkan*

(*Southwest Institute of Railway Academy*)

### Abstract

This paper presents the findings of an investigation by the Delphi Method and the process of summarizing experts' opinions by making use of Grey systems theory. The investigation was made to fifty-three experts aimed in finding out the main factors in the formation of torrential rain debris flow. The Grey statistics method is used to summarize the experts' opinions. As a supplement, the Grey relational grade analysis is made on the data obtained from surveying and measuring. Based upon the conclusion from these studies, the forming of torrential rain debris flow is imputed to eleven main factors classified into three groups according to their importance.