

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

第三名

030502

「滾蛟龍的反噬」

—模糊方法對土石流發生之探討

學校名稱：高雄縣立阿蓮國民中學

作者： 國二 鄭豐慶 國二 林永哲 國二 鄭博予 國二 王映竹	指導老師： 曹鎮 陳建州
-------------------------------------------------------------	----------------------------

關鍵詞：土石流、模糊理論、危險等級

「滾蛟龍的反噬」－模糊方法對土石流發生之探討

摘要

台灣由於地形陡峭，地質條件脆弱，加上地處亞熱帶，每年颱風豪雨帶來豐沛的雨量，往往造成許多地區發生土石流災害，對人民的生命財產造成莫大損失。本文針對民國 74~93 年台灣發生的土石流事件，利用模糊原理與方法，撰寫程式進行模擬演算，發現影響土石流最主要的因子為總降雨量、地形坡度、集水區面積、開墾面積比、以及上游高程；其中又以總降雨量之影響最大。再配合模糊綜合評判法，即可設定在不同之降雨、地形條件下，模擬出發生土石流之危險等級，也可進一步反推出造成土石流發生之警戒降雨量，可作為土石流未發生前之參考依據。

一、前言

土石流是一種土、砂、石與水混合所形成之高含砂流體，在重力作用下沿著自然坡面流動的現象。因為台灣是座年輕的島嶼，因此全島呈現以山地為主的地形，次則丘陵，平原最少，地質大致屬於脆弱的沉積岩和變質岩；近年來隨著社會經濟的快速發展，平地開發逐漸飽和，已轉向山坡地進行開墾，造成水土保持的破壞及山坡地植被的減少，使得土石流成為台灣每當颱風侵襲時必然的附加災害，常常造成人民嚴重傷亡、橋樑交通阻斷.....等相關的後續問題。

由於土石流具有發生突然、流動快速、衝擊力強及破壞性大等特性，往往讓人措手不及而造成許多悲劇，因此事先探討土石流的發生原因，預測土石流危險程度，進而及早採取適當的避難措施，將生命財產的損失降到最低，是防範土石流相當重要的工作之一。

然而土石流的發生現象相當複雜，且受到眾多因素交互影響，不容易作出精準的判斷及預測。因此，我們在這篇報告中，嘗試採用模糊理論的方法，採用以往發生過的土石流資料作為參考，判斷各因素在哪些情況下會達到土石流的發生警戒標準，並利用數學計算加以歸納，以求與自然界的發生現象達到相似的程度。

二、研究動機

炎熱的夏天即將到來，夏天是台灣主要的颱風季節，我們在自然與生活科技教科書第六冊，學習到天然災害的可怕，其中尤其是土石流災害，它不像颱風還有衛星影像可預測，往往在一夕間突然地發生，其破壞力之強常使地形地貌出現重大改變，對人民生命財產造成的損失更是不容小覷。不幸的是近年來受到全球變遷的影響，台灣地區一年內出現比往常更多的颱風；再者臺灣先天地質條件破碎，山區地勢陡峭，加上山坡地利用不當的後天因素，每經豪雨、颱風侵襲易發生土石流，嚴重威脅山坡地居民生命財產安全，因此本文以土石流作為研究對象，藉此了解土石流發生的前因後果，讓我們能夠更深入探討如何保護照顧我們生活的這塊土地，為我們的家鄉盡一份微薄之力。

由於數理資優教育方案的課程，希望大家製作科學專題，讓我們有機會接觸到有關模糊理論(Fuzzy)的原理，它可以利用數學函數表現出近似人類判斷的功能，也可以用來簡化複雜的問題，在眾多影響因素中找出關鍵性的因素，因此我們採用這個方法，釐清土石流的眾多因素並進行綜合判斷，了解土石流的來龍去脈。

三、研究目的

- 1.找出導致土石流發生的關鍵性因素
- 2.探討各因素對土石流的影響效果
- 3.分析不同降雨量與土地開發的對土石流的影響
- 4.以模糊人工智慧綜合判斷土石流的發生(危險)等級

四、研究設備器材

- 1.資料來源：土石流防災資訊網 網址：<http://246.swcb.gov.tw/default-1.asp>
- 2.電腦設備：Intel Pentium IV 個人電腦
- 3.應用軟體：Microsoft Excel Microsoft Word

五、研究方法

1. 資料整理：

(1) 資料來源：本文分析之資料，取自土石流防災資訊網【2】，民國 74~93 年紀錄的土石流資料，共計有 33 場。其中有發生時間、累積雨量、潛勢溪流之上下游高程、河段長度、平均坡度、集水區面積、土地利用型態以及土石流警戒基準值等資料，如下表 1 所示。

而國內其他學者都對土石流有不少的研究，給了我們相當的概念與啓發，相關的參考資料則統一整理於參考文獻中。

表 1 土石流基本資料表

1. 發生地點	台北縣金山鄉重和村 (台北A211)  地圖
2. 發生時間	民國89年11月1日 (象神颱風)
3. 發生原因	象神颱風時累積雨量為718 mm (89.10.29-11.2)
4. 土石流警戒基準值	350 mm
5. 參考雨量站	三和站
6. 災損情形	象神颱風帶來豪雨，造成金山鄉重和村台北A211土石流潛勢溪流發生土石流災害。三和國小校車及驛車皆淹沒於水中。重光溪上游山崩之土砂造成下游民房沖毀及環溝一、二號橋及便橋被沖毀。
7. 潛勢溪流特性	台北A211潛勢溪流之上游高程為782公尺，下游為42公尺，河段長為1,950公尺，平均坡度為0.38，坡度15度以上之集水面積為67.8公頃。
8. 崩塌面積	0.0025公頃 (90年桃芝颱風過後)
9. 土地利用方式	集水區內土地利用大部分以農、林業為主，主要為陽明山國家公園保護之林地。茲將本集水區利用分述如下：林業、草生、農作及農業附帶設施：佔集水區面積99.6%，住宅及其他用地：佔集水區面積0.063%。

(2) 土石流定義：土、砂、石與水混合所形成之高含砂流體，在重力作用下沿著自然坡面流動的現象，在台灣及日本稱之為「土石流」，在中國大陸則習慣稱之為「泥石流」，英文則稱為「Debris flow」。土石流的外觀有如預拌混凝土，其主要特徵為流速快、泥砂濃度高、沖蝕力強、衝擊力大，台灣的土石流大多在豪雨期間發生在山坡地或山谷之中【3】，依運動方式可分成發生區、流動區與堆積區，發生區的橫剖面形狀多呈 V 字形，流動區為 U 字形，堆積區則像一伸長的舌狀，如圖 1 所示【4】。



圖 1 土石流發生圖

(3) 造成土石流的原因：【3】

- 1、充足的水源：通常來自降雨，因此總降雨量與降雨強度等都是導致土石流發生的影響因素。
- 2、豐富的鬆散土石：通常來自上游的崩坍，或是不當的人為開墾，提供土石流的材料。
- 3、有效之河床坡度：土石流發生區之坡度大約在 15° 至 30° 之間，流動區之坡度大約在 6° 至 15° 之間，堆積區之坡度大約在 3° 至 6° 之間，如圖 2 所示。

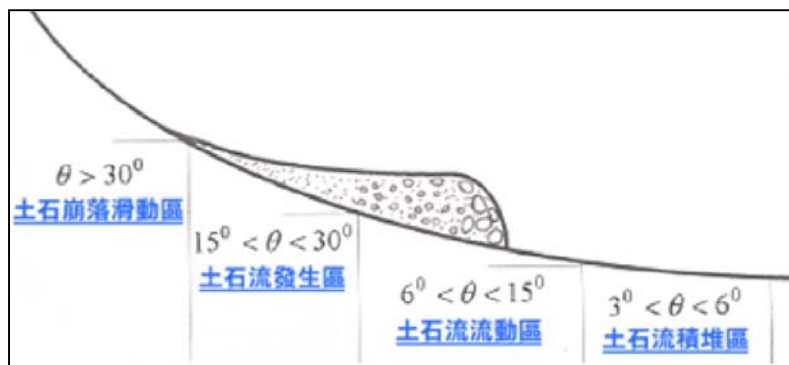


圖 2 土石流流動分區圖

2. 程式分析：利用 Excel 軟體撰寫模糊理論程式，如表 2 所示，詳細程式碼請參考附錄。再將土石流防災資訊網【2】取得之資料代入，進行主要因素（導致土石流發生的關鍵性因素）之選取。

表 2 本文撰寫之模糊理論程式

C4		=IF(C2<0,0,IF(C2>700,1,(SIN(C2/700*1.5707964))))							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		上游高程	總降雨量	集水面積	地形坡度	開墾面積(%)			
2	確實數字	1642	517	339	28.0343	16			
3									
4	隸屬度	1	0.916861	1	0.69657	0.587785			
5									
6									
7	因素集總數	5							
8									
9								90	
10	步驟1 判斷矩陣 P							28.0343	
11	U	上游高程	總降雨量	集水面積	地形坡度	開墾面積(%)			
12	上游高程	1	0.222222	2	1.666667	5			
13	總降雨量	4.5	1	5.555556	4.545455	5.882353			
14	集水面積	0.5	0.18	1	2	3.333333			
15	地形坡度	0.6	0.22	0.5	1	2.5			
16	開墾面積	0.2	0.17	0.3	0.4	1			
17									

- (1)由程式所得到的權重集大小，即可判斷該因素之重要性，經由多次的修正與嘗試，本文選取上游高程、累積雨量、集水區面積、平均坡度、土地利用型態等五個因素，進行後續土石流發生的計算輸入因素。
- (2)將上述五個因素，做為土石流的代表因素，並建立各因素的隸屬函數，將各因素的強弱(數字大小)代入隸屬函數，轉換為模糊值(0~1)，以方便電腦計算。
- (3)本文再將土石流發生的結果，在評價集中分為 I~V 五級，其中 I 級為沒有土石流發生危險之情況，III 級表示有中度的發生可能，V 級為最高度危險等級(已經發生土石流)。
- (4)將民國 74~93 年紀錄的土石流資料經過反覆測試，調整隸屬函數、權重集以及評價集，使三者相互搭配並與實際發生情況相符合，即達到最佳模糊分配(模擬自然界規律)。
- (5)分別輸入不同之累積雨量與土地開墾面積，便可推估對於土石流發生之影響程度，並可以進一步推估出土石流發生之警戒雨量(設定評價集 4~4.5 級為土石流疏散避難等級)。
- (6)與土石流防災資訊網公告之降雨量警戒值進行比對，以驗證本程式正確性，如此即建立以模糊方法推估土石流警戒之簡易模式。

六、模糊理論簡介【7】

近年來，「Fuzzy」有如一股旋風，橫掃家電市場，小至攝影機的自動對焦裝置、洗衣機的水流水量控制器、冷氣機的溫度調節，大至地下鐵的全自動駕駛系統，到處可見 Fuzzy 的蹤跡，使得「Fuzzy」一詞幾乎成了新科技的代名詞。事實上，有關模糊理論的應用還不止於此，舉凡自然界之複雜現象與不確定現象，如氣象上洪水與颱風雨量的預測、電機上的訊號處理與自動控制、醫學上之影像判釋等，甚至可以應用於人文及社會學科上。

模糊理論主要之原理是將主觀性及不確定性之事物，經過隸屬函數轉換為可運算的數字，對於「不精確」、「含糊」或資訊不充足的問題特別具有效力，亦可將人類的「概估」觀念轉換為數學方式表示。現代數學與集合論關係相當密切，在普通集合論中，其邏輯思考建立在二值邏輯上，因此它只能表現出「非此即彼」的概念，所以判斷一個人往往只有二分法，例如美、醜；高、矮；好、壞...等；而沒有介於兩者之間的一個程度，如有點美、普通美、很美...等【5】。

但是在現實生活中，美醜、高矮或中年人等模糊的概念不容易用二分法去判斷，而我們人腦實際的思考模式也與二值邏輯大不相同，也因此產生了所謂的模糊數學，模糊數學是研究和處理模糊現象的數學。而所謂的模糊概念，主要是指客觀事物的差異在過渡時所表現的「亦此亦彼」性。比如有點年輕、有點老、有點矮、太冷或不太漂亮等等，這些概念都沒有數字(年齡、身高...)上的絕對界線，也就是沒有絕對明確的單一標準，且通常必須藉由許多面向的因素綜合作出評價，才能有較客觀的結果。

模糊集合可用 0~1 之間隸屬度函數表示之，當隸屬度為 1 時，表示其模糊預測與目標之間完全符合；當隸屬度為 0 時，表示這個模糊預測不屬於這個目標，下圖 3 表示接近 400 的隸屬函數，圖 4 則表示天氣炎熱的隸屬函數，藉由隸屬函數的轉換，即可將實際的數字轉換為概念性的「程度」，即隸屬度愈接近 1，表示炎熱的程度愈高。

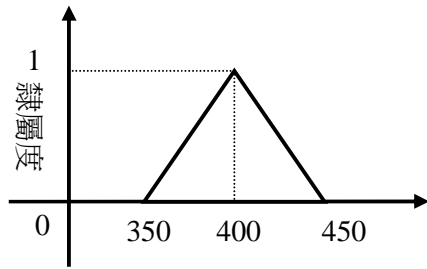


圖 3 接近 400 的隸屬函數

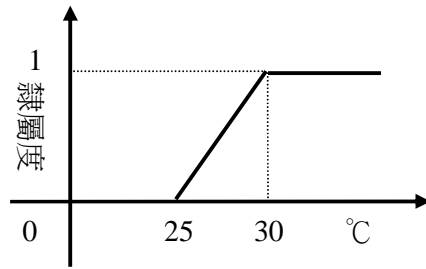


圖 4 天氣炎熱的隸屬函數

人工智慧 (Artificial Intelligence 或簡稱 AI) 有時也稱作機器智能，通常是指透過電腦以運算方式表現出類似人類的思考模式，進而能夠執行判斷、決策與分析等工作【6】。人工智慧的基本計算原理是利用模糊方法，將眾多因素的數據資料轉換為 0~1 的模糊數值，再輸入電腦進行綜合性的評價或判斷，以下我們就採用模糊方法，配合電腦程式的撰寫，以人工智慧對土石流進行分析，舉例如下，其詳細運算過程與說明請見附錄。

七、模糊運算範例

以 74 年 8 月尼爾森颱風在南投豐丘所引發之土石流為例，總降雨量 517mm，平均地形坡度 28°，集水區面積 339 公頃，開墾面積比 16%，河段上游高程 1642m，由上述資料可得到因素集

$$U = [\text{總降雨量, 地形坡度, 集水區面積, 開墾面積比, 上游高程}] \\ = [517, 28, 339, 16, 1642]$$

由於各因素之單位不同，其數字大小也有相當差異，故透過隸屬函數將其轉為隸屬度。而隸屬函數之建立需要相當經驗，本文主要是配合人工智慧與相關研究資料【5,8,9,10】，經由反覆嘗試錯誤而修正得到合適的隸屬函數。

例如我們由資料上知道通常總降雨量愈高，發生土石流的機會也越大，表示降雨量與土石流危險度成正相關，則可以大致推測總降雨量之隸屬函數為圖 5，再由許多場土石流發生資料分析後，我們發現大多數土石流發生時，總降雨量多在 400mm 以上，即此時已達到發生的危險「程度」，故隸屬函數可修正為圖 6；由文獻上隸屬函數採用圓滑的曲線較佳，為了計算上的方便，我們決定採用如圖 6 之 Sin+直線分佈。

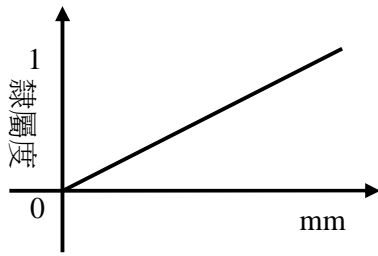


圖 5 總降雨量之隸屬函數

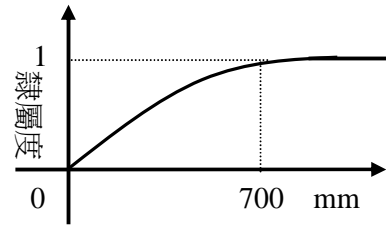


圖 6 修正後之總降雨量隸屬函數

因此，將總降雨量 517 mm 經由隸屬函數轉換後，得到隸屬度為 0.916。

五個因子各自經過隸屬函數轉換後，分別得到隸屬度為 0.916, 0.696, 1, 0.587, 1

在 Excel 上建立判斷矩陣，分別比較五個因子的重要性，由歷史土石流資料分析發現，土石流受到降雨量的影響最大，其次是集水區面積與平均坡度，經過電腦的反覆測試，並與實際降雨量比較，調整誤差至最小，並且檢驗 CR 值小於 0.1 後，得到五個因子的權重分配，即權重集

$$W = [0.52, 0.1, 0.13, 0.05, 0.18]$$

再建立評價集的隸屬函數，我們將土石流發生狀況分為五級，即 I~V 五級，其中 I 級為沒有土石流發生危險之情況，II 級為低度發生危險，III 級表示有中度的發生可能，IV 級為土石流發生警戒等級，V 級為最高度危險等級(已經發生土石流)。其圖形如圖 7 所示。

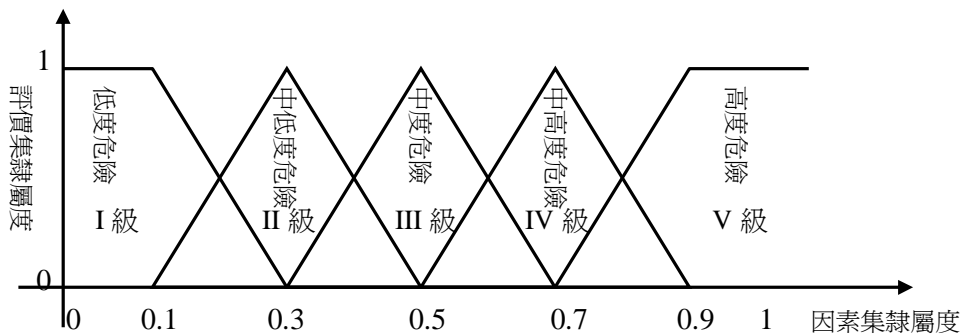


圖 7 評價集隸屬函數

將總降雨量的隸屬度 0.916 代入上圖，完全落在 V 級土石流高度危險區，評價級隸屬度為 1，其餘四級均為零，故 $\tilde{R}_{\text{總降雨量}} = [r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}] = [0, 0, 0, 0, 1]$ ，亦即就降雨量單一因素而言，已達到對土石流的最大影響，但最終是否會發生土

石流，仍需要配合其他因素作出綜合評判。

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{\text{地形坡度}} &= [0, 0, 0.02, 0.98, 0], & \tilde{R}_{\text{集水區面積}} &= [0, 0, 0, 0, 1], \\ \tilde{R}_{\text{開墾面積比}} &= [0, 0, 0.56, 0.43, 0], & \tilde{R}_{\text{上游高程}} &= [0, 0, 0, 0, 1], \end{aligned}$$

再將評價集的五個因子的隸屬度組成一個模糊矩陣為：

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.56 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

模糊綜合評判可表示為： $\tilde{B} = \tilde{W} \circ \tilde{R}$

$$\begin{aligned} &= (0.52 \ 0.1 \ 0.13 \ 0.05 \ 0.18) \circ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.56 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= (0 \ 0 \ 0.03 \ 0.122 \ 0.847) \end{aligned}$$

將這五個值乘以對應危險等級後相加，可得到我們的推估土石流危險等級。

$$\text{推估危險等級} = 0 \times 1 + 0 \times 2 + 0.03 \times 3 + 0.122 \times 4 + 0.847 \times 5 = \mathbf{4.8 \text{ 級}}$$

由於本案例是實際上發生過的土石流，我們推估的危險等級當然越高越好，本文推估的結果是 4.8 級，達到高度發生危險，與實際結果相符合，顯示我們在程式裡的隸屬函數與權重設定，都一定程度的反應了實際狀況，也成功的模擬出自自然界土石流發生的規則，如圖 8 所示。

爲了更進一步達到預測土石流的發生，以保護人民生命財產安全，我們將建立的模糊規則，作為發生土石流之警戒雨量推估依據，當程式中輸入不同的雨量時，即可推算對應之土石流危險等級，如圖 9、10 所示。根據實際觀測資料，我們設定土石流危險等級 4~4.5 爲土石流發生前的警戒情況，此時的警戒降雨量約 255mm，與土石流防災資訊網【2】所公佈之 200mm 警戒值，誤差約 21%，驗證

了我們的方法雖然簡單，卻有相當的準確度。

最後，藉由不同的輸入值，我們可以推估不同的上游高程與平均坡度的變化，對於警戒降雨量之交互影響，如圖 11 所示。

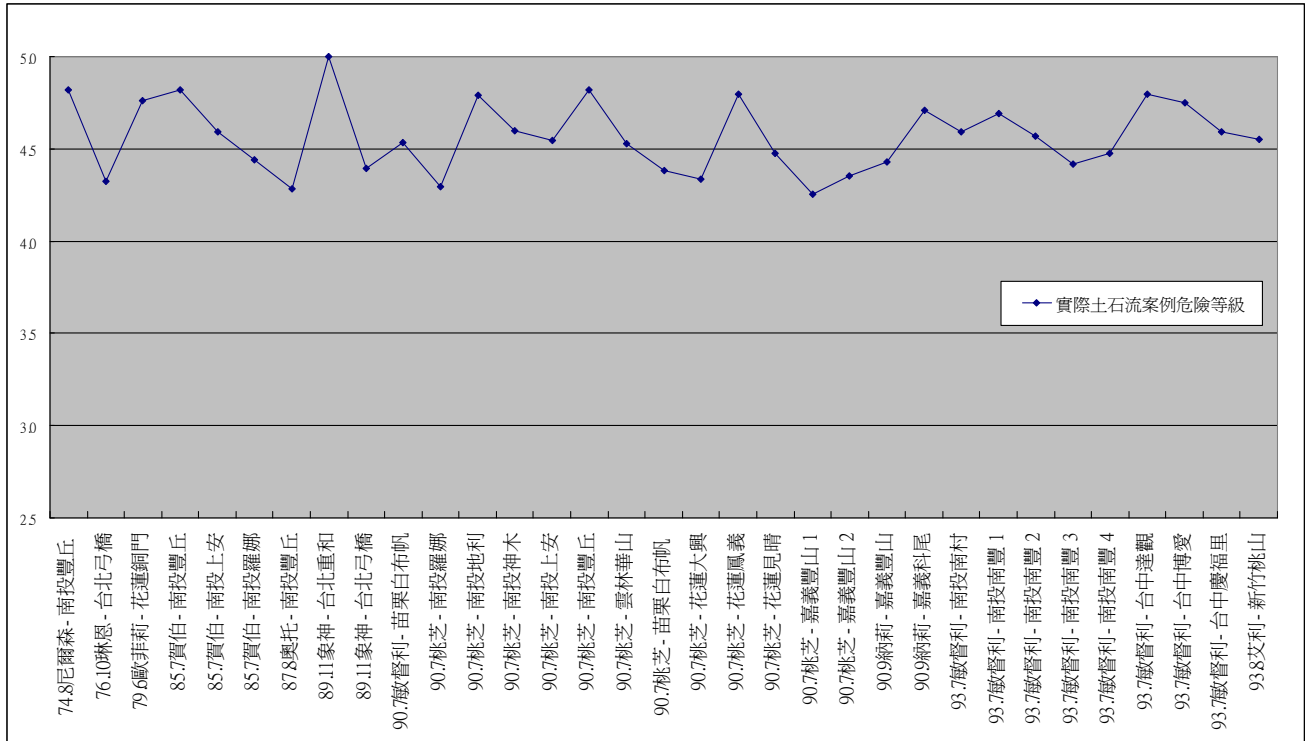


圖 8 實際土石流發生案例之危險等級圖

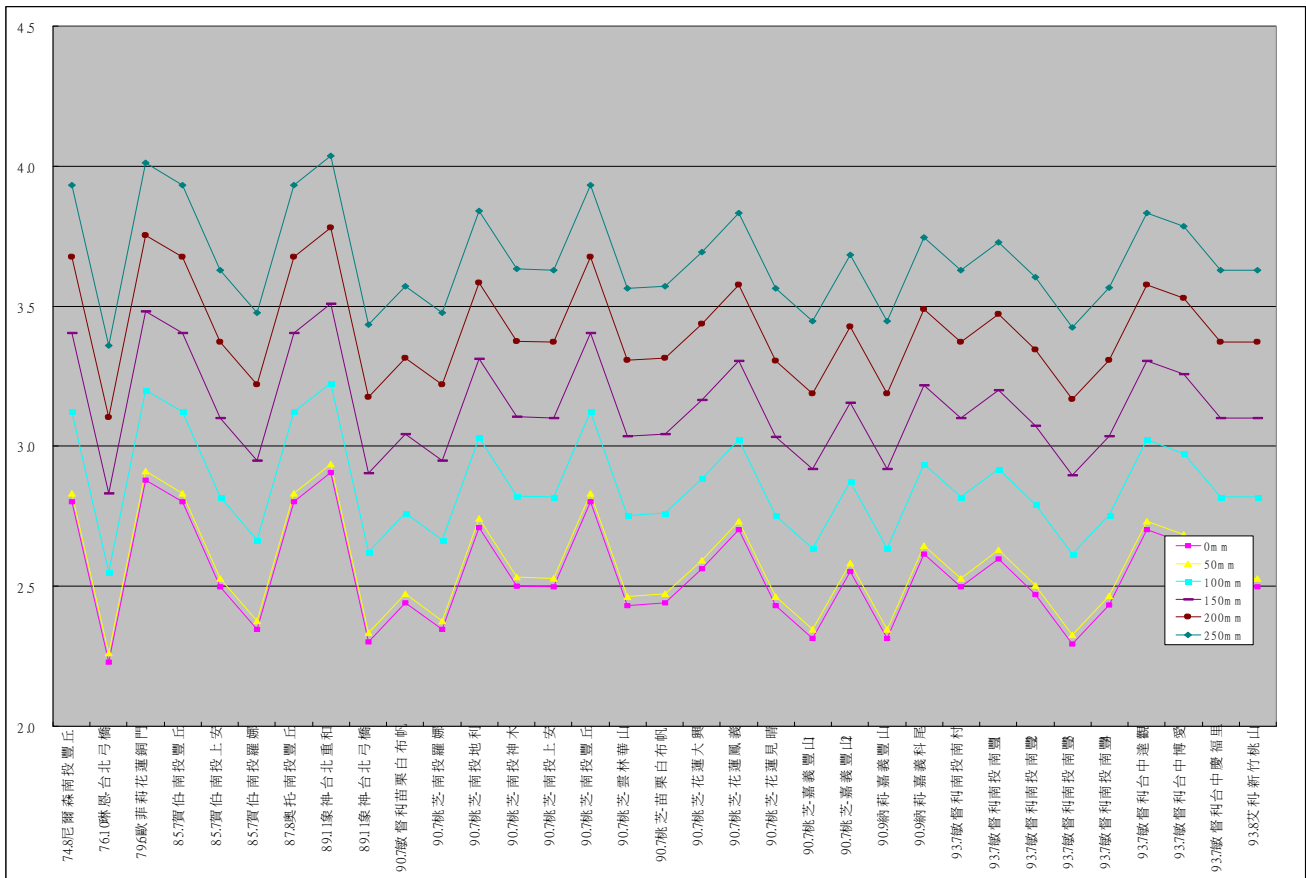


圖 9 不同降雨量之土石流危險等級圖

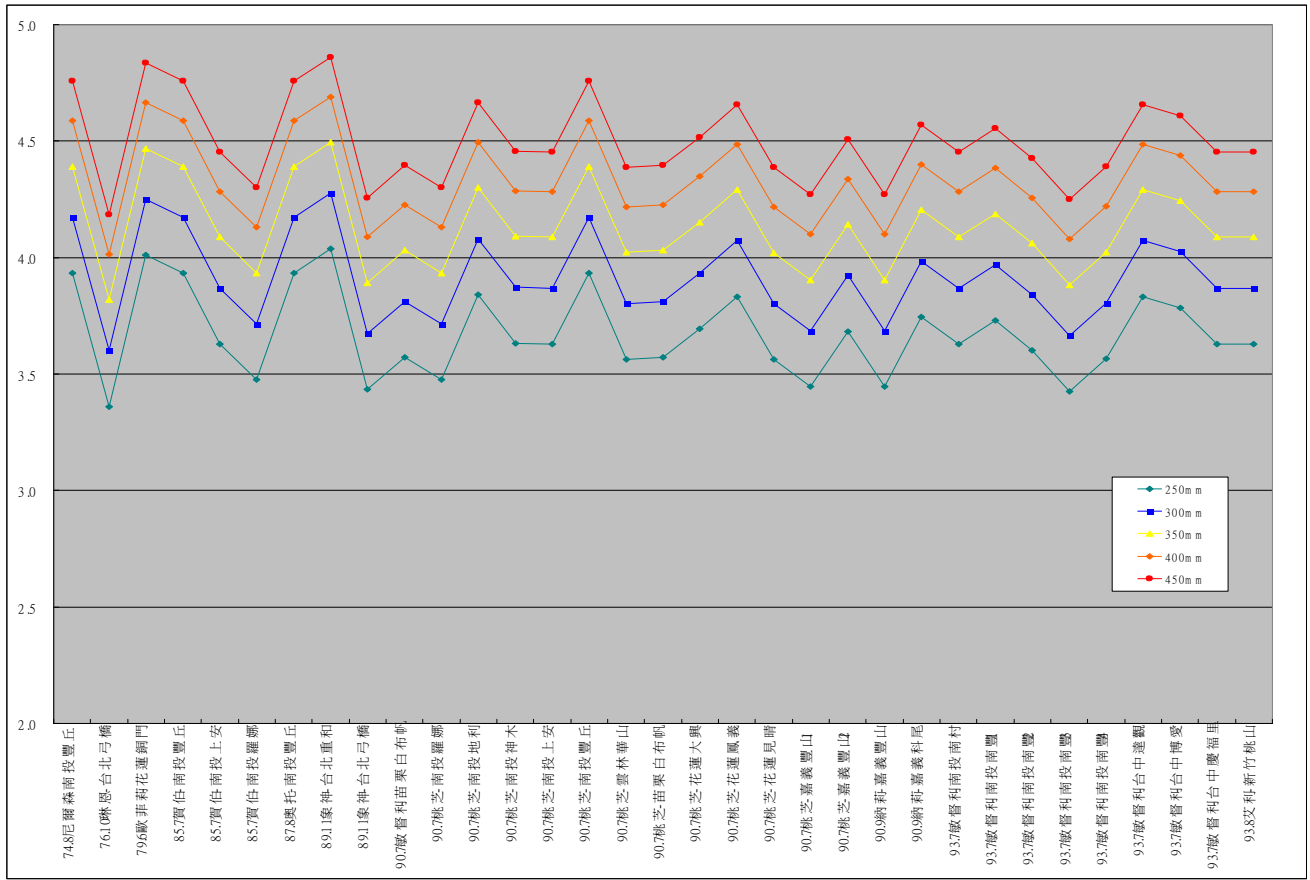


圖 10 不同降雨量之土石流危險等級圖

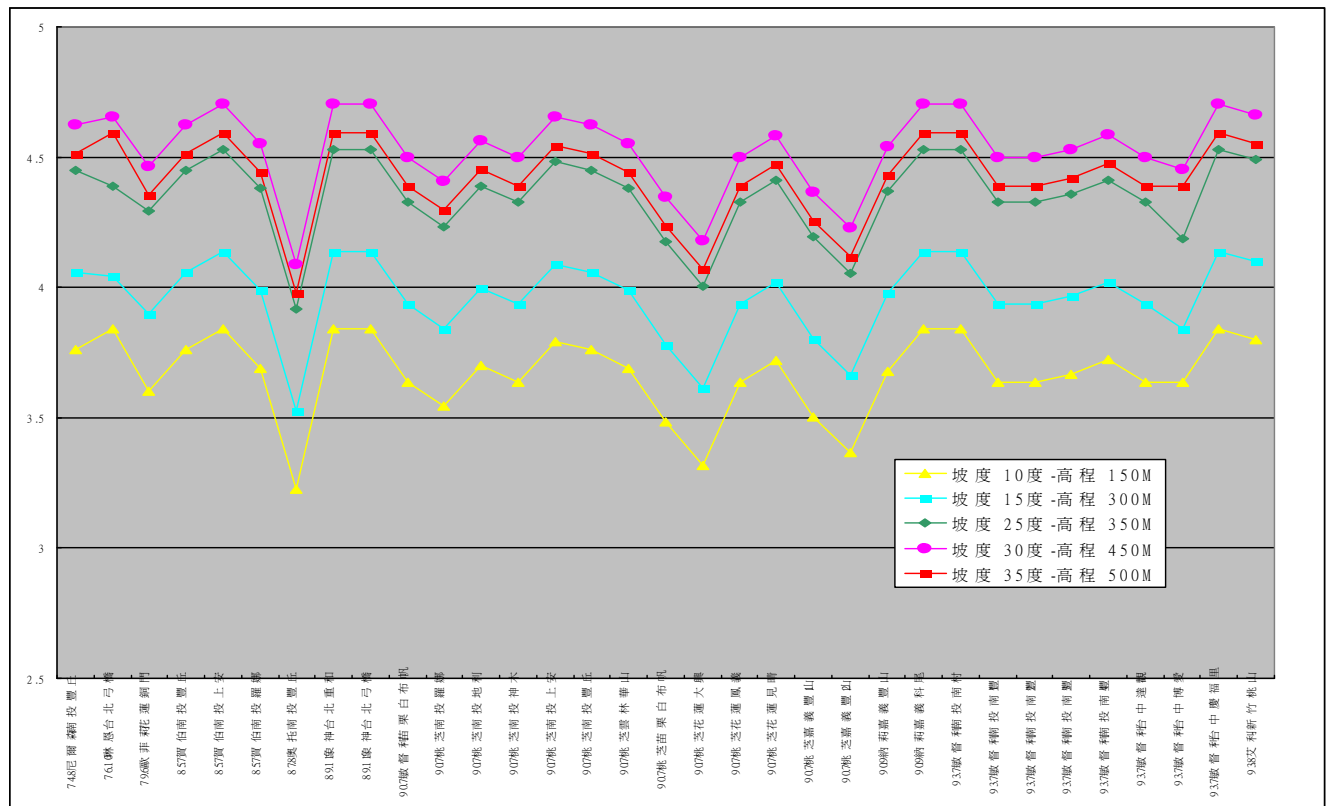


圖 11 不同高程與坡度對土石流危險等級之影響

八、結果與討論

1. 土石流是一種相當複雜的自然現象，受到眾多因素交互影響，我們利用模糊人工智慧的方法，將各因素進行簡化，找出主要的影響因素，發現影響最大的是總降雨量，而地形坡度、集水區面積、開墾面積比、上游高程均對土石流的發生有一定程度的影響。
2. 由權重分配的結果，總降雨量的權重 0.52，已經達到整體的一半以上，顯示降雨量對土石流的影響程度最大，也佐證降雨是土石流最主要的驅動因子，只要沒有下雨，即使坡度再陡、開墾面積再大，也不會有土石流發生。
3. 我們將程式輸入降雨量進行測試，發現當達到 450~600mm 時，幾乎所有的潛勢溪流都發生土石流(接近 5 級)如圖 10 所示，與實際土石流發生資料對比相當符合，顯示我們的程式設定相當程度的反應了實際狀況，也成功的模擬出自然界土石流發生的規則。
4. 我們設定土石流危險等級 4~4.5 為土石流發生前的警戒情況，由程式可反推達到該危險等級所需要的降雨量，即土石流警戒雨量，如圖 9、10 所示，與實際土石流發生案例比對，均未達到發生土石流的累積雨量，但卻足以作為土石流發生前的警戒雨量，顯示我們的設定值具有一定參考價值。
5. 當輸入的開墾面積比愈高時，發生土石流的警戒降雨量值越低，通常土地開墾面積達到 30% 以上時，就可使警戒降雨量下降，顯示山坡地開墾會影響水土保持，對土石流的發生有負面的效應。
6. 當輸入的平均坡度愈高時，警戒降雨量愈低，顯示坡度對土石流的發生有正面的效果，但坡度超過 30 度時，影響反而降低，這並非表示坡度較陡土石流即不會發生，而是由於坡度超過 30 度時，大多數土石均直接掉落，呈現落石的災害，不需要等降雨的潤滑效果，來造成土石運動。
7. 當我們將平均坡度、上游高程均增加的條件(越接近山區狀態)輸入時，可發現在兩個因素共同作用下，會使警戒降雨量大幅下降，顯示在坡度與高度均愈大的高山地區，愈容易受降雨的驅動而發生土石流，此時若再將開墾面積比輸入值增加，則會更加降低警戒降雨量(更容易發生土石流)，因此我們證實在先天脆弱

高山地區，應當減少甚至禁止開發行為，以防範土石流的發生。

- 8.整體而言，我們選取總降雨量、地形坡度、集水區面積、開墾面積比、上游高程等五項因素，利用模糊人工智慧方法，成功的模擬出自然界土石流發生的規則，再利用此程式反推危險等級 4~4.5 級之降雨量，作為發生土石流前之警戒雨量，與土石流防災資訊網【2】所公佈之警戒值，誤差多在 30%以內，有不錯的精確度，但有少數誤差較大的現象，顯示還有其他的因素可以再列入討論。
- 9.我們藉由簡單的模糊人工智慧，可以推估土石流警戒雨量，當山坡地開發，造成地形、坡度、植生種類等的變化後，可以輸入本程式推估新的警戒雨量，以作為未來防範土石流災害之參考。

九、結論與建議

- 1.本文利用模糊人工智慧方法，同學合作編寫完成 Excel 小程式，運用總降雨量、地形坡度、集水區面積、開墾面積比與上游高程等五個因子，進行土石流發生危險度的綜合評估，結果顯示在一般情況下，均有不錯的準確度。
- 2.一般而言，土石流的現象相當複雜，受到相當多因素的影響，其中最主要的因素為總降雨量、地形坡度、集水區面積、開墾面積比外，還受到地質條件、土砂與石的比例，以及植生種類的影響，因此如果可以增加更多的因素，並配合實驗與現場調查，應當能得到更加精確的結果。
- 3.本文目前採用五個因素進行評估，未來希望能增加因子的數量，並且使用不同形式隸屬函數，希望能提高評估的準確度。
- 4.我們利用簡單的人工智慧方法，配合總降雨量、地形坡度、集水區面積、開墾面積比與上游高程等五個因素，進行土石流發生危險度的綜合評估，推估的結果有一定的準確度，顯示人工智慧可以用來解決較複雜的問題，如果能配合更多資料，相信能對土石流發生的防範，作出一定的貢獻。

十、參考文獻

- 【1】歷屆科展優良作品。
- 【2】行政院水土保持局土石流防災資訊網 <http://246.swcb.gov.tw/default-1.asp>
- 【3】國立成功大學水利系，詹錢登教授研究室 <http://140.116.38.86/>
- 【4】行政院農業委員會水土保持局土石流防災教育網站，認識土石流
<http://debris.swcb.gov.tw/home.php>
- 【5】王安培、馮道偉（2002）提升土石流預警準確性之研究，中原大學土木工程系，計劃編號：91農科-1.3.1-保-S1(02)
- 【6】曾憲雄、黃國禎（2000）「人工智慧與專家系統」，旗標圖書股份公司。
- 【7】闕頌廉（2001），「應用模糊數學」，科技圖書股份公司。
- 【8】范正成、林森榮（1997），「土石流發生水文及地文條件應用於土石流預警之研究」，第一屆土石流研討會論文集，125~139 頁。
- 【9】陳秋份、林慶偉、陳禮仁（1999），「土石流危險溪流危險度評估方法之研究」，第二屆土石流研討會論文集，153~163 頁。

附 錄

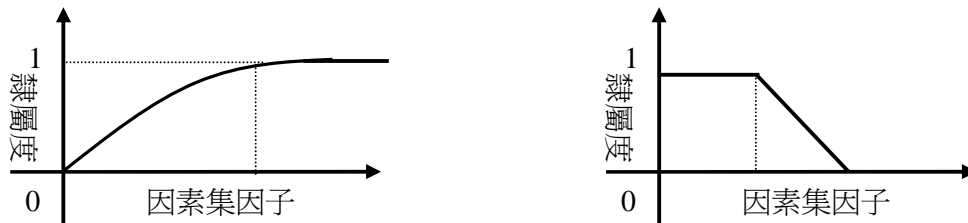
1. 運算過程說明：

1. 建立因素集 U ：

因素集是由影響評判對象的各因素所組成的集合，各因素通常都具有某種程度的模糊性，本文經由文獻資料的收集，配合學者專家之研究成果【8,9】，經過我們多次的計算之後，決定選擇對土石流影響較大的總降雨量(mm)、地形坡度、集水區面積(公頃)、開墾面積比(%)、以及上游高程(m)等五項氣象因子為因素集。即 因素集 $U = [\text{總降雨量}, \text{地形坡度}, \text{集水區面積}, \text{開墾面積比}, \text{上游高程}]$

2. 建立隸屬函數：

隸屬函數可將因素集的因子轉換為 0~1 間的隸屬度，為簡化計算過程，本文五項因素的隸屬函數主要採用直線型、梯形、直線+Sin 型，如下圖所示。



3. 建立權重集 W ：

在因素集中各因素對於評判有著不一樣的重要性，為表示各因素對土石流不同程度的影響，必需對每一因素按其重要性給予不同的權重，且各權重總和為 1。即 權重集 $W = [\text{總降雨量權重}, \text{地形坡度權重}, \text{集水區面積權重}, \text{開墾面積比權重}, \text{上游高程權重}]$

4. 建立評價集：

每個因素集因子均對土石流有影響，本文評價集將土石流發生狀況分為五級，即 I~V 五級，其中 I 級為沒有土石流發生危險之情況，II 級為低度發生危險，III 級表示有中度的發生可能，IV 級為土石流發生警戒等級，V 級為最高度危險等級(已經發生土石流)。

5. 模糊綜合評判：

單獨從一個因素進行評判，以確定評判對象對評價集的隸屬度，稱為單因素模糊評判。如對因素集第 i 個因素 X_i 進行評判，其評價集五個元素的隸屬度為 r_{ij} 。評判結果可表示為 $\tilde{R}_i = [r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}]$ 同理可將評價集的五個因子的隸屬度組成一個模糊矩陣為

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{pmatrix}$$

綜合考慮所有因素之影響做出評判結果，稱為模糊綜合評判。可用每列元素之和來反應所有因素的綜合影響，但這種做法並未考慮各因素的重要程度。如果對 r_{ij} 施以相對的權重 w_i ，則能合理反應所有因素的綜合影響，那麼綜合評判可表示為

$$\tilde{B} = \tilde{W} \circ \tilde{R}$$

$$\text{即 } \tilde{B} = (w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5) \circ \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{pmatrix} = (b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5)$$

其中 $\tilde{B} = \tilde{W} \circ \tilde{R}$ 的運算法由模糊矩陣合成運算方式計算。

最後再將 $(b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5)$ 分別乘以其對應評價級的 I~V 級後相加，就得到模擬之土石流發生危險度，此一步驟通常稱為解模糊化。

6. 權重決定方法：

評判中另一個重要部分為因素集因素的相對重要性，亦即決定各個因素的權重大小。常見的評價問題中的權重，一般多憑經驗主觀推測。雖然主觀的判定權重多少含有客觀的成份，一定程度的反應了實際狀況，但有時也會受到個人經驗不足或觀察不夠細微的影響，使評價結果嚴重失真，導致決策的錯誤【7】。

本文為求客觀，採用層次分析法對權重進行過濾、檢核處理，以盡量降低主觀成分，符合客觀事實，其詳細方法請見附錄 2。

7. 人工智能判別：

本文目前採用基本人工智能，就是利用電腦反覆調整隸屬函數與評價集，將推估土石流危險等級與實際土石流危險等級間的誤差減到最小，此過程類似人類的學習方式，可以藉由不斷的錯誤嘗試得到正確的結果，因此可以模擬出自然界土石流發生與降雨量間的基本規則，再以此規則作為未來發生土石流之警戒降雨量的推估依據。

2. 層次分析法：

A. 選定因素集因子 U

B. 構造判斷矩陣 P

以 u_i 表示因素集因子， $u_i \in U (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。 u_{ij} 表示 u_i 對 u_j 的相對重要性， $(j = 1, 2, 3, \dots, n)$ ， u_{ij} 的數字選定依表 1 進行。

根據上述各符號的意義得判斷矩陣 P

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & \cdots & u_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccc} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{array} \right. \end{matrix}$$

表 1 判斷矩陣標度及其含義

標度	含義
1	表示因素 u_i 與 u_j 比較，具有同等重要性。
3	表示因素 u_i 與 u_j 比較， u_i 比 u_j 稍微重要。
5	表示因素 u_i 與 u_j 比較， u_i 比 u_j 明顯重要。
7	表示因素 u_i 與 u_j 比較， u_i 比 u_j 強烈重要。
9	表示因素 u_i 與 u_j 比較， u_i 比 u_j 極端重要。
2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8 分別表示相鄰判斷 1~3, 3~5, 5~7, 7~9 的中間值。
倒數	表示因素 u_i 與 u_j 比較得判斷 u_{ij} ，則 u_i 與 u_i 比較得判斷 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

C 計算重要性排序

根據判斷矩陣，求出最大特徵根所對應的特徵向量。該特徵向量即為各評價因素重要性排序，也就是權重分配。其步驟如下。

i. 將判斷矩陣每一行歸一化

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^n u_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

ii. 每一行歸一化後的判斷矩陣按列相加

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{u}_{ij}$$

iii. 對向量 $\bar{W}_i = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 做歸一化處理

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}$$

依此所得到 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 的即為所求特徵向量，就是權重的分配。

iv. 計算判斷矩陣最大特徵根 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum \frac{(PW)_i}{W_i}$$

$$PW = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix}$$

D. 檢驗

以上得到的特徵向量即為所求權重，而權重的分配是否合理？則需要對判斷矩陣進行一致性檢驗，檢驗公式為：

$$CR = CI / RI$$

其中 CR 稱為判斷矩陣的隨機一致性比例；

CI 稱為判斷矩陣的一般一致性指標，由下式求得

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

RI 稱為判斷矩陣的平均隨機一致性指標，1~9 階矩陣， RI 值如表 2。

表 2 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

當 $CR < 0.10$ 即認為判斷矩陣具有滿意的一致性，說明權數分配是合理的；否則就須調整判斷矩陣，直到取得有滿意的一致性為止。

例如：判斷矩陣為

$$P = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

步驟 i：將判斷矩陣每一行歸一化

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1/5}{4.333} & \frac{1/3}{4.333} \\ \frac{5}{9} & \frac{1}{1.533} & \frac{3}{4.333} \\ \frac{3}{9} & \frac{1/3}{1.533} & \frac{1}{4.333} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.111 & 0.130 & 0.077 \\ 0.556 & 0.652 & 0.692 \\ 0.333 & 0.217 & 0.231 \end{pmatrix}$$

步驟 ii：

$$\bar{W}_1 = 0.111 + 0.130 + 0.077 = 0.317$$

$$\bar{W}_2 = 0.556 + 0.625 + 0.692 = 1.900$$

$$\bar{W}_3 = 0.333 + 0.217 + 0.231 = 0.781$$

步驟 iii：對 $\bar{W} = (0.317, 1.900, 0.781)^T$ 歸一化

$$W_1 = \frac{0.317}{0.317 + 1.900 + 0.781} = 0.106$$

$$W_2 = \frac{1.900}{0.317 + 1.900 + 0.781} = 0.634$$

$$W_3 = \frac{0.781}{0.317 + 1.900 + 0.781} = 0.261$$

權重集為 $W = (0.106, 0.634, 0.261)$

步驟 iv：求 λ_{\max}

$$PW = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0.106 \\ 0.634 \\ 0.261 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.320 \\ 1.947 \\ 0.785 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{3} \left(\frac{0.320}{0.106} + \frac{1.947}{0.634} + \frac{0.785}{0.261} \right) = 3.036$$

$$\text{檢驗：} CI = \frac{3.036 - 3}{3 - 1} = 0.018$$

$$CR = 0.018/0.58 = 0.031 < 0.10$$

這表示判斷矩陣具滿意一致性，也就是 $W = (0.106, 0.634, 0.261)$ 可作為權重集。

3. 程式碼：

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	上游高程m	總降雨量(mm)	集水面積(公頃)	地形坡度	開墾面積(%)						
2	確實數字	1642	517	339	28.03429653	16					
3											
4	隸屬度	IF(B2<250,0,IF(B2>517,IF(C2<0,0,IF(C2>700,IF(D2<0,0,IF(D2>100,IF(E2<10,0,IF(E2<20,IF(F2<5,0,IF(F2>40,1,(SIN(F2/40*1.5707964)))))))))									
5											
6											
7	因素集總	5									
8											
9								90			
10	步驟1 判斷矩陣 P						28.0343				
11	U	上游高程m	總降雨量(mm)	集水面積(公頃)	地形坡度	開墾面積(%)					
12	上游高程	1/B13	1/B14	1/B15	1/B16						
13	總降雨量	4.5	1/C14	1/C15	1/C16						
14	集水面積	0.5	0.18	1/D15	1/D16						
15	地形坡度	0.6	0.22	0.5	1/E16						
16	開墾面積	0.2	0.17	0.3	0.4	1					
17											
18	步驟2 直向歸一化										
19		B12/(B12+B13+B14+ C12/(C12+C13+C14+ D12/(D12+D13+D14+ E12/(E12+E13+E14+ F12/(F12+F13+F14+F15+F16)					B19+B20+ C19+C20+ D19+D20+ E19+E20+ F19+F20+F21+				
20		B13/(B12+B13+B14+ C13/(C12+C13+C14+ D13/(D12+D13+D14+ E13/(E12+E13+E14+ F13/(F12+F13+F14+F15+F16)									
21		B14/(B12+B13+B14+ C14/(C12+C13+C14+ D14/(D12+D13+D14+ E14/(E12+E13+E14+ F14/(F12+F13+F14+F15+F16)									
22		B15/(B12+B13+B14+ C15/(C12+C13+C14+ D15/(D12+D13+D14+ E15/(E12+E13+E14+ F15/(F12+F13+F14+F15+F16)									
23		B16/(B12+B13+B14+ C16/(C12+C13+C14+ D16/(D12+D13+D14+ E16/(E12+E13+E14+ F16/(F12+F13+F14+F15+F16)									
24											
25	步驟3 簡化及橫向歸一化										
26	W_	B19+C19+D19+E19+ B20+C20+D20+E20+ B21+C21+D21+E21+ B22+C22+D22+E22+ B23+C23+D23+E23+F23					B26+C26+D26+E26+F26				
27											
28	W1	E26/(B26+C26+D26+E26+F26)									
29	W2	C26/(B26+C26+D26+E26+F26)									
30	W3	D26/(B26+C26+D26+E26+F26)									
31	W4	E26/(B26+C26+D26+E26+F26)									
32	W5	F26/(B26+C26+D26+E26+F26)									
33		B28+E29+B30+B31+B32									
34											
35	權重集W	B28	B29	B30	B31	B32		B35+C35+D35+E35+F35			
36											
38	步驟4：求 λ max										
39			1/B13	1/B14	1/B15	1/B16		B26/(B26+C26+D26+E26+F26)			
40			4.5	1/C14	1/C15	1/C16		C26/(B26+C26+D26+E26+F26)			
41			0.5	0.18	1/D15	1/D16	*	D26/(B26+C26+D26+E26+F26)			
42			0.6	0.22	0.5	1/E16		E26/(B26+C26+D26+E26+F26)			
43			0.2	0.17	0.3	0.4	1	F26/(B26+C26+D26+E26+F26)			
44	λ max										
45			C39*I39+D39*I40+E39*I41+F39*I42+G39*I43								
46			C40*I39+D40*I40+E40*I41+F40*I42+G40*I43								
47			C41*I39+D41*I40+E41*I41+F41*I42+G41*I43								
48			C42*I39+D42*I40+E42*I41+F42*I42+G42*I43								
49			C43*I39+D43*I40+E43*I41+F43*I42+G43*I43 λ max =				(C45/B35+C46/C35+C47/D35+C48/E35+C49/F35)/E7				
50											
51	檢驗：CR=C/RI										
52	CI = (λ max - n)/(n-1)				RI =		IF(B7=3,0.58,IF(B7=4,0.9,IF(B7=5,1.12,IF(B7=6,1.24,IF(B7=7,1.32,IF(B7=8,1.41,IF(B7=9,1.48,IF(B7=10,1.56))))))))				
53											
54	CR =	(F49-B7)/(B7-1)/F52	<0.10		則權重集W可使用						
55											
56											
57	建立評價集R										
58		低度(1)	中低度(1.5)	中度(2)	中高度(2.5)	高度(3)					
59	R1	IF(B4<0,0,IF(B4<0.1,IF(B4<0.1,0,IF(B4<0,IF(B4<0.3,0,IF(B4<0.5,IF(B4<0.5,0,IF(B4<0.7,0,IF(B4<0.9,(B4-0.7)/SUM(B59:F59)									
60	R2	IF(C4<0,0,IF(C4<0.1,IF(C4<0.1,0,IF(C4<0,IF(C4<0.3,0,IF(C4<0.5,IF(C4<0.5,0,IF(C4<0.7,0,IF(C4<0.9,(C4-0.7)/SUM(B60:F60)									
61	R3	IF(D4<0,0,IF(D4<0.1,IF(D4<0.1,0,IF(D4<0,IF(D4<0.3,0,IF(D4<0.5,IF(D4<0.5,0,IF(D4<0.7,0,IF(D4<0.9,(D4-0.7)/SUM(B61:F61)									
62	R4	IF(E4<0,0,IF(E4<0.1,IF(E4<0.1,0,IF(E4<0,IF(E4<0.3,0,IF(E4<0.5,IF(E4<0.5,0,IF(E4<0.7,0,IF(E4<0.9,(E4-0.7)/SUM(B62:F62)									
63	R5	IF(F4<0,0,IF(F4<0.1,IF(F4<0.1,0,IF(F4<0,IF(F4<0.3,0,IF(F4<0.5,IF(F4<0.5,0,IF(F4<0.7,0,IF(F4<0.9,(F4-0.7)/SUM(B63:F63)									
64											
65	模糊綜合評判 B~ = W~ o R~										
66											
67											
68	B~ =	B35*B59+C35*B60+ B35*C59+C35*C60+ B35*D59+C35*D60+ B35*E59+C35*E60+D35*F61+E35*F62					0.00				
69											
70											
71											
72	估計結果(危險級數)			C68*1+D68*2+E68*3+F68*4+G68*5							
73	結果										

【評語】 030502

優點：1.利用模糊理論評估土石流現象成功分辨影響因素之大小。2.研究結果學術性和實用性都很高。

缺點：可將影響因素更加複雜化，以接近大自然條件。

建議改進事項：建議納入有豪雨但未發生土石流的資料一起分析。漏列參考文獻 10。