

以模糊邏輯分析集水區暴雨逕流關係型態之研究

洪益發⁽¹⁾ 梁昇⁽²⁾

摘 要

集水區在颱風或豪大雨期間降下的暴雨，由於降雨時間集中而且雨量甚大，產生的逕流常造成洪災，每年不幸之事件頻傳。為了減低洪災損失，可以研究如何在暴雨期間預估逕流量，以便提早發出警訊提醒大家注意。逕流來自於降雨，降雨愈多逕流愈多，兩者有正比例關係。但此一關係會受到水文及地文因子影響，所以呈現非線性關係。如果吾人想在颱風或豪大雨期間，由暴雨量預估逕流量，以便爭取時間應變，則必須對集水區暴雨逕流型態進一步研究。

模糊集合是相對於傳統明確集合的另一種概念，傳統明確集合的元素是 0 與 1，沒有中間的過渡地帶。模糊集合容許在 0 與 1 之間存有無限的可能，是多元的，更能貼近真實世界的內涵。本研究以模糊邏輯分析集水區暴雨逕流型態，由單場暴雨總量之歸屬函數，與其產生逕流總量之歸屬函數，經由模糊推論過程，探討暴雨和逕流之關係，以預測單場暴雨之逕流量。

本研究選用台灣中部地區烏溪流域惠蓀雨量站及南北通橋水位站，在颱風或豪大雨期間之水文事件進行案例探討。

(**關鍵詞**：模糊、集水區、暴雨、逕流、烏溪。)

A Study of Relationship between Rainfall and Runoff of a Watershed Using Fuzzy Logic Analysis

Yi-Fa Hung, Sheng Liang

Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, 402, Taiwan

ABSTRACT

Runoffs from heavy rainstorms within a watershed can often turn into severe floods each year in Taiwan. Floods can usually cause heavy damages to property and/or loss of lives at times. To minimize or contain these damages and losses, floods will have to be projected or forecasted. To project or forecast a flood, runoffs will have to be predicted. A clear relationship between runoffs and rainstorms will have to be established as a first step to predict runoffs.

Rainfall and runoff appear to be directly and proportionally related. With all key parameters of hydrology and geometry considered, the relationship is in fact nonlinear. Hence, Fuzzy Logic

(1) 中興大學水土保持學系博士班研究生

(2) 中興大學水土保持學系教授

appears to be the exact tool for establishing the relationship between rainfall and runoff. The elements of crisp set are 0 and 1, being extremely binary, and no transition zone existed between 0 and 1. But the elements of the fuzzy set are infinite, being multidimensional and closer to the real world. Using fuzzy logic, this paper studies the pattern of rainstorm and runoff within a watershed. Fuzzy logic membership functions of rainstorm and runoff are first created separately, and then the fuzzy reasoning is processed. When the relationship between rainstorm and runoff is found, the runoff could be forecasted from the rainstorm observed data.

Wu River in central Taiwan was used as a case study for this paper. Rainfall data used in this study were collected from the observation stations of Huei-Sun and Nan-Bei-Tong Bridge.

(**Keywords** : fuzzy, watershed, rainstorm, runoff, Wu River)

一、前言

集水區在颱風或豪大雨期間降下的暴雨，由於降雨時間集中而且雨量甚大，產生的逕流往往造成洪災，導致國人生命危險與財產損失，每年不幸事件頻傳，殊為遺憾。為了減低洪災損失，除了一般防災應變措施外，在水文科技領域上亦應研究如何進一步準確預估在暴雨期間產生的逕流量，以便提早發出警訊來提醒大家注意。

逕流是由降雨而來，兩者有正比例關係。自天而降的雨量在扣除地上截留、地表滲蓄、地下入滲等損失量之後，剩下的就是地表逕流，損失量的多寡跟集水區的水文及地文因子有關，而具有非線性之關係。就水文因子之影響而言，若在暴雨之前曾下了雨，因土壤之含水量較多，則入滲量較少，所以逕流量較多；相反地若在暴雨之前久旱不雨，則土壤之含水量稀少，入滲量較多，所以逕流量較少。在地文因子之影響，若地形的坡降較陡，則逕流的流速較快，無充分時間入滲土壤，所以損失量較少，逕流量較多；若地貌的植被較佳，則逕流的流速較慢，有充分時間入滲土壤，所以逕流損失量較多，逕流量卻較少。

既然逕流深受降雨之影響，所以吾人若想在颱風或豪大雨期間由暴雨量預估逕流

量，以爭取緊急應變之時間，則必須對於集水區之暴雨逕流型態進行研究。

一般而言，逕流的量測工作難度較高，且不易準確。這是因為逕流不是直接量測，而是間接量測溪床上之水位、通水面積及水流速度，以建立溪床水位及逕流之關係曲線。但由於溪床的通水面積會受到底床沖淤影響而變化，尤其是洪水來臨及退水期間之變化更是顯著，而且此時水流速度之量測也因為流速較快而較難準確。

但是逕流的源頭，降雨的量測精度就相對較高，因為降雨的量測方法比較簡單。由於降雨的發生時間早於逕流，所以在颱風或豪大雨期間，若由暴雨之觀測數據，再間接去預估逕流量，則吾人比較有充裕時間去因應逕流造成之洪災。在這整個過程中，集水區暴雨逕流型態分析就是最核心的研究重點。不過遺憾的是，在颱風或豪大雨期間由於風強雨大，導致量測儀器受損機會甚高，常常造成暴雨紀錄或逕流紀錄中斷短缺以及量測誤差偏大等問題，致使水文研究相對困難。

模糊集合(fuzzy set)的概念是由加州大學 Lotfi A. Zadeh 教授(1964)提出，模糊集合是相對於傳統明確集合(crisp set)的另一種概念，傳統明確集合的元素是 0 與 1、是二元的、沒有中間的過渡地帶，非黑即白，這與

真實世界的現象不盡相符。所以模糊集合容許在 0 與 1 之間存有無限的可能、是多元的，除了黑與白兩種極端之外，中間還有灰，而且是各種不同程度的灰，如此將更能貼近真實世界的內涵。模糊集合經過二十年的理論發展期，自 1980 年代末期起，模糊系統(fuzzy system)已經成功應用在很多領域，包括商品製造、工業流程及自動化控制等。

模糊邏輯(fuzzy logic)在水文領域之研究及應用，大多在處理水文量的不確定性(uncertainty)。如張良正、楊朝仲及陳昶憲(1998)以模糊理論預測水文測站之出流量，Ozelkan and Duckstein(2001)以模糊概念建立降雨及逕流模式。

本研究以模糊邏輯分析集水區暴雨逕流型態，由單場暴雨總量之歸屬函數，與其所造成逕流總量之歸屬函數，經由模糊推論，探討暴雨逕流型態之分類，進而預測單場暴雨之逕流量。研究案例選用台灣中部地區烏溪流域惠蓀雨量站及南北通橋水位站，在颱風或豪大雨期間之每小時水文觀測紀錄。

二、模糊邏輯

1. 模糊集合

傳統集合對於事物的描述都是很明確的，舉例來說，假設男性成人的身高如果在 180 公分以上就算是高個子，亦即 179 公分以下者就不是高個子。縱使 179 只比 180 少 1 公分，這雖然不太合理，但卻符合傳統集合的邏輯。

在模糊集合的邏輯裡，可以對於上述現象給予適當的處理，模糊邏輯引進歸屬函數(membership function)的概念。例如吾人可以在 180 公分與 170 公分之間建立一段中間過渡地帶，如圖一所示。亦即 170 公分以下之身高不算是高個子，但是從 170 公分以上，隨著 171 公分、172 公分、...之歸屬函數逐漸

逼近 1，表示其身高值也逐漸邁入高個子領域。亦即愈接近 180 公分之身高值，就愈像是高個子。

傳統集合非黑即白之二分法，與真實世界的現象不盡相符。然而模糊集合卻容許在黑與白之間存有無限多的可能，除了黑與白之外，還有灰，而且是各種不同程度的灰，更能貼近真實世界的內涵。

2. 模糊化

將變數之值不再侷限於 0 和 1 兩種可能，而改成屬於 0 與 1 區間之任何數值，即是變數模糊化。變數之模糊化通常以歸屬函數表示之，常用的歸屬函數型態有三角形歸屬函數、梯形歸屬函數、高斯(Gaussian)歸屬函數等，圖二即為這些歸屬函數之圖例。

3. 模糊規則

語意式(linguistic)變數在模糊邏輯中扮演非常重要的角色，模糊規則(fuzzy rule)就是在語意式變數之間建立一種模糊關係，然後再依照此一模糊關係去進行語意式變數的模糊推論(fuzzy reasoning)。

語意式變數是一種使用語文來表示之變數，如果「年齡」是語意式變數的話，那麼此一變數的值就有可能是「年輕」或「年老」。

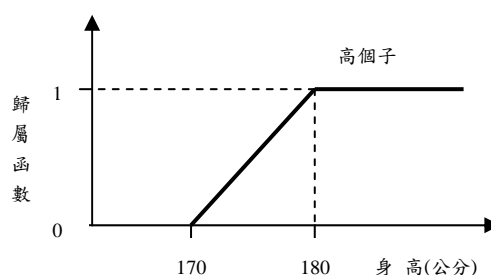


圖 1. 高個子之歸屬函數
Figure 1. Membership function of tall height.

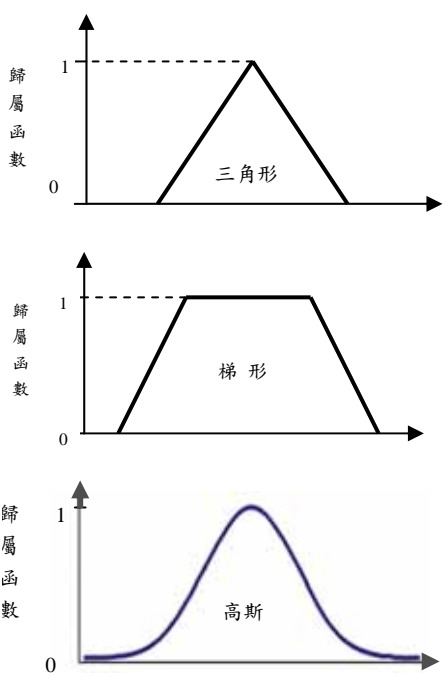


圖 2. 歸屬函數型態 (三角形、梯形、高斯)
Figure 2. Type of membership function.
(triangle、trapezoidal、Gaussian)

語意式變數的概念是由 Lotfi A. Zadeh 教授在 1975 年首先提出，主要是當傳統的數值概念無法解決複雜問題時，語意式變數可以提供另一類不同的處理思惟。

模糊規則，亦可稱為模糊蘊涵(fuzzy implication)。通常以下列方式表示：

$$\text{If } x \text{ is } A \quad \text{Then } y \text{ is } B$$

式中 $x \text{ is } A$ 稱作模糊規則的前件部 (antecedent or premise)， $y \text{ is } B$ 稱作模糊規則的後件部 (consequence or conclusion)。以下是簡單的模糊規則例子：

- If 室溫很高 Then 開冷氣
- If 車速過快 Then 踩煞車

4. 模糊推論

模糊推論可以說是模糊邏輯理論的核心，因為人類的思考決策模式可以經由模糊

推論之進行，而達到解決問題之目的。模糊推論是依據模糊規則而來，假設有一模糊規則如下：

$$\text{If } x \text{ is } A \quad \text{Then } y \text{ is } B$$

如果現在 $x \text{ is } A'$ ，則依據上述模糊規則，經由模糊推論可以得到 $y \text{ is } B'$ 之結果。

如果模糊規則有 n 條，例如：

- If $x \text{ is } A_1$ Then $y \text{ is } B_1$
- If $x \text{ is } A_2$ Then $y \text{ is } B_2$
- ⋮
- ⋮
- ⋮

$$\text{If } x \text{ is } A_n \quad \text{Then } y \text{ is } B_n$$

則當 $x \text{ is } A'$ 時，依據上述模糊規則，經由模糊推論結果可以得到 $y \text{ is } B'$ 。圖三是模糊推論之圖例。

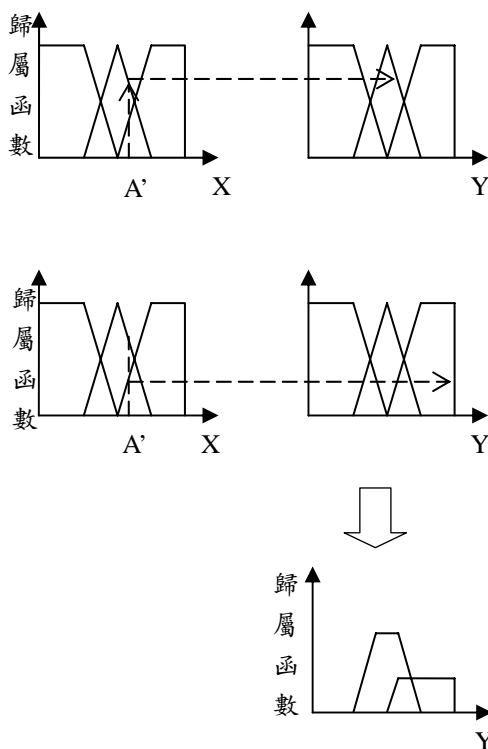


圖 3. 模糊推論之圖例
Figure 3. A figure example of fuzzy reasoning.

5. 去模糊化

去模糊化(defuzzification)就是將模糊推論結果，轉換回明確數值得到最後一般數值解答之過程。常用的去模糊化方法有兩種，其數理概念示如圖四。其中一種為最大平均法(mean of maximum, MOM)，僅針對歸屬函數最大值部分，求其平均值，不考慮其他較小值的歸屬函數。另一種為形心法(center of area, COA)，係考量全部的歸屬函數，不論其大小值，求其全部面積之中心。

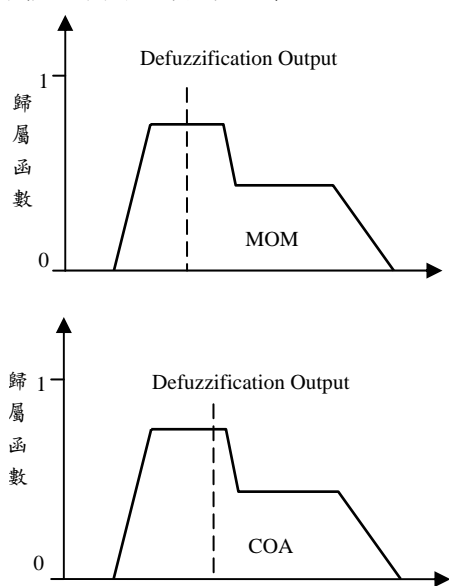


圖 4. 去模糊化之方法

Figure 4. Defuzzification methods. (MOM、COA)

三、研究案例

1. 研究流程

本研究對於集水區暴雨逕流型態之分析流程示如圖五，首先進行集水區暴雨及逕流觀測資料蒐集，蒐集的水文事件限於颱風或豪大雨期間之降雨和逕流，並選用觀測期距為小時之資料。

再來就是建立各單場暴雨總量之歸屬函

數，亦即將各場暴雨總量模糊化處理。同時並對各場暴雨產生之逕流總量也予以模糊化處理，從而建立逕流總量之歸屬函數。

接著建立本研究集水區暴雨逕流型態之模糊規則，例如：集水區若降下很大的暴雨，就會產生很大的逕流。然後依據此一模糊規則去進行模糊推論。最後將模糊推論結果，經由去模糊化之處理而得到答案。

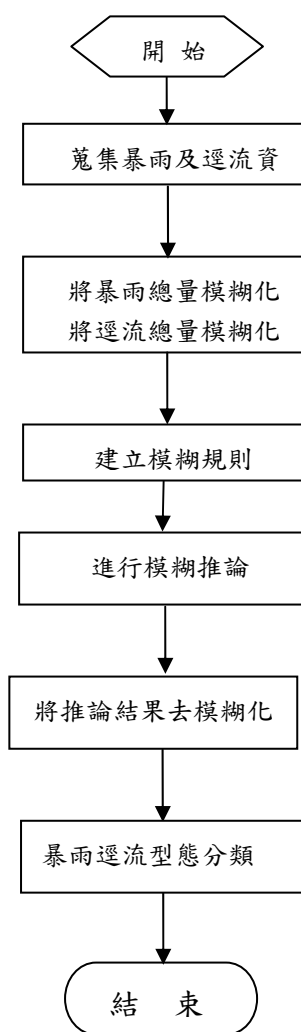


圖 5. 模糊邏輯研究流程

Figure 5. Flowchart of fuzzy logic study.

2. 水文資料

水文資料選用台灣中部地區烏溪流域，惠蓀雨量站之時雨量觀測數據及南北通橋水位站(集水面積 408 平方公里)之時流量推估數據，惠蓀雨量站及南北通橋水位站在烏溪流域之地理位置示如圖六。由於本研究必須選用暴雨和逕流資料完整者，所以經篩選結果採用自 1991 年至 2002 年，總共 14 場暴雨和逕流紀錄。

3. 模糊規則

本研究案例之模糊規則定義如下，如此定義之原因是逕流量和暴雨量有正比例關係。

- | | |
|----------|------------|
| If 暴雨量多 | Then 逕流量多 |
| If 暴雨量適中 | Then 逕流量適中 |
| If 暴雨量少 | Then 逕流量少 |

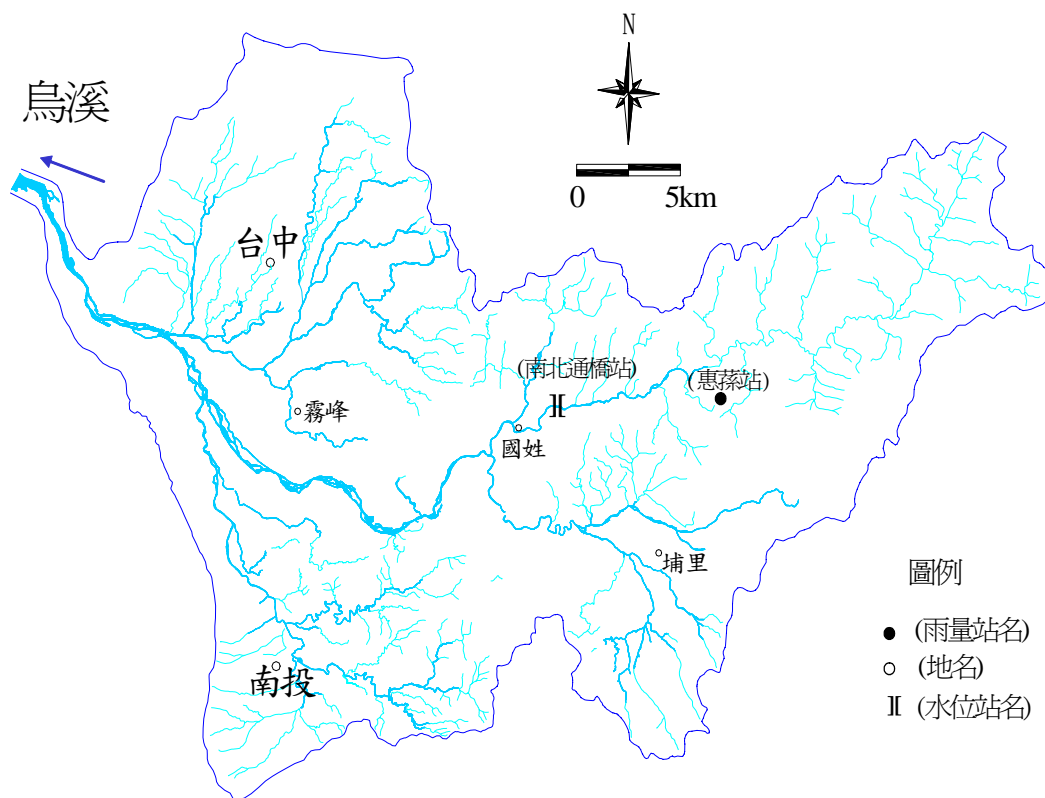


圖 6. 烏溪流域惠蓀雨量站及南北通橋水位站位置圖

Figure 6. Location of Hui-Sun rainfall station and Nan-Bei-Tong Bridge water stage station within Wu River.

表 1. 14 場水文事件暴雨及逕流數據
 Table 1. Rainstorm and runoff data of 14 hydrology events.

編號	發生日期	事件名稱	水文類別	第一日	第二日	第三日	合計值	逕流係數
1	1991/06 23-25	0623 暴雨	暴雨量	70	133	39	242	0.292
			逕流量	435	1264	1186	2884	
2	1992/07 06-08	0706 暴雨	暴雨量	87	113	34	234	0.415
			逕流量	1102	1384	1476	3961	
3	1993/05 26-28	0526 暴雨	暴雨量	116	212	47	375	0.204
			逕流量	227	1151	1742	3119	
4	1993/06 01-03	0601 暴雨	暴雨量	23	199	38	260	0.429
			逕流量	754	1920	1880	4555	
5	1994/08 08-10	道格颱風	暴雨量	532	246	123	901	0.272
			逕流量	3932	3223	2861	10016	
6	1995/06 08-10	荻安娜颱風	暴雨量	60	123	65	248	0.201
			逕流量	218	562	1256	2036	
7	1996/04 19-21	0419 暴雨	暴雨量	124	62	2	188	0.209
			逕流量	304	714	587	1606	
8	1996/05 07-09	0507 暴雨	暴雨量	82	180	58	320	0.422
			逕流量	699	2753	2055	5507	
9	1997/03 21-23	0321 暴雨	暴雨量	76	157	47	280	0.113
			逕流量	60	284	951	1295	
10	1997/05 17-19	0517 暴雨	暴雨量	118	3	223	344	0.094
			逕流量	130	210	984	1323	
11	1997/06 09-11	0609 暴雨	暴雨量	72	154	137	363	0.327
			逕流量	788	1514	2536	4838	
12	1998/08 04-06	奧托颱風	暴雨量	71	11	6	88	0.176
			逕流量	220	235	176	631	
13	2001/09 16-18	納莉颱風	暴雨量	35	78	3	116	0.282
			逕流量	223	515	595	1333	
14	2002/07 09-11	娜克莉颱風	暴雨量	1	119	19	139	0.466
			逕流量	161	1139	1344	2644	

備註: 暴雨量單位(mm), 逕流量單位(萬立方公尺)。

4. 模糊化

本研究案例對於單場暴雨總量和逕流總量之模糊化皆選用三角形歸屬函數，並且都採

用多、適中、少。在模糊化之前先計算這 14 場水文事件之逕流係數。

$$Q = C \times \frac{A \times 10^3 \times 10^3 \times R \times 10^{-3}}{10^4}$$

式中 Q: 逕流總量(萬立方公尺)
 C: 逕流係數
 A: 水位站集水面積(平方公里)
 R: 暴雨總量(mm)

逕流係數計算結果如表一所示，可以看出同一集水區不同場次的暴雨，其逕流係數差異頗大，但大約都介於 0.1 至 0.5 之間。究其差異原因可能與臨前土壤水分含量有關，亦即若在暴雨之前已經有下雨，則因土壤潮濕，造成入滲量較少，所以逕流量較多；相反地若在暴雨之前已經很久沒下雨，則土壤乾燥，造成入滲量較多，所以逕流量較少。

如果將逕流係數分級，分別以 0.1、0.2、0.3、0.4 為中心，在各中心上下者也一併納入各中心統計，則逕流係數屬於 0.1 之水文事件有編號 9、10 共二場，屬於 0.2 者有編號 3、6、7、12 共四場，屬於 0.3 者有編號 1、5、11、13 共四場，屬於 0.4 者有編號 2、4、8、14 共四場。

經檢視各場次暴雨總量之數值，可大約以 150mm 當作「暴雨量適中」之代表。再分別以 50mm 當作「暴雨量少」之起算點，及 250mm 當作「暴雨量多」之起算點。最後分別以 0mm 當作「暴雨量少」之邊界，及 400mm 當作「暴雨量多」之邊界。經模糊化之暴雨總量歸屬函數示如圖七。

與上述暴雨總量各控制數值相對應之逕流總量，則採用逕流係數 0.2 與 0.3 之平均值 0.25，分別推估求得各相對應之逕流總量為 0、510、1530、2550、4080 萬立方公尺，經模糊化之逕流總量歸屬函數亦示如圖七。

5. 模糊推論及去模糊化

將本研究案例 14 場水文事件之暴雨總量，經由模糊化之暴雨總量歸屬函數，依據前

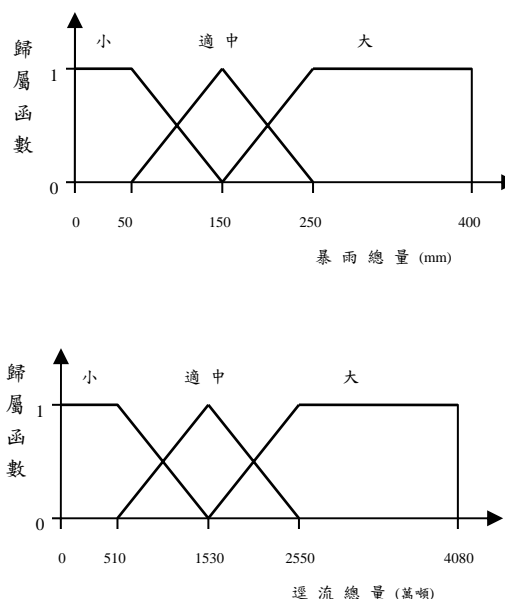


圖 7. 暴雨總量及逕流總量歸屬函數
 Figure 7. Membership function of rainstorm and runoff separate.

述模糊規則，推論求得模糊化之逕流總量，經過去模糊化後（本研究案例採用形心法 COA），可以得到一般數值的逕流總量，如表二所示。

6. 暴雨逕流型態分類

由表一各場次暴雨之逕流係數變化，及考慮暴雨之前是否曾經下雨影響逕流量。本研究將逕流係數介於 0.2 與 0.3 之間的水文事件視為「逕流量適中」，去模糊化後之逕流總量，即為求解結果。

逕流係數 0.3 以上之水文事件視為「逕流量多」，去模糊化後之逕流總量，須再乘以調整係數 1.5，才是求解結果。逕流係數 0.2 以下之水文事件視為「逕流量少」，去模糊化後之逕流總量，須再乘以調整係數 0.5，才是求解結果。

表 2. 去模糊化逕流總量及逕流總量預測誤差
 Table 2. Defuzzified runoff and its prediction error.

編號	事件名稱	暴雨總量	逕流總量 (A)	逕流係數	去模糊化逕流總量 (B)	逕流總量預測誤差 (B) - (A)
1	0623 暴雨	242	2884	0.292	2942	58 (2.0%)
2	0706 暴雨	234	3961	0.415	2845	-1116 (-28.2%)
3	0526 暴雨	375	3119	0.204	3039	-80 (-2.6%)
4	0601 暴雨	260	4555	0.429	3039	-1516 (-33.3%)
5	道格颱風	901	10016	0.272	7230	-2786 (-27.8%)
6	荻安娜颱風	248	2036	0.201	3015	979 (48.1%)
7	0419 暴雨	188	1606	0.209	2252	646 (40.2%)
8	0507 暴雨	320	5507	0.422	3039	-2468 (-44.8%)
9	0321 暴雨	280	1295	0.113	3039	1744 (134.7%)
10	0517 暴雨	344	1323	0.094	3039	1716 (129.7%)
11	0609 暴雨	363	4838	0.327	3039	-1799 (-37.2%)
12	奧托颱風	88	631	0.176	1037	406 (64.3%)
13	納莉颱風	116	1333	0.282	1288	-45 (-3.4%)
14	娜克莉颱風	139	2644	0.466	1458	-1186 (-44.9%)

備註: 暴雨總量單位(mm), 逕流總量單位(萬立方公尺)。

7. 研究結果

重新將本研究案例 14 場水文事件之暴雨總量, 經模糊邏輯之運算, 求得去模糊化之逕流總量, 並依各水文事件之逕流係數, 視其是否屬於「逕流量多」或「逕流量少」, 再分別乘以調整係數, 得到最後的逕流總量如表三所示。此一結果顯示再調整後之逕流

總量, 比只有單純去模糊化之逕流總量, 更能貼近實際逕流總量情況。

惟表三的第 3 及第 5 場水文事件有些例外, 第 3 場水文事件的逕流係數 0.204, 可以比照逕流係數 0.2 以下者, 乘以調整係數 0.5。但其暴雨總量有 375mm, 比起其他同級逕流係數之暴雨總量 188mm (第 7 場) 或

248mm（第 6 場）還高出許多，若乘以調整係數反而造成逕流總量偏少，預測誤差擴大，所以就不予調整。

第 5 場水文事件的逕流係數 0.272，可以比照逕流係數介於 0.2 與 0.3 之間者，不

用乘以調整係數。但其暴雨總量有 901mm，比起其他同級逕流係數之暴雨總量 242mm（第 1 場）或 116mm（第 13 場）還高出許多，若不予調整將使逕流總量偏少，預測誤差擴大，所以就乘以調整係數 1.5。

表 3. 調整後逕流總量及逕流總量預測誤差
Table 3. Modified runoff and its prediction error.

編號	事件名稱	逕流總量 (A)	去模糊化逕流總量 (B)	逕流總量預測誤差 (B)-(A)	再調整後逕流總量 (C)	逕流總量預測誤差 (C)-(A)
1	0623 暴雨	2884	2942	58 (2.0%)	2942	58 (2.0%)
2	0706 暴雨	3961	2845	-1116 (-28.2%)	4268	307 (7.8%)
3	0526 暴雨	3119	3039	-80 (-2.6%)	3039	-80 (-2.6%)
4	0601 暴雨	4555	3039	-1516 (-33.3%)	4558	3 (0.1%)
5	道格颱風	10016	7230	-2786 (-27.8%)	10844	828 (8.3%)
6	荻安娜颱風	2036	3015	979 (48.1%)	1507	-529 (-26.0%)
7	0419 暴雨	1606	2252	646 (40.2%)	1126	-480 (-30.0%)
8	0507 暴雨	5507	3039	-2468 (-44.8%)	4558	-949 (-17.2%)
9	0321 暴雨	1295	3039	1744 (134.7%)	1519	224 (17.3%)
10	0517 暴雨	1323	3039	1716 (129.7%)	1519	196 (14.8%)
11	0609 暴雨	4838	3039	-1799 (-37.2%)	4558	-280 (-5.8%)
12	奧托颱風	631	1037	406 (64.3%)	519	-112 (-17.7%)
13	納莉颱風	1333	1288	-45 (-3.4%)	1288	-45 (-3.4%)
14	娜克莉颱風	2644	1458	-1186 (-44.9%)	2168	-476 (-18.0%)

備註：逕流總量單位(萬立方公尺)。

四、結語

1. 由本研究結果顯示集水區單場暴雨，其逕流總量與暴雨總量存有正比例關係，此一關係又受到暴雨之前，是否曾經下很多雨或是否已經很久未下雨之影響。亦即在暴雨之前若已經下了很多雨，則土壤含水量會較多，相對在暴雨期間之土壤入滲量會較少，造成逕流量較多，所以逕流係數較高。反之若在暴雨之前很久沒下雨，則土壤含水量較少，暴雨期間之土壤入滲量會較多，造成逕流量較少，所以逕流係數較低。
2. 本研究目前只探討集水區單場暴雨中，其逕流總量與暴雨總量之定量關係，但對於單場暴雨內各小時暴雨量與其後產生各小時逕流量之數理關係，則尚未納入一併研究。未來將結合類神經網路與模糊邏輯，對此一課題做進一步之研究。
3. 在暴雨總量與逕流總量之模糊化過程中，如何合理決定歸屬函數 x 軸上之控制點數值，亦是未來必須研究確認的工作。本研究係歸納 14 場水文事件之暴雨總量與逕流總量再予以判斷決定，未來可加入更富學理之分析，以避免不同個案而有不同之結果。依照逕流係數來判斷是否以調整係數修正逕流總量，就本研究而言仍有例外情

況，此一例外情況所顯示的水文特性確有其學理依據，未來如何將其納入整體的逕流總量調整原則，則是下一階段研究的重點。

五、參考文獻

1. 蘇木春、張孝德編著 (1997) 「機器學習：類神經網路、模糊系統以及基因演算法則」，全華科技圖書股份有限公司，pp.6-1~8-32.
2. 張良正、楊朝仲、陳昶憲 (1998) 「模糊理論在洪流預測之應用」，第九屆水利工程研討會
3. 陳耀茂譯 (2000) 「模糊理論」，五南圖書出版有限公司，pp.89-115.
4. Ozelkan, Ertunga C., and Lucien Duckstein (2001) “ Fuzzy conceptual rainfall-runoff models ”, *Journal of Hydrology*, 253 : 41-68.
5. Pongracz, R., I. Bogardi, and L. Duckstein (1999) “Application of fuzzy rule-based modeling technique to regional drought ”, *Journal of Hydrology*, 224 : 100-114.
6. Yen, John, and Reza Langari (1999) “FUZZY LOGIC”, Prentice-Hall, Inc., pp.21-55.

93 年 8 月 5 日收稿

93 年 9 月 10 日修改

93 年 9 月 18 日接受

