

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

驟雨衝擊效應之流量即時預報

Real-time Flood Forecasting by
Considering the Rain-burst Effect



萬本立

Been-Lih Wan

指導教授：鄭克聲 博士

Advisor: Ke-Sheng Cheng, Ph.D.

中華民國 101 年 6 月

June, 2012

謝誌

學生生涯到這裡畫下一個句點。在求學的道路上需要感謝的人多不勝數，是你、是妳，也是您，謝謝你們這一路上的支持、鼓勵和陪伴，沒有你們我的學生生活也不會如此的多彩多姿。

我要特別感謝我的指導教授鄭克聲博士，總是不厭其煩的指導我，詳細地與我討論研究內容的細節，此外我還要感謝葉克家教授、黃文政教授以及吳瑞賢教授，謝謝你們不畏風雨的前來口試，並且為我的論文提供許多寶貴的意見，因為你們我才能夠完成我的碩士論文。

最後我要感謝我的父母這二十幾年來不辭辛勞的照顧，和用心栽培，我才能夠平穩地走在求學的道路上。這篇論文僅獻給我的親人、老師、朋友、愛人和在天上的爺爺與外婆。



摘要

台灣近年來極端降雨事件發生次數日益頻繁，造成許多的洪水災害，使得居民生命、財產遭受嚴重威脅。為降低洪水災害損失，即時流量預報就成為重要的研究課題。

本研究以曾文水庫集水區和赤蘭溪流域為研究區域，針對研究區域颱風、豪雨事件之流量資料，以時間序列的 AR(2)模式和 Naïve 模式做為流量即時預報模式，並藉由雨量資料來改善時間序列模式預報延遲的問題。雨量資料的探討分為兩部分，第一部份為探討雨量增加量和流量增加量之間的關係，藉由找出會造成流量突增的雨量增加量(rain-burst)，建立雨量增加量和流量增加量之間的關係式，結合 AR(2)模式修正驟雨效應所導致的預報延遲誤差。第二部份為應用單位歷線的概念，以線性迴歸方式建立雨量差和流量差的反應函數式，由前幾個時刻的雨量差推求預報時刻的流量差，結合 Naïve 模式進行即時流量預報，藉由考慮到雨量變化的整個趨勢，大幅改善預報延遲問題。

研究結果顯示，考慮 rain-burst 的 AR(2)模式可藉由降低峰值時刻的預報誤差，提高 CP 值，改善預報延遲的問題，而結合反應函數式的 Naïve 模式在 CP 值的表現，明顯優於其他模式，顯示考量整體雨量變化趨勢對於改善預報延遲問題有很大的成效。

關鍵字：時間序列、AR(2)模式、Naïve 模式、驟雨效應(rain-burst)、單位歷線、反應函數

Abstract

In recent years, the extreme rainfall events become more and more so that result in many flood disasters that make residents' lives and property suffered a serious threat. In order to reduce flood damage, real-time flood forecasting has become an important research topic.

Research analysis was processed with flood events of Tseng-Wen Reservoir Watershed and Chi-Lan River basin. This study constituted several forecasting models of hourly stream discharge based on AR(2) model and Naïve model, and correct the problem of forecasting time lag phenomenon by considering rainfall data.

The discussion of rainfall data is divided in two parts. First part is that discuss the relationship between increment of rainfall and increment of discharge. By identify the increment of rainfall (rain-burst) which can make discharge significantly increase in a short time, we can establish the function of relationship between increment of rainfall and increment of discharge and combined with AR(2) model to correct the problem of forecasting time lag phenomenon which result from rain-burst effect. Second part is that apply the concept of unit hydrograph to establish response function between rainfall difference and discharge difference by linear regression, use data of rainfall difference before prediction time to estimate discharge difference on prediction time and combined with Naïve model to forecast hourly discharge. By considering the trend of rainfall variations, significantly improve the problem of forecasting time lag phenomenon.

The results of research shows that AR(2) model by considering the rain-burst effect can improve the problem of forecasting time lag phenomenon and enhance CP value by reducing the prediction error on peak time. And the performance of Naïve model which combined with response function is significantly better than other models. This result

demonstrates that considering the trend of rainfall variations is very effective to improve the problem of forecasting time lag phenomenon.

Keywords : Time series, AR(2) model, Naïve model, Rain-burst effect, Unit hydrograph, Response function



目錄

摘要.....	I
Abstract	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 序論.....	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究架構.....	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 時間序列模式.....	4
2.1.1 自我迴歸過程 AR(p)模式介紹	5
2.1.2 自我迴歸過程 AR(p)模式特性	5
2.1.3 自我迴歸過程 AR(p)模式的參數估計.....	5
2.2 時間序列模式在流量預報上的應用與表現.....	8
2.2.1 時間序列模式的預報延遲問題	9
2.2.2 預報延遲問題的修正.....	10
2.3 模式評估指標.....	11
第三章 研究區域概況與資料整理和計算.....	13
3.1 曾文水庫集水區概況	13
3.2 赤蘭溪流域概況	13
3.3 資料整理和計算	18
3.3.1 流量資料的鑑定	19
第四章 即時預報模式的建立	21
4.1 事件的分類.....	21
4.2 Naïve 模式的建立.....	24
4.3 AR(2) 模式的建立	24
4.4 考量 rain-burst 的 AR(2)模式	25
4.4.1 雨量增加量與流量增加量關係式的建立.....	25
4.4.2 反應時間的估算	26
4.5 反應函數模式的建立	29
4.5.1 曾文水庫集水區和赤蘭溪流域之反應函數模式的建立.....	31

4.5.2 曾文水庫集水區和赤蘭溪流域之調適性反應函數模式的建立	34
第五章 即時預報模式預報結果	37
5.1 Naïve 模式的預報結果	37
5.2 AR(2) 模式的預報結果	37
5.3 考慮 rain-burst 的 AR(2) 模式的預報結果	41
5.4 反應函數模式的預報結果	55
5.5 調適性反應函數模式的預報結果	57
5.6 五個模式的綜合評估與比較	59
5.6.1 各模式之 CP 值評估與比較	59
5.6.2 各模式之峰值時刻的預報誤差評估與比較	62
第六章 結論與建議	78
6.1 結論	78
6.2 建議	79
參考文獻	80
附錄	82



圖目錄

圖 1-1	論文研究架構.....	3
圖 2-1	AR(p)模式之 ACF 結構示意圖.....	7
圖 2-2	AR(2)模式之 PACF 結構示意圖.....	7
圖 2-3	預報延遲示意圖.....	9
圖 3-1	曾文水庫集水區地理位置.....	15
圖 3-2	赤蘭溪流域地理位置示意圖.....	17
圖 3-3	曾文水庫集水區徐昇式權重面積區塊圖.....	20
圖 3-4	赤蘭溪流域徐昇式權重面積區塊圖.....	20
圖 4-1	曾文水庫集水區事件之逕流歷線圖.....	23
圖 4-2	赤蘭溪流域事件之逕流歷線圖.....	23
圖 4-3	曾文水庫集水區之雨量增加量與流量增加量關係圖.....	28
圖 4-4	赤蘭溪流域之雨量增加量與流量增加量關係圖.....	28
圖 4-5	曾文水庫集水區各事件 U 值.....	32
圖 4-6	赤蘭溪流域各事件 U 值.....	33
圖 4-7	曾文水庫集水區各事件之平均流量與最大 U 值的關係圖.....	35
圖 4-8	赤蘭溪流域各事件之平均流量與最大 U 值的關係圖.....	36
圖 5-1	AR(2)模式預報值之相關係數&Naive 模式預報值之相關係數散布圖.....	38
圖 5-2	曾文水庫集水區事件 1 之 rain-burst 預報結果.....	44
圖 5-3	曾文水庫集水區事件 4 之 rain-burst 預報結果.....	44
圖 5-4	曾文水庫集水區事件 5 之 rain-burst 預報結果.....	45
圖 5-5	曾文水庫集水區事件 6 之 rain-burst 預報結果.....	45
圖 5-6	曾文水庫集水區事件 8 之 rain-burst 預報結果.....	46
圖 5-7	曾文水庫集水區事件 9 之 rain-burst 預報結果.....	46
圖 5-8	曾文水庫集水區事件 10 之 rain-burst 預報結果.....	47
圖 5-9	曾文水庫集水區事件 12 之 rain-burst 預報結果.....	47
圖 5-10	曾文水庫集水區事件 13 之 rain-burst 預報結果.....	48
圖 5-11	曾文水庫集水區事件 14 之 rain-burst 預報結果.....	49
圖 5-12	赤蘭溪流域事件 1 之 rain-burst 預報結果.....	49
圖 5-13	赤蘭溪流域事件 2 之 rain-burst 預報結果.....	49
圖 5-14	赤蘭溪流域事件 3 之 rain-burst 預報結果.....	50
圖 5-15	赤蘭溪流域事件 4 之 rain-burst 預報結果.....	50
圖 5-16	赤蘭溪流域事件 5 之 rain-burst 預報結果.....	51
圖 5-17	赤蘭溪流域事件 6 之 rain-burst 預報結果.....	51
圖 5-18	赤蘭溪流域事件 7 之 rain-burst 預報結果.....	52
圖 5-19	赤蘭溪流域事件 8 之 rain-burst 預報結果.....	52

圖 5-20	赤蘭溪流域事件 10 之 rain-burst 預報結果.....	53
圖 5-21	赤蘭溪流域事件 11 之 rain-burst 預報結果.....	53
圖 5-22	赤蘭溪流域事件 12 之 rain-burst 預報結果.....	54
圖 5-23	曾文水庫集水區事件 1 之五個模式預報結果.....	64
圖 5-24	曾文水庫集水區事件 2 之五個模式預報結果.....	64
圖 5-25	曾文水庫集水區事件 3 之五個模式預報結果.....	65
圖 5-26	曾文水庫集水區事件 4 之五個模式預報結果.....	65
圖 5-27	曾文水庫集水區事件 5 之五個模式預報結果.....	66
圖 5-28	曾文水庫集水區事件 6 之五個模式預報結果.....	66
圖 5-29	曾文水庫集水區事件 7 之五個模式預報結果.....	67
圖 5-30	曾文水庫集水區事件 8 之五個模式預報結果.....	67
圖 5-31	曾文水庫集水區事件 9 之五個模式預報結果.....	68
圖 5-32	曾文水庫集水區事件 10 之五個模式預報結果.....	68
圖 5-33	曾文水庫集水區事件 11 之五個模式預報結果.....	69
圖 5-34	曾文水庫集水區事件 12 之五個模式預報結果.....	69
圖 5-35	曾文水庫集水區事件 13 之五個模式預報結果.....	70
圖 5-36	曾文水庫集水區事件 14 之五個模式預報結果.....	70
圖 5-37	曾文水庫集水區事件 15 之五個模式預報結果.....	71
圖 5-38	赤蘭溪流域事件 1 之五個模式預報結果.....	71
圖 5-39	赤蘭溪流域事件 2 之五個模式預報結果.....	72
圖 5-40	赤蘭溪流域事件 3 之五個模式預報結果.....	72
圖 5-41	赤蘭溪流域事件 4 之五個模式預報結果.....	73
圖 5-42	赤蘭溪流域事件 5 之五個模式預報結果.....	73
圖 5-43	赤蘭溪流域事件 6 之五個模式預報結果.....	74
圖 5-44	赤蘭溪流域事件 7 之五個模式預報結果.....	74
圖 5-45	赤蘭溪流域事件 8 之五個模式預報結果.....	75
圖 5-46	赤蘭溪流域事件 9 之五個模式預報結果.....	75
圖 5-47	赤蘭溪流域事件 10 之五個模式預報結果.....	76
圖 5-48	赤蘭溪流域事件 11 之五個模式預報結果.....	76
圖 5-49	赤蘭溪流域事件 12 之五個模式預報結果.....	77
圖 A1.	曾文水庫集水區各事件流量資料之 PACF 圖.....	85
圖 A2.	赤蘭溪流域各事件流量資料之 PACF 圖.....	87

表目錄

表 3-1 曾文水庫集水區雨量站資料概況.....	14
表 3-2 曾文水庫入流量資料概況.....	14
表 3-3 赤蘭溪流域雨量站資料概況.....	16
表 3-4 赤蘭溪流域流量站資料概況.....	16
表 4-1 研究區域各事件平均流量.....	22
表 4-2 各流域之雨量差和流量差在延遲時間 t 的相關係數.....	27
表 4-3 各研究區域預報模式之反應函數 U 值.....	31
表 4-4 曾文水庫集水區各事件 U 值.....	32
表 4-5 赤蘭溪流域各事件 U 值.....	33
表 4-6 曾文水庫集水區各分類 U 值.....	35
表 4-7 赤蘭溪流域各分類 U 值.....	36
表 5-1 Naïve 模式在曾文水庫集水區的預報評估結果.....	39
表 5-2 Naïve 模式在赤蘭溪流域的預報評估結果.....	39
表 5-3 AR(2)模式在曾文水庫集水區的預報評估結果.....	40
表 5-4 AR(2)模式在赤蘭溪流域的預報評估結果.....	40
表 5-5 考慮 rain-burst 的 AR(2)模式在曾文水庫集水區的預報評估結果.....	43
表 5-6 考慮 rain-burst 的 AR(2)模式在赤蘭溪流域的預報評估結果.....	43
表 5-7 反應函數模式在曾文水庫集水區的預報評估結果.....	56
表 5-8 反應函數模式在赤蘭溪流域的預報評估結果.....	56
表 5-9 調適性反應函數模式在曾文水庫集水區的預報評估結果.....	58
表 5-10 調適性反應函數模式在赤蘭溪流域的預報評估結果.....	58
表 5-11 曾文水庫集水區各模式預報結果之 CP 值.....	60
表 5-12 赤蘭溪流域各模式預報結果之 CP 值.....	60
表 5-13 曾文水庫集水區各模式預報結果之 RMSE 值.....	61
表 5-14 赤蘭溪流域各模式預報結果之 RMSE 值.....	61
表 5-15 曾文水庫集水區各模式預報結果之 $EPT_p(\%)$ 值.....	63
表 5-16 赤蘭溪流域各模式預報結果之 $EPT_p(\%)$ 值.....	63
表 A1. 曾文水庫集水區各流量事件之起訖時間與事件代號.....	84
表 A2. 赤蘭溪流域各流量事件之起訖時間與事件代號.....	84
表 A3. 研究區域各流量事件 AR(2)模式參數值.....	85

第一章 序論

1.1 研究動機與目的

台灣的地理位置、氣候條件以及地形所形成的自然環境，容易遭受洪水災害的威脅，根據消防署統計。民國 47 年至民國 100 年共有 259 場洪水災害，其中 212 場為颱風所造成，其餘 47 場為豪雨所造成，平均每年 4.89 場，若只看民國 90 年至民國 100 年所發生的洪水災害事件則有 78 場，平均每年發生水災的場次高達 7.7 場，由此可知，台灣極端降雨事件發生次數日益頻繁，造成更多的洪水災害，使得居民生命、財產遭受更嚴重的威脅。

近年來最嚴重的洪水災害，莫過於 2009 年的莫拉克颱風事件，莫拉克颱風於 98 年 8 月 7~9 日侵襲台灣，為中南部帶來大量雨量，累積雨量及降雨強度均破台灣歷史紀錄，造成南部河川下游沿岸堤防嚴重潰堤，導致南部地區居民嚴重的傷亡和損失。然而颱風、豪雨皆為自然現象，其出現的時間、地點及大小皆不易預測，也不可能避免或排除，因此只能預防和應變。而洪水災害是由於降雨超量，導致排水不及，造成河川溪流暴漲所導致，若能做好預警工作，及早預測出流量變化，便可以及時提出因應之策，降低洪水災害所造成的損失，因此建立即時流量預報模式對於降低洪水災害損失便是一個重要的課題。

在流量預報方面已發展出許多模式，像是類神經網路模式(Neural Networks Model)、時間序列模式(Time Series Model)等等。對於大部分的流量預報模式之預報值而言，在一些評估指標上的評比都很不錯，像是相關係數(Correlation Coefficient, r)或效率係數(Coefficient of Efficiency, CE)皆可達到 0.9 以上，但在持續係數(Coefficient of Persistence, CP)的評比上卻不佳，這代表流量預報模式的預報值雖有一定的準確度，但卻有預報延遲問題(見§2.2.1)的發生。預報延遲問題除了造成持續係數(Coefficient of Persistence, CP)評比不佳外，也會導致流量事件峰值時刻的預報值有普遍低估的情形，造成峰值預測的誤差。

預報延遲問題的產生與預報模式的建構有很大的關係，一般而言，都只有以歷史的流量資料來建立預報模式，並以前幾個時刻的流量值來預報下個時刻的流量值，這樣沒有考慮到自然降雨逕流的物理機制，因此都要等流量變化以後，預報模式才能抓到變化的趨勢，自然就會產生預報延遲的問題。考量降雨和逕流之間的物理機制，逕流變化和雨量有很大的相關性，逕流的增加是由於降雨所造成，因此便可加入雨量資料，建立一個考量流量和雨量的預報模式。

綜合以上論述，本研究嘗試以時間序列的 AR(2)模式(Autoregressive Model)和 Naïve 模式為主要的流量預報模式，並且設法考量雨量資料，修正模式的預測值，並建立同時考量流量和雨量的預報模式，以改善預報延遲的問題，提升峰值預報值的準確度。

1.2 研究架構

本研究分為三大部分，如圖 1-1 所示。第一部分為研究區域之時雨量和時流量資料的整理與計算，所選用的研究區域為曾文水庫集水區以及赤蘭溪流域。在這一部分會利用徐昇式多邊形法，算出研究區域的平均時雨量，並對應時流量資料切割出颱風、豪雨的降雨逕流序列作為研究資料，並把所切割出的事件分成兩類，一類作為建立即時預報模式的歷史資料(Training data)，另一類作為評估即時預報模式的驗證資料(Validation data)。

第二部分為即時預報模式的建立與介紹，這一部分會利用第一部分所得到用以建立即時預報模式的歷史資料(Training data)，來建立模式，所建立的模式分別為 AR(2)模式、AR(2)rain-burst 模式、Naïve 模式、反應函數模式。AR(2)加 rain-burst 模式，為考量時雨量的 AR(2)模式，當時雨量的增加量大過一門檻值就進行 AR(2)模式預報值的修正，而反應函數模式則是建立雨量差(ΔR)和流量差(ΔQ)之間的反應函數，再結合 Naïve 模式所得之新模式。

第三部分為模式預報的評估結果，本研究選用相關係數(r)、效率係數(CE)、持續係數(CP)、均方根差(RMSE)、峰值時刻的預報誤差(Error of prediction on peak

time, EPT_p)做為評估模式的評估指標，利用第二部分建立的即時預報模式對於第一部分所選用的驗證資料(Validation data)進行預報，並計算出上述的評估指標，並繪製觀測和預報的降雨逕流歷線，進行各個模式的評估、判斷其優缺點。

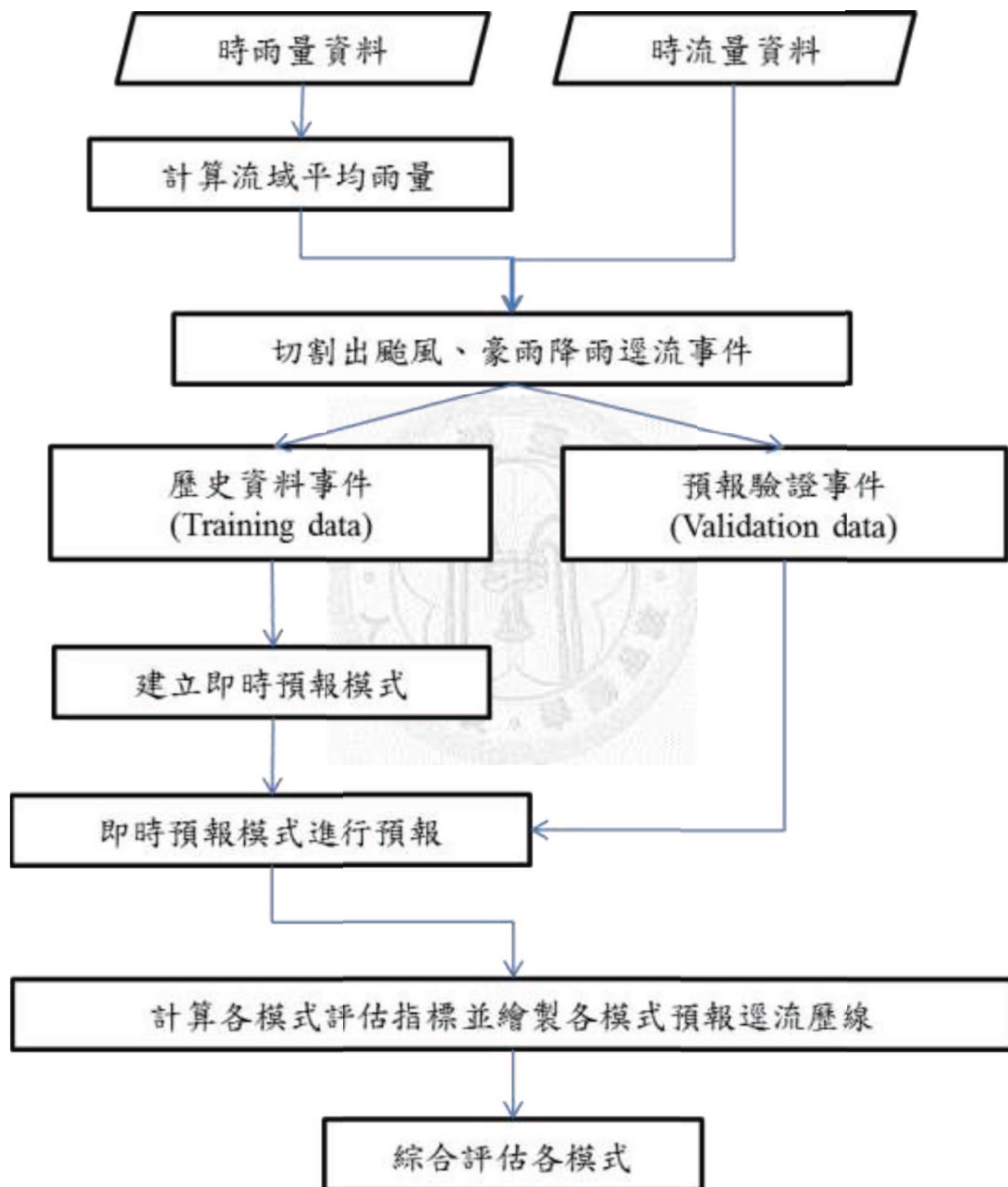


圖 1-1 論文研究架構

第二章 文獻回顧

2.1 時間序列模式

時間序列是指以時間先後順序所得到的觀測值序列，也就是隨時間觀測某種動態系統所得到的觀測值集合，像是所觀測到的水文資料，蒸發散量、雨量、流量等等，不論其觀測時距大小，均為隨時間先後順序所觀測到的水文現象，即稱為水文時間序列。

大部分水文方面的時間序列分析和模擬，都是基於混合自我迴歸移動平均過程，ARMA 模式的架構。ARMA 模式是一個表現線性隨機過程的模式，是由 Box 與 Jenkins 在 1970 年初所提出，通常 ARMA 模式會以 ARMA(p,q) 的形式表示，p 代表的是自我迴歸(Auto-regressive)的階數，而 q 則代表移動平均(Moving-average)的階數。ARMA 模式會以前 p 個觀測值和前 q 個白噪音的加權總合，描述時間序列裡的每一個觀測值：

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \cdots + \varphi_p X_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \cdots + \theta_q a_{t-q} \quad (2-1)$$

其中 X_t 表示所觀測的時間序列值； $\{a_t\}_{t=1}^{\infty} \sim N(0, \sigma_a^2)$ ； $\{\varphi_1, \varphi_2, \cdots \varphi_p\}$ 為自我迴歸參數； $\{\theta_1, \theta_2, \cdots \theta_q\}$ 為移動平均參數。

ARMA 模式為平穩型時間序列模式，因此在應用上時間序列資料也必須要符合穩定的特性。而模式的平穩性可依其機率結構特性，分為嚴格穩定(Strictly Stationary)和弱穩定(Weakly Stationary)。嚴格穩定的定義為，若一隨機過程 $\{X_t\}_{t=1}^{\infty}$ 在任一 k 個時段， $(X_{i+1}, X_{i+2}, \cdots X_{i+k})$ 的聯合分配與另 k 個平移 m 單位時間之 $(X_{i+1+m}, X_{i+2+m}, \cdots X_{i+k+m})$ 的聯合分配完全相等，則此隨機過程為嚴格穩定模式，其中 k 與 m 均為任一正整數，即

$$f(X_{i+1}, X_{i+2}, \cdots X_{i+k}) = f(X_{i+1+m}, X_{i+2+m}, \cdots X_{i+k+m}) \quad (2-2)$$

對任一 k， $m \in N\{1, 2, \cdots\}$ 均成立。

弱穩定則必須滿足下列三個條件：(1) $E(X_i) = \mu$ (2) $Var(X_i) = \gamma_0$ (3)

$Cov(X_i, X_{i+m}) = \gamma_m$ ，對所有 $i=1,2,\dots$ 均成立。若時間序列資料皆不符合上述穩定條件，則必須將資料差分，以達到平穩特性。

2.1.1 自我迴歸過程 AR(p)模式介紹

在本研究中所應用的自我迴歸過程 AR(p)模式，即為 ARMA(p,0)，是 ARMA 模式中的一個特例，常用於模擬和預報自我相關性高的水文資料。一個次數為 p 的自我迴歸過程 AR(p)可表示為：

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t \quad (2-3)$$

X_t 以過去 p 個時刻的觀測值的線性組合表示， a_t 為白噪音 $\{a_t\}_{t=1}^{\infty} \sim N(0, \sigma_a^2)$ 。若 $p=2$ ，序列就為 AR(2)模式，即為二階自我迴歸過程：

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + a_t \quad (2-4)$$

AR(2)模式平穩的充要條件為：

$$\begin{cases} |\varphi_2| < 1 \\ \varphi_1 + \varphi_2 < 1 \\ \varphi_2 - \varphi_1 < 1 \end{cases} \quad (2-5)$$

2.1.2 自我迴歸過程 AR(p)模式特性

自我迴歸過程 AR(p)模式的特性為，其 $ACF\{\rho_j\}_{j=1}^{\infty}$ 結構呈尾隨消失(tail-off)形式，而其 $PACF\{\varphi_{kk}\}_{k=1}^{\infty}$ (φ_{kj} 為 AR(k)模式中第 j 個係數)結構呈截斷(cut-off)形式，在 p 期之後被截，舉例：有一時間序列資料，將其計算所得之 ACF 值、PACF 值如圖 2-1、圖 2-2 所示，由圖 2-1 可看出其 ACF 結構呈尾隨消失形式，PACF 結構呈截斷形式，在第 2 期之後被截，因此此時間序列資料可視為二階自我迴歸過程，即為 AR(2)模式。

2.1.3 自我迴歸過程 AR(p)模式的參數估計

AR(p)模式的參數估計通常是解 Yule-Walker 方程式所求得，詳細內容如下：
假設有一 AR(p)模式為：

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t \quad (2-6)$$

同乘 X_{t-k} 於式(2-6)兩邊，

$$X_{t-k}X_t = \varphi_1 X_{t-k}X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-k}X_{t-2} + \cdots + \varphi_p X_{t-k}X_{t-p} + X_{t-k}a_t \quad (2-7)$$

取期望值

$$E(X_{t-k}X_t) = \varphi_1 E(X_{t-k}X_{t-1}) + \varphi_2 E(X_{t-k}X_{t-2}) + \cdots + \varphi_p E(X_{t-k}X_{t-p}) + E(X_{t-k}a_t) \quad (2-7)$$

令 $E(X_{t-k}X_t) = \gamma_k$

$$\gamma_k = \varphi_1 \gamma_{k-1} + \varphi_2 \gamma_{k-2} + \cdots + \varphi_p \gamma_{k-p} \quad (2-8)$$

同除 γ_0 ，得

$$\rho_k = \varphi_1 \rho_{k-1} + \varphi_2 \rho_{k-2} + \cdots + \varphi_p \rho_{k-p} \quad (2-9)$$

此式對所有 $k=1,2,\dots,p,p+1,\dots$ 均成立，將式(2-9)前 p 個方程式聯立起來($k=1,2,\dots,p$)

$$\begin{cases} \rho_1 = \varphi_1 \rho_0 + \varphi_2 \rho_1 + \cdots + \varphi_p \rho_{p-1} \\ \rho_2 = \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_0 + \cdots + \varphi_p \rho_{p-2} \\ \vdots \\ \rho_p = \varphi_1 \rho_{p-1} + \varphi_2 \rho_{p-2} + \cdots + \varphi_p \rho_0 \end{cases} \quad (2-10)$$

將式(2-10)以矩陣表示

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

則

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

即可得 AR(p)模式中自我迴歸參數 $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p\}$ 的 Yule-Walker 估計值

舉例：

$$(1) \text{ AR}(1) \text{ 模式， } \hat{\varphi}_1 = [1]^{-1} \rho_1 = \rho_1 \quad (2-13)$$

$$(2) \text{ AR}(2) \text{ 模式， } \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_1 \\ \hat{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{解得} \quad \begin{cases} \hat{\varphi}_1 = \frac{\rho_1(1-\rho_2)}{1-\rho_1^2} \\ \hat{\varphi}_2 = \frac{\rho_2-\rho_1^2}{1-\rho_1^2} \end{cases} \quad (2-14)$$

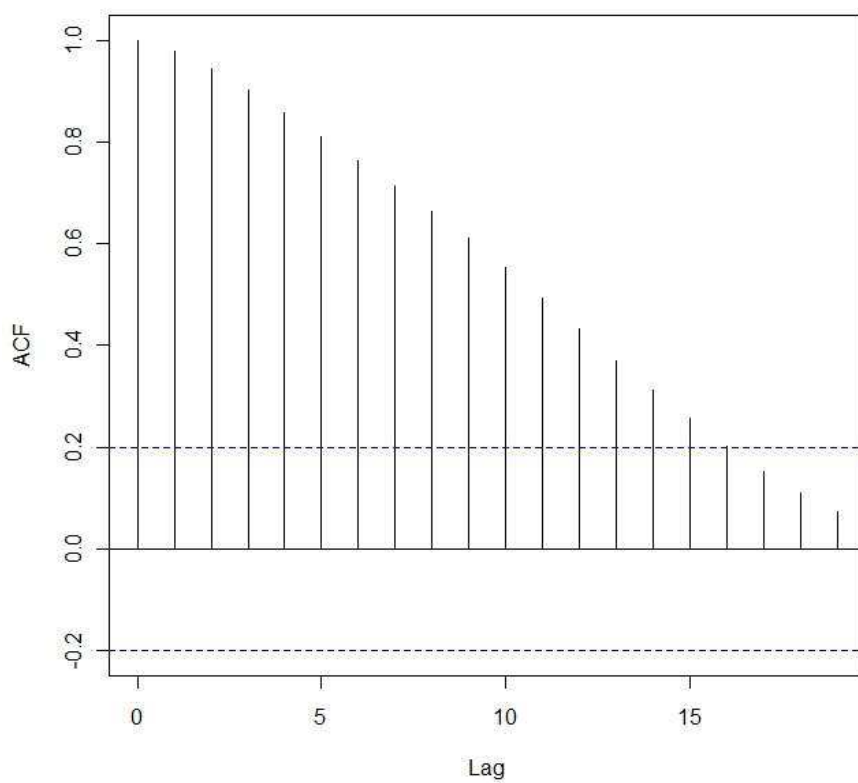


圖 2-1 AR(p)模式之 ACF 結構示意圖

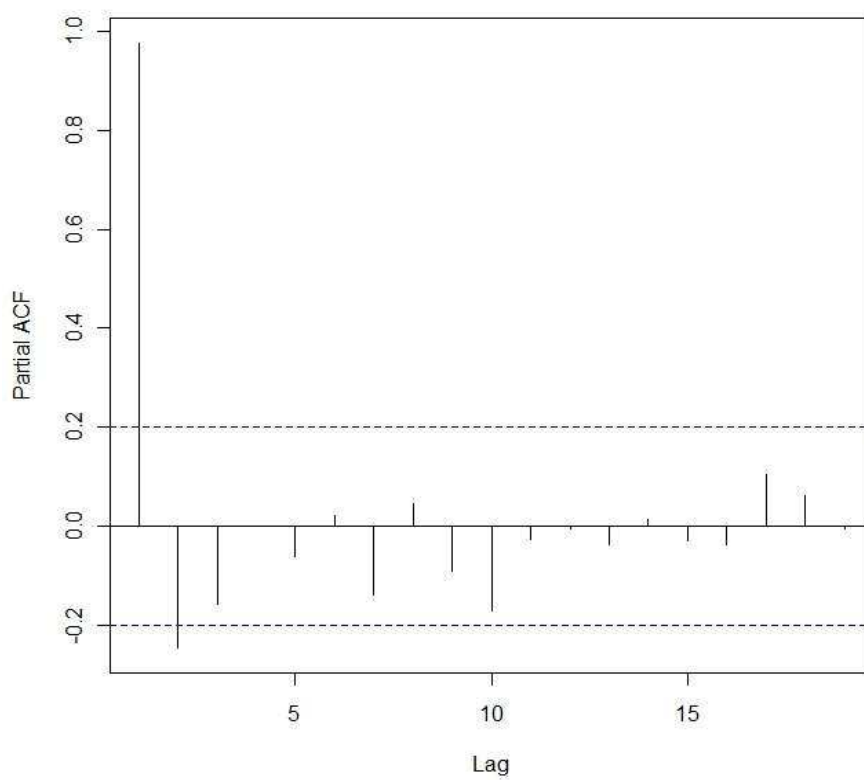


圖 2-2 AR(2)模式之 PACF 結構示意圖

2.2 時間序列模式在流量預報上的應用與表現

颱風、豪雨的流量時間序列，大部分都具有自我相關性高和持續性高的特性，所以用自我迴歸過程都可將其描述得不錯，也可以有效的預測未來值，因此本研究以 AR(2)模式做為主要的即時預報模式之一，而在國內已有許多時間序列模式在流量預報方面的應用，如：

1. 陳昶憲等於 1994 年使用自迴歸整合移動平均模式(ARIMA)及轉換噪音模式(TFN)，建立八掌溪流域之洪水預測模式，其平均效率係數(CE)均高達 93%以上，顯示模式預報具有一定可靠度。
2. 游保杉等於 1994 年以自迴歸模式(AR)作為八掌溪即時河川流量預報模式。
3. 虞國興等於 1999 年以自迴歸模式(AR)、非線性常態模式(RCA)、部分自迴歸模式(SAR)和非常態模式分析與預測高屏溪流域之流量。
4. 陳伶姮於 2000 年以自迴歸模式(AR)和自迴歸移動平模式(ARMA)預測石門水庫的入流量，建議採用 AR(1)模式來預測入流量的趨勢，但極端值的預報上則表現不佳，須利用其他理論輔助修正。
5. 陳昶憲等於 2003 年使用自迴歸移動平模式(ARMA)、轉換噪音模式(TFN)和灰色模型 GM(1,1)，建立烏溪大肚橋流量測站的預測模式，研究顯示以 AMRA 模式之預測能力最佳。

綜合以上論述，以時間序列模式作為流量預報模式所得之預報值，皆能達到一定的準確度，但仔細評估各個研究之時間序列模式的預報結果，就會發現時間序列模式存在一個共同的問題，那就是預報延遲。有些研究在評估的指標上只用相關係數(r)、效率係數(CE)和均方根差(RMSE)，或者是計算洪峰誤差(EQ_p)，這些評估指標都無法反應預報延遲的問題，因為即使預報延遲這些評估指標值也可以相當的好，但如果從持續係數(CP)來看，就可以很明顯看出預報延遲的問題。

以時間序列模式做預報所得之相關係數(r)和效率係數(CE)大部分皆可達 0.8 以上，洪峰誤差(EQ_p)也都很小，但是持續係數值大部分卻落在 0.1~0.3 之間，高一

點只達 0.5，會有明顯的落差是因為預報延遲的問題只會影響持續係數(CP)的好壞，對於相關係數(r)、效率係數(CE)等等，並無顯著影響。

2.2.1 時間序列模式的預報延遲問題

預報延遲問題如圖 2-3 所示，可看出預測之流量歷線就好像實測之流量歷線往後平移一個時刻，代表當前時刻的預報值與前一時刻的觀測值相近，這也是相關係數、效率係數高，可是持續係數低的原因，因為持續係數是預報值與前一時刻的觀測值相比較，而預報值與前一時刻的觀測值相近就代表兩者之間並無明顯差異，自然持續係數就不高。整體而言，雖然時間序列模式可以偵測到整個事件的流量趨勢，但是在反應即時流量趨勢的能力，還是明顯不足。

預報延遲問題除了造成持續係數較低外，也會使得在峰值時刻的預報值有明顯低估的情形，這是因為要等到峰值發生後，模式才會偵測到這個上升趨勢，因此會晚一個時刻才達到峰值，也就造成了峰值時刻的預報誤差。峰值預報的準確度對於整個即時預報而言，是很重要的一環，因為尖峰流量發生的時間點與大小，往往會影響因應對策的決定，像是對於水庫而言，就要決定什麼時間點要放流，還有放流的多寡，因此對於即時流量預報而言，預報延遲問題是一個重要且必須被改善的問題。

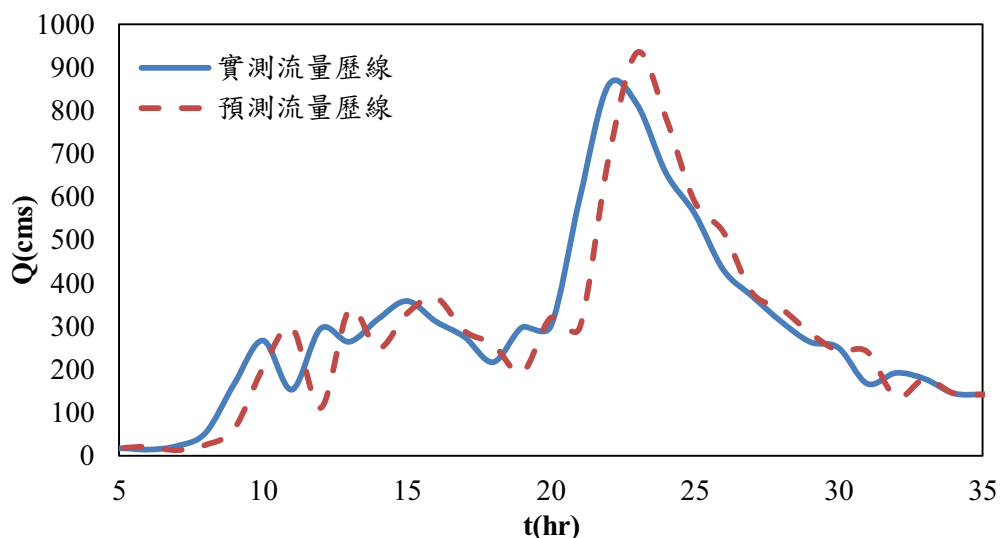


圖 2-3 預報延遲示意圖

2.2.2 預報延遲問題的修正

預報延遲問題的產生是由於時間序列模式的架構限制。時間序列模式主要是以過去時刻的觀測值，來推估當前時刻的預報值，以自迴歸流量即時預報模式AR(2)為例，是用前兩個時刻的觀測流量值，來預測當前時刻的流量值，所以模式能偵測到的趨勢往往只有前兩個小時的流量趨勢，但實際上流量的趨勢並不會在每個時刻都一樣，而是會隨著時間不斷改變，可是當前的流量趨勢要到下個時刻模式才會反應，因此自然而然會發生預報延遲的現象。

在修正預報延遲方面，國內外也有少數相關的研究文獻，不過主要都是加入雨量資料，並應用類神經網路的理論進行模式的修正，像是鍾侑達等以調適性類神經模糊理論系統(Adaptive-Network Based Fuzzy Inference system, ANFIS)修正水位預報的一階延遲現象，在研究中發現直接以雨量直接修正的準確性不佳，但是藉由雨量變化趨勢取得水位變化趨勢，來修正預報值便可得到較準確與穩健的結果。

考慮到物理機制，流量與雨量有很明顯的正相關，當雨水落至地面匯集至河道即變成流量，因此流量歷線的起伏形式與雨量組體圖的起伏形式有一定程度的類似，但如果用雨量資料進行預報值的修正，的確還是會有準確性不佳的問題，因為降雨會有入滲損失，逕流也可能有滯蓄現象，所以降雨並不一定完全轉換為逕流。為了排除可能的擾動因素，可以單純的從雨量變化趨勢和流量變化趨勢之間的關係作探討，因此本研究試法找出雨量變化(ΔR)和流量變化(ΔQ)之間的關係，便藉此改善時間序列模式在即時流量預報的表現和峰值預報的準確度。

2.3 模式評估指標

本研究採用 5 個評估指標對於各模式預報結果進行評估，分別介紹如下：

(1) 相關係數(Correlation Coefficient, r)

$$r(Q_t, \hat{Q}_t) = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})(\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})^2}}$$
$$-1 \leq r \leq 1 \quad (2-15)$$

$\bar{Q}$ = 觀測流量值的平均值, $\bar{\hat{Q}}$ = 預報流量值的平均值

相關係數主要是看預測序列和實測序列之間的線性相關程度，值越接近 0 代表線性相關程度越小，其正副代表正相關與負相關。

(2) 均方根誤差(Root-mean-squared error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2}$$
$$0 \leq RMSE < \infty \quad (2-16)$$

均方根誤差主要是探討觀測值與預報值之平均誤差，值越小代表預報值越接近觀測值。

(3) 峰值時刻的預報誤差(Error of prediction on peak time, EPT_p)

$$EPT_p = \frac{Q_{t_p} - \hat{Q}_{t_p}}{Q_{t_p}} \times 100\%$$
$$-\infty < EPT_p < \infty \quad (2-17)$$

Q_{t_p} = 流量序列的流量峰值, $\hat{Q}_{t_p}$ = 在流量峰值發生時刻的預報值

峰值時刻的預報誤差是指在觀測值之峰值時刻，觀測值與預報值的百分誤差。會選擇此評估指標，而不看觀測值峰值和預報值峰值之間的誤差是因為當預報延遲問題發生時，預報值之峰值與觀測值之峰值可能差異不大，但在觀測值峰值時刻的預報值卻會有明顯低估的情形，因此才選擇峰值時刻的預報誤差作為評估指

標之一。

(4) 效率係數(Coefficient of efficiency, CE)

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}$$
$$-\infty < CE \leq 1 \quad (2-18)$$

$\bar{Q}$ = 觀測流量值的平均值

效率係數是比較以序列平均流量作預報值和模式預報值之間的優劣，值越接近 1，代表模式的預報值比以平均流量作預報值表現更好，反之則代表以平均流量作為預報值會得到更好的預報結果。

(5) 持續係數(Coefficient of persistence, CP)

$$CP = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t-k})^2}$$
$$-\infty < CP \leq 1 \quad (2-19)$$

Q_{t-k} = 在 $t - k$ 時刻的觀測流量

持續係數是比較以 $t-k$ 時刻的觀測值作預報值和模式預報值之間的優劣，值越接近 1，代表模式的預報值比以 $t-k$ 時刻的觀測值作預報值表現更好。當 $k=1$ 時，即可視為預報模式與 Naïve 模式之間的比較，因為 Naïve 模式即是用前一時刻的觀測值作為當下時刻預報值的模式，因此在 $k=1$ 時，Naïve 模式的 CP 值為 0。在本研究裡，都取 $k=1$ 的 CP 值進行預報評估。

對於自我相關性高的時間序列，CP 值會是比較客觀的模式評估指標，因為自我相關性高的時間序列像是流量序列，若以時間序列模式做預報，CE 值和 r 值都可以達 0.8 以上，但是 CP 值卻不高甚至是負的，那用 Naïve 模式做預報其實就可以達到同樣的預報準確度，而 Naïve 模式為最簡單的流量預報模式，如果所建立的預報模式無法比 Naïve 模式還要好，那就代表所建立的預報模式沒有實質上的意義，因此本研究會用上述之評估指標以 Naïve 模式做基準，進行其他即時預報模式的比較和評估。

第三章 研究區域概況與資料整理和計算

3.1 曾文水庫集水區概況

曾文水庫集水區為曾文溪流域最上游之集水區。曾文溪發源自阿里山山脈，標高約為 2609 m，流經嘉義縣阿里山鄉、番路鄉、大埔鄉及高雄縣那瑪夏鄉，再流入曾文水庫。曾文水庫集水區全部位於嘉義縣境內，集水區面積為 479 km²，平均標高為 963 m，年平均降雨量為 2915.8 mm，河床坡降甚陡，溪流平均坡降達 1/65，主流曾文溪貫穿其中央，壩址之平均流量為每秒 37.8m³/s。曾文水庫位於嘉義縣大埔鄉曾文溪主流上游，為全台灣容量最大之水庫，主要為提供嘉南地區耕地灌溉用水，也兼具發電、防洪和觀光等功能，對於南部地區水資源供給有重大影響。

位於本流域中之流量站(曾文水庫)及雨量站分別屬於南部水資源管理局與第六河川局，其資料、位置如表 3-1、表 3-2、圖 3-1 所示。

3.2 赤蘭溪流域概況

赤蘭溪流域是八掌溪流域的子流域，為八掌溪主要支流之一，發源於嘉義縣中埔鄉與番路鄉交界中崙山，標高為 1285 m 其上游有澗水溪和石弄溪兩條支流匯入。流域北邊為八掌溪主流，東邊為曾文溪流域，南邊是急水溪流域，往西於水上鄉忠和村中庄附近注入八掌溪。赤蘭溪流域面積共約為 110.01km²，溪流長度約 19.16 km，河床平均坡降約為 1/60，流域土地主要以農業使用為主。

赤蘭溪流域內僅有 1 個流量測站(常盤橋)，和 3 個雨量站，分別屬水利署和中央氣象局所管轄，其流域地理位址，流量站和雨量站資料如表 3-3、3-4、圖 3-2 所示。

表 3-1 曾文水庫集水區雨量站資料概況

曾文水庫集水區雨量站						
來源站號	站名	流域	河流	管理單位	記錄年份	統計年數
01L430	大埔	曾文溪	大埔溪	第六河川局	1961~1982	22
01M200	達邦	曾文溪	大埔溪	第六河川局	1960~1967, 1969~1975, 1977~1982	21
H1M220	里佳	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1M230	水山	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1M240	樂野	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1M250	馬頭山	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1M420	三角南山	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1M430	龍美	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1O940	大棟山	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24
H1P970	表湖	曾文溪	大埔溪	南部資源管理局	1987~2010	24

表 3-2 曾文水庫入流量資料概況

曾文水庫集水區流量站(曾文水庫)				
來源站號	站名	流域	河流	管理單位
		曾文溪	大埔溪	南部資源管理局
				記錄年份
				2002~2010
				統計年數
				9

曾文水庫集水區

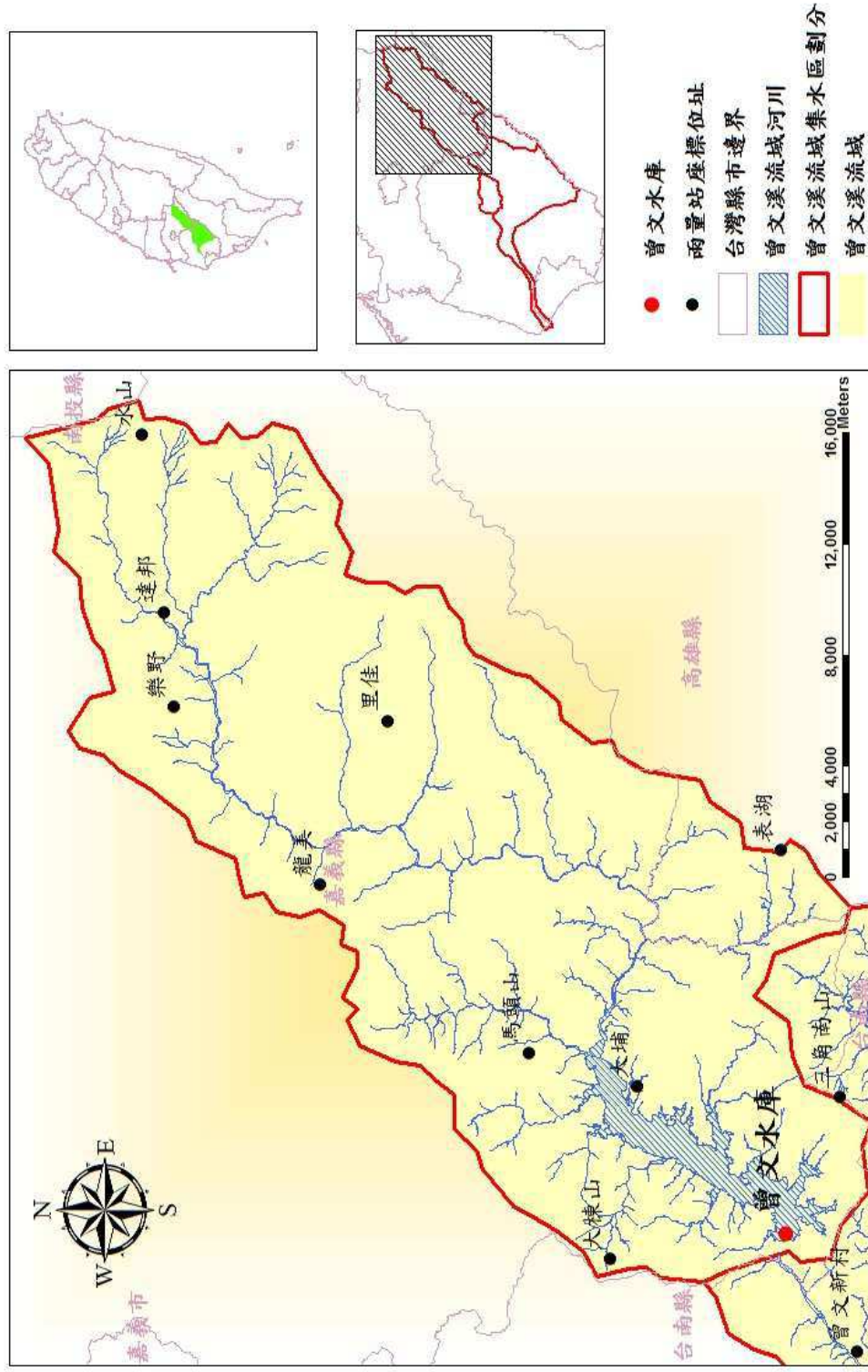


圖 3-1 曾文水庫集水區地理位置

表 3-3 赤蘭溪流域雨量站資料概況

赤蘭溪流域雨量站						
站號	站名	流域	河流	管理單位	記錄年份	統計年數
C1M540	小公田	八掌溪	澗水溪	中央氣象局	1993~2011	19
C1M550	中埔	八掌溪	澗水溪	中央氣象局	1997~2011	15
C1M600	頭凍	八掌溪	赤蘭溪	中央氣象局	1993~2011	19

表 3-4 赤蘭溪流域流量站資料概況

赤蘭溪流域流量站						
站號	站名	流域	河流	管理單位	記錄年份	統計年數
1580H008	常盤橋	八掌溪	赤蘭溪	水利署	1972~1996,2000~2001,2003~2008	33

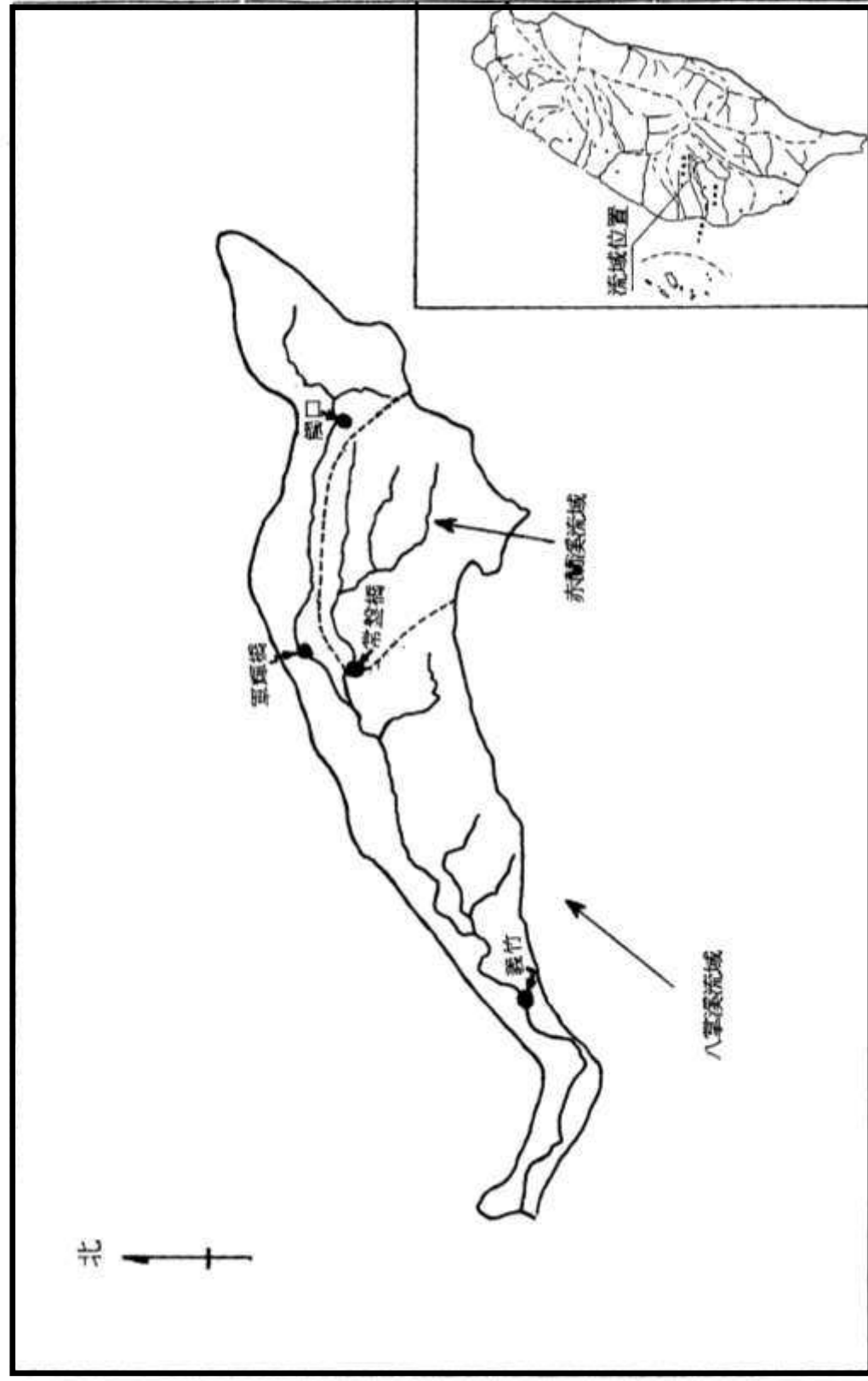


圖 3-2 赤蘭溪流域地理位置示意圖(資料來源：赤蘭溪淹水模式之研究)

3.3 資料整理和計算

本研究主要內容為針對颱風、豪雨事件，以自我回歸模式進行流量的時預報，並以雨量資料修正自我回歸模式的預報值，以提升預報值的準確度，因此所需的資料有：(一) 研究區域雨量測站的時雨量資料；(二) 研究區域流量站暴雨事件的時流量資料，分別對於兩個流域進行資料蒐集整理，詳細整理結果如下：

(一) 時雨量資料：

在曾文水庫集水區的時雨量方面，為搭配曾文水庫入流量的記錄年限(2002~2010)，因此不選用大埔和達邦這兩個測站。利用所選用的八個測站：里佳、水山、樂野、馬頭山、三角南山、龍美、大棟山以及表湖的時雨量資料，以徐昇式多邊形法求得曾文水庫集水區之平均時雨量，再對照曾文水庫所記錄的颱風豪雨事件之時間，切出所對應的降雨事件。雨量站權重面積和權重因子計算結果如表 3-5、圖 3-3。

赤蘭溪流域的雨量站共有三個分別為小公田、中埔和頭凍，用這三個測站的時雨量資料，以徐昇式多邊形法求得赤蘭溪流域之平均時雨量，並針對 7、8、9、10 月，將降雨延時超過 24 小時的颱風、豪雨事件切割出來。雨量站權重面積和權重因子計算如表 3-6、圖 3-4。

(二) 時流量資料：

曾文水庫集水區的時流量資料為曾文水庫管理局針對颱風豪雨事件所記錄，記錄年限為 2002~2010 年，共 23 場事件。

赤蘭溪流域的流量站只有常盤橋一站，因此只採用常盤橋流量站的時流量資料。對照時雨量資料所切割出來事件之時間，也將同樣時間的流量序列切割出來，共 28 場事件。

考量降雨、流量序列的完整性和合理性，曾文水庫集水區和赤蘭溪流域分別挑出 15 個事件和 12 個事件，並分別給予事件代號，事件代號與事件起訖時間之對應，如附錄表 A1.和表 A2.所示。

3.3.1 流量資料的鑑定

計算各事件流量序列之 PACF 值，由附錄圖 A1.和 A2.可看出，大部分的流量事件之 PACF 值在第二期之後有明顯截斷，以曾文水庫集水區而言，共有 11 場事件，而赤蘭溪流域則有 10 場事件在第二期之後有明顯截斷形式，顯示對於大部分的颱風、豪雨流量事件，以 AR(2)模式做預報較能符合其資料特性。

對於資料平穩性的判定，先針對每一場流量時間序列，以 Yule-Walker 法推求個別場次的 AR(2)模式參數值 $\hat{\varphi}_1$ 、 $\hat{\varphi}_2$ ，如附錄表 A3.。對照式(2-5)之 AR(2)模式平穩之充要條件，可得知每場事件的 AR(2)模式參數值，皆符合式(2-5)所列的三個條件，代表所用選用的 27 場事件之流量資料皆為穩定的時間序列，可直接應用於時間序列模式，無須再以資料差分方式達到平穩特性。



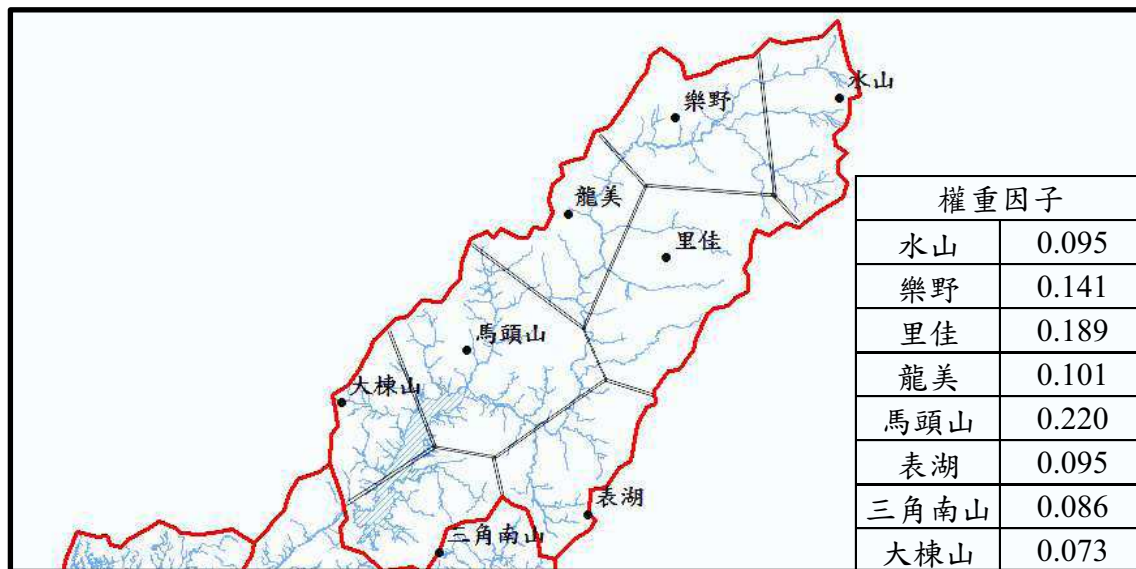


圖 3-3 曾文水庫集水區徐昇式權重面積區塊圖

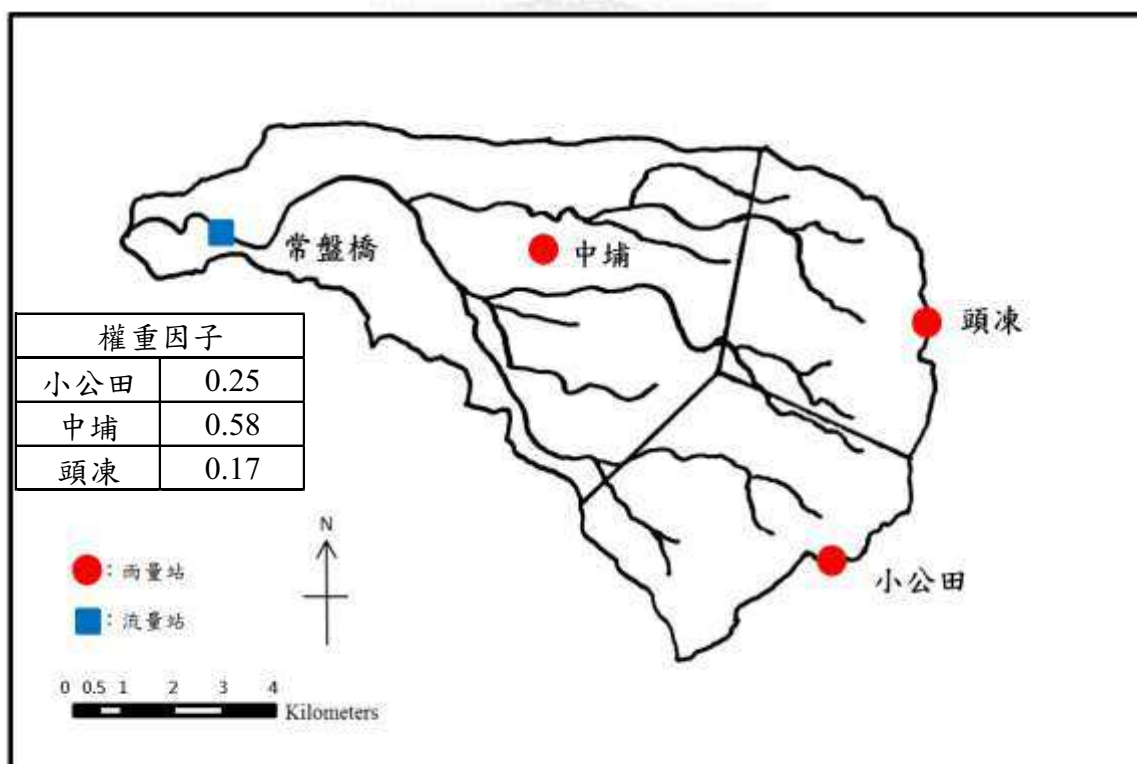


圖 3-4 赤蘭溪流流域徐昇式權重面積區塊圖

第四章 即時預報模式的建立

4.1 事件的分類

為建立即時預報模式和驗證即時預報模式，則必須將資料分成兩組，一組將作為歷史資料(Training data)，用來推估模式參數，以建立預報模式，另一組則需用來作為模式驗證的預報資料(Validation data)。由表 4-1 可知，不同流量事件彼此之間的平均流量大小變異性很高，為避免在做預報驗證時，都選擇相同類型的流量事件去評估，而無法看到整體的預報情況，因此先做流量事件的分類。

以平均流量大小作為基準，將流量事件分成高、中、低三類，每類事件個數相同，舉例來說，曾文水庫集水區共有流量事件 15 場，則取平均流量最高的 5 場作為高流量事件，最低的 5 場作為低流量事件，以此類推，分類結果如表 4-1 所示。針對曾文水庫集水區之事件，隨機選用高流量事件 2 個，中流量事件 2 個，低流量事件 1 個，作為預報驗證事件，其餘 10 場事件串聯成一時間序列，作為歷史資料，用以推估預報模式之參數。而赤蘭溪則是隨機選用各類流量事件各 1 個，作為預報驗證事件，其餘 9 場事件串聯成一時間序列，作為歷史資料，用以推估預報模式之參數。於表 4-1 中，所選用事件之代號以粗體底線標示之。

曾文水庫集水區與赤蘭溪流域事件的逕流歷線圖如圖 4-1、4-2 所示，藍色曲線表示為歷史流量事件，紅色曲線表為預報驗證事件，曾文水庫集水區事件之尖峰流量除了有一場事件超越 11000 cms 外，其餘事件約在 5000~6000 cms 之間，而赤蘭溪流域事件之尖峰流量明顯較低，只介於 400~1000 cms 之間，且與曾文水庫集水區相比，各事件之間之平均流量差也較少，是一個流量變異較小的區域。

表 4-1 研究區域各事件平均流量

曾文水庫集水區			赤蘭溪流域		
事件代號	平均流量(cms)	分類類別	事件代號	平均流量(cms)	分類類別
1	268.77	L	<u>1</u>	332.86	H
2	230.93	L	2	31.45	L
3	340.76	L	3	72.46	L
<u>4</u>	1123.01	M	4	98.76	M
5	1519.73	H	5	31.02	L
6	1386.99	H	6	82.72	M
7	233.25	L	<u>7</u>	144.54	M
<u>8</u>	1607.41	H	<u>8</u>	57.78	L
9	929.00	M	9	226.89	H
10	1206.69	M	10	192.95	H
11	1153.62	M	11	156.05	M
<u>12</u>	1736.67	H	12	237.28	H
<u>13</u>	1044.52	M	L：低流量 M：中流量 H：高流量		
14	2313.42	H			
<u>15</u>	622.48	L			
L：低流量 M：中流量 H：高流量					

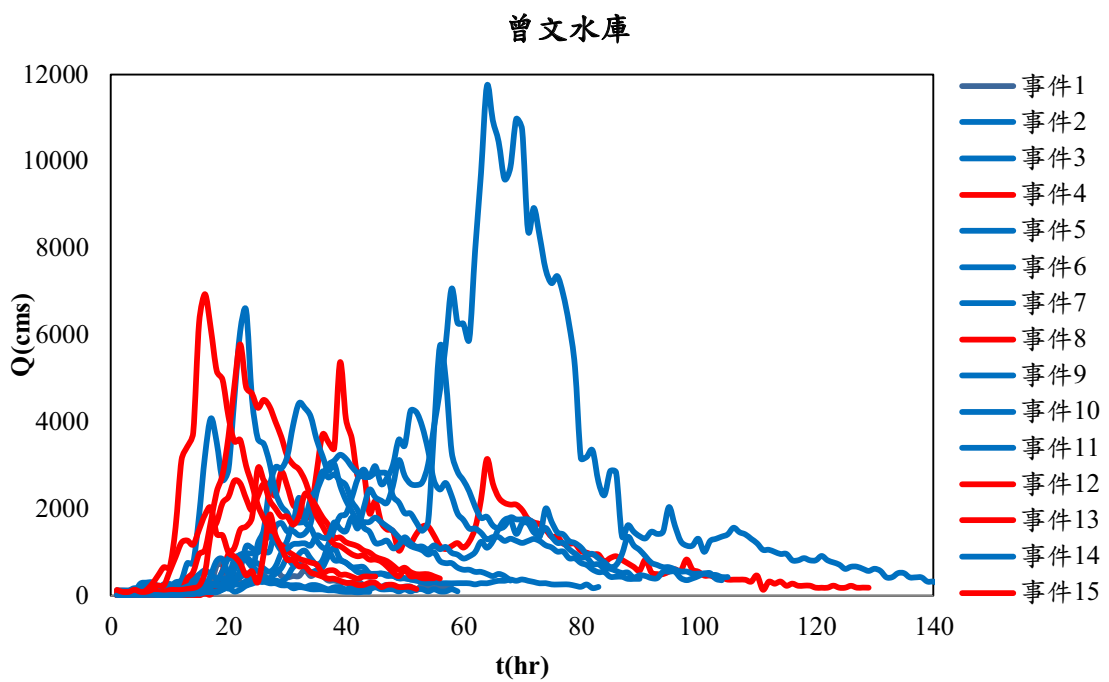


圖 4-1 曾文水庫集水區事件之逕流歷線圖

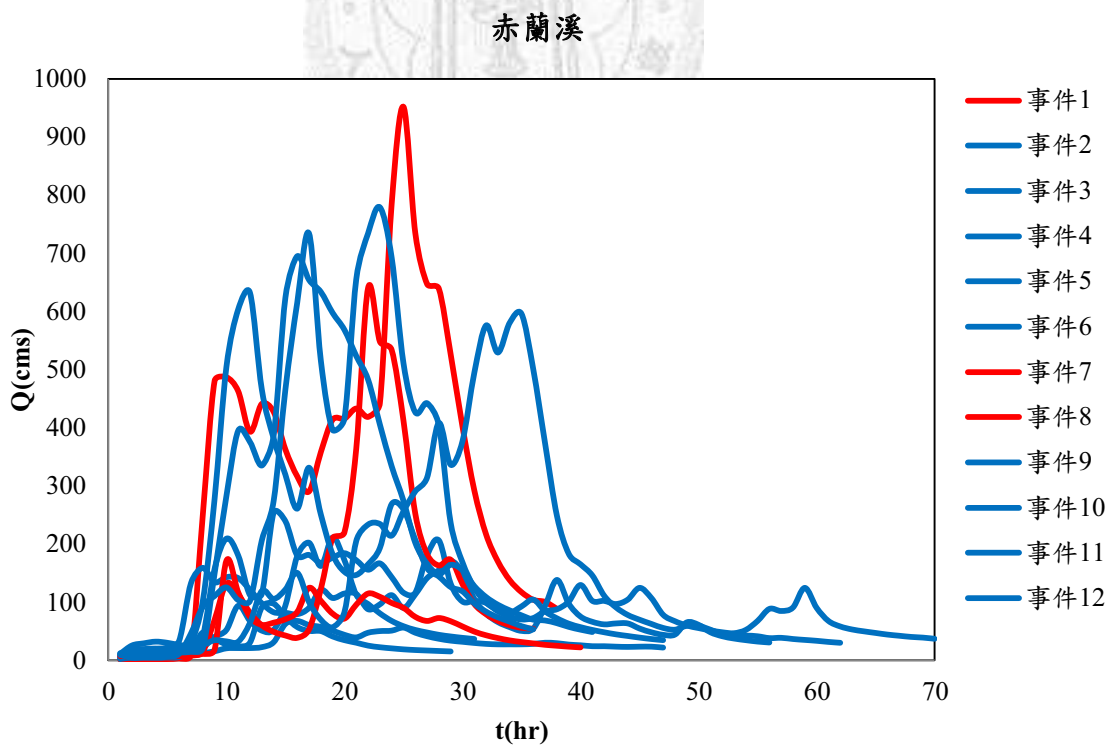


圖 4-2 赤蘭溪流域事件之逕流歷線圖

4.2 Naïve 模式的建立

Naïve 模式可視為 $p=1$ 的自我迴歸模式，即為 AR(1)模式：

$$Q_t = \varphi_1 Q_{t-1} + a_t \quad (4-1)$$

其模式參數 φ_1 固定為 1，因此屬於 AR(1)模式中的特例，又稱隨機漫步模式。隨機漫步模式特性為資料之變異數會隨著時間 t 成正比，而不為常數，所以不符合穩定之條件，為非平穩序列。

在模式應用上，雖然 Naïve 模式為非平穩模式，但在實際預報時並不會考慮噪音擾動項，因此模式就可改寫為如式(4-2)

$$\hat{Q}_t = Q_{t-1} \quad (4-2)$$

在 t 時刻的預報值，即為 $t-1$ 時刻的觀測值，時間序列資料自我相關性越高，以此模式預報的結果就會越好，而此模式的 r 值就為資料序列之一階自我相關係數值，CP 值在 $k=1$ 時恆為 0。因為 Naïve 模式架構簡單，並無參數推估，輸入的變數也少，再加上在預報上能達一定準確度，因此常用於與其他預報模式做比較，若是預報模式表現得並沒有比 Naïve 模式好，就可以判定此模式預報能力不佳。本研究也會以 Naïve 模式做為比較的基準，對其餘模式進行比較和評估。

4.3 AR(2) 模式的建立

分別計算曾文水庫集水區和赤蘭溪流域的 AR(2) 模式參數 $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2$ ，由式(2-14)可得知

$$\begin{cases} \hat{\varphi}_1 = \frac{\rho_1(1 - \rho_2)}{1 - \rho_1^2} \\ \hat{\varphi}_2 = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} \end{cases}$$

經由計算可得，曾文水庫集水區 AR(2) 模式之 $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2$

$$\hat{\varphi}_1 = 1.33, \hat{\varphi}_2 = -0.35$$

代入 AR(2) 模式，即可得曾文水庫集水區的 AR(2) 預報模式

$$\hat{Q}_t = 1.33Q_{t-1} - 0.35Q_{t-2} \quad (4-3)$$

經由計算可得，赤蘭溪流域 AR(2) 模式之 $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2$

$$\hat{\varphi}_1 = 1.33, \hat{\varphi}_2 = -0.35$$

代入 AR(2) 模式，即可得赤蘭溪流域的 AR(2) 預報模式

$$\hat{Q}_t = 1.44Q_{t-1} - 0.48Q_{t-2} \quad (4-4)$$

在先前章節有提到以 AR(2) 模式常會有預報延遲的問題，因此必須考量用雨量資料進行預報值的改善。

4.4 考量 rain-burst 的 AR(2)模式

預報延遲的問題，在第二章已經闡述過，當流量在短時間大幅增加時，預報模式無法及時反應趨勢，此問題就會更加明顯，而流量大幅增加的時間點往往都是達到峰值的時刻，因此就會產生顯著的峰值預報誤差。

流量增加主要是由於雨量增加的緣故，加上降雨匯集至河流需要一段時間，因此便可提前知道流量增加之趨勢，可藉此特性找出雨量增加量(ΔR)和流量增加量(ΔQ)之間的關係式，並定義一個雨量增加量的門檻值，當雨量增加量超過此門檻值，就進行流量預報值的修正。考量 rain-burst 的 AR(2)模式如式(4-5)

$$\hat{Q}_t = \hat{\varphi}_1 Q_{t-1} + \hat{\varphi}_2 Q_{t-2} + \Delta \hat{Q}_t \cdot I_{[rain-burst, \infty)} \quad (4-5)$$

I : Indicator variable

4.4.1 雨量增加量與流量增加量關係式的建立

先針對兩個研究區域定義各自的雨量增加量門檻值，考量曾文水庫集水區流域面積較大，因此將雨量增加量(ΔR)門檻值定為 13 mm，而赤蘭溪流域之雨量增加量(ΔR)門檻值則定為 10 mm。

ΔR 和 ΔQ 定義為前後兩小時的雨量差與流量差，即為：

$$\begin{cases} \Delta R_t = R_t - R_{t-1} \\ \Delta Q_t = Q_t - Q_{t-1} \end{cases} \quad t = 2, 3 \dots n \quad (4-6)$$

R_t = 在 t 時刻的雨量觀測值

Q_t = 在 t 時刻的流量觀測值

針對各自流域之事件，找出大於所定義門檻值的雨量增加量和其對應之流量增加量，並繪製散布圖，如圖 4-3、圖 4-4。由圖 4-3 和圖 4-4 可看出當雨量增加量高到一定程度時，流量增加量便會大幅增加，所以兩者並不為線性關係，在本研究裡以二次多項式做為兩者關係式之方程式進行套配，並設定在雨量增加量門檻值之位置截距為 0，套配結果如式(4-7)、式(4-8)：

$$\text{曾文：}\Delta\hat{Q} = 3.7935(\Delta R - 13)^2 + 73.837(\Delta R - 13) \text{ when } \Delta R > 13\text{mm} \quad (4-7)$$

$$\text{赤蘭：}\Delta\hat{Q} = 0.2379(\Delta R - 10)^2 + 18.521(\Delta R - 10) \text{ when } \Delta R > 10\text{mm} \quad (4-8)$$

套配出雨量增加量和流量增加量的關係式後，還需知道雨量增加量反應為流量增加量的時間差，才能知道修正流量的確切時刻，因此必須做反應時間的探討。

4.4.2 反應時間的估算

在建立好雨量增加量和流量增加量之間的關係後，必須知道降雨匯集至河流的反應時間，對於同流域訂定一個統一的標準，才能知道在何時需要進行流量預報值得修正。本研究是以雨量增加量與流量增加量在不同延遲時間的相關係數做比較，取相關係數最大的延遲時間為反應時間。

若有一組長度為 n 的時流量資料和時雨量資料分別為

$$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, \dots, Q_{n-2}, Q_{n-1}, Q_n$$

$$R_1, R_2, R_3, R_4, \dots, R_{n-2}, R_{n-1}, R_n$$

則流量差資料與雨量差資料則為

$$\begin{array}{ll} \Delta Q_1 = Q_2 - Q_1 & \Delta R_1 = R_2 - R_1 \\ \Delta Q_2 = Q_3 - Q_2 & \Delta R_1 = R_3 - R_2 \\ \Delta Q_3 = Q_4 - Q_3 & \Delta R_1 = R_4 - R_3 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta Q_{n-2} = Q_{n-1} - Q_{n-2} & \Delta R_{n-2} = R_{n-1} - R_{n-2} \\ \Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1} & \Delta R_{n-1} = R_n - R_{n-1} \end{array}$$

雨量差和流量差在延遲時間 t 的相關係數即為

$$\text{Correlation Coefficient, } r(\Delta R_k, \Delta Q_{k+t}) \quad k=1,2,3,\dots,n-(t+2),n-(t+1)$$

計算結果如表 4-2

表 4-2 各流域之雨量差和流量差在延遲時間 t 的相關係數

曾文水庫集水區		赤蘭溪流域	
延遲時間(hr)	相關係數	延遲時間(hr)	相關係數
0	0.2883	0	-0.1422
1	0.3976	1	0.1774
2	0.1300	2	0.5526
3	0.0379	3	0.1749

由表 4-2 可知曾文水庫集水區在延遲時間 1 小時之相關係數最高，因此反應時間定為 1 小時，而赤蘭溪流域反應時間為 2 小時，因此兩研究區域的雨量增加量和流量增加量之關係式就可分別表示為：

$$\begin{cases} \Delta\hat{Q}_t = 3.7935(\Delta R_{t-1} - 13)^2 + 73.837(\Delta R_{t-1} - 13) & \text{when } \Delta R_{t-1} > 13\text{mm} \\ \Delta\hat{Q}_t = 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4-9)$$

$$\begin{cases} \Delta\hat{Q}_t = 0.2379(\Delta R_{t-2} - 10)^2 + 18.521(\Delta R_{t-2} - 10) & \text{when } \Delta R_{t-2} > 10\text{mm} \\ \Delta\hat{Q}_t = 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4-10)$$

在模式應用上以曾文水庫集水區為例，若在 t-1 時刻的雨量增加量(ΔR)大於 13 mm，則必須在 t 時刻修正流量的預報值，修正量 $\Delta\hat{Q}_t$ 則是將雨量增加量(ΔR)代入式 (4-8)所得，最後在 t 時刻的預報值即是 AR(2) 模式在 t 時刻之預報值加上此修正量，其餘未修正時刻之預報值，即還是 AR(2)模式之預報值。

此模式主要是針對流量峰值進行修正，期望藉由修正峰值的預報誤差，提高 CP 值，改善預報延遲的情形。

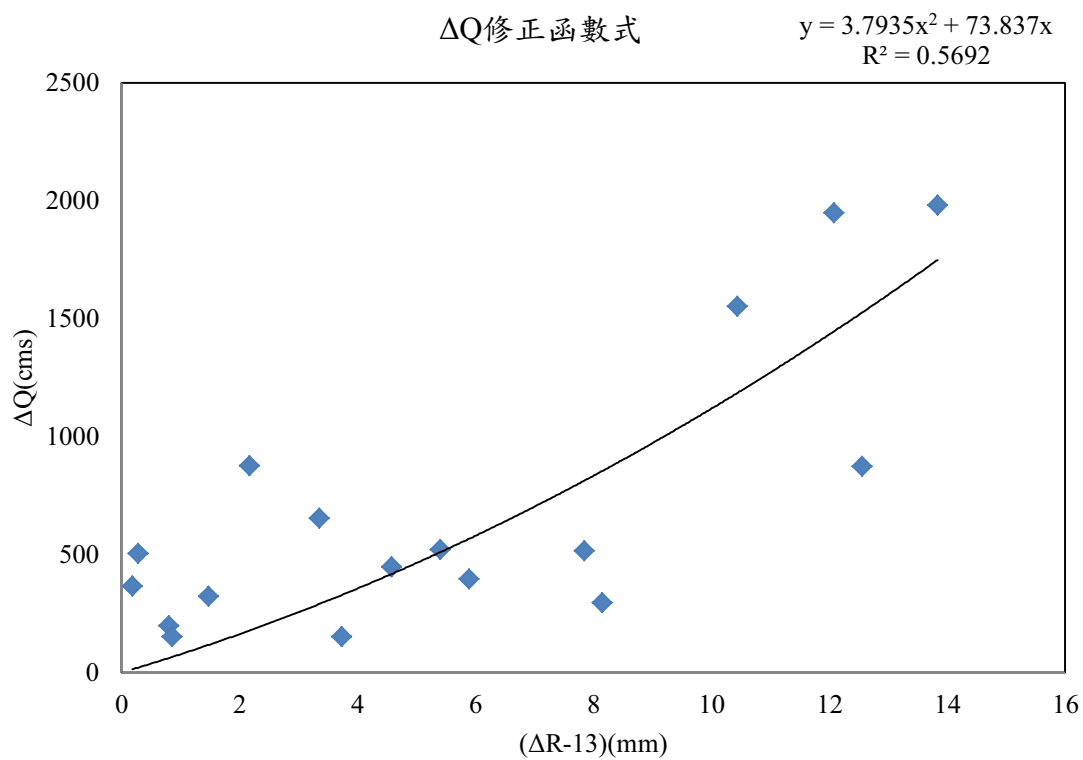


圖 4-3 曾文水庫集水區之雨量增加量與流量增加量關係圖

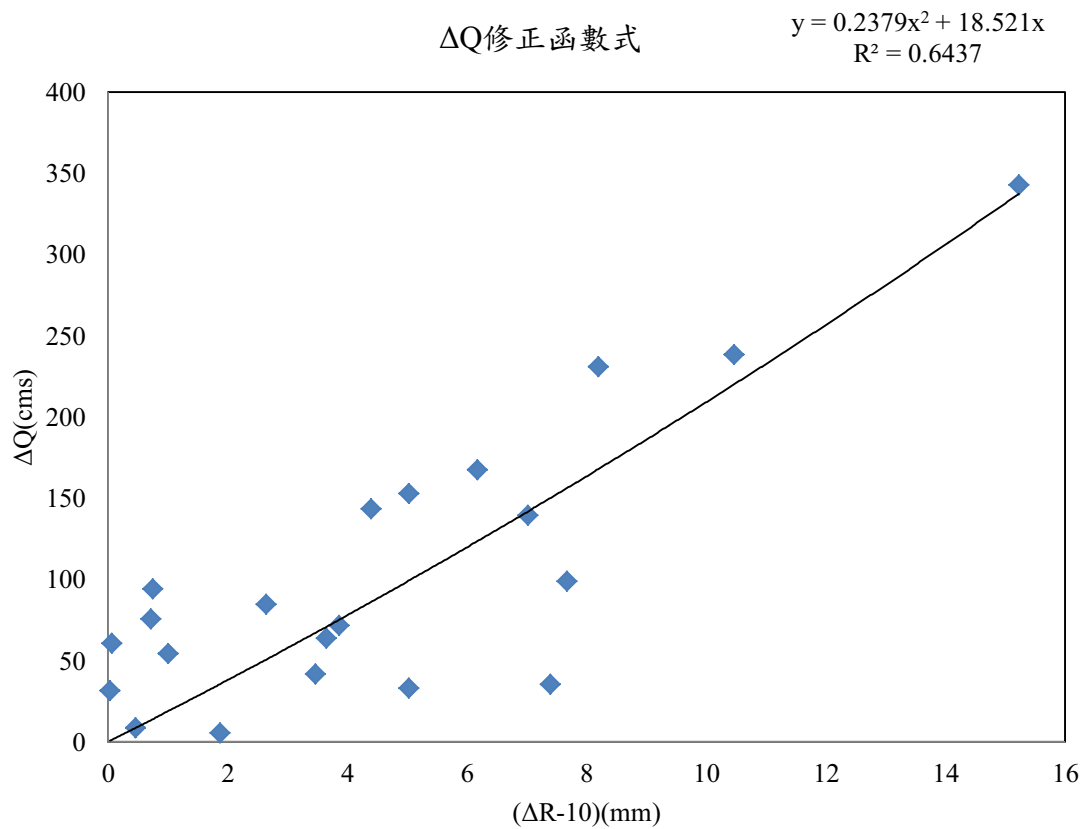


圖 4-4 赤蘭溪流域之雨量增加量與流量增加量關係圖

4.5 反應函數模式的建立

降雨逕流演算中，利用單位歷線的概念，將有效降雨量反應成直接逕流量的系統視為線性系統，每個時刻的直接逕流量都表為前幾個時刻的有效降雨量之線性組合，因此便可利用有效降雨觀測值與直接逕流觀測值，推求出單位歷線，再利用單位歷線建立雨量與流量之間的關係式。計算方式如下：

設 $R_1, R_2, R_3, \dots, R_{n-2}, R_{n-1}, R_n$ R_n 為每一延時 T 有效雨量之大小

$U_1, U_2, U_3, \dots, U_{m-2}, U_{m-1}$ U_m 為有效雨量延時 T 時單位歷線之大小

$Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_{n+m-2}, Q_{n+m-1}$ Q_{n+m-1} 為直接逕流之大小

則 $Q_1 = R_1 U_1$

$$Q_2 = R_1 U_2 + R_2 U_1$$

$$Q_3 = R_1 U_3 + R_2 U_2 + R_3 U_1$$

$\vdots$

$$Q_{n+m-2} = R_{n-1} U_{m-1} + R_n U_{m-2}$$

$$Q_{n+m-1} = R_n U_{m-1}$$

以矩陣表示

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_{n+m-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ R_2 & R_1 & 0 & \dots & 0 \\ R_3 & R_2 & R_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_n & R_{n-1} & \dots & R_2 R_1 & \dots & 0 \\ \vdots & R_n & R_{n-1} & \dots & R_2 R_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & R_n R_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_{m-1} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

將上述矩陣簡寫為：

$$[Q] = [R][U] \quad (4-12)$$

則

$$[U] = ([R]^T[R])^{-1}[R]^T[Q] \quad (4-13)$$

由式(4-13)解得 U 值，因此在 t 時刻的流量值與 t+1 時刻的流量值就可表為：

$$Q_t = R_t U_1 + R_{t-1} U_2 + R_{t-2} U_3 + \cdots + R_{t-m+2} U_{m-1} \quad (4-14)$$

$$Q_{t+1} = R_{t+1} U_1 + R_t U_2 + R_{t-1} U_3 + \cdots + R_{t-m+3} U_{m-1} \quad (4-15)$$

式(4-15)-式(4-14)

$$Q_{t+1} - Q_t = (R_{t+1} - R_t) U_1 + (R_t - R_{t-1}) U_2 + \cdots + (R_{t-m+3} - R_{t-m+2}) U_{m-1} \quad (4-16)$$

將所定義的式(4-6)代入式(4-16)，則

$$\Delta Q_t = \Delta R_t U_1 + \Delta R_{t-1} U_2 + \cdots + \Delta R_{t-m+2} U_{m-1} \quad (4-17)$$

由式(4-17)可知，若是雨量反應為流量之系統為線性系統，那雨量差(ΔR)反應為流量差(ΔQ)的系統也會具有同樣的性質，因此流量差也可表為雨量差的線性組合，則式(4-11)就可改寫為：

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n+m-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \Delta R_2 & \Delta R_1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \Delta R_3 & \Delta R_2 & \Delta R_1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta R_n & \Delta R_{n-1} & \cdots & \Delta R_2 & \Delta R_1 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \Delta R_n & \Delta R_{n-1} & \cdots & \Delta R_2 & \Delta R_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \Delta R_n & \Delta R_{n-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \Delta R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_{m-1} \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

因此式(4-13)就變為：

$$[U] = ([\Delta R]^T[\Delta R])^{-1}[\Delta R]^T[\Delta Q] \quad (4-19)$$

利用雨量差資料(ΔR)和流量差資料(ΔQ)就可以推求出 U 值，則流量差的線性推估式就可以表示為：

$$\Delta \hat{Q}_t = U_1 \Delta R_t + U_2 \Delta R_{t-1} + \cdots + U_{m-1} \Delta R_{t-m} \quad (4-20)$$

在實際應用上，因為在預報 t+1 時刻之流量時，並沒有 t+1 時刻之雨量值，因此會將 ΔR 舉陣的第一列除了 0 以外的值都令為 1，這樣解出來的 U_1 即為一個常數，因此式(4-20)就變為：

$$\Delta \hat{Q}_t = U_1 + U_2 \Delta R_{t-1} + \cdots + U_{m-1} \Delta R_{t-m} \quad (4-20)$$

反應函數模式就為：

$$\hat{Q}_{t+1} = Q_t + \Delta\hat{Q}_t \quad (4-21)$$

反應函數模式可視為 Naïve 模式和流量差與雨量差之線性反應函數之組合，其同時考量了雨量增加與雨量減少之流量情形，因此是對整體預報延遲效應進行修正，期望可以大幅提升 CP 值，顯著改善預報延遲的問題。

4.5.1 曾文水庫集水區和赤蘭溪流域之反應函數模式的建立

考量雨量與流量的反應時間、資料記錄的時間間隔以及滯洪時間和研究區域之集水區面積，因此曾文水庫集水區之 U 值基期就取為 6，而赤蘭溪流域之 U 值基期取為 5，則雨量差與流量差反應函數式就可分別表為：

$$\text{曾文水庫集水區: } \Delta\hat{Q}_t = U_1 + U_2\Delta R_{t-1} + U_3\Delta R_{t-2} + U_4\Delta R_{t-3} + U_5\Delta R_{t-4} \quad (4-22)$$

$$\text{赤蘭溪流域: } \Delta\hat{Q}_t = U_1 + U_2\Delta R_{t-1} + U_3\Delta R_{t-2} + U_4\Delta R_{t-3} \quad (4-23)$$

將流量差與雨量差資料代入式(4-19)，即可求得 U 值，各式件所求出之 U 值如表 4-4、表 4-5、圖 4-5、圖 4-6 所示，同樣按照章節 4-1 事件分類，對於曾文水庫集水區，將事件 4、事件 8、事件 12、事件 13 和事件 15 作為預報驗證事件，而赤蘭溪流域則是將事件 1、事件 7、事件 8 作為預報驗證事件，其餘事件所得之 U 值取平均，作為反應函數預報模式的 U 值，計算結果如表 4-3，則曾文水庫集水區和赤蘭溪流域的反應函數式就分別為：

$$\Delta\hat{Q}_t = 6.9 + 24.94\Delta R_{t-1} + 11.77\Delta R_{t-2} + 6.43\Delta R_{t-3} + 4.89\Delta R_{t-4} \quad (4-24)$$

$$\Delta\hat{Q}_t = 0.48 + 2.72\Delta R_{t-1} + 6.52\Delta R_{t-2} + 3.37\Delta R_{t-3} \quad (4-25)$$

表 4-3 各研究區域預報模式之反應函數 U 值

研究區域	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
曾文水庫集水區	6.90	24.94	11.77	6.43	4.89
赤蘭溪流域	0.48	2.72	6.52	3.37	

建立好各流域之反應函數式後，便可代入式(4-21)，加上 t 時刻所觀測到的流量值，即是 t+1 時刻的流量預報值

表 4-4 曾文水庫集水區各事件 U 值

曾文水庫集水區					
事件代號	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
1	11.01	12.77	-3.34	4.93	1.53
2	4.96	10.45	4.01	6.25	1.84
3	2.94	9.59	8.29	5.11	1.98
<u>4</u>	4.75	19.86	5.16	13.09	12.66
5	18.71	68.58	12.03	2.36	-2.64
6	6.35	43.15	13.59	-0.62	-1.28
7	-0.78	7.60	7.48	3.81	-1.47
<u>8</u>	6.72	34.56	47.77	34.75	-0.87
9	3.90	13.94	13.23	3.16	15.55
10	9.59	31.73	29.48	11.58	2.21
11	10.05	22.19	12.77	2.75	12.97
<u>12</u>	2.72	21.75	28.88	5.35	23.99
<u>13</u>	11.20	33.39	10.53	1.35	13.43
14	2.25	29.43	20.13	24.95	18.18
<u>15</u>	2.74	24.67	-10.85	11.50	6.64

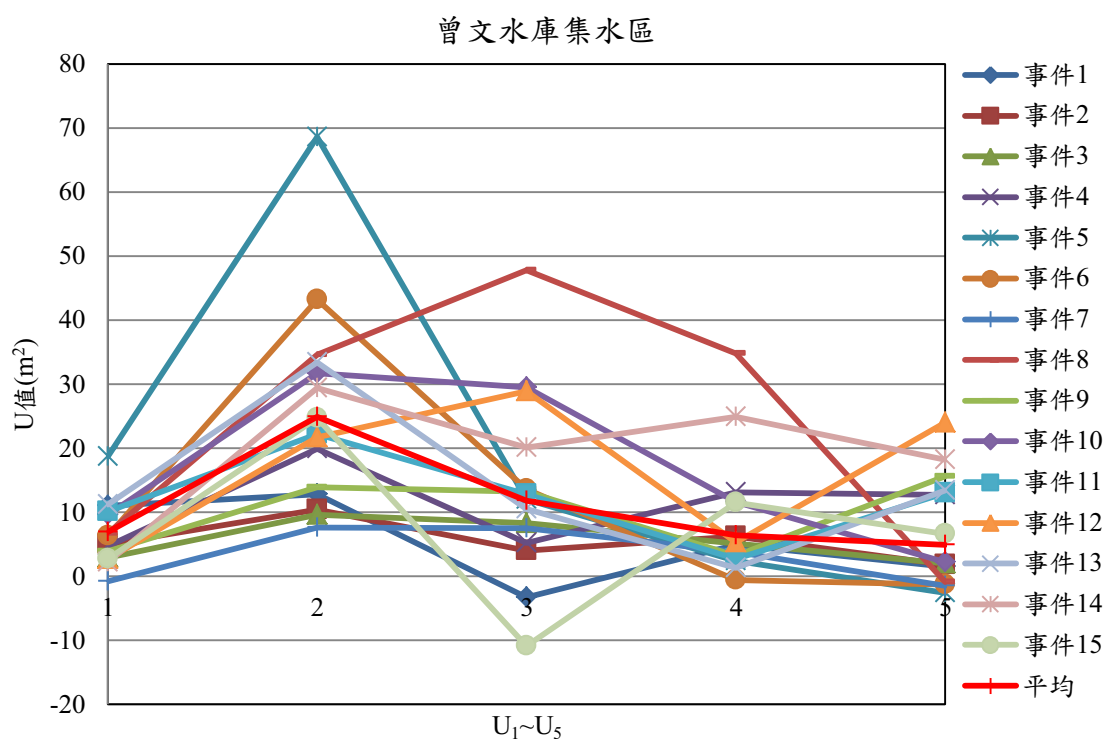


圖 4-5 曾文水庫集水區各事件 U 值

表 4-5 赤蘭溪流域各事件 U 值

赤蘭溪流域				
事件代號	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄
<u>1</u>	0.52	3.34	5.87	2.19
2	0.61	0.03	3.79	2.50
3	0.53	1.33	3.49	2.56
4	0.11	2.05	5.48	2.57
5	0.15	-0.26	1.31	1.49
6	0.34	0.39	3.55	2.59
<u>7</u>	0.38	5.01	5.56	1.88
<u>8</u>	0.48	-1.65	5.03	2.01
9	0.90	11.14	13.59	7.69
10	0.80	3.10	8.39	3.38
11	0.25	2.29	8.75	4.20
12	0.62	4.42	10.34	3.33

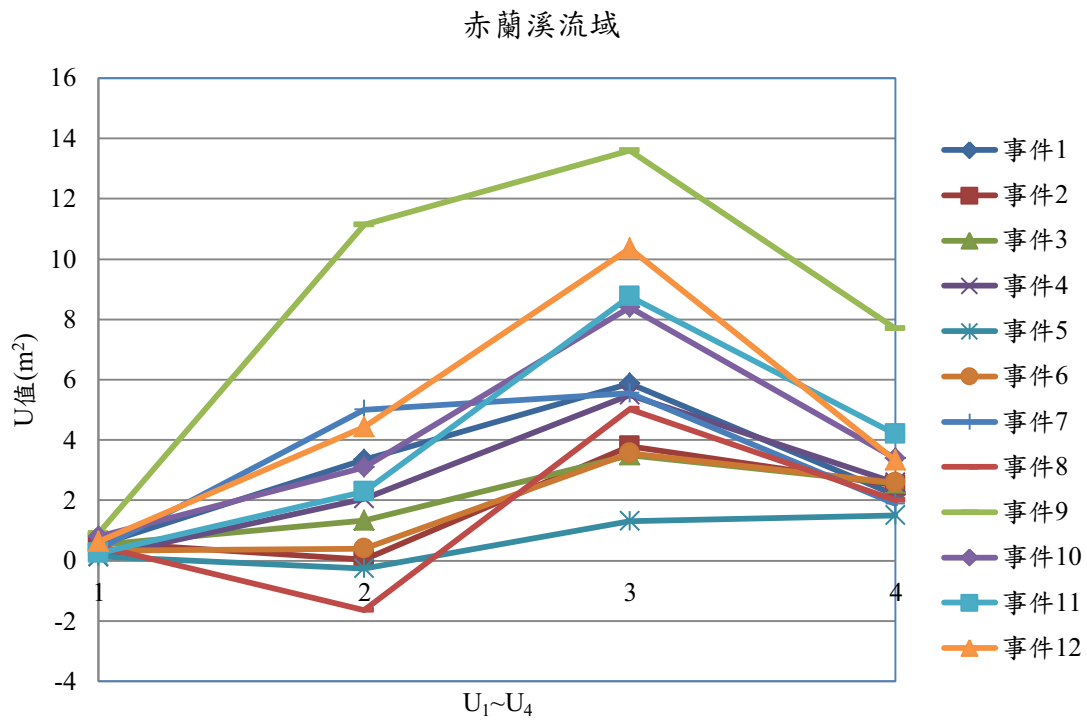


圖 4-6 赤蘭溪流域各事件 U 值

4.5.2 曾文水庫集水區和赤蘭溪流域之調適性反應函數模式的建立

由圖 4-5 和圖 4-6 可看出，對於不同的流量事件其 U_2, U_3, U_4 值變異很大，如果反應函數式之 U 值只以歷史事件各自 U 值之平均，則對於 U 值較高和 U 值較低的事件可能會有較大的誤差，因此考量反應函數模式之 U 值不為一個定值的情況。由圖 4-7 和圖 4-8 可看出 U 值與平均流量有明顯正相關趨勢，當事件平均流量越高，則事件 U 值就越高，因此可以對照章節 4.1 的流量分類結果，也將各事件 U 值分成同樣的 3 類，各類取平均得到 3 組 U 值，如表 4-5、表 4-6，當判斷為高流量時，就用高流量組別的 U 值做預報，判斷為中流量時，就用中流量組別的 U 值做預報，以此類推。因為流量與雨量有明顯正相關且在流量反應之前，雨量便會先有反應，因此便可以用雨量作為判斷流量類別的依據。

對於曾文水庫集水區，以前 4 個小時的雨量加權平均值為判斷依據，判斷值 P 為

$$P_t = 0.5R_{t-1} + 0.25R_{t-2} + 0.125(R_{t-3} + R_{t-4}) \quad (4-26)$$

再將曾文水庫集水區歷史事件雨量資料代入式(4-25)計算，可得低流量事件之 P 值皆小於 18、中流量事件之 P 值皆小於 32，因此當 P 值小於 18 則將低流量組之 U 值代入反應函數式， P 值介於 18 至 32 時則將中流量組之 U 值代入反應函數式，其餘皆將高流量組之 U 值代入反應函數式。

對於赤蘭溪流域，以前 4 個小時的雨量加權平均值為判斷依據，判斷值 P 為

$$P_t = 0.22R_{t-1} + 0.52R_{t-2} + 0.27R_{t-3} \quad (4-27)$$

再將赤蘭溪流域歷史事件雨量資料代入式(4-26)計算，可得低流量事件之 P 值皆小於 19、中流量事件之 P 值皆小於 26，因此當 P 值小於 19 則將低流量組之 U 值代入反應函數式， P 值介於 19 至 26 時則將中流量組之 U 值代入反應函數式，其餘皆將高流量組之 U 值代入反應函數式。

希望藉由分成 3 個類別，隨時調整 U 值大小，以符合整體的流量趨勢，使反應函數模式對於每個類別的流量事件，都能達到一定程度的預報準確度。

表 4-6 曾文水庫集水區各分類 U 值

曾文水庫集水區					
類別	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
低流量	4.53	10.10	4.11	5.02	0.97
中流量	7.85	22.62	18.49	5.83	10.24
高流量	9.10	47.05	15.25	8.90	4.75

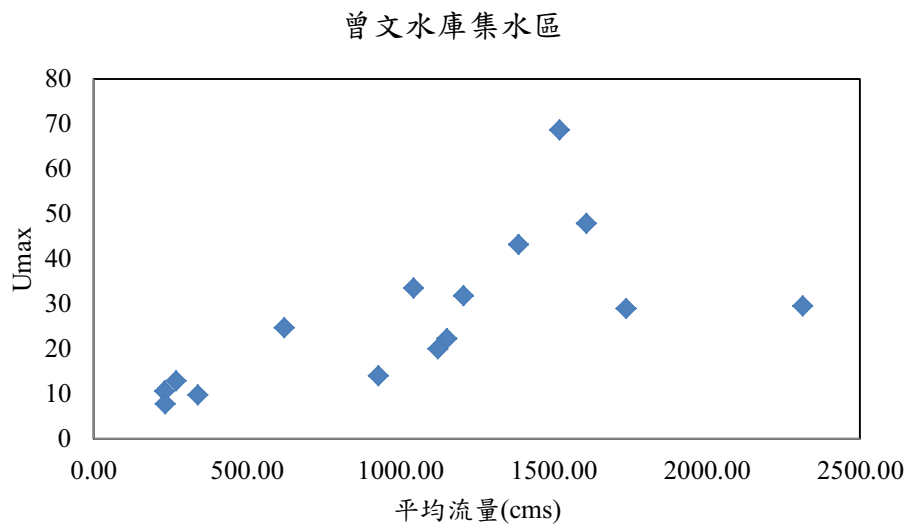


圖 4-7 曾文水庫集水區各事件之平均流量與最大 U 值的關係圖

表 4-7 赤蘭溪流域各分類 U 值

赤蘭溪流域				
類別	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄
低流量	0.43	0.37	2.86	2.18
中流量	0.23	1.58	5.93	3.12
高流量	0.77	6.22	10.77	4.80

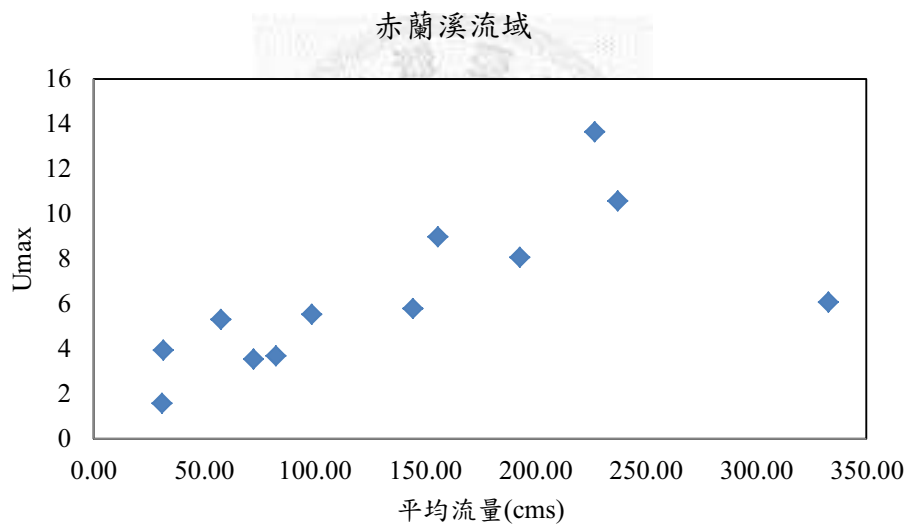


圖 4-8 赤蘭溪流域各事件之平均流量與最大 U 值的關係圖

第五章 即時預報模式預報結果

5.1 Naïve 模式的預報結果

由表 5-1、表 5-2 可知，Naïve 模式的預報結果除了幾場事件表現較差以外，其餘事件預報的相關係數都可達 0.8 以上，CE 值也都 0.7 以上，顯示 Naïve 模式具有一定的預報能力，但因為模式架構問題，所以預報會完整的延遲一個時刻，因此峰值時刻的預報誤差(EPT_p)都為負的。

從有些事件的峰值時刻的誤差可以得知，流量峰值和前一時刻的流量值相差很多，顯示流量是在短時間突然增加而達峰值，一般單純用流量資料來預測流量的時間序列模式很難抓到這個趨勢，這個結果顯示如果要提升峰值預報的準確度，需要再考慮到雨量這個因素。

5.2 AR(2) 模式的預報結果

以 AR(2)模式做流量預報，由表 5-3、表 5-4 來看，預報值的相關係數(r)跟效率係數(CE)都相當高，但持續係數(CP)卻有普遍偏低的情形，在低流量事件甚至有負值的情況發生，這代表以 Naïve 模式做預報，反而在預報方面表現的更好。當 Naïve 模式的預報值與觀測值之相關係數，大於 AR(2)模式的預報值與觀測值之相關係數，持續係數就會是負值，代表 Naïve 模式的表現優於 AR(2)模式，由圖 5-1 可看出兩模式預報值與觀測值的相關係數有明顯的正相關，當 Naïve 模式的預報值與觀測值之相關係數越高，則 AR(2)模式的預報值與觀測值之相關係數也會越高，以 AR(2)模式做預報的表現就會較佳。Naïve 模式的預報值與觀測值之相關係數即為流量序列時間差為一個時刻的自我相關係數，與流量高低有明顯正相關，以同一研究區域做比較，有平均流量越高相關係數就會越高的趨勢，因此可推論 AR(2)模式在預測中高流量事件的時候才會比用 Naïve 模式預測的好。

會導致 AR(2)模式的持續係數(CP)偏低的主因為預報延遲效應，從圖 5-2 至圖 5-21 便可看出 AR(2)模式的預報流量歷線，幾乎與等同於時間向後位移一個時刻的

觀測流量歷線，即是 Naïve 模式的預報流量歷線，因此 AR(2)模式的持續系數才會偏低，預報延遲效應會導致預報上的誤差，尤其是在流量峰值的預測上都會偏低，因此與 Naïve 模式相比，其實有同樣的問題存在，從評估結果而言，只能說比 Naïve 模式稍好，但依然有預報延遲和峰值預報不佳的問題。

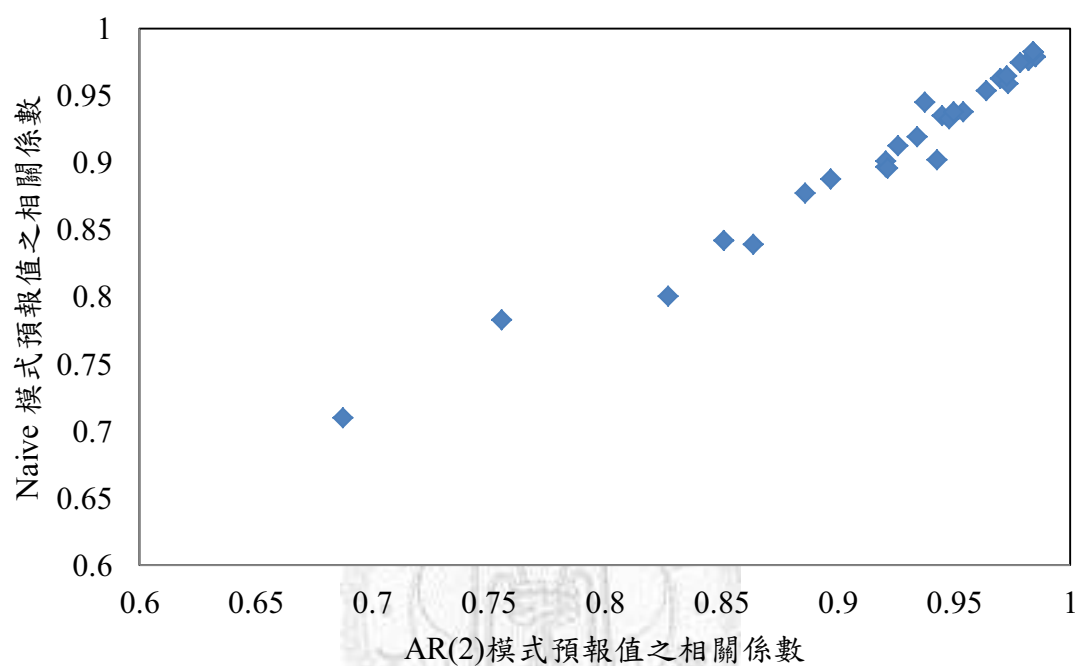


圖 5-1 AR(2)模式預報值之相關係數&Naïve 模式預報值之相關係數散布圖

表 5-1 Naïve 模式在曾文水庫集水區的預報評估結果

Naïve 模式(曾文水庫集水區)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.78	0.56	0.00	107.52	-0.40
2	0.91	0.82	0.00	85.25	-30.74
3	0.94	0.87	0.00	69.88	-17.68
<u>4</u>	0.95	0.89	0.00	345.31	-36.88
5	0.93	0.87	0.00	584.95	-7.38
6	0.94	0.88	0.00	385.31	-33.92
7	0.90	0.79	0.00	56.38	-15.92
<u>8</u>	0.98	0.95	0.00	348.64	-16.77
9	0.97	0.95	0.00	153.70	-13.95
10	0.98	0.96	0.00	246.36	-11.44
11	0.98	0.96	0.00	206.76	-18.80
<u>12</u>	0.95	0.91	0.00	573.53	-9.40
<u>13</u>	0.96	0.93	0.00	223.67	-13.93
14	0.98	0.97	0.00	523.52	-17.12
<u>15</u>	0.89	0.78	0.00	245.36	-7.88

表 5-2 Naïve 模式在赤蘭溪流域的預報評估結果

Naïve 模式(赤蘭溪流域)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
<u>1</u>	0.90	0.79	0.00	104.92	-17.58
2	0.80	0.59	0.00	15.38	-6.48
3	0.88	0.75	0.00	28.42	-23.22
4	0.84	0.68	0.00	31.50	-55.05
5	0.92	0.84	0.00	5.99	-7.56
6	0.84	0.67	0.00	22.63	-9.47
<u>7</u>	0.90	0.80	0.00	73.16	-43.20
<u>8</u>	0.71	0.41	0.00	29.92	-89.47
9	0.94	0.88	0.00	83.54	-5.78
10	0.90	0.80	0.00	71.99	-4.48
11	0.96	0.93	0.00	44.81	-2.59
12	0.96	0.92	0.00	61.72	-10.21

註：預報驗證事件以粗體底線標示

表 5-3 AR(2) 模式在曾文水庫集水區的預報評估結果

AR(2) 模式(曾文水庫集水區)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.76	0.47	-0.22	118.78	20.23
2	0.93	0.85	0.13	79.62	-20.10
3	0.94	0.89	0.13	65.15	-11.03
<u>4</u>	0.94	0.87	-0.15	369.83	-38.96
5	0.95	0.89	0.21	520.19	-0.87
6	0.95	0.90	0.18	348.94	-22.46
7	0.92	0.84	0.24	49.18	-11.93
<u>8</u>	0.98	0.96	0.25	301.01	-11.37
9	0.98	0.96	0.14	142.22	-12.78
10	0.99	0.97	0.29	207.54	-7.37
11	0.98	0.97	0.12	194.41	-21.40
<u>12</u>	0.96	0.93	0.22	507.50	1.65
<u>13</u>	0.97	0.94	0.22	197.83	-13.66
14	0.98	0.97	0.07	504.88	-13.39
<u>15</u>	0.90	0.79	0.04	239.94	-3.69

表 5-4 AR(2) 模式在赤蘭溪流域的預報評估結果

AR(2) 模式(赤蘭溪流域)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
<u>1</u>	0.92	0.83	0.19	94.55	-3.59
2	0.83	0.61	0.03	15.13	19.70
3	0.89	0.76	0.02	28.17	-35.39
4	0.85	0.67	-0.03	31.97	-56.45
5	0.93	0.86	0.14	5.54	11.22
6	0.86	0.70	0.08	21.75	-9.28
<u>7</u>	0.92	0.83	0.17	66.83	-34.71
<u>8</u>	0.69	0.25	-0.27	33.79	-87.86
9	0.95	0.91	0.25	72.55	-4.68
10	0.94	0.88	0.38	56.64	-0.75
11	0.97	0.94	0.18	40.46	-2.36
12	0.97	0.94	0.33	50.43	2.66

註：預報驗證事件以粗體底線標示

5.3 考慮 rain-burst 的 AR(2) 模式的預報結果

在曾文水庫集水區的流量事件方面，使用考慮 rain-burst 的 AR(2)模式預報共修正了 10 場事件，其中歷史事件 6 場，驗證事件 4 場，對於歷史事件而言，除了事件 1 與事件 14 外，其餘事件的相關係數(r)、效率係數(CE)、持續係數(CP)與 AR(2)模式和 Naïve 模式相比也都比較高，持續係數(CP)也有些微提升，以事件 6(圖 5-18)的預報歷線圖來看，也大幅改善了在峰值的預報誤差，而對於驗證事件而言，除了事件 15 雨量差皆在門檻之下沒修正以外，其餘事件之相關係數(r)、效率係數(CE)、持續係數(CP)都有所提升，事件 4 的 CP 值也因為修正而從-0.15 變為 0.08，顯示此模式確實對預報延遲效應有所改善，但從事件 1 可看出對於低流量事件而言，考慮 rain-burst 的 AR(2)模式會仍可能會有誤判而高估流量的情形，而對某些事件而言，也會過早修正或過晚修正而無法準確修正峰值的預報值，這也顯示曾文水庫集水區事件雨量反應為流量的時間並不一致。

在赤蘭溪流域的流量事件方面，共修正 11 場事件，其中歷史事件 8 場，驗證事件 3 場。除了沒修正的場次外，其餘場次的相關係數(r)、效率係數(CE)與 AR(2)模式和 Naïve 模式的相比也都比較高，每場事件的 CP 值也都變為正值，對於預報驗證事件，不但持續係數有顯著提升，也改善了每一場預報驗證流量資料峰值的預報誤差，因此持續係數皆達 0.3 以上，甚至有超過 0.5 的情形，表示考慮 rain-burst 的 AR(2)模式在赤蘭溪流域的流量預報上，表現的相當不錯。

整體而言，考慮 rain-burst 的 AR(2)模式明顯提升流量峰值預報的準確度，持續係數(CP)也有提升，代表慮 rain-burst 的 AR(2)模式改善了預報延遲的效應。雖然改善了預報延遲的效應，但在峰值下一個時刻的預報值，卻依然有明顯高估的情形，這也是另一個產生預報誤差的主要原因。由於 AR(2)模式是藉由前兩個時刻的觀測值來推估當前時刻的預報值，當前兩個時刻的觀測值是上升的趨勢，AR(2)模式就會以上升趨勢進行流量預報，所以峰值後一個時刻的預報值會比峰值更高，但實際上峰值後一個時刻的觀測值因為雨勢漸緩一定比峰值低，而 AR(2)模式

沒考慮到雨量因素，因此峰值後一個時刻的預報值就會產生明顯的誤差。考慮 rain-burst 的 AR(2) 模式雖然考慮了雨量因素，並修正了預報值，但只單純的考慮雨量差為正的情況，並無考慮當雨量差為負時，對於流量預報值的修正，因此依然有此誤差的產生。



表 5-5 考慮 rain-burst 的 AR(2)模式在曾文水庫集水區的預報評估結果

考慮 rain-burst 的 AR(2)模式(曾文水庫集水區)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.74	0.27	-0.67	139.03	80.75
2	0.93	0.85	0.13	79.62	-20.10
3	0.95	0.89	0.13	65.09	-11.03
4	0.96	0.90	0.08	330.49	-6.38
5	0.96	0.91	0.31	487.28	-0.87
6	0.96	0.91	0.29	324.27	2.71
7	0.92	0.84	0.24	49.18	-11.93
8	0.98	0.97	0.29	293.24	-11.37
9	0.98	0.96	0.15	141.81	-12.78
10	0.99	0.97	0.30	206.76	-6.88
11	0.98	0.97	0.12	194.41	-21.40
12	0.97	0.93	0.26	494.80	1.65
13	0.98	0.95	0.27	191.74	-13.66
14	0.98	0.97	0.04	512.44	-13.39
15	0.90	0.79	0.04	239.94	-3.69

表 5-6 考慮 rain-burst 的 AR(2)模式在赤蘭溪流域的預報評估結果

考慮 rain-burst 的 AR(2) 模式(赤蘭溪流域)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.97	0.92	0.62	64.58	9.38
2	0.83	0.62	0.06	14.94	19.70
3	0.89	0.76	0.04	27.83	-35.39
4	0.90	0.75	0.21	28.03	-0.52
5	0.94	0.86	0.17	5.46	11.22
6	0.91	0.77	0.31	18.86	-9.28
7	0.94	0.87	0.35	59.02	-21.26
8	0.84	0.60	0.33	24.53	-29.86
9	0.95	0.91	0.25	72.55	-4.68
10	0.95	0.88	0.41	55.39	5.37
11	0.97	0.94	0.21	39.71	-2.36
12	0.99	0.97	0.70	34.08	2.66

註：預報驗證事件以粗體底線標示

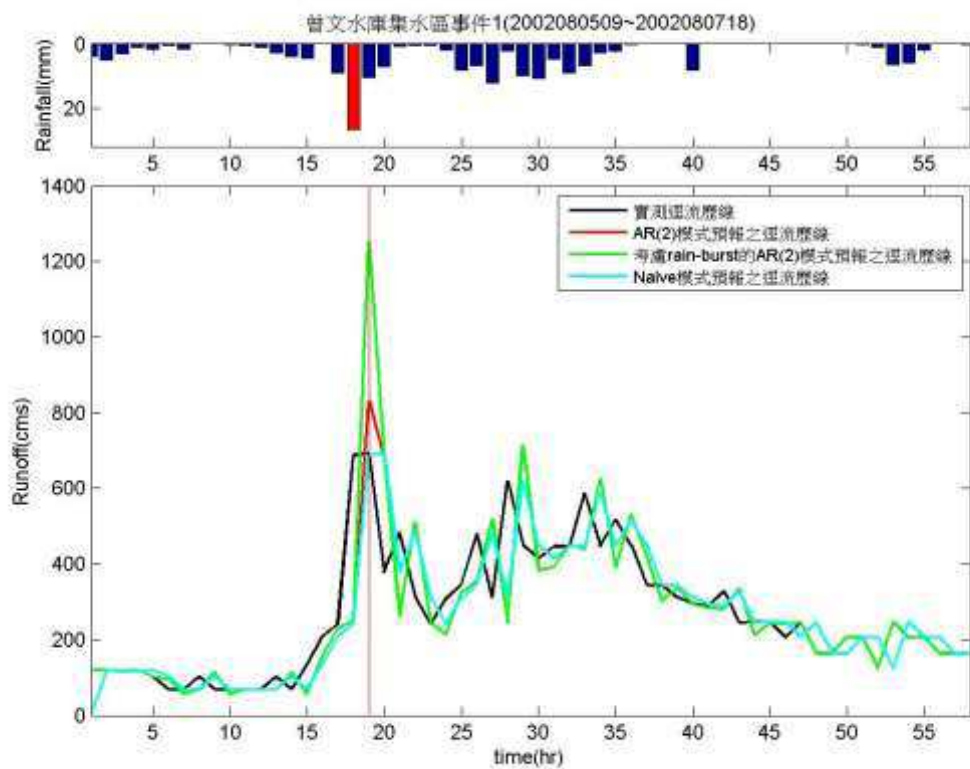


圖 5-2 曾文水庫集水區事件 1 之 rain-burst 預報結果

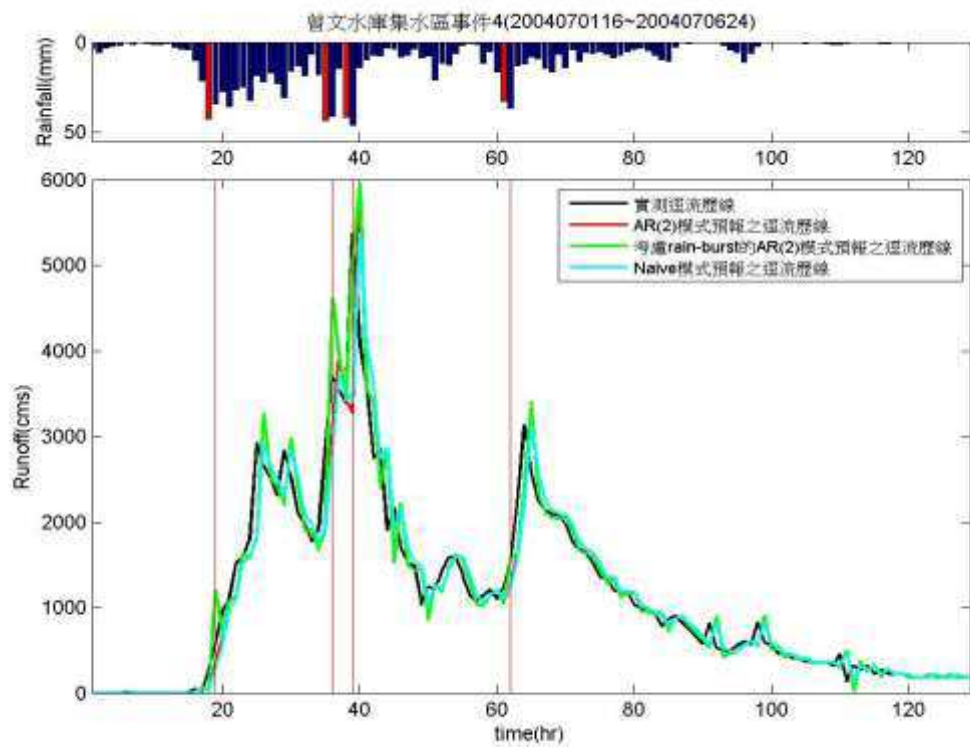


圖 5-3 曾文水庫集水區事件 4 之 rain-burst 預報結果

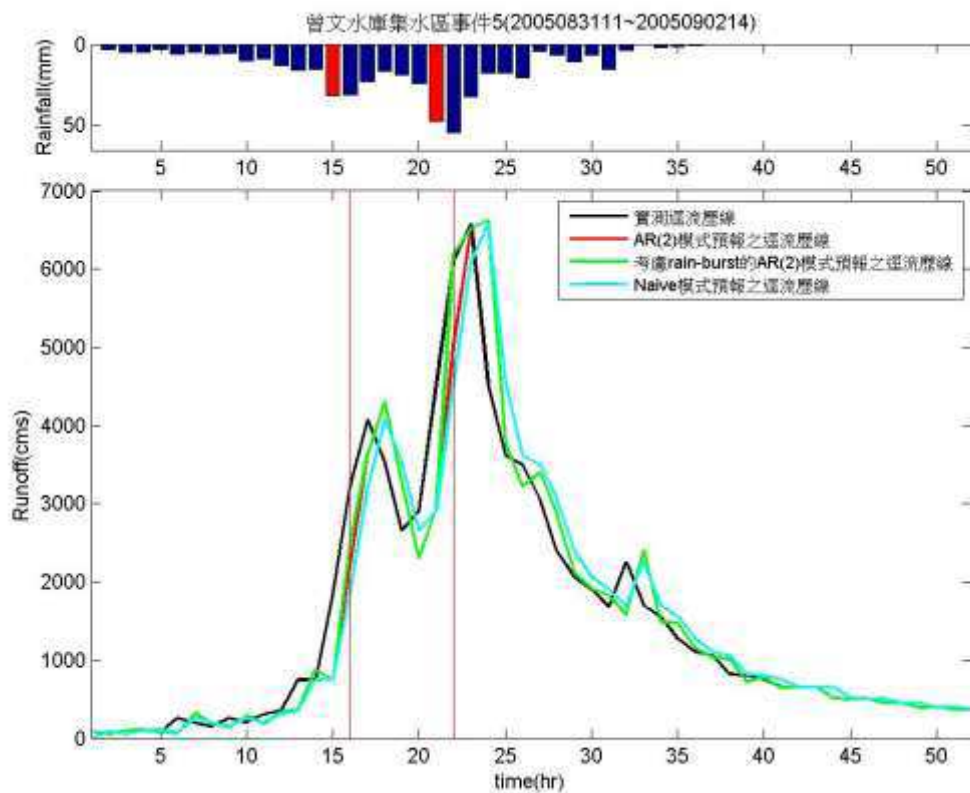


圖 5-4 曾文水庫集水區事件 5 之 rain-burst 預報結果

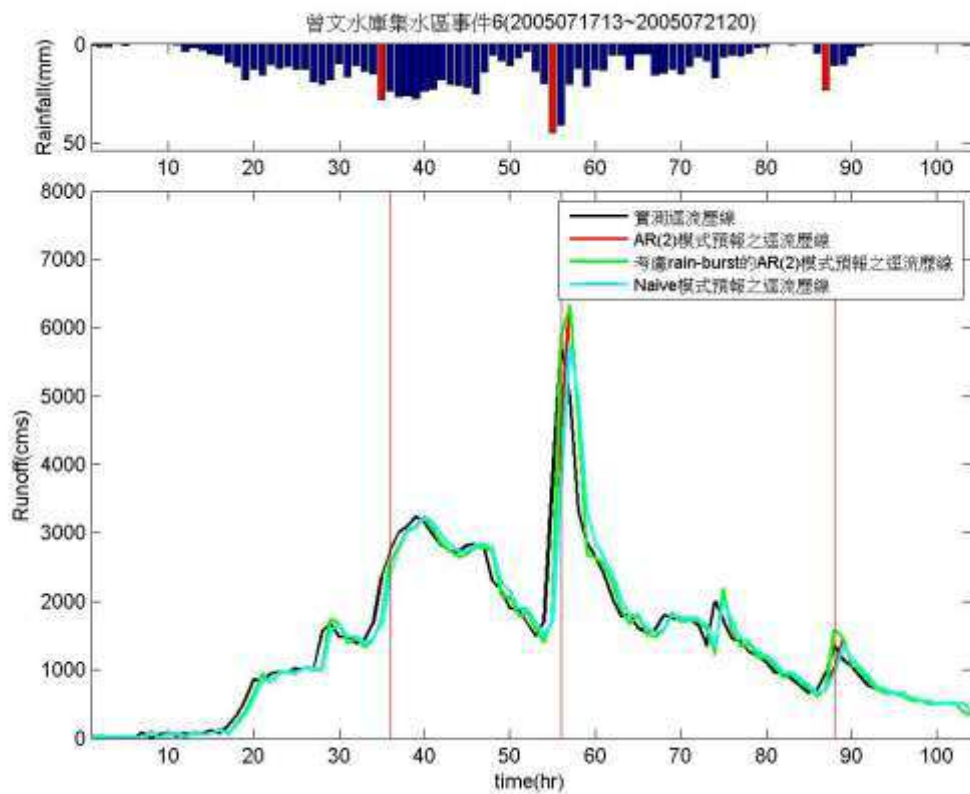


圖 5-5 曾文水庫集水區事件 6 之 rain-burst 預報結果

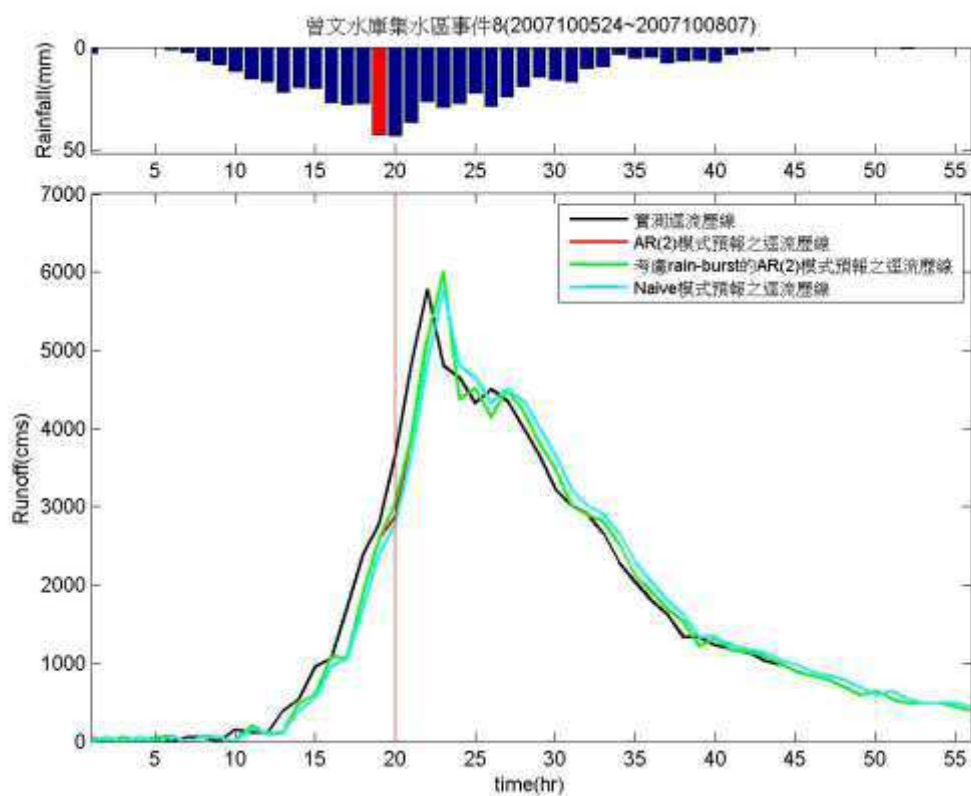


圖 5-6 曾文水庫集水區事件 8 之 rain-burst 預報結果

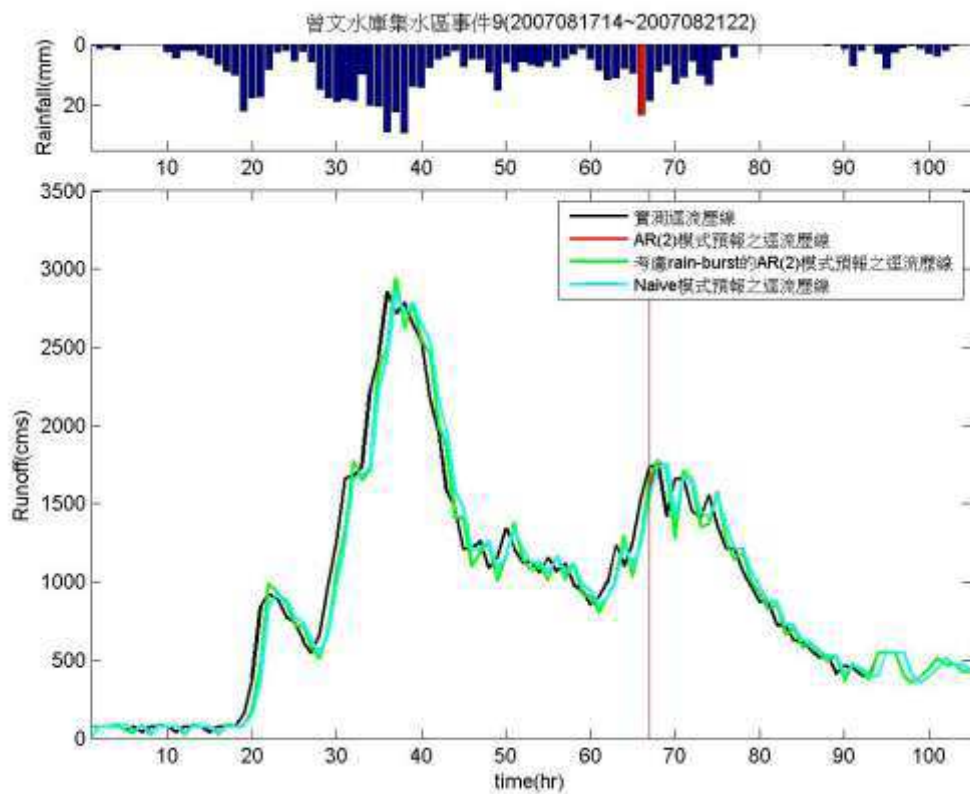


圖 5-7 曾文水庫集水區事件 9 之 rain-burst 預報結果

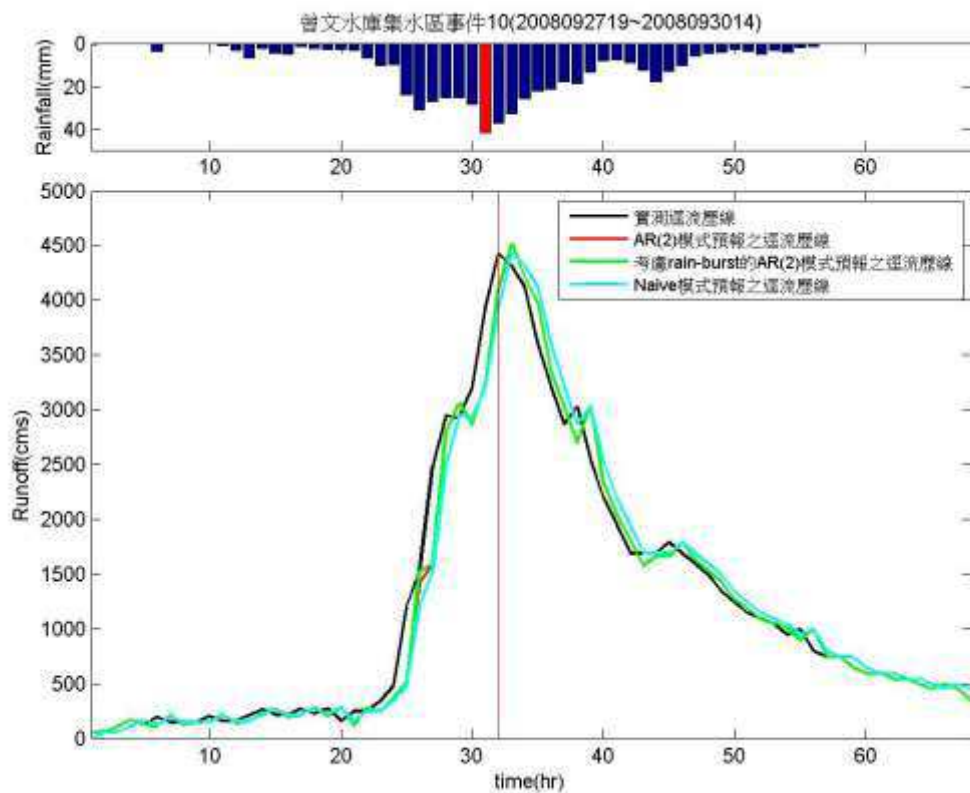


圖 5-8 曾文水庫集水區事件 10 之 rain-burst 預報結果

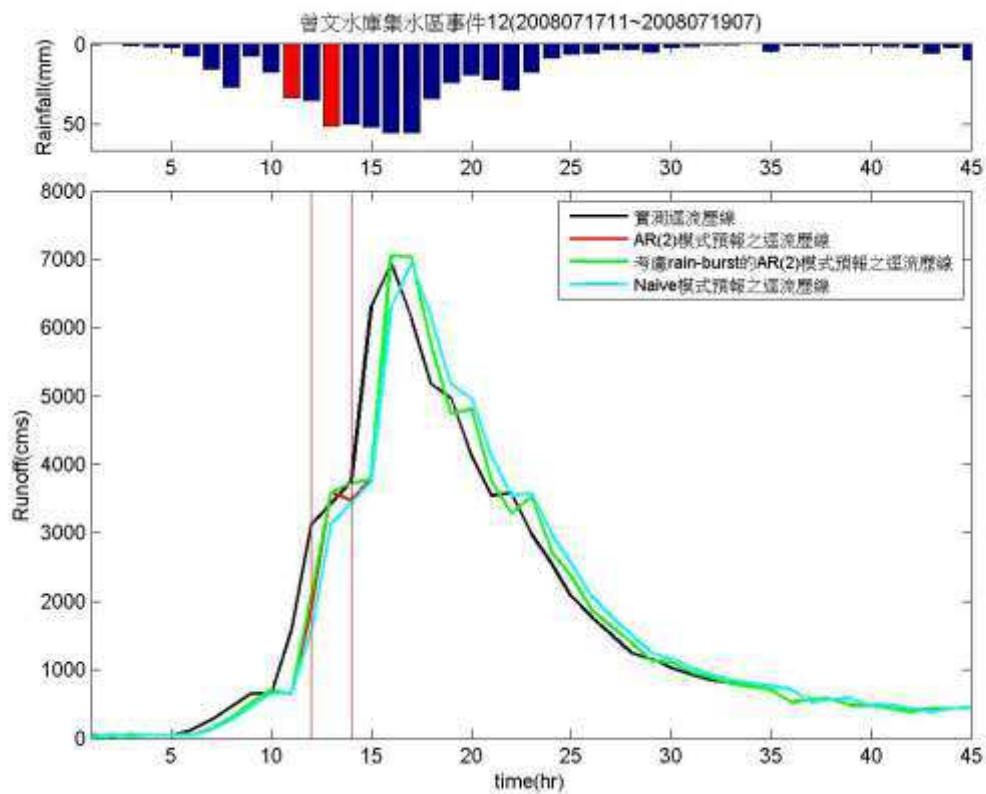


圖 5-9 曾文水庫集水區事件 12 之 rain-burst 預報結果

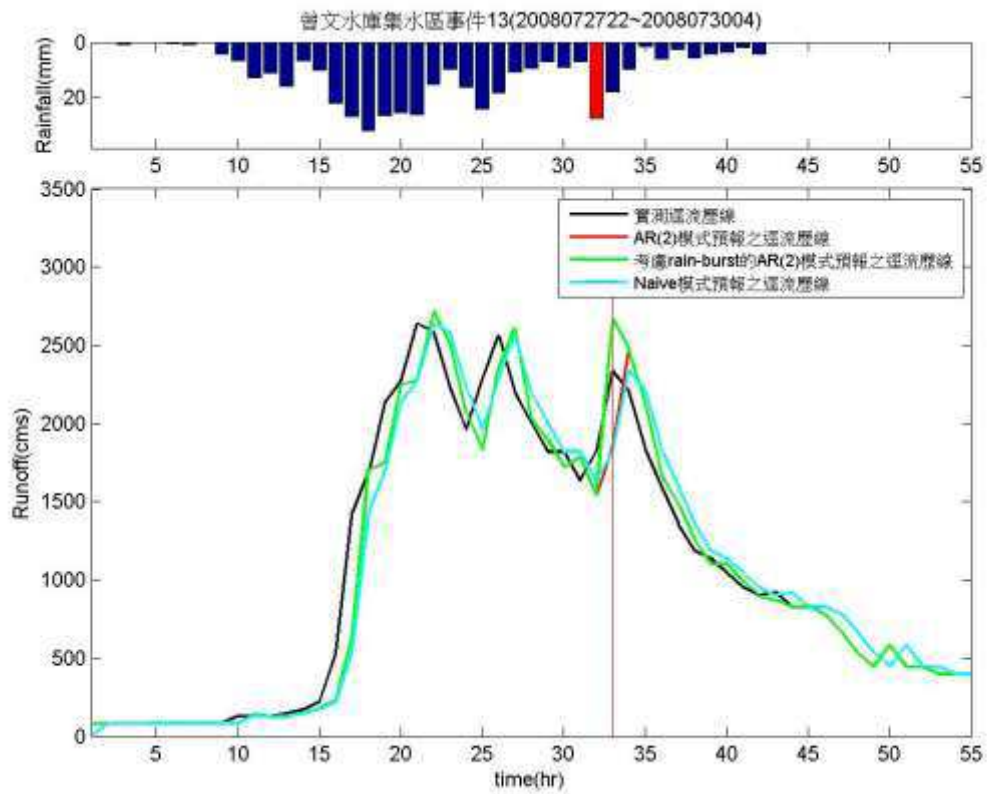


圖 5-10 曾文水庫集水區事件 13 之 rain-burst 預報結果

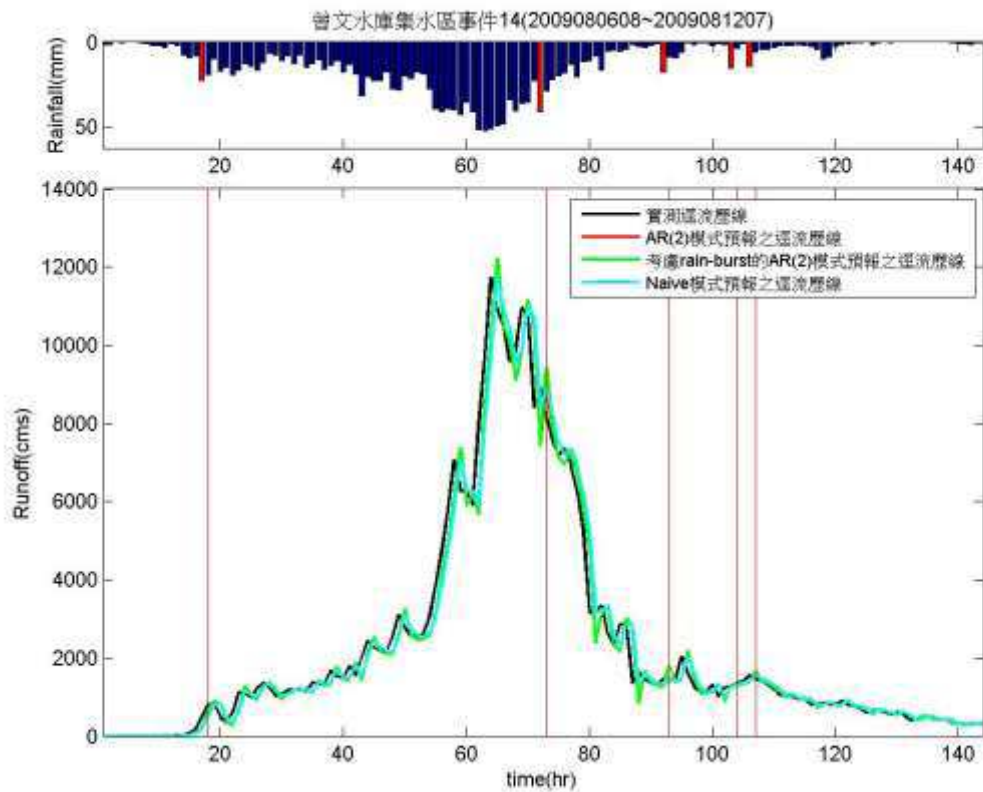


圖 5-11 曾文水庫集水區事件 14 之 rain-burst 預報結果

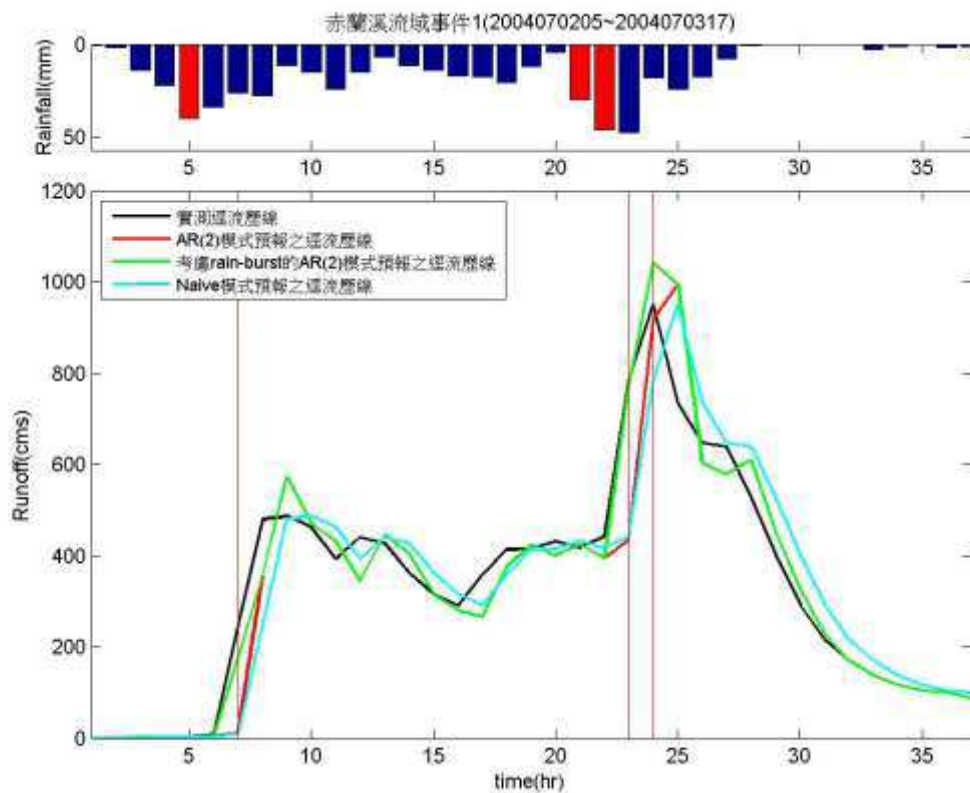


圖 5-12 赤蘭溪流域事件 1 之 rain-burst 預報結果

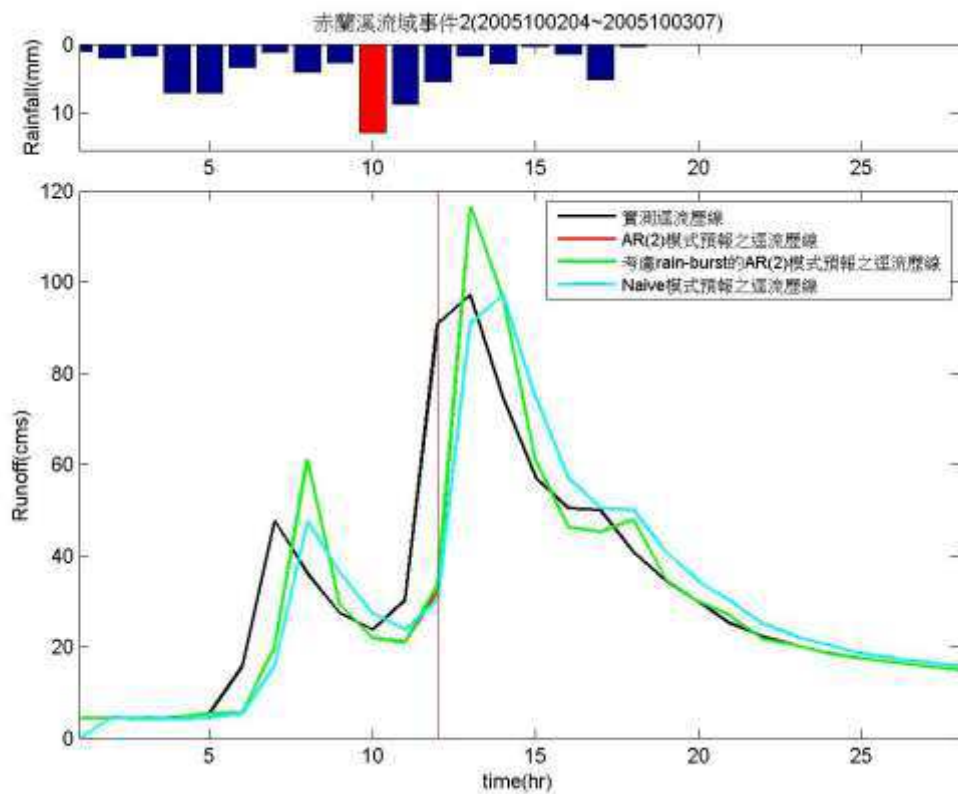


圖 5-13 赤蘭溪流域事件 2 之 rain-burst 預報結果

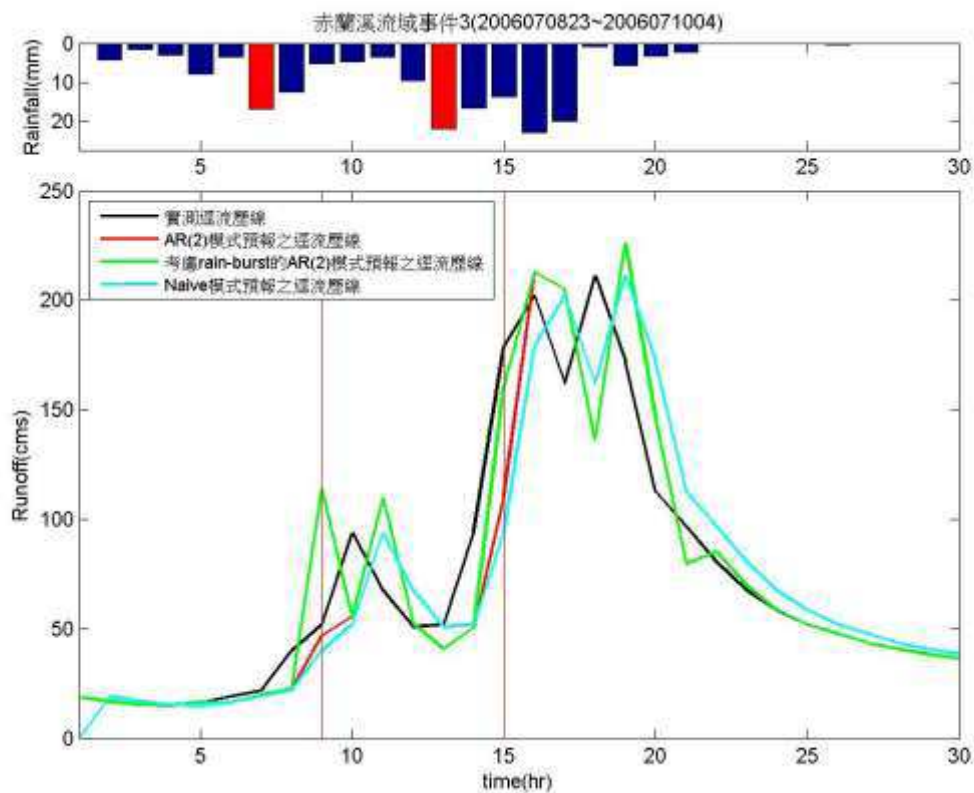


圖 5-14 赤蘭溪流域事件 3 之 rain-burst 預報結果

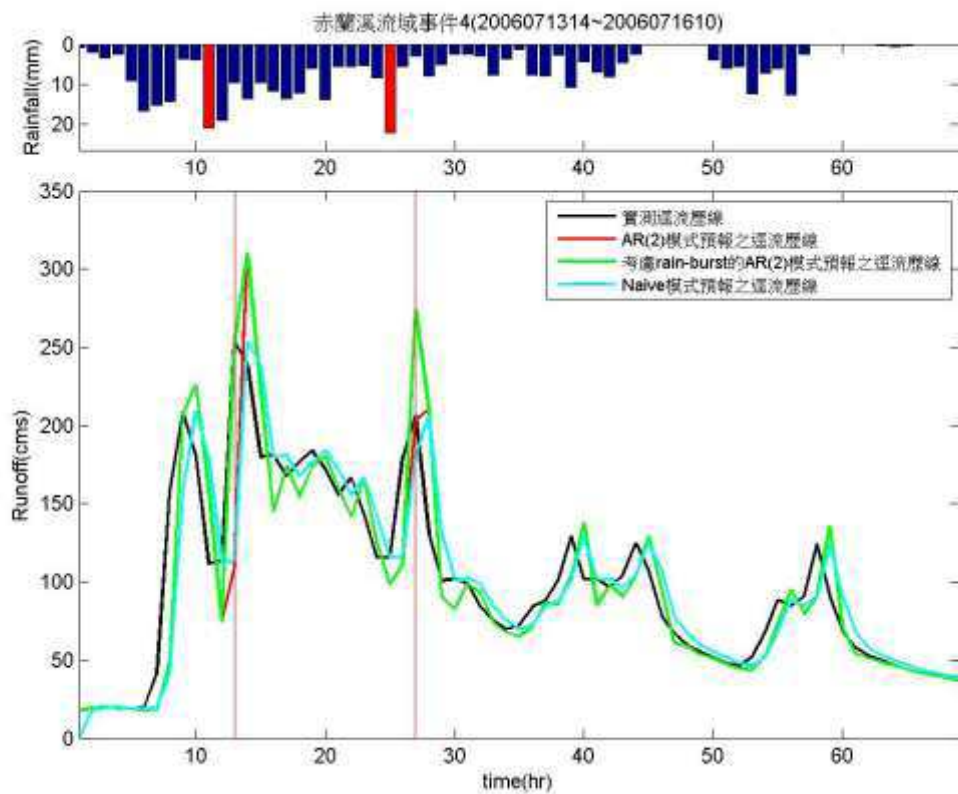


圖 5-15 赤蘭溪流域事件 4 之 rain-burst 預報結果

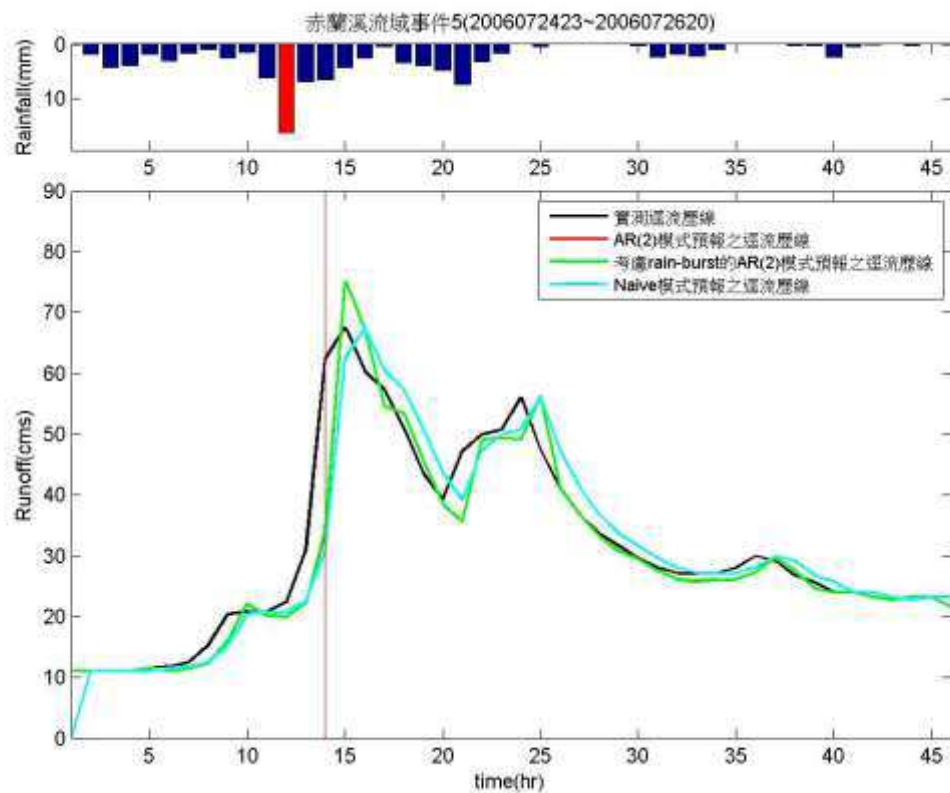


圖 5-16 赤蘭溪流域事件 5 之 rain-burst 預報結果

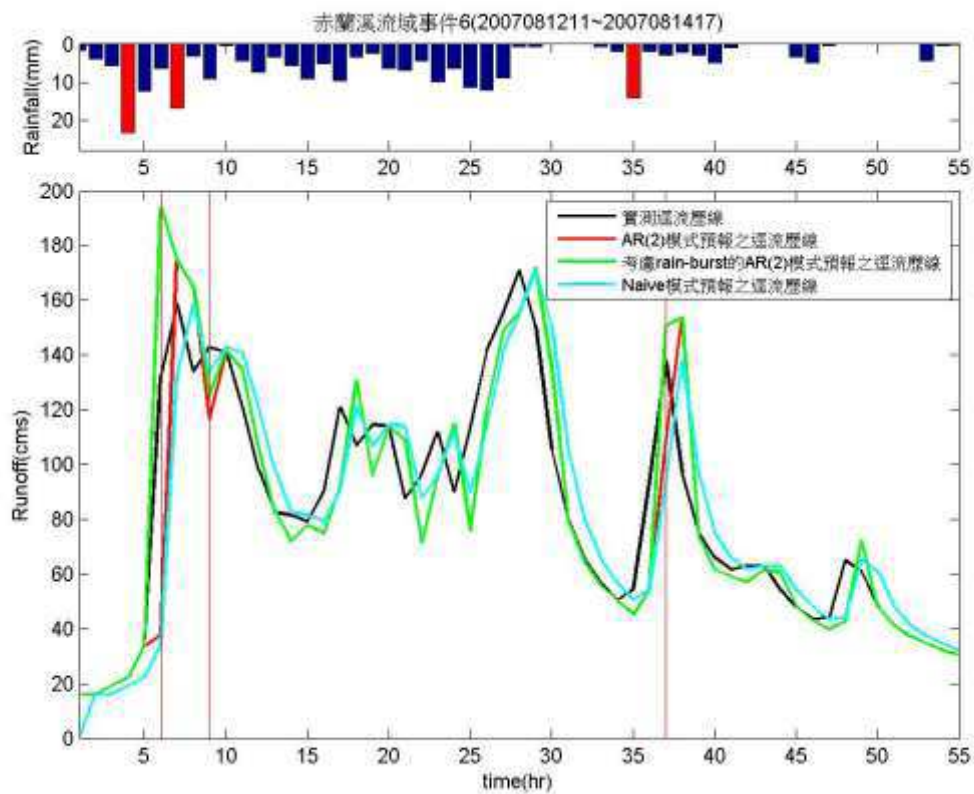


圖 5-17 赤蘭溪流域事件 6 之 rain-burst 預報結果

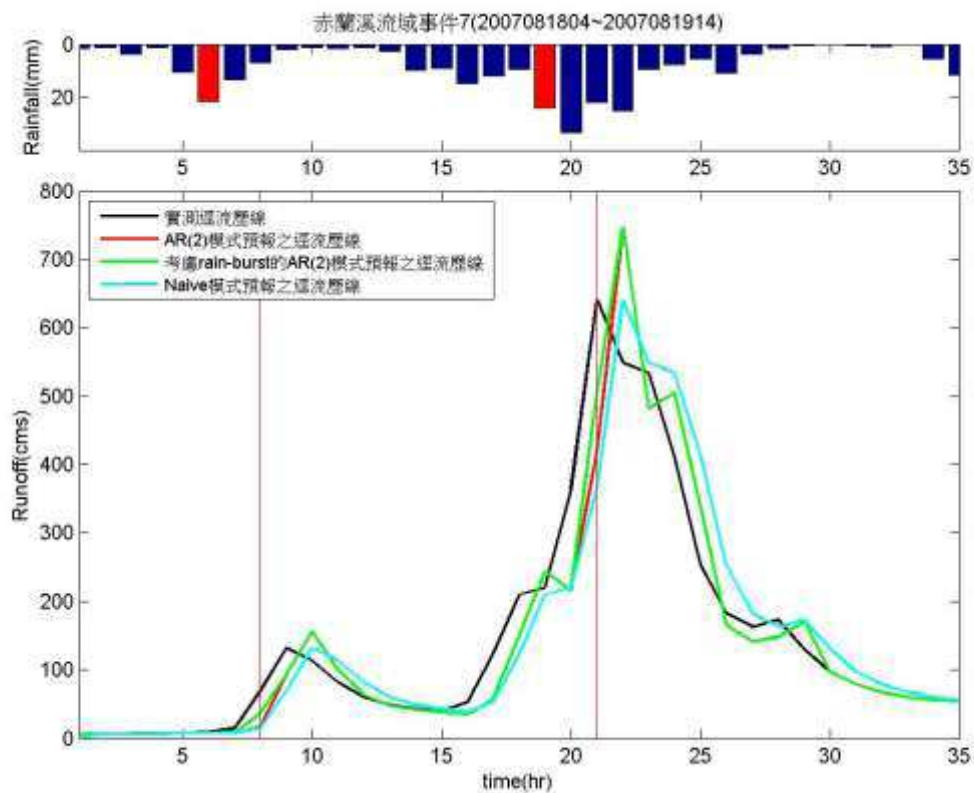


圖 5-18 赤蘭溪流域事件 7 之 rain-burst 預報結果

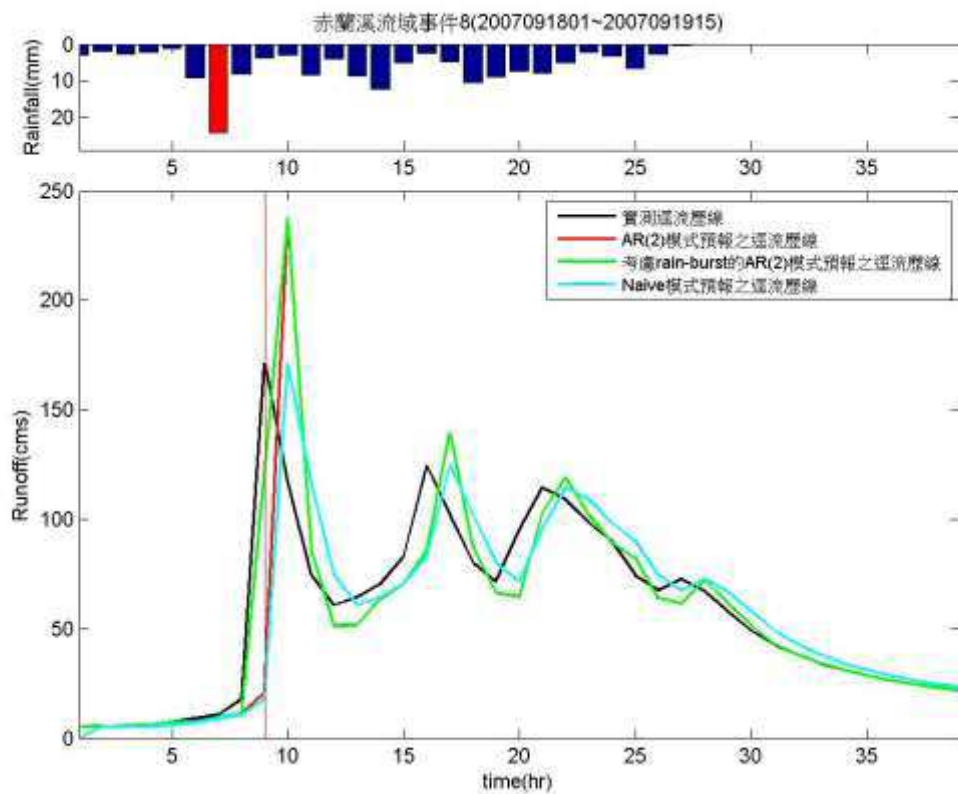


圖 5-19 赤蘭溪流域事件 8 之 rain-burst 預報結果

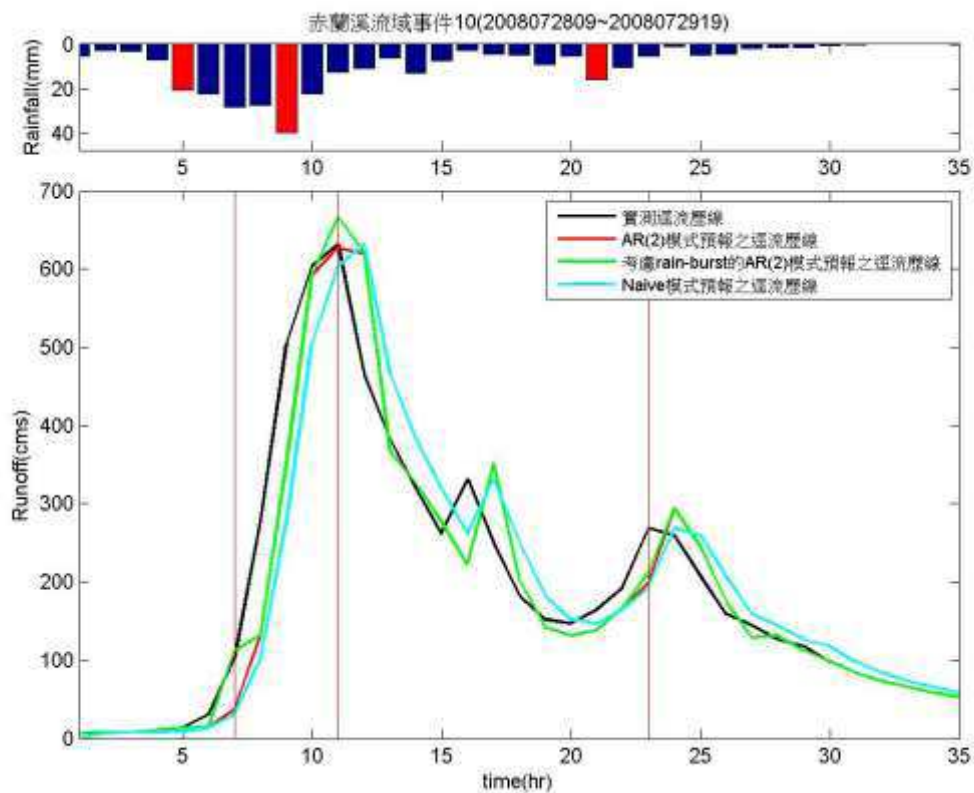


圖 5-20 赤蘭溪流域事件 10 之 rain-burst 預報結果

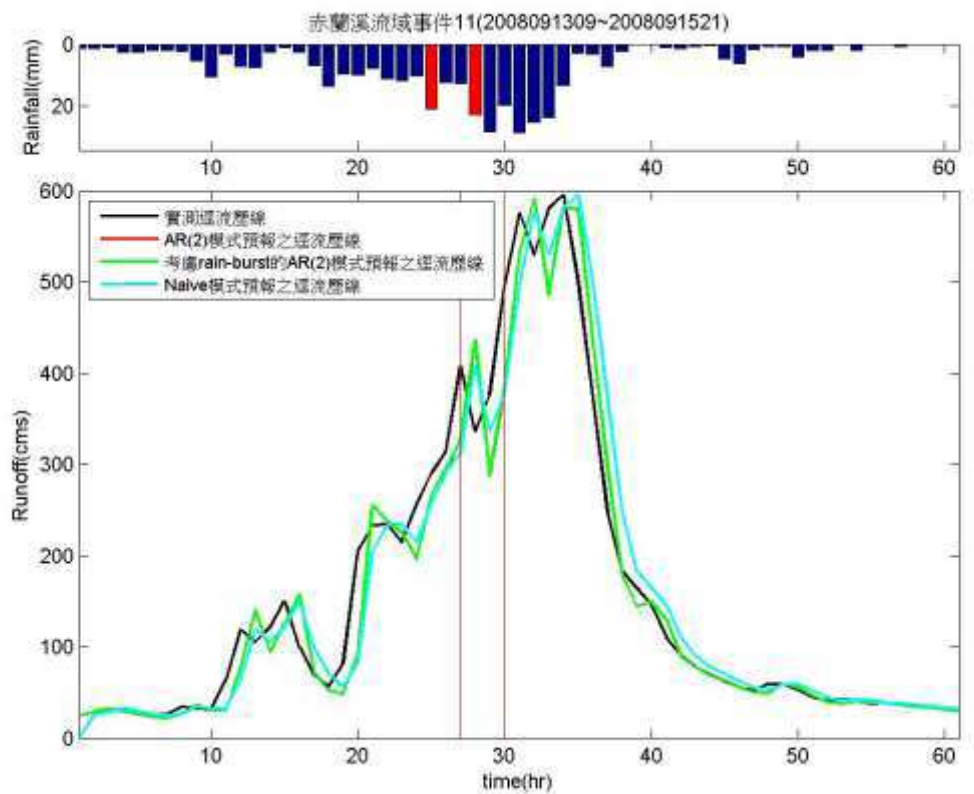


圖 5-21 赤蘭溪流域事件 11 之 rain-burst 預報結果

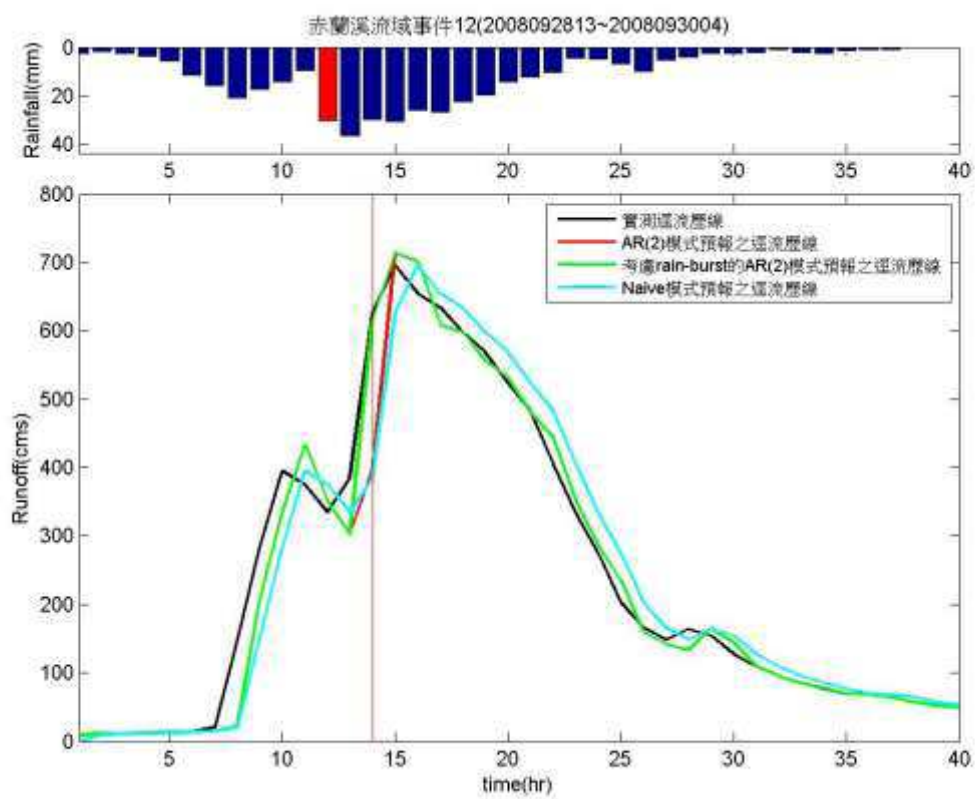


圖 5-22 赤蘭溪流域事件 12 之 rain-burst 預報結果



5.4 反應函數模式的預報結果

對於曾文水庫集水區而言，反應函數模式預報結果不如預期，雖然有部分事件的 CP 值有明顯提升，但有些事件的 CP 值仍然是負的，像是事件 10 與事件 13，甚至比 AR(2)模式和 Naïve 模式的預報結果還差，將 CP 值為負的 4 場事件挑出來看，分別為事件 1、事件 2、事件 3、事件 7，剛好都為低流量事件，這顯示只以平均 U 值下去估算低流量事件的流量趨勢，對於低流量事件而言明顯不佳，但中流量事件和高流量事件卻符合整體平均 U 值之趨勢，因此在中流量事件和高流量事件以反應函數模式做預報，在 CP 值的都比 AR(2)模式和考慮 rain-burst 的 AR(2)模式好，但如果是看峰值時刻的誤差，則還是考慮 rain-burst 的 AR(2)模式較佳。

對於赤蘭溪流域而言，以反應函數模式做預報，除了事件 5 以外，整體的 CP 值都有明顯提升，都達 0.3 以上，一半以上事件 CP 值皆大於 0.5，這顯示在預報上已幾乎沒有預報延遲的效應，不過從事件 5 來看，以反應函數模式預報還是有可能會有預報表現不佳的情況，CP 值甚至只有-4.34，這同樣顯示只以平均 U 值估算流量趨勢，雖然可以預測到大部分的趨勢，但少部分的流量事件可能還是會預報的很差。除此之外，以峰值時刻的預報誤差來看，也還是考慮 rain-burst 的 AR(2)模式較好。

綜合以上論述，反應函數模式對於大部分事件的預報延遲效應皆有改善，但對於少部分的流量事件卻有預報不佳的情形，而且雖然有改善預報延遲效應，但對於峰值預報的準確度而言，還是考慮 rain-burst 的 AR(2)模式較好。

表 5-7 反應函數模式在曾文水庫集水區的預報評估結果

反應函數模式(曾文水庫集水區)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.82	0.53	-0.07	111.28	75.36
2	0.90	0.79	-0.18	92.51	-3.15
3	0.92	0.83	-0.32	80.27	-0.37
<u>4</u>	0.95	0.91	0.16	315.88	-28.03
5	0.96	0.92	0.39	457.62	0.22
6	0.96	0.92	0.34	313.23	-20.85
7	0.90	0.78	-0.07	58.24	-11.26
<u>8</u>	0.98	0.97	0.32	286.45	-17.77
9	0.98	0.96	0.16	141.21	-10.97
10	0.99	0.98	0.44	185.05	-3.18
11	0.99	0.97	0.19	185.81	-16.98
<u>12</u>	0.97	0.93	0.26	492.64	-7.31
<u>13</u>	0.98	0.97	0.56	147.87	-14.97
14	0.98	0.97	0.10	497.35	-15.89
<u>15</u>	0.90	0.79	0.08	235.83	-5.03

表 5-8 反應函數模式在赤蘭溪流域的預報評估結果

反應函數模式(赤蘭溪流域)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
<u>1</u>	0.95	0.90	0.50	74.11	2.96
2	0.85	0.71	0.29	12.97	-8.19
3	0.92	0.85	0.38	22.30	-2.70
4	0.96	0.92	0.73	16.25	-12.93
5	0.64	0.11	-4.41	13.93	-48.51
6	0.93	0.86	0.57	14.90	-1.65
<u>7</u>	0.94	0.88	0.38	57.53	-25.84
<u>8</u>	0.83	0.68	0.45	22.14	-41.74
9	0.97	0.94	0.48	60.06	-5.54
10	0.96	0.92	0.60	45.70	0.16
11	0.99	0.98	0.71	24.03	-1.88
12	0.99	0.98	0.75	30.78	3.18

註：預報驗證事件以粗體底線標示

5.5 調適性反應函數模式的預報結果

對於曾文水庫集水區而言，從表 5-9 來看，用調適性反應函數模式預報，除了事件 1 外，其餘事件的 CP 值皆大於 0，代表調適性反應函數明顯的比 Naïve 模式來的好，與反應函數模式相比，雖然有些事件的 CP 值較低，但整體而言不會出現預報明顯表現不佳的情況，像是以反應函數模式預報時，CP 值為負的事件 1、事件 2、事件 3 和事件 7 等低流量事件，以調適性反應函數預報時，CP 值皆有所提升，顯示以調適性反應函數預報，使用不同類別的 U 值去推估流量趨勢，較能符合整體事件趨勢。

而對於赤蘭溪流域而言，從表 5-10 來看，CP 值皆在 0.3 以上，雖然有部分事件之 CP 值比反應函數模式預報時來的低，但依然顯示調適性反應函數模式，不管是對於低流量事件，還是中流量和高流量事件，預報皆有一定的準確度，不會出現有些事件預報表現佳，有些事件卻預報不佳的情況，對於即時流量預報而言，算是比較具有可靠性的預報模式。

表 5-9 調適性反應函數模式在曾文水庫集水區的預報評估結果

調適性反應函數模式(曾文水庫集水區)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.82	0.52	-0.11	113.28	28.11
2	0.94	0.85	0.14	79.08	-20.24
3	0.97	0.93	0.47	50.94	-10.24
4	0.96	0.91	0.22	304.37	-29.88
5	0.96	0.92	0.42	445.30	4.03
6	0.96	0.91	0.26	331.57	-21.57
7	0.95	0.89	0.48	40.82	-12.62
8	0.98	0.97	0.33	285.31	-19.58
9	0.98	0.96	0.23	134.85	-13.67
10	0.99	0.98	0.44	183.71	-3.58
11	0.99	0.97	0.18	187.18	-16.50
12	0.96	0.93	0.21	508.84	-6.30
13	0.98	0.97	0.52	155.42	-15.41
14	0.98	0.97	0.11	494.05	-15.33
15	0.89	0.78	0.01	244.20	-8.97

表 5-10 調適性反應函數模式在赤蘭溪流域的預報評估結果

調適性反應函數模式(赤蘭溪流域)					
事件代號	r	CE	CP	RMSE	EPT _p (%)
1	0.95	0.89	0.45	77.62	14.61
2	0.92	0.85	0.63	9.38	3.06
3	0.96	0.93	0.71	15.32	-3.50
4	0.92	0.85	0.53	21.63	-35.75
5	0.95	0.89	0.35	4.81	-14.25
6	0.94	0.89	0.67	13.01	-2.22
7	0.93	0.85	0.26	62.75	-28.73
8	0.88	0.77	0.61	18.78	-57.56
9	0.95	0.91	0.24	72.69	-5.73
10	0.96	0.92	0.60	45.48	-1.46
11	0.98	0.96	0.52	31.01	-3.02
12	0.99	0.97	0.65	36.35	8.03

註：預報驗證事件以粗體底線標示

5.6 五個模式的綜合評估與比較

因為各模式在相關係數(r)和效率係數(CE)方面表現皆不錯，所以本研究主要是以持續係數(CP)、峰值時刻的預報誤差(EPT_p (%))和均方根誤差(RMSE)進行五個模式的綜合評估與比較，從表 5-11、表 5-12 和表 5-14、表 5-15 可看出不管是曾文水庫集水區，還是赤蘭溪流域，其預報結果之 CP 值與 RMSE 值皆有一樣的趨勢，當 CP 值評估結果好，RMSE 的評估結果也會好，因此只做兩個部份的探討，一個部分為各模式之預報 CP 值評估結果比較，另一個部分為各模式之預報峰值時刻預報誤差(EPT_p)的結果比較。

5.6.1 各模式之 CP 值評估與比較

從表 5-11 和表 5-12 來看(表中之模式 1 為 AR(2)模式，模式 2 為考慮 rain-burst 的 AR(2)模式，模式 3 為反應函數模式，模式 4 為調適性反應函數模式，模式 5 為 Naïve 模式)，不管是曾文水庫集水區還是赤蘭溪流域，都是反應函數模式和調適性反應函數模式表現較佳，顯示這兩個模式的預報延遲問題最小，再仔細比較，可以發現反應函數模式在預報中高流量事件表現較好，而調適性反應函數則是在預報低流量事件較佳，原因是對於中高流量而言，U 值的關係沒有那麼一致，雖然中流量事件的 U 值和高流量事件的 U 值明顯比低流量事件的 U 值高，但是高流量事件的 U 值卻沒有明顯的比中流量事件的 U 值高，反而有中流量事件 U 值大於高流量事件 U 值的情況，因此在調適性反應函數模式裡，強制區分為三類會導致不具有一致性的類別預報結果較差，而具有一致性的類別預報結果較好，這也是為什麼調適性反應函數模式在預報低流量事件時，表現較好的緣故。然而對個別事件而言，中高流量事件以反應函數模式預報較佳，但就整體而言還是調適性反應函數模式較好，即使在中高流量的預報結果略遜於反應函數模式，但其差異不大，而對於低流量事件反應函數模式卻比調適性反應函數模式相對較差，因此就整體預報延遲改善的評估，還是調適性反應函數模式的預報結果最好。

表 5-11 曾文水庫集水區各模式預報結果之 CP 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件編號	CP	CP	CP	CP	CP
1	-0.22	-0.67	-0.07	-0.11	0.00
2	0.13	0.13	-0.18	0.14	0.00
3	0.13	0.13	-0.32	0.47	0.00
<u>4</u>	-0.15	0.08	0.16	0.22	0.00
5	0.21	0.31	0.39	0.42	0.00
6	0.18	0.29	0.34	0.26	0.00
7	0.24	0.24	-0.07	0.48	0.00
<u>8</u>	0.25	0.29	0.32	0.33	0.00
9	0.14	0.15	0.16	0.23	0.00
10	0.29	0.30	0.44	0.44	0.00
11	0.12	0.12	0.19	0.18	0.00
<u>12</u>	0.22	0.26	0.26	0.21	0.00
<u>13</u>	0.22	0.27	0.56	0.52	0.00
14	0.07	0.04	0.10	0.11	0.00
<u>15</u>	0.04	0.04	0.08	0.01	0.00

表 5-12 赤蘭溪流域各模式預報結果之 CP 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件代號	CP	CP	CP	CP	CP
<u>1</u>	0.19	0.62	0.50	0.45	0.00
2	0.03	0.06	0.29	0.63	0.00
3	0.02	0.04	0.38	0.71	0.00
4	-0.03	0.21	0.73	0.53	0.00
5	0.14	0.17	-4.41	0.35	0.00
6	0.08	0.31	0.57	0.67	0.00
<u>7</u>	0.17	0.35	0.38	0.26	0.00
<u>8</u>	-0.27	0.33	0.45	0.61	0.00
9	0.25	0.25	0.48	0.24	0.00
10	0.38	0.41	0.60	0.60	0.00
11	0.18	0.21	0.71	0.52	0.00
12	0.33	0.70	0.75	0.65	0.00

註：預報驗證事件以粗體底線標示，灰底表示 CP 值最高之模式

表 5-13 曾文水庫集水區各模式預報結果之 RMSE 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件編號	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
1	118.78	139.03	111.28	113.28	107.52
2	79.62	79.62	92.51	79.08	85.25
3	65.15	65.09	80.27	50.94	69.88
4	369.83	330.49	315.88	304.37	345.31
5	520.19	487.28	457.62	445.30	584.95
6	348.94	324.27	313.23	331.57	385.31
7	49.18	49.18	58.24	40.82	56.38
8	301.01	293.24	286.45	285.31	348.64
9	142.22	141.81	141.21	134.85	153.70
10	207.54	206.76	185.05	183.71	246.36
11	194.41	194.41	185.81	187.18	206.76
12	507.50	494.80	492.64	508.84	573.53
13	197.83	191.74	147.87	155.42	223.67
14	504.88	512.44	497.35	494.05	523.52
15	239.94	239.94	235.83	244.20	245.36

表 5-14 赤蘭溪流域各模式預報結果之 RMSE 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件代號	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
1	94.55	64.58	74.11	77.62	104.92
2	15.13	14.94	12.97	9.38	15.38
3	28.17	27.83	22.30	15.32	28.42
4	31.97	28.03	16.25	21.63	31.50
5	5.54	5.46	13.93	4.81	5.99
6	21.75	18.86	14.90	13.01	22.63
7	66.83	59.02	57.53	62.75	73.16
8	33.79	24.53	22.14	18.78	29.92
9	72.55	72.55	60.06	72.69	83.54
10	56.64	55.39	45.70	45.48	71.99
11	40.46	39.71	24.03	31.01	44.81
12	50.43	34.08	30.78	36.35	61.72

註：預報驗證事件以粗體底線標示，灰底表示 CP 值最高之模式

5.6.2 各模式之峰值時刻的預報誤差評估與比較

對於曾文水庫集水區而言，在峰值時刻的預報誤差表現方面，是考慮 rain-burst 的 AR(2)模式和反應函數模式比較好，而在赤蘭溪流域則是考慮 rain-burst 的 AR(2)模式和調適性反應函數比較好。結果顯示單純考量突增的暴雨增加量，確實提高了峰值預報的準確度，像是曾文水庫集水區的事件 4 和事件 6，其餘模式的峰值時刻的預報誤差皆在 20%~40%之間，但是考慮了 rain-burst 效應後的 AR(2)模式卻能將誤差降到 10%以下，而赤蘭溪流域的事件 4、事件 7 和事件 8 以考慮 rain-burst 效應的 AR(2)模式預報，也大幅降低了峰值時刻的預報誤差，這顯示了考慮 rain-burst 效應不一定能大幅改善預報延遲的問題，但是卻能大幅提高峰值時刻預報的準確度。

綜合以上論述，如果單就峰值預報來看，考慮 rain-burst 的 AR(2)模式表現最優異，以此模式做預報，最能夠大幅改善峰值預報的誤差，但若是以整體性來說，則是以調適性反應函數模式表現最好，因為不管是針對任何類型的流量事件，其預報之 CP 值都能達到一定水準，這顯示在整體預報評估上，其預報延遲的問題最小，對於整體流量趨勢的預測也最為準確。

表 5-15 曾文水庫集水區各模式預報結果之 $EPT_p(\%)$ 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件編號	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$
1	20.23	80.75	75.36	28.11	-0.40
2	-20.10	-20.10	-3.15	-20.24	-30.74
3	-11.03	-11.03	-0.37	-10.24	-17.68
<u>4</u>	-38.96	-6.38	-28.03	-29.88	-36.88
5	-0.87	-0.87	0.22	4.03	-7.38
6	-22.46	2.71	-20.85	-21.57	-33.92
7	-11.93	-11.93	-11.26	-12.62	-15.92
<u>8</u>	-11.37	-11.37	-17.77	-19.58	-16.77
9	-12.78	-12.78	-10.97	-13.67	-13.95
10	-7.37	-6.88	-3.18	-3.58	-11.44
11	-21.40	-21.40	-16.98	-16.50	-18.80
<u>12</u>	1.65	1.65	-7.31	-6.30	-9.40
<u>13</u>	-13.66	-13.66	-14.97	-15.41	-13.93
14	-13.39	-13.39	-15.89	-15.33	-17.12
<u>15</u>	-3.69	-3.69	-5.03	-8.97	-7.88

表 5-16 赤蘭溪流域各模式預報結果之 $EPT_p(\%)$ 值

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5
事件代號	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$	$EPT_p(\%)$
<u>1</u>	-3.59	9.38	2.96	14.61	-17.58
2	19.70	19.70	-8.19	3.06	-6.48
3	-35.39	-35.39	-2.70	-3.50	-23.22
4	-56.45	-0.52	-12.93	-35.75	-55.05
5	11.22	11.22	-48.51	-14.25	-7.56
6	-9.28	-9.28	-1.65	-2.22	-9.47
<u>7</u>	-34.71	-21.26	-25.84	-28.73	-43.20
<u>8</u>	-87.86	-29.86	-41.74	-57.56	-89.47
9	-4.68	-4.68	-5.54	-5.73	-5.78
10	-0.75	5.37	0.16	-1.46	-4.48
11	-2.36	-2.36	-1.88	-3.02	-2.59
12	2.66	2.66	3.18	8.03	-10.21

註：預報驗證事件以粗體底線標示，灰底表示 CP 值最高之模式

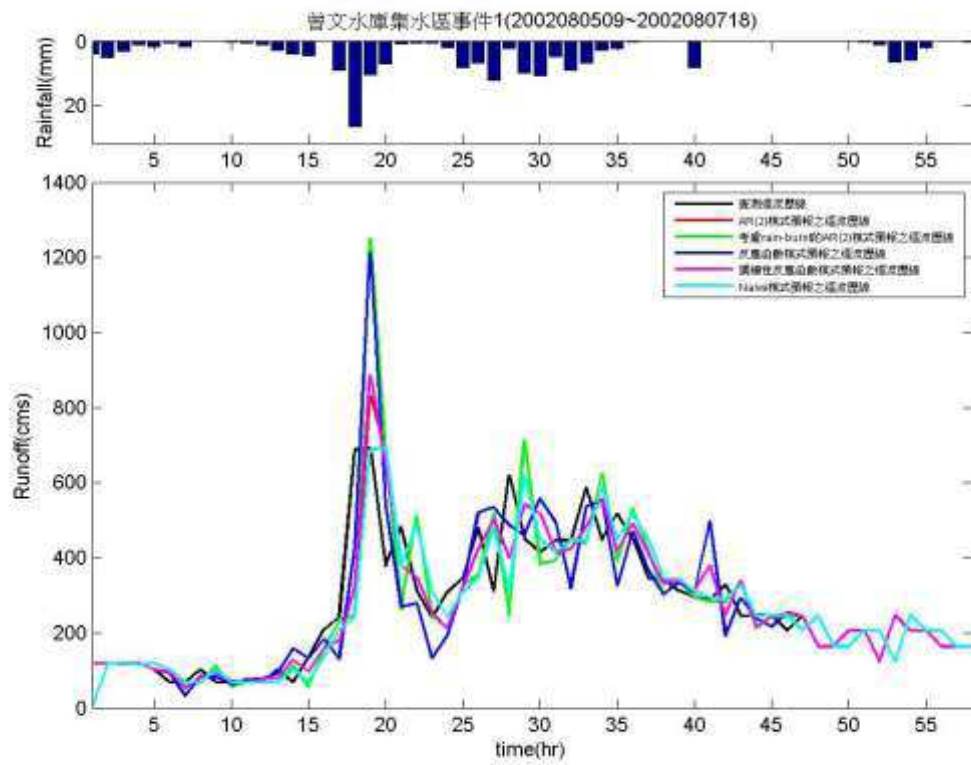


圖 5-23 曾文水庫集水區事件 1 之五個模式預報結果

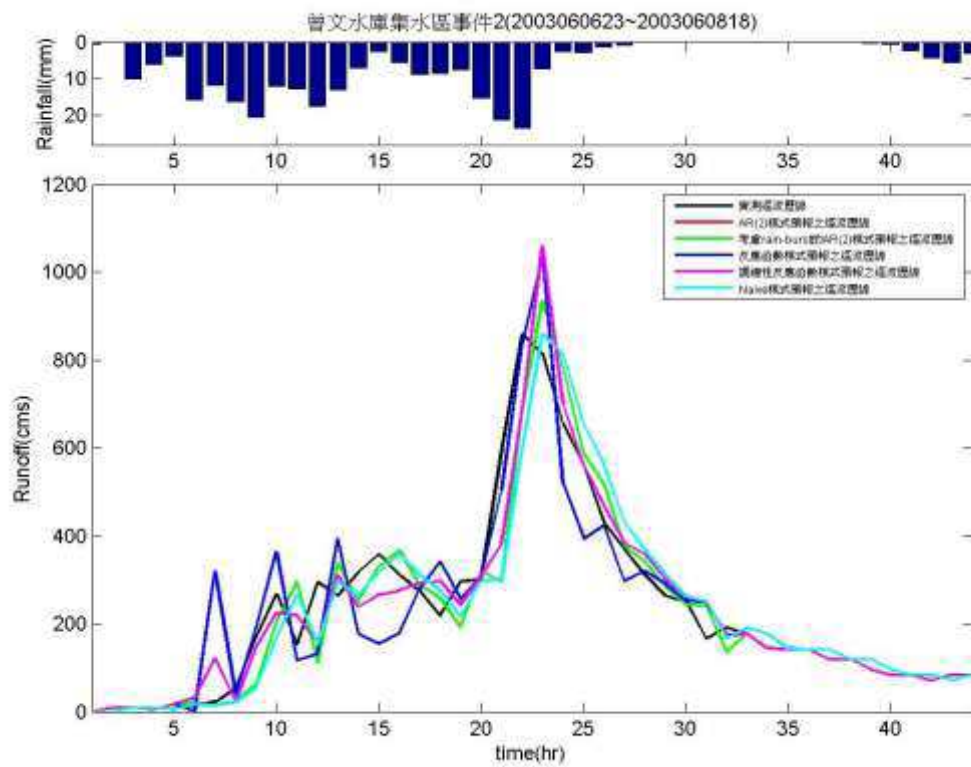


圖 5-24 曾文水庫集水區事件 2 之五個模式預報結果

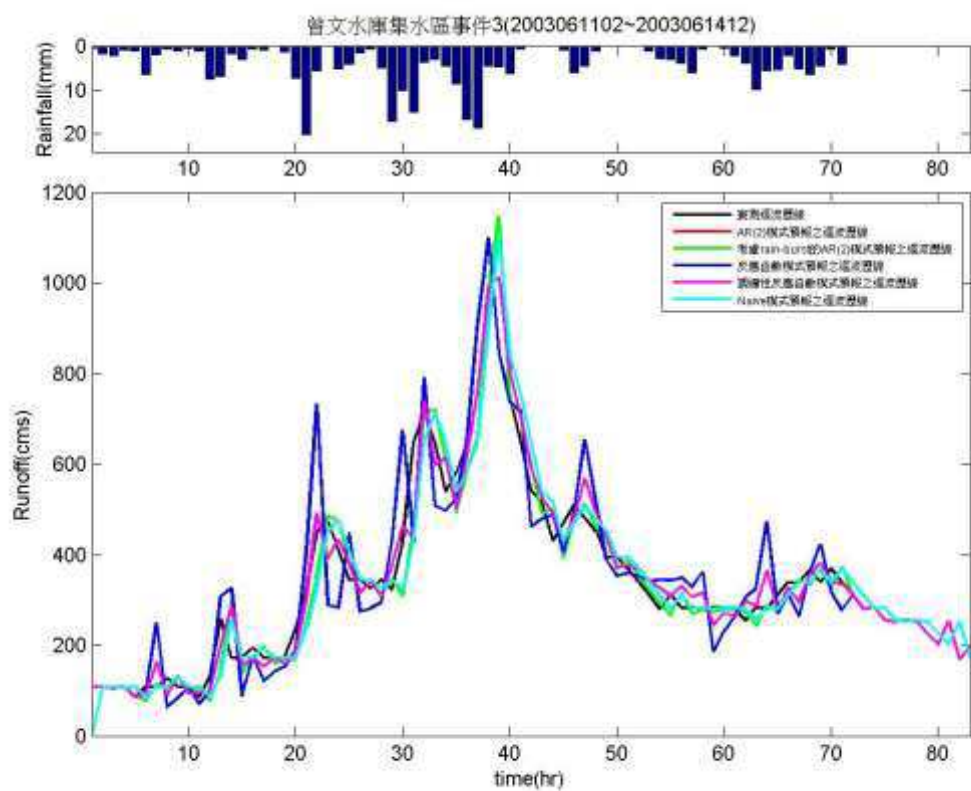


圖 5-25 曾文水庫集水區事件 3 之五個模式預報結果

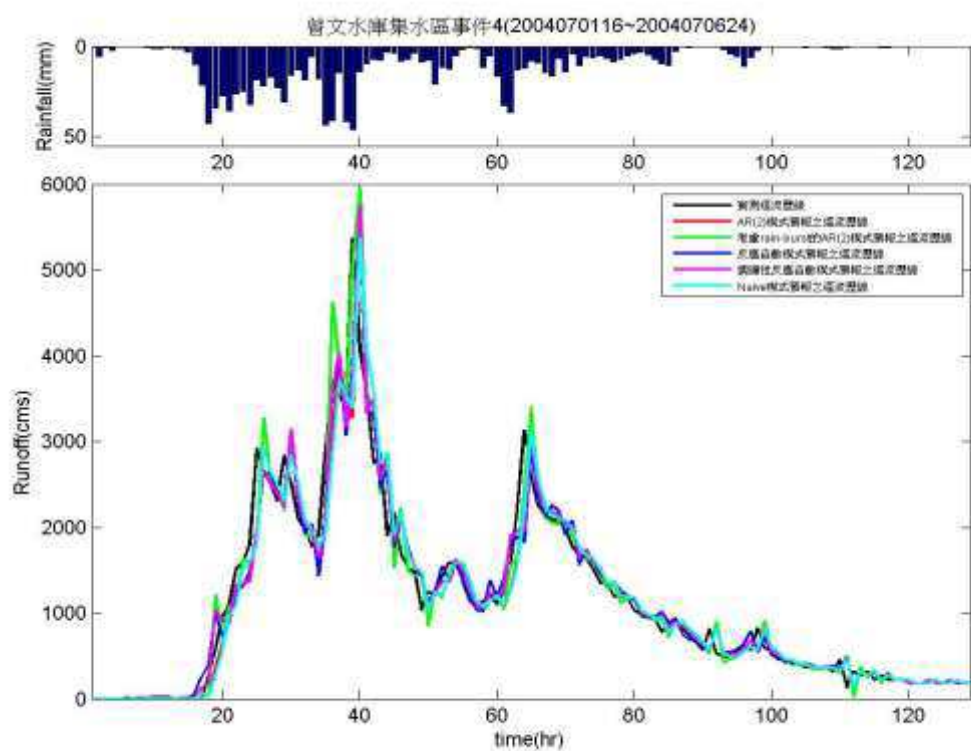


圖 5-26 曾文水庫集水區事件 4 之五個模式預報結果

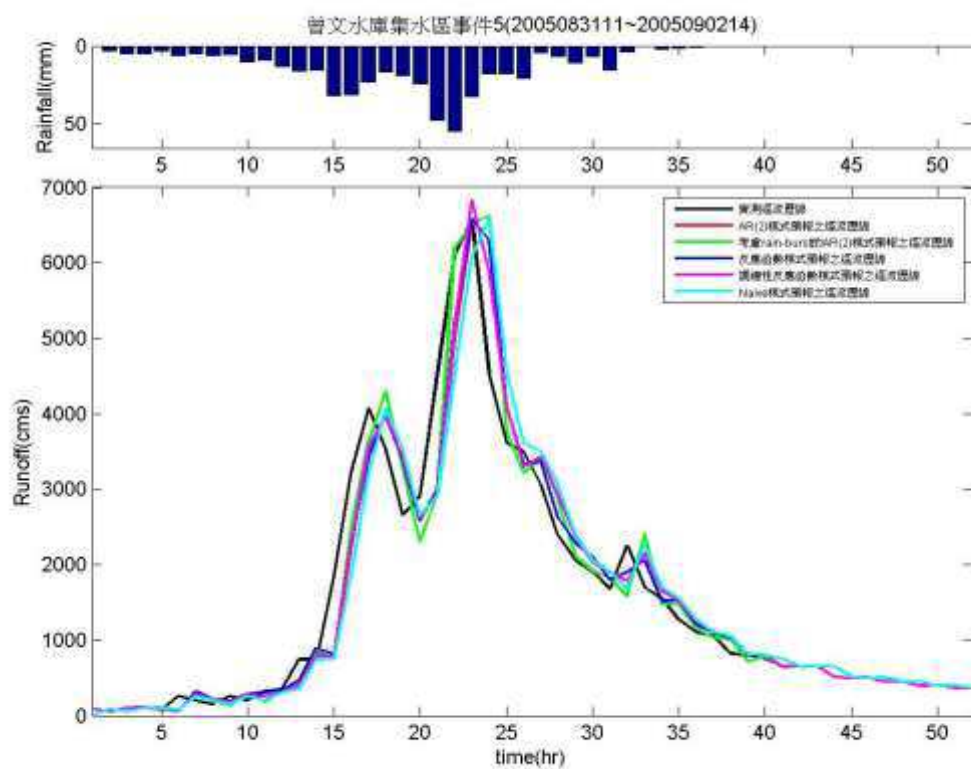


圖 5-27 曾文水庫集水區事件 5 之五個模式預報結果

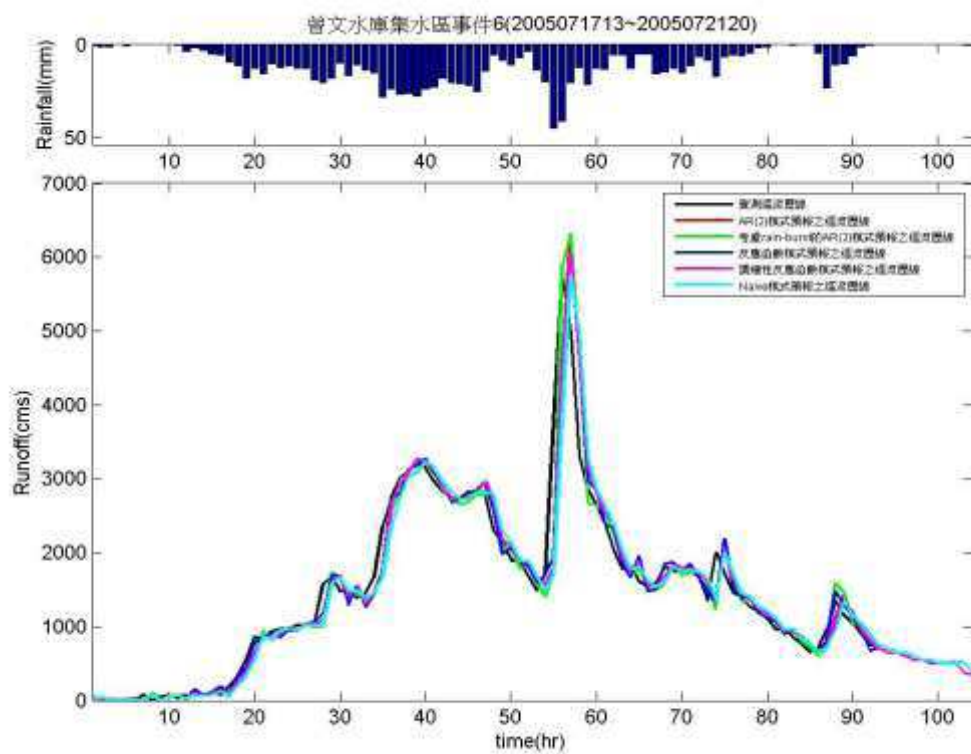


圖 5-28 曾文水庫集水區事件 6 之五個模式預報結果

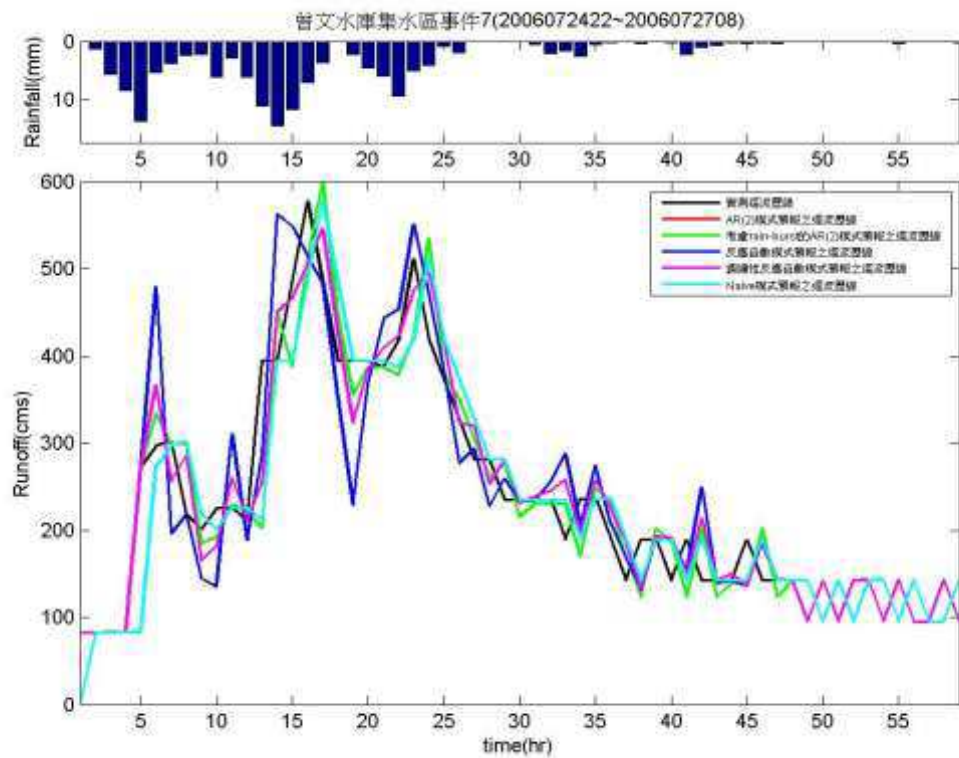


圖 5-29 曾文水庫集水區事件 7 之五個模式預報結果

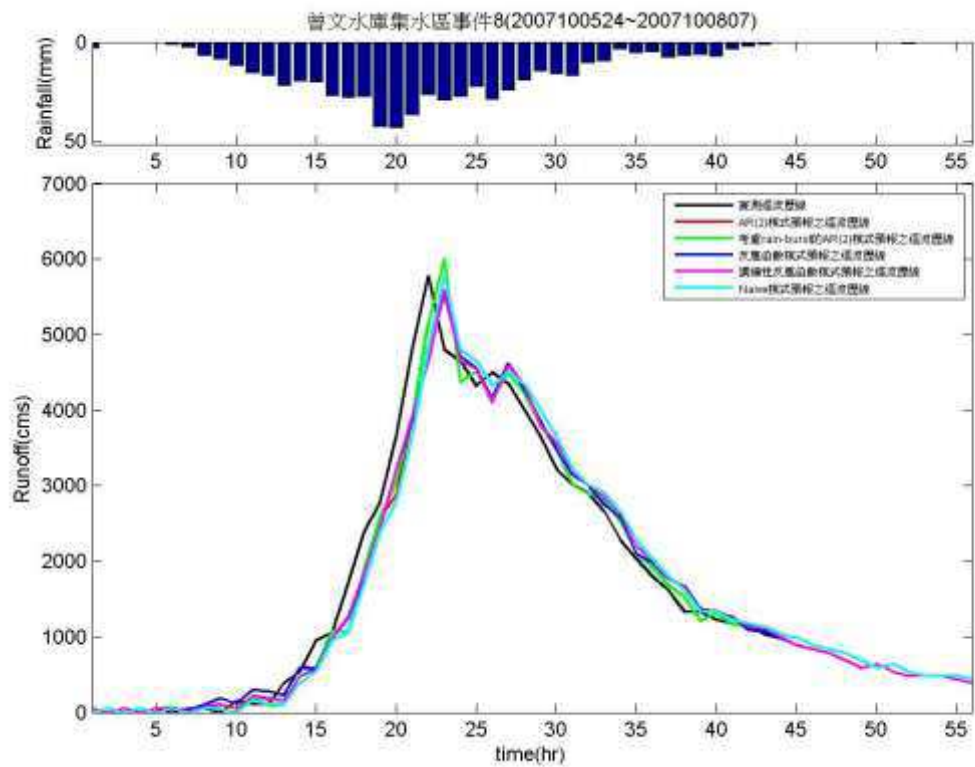


圖 5-30 曾文水庫集水區事件 8 之五個模式預報結果

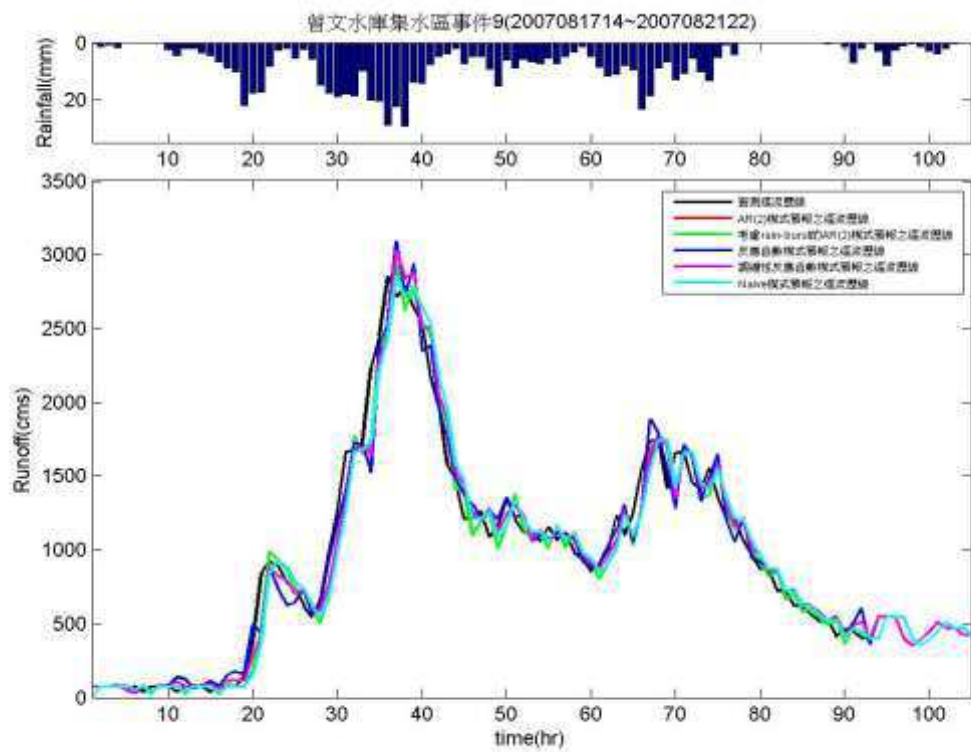


圖 5-31 曾文水庫集水區事件 9 之五個模式預報結果

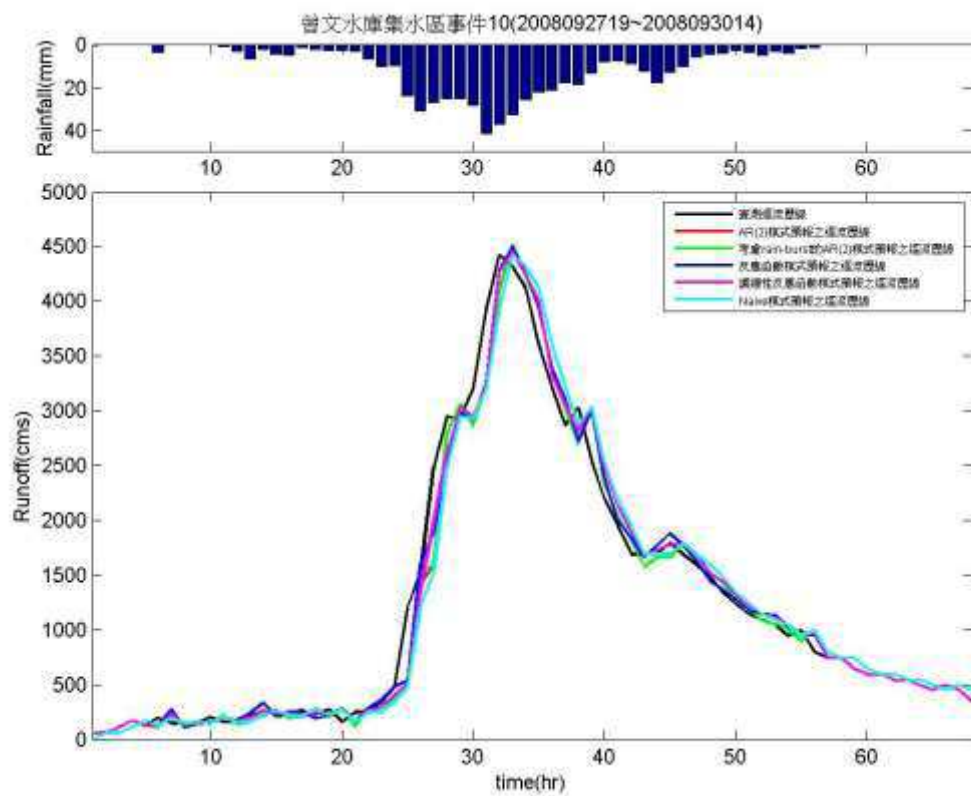


圖 5-32 曾文水庫集水區事件 10 之五個模式預報結果

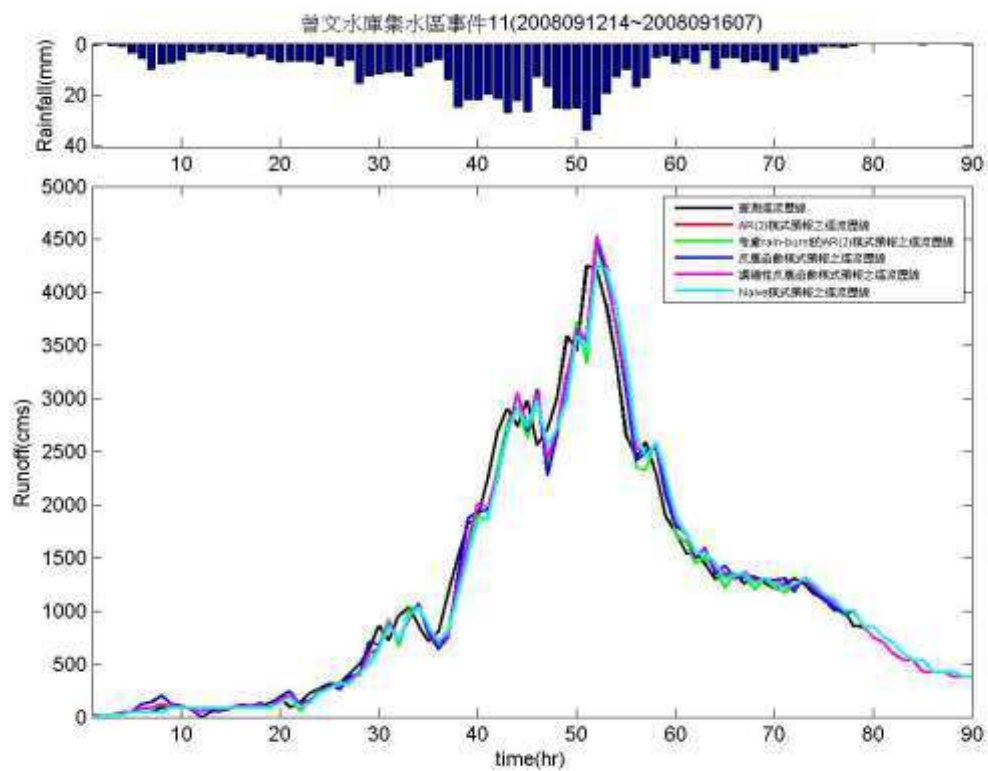


圖 5-33 曾文水庫集水區事件 11 之五個模式預報結果

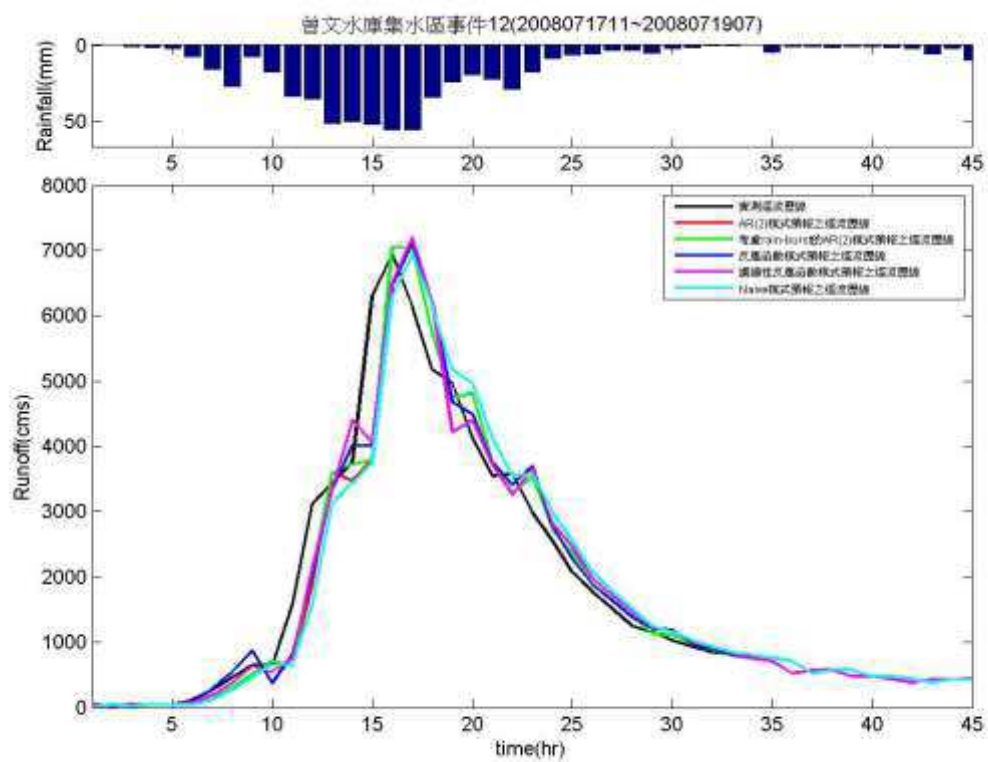


圖 5-34 曾文水庫集水區事件 12 之五個模式預報結果

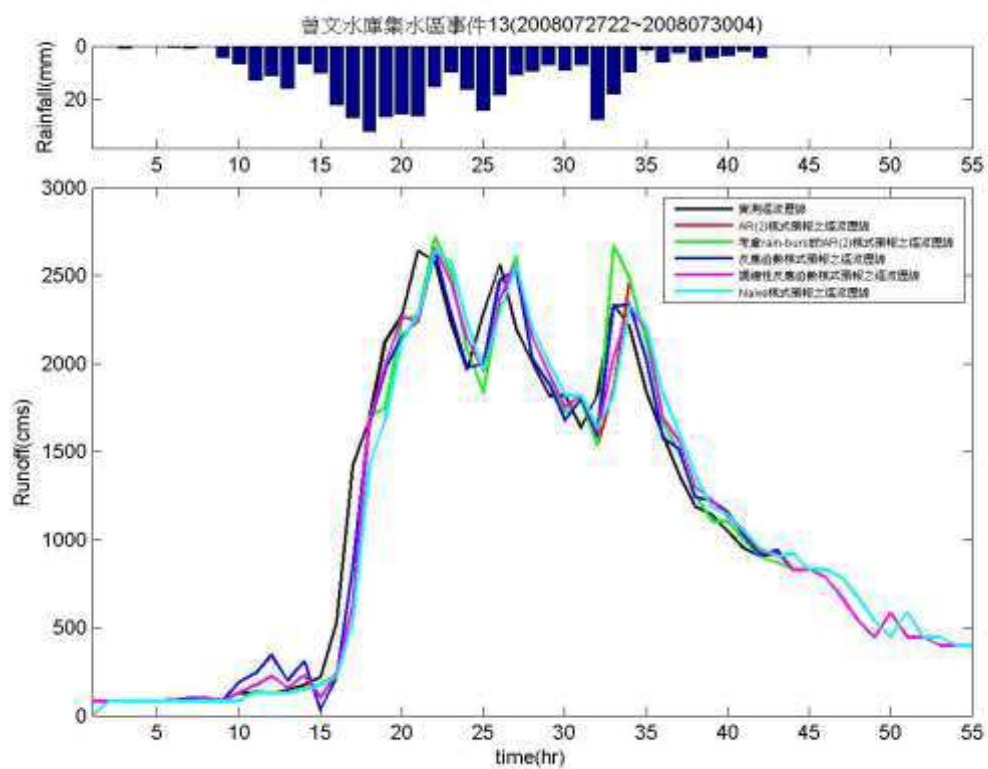


圖 5-35 曾文水庫集水區事件 13 之五個模式預報結果

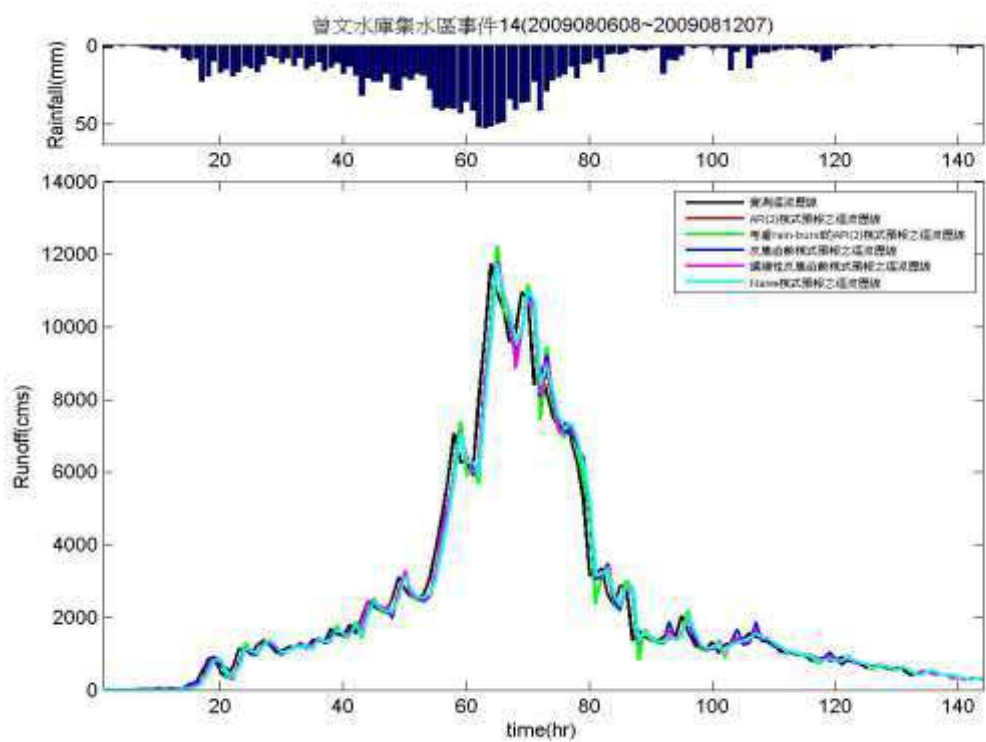


圖 5-36 曾文水庫集水區事件 14 之五個模式預報結果

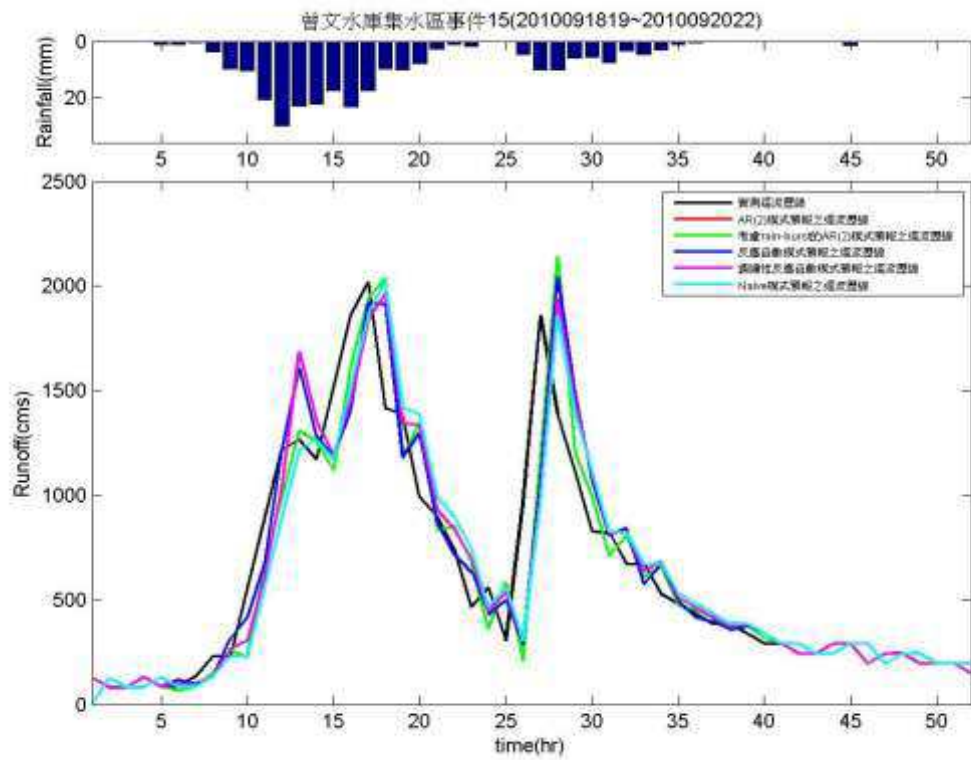


圖 5-37 曾文水庫集水區事件 15 之五個模式預報結果

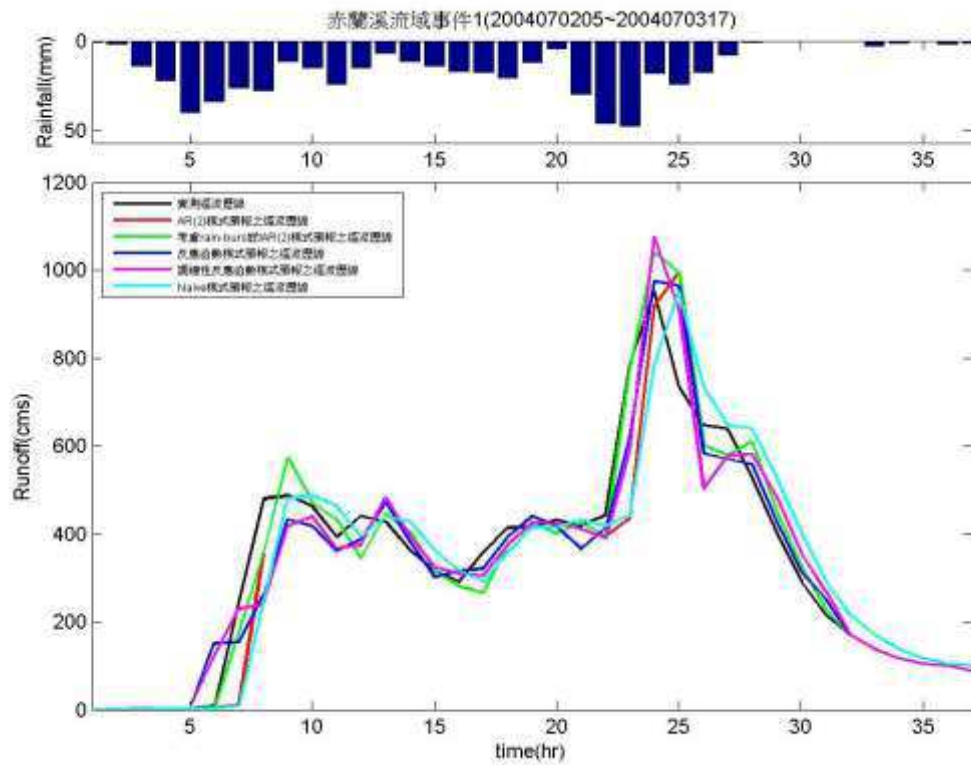


圖 5-38 赤蘭溪流域事件 1 之五個模式預報結果

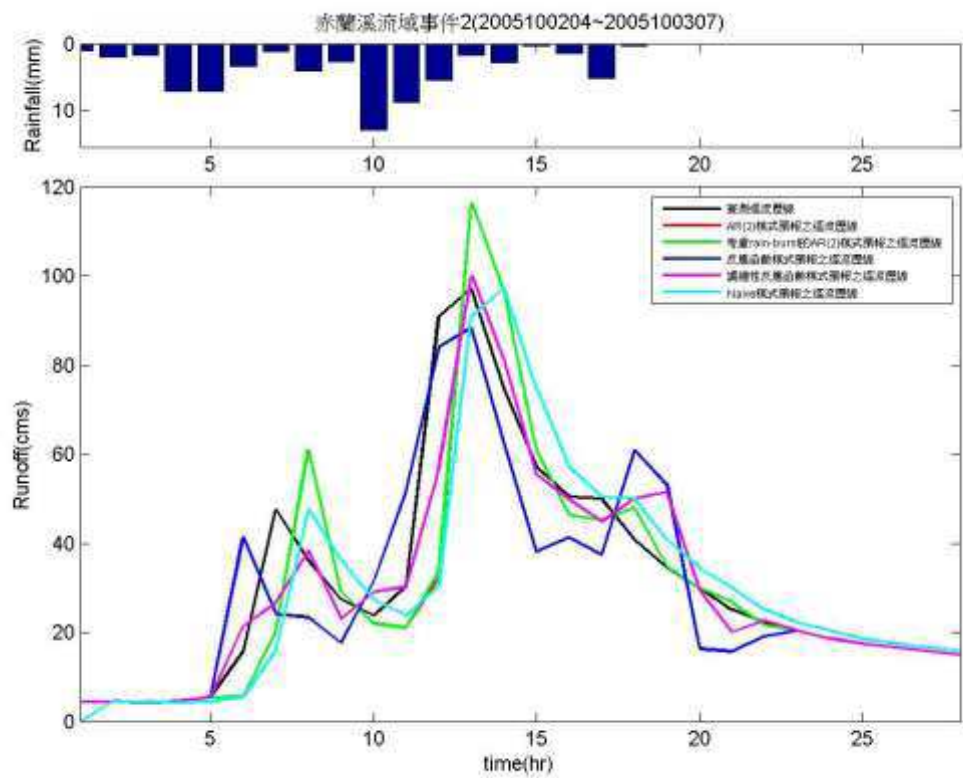


圖 5-39 赤蘭溪流域事件 2 之五個模式預報結果

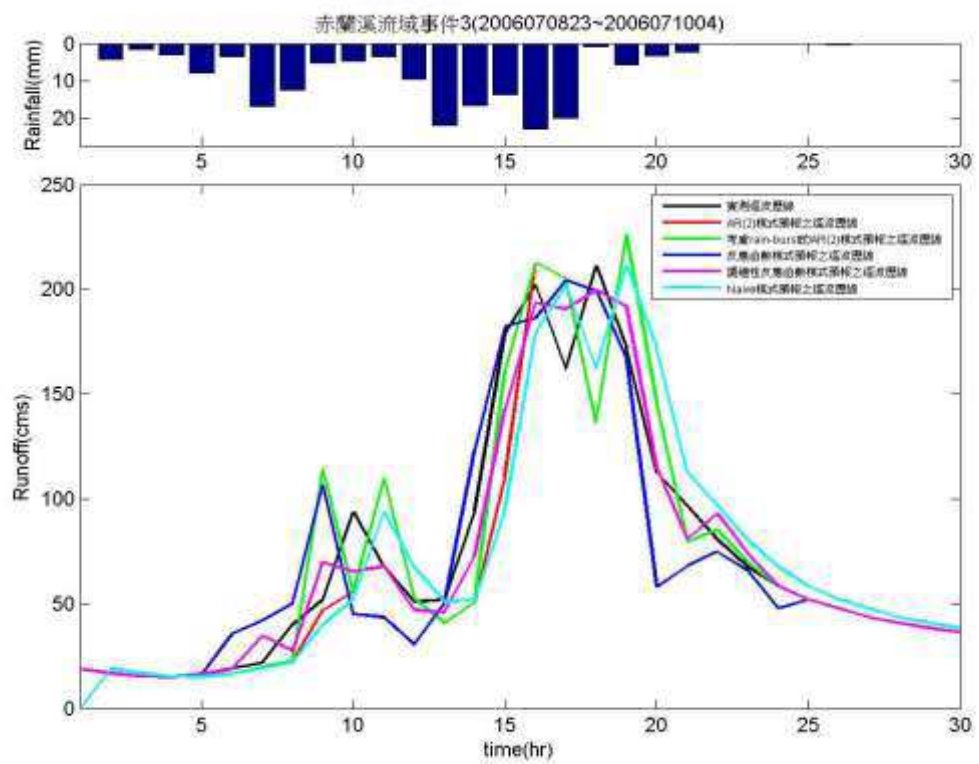


圖 5-40 赤蘭溪流域事件 3 之五個模式預報結果

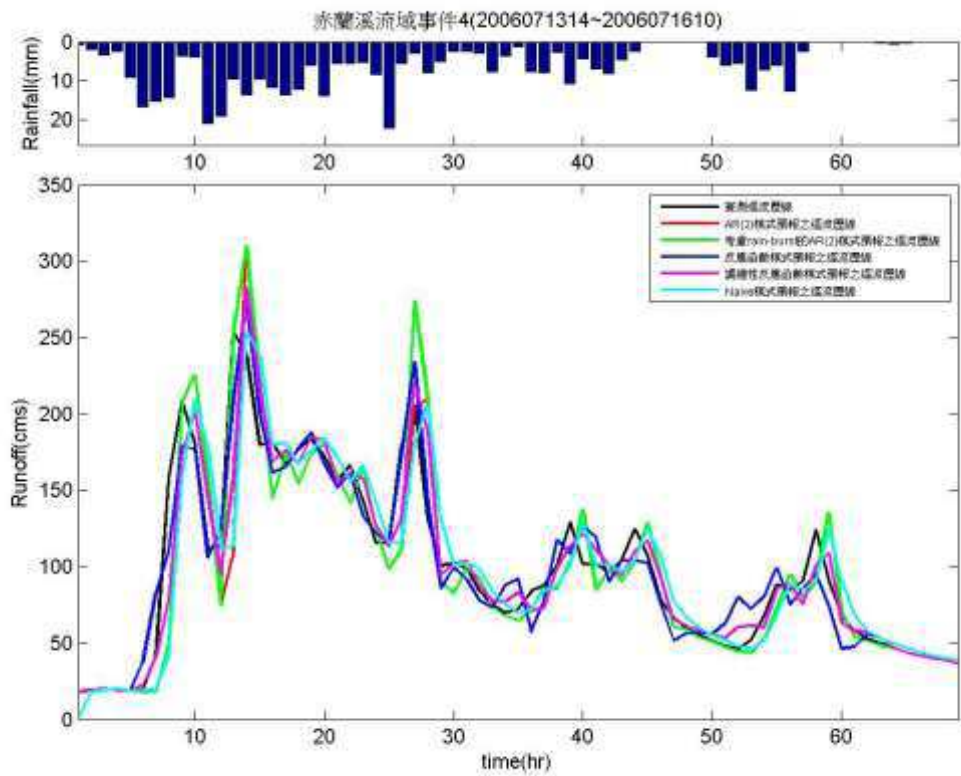


圖 5-41 赤蘭溪流域事件 4 之五個模式預報結果

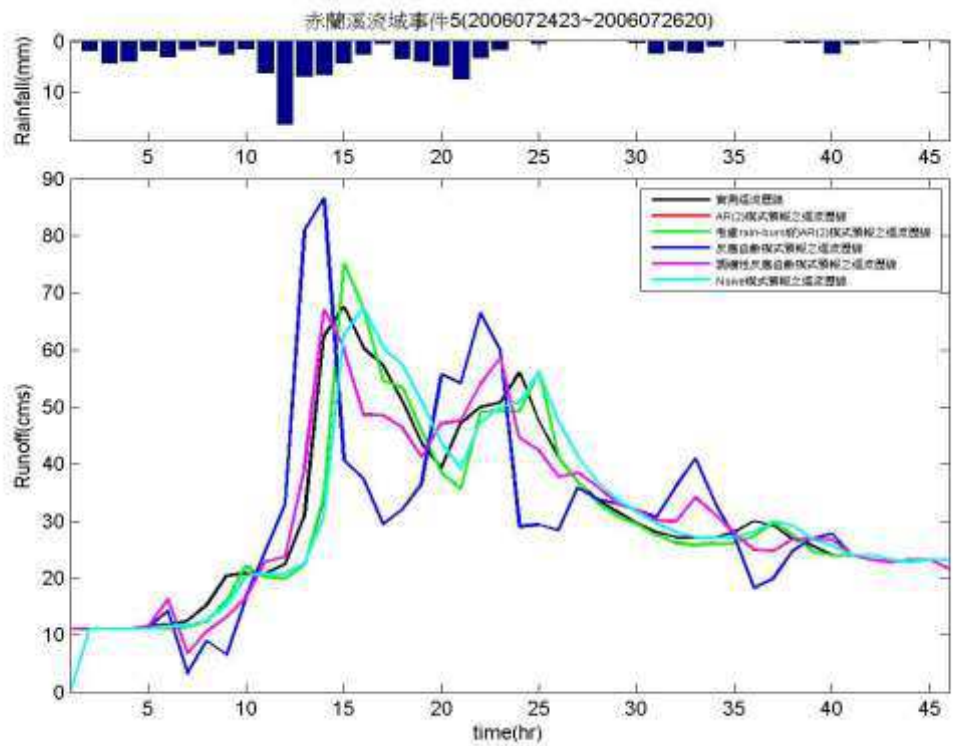


圖 5-42 赤蘭溪流域事件 5 之五個模式預報結果

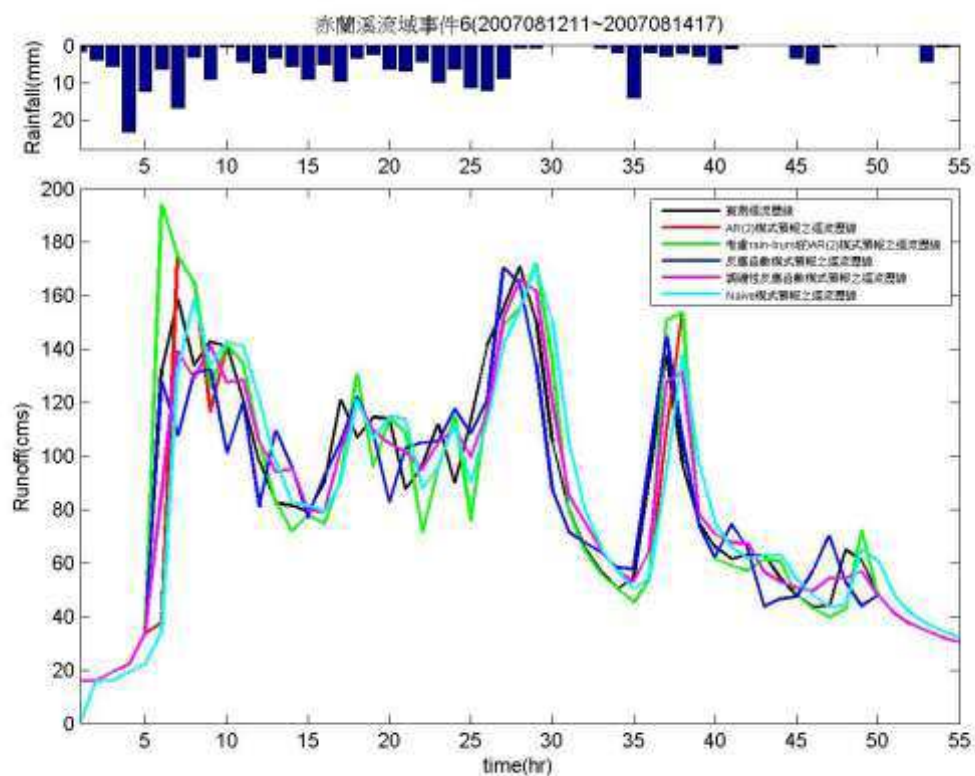


圖 5-43 赤蘭溪流域事件 6 之五個模式預報結果

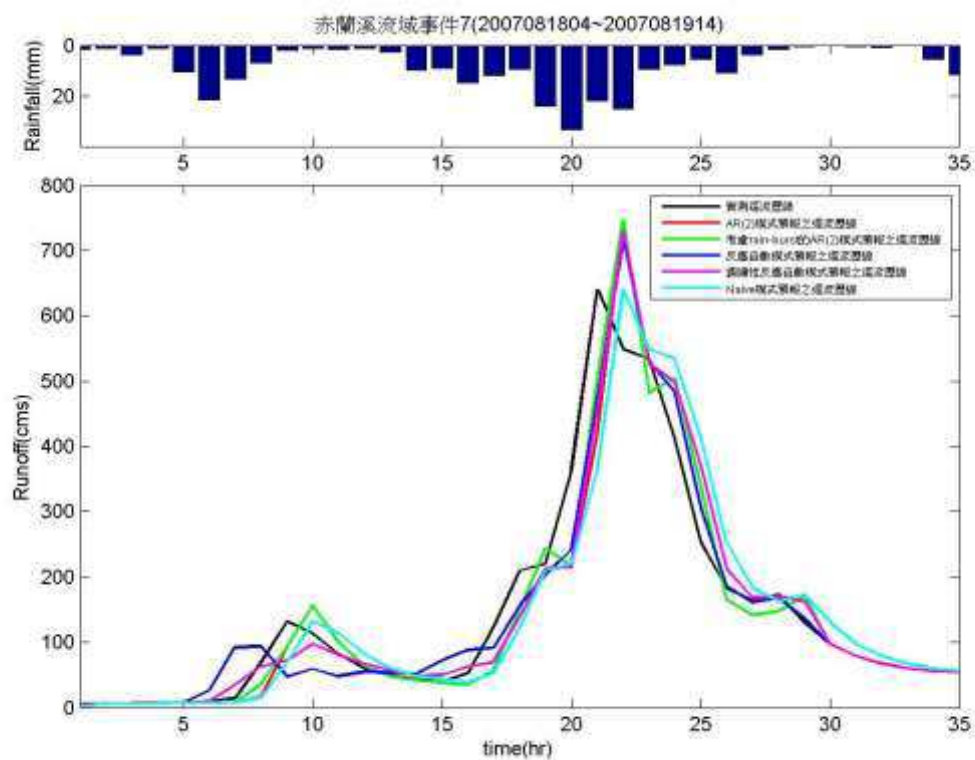


圖 5-44 赤蘭溪流域事件 7 之五個模式預報結果

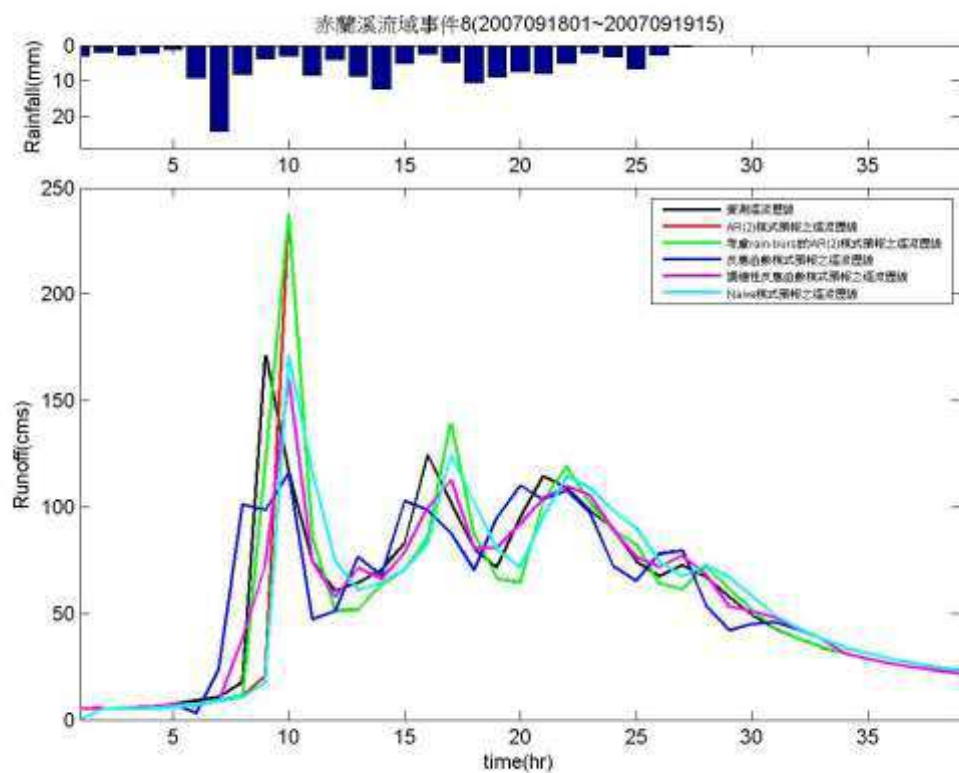


圖 5-45 赤蘭溪流域事件 8 之五個模式預報結果

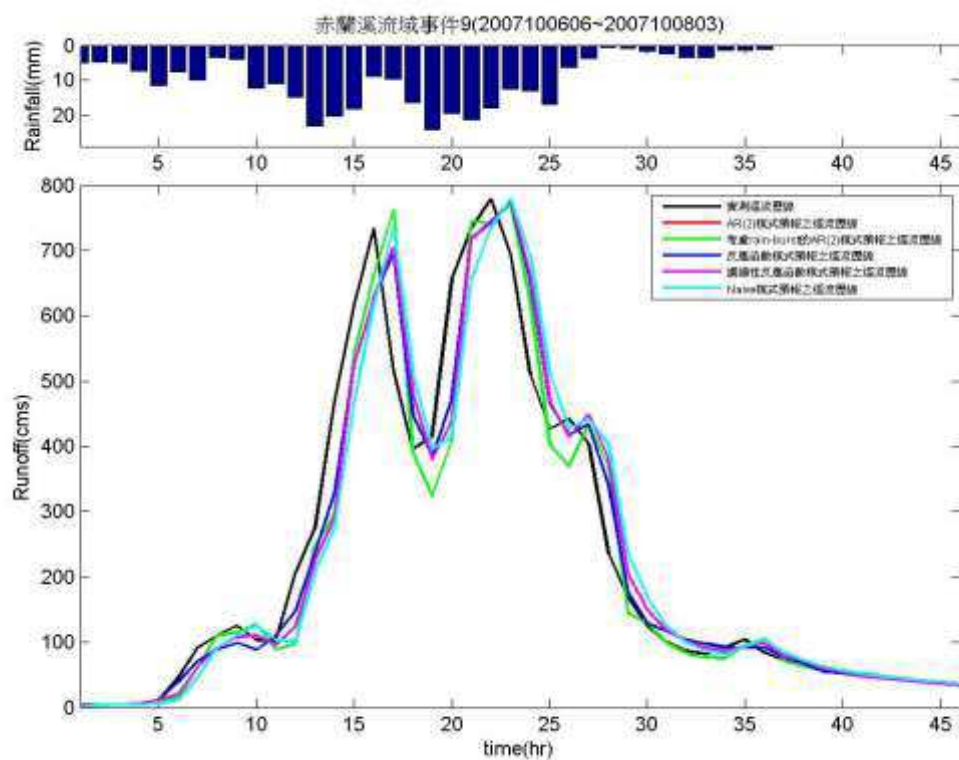


圖 5-46 赤蘭溪流域事件 9 之五個模式預報結果

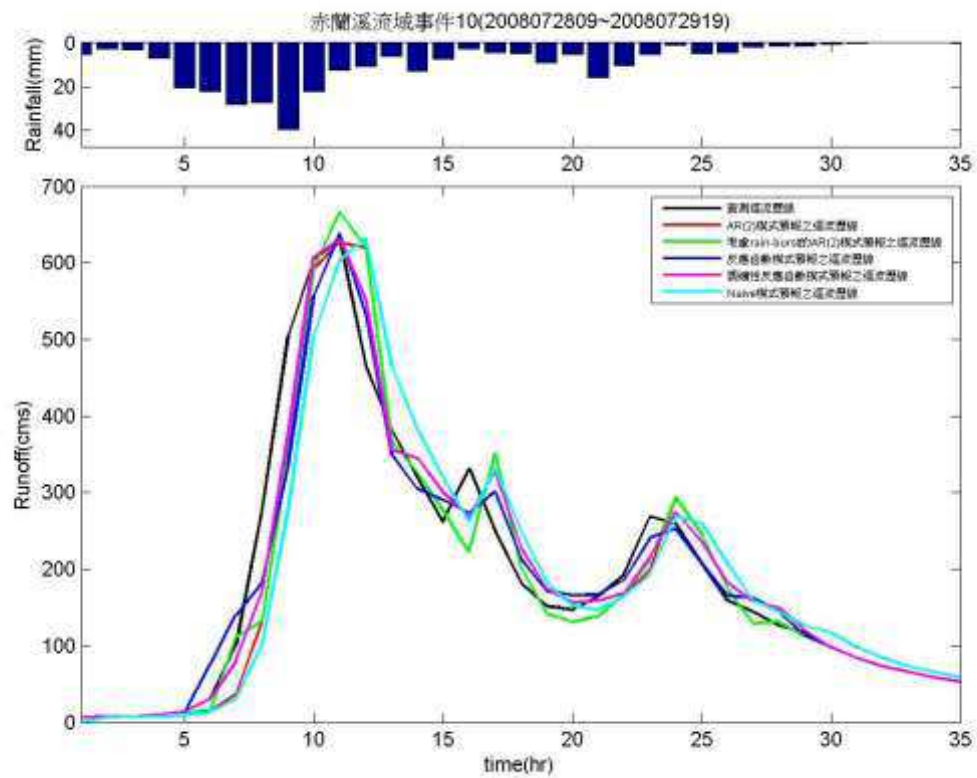


圖 5-47 赤蘭溪流域事件 10 之五個模式預報結果

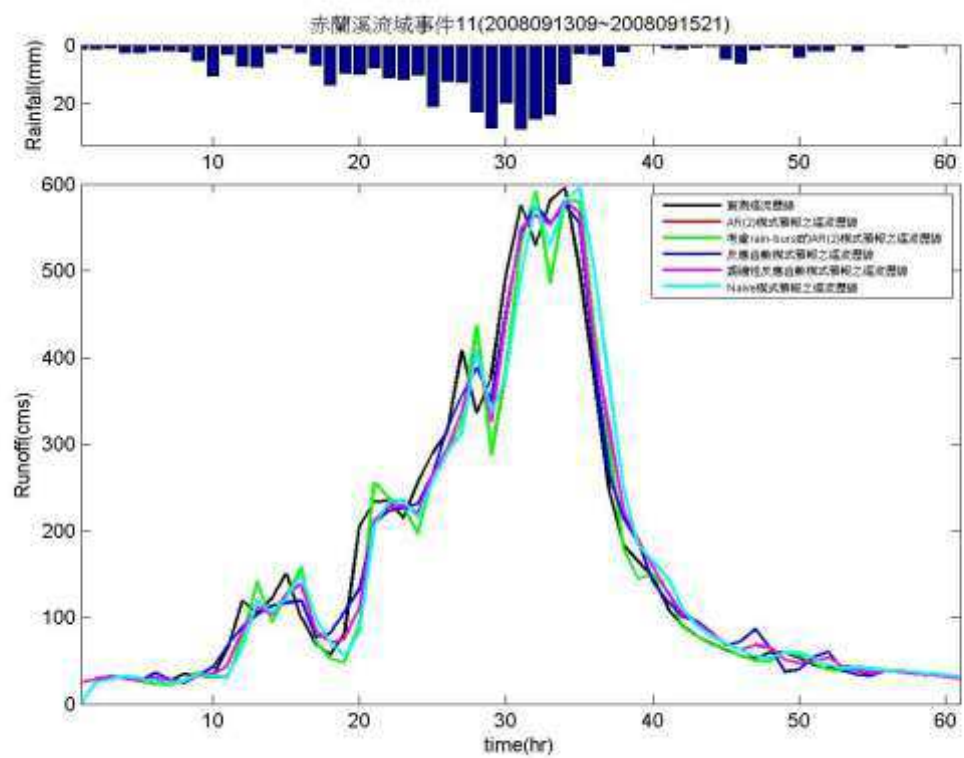


圖 5-48 赤蘭溪流域事件 11 之五個模式預報結果

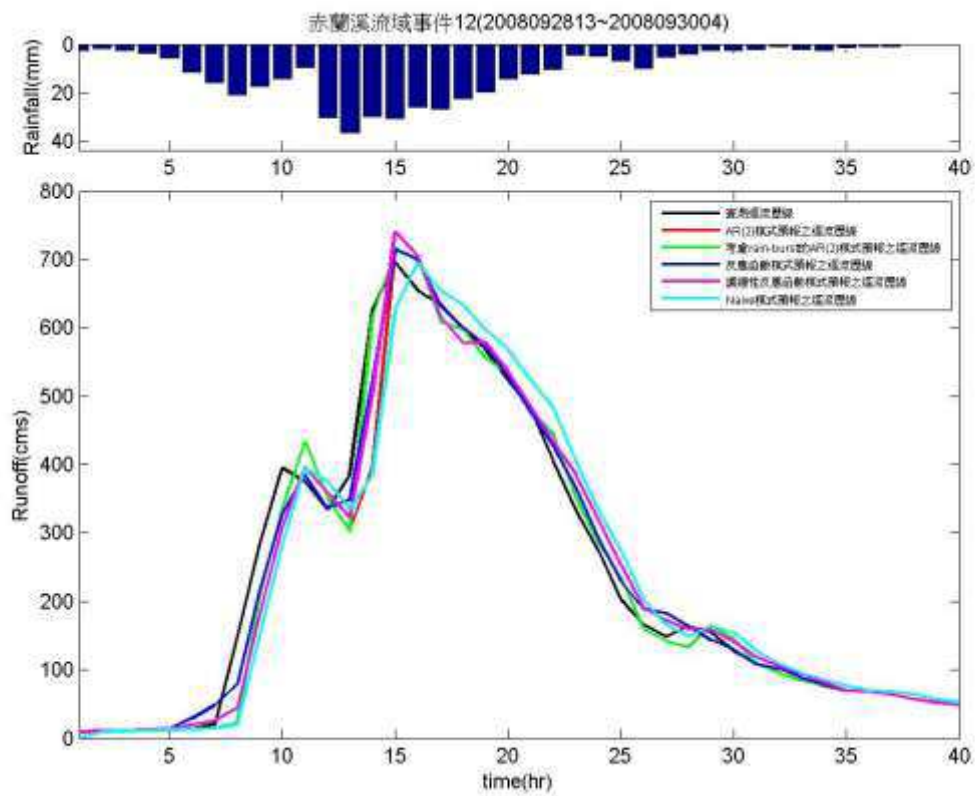


圖 5-49 赤蘭溪流域事件 12 之五個模式預報結果



第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 以 AR(2)模式做預報會有明顯的預報延遲現象，而考慮 rain-burst 的 AR(2)模式雖可以大幅提升峰值預報的準確度，但對於其他時刻之預報延遲現象並無明顯改善。
2. 反應函數模式與調適性反應函數模式，考量了整體雨量變化的趨勢，所以大幅降低了預報延遲現象所產生的誤差問題，其中調適性反應函數模式更考量到流量大小與 U 值的關係，因此整體而言，五個模式中以調適性反應函數模式的預報結果表現最佳，不管是針對哪場流量事件做預報，其 CP 值和峰值預報準確度皆能達到一定程度。
3. 理論上只要是同一集水區或流域，即使是不同流量事件，其所推導出之單位歷線應該要一樣，可是從研究結果上來看，不管是曾文水庫集水區或是赤蘭溪流域降雨逕流事件的單位歷線，皆有明顯差異，這應是由於降雨時間、空間不均所導致的，違背了單位歷線的假設，因此造成了不同降雨逕流事件會有不同單位歷線的情形。
4. 因為不符單位歷線的假設，所以只能將雨量差對流量差的反應函數視為一單純的線性迴歸方程式，代表雨量差之大小與流量差之大小成一線性正比關係。
5. 各模式預報之相關係數值和效率係數值對於大部分事件都可達 0.8 以上，顯示對於預報流量事件而言，相關係數和持續係數的評估並不客觀，無法真正比較模式間的優劣，但從持續係數和均方跟差就可看出各模式預報結果有明顯的不同。

6.2 建議

1. 以考慮 rain-burst 的 AR(2)模式做預報時，有發現過早修正的情形，顯示雨量反應為流量的時間差並不為一定值，以曾文水庫集水區為例，若今天在 t 時刻觀測到 rain-burst 的發生，即是這個時刻的雨量比前個時刻的雨量高出 13mm 以上，那依照定義就會在 $t+1$ 時刻進行流量預報值的修正，但是判定 rain-burst 的依據是平均雨量，並無考慮到降雨位置，從圖 3-1 來看就可了解其實各雨量站與水庫的距離相差很多，就單一雨量站來看，在水山測站和樂野測站所觀測到 rain-burst 反應為流量的時間有比在其他測站長的跡象，這應該是距離所導致的緣故，因此未來可以針對此部分進行不同反應時間的考量。
2. 本研究之即時流量預報模式只預測 1 小時後的流量，考量現實情況，能預測 2 小時至 3 小時後的流量才比較能夠實際運用於降低洪災損失上，因為這樣才有足夠的反應時間。對於曾文水庫而言，雖然大部分降雨逕流事件之反應時間為 1 小時，但依然可利用水山、樂野等集流時間較長之雨量站之資料，預報曾文水庫集水區 2 小時後的流量，而赤蘭溪流域之反應時間為 2 小時，就可直接應用雨量資料預報赤蘭溪流域 2 小時後的流量，至於 3 小時以上的流量預報就比較困難，必須進行雨量資料的模擬才可進行。

參考文獻

1. 王如意、易任(1998)，「由複合暴雨推求單位歷線」，應用水文學上冊，pp.429-440。
2. 王俊欽(2001)，「基隆河流域洪流時序分析模式」，私立中原大學土木工程研究所碩士論文。
3. 陳伶姮(2001)，「河川旬流量時間序列之研究—以石門水庫入流量為例」，國立海洋大學河海工程研究所碩士論文。
4. 陳昶憲、康村啟、林榮坤(1994)，「八掌溪流域洪流量預測」，八十三年度農業工程研討會期刊，pp. 429-441。
5. 陳昶憲、劉錦蕙(2003)，「時序與灰色時流量預測模式效能比較」，台灣水利季刊，第 51 卷，第 4 期，pp. 68-78。
6. 虞國興、倪佩君(1999)，「高屏溪流域流量分析與預測—時間序列法」，財團法人曹公農業水利研究發展基金會 1999 年度研究報告。
7. 虞國興、吳啟瑞(2000)，「高屏溪流域流量分析與預測—時間序列法(二)」，財團法人曹公農業水利研究發展基金會 2000 年度研究報案。
8. 鍾侑達(2007)，「以類神經模糊推理修正水位預測之一階延遲現象」，私立逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
9. Wu, C.L., Chau, K.W. (2010) Data-driven models for monthly streamflow time series prediction. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.23, pp.1350–1367.
10. Toth , E., Brath, A., and Montanari, A. (2000) Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. Journal of Hydrology , Vol.239, pp. 132–147.
11. Robert, J., Alison, J., and Linda, M. (2007) Timing error correction procedure

applied to neural network rainfall–runoff modeling. Hydrological Sciences–
Journal–des Sciences Hydrologiques, Vol.52, pp.414-431

12. Tingsanchali, T., and Gautam ,M. R. (2000) Application of tank, NAM, ARMA and
neural network models to flood forecasting. hydrological processes, Vol.14,
pp.2473-2487.



附錄



表 A1. 曾文水庫集水區各流量事件之起訖時間與事件代號

事件代號	起訖時間(年/月/日/小時)
1	2002/08/05/09 ~ 2002/08/07/18
2	2003/06/06/23 ~ 2003/06/08/18
3	2003/06/11/02 ~ 2003/06/14/12
4	2004/07/01/16 ~ 2004/07/06/24
5	2005/08/31/11 ~ 2005/09/02/14
6	2005/07/17/13 ~ 2005/07/21/20
7	2006/07/24/22 ~ 2006/07/27/08
8	2007/10/05/24 ~ 2007/10/08/07
9	2007/08/17/14 ~ 2007/08/21/22
10	2008/09/27/19 ~ 2008/09/30/14
11	2008/09/12/14 ~ 2008/09/16/07
12	2008/07/17/11 ~ 2008/07/19/07
13	2008/07/27/22 ~ 2008/07/30/04
14	2009/08/06/08 ~ 2009/08/12/07
15	2010/09/18/19 ~ 2010/09/20/22

表 A2. 赤蘭溪流域各流量事件之起訖時間與事件代號

事件代號	起訖時間(年/月/日/小時)
1	2004/07/02/05 ~ 2004/07/03/17
2	2005/10/02/04 ~ 2005/10/03/07
3	2006/07/08/23 ~ 2006/07/10/04
4	2006/07/13/14 ~ 2006/07/16/10
5	2006/07/24/23 ~ 2006/07/26/20
6	2007/08/12/11 ~ 2007/08/14/17
7	2007/08/18/04 ~ 2007/08/19/14
8	2007/09/18/01 ~ 2007/09/19/15
9	2007/10/06/06 ~ 2007/10/08/03
10	2008/07/28/09 ~ 2008/07/29/19
11	2008/09/13/09 ~ 2008/09/15/21
12	2008/09/28/13 ~ 2008/09/30/04

表 A3. 研究區域各流量事件 AR(2)模式參數值

曾文水庫集水區	事件代號	φ_1	φ_2	赤蘭溪流域	事件代號	φ_1	φ_2
	1	0.70	0.25		1	1.37	-0.42
	2	1.28	-0.33		2	1.17	-0.26
	3	1.22	-0.24		3	1.17	-0.23
	4	0.92	0.05		4	1.14	-0.19
	5	1.41	-0.46		5	1.28	-0.31
	6	1.39	-0.42		6	1.25	-0.29
	7	0.97	0.01		7	1.32	-0.40
	8	1.50	-0.51		8	0.86	0.05
	9	1.31	-0.32		9	1.44	-0.48
	10	1.55	-0.57		10	1.56	-0.62
	11	1.30	-0.32		11	1.40	-0.42
	12	1.43	-0.47		12	1.55	-0.58
	13	1.38	-0.40				
	14	1.25	-0.27				
	15	1.16	-0.22				

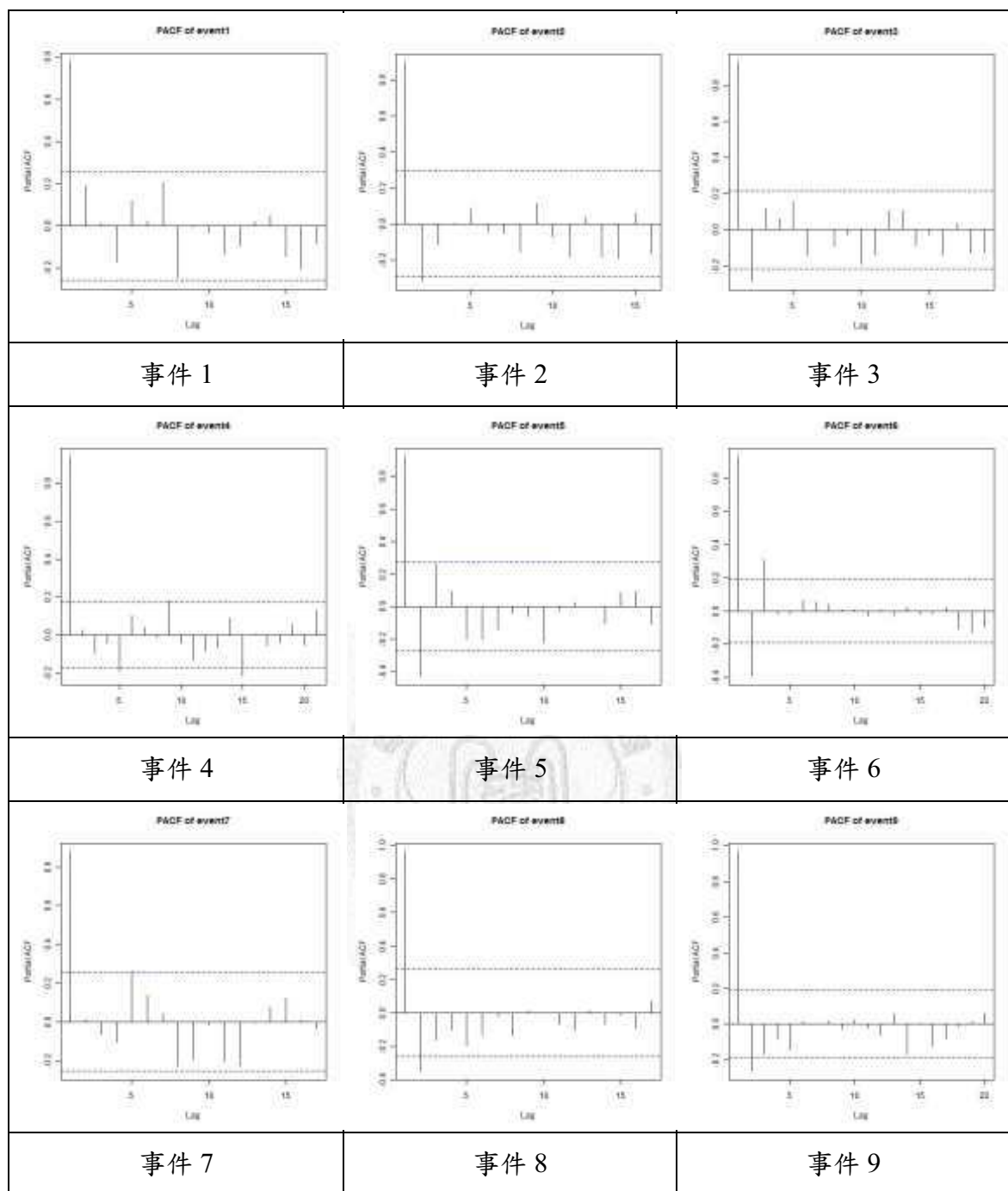


圖 A1. 曾文水庫集水區各事件流量資料之 PACF 圖

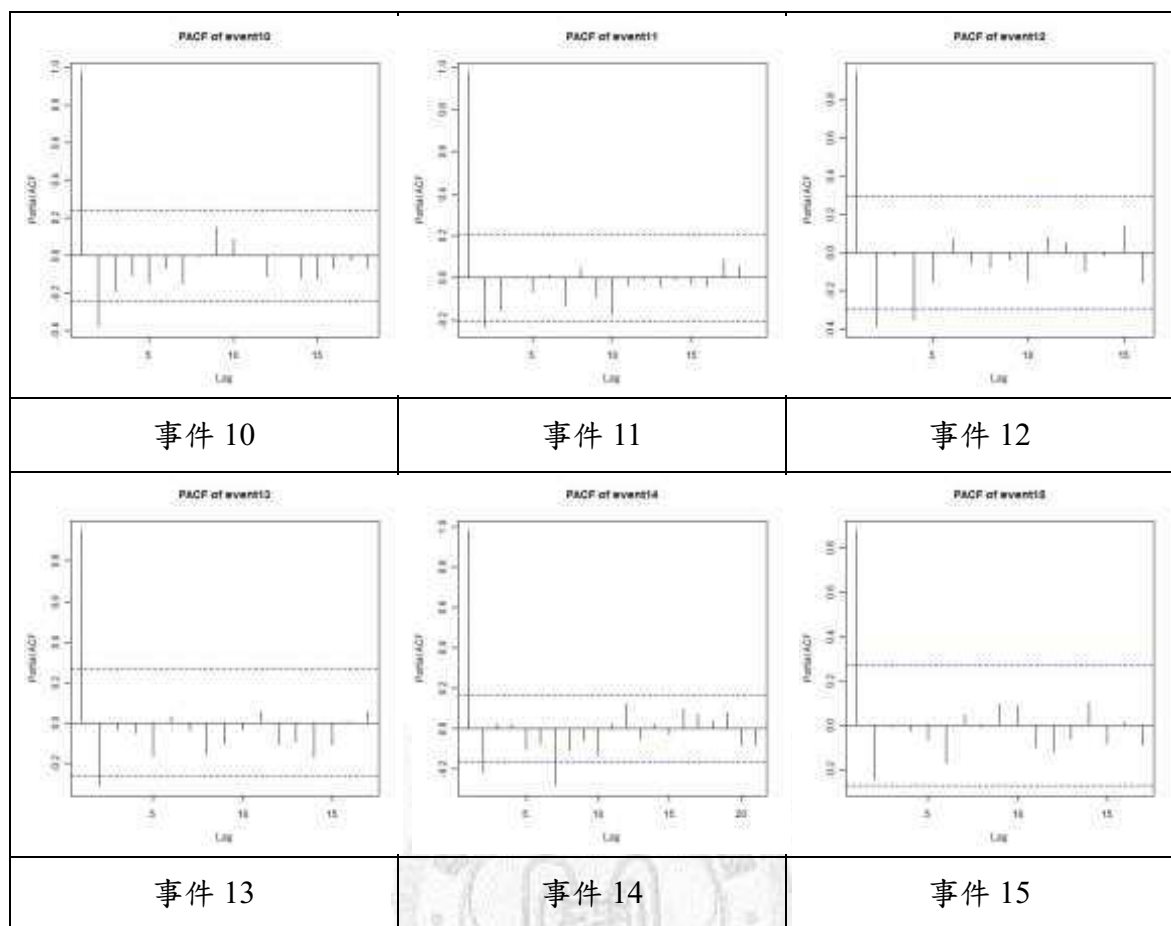


圖 A1. 曾文水庫集水區各事件流量資料之 PACF 圖(續)

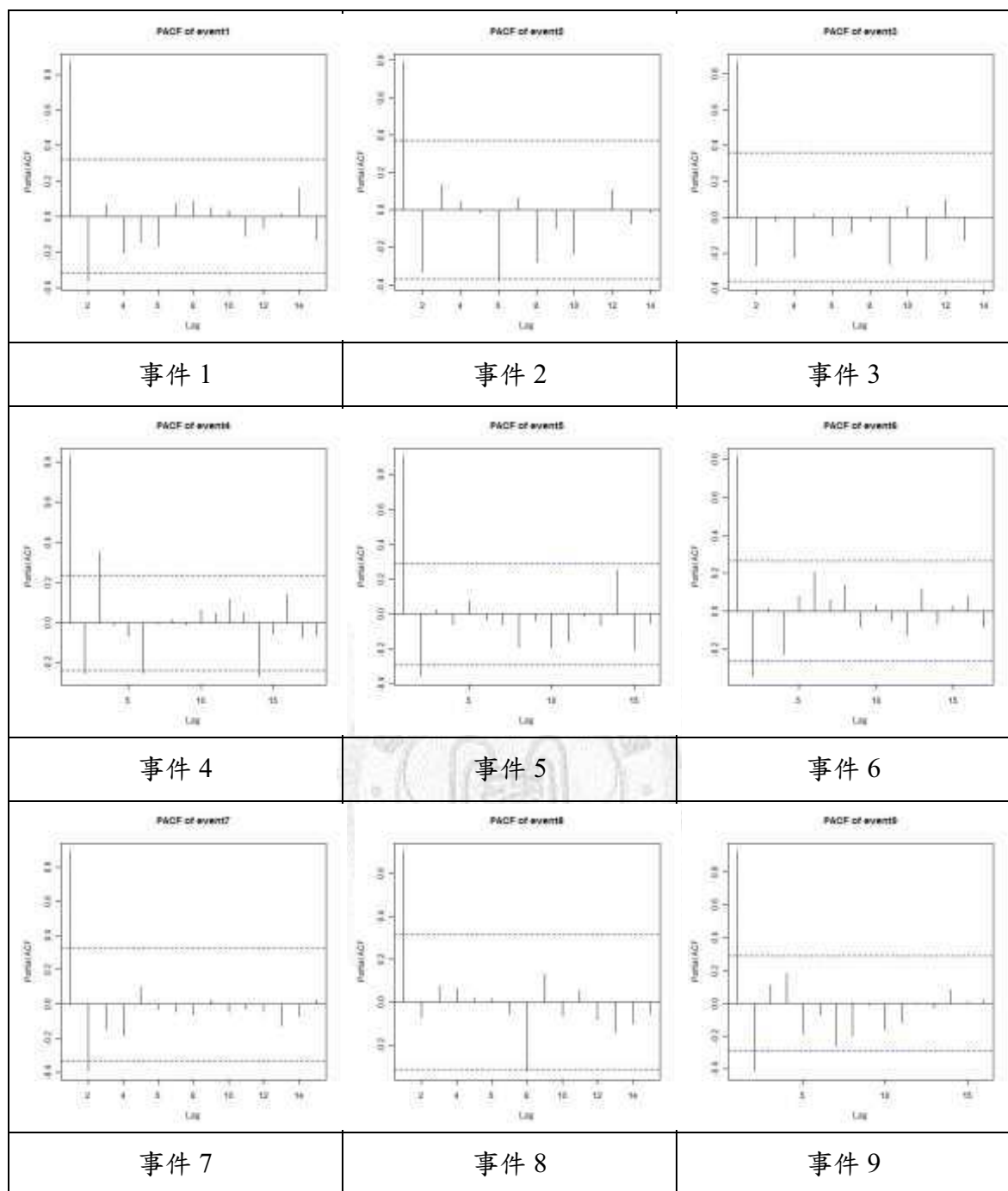


圖 A2. 赤蘭溪流域各事件流量資料之 PACF 圖

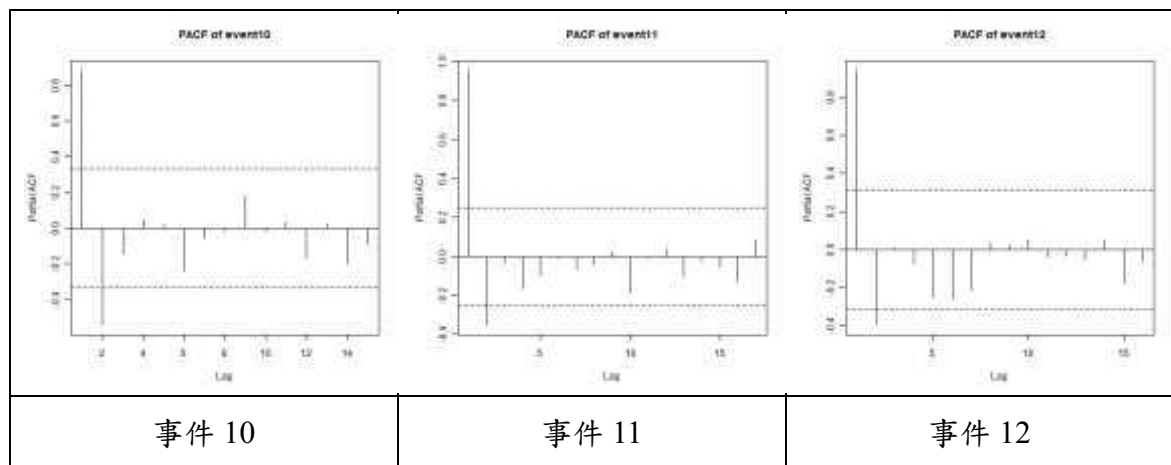


圖 A2. 赤蘭溪流域各事件流量資料之 PACF 圖(續)

