

長短程水筒模式之研究與應用-以高屏溪為例

蘇騰鎰¹ 宋建樺² 江孟容³ 何琮裕⁴

1 淡江大學水資源及環境工程學系兼任助理教授及水利技師

2. 3. 4 淡江大學水文技術服務團高級研究專員

摘要

近年來臺灣氣候極端異常，每逢颱風暴雨，常造成驚人雨量與災害，尤以莫拉克颱風(Morakot)為近 50 年來最嚴重之水患事件，超出設計標準之驚人降雨量導致高屏溪流域河川、區域排水之防洪系統失敗，同時因地面降雨、河川水位等即時監測資訊相當不足，無法有效掌握流域危險程度及未來災情分析研判而衍生導致相當慘重之複合型災害。故藉由具備物理機制之水文模式來預測即時性水文資料之方法實有其必要性。

爰此，本研究以高屏溪流域上游集水區為研究對象，並收集整理水位流量站代表性颱風暴雨場次之雨量、流量等水文資料，利用長短程水筒模式來建立研究區域之降雨-逕流模式，希冀可提供後續水利防災實務上之參考與應用。

關鍵字：長短程水筒模式、降雨-逕流模式、水文設計

一、前言

菅原正己(Sugawara, 1971)提出可研究長期與短期降雨—逕流關係之水筒 Tank 模式，其將流域之逕流機制假想為數個互相連結之貯留形容器，以容器本身具有明確之水量貯存與流動方向等特性，藉以描述自然集水區之複雜水文現象。該模式中以直列式三只貯留形狀之容器以比擬自然集水區，於計算逕流量時，可由每個時間間距之貯蓄水量及該流出孔口係數求得各孔流出量，再由線性疊加方式可求得逕流量。目前於水

利署第十河川局中「淡水河洪水預報系統」乃是應用此水筒模式模擬逕流量，已有相當準確之效果。繼水筒模式之後，日本京都大學教授角屋氏(kadoya, 1988)針對水筒模式之特性，研究出可同時適用之長程與短程逕流模式(Long and Short Terms Runoff Model, 簡稱為 LST 模式)，對水文機制有更深入之闡釋；Harald(2009)以串列式之水筒來建構集水區之集塊(lumped)模型。

二、長短程水筒模式之理論

Harald(2009)以串列式之水筒來建構集水區之集塊(lumped)模型，根據不同參數設定(例如土壤含水量、逕流冪次指數、臨界土壤水分、各水筒間出流量之退水係數、遲緩地表下逕流比例等)架構出可調式串列水筒模式(adaptive serial tank model, AST)，其示意圖如圖 1 所示。

水筒模式之概念乃是將降雨—逕流之機制，類比為許多相互連結之貯留形容器，以容器具有其貯水量與流動方向，描述自然環境下之水文機制。水筒模式之參數包含許多物理意義，各水筒間以水量傳遞描述降雨—逕流歷程。LST 模式之架構主要以直列式三只串聯貯留型容器所組成，最上層容器中由一假想薄膜區隔，模擬入滲機制。模式中以連續方程式描述各水筒間入流量及出流量之關係，以獲得各水筒單位面積水深之變化情形，其定義分別如下：

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = R(t) - Q_1(t) - Q_2(t) - F(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = F(t) - G_1(t) - Q_3(t) \quad (2)$$

$$\frac{dS_3(t)}{dt} = G_1(t) - G_2(t) - Q_4(t) \quad (3)$$

$$\frac{dS_4(t)}{dt} = G_2(t) - Q_5(t) \quad (4)$$

式中， $S_i(t)$ ： t 時刻第 i 筒之單位面積

水深($i=1\sim 4$)；

$R(t)$ ： t 時刻之降雨量；

$F(t)$ ： t 時刻之入滲量；

$G_i(t)$ ：地下水流通量($i=1\sim 2$)。

降雨量扣除蒸發量後直接落入第一筒上層，為第一筒之輸入(input)，產生之輸出(output)為 Q_2 (快速地表下逕流)、 F (入滲)及 Q_1 (地表逕流)， Q_1 產生條件為 $S_1(t)$ (第一筒上層蓄水量)超過 Z_1 (Q_1 孔口高度)。同理，第二筒之輸入為 F (入滲)，輸出為 Q_3 (遲緩地表下逕流)與 G_1 (地下水流通量)。以第三筒而言，輸入為 G_1 (地下水流通量)，輸出為 Q_4 (地下水流)與 G_2 (地下水流通量)。第四筒則是輸入為 G_2 (地下水流通量)，輸出為 Q_5 (地下水流)。

當筒內水深超過孔口高度時，即表 $S_1 > Z_1$ 、 $S_2 > Z_3$ 時， Q_1 、 Q_3 方有流量產生。模式中將地表逕流量 Q_1 以曼寧公式(Manning's formula)之流量與水深關係為 $5/3$ 冪次之函數表示，即 $Q = k \cdot R^{5/3}$ ，此與傳統水筒模式有顯著之不同。LST 模式中入滲量正比於第二筒之可容水量，其物理意義相當於土壤之可吸收水量，即地表下可容水空間($Z_2 + Z_3$)乘以係數 b_1 ，地表下土層愈乾燥，可入滲量愈多。各筒出流量與地下水流通量分別定義如下：

$$Q_1(t) = a_1 \cdot (S_1(t) - Z_1)^{5/3} \quad (5)$$

$$Q_2(t) = a_2 \cdot S_1(t) \quad (6)$$

$$Q_3(t) = a_3 \cdot (S_2(t) - Z_3) \quad (7)$$

$$Q_4(t) = a_4 \cdot S_3(t) \quad (8)$$

$$Q_5(t) = a_5 \cdot S_4(t) \quad (9)$$

$$G_1(t) = b_2 \cdot S_2(t) \quad (10)$$

$$G_2(t) = b_3 \cdot S_3(t) \quad (11)$$

$$F(t) = b_1 \cdot (Z_2 + Z_3 - S_2(t)) \quad (12)$$

採用 LST 模式時，一般均假設降雨前，水筒之初始水位為零。給予起始值 $S_1(0)$ 、 $S_2(0)$ 、 $S_3(0)$ 、 $S_4(0)$ 均為零，並代入連續方程式，迭代後可依序求得各孔口流量。為配合電腦執行運算，將式(1)

至(4)離散化，即取 dt 為一個時間單位後

可得式(13)至(16)：

$$S_1(t+1) = S_1(t) + R(t) - E(t) - Q_1(t) - Q_2(t) - F(t) \quad (13)$$

$$S_2(t+1) = S_2(t) + F(t) - G_1(t) - Q_3(t) \quad (14)$$

$$S_3(t+1) = S_3(t) + G_1(t) - G_2(t) - Q_4(t) \quad (15)$$

$$S_4(t+1) = S_4(t) + G_2(t) - Q_5(t) \quad (16)$$

總逕流量為各筒側孔流出量之總和，可由式(17)表示：

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_4(t) + Q_5(t) \quad (17)$$

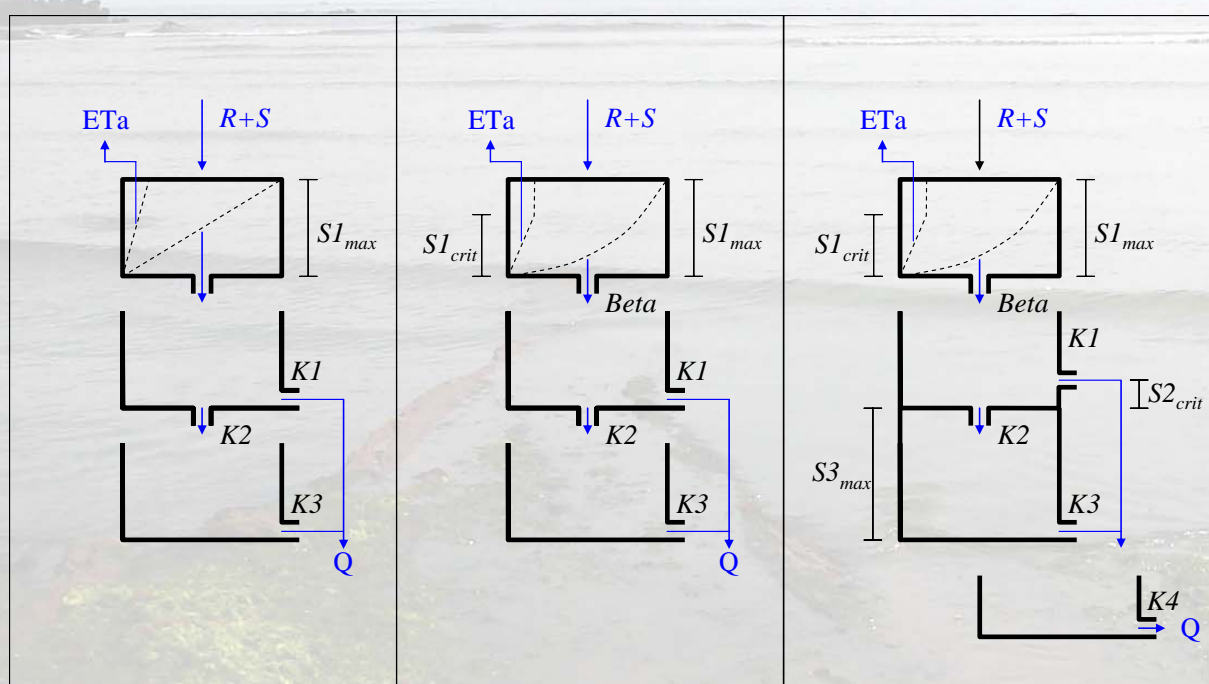


圖 1 可調式串列水筒模式示意圖

三、實務應用

本研究以高屏河流域之里嶺大橋流量站上游集水區為研究對象，首先上游集水區雨量、流量資料，並針對記錄資料品質進行篩選，挑選由民國

80 年代迄今、且曾於該地造成較大雨勢或淹水災害之颱風暴雨場次水文資料為主，其相關資訊如圖 2 所示。

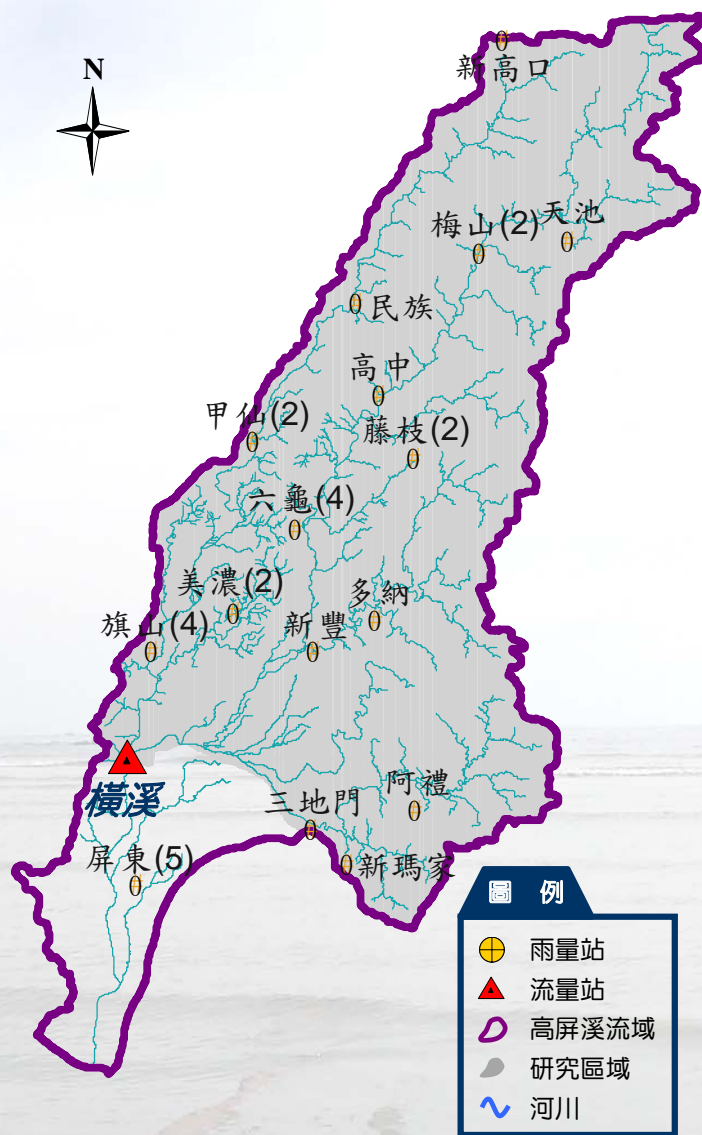


圖 2 高屏溪流域水文測站位置概況圖

茲將整體分析步驟簡述如下：

(一)收集歷史(至 98 年)之時雨量、時流量資料。其中，時雨量資料係以水利署所管轄之雨量站為主，計有旗山(4)、屏東(5)、新高口、多納、甲仙(2)、美濃(2)、新豐、阿禮、新瑪家、三地門、六龜(4)、高中、藤枝(2)、梅山(2)、天池及民族等共計 16

站，而時流量資料則以里嶺大橋站為主。

(二)將里嶺大橋站之時流量資料重新整理排列，並選取歷年發生較大洪水歷線之暴雨或颱風場次資料，以供模式參數檢定驗證之用，本研究挑選之颱風暴雨場次如表 1 所示。

表 1 長短程水筒模式採用之颱風暴雨場次一覽表

編號	颱風/暴雨 名稱	發生時間 (年/月/日)	洪峰流量 (秒立方公尺)	洪峰時間 (小時)	備註
1	728 暴雨	80.07.28	4150.0	67	檢定
2	寶莉	81.08.30	9200.0	26	檢定
3	提姆	83.07.11	3490.0	32	檢定
4	道格	83.08.08	11500.0	43	檢定
5	701 暴雨	86.07.01	2310.0	23	檢定
6	804 暴雨	87.08.04	1875.0	22	檢定
7	瑞伯	87.10.15	2360.0	39	檢定
8	520 暴雨	90.05.20	3960.0	14	檢定
9	桃芝	90.07.30	9700.0	12	檢定
10	聖帕	96.08.18	8237.2	25	檢定
11	鳳凰	97.07.28	5589.0	33	檢定
12	薔蜜	97.09.28	9206.3	31	驗證
13	莫拉克	98.08.05	27445.9	74	驗證

(三)配合步驟(二)挑選出颱風暴雨期間之時雨量紀錄，利用徐昇式法推求得上游集水區之平均時雨量，於本研究中共用民國 80 年至民國 97 年間 13 場颱風暴雨場次資料進行模式之檢定驗證。

(四)水筒模式除上述之雨量、流量資料供模式模擬外，亦需一物理參數-入滲指數，藉以完整描述整體水文流程，於本研究中，因所挑選之場次均為歷年較大洪水之暴雨或颱風場次，其基流量遠小於整體洪水量，故於本研究中乃假設基流量為零，而入滲指數則參考『高屏溪治理基本計畫報告』，一般採用 2mm/hr。

(五)模式中常訂定一些參數藉以模擬研究流域水文現象之變化，所引用之水

文參數通常須藉由一些參數優選方法予以決定。本研究乃應用禁忌演算法求取模式之參數，水筒模式之所需檢定參數共計 11 個 ($a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_3$ 、 $Z_1 \sim Z_3$)， $a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_3$ 為小於 1 之參數。

(六)利用步驟(五)檢定之 11 項參數各自予以平均，並代入最新發生之颱風暴雨場次 2 場進行驗證，藉以探討模式之應用性與合理性。

本研究利用上述步驟，於里嶺大橋水位流量站之 11 項參數檢定結果如圖 3、表 2 及表 3 所示。由結果可得知，民國 80 年至 97 年間各場檢定效率係數 CE 值介於 0.770 至 0.962 間，其平均值則為 0.858，而洪峰誤差百分比 EQP 值介於 -0.98% 至 -17.56% 間，其平均值為 -7.91%。隨後以 97

年薔蜜颱風及 98 年莫拉克颱風之雨量與逕流量紀錄資料加以驗證之，可得 CE 為 0.893，顯示模擬結果與實際

資料非常密合(如圖 4)，表示 LST 模式應用於高屏溪流域上游集水區之精確度很高。

表 2 高屏溪里嶺大橋上游集水區之模式檢定驗證參數(LST)

事件/日期	參數											備註
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	Z_1	Z_2	Z_3	
暴雨/80.07.28	0.0002	0.0550	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	36	29	檢定
寶莉/81.08.30	0.0001	0.0500	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	36	23.5	檢定
提姆/83.07.11	0.0001	0.0700	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	25	10.5	檢定
道格/83.08.08	0.0002	0.0810	0.059	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	36	23.5	檢定
暴雨/86.07.01	0.0002	0.0340	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	36	23	檢定
暴雨/87.08.04	0.0001	0.0825	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	16	9	19	檢定
瑞伯/87.10.15	0.0001	0.0635	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	26	15	23.5	檢定
暴雨/90.05.20	0.00015	0.0621	0.070	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	22	20	10	檢定
桃芝/90.07.30	0.0002	0.0610	0.060	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	23	30	23.5	檢定
聖帕/96.08.18	0.0002	0.0520	0.050	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	40	23.5	檢定
鳳凰/97.07.28	0.00015	0.0340	0.055	0.005	0.00175	0.092	0.0004	0.0015	24	24	23.5	檢定
平均值	0.0002	0.0586	0.0568	0.0050	0.00175	0.0920	0.0004	0.0015	23.2	27.9	21.1	驗證

註：符號*表示為利用檢定之參數平均結果進行驗證。

表 3 高屏溪里嶺大橋上游集水區之檢定驗證結果(LST)

事件/日期	觀測值		模擬值				
	$Q_p(\text{cms})$	$T_p(\text{hrs})$	$Q_p(\text{cms})$	$T_p(\text{hrs})$	CE	$EQ_p(\%)$	$ET_p(\text{hrs})$
暴雨/80.07.28	4150.0	67	3834.3	43	0.824	-7.61	-24
寶莉/81.08.30	9200.0	26	8868.6	27	0.925	-3.60	1
提姆/83.07.11	3490.0	32	3361.1	21	0.862	-3.69	-11
道格/83.08.08	11500.0	43	9481.0	42	0.815	-17.56	-1
暴雨/86.07.01	2310.0	23	2028.5	24	0.864	-12.19	1
暴雨/87.08.04	1875.0	22	1548.2	23	0.770	-17.43	1
瑞伯/87.10.15	2360.0	39	2218.6	38	0.789	-5.99	-1
暴雨/90.05.20	3960.0	14	3739.2	13	0.904	-5.57	-1
桃芝/90.07.30	9700.0	12	9252.9	13	0.851	-4.61	1
聖帕/96.08.18	8237.2	25	7599.5	29	0.872	-7.74	4
鳳凰/97.07.28	5589.0	33	5534.2	32	0.962	-0.98	-1
*薔蜜/97.09.28	9206.3	31	9002.6	31	0.918	-2.21	0
*莫拉克/98.08.05	27445.9	74	18066.7	72	0.867	-34.17	-2

註 1：符號*表示為利用檢定之參數平均結果進行驗證。

註 2： Q_p 洪峰量、 T_p 洪峰到達時間、 CE 效率係數、 EQ_p 洪峰誤差百分比、 ET_p 洪峰時間誤差

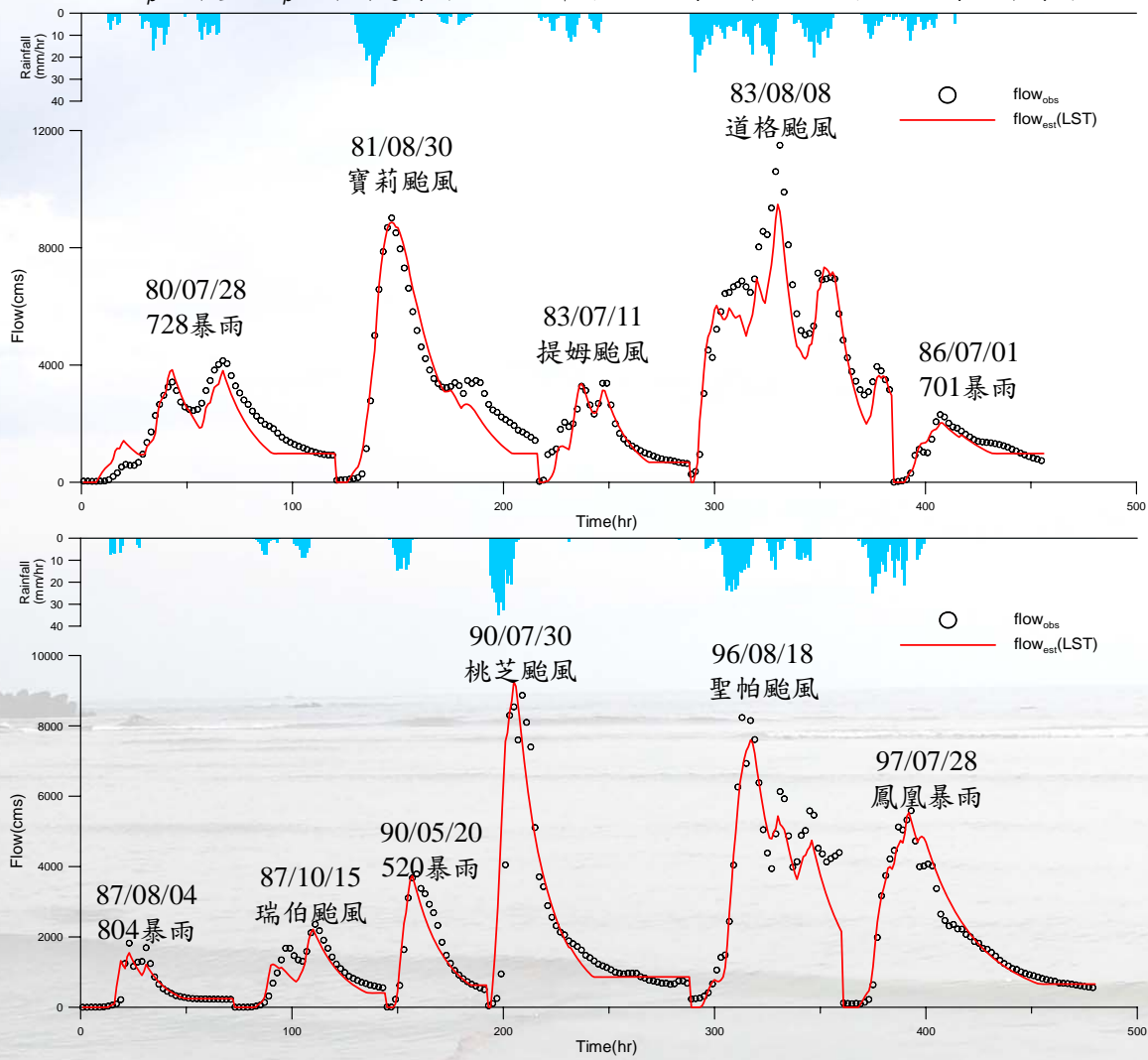


圖 3 颱風暴雨場次檢定圖

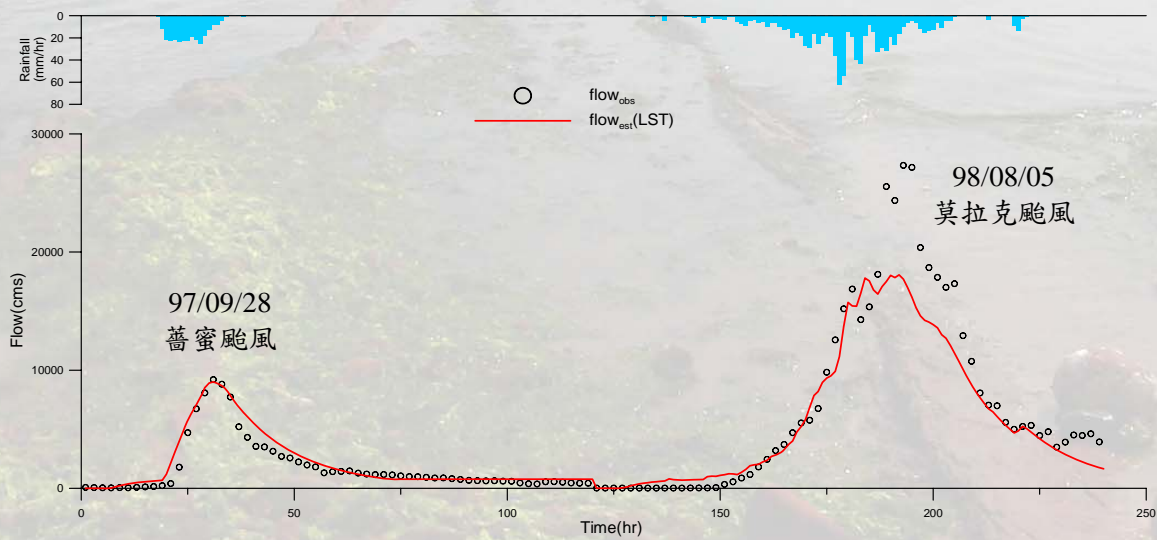


圖 4 颱風暴雨場次驗證圖

四、結論與建議

本研究採用 LST 模式為高屏溪里嶺大橋站上游集水區之降雨—逕流模式，該模式係為一具備物理機制之水文模式，惟缺點為參數較多，需藉由多場次水文資料來建立各項參數之合理數據，經分析結果可得知，LST 模式檢定驗證自民國 80 年迄今共計 13 場颱風場次均

獲致不錯之模擬結果，表示該模式具備一定之準確度，惟其洪峰流量誤差百分比 EQP 仍有改善之空間，後續應持續納入新增之颱風暴雨場次予以修正相關參數，希冀藉以提供水文設計及災害預測之參考與應用。

五、參考文獻

- 1.王如意、易任：應用水文學，上、下冊，國立編譯館出版，茂昌圖書有限公司發行，1979。
- 2.王如意、譚智宏：「修正型水筒模式之研究及其應用於流域逕流量之預測」，台灣水利，第 39 卷，第 3 期，1980。
- 3.王如意、劉佳明、虞國興：「水筒模式及最佳農業用水之研究」，國立台灣大學農業工程學研究所研究報告，1980。
- 4.永井明博、田中丸治哉、角屋 睦：ダム管理の水文學，森北出版會，2003。
- 5.菅原正已，流出解析法，日本共立出版社，1972。
- 6.菅原正已，「水文水櫃模式分析技術研習會議講義」，台灣大學土木工程學研究所，1978。
- 7.童慶斌：啟發式演算法與水資源管理講義，國立台灣大學生物環境系統工程學系，永續發展研究室，2003。
- 8.Chow, V.T. and Kulkarni, V. C., "General Hydrologic System Model", Journal of Hydraulics, ASCE, June, 1971.
- 9.Nash, J. E., "The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph", Intl. Assoc. Sci. Hydrology, Pub.45. Vol.3, pp. 114-121, 1957.
- 10.Harald Kling and Hoshin Gupta., "On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability," Journal of Hydrology, 373, pp.337-351, 2009.

收稿：101 年 4 月 12 日
修改：101 年 5 月 2 日
接受：101 年 5 月 16 日