

# 乾旱嚴重度-延時-頻率曲線發展與應用： 以曾文-烏山頭系統為例

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DROUGHT SEVERITY-DURATION-FREQUENCY CURVES: A CASE STUDY IN  
TSENGWEN-WUSANTO RESERVOIR SYSTEM

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
博士候選人

**范保國**  
Quoc Bao Pham

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
研究員

**楊道昌**  
Tao-Chang Yang

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
碩士

**陳仲廷**  
Chung-Ting Chen

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
特聘教授

**游保杉**  
Pao-Shan Yu

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
副研究員

**郭振民**  
Chen-Min Kuo

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
博士後研究員

**曾宏偉\***  
Hung-Wei Tseng

1

## 摘要

臺灣於水資源規劃與檢討一般常以缺水指數作為依據，惟其計算上係基於年缺水率，因此難以反應枯水期情況，為能合理探討臺灣水資源系統於枯水期間之缺水特性，本研究嘗試導入乾旱 SDF 曲線(severity-duration-frequency curves)描述乾旱事件嚴重度、延時以及頻率年之關係，詳細說明其產製流程與分析結果，並以曾文-烏山頭水庫系統為例，研提可能之延伸應用方式，包含：連結歷史水文乾旱、乾旱衝擊評估以及枯水期間供水缺口評估，總結重要成果如下：(1)藉由點繪 2014 至 2015 年水文乾旱造成之缺水事件至現況條件下乾旱 SDF 曲線，得知其約莫為 10 年發生一次之大旱；(2)莫拉克颱風導致之泥砂淤積，造成多數延時與頻率年對應缺水事件之缺水率增加約 1.5 至 6.0%；(3)基於現況條件下評估枯水期間供水缺口，發現其缺口相當於每日 2.4 萬噸(現況需水量每日約 40 萬噸)，可作為未來枯水期間水源規劃上參考。

**關鍵詞：**乾旱 SDF 曲線、乾旱特性、水資源規劃與管理。

\* 通訊作者 · 國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員  
臺南市東區大學路 1 號 · hungwei1618@gmail.com

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DROUGHT SEVERITY-DURATION-FREQUENCY CURVES: A CASE STUDY IN TSENGWEN-WUSANTO RESERVOIR SYSTEM

### Quoc Bao Pham

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Chung-Ting Chen

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Chen-Min Kuo

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Tao-Chang Yang

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Pao-Shan Yu

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Hung-Wei Tseng\*

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

## ABSTRACT

2

In Taiwan, the shortage index is usually used as the criterion for water resources planning purposes. However, the index calculation is based on annual water deficient ratios, which might underestimate the magnitude of drought events. In order to reasonably quantify properties of drought events during dry seasons, this study developed drought severity-duration-frequency (SDF) curves to interpret the relation between severity, duration and frequency of drought events. Details of development of drought SDF curves were provided and Tsengwen-Wusanto reservoir system was selected as the study area to demonstrate potential applications of drought SDF curves, including mapping of historical hydrological drought events, drought impact assessment and water shortage evaluation during dry seasons. The important findings are given as follows: (1) The 2014-2015 hydrological drought event was mapping onto the current drought SDF curve. The mapping results show the return period of the event is around 10 years; (2) Typhoon Morakot caused serious sedimentation problems and led to overall water shortage rates of drought events for various durations and return periods increased in a range from 1.5% to 6.0%; (3) The results of water shortage evaluation suggest that there is a 24,000-ton gap between water supply and water demand (the water demand is around 400,000 ton per day). The gap could be taken into account for future water resources planning and management during dry seasons.

**Keywords:** Drought severity-duration-frequency curves, Drought properties, Water resources planning and management.

Pham, Q.B., Chen, C.T., Kuo, C.M. Yang, T.C., Yu, P.S., Tseng, H.W.\* (2020). "Development and Application of Drought Severity-uration-frequency Curves: A Case Study in Tsengwen-Wusanto Reservoir System." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 66(2), 1-11. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202006\\_66\(2\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202006_66(2).0001)

## 一、前言

臺灣在防洪改善設計之工程實務上，廣泛採用設計暴雨進行水工結構物之檢討或設計規劃，而設計暴雨水文特性則可透過 IDF 曲線(intensity-duration-frequency curves)描述雨量強度、延時以及頻率年之關係。若給定設計標準(例如：延時 24 小時與重現期 25 年)，即可依據 IDF 曲線對應出設計暴雨總量，再藉由設計雨型進行暴雨總量分配以推求設計暴雨事件。然而，臺灣在水資源規劃管理之工程實務上並無導入類似概念，主要採用缺水指數(shortage index, SI)作為規劃管理之參考依據，一般選擇缺水指數等於特定門檻值(例如：SI =1)作為規劃管理之標準，惟缺水指數於計算上係以年缺水率為基準，對於乾旱時間特性之解析能力有限。

為更深入探討乾旱特性，開始有許多研究投入乾旱 SDF 曲線(drought severity-duration-frequency curves)之發展與應用，藉其可描述乾旱嚴重度、延時以及頻率年之關係，並應用於水資源乾旱風險評估等相關議題。其中，乾旱種類依應用領域與對象不同而有不同定義方式，例如：氣象乾旱著重於氣候異常乾燥炎熱或降雨短缺造成之乾旱，而水文乾旱著重於流量或蓄水量不足造成之乾旱。近年國際上已有許多研究應用乾旱 SDF 曲線進行氣象乾旱與水文乾旱之探討(Kwak *et al.*, 2016; Sung and Chung, 2014; Reddy and Ganguli, 2012)，本研究針對重要相關文獻介紹如下：

Juliani and Okawa (2017)採用乾旱 SDF 曲線量化氣象乾旱之缺水特性，以作為乾旱風險評估基礎，瞭解未來可能面臨之乾旱威脅。其採用 12 個月為時間尺度進行雨量資料分析，計算標準化雨量指標(standardized precipitation index)並選擇-1.0 作為門檻值以辨識水文乾旱事件，針對不同延時(1、3、6、9 以及 12 個月)乾旱事件分析其嚴重度，再配合伽瑪分布推估各個頻率年嚴重度。此外，進一步研提區域化乾旱 SDF 曲線提

供無測站地區於乾旱風險評估參考，並產製特定延時與頻率年下之乾旱等值圖以呈現空間上乾旱風險。Guzmán *et al.* (2017)應用乾旱 SDF 曲線評估巴西東南部水資源系統之水文乾旱風險，其採用需水量作為門檻值進行乾旱事件(缺水)辨識，針對不同延時(31、90、180 以及 365 日)挑選歷年最大缺水量，再配合一般極端值分布推估各個頻率年缺水量。此外，進一步整合乾旱 SDF 曲線與經濟分析探討各種需水情況與氣候變遷情境下乾旱事件對於水公司可能造成之經濟衝擊。Halwatura *et al.* (2015)採用 3 個月時間尺度進行雨量與蒸發資料分析，計算乾旱偵察指標(reconnaissance drought index)以辨識乾旱事件，再分別使用伽瑪分布與羅吉斯分布(logistic distribution)進行乾旱嚴重度與乾旱延時之擬合，以建立乾旱 SDF 曲線再應用於設計乾旱推估。其中，其將歷史資料分割為兩段 20 年資料(1972-1992 與 1993-2013)，以探討極端乾旱之變化趨勢。Rajsekhar *et al.* (2013)基於月流量資料計算標準化流量指標(standardized stream flow index)並選擇-0.99 作為門檻值以辨識水文乾旱事件，其應用乾旱 SDF 曲線評估美國德州水文乾旱風險，探討延時 3、6、9、12、18、24 以及 36 個月下頻率年 5、10、25、50 以及 100 年所對應之水文乾旱嚴重度，並產製水文乾旱地圖集以呈現乾旱嚴重度之空間變異。Vasiliades *et al.* (2017)以月流量資料中位數作為門檻值進行乾旱事件辨識，採用不同延時(30、60、90、180 以及 360 日)從歷年乾旱事件挑選出最大嚴重度，再配合頻率分析建構乾旱 SDF 曲線，據以探討水文乾旱之嚴重度、延時以及頻率年之關係。Ganguli and Ganguly (2016)基於 6 個月雨量資料計算標準化雨量指標並選擇-0.9 作為門檻值以辨識氣象乾旱事件，分析乾旱空間結構並發展與應用乾旱 SDF 曲線探討極端乾旱事件趨勢。其中，於極端乾旱事件分析上主要係針對不同延時(1、2、3...12 個月)與頻率年(10 與 100 年)之乾旱進行探討。

綜合上述文獻回顧(表 1)，國際上於氣象乾旱或水文乾旱評估分析採用之時間尺度通常會涵蓋 1 至 12 個

表 1 國際上乾旱 SDF 曲線發展與延伸應用

文獻	乾旱種類	乾旱定義	延時	延伸應用
Juliani and Okawa (2017)	氣象	標準化雨量指標低於-1.0	月尺度：1、3、6、9、12	區域化、等值圖
Guzmán <i>et al.</i> (2017)	水文	供水量低於需水量	日尺度：31、90、180、365	經濟分析
Halwatura <i>et al.</i> (2015)	氣象	乾旱偵察指標	月尺度：羅吉斯分布	極端乾旱趨勢分析、設計乾旱概念
Rajsekhar <i>et al.</i> (2013)	水文	標準化流量指標低於-0.99	月尺度：3、6、9、12、18、24、36	水文乾旱地圖集
Vasiliades <i>et al.</i> (2017)	水文	月流量低於其中位數	日尺度：30、60、90、180、360	-
Ganguli and Ganguly (2016)	氣象	標準化雨量指標低於-0.9	月尺度：1、2、3、...、12	極端乾旱事件趨勢分析、乾旱空間結構分析

月(較年尺度細緻),以描述枯水期間短延時高強度之缺水事件,而在乾旱 SDF 延伸應用上亦包含許多面向,例如:極端乾旱事件等值圖、經濟分析以及極端乾旱事件趨勢分析等。故本研究考量臺灣水文特性,導入乾旱 SDF 概念以合理描述枯水期間之缺水情況,聚焦發展乾旱 SDF 曲線並應用於評估水資源系統乾旱特性,詳細說明乾旱 SDF 曲線產製流程與結果,並嘗試探討其可能之應用方式,期望推廣其概念於臺灣水資源系統評估與管理。

## 二、研究區域與資料

本研究選擇曾文-烏山頭水庫系統作為研究區域,藉以蒐集水源供需總量與庫容等資訊,以瞭解其現況水源供需情況,並參考其系統架構蒐集相關系統參數與資料,作為後續現況供水操作模擬之依據。針對水庫系統與資料設置詳細說明如下:

### 2.1 曾文-烏山頭水庫系統之供需現況與系統架構

圖 1 為曾文-烏山頭水庫系統之供需現況與系統架構圖,以系統供需現況來看,其水源量為 12.25 億噸/年,而其需水量則參考年基準分配水量設定為 10.47 億噸/年(經濟部水利署南區水資源局,2015),目前水庫系統有效庫容約為 5.87 億噸,故平均每年需裝滿約 1.78 次才能滿足用水需求;若以系統架構來看,曾文-烏山頭水庫係以串聯方式聯合運用,曾文水庫水源可由東口堰引至烏山頭水庫蓄存,再由烏山頭水庫負責主要供水作業。

### 2.2 曾文-烏山頭水庫系統之系統參數與資料

本研究蒐集現況水資源相關系統參數與資料,包含:流量資料、需水量、水庫有效庫容、正常滿水位、水庫操作規線、輸水損失以及引水限制,詳細資料列於表 2,後續供水操作模式將採用蒐集之現況條件作為模擬依據。

表 2 曾文-烏山頭水庫系統之系統參數與資料設置

系統參數與資料	說明
流量資料年限	1959 至 2018 年 曾文水庫 <sup>[1]</sup> : 1959/01-1974/06 $Q_{\text{曾文水庫}} = 0.980 \times Q_{\text{照興站}}$ 1974/07-2018/12 營運紀錄 烏山頭水庫 <sup>[1]</sup> : 1959/01-2018/12 $Q_{\text{烏山頭水庫}} = 0.09668 \times Q_{\text{曾文水庫}}$
需水量	依年基準配水量 10.47 億噸進行設定 曾文水庫: 50,897 萬噸(2017 年測量)
水庫有效庫容	烏山頭水庫: 7,982 萬噸(2011 年測量)
正常滿水位	曾文水庫運用要點 <sup>[2]</sup> 之正常滿水位
水庫操作規線	曾文水庫運用要點 <sup>[2]</sup> 之下限與嚴重下限 <sup>[3]</sup>
輸水損失	曾文水庫至東口堰: 5.3% 東口堰至烏山頭水庫: 3.4%
引水限制	東口堰至烏山頭水庫: 56 cms

<sup>[1]</sup>流量推估方式參考自「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」(經濟部水利署水利規劃試驗所,2013)。

<sup>[2]</sup>2017 年 8 月 11 日經濟部經授水字第 10620209320 號令。

<sup>[3]</sup>下限與嚴重下限係採用曾文水庫與烏山頭水庫有效蓄水量之總和。

## 三、研究方法

### 3.1 供水操作模式

本研究基於模擬法建置供水操作模式,其主要係由連續方程式與水庫操作規線組成,以模擬水庫系統於各個時刻之供水量。首先,藉由比對當前時刻之蓄水量與水庫操作規線可決定當前時刻之放水量,然後透過連續方程式考慮當前時刻之蓄水量、入流量、放水量、溢流量以及蒸發量來決定下個時刻之蓄水量:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - O_t^{spill} - E_t \dots\dots\dots(1)$$

其中,  $S_{t+1}$  為第  $t+1$  時刻之期初蓄水量;  $S_t$  為第  $t$  時刻之期初蓄水量;  $I_t$  為第  $t$  時刻之入流量;  $O_t$  為第  $t$  時刻之供水量;  $O_t^{spill}$  為第  $t$  時刻之溢流量;  $E_t$  為第  $t$  時刻之蒸發量。

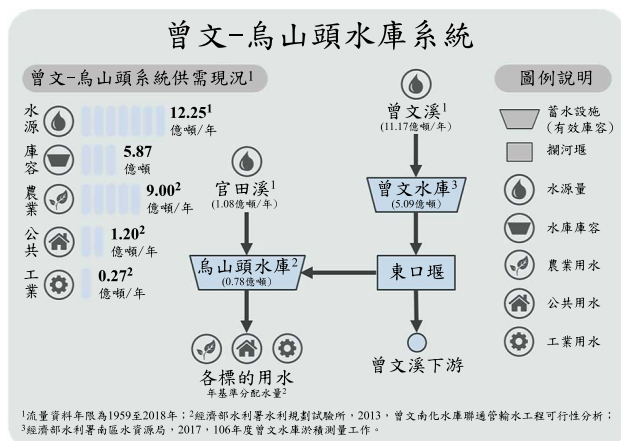


圖 1 曾文-烏山頭水庫系統之供需現況與系統架構圖

倘若於颱風期間，蓄水量高於水庫操作規線上限或者達到特定水庫標高(例如：正常滿水位)時，水庫得以啟動防洪運轉，惟其運轉方式較為複雜，需取決於洪水特性與仰賴專業人員判斷，難以使用模擬方式處理，故本研究參考「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2013)之時間點模式並將曾文水庫蓄升計畫納入考慮，將水庫系統之防洪運轉過程簡化如下：

$$S_{t+1} = \begin{cases} \text{if } S_{t+1} > S_{max} ; Q_t^{spill} = S_{t+1} - S_{max} & \dots\dots\dots (2) \\ \text{if } S_{t+1} < S_{max} ; Q_t^{spill} = 0 \end{cases}$$

其中， $S_{t+1}$  為第  $t+1$  時刻之期初蓄水量； $Q_t^{spill}$  為第  $t$  時刻之溢流量； $S_{max}$  為水庫正常滿水位對應之蓄水量(正常滿水位於 5 至 8 月為 228 公尺、9 月為 229 公尺、10 月至次年 4 月則為 230 公尺)。

詳細之供水操作模式介紹與模式驗證可參考「氣候變遷對於水庫系統缺水情況之影響與其不確定性」(曾宏偉等人，2016)，而本研究主要聚焦曾文-烏山頭水庫系統現況缺水特性分析，採用 60 年長期(1959 至 2018 年)流量資料作為輸入流量，並更新相關系統參數(表 2)後重新進行供水操作分析，以瞭解現況條件下水資源系統可能面臨之長期缺水特性。

### 3.2 乾旱 SDF 曲線繪製步驟

本研究參考「因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2018)之乾旱 SDF 曲線產製流程，以曾文-烏山頭水庫系統為對象，進行長期供水操作模擬並分析其缺水(供需不平衡)事件之嚴重度、延時以及頻率年間之關係，再將分析結果繪製成乾旱 SDF 曲線作為後續應用依據，其繪製流程如圖 2 所示。針對各步驟說明如下：

1. 設置水資源系統參數與資料，包含：流量資料、需水量、水庫有效庫容、正常滿水位、水庫操作規線、輸水損失以及引水限制等相關資料。
2. 採用供水操作模式進行水資源系統之供水操作分析，並產出歷年供水量與需水量之時間序列資料。
3. 計算水資源系統之缺水量，而缺水(乾旱事件)之定義係指供水量無法滿足需水量之情況，其量為需水量與供水量兩者之差異。本研究以缺水量作為乾旱事件之嚴重度，並進一步探討不同延時下乾旱事件之特性，針對不同延時(例如：30、60、90...180 日)進行年最大缺水量(嚴重度)挑選，提供後續分析使用。
4. 針對不同延時之年最大缺水量資料進行頻率分

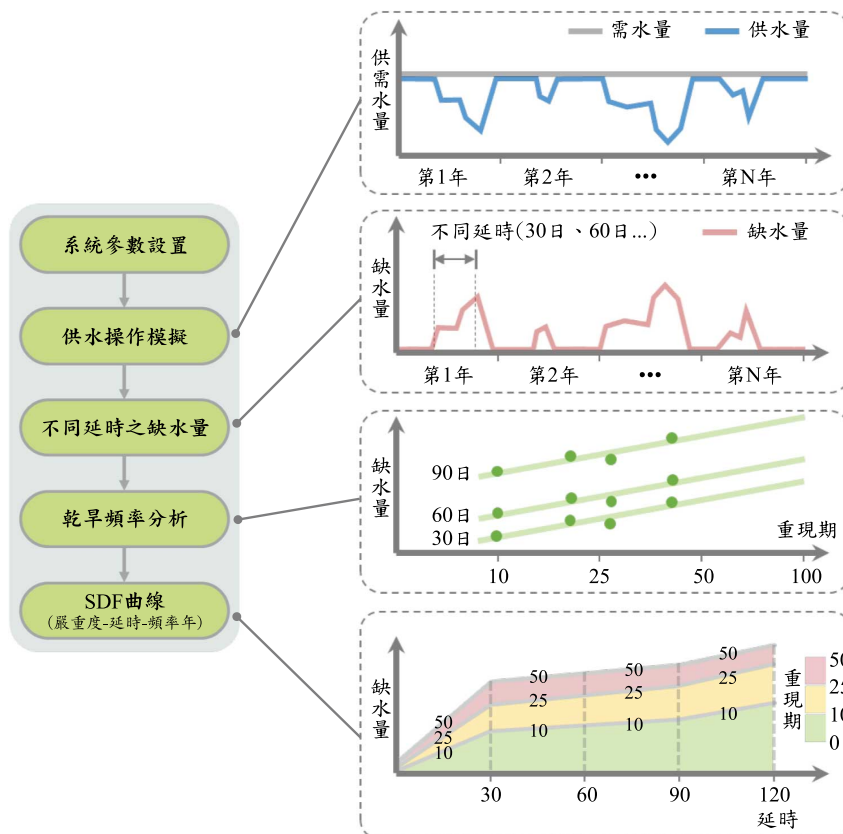


圖 2 乾旱 SDF 曲線繪製步驟

析，以計算不同延時下各頻率年乾旱事件所對應之缺水量。其中，頻率分析採用之統計分布係以臺灣常用之水文統計分布為主(經濟部水資源局，2001)，例如：一般極端值分布、極端值一型分布、皮爾遜第三型分布、對數皮爾遜第三型分布、三參數對數常態分布，再配合 Kolmogorov-Smirnov (KS)檢定決定最佳統計分布。

5. 基於不同延時下乾旱事件各個頻率年缺水量，繪製可代表水資源系統乾旱嚴重度、延時、頻率年之關係圖(乾旱 SDF 曲線)。

#### 四、結果與討論

本研究重點在於導入乾旱 SDF 曲線觀念並應用於量化水資源乾旱特性，以合理描述枯水期間之缺水特性。首先說明乾旱 SDF 曲線與臺灣常用缺水指數之連

結，再詳細描述其產製流程與分析結果，最後則針對乾旱 SDF 曲線可能之應用方式進行介紹，包含：連結歷史水文乾旱事件、乾旱衝擊評估以及枯水期間供水缺口評估。

#### 4.1 乾旱 SDF 曲線與缺水指數之連結

本研究採用長達 60 年(1959 至 2018 年)流量資料作為供水操作模式之輸入並依現況條件進行水資源系統參數設置，以分析水資源系統之長期供水操作情況，基於歷年需水量與供水量資料探討水資源系統之乾旱特性。其中，曾文-烏山頭水庫系統給水標的包含：農業用水、工業用水以及家用及公共給水，本研究主要聚焦公共用水(工業用水與家用及公共給水)之缺水特性分析。

表 3 為公共用水歷年之年缺水日、年缺水量以及年缺水率，分析結果指出：公共用水之長期平均年缺水

表 3 曾文-烏山頭水庫系統公共用水之歷年缺水情況

年份	年缺水日 (日)	年缺水量 (萬噸)	年缺水率 (%)	年份	年缺水日 (日)	年缺水量 (萬噸)	年缺水率 (%)
1959	0	0	0.0	1989	46	292	2.0
1960	90	391	2.7	1990	0	0	0.0
1961	125	616	4.2	1991	227	1,738	11.8
1962	168	1,034	7.0	1992	101	1,099	7.5
1963	192	1,443	9.8	1993	231	1,690	11.5
1964	228	1,586	10.8	1994	172	3,951	26.9
1965	183	1,831	12.5	1995	256	1,672	11.4
1966	180	684	4.7	1996	225	3,584	24.4
1967	245	1,736	11.8	1997	148	449	3.1
1968	146	1,458	9.9	1998	31	66	0.5
1969	80	327	2.2	1999	90	263	1.8
1970	270	1,948	13.2	2000	289	963	6.6
1971	236	2,564	17.4	2001	140	1,221	8.3
1972	0	0	0.0	2002	189	1,354	9.2
1973	118	277	1.9	2003	321	5,302	36.1
1974	140	635	4.3	2004	184	4,193	28.5
1975	0	0	0.0	2005	60	134	0.9
1976	0	0	0.0	2006	40	98	0.7
1977	60	242	1.6	2007	99	522	3.5
1978	21	45	0.3	2008	3	6	0.0
1979	63	224	1.5	2009	72	331	2.3
1980	287	2,820	19.2	2010	152	569	3.9
1981	151	3,010	20.5	2011	172	535	3.6
1982	60	201	1.4	2012	121	558	3.8
1983	32	64	0.4	2013	67	157	1.1
1984	233	1,608	10.9	2014	198	1,218	8.3
1985	148	1,641	11.2	2015	164	2,049	13.9
1986	47	95	0.6	2016	0	0	0.0
1987	133	276	1.9	2017	75	140	1.0
1988	171	728	5.0	2018	170	1,283	8.7

[1] 平均年缺水日為 131 日；平均年缺水量為 1,049 萬噸；平均年缺水率為 7.2%；缺水指數(SI)為 1.13。

日與年缺水量分別為 131 日與 1,049 萬噸。由長期平均資料可知其並非均勻缺水，而係屬於集中缺水型態，缺水量集中發生於 131 日內，突顯出短延時缺水分析之必要性。曾文-烏山頭水庫系統基準分配水量之公共用水需水量約為 40 萬噸/日，若將 1,049 萬噸缺水量分配至全年，其缺水率約為 7.2% (1,049 ÷ 365 ÷ 40 ≈ 7.2%)；若依平均年缺水日進行缺水量分配，則其缺水率增加至 20.0% (1,049 ÷ 131 ÷ 40 ≈ 20.0%)。整體而言，分析時間尺度不同可能導致顯著缺水特性差異，選擇過長時間尺度可能低估缺水事件強度，故在時間尺度挑選上需考慮能否合理量化枯水期間之缺水特性。

若以臺灣於評估水資源系統缺水情況常用之缺水指數來看，公共用水之缺水指數約為 1.13，其計算公式如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_i}{D_i} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

其中， $N$  為分析總年數； $S_i$  為第  $i$  年之總缺水量； $D_i$  為第  $i$  年之總需水量。

因缺水指數係將各年缺水狀況平均化，造成缺水指數為一對多之函數關係，且於計算上係基於全年缺水率而非缺水期間之缺水率，造成缺水指數無法正確描述枯水期間之缺水特性，包含：缺水發生機率、缺水強度以及缺水延時等，故本研究導入乾旱 SDF 曲線以選擇較為細緻之時間尺度，可更適切評估枯水期間之乾旱特性，用於輔助缺水指數以強化其於枯水期間之解釋能力。

## 4.2 曾文-烏山頭水庫系統之乾旱 SDF 曲線產製

為能更合理探討枯水期間之乾旱特性，本研究先採用水文年形式重新整理水源供需資料，讓乾旱事件不因日曆年轉換而被切割。以延時 30 日為例，首先針對各水文年挑選 30 日最大缺水量，再將挑選出來之年最大缺水量資料以臺灣常用統計分布進行配套，並配合 KS 統計檢定決定出最佳統計分布，然後使用最佳統計分布推估不同頻率年之最大缺水量。最後，重覆上述流程完成各延時(30、60、90...180 日)不同頻率年最大缺水量推估，詳細流程說明於乾旱 SDF 曲線繪製步驟(圖 2)。

表 4 為臺灣常用統計分布配套不同延時年最大缺水量之 KS 統計值，檢定結果顯示：若採用一般極端值分布配套各個延時年最大缺水量，無論何種延時皆可通過 KS 檢定，相較於其他統計分布，以該分布最適

合用於描述曾文-烏山頭水庫系統公共用水之年最大缺水量。因此，後續於不同頻率年最大缺水量推估，皆以一般極端值分布為主。

表 5 為曾文-烏山頭水庫系統於不同延時下各頻率年對應缺水量，缺水量下面括號內數字則為對應之缺水率，而延時欄位括號內數字代表年最大缺水量之長期平均。在固定延時情況下，以延時 30 日為例，頻率年 2 年對應之缺水量約為 219 萬噸(缺水率 18%)，隨著

表 4 臺灣常用統計分布配套不同延時年最大缺水量之 KS 統計值

延時(日)	GEV	EV1	PT3	LPT3	LN3
30	<b>0.118</b>	0.188	0.195	0.181	<b>0.142</b>
60	<b>0.082</b>	0.188	0.189	<b>0.128</b>	0.465
90	<b>0.099</b>	0.202	<b>0.159</b>	<b>0.107</b>	0.448
120	<b>0.111</b>	0.205	<b>0.132</b>	<b>0.096</b>	0.482
150	<b>0.118</b>	0.211	<b>0.113</b>	<b>0.090</b>	0.398
180	<b>0.124</b>	0.218	<b>0.111</b>	<b>0.087</b>	0.425
檢定值	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
通過數	6	0	4	5	1

<sup>[1]</sup>GEV：一般極端值分布；EV1：極端值一型分布；PT3：皮爾遜第三型分布；LPT3：對數皮爾遜第三型分布；LN3：三參數對數常態分布。

<sup>[2]</sup>通過 KS 檢定者以粗體字表示。

<sup>[3]</sup>KS 統計檢定門檻值採用  $D_{(n,\alpha)} = D_{(59,0.05)} = 1.77$ 。

表 5 曾文-烏山頭水庫系統於不同延時下各頻率年對應缺水量

延時(日) (平均缺水量)	頻率年(年)				
	2	5	10	25	50
30 (304)	219 (18%)	459 (38%)	660 (55%)	972 (81%)	1,207 (100%)
60 (505)	327 (14%)	750 (31%)	1,129 (47%)	1,759 (73%)	2,368 (98%)
90 (636)	390 (11%)	941 (26%)	1,446 (40%)	2,304 (64%)	3,152 (87%)
120 (733)	441 (9%)	1,089 (23%)	1,684 (35%)	2,702 (56%)	3,711 (77%)
150 (812)	474 (8%)	1,198 (20%)	1,874 (31%)	3,045 (50%)	4,221 (70%)
180 (882)	500 (7%)	1,290 (18%)	2,039 (28%)	3,354 (46%)	4,692 (65%)

<sup>[1]</sup>平均缺水量係依據供水操作模擬結果推求而得。

<sup>[2]</sup>公共用水之平均日需水量約 40 萬噸。

<sup>[3]</sup>括號內數字為缺水率。

<sup>[4]</sup>單位：萬噸。

頻率年增加其缺水率亦會快速增加，當頻率年增加至 50 年，其對應之缺水率則已達 100%，無法提供任何公共用水。若在固定頻率年情況下，以頻率年 5 年為例，延時 30 日對應之缺水量約為 459 萬噸(缺水率 38%)，隨著延時增加其缺水率則有降低情況，當延時增加至 180 日，其對應之缺水率則降低至 18%。整體而言，以特定延時來看，當頻率年愈高其對應之缺水率有增加趨勢(缺水強度愈強)；但若以特定頻率年缺水量來看，當延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(缺水強度愈低)。

此外，本研究進一步比對特定延時下年最大缺水量長期平均值與特定延時下各頻率年缺水量，以便後續應用參考。比對結果發現：不同延時下年最大缺水量長期平均值約介於頻率年 2 年缺水量至頻率年 5 年缺水量之間，約略等於兩者平均。以延時 120 日為例，其平均年最大缺水量約為 733 萬噸，缺水量介於頻率年 2 年缺水量(441 萬噸)至 5 年缺水量(1,089 萬噸)之間，與兩者平均值接近( $(441 + 1,089) \times 0.5 \approx 765$ )。

基於上述不同延時下各頻率年對應缺水量之資訊，可探討曾文-烏山頭水庫系統一旦發生乾旱事件時，其乾旱事件嚴重度、延時、頻率年之關係，有助於合理化枯水期間之缺水情況，並可依據其成果繪製曾文-烏山頭水庫系統現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 3)。圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線則代表不同頻率年，而對角粗線則代表最大缺水量之上限(即缺水率 100%)。由乾旱 SDF 曲線圖可知：在延時固定情況下，頻率年增加將導致最大缺水量增加；同樣地，在頻率年固定情況下，延時增加將導致最大缺水量增加，惟其增加幅度(斜率)會隨延時增加而有所趨緩。

### 4.3 乾旱 SDF 曲線應用：連結(歷史)嚴重供需乾旱事件

為瞭解歷史水文乾旱事件於曾文-烏山頭水庫系統造成之影響，本研究採用近年較嚴重之水文乾旱事件

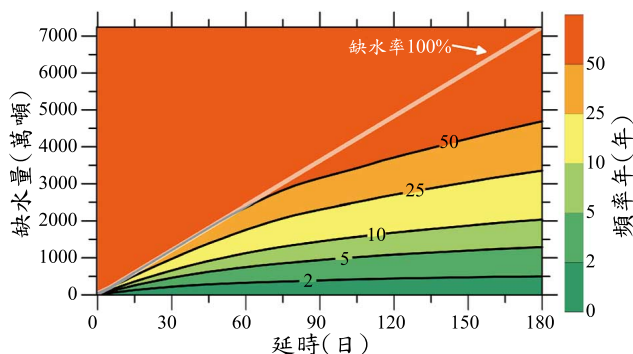


圖 3 曾文-烏山頭水庫系統現況條件下乾旱 SDF 曲線

(2014 至 2015 年事件)為案例，從該時段供水操作模擬結果內挑選延時 30、60、90、120、150 以及 180 日之最大缺水量，並將其點繪至現況條件下乾旱 SDF 曲線(圖 4)。由圖可知，2014 至 2015 年水文乾旱事件於曾文-烏山頭水庫系統造成之缺水事件特性：延時 30 與 120 日缺水事件之頻率年約為 10 年；延時 60 與 90 日缺水事件之頻率年則略低於 10 年，其頻率年介於 5 至 10 年之間；而較長延時的部分，延時 150 與 180 日缺水事件之頻率年略高於 10 年，其頻率年介於 10 至 25 年之間。整體而言，藉由比對現況條件下乾旱 SDF 曲線與歷史水文乾旱事件，分析結果顯示：2014 至 2015 年水文乾旱事件於曾文-烏山頭水庫系統造成之缺水事件頻率年約莫為 10 年左右，其屬於 10 年發生一次之大旱。

美國國家科學院提出設計乾旱概念(National Academies, 1986)，建議在實務應用上可選擇歷史最嚴重乾旱或更為嚴重乾旱(例如：頻率年 25 年)作為設計乾旱，以決定水資源系統在面臨嚴峻乾旱發生時需提升之額外容量。此外，美國工兵團亦引用設計乾旱概念(U.S. Army Corps of Engineers, 1994)，建議可採用：(1) 歷史或近年最嚴重之乾旱事件或(2) 合成乾旱事件作為設計乾旱，以測試水資源系統面臨乾旱事件之表現。對於曾文-烏山頭水庫系統而言，可選用 2014 至 2015 年乾旱(頻率年 10 年)作為設計乾旱，以決定未來於抗旱期間需要之跨區調度水量或備援水量。例如：以延時 60 日為例，頻率年 10 年乾旱事件對應之缺水量 1,129 萬噸，則調度水量或備援水量在規劃上可採 18.8 萬噸/日( $1,129 \div 60 \approx 18.8$ )。

### 4.4 乾旱 SDF 曲線應用：乾旱衝擊評估

南臺灣水資源系統於 2009 年受到莫拉克颱風重創，極端暴雨導致大量泥沙淤積於水庫，使得供水穩定度受到嚴重衝擊。為探討水庫淤積對於水資源系統之

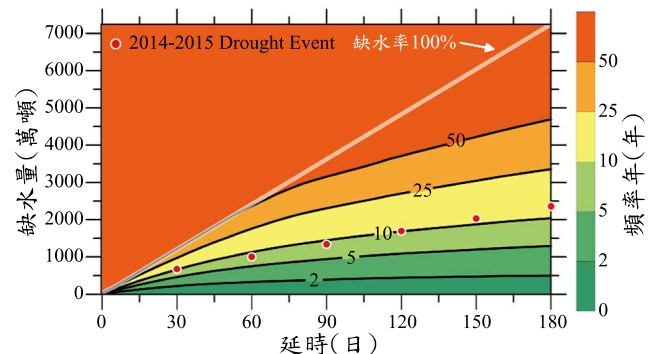


圖 4 歷史水文乾旱事件與現況條件下乾旱 SDF 曲線之對應



影響，本研究參考「莫拉克颱風災後南區因應氣候異常之供水潛能及供水調度檢討與因應對策」(經濟部水利署南區水資源局，2010)採用莫拉克颱風前之曾文水庫庫容曲線(2008 年測量)作為系統設置參數，其餘系統參數與資料則與現況維持一致，方便釐清水庫淤積之衝擊。圖 5 為曾文-烏山頭水庫系統現況下乾旱 SDF 曲線(實線)與莫拉克颱風影響前之乾旱 SDF 曲線(虛線)，分析結果顯示：在莫拉克颱風造成淤積影響之前，其庫容大蓄豐濟枯能力佳，各個延時與頻率年對應之缺水量皆較現況輕微。

兩者乾旱 SDF 曲線於特定延時與頻率年下年最大缺水量之差值列於表 6，差值計算方式為現況減去莫拉克颱風影響前之缺水量，以突顯其對於水資源系統造

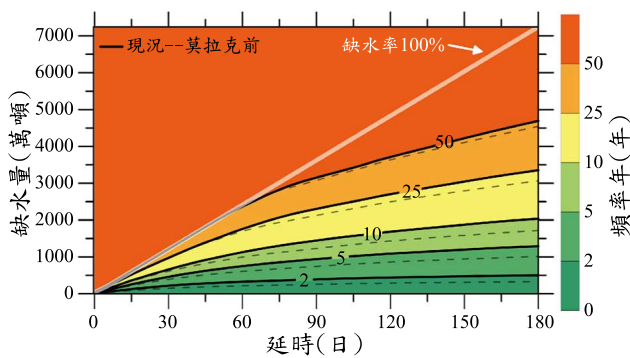


圖 5 現況條件(實線)與莫拉克影響前(虛線)之乾旱 SDF 曲線

表 6 現況與莫拉克影響前乾旱 SDF 曲線於特定延時與頻率年之缺水量差值

延時 (日)	頻率年(年)				
	2	5	10	25	50
30	71 (5.9%)	69 (5.7%)	50 (4.1%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
60	113 (4.7%)	143 (5.9%)	135 (5.6%)	62 (2.6%)	0 (0.0%)
90	135 (3.7%)	198 (5.5%)	216 (6.0%)	177 (4.9%)	71 (2.0%)
120	151 (3.1%)	229 (4.7%)	252 (5.2%)	206 (4.3%)	74 (1.5%)
150	162 (2.7%)	256 (4.2%)	289 (4.8%)	251 (4.2%)	115 (1.9%)
180	171 (2.4%)	277 (3.8%)	320 (4.4%)	289 (4.0%)	149 (2.1%)

[1]缺水量差值計算方式為現況減去莫拉克影響前。

[2]括號內數字為增加缺水率。

[3]單位：萬噸。

成之負面影響(缺水量增加)。整體而言，水庫淤積會造成各個延時與頻率年對應之缺水量增加，其造成缺水率增加約 1.5 至 6.0%。

#### 4.5 乾旱 SDF 曲線應用：枯水期間供水缺口評估

乾旱 SDF 曲線為本研究之重要產出，期望可應用於強化缺水指數解釋能力，以合理反應枯水期間缺水情況，針對其供水缺口評估步驟說明如下：

##### (1)查詢長期平均缺水情況

因乾旱 SDF 曲線可較貼切描述水資源系統於枯水期間所面臨之缺水情況，故藉由查詢乾旱 SDF 曲線中特定延時與重現期所對應之缺水量，即可瞭解其於枯水期間之實際乾旱特性。例如：若需瞭解曾文-烏山頭水庫系統於延時 120 日缺水事件之長期平均缺水情況，可查詢乾旱 SDF 曲線中延時 120 日下頻率年 2 與 5 年所對應之缺水量，分別為 441 與 1,089 萬噸(詳表 5)，再取兩者平均 765 萬噸代表長期缺水量。因曾文-烏山頭水庫系統之平均日需水量約 40 萬噸，故其缺水率約為 15.9%左右( $765 \div 120 \div 40 \approx 15.9\%$ )。

##### (2)計算可忍受缺水範圍

曾文-烏山頭水庫系統於設計規劃階段係採用缺水指數為 1.0(即平均年缺水率為 10%)作為設計標準，以曾文-烏山頭水庫系統之現況需水量每日約 40 萬噸來看，120 日之可忍受缺水範圍約為 480 萬噸( $40 \times 0.1 \times 120 \approx 480$ )。

##### (3)評估枯水期間供水缺口

曾文-烏山頭水庫系統 120 日乾旱事件之長期平均缺水量約為 765 萬噸，而系統可忍受缺水範圍約為 480 萬噸，兩者相差約 285 萬噸，此即枯水期供水缺口，供水缺口相當於每日 2.4 萬噸( $285 \div 120 \approx 2.4$ )，可作為未來枯水期水源規劃上參考。

## 五、結論與建議

本研究嘗試導入乾旱 SDF 曲線觀念並應用於量化水資源系統乾旱特性，期望可更合理描述枯水期間之缺水特性。除詳細說明乾旱 SDF 曲線產製流程與分析結果，亦說明其可能之應用方式，包含：連結歷史水文乾旱事件、乾旱衝擊評估以及枯水期間供水缺口評估。針對重要研究成果與建議說明如下：

1. 為合理分析水資源系統於枯水期間之缺水特性，本研究發展乾旱 SDF 曲線以描述缺水量、延時以

及頻率年之關係，並總結重要特性如下：(1)延時固定頻率年愈高其缺水率有增加趨勢(強度愈高)；(2)頻率年固定延時愈長其缺水率則有降低之趨勢(強度愈低)；(3)長期平均缺水量約略等於頻率年2年與5年所對應缺水量之平均值。

2. 為瞭解2014至2015年水文乾旱事件於曾文-烏山頭水庫系統造成之衝擊，本研究將該時段各個延時之最大缺水量點繪至現況條件下乾旱SDF曲線，分析結果顯示：2014至2015年缺水事件之頻率年約莫為10年左右，其屬於10年發生一次之大旱。
3. 為評估泥砂淤積對於水資源系統之影響，比對現況條件下乾旱SDF曲線與莫拉克颱風影響前乾旱SDF曲線，比對結果顯示：泥砂淤積會造成各個延時與頻率年對應之缺水量增加，其造成缺水率增加約1.5%至6.0%。
4. 本研究嘗試應用乾旱SDF曲線於枯水期間供水缺口評估，其評估流程如下：(1)查詢長期平均缺水、(2)計算可容忍範圍、(3)評估枯水期間供水缺口。以曾文-烏山頭水庫系統為例，其枯水期間供水缺口相當於每日2.4萬噸，可作為未來枯水期間水源規劃上參考。
5. 本研究於乾旱SDF曲線產製流程中主要係採用單變量頻率分析，在延時固定之前提下針對年最大缺水量進行頻率分析。然而，實際情況下乾旱事件嚴重度與延時之間可能具有相關性，建議未來可採用雙變量頻率分析，以更合理反應乾旱事件嚴重度與延時相關性造成之影響。
6. 在防洪改善設計標準上，已對於暴雨特性有明確規範，例如：「河川治理及環境營造規劃參考手冊」建議縣市管河川於暴雨延時應採用一日或二日暴雨造成較大洪峰流量者，而暴雨重現期則係採用25年作為標準。然而，乾旱SDF曲線雖可合理描述水資源系統於枯水期間之缺水特性，提供缺水事件之嚴重度、延時以及頻率年等資訊，惟於水資源系統設計與規劃時，乾旱SDF曲線之參數應如何決定尚未有明確規範，例如：設計水資源系統時應選擇何種延時或頻率年作為標準，建議未來可深入探討乾旱SDF曲線之參數制定，以供水資源系統設計與規劃參考。

## 謝誌

本研究承蒙經濟部水利署計畫「因應氣候變遷水

源供應與經濟影響研究(1/2)」(計畫編號：MOEAWRA1080330)與經濟部水利署水利規劃試驗所計畫「因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估」(計畫編號：MOEAWRA1070170)經費補助得以順利完成初步成果並持續精進與推廣，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Ganguli, P., Ganguly, A.R., "Space-time Trends in U.S. Meteorological Droughts," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 235-259, 2016.
2. Guzmán, D.A., Mohor, G.S., Taffarello, D., Mendiondo, E.M., "Economic Impacts of Drought Risks for Water Utilities through Severity-Duration-Frequency Framework under Climate Change Scenarios," *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-615>, 2017.
3. Halwatura, D., Lechner, A.M., Arnold, S., "Design Droughts: A New Planning Tool for Ecosystem Rehabilitation," *International Journal of Geomate*, 8(1), 1138-1142, 2015.
4. Juliani, B.H.T., Okawa, C.M.P., "Application of a Standardized Precipitation Index for Meteorological Drought Analysis of the Semi-arid Climate Influence in Minas Gerais, Brazil," *Hydrology*, 4, 26. doi:10.3390/hydrology4020026, 2017.
5. Kwak, J., Kim, S., Kim, D., Kim, H., "Hydrological Drought Analysis Based on Copula Theory," *River Basin Management*, Chapter 4, Published by INTECH, 2016.
6. National Academies, "Drought Management and Its Impact on Public Water Systems. Report on a Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board," National Research Council, National Academies, 127pp, 1986.
7. Rajsekhar D., Singh, V.P., Mishra A., "Hydrological Drought Atlas for the State of Texas," Texas Water Resources Institute, Technical Report Number 474, 2013.
8. Reddy, M.J., Ganguli, P., "Application of Copulas for Derivation of Drought Severity-Duration-Frequency Curves," *Hydrological Processes*, 26, 1672-1685, 2012.
9. Sung, J.H., Chung, E.S., "Development of Streamflow Drought Severity-Duration-Frequency Curves Using the Threshold Level Method," *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3341-3351, 2014.
10. U.S. Army Corps of Engineers, "Managing Water for

- Drought. National Study of Water Management during Drought,” Institute for Water Resources, IWR Report 94-NDS-8, 1994.
11. Vasiliades, L., Sarailidis, G., Loukas, A., “Hydrological Modelling of Low Flows for Operational Water Resources Management,” *European Water*, 57, 223-229, 2017.
  12. 曾宏偉、郭振民、楊道昌、游保杉，「氣候變遷對於水庫系統缺水情況之影響與其不確定性」，105 年度農業工程研討會，新竹，臺灣，2016。
  13. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估」，2018。
  14. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」，2013。
  15. 經濟部水利署南區水資源局，「106 年度曾文水庫淤積測量工作」，2017。
  16. 經濟部水利署南區水資源局，「氣候變遷下曾文、烏山頭水庫系統供水潛能分析檢討」，2015。
  17. 經濟部水利署南區水資源局，「莫拉克颱風災後南區因應氣候異常之供水潛能及供水調度檢討與因應對策」，2010。
  18. 經濟部水資源局，「水文設計應用手冊」，2001。

收稿日期：民國 108 年 06 月 18 日

修正日期：民國 108 年 11 月 28 日

接受日期：民國 109 年 02 月 07 日