

新竹頭前溪水資源系統乾旱風險評估

Drought Risk Assessment of Water Resources System-Taking Hsinchu Area as an Example

經濟部水利署水利規劃試驗所

正工程司

研究助理

研究助理

陳聖文

陳泳錦

侯承佑

Sheng-Wen Chen

Yung-Chin Chen

Cheng-Yu Hou

摘 要

近年來，由於極端氣候導致枯旱事件日趨頻繁及嚴重。於嚴重枯旱期間，仰賴適當之水源調度與備援，以確保供水穩定。為因應水資源系統可能面臨較歷史最嚴重事件更為嚴峻的乾旱情況，亟需評估極端事件之風險並據以研擬超前部署策略，來面對極端枯旱之威脅。透過頻率分析估算某特定延時下不同發生機率/頻率年之乾旱嚴重程度，可瞭解不同乾旱嚴重程度的機率特性。進一步透過頻率分析所產生之不同延時下乾旱事件嚴重程度與發生機率/頻率年之關係，可整合繪製成乾旱嚴重程度-延時-頻率關係曲線，以考慮枯水時期乾旱事件之缺水風險。

本文之內容，以新竹地區為案例，導入乾旱 SDF 曲線圖及設計乾旱以評估新竹頭前溪水資源系統面臨乾旱事件之缺水風險，並檢視備援容量與相關因應措施可否足以因應氣候變遷之衝擊，以提升極端乾旱事件下水資源系統之調適能力與抗旱韌性。

關鍵詞：水資源系統，乾旱風險，乾旱 SDF 曲線

Abstract

In recent years, drought events have become more frequent and severe due to extreme weather. During periods of severe drought, We rely on proper water resource scheduling and backup to ensure a stable water supply. In response to the fact that the water resources system may face a even more severe drought than the worst event in history, it is urgent to assess the risk of extreme events and formulate advanced deployment strategies accordingly to face the threat of extreme drought. The probability characteristics of different drought severity can be understood by estimating the drought severity in different probability/frequency years under a certain time delay through frequency analysis. Furthermore, the relationship between the severity of drought events and the probability of occurrence/frequency year under different delays generated by frequency analysis can be integrated and drawn into a relationship curve

of drought severity-delay-frequency to consider the water shortage risk of drought events during dry seasons.

The content of this paper, taking the Hsinchu area as an example, introduces the drought SDF curve and designs the drought to evaluate the water shortage risk of the Hsinchu Touqianxi water resources system when facing a drought event. To further improve the adaptability and drought resilience of the water resources system under extreme drought events, this paper also checks whether the backup capacity and related response measures are sufficient to cope with climate change.

Keywords: water resource system, drought risk, drought SDF curve

一、前言

受到近年極端事件頻傳影響，臺灣水資源供需系統在經營與管理上皆遭受極大挑戰，例如：109 年無颱風登陸臺灣，打破 56 年以來紀錄，同年也在水利史上創下許多第一次：(1)夏季豐水期進行人工增雨、(2)在 10 月召開旱災應變會議以及(3)在 10 月水情燈號由綠燈（水情提醒）轉為黃燈（減壓供水）。在頻繁極端事件威脅下，如何提升水資源供需系統之抗旱韌性，以減緩極端事件衝擊，為當前水資源經營與管理的重要努力目標。由於臺灣水資源供需系統之設計規劃與檢討皆係基於缺水指數(shortage index, SI)，其在計算上採年缺水率與平均之概念，不易反應出枯水期或極端枯旱時期的實際缺水情況，導致枯水期或極端枯旱時期之水資源管理較為不易。因此，每當有極端枯旱事件發生，水資源供需系統在經營與管理上更是困難重重。

為能減緩極端事件對於水資源供需系統之衝擊，首先可藉由歷史極端事件特性分析，以探討對水資源供需系統之影響，並透過導入極端乾旱概念來反應枯水期與極端枯旱時期之實際枯旱風險（缺水情況），再依據「極端乾旱」之缺水量進行備援評估與探討備援水量對於減緩極端枯旱衝擊之效益。

本文內容以新竹地區為案例，導入乾旱 SDF 曲線圖與設計乾旱來評估新竹地區水資源系統面臨乾旱事件之缺水風險，並檢視備援容量與相關因應措施可否因應氣候變遷之衝擊，以提升極端乾旱事件下水資源系統之調適能力與抗旱韌性。

二、文獻回顧

1. 缺水指數之概念

臺灣於70年代左右即引用缺水指數(SI)進行規劃與研判水資源設施之供水能力^[1]，後續相關水資源設施之規劃演算供水潛能亦採用缺水指數作為評估標準。SI為美國陸軍工兵團提出，透過計算資料時段內各年缺水率平方之平均值，將缺水程度量化為一數值，其定義如下：

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

其中，N為資料總年數、 D_i 為第i年需水量、 S_i 為第i年供水量。

SI透過推求各年缺水程度之平均值，將資料時段內缺水情況量化成單一數字，並在計算過程中透過「平方」給予較嚴重枯旱（缺水）情況較高權重。以往規劃選擇SI介於0.5至2.0間作為供水能力評估標準，若SI愈小代表用水端（需求端）可忍受之缺水程度較低，其可能遭受之平均缺水情況較為輕微；而SI愈大則代表用水端（需求端）可忍受之缺水程度較高，其可能遭受之平均缺水情況則較為嚴重。然而，受臺灣特殊水文環境之影響（即豐、枯水年交替頻繁與年內豐枯水期分明），供水系統之缺水情況每年皆有所不同，基於平均年缺水率概念之SI應用於枯水期水資源調配計算是否合理，有必要進行深入探討。

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、缺水強度與缺水延時等，故導入乾旱SDF曲線以選擇較為細緻之時間尺度，如30、60以及90日，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。

2. 極端乾旱之定義

美國陸軍工兵團於1994年執行乾旱時期水資源管理之國家型研究計畫並發表「乾旱水資源管理」研究報告^[2]，文中提及「極端乾旱」之概念與應用，並建議採用其測試水資源系統表現，而「極端乾旱」可用歷史或近年最嚴重之乾旱事件與合成乾旱事件(synthetic drought)。由於歷史或近年最嚴重之乾旱事件缺少機率概念，無法瞭解未來發生相同乾旱事件之機率或頻率年。此外，乾旱事件是否具有足夠代表性亦不明確，未來是否有更為嚴重的事件會發生且其機率為何並無法得知。因此，另外建議以合成乾旱事件作為「極端乾旱」。合成乾旱係採用水文統計方式（例如：頻率分析）產出多場嚴重乾旱事件（例如：不同頻率年之乾旱事件），以測試抗旱因應作為之成效，並可進一步探討其成本與成效之關係。

導入「極端乾旱」之合成乾旱概念可透過頻率分析估算某特定延時下不同發生機率/頻率年之乾旱嚴重程度，來瞭解不同乾旱嚴重程度的機率特性。進一步透過頻率分析所產生之不同延時下乾旱事件嚴重程度與發生機率/頻率年之關係，可整合繪製成乾旱嚴重程度-延時-頻率關係曲線(drought severity-duration-frequency curves)，簡稱「乾旱SDF曲線」。乾旱SDF曲線可應用於不同的乾旱類型，例如：氣象乾旱、水文乾旱與社會經濟乾旱。

3. 乾旱 SDF 曲線

乾旱SDF曲線(drought severity-duration-frequency curve)為水資源供需系統一旦發生乾旱事件，其缺水事件之缺水量（即嚴重度）、延時以及頻率年（發生機率）之關係，如圖1。透過乾旱SDF曲線可設定水資源供需系統之「極端乾旱」（類

比於防洪工程之保護標準)。一般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個月(相較於年尺度更加細緻),以描述枯水期間短延時高強度之缺水事件,而其延伸應用上亦包含許多面向,如整合乾旱衝擊與經濟分析、繪製空間上極端乾旱事件之等值圖,以及極端乾旱事件趨勢分析等。目前已有許多研究投入乾旱SDF曲線之發展與應用,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^[3]。

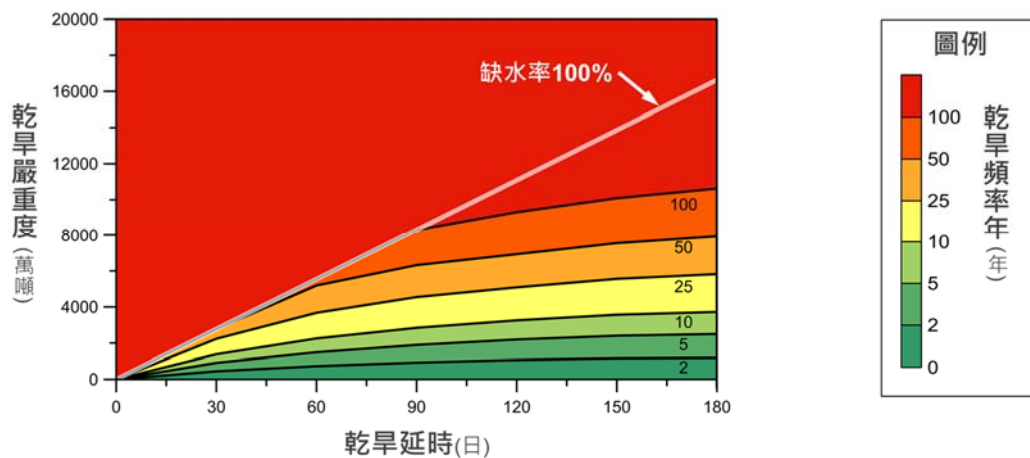


圖 1 乾旱 SDF 曲線示意圖

三、研究區域與資料

本計畫頭前溪水源運用範圍之系統架構如圖 2 所示,現況設施包含寶山、寶山第二水庫、上坪堰及隆恩堰。頭前溪逕流量以上坪站及內灣站之流量為基準,並以此推估各水源控制點之入流量,其中上坪堰入流量採用上坪站面積比(1.051 倍)推估,隆恩堰天然流量採用水規所 98 年「頭前溪流域水資源開發個案工程初步規劃-新竹地區水資源供需檢討^[4]」推估式。

上坪堰歷年各月平均流量列如圖 3 所示,平均水源量為 5.03 億立方公尺,4~9 月為豐水期,水源量為 3.67 億立方公尺,佔全年水源量之 73%;隆恩堰歷年月平均流量列如圖 3 所示,平均水源量為 8.58 億立方公尺,4~9 月為豐水期,水源量為 6.30 億立方公尺,佔全年水源量之 74%^[5]。

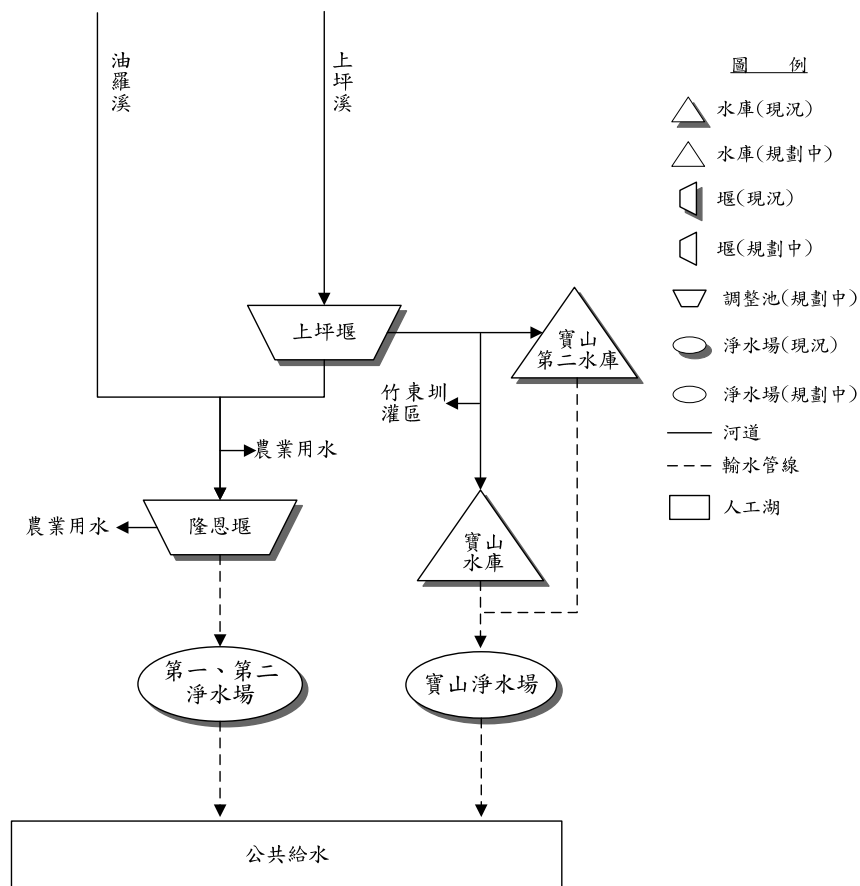


圖2 頭前溪水源運用架構圖

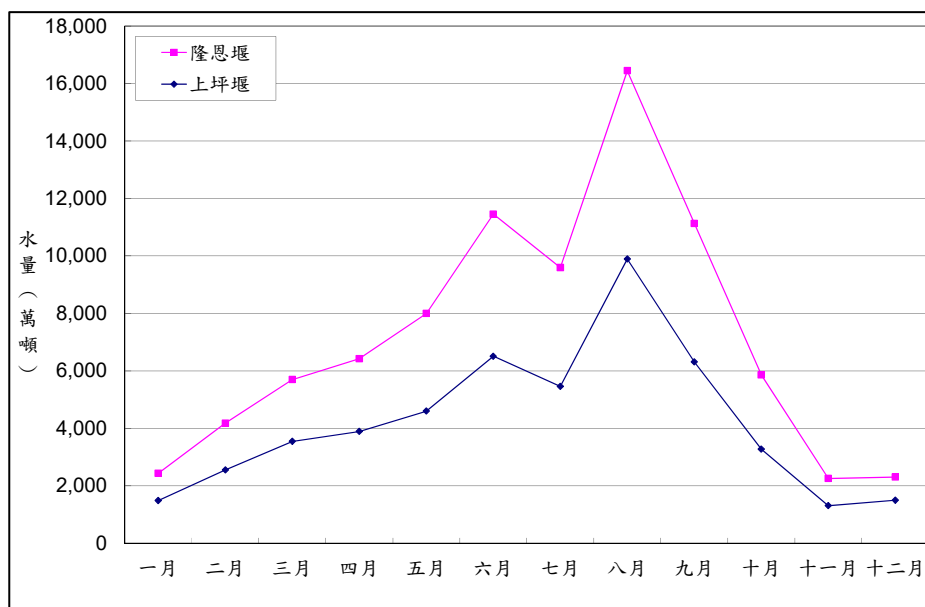


圖3 頭前溪流域各水源設施入流量歷年月平均分布圖

四、研究流程與方法

1. 乾旱 SDF 曲線繪製流程

乾旱SDF曲線產製流程如圖4，其產製主要係基於長期水資源供需模擬結果，分析缺水（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。針對各步驟說明如下：

- A、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。
- B、採用供水操作模式進行水資源系統之長期供水操作分析，並產出歷年供水量與需水量之時間序列資料。其中，長期供水操作分析採用至少30年以上資料，以確保後續乾旱頻率分析結果之合理性。
- C、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。再以缺水量作為乾旱事件之嚴重度，依水文豐枯特性重新整理資料，進一步探討不同延時下乾旱事件之特性，並針對不同延時（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。
- D、針對不同延時之年最大缺水量資料進行頻率分析，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^[6]，例如：一般極端值分布(GEV)、極端值一型分布(EV1)、皮爾遜第三型分布(PT3)、對數皮爾遜第三型分布(LPT3)、三參數對數常態分布(LN3)以及常態分布(N)，再配合適合度檢定以決定最佳統計分布。
- E、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、延時以及頻率年之關係圖（乾旱SDF曲線）^[7]。

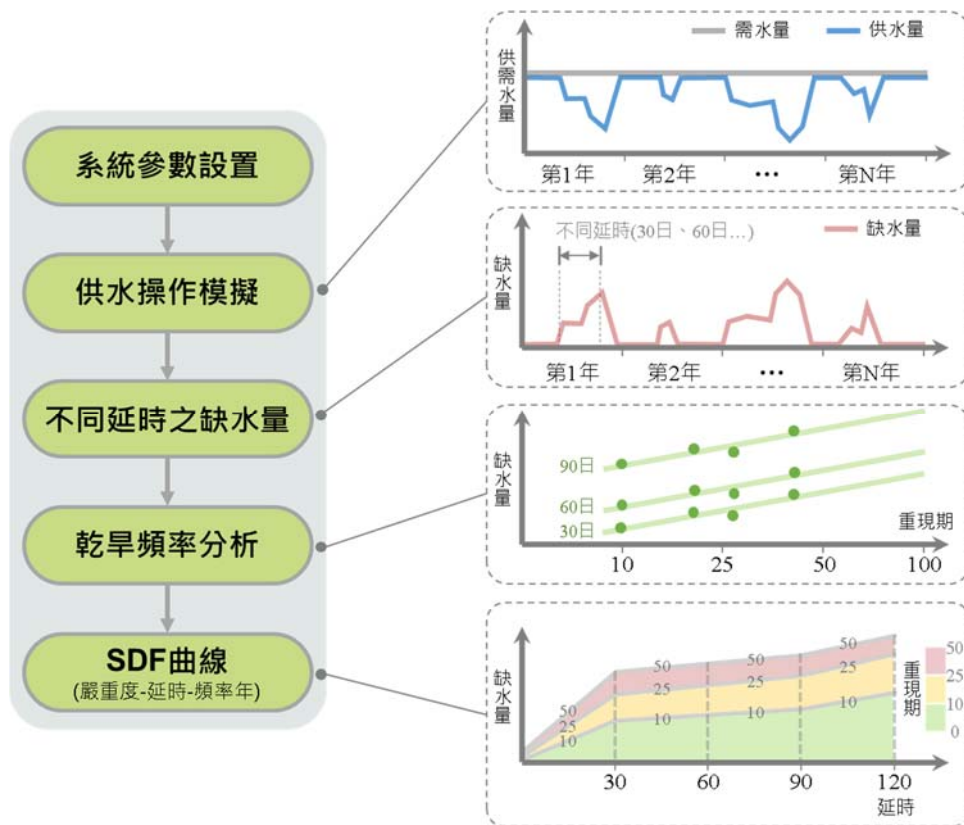


圖4 乾旱SDF曲線產製流程圖

2. 水源運用分析原則

- A、頭前溪水源運用優先利用隆恩堰川流水，不足水量則由寶山、寶山第二水庫補充。另考慮演算清水供水能力，淨水損失採用5%估列。
- B、上坪堰入流量大於「上坪攔河堰運用要點」所列引水基準流量時，優先取用2.7秒立方公尺水量供竹東圳及樹杞林圳灌區使用及引入寶山水庫蓄存利用，若仍有剩餘水量時，引入寶山第二水庫蓄存利用。
- C、當隆恩堰入流量大於生態基流量及既有用水權益水量時，引水供應公共給水。
- D、當上述供水仍無法滿足公共給水需求時，考慮寶山水庫優先興建，為保障其供水權益及實際供水狀況，優先利用寶山水庫供水每日10萬立方公尺，再有不足，由寶山第二水庫供水。
- E、寶山第二水庫視蓄水狀況參酌運用要點之蓄水利用運轉規定供水。當水庫水位高於運轉規線時，依計畫用水量供水；當水庫水位低於運轉規線時，得減量供水，本計畫依不同區間進行減量供水。
- F、上坪堰所需放流之生態基流量已列入引水基準內，最小為0.5秒立方公尺；隆恩堰則依據「頭前溪隆恩堰用水分配作業要點」放流0.38秒立方公尺^[5]。

五、結果與討論

圖 5 為頭前溪水資源系統現況條件下乾旱 SDF 曲線，圖中橫軸為延時、縱軸為缺水量、等值線代表不同頻率年，而斜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，在頻率年固定之情況下，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。

若需評估水資源系統在極端枯旱影響下可能面對之缺水情況，可藉由查詢乾旱 SDF 曲線中「極端乾旱」所對應之缺水量。現況條件下頭前溪水資源系統其極端乾旱事件之延時與頻率年參數如分別採用 120 日與 10 年，此組參數對應缺水量約為 2,093 萬噸。因頭前溪之現況需水量為 43.2 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 40.4% 左右 ($2,093 \div 120 \div 43.2 = 40.37\%$)。

若考量枯旱時期啟動備援方案以石門水庫至新竹原水聯通管^[8]進行分析，其極端乾旱事件之延時與頻率年參數亦分別採用 120 日與 10 年，此組參數對應缺水量約為 1,438 萬噸。因頭前溪之現況需水量為 43.2 萬噸/日，將其缺水量換算為缺水率約為 27.7% 左右 ($1,438 \div 120 \div 43.2 = 27.74\%$)，如圖 6 所示。

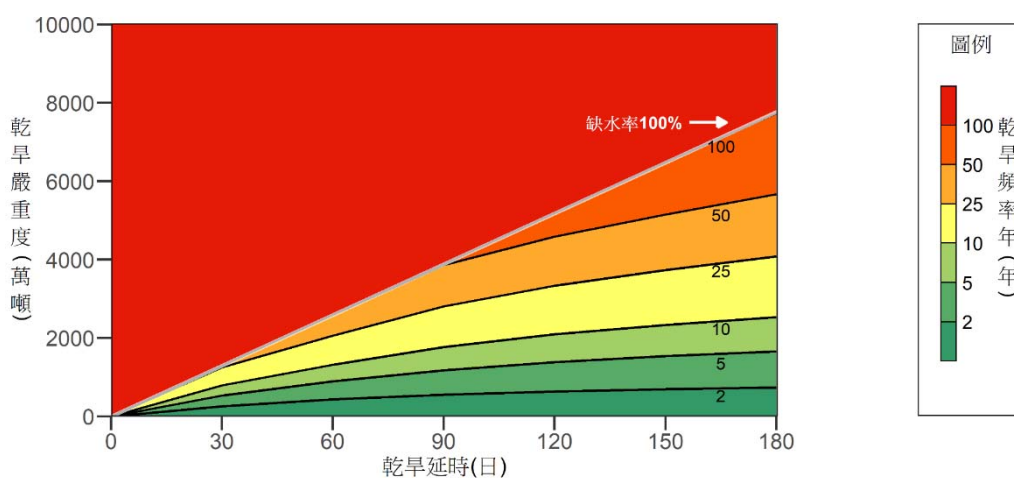


圖 5 現況情境頭前溪水資源系統乾旱 SDF 曲線

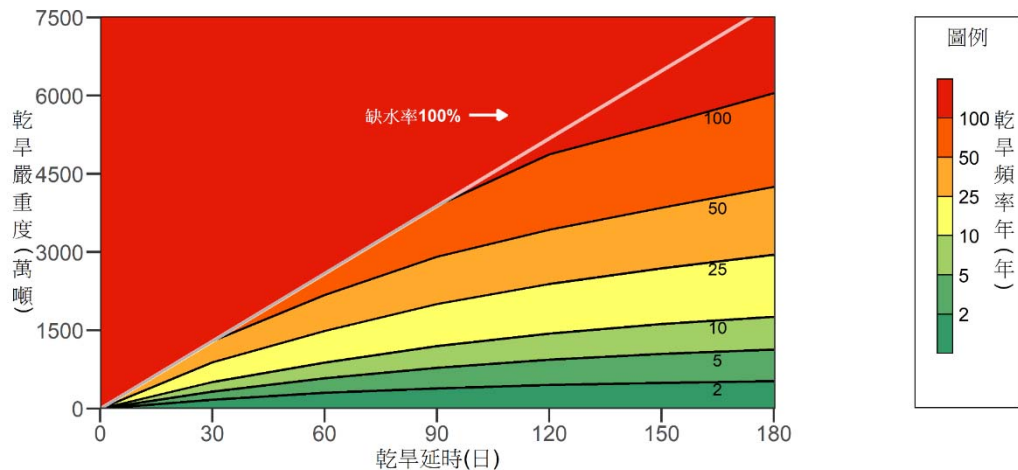


圖6 啟動備援方案下頭前溪水資源系統乾旱SDF曲線

六、結論與建議

1. 臺灣水資源系統設計規劃與評估檢討上常採用缺水指數(SI)作為基準，雖其可描述長期平均缺水情況，但不易反映極端乾旱時期之缺水情況。故本研究採用乾旱SDF曲線量化水資源系統於極端乾旱時期之缺水風險，用以強化於極端乾旱時期之解釋能力。
2. 藉由比對新竹頭前溪水資源系統地區於不同供需條件下極端枯旱潛勢地圖，可瞭解水源調度等方案紓緩極端乾旱風險之效益。以現況條件下極端枯旱事件作為基準，因受益於石門到新竹原水連通計畫之推動，新竹地區之極端缺水率已有所改善，突顯該方案對於紓緩極端枯旱衝擊之重要性。
3. 因乾旱SDF曲線可同時描述乾旱缺水量、延時以及頻率年之關係，建議未來於水資源管理可納入乾旱SDF曲線進行備援水量評估規劃，以進一步評估極端乾旱事件可能造成之衝擊及備援方案之效益。

七、參考文獻

1. 經濟部水利署，供水可度標準建立之研究，2002。
2. USACE, "Managing Water for Drought. National Study of Water Management during Drought", Institute for Water Resources, IWR Report 94-NDS-8, 1994.
3. Kwak, J., Kim, S., Kim, D., Kim, H., "Hydrological Drought Analysis Based on Copula Theory", River Basin Management, Chapter 4, Published by INTECH., 2016.
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所，頭前溪流域水資源開發個案工程初步規劃-新竹地區水資源供需檢討，2009。
5. 經濟部水利署水利規劃試驗所，109 年經理計畫滾動檢討-北部區域水資源經營

管理調適策略規劃，2021。

6. 經濟部水資源局，水文設計應用手冊，2001。

經濟部水利署水利規劃試驗所，因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃，2021。

7. 經濟部水利署水利規劃試驗所，強化新竹地區穩定供水－石門水庫至上坪堰原水聯通管及油羅溪伏流水可行性規劃，2022。