

# 氣象及水文乾旱特徵與缺水關係之探討

## Exploring the Relationships between Meteorological and Hydrologic Drought Characteristics and Water Shortages

國立成功大學水利及海洋工程學系  
碩士班研究生 陳乃卉  
Nai-Hui Chen

教授 蕭政宗  
Jenq-Tzong Shiau

### 摘 要

台灣位處亞熱帶地區，中南部降雨受梅雨季與颱風季的影響，雨量多集中在夏季，呈現乾濕分明的趨勢，又因地形起伏大，造成坡陡流急的情形，因此多仰賴水庫儲存水源，以提供乾季作使用。本文主要探討氣象乾旱、水文乾旱與水庫供水不足以致缺水三者之間的關係，其中以標準化降水指數(Standardized Precipitation Index, SPI)來代表氣象乾旱，並以標準化流量指數(Standardized Streamflow Index, SSI)來代表水文乾旱，水庫營運則以無限水機制的標準營運策略(Standard Operating Policy, SOP)來計算缺水。本文選用位於台灣南部區域之南化水庫及甲仙攔河堰為例說明，以 1960 至 2019 年間之雨量及流量資料，計算 SSI-1 與不同時間尺度 SPI 間之皮爾森相關係數。結果顯示，利用全部資料建立雨量與流量資料經驗 CDF，並計算相對應之 SPI 及 SSI 數值後，求得之南化水庫 SPI-2 與 SSI-1 最為相關，而甲仙攔河堰則以 SPI-6 與 SSI-1 相關係數最大。以 SSI=0 作為定義乾旱事件的門檻，與 SOP 所獲得的缺水事件有更密切的關係。

關鍵詞：氣象乾旱，SPI，水文乾旱，SSI，缺水

### Abstract

Taiwan is located in a subtropical region where the rainfall in the south region is greatly affected by the plum rain and typhoon seasons. The rainfall is mostly concentrated in summer, showing clear dry and wet seasons. Due to high gradient slope in the terrain and large flow fluctuation, it relies on reservoirs to store surface water sources for dry season use in Taiwan. The purpose of this study is to explore the relationships between meteorological drought, hydrologic drought and water shortage caused by insufficient reservoir supplies. The standardized precipitation index (SPI) and the standardized streamflow index (SSI) are used to represent meteorological drought and hydrologic drought, respectively. Water shortage is obtained by reservoir operation model with the standard operating policy (SOP), which involves no hedging mechanism. The Nanhua Reservoir- Jiaxian Weir located in southern Taiwan is used

as an example in this study. The rainfall and streamflow data from 1960 to 2019 are used in this study to calculate correlation coefficients between the SSI-1 and various time scales SPI. Drought propagation between the meteorological and hydrologic drought is determined by the time scale with the highest coefficients. Then all data are used to establish the empirical CDF of rainfall and flow data and calculate the corresponding SPI and SSI values. It is found that the SPI-2 of Nanhua Reservoir is the most related with SSI-1, and the coefficients between SPI-6 and SSI-1 of Jiaxian Weir is the highest. Besides, using SSI=0 as the threshold to define drought event, close relationship with the water shortage events obtained by the SOP is observed.

Keywords: meteorological drought, SPI, hydrologic drought, SSI, water shortage

## 一、前言

台灣地區年降雨量十分豐沛，約為世界平均值的 2.5 倍以上，但由於降雨時空分布不均，中南部地區雨量多集中在每年 5 月至 10 月，豐水期與枯水期水量差異懸殊，再加上中央山脈的地形影響，山勢陡峭，坡陡流急，導致蓄水不易，使得台灣地區雖雨量豐沛卻也常出現缺水問題，為避免嚴重乾旱發生，合理的水資源調配是十分重要的，因此水庫是不可或缺的水利設施之一。然而，即便是興建水庫協助儲存水源，在嚴重的乾旱情況下還是可能出現水庫供水不足以致缺水的問題產生。因此，若能透過歷年來雨量及流量資料來辨別入流量多寡，在水量少時提早限制水庫的水源釋放，就能大幅地降低水庫供水效率不足的情況，並減少缺水所帶來的影響。

Barker et al. (2016) 建立乾旱監測預警 (Monitoring and Early Warning, M&EW) 系統，其中使用了標準化降水指數 (SPI) 等乾旱指標。Huang et al. (2017) 則研究了從氣象乾旱到水文乾旱的傳播及其潛在影響因素，透過揭示乾旱傳播過程來緩解乾旱的影響。Apuv et al. (2017) 進一步針對不同氣候特徵對於水文乾旱傳播的作用，其中在季節性、氣象乾旱與降水時間等條件中，以降水時間具有最顯著的影響力。Guo et al. (2020) 為了瞭解不同程度的氣象乾旱如何引發相應不同程度的水文乾旱傳播，提出了一種基於 Bayesian 網絡的新模式來解決問題，利用乾旱傳播時間將不同乾旱類型進行匹配，以此確定觸發各級水文乾旱的氣象乾旱條件。

本研究參考 Xing et al. (2021) 中探討以水庫為主的中國 Darling 河流域，其不同時間尺度下氣象與水文乾旱的傳播，將不同時間尺度之 SPI 數據與 SSI-1 作相關性分析，得到與 SSI-1 最為相關的 SPI 時間尺度，之後再透過 SSI 數值來判斷與缺水事件的關係。其中在定義乾旱事件的方法廣泛，本研究根據 Ma et al. (2019) 中定義乾旱事件的方法，以 SSI=0 作為乾旱事件的門檻，將連續性負 SSI 數值視為一次水文乾旱事件，並針對不同時間尺度下的 SSI 數值進行研究。此外在水庫營運方面，Men et al. (2019) 將傳統限水策略 (Hedging Rules, HR) 改進後得到聯合限水策略 (Joint Hedging Rules, JHR)，再將 JHR 與 HR 和標準營運策略 (SOP) 進行比較。但為了更好呈現水庫供水不足以致缺水的情況，本研究選用無限水機制的 SOP 作為水庫營運的方式，讓缺水純粹由乾旱事件所導致。

本研究以南化水庫及甲仙攔河堰系統作為研究對象，取用 1960 年至 2019 年雨量及流量數據，轉換為 SPI 及 SSI 數據，並分析氣象乾旱與水文乾旱之間傳播過程的相關性，再進一步研究水文乾旱與缺水之間的關係，嘗試透過一連串傳播過程，將結果作為未來乾旱事件發生及水庫限水策略上之有效參考。

## 二、研究地區與使用資料

### 2.1 研究地區

本研究以南化水庫及甲仙攔河堰系統作為研究對象，南化水庫位於台南市南化區曾文溪的支流後堀溪上，於民國 82 年完工，為供應台南與高雄地區主要民生用水之單目標水庫，其集水面積約為 104 平方公里，滿水位標高為 180 公尺，設計庫容約為 158 百萬立方公尺(MCM)。南化水庫水源除自身集水區流量外，還包含旗山溪甲仙攔河堰越域引水之流量，其中甲仙攔河堰位於高屏溪支流旗山溪上，與民國 88 年完工，集水面積約為 408 平方公里，引水主要配合南化水庫之需求進行，最大計畫引水量為每秒 30 立方公尺(cms)。表一所列為南化水庫與甲仙攔河堰各月份應保留水權量、計畫需水量、生態基流量與計畫越域引水量。

表一、南化水庫與甲仙攔河堰各月份應保留水權量、計畫需水量及蒸發率

| 月份  | 南化水庫           |                |               | 甲仙攔河堰          |                  |                |
|-----|----------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|
|     | 水權保留量<br>(cms) | 計畫需水量<br>(cms) | 蒸發率<br>(mm/日) | 水權保留量<br>(cms) | 計畫越域引水量<br>(cms) | 生態基流量<br>(cms) |
| 1月  | 0.20           | 5.52           | 2.88          | 8.32           | 30.0             | 2.71           |
| 2月  | 0.21           | 5.69           | 3.69          | 7.42           | 30.0             | 2.71           |
| 3月  | 0.26           | 4.85           | 4.31          | 8.16           | 30.0             | 2.71           |
| 4月  | 0.26           | 5.51           | 4.93          | 8.09           | 30.0             | 2.71           |
| 5月  | 0.27           | 5.58           | 4.86          | 8.98           | 30.0             | 2.71           |
| 6月  | 0.72           | 5.95           | 4.10          | 20.62          | 30.0             | 2.71           |
| 7月  | 0.72           | 6.02           | 4.57          | 23.45          | 30.0             | 2.71           |
| 8月  | 0.72           | 5.90           | 4.14          | 21.39          | 30.0             | 2.71           |
| 9月  | 0.72           | 6.30           | 4.12          | 21.38          | 30.0             | 2.71           |
| 10月 | 0.71           | 5.75           | 3.78          | 15.08          | 30.0             | 2.71           |
| 11月 | 0.42           | 5.94           | 3.00          | 12.58          | 30.0             | 2.71           |
| 12月 | 0.25           | 6.11           | 2.69          | 9.20           | 30.0             | 2.71           |

南化水庫因上游淤積嚴重，庫容已大幅度降低，目前最大庫容為 91.45 百萬立方公尺(2018 年測)。本研究根據南化水庫與甲仙攔河堰上游後堀溪與旗山溪之入流量資料與水庫蓄水量資料進行研究，其中研究期間為 1960 至 2019 年，並以旬作為演算單位。

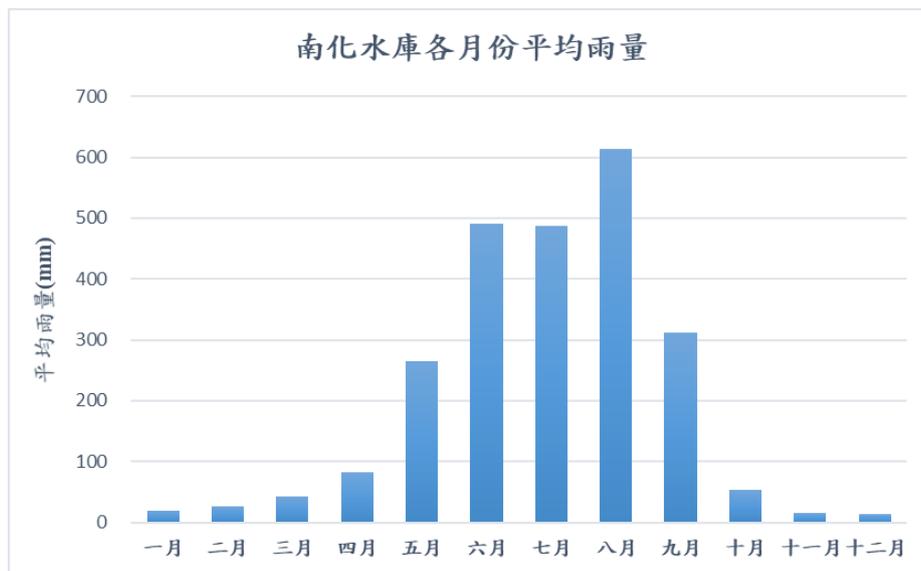
### 2.2 雨量使用資料

本研究使用之雨量資料取自臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP)，取用氣象局、水利署、民航局、環保署及林試所等多個單位提供之測站資料，研究期間為 1960

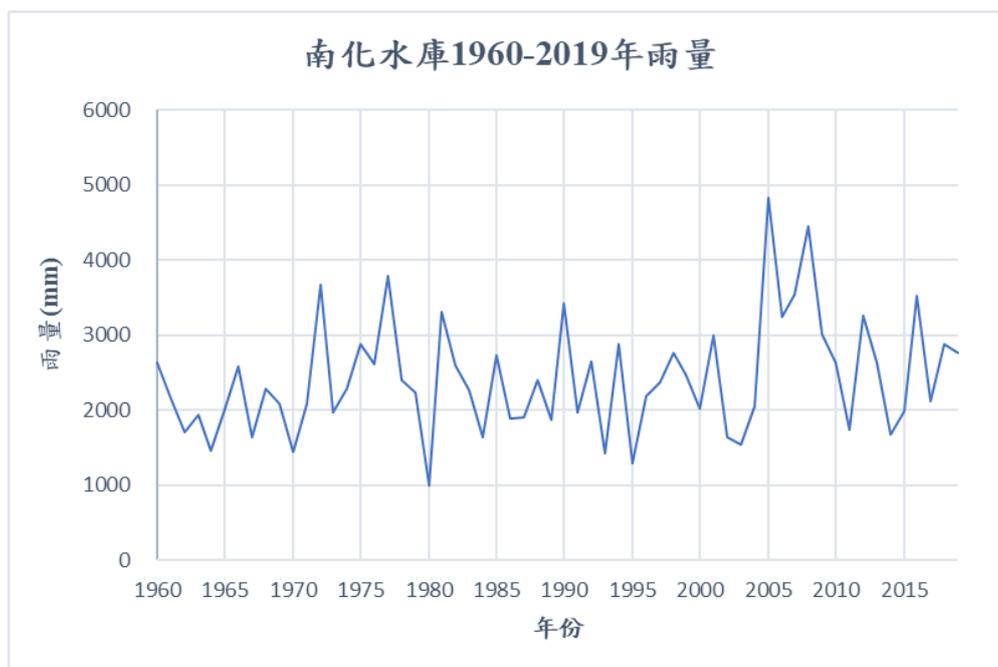
至 2019 年，總時長為 60 年，將每日觀測資料從原本分布不均之測站點位，內插至 1 公里解析度的網格，建置長期的網格化觀測降雨日資料。表二與表三分別列出南化水庫與甲仙攔河堰 1960-2019 年共 60 年各月份之雨量統計特性；圖一與圖二分別為南化水庫各月份平均雨量與 1960-2019 年雨量；圖三與圖四分別為甲仙攔河堰各月份平均雨量與 1960-2019 年雨量。

表二、南化水庫 1960-2019 年各月份雨量統計特性表(單位為 mm)

| 月份  | 一月     | 二月     | 三月     | 四月     | 五月     | 六月      | 七月      | 八月      | 九月      | 十月     | 十一月    | 十二月    |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 最大值 | 198.99 | 175.08 | 196.60 | 408.37 | 645.99 | 1628.05 | 1663.71 | 1991.75 | 1448.78 | 633.29 | 146.19 | 106.17 |
| 最小值 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 14.27  | 40.35   | 52.88   | 151.69  | 73.80   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 平均值 | 19.74  | 26.68  | 41.94  | 83.01  | 264.47 | 491.40  | 486.86  | 613.94  | 311.06  | 53.18  | 15.58  | 13.64  |
| 標準差 | 30.29  | 35.79  | 46.75  | 78.13  | 162.08 | 345.35  | 322.19  | 395.56  | 307.20  | 92.87  | 24.66  | 20.06  |



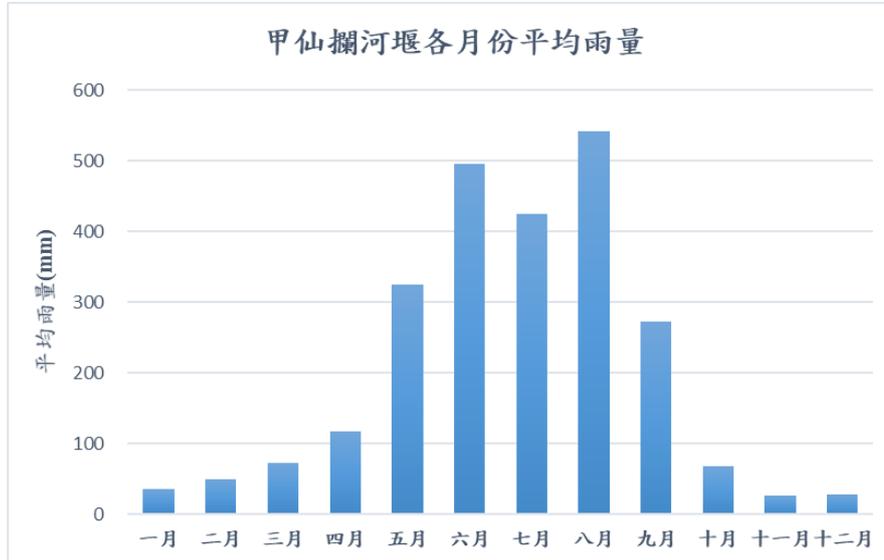
圖一、南化水庫各月份平均雨量分布圖



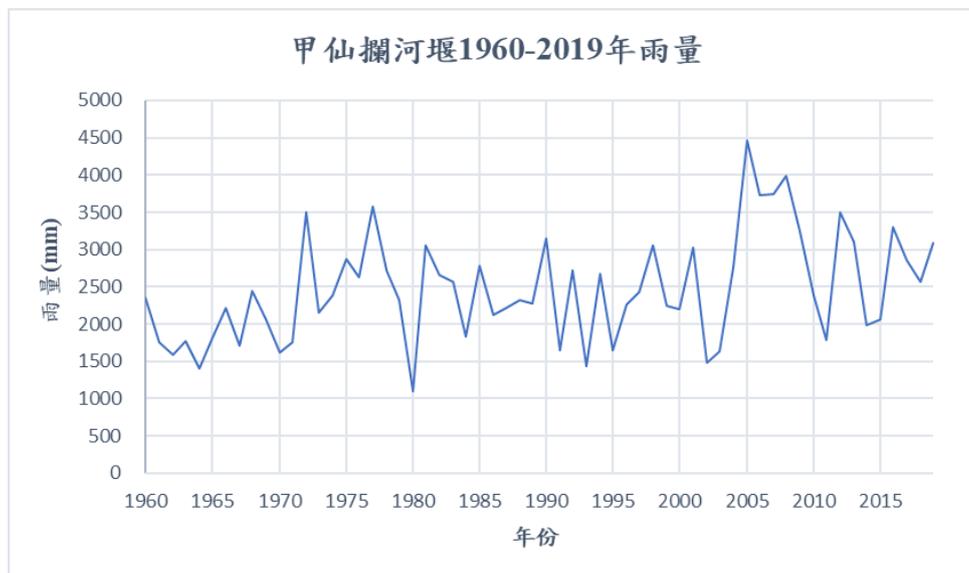
圖二、南化水庫 1960-2019 年雨量

表三、甲仙攔河堰 1960-2019 年各月份雨量統計特性表(單位為 mm)

| 月份  | 一月     | 二月     | 三月     | 四月     | 五月     | 六月      | 七月      | 八月      | 九月      | 十月     | 十一月    | 十二月    |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 最大值 | 280.20 | 298.01 | 330.52 | 532.09 | 735.65 | 1518.95 | 1415.51 | 2147.97 | 1512.75 | 656.44 | 189.63 | 117.34 |
| 最小值 | 0.00   | 0.06   | 0.65   | 0.62   | 21.53  | 17.72   | 49.30   | 120.37  | 57.29   | 0.61   | 0.00   | 0.02   |
| 平均值 | 36.57  | 50.21  | 73.33  | 117.56 | 325.40 | 495.38  | 424.20  | 542.35  | 273.42  | 68.50  | 27.55  | 27.64  |
| 標準差 | 44.27  | 61.19  | 70.52  | 103.45 | 187.92 | 339.39  | 310.26  | 389.72  | 274.11  | 101.26 | 34.91  | 30.14  |



圖三、甲仙攔河堰各月份平均雨量分布圖



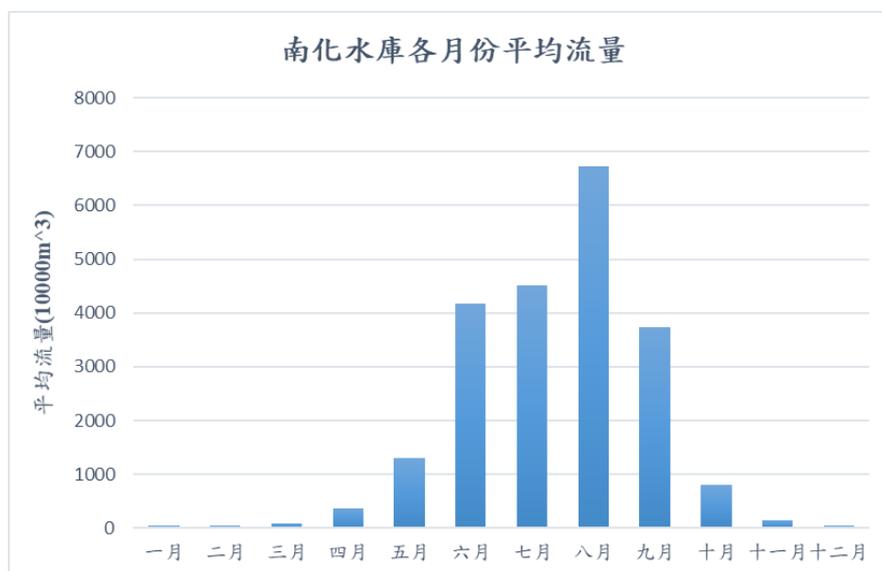
圖四、甲仙攔河堰 1960-2019 年雨量

### 2.3 流量使用資料

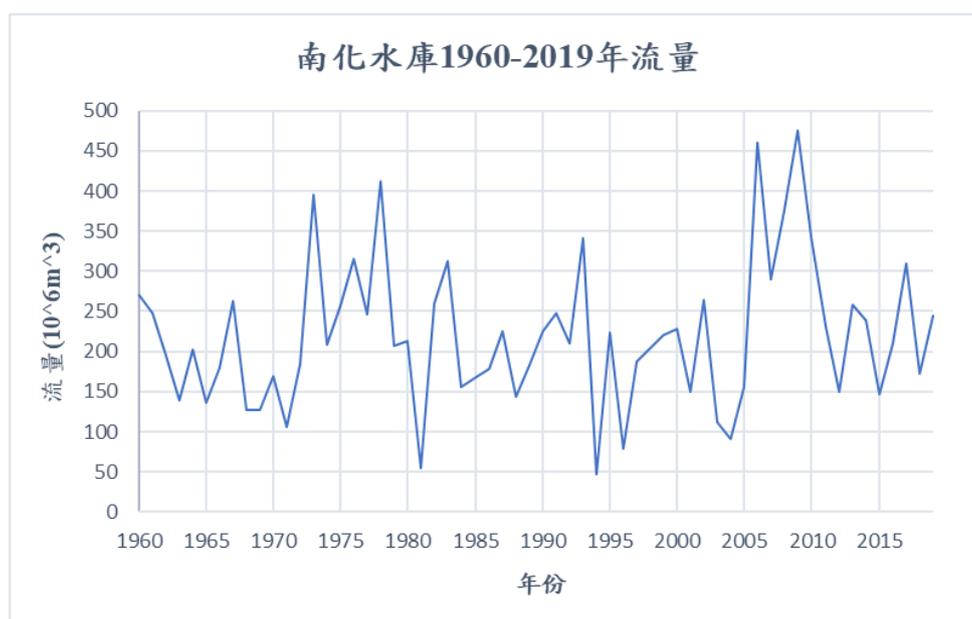
本研究所使用之流量資料為南化水庫與甲仙攔河堰 1960 至 2019 年之入流量，因台灣地區多數攔河堰上游未設置流量站，故入流量資料多來自鄰近地區之流量站匯集資料而成。表四與表五分別列出南化水庫與甲仙攔河堰 1960-2019 年共 60 年各月份之流量統計特性；圖五與圖六分別為南化水庫各月份平均流量與 1960-2019 年流量；圖七與圖八分別為甲仙攔河堰各月份平均流量與 1960-2019 年流量。

表四、南化水庫 1960-2019 年各月份流量統計特性表(單位為 10000m<sup>3</sup>)

| 月份  | 一月     | 二月    | 三月     | 四月      | 五月      | 六月      | 七月      | 八月      | 九月      | 十月      | 十一月    | 十二月   |
|-----|--------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| 最大值 | 767.3  | 499   | 871.2  | 8331    | 7109    | 16591.9 | 18354.8 | 28952.8 | 19497.8 | 11043.6 | 870    | 281.3 |
| 最小值 | 5      | 0     | 0      | 0       | 13      | 127     | 131     | 697     | 274.9   | 50.7    | 24     | 11.9  |
| 平均值 | 55.78  | 51.05 | 87.52  | 360.79  | 1296.75 | 4163.66 | 4508.78 | 6717.46 | 3724.86 | 804.62  | 139.84 | 56.37 |
| 標準差 | 110.55 | 88.12 | 183.90 | 1161.23 | 1576.49 | 3723.72 | 3686.85 | 4898.62 | 3739.08 | 1454.89 | 126.79 | 54.01 |



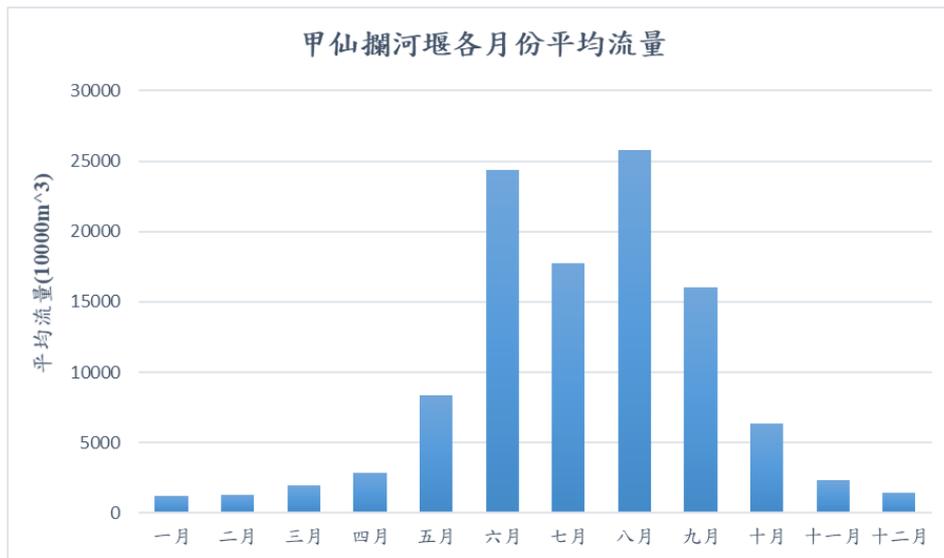
圖五、南化水庫各月份平均流量分布圖



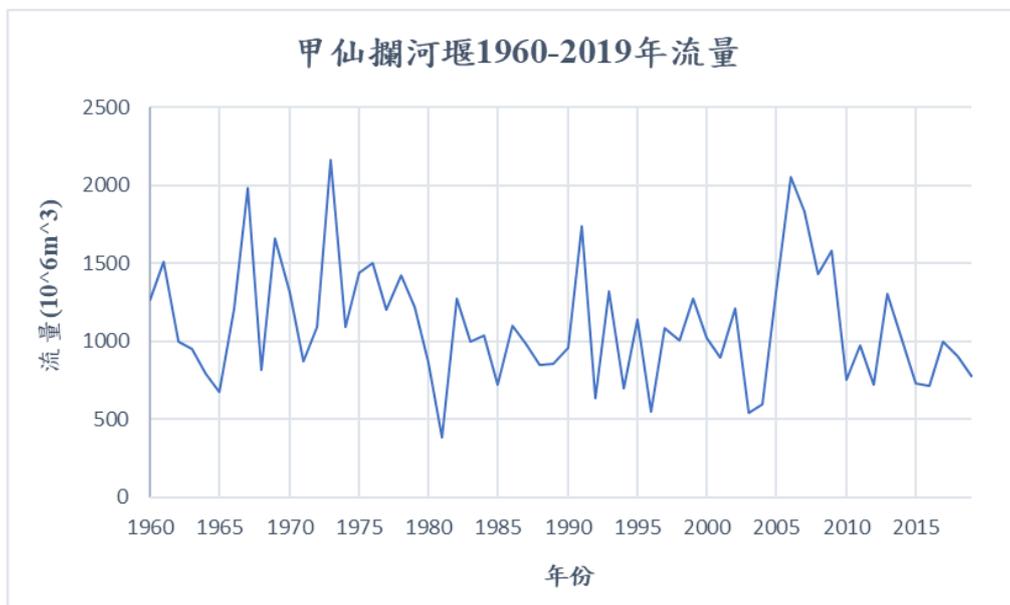
圖六、南化水庫 1960-2019 年流量

表五、甲仙攔河堰 1960-2019 年各月份流量統計特性表(單位為 10000m<sup>3</sup>)

| 月份  | 一月      | 二月      | 三月      | 四月      | 五月      | 六月       | 七月       | 八月       | 九月       | 十月      | 十一月     | 十二月     |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 最大值 | 4633    | 7137    | 15608   | 18746   | 21751   | 89834    | 72925.5  | 83101    | 68364.8  | 28506.1 | 6676.3  | 3523    |
| 最小值 | 31.9    | 0.9     | 16.8    | 248     | 805.6   | 2141     | 2138     | 5195     | 2602.4   | 2045    | 837.1   | 250     |
| 平均值 | 1249.35 | 1326.91 | 1994.13 | 2858.07 | 8366.77 | 24384.82 | 17754.10 | 25820.71 | 16018.20 | 6376.70 | 2330.50 | 1460.66 |
| 標準差 | 689.01  | 1234.40 | 2680.18 | 3384.90 | 5817.01 | 19546.96 | 13155.20 | 17518.16 | 11979.65 | 4220.56 | 1003.38 | 503.58  |



圖七、甲仙攔河堰各月份平均流量分布圖



圖八、甲仙攔河堰 1960-2019 年流量

### 三、研究方法

#### 3.1 標準化降水指數(SPI)

本研究參考 McKee et al. (1993)所發展之標準化降雨指標(SPI)來定義乾旱的嚴重程度，SPI 的計算分為二步驟，首先依據不同時間尺度(1 旬、2 旬、3 旬、6 旬、12 旬)累積雨量擬合一機率分布，其次以觀測雨量之機率推求相同機率對應之標準常態分布分位數(quantile)即為 SPI。由於雨量可能為 0，因此各時間尺度累積雨量的機率分布須包含二部分，其一為 0 雨量的機率，另一為非 0 雨量的機率。因此累積雨量的機率分布可表為：

$$F(x)=q+(1-q)G(x) \quad (1)$$

其中  $q$  為 0 雨量的機率； $G(x)$  為非 0 雨量的機率，本研究根據 Panofsky and Brier (1958) 提出之經驗分布進行非 0 雨量資料擬合，如下所示：

$$G(x) = \frac{k}{n+1} \quad (2)$$

其中  $n$  為樣本個數， $k$  為雨量資料透過升冪排列後從最小值起算之第  $k-1$  個數值。

本研究取用 1960 至 2019 年之南化水庫與甲仙攔河堰全部雨量資料依上述計算方式計算各時刻不同時間尺度之 SPI 數值，公式如下：

$$SPI = \Phi^{-1}(F(I_k^t)) \quad (3)$$

其中  $\Phi^{-1}$  為標準常態分布之反函數； $I_k^t$  為  $t$  時刻累積  $k$  旬之雨量 ( $k$  為 1、2、3、6 或 12 旬)； $F(I_k^t)$  為累積  $k$  旬雨量小於或等於  $I_k^t$  之累積機率。

SPI 指標值大多介於 +4 到 -4 之間，根據 McKee et al. (1993) 定義可分為 7 類，如表六所示，可用於定義乾旱的嚴重程度。

表六、SPI 指標值定義

| SPI 指標               | McKee 定義 | 機率     |
|----------------------|----------|--------|
| $SPI \geq 2$         | 極度濕潤     | 0.0228 |
| $1.5 \leq SPI < 2$   | 嚴重濕潤     | 0.0440 |
| $1 \leq SPI < 1.5$   | 中度濕潤     | 0.0919 |
| $-1 \leq SPI < 1$    | 正常       | 0.6826 |
| $-1.5 \leq SPI < -1$ | 中度乾旱     | 0.0919 |
| $-2 \leq SPI < -1.5$ | 嚴重乾旱     | 0.0440 |
| $SPI < -2$           | 極度乾旱     | 0.0228 |

### 3.2 標準化流量指數 (SSI)

水庫入流量會影響水庫供水能力，本研究利用過去水庫入流量資料豐枯程度作為水庫供水能力之依據之一。本研究參考 Telesca et al. (2012) 所發展之標準化流量指數 (SSI) 來定義水庫入流量之豐枯情形，計算方法與 SPI 相同，利用 1960 至 2019 年全部流量資料以經驗分布進行擬合，將累積分布函數對應至相同機率之標準常態分布，所得之分位數即為 SSI，可用於判斷入流量之豐枯狀態，如下所示：

$$SSI = \Phi^{-1}(F(Q_k^t)) \quad (4)$$

其中  $\Phi^{-1}$  為標準常態分布之反函數； $Q_k^t$  為  $t$  時刻累積  $k$  旬之入流量 ( $k$  為 1、2、3、6 或 12 旬)； $F(Q_k^t)$  為累積  $k$  旬入流量小於或等於  $Q_k^t$  之累積機率。

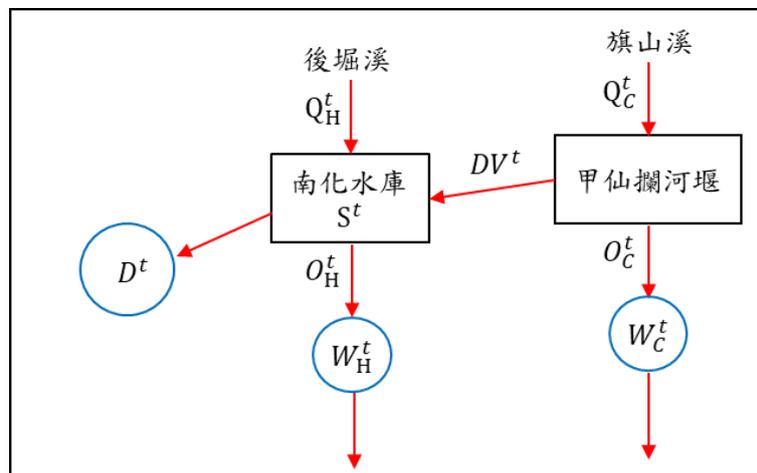
SSI 指標值與 SPI 類似，大多介於+4 到-4 之間，根據 McKee et al. (1993)定義可分為 7 類，如表七所示，可用於定義乾旱的嚴重程度，而本研究特別使用 SSI=0 作為定義乾旱事件的門檻，亦列於表七中。

表七、SSI 指標值定義

| SSI指標                | McKee定義 | 機率     | 本文定義  |      |
|----------------------|---------|--------|-------|------|
| $SSI \geq 2$         | 極度濕潤    | 0.0228 | SSI>0 | 濕潤   |
| $1.5 \leq SSI < 2$   | 嚴重濕潤    | 0.0440 |       |      |
| $1 \leq SSI < 1.5$   | 中度濕潤    | 0.0919 |       |      |
| $-1 \leq SSI < 1$    | 正常      | 0.6826 | SSI=0 | 區分門檻 |
| $-1.5 \leq SSI < -1$ | 中度乾旱    | 0.0919 | SSI<0 | 乾旱   |
| $-2 \leq SSI < -1.5$ | 嚴重乾旱    | 0.0440 |       |      |
| $SSI < -2$           | 極度乾旱    | 0.0228 |       |      |

### 3.3 南化水庫與甲仙攔河堰系統營運模式

本研究使用南化水庫與甲仙攔河堰供水系統，並以標準營運策略(SOP)作為營運模式，整體供水系統如圖九所示。



圖九、南化水庫與甲仙攔河堰供水系統架構圖

南化水庫入流量除了自身後堀溪的流量外，還需額外計算甲仙攔河堰越域引水之流量，而越域引水量為旗山溪流量扣除甲仙攔河堰之水權保留量後，加上越域引水限制及水庫庫容限制所得到，故實際越域引水量表示如下：

$$DV^t = \min\{\max\{Q_c^t - W_c^t, 0\}, DV_{max}^t, \{S_{max} - S^t + E^t + D^t \Delta t - \max\{Q_H^t - W_H^t, 0\}, 0\}\} \quad (5)$$

其中  $DV^t$  與  $DV_{max}^t$  分別為甲仙攔河堰實際越域引水量與各旬越域引水限制； $Q_c^t$  與  $Q_H^t$  分別

為旗山溪與後堀溪於 1960 至 2019 年間之入流量，以旬為單位； $W_C^t$ 與 $W_H^t$ 分別為甲仙攔河堰與南化水庫之下游水權保留量及生態基流量，其值詳見表一； $S_{max}$ 與 $S^t$ 分別為水庫容限制與  $t$  時刻下水庫蓄水量； $D^t$ 為南化水庫計畫需水量，各月份計畫需水量詳見表一， $\Delta t$ 為演算時距，以旬為單位。

南化水庫之水平衡方程式包含水庫蓄水量、後堀溪入流量、越域引水量、供水量、放流量及蒸發散量，可表示如下：

$$S^{t+1} = S^t + Q_H^t + DV^t - R^t - O_H^t - E^t \quad (6)$$

其中 $S^t$ 與 $S^{t+1}$ 分別為  $t$  時刻與  $t+1$  時刻之水庫蓄水量，由於本研究採用標準營運策略(SOP)，故水庫可能出現呆容量(0 百萬立方公尺)之情況； $R^t$ 為水庫供水量； $O_H^t$ 為水庫放流量； $E^t$ 為水庫蒸發散損失量，單位皆為百萬立方公尺(MCM)，各數值分述如下：

水庫放流量 $O_H^t$ 為下游河川剩餘流量，計算公式如下：

$$O_H^t = Q_H^t - \max\{Q_H^t, W_H^t, 0\} + \max\{S^t - E^{t+1} + \max\{Q_H^t - W_H^t, 0\} + DV^t - R^t - S_{max}, 0\} \quad (7)$$

若 $S^{t+1} > S_{max}$ ，則水庫放流量 $O_H^{t'} = O_H^t + S^{t+1} - S_{max}$ ，且 $S^{t+1} = S_{max}$ 。

$E^t$ 為水庫蒸發散損失量，計算公式如下：

$$E^t = 0.7 \times e^t \times \frac{1}{2} (A^t + A^{t+1}) \Delta t / 1000 \quad (8)$$

其中 0.7 為蒸發皿係數； $e^t$ 為水庫每日蒸發率，其值詳見表一； $A^t$ 與 $A^{t+1}$ 分別為  $t$  時刻與  $t+1$  時刻下之水庫蓄水面積。

而甲仙攔河堰水平衡方程式可表示如下：

$$O_C^t = Q_C^t - DV^t \quad (9)$$

其中 $O_C^t$ 為下游河川剩餘流量。

### 3.4 標準營運策略(SOP)

標準營運策略供水原則為盡可能滿足需水量，即使蓄水量不足亦不限制供水，直至水庫空庫為止，且不提供多餘水量，除非水庫滿庫而溢流。

$R^t$ 為水庫供水量，供水方式依據 SOP 原則，規則如下：

$$R^t = D^t \Delta t \quad , \text{當 } S^t + Q_H^t + DV^t - E^t > D^t \Delta t \quad (10)$$

$$R^t = S^t + Q_H^t + DV^t - E^t \quad , \text{當 } S^t + Q_H^t + DV^t - O_H^t < D^t \Delta t \quad (11)$$

若 $S^{t+1} < S_{min}$ ，則水庫供水量 $R^{t'} = R^t - S_{min} + S^{t+1}$ ，且 $S^{t+1} = S_{min}$ 。

其中 $S_{min}$ 為水庫呆容量； $SH^t$ 為缺水量。

最後，缺水數值 $SH^t$ 計算方式如下：

$$SH^t = \max\{D^t \Delta t - R^t, 0\} \quad (12)$$

## 四、結果與討論

### 4.1 相關性分析

#### 4.1.1 皮爾森相關係數

相關性分析是瞭解不同類型乾旱之間的基本工具，可用來表示乾旱之間的傳播。本研究選用皮爾森相關係數(Pearson's correlation coefficient)作為相關性分析的主要工具，計算方式為兩個隨機變數 $X$ 和 $Y$ (如SPI與SSI指標)，其共變異數與標準差之乘積比，公式如下：

$$\rho_{XY} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (13)$$

其中 $E(X)$ 、 $E(Y)$ 及 $E(XY)$ 分別為變數 $X$ 、變數 $Y$ 及變數 $XY$ 之期望值； $\sigma_X$ 與 $\sigma_Y$ 分別為變數 $X$ 與變數 $Y$ 之標準差。表八列出皮爾森相關係數之相關程度：

表八、皮爾森相關係數之相關程度表

| 相關程度   | $+\rho_{XY}$ | $-\rho_{XY}$ |
|--------|--------------|--------------|
| 完全相關   | 1.00         | -1.00        |
| 高度相關   | 0.70~0.99    | -0.99~-0.70  |
| 中度相關   | 0.40~0.69    | -0.69~-0.40  |
| 低度相關   | 0.10~0.39    | -0.39~-0.10  |
| 微弱或無相關 | 0.00~0.09    | -0.09~-0.00  |

將不同時間尺度之SPI指標與SSI-1作相關性分析，結果如表九所示：

表九、不同時間尺度SPI與SSI-1相關性比較表

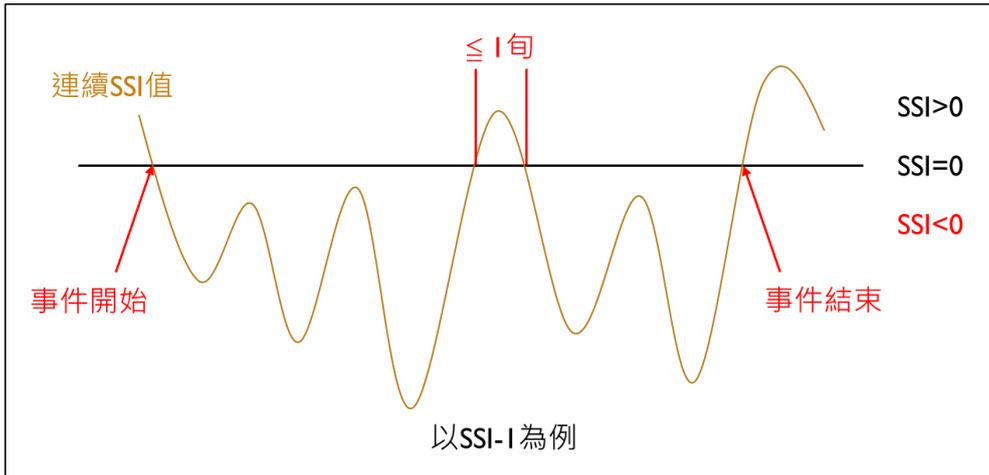
|                   | SPI- 1 | SPI- 2 | SPI- 3 | SPI- 6 | SPI-12 | SPI-18 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 南化水庫 $\rho_{XY}$  | 0.779  | 0.814  | 0.811  | 0.801  | 0.695  | 0.431  |
| 甲仙攔河堰 $\rho_{XY}$ | 0.679  | 0.763  | 0.785  | 0.795  | 0.703  | 0.438  |

在南化水庫中SPI-2與SSI-1相關性最高；甲仙攔河堰則是SPI-6與SSI-1最為相關，兩者皆呈現高度相關性，其他不同時間尺度之SPI與SSI-1相關係數大小亦列於表九中，雖相關性略低一些，但也有達到中度相關性。而由表中亦可看出，在南化水庫與甲仙攔河堰中，SPI-18與SSI-1之相關性皆最低。

### 4.2 SSI指標與缺水關係之探討

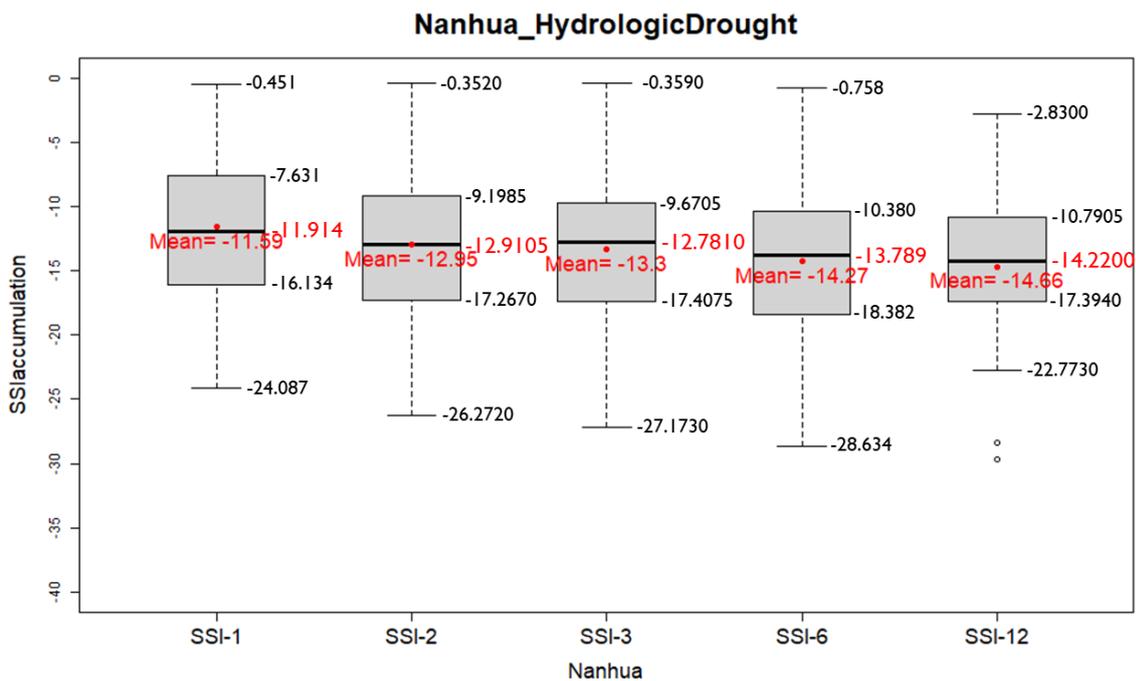
將 1960 至 2019 年南化水庫與甲仙攔河堰之入流量數據以經驗分布擬合後，再將累積分布函數對應至相同機率之標準常態分布，最後得到之分位數即為 SSI 指標，並依序求出不同時間尺度下之 SSI 數值，本研究取用 SSI-1、SSI-2、SSI-3、SSI-6 與 SSI-12 與透過 SOP 獲得之南化水庫缺水情況進行比較。

本研究將連續性負 SSI 數值視為一次水文乾旱事件，以此得到多起水文乾旱事件，並比較不同時間尺度下之情況。其中在判斷水文乾旱事件中，若在連續負 SSI 數值中有短暫時間出現正 SSI 數值(如在 SSI-1 情況下，以 1 旬為限；SSI-2 情況中以 2 旬以內之連續正 SSI 值為限，以此類推)，則將該正值涵蓋在該水文乾旱事件中，如圖十示意圖：

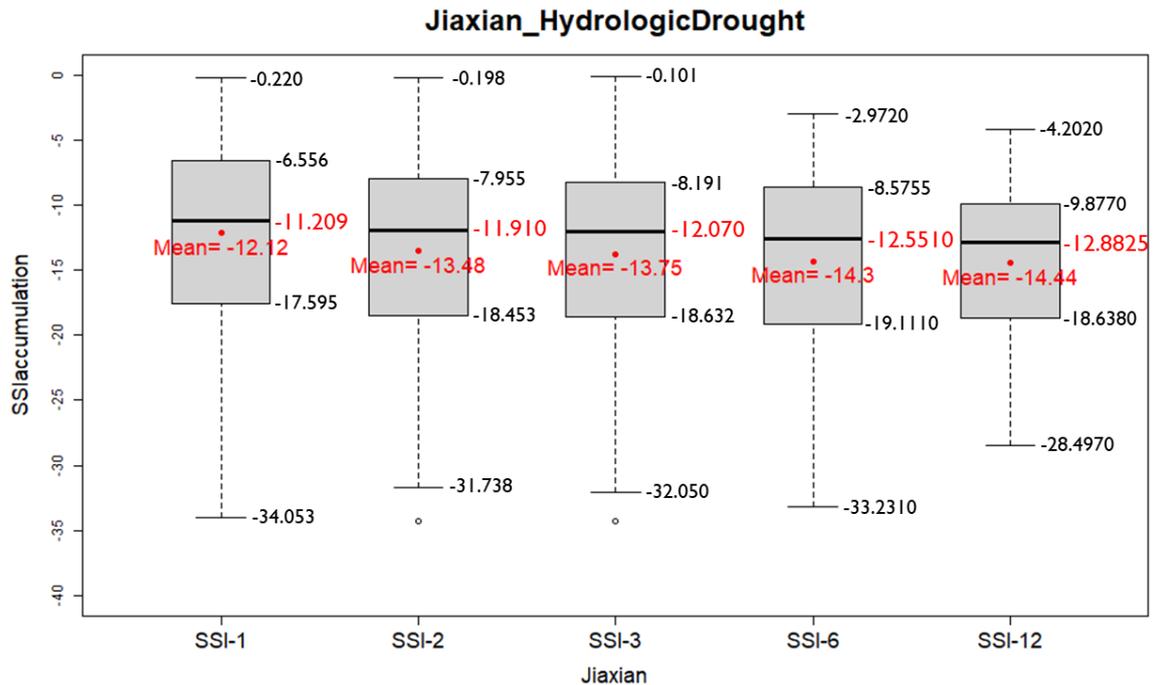


圖十、水文乾旱事件示意圖

得到多起水文乾旱事件與不同時間尺度下之情況後，對其作盒型圖分析，南化水庫與甲仙攔河堰水文乾旱事件盒型圖如圖十一與圖十二所示：



圖十一、南化水庫不同時間尺度下之水文乾旱事件盒型圖



圖十二、甲仙攔河堰不同時間尺度下之水文乾旱事件盒型圖

得到南化水庫與甲仙攔河堰不同時間尺度下之水文乾旱事件盒型圖後，取用中位數作為是否發生缺水事件之衡量標準，與透過 SOP 得到之南化水庫缺水事件進行比較，比較結果以下各別敘述。

表十、南化水庫與甲仙攔河堰與缺水事件分開比較表

| 南化水庫         | SSI- 1  | SSI- 2   | SSI- 3  | SSI- 6  | SSI-12   |
|--------------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 中位數          | -11.914 | -12.9105 | -12.781 | -13.789 | -14.22   |
| 水文乾旱事件比中位數嚴重 | 35      | 32       | 32      | 30      | 30       |
| 有發生缺水事件      | 28      | 27       | 27      | 25      | 26       |
| 比重           | 80.00%  | 84.38%   | 84.38%  | 83.33%  | 86.67%   |
| 甲仙攔河堰        | SSI- 1  | SSI- 2   | SSI- 3  | SSI- 6  | SSI-12   |
| 中位數          | -11.209 | -11.91   | -12.07  | -12.551 | -12.8825 |
| 水文乾旱事件比中位數嚴重 | 35      | 33       | 31      | 30      | 30       |
| 有發生缺水事件      | 27      | 26       | 26      | 25      | 25       |
| 比重           | 77.14%  | 78.79%   | 83.87%  | 83.33%  | 83.33%   |

由表十可以看出，將南化水庫水文乾旱事件與缺水事件進行比較後，若水文乾旱事件相較於整體水文乾旱得到之 SSI 中位數嚴重，則發生缺水事件的比率高達 8 成以上；甲仙攔河堰的結果也與南化水庫類似，在 SSI-1 與 SSI-2 情況中，當水文乾旱較整體水文乾旱中位數嚴重時，發生缺水事件的機率接近 8 成，而在其他時間尺度下皆有 8 成以上機率發生缺水事件。

表十一、南化水庫與甲仙攔河堰與缺水事件同時比較表

| 南化水庫與甲仙攔河堰同時考慮            | SSI- 1  | SSI- 2   | SSI- 3  | SSI- 6  | SSI-12   |
|---------------------------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 南化水庫中位數                   | -11.914 | -12.9105 | -12.781 | -13.789 | -14.22   |
| 甲仙攔河堰中位數                  | -11.209 | -11.91   | -12.07  | -12.551 | -12.8825 |
| 同時間下有一水庫或以上發生水文乾旱事件較中位數嚴重 | 43      | 41       | 41      | 39      | 38       |
| 有發生缺水事件                   | 33      | 32       | 33      | 31      | 31       |
| 比重                        | 76.74%  | 78.05%   | 80.49%  | 79.49%  | 81.58%   |

由表十一可看出，同時將南化水庫與甲仙攔河堰之水文乾旱事件納入考量，若是同時間下有一水庫或兩個同時發生水文乾旱事件較整體水文乾旱之 SSI 中位數嚴重的情況，則在不同時間尺度下發生缺水事件的機率皆高達 8 成左右。

## 五、結論與建議

綜合以上分析結果，本文歸納以下三點結論：

1. 本文以 SPI 與 SSI 指標表示氣象及水文乾旱事件，並透過兩項指標之相關性分析得到氣象乾旱與水文乾旱間之高度相關性，其中南化水庫以 SPI-2 與 SSI-1 最為相關，而甲仙攔河堰以 SPI-6 與 SSI-1 最為相關。
2. 透過無限水機制的 SOP 作為水庫營運方式，可直接獲得南化水庫因供水不足導致缺水事件的資料，再以不同時間尺度下之整體水文乾旱中位數值作為衡量標準，分析當水文乾旱事件較中位數嚴重之情況下，發生缺水事件之機率。
3. 結果顯示，若分別考慮南化水庫與甲仙攔河堰之情況，則在較嚴重情況下兩者皆有近 8 成或 8 成以上機率發生缺水事件；若同時考慮兩者之情況，則也呈現出類似之結果。

最後，本文針對研究成果提出以下幾點建議，作為未來研究目標：

1. 本文只考慮水文乾旱事件較整體事件中位數嚴重之情況，未來將嘗試較中位數輕微而不發生缺水事件之情況。
2. 本文只以水文乾旱嚴重度之中位數作為衡量是否發生缺水事件之標準，未來將嘗試將水文乾旱持續時間及水庫蓄水量等不同指標納入考量。

## 六、謝誌

本研究承科技部經費補助(MOST111-2221-E-006-004)，謹誌謝忱。

## 七、參考文獻

1. Apurv, T., Sivapalan, M., & Cai, X., "Understanding the role of climate characteristics in drought propagation." Water Resources Research **53**(11): 9304-9329, 2017.
2. Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., & Svensson, C., "From meteorological to

- hydrological drought using standardised indicators." Hydrology and Earth System Sciences **20**(6): 2483-2505, 2016.
3. Guo, Y., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Fang, W., Wang, L., & Wang, H., "Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels." Science of The Total Environment **712**: 136502, 2020.
  4. Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., & Ma, L., "The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors." Journal of Hydrology **547**: 184-195, 2017.
  5. Ma, F., Luo, L., Ye, A., & Duan, Q., "Drought characteristics and propagation in the semiarid Heihe River Basin in Northwestern China." Journal of Hydrometeorology **20**(1): 59-77, 2019.
  6. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J., The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Boston, MA, USA, 1993.
  7. Men, B., Wu, Z., Li, Y., & Liu H., "Reservoir operation policy based on joint hedging rules." Water **11**(3): 419, 2019.
  8. Panofsky, H. A., & Brier, G. W., Some applications of statistics to meteorology. Mineral Industries Extension Services, College of Mineral Industries, Pennsylvania State University, University Park, 1958.
  9. Telesca, L., Lovallo, M., Lopez-Moreno, I., & Vicente-Serrano, S., "Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain)." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **391**(4): 1662-1678, 2012.
  10. Xing, Z., Ma, M., Zhang, X., Leng, G., Su, Z., Lv, J., Yu, Z., & Yi, P., "Altered drought propagation under the influence of reservoir regulation." Journal of Hydrology **603**: 127049, 2021.