



水庫安全蓄水線及其於乾旱預警之應用

虞國興／台灣水資源與農業研究院 院長

朱志彬／農田水利署 簡任正工程司

李元喻／農田水利署 正工程司

受氣候變遷影響，全球極端氣候與罕見水文事件發生頻仍。今（2022）年歐洲面臨 500 年來最嚴重旱災，包含歐洲大陸西部、中部和南部地區近半個歐洲均遭受嚴重乾旱影響。我國在 2020～2021 年亦歷經一場百年大旱，而今（2022）年入夏以來，全台的降雨量偏少，目前南部水庫之入流量與蓄水量持續下降，水情不容樂觀。本文回顧 2022 年歐洲大旱過程中利用傳統 SPI 進行各區域之乾旱監測方式，嘗試採用「變動尺度之 SPI」之乾旱監測方法，以改善提升 SPI 評估乾旱之持續性與嚴重度之研判能力。此外，本文又提出「水庫安全蓄水線」之概念，作為乾旱預警之評估方法。本文以石門水庫灌區為案例，實際應用於 2020 年二期作之停灌決策；經由 2020～2021 年水庫之實際蓄水量驗證結果可知，水庫安全蓄水線在供灌決策實務上確實可行，可提供作為研判未來可能發生之嚴重乾旱狀況，及早預警並啟動各種因應抗旱措施之實務應用參考。

前言

近年全球遭受氣候變遷的衝擊不斷地加劇，極端氣候與罕見水文事件頻仍發生，今（2022）年歐洲面臨 500 年來最嚴重旱災，由歐洲聯盟委員會聯合研究中心（Joint Research Centre, JRC）透過不定期發佈乾旱分析報告（Drought in Europe/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report）^[1,2]，提出歐洲仍有近 3 分之 2 的地區處在乾旱警戒或警報狀態。其中有 47% 的地區面臨乾旱風險，土壤水分明顯不足；另有 17% 的地區處於更嚴重的警報狀態，如圖 1 所示。有不少氣候條件惡化，最嚴重乾旱地區是位處已在 2022 年春季受到乾旱影響的地區，包括義大利北部、法國東南部及匈牙利與羅馬尼亞的部分地區。由乾旱報告數據顯示，即便 8 月至 10 月歐洲部分地區迎來正常的降雨量，仍不足以讓歐洲各地區從超過半年的嚴重乾旱中完全恢復。

同樣地，我國亦連續三年受反聖嬰現象影響，各種颱風似乎只要接近台灣必然會轉向，過去常見 8～9 類之各種侵台颱風路徑，全部消聲匿跡，而造成這幾

年台灣發生乾旱的頻率特別高。在 2020～2021 年才剛經歷了一場超過 300 天之百年大旱，2020 年颱風未侵台使得前一年水庫蓄水量不足，隔年春季降雨亦不如預期且梅雨遲至，至 5 月底全台水庫幾近枯竭，全台依賴水庫灌溉之農業區域幾乎全數停灌，水情異常嚴峻^[3]。今（2022）年入夏以來，全台的降雨量仍然偏少，北部直至 9 月及 10 月幾波颱風環流伴隨東北季風效應，才挹助了水庫蓄水量，目前石門水庫幾近滿庫；但是卻沒有為南部帶來顯著足夠降雨，曾文一烏山頭水庫的入流量與蓄水量持續下降，水情不甚樂觀。

在面對未來頻繁發生的乾旱事件與供灌缺水風險不斷升高之各種嚴峻挑戰，能否運用過去歷史發生的乾旱監測記錄資料，透過大數據分析建立可靠度高之相關乾旱指標與預警評估機制，充分運用所能掌握之即時氣象與水庫堰壩之水文監測資訊，預先研判未來可能發生之乾旱情勢，及早預警並啟動部署各種因應之抗旱措施^[4,5]，減少大規模之停灌發生，以降低乾旱所造成之農業生產損失及農民生計影響。

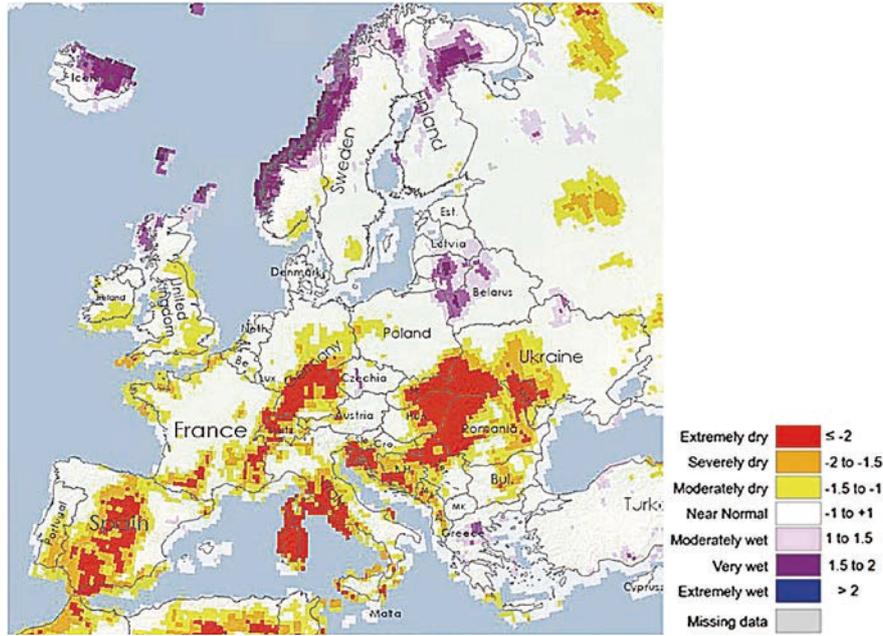


圖 1 歐洲乾旱監測分布圖

(資料來源：Drought in Europe August 2022, JRC GDO: Standardized Precipitation Index SPI-3, three months ending 10th of August 2022. ^[1])

桃園地區乾旱情勢分析

不論是在 JRC 分析歐洲乾旱警戒或警報狀態之報告中或者國內外相關乾旱分析之研究中均常見到以標準化降雨指標 (Standardized Precipitation Index, SPI) 作為乾旱監測及研判嚴重程度之重要指標。SPI 為 McKee 於 1993 年首次於應用氣候學大會上介紹，並於世界氣象組織 (WMO) 乾旱指標手冊中 ^[6] 建議採用之一種標準化降水指數，可用來監測乾旱的嚴重程度並提供早期之預警。傳統上任何地點的 SPI 計算只需要有長期的降雨記錄，並將不同時間尺度 (1, 3, 6...月) 之降雨量機率函數轉化為常態分布，以使其平均 SPI 為零。因此，當 SPI 負值代表雨量偏少，乾旱嚴重程度可根據 SPI 的負值大小來劃分等級，SPI 負值愈大表示乾旱愈嚴重，如表 1 所示。

表 1 利用標準化降雨指標 SPI 之乾旱嚴重度等級

乾旱嚴重度等級	SPI 值範圍
降雨正常	> -0.5
輕度乾旱	-0.5 ~ -1.0
中度乾旱	-0.5 ~ -1.0
重度乾旱	-0.5 ~ -1.0
極度乾旱	< -2.0

過去在利用 SPI 上，常在選擇何種合適之時間尺度而產生困擾，也就是說選太短時間 (如 1 旬)，可能降一場雨 SPI 就轉為正值，無法反應乾旱持續性；若選較長

之時間尺度 (如 6 個月以上)，似乎又無法反應近期的降雨情形。因此，Lin *et al* ^[7] 提出變動尺度 SPI (Variable-scale Standardized Precipitation Index)，以水文年 (每年 5 月至隔年 4 月) 為每年乾旱監測之時間，以旬 (Ten days period, TDP) 為基本時間尺度單位，計算步驟如下：

1. 先計算當旬 (1 TDP) 之 SPI，即 SPI-1
2. 若 SPI-1 < -0.5，則累計推求 2 旬之 SPI，即 SPI-2
3. 若 SPI-2 < -0.5，則須累計推求至 3 旬之 SPI，即 SPI-3
4. 依此類推，若乾旱持續越久，則將累計越多 n (1 ~ 36 旬) 降雨量之 SPI，即 SPI-n (如表 2)
5. SPI-n 能夠兼具反應近期之動態降雨現況，但也不會因短暫之降雨量就立即解除乾旱，故能夠偵測出乾旱持續性的真實狀態，以研判乾旱的嚴重程度

以桃園地區 2020 ~ 2021 年在遭遇百年大旱時期與今 (2022) 年之乾旱水情監測為例，如圖 2 所示。變動尺度能夠真正反應乾旱的持續嚴重程度，如 109 (2020) 年下半年開始發生之乾旱現象持續發生至 110 (2021) 年 5 月已達到極度乾旱之嚴峻程度；同時，觀察到今年 111 (2022) 年至 9 月上旬幾乎快達到重度乾旱等級之狀態，後來幾波颱風環流及東北季風帶來豐沛雨量，才恢復至正常的水情狀態。圖 2 亦顯示桃園地區自 109 年 5 月至 111 年 10 月，於長達二年半期間水情正常之月份極少，氣候變遷改變桃園地區降雨分布已十分明顯。

表 2 變尺度 SPI 隨不同時間尺度之累計降雨量計算 SPI-n

時間	第 j 旬	第 $(j+1)$ 旬	...	第 $(j+n-1)$ 旬
降雨量	r_j	$r_j + r_{j+1}$...	$r_j + r_{j+1} + \dots + r_{j+n-1}$
變尺度 SPI	SPI-1	SPI-2	...	SPI-n

水庫安全蓄水線之建構

灌溉用水範圍因具有較大彈性調整之特性，為滿足區域整體水資源之需求，灌溉水量常須配合調整以支援其他用水標的用水，故目前民生及工業用水量具有較優先之使用順位，水庫必須優先保留供應給民生、工業之用水量後，剩餘之水量才是可供灌溉之水量。因此，為確保民生工業用水無虞，各時期水庫應有之蓄水量，稱之為「水庫安全蓄水量」，可作為評估未來是否可能發生乾旱缺水之早期預警。

一般在枯水期期間，若不考慮水庫蓄水量，僅依賴水庫之入流量則無法滿足民生及工業之用水量需求，然而進入豐水期後，基本上僅靠水庫之入流量即能滿足其需求。以石門水庫為例，若各旬以超越機率 90% 之入流量 $Q_{90,t}$ 與民生及工業之用水量需求比較（如圖 3 所示）可知，水庫之入流量低於民生及工業之用水量主要是發生在 1~4 月，不足量 S_E 約為 3,400 萬噸。

因此，若將枯水期之 11/1 設定為基準日，為確保 11 月到 4 月（枯水期）之民生與工業用水 S_E ，同時再保留 5、6 兩個月之用水無虞（平均 3,000 萬噸/月 \times 2 月），則基準日安全蓄水量 S_0 可設定為： $S_0 = S_E + 6000$ ；安全蓄水量 S_t 計算如下：

$$\begin{cases} S_t = S_{t-1} + Q_{90,t} - D_t & t=1 \sim 20, 30 \sim 35 \\ S_t = S_{20} & t=21 \sim 29 \end{cases}$$

其中， $t = 0$ 為基準日 11 月 1 日； $Q_{90,t}$ 為各旬超越機率 90% 入流量； D_t 為各旬民生工業用水。即假設在各旬水庫入流量均以超越機率 90% 之嚴重偏低流量情境下，必須確保各時期之水庫蓄水量大於安全蓄水量 S_t ，基

本上自枯水期 11 月開始至少需保留 9,400 萬噸（即 $S + 6000$ ， S 約為 3,400 萬噸），超出的蓄水量部分即為可供灌溉利用之水量。原則上，每年 6~8 月（ $t = 21 \sim 29$ ）為颱風季（或豐水期），其入庫流量 Q_{90} 遠大於民生與工業用水需求，若此豐水期間之入庫流量 Q_{90} 恰等於民生與工業用水需求，即 $S_t = S_{20}$ ， $t = 21 \sim 29$ ，表示豐水期降雨已不如預期，如再低於此， $S_t < S_{20}$ ，即顯示水庫蓄水量已呈現不足現象，如圖 4 所示。

枯水期基準日 11/1 之蓄水量 S_0 為變數，若假設 S_0 為 1 億噸（大於水庫需保留之安全蓄水量 9,400 萬噸），並以 107 年~108 年實際之蓄水量為例，如圖 5 所示；圖中，紅色線即為各時期之水庫安全蓄水線，黑色線為 107 年~108 年之實際蓄水量，藍色區間範圍即為可利用之農業水資源（即超出水庫安全蓄水線至實際蓄水量之範圍）。

水庫安全蓄水線之乾旱早期預警

本研究進一步將「水庫安全蓄水量」方法實際應用在 109 二期作之停灌決策評估，如圖 6 所示。當時中央在 10 月 11 日做出停灌決定，由圖可知，石門水庫之蓄水量自 10 月 1 日起即低於水庫安全蓄水量，應予以停灌，故水庫安全蓄水量線可適用在評估是否停灌決策上之實務應用。

此外，進一步由 109 年至 110 年石門水庫之實際蓄水量驗證可知，即便 109 年 10 月中旬二期作已停灌，接續 110 年一期作僅供灌桃三而其餘停灌下，雖然水庫在 1 月上旬蓄水量曾短暫回升至 1 億噸，但水庫在 4 月下旬仍已低於水庫安全蓄水線，5 月下旬水庫幾乎乾涸見底，如圖 7 所示。由此可知，若當時沒有做出停灌之決定，石門水庫必發生空庫情形，桃園地區用水將達無法想像之窘迫情勢。因此，透過水庫安全蓄水線之評估方式，確實可達到早期乾旱預警之目的，及早做出正確之用水決策研判，降低缺水風險之發生。

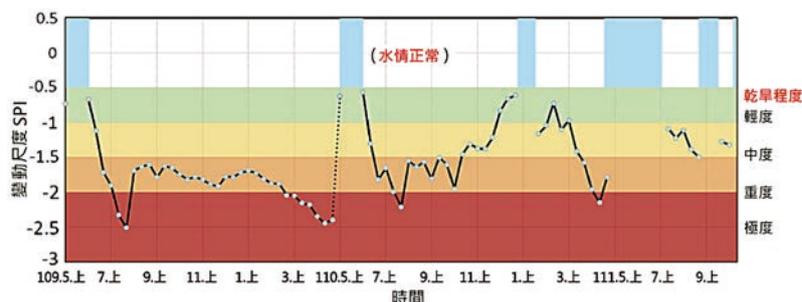


圖 2 桃園地區變尺度 SPI 乾旱指標
（資料來源：台灣水資源與農業研究院整理繪製；參考 Lin et al [2]）

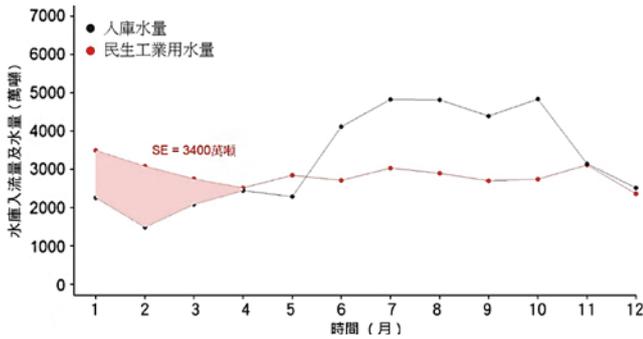


圖 3 石門水庫全年水庫入流量與民生及工業用水量需求比較圖 (以超越機率 90% 之入流量為例)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

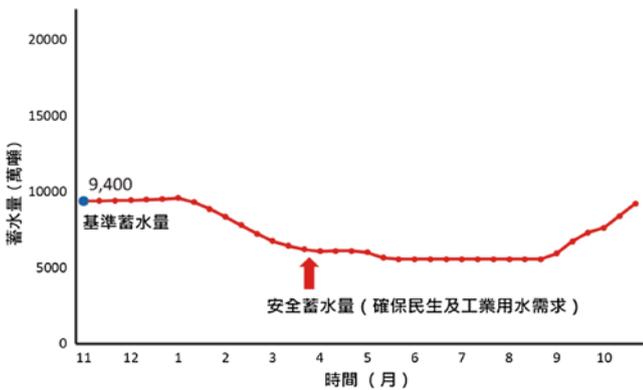


圖 4 石門水庫安全蓄水量線圖 (基準蓄水量 S0 為 9,400 萬噸)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

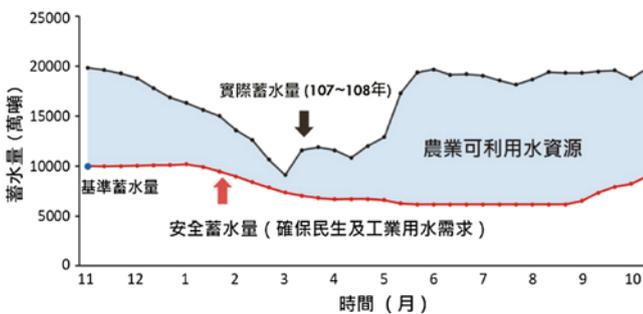


圖 5 水庫安全蓄水線與農業可利用水資源關係圖 (S0 為 1 億噸; 以石門水庫 107~108 年之實際蓄水量為例)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

結語

針對目前農業水資源必須配合水庫優先滿足民生及工業用水之供水政策下,提出「水庫安全蓄水線」作為兼具滿足農業灌溉用水之早期乾旱缺水之預警方法。本文以石門水庫灌區為案例,推導水庫安全蓄水線作為乾旱預警與供灌決策之評估方法,並實際應用於 2020 年二期作之停灌決策研判。經由 2020~2021 年實際蓄水量之驗證結果可知,水庫安全蓄水線在供灌決策實務上確實可行,可提供未來農業水資源灌溉實務上作為早期乾旱預警與決策研判之應用參考。

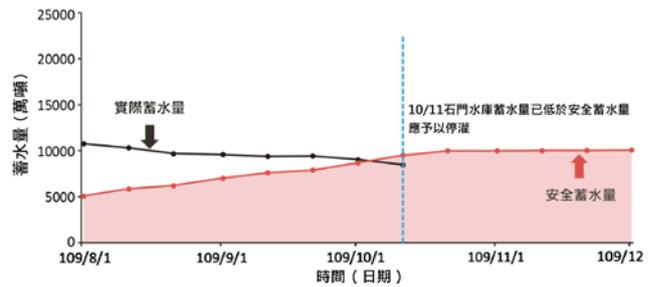


圖 6 以水庫安全蓄水線實際應用在 109 年二期作停灌決策之評估 (資料來源:台灣水資源與農業研究院)

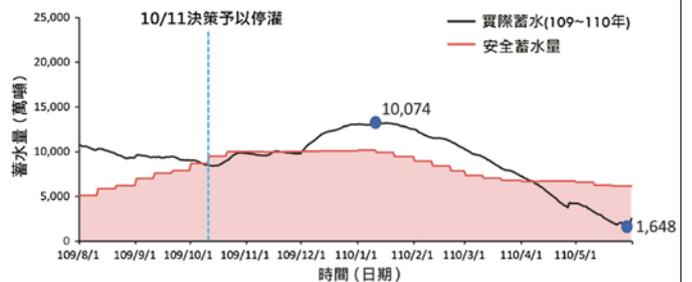


圖 7 以石門水庫 109 年至 110 年實際蓄水量驗證供灌決策之結果
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

參考文獻

1. Joint research centre(JRC), Drought in Europe/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report, August 2022. https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/news/GDO-EDODrought-News202208_Europe.pdf
2. Joint research centre(JRC), Drought in northern Italy/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report, March 2022. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128974>
3. Tsai SF, Hung MT, Chu CB, Hsieh LS, Wang PJ (2022) The hydrological processes of Taiwan's severe drought event during 2020-21 and the experience of irrigation strategies for fighting drought. Transactions of the 24th ICID International Congress on Irrigation and Drainage, Adelaide, Australia – Abstract Volume: Question 62, 63, and Special Session, 177-178.
4. IPCC, 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., et al. (Eds.), Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Inter- governmental Panel On Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
5. Joint Research Centre (JRC) science for policy report. Karmen Poljanšek, Ainara Casajus Valles, Montserrat Marín Ferrer, Juergen V. Vogt, Maureen Wood, 2019. Recommendations for national risk assessment for disaster risk management in EU: Approaches for identifying, analysing and evaluating risks.
6. World Meteorological Organization (WMO), 2012. Standardized Precipitation Index User Guide, WMO-No. 1090. https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_en_2012.pdf
7. Lin, Teng-Wei, Ke-Sheng Cheng, 2020. Drought Monitoring and Early Warning Using Variable-Scale Standardized Precipitation Index and Stochastic Rainfall Simulation. Master Thesis Report, National Taiwan University.