

水庫水資源乾旱預警模式之建置

Water resource drought early warning system for reservoirs

國立成功大學 水利及海洋工程學系
碩士 教授
陳思妤 陳憲宗
Szu-Yu Chen Shien-Tsung Chen

摘要

本研究旨在結合判別分析 (discriminant analysis) 與合成少數樣本過採樣技術 (synthetic minority oversampling technique, SMOTE), 以石門水庫及曾文—烏山頭水庫為研究區域, 建立水資源乾旱預警模式, 預測水庫未來第一個月與第三個月水情為正常或警戒, 做為啟動乾旱應變措施的參考依據。本研究採用不同時間尺度的標準化水文指標 (標準化降雨指標、標準化蓄水量指標、標準化流量指標) 作為模式之輸入變量組合, 並以水庫水情分類結果 (正常或警戒) 為輸出變量; 分別應用線性判別分析 (linear discriminant analysis, LDA) 與二次判別分析 (quadratic discriminant analysis, QDA), 並加入 SMOTE 處理樣本不平衡問題, 建立水庫水資源乾旱預警模式。本研究依據水情分類準確率, 選定各研究區域之最佳輸入變量組合與判別分析方法, 並探討 SMOTE 處理前後是否有提升模式判別準確率。研究結果顯示, 在石門水庫與曾文—烏山頭水庫, QDA 之水情預報準確率均高於 LDA, 且加入 SMOTE 使正常與警戒樣本數目一致後, 整體預測準確率有所提升。結合 QDA 與 SMOTE 之水資源乾旱預警模式, 預測未來第一與第三個月之水情, 在石門水庫的準確率分別為 0.92 與 0.87, 在曾文—烏山頭水庫的準確率分別為 0.88 與 0.86。整體而言, 本研究提出之水資源乾旱預警模式具有良好的水情預報能力。

關鍵詞: 水資源乾旱預警、線性判別分析、二次判別分析、合成少數樣本過採樣技術

Abstract

This study aims to develop water resource drought early warning system based on linear discriminant analysis (LDA) and quadratic discriminant analysis (QDA) for Shimen, and Zengwen–Wushantou Reservoirs in Taiwan. The objective is to predict reservoir water conditions as either “normal” or “alert” for one-month and three-month lead times, providing a scientific basis for initiating relevant drought response measures. Synthetic minority oversampling technique (SMOTE) was applied to address imbalance number of normal or alert data. Model inputs comprise combinations of standardized hydrological indicators at various temporal scales, including the standardized precipitation index, standardized reservoir storage index, and standardized streamflow index, while the output variable is the classified reservoir water status (normal or alert). LDA and QDA were employed to build the early warning models, with the best-performing input combinations determined based on the classification accuracy. The results suggest that for one-month-ahead warning, QDA with SMOTE performs the best for Shimen and Zengwen–Wushantou Reservoirs, with the validation accuracy of 0.92 and 0.88, respectively. For three-month-ahead warning, the optimal models are QDA with SMOTE for Shimen and Zengwen–Wushantou Reservoirs (with the accuracy of 0.87 and 0.86, respectively).

Keywords: drought early warning system, water resources, linear discriminant analysis, quadratic discriminant analysis, synthetic minority oversampling technique

一、前言

臺灣降水主要來自梅雨與颱風，近年受氣候變遷影響，像是 2020 年無颱風登陸，2021 年因梅雨季雨量少，造成臺灣主要水庫蓄水量驟降，出現嚴重乾旱事件，此現象反映出氣候變遷對水資源造成衝擊，意味著未來將面對長期水資源短缺之壓力。

本研究分別應用線性判別分析 (linear discriminant analysis, LDA) 與二次判別分析 (quadratic discriminant analysis, QDA) 結合合成少數類過採樣技術 (synthetic minority oversampling technique, SMOTE)，以石門水庫及曾文一烏山頭水庫為研究區域，將不同時間尺度之現況與未來的標準化水文指標 (標準化降雨量指標、標準化蓄水量指標、標準化流量指標) 作為輸入變量組合，建立水庫水資源乾旱預警模式，預測未來第一個月與第三個月之水情狀態 (正常或警戒)，以提供決策輔助依據。

二、研究資料與研究方法

本研究使用之資料為雨量、蓄水量與流量三種變量。雨量資料來自臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, TCCIP) 提供之網格化日資料，蓄水量與流量資料來自經濟部水利署防災資訊網及相關主管機關蒐集而來。石門水庫資料年限為 1960 年至 2022 年，其中 1960 年至 2009 年作為建立模式率定使用，2010 年至 2022 年作為模式驗證使用；曾文一烏山頭水庫資料年限為 1975 年至 2022 年，其中 1975 年至 2009 年作為建立模式率定使用，2010 年至 2022 年作為模式驗證使用。

本研究分別應用 LDA 及 QDA 建立水庫水資源乾旱預警模式，並經由 SMOTE 改善類別樣本數不平衡問題，提升模式的判別能力，以預測未來第一個月與第三個月之水情。

線性判別分析 (LDA) 是由 Fisher (1936) 提出，為一種線性分類方法，用於處理分類問題，概念是在高維空間中尋找一個最佳投影方向，將樣本投影至一維空間後，使不同類別能夠清楚區分。二次判別分析 (QDA) 為常見的非線性分類方法，用於處理不同類別之間具有不同共變異矩陣的分類問題，理論架構與 LDA 相近，兩者主要差異在於類別間變異矩陣不同，LDA 是所有類別間具有相同的共變異數矩陣，而 QDA 則是允許各個類別擁有獨自的共變異數矩陣，因此 QDA 分類邊界呈現二次曲線。已有研究指出 QDA 優於 LDA (Chiyeaka et al., 2025)。合成少數類樣本技術 (SMOTE) 由 Chawla (2002) 提出，透過線性內插法的方式，在少數類別樣本之間產生新樣本，用來增加少數類別的數量，達到類別樣本數平衡，改善原始資料分布不均的問題，並能夠降低模式因過度重複複製原始樣本所產生的過擬合風險。

為能評估及比較水資源乾旱預警模式之表現，採用混淆矩陣 (confusion matrix) 的方法計算模式的準確率 (accuracy, ACC) 為整體準確率、召回率 (recall) 為預測正常準確率及真陰性率 (true negative rate, TNR) 為預測警戒準確率。上述三項指標均為逐月計算後之平均結果，代表模式在全年不同月份下的整體預測表現。本研究以「整體預測準確率」作為主要評鑑指標。

三、水資源乾旱預警模式

本研究將雨量、流量及蓄水量資料建立為標準化降雨量指標 (standardized precipitation index, SPI)、標準化水庫蓄水量指標 (standardized reservoir storage index, SRSI) 與標準化流量指標 (standardized streamflow index, SSI)，作為水庫水資源乾旱預警模式之輸入變量。參照水庫的警戒標準圖，轉換成水情分類結果，作為模式輸出變量的水情

類別（正常或警戒）。圖 1 及圖 2 為水庫警戒標準圖，第一類為「正常」，表示蓄水量高於警戒標準，水情穩定，未出現水資源乾旱；第二類為「警戒」，表示蓄水量低於警戒標準，水情緊張或進入限水階段，即為本研究所定義之「水資源乾旱」。

本研究之模式建置架構（圖 3），輸入變量為現況指標加入未來指標，現況指標為不同時間尺度之標準化降雨量指標（ $SPI1$ 、 $SPI3$ ）、標準化水庫蓄水量指標（ $SRSI1$ 、 $SRSI3$ ）與標準化流量指標（ $SSI1$ 、 $SSI3$ ），其中 1 與 3 代表時間尺度為 1 個月與 3 個月。未來指標則為標準化降雨量指標（ $SPI1f$ 或 $SPI3f$ ）及標準化流量指標（ $SSI1f$ 或 $SSI3f$ ），代表未來 1 個月或 3 個月的預測降雨量與流量。輸出變量為各水庫之水情分為正常或警戒。輸出變量為各水庫之水情分為正常或警戒。藉由不同時間尺度之輸入及輸出變量，建立 8 組變量組合，預測未來第一個月水情及第三個月水情的預警模式。

預測未來第一個月之水情及預測未來第三個月之水情之率定成果如表 1，比較兩種模式表現，兩個水庫在率定期間之整體準確率皆為 QDA 優於 LDA，故皆使用 QDA 作為預警模式方法。各水庫依據率定資料選定的方法及模式，將驗證資料進行模式預測，最佳模式之驗證結果如表 2，兩個水庫在整體準確率皆達 0.8 以上，證明模式能有效掌握未來水情狀態。

四、應用 SMOTE 提升水情預警成效

由表 2 驗證結果可發現，曾文一烏山頭水庫在預測未來第一個月之水情，整體準確率（ACC）達 0.8，但預測警戒準確率（TNR）僅約 0.6；石門水庫在預測未來第三個月之水情，整體準確率（ACC）達 0.8，但預測正常準確率（recall）僅約 0.7，反映出儘管模式預測的整體準確率表現良好，然而對於正常與警戒類別其中一類別之判別，有改善的空間，而此結果顯示原始資料中可能因樣本分布不均，讓模式學習樣本數較多的類別，忽略對少數類別的判別能力，影響預測準確性，因此應用 SMOTE 處理類別樣本數不平衡，表 3 以石門水庫的三月為例，原始資料三月正常類別僅 13 筆，警戒類別有 36 筆，經過 SMOTE 處理後，三月正常類別數量提升至 36 筆，將兩類別樣本數量調整至相近數量。

經過 SMOTE 處理後的資料，並結合 LDA 與 QDA 兩種判別方式，進行預警模式之建立。表 4 顯示，兩個水庫在率定期間之整體準確率皆為 QDA 優於 LDA，故皆使用 QDA 作為預警模式方法，由表 5 驗證結果顯示，兩個水庫皆達到 0.8 以上之準確率。

為評估經過 SMOTE 處理後再建模，是否相較於使用原始資料建模更能提升模式之判別準確率，圖 4 為預測未來第一個月水情之比較結果，資料經過 SMOTE 處理後，石門水庫在整體表現有小幅度提升；曾文一烏山頭水庫則提升較明顯，驗證結果的預測警戒準確率（TNR）提升由 0.61 提升至 0.78，整體提升 15%。圖 5 為預測未來第三個月水情之比較結果，資料經過 SMOTE 處理後，兩個水庫整體表現都有穩定且提升的成效。

期望於水資源乾旱發生初期提供水情警示，針對比較後得到 QDA 結合 SMOTE 為最佳方法，再對驗證資料進行實際的預警操作，藉此對比預測水情與實際水情，評估模式的預報能力。圖 6 為石門水庫預測未來第一個月之水情預警圖，呈現 2018 年至 2021 年之水情，圖 7 為曾文一烏山頭水庫預測未來第三個月之水情預警圖，呈現 2018 年至 2021 年之水情，藍線是蓄水量變化，下方的圓點是水情狀態，上排是實際水情，下排是模式預測水情，紅代表水情警戒，藍代表水情正常，實際水情與預測水情對比後可發現，模式多數能準確預測警戒水情，僅少數月份出現預測延遲或誤判，主要在蓄水量開始下降階段，水情轉變具有較大不確定性。

五、結論

1. 本研究應用 LDA 與 QDA 建立各水庫之水資源乾旱預警模式，結果顯示，石門水庫及曾文－烏山頭水庫應用 QDA 模式之整體預測準確率優於 LDA。
2. 各水庫之原始資料存在正常水情與警戒水情的類別樣本數不平衡情況，易造成預測結果偏向多數類別。經由 SMOTE 處理後，使正常及警戒水情之樣本數量趨進平衡，進而降低因類別樣本不平衡所造成模式偏誤的影響。
3. 本研究經由 SMOTE 處理後之資料結合 QDA 方法，建立石門水庫及曾文－烏山頭水庫之水資源乾旱預警模式，預測未來第一個月及第三個月之水情，得到整體準確率、正常水情判別準確率與警戒水情判別準確率皆優於原始資料所建立之模式。
4. 各水庫之最佳判別分析模式結果如下：石門水庫為 QDA 結合 SMOTE；曾文－烏山頭水庫為 QDA 結合 SMOTE。

參考文獻

- Fisher, R. A. (1936). The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of eugenics*, 7(2), 179–188.
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357.
- Chiyeaka, O. M., Ewere, O. J., Victor, O., & Shola, O. (2025). Comparative Study of Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA) and Support Vector Machine (SVM) In Dataset. *Advanced Journal of Science, Technology and Engineering*, 5(1), 70–84.

表 1 水資源乾旱預警模式之準確率（率定）

研究區域	方法	整體準確率	預測正常準確率	預測警戒準確率
預測未來第一個月之水情				
石門水庫	LDA	0.94	0.94	0.92
	QDA	0.96	0.95	0.95
曾文－烏山頭水庫	LDA	0.92	0.90	0.93
	QDA	0.96	0.97	0.95
預測未來第三個月之水情				
石門水庫	LDA	0.91	0.91	0.87
	QDA	0.92	0.91	0.91
曾文－烏山頭水庫	LDA	0.81	0.81	0.78
	QDA	0.93	0.95	0.88

表 2 水資源乾旱預警模式之準確率（驗證）

研究區域	方法	整體準確率	預測正常準確率	預測警戒準確率
預測未來第一個月之水情				
石門水庫	QDA	0.92	0.87	1.00
曾文－烏山頭水庫	QDA	0.81	0.74	0.61
預測未來第三個月之水情				
石門水庫	QDA	0.81	0.72	0.97
曾文－烏山頭水庫	QDA	0.86	0.83	0.78

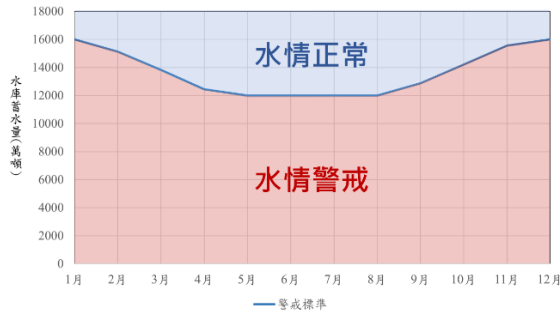


圖 1 石門水庫警戒標準圖

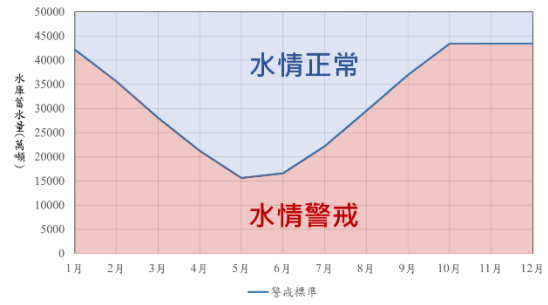


圖 2 曾文一烏山頭水庫警戒標準圖

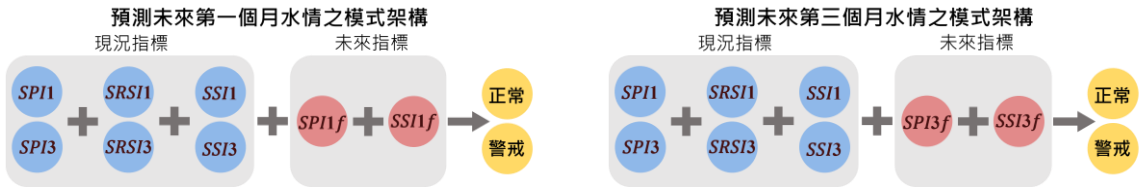


圖 3 預警模式之架構

表 3 石門水庫及曾文一烏山頭水庫率定資料經 SMOTE 平衡前後之樣本數變化

月份	石門水庫				曾文一烏山頭水庫			
	原始資料		資料平衡後		原始資料		資料平衡後	
	正常	警戒	正常	警戒	正常	警戒	正常	警戒
1	21	28	27	28	17	17	17	17
2	15	34	33	34	14	20	20	20
3	13	36	36	36	11	23	23	23
4	18	31	30	31	12	22	22	22
5	19	30	30	30	15	19	19	19
6	27	22	27	26	25	9	25	25
7	28	21	28	27	25	9	25	25
8	32	17	32	31	27	7	27	26
9	38	11	38	38	27	7	27	26
10	40	9	40	39	23	11	23	23
11	32	17	32	31	22	12	22	21
12	27	22	27	26	21	13	21	20

表 4 經 SMOTE 處理後之模式準確率 (率定)

研究區域	方法	整體準確率	預測正常準確率	預測警戒準確率
預測未來第一個月之水情				
石門水庫	LDA+SMOTE	0.94	0.95	0.93
	QDA+SMOTE	0.96	0.96	0.95
曾文一烏山頭水庫	LDA+SMOTE	0.94	0.95	0.93
	QDA+SMOTE	0.97	0.98	0.96
預測未來第三個月之水情				
石門水庫	LDA+ SMOTE	0.92	0.94	0.89
	QDA+SMOTE	0.93	0.94	0.92
曾文一烏山頭水庫	LDA+SMOTE	0.90	0.93	0.88
	QDA+SMOTE	0.94	0.95	0.92

表 5 經 SMOTE 處理後之模式準確率 (驗證)

研究區域	方法	整體準確率	預測正常準確率	預測警戒準確率
預測未來第一個月之水情				
石門水庫	QDA+SMOTE	0.92	0.88	0.99
曾文-烏山頭水庫	QDA+SMOTE	0.88	0.84	0.78
預測未來第三個月之水情				
石門水庫	QDA+SMOTE	0.87	0.80	0.97
曾文-烏山頭水庫	QDA+SMOTE	0.86	0.88	0.82

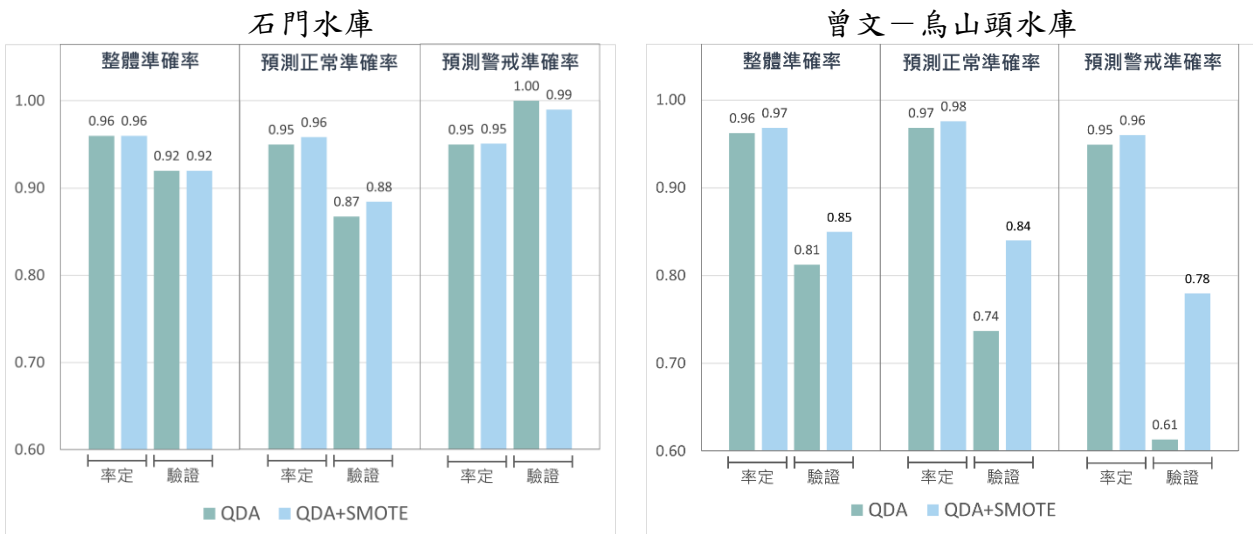


圖 4 預測未來第一個月水情之比較結果

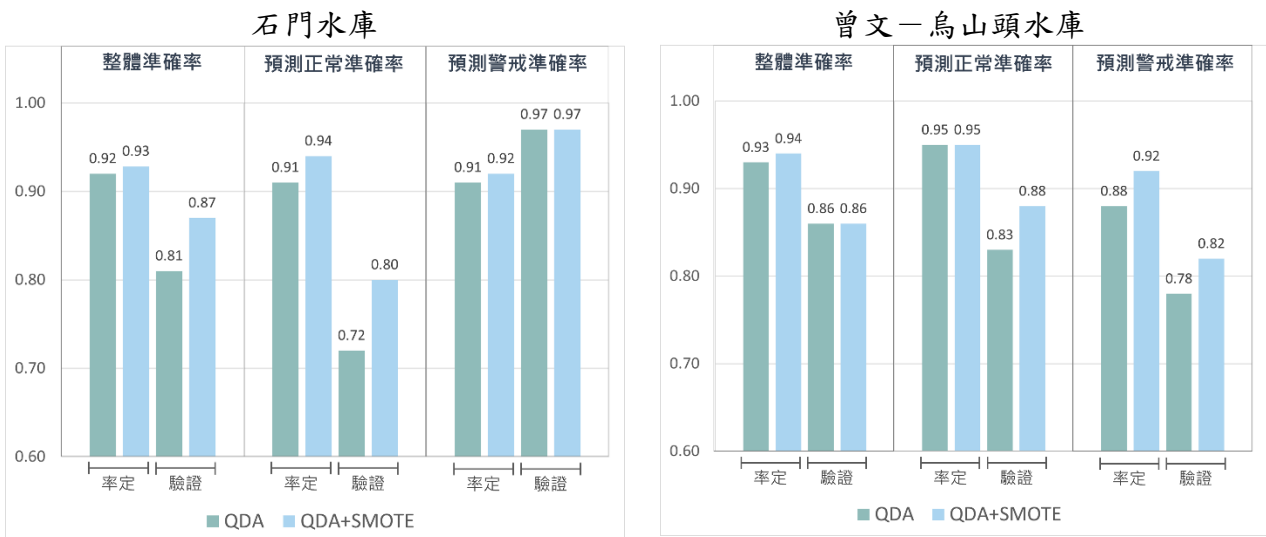


圖 5 預測未來第三個月水情之比較結果

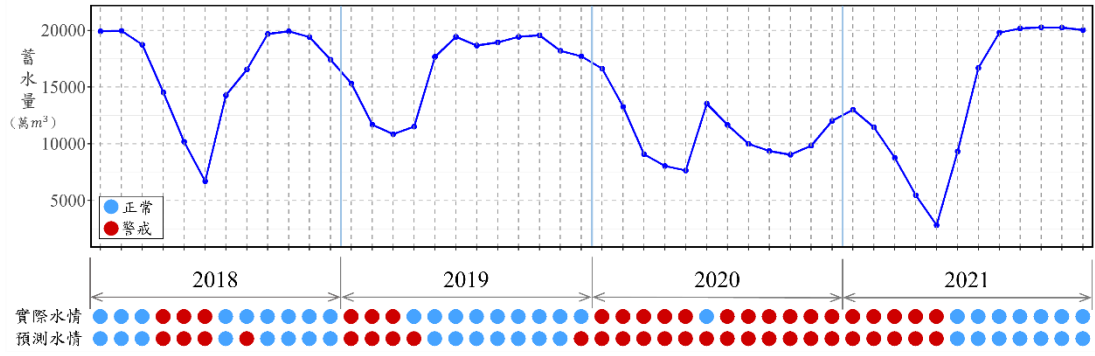


圖 6 石門水庫預測未來第一個月之水情預警圖 (2018~2021)

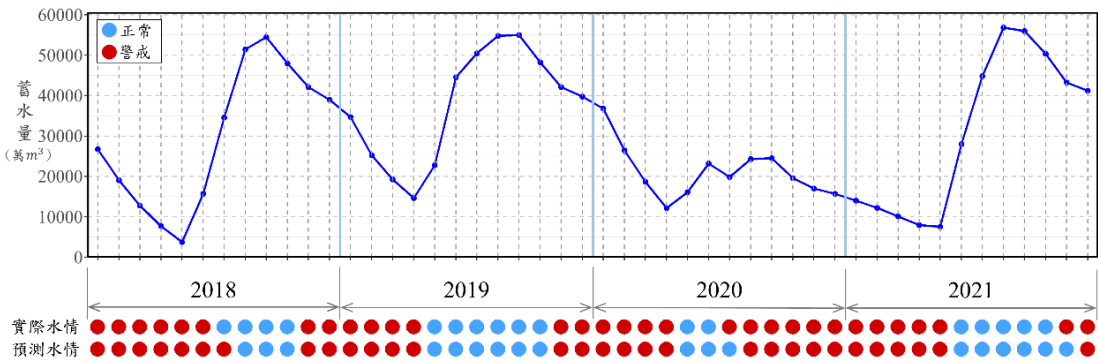


圖 7 曾文-烏山頭水庫預測未來第三個月之水情預警圖 (2018~2021)