
**強化水庫集水區因應氣候變遷治山、防洪
及排淤調適能力之研究
成果報告書**

**Strengthening Water and Soil
Conservation, Flood Protection, Sediment
Removal Adaptive Capacity to Climate
Change in Reservoir Watershed**

執行單位：逢甲大學

執行期間：106 年 02 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：何智超 研究助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 106 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

強化水庫集水區因應氣候變遷治山、防洪及排淤調適能力之研究

摘要

石門水庫集水區每逢颱風豪雨來襲，常伴隨坡地崩塌發生，大量土砂造成水庫發生嚴重淤積，影響水庫長期供水效應，因此本計畫期透過集水區土砂生產量評估與水庫最佳防洪排淤操作規則探討，提出因應氣候變遷之治山、防洪及排淤調適方案。本計畫利用 IPCC 之 AR5 評估報告，分析基期(1986-2005)及近未來(2020-2039)之水文變化，並透過打荻珠男經驗公式及修正土壤沖蝕公式評估單場事件之土砂生產量，配合遞移率評估水庫入砂量，最後結合遺傳演算法、河道水理演算與類神經網路等模式，發展水庫防洪減淤最佳規劃操作模式。分析結果顯示(1)近未來重現期 100 年最大一日暴雨之入庫土砂量為 1207.5 萬立方公尺，較基期增加 16.68%入砂量。(2)石門水庫最佳防洪操作規則傾向優先由排砂鋼管排砂，溢洪道次之，排砂鋼管最後。(3) 因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略優先推動順序為山坡地保育治理、土地使用管理與防災監測、阿姆坪防淤隧道及大灣坪防淤隧道。

關鍵字：土砂生產量、遺傳演算法、類神經網路、調適方案

Strengthening Water and Soil Conservation, Flood Protection, Sediment Removal Adaptive Capacity to Climate Change in Reservoir Watershed

Abstract

Massive sand and mud usually accompanies typhoon that cause reservoir storage capacity decrease and turbidity increase. The study proposes adaptive actions according to watershed sediment estimation and optimal flood operation to keep reservoir sustainable operation. The study estimates hydrological variation of baseline (1986-2005) and near future (2020-2039) base on AR5 report. Empirical formula and Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) are used to evaluate watershed sediment yield. Genetic algorithms, river simulation model, and Artificial Neural Network (ANN) are used to develop an optimal flood control model. The results show (1) The watershed sediment yield of 100 return period for future (2020-2039) is 12.075 million m³, which increase 16.68% than that for base (1986-2005). (2) Optimal operating rules tended to open desilting tunnel early and extend open duration during flood. (3) Prioritizing adaptive actions is hillside conservation, land use management, A-Mu-Ping Desilting Tunnel and Da-Wan-Ping Desilting Tunnel in order.

Keyword : Watershed Sediment Yield 、 Genetic Algorithms 、

Artificial Neural Network 、 Adaptive Actions

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VII
第一章 緒論	1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫範圍	1-1
第三節 計畫目標	1-2
第四節 工作項目	1-3
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 水文氣候變遷分析	2-1
第二節 水庫集水區土砂產量評估	2-14
第三節 水庫防洪減淤操作最佳規劃模式之發展	2-18
第四節 調適方案執行優先順序分析	2-25
第三章 石門水庫集水區案例分析	3-1
第一節 石門水庫基本資料蒐集與調查	3-1
第二節 石門水庫集水區水文氣候變遷分析	3-19
第三節 石門水庫集水區土砂產量評估	3-36
第四節 石門水庫最佳防洪減淤操作	3-41
第五節 研擬因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略 ...	3-62
第四章 結論及建議	4-1
第一節 結論	4-1
第二節 建議	4-3

參考文獻.....	參 1
-----------	-----

附錄.....	附-1
---------	-----

附錄一 期末審查意見回覆	附-1
--------------------	-----

附錄二 工項完成進度自我檢核表	附-3
-----------------------	-----

表次

表 2-1 AR4 與 AR5 氣候情境資料說明	2-6
表 2-2 國際間氣候變遷 AR4 與 AR5 比較研究.....	2-9
表 3-1 石門水庫集水區土地利用面積統計表	3-8
表 3-2 石門水庫淤積一覽表	3-11
表 3-3 石門水庫 102、103、104 年崩塌面積一覽表	3-14
表 3-4 石門水庫集水區年產砂量暨入砂量推估結果彙整	3-16
表 3-5 石門水庫集水區歷年土砂災害事件統計一覽表	3-17
表 3-6 各測站年降雨量 MK 檢定分析表	3-20
表 3-7 各測站年降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表	3-21
表 3-8 各測站豐水期降雨量 MK 檢定分析表	3-22
表 3-9 各測站豐水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表.....	3-23
表 3-10 各測站枯水期降雨量 MK 檢定分析表	3-25
表 3-11 各測站枯水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表	3-26
表 3-12 各測站年最大一日降雨量 MK 檢定分析表	3-27
表 3-13 各測站年最大一日降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表.....	3-28
表 3-14 各測站年最大連續不降雨日數 MK 檢定分析表	3-30
表 3-15 各測站年最大連續不降雨日數 MWP 及 KW 檢定分析表	3-31
表 3-16 石門水庫集水區各測站近未來(2020-2039)各月份降雨量變化 比率分析結果表	3-33
表 3-17 石門水庫集水區各測站基期(1986-2005)與近未來(2020-2039) 最大一日暴雨頻率分析成果	3-35
表 3-18 基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年最大一日 暴雨之崩塌產砂量	3-39

表 3- 19	基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年最大一日暴雨量土壤沖蝕量	3-39
表 3- 20	石門水庫集水區土砂遞移率估算成果.....	3-40
表 3- 21	基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年石門水庫入砂量與變化	3-41
表 3- 22	河川洪水類神經模式驗證案例評估指標列表	3-47
表 3- 23	庫區泥砂動態類神經模式驗證案例評估指標列表	3-50
表 3- 24	放流設施最佳規劃之排砂效率比較一覽表	3-61

圖次

圖 1-1 計畫區地理位置圖	1-2
圖 3-1 石門水庫集水區高程分布圖	3-2
圖 3-2 石門水庫集水區坡度分布圖	3-3
圖 3-3 石門水庫集水區坡向分布圖	3-4
圖 3-4 石門水庫集水區地質分布圖	3-5
圖 3-5 石門水庫氣候站與水位流量站位置分布圖	3-7
圖 3-6 石門水庫集水區土地利用分佈圖	3-9
圖 3-7 石門水庫累計淤積量圖	3-13
圖 3-8 石門水庫增設防淤隧道工程位置圖	3-13
圖 3-9 102~104 年石門水庫集水區內崩塌地分布圖	3-15
圖 3-10 石門水庫集水區內歷史土砂災害事件分布圖	3-18
圖 3-11 各測站年降雨量 MK 檢定分析圖	3-20
圖 3-12 各測站年降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖	3-21
圖 3-13 各測站豐水期降雨量 MK 檢定分析圖	3-23
圖 3-14 各測站豐水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖	3-24
圖 3-15 各測站枯水期降雨量 MK 檢定分析圖	3-25
圖 3-16 各測站枯水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖	3-26
圖 3-17 各測站年最大一日降雨量 MK 檢定分析圖	3-28
圖 3-18 各測站年最大一日降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖	3-29
圖 3-19 各測站年最大連續不降雨日數 MK 檢定分析圖	3-30
圖 3-20 各測站年最大連續不降雨日數 MWP 及 KW 檢定分析圖	3-31
圖 3-21 累積崩塌面積比、累積雨量與臨界雨量	3-38
圖 3-22 大漢溪下游系統圖	3-41

圖 3-23 大漢溪縱剖面圖	3-42
圖 3-24 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較.....	3-44
圖 3-25 辛樂克颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較	3-45
圖 3-26 鳳凰颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較	3-45
圖 3-27 薔蜜颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較	3-46
圖 3-28 庫區泥砂動態類神經網路架構圖	3-48
圖 3-29 排洪隧道泥砂濃度驗證結果	3-48
圖 3-30 溢洪道泥砂濃度驗證結果	3-49
圖 3-31 電廠排砂鋼管泥砂濃度驗證結果	3-49
圖 3-32 放流量及入流量之比較(薔蜜颱風).....	3-52
圖 3-33 下游河道水位之結果比較(薔蜜颱風)	3-52
圖 3-34 放流量及入流量之比較(鳳凰颱風)	3-53
圖 3-35 下游河道水位之結果比較(鳳凰颱風)	3-53
圖 3-36 放流量及入流量之比較(辛樂克颱風)	3-54
圖 3-37 下游河道水位之結果比較(辛樂克颱風)	3-54
圖 3-38 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(薔蜜颱風)	3-56
圖 3-39 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(薔蜜颱風)	3-57
圖 3-40 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(薔蜜颱風)	3-57
圖 3-41 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)	3-58
圖 3-42 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)	3-58
圖 3-43 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)	3-59
圖 3-44 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)	3-59
圖 3-45 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)	3-60
圖 3-46 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)	3-60

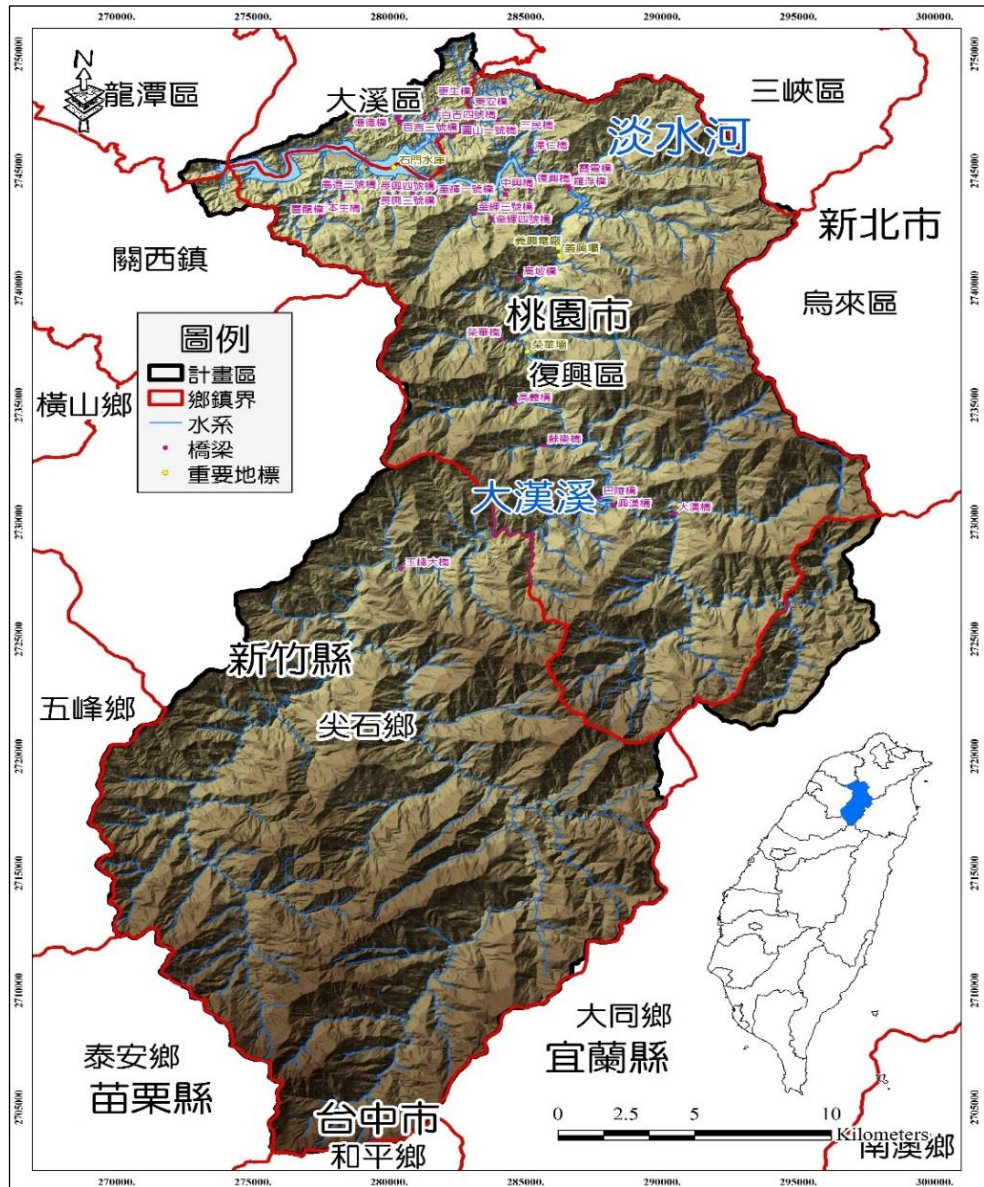
第一章 緒論

第一節 擬解決問題

台灣地區山高坡陡，地質條件欠佳，每逢颱風豪雨來襲，常伴隨坡地沖蝕崩塌發生，土砂隨著河流進入水庫集水區致使水庫發生嚴重淤積。以石門水庫為例，歷經多次颱風淤積後，現況總淤積佔原庫容 33.1%。加上石門水庫集水區地質主要為澳底層、大桶山層與乾溝層，此種頁岩受風化影響，是細顆粒泥質土的主要來源，致使豪大雨發生時水庫水質濁度易升高，降低供水能力。在極端氣候加劇下，豪大雨發生頻率越趨頻繁，水庫將面臨洪水量增加與來砂量增加的雙重挑戰。因此本計畫目的為建立一套可以同時考量集水區土砂及水庫防洪排砂運轉模式，以探討在氣候變遷影響下，建立水庫最佳操作規則，確保水庫功能及延長水庫壽命的方法，達到水庫永續經營之目標。

第二節 計畫範圍

本計畫研究區域為石門水庫集水區，其面積為 763.4km²，屬淡水河流域上游，由大漢溪及其他支流所組成，集水區全區跨越行政區域包括桃園市復興區、桃園市龍潭區、桃園市大溪區，新竹縣尖石鄉、新竹縣關西鎮及宜蘭縣大同鄉等共 6 鄉（鎮）。本計畫工作範圍之地理區位，如圖 1-1 所示。



資料來源：本計畫製作

圖 1-1 計畫區地理位置圖

第三節 計畫目標

- 一、了解研究區域現況與未來氣象水文之變化差異。
- 二、透過量化分析，了解水庫集水區現況與未來坡地土石崩塌與沖蝕趨勢
- 三、根據水庫入流量、來砂量之變化以及水庫供水標的，研擬水庫防洪減淤操作規則

四、依據衝擊分析結果，研擬因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略。

五、建立調適指標以作為調適方案決策參考及監控調適方案績效評估之參考。

第四節 工作項目

一、基本資料蒐集與調查

二、水文氣候變遷分析

(一)區域水文氣候因子變動趨勢分析

(二)區域氣候空間與時間降尺度分析

三、水庫集水區土砂產量評估

(一)坡地崩塌土砂產量評估

(二)集水區土壤沖蝕量評估

(三)水庫入庫土砂量評估

四、水庫防洪減淤操作最佳規劃模式之發展

(一)建立下游河道水理類神經網路

(二)建立庫區泥砂類神經網路

(三)建立水庫防洪減淤操作最佳規劃模式

五、研擬因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 水文氣候變遷分析

一、區域水文氣候因子變動趨勢分析

為探討水文因子觀測資料是否有明顯之變動趨勢，本計畫以統計方法分析雨量變動趨勢，以MK檢定檢視觀測資料是否有顯著上升或下降變動趨勢。MWP檢定和KW檢定用來檢視觀測資料是否存有變異點以及變異點發生在哪一年。

(一)統計檢定理論介紹

MK 檢定、MWP 檢定與 KW 檢定均為無母數統計方法(nonparametric statistics)，由於無母數統計方法主要是依據資料的等級(rank)進行檢定，故不受限於資料本身之分布，可應用於各種機率分布資料之分析。三種統計檢定方法理論分別介紹如下：

1.MK (Mann-Kendall)檢定

MK 檢定可用於檢測資料是否具有趨勢(Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987)，其虛無假設視資料在時間上之分布是隨機的，即資料不具趨勢性；而對立假設為資料具有遞增或遞減的趨勢。今有 n 個樣本， $y_i, i = 1, \dots, n$ ，並定義 S 指標如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad \text{式 2-1}$$

其中，

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{if } \theta > 0 \\ 0, & \text{if } \theta = 0 \\ -1, & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad \text{式 2-2}$$

Kendall (1975)推導 S 指標於隨機條件下之期望值
與變異數分別為：

$$E(S) = 0 \quad \text{式 2-3}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \{n(n-1)(2n+5)\} \quad \text{式 2-4}$$

並定義統計檢定量 Z 為：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{式 2-5}$$

如果 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ 則拒絕虛無假設，表示資料在時間上有趨勢存在。其中， α 為顯著水準。若 S 指標值為正值，則表示資料具有逐漸增加之趨勢；反之，若 S 指標值為負值，則表示資料具有逐漸減少之趨勢。

2.MWP (Mann-Whitney-Pettitt)檢定

MWP 檢定法由 Pettitt(1979)提出，利用無母數統計方法，檢測連續資料在一段時序列中是否存在顯著差異的改變點。若時間序列之資料長度為 T ，首先假設 t 為時間序列中最可能之變化點，並以 t 點為界，將時間序列資料分為前後兩部分 $\{X_1, \dots, X_t\}$ 與 $\{X_{t+1}, \dots, X_T\}$ ，進而以式 2-6 計算 t 點於時間序列中位於何處時兩資料將會出現最大轉折點，

此即為變異點。Pettitt 定義之 U_t 指標如下：

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \text{式 2-6}$$

其中令 $(x_i - x_j) = X$

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 1, & \text{if } X > 0 \\ 0, & \text{if } X = 0 \\ -1, & \text{if } X < 0 \end{cases} \quad \text{式 2-7}$$

將 $|U_t|$ ($t = 1, \dots, T$) 描繪出來，若 $|U_t|$ 呈現持續增加的情形，則無顯著變異點，反之， $|U_t|$ 持續增加至某一處開始減少，轉折點即為變異發生位置。然而時間序列中趨勢發生變化可能不只一次，即變異點可能為數個，本研究依據順序統計量(order statistics)之理論，進而引用 KS 兩樣本檢定，檢定兩樣本累積分布函數之最大差值 KT 計算之發生機率 P 如式 2-8 所示，自時序列資料中找到 $|U_t|$ ($t = 1, \dots, T$) 之最大值為趨勢變異點之發生機率。呂季蓉(2006)提出當 t 時刻之 $|U_t|$ 值為時間序列中最大值且發生機率大於 0.9 時，則存在有顯著改變點之現象越加明顯。

$$P = 1 - \exp\left[\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right] \quad \text{式 2-8}$$

$$K_T = \max |U_t| \quad \text{式 2-9}$$

3.KW (Kruskal-Wallis)檢定

KW 檢定又稱為 Kruskal-Wallis 因子分類變異數分析，由 Kruskal 與 Wallis 將 Wilcoxon 兩樣本檢定法加以推廣所得，此檢定運用於檢測 k 組獨立隨機樣本是否來自同一母體，其虛無假設為各組資料皆來自相同母體；而對立假設為至少有一組資料來自不同母體。藉由前述 MWP 檢定可求得時間序列中顯著差異之改變點位置，而 KW 檢定則可進一步檢測改變點前後之兩樣本是否存在顯著差異。其檢定步驟如下(顏月珠，1986)：

將 k 組獨立樣本所有觀測值由小至大排列，並分別給予適當等級。此處 k 即為經由 MWP 檢定法求得之 t 點位置或稱改變點位置，將連續資料分為兩組獨立樣本。

求算檢定統計量 H，如下所示：

A.若樣本中 n 個觀測值均不相等，則 H 為：

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad \text{式 2-10}$$

$$n(n+1) = \sum_{i=1}^k n_i \quad \text{式 2-11}$$

其中 n_i 為各組樣本大小， R_i 為各組樣本的等級和

B.若樣本中存有部份觀測值相等，尤其相同觀測值達 25%以上，則 H 須校正為：

$$H = \frac{\frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)}{1 - \frac{\sum_{j=1}^c (t_j^3 - t_j)}{n^3 - n}} \quad \text{式 2-12}$$

其中 c 為相同等級的集合數， t_j 為第 j 個相同等級集合中的觀測值個數。

- (1) 當 $n_i > 5$ 時， H 分配近於 χ^2 分配，故自由度 $v = k - 1$ ，且於 95%信賴區間時，若式 2-13 成立，則拒絕母體相同的虛無假設。

$$H > \chi^2_{(1-\alpha, k-1)} \quad \text{式 2-13}$$

二、區域氣候空間與時間降尺度分析

(一)氣候變遷情境說明

本計畫比較 IPCC 的 2007 年第四次評估報告（Fourth Assessment Report, AR4）與 2013 年的第五次評估報告（Fifth Assessment Report, AR5）之氣候情境資料，差異彙整如表 2-1。就排放情境而言，AR4 報告中推估未來的氣候變遷，主要分成 A1、A2、B1 和 B2 四大類(詳圖 2-1)，其中 A1 情境中考量未來可能的社經與排放量又分成三類 A1F1、A1T 和 A1B，不同的排放濃度情境下，溫度會隨著溫室氣體減量的多寡影響著推估期的增溫量。AR5 報告中的推估情境則是以代表濃度路徑表示分為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 四種情境。RCP8.5 情境，表示世界各國並無任何溫室氣體減量之假設情境，此情境是相對於是最劣排放情境，以險峻的情境進行推估，可做較保守的調適操作。所有情境中以 RCP2.6 情境對於未來的溫室氣體減量相對樂觀。IPCC AR4 與 IPCC AR5 之不同情境下二氧化碳濃度上升趨勢示如圖 2-2。

表 2-1 AR4 與 AR5 氣候情境資料說明

	AR4	AR5	
基期	1980~1999	1986~2005	
近未來	2020~2039	2020~2039	2016~2035
世紀中	2041 ~2059	2041 ~2059	2046 ~2065
	2060~2079	2060~2079	-
世紀末	2080 ~2099	2080 ~2099	2081 ~2100
排放情境 (模式數)	A1b(24)	Rcp2.6(26)	
	A2(19)	Rcp 4.5(38)	
	B1(21)	Rcp6.0(21)	
		Rcp8.5(41)	

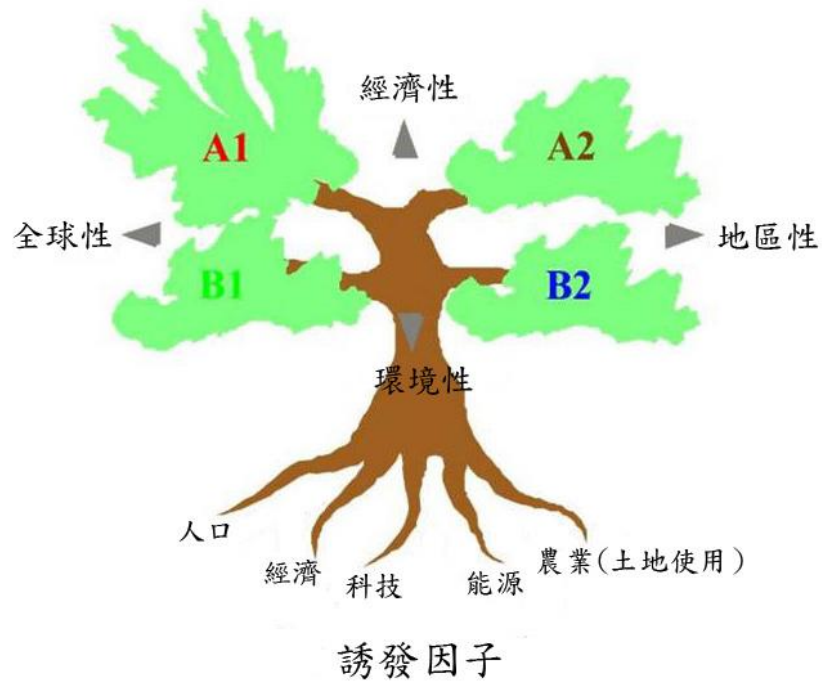


圖 2-1 AR4 排放情境架構圖

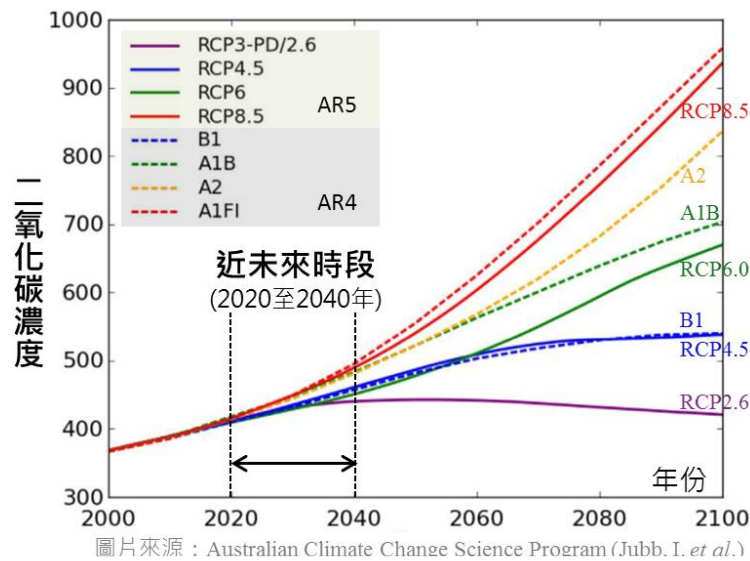


圖 2-2 IPCC AR4 與 AR5 二氧化碳濃度上升趨勢

(二)氣候變遷情境挑選

情境挑選一般可依據下列三種方式進行：

- 1.根據歷史或基期的表現決定分析情境：利用歷史觀測資料來比較 GCM 基期時段的模擬結果，根據其模擬表現後再挑選相近的情境進行比較。
- 2.根據二氧化碳排放濃度決定分析情境：根據 IPCC AR5 報告中 IPCC AR4 與 IPCC AR5 的二氧化碳濃度比較圖，如圖 2-2 所示，挑選相似的排放路徑的情境進行分析，例如 RCP8.5 相對於 A1FI(或 A2)、RCP6.0 相對於 A1B、RCP4.5 相對於 B1。

3.無挑選(系集平均)(multi-model ensemble, MME)決定分析情境：直接將所有情境的結果加以平均，即將所有可用的資訊均納入分析，避免遺漏任何發生的可能。

本計畫參考水利規劃試驗所「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估」，羅列國際間氣候變遷研究中 IPCC AR4 與 IPCC AR5 情境挑選相關研究(詳表 2-2)。可發現目前多數研究均以二氧化碳濃度或情境無挑選(系集平均)的方式來比較 IPCC AR4 與 IPCC AR5 的差異。以近未來(2020 至 2039 年)之研究來看，過去經濟部水利署氣候變遷計畫均採用 IPCC AR4 下的 A1B、A2、B1 三個情境，此三個情境對應最接近 IPCC AR5 的二氧化碳濃度為 RCP8.5 及 RCP4.5 (詳表 2-3)。由於過去普遍認為 A1B 情境是最可能發生之情境，因此本計畫以其對應 AR5 之 RCP8.5 情境進行後續分析。

表 2-2 國際間氣候變遷 AR4 與 AR5 比較研究

作者	分析範圍			比較方法			研究內容與結果
	全球	大尺度	小尺度	歷史比較	二氧化碳濃度	系集平均	
Kitoh & Endo(2015)	X				X		28 個 AR5 RCP8.5 平均，五日最大降雨與一日最大降雨全球各地都有增加
Taylor et al. (2012)	X					X	中緯度與熱帶地區，AR4 或 AR5 的強降雨均呈現增加
Knutti and Sedlacek(2013)	X					X	CMIP3 與 CMIP5 的全球氣溫、降雨分布特性相似，模式不確定性的相差幅度亦不大
Yao et al. (2013)	X				X	X	1.AR4 (B1) vs AR5 (RCP4.5)，近未來季極端溫度變化相同 2.AR4 MME (B1,A1B,A2) vs AR5 MME (RCP4.5,RCP8.5)，月極端溫度一致
Lutz et al. (2013)		X				X	1.計算中亞冰川在近未來(2008-2050)的冰川變化 2.AR4 MME(A1B, A2, B1) vs AR5 MME (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)，冰川量相近
Monerie et al. (2012)		X				X	1.8 個 CMIP5 模式(RCP4.5)與 8 個 CMIP3 模式(A1B)進行比較 2.CMIP5 之模擬結果就整體而言更加真實，且具備更高的準確性，然而部分 CMIP3 模式所存在的偏差在 CMIP5 中仍然存在
Tung et al. (2014)		X				X	15 個 AR4 MME vs 18 個 AR5 MME 分析亞洲夏季季風，發現 IPCC AR4 與 IPCC AR5 均

作者	分析範圍			比較方法			研究內容與結果
	全球	大尺度	小尺度	歷史比較	二氧化碳濃度	系集平均	
							呈現相同的季風起始延遲的現象
Kusunoki and Arakawa(2015)		X				X	1.比較 CMIP5 與 CMIP3 GCM 模式在東亞區（20°-50°N, 110°-150°E）的降雨模擬能力 2.無論是 CMIP5 或是 CMIP3 的模式對於東亞地區的降水強度有低估的現象。 3.在全年分佈、雨季的循環表現，以及極端降雨事件上，CMIP5 模式對於東亞地區的重現性皆高於 CMIP3。
Pacific Northwest Climate Impacts Research Consortium		X			X	X	1.西北太平洋地區溫度與雨量分析 2. AR4 MME (B1, A2) vs AR5 MME (RCP4.5, RCP8.5) 3.AR5 的溫度較 IPCC AR4 溫暖；雨量均增加
Supharatid (2015)			X		X		1. 泰國曼谷的淹水脆弱度分析 2. AR4 (A2) MME vs AR5 (RCP4.5) MME 與 AR4 (B1) MME vs AR5 (RCP8.5) MME，兩者的差異不會太大
Wichakul et al. (2015) Hunukumbura & Tachikawa(2012)			X		X		1.泰國 Chao Phraya River 流域的流量變化 2. AR4 (A1B) vs AR5 (RCP8.5)，平均月流量增加，低流量減少
Sun et al. (2015)			X	X			1. 14 個 AR4 MME vs 14 個 AR5 MME

作者	分析範圍			比較方法			研究內容與結果
	全球	大尺度	小尺度	歷史比較	二氧化碳濃度	系集平均	
							2. 中國各區域，模擬溫度與雨量時的表現均不佳，各地區的低雨量均高估
Cayan et al. (2012)			X			X	1. 美國西南部溫度與雨量 2. AR4 MME vs AR5 MME 3. 均呈現雨量減少與溫度上升的現象
Adapt New South Wales, AdaptNSW			X			X	1. 澳洲與亞太地區的溫度與降雨表現， AR4 MME vs AR5 MME 2. 溫度均增加的現象；AR4 的雨量減少趨勢較 AR5 來的嚴重

資料來源：水利規劃試驗所，105 年，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(1-2)

表 2-3 水利署採用 IPCC AR4 情境與 IPCC AR5 情境對照

情境對照	IPCC AR4 情境 (經濟部水利署採用)	IPCC AR5 情境 (本計畫採用)
情境	A1B	RCP8.5
	A2	RCP8.5
	B1	RCP4.5

資料來源：水利規劃試驗所，105 年，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(1-2)

(一)GCM 模式挑選

目前 IPCC 提供 40 多個全球環流模式(general circulation model, GCM)之未來氣候模擬值，根據水規所「氣候變遷降雨量

情境差異對洪旱衝擊評估(1-2)」，GCM 模式挑選一般可區分為四種方式：

- 1.水文氣候觀點：此觀點多採用雨量與溫度作為分析變量，分析比較基期歷史觀測值與 GCM 模式模擬之結果，並挑選表現較好之 GCM 模式作為後續衝擊分析使用，挑選模式數量大多介於 5 至 8 個之間。其中，常採用之評鑑指標包含相關係數(correlation coefficient)與均方根誤差(root mean squared error)。
- 2.大氣觀點：此觀點指採用特定天氣系統(例如：颱風系統與季風系統)作為檢核對象，分析比較歷史觀測值與 GCM 模式模擬之結果，比較項目包含颱風生成位置之空間與時間分布、季風範圍、季風型態以及季風時序等等。其中，常採用之評鑑指標包含泰勒 S 指標(Taylor's indices)與泰勒技術得分(Taylor skill score)等指標。
- 3.統計觀點：此觀點主要探討分析 GCM 模式推估值之間的統計特性，例如分析不同 GCM 模式推估值之相關性，給予高度相關 GCM 模式推估值較低之權重，以增加 GCM 模式推估值之多樣性，最後再依據權重整合所有推估值。此外，亦有研究比較不同模式挑選方法對於氣候變遷評估結果之影響，其分析結果指出：模式挑選方法對於氣候變遷評估結果具有顯著之影響。
- 4.多模式系集平均觀點：採用多模式系集平均之結果作為氣候變遷衝擊評估之依據

由於國內針對防洪及土砂主軸問題，多採用多模式系集平

均觀點，於豐水期間採系集平均值加上一倍標準偏差，於枯水期間則採系集平均值減去一倍標準偏差。故本計畫亦採用此方式進行後續分析。

(一)空間降尺度分析

目前 IPCC 提供 40 多個全球環流模式(general circulation model, GCM)之未來氣候模擬值，然 GCM 模式網格解析度約為二、三百公里，無法精確反映台灣區域之氣候特性，需透過空間降尺度分析，以反映局部區域氣象水文之變化。本研究引用國家災害防救科技中心(NCDR)之 TCCIP 降尺度結果，再利用其空間降尺度分析結果進行氣候繁衍。TCCIP 採用 Bias Correction Statistical Downscaling(簡稱 BCSD)統計降尺度方法，由高解析度觀測資料與低解析度 GCM 模式資料兩者的累積分布函數(CDF, cumulative distribution function)關係，透過偏差量的校正(bias correction)降尺度後，以獲得台灣地區 5 公里×5 公里高解析度之月平均氣候值之模式結果。

(一)時間降尺度分析

本計畫利用 TCCIP 提供之月降雨變化量配合氣候繁衍模式(Weather generator model)繁衍出日降雨量。Srikanthan and McMahon (2001)將隨機型氣象繁衍模式分為兩大類：參數型及非參數型，其中參數型氣象繁衍模式最著名的為 Richardson 於 1981 年提出的 Richardson-type 氣象繁衍模式，Richardson-type 模式的方法為透過馬可夫轉置矩陣的機率來決定某日的降雨發生與否，再使用機率分布繁衍降雨日時的降雨量。另外 Racsko

等人於 1991 提出 serial approach 氣候繁衍模式，在繁衍過程中增加降雨延時之決定，常見之參數型氣候繁衍模式，如：WGEN (Richardson and Wright, 1984)、WXGEN (Wallis and Griffiths, 1995)、CLIGEN (Zhang and Garbrecht, 2003)，以及 LARS-WG (Racsko et al., 1991)；非參數型氣候繁衍模式則是透過重複複製歷史觀測資料，在不破壞變數時間與空間的關係下，繁衍時間序例的氣候資料，如 K-Nearest neighbor approach。本計畫將採用 Richardson-type 氣象繁衍模式，進行後續分析。

(二)多模式系集平均雨量

本計畫以 Richardson-type 法針對 AR5 之 RCP8.5 情境中的 42 個 GCMS 模式進行日雨量繁衍，並採多模式系集平均觀點，於豐水期間採系集平均值加上一倍標準偏差，於枯水期間則採系集平均值減去一倍標準偏差，作為 AR5 之 RCP8.5 情境之多模式系集平均成果，再根據此成果挑選各年最大一日降雨量資料進行頻率分析。頻率分析採用之統計分布參考經濟部水利署「水文分析圖表範例及作業參考手冊」，以對數皮爾遜 III 型分布 (Log Pearson type III distribution, LPT3) 進行分析。

第二節 水庫集水區土砂產量評估

一、坡地崩塌土砂產量評估

崩塌產砂為集水區土砂生產量主要來源(Chen et al., 2012)，本計畫建立石門水庫崩塌地產砂量推估模式，作為極端降雨下集水區產砂量推估、流域內河道土砂運移及堆積量推估與土砂災害處理對策研擬之依據。

本計畫以崩塌判釋成果與崩塌體積量測為基礎，推估歷次颱風之新生崩塌體積，作為打荻珠男(1971)之經驗公式之率定基礎，並且分析各子集水區之臨界雨量，率定與驗證淡水河流域各子集水區之崩塌地產砂推估模式。崩塌面積與引發崩塌之臨界降雨量經驗公式如下：

$$\frac{s}{A} = 10^{-6}k(P - P_0)^2$$

其中s為崩塌面積(m²)、k為集水區係數、A為集水區面積(m²)、P為累積雨量(mm)、P₀為發生崩塌之臨界降雨量(mm)。上述公式乘上崩塌深度(m)，崩塌面積(s)乘以崩塌深度(h)可得到崩塌體積，可改寫為：

$$V = kAh(P - P_0)^2$$

其中V為崩塌體積(m³)、A為集水區面積(m²)，過去崩塌深度(h)之參數受限於無現地觀測之資料，通常給定一個假定之平均。根據上述之結果，崩塌深度與面積大小有關係，因此將k*h視為單一參數(K)，可得下列經驗公式：

$$V = KA(P - P_0)^2$$

臨界降雨量為崩塌地產砂量模式之重要參數，可透過颱風事件之雨量分布圖套疊崩塌地圖層，統計各崩塌地對應的累積雨量，繪製崩塌地累積面積與累積雨量關係，分辨產生崩塌地之臨界降雨量。

二、集水區土壤沖蝕量評估

土壤沖蝕量評估方法以美國農業部(United State Department of Agriculture, USDA)所發展最為多元化，如 USLE、MUSLE、SWRRBWQ、RUSLE、AGNPS、WEPP；國內學者陳樹群等人(1998)發展土壤沖蝕指標 SEIM(Soil Erosion Index Model)模式，將

USLE 影響參數轉換指數方式，並以指數總值配合迴歸公式計算土壤流失量。常見之土壤沖蝕量經驗公式彙整如表2-4，

水土保持技術規範第35條規定山坡地土壤流失量之估算得採用通用土壤流失公式(USLE)，然該公式僅能評估年平均土壤沖蝕量，無法探討不同暴雨事件下之土壤沖蝕量。為此，本計畫改採Williams and Berndt於1977年所提出的修正土壤沖蝕公式(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)，此公式係利用逕流量及尖峰流量間接反映出降雨的特性來推估泥砂量的產生，不同於USLE直接以降雨作為沖蝕能量的指標。此法優點主要有以下兩項：(1) 不需另外估算泥砂遞移因子；(2)可估算單場暴雨事件之泥砂產生量。其公式如下

$$V_s = 11.8(V_{eff} \cdot Q_p)^{0.56} \cdot Km \cdot C \cdot P \cdot L \cdot S$$

式中，

V_s ：單場暴雨所產生之土砂量(公噸)； V_{eff} ：降雨事件逕流體積(m^3)； Q_p ：集水區洪峰流量(cms)； Km ：土壤沖蝕指數； C ：覆蓋與管理因子； P ：水土保持處理因子； L ：坡長因子； S ：坡度因子。

表 2-4 常見之土壤沖蝕公式列表

發展者	模式名稱	應用層面
美國農業部 (USDA)	USLE	估算年平均土壤沖蝕量
	MUSLE	用流量取代 USLE 之降雨沖蝕指數，用於單場暴雨事件土壤沖蝕量
	SWRRBWQ	適用於水質污染模式
	RULSE	修正 USLE 坡度、覆蓋管理因子及沖蝕指數
	AGNPS	考慮坡形因子，分成凹坡、凸坡及平坦坡
	WEPP	物理性沖蝕模式
陳樹群 等人 (1998)	SEIM	指標值配合迴歸公式計算土壤沖蝕量

三、入庫土砂量評估

由於本計畫土壤沖蝕量採用MUSLE公式推估，不需另外估算泥砂遞移，因此入庫土砂量可由下式推估

$$\text{入庫土砂量} = \text{土壤沖蝕量} + (\text{坡地崩塌土砂量} \times \text{土砂遞移率})$$

關於土砂遞移率過去已有許多文獻探討，Heim (1932)蒐集33歷史崩塌資料，建立崩塌量與崩塌土砂運移距離及崩塌高程差之迴歸經驗式。其後相關研究亦發現崩塌量除與上述因子相關外，亦受地形平均坡度影響(Vandre, 1985；Takahashi et al., 1994)；Lin et al. (2002)提出泥砂遞移率以單位網格為基礎，配合土壤流失量推估集水區出口的坡面泥砂遞移量；水利署(2006, 2007)建立石門水庫集水區中大漢溪主河道之土砂遞移率經驗式，其中以集水區面積為主要因子。土砂遞移率與集水區面積大致成一反比的關係，即集水區面積愈大，泥砂搬運至出水口的距離愈遠，故溪流長度愈長於中途貯存的地方愈多，且貯存機率愈大，相對於土砂遞移率則愈小。陳樹群與賴益成(2004)亦針對土砂遞移率與集水區面積之關係進行探討研究，茲彙整水庫集水區面積與土砂遞移率之經驗公式，詳見表2-5。本計畫

將分析各種土砂遞移率之經驗公式，並取用較保守之數據進行後續分析。

表 2-5 水庫集水區面積與土砂遞移率經驗公式

出處	土砂遞移率經驗公式
Roehl, J. W., "Sediment Source Areas, Delivery Ratios and Influencing Morphological Factors," IAHS Publ., No. 59, Commission of Land Erosion, pp. 202-213 (1962)	$\log \text{SDR}(\%) = 1.91 - 0.338 \log A$
Vanoni, V.A., "Sedimentation Engineering," Manual and Report, ASCE, No. 54, New York (1975)	$\text{SDR}(\%) = 62 \times A^{-0.14}$
陳樹群、賴益成，「水庫集水區土砂評量與整治率評估模式」，中華水土保持學報，第三十五卷，第一期，pp. 53-67. (2004)	$\text{SDR}(\%) = 249.14 \times A^{-0.316}$ $\text{SDR}(\%) = 126.22 \times A^{-0.35} S^{0.22}$

第三節 水庫防洪減淤操作最佳規劃模式之發展

本計畫整合遺傳演算法、水理模式及庫區泥砂模式，建立一水庫防洪減淤操作最佳規劃模式。參考石門水庫運用要點，建立下列五項操作原則：

一、洪水來臨前，應視水庫當下水位，進行調節性放水，以增加蓄洪空間，以免洪水來臨時因水庫水位過高，來不及放水導致潰壩之風險。

二、洪水來臨時，充分運用水庫的防洪空間，調節水庫放水量，避免因水庫放水，增加下游生命財產之損失。

三、水庫防洪操作過程中，需確保水庫之安全，以避免水庫潰壩。

四、水庫防洪操作過程中，透過水力排砂之方式，盡可能排出最大量化的土砂，以延長水庫使用壽命。

五、洪水過後，水庫水位回蓄至目標水位，以利未來枯水期之水資源調配使用。

本最佳規劃模式是在入流量已知之前提下，在兼顧水庫壩體安全、降低下游地區淹水損失及排出砂量最大化三者不同之目標，並考量水庫防洪運用要點，規劃最佳放水歷程。目標函數表示如下式：

$$\text{Min}_{R_t} \left\{ \text{Max} \left\{ \frac{L^p - L^{\text{bank}}}{L^{\text{bank}}}, 0 \right\} + \frac{|H_{\text{initial}} - H_{\text{final}}|}{H_{\text{initial}}} - \frac{1}{M} \sum_{t \in [t_0, T]} R_t \times C_t \right\}$$

其中， L^{bank} 為下游控制點堤防高； L^p 為下游控制點之尖峰水位；

H_{initial} 為初始蓄水位高； H_{final} 為防洪操作期末蓄水位高； M 為總入庫泥砂量； R_t 為 t 時刻的放水量； C_t 為 t 時刻的出口泥砂濃度。

目標函數中考量三項目標，第一項目標是減災項，以減少下游地區之淹水災損為主，因此若已發生溢堤淹水的情況下，控制點之溢堤水位應越低越好；第二項目標是水資源項，主要讓期末蓄水量停留於目標蓄水量，可以蓄存一定量之水源以便因應來年的枯水期使用，亦不致於過度蓄水以保留餘裕容量應付後續颱風；第三項目標為減淤項，是在不違反石門防洪操作運用要點規定之放水原則，

在防洪操作過程中，以水力排砂方式盡可能排出最大化的土砂量。由於三目標因單位不同，故本計畫先將三者進行正規化，再以權重值組合為單一目標。

在限制式方面，以數學式呈現包含水庫演算、防洪三階段放水原則、水庫安全限制式及溢洪道最大流量限制式等四大項。

(一)水庫演算

水庫演算是以質量平衡方程式為描述水庫蓄水量，蓄水方程式如下式，水庫蓄水量受到水庫入流量與放水量之影響，水庫蓄水量可透過水庫標高、面積與容積曲線(H-A-V Curve)進一步轉換成水庫水位。

$$(I_{t-1} + I_t) - (R_{t-1} + R_t) = \frac{2}{\Delta t} (S_t - S_{t-1})$$
$$H_t = f_{HAV}(S_t) \quad t = 1, 2, \dots, t_{III}$$

式中 I_t 為 t 時刻水庫入流量； R_t 為 t 時刻水庫放水量； S_t 為 t 時刻水庫蓄水量； H_t 為 t 時刻水庫水位。

(二)防洪三階段放水原則

1.洪水來臨前(第 I 階段)

第 I 階段為洪水尚未來臨，藉由適時調節性放水，以增加水庫之蓄洪容量。本階段放水限制為放水量不可大於 1,000 (cms)，如下式，其中 R_t 為 t 時刻水庫放水量。

$$R_t \leq 1000 \text{ cms} \quad t = 1, 2, \dots, t_I$$

2.洪峰發生前(第 II 階段)

第 II 階段為主要防洪操作的階段，本階段共有三項放水限制，說明如下：

(1)放水量不可大於最大進水流量：

$$I_t^{\max} = \max \{I_{t-1}^{\max}, I_t\}$$

$$R_t \leq I_t^{\max} \quad t = t_I + 1, \dots, t_{II}$$

式中 $I_t^{\max}$ 為 t 時刻以前之最大進水量； R_t 為 t 時刻水庫放水量。

(2)放水增加率不可大於進流量之最高增加率：

$$\Delta I_t^{\max} = \max \{(\Delta I_{t-1}^{\max}, I_t - I_{t-1})\}$$

$$R_t - R_{t-1} \leq \Delta I_t^{\max} \quad t = t_I + 1, \dots, t_{II} \quad (\text{式})$$

式中 $\Delta I_t^{\max}$ 為 t 時刻以前之最高增加率； R_t 為 t 時刻水庫放水量。

(3)放水量不可小於前一時刻放水量：運用要點中並未規範此操作原則，但許多前人研究均加入此原則，使得放水歷程逐步隨入流歷程而提升。

$$R_t \geq R_{t-1} \quad t = t_I + 1, \dots, t_{II} \quad (\text{式})$$

式中 R_t 為 t 時刻水庫放水量。

3. 洪峰發生後(第 III 階段)

第 III 階段為洪峰發生後，操作上為退水階段的時期，主要功用在回復水庫水位至目標蓄水位。本階段共有兩項放水限制，說明如下：

(1)放水量不可大於洪峰入流量：

$$R_t \leq I^{peak} = \max \{ (I_t) \}_{t=1,2,\dots,t_{III}} \quad t = t_{II} + 1, \dots, t_{III}$$

式中 I^{peak} 為洪峰流量； R_t 為 t 時刻水庫放水量。

(2)放水量不可大於前一時刻放水量：

$$R_t \leq R_{t-1} \quad t = t_{II} + 1, \dots, t_{III}$$

式中， R_t 為 t 時刻水庫放水量。

(三)水庫安全限制式

確保最大可能洪水時水庫之安全性，使最大洪水水位不至溢壩。式中 H_t 為 t 時刻水庫水位； H_{max} 為水庫最高蓄水位。

$$H_t \leq H_{max} \quad t = 1, 2, \dots, t_{III}$$

(四)放流口最大流量限制式

水庫各時段放流量應小於放流口之最大放水限制，最大放水限制可由北水局所提供之資料求得，其為水庫水位與閘門開度之函數。式中 $R_{n,t}$ 為 t 時刻第 n 個放流口之放水量； $U_{n,t}^{max}$ 為放流口之最大放水限制； R_t 為 t 時刻之總放水量。

$$R_{n,t} \leq U_{n,t}^{max} = g_n(R_{n,t}, S_t) \quad t = 1, 2, \dots, t_{III}$$

$$R_t = R_{1,t} + R_{2,t} + R_{3,t} + \dots + R_{n,t} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(五)下游河道水位模擬

本計畫所建立之水庫防洪規劃模式因考量到降低下游地區淹水之影響，以 HEC-RAS 建立下游河道水理模式。由於河道演算需嵌入水庫優選模式反覆呼叫，因此本研究採倒傳遞類神經網路，應用前述 HEC-RAS 模式建立大量之水庫放水量與對

應之河道流量與水位等水理資訊，將該資料作為類神經網路之訓練資料，建立河川洪水類神經模式藉此降低模式計算量。倒傳遞網路學習過程說明如下：

1.令輸入層、隱藏層與輸出層節點分別以 i 、 j 、 k 為下標符號，建立一輸入層、隱藏層與輸出層節點數分別為 m 、 n 、 o 個，以均勻分佈隨機亂數設定加權值矩陣 W_{ij} 、 W_{jk} 與閾值 b_j 、 b_k 的初始值。

2.輸入一個訓練案例的輸入向量 $\vec{X} = [X_i]$ ， $i=1,2,\dots,m$ 與目標輸出向量 $\vec{T} = [T_k]$ ， $k=1,2,\dots,o$

3.計算推估輸出向量 $\vec{O}$

(1)輸入層向量

$$\vec{X} = [X_i] \quad i=1,2,\dots,m$$

(2)計算隱藏層輸出向量 $\vec{H}$

$$H_j = f_h(\text{net}_j), \quad \text{net}_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j, \quad j=1,2,3,\dots,n$$

式中 $f_h(x)$ 為隱藏層轉換函數，可依問題型態挑選轉換函數

(3)計算輸出層輸出向量 $\vec{O}$

$$O_k = f_o(\text{net}_k), \quad \text{net}_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k, \quad k=1,2,3,\dots,o$$

式中 $f_o(x)$ 為輸出層轉換函數，可依問題型態挑選轉換函數

4.計算加權值矩陣修正量 ΔW ，及閾值修正量 Δb 。因為監督式學習的目的在降低網路輸出單元目標輸出值與推論輸出值之差距，所以一般以能量函數（又稱誤差函數）表示學習的品質：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^o (O_k - T_k)^2$$

因此網路的學習過程即為使能量函數最小化的過程，通常以最陡坡降法來使能量函數最小化，即每輸入一個訓練案例，網路即小幅調整加權值的大小，調整的幅度和誤差函數對該加權值的敏感程度成正比，即與誤差函數對加權值的偏微分值大小成正比：

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w}$$

$$\Delta b = -\eta \frac{\partial E}{\partial b}$$

式中 Δw 與 Δb :加權值與閾值調整的幅度; η 稱為學習速率 (learning rate), 控制每次以最陡坡降法最小化誤差函數的步幅。

5.更新加權值矩陣與閾值

$$w_{new} = w_{old} + \Delta w$$

$$b_{new} = b_{old} + \Delta b$$

6.重覆步驟 2 至步驟 6，直至收斂，即誤差不再有明顯變化且符合所要求的精度。

(六)放流口泥砂排放量模擬

$$M = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^3 C_{n,t} \times R_{n,t}$$

M 為總排砂量， $C_{n,t}$ 為 t 時刻第 n 個放流口之泥砂濃度值，利用前述泥砂動態類神經模式可模擬放流口之濃度變化，並且以該放流口濃度乘上該放流口流量作為該放流口之排放泥砂量。

第四節 調適方案執行優先順序分析

當面臨須多準則考量不同層面與特性之調適策略時，為了提供決策者快速搜尋與篩選之工具，並有具體可行決策之評斷依據，本計畫將採用多準則排序評估法(multicriteria ordering method)，將各方案依此評估法進行排序，再將其次序加總與比較，以作為調適方案執行優先順序之參考。

方案評估指標參考英國氣候衝擊綱領 (UK Climate Impacts Programme，簡稱 UKCIP)調適精靈(Adaptation Wizard)之建議，擇其適當指標進行多準則排序評估。UKCIP 調適精靈建議之評估指標有以下十項：(1)效用(Effectiveness)：調適方案是否可達到預計目標；(2)效益(Efficiency)：經濟上是否會造成利益大於花費；(3)公平性(Equity)：調適方案不該對其他區域造成負面的影響；(4)彈性(Flexibility)：調適方案後續是否有增加或調整的空間；(5)永續性(Sustainability)：調適方案是否為永續方案，且是否可達到永續性目標；(6)實用性(Practical)：調適方案在不同時間尺度上是否可以被執行；(7)可行性(Legitimacy)：調適方案是否為法律或社會可接受；(8)即時性(Urgency)：調適方案多快可以被執行；(9)強健性(Robust)：在氣候變遷不確定性下，調適方案是否依然強健；(10)協同

(Synergies/ coherence with other strategic objectives)：調適方案是否可以幫助其他方案達到目標。本計畫參考水利署「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」，採用效用(Effectiveness)、永續性(Sustainability)、可行性(Legitimacy)及即時性(Urgency)四項指標進行分析。

前述多準則排序評估法係指若決策問題有 n 項可行之調適方案 $A=\{A_i \mid i=1,2,\dots,n\}$ ，考慮的評估準則共 m 個，即 $C=\{C_j \mid j=1,2,\dots,m\}$ ，決策目的在決定調適方案執行優先順序。就每一評估準則 C_j ，任意兩個方案 A_i 與 $A_{i'}$ 之比較只有兩種情況，即 A_i 優於 $A_{i'}$ 或 $A_{i'}$ 優於 A_i ，成對比較較佳之計畫可得 1 分，較差之計畫則得 0 分，即 $S_j(i,i')$ 表在評估準則 C_j 下，計畫 A_i 與 $A_{i'}$ 比較後之得分，表示如下：

$$S_j = \begin{cases} 1, & \text{if } A_i \text{ 優於 } A_{i'} \\ 0, & \text{if } A_{i'} \text{ 優於 } A_i \end{cases}, \forall i, i'; i \neq i'$$

經由 n 項方案成對比較後，可得優劣成對比較矩陣 S_j ，即：

$$S_j = [S_j(i, i')]_{n \times n}, \forall_j$$

由於方案 A_i 不與自己比較，因此矩陣 S_j 對角線無數值，便於數字統計而填入 0，因方案優劣比較在於統計優於其他計畫之次數，因此對角線填入 0 並不影響評估結果。

依據 C_j 評估準則下 n 項調適方案成對比較後，可計算 A_i 計畫優於其他計畫之總次數，以 RS_{ij} 表示此一總優勢次數，則：

$$RS_{ij} = \sum_{i=1}^n S_j(i, i'), \forall_{i,j}$$

根據 RS_{ij} 值之大小，即可排列於 C_j 準則下之方案優先順序， RS_{ij} 值越大表示方案越佳，應排序在前。

第三章 石門水庫集水區案例分析

第一節 石門水庫基本資料蒐集與調查

一、石門水庫集水區概況

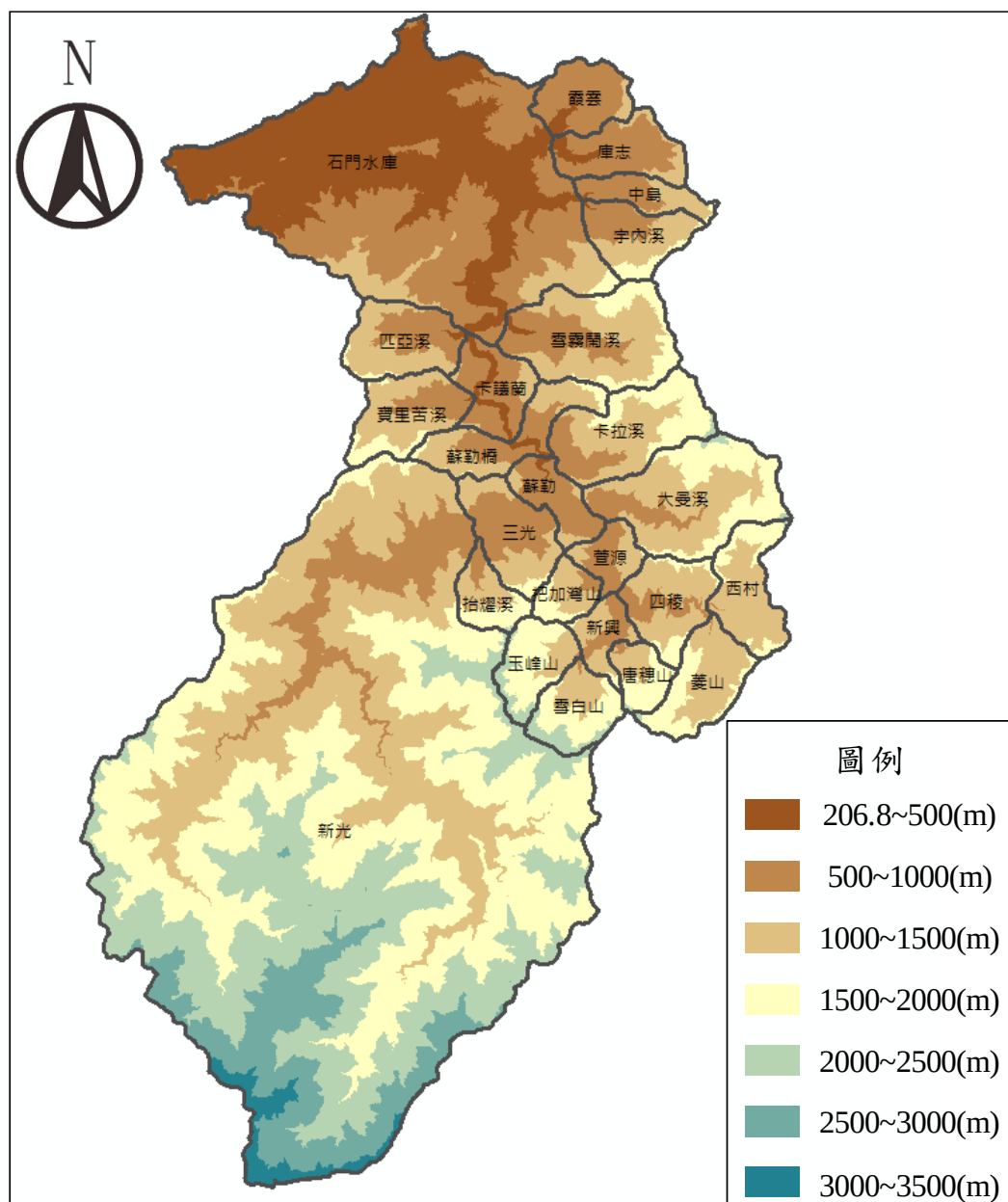
石門水庫集水區範圍屬淡水河流域上游，由大漢溪及其他支流所組成，公告面積為763.4km²，集水區全區跨越行政區域包括桃園市復興區、桃園市龍潭區、桃園市大溪區，新竹縣尖石鄉、新竹縣關西鎮及宜蘭縣大同鄉等共6鄉（鎮）。石門水庫集水區內，地形由西北地帶向東南遞次抬升，全域較為狹長。而流域中，主要高程落於海拔1,000m至1,500m之間；而流域中，坡度在五級坡至六級坡之間者，即佔全區域面積之73.8%，茲就各項地文統計簡述如下：

(一)高程：境內最高高程為3,523m，平均高程為1,402m，以1,000m至1,500m所佔面積最多，其次為500m至1,000m，佔41.7%，其分布如圖3-1所示。

(二)坡度：坡度主要集中於15~30%以上之三級坡。平均坡度為33.2%，集水區南北狹長，以東南側較為陡峭，西北側較為平緩，分布如圖3-2所示。

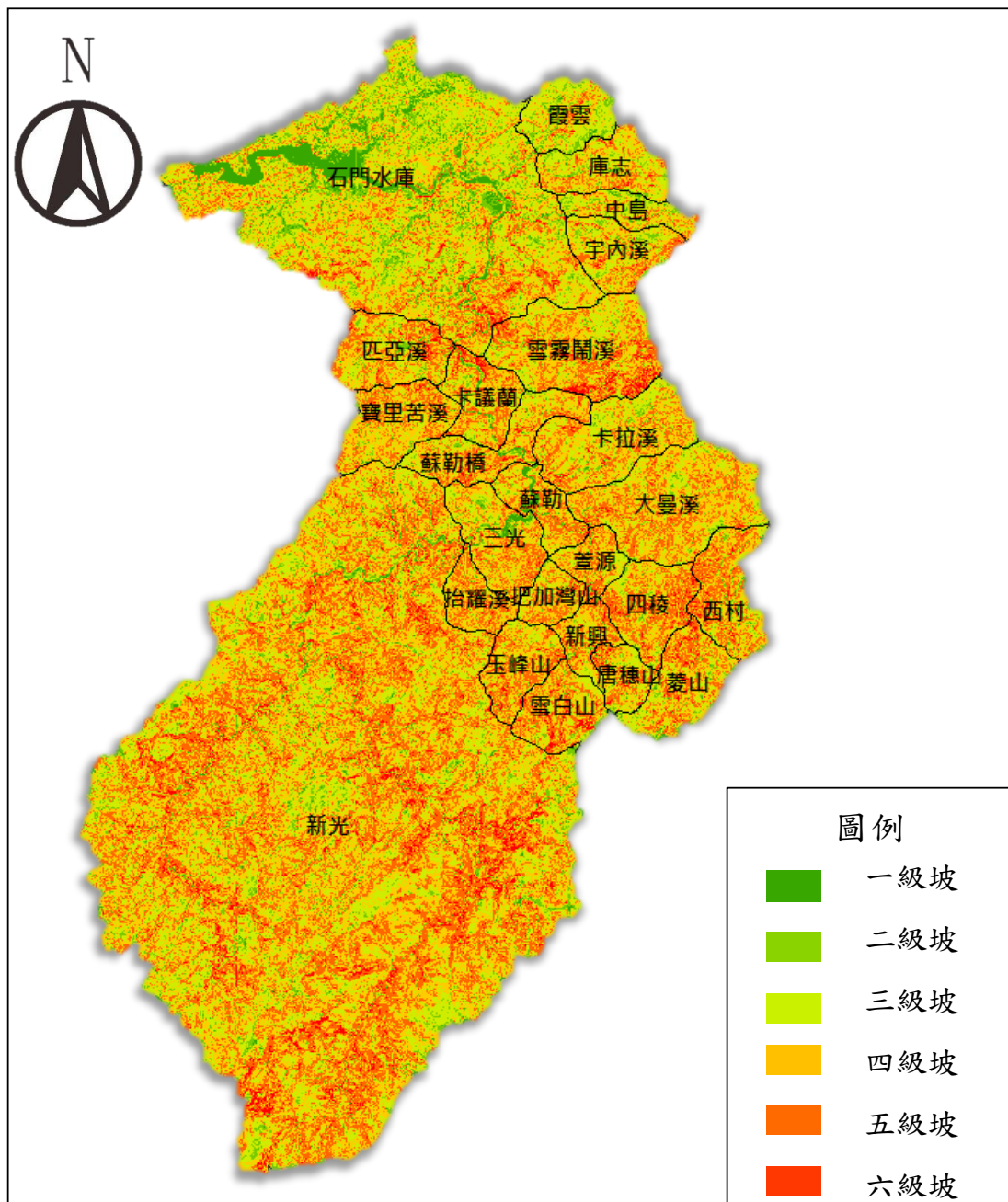
(三)坡向：計畫區集水區內之坡向分布較為均勻，以北向、西北向為主，其中以北向為多，佔總面積的15.0%，分布如圖3-3所示。

(四)地質：石門水庫集水區位於雪山山脈帶及西部麓山帶內。受區域性逆衝斷層之影響，地層多呈東北東走向，呈中至高角度向東南傾斜。而露出之岩層，除小部分為火成岩外，大部分為沈積岩，分布如圖3-4所示。



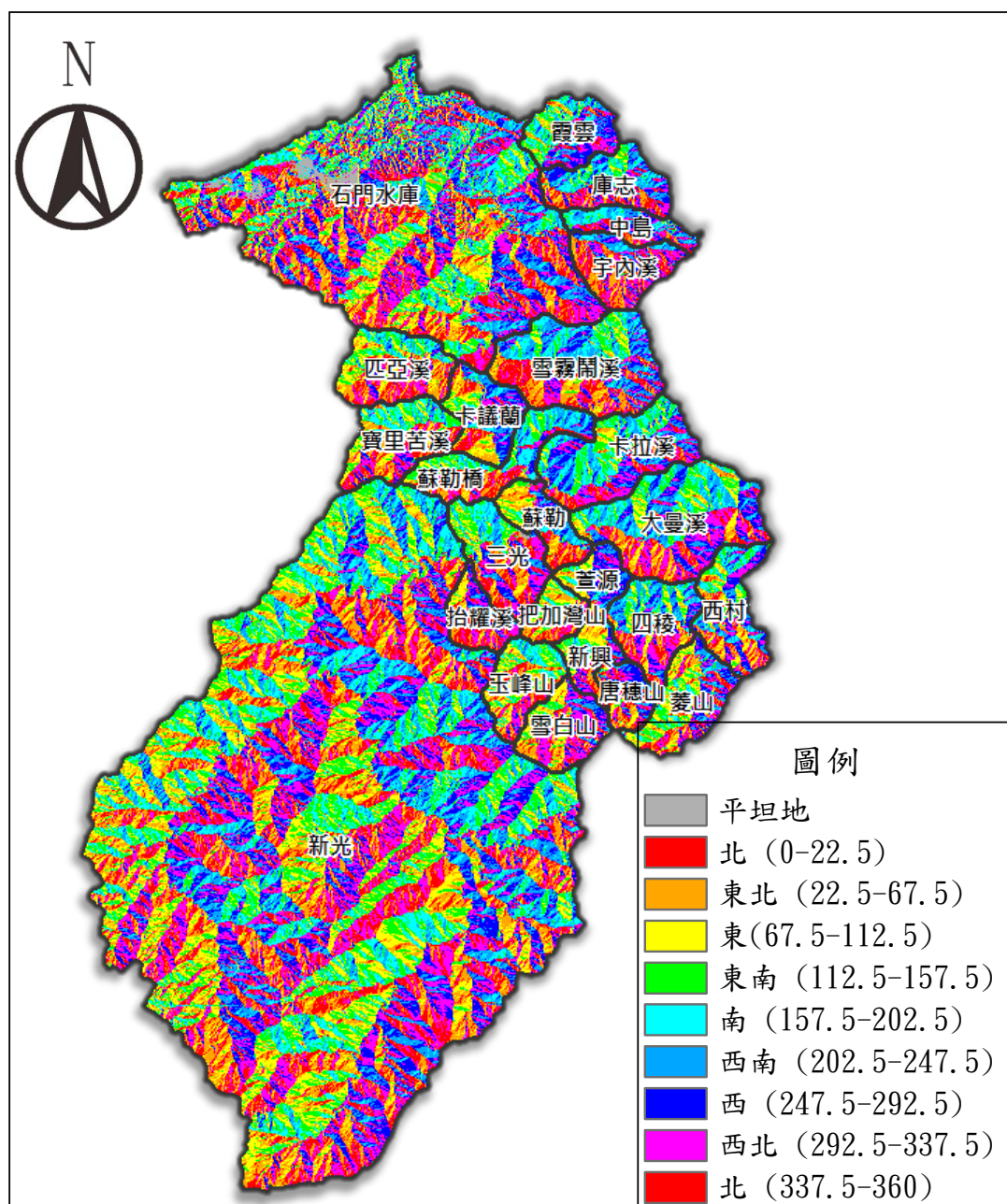
資料來源：本計畫製作

圖 3-1 石門水庫集水區高程分布圖



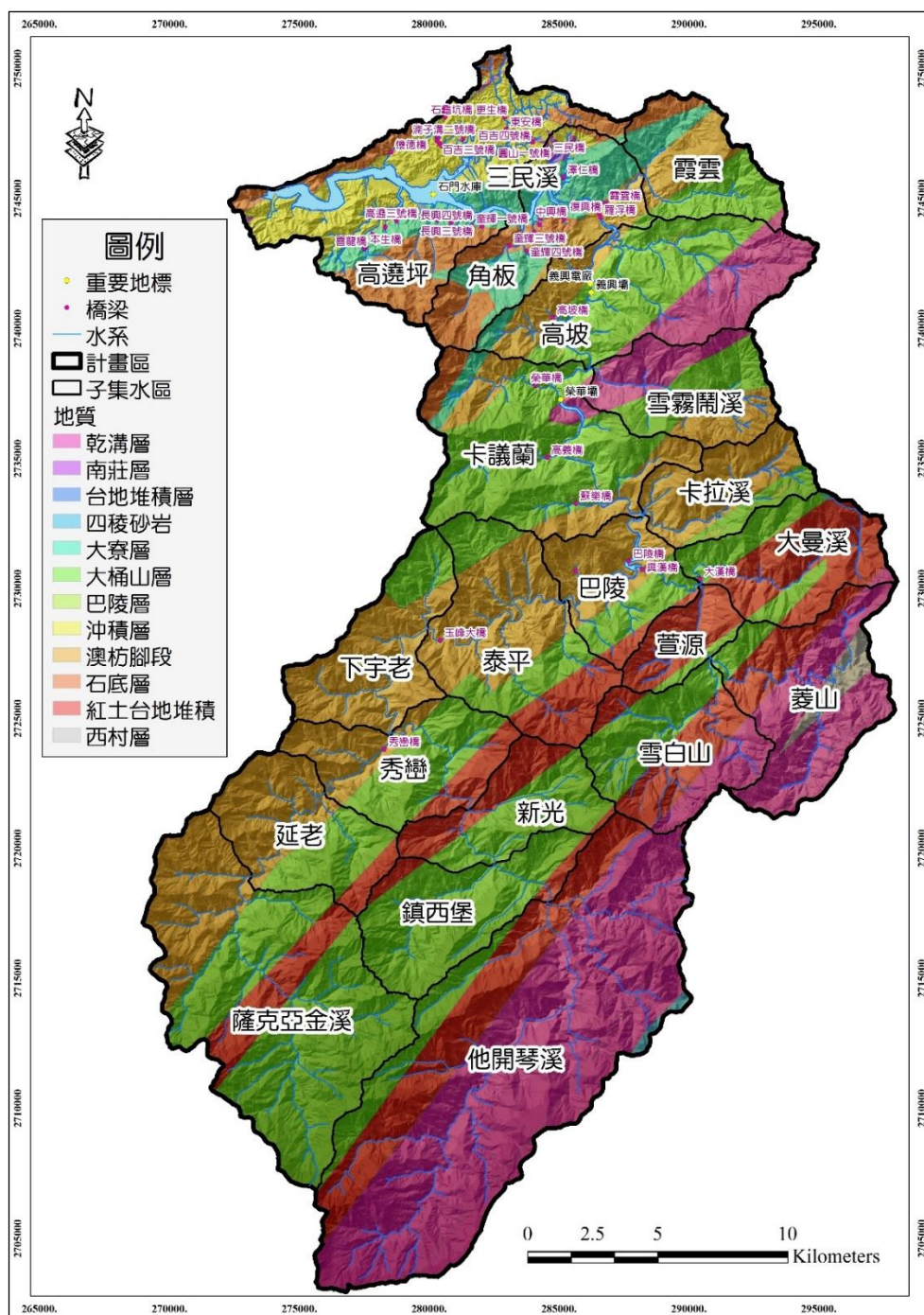
資料來源：本計畫製作

圖 3-2 石門水庫集水區坡度分布圖



資料來源：本計畫製作

圖 3-3 石門水庫集水區坡向分布圖



資料來源：本計畫製作

圖 3-4 石門水庫集水區地質分布圖

二、氣象水文

(一)氣候與雨量站：石門水庫集水區屬於亞熱帶海洋季風型氣候，因此冬夏季溫差極大。年平均降雨量在 2,200mm~2,800mm 間，雨季多集中於五至九月期間，其主要由颱風造成。集水區氣象資

料相當完備，有石門、巴陵、高義、嘎拉賀、長興、霞雲、三光、鞍部、秀巒、玉峰、白石、鎮西堡、西丘斯山、復興共 14 個測站。氣候雨量站位置詳見圖 3-5。

(二)氣溫：集水區內之氣溫，由於受海拔高差影響，各地氣溫變化較大，全年氣溫溫差約在 $12^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$ 間，年平均氣溫約為 20°C ，以元月氣溫最低，七月與八月分最熱；在濕度方面，各月份平均濕度約在 $80\%\sim 88\%$ ，年平均濕度約在 84% ，故集水區之乾濕季節變化不甚明顯，氣候型態屬亞熱帶重濕氣候。

(三)水位流量站：石門水庫集水區內計有五個水位流量站，分別是霞雲、高義、稜角、玉峰及秀巒，其中以霞雲站位於集水區之最下游，年平均流量 $13,243\text{cms}$ 最大；秀巒站年平均流量為 $2,192\text{cms}$ 最小。一般流量以五至十月較大，謂之豐水期；十一月至翌年四月為枯水期，流量較少，尤以十二月及一月流量最小。氣候雨量站位置詳見圖 3-5。



資料來源：本計畫製作

圖 3-5 石門水庫氣候站與水位流量站位置分布圖

三、土地利用

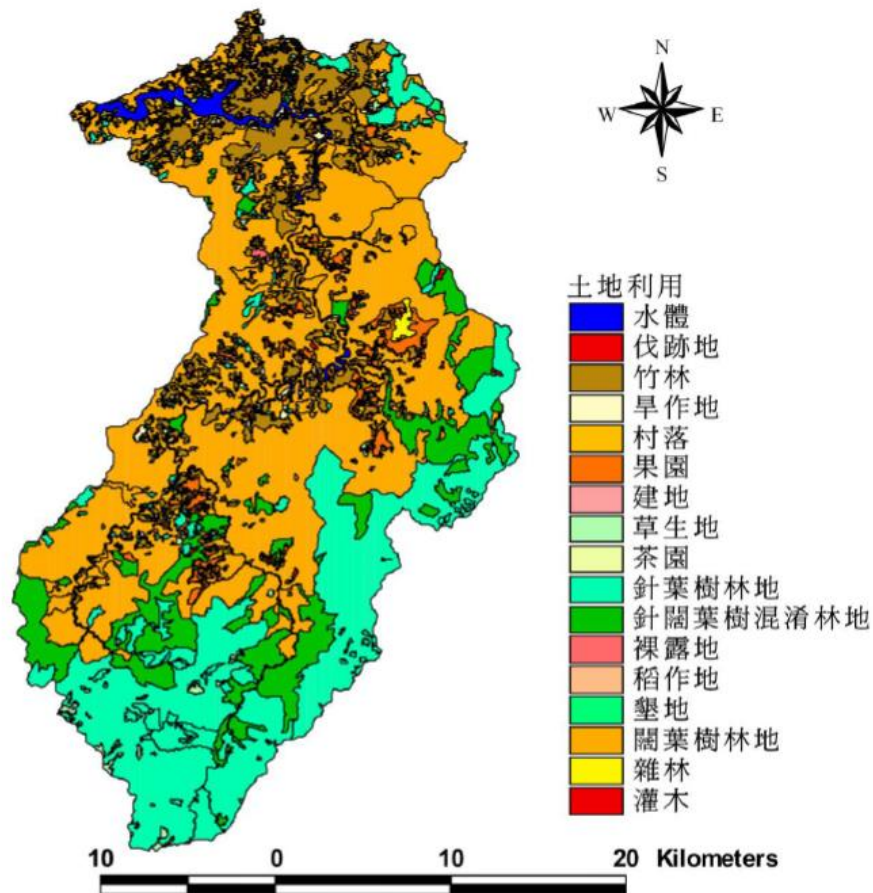
石門水庫集水區之土地利用以國有林班地 530.24 km^2 為最廣，佔全集水區面積之 69.46% ；山地保留地 167.88 km^2 居次，佔 21.99% ；私有地 22.5 km^2 居第三，佔 2.10% ；其他用地 41.58 km^2 ，佔 5.45% 。石門水庫集水區內以針葉樹林地、闊葉樹林地及針闊葉混淆林地為多

數，面積共達61,950.87公頃，約佔集水區面積之81.15%；其次以竹林經營為數最多，佔8,532.73公頃，比例為11.18%，主要分佈於三民、長興、奎輝、霞雲等地，大部分栽植於緩坡或由柑橘園改植，其中以桂竹林所佔數量最大，尚包括少量之綠竹林、雜林、灌木及伐跡地面積則計有275.12公頃，佔集水區面積之0.36%。上述總使用總面積共計70,758.72公頃，佔集水區面積之92.69%。果園面積2,283.17公頃主要分佈於海拔800 m以上之坡地，適溫帶果樹栽培，低海拔地區乃以柑橘為主。茶園面積61.86公頃，多分佈於低海拔水庫邊周圍，尤以三民、水流東、三層一帶為多。農業利用上有稻作地、旱作、果園、茶園及墾地五類，農業利用面積共計3,195.31公頃，佔集水區面積之4.19%。其他土地利用包括草生地、建地、村落、裸露地等類別，其面積共計2,385.97公頃，佔集水區面積之3.12%。表3-1詳列不同土地利用所佔比例，圖3-6則為集水區之土地利用分佈圖。

表 3-1 石門水庫集水區土地利用面積統計表

土地利用別	面積(公頃)	百分比(%)	土地利用別	面積(公頃)	百分比(%)
雜林	183.74	0.24	果園	2,283.17	2.99
針葉樹林地	19,063.04	24.97	茶園	61.86	0.08
闊葉樹林地	34,380.37	45.04	墾地	88.76	0.12
針闊葉樹混淆地	8,507.46	11.15	伐跡地	69.88	0.09
灌木	21.50	0.03	建地	134.27	0.18
竹林	8,532.73	11.18	村落	40.02	0.05
草生地	735.15	0.96	水體	1,369.21	1.79
稻作地	231.72	0.30	裸露地	107.22	0.14
旱作地	529.8	0.69	總計	76,340.00	100.00

資料來源：水利規劃試驗所，105，石門水庫垂直分層泥砂濃度監測技術研發及現場測試評估



資料來源：水利規劃試驗所，105，石門水庫垂直分層泥砂濃度監測技術研發及現場測試評估

圖 3-6 石門水庫集水區土地利用分佈圖

四、石門水庫淤積現況

根據經濟部水利署北區水資源局水庫歷年淤積測量資料統計顯示(如表3- 2及圖3-7)，1963年5月至1972年12月間之年平均淤積量為402萬立方公尺；因歷年颱風所帶來的豪雨造成集水區山坡地大量土石崩塌。單次颱風所造成的淤積量即可達數十年平均淤積量的總和，對於水庫壽命威脅甚大。例如1996年7月挾帶超級豪雨侵台的強烈颱風「賀伯」，累計淤砂量達867萬立方公尺，2004年8月石門水庫遭受艾利颱風侵襲，挾帶大量泥砂流入庫區，甚而影響石門大圳取水及發電功能，至2016年3月止，水庫淤積量已達10,441萬立方公尺，佔

總庫容量33.78%。爲了維持水庫之永續經營，石門水庫目前已實施集水區治理計畫(各攔砂設施治理後土砂攔阻率增加1.5倍至27倍)、水庫浚漂作業及完成電廠排砂隧道(300秒立方公尺)進行水力排砂，這些措施已發揮其成效，單場事件造成的水庫淤積量較從前已有顯著降低，然受到氣候變遷影響，極端降雨次數增加，水庫年累積淤積量仍有漸增趨勢，整體防淤能力仍不足，須再增設水庫防淤設施因應，依據「石門水庫防洪防淤整體綱要計畫」，規劃「石門水庫增設防淤隧道工程」計畫，如圖3-8，俾使颱風時期高濁度渾水，經由阿姆坪隧道(D案)及大灣坪隧道(C案)排放至水庫下游河道，俾減緩水庫淤積速率。其中大灣坪隧道以排砂為主，可分擔71萬立方公尺，阿姆坪隧道以運砂及抽砂兼沖淤通道為主，可分擔64萬立方公尺，另大灣坪隧道可增加水庫防淤流量1,600秒立方公尺，阿姆坪隧道增加沖淤流量600秒立方公尺。其中大灣坪隧道以水力排砂為主，防淤設計流量1,600秒立方公尺，進水口位於水庫河道斷面12下游約240公尺，隧道路線往西轉為西北，豎井閘門設置於環湖公路旁，出水口位於後池邊坡。利用隧道前端之象鼻引水鋼管，經豎井內之閘門控制，將水庫底層高濁度渾水導入後池，以減少庫區淤積，阿姆坪隧道以運砂及抽砂兼沖淤通道為主，沖淤設計流量600秒立方公尺，進水口約位於水庫河道斷面20，隧道路線以直線往西北，通過湍子溝溪懷德橋下游溪谷下方，出水口位於台4線35k附近下方。

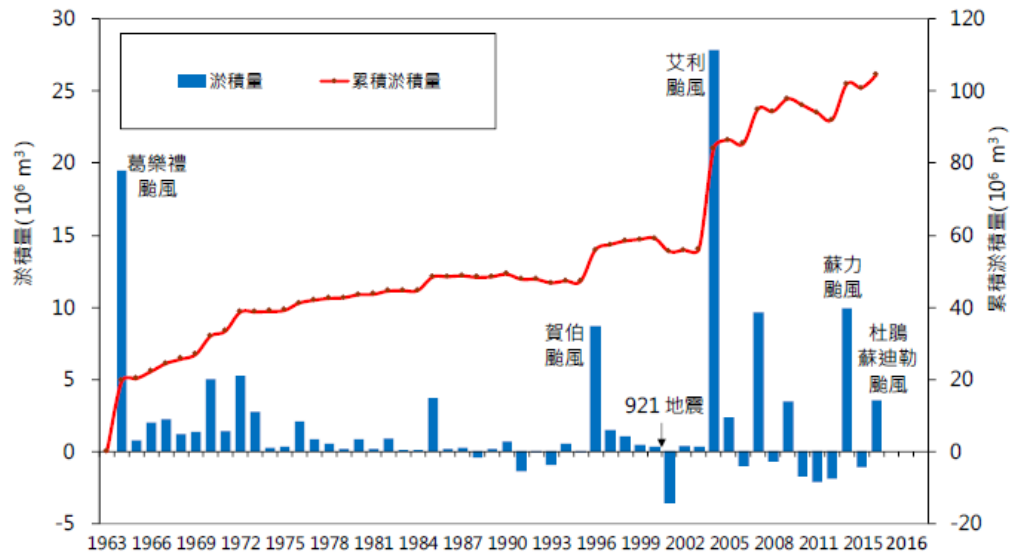
表 3-2 石門水庫淤積一覽表

期別	起迄年月 (中華民國)	間隔	呆容量 10 ³ m ³		有效容量 10 ³ m ³		合計 10 ³ m ³			年平均淤積 10 ³ m ³	
			剩餘	淤積	剩餘	淤積	剩餘	淤積	累計淤積	每期	累計
1	52.05-53.03	0.8	43,390	13,850	246,260	5,620	289,650	19,470	19,470		
2	53.03-54.04	1.1	43,220	170	245,660	600	288,880	770	20,240	700	10,653
3	54.04-55.05	1.1	42,080	1,140	244,810	850	286,890	1,990	22,230	1,809	7,410
4	55.05-56.05	1.0	40,450	1,630	244,250	560	284,700	2,190	24,420	2,190	6,105
5	56.05-57.06	1.1	38,630	1,820	244,890	-640	283,520	1,180	25,600	1,073	5,020
6	57.06-58.05	0.9	37,840	790	244,350	540	282,190	1,330	26,930	1,478	4,488
7	58.05-59.06	1.1	34,680	3,160	242,480	1,870	277,160	5,030	31,960	4,573	4,501
8	59.06-60.06	1.0	34,610	70	241,140	1,340	275,750	1,410	33,370	1,410	4,120
9	60.06-61.12	1.5	30,000	4,610	240,520	620	270,520	5,230	38,600	3,487	4,021
10	61.12-63.08	1.7	29,767	233	240,518	2	270,285	235	38,835	138	3,437
11	63.08-64.11	1.2	28,877	890	241,108	-590	269,985	300	39,135	250	3,131
12	64.11-65.11	1.0	29,480	-603	238,477	2,631	267,957	2,028	41,163	2,028	3,049
13	65.11-66.11	1.0	28,440	1,040	238,730	-253	267,170	787	41,950	787	2,893
14	66.11-67.11	1.0	28,534	-94	238,130	600	266,664	506	42,456	506	2,739
15	67.11-68.11	1.0	28,446	88	238,034	96	266,480	184	42,640	184	2,584
16	68.11-69.11	1.0	27,296	1,150	238,357	-323	265,653	827	43,467	827	2,484
17	69.11-70.11	1.0	27,155	141	238,375	-18	265,530	123	43,590	123	2,356
18	70.11-71.11	1.0	26,199	956	238,439	-64	264,638	892	44,482	892	2,281
19	71.11-72.11	1.0	25,554	645	238,986	-547	264,540	98	44,580	98	2,175
20	72.11-73.11	1.0	25,515	39	238,956	30	264,471	69	44,649	69	2,077
21	73.11-74.11	1.0	24,320	1,195	236,456	2,500	260,776	3,695	48,344	3,695	2,149
22	74.11-75.11	1.0	24,615	-295	236,036	420	260,651	125	48,469	125	2,063
23	75.11-76.11	1.0	24,868	-253	235,560	476	260,428	223	48,692	223	1,987
24	76.11-77.11	1.0	25,171	-303	235,669	-109	260,840	-412	48,280	-412	1,893
25	77.11-78.11	1.0	25,330	-159	235,337	332	260,667	173	48,453	173	1,828
26	78.11-79.11	1.0	24,367	963	235,607	-270	259,974	693	49,146	693	1,787
27	79.11-80.11	1.0	24,786	-419	236,590	-983	261,376	-1,402	47,744	-1,402	1,675
28	80.11-81.11	1.0	24,708	78	236,670	-80	261,378	-2	47,742	-2	1,618
29	81.11-82.11	1.0	24,972	-264	237,387	-717	262,359	-981	46,761	-981	1,533
30	82.11-83.11	1.0	22,751	2,221	239,075	-1,688	261,826	533	47,294	533	1,501
31	83.11-84.11	1.0	22,328	423	239,599	-524	261,927	-101	47,193	-101	1,452
32	84.11-85.11	1.0	18,762	3,566	234,495	5,104	253,257	8,670	55,863	8,670	1,668
33	85.11-86.11	1.0	17,954	808	233,826	669	251,780	1,477	57,340	1,477	1,662
34	86.11-87.11	1.0	17,682	272	233,086	740	250,768	1,012	58,352	1,012	1,644

強化水庫集水區因應氣候變遷治山、防洪及排淤調適能力之研究

期別	起迄年月 (中華民國)	間隔	呆容量 10 ³ m ³		有效容量 10 ³ m ³		合計 10 ³ m ³			年平均淤積 10 ³ m ³	
			剩餘	淤積	剩餘	淤積	剩餘	淤積	累計淤積	每期	累計
35	87.11-88.11	1.0	17,544	138	232,766	320	250,310	458	58,810	458	1,611
36	88.11-89.11	1.0	17,476	68	232,560	206	250,036	274	59,084	274	1,576
37	89.11-90.11	1.0	15,407	2,069	238,251	-5,691	253,658	-3,622	55,462	-3,622	1,441
38	90.11-92.04	1.5	15,651	-244	237,601	650	253,252	406	55,868	271	1,397
39	92.04-93.03	1.0	15,216	435	237,760	-159	252,976	276	56,144	276	1,369
40	93.03-93.12	0.8	6,216	9,000	218,876	18,884	225,092	27,884	84,028	34,855	2,010
41	93.12-94.12	1.0	4,925	1,291	217,835	1,041	222,760	2,332	86,360	2,332	2,018
42	94.12-95.12	1.0	5,943	-1,017	217,825	9	223,768	-1,008	85,352	-1,008	1,949
43	95.12-96.12	1.0	5,066	877	209,078	8,747	214,144	9,624	94,976	9,624	2,120
44	96.12-97.12	1.0	5,150	-84	209,692	-614	214,842	-698	94,278	-698	2,058
45	97.12-98.12	1.0	5,370	-220	206,009	3,683	211,379	3,463	97,741	3,463	2,088
46	98.12-99.12	1.0	5,832	-462	207,308	-1,299	213,140	-1,761	95,980	-1,761	2,008
47	99.12-100.12	1.0	6,492	-660	208,764	-1,455	215,256	-2,115	93,864	-2,115	1,923
48	100.12-102.02	1.2	7,275	-783	209,865	-1,101	217,140	-1,884	91,980	-1,570	1,840
49	102.02-103.02	1.0	4,917	2,358	202,278	7,587	207,195	9,945	101,925	9,945	1,999
50	103.02-104.02	1.0	5,695	-779	202,563	-285	208,259	-1,064	100,861	-1064	1,940
51	104.02-105.03	1.1	5,585	110	199,124	3439	204,709	3,549	104,411	309,120	1,966
合計		52.0		52,545		49,317		100,861			
容量損失			90.24%		20.94%		33.78%				
附註:	1.水庫設計總容量 309,120*103m3,有效設計容量 251,880*103m3,呆容量 57,240*103m3。										
	2.1~36 期僅測量 34 條主斷面,修正 1/10,000 舊地形等高線,以求積儀測面積及計算容積。										
	3.第 37 期起,全面均勻測量水深,新測 1/1,000 地形圖,電腦檔案計算面積及容積。										
	4.第 51 期起,配合測量技術提升,水域改採多音束深納測深及陸域採光打雷達測量,並計算容積及淤積量。										

資料來源：北區水資源局



資料來源：北區水資源局

圖 3-7 石門水庫累計淤積量圖



圖 3-8 石門水庫增設防淤隧道工程位置圖

五、崩塌面積與入庫泥沙量

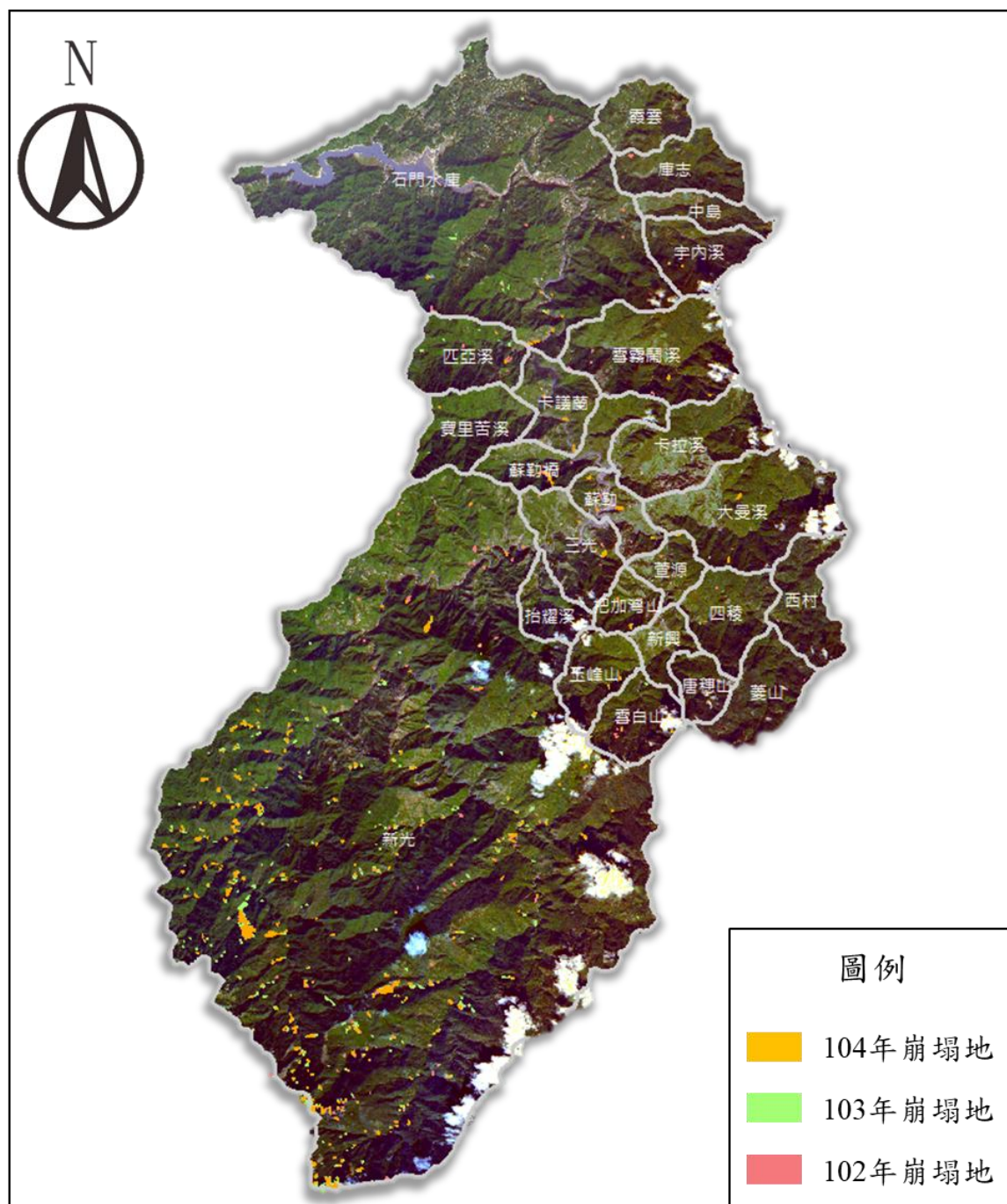
本計畫蒐集石門水庫集水區102~104衛星影像，經判釋後，各子集水區崩塌面積與分布示如圖3-9及表3- 3，103年較102年崩塌面積增加308,867 m^2 ，104年因逢枯早年，加上集水區保育治理成效發揮，崩塌面積較103年減少790,138 m^2 。

本計畫蒐集石門水庫集水區之土砂生產量相關研究報告(詳表3-4)，由表中顯示石門水庫集水區之產砂來源以崩塌造成之土砂為主，所佔比例在75%以上。

表 3-3 石門水庫 102、103、104 年崩塌面積一覽表

集水區	104 年度		103 年度		102 年度	
	崩塌地 數量	崩塌地面積 (m ²)	崩塌地 數量	崩塌地面積 (m ²)	崩塌地 數量	崩塌地面積 (m ²)
石門水庫	8	38,984	13	31,192	15	56,084
霞雲	0	0	0	0	1	1,172
庫志	0	0	0	0	1	10,560
中島	0	0	0	0	1	3,096
宇內溪	2	2,948	1	1,840	1	2,146
雪霧鬧溪	2	8,136	1	8,274	6	17,921
匹亞溪	2	5,768	9	11,116	8	20,830
寶里苦溪	1	1,428	2	3,740	3	4,752
卡議蘭	4	14,776	0	0	0	0
蘇樂橋	3	34,516	0	0	7	46,056
卡拉溪	0	0	0	0	0	0
大曼溪	3	17,824	3	11,928	3	7,680
蘇樂	4	27,472	1	2,596	8	21,276
三光	3	18,196	1	22,922	5	32,156
萱源	1	3,292	1	6,456	2	7,324
把加灣山	2	9,504	1	7,920	3	19,684
抬耀溪	1	3,168	0	0	1	2,708
西村	0	0	0	0	0	0
四稜	1	1,216	2	3,084	2	3,992
玉峰山	2	3,436	2	5,452	2	5,756
菱山	0	0	0	0	2	2468
新興	0	0	0	0	0	0
唐穗山	0	0	0	0	0	0
雪白山	4	8,408	4	9,124	8	2,0668
新光	266	1,507,531	452	2,371,097	284	1,901,725
合計	309	1,706,603	493	2,496,741	363	2,188,054

資料來源：本計畫繪製



資料來源：本計畫繪製

圖 3-9 102~104 年石門水庫集水區內崩塌地分布圖

表 3- 4 石門水庫集水區年產砂量暨入砂量推估結果彙整

報告名稱	沖蝕量 推估方法	崩塌量 推估方法	集水區產砂量 (萬 m ³)		總產砂量 (萬 m ³)	平均 遞移率	入砂量 (萬 m ³)
			沖蝕量	崩塌量			
水庫集水區土壤沖蝕之研究-以石門、翡翠水庫為例(2003)	USLE	Khazai & Sitar	267	1,860	2,127	-	-
水庫集水區土砂整治成效評估(2/2)(2003)	SEIM	沖蝕量的三倍	21.1	63.3	84.4	48%	40.5
石門水庫集水區泥砂產量推估之研究(3/3)(2005a)	Cs-137	Power Law	58	609	667	49%	327
水庫集水區崩塌地潛勢分析及崩塌土方量估算之研究(3/3)(2006)	SEIM	崩塌體積公式	26	816	828.6	29%	240
石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究(3/3)(2008a)	MUSLE	坡地崩塌風險評估模式	82	1,276	1,358	33%	448
石門水庫集水區產砂量推估與數位式集水區綜合管理研究計畫(2008b)	Cs-137	崩塌體積公式	71	1,093	1,164	-	-

資料來源：水利規劃試驗所，105，石門水庫垂直分層泥砂濃度監測技術研發及現場測試評估

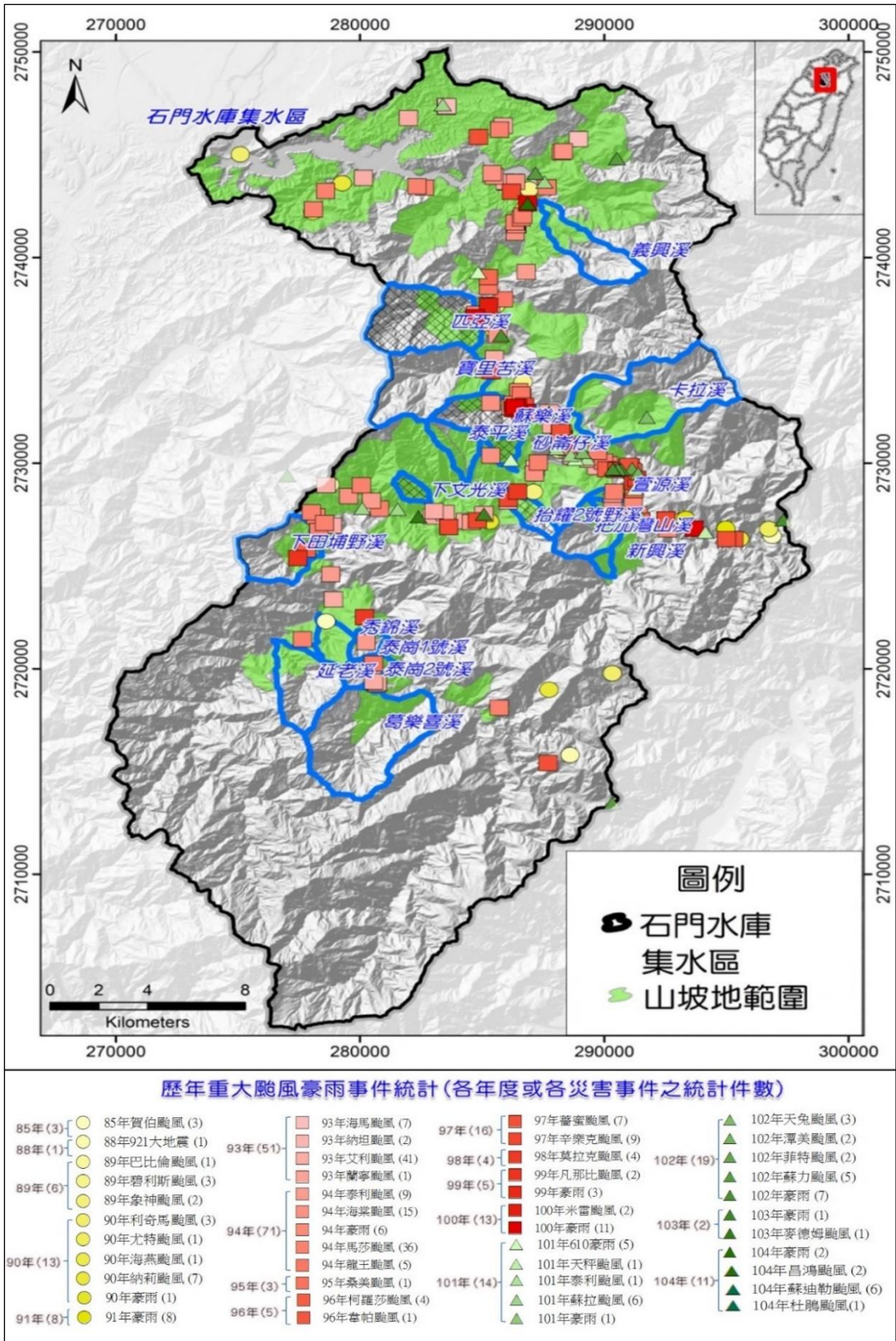
六、歷年土砂災害事件

根據「104年石門水庫集水區執行成效追蹤」，以水保局歷年相關報告、土石流防災資訊網、國家災害防救科技中心、消防署、公路總局公路防救災資訊系統及新聞媒體所蒐集之災害事件，如圖3-10所示，1996年至2015年10月石門水庫集水區土砂災害事件共計245件，集中於2004年到2005年間，佔整體事件的49.8%，以2004年艾利颱風所引發的41件為最高，如表3- 5所示。

表 3-5 石門水庫集水區歷年土砂災害事件統計一覽表

年份	災害數量(件)	所占比重 (%)	年份	災害數量(件)	所占比重 (%)
1996	3	1.2	2006	3	1.2
1997	0	0.0	2007	5	2.0
1998	0	0.0	2008	16	6.5
1999	1	0.4	2009	4	1.6
2000	6	2.4	2010	5	2.0
2001	13	5.3	2011	13	5.3
2002	8	3.3	2012	14	5.7
2003	0	0.0	2013	19	7.8
2004	51	20.8	2014	2	0.8
2005	71	29.0	2015	11	4.5
總計				245(件)	100(%)

資料來源：彙整自行政院農業委員會水土保持局，105 年，104 年石門水庫集水區執行成效追蹤



資料來源：行政院農業委員會水土保持局，105 年，104 年石門水庫集水區執行成效追蹤

圖 3-10 石門水庫集水區內歷史土砂災害事件分布圖

第二節 石門水庫集水區水文氣候變遷分析

一、石門水庫集水區水文氣候因子變動趨勢分析

為探討石門水庫集水區研究區內之水文氣候因子變動趨勢，本計畫針對年雨量、豐水期雨量、枯水期雨量、年最大一日降雨量和年最大連續不降雨日數五種降雨特性，分別利用MK檢定及MWP與KW檢定探討前述因子是否明顯上升或下降變動趨勢或是存有顯著變異點。石門水庫集水區之雨量站分布圖示如圖3-5，共計有14站，茲就各因子之變動趨勢分析結果說明如下：

(一)年降雨量

年降雨量 MK 檢定分析結果示如表 3- 6 及圖 3-11。結果顯示玉峰、高義、霞雲三站通過 MK 檢定，玉峰、高義、霞雲三站皆呈現顯著上升趨勢，上升率分別為 586.7mm/yr/10-yr、603.63mm/yr/10-yr 和 695.22 mm/yr/10-yr。

年降雨量 MWP 及 KW 分析結果示如表 3- 7 及圖 3-12。結果顯示僅霞雲一個站通過 MWP 及 KW 檢定，其變異點發生於 1995 年。

表 3- 6 各測站年降雨量 MK 檢定分析表

測站名稱	增減率	MK 統計量	MK 檢定值	顯著與否
三光	368.00	1.01	1.96	否
巴陵	395.47	1.78	1.96	否
玉峰	586.70	2.04	1.96	是
白石	585.86	1.52	1.96	否
石門	412.50	1.78	1.96	否
西丘斯山	382.25	1.01	1.96	否
秀巒	-215.43	-0.68	1.96	否
長興	607.86	1.46	1.96	否
高義	603.63	2.04	1.96	是
復興	360.59	1.01	1.96	否
嘎拉賀	317.67	1.20	1.96	否
鞍部	525.00	1.65	1.96	否
霞雲	695.22	2.24	1.96	是
鎮西堡	326.75	1.20	1.96	否

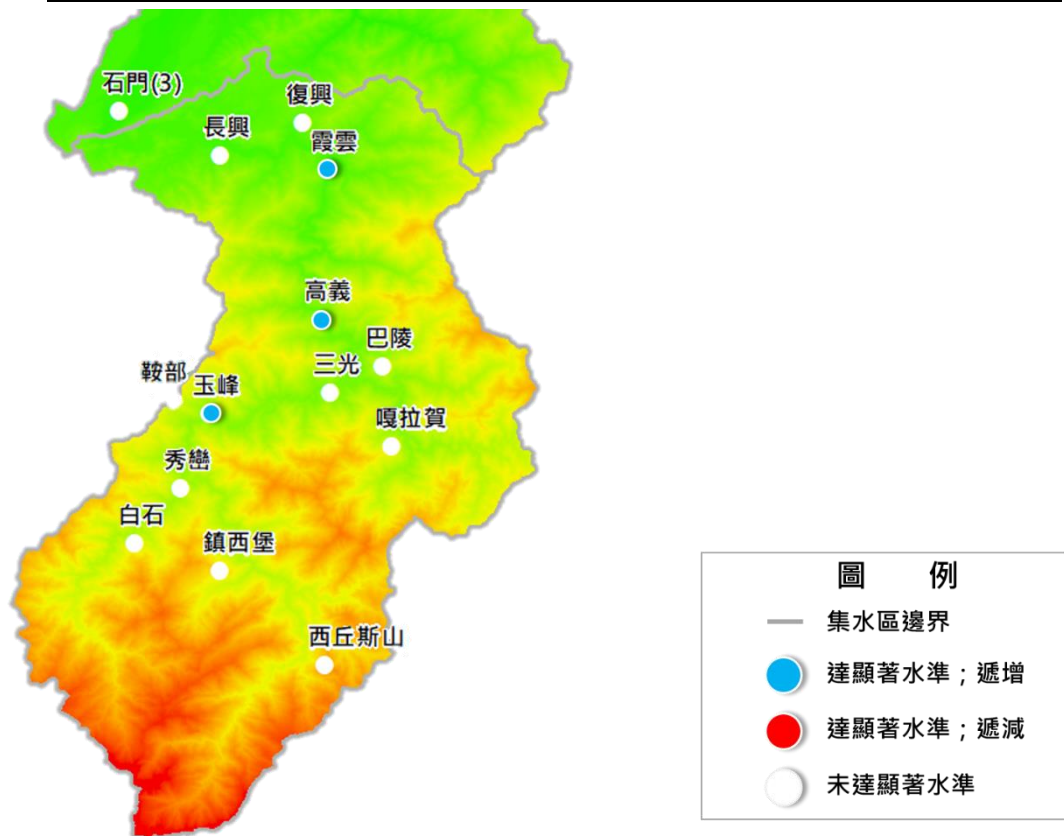


表 3-7 各測站年降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表

測站名稱	改變點	發生機率	顯著水準	顯著與否	KW 統計量	KW 檢定值	明顯差異
三光	2003	0.604	0.9	否	5.143	2.706	是
巴陵	1997	0.807	0.9	否	3.429	2.706	是
玉峰	1993	0.875	0.9	否	4.339	2.706	是
白石	1993	0.779	0.9	否	3.149	2.706	是
石門	1997	0.832	0.9	否	3.72	2.706	是
西丘斯山	1997	0.604	0.9	否	1.929	2.706	否
秀巒	1998	0.36	0.9	否	0.981	2.706	否
長興	1996	0.844	0.9	否	3.753	2.706	是
高義	1995	0.855	0.9	否	3.863	2.706	是
復興	1996	0.699	0.9	否	2.426	2.706	否
嘎拉賀	1996	0.624	0.9	否	1.975	2.706	否
鞍部	1995	0.779	0.9	否	3.023	2.706	是
霞雲	1995	0.946	0.9	是	5.851	2.706	是
鎮西堡	1993	0.604	0.9	否	1.929	2.706	否

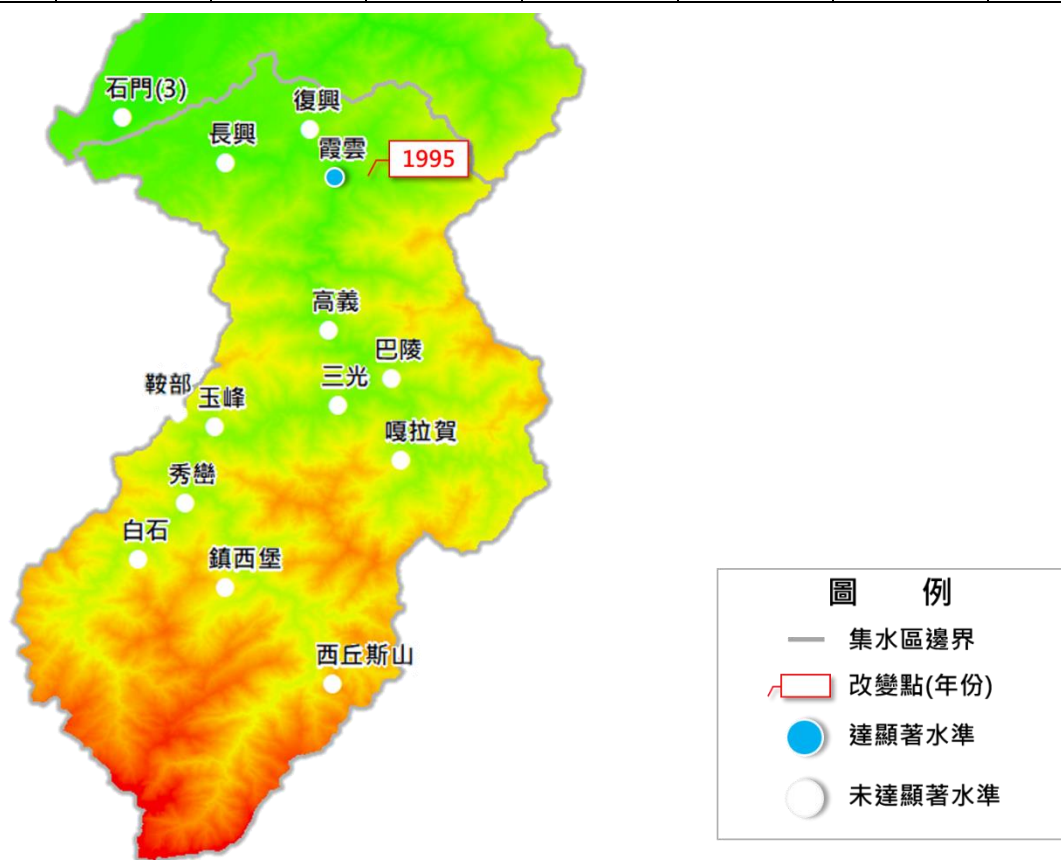


圖 3-12 各測站年降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖

(二)豐水期降雨量

豐水期降雨量 MK 檢定分析結果示如表 3- 8 及圖 3-13。結果顯示白石、石門、復興與霞雲四站通過 MK 檢定，四站皆呈現顯著上升趨勢，上升率分別為 526.19 mm/yr/10-yr、433.93 mm/yr/10-yr、502.36 mm/yr/10-yr 及 618.67 mm/yr/10-yr。

豐水期降雨量 MWP 及 KW 分析結果示如表 3- 9 及

圖 3-14。結果顯示白石、石門、長興、復興及霞雲五個站通過 MWP 及 KW 檢定，其變異點分別發生於 1993、1997、1995、1995、1995 年。

表 3- 8 各測站豐水期降雨量 MK 檢定分析表

測站名稱	增減率	MK 統計量	MK 檢定值	顯著與否
三光	337.86	1.27	1.96	否
巴陵	373.41	1.46	1.96	否
玉峰	521.15	1.59	1.96	否
白石	526.19	1.98	1.96	是
石門	433.93	2.30	1.96	是
西丘斯山	280.84	0.88	1.96	否
秀巒	-102.23	-0.16	1.96	否
長興	468.32	1.85	1.96	否
高義	569.35	1.91	1.96	否
復興	502.36	2.17	1.96	是
嘎拉賀	275.24	0.68	1.96	否
鞍部	325.57	1.40	1.96	否
霞雲	618.67	1.98	1.96	是
鎮西堡	284.82	1.07	1.96	否

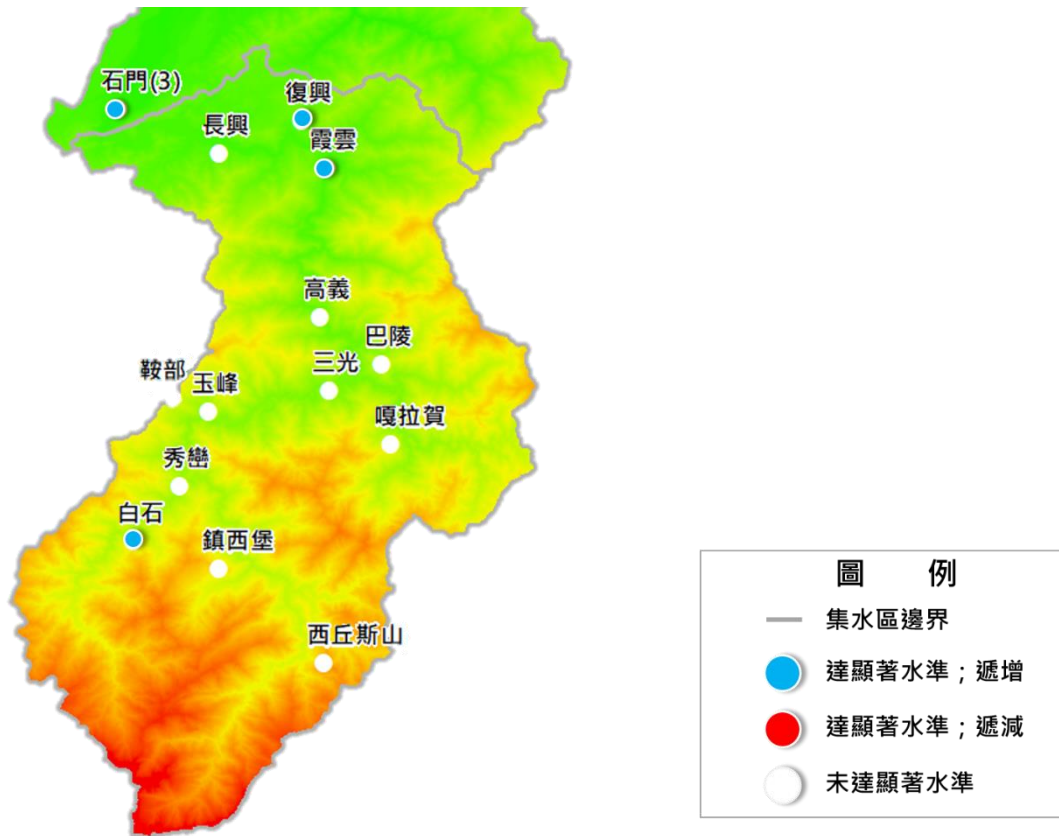


圖 3-13 各測站豐水期降雨量 MK 檢定分析圖

表 3-9 各測站豐水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表

測站名稱	改變點	發生機率	顯著水準	顯著與否	KW 統計量	KW 檢定值	明顯差異
三光	1995	0.681	0.9	否	2.286	2.706	否
巴陵	1996	0.699	0.9	否	2.426	2.706	否
玉峰	1993	0.807	0.9	否	3.429	2.706	是
白石	1993	0.924	0.9	是	5.357	2.706	是
石門	1997	0.946	0.9	是	6.095	2.706	是
西丘斯山	1997	0.429	0.9	否	1.167	2.706	否
秀巒	2004	0.227	0.9	否	2.714	2.706	是
長興	1995	0.963	0.9	是	6.606	2.706	是
高義	1993	0.875	0.9	否	4.339	2.706	是
復興	1995	0.955	0.9	是	6.223	2.706	是
嘎拉賀	2003	0.519	0.9	否	4.063	2.706	是
鞍部	1995	0.779	0.9	否	3.023	2.706	是
霞雲	1995	0.946	0.9	是	5.851	2.706	是
鎮西堡	2003	0.604	0.9	否	5.143	2.706	是

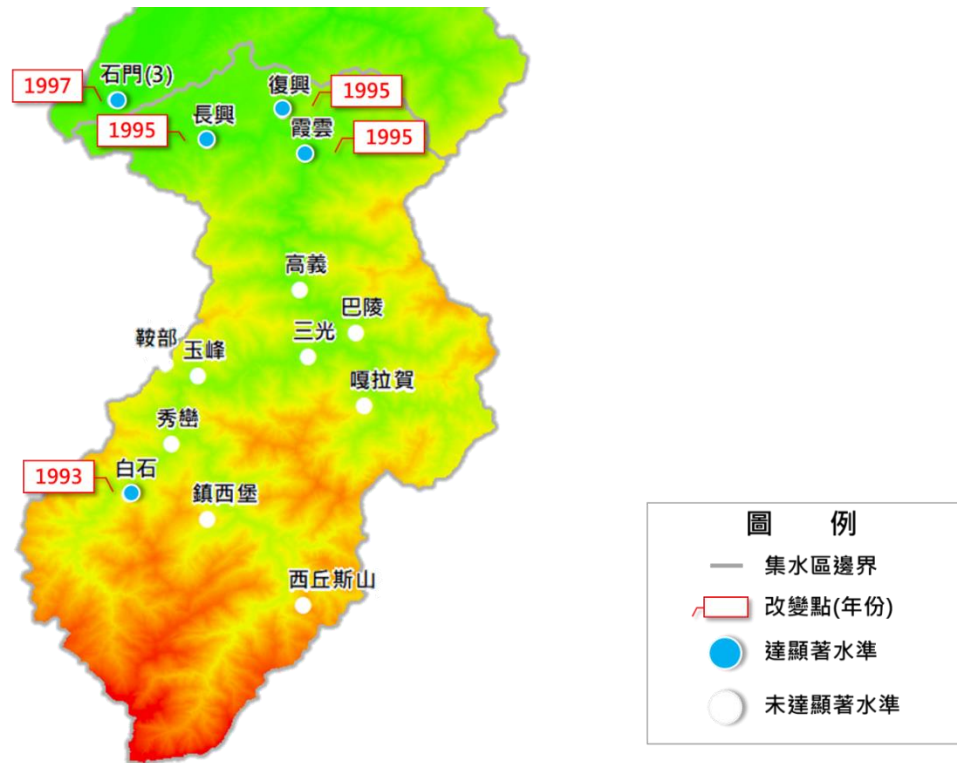


圖 3-14 各測站豐水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖

(三)枯水期降雨量

枯水期降雨量 MK 檢定分析結果示如表 3- 10 及圖 3-15。

結果顯示 14 個測站並無顯著變化。

枯水期降雨量 MWP 及 KW 分析結果示如表 3- 11 及

圖 3-16。結果顯示 14 個站均無通過 MWP 及 KW 檢定。

表 3- 10 各測站枯水期降雨量 MK 檢定分析表

測站名稱	增減率	MK 統計量	MK 檢定值	顯著與否
三光	7.41	0.03	1.96	否
巴陵	72.17	0.49	1.96	否
玉峰	62.50	0.55	1.96	否
白石	-22.92	-0.03	1.96	否
石門	18.57	0.03	1.96	否
西丘斯山	68.35	1.01	1.96	否
秀巒	-115.83	-1.14	1.96	否
長興	15.00	0.16	1.96	否
高義	40.82	0.23	1.96	否
復興	-89.08	-0.49	1.96	否
嘎拉賀	46.52	0.36	1.96	否
鞍部	-88.28	-1.27	1.96	否
霞雲	10.86	0.10	1.96	否
鎮西堡	46.67	0.42	1.96	否

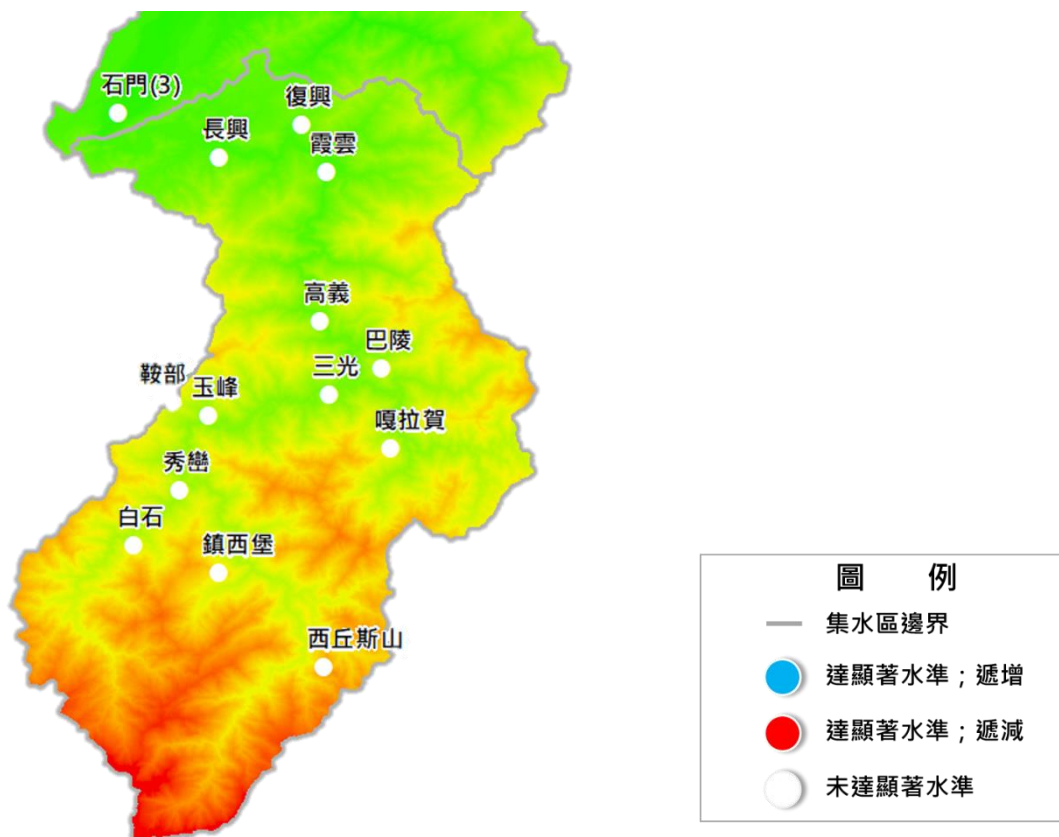


圖 3-15 各測站枯水期降雨量 MK 檢定分析圖

表 3- 11 各測站枯水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表

測站名稱	改變點	發生機率	顯著水準	顯著與否	KW 統計量	KW 檢定值	明顯差異
三光	2002	0.187	0.9	否	0.81	2.706	否
巴陵	1989	0.292	0.9	否	1.08	2.706	否
玉峰	1989	0.249	0.9	否	0.893	2.706	否
白石	2001	0.337	0.9	否	1.286	2.706	否
石門	1990	0.187	0.9	否	0.55	2.706	否
西丘斯山	1989	0.519	0.9	否	2.286	2.706	否
秀巒	1998	0.583	0.9	否	1.923	2.706	否
長興	1999	0.292	0.9	否	0.823	2.706	否
高義	1989	0.207	0.9	否	0.723	2.706	否
復興	1995	0.249	0.9	否	0.571	2.706	否
嘎拉賀	1989	0.249	0.9	否	0.893	2.706	否
鞍部	2001	0.644	0.9	否	3.223	2.706	是
霞雲	1989	0.207	0.9	否	0.723	2.706	否
鎮西堡	1989	0.383	0.9	否	1.509	2.706	否

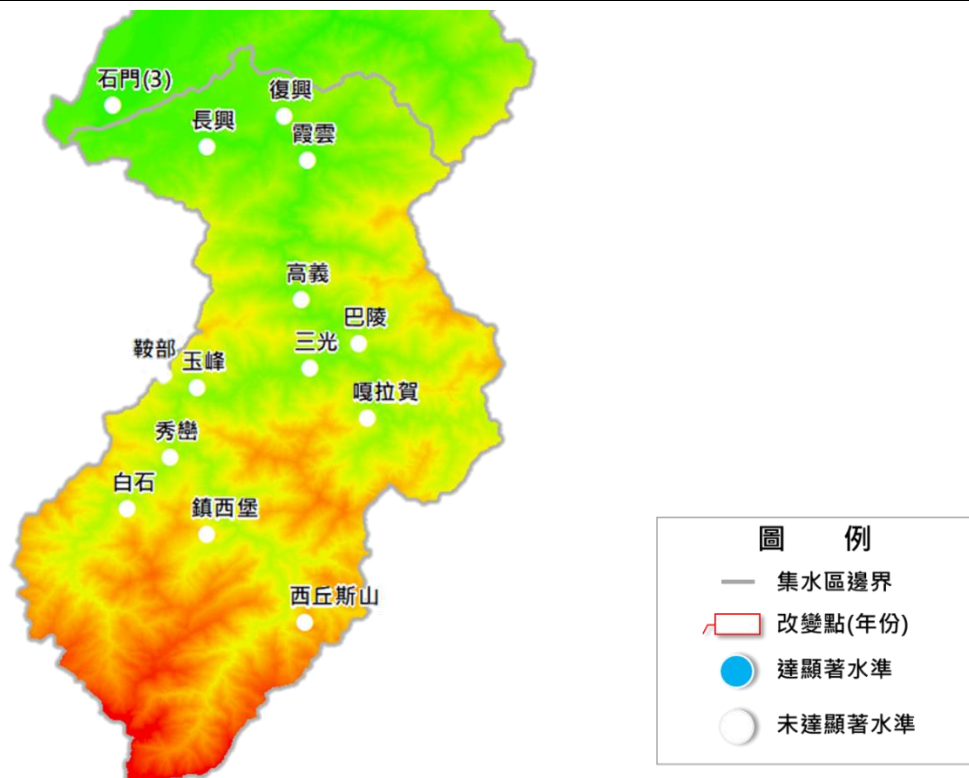


圖 3-16 各測站枯水期降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖

(四)年最大一日降雨量

年最大一日降雨量 MK 檢定分析結果示如表 3- 12 及圖 3- 17。結果顯示石門、復興與鎮西堡三站通過 MK 檢定，三站皆呈現顯著上升趨勢，上升率分別為 75.25 mm/yr/10-yr、111.18 mm/yr/10-yr 及 119.44mm/yr/10-yr。

年最大一日降雨量 MWP 及 KW 分析結果示如表 3- 13 及

圖 3-18。結果顯示石門、長興、復興、霞雲及鎮西堡五個站通過 MWP 及 KW 檢定，其變異點分別發生於 1995、1995、1995、1995、1993 年。

表 3- 12 各測站年最大一日降雨量 MK 檢定分析表

測站名稱	增減率	MK 統計量	MK 檢定值	顯著與否
三光	110.45	1.72	1.96	否
巴陵	64.43	1.14	1.96	否
玉峰	188.33	1.43	1.96	否
白石	163.75	1.65	1.96	否
石門	75.25	2.30	1.96	是
西丘斯山	71.91	1.01	1.96	否
秀巒	85.99	1.40	1.96	否
長興	83.33	1.85	1.96	否
高義	116.25	1.46	1.96	否
復興	111.18	1.98	1.96	是
嘎拉賀	42.75	0.97	1.96	否
鞍部	183.75	1.59	1.96	否
霞雲	127.44	1.91	1.96	否
鎮西堡	119.44	2.14	1.96	是

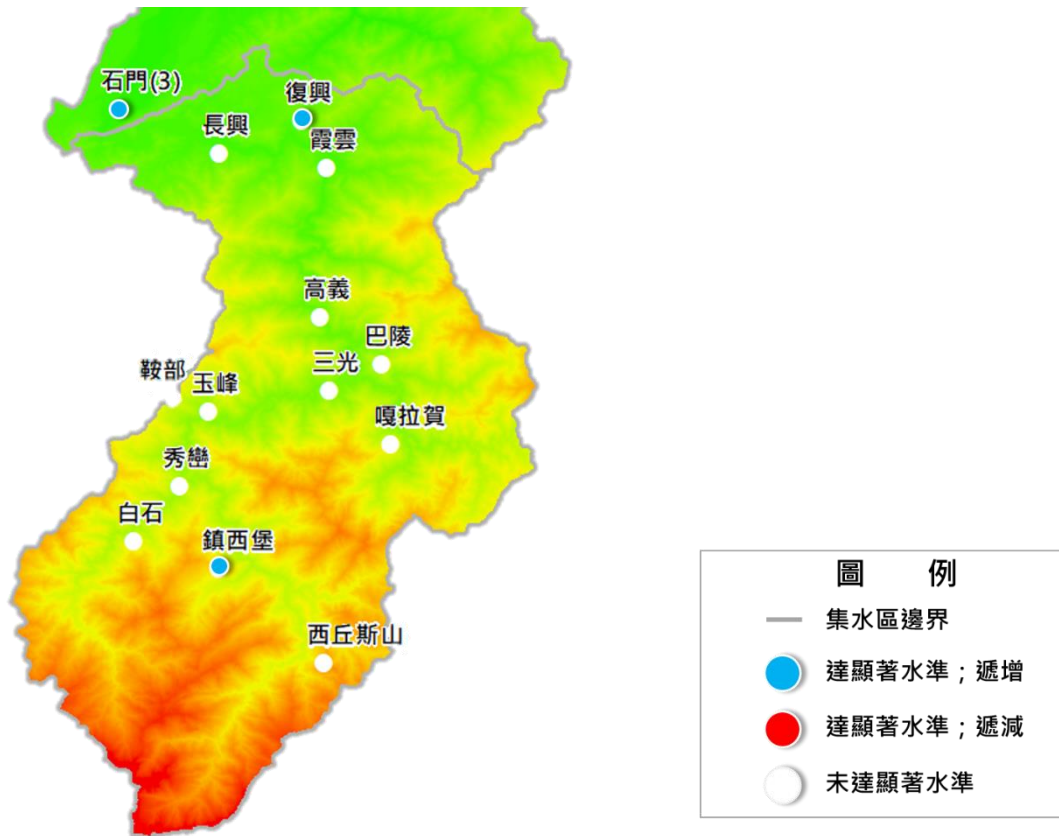


圖 3-17 各測站年最大一日降雨量 MK 檢定分析圖

表 3- 13 各測站年最大一日降雨量 MWP 及 KW 檢定分析表

測站名稱	改變點	發生機率	顯著水準	顯著與否	KW 統計量	KW 檢定值	明顯差異
三光	1995	0.875	0.9	否	4.166	2.706	是
巴陵	1995	0.681	0.9	否	2.286	2.706	否
玉峰	1993	0.779	0.9	否	3.149	2.706	是
白石	1995	0.894	0.9	否	4.48	2.706	是
石門	1995	0.955	0.9	是	6.223	2.706	是
西丘斯山	1999	0.749	0.9	否	3.293	2.706	是
秀巒	1993	0.875	0.9	否	4.339	2.706	是
長興	1995	0.97	0.9	是	7	2.706	是
高義	1995	0.894	0.9	否	4.48	2.706	是
復興	1995	0.955	0.9	是	6.223	2.706	是
嘎拉賀	1999	0.681	0.9	否	2.721	2.706	是
鞍部	1995	0.855	0.9	否	3.863	2.706	是
霞雲	1995	0.936	0.9	是	5.491	2.706	是
鎮西堡	1993	0.946	0.9	是	6.095	2.706	是

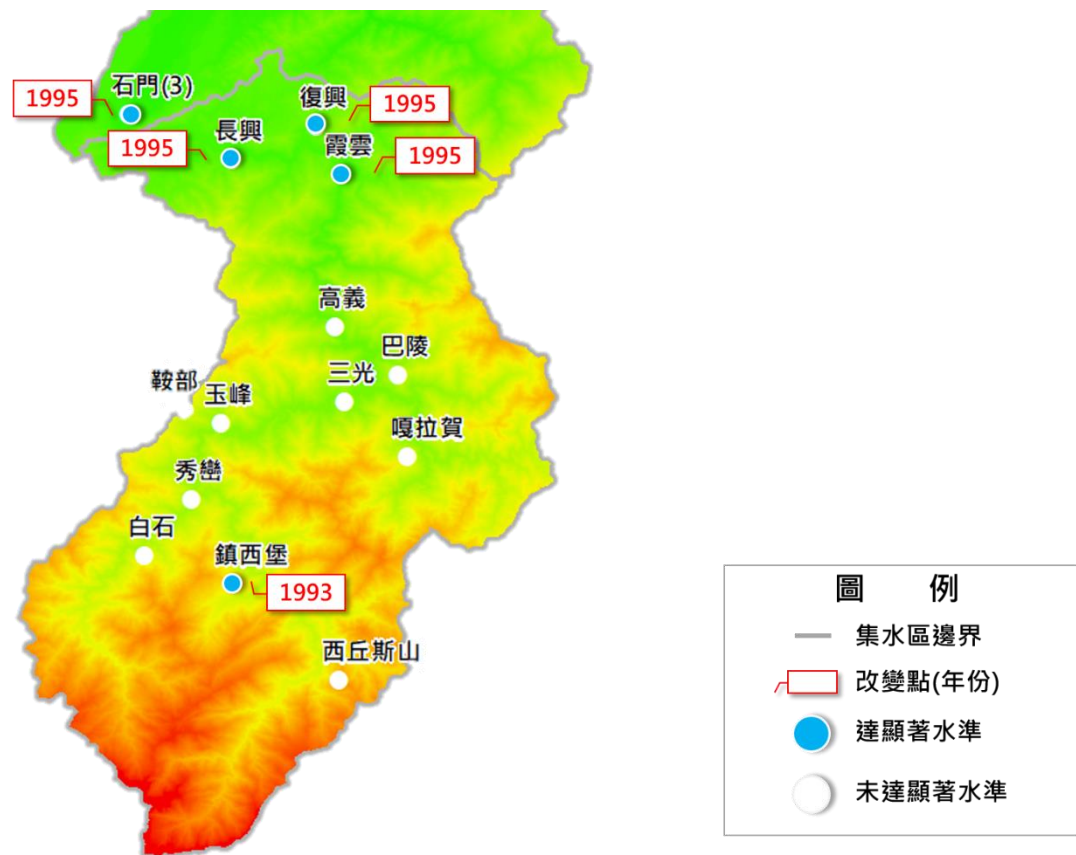


圖 3-18 各測站年最大一日降雨量 MWP 及 KW 檢定分析圖

(五)年最大連續不降雨日數

年最大連續不降雨日數 MK 檢定分析結果示如表 3-14 及

圖 3-19。結果顯示 14 站並無顯著變化。

年最大連續不降雨日數 MWP 及 KW 分析結果示如表 3-15

及圖 3-20。結果顯示僅玉峰一站通過 MWP 及 KW 檢定，其變

異點發生於 1990 年。

表 3- 14 各測站年最大連續不降雨日數 MK 檢定分析表

測站名稱	增減率	MK 統計量	MK 檢定值	顯著與否
三光	0.00	-0.19	1.96	否
巴陵	-0.36	-0.13	1.96	否
玉峰	-5.00	-1.43	1.96	否
白石	-4.29	-1.17	1.96	否
石門	-4.53	-1.36	1.96	否
西丘斯山	0.00	-0.03	1.96	否
秀巒	4.58	0.75	1.96	否
長興	-0.97	-0.39	1.96	否
高義	-4.77	-1.23	1.96	否
復興	-1.43	-0.78	1.96	否
嘎拉賀	-2.22	-1.75	1.96	否
鞍部	4.44	1.36	1.96	否
霞雲	-3.54	-0.84	1.96	否
鎮西堡	-3.67	-0.97	1.96	否

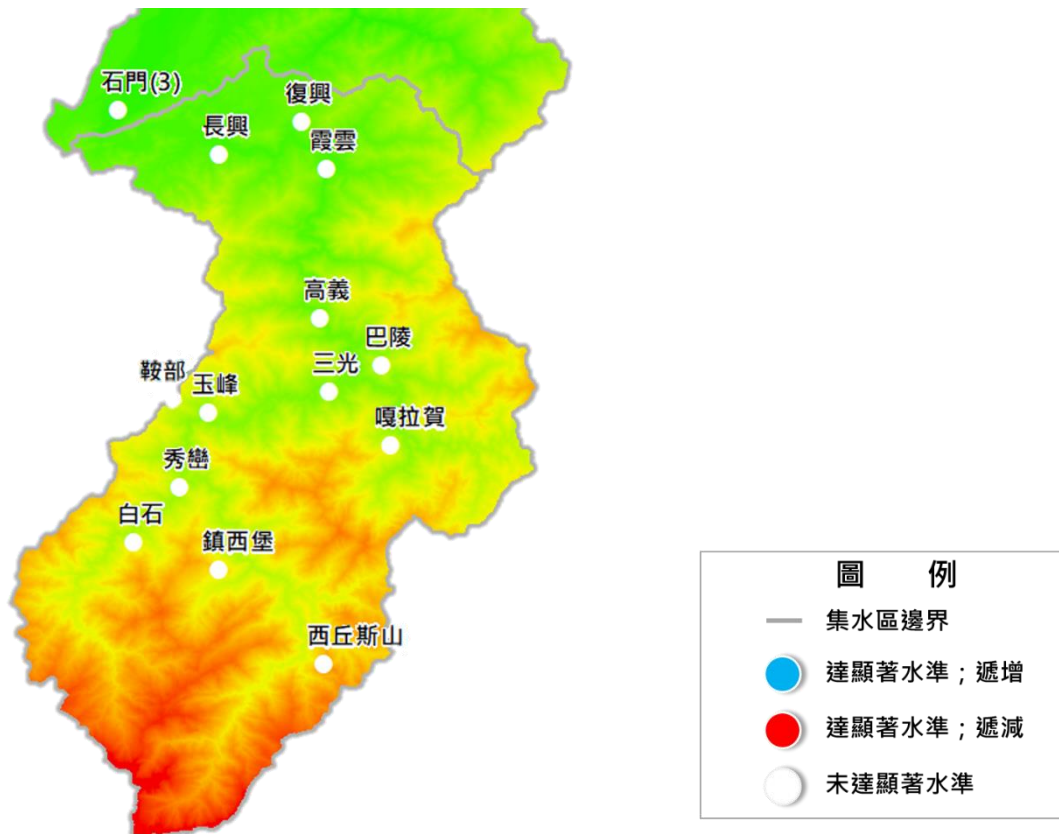


圖 3-19 各測站年最大連續不降雨日數 MK 檢定分析圖

表 3- 15 各測站年最大連續不降雨日數 MWP 及 KW 檢定分析表

測站名稱	改變點	發生機率	顯著水準	顯著與否	KW 統計量	KW 檢定值	明顯差異
三光	2002	0.292	0.9	否	1.356	2.706	否
巴陵	1989	0.894	0.9	否	7	2.706	是
玉峰	1990	0.917	0.9	是	6.63	2.706	是
白石	1990	0.866	0.9	否	5.35	2.706	是
石門	1989	0.765	0.9	否	4.52	2.706	是
西丘斯山	1989	0.749	0.9	否	4.321	2.706	是
秀巒	2000	0.866	0.9	否	5.35	2.706	是
長興	1989	0.541	0.9	否	2.431	2.706	否
高義	1990	0.699	0.9	否	3.202	2.706	是
復興	1995	0.429	0.9	否	1.12	2.706	否
嘎拉賀	1995	0.855	0.9	否	3.863	2.706	是
鞍部	2000	0.855	0.9	否	5.15	2.706	是
霞雲	1989	0.765	0.9	否	4.52	2.706	是
鎮西堡	1990	0.855	0.9	否	5.15	2.706	是

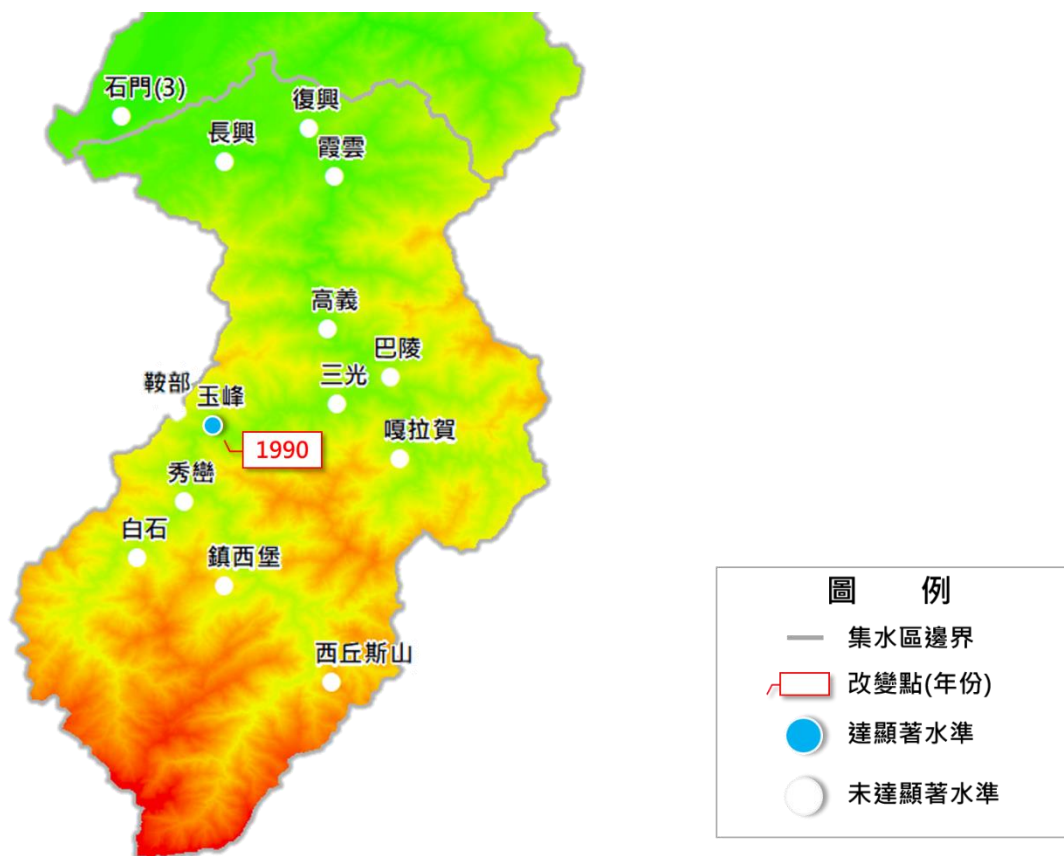


圖 3- 20 各測站年最大連續不降雨日數 MWP 及 KW 檢定分析圖

二、石門水庫集水區區域氣候空間與時間降尺度分析

本研究引用國家災害防救科技中心之TCCIP空間降尺度結果，再利用Richardson-type法針對AR5之RCP8.5情境中的42個GCMS模式進行近未來(2020-2039)之日雨量繁衍，採多模式系集平均觀點，於豐水期間採系集平均值加上一倍標準偏差，枯水期間則採系集平均值減去一倍標準偏差，石門水庫集水區各測站各月份之降雨量變化比率分析結果詳見表3- 16。結果顯示各站枯水期之降雨量變化比率皆呈現減少趨勢，減少率介於16-37%，各站豐水期之降雨量變化比率皆呈現增加趨勢，增加率介於15-38%，顯示氣候變遷影響下，有豐越豐，枯越枯之趨勢，其中2月份雨量減少最多，4月份次之，與現在石門水庫集水區春雨有減少之趨勢吻合。7~9月雨量增加最多，顯示未來於此段時間可能會發多場之颱洪暴雨事件。

本計畫進一步進行石門水庫集水區基期(1986-2005)及近未來(2020-2039)最大一日暴雨頻率分析，根據經濟部水利署「水文分析圖表範例及作業參考手冊」建議，採用對數皮爾遜III型分布（Log Pearson type III distribution, LPT3）進行各測站分析，各測站分析結果示如表3- 17。此外，本計畫亦利用徐昇式多邊形法計算石門水庫集水區平均雨量，各雨量站控制面積與權重詳見圖3- 21，結果顯示近未來(2020-2039)各測站各重現期最大一日暴雨頻率較基期(1986-2005)27~40%，石門水庫集水區整體平均雨量增加28~35%，暴雨的增加對於水庫集水區土砂災害以及下游防洪安全都將產生更嚴重之威脅。

表 3- 16 石門水庫集水區各測站近未來(2020-2039)各月份降雨量變化比率分析結果表

月份	三光	巴陵	玉峰	白石	石門	西丘 斯山	秀巒	長興	高義	復興	嘎拉賀	鞍部	霞雲	鎮西堡
1	-0.21	-0.21	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21	-0.21	-0.22	-0.21	-0.22
2	-0.35	-0.34	-0.36	-0.37	-0.35	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.34	-0.35	-0.36	-0.34	-0.37
3	-0.21	-0.2	-0.21	-0.22	-0.21	-0.22	-0.22	-0.21	-0.2	-0.2	-0.21	-0.21	-0.2	-0.22
4	-0.26	-0.25	-0.26	-0.28	-0.26	-0.28	-0.27	-0.26	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26	-0.25	-0.28
5	0.15	0.15	0.16	0.15	0.17	0.15	0.15	0.17	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15
6	0.23	0.22	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24
7	0.35	0.35	0.34	0.35	0.33	0.35	0.35	0.32	0.35	0.32	0.35	0.34	0.32	0.35
8	0.35	0.34	0.33	0.34	0.31	0.34	0.35	0.3	0.34	0.3	0.35	0.33	0.3	0.34
9	0.36	0.36	0.38	0.38	0.38	0.36	0.37	0.37	0.36	0.35	0.36	0.38	0.35	0.37
10	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.35	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36
11	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	-0.17	-0.16	-0.16	-0.18	-0.16	-0.18
12	-0.16	-0.16	-0.17	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.17	-0.16	-0.18

註：上述數據是根據 42 個 GCM 模式，於豐水期間採系集平均值加上一倍標準偏差，枯水期間則採系集平均值減去一倍標準偏差估算

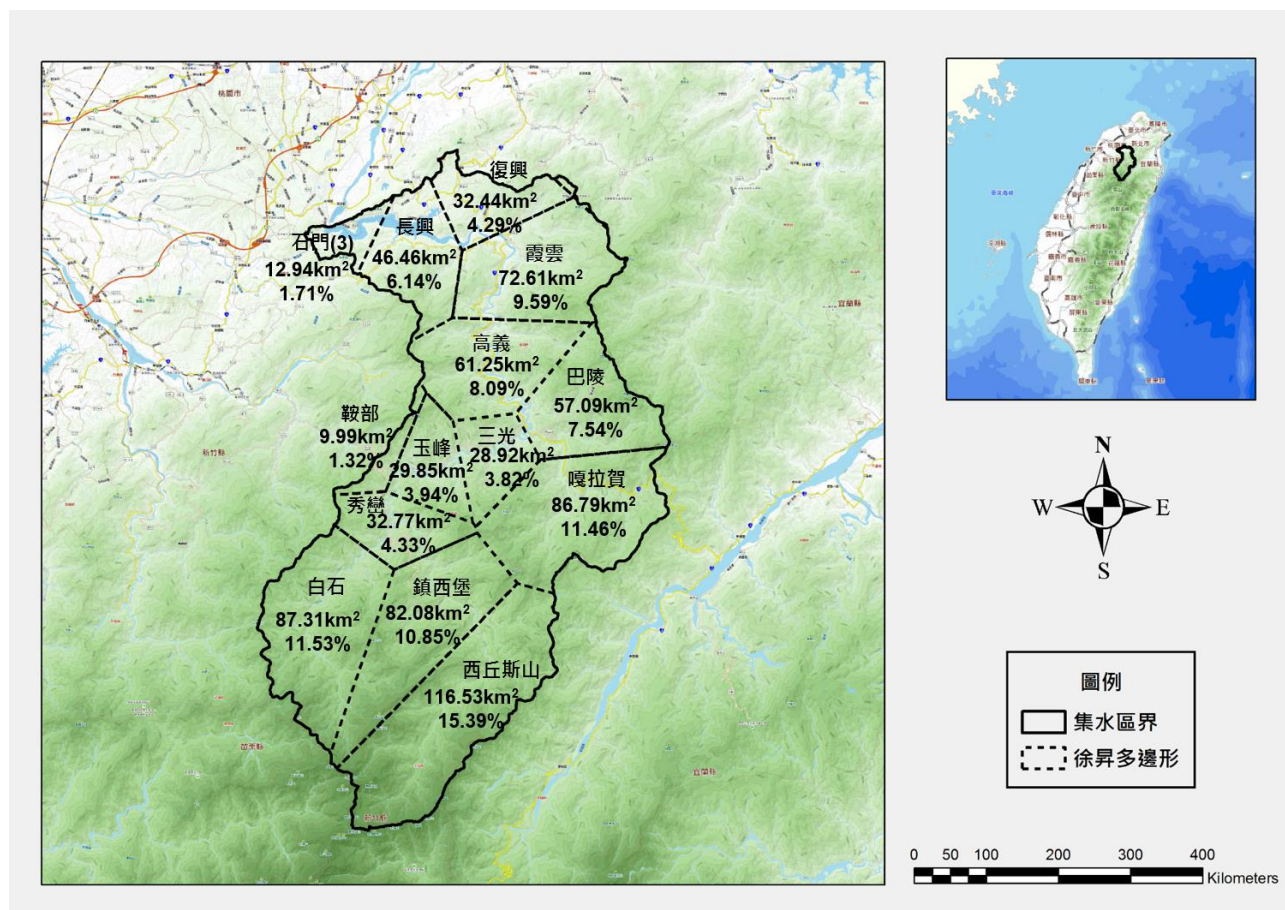


圖 3- 21 石門水庫集水區各雨量測站徐昇式多邊形法控制面積

表 3- 17 石門水庫集水區各測站基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)最大一日暴雨頻率分析成果

情境	重現期	石門	長興	復興	霞雲	高義	三光	巴陵	嘎拉賀	鞍部	玉峰	秀巒	白石	鎮西堡	西丘斯山	石門水庫 集水區平 均雨量
基期 (1986- 2005)	2	203.8	217.1	249.7	264.6	276.2	257.5	245.7	220.7	238.1	279.5	224.4	283.1	237.3	255.8	246.26
	5	278.0	321.7	391.5	437.5	495.8	437.3	385.8	355.4	459.5	555.7	395.7	543.5	417.8	437.4	421.10
	10	321.7	394.6	487.5	554.6	646.7	551.1	467.4	433.7	641.5	774.5	512.9	750.1	536.5	548.8	542.72
	25	371.4	490.0	609.0	701.0	834.1	683.0	556.4	518.3	908.4	1081.4	658.5	1042.4	678.3	673.5	703.46
	50	404.9	563.2	698.8	807.4	968.6	771.8	613.1	571.7	1132.3	1327.2	763.1	1279.4	776.2	754.4	834.70
	100	435.9	638.1	787.5	911.0	1097.3	852.5	662.6	617.6	1376.7	1584.4	863.4	1530.6	867.1	825.7	988.62
	200	464.7	715.2	875.7	1012.1	1220.6	926.2	706.0	657.4	1642.5	1852.6	959.8	1795.9	951.5	888.7	1190.92
近未來 (2020- 2039， 採 42 個 GCM 系 集平均)	2	266.6	278.0	316.2	338.7	368.6	347.6	330.5	298.6	313.7	374.3	304.6	378.3	316.7	345.4	326.28
	5	368.0	419.3	507.2	572.7	668.5	595.2	526.0	481.8	627.0	756.6	541.9	748.8	573.8	591.7	566.46
	10	429.2	521.7	642.0	736.4	875.7	749.5	637.0	587.5	875.4	1053.8	700.1	1033.8	739.6	743.2	731.36
	25	500.3	660.1	818.4	946.8	1134.0	925.1	754.3	700.6	1223.6	1460.9	891.2	1421.6	932.3	913.5	943.79
	50	549.1	769.5	953.0	1103.7	1319.7	1041.0	826.7	771.1	1502.2	1778.7	1024.5	1723.3	1061.3	1024.3	1110.59
	100	594.9	884.1	1089.5	1259.4	1497.6	1144.7	888.0	831.3	1793.5	2103.8	1149.2	2031.3	1177.5	1122.3	1297.31
	200	638.3	1004.6	1228.3	1414.4	1668.3	1237.5	940.1	882.9	2096.7	2435.1	1266.0	2344.6	1282.3	1209.0	1529.73
近未來 暴雨增 減率	2	0.31	0.28	0.27	0.28	0.33	0.35	0.35	0.35	0.32	0.34	0.36	0.34	0.33	0.35	0.32
	5	0.32	0.30	0.30	0.31	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.38	0.37	0.35	0.35
	10	0.33	0.32	0.32	0.33	0.35	0.36	0.36	0.35	0.36	0.36	0.36	0.38	0.38	0.35	0.35
	25	0.35	0.35	0.34	0.35	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.37	0.36	0.34
	50	0.36	0.37	0.36	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35	0.33	0.34	0.34	0.35	0.37	0.36	0.33
	100	0.36	0.39	0.38	0.38	0.36	0.34	0.34	0.35	0.30	0.33	0.33	0.33	0.36	0.36	0.31
	200	0.37	0.40	0.40	0.40	0.37	0.34	0.33	0.34	0.28	0.31	0.32	0.31	0.35	0.36	0.28

第三節 石門水庫集水區土砂產量評估

一、坡地崩塌土砂產量評估

本計畫以打荻珠男之經驗公式推估坡地崩塌土砂產量，打荻珠男經驗公式根據第二章第二節之推估成果，可以下式表示

$$V = KA(P - P_0)^2 \quad (3-1 \text{式})$$

其中 V 為崩塌體積(m^3)； K 為集水區參數； A 為集水區面積(m^2)； P 為事件降雨量(mm)； P_0 為發生崩塌之臨界雨量(mm)。前述集水區參數 K 及發生崩塌之臨界雨量 P_0 ，引用水利規劃試驗所101年「淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」成果，茲就分析成果說明如下：

(一)集水區參數 K

集水區參數(K)之率定模式誤差估算是以 2004-2012 年的 10 場降雨事件所產生之崩塌地產砂量為觀測值，藉由調整 K 值以找尋誤差的最小均方根值(root mean square, RMS)。均方根公式如下：

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2}{n}} \quad (3-2 \text{式})$$

其中 X_{RMS} 為誤差的均方根值； X_n 為觀測誤差(預測值-觀測值)。分析計算結果如表 3- 18，在 $K=0.1045$ 的結果狀況下，其 RMS 能得到最小值 258.0，因此將石門水庫集水區參數設定為 0.1045。

(二)發生崩塌之臨界雨量 P_0

利用雨量站的時雨量資料，統計颱風降雨的總雨量，並利

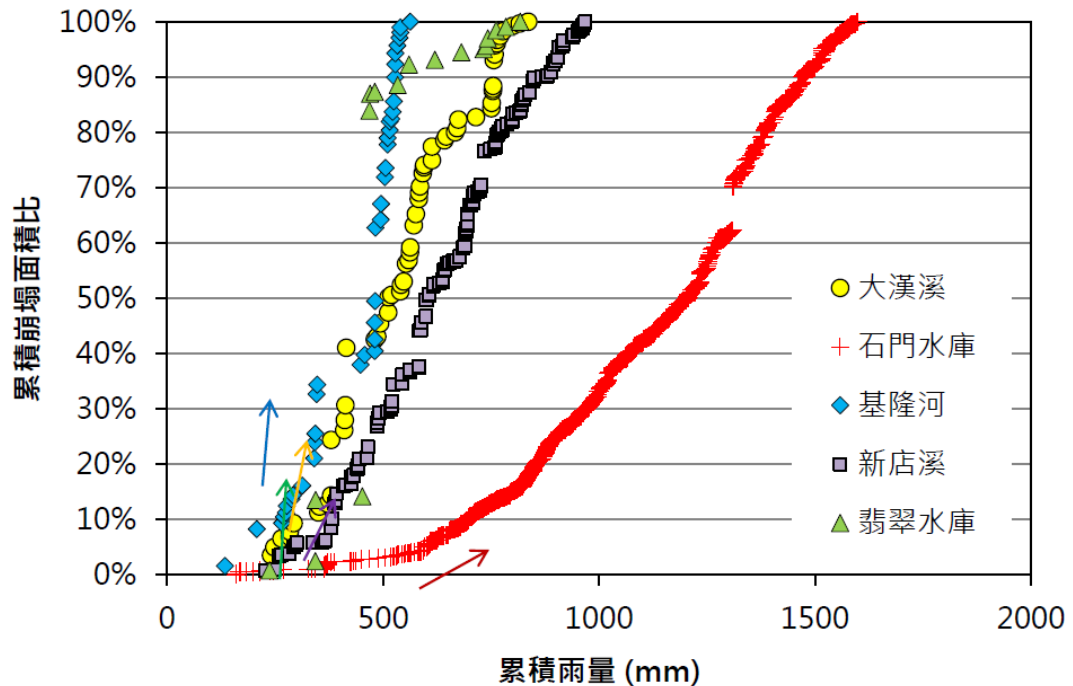
用克利金法(Kriging Method)內插得到全流域的降雨空間分布。將颱風事件之雨量分布圖套疊崩塌地圖層，統計各崩塌地對應的累積雨量，繪製崩塌地累積面積與累積雨量關係，分辨產生崩塌地之臨界降雨量，分析結果示如圖 3-22，結果顯示石門水庫集水區累積雨量至 600 毫米時，崩塌面積才有明顯增加，因此發生崩塌之臨界雨量設定為 600 毫米。

表 3- 18 集水區參數率定結果

單位：萬立方公尺

颱風或豪雨名稱	石門水庫 (K=0.1045)		
	觀測	預測	誤差
艾利	1626.69	1335.86	-290.84
海棠	35.21	0.00	-35.21
馬莎	188.68	440.20	251.53
豪雨	17.11	0.00	-17.11
聖帕	3.36	0.00	-3.36
柯羅莎	68.26	17.67	-50.59
辛樂克	19.85	688.22	668.37
薔蜜	3.50	0.00	-3.50
莫拉克	11.29	0.00	-11.29
蘇拉	37.92	441.97	404.05
均方根值	258.0		

資料來源：水利規劃試驗所，101 年，淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫



資料來源：水利規劃試驗所，101 年，淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫(1/2)

圖 3-22 累積崩塌面積比、累積雨量與臨界雨量

(三)坡地崩塌土砂產量

前述參數配合石門水庫集水區面積，3-1 式可改寫為

$$V = 79.78 \times (P - 600)^2 \quad (3-3 \text{ 式})$$

將基期和近未來重現期 100 年之降雨量帶入 3-3 式，以推估石門水庫集水區崩塌產砂量，分析結果詳表 3- 19，分析結果顯示石門水庫集水區基期(1986-2005)重現期 100 年最大一日暴雨之崩塌產砂量 1204.9 萬立方公尺，但隨著近未來(2020-2039)暴雨量增加，近未來(2020-2039)崩塌產砂量增加至 3879.2 萬立方公尺，增加率達 221.95%。

表 3- 19 基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年最大一日暴雨之崩塌產砂量

集水區	崩塌產砂量公式	崩塌產砂量 (萬噸)		崩塌產砂量 (萬 m ³)	
		基期 (1986-2005)	近未來 (2020-2039)	基期 (1986-2005)	近未來 (2020-2039)
石門水庫	$V = 79.78 \times (P - 600)^2$	1927.8	6206.7	1204.9	3879.2

備註：土砂密度以 1.6 噸/m³ 計，公式來源：水利規劃試驗所，101 年，淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫

二、集水區土壤沖蝕量評估

土壤沖蝕推估模式採用修正土壤沖蝕公式(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)，估算結果(詳

表3- 20)，顯示森林地的土壤沖蝕量為每公頃23.92 噸。草地平均沖蝕為每公頃56.38 噸。裸露地平均沖蝕為每公頃749 噸，石門水庫集水區基期(1986-2005) 重現期100 年最大一日暴雨之崩塌產砂量12.6萬立方公尺，隨著近未來(2020-2039)暴雨量增加，近未來(2020-2039)崩塌產砂量增加至20.5萬立方公尺，增加率為62.70%

表 3- 20 基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年最大一日暴雨量土壤沖蝕量

子集水區	土壤沖蝕量 (萬噸)		土壤沖蝕量 (萬 m ³)	
	基期 (1986-2005)	近未來 (2020-2039)	基期 (1986-2005)	近未來 (2020-2039)
石門水庫	20.2	32.8	12.6	20.5

備註：土砂密度以 1.6 噸/m³ 計

三、石門水庫入庫土砂量評估

石門水庫入庫土砂量由土壤沖蝕量加上坡地崩塌土砂量乘以土砂遞移率估算之，本計畫參考表2-5估算不同土砂遞移率經驗公式，分析結果示如表3- 21，本計畫採用較保守之分析成果，即石門水庫

集水區土砂遞移率採用30.6%進行石門水庫入庫土砂量評估，評估結果示如(詳表3- 22)，石門水庫基期(1986-2005) 重現期100 年最大一日暴雨之入庫土砂量381.3萬立方公尺，隨著近未來(2020-2039)暴雨量增加，近未來(2020-2039) 入庫土砂量增加至1207.5萬立方公尺，增加率為216.68%。

表 3- 21 石門水庫集水區土砂遞移率估算成果

出處	土砂遞移率經驗公式	石門水庫 遞移率(%)	備註
Roehl (1962)	$\log \text{SDR}(\%) = 1.91 - 0.338 \log A$	8.6	石門水庫 集水面積 763.4 平 方公里， 石門水庫 平均坡度 0.4
Vanoni (1975)	$\text{SDR}(\%) = 62 \times A^{-0.14}$	24.5	
陳樹群、賴 益成 (2004)	$\text{SDR}(\%) = 249.14 \times A^{-0.316}$	30.6	
	$\text{SDR}(\%) = 126.22 \times A^{-0.35} S^{0.22}$	10.1	

表 3-22 基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期 100 年石門水庫入砂量與變化

子集水區	基期 (1986-2005)			近未來 (2020-2039)			近未來 土砂增減率		
	崩塌 [萬 m ³]	土壤 [萬 m ³]	水庫入砂量 [萬 m ³]	崩塌 [萬 m ³]	土壤 [萬 m ³]	水庫入砂量 [萬 m ³]	崩塌 [%]	土壤 [%]	合計 [%]
石門水庫	1204.9	12.6	381.3	3879.2	20.5	1207.5	221.95	62.70	216.68

備註：本計畫分析，土砂密度以 1.6 噸/m³ 計

第四節 石門水庫最佳防洪減淤操作

本計畫整合遺傳演算法、水理模式及庫區泥沙模式，建立水庫防洪減淤操作最佳規劃模式，以優選出石門水庫最佳防洪減淤操作。以下茲就河道水理模式建立、庫區泥砂運移機制建立及石門水庫最佳防洪減淤操作建立之成果說明如下：

一、石門水庫下游河道水理模式建立

石門水庫下游河道示如圖3-23，包含永福溪及三峽河兩個支流。由於永福溪以及三峽河缺乏流量站資料以及水位測站資料，又因兩者之流量對比石門水庫洪氾來臨時期支流流量相對微小，因此本計畫忽略永福溪以及三峽河支流量，計算範圍至三峽河匯流前。

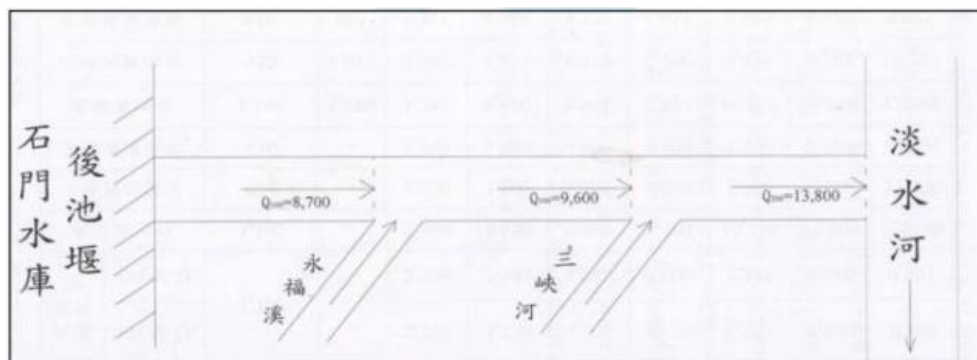


圖 3-23 大漢溪下游系統圖

本計畫首先應用HEC-RAS模擬石門水庫放流量對於控制斷面水位之關係，接續採用類神經模式取代前述HEC-RAS模擬模式，以降低最佳規劃模式之計算量。

HEC-RAS所需要資料包含河川斷面幾何資料、曼寧n值，上游邊界條件、下游邊界條件、側向邊界條件等，茲說明如下：

(一)河川斷面幾何資料

河川幾何斷面資料，係採民國 103 年量測之大漢溪大斷面測量實測資料(詳圖 3-24)，本模式採用其中之斷面編號 T52 至 T90A，斷面資料包含包括斷面形狀與該斷面之河心累距等。

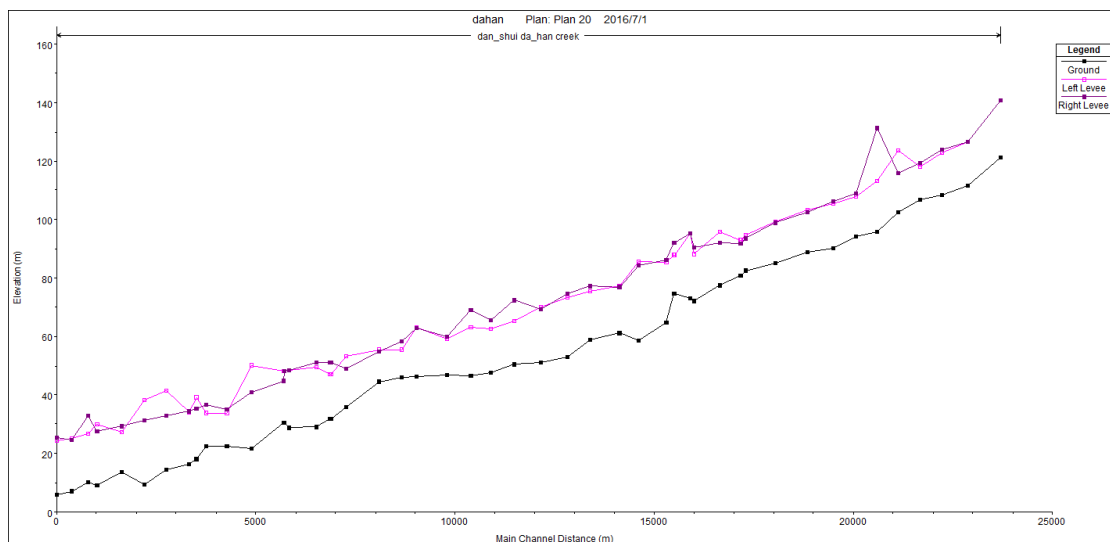


圖 3-24 大漢溪縱剖面圖

(二)曼寧 n 值

本計畫參考石門水庫放淤對下游河道生態影響之調查研究計畫之建議值，報告中以實測之有效斷面、坡降及河床質等基本資料，以經驗及理論公式等推算大漢溪主流各河段之曼寧 n 值，決定該河段之 n 值為 0.033。

(三)上游邊界條件

本研究上游邊界條件為流量邊界條件，以流量 1000cms 至 11500cms，每隔 100cms 模擬一次。

(四)下游邊界條件

本研究下游邊界條件為定水位邊界條件，在此設為正常水深(Normal Depth)。

(五)側向邊界條件

側入流部分，僅有永福溪及三峽河兩側入流，又因兩者之流量對比於洪颱時期石門水庫之放流相對微小，本模擬案例忽略側入流量之輸入。

利用 HEC-RAS 水理演算模式建立大量之水庫放水量與對應之河道流量與洪水位等對應資訊，在此作為類神經網路之訓練資料，建立河川洪水類神經模式藉此降低模式計算量。

本計畫以辛樂克、鳳凰、薔蜜颱風於 t 時刻及 $t-1$ 時刻之流量資料為網路輸入資料，第 t 時刻控制點之水位則為網路輸出資料，本研究之控制點選擇為斷面 T74。倒傳遞類神經網路隱藏層為一層，其中包含 4 個神經元。模式所用之轉換函數為 S 形函數(Logsig)函數。由於所選用之轉換函數可微分，故可利用最陡坡降法(Gradient Steepest Decent Method)等方法在學習訓練的過程中，逐步修正倒傳遞類神經網路的權重與閾值，使模擬誤差值逐步縮小，達到機器學習之目的

類神經訓練案例事件採用共 106 場流量-水位事件進行分析，流量選用自 1000cms 開始，每隔 100cms 取一筆流量，最高取至 11500cms，再利用 HEC-RAS 分析出此 106 場流量對應

之水位資訊，訓練成果示如圖 3-25。成果顯示河川洪水類神經模式與 HEC-RAS，兩者之模擬水位十分一致，本計畫再以辛樂克、鳳凰與薔蜜颱風之連續流量資料作為驗證案例，分析結果示如圖 3-26~圖 3-28 及表 3- 23 所示，三場颱風事件之決定係數 (R^2) 為 0.99 以上，誤差百分率(MAPE)皆低於 0.001，顯示本計畫類神經模式精度足以反映 HEC-RAS 模式之模擬成果。

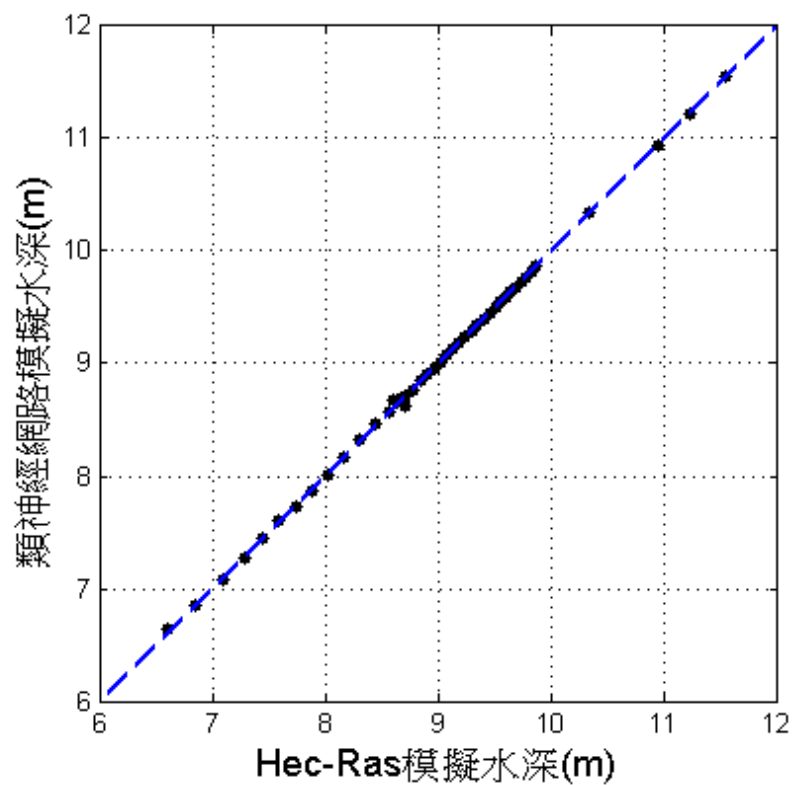


圖 3-25 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較

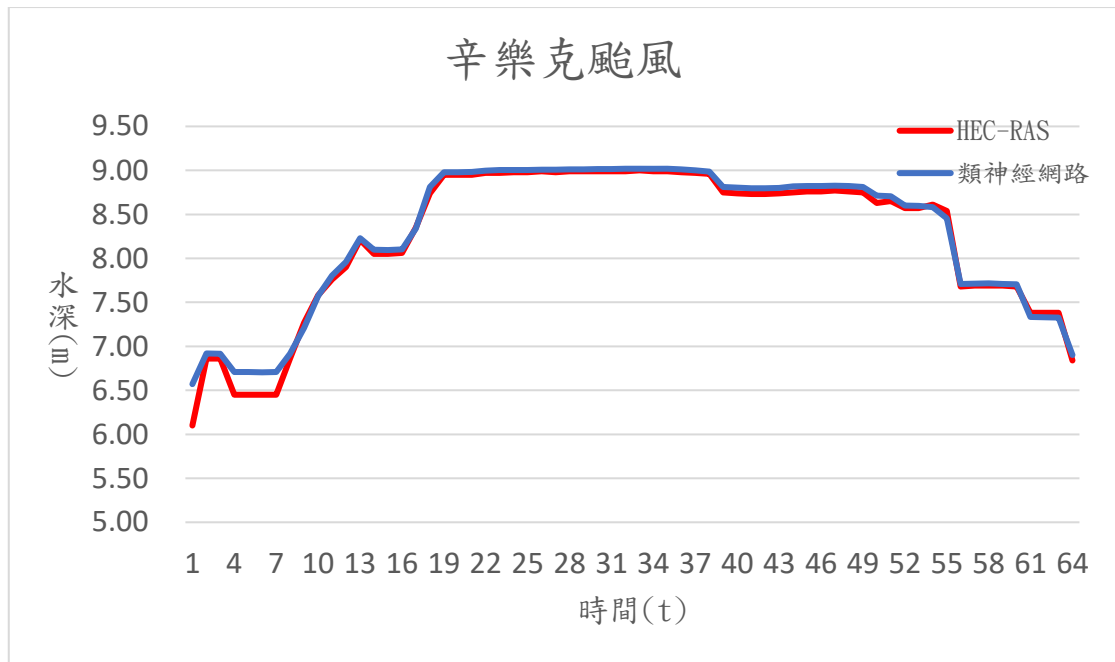


圖 3-26 辛樂克颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較

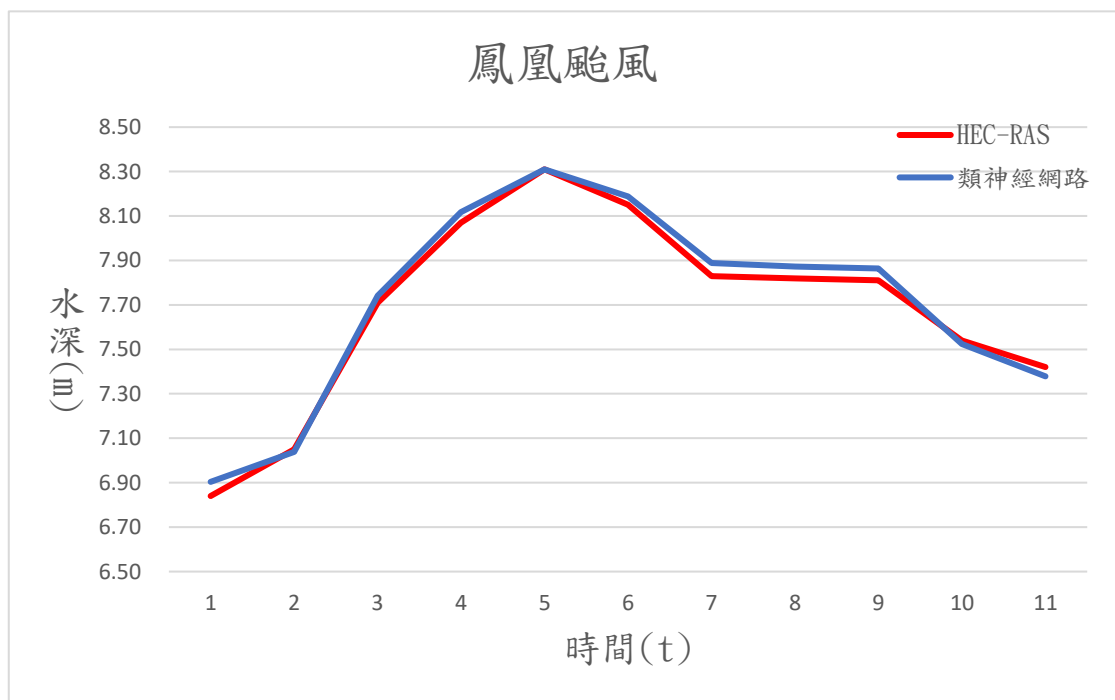


圖 3-27 鳳凰颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較

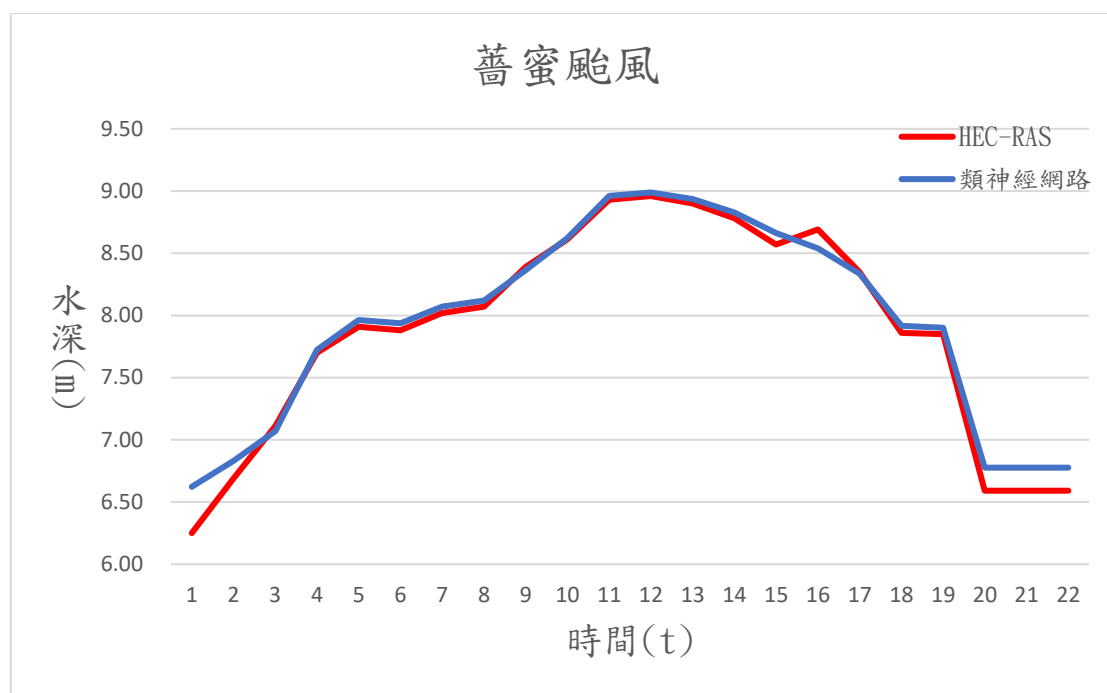


圖 3-28 薔蜜颱風 HEC-RAS 與類神經網路模擬結果比較

表 3- 23 河川洪水類神經模式驗證案例評估指標列表

評估指標	辛樂克颱風	鳳凰颱風	薔蜜颱風
決定係數(R2)	0.9922	0.9939	0.9920
誤差百分率(MAPE)	0.001	0.0006	0.0014

二、石門水庫庫區泥砂運移機制建立

泥砂於庫區之運移機制是自入庫產生異重流朝大壩流動，當異重流遇到大壩捲升後產生渾水潭，進而影響鄰近的取水設施及排砂效益，因此為掌握水庫排砂效益與上游入砂量關係，本計畫將透過類神經模式學習庫區泥砂運移機制，以降低物理模式之計算量。

本計畫以第t時刻至t-3時刻之防洪隧道、溢洪道、排砂鋼管及羅浮站流量資料及羅浮站泥砂濃度資料作為輸入資料，第t時刻之放流口泥砂濃度則為網路輸出資料。倒傳遞類神經網路隱藏層為一層，其中包含4個神經元。模式所用之轉換函數為S形函數(Logsig)函數。由於所選用之轉換函數可微分，故可利用最陡坡降法(Gradient Steepest Decent Method)等方法在學習訓練的過程中，逐步修正倒傳遞類神經網路的權重與閾值，使模擬誤差值逐步縮小，達到機器學習之目的，倒傳遞類神經網路架構圖示如圖3-29。

本模式辛樂克、薔蜜、鳳凰颱風歷程的前2/3時間訓練案例，剩餘的三分之一時間為驗證案例，驗證結果如圖3-30~圖3-32及表3- 24。圖中顯示，泥砂動態類神經模式與實際觀測資料，兩者之模擬濃度在趨勢上十分一致，排洪隧道、石門電廠砂鋼管與溢洪道之決定係數(R2)分別為0.9284、0.6139、0.9882，誤差百分率(MAPE)分別為0.3267、0.4290、0.4940，顯示本計畫類神經模式精度足以掌握水庫排砂量之機制。

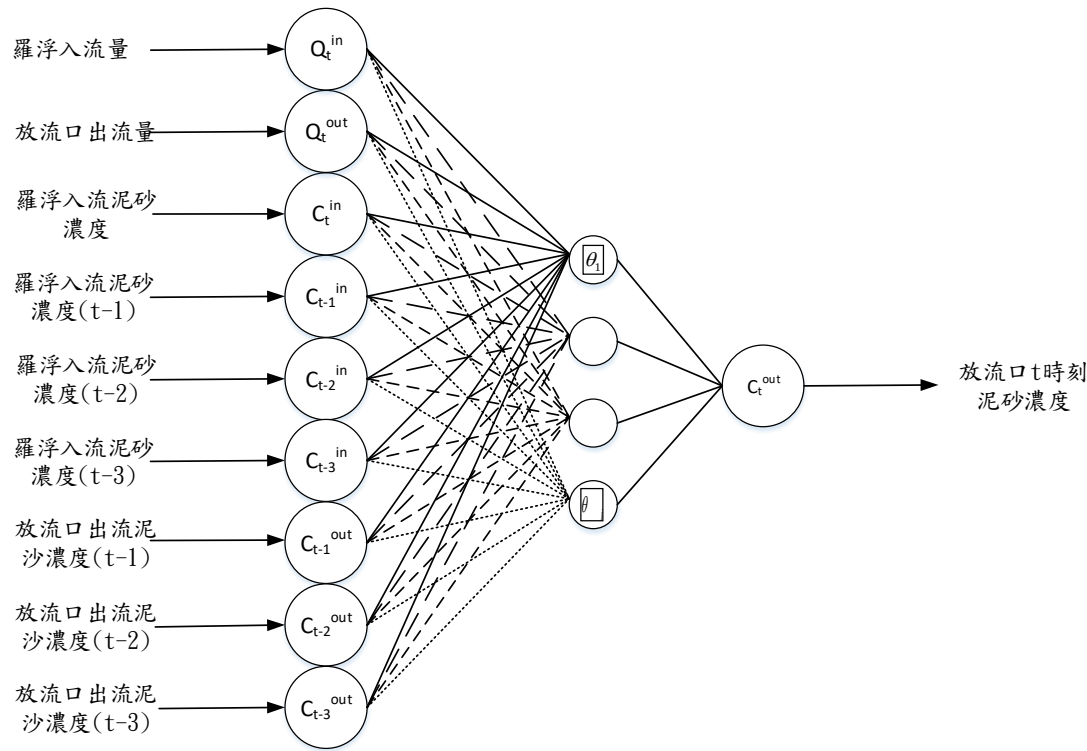


圖 3-29 庫區泥砂動態類神經網路架構圖

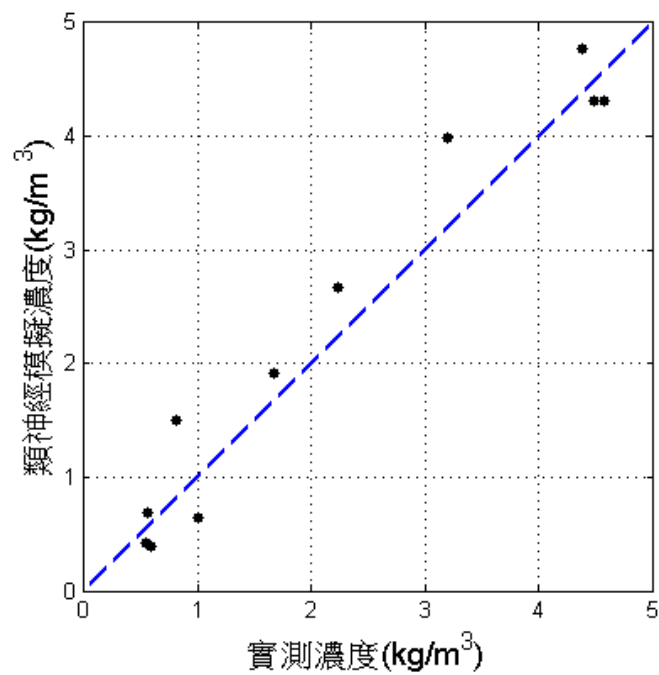


圖 3-30 排洪隧道泥砂濃度驗證結果

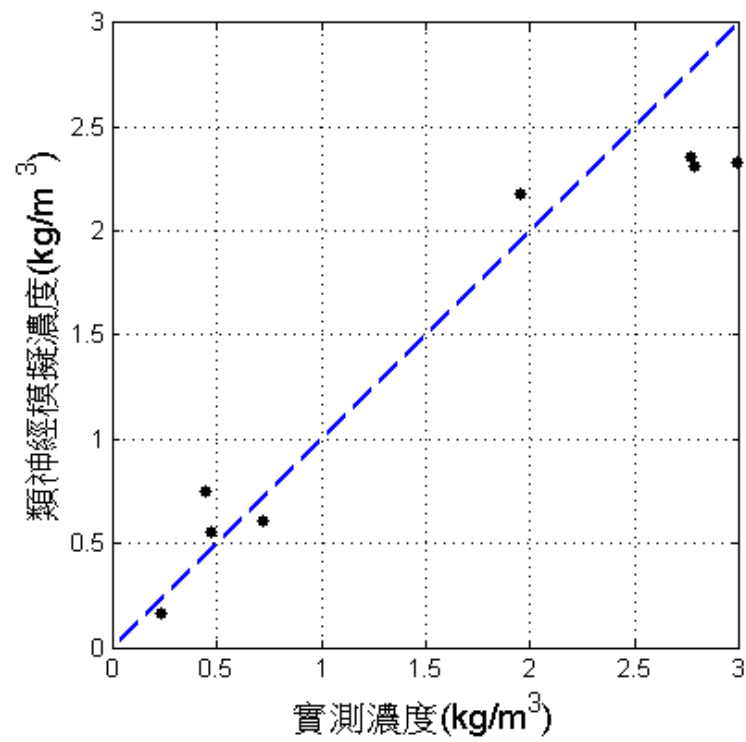


圖 3-31 溢洪道泥砂濃度驗證結果

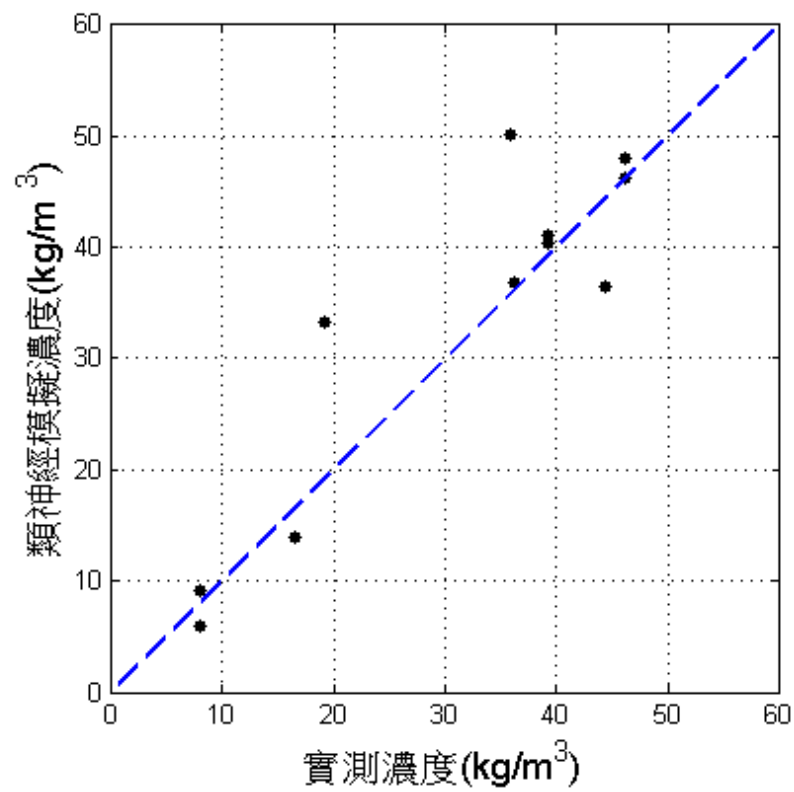


圖 3-32 電廠排砂鋼管泥砂濃度驗證結果

表 3- 24 庫區泥砂動態類神經模式驗證案例評估指標列表

	排洪隧道	電廠排砂鋼管	溢洪道
決定係數(R^2)	0.9487	0.8277	0.8807
誤差百分率(MAPE)	0.2424	0.1545	0.2294

三、石門水庫最佳防洪減淤操作建立

利用第二章第三節所建立之防洪減淤最佳化模式，探討鳳凰、辛樂克及薔蜜三場颱風事件之實際操作結果進行比較。茲就減災項及減淤項兩部分作探討，並與鳳凰、辛樂克及薔蜜三場颱風事件之實際操作結果進行比較。

(一)減災項

茲比較鳳凰、辛樂克及薔蜜三場颱風事件下石門水庫最佳防洪減淤操作與實際操作後之放流量對下游河道安全，分析結果示如圖 3-33~圖 3-38。

就薔蜜颱風而言，最佳防洪減淤操作和實際操作之趨勢相同，最佳操作最大放流量達 3291.99 cms，最高洪水位為 9.45m，實際操作最大放流量 3105.19cms，最高洪水位為 8.96m，由於下游堤防高度為 20m，仍符合下游防洪要求。另外於洪峰發生前，最佳防洪減淤操作放流量增量明顯高於實際操作；洪峰發生後最佳防洪減淤操作放流量遞減量明顯低於實際操作。

就鳳凰颱風而言，最佳防洪減淤操作和實際操作之趨勢相同，最佳操作最大放流量達 2039.78cms，最高洪水位為

8.39m，實際操作最大放流量 2010.98cms，最高洪水位為 8.35m，由於下游堤防高度為 20m，仍符合下游防洪要求。另外於洪峰發生前，最佳防洪減淤操作放流量增量明顯高於實際操作；洪峰發生後最佳防洪減淤操作放流量遞減量明顯低於實際操作。

就辛樂克颱風而言，最佳防洪減淤操作和實際操作之趨勢相同，但相較其他兩個颱風，最佳操作總體放流量較實際操作高出許多，最佳操作最大放流量達 3446.89cms，且持續了 16 小時，最高洪水位為 9.51m，實際操作最大放流量達 3164.67cms，且持續了 15 小時，最高洪水位為 8.99m，雖然最佳操作最大放流量較實際流量超出許多，但仍符合下游防洪要求。另外於洪峰發生後最佳防洪減淤操作放流量遞減量明顯低於實際操作。

綜合前述，可發現最佳規劃遇到洪水量較大之颱風事件(如辛樂克颱風、薔蜜颱風)時，在符合下游防洪要求，傾向多放水，以排除庫區內之泥砂；但遇到洪水量較小之颱風事件(如鳳凰颱風)時，由於流量小排砂效益不顯著，因此與實際操作較為相似。

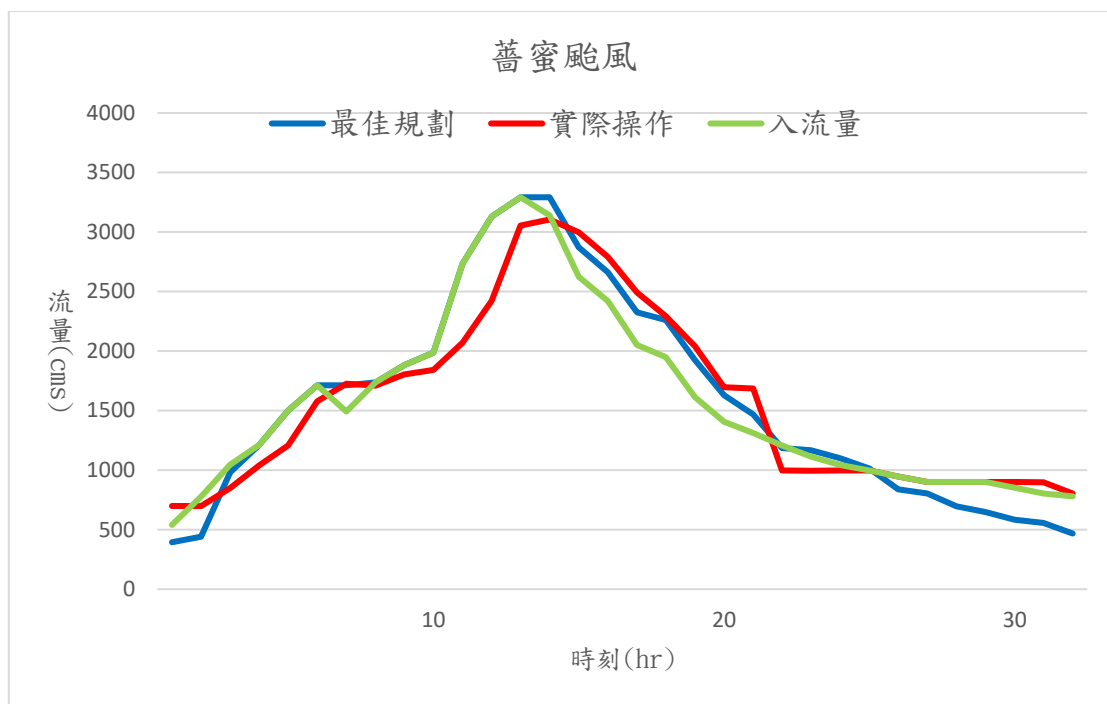


圖 3-33 放流量及入流量之比較(薔蜜颱風)

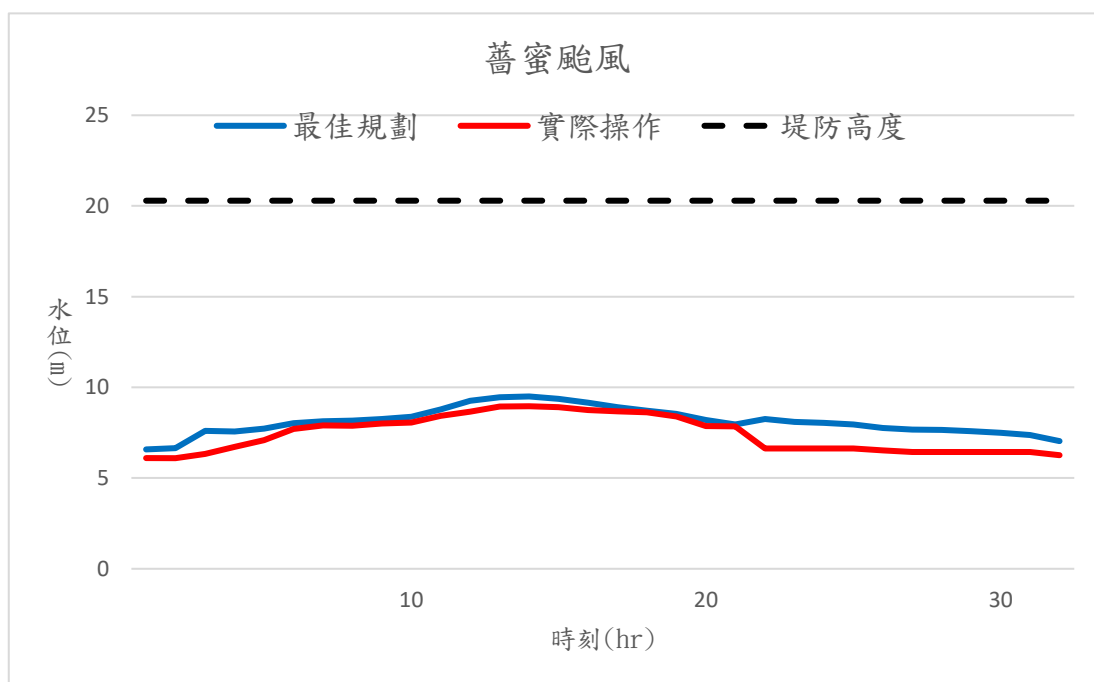


圖 3-34 下游河道水位之結果比較(薔蜜颱風)

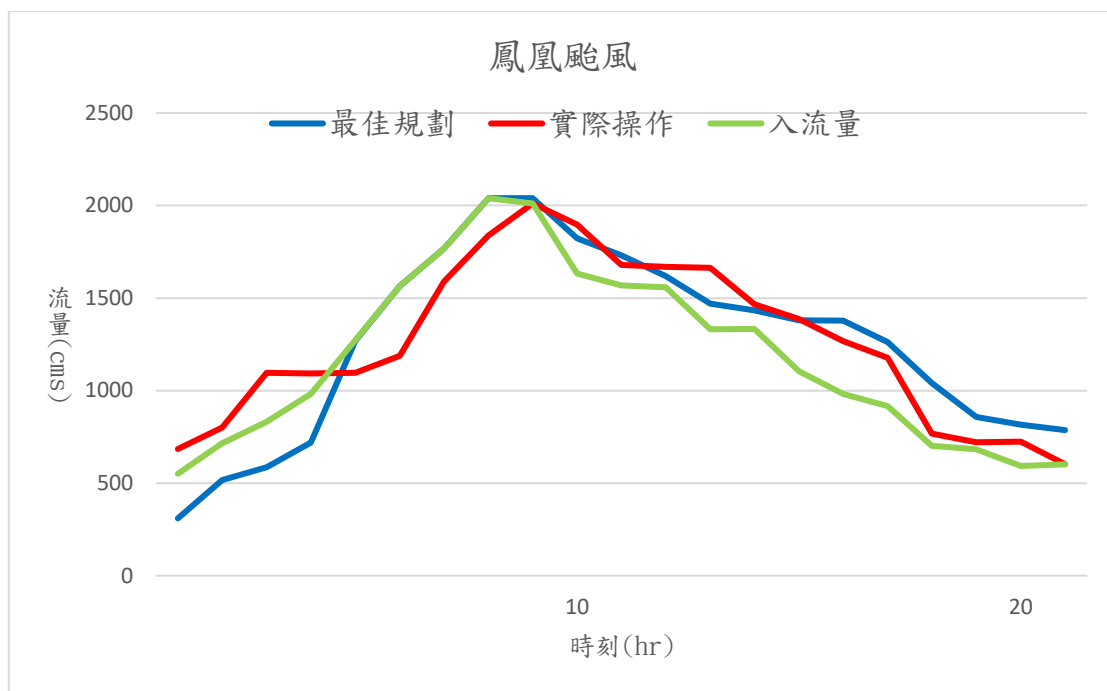


圖 3-35 放流量及入流量之比較(鳳凰颱風)

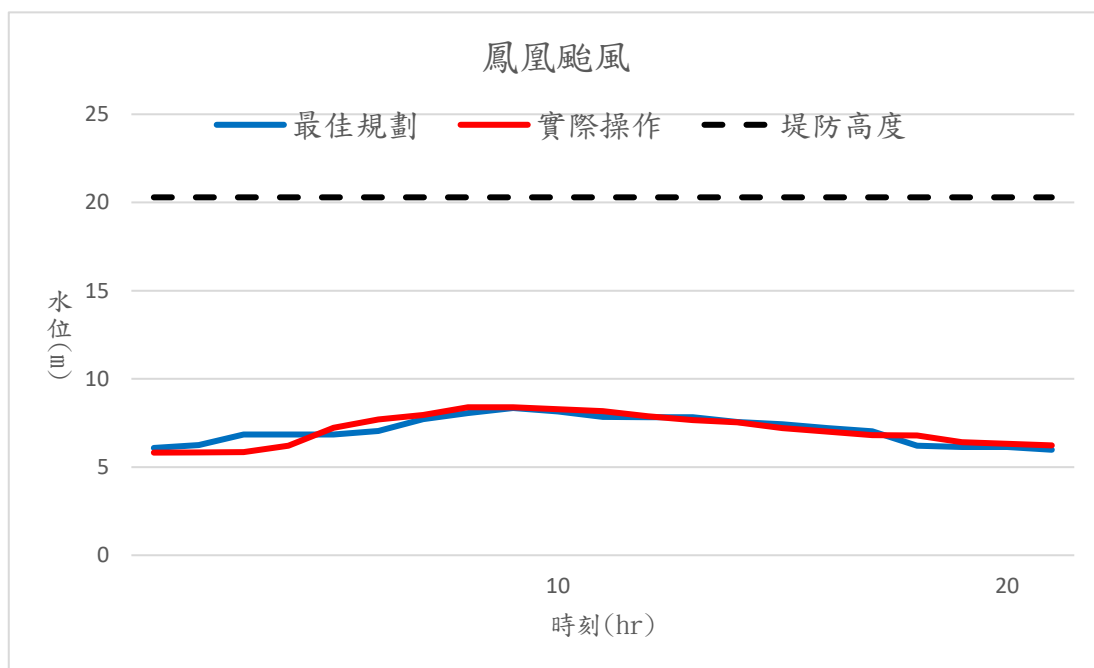


圖 3-36 下游河道水位之結果比較(鳳凰颱風)

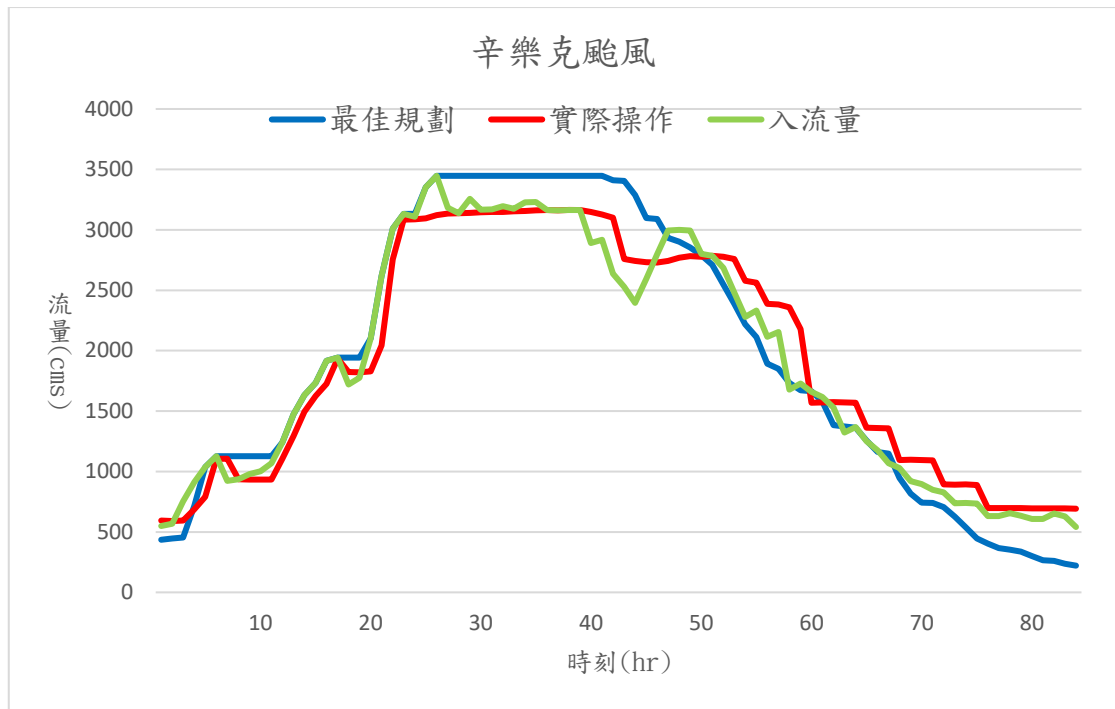


圖 3-37 放流量及入流量之比較(辛樂克颱風)

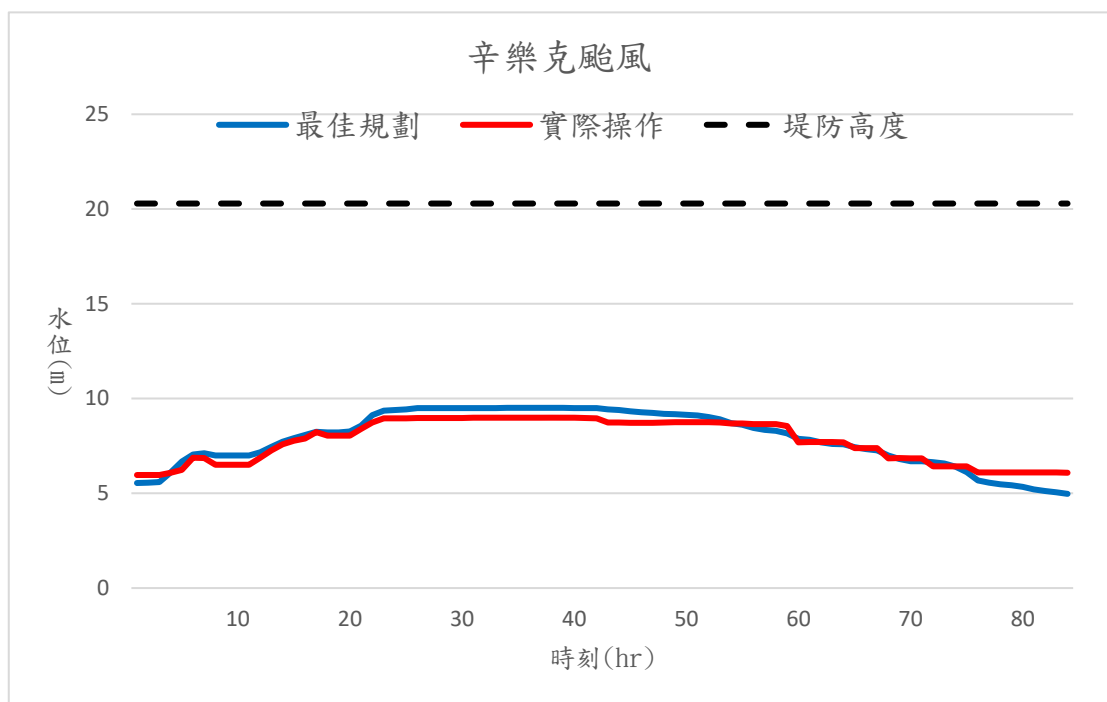


圖 3-38 下游河道水位之結果比較(辛樂克颱風)

(二)減淤項

茲比較鳳凰、辛樂克及薔蜜三場颱風事件下石門水庫最佳防洪減淤操作與實際操作後之放流量對水庫排砂效益之差異，

分析結果示如圖 3-39~圖 3-47。

就薔蜜颱風而言，最佳防洪減淤操作和實際操作之趨勢相同，最佳操作最大放流量達 3291.99 cms，最高洪水位為 9.45m，實際操作最大放流量 3105.19cms，最高洪水位為 8.96m，由於下游堤防高度為 20m，仍符合下游防洪要求。另外於洪峰發生前，最佳防洪減淤操作放流量增量明顯高於實際操作；洪峰發生後最佳防洪減淤操作放流量遞減量明顯低於實際操作。

就薔蜜颱風而言，排洪隧道的部分，實際操作排砂量 14.43 萬噸優於最佳規劃排砂量 11.99 萬噸，排砂鋼管及溢洪道部分，最佳規劃排砂量(44.11 萬噸+9.36 萬噸)優於實際操作排砂量(26.84 萬噸+6.81 萬噸)。

就鳳凰颱風而言，排洪隧道的部分，實際操作排砂量 7.56 萬噸優於最佳規劃排砂量 6.70 萬噸，排砂鋼管及溢洪道部分，最佳規劃排砂量(30.77 萬噸+0.94 萬噸)優於實際操作排砂量(19.17 萬噸+0.89 萬噸)。

就辛樂克颱風而言，排洪隧道的部分，實際操作排砂量 91.82 萬噸優於最佳規劃排砂量 59.71 萬噸，排砂鋼管及溢洪道部分，最佳規劃排砂量(156.26 萬噸+58.92 萬噸)優於實際操作排砂量(19.17 萬噸+16.37 萬噸)。

綜合前述，最佳規劃傾向增加排砂鋼管及溢洪道排砂量，降低排洪隧道排砂量，為探討為何有此趨勢，本計畫增加計算各設施之砂水比，砂水比是指排砂量與排洪量之比值，可用以

表示排水設施排除一單位水量，可附帶排出幾單位的泥砂量，此數值越高，代表排砂效率越好。各項排水設施累積排砂量與砂水比分析結果示如表 3- 25，可發現砂水比以排砂鋼管優於溢洪道優於排洪隧道，因此最佳規劃傾向優先由排砂鋼管排砂，溢洪道次之，排洪隧道最後。然溢洪道僅能排除水位高於溢洪道高程之水量，對於流量較小之颱風，水庫水位達到溢洪道高程之延時並不長，因此溢洪道累積排砂量遠小於排洪隧道累積排砂量；但若遇洪峰量較大之颱風，水庫水位達到溢洪道高程之延時增長，因此溢洪道累積排砂量將接近於排洪隧道累積排砂量。

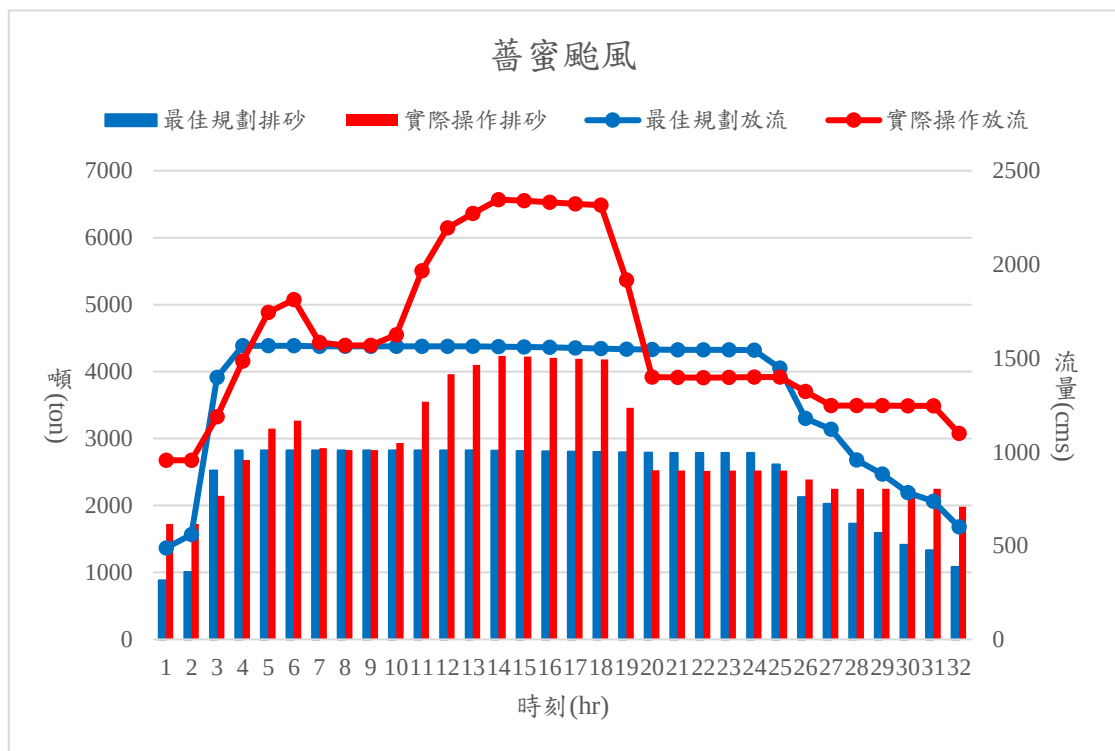


圖 3-39 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(薔蜜颱風)

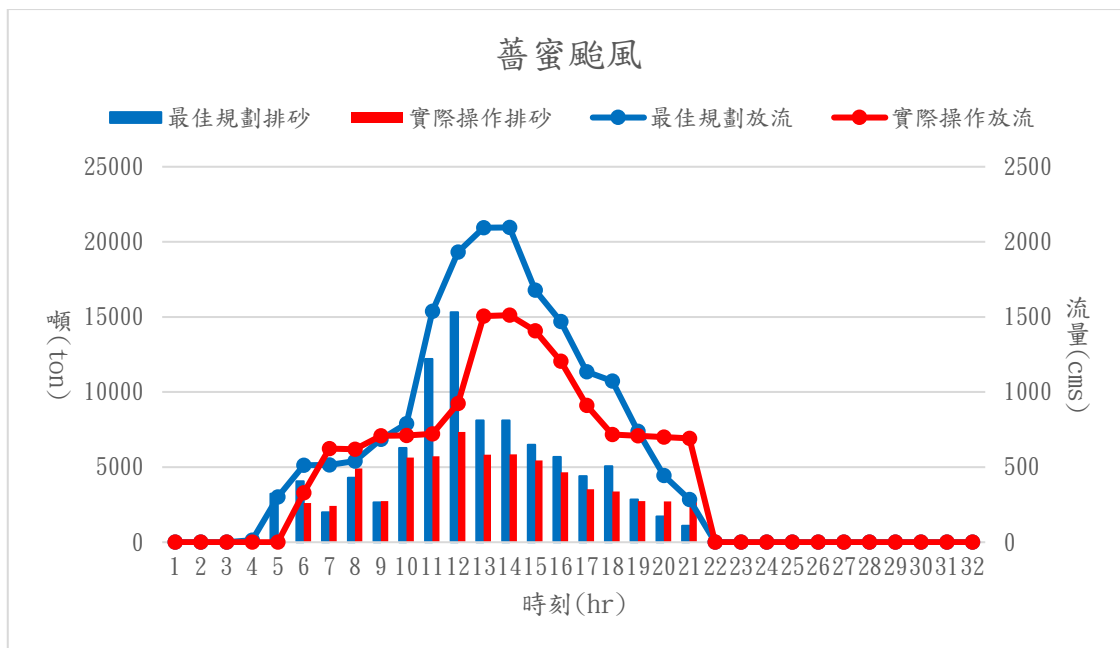


圖 3-40 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(舊蜜颱風)

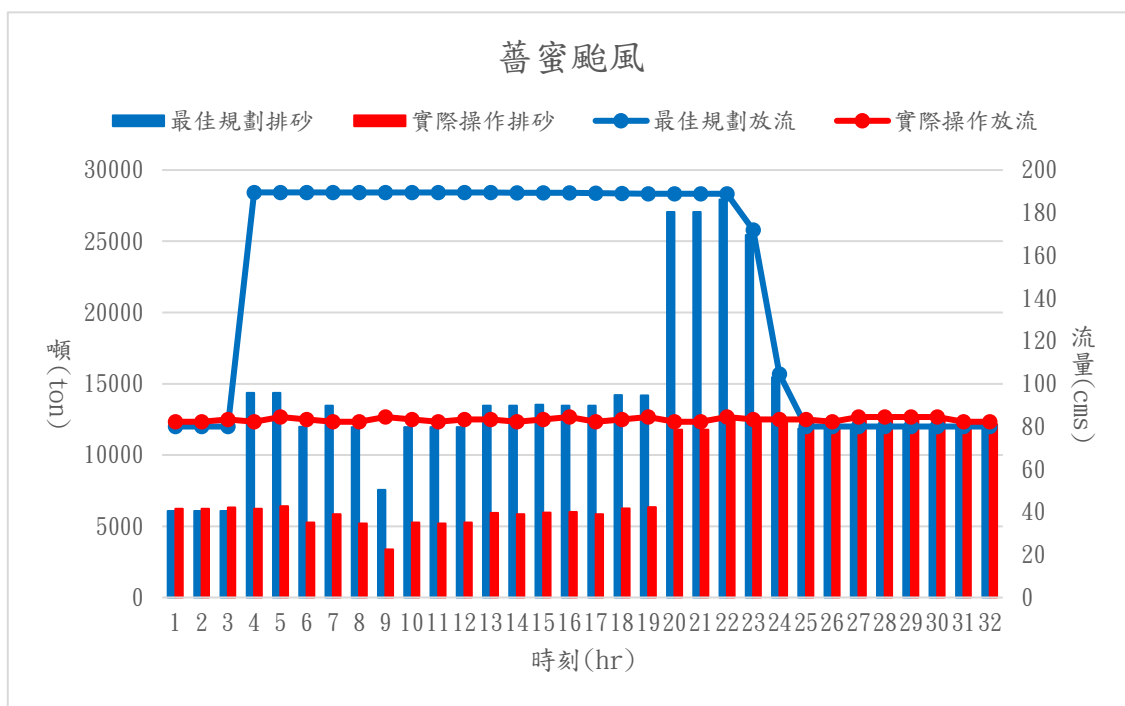


圖 3-41 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(舊蜜颱風)

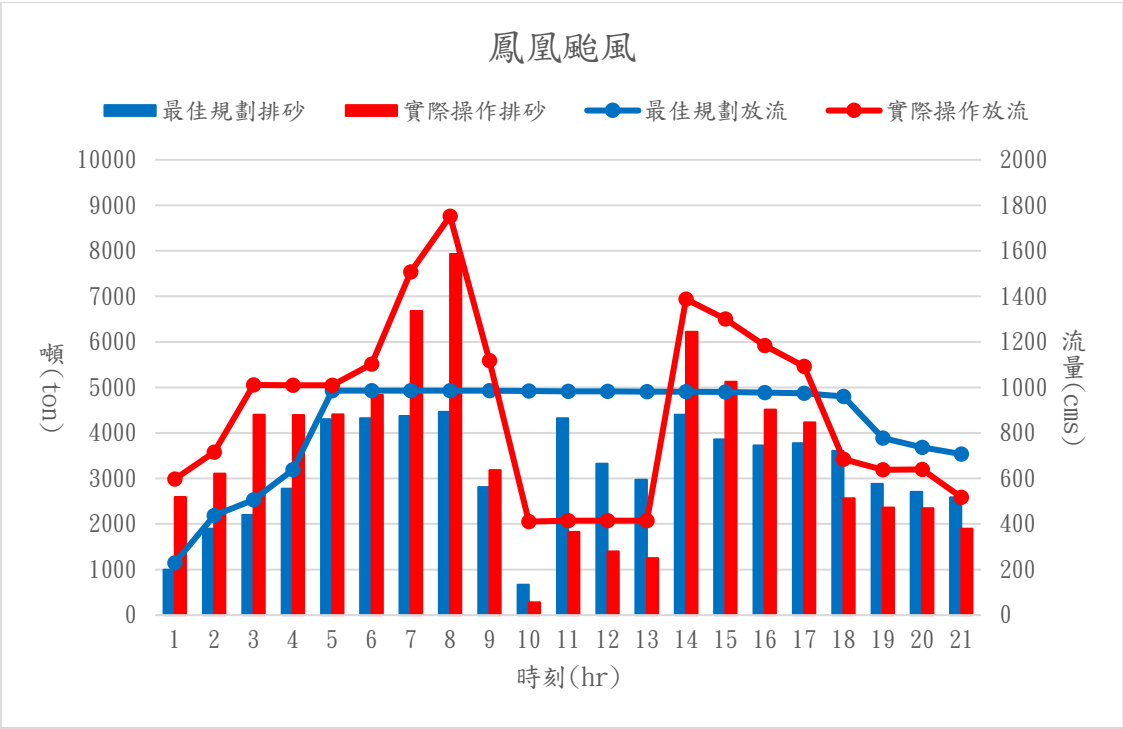


圖 3-42 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)

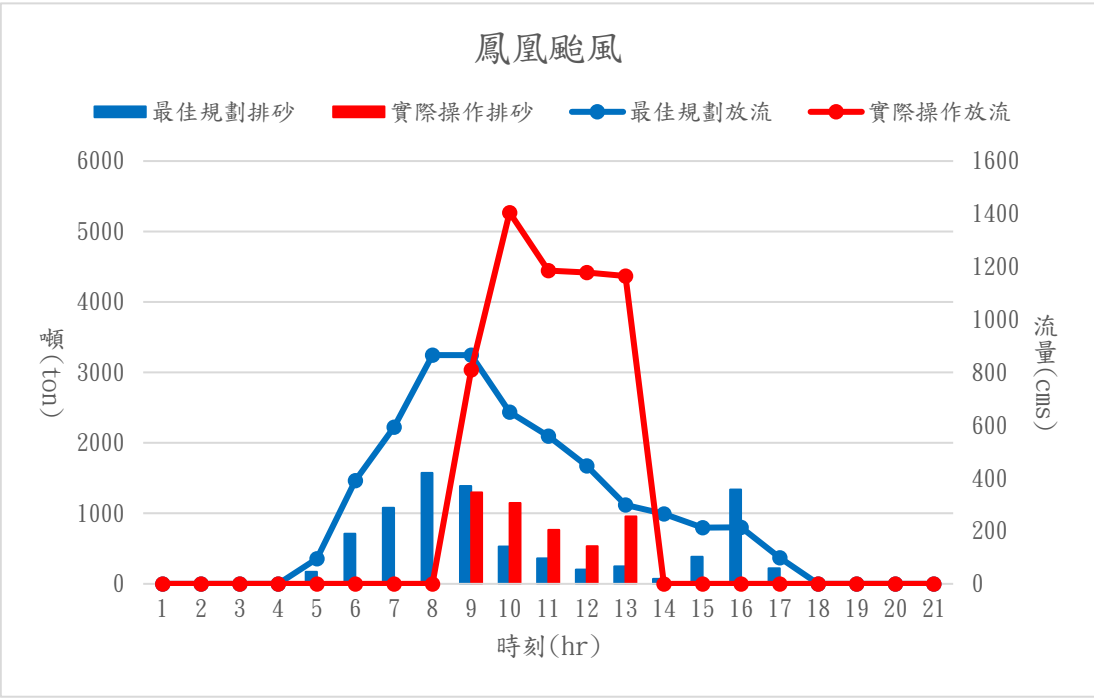


圖 3-43 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)

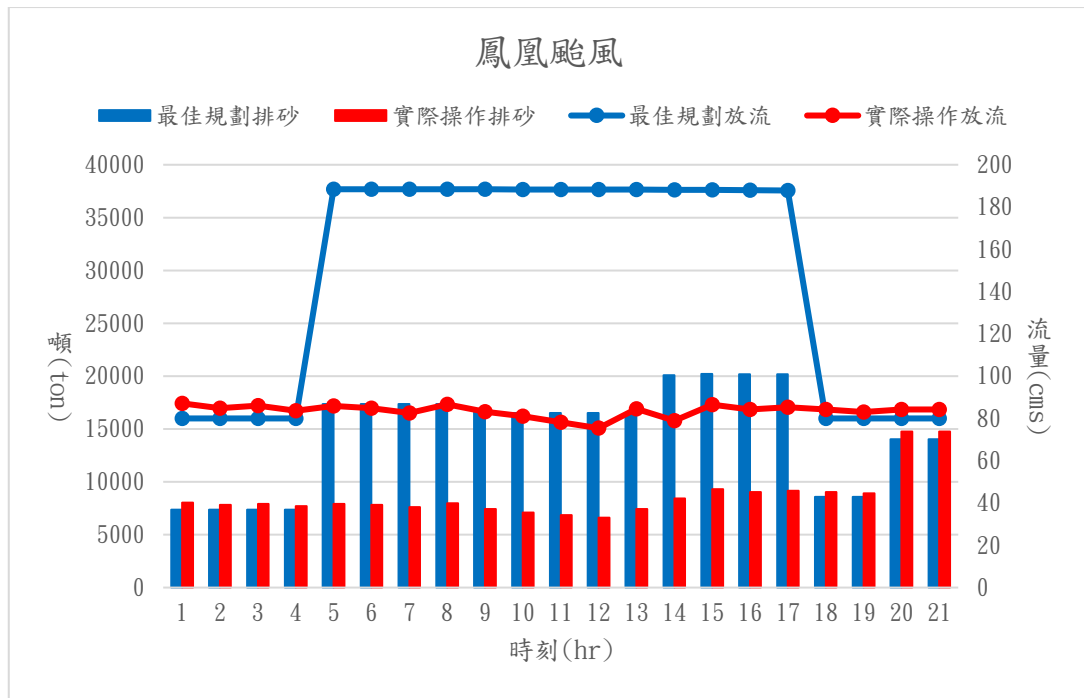


圖 3-44 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(鳳凰颱風)

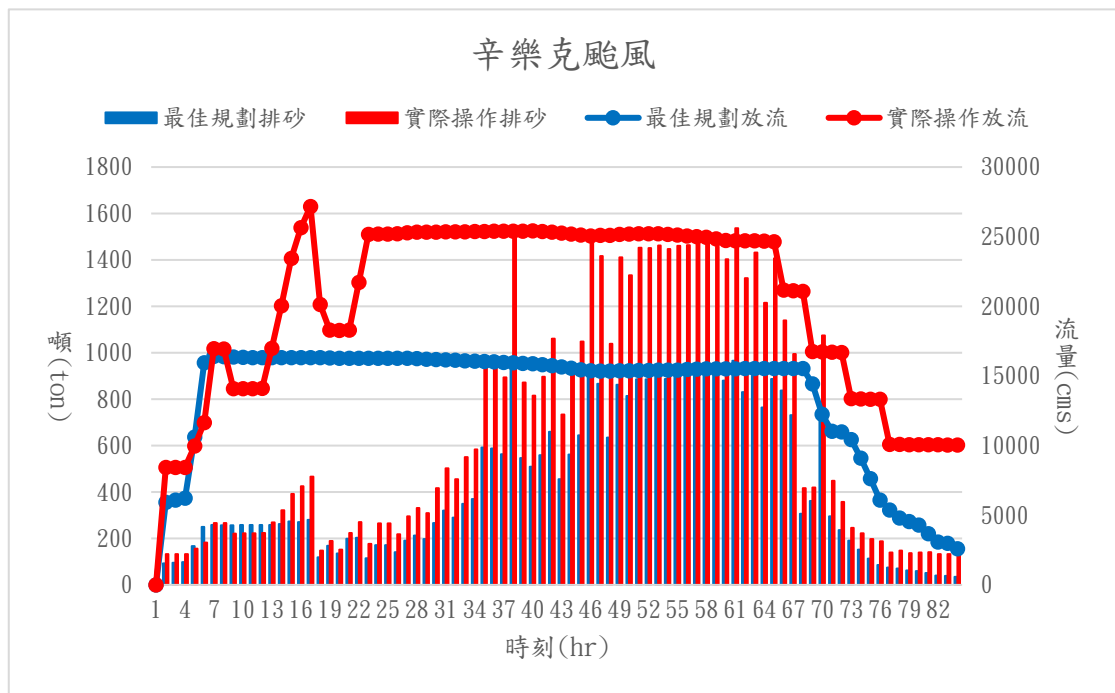


圖 3-45 排洪隧道排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)

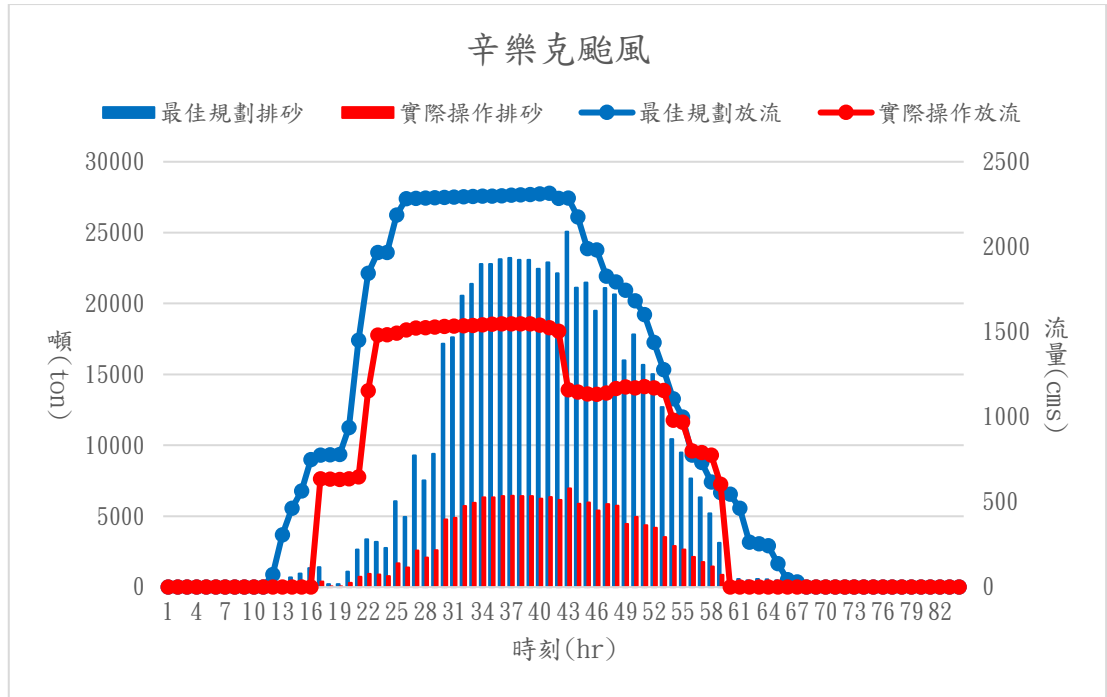


圖 3-46 溢洪道排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)

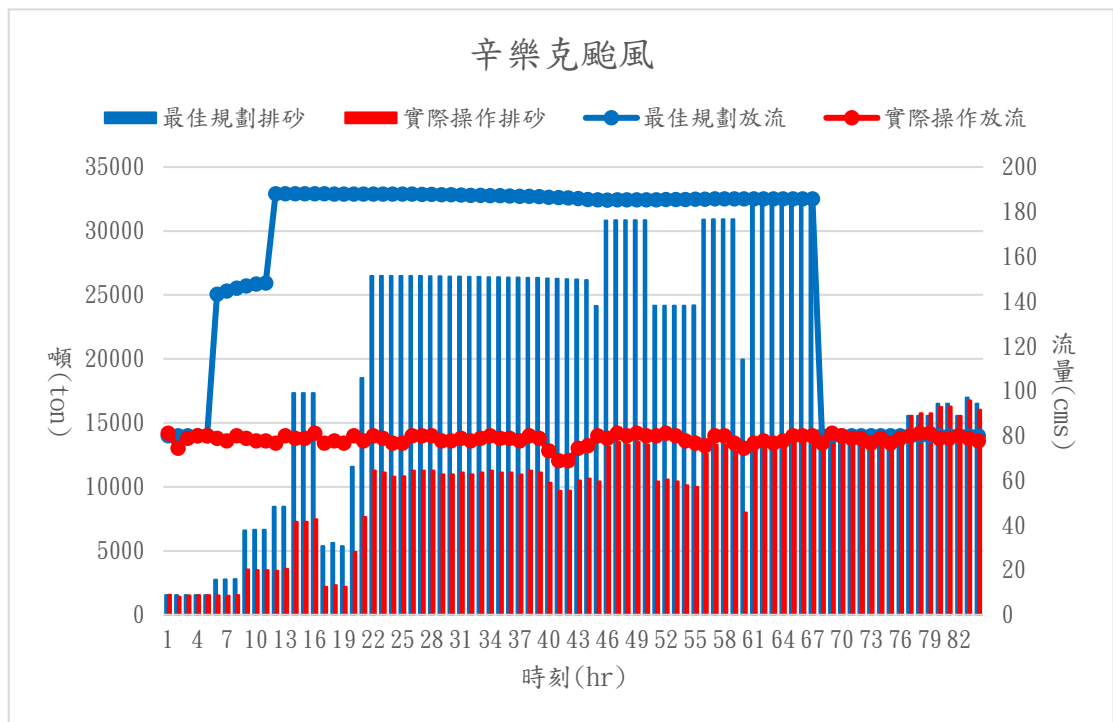


圖 3-47 排砂鋼管排砂量與流量歷程之結果比較(辛樂克颱風)

表 3- 25 放流設施最佳規劃之排砂效率比較一覽表

		排洪隧道	溢洪道	排砂鋼管
薔蜜颱風	累積排砂量(萬噸)	11.99	9.36	44.11
	砂水比(kg/m ³)	0.0012	0.0014	0.0331
鳳凰颱風	累積排砂量(萬噸)	6.69	0.93	30.77
	砂水比(kg/m ³)	0.0010	0.004	0.0276
辛樂克颱風	累積排砂量(萬噸)	59.7	58.92	156.26
	砂水比(kg/m ³)	0.0024	0.002	0.0257

第五節 研擬因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略

本計畫以降低水庫淤砂量為目標，研擬石門水庫集水區因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略，提出土地使用管理與防災監測、山坡地保育治理、石門水庫防淤隧道工程計畫-阿姆坪隧道及大灣坪隧道等四個調適策略，並利用多準則排序評估法評估調適方案執行優先順序。

石門水庫治山、防洪、排淤調適策略成對比較矩陣與多準則評估排序結果詳見表 3-27 及表 3-28。就效用而言，山坡地保育治理直接針對野溪及崩塌地等土砂源頭進行治理，其效用最佳，後續依次為大灣坪防淤隧道、阿姆坪隧道、土地使用管理與防災監測；就永續性而言，土地使用管理與防災監測屬於非工程方案，永續性最佳，後續依次為山坡地保育、阿姆坪隧道及大灣坪防淤隧道；就可行性而言，山坡地保育治理為水保局積極動動項目，可行最高，後續依次為土地使用管理與防災監測、阿姆坪隧道及大灣坪防淤隧道；就即時性而言，土地使用管理與防災監測透過調查及取締進行土地使用管制，即時性最高，後續依次為山坡地保育治理、阿姆坪隧道及大灣坪防淤隧道。根據前述進行成對矩陣比較，計算各調適方案各指標下之總得分，分析結果詳見表 3-28，建議調適方案執行優先順序依次為山坡地保育治理、土地使用管理與防災監測、阿姆坪隧道及大灣坪防淤隧道。

表 3- 26 石門水庫治山、防洪、排淤調適方案

調適方案	方案說明	預期效益
土地使用管理與防災監測	辦理山坡地土地可利用限度調查，加強山坡地違規案件取締及移送法辦執行及劃定公告地區特定水土保持區範圍及公告管制事項等管理措施	每年預計防治土砂產生量約 350 萬立方公尺，山坡地治理範圍面積約 21,000ha
山坡地保育治理	野溪處理及崩塌地處理	
石門水庫防淤隧道工程計畫-阿姆坪隧道	阿姆坪隧道以運砂及抽砂兼沖淤通道為主，沖淤設計流量 600 秒立方公尺，進水口約位於水庫河道斷面 19，隧道路線以直線往西北，通過湍子溝溪懷德橋下游溪谷下方，出水口位於台 4 線 35k 附近下方，其後利用 10、11 及 12 號沉澱池設置沖淤池 1 座，並延伸至大漢溪。	預估年清淤疏濬量約可達 64 萬立方公尺，並增加水庫排洪 600 秒立方公尺
石門水庫防淤隧道工程計畫-大灣坪防淤隧道	興建大灣坪防淤隧道計畫，大灣坪隧道以水力排砂為主，防淤設計流量 1,600 秒立方公尺，進水口位於水庫河道斷面 12 下游約 240 公尺，隧道路線往西轉為西北，豎井閘門設置於環湖公路旁，出水口位於後池邊坡。主要利用隧道前端之象鼻引水鋼管，經由豎井內之閘門控制，將水庫底層高濁度之渾水導入後池，以減少庫區淤積。	預估年清淤疏濬量約可達 71 萬立方公尺，並增加 1,600 秒立方公尺

表 3- 27 石門水庫治山、防洪、排淤調適方案成對比較矩陣表

評估指標	比較矩陣	得分				
		土地使用管理與防災監測	山坡地保育治理	阿姆坪隧道	大灣坪防淤隧道	總和
效用	土地使用管理與防災監測	X	0	0	0	0
	山坡地保育治理	1	X	1	1	3
	阿姆坪隧道	1	0	X	0	1
	大灣坪防淤隧道	1	0	1	X	2
永續性	土地使用管理與防災監測	X	1	1	1	3
	山坡地保育治理	0	X	1	1	2
	阿姆坪隧道	0	0	X	1	1
	大灣坪防淤隧道	0	0	0	X	0
可行性	土地使用管理與防災監測	X	0	1	1	2
	山坡地保育治理	1	X	1	1	3
	阿姆坪隧道	0	0	X	1	1
	大灣坪防淤隧道	0	0	0	X	0
即時性	土地使用管理與防災監測	X	1	1	1	3
	山坡地保育治理	0	X	1	1	2
	阿姆坪隧道	0	0	X	1	1
	大灣坪防淤隧道	0	0	0	X	0

表 3-28 石門水庫淤積防治調適方案成對比較矩陣表

調適方案	效用	永續性	可行性	即時性	總分
土地使用管理與 防災監測	0	3	2	3	8
山坡地保育治理	3	2	3	2	10
阿姆坪隧道	1	1	1	1	4
大灣坪防淤隧道	2	0	0	0	2

第四章 結論及建議

第一節 結論

一、本計畫利用MK檢定及MWP與KW檢定探討石門水庫集水區年雨量、豐水期雨量、枯水期雨量、年最大一日降雨量和年最大連續不降雨日數是否存在明顯變動趨勢或是顯著變異點，分析結果說明如下：

(一)MK 檢定結果顯示枯水期雨量及年最大連續不降雨日數並無顯著上升或變動趨勢；就年雨量而言，玉峰、高義、霞雲三站皆呈現顯著上升趨勢；就豐水期雨量而言，白石、石門、復興與霞雲四站皆呈現顯著上升趨勢；就年最大一日降雨量而言，石門、復興與鎮西堡三站皆呈現顯著上升趨勢。

(二)MWP 與 KW 檢定結果顯示枯水期雨量無顯著變異點；就年雨量而言，僅霞雲站有顯著變異點，變異點發生於 1995 年；就豐水期雨量而言，白石、石門、長興、復興及霞雲五站有顯著變異點，變異點分別發生於 1993、1997、1995、1995、1995 年；就年最大一日降雨量而言，石門、長興、復興、霞雲及鎮西堡五站有顯著變異點，變異點分別發生於 1995、1995、1995、1995、1993 年；就年最大連續不降雨日數而言，僅玉峰站有顯著變異點，變異點發生於 1990 年。

二、本計畫近未來(2020-2039)雨量估算於豐水期間採系集平均值加上一倍標準偏差，枯水期間採系集平均值減去一倍標準偏差，分析結果顯示有豐越豐，枯越枯之趨勢，其中2、4月雨量減少最多，7~9月雨量增加最多，顯示石門水庫未來可能趨向春雨減少、秋颱或暴雨增加之趨勢。

三、石門水庫土壤沖蝕量採用修正土壤沖蝕公式(MUSLE)估算，坡地崩塌採用崩塌判釋及打荻珠男經驗公式推估，石門水庫入庫土砂量由土壤沖蝕量加上坡地崩塌土砂量乘以土砂遞移率估算之，茲分析基期(1986-2005)與近未來(2020-2039)重現期100年最大一日暴雨之入庫土砂量，分析結果顯示近未來(2020-2039)入庫土砂量重現期100年最大一日暴雨之入庫土砂量為12807.45萬立方公尺，較基期增加23816.0568%入砂量。

四、本計畫整合遺傳演算法、水理模式及庫區泥沙模式，建立水庫防洪減淤操作最佳規劃模式，為降低最佳規劃模式計算量，以智慧演算法取代水理及庫區泥沙物理機制模式。分析成果顯示：

(一)最佳規劃遇到洪水量較大之颱風事件時，在符合下游防洪要求，傾向多放水，以排除庫區內之泥砂；但遇到洪水量較小之颱風事件時，由於流量小排砂效益不顯著，因此與現行操作較為相似。

(二)最佳規劃傾向優先由排砂鋼管排砂，溢洪道次之，排洪隧道最後。

(三)本計畫提出土地使用管理與防災監測、山坡地保育治理、石門水庫防淤隧道工程計畫-阿姆坪隧道及大灣坪隧道等四項因應氣候變遷之治山、防洪、排淤調適策略，透過多準則排序評估法建議方案執行優先順序。分析結果建議優先推動順序為山坡地保育治理、土地使用管理與防災監測、阿姆坪隧道及大灣坪防淤隧道。

第二節 建議

一、由於泥砂全洪水程觀測資料有限，目前僅以三場颱風作為庫區泥砂動態類神經之訓練案例，為避免受到觀測資料有限之限制，建議後續可建立水庫泥砂物理模型，透過物理模型產出更多樣性之訓練案例，再透過類神經建立學習模型，讓庫區泥砂動態類神經能有效反映不同流量區間之泥砂運移機制。

二、本計畫坡地崩塌與土壤沖蝕量是以單場事件進行分析，並透過遞移率估算水庫入砂量，然未入庫之泥砂，仍堆積於坡面或河道，造成土砂災害發生風險提高，因此建議後續可發展序率式崩塌產量評估模式及動床輸砂模式，以評估坡面崩塌風險增高對崩塌量之影響以及河道沖淤變化對於河道輸砂量之影響。

三、石門水庫最佳防洪減淤操作是由最佳規劃模式依據颱風事件之入流與入砂條件優選得到每個時刻之放流量與排砂量，若無法歸納出可供操作人員具以操作之規則，將不易落實於防洪即時操作。建議後續可透過決策樹等人工智慧方法，建立可據以執行之操作規則，並配合流量即時預測，以提供水庫從業人員防洪即時操作之準則

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局，2016，104 年石門水庫集水區執行成效追蹤。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2016，石門水庫垂直分層泥砂濃度監測技術研發及現場測試評估。
3. 經濟部水利署水利規劃研究所，2016，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(1-2)。
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2013，淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫(2/2)。
5. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2012，淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫(1/2)。
6. 陳樹群、陳少謙、吳俊銘，2012，南投縣神木村集水區崩塌特性分析」，中華水土保持學報，第 43 卷，第 3 期，第 214-226 頁。
7. 邱彥璋、吳翌禎，2010，4D 動態模擬應用於工作空間衝突分析之研究，第十四屆營建工程與管理學術研討會論文集。
8. 吳翌禎、謝尚賢，2008，4D 營建管理系統之現況分析與發展趨勢，營建管理季刊，第 74 期，第 23-34 頁。
9. 經濟部水利署，2007，石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評

估研究 (2/3)。

10. 經濟部水利署，2006，石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究 (1/3)。
11. 呂明娟，2006，建築結構工程 4D 模擬系統之研究，國立台灣大學碩士論文。
12. 陳樹群、賴益成，2004，水庫集水區土砂評量與整治率評估模式，中華水土保持學報，第 35 卷，第 1 期，第 53-67 頁。
13. 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明，1998，本土化土壤沖蝕指標模式之建立，中華水土保持學報，第 29 卷，第 3 期，第 233-247 頁。
14. 楊世清、李華寧、張錦章，1992，營建專業管理，台北斯坦出版有限公司，316 頁。
15. 打荻珠男，1971，ひと雨よる山腹崩壊について，新砂防，通卷 79 号。
16. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks R., Liston, K., 2008, BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, Wiley, 504 Pages.
17. Heim A., 1932, Bergsturz und menschenleben. Frets und Wasmuth, Zurich, 218p.
18. Hunukumbura, P.B. and Tachikawa, Y., 2012, River discharge projection under climate change in the Chao Phraya River Basin.

- Journal of the Meteorological Society of Japan 90A: 137–150.
19. Kusunoki S. and Arakawa O., 2015, Are CMIP5 Models Better than CMIP3 Models in Simulating Precipitation over East Asia, *Journal of Climate*, Volume 28 No. 14, 5601-5621.
 20. Lin, C.Y., Lin, W.T., Chou, W.C., 2002, Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil Tillage Res.* 68, 143–152.
 21. Pettitt A.N., 1979, A non-parametric approach to the change-point problem, *Appl. Statist.*, 28, 126–135.
 22. Racsko, P., Szeidl, L., Semenov, M., 1991, A serial approach to local stochastic weather models. *Ecol Model* 57:27–41.
 23. Richardson, C.W., 1981, Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour Res* 17:182–190.
 24. Richardson, C.W. and Wright, D.A., 1984, WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, 83 pp.
 25. Roehl, J. W., 1962, Sediment Source Areas, Delivery Ratios and Influencing Morphological Factors, IAHS Publ., No. 59, Commission of Land Erosion, pp. 202-213.
 26. Vandre, B. C., 1985, Rudd Creek debris flow, Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazards in Utah, General Series Rep. UWRL/G-85/03, D. S. Bowles, ed., Utah Water Res. Lab., Utah State Univ., Logan, Utah, 117–131.
 27. Srikanthan, R. and T.A. McMahon, 2001, Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: a review *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5 (4), pp. 653-670.

28. Taylor, K., Stouffer R., Meehl G., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society 93: 485–498.
29. Vanoni, V.A., 1975, Sedimentation Engineering, Manual and Report, ASCE, No. 54, New York.
30. Wallis, T.W.R. and J.F. Griffiths, 1995, An Assessment of the Weather Generator (WXGEN) Used in the Erosion/Productivity Impact Calculator (EPIC). Agricultural and Forest Meteorology 73(1):115-133.
31. Williams, J.R. and Berndt, H.D., 1977, Sediment yield prediction based on watershed hydrology, Transactions Am. Soc. Agric. Eng., 20, pp. 1100-1104.
32. Wu, I.C. and Hsieh, S.H., 2007, Transformation from IFC Data Model to GML Data Model: Methodology and Tool Development, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 30, No. 6, pp. 1085-1090.
33. Wu, I.C. and Hsieh, S.H., 2008, VisPMIS: A Visual Project Management Information System, Proceedings of the 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, November 19-21th, Taipei, Taiwan.
34. Zhang, X.C. and Garbrecht, J.D., 2003, Evaluation of CLIGEN precipitation parameters and their implications on WEPP runoff and erosion prediction, Trans. ASAE, 46 (2), pp. 311-320

附錄

附錄一 期末審查意見回覆

審查意見	意見回覆
1. 請增列摘要、工作時程表。	1.感謝委員意見，業已補充摘要請詳 PI-II，另因本計畫已完成所有工作項目，因此以工作項目檢核表取代工作時程表，工作檢核表淺詳附錄二。
2. 宜列檢核表，檢核工作項目、數量期程是否符合契約規定。	2.感謝委員意見，業已增補檢核表，目前完成工作項目與數量符合契約規定，請詳附錄二。
3. P.3-11 表 3-2，103m ³ 請修正為 10 ³ m ³ 。	3.感謝委員意見，已修正誤植處，請詳表 3-2(P3-11~P3-12)。
4. P.3-14，內文和表 3-3 不符	4.感謝委員意見，內文為誤植，已修正誤植處，請詳 P3-13。
5. P.3-52，溢洪道 82.76 萬噸和表 3-24 中 58.92 萬噸不符。	5.感謝委員意見，82.76 萬噸為誤植，已於文中修正，請詳 P3-56。
6. 本研究較多集中於防洪排淤方式的選擇與評估，多屬水利工程範疇，後續如有再執行，應朝上游集水區處理的重點來討論。	6.感謝委員意見，後續將以上游集水區處理為重點進行進行研提。
7. P.3-13 所示累積淤積量用平均斜率來看年度淤積仍漸增，並非降低。	7.感謝委員意見，由於受到氣候變遷影響，極端降兩次數增加，因此就年累積淤積量確實呈現漸增趨勢，而本文所提的”淤積量降低”是指因為近年來水庫集水區治理成效及水庫排砂設施發揮效率，”單場事件”造成的水庫淤積量有顯著降低，已修正相關文字說明以避免讀者誤解，請詳 P3-10。
8. 入庫土砂量的計算在 P.3-38 中遞移率差異很大，如此計算缺具體的意義，顯示多餘的部份跑去	8.感謝委員意見，未入庫之土砂確實會堆積於坡面或河道，造成土砂災害發生風險提高，因此本計畫建

審查意見	意見回覆
那裡，應為沿河道淤積，長遠來看應會入庫。	議後續可發展序率式崩塌產量評估模式及動床輸砂模式，以評估坡面崩塌風險增高對崩塌量之影響以及河道沖淤變化對於河道輸砂量之影響。相關建議請詳第四章第二節。
9. P.1-3 之計畫目標五(建立調適指標以作為調適方案決策參考及監控調適方案績效評估之參考)之討論較少，建議補充。	9.感謝委員意見，業已補充調適策略研擬，請詳第三章第五節。
10. 因為集水區的土砂運移有遞移的情形，因此上游的崩塌土石不會立即進到水庫，因此取得颱風的降雨量與崩塌地的變遷可瞭解水庫集水區的耐受力與恢復能力，對未來的治理策略的研擬非常重要。	11.感謝委員意見，本計畫利用打荻珠男經驗公式探討基期及近未重現期 100 年雨量下，崩塌地變化，以了解水庫集水區的耐受力與恢復能力。相關成果詳見第三章第三節第一小截。
12. 類神經網路應有測試案例，以瞭解其準確性。	11.感謝委員意見，類神經網路業已分為訓練與測試案例進行分析，河川水位類神經以 1000cms~11500cms，每隔 100cms 取一筆流量，共 106 場作為訓練案例，以辛樂克、鳳凰與薔蜜颱風三場台中之連續流量資料作為驗證案例，相關成果詳見第三章第四節第一小節。庫區泥砂運移類神經模式以辛樂克、薔蜜、鳳凰颱風三場颱風歷程的前 2/3 時間訓練案例，後 1/3 時間作為驗證案例，相關成果詳見第三章第四節第二小節。

附錄二 工項完成進度自我檢核表

合約工項		對應 章節	<u>各別工項應完成 進度</u> 各別工項總進度	<u>各別工項實際完 成進度</u> 各別工項總進度
一、基本資料蒐集與調查		3-1	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
二、水文氣象變異分析	1.區域水文氣候因子變動趨勢分析	2-1-1 3-2-1	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	2.區域氣候空間與時間降尺度分析	2-1-2 3-2-2	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
三、水庫集水區土石崩塌與沖蝕評估		2-2 3-3	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
四、水庫防洪減淤操作 最佳規劃模式之發展	1. 建立下游河道水理類神經網路	2-3 3-4-1	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	2. 建立庫區泥沙類神經網路	2-3 3-4-2	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	3. 建立水庫防洪減淤操作最佳規劃模式	2-3 3-4-3	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
五、研擬因應氣候變遷之治 山、防洪、排淤調適策略	1. 治山、防洪、排淤調適策略研擬	2-4 4-5	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	2.調適方案執行優先順序建議	2-4 4-5	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$