

因應氣候變遷水源設施脆弱度盤查方法研究(2/3)

A Study on Vulnerability Assessment of Water Supply Facilities under Climate Change (2/3)

主管單位：經濟部水利署水利規劃試驗所

游保杉¹

陳昭銘²

楊道昌¹

Yu, Pao-Shan¹

Chen, Jau-Ming¹

Yang, Tao-Chang¹

吳演聲³

蕭玲鳳⁴

Wu, Yean-Seng

Hsiao, Ling-Feng

¹ 國立成功大學水利暨海洋科學系

² 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技系

³ 中興工程顧問股份有限公司

⁴ 台灣颱風洪水研究中心

摘要

為因應台灣地區因氣候變遷所引發暴雨洪流，造成水源設施重大破壞而導致災害。本計畫目的擬以三年為期程，研究氣候變遷影響下可能最大降雨、流量的改變，並研擬評估水源設施脆弱度盤查的方法，以確實掌握氣候變遷下水源設施面臨的風險。

本年度計畫藉由去(103)年度所蒐集相關方法、理論、與初步評析模式之結果，進一步精進與建置模式推估因氣候變遷影響下可能最大降雨與流量、並與國內常用的颱風模式法之結果比較，進而研提氣候變遷影響下，可能最大降雨與流量的推估方法，以翡翠水庫、石門水庫、鯉魚潭水庫，與曾文水庫為例模擬氣候變遷造成之影響。另外擬蒐集國內外水源設施脆弱度評估與盤查方式、綜整氣候變遷對水源設施之影響因子、初研水庫與攔河堰的脆弱度指標與分級標準。工作項目及內容共計六項，包含(1)可能最大降雨、流量推估方法適用性評估：分別針對氣候變遷之有無，評析可能最大降雨、流量推估方式、理論之適用性並提出建議。(2)可能最大降雨、流量推估模式建置：針對氣候變遷影響之有無，建置可能最大降雨、流量推估模式。(3)案例分析：以翡翠水庫、石門水庫、鯉魚潭水庫，與曾文水庫為例，進行氣候變遷影響下可能最大降雨、流量模擬推估，並與國內常用颱風模式法之結果比較。(4)水源設施脆弱度盤查方法與成果蒐集：蒐集國內外(近5年以上)水源設施脆弱度盤查相關方法、成果與因應氣候變遷之修正方式等相關文獻。(5)脆弱度指標與分級標準初研：初步研擬水源設施脆弱度之定義、指標與分級標準，並召開專家會議進行討論。(6)工作簡報及報告編印：期初、期中、期末簡報及不定期工作會報與報告編印。

關鍵詞：氣候變遷、PMP、PMF、脆弱度盤查

Abstract

Serious floods may occur frequently under climate change and destroy the water supply facilities to cause tremendous disasters. In order to cope with the aforementioned problem in Taiwan, this three-year-period project aims to investigate the probable maximum precipitation (PMP), the probable maximum flood (PMF), and vulnerabilities of water-supply facilities under climate change scenarios for grasping the damage risk of water supply facilities in the future. The second-year project (The project of this year) aims to improve the proposed PMP and PMF models which consider the combined effect of typhoon and monsoon for PMP and PMF estimations under climate change scenarios. Four reservoirs, i.e., Fei-Tsui, Shih-Men, Li-Yu-Tan, and Tseng-Wen, are chosen as the study areas. Besides, the project of this year collected the literature on vulnerability assessment for water-supply facilities, investigated the impact factors of climate change on water-supply facilities, and preliminarily designed the vulnerability indexes and grade scales for reservoirs and dams. The work items of this year include: (1) Applicability Evaluation of PMP and PMF Methods, (2) Model Development for PMP and PMF Estimation, (3) Case Studies, (4) Literature Collection on Vulnerability Assessment of Water Supply Facilities, (5) Design of Vulnerability Indexes and Grade Scales for Reservoirs and Dams, and (6) Oral Presentation and Edition of Preliminary, Mid-term, and Final Project Reports.

Keywords: Climate Change, Probable Maximum Precipitation, Probable Maximum Flood, The Vulnerability Assessment.

一、前言

根據國際氣候變遷跨政府組織(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)報告指出全球溫度有上升趨勢，而全球暖化的現象導致極端事件更為頻繁發生；台灣本就位於高風險地區，對於氣候變遷之衝擊更是需要審慎因應，因此有必要針對因應氣候變遷影響下可能引發的極端暴雨與洪流，甚至可能造成水源設施嚴重損壞而導致災害之情況，進行深入之分析與探討，以提供決策單位規劃及研擬調適策略之參考。

為此，本計畫以三年(103~105年)為期程，研究氣候變遷影響下可能最大降雨、流量的改變，並研擬評估水源設施脆弱度盤查的方法，以確實掌握氣候變遷下水源設施面臨的風險。

二、研究地區與研究方法

2.1 研究地區

本計畫以曾文水庫、鯉魚潭水庫、石門水庫與翡翠水庫為例，進行計畫研提工作項目之案例分析。茲將四個水庫集水區之地理位置分布標示於圖1。

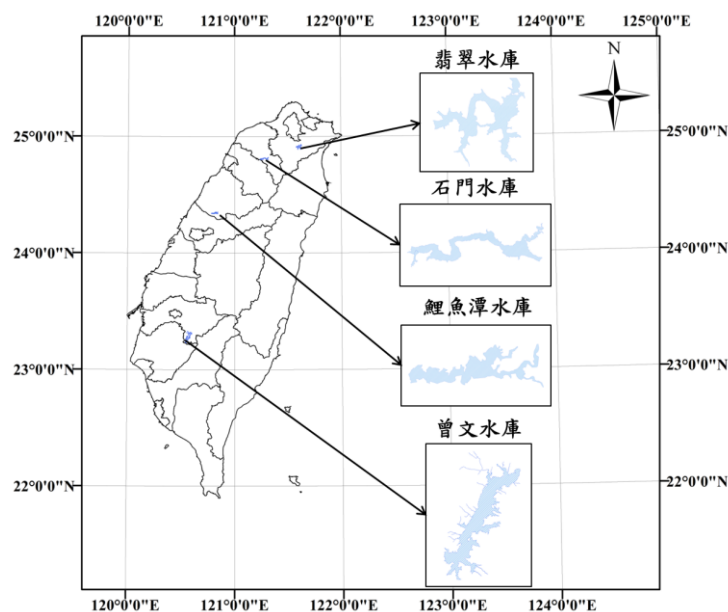


圖 1、案例水庫水庫之地理位置分布圖

2.2 研究方法

藉由第一年度計畫執行之經驗與成果，本年度計畫進一步針對PMP與PMF進行不同面向之適用性評估，期望能透過PMP及PMF在國內外研究基礎下，結合本計畫之議題，評估並建置最適合之推估方法。

2.2.1 可能最大降雨、流量推估方法適用性評估

透過國內外PMP推估相關文獻蒐集，整理適合應用於台灣且可於氣候變遷影響下做延伸之方法，分別為：暴雨移置法、露點調整法、概化法(颱風模式法)及天氣數

值模式法。而PMF推估方法則有單位歷線相關方法(單位歷線法、三角單位歷線法、無因次單位歷線法、瞬時單位歷線法)及概念模式(貯蓄函數法、水筒模式、半分布並聯型線性水庫)等方法。

2.2.2.1PMP推估方法

針對前述PMP方法透過不同面向(資料取得方便性、假設條件合理性、氣候變遷可延伸性、分析操作簡易性、模式物理機制周全性)進行適用性評估(表1)得知：由氣候變遷延伸性與模式物理機制周全性來看，以暴雨移置法、露點調整法及颱風模式法為基礎所發展之「暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法」，以及「颱風模式法結合季風降雨回歸法」較適合台灣之降雨特性。故後續建議以此二方法進行PMP推估模式建置。

表 1、PMP 推估方法之使用條件與適用性評估

PMP 推估方法名稱	資料取得方便性	假設條件合理性	氣候變遷可延伸性	分析操作簡易性	模式物理機制周全性	總結
暴雨移置與露點調整法	高	合理	高	低	高	-
颱風模式法	高	合理	高	中	高	-
WMO 統計法	高	合理	低	中	低	-
最大包絡線法	高	合理	低	中	低	-
暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法	中	合理	高	低	高	建議
颱風模式法結合季風降雨回歸法	中	合理	高	中	高	建議

2.2.2.2PMF推估方法

針對前述PMF方法透過不同面向(模式複雜性、假設條件合理性、氣候變遷可延伸性)進行適用性評估(表2)得知：由模式複雜性來看，單位歷線相關方法較概念模式簡單、快速，且易推廣。但單位歷線相關方法中之三角形單位歷線法適用於未量測地點，且單位歷線法於各延時間之轉換較為不易，而無因次單位歷線法易於轉換各降雨延時之單位歷線，故建議以無因次單位歷線法進行後續PMF推估模式之建置。

表 2、PMF 推估方法之適用性評估

項次	PMF 推估方法名稱	模式複雜性	假設條件合理性	氣候變遷可延伸性	總結
1	單位歷線法	低 ^{*1}	合理	可	-
2	三角單位歷線法	低 ^{*2}	合理	可	-
3	無因次單位歷線法	低 ^{*3}	合理	可	建議
4	貯蓄函數法	高	合理	可	-
5	水筒模式	高	合理	可	-
6	半分布並聯型線性水庫	高	合理	可	-
7	瞬時單位歷線法	中	合理	可	-

註*1：不易轉換不同降雨延時之單位歷線

*2：僅利用地文因子推估，適用於未量測地點

*3：易於轉換各降雨延時之單位歷線

2.2.2 可能最大降雨推估方法說明

依據前述適用性評估結果，並考量台灣水庫集水區地文條件與暴雨事件之長延時性，各水庫PMP推估係以暴雨移置與露點調整法以及颱風模式法，各別結合季風降雨回歸法進行複合性天氣系統PMP之推估。進而透過無因次單位歷線法將PMP轉換為PMF，作為水庫安全評估之依據。後續將針對上述之PMP推估方法進行說明。

2.2.2.1 暴雨移置與露點調整法

依據水文設計應用手冊[3]，暴雨移置與露點調整法係利用鄰近計畫流域地區之數場實測暴雨，以及利用降雨深度—面積—延時關係移位至計畫流域，做露點調整及屏障高度校正，推估可能最大降雨量。當採用此法時，應選擇三場以上，具代表性之實測暴雨事件分別推估。暴雨移置與露點調整法只適用於具有相同之氣象及地形因子之地區，如暴雨之來源、特性及走向等。

根據暴雨事件之地面代表露點推估水氣量，以等雨量線或降雨深度—延時—面積曲線求得暴雨深度，再配合暴雨之代表性露點與該地區該季節所能發生之最大露點，推求該地區之PMP，即為進行露點調整。亦即將以觀察到之雨量，因地形屏障、流域或地區高度及露點差異而乘以一組或數組調整係數，以估計PMP。將暴雨之可降水量(W_S)調整至最大可降水量(W_m)，其調整係數(r_m)為：

$$r_m = \frac{W_m}{W_S} \quad (1)$$

而當研究流域時常發生暴雨記錄不足之現象，若鄰近流域發生過特殊之暴雨，則可進行暴雨移置，將之移入研究流域以供應用。暴雨移置之步驟說明如后：

1. 適當季節理由均勻氣象帶中選取若干代表性暴雨，以供移置之用。流域中暴雨之深度、延時與通常情況下1000hPa之暴雨代表露點等資料均需利用。
2. 進行暴雨移置時，同時須考慮氣團之行徑。
3. 決定流域內1000hPa處所能發生之最高露點。
4. 計算校正因子，可由實際暴雨在原位置因受水氣障礙而獲得之可降水量，除以暴雨在新位置因受水氣之障礙而獲得之最大可降水量得之。

亦即，將鄰近流域之暴雨移置研究流域時，除露點調整外尚須考慮此二地區之高度差(暴雨流動方向之地形屏障高度)。

2.2.2.2 颱風模式法

依據水文設計應用手冊[3]，颱風模式法係模擬颱風所造成之由環流雨及地形雨而推估可能最大降雨量。將降水過程簡化，因此降水率可由地面露點、高度、進流與出流等物理參數表示，模式中亦包含氣流與水氣之連續方程式。颱風模式法係將某特定地區以空氣柱的概念作分層，其近地面雨量屬環流雨，850mb至550mb形成之降雨則以地形雨為主，550mb至更高層由於水氣量極少，對於地形雨估算影響不大故忽略不計。惟此推估方法用於較大面積流域上推求可能降雨量與降雨定量預報較為適合，而對於小面積流域上，因各參數之觀測不夠精密，效果則較為不理想，故不建議使用於小集水面積之集水區。

1. 環流雨

環流雨之估算公式可由水氣保守定律推演得之，假設颱風結構為一圓形對稱，並令 P_r 為兩個同心圓之平均降雨：

$$P_r = 2M \frac{r_2 U_2 - r_1 U_1}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{g} \int_{P_1}^{P_0} q dP \quad (3)$$

其中， M 為濕氣含量(單位面積水氣含量)； q 為潮濕空氣之比濕(specific humidity)； P 為氣壓； P_0 為計算環流雨時近地面之氣壓值，其值為 1000mb； P_1 為計算環流雨時高層之氣壓值，其值為 900mb； g 為重力加速度； U 為吹向颱風中心之分風(wind component toward typhoon center)； U_1 與 U_2 則分別為處吹向颱風中心之分風，根據實測風速 V 由下式計算而得：

$$U = V \cos \theta \quad (4)$$

式中 θ 為觀測點至颱風中心連線與風向間之夾角，通常以 70° 計。颱風中心距離與風速之關係可以下經驗式表示：

$$vr^{0.6} = \text{常數} \quad (5)$$

其中 r 為颱風之暴風半徑。

2.地形雨

地形雨之估算方法是將空氣層分為數層，並設 P_i 為第 i 層引起之降雨量：

$$P = \sum_i^n P_i \quad (6)$$

$$P_i = -\frac{0.622}{RT} \left(\frac{de}{dz} + \frac{eg}{RT} \right) V_z dz \quad (7)$$

其中， R 為空氣氣體常數(gas constant)； z 為高度； V_z 為平均垂直速度； e 為水氣壓(water vapor)。實際計算時可將空氣區分為850hPa以上、850-700hPa間、700-550hPa間及550hPa以下共四層，第一層高度低，第四層濕度不高，對地形雨之影響可忽略不計。上述平均垂直速度係自下式求算而得：

$$V_z = V \cos(\theta - \alpha) \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (8)$$

其中， $\frac{\Delta H}{\Delta x}$ 為迎風地形坡度； α 為測得之風向。計算過程中不考慮水氣輻散場的作用，故垂直速度若為負值，則降雨以零作計算。

3.調整係數

由於颱風模式法模擬出之雨量未必與實際發生雨量相符，為因應水庫集水區地形之特性，故模擬出之颱風降雨量需乘以集水區之調整係數以符合實際情況。其公式如下：

$$\text{調整係數} = \frac{\text{實際雨量}}{\text{地形雨雨量} + \text{環流雨雨量}} \quad (9)$$

2.2.2.3季風降雨迴歸法

台灣季風降雨系統可分為西南氣流與東北季風，依據本計畫第一年度執行成果[4]所發展之季風降雨迴歸法，利用影響季風降雨相關之兩個大氣變數：風速及可降水量，建立兩變數與季風降雨之關係式，以推估季風系統之PMP。西南氣流與東北季風降雨迴歸式之推估步驟概述如下。

1.決定季風顯著區域並計算區域內平均風速與平均可降水量

選取代表測站之逐日降雨量，及National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 之Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 的逐日風速及可降水量資料，計算代表測站降雨各別與NCEP CFSR風速及可降水量之相關係數，以選取相關係數較高者之區域為顯著區。同時計算區域內平均風速與平均可降水量。其中，分析西南氣流時係以阿里山測站作為代表測站；分析東北季風時則以宜蘭測站作為代表測站。

以分析西南氣流而言：選取1979~2010年5至8月發生之西南氣流事件，並以阿里山測站之逐日降雨量，及NCEP CFSR逐日風速及可降水量作為分析資料，推求阿里山站降雨各別與NCEP CFSR風速及可降水量之相關係數，以決定西南氣流顯著區之位置(圖2)。該場西南氣流事件之風速與可降水量，則以顯著區域內之風速與可降水量平均值作為後續計算使用。風速及可降水量後續分別簡稱為 uv 及 prw 。

以分析東北季風而言：選取1979~2010年發生之東北季風事件，並以宜蘭測站之逐日降雨量，及NCEP CFSR逐日uv及prw作為分析資料，推求宜蘭站降雨各別與NCEP CFSR uv及prw之相關係數，以決定東北季風顯著區之位置(圖2)。同時，該場東北季風事件之uv與prw，則以顯著區域內之uv與prw平均值作為後續計算使用。

2.建立季風降雨回歸式

將前述之季風(西南氣流與東北季風)事件，透過交叉驗證的方法，各別建立氣象站(如阿里山或宜蘭測站)降雨(P)與uv及prw之間之季風降雨回歸方程式，即 $P=f(uv, prw)$ 。透過F檢定後，再利用絕對百分比誤差及均方根誤差選擇最佳的回歸方程式。茲將西南氣流降雨回歸方程式(PHMS)與東北季風降雨回歸方程式(PHNM)呈列如下。

$$P_{HMS} = 0.907 \times uv \times prw - 199.21 \quad (10)$$

$$P_{HNM} = 0.122 \times uv \times prw + 96.46 \quad (11)$$

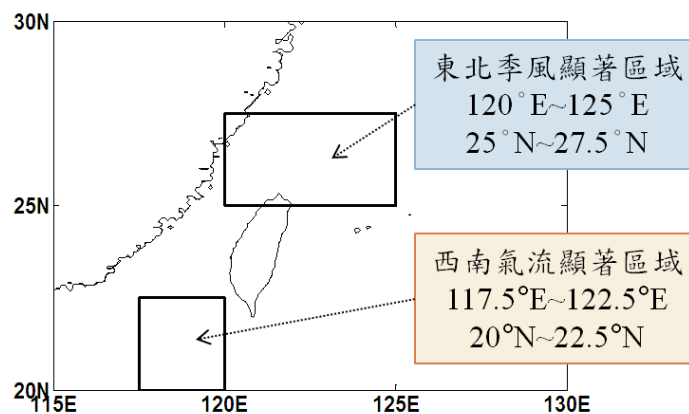


圖 2、季風降雨系統影響顯著區域

依據前述推估方法，本計畫利用暴雨移置與露點調整法以及颱風模式法進行颱風系統之最大降雨推估後，各別結合季風降雨回歸法進行季風系統之最大降雨推估，以建置複合性天氣系統PMP推估模式，即「暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法」及「颱風模式法結合季風降雨回歸法」。

2.2.3可能最大洪水推估方法說明

依據前述PMF適用性評估結果，本計畫PMP之推估成果將配合無因次單位歷線法為水文分析工具進行PMF之推估。無因次單位歷線法係以 $Q \times Ts / cms-D$ 為縱座標，其中Q為流量，單位為立方米/秒(cms)，Ts是指暴雨流量開始至逕流一半體積時之時間，單位為小時，cms-D為逕流總體積，單位為立方米/秒-日，以 $100 \times T / Ts$ 為橫座標。無因次單位歷線Ts及cms-D，受集水區水文特性之影響，不同測站有其不同的值。理論上，同一集水區之無因次單位歷線完全相同，因此可用以推算任何有效降雨延時的單位歷線，不受延時大小限制為其優點，因此計算各場次暴雨之無因次單位歷線，並平均之以求得平均無因次單位歷線，再以平均無因次單位歷線推求單位歷線，其方法步驟如下：

1. 選取某流量站歷年較大洪水歷線，減去河川基流量，計算其逕流總體積，求出暴雨流量開始至逕流一半體積時之時間 T_s (單位：小時)
2. 以 $100 \times T/T_s$ 為橫座標， $Q \times T_s / \text{cms-D}$ 為縱座標，將該站歷次無因次單位歷線平均，而求得平均無因次單位歷線。
3. 計算有效降雨歷時中心至直接逕流體積一半之稽延時間，依據水利局於民國 82 年經驗證後得到最佳方程式如下：

$$T_{slag} = \frac{A^{0.217}}{S^{0.111}} \quad (12)$$

計算 $T_s = (T_r/2) + T_{slag}$ ，本計畫有效降雨延時 T_r 取 1 小時。

4. 計算有效降雨 1cm，有效降雨延時 1 小時之。
5. 將平均無因次單位歷線之橫座標乘以 $T_s/100$ ，即可得時間 T ，縱座標乘以 $\text{cms-D}/T_s$ ，即可得流量 Q ，即得有效降雨延時 1 小時，有效降雨 1cm 之單位歷線。

三、研究成果

本文針對複合性天氣系統 PMP、PMF 推估模式建置、水源設施脆弱度盤查方法與成果蒐集、脆弱度指標與分級標準初研及案例分析進行成果概述。

3.1 複合性天氣系統 PMP、PMF 推估模式建置

「暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法」及「颱風模式法結合季風降雨回歸法」係分別以暴雨移置與露點調整法，及颱風模式法為基礎，並考量季風共伴效應所發展之複合性天氣系統 PMP 推估方法，應用上需針對其使用規範及相關參數進行檢核與敏感度測試，以得到應用於台灣水庫集水區時，較適當之參數設定值，進而建置 PMP 推估模式。而 PMF 模式則依前述 PMF 適用性評估成果之建議，係採無因次單位歷線法進行後續 PMF 推估模式之建置。茲將建置 PMP 及 PMF 模式分為四個工作子項：

1. 暴雨移置與露點調整法之檢核

針對暴雨移置與露點調整法於應用時，檢核暴雨移置之合理性以及不同代表延時之敏感度得知：暴雨中心發生於阿里山之颱風，較適合利用暴雨移置至曾文水庫推估其 PMP；暴雨中心發生於嘉義市區之颱風，較適合移置至鯉魚潭水庫推估其 PMP。代表性延時之挑選，建議應用於曾文與鯉魚潭水庫時，代表性延時以 24 小時進行 PMP 推估；應用於石門與翡翠水庫時則代表性延時以 12 小時進行 PMP 推估。

2. 颱風模式法影響因子敏感度測試

針對颱風模式法進行影響因子(七級風暴風半徑與風速、最大濕氣含量、水庫集水區有效坡度、調整係數)敏感度測試得知：七級風暴風半徑與風速，以及目標水庫有效坡度之敏感度最高，其次為調整係數。因此，於 PMP 推估時應謹慎估計前述因子之數值。綜整各水庫影響因子建議值並彙整如表 3。

表 3、各水庫颱風模式法影響因子設定建議值

水庫名稱	七級風暴風半徑(km)	風速(m/s)	濕氣含量(gm/cm ²)	有效坡度	調整係數
曾文	600	依七級風暴風半徑與第二節中式(5)推求	2.5	0.07	AVG(莎拉,碧利斯,辛樂克,蘇拉) =AVG(0.79,0.85,0.69,0.93)=0.81
石門	600		2.5	0.095	AVG(葛樂禮,貝絲,貝蒂,畢莉,辛樂克) =AVG(0.63,0.63,0.69,0.82,0.74)=0.70
翡翠	600		2.5	0.05	AVG(韋帕,辛樂克,蘇拉,蘇力,潭美) =AVG(0.81,0.83,0.63,0.36,0.53)=0.63

註：鯉魚潭水庫不適用颱風模式法故不予作設定值之建議

3.氣候變遷下複合性天氣系統PMP推估模式建置

利用前述暴雨移置與露點調整法及颱風模式法參數建議值之設定，並配合本計畫發展之季風降雨回歸式(西南氣流： $P_{HMS} = 0.907 \times uv \times prw - 199.21$ 、東北季風： $P_{HNM} = 0.122 \times uv \times prw + 96.46$ ； P_{HMS} 為西南氣流最大雨量，單位為mm/day； P_{HNM} 為東北季風最大雨量，單位為mm/day； uv 為風速，單位為m/s； prw 為可降水量，單位為mm)，以建立複合性天氣系統PMP推估模式：(1)暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法及(2)颱風模式法結合季風降雨回歸法。

針對前述兩種方法，採用IPCC AR4提供之大氣環流模式(GCM)資料，選取於東亞地區表現較佳之9個GCM，其中7個GCM可提供本計畫推估PMP時季風顯著區域範圍受氣候變遷影響之參數資料(即風速乘以可降水量： $uv \times prw$ 、風速： uv ，及可降水量： prw)。進一步利用此參數資料，進行氣候變遷情境下暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法，及颱風模式法結合季風降雨回歸法之建立，以完成氣候變遷情境下複合性暴雨模式之建置。

4.氣候變遷下PMF推估模式建置

透過各水庫無因次單位歷線之重新演繹結果發現：本計畫推演之各水庫單位歷線洪峰值，皆低於水庫原壩址單位歷線之洪峰值，而洪峰發生時間相近。其中，翡翠水庫僅於民國67年採用無因次單位歷線法進行PMF推估(台北區自來水第四期建設計畫 水源工程定案研究專題報告A，中興工程顧問社)，每小時10 mm有效降雨單位歷線之洪峰值為206 cms，亦高於本計畫推演之單位歷線洪峰值(130 cms)。惟目前查無翡翠水庫原壩址單位歷線詳細資料，故無法進行無因次單位歷線之比對。茲將曾文、鯉魚潭及石門水庫每小時10 mm有效降雨單位歷線與壩址單位歷線之比對結果呈列如圖3至圖5。

考量納入新颱風場次進行水庫單位歷線演繹，確實將影響其歷線之洪峰平均值，故現階段暫以本計畫推估之氣候變遷PMP，配合各水庫原壩址單位歷線進行PMF之推估較為保守。惟後續仍應針對新發生且產生嚴重降水之颱風事件進行單位歷線演繹，以檢核原壩址單位歷線之適用性。

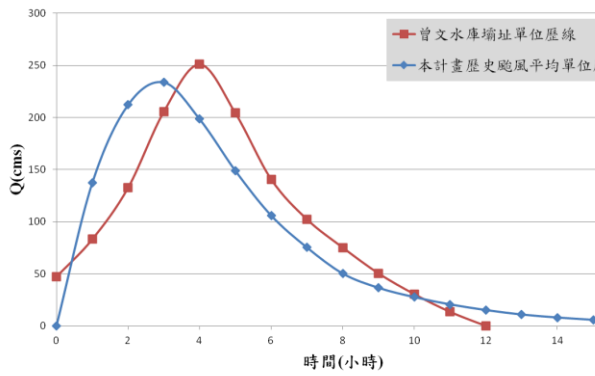


圖 3、曾文水庫壩址單位歷線與本計畫平均單位歷線比對

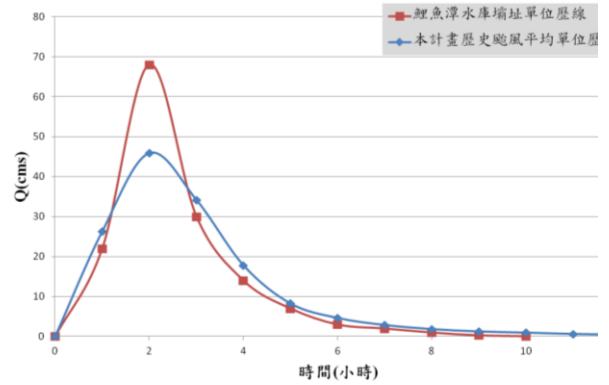


圖 4、鯉魚潭水庫壩址單位歷線與本計畫平均單位歷線比對

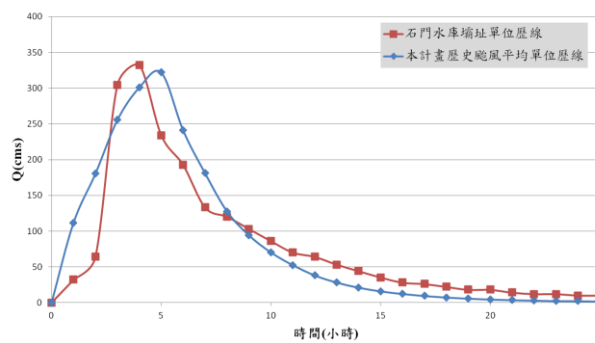


圖 5、石門水庫壩址單位歷線與本計畫平均單位歷線比對

3.2 水源設施脆弱度盤查方法與成果蒐集

透過蒐集國內外水源設施脆弱度盤查之文獻蒐集，大部分乃配合風險管理之目的而進行，至於針對脆弱度盤查之作法，目前文獻上似乎較無具體明確之探討。

其中，加拿大BC Hydro公司管理30幾座發電用之壩堰，耗費10幾年的時間開發PRM(Portfolio Risk Management)風險管理方法，以有效進行所屬壩堰之風險評估與管理。此一PRM方法中，各風險評估項目之風險指標計算中，包含脆弱度指標之計算，乃為壩堰缺陷之半定量方法，考量設施現況或能力與規範，或預期表現之差距、缺陷種類、出現頻度及與設施安全之關聯性等因素，透過公式計算各缺陷之脆弱度。水利署「群壩安全管理及風險排序研究(1/2)&(2/2)」[5]計畫中，基於上述加拿大BC Hydro之PRM脆弱度計算方法，考量我國水庫與壩堰管理現況及執行需求進行調整，建立一套適合國內水利建造物脆弱度之計算模式，配合缺陷造成之後果，得到風險指標並進行排序。本計畫參考此一方法並加以調整，以進行水源設施脆弱度盤查之相關作業。

3.3 脆弱度指標與分級標準初研

本計畫針對水源設施之脆弱度定義為：「水源設施在特定災害影響下，暴露於災害之程度、在危害衝擊下之承受能力及無法承受災害時之調整或因應能力等因素之綜合影響」。因此，水源設施脆弱度乃綜合(1)暴露於災害之程度(暴露度)、(2)設施安全或功能受影響之程度(敏感度)及(3)不滿足安全或功能需求而採行因應或改善措施

之可行性與能力(調適力)等三個部分而成，亦即：

$$\text{脆弱度}(V)=\text{暴露度}(P)\times\text{敏感度}(S)\times\text{調適力}(R) \quad (13)$$

由於本計畫之主要目的為探討氣候變遷效應之課題，而氣候變遷主要影響水文環境條件，故本計畫將只針對異常水文事件(即洪水)危害下之脆弱度進行探討與盤查。為聚焦於異常水文事件對水源設施安全脆弱度之影響，避免過多次要或間接盤查項目影響甚至主導盤查結果，本計畫將只針對各範疇中直接影響安全脆弱度且可具體考量異常水文事件參數之項目列為盤查項目，如下表4所示。

表 4、各範疇影響安全脆弱度之盤查項目

編號	分項		盤查項目
一	排洪能力		
1.1	結構物水理		排洪設施率定曲線校核
1.2	排洪演算及出水高		出水高校核
二	結構安全		
2.1	堆填壩 或 人工湖	壩坡安定性	壩坡安定性校核
		壩座安定性	壩座安定性校核
2.2	混凝土壩	壩體安定性	壩體安定性校核
		壩座安定性	壩座安定性校核
2.3	攔河堰 (混凝土重力式)	堰體安定性	堰體安定性校核
		堰座安定性	堰座安定性校核
2.4	攔河堰 (橡皮壩型式)	壩墩安定性	壩墩安定性校核
		壩座安定性	壩座安定性校核
2.5	獨立於壩堰之排 洪(砂)設施	結構安定性	主體結構安定性校核
三	邊坡安定		
3.1	大型地滑潛勢邊坡		邊坡安定性及引致湧浪高度校核
四	溢頂潰決		
4.1	溢頂潰決分析		設施溢頂潰決年發生率

各脆弱度盤查項目均包含敏感度及調適力二部分，其脆弱度計算方式如下：

$$V_i = S \times R = W \times \sqrt[3]{G \times C} \times F \times \sqrt[3]{I} \quad (14)$$

式中， V_i =脆弱度， S =敏感度指標， R =調適力指標， W 、 G 、 C 、 F 為敏感度影響因子， I =因應/改善措施之可行性或能力因子。各盤查項目透過校核計算結果及賦值等過程，可計算得到脆弱度，加總後即得到水源設施整體脆弱度。

脆弱度盤查架構涵蓋絕大部分現行水庫安全評估校核分析之工作內容，可視為

現行水庫安全評估工作成果之延伸應用；此外，亦具有檢核安全評估工作不足之處及提供成果摘要之功能。

為便於不同水源設施之脆弱度排序及分級，本計畫除直接利用脆弱度數值比較外，亦採用如下正規化(百分比)之方式，使比較基準更為客觀：

$$\text{脆弱度}(\%) = (\text{脆弱度值} - \text{脆弱度最低值}) / (\text{脆弱度最高值} - \text{脆弱度最低值}) \times 100\% \quad (15)$$

其中，脆弱度最低值及脆弱度最高值分別為該水源設施在現況下脆弱度理論上所能達到之最小值及最大值。正規化後之結果將以直條圖之方式呈現，其主要代表目前脆弱度距離理想狀況之程度(百分比愈低表愈接近理想狀態)。另外，針對所考量4大類範疇對應之脆弱度分別進行正規化(百分比)，並以雷達圖方式呈現，由此方式可清楚得知脆弱度主要是由哪些範疇所貢獻。

各水源設施之脆弱度盤查工作完成後，根據脆弱度值進行排序，瞭解各水源設施脆弱度高低相對情形，做為後續因應氣候變遷調適改善之參考。脆弱度排序的方式包括：

- 整體排序
- 以水源設施類型各別排序
- 以設施所在區域各別排序
- 以設施所屬水系各別排序
- 以設施之管理機關(構)各別排序
- 以設施等級各別排序
- 設施興建年代各別排序

另外，為便於有效管控水源設施之脆弱度，將有限之經費及人力優先投入脆弱度較高之水源設施，使其能妥善因應氣候變遷之影響，同時也方便進行後續之追蹤考核，規劃水源設施之脆弱度分級如下：

1. 三級制(以排序總數百分比區分等級)

高度(前 30%)、中度(前 60%)及低度(其餘)

2. 五級制(以百分比區分等級)

極高度(前 20%)、高度(前 40%)、中度(前 60%)、低度(前 40%)及極低度(其餘)

為配合現有水庫分級管理制度，因此建議採用三級制較為合宜。

3.4 案例分析

利用「暴雨移置與露點調整法結合季風降雨回歸法」推得鯉魚潭水庫延時60小時之PMP介於3272~3481 mm，平均而言氣候變遷影響下可能造成水庫PMP增加約8%。

利用「颱風模式法結合季風降雨回歸法」推估曾文水庫延時60小時之PMP介於3475~4464 mm，平均而言氣候變遷影響下可能造成水庫PMP增加約9%；石門水庫延時60小時之PMP介於1927~2154 mm，平均而言氣候變遷影響下可能造成水庫PMP增加約3%；翡翠水庫延時60小時之PMP介於2885~3123 mm，平均而言氣候變遷影響下可能造成水庫PMP增加約2%。

曾文水庫之 PMF 介於 11956~14909 cms，相較於水庫現況之 PMF(12204 cms)，平均而言(13180 cms)氣候變遷影響下可能造成 PMF 增加約 8%。石門水庫之 PMF 介於 16698~18674 cms，相較於水庫現況之 PMF(16963 cms)，平均而言(17448 cms)氣候變遷影響下可能造成 PMF 增加約 3%。鯉魚潭水庫之 PMF 則介於 3332~3545 cms，相較於水庫現況之 PMF(3183 cms)，平均而言(3420 cms)氣候變遷影響下可能造成 PMF 增加約 7%。

翡翠水庫之 PMF 介於 10141~10881 cms，相較於水庫現況之 PMF(10500 cms)，平均而言氣候變遷影響下可能造成 PMF 增加約 0.4%。

綜整前述各水庫氣候變遷下 PMF 推估結果以供後續脆弱度盤查使用：曾文水庫為 13180 cms，石門水庫為 17448 cms，鯉魚潭水庫為 3420 cms，翡翠水庫則為 10537 cms。惟現階段脆弱度盤查方法為初研階段，故暫以鯉魚潭水庫為例進行脆弱度盤查，結果發現：

1. 鯉魚潭水庫正規化後之整體脆弱度在現況(無氣候變遷效應)及氣候變遷效應下，分別為 12.9% 及 15.2% (如圖 7)，根據所訂脆弱度準則，均屬輕度脆弱。現況及氣候變遷效應之整體脆弱度增加幅度 $= (10.25 - 8.79) / 8.79 = 0.166 = 16.6\%$ ，顯示鯉魚潭水庫就脆弱度而言受到設定氣候變遷情境之影響不大。

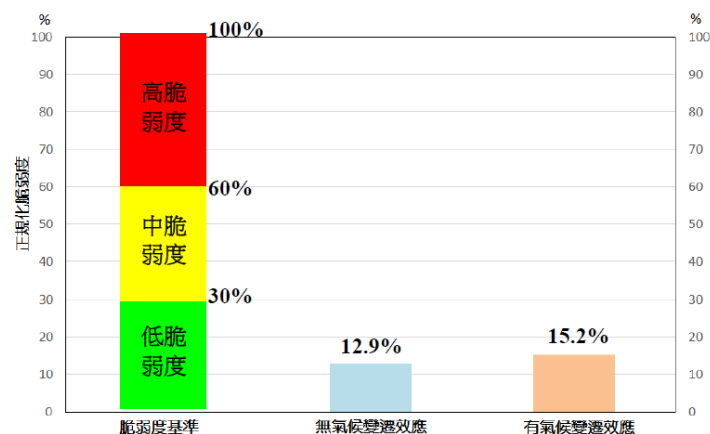


圖 7、鯉魚潭水庫現況(無氣候變遷)及氣候變遷下之正規化脆弱度比較

3. 在鯉魚潭水庫整體脆弱度中，無論是現況或者考量氣候變遷效應，結構安全及溢頂潰決二個範疇脆弱度之佔比均較高；在氣候變遷效應下，溢頂潰決及排洪能力二個範疇脆弱度之佔比將較現況之佔比增加，結構安全及邊坡安定之脆弱度佔比則相對降低。(如圖 8)

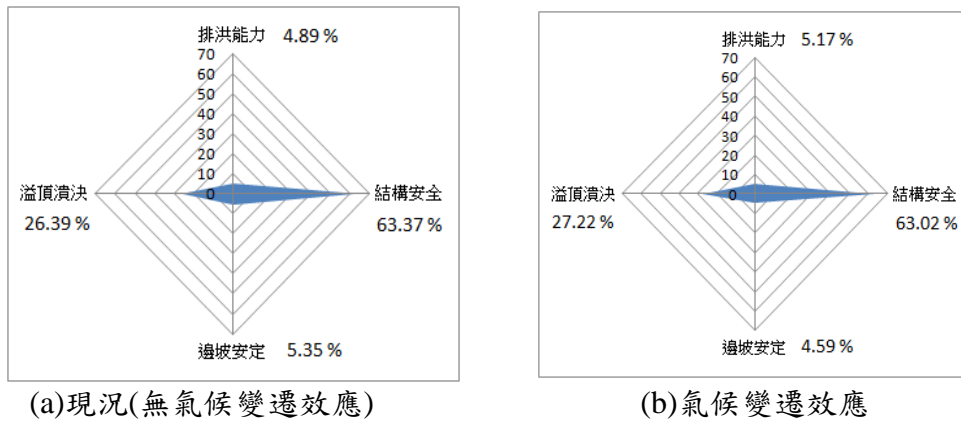


圖 8 鯉魚潭水庫整體脆弱度中各範疇脆弱度之相對貢獻

四、結論與建議

氣候變遷影響下，依本計畫目前之推估結果各水庫PMP與PMF皆有增加之趨勢，而初步以鯉魚潭水庫進行脆弱度盤查，其整體脆弱度於氣候變遷之影響下，亦有增加之情況，惟增加幅度並不顯著。未來建議召開專家學者會議討論本計畫所提可能最大降雨之推估方法、脆弱度盤查架構、盤查項目、盤查表格、評核準則(含權重)及脆弱度計算方法等內容，取得一定共識後進行調整，最後加以確定，以期針對PMP、PMF推估方法與脆弱度盤查彙編使用參考手冊，並供後續評估現有水庫安全性與相關工作所用。

參考文獻

1. 李清勝，羅英哲，張龍耀(2007)，「琳恩颱風與東北季風交互作用產生強降水之研究」，大氣科學，35，13-33。
2. 苗艷紅，華家鵬，吳艷紅(2005)，「暴雨組合方法推求可能最大暴雨」，水利水電科技進展，第25卷，增刊第1期，6-7，第68頁。
3. 經濟部水資源局(2001)，「水文設計應用手冊」。
4. 科技部(2011)，「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置(3/3)」計畫。
5. 經濟部水利署(2011)，「群壩安全管理與風險排序研究(2/2)」。
6. 經濟部水利署(2011)，「曾文水庫第四次整體檢查與安全評估」。
7. 經濟部水利署(2012)，「翡翠水庫第四次整體檢查與安全評估」。
8. 經濟部水利署(2013)，「石門水庫第四次整體檢查與安全評估」。
9. 經濟部水利署(2013)，「鯉魚潭水庫第二次整體檢查與安全評估」。
10. 經濟部水利署(2013)，「氣候變遷水文情境評估研究(2/2)」成果報告。
11. J. R. Fulks,(1935) “Rate of precipitation from adiabatically ascending air”, Monthly Weather Review, 63(10).
12. World Meteorological Organization,(2009) “Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)”.

