

國立臺灣大學生物環境資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

氣候變遷對翡翠水庫供水、發電與防洪功能之衝擊評估

The Impacts of Climate Change on the Feitsui Reservoir Capability of

Water Supply, Hydropower Generation, and Flood Mitigation

戴嘉慧

Chia-Hui Tai

指導教授：童慶斌 博士

Advisor: Dr. Ching-Pin Tung

中華民國九十九年六月

June 2010

謝 誌

感謝童慶斌老師細心和耐心的指導，很幸運能跟著老師學習，這兩年獲益良多。感謝林裕彬老師、李明旭老師、陳彥璋老師，在口試給予指導與建議。謝謝翡翠水庫管理局的協助和幫忙，使這篇論文能以順利完成。

也很感謝宛渝學姊一直以來教導和幫助，謝謝學姊教了我好多好多，也謝謝同窗好友小胖、BU、曹啾啾，和你們討論、吃點心、一起做研究的日子很開心，一起趕論文、緊張地準備口試至今也變成難忘的回憶，能有你們這些同學一起度過研究生生涯很開心！

謝謝研究室的大家，謝謝子明學長、小柯學長、仲哲學長、宗祐學長、嘉佑學長、阿狗和小黑、皓皓、玫君學姊，學弟妹們小雞、奕如、澎澎、冠儀、小天才……，這真是一個很棒又很溫馨的研究室。另外要謝謝鄰居小雞，常常麻煩妳真是不好意思，真是謝謝妳。

謝謝我的家人一路的支持和陪伴，我愛你們。謝謝弟兄姊妹們一直以來的關心和代禱，有你們的扶持使我能夠繼續往前。

要畢業了，學生生涯告一個段落，即將邁入下一階段，大家再見~

摘要

近幾年來極端水文事件頻傳，氣候變遷使得雨量呈現極端化，進而影響豐枯水期的流量，使得水庫入流量差異增加，間接衝擊水庫供水、發電與防洪功能。枯水期流量的減少可能影響水庫的供水、發電標的；而颱風時期的極端暴雨，產生之高流量可能危及水庫防洪標的，並引發水庫安全等相關問題。因此本研究之研究目的在於探討氣候變遷對水庫供水、發電、防洪功能之衝擊。台灣地區借重水庫功能儲存與分配水資源，部分水庫具有發電功能，供水同時產生發電效益。除此之外，水庫對於颱風、暴雨等洪水事件，亦可提供水庫容量作為蓄洪用途，可減輕下游地區在短時間內受到高流量洪水衝擊。然而在面對氣候變遷對水文特性之影響，乾旱時間延長，暴雨強度增加，極端的現象屢現，水庫原先設計供水、發電、防洪標的，在氣候變遷持續影響下，是否依舊合乎其設計功能成為重要的議題。本研究以新店河流域之翡翠水庫為研究區域，應用大氣環流模式對未來氣候預設情境之評估結果推估水庫流量，並且依據計畫需水量與水庫運轉規則，模擬翡翠水庫蓄水量與發電量之變化；另一方面以防洪運轉規則模擬翡翠水庫於颱風事件中水位之變化，確保水位能否維持於最大可能洪水位以下，維護水庫安全性。藉此評估翡翠水庫供水、發電與防洪能力，因應氣候變遷下水資源分配之調適與規劃。結果顯示氣候變遷下多數情境缺水情形較少，唯獨 GFCM2.1 模式於 A1B 中期與 A2 中期情境之缺水率稍高，分別為 2.79% 與 1.23%。而氣候變遷下枯水期總發電量於短期減低約 230 萬度，至中期將減低 566 萬度；豐水期總發電量短期將增加 182 萬度，中期增加約 82 萬度。在防洪功能評估結果，代表氣候變遷尖峰在前雨型於較高起始水位時，運轉期間將超過最大可能洪水位，因而危及水庫安全。

關鍵詞：氣候變遷、水庫、減洪、供水、水力發電

Abstract

In recent years, climatic variation leads to the increasing frequency of extreme events and the difference of river flow between wet period and dry period. The increasing intensity and duration of drought events will result in the storage insufficient for water supply and hydropower generation. On the other hand, the extreme flood in wet seasons will cause great impacts on the operation of reservoir in flood mitigation. Climate change may cause more climate variability and further result in more frequent extreme hydrological events which may greatly influence reservoir's functions. The purpose of this study is to evaluate the impact of climate change on the capability of water supply, hydropower generation and flood mitigation of a single reservoir. The inflows are generated based on different climate scenarios from different GCMs' outputs. Then, these inflows are applied to evaluate reservoir storage for estimating water supply capacity and hydropower generation. The flood mitigation capability is evaluated for different typhoon events that are designed based on a historical typhoon event and strengthened according to GCMs' outputs. The Feitsui reservoir is chosen as a case study. Results indicate that most of cases display fewer insufficient for water supply, whereas the GFCM2.1 model leads to higher insufficient rate, only 2.79% in A1Bm and 1.23% in A2m, respectively. Under climate change, hydropower generation will decline 2.3 and 5.66 million degrees in short term and middle term in dry period, and increase 1.82 and 0.82 million degrees in short term and middle term in wet period, respectively. When the flood mitigation operation starts at higher water level, the typhoon event having early peak rainfall may cause reservoir safety problem under climate change.

Keywords: Climate Change, Reservoir, Flood Mitigation, Water Supply, Hydropower Generation

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	vi
表目錄.....	x
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 章節介紹.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 大氣環流模式挑選.....	5
2.2 氣候變遷對水文與水資源之影響.....	8
2.3 氣候變遷對水庫功能的衝擊.....	8
2.4 氣候變遷對供水系統之衝擊.....	9
2.5 氣候變遷對水庫發電之衝擊.....	9
2.6 氣候變遷對水庫防洪之衝擊.....	10

第三章 研究方法	11
3.1 研究區域簡介	12
3.2 氣候變遷情境與應用	15
3.2.1 漸變試驗情境簡介	17
3.2.2 大氣環流模式挑選	19
3.2.3 氣象合成模式	33
3.3 水文模式	34
3.3.1 GWLF(Generalized Watershed Loading Functions)模式	34
3.3.2 半分布並聯型線性水庫降雨－逕流模式	37
3.4 翡翠水庫水平衡與發電模式	39
第四章氣候變遷下翡翠水庫供水與發電評估	45
4.1 GWLF 模式驗證	46
4.2 翡翠水庫模式驗證	49
4.3 氣候變遷下翡翠水庫供水與發電評估	52
4.4 小結	64
第五章氣候變遷下翡翠水庫防洪評估	66
5.1 半分布並聯型線性水庫降雨－逕流模式驗證	67
5.2 翡翠水庫洪水操作驗證	71
5.3 氣候變遷下翡翠水庫防洪影響評估	73

5.4 小結	83
第六章結論與建議.....	85
6.1 結論	85
6.2 建議.....	89
參考文獻.....	91



圖目錄

圖 1-1	研究架構圖	4
圖 3-1	研究架構圖	12
圖 3-2	新店溪流域	14
圖 3-3	翡翠電廠位置圖	15
圖 3-4	翡翠供水系統示意圖	15
圖 3-5	氣候變遷情境應用流程	16
圖 3-6	SRES 情境溫室氣體排放情境	18
圖 3-7	SRES 四個情節說明	18
圖 3-8	模式挑選流程	23
圖 3-9	各雨量站與大氣環流模式基期之 R 比較	26
圖 3-10	各雨量站與大氣環流模式基期之 RMSE 比較(枯水期)	27
圖 3-11	各雨量站與大氣環流模式基期之 RMSE 比較(豐水期)	27
圖 3-12	坪林站與秀巒站雨量相關性	31
圖 3-13	坪林站與梅花站雨量相關性	32
圖 3-14	秀巒站與梅花站雨量相關性	32
圖 3-15	GWLF 模式水平衡關係示意圖	37
圖 3-16	集水區示意圖	39
圖 3-17	模式結構示意圖	39

圖 3-18 翡翠水庫模式建立之因子.....	40
圖 3-19 翡翠水庫規線圖.....	43
圖 3-20 翡翠水庫防洪運轉規則示意圖.....	44
圖 4-1 氣候變遷翡翠水庫供水與發電功能評估流程圖.....	46
圖 4-2 南勢溪流量驗證.....	48
圖 4-3 南勢溪模擬流量與實際流量之相關性.....	48
圖 4-4 北勢溪流量驗證.....	49
圖 4-5 北勢溪模擬流量與實際流量之相關性.....	49
圖 4-6 驗證民國 94 年 11 月至 96 年 10 月翡翠水庫蓄水量.....	51
圖 4-7 民國 94 年 11 月至 96 年 10 月豐水期與枯水期累計發電量.....	52
圖 4-8 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(B1 短期情境).....	55
圖 4-9 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(B1 中期情境).....	56
圖 4-10 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A1B 短期情境).....	56
圖 4-11 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A1B 中期情境).....	56
圖 4-12 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A2 短期情境).....	57
圖 4-13 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A2 中期情境).....	57
圖 4-14 B1 情境雨量比值.....	57
圖 4-15 A1B 情境雨量比值.....	58
圖 4-16 A2 情境雨量比值.....	58

圖 4-17	枯水期缺水率與雨量變化之關係.....	59
圖 4-18	豐水期缺水率與雨量變化之關係.....	59
圖 4-19	B1 情境模擬發電量.....	61
圖 4-20	A1B 情境模擬發電量.....	61
圖 4-21	A2 情境模擬發電量.....	62
圖 4-22	氣候變遷下翡翠水庫之模擬發電量.....	63
圖 4-23	發電量變化與雨量變化之關係(枯水期).....	63
圖 4-24	發電量變化與雨量變化之關係(豐水期).....	64
圖 5-1	氣候變遷下翡翠水庫防洪評估流程.....	67
圖 5-2	北勢溪集水區核胞圖.....	69
圖 5-3	艾利颱風流量檢定.....	70
圖 5-4	海棠颱風流量檢定.....	70
圖 5-5	泰利颱風流量驗證.....	70
圖 5-6	柯羅莎颱風流量驗證.....	71
圖 5-7	翡翠水庫防洪運轉.....	72
圖 5-8	泰利颱風防洪運轉下水位驗證.....	73
圖 5-9	柯羅莎颱風防洪運轉下水位驗證.....	73
圖 5-10	氣候變遷下柯羅莎颱風雨型防洪運轉下水位.....	76
圖 5-11	柯羅莎颱風小時雨量記錄.....	77

圖 5-12 平衡雨型示意圖	78
圖 5-13 尖峰位置設計雨型	78
圖 5-14 氣候變遷下尖峰位置設計雨型	78
圖 5-15 設計雨型之模擬流量	79
圖 5-16 防洪操作模擬水位	81
圖 5-17 氣候變遷下防洪操作模擬水位	81
圖 5-18 現況設計雨型入流量分析	82
圖 5-19 現況與氣候變遷設計雨型入流量分析比較	82
圖 5-20 氣候變遷設計雨型之水位變化(起始水位為 167.5m)	83



表目錄

表 2-1	大氣環流模式挑選方法.....	6
表 3-1	大氣環流模式簡介表.....	19
表 3-2	大氣環流模式與坪林站歷史雨量評估.....	24
表 3-3	大氣環流模式與碧湖站歷史雨量評估.....	25
表 3-4	大氣環流模式與大桶山站歷史雨量評估.....	25
表 3-5	大氣環流模式與福山站歷史雨量評估.....	26
表 3-6	排名法挑選大氣環流模式.....	29
表 3-7	扣分法 A 挑選大氣環流模式.....	30
表 3-8	扣分法 B 挑選大氣環流模式.....	30
表 3-9	板新工程簡介.....	41
表 3-10	模式模擬放流量之規則.....	43
表 3-11	設施設計放水量.....	44
表 4-1	北勢溪與南勢溪驗證相關資料.....	48
表 4-2	模式缺水旬數統計表.....	55
表 4-3	模式缺水旬數範圍統計表.....	55
表 5-1	北勢溪集水區核胞地文資料.....	69
表 5-2	半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式檢定驗證結果.....	69
表 5-3	大氣環流模式颱風季節雨量比值.....	75

表 5-4 柯羅莎颱風現況與未來氣候變遷之模擬結果.....76

表 6-1 氣候變遷下翡翠水庫供水、發電與防洪功能影響評估.....88



第一章 前言

1.1 研究動機

水資源為人類生活不可或缺之要素，維繫人民生活與社會經濟，影響產業層面廣泛，包括農業、工業、養殖漁業，對近年來蓬勃發展之高科技產業而言亦為關鍵資源，水資源是整體社會安定與經濟發展之重要基礎。然而台灣地區降雨在時間與空間分布上極為不均，5至10月雨量豐沛，11至4月降雨減少，豐、枯水期差異顯著，並且由於地形狹長，河川多為東西向且坡陡流急，不易留存水資源，因此水庫肩負貯存及分配水源功能，攔蓄豐水期水源貯存於水庫，並於枯水期供應下游需求，穩定自然豐、枯水期差異所造成水源不足之衝擊，在水資源管理中佔有重要地位。除此之外，台灣於夏、秋季面臨颱風、豪雨侵襲，水庫容量具有蓄洪、減洪功能，將洪水蓄於水庫並於合適時間逐步洩洪至下游，避免高流量洪水直接湧至下游，進而維護下游安全。水庫對於台灣氣候型態發揮調節、分配水資源之重要功能，除供水、防洪功能以外，水庫亦具有發電、遊憩等功能。

水庫為水資源調配中關鍵角色，台灣各地已有多座水庫，然而水庫是依照原有水文特性與用水需求所設計，近幾年來水文特性逐漸產生變化，極端事件發生頻率與強度增加，考驗水庫原有設計功能，究其原因與氣候變遷造成水文特性改變有關。自工業革命以來，大量溫室氣體的排放加強溫室效應，導致長期氣候變遷與短期氣候變異，在水文、生態與環境等等各方面皆產生影響。政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第二工作小組（Working Group II）曾於2007年發表「衝擊、調適與脆弱度」報告（Impacts, Adaptation and Vulnerability），報告中以各面向以及各地區為基礎，探討氣候變遷可能造成之影響，報告中顯示極端氣候現象影響的範圍將擴大，除了受乾旱影響的區域增多外，部份區域發生暴風雨事件的頻率將提昇，發生洪水的風險亦隨之提高。

在全球氣候變遷的影響之下，台灣地區極端水文事件的發生頻率也逐年增加，根據童慶斌等(2002)之研究報告顯示，全球暖化導致台灣地區氣候與水文有極端化之趨勢，暴雨與乾旱將更加頻繁，全球暖化與氣候變異顯著增加對生態環境、水資源與農業環境等均會產生影響；童慶斌等（1999）與林俊成及李國忠（2000）藉由模式模擬評估氣候變遷對河川流量之衝擊影響，亦發現衝擊影響有極端化之現象，即豐水期流量增加，枯水期流量減少。民國 91 年、92 年的乾旱事件，使得北部地區供水不足，造成大規模農田必須休耕作為調配；而民國 93 年、94 年的大量降雨事件，也使得台灣多處居民飽受洪災之苦，由此可見，氣候變遷所引發的極端水文事件，對國家的整體經濟以及社會安定皆造成了極大的衝擊。

水力發電為重要之再生能源，無須排放二氧化碳即可產生電量，且發電後之尾水可繼續提供下游用水需求，兼具發電與供水之用，為較環保之電量來源。在用電需求大的現代社會，水力發電有助於紓解尖峰用電量之壓力。水力發電量受水庫水位高程和發電用水量影響，較高之水位落差和高流量可產生較高之發電量，但在氣候變遷影響降雨之情況下，間接影響河川流量與水庫蓄水量，在蓄水量可能產生變化之未來，水庫水位所產生之高程落差可能因此發生改變，而蓄水量之多寡也將影響放流量，進而對發電量產生衝擊。

台灣地區借重水庫功能儲存與分配水資源，部分水庫具有發電功能，供水同時產生發電效益。除此之外，水庫對於颱風、暴雨等洪水事件，亦可提供水庫容量作為蓄洪用途，可減輕下游地區在短時間內受到高流量洪水衝擊。因此水庫無論在供水、發電或防洪方面均對社會經濟以及民生安全產生重大貢獻。然而在面對氣候變遷對水文特性造成之影響，乾旱時間延長、暴雨發生頻率增加以及暴雨強度增加等極端的現象屢現，水庫原先設計供水、發電及防洪標的在氣候變遷持續影響下，是否依舊合乎其設計功能成為重要的議題。在生態環保意識抬頭的現今社會，興建水庫日趨困難，因此如何最佳的操作現有水庫，以達水資源最佳利用亦成為最佳課題。

1.2 研究目的

氣候變遷在雨量上呈現極端的變異，影響豐枯水期的流量，使得水庫入流量差異增加，間接衝擊水庫供水、發電與防洪功能。枯水期流量的減少可能影響水庫的供水、發電標的；而颱風時期的極端暴雨，產生之高流量可能危及水庫防洪標的，並引發水庫安全等相關問題。因此本研究之研究目的在於探討氣候變遷對水庫供水、發電、防洪功能之衝擊。

本研究以新店溪流域之翡翠水庫為研究區域，利用大氣環流模式對未來氣候評估之修正值，以簡易降尺度應用於研究區域，將鄰近網格點之變化量視為研究區域之變化量，修正歷史氣象資料。依照後續評估功能之不同分為兩部分：第一部分為長期連續模擬翡翠水庫蓄水量與發電量，以大氣環流模式輸出結果修正歷史氣象統計特性，並藉由氣候合成模式產生未來氣象資料。第二部分為翡翠水庫於暴雨事件之運轉操作，將大氣環流模式輸出結果修正歷史暴雨事件雨量與設計雨型雨量，得代表氣候變遷之暴雨事件雨量。研究中利用 GWLF 模式產生旬流量資料，進行長期連續之模擬，而暴雨事件流量則透過半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式產生小時之流量歷線。本研究依據計畫需水量與水庫蓄水利用運轉規則建立翡翠水庫水平衡與發電模式，模擬水庫之蓄水量與發電量；另一方面以防洪運轉規則模擬翡翠水庫於颱風事件中水位之變化，確保水位能否維持於最大可能洪水位以下，維護水庫安全性。藉此評估翡翠水庫供水、發電與防洪能力，因應氣候變遷下水資源分配之調適與規劃。

1.3 章節介紹

本研究第二章回顧過去相關研究之文獻，包括大氣環流模式挑選、氣候變遷對水文與水資源之衝擊，並探討氣候變遷對水庫功能之影響；第三章介紹研究架構及評估方法；第四章則針對氣候變遷對翡翠水庫供水與發電功能之衝擊評估進行說明，包括 GWLF 模式驗證、水庫歷史蓄水量與發電量之驗證，以及未來蓄水

量與發電量評估，並針對模擬結果進行分析討論。而第五章則針對氣候變遷對翡翠水庫防洪功能進行評估，首先驗證半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式，並經由設計雨型進一步評估氣候變遷對翡翠水庫防洪功能之衝擊；第六章總結各章分析結果並提出建議。

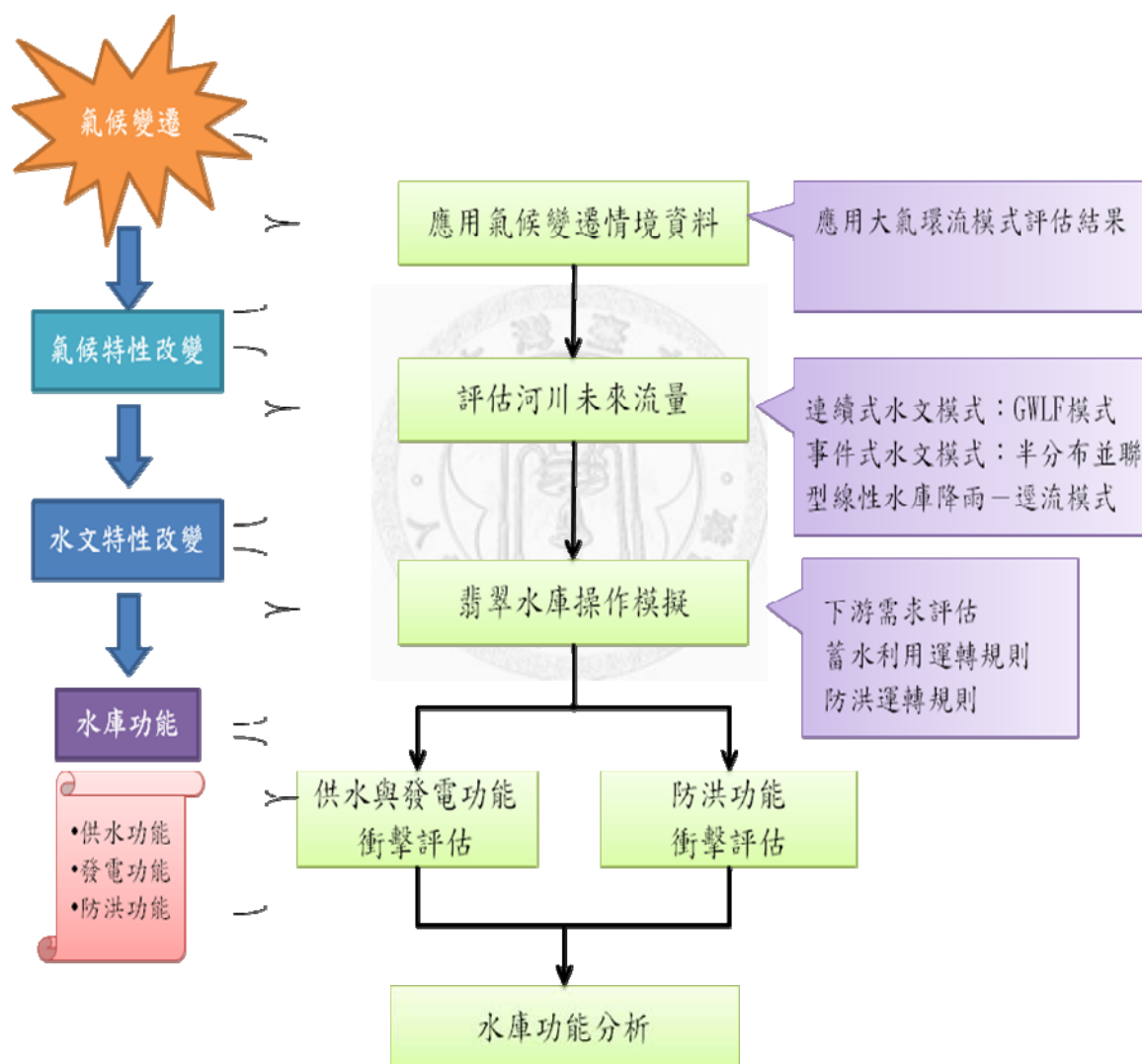


圖 1-1、研究架構圖

第二章 文獻回顧

關於氣候變遷不論是模式預測結果或是觀測資料都顯示已有氣候變遷的趨勢，近年來有關氣候變遷的相關研究逐漸受到重視。而氣候變遷對於整體供水系統的影響評估及其後續之水資源管理正在起步階段。以下針對過去相關氣候變遷對水文與水資源影響及水庫功能衝擊與水資源系統之相關研究提出說明。

2.1 大氣環流模式挑選

氣候變遷議題已逐漸成為國際矚目之焦點，目前關於氣候變遷研究多使用大氣環流模式輸出之結果，以降尺度方法將大氣環流模式輸出結果應用在集水區尺度，藉此修正歷史氣候資料之統計特性，推估氣候變遷下之氣候特性，再進行各領域相關研究。

目前 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 提供多個大氣環流模式之輸出結果，然而並非所有模式皆適用於各研究區域，需要挑選合適之模式，足以反映研究區域之氣候特性。Wiley and Palmer(2008)以模式重新產生區域歷史水文資料為條件，對大氣環流模式進行篩選，分析結果模式間呈現變異的情況，顯示評估長期趨勢時使用多模式的組合之重要性。Chiew et al. (2009)分析 23 個 GCMs 與澳洲南部之歷史雨量，藉由 RESM(Root Mean Square Error)評估 GCMs 模擬結果與觀測值，在冬季平均雨量、夏季平均雨量、年平均雨量顯示明顯的差異。在此研究中亦分析只使用較佳的模式，或者加重較佳模式之權重，其後續模擬結果與使用全部 23 個模式相近。表 2-1 整理 5 項文獻所提出挑選大氣環流模式的依據與方法。分別列出其評估項目、評估方法，空間尺度與時間尺度。

表 2-1、大氣環流模式挑選方法(莊立昕、何宜昕、戴嘉慧共同整理,2010)

資料來源	方法	備註
Perkins et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 以日降雨量、日最高溫和日最低溫作為評估項目。 ◆ 評估方法採用機率密度函數以分析 23 組 GCMs 模擬跟歷史資料之間的差異。當觀測資料與模擬資料之機率密度函數完全吻合，則重疊面積為 1，技術得分亦為 1。隨著兩者差異越大技術得分越小。 ◆ 時間尺度：為 1961-2000 之日資料，不分季節。 ◆ 空間尺度：全範圍內共有 12525 個雨量測站和 1529 個溫度測站，將澳大利亞切成 12 個矩形網格(10°×10°)，網格內之資料平均以代表該地區氣象資料。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 現在未能取得 GCMs 日資料。 ◆ 此方法無法看出一些訊息，像是連續不降雨日出現的頻率，連續性的最高溫或最低溫日數等。
Suppiah et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 以溫度、雨量和海平面平均壓力作為評估項目。 ◆ 評估方法採用 RMSE 和相關係數兩者，視 RMSE 較低者和相關係數較高者為較佳的 GCMs，技術得分利用 demerit point system (Whetton et al., 2005)，平均海平面壓力、溫度、雨量之相關係數低於 0.8 或 RMSE 高於 2 扣一分，若相關係數低於 0.6 或 RMSE 高於 4 再扣一分，依此記錄得分並取缺點得分較少者。 ◆ 時間尺度：為 1961-1990 季平均值，將季的資料作 RMSE 和相關係數分析。 ◆ 空間尺度：將全區域觀測與模式之季平均資料分成數個網格(5°×5°)，RMSE 之計算涵括研究區域內所有範圍。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 台灣面積小，GCMs 的網格點甚至不在本島上，沒有辦法將全區域分好幾個點作分析。 ◆ 對台灣地區 RMSE 和相關係數的門檻值未必能採用同一標準。
Koutsoyiannis et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 評估項目包含溫度和雨量。 ◆ 評估方法利用效率係數 $Eff=1-e^2/\sigma^2$，其中 e^2 為預測之平均平方差，σ^2 為歷史觀測資料之變異。 ◆ 時間尺度：為逐月做分析，且歷史資料記錄年份在 100 年以上者。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 亦有研究分析權重時，依據網格點至觀測資料之距離作為權重依據。 ◆ 台灣無一百年以上之記錄。

資料來源	方法	備註
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 空間尺度：挑選分析區域最接近的 4 個網格點，將各點 GCMs 資料作權重優選，取加權後氣象資料與觀測資料最接近者。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 在評估 GCMs 能力時，可將鄰近區域之資料加以考量，再進行其他分析。
Chiew et al. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 以雨量為評估項目 ◆ 評估方法採用 RMSE、相關係數 R、Cv(coefficient of variation)與NSE(Nash-Sutcliffe efficiency)對 23 個 GCM 作為評量。 ◆ 時間尺度為 1961~2000 之觀測日雨量。共比較 23 個 GCM，其中有 15 個模式提供日資料。 ◆ 觀測雨量之空間尺度為 0.05 度網格，然而在計算 Cv 時，將網格尺度累計至 1.75 度(類似 GCM 尺度)。而 GCM 則依不同模式將澳大利亞分成 14~134 個網格。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ RMSE 門檻值難以訂定。 ◆ 模式 Cv 值與觀測 Cv 值比較，卻難以判定何者為較佳。 ◆ 在本研究中選取較好模式與全部模式均挑選之後續模擬結果相似。
Johnson and Sharma (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 以變異之收斂性為評估項目，探討八種氣象變數在模擬氣候變遷情況下之變動性，氣象變數為以下：溫度、雨量、風速、比濕度、長波輻射、短波輻射、海平面壓力及可降水量。 ◆ 評估方法首先校正所有資料之偏差，再將每種氣象變數的 9GCMs 依據網格位置與時間加總平均，並計算短、中、長期變異之收斂性。 ◆ 時間尺度：利用 1961-1990 月平均資料校正，變異性評估部分以年平均值計算。 ◆ 空間尺度：將研究區域以 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 劃分成 128 個網格，此網格資料由各 GCMs 最鄰近四點依其距離分別給與一權重而得到。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 結果顯示表面壓力與氣溫為最穩定之變數，雨量為最差，即雨量變動最劇烈。

2.2 氣候變遷對水文與水資源之影響

Tung and Haith (1995)曾就氣候變遷對不同區域之水資源衝擊進行評估，這些研究結果均顯示水資源對氣候變遷之敏感度非常高。童慶斌與李宗祐(2001)則是應用於評估七家灣溪河川流量的衝擊，其結果顯示雖然平均年流量均有增加的趨勢，但豐枯水期流量極端化。而 Wilby et al. (2006) 等人研究氣候變遷下英國 River Kennet 之河川流量與水質所遭受之衝擊，結果顯示 River Kennet 在氣候變遷之影響下，有乾季流量減少、雨季流量增加之趨勢。而 Baltas and Mimikou(2005)針對 Aliakmon river 進行評估，分析此流域在氣候變遷下平均年流量、冬季流量、夏季流量均有減少的趨勢。Thodsen (2007) 亦探討丹麥境內五條主要河川受氣候變遷影響下之流量變異，其結果顯示各流域內無論是之平均降雨量與平均流量皆有增加之趨勢。除此之外，Kang et al. (2007) 等人結合大氣環流模式與水文模式，探討美國科羅拉多 South Platte 流域受氣候變遷影響下的流量變化，亦顯示出河川尖峰流量對於氣候變遷的反應相當敏感。根據上述研究成果顯示，氣候變遷將會對河川流量造成影響，進而對水資源造成衝擊。

2.3 氣候變遷對水庫功能的衝擊

Cole et al. (1991) 指出在已知河川流量的變化下，水庫供水可靠度與水庫的容量與平均河川流量及出水量的比率有關。Lettenmaier et al. (1999) 分析美國六個水庫系統，其系統特性包含單一水庫系統以及大型的多個水庫系統。模擬現況與未來三種不同氣候變遷預設情境下的河川流量與水資源系統的供水情形，評估 2050 年時六個集水區的不同水資源指標的衝擊程度；此外，Lettenmaier et al. (1999) 考慮了若供水層面發生變化之影響，或操作方式改變而造成之衝擊。研究發現大部分流域與氣候變遷情境，氣候變遷的影響在水庫的操作與供水改變的影響相似。研究中也發現水庫系統的供水量與水庫操作改變之衝擊影響與入流量改變之影響相比則是較小。

2.4 氣候變遷對供水系統之衝擊

根據 Gleick (1986), Idos (1984), Tung and Haith (1995)就氣候變遷下在各個不同的區域，對水資源系統所造成的衝擊作相關問題之評估，以及 Ayers et al. (1994)針對美國 Delaware River 流域水資源受氣候變遷影響之評估結果顯示，水資源對氣候變遷之敏感度非常高。Wiley and Palmer(2008)研究氣候變遷影響下，西雅圖都市地區的供水系統所受之影響，結果顯示 Cedar and Tolt River 之雪量將大幅減少，未來供水系統量亦呈現較高機率減低。童慶斌等(1999)探討氣候變遷下對台灣水資源之衝擊及因應對策，除了分析在氣候變遷衝擊下流量的變化，還針對水庫容量及水庫營運風險進行評估；童慶斌等人(2001)利用一整合型系統動力模式評估氣候變遷對鯉魚潭水庫系統的衝擊，結果顯示在氣候變遷條件下，河川流量呈現極端分佈現象，如豐水期水量增加，枯水期水量減少，其對目前之民生用水需求量影響不大，但當民生用水從目前之 90 萬噸增加至 100 萬噸時，其缺水風險將因氣候變遷的影響而增加。童慶斌(2009)分析石門水庫在 GFDL2.1 之 A1B 短期情境中，水庫入流量在 4 月僅約目前之 30%左右，依照目前水庫操作規線模擬水庫水位，水庫水位可能低於嚴重下限並影響供水能力。若調整水庫操作規線，可使得水庫的供水能力提高，但仍然可能發生供水不足的情況。

2.5 氣候變遷對水庫發電之衝擊

Baltas and Mimikou(2005)分析氣候變遷對希臘北部 Polyfyto reservoir 發電功能之影響，結果顯示在氣候變遷的影響之下，發電量的風險隨之攀升。Vicuna et al. (2008)針對加州 11 個水庫發電系統建立線性規劃模式，評估在 4 種氣候變遷情境下發電量與發電營收之變化，結果顯示在較乾情境影響下發電量與發電營收減低，反之將增加。發電量減少的情形較發電營收顯著，此現象顯出系統儲水能力，儲存水源可於高電價期間(7~9 月)使用。另一方面洪水增加之情境造成洩洪，不利於儲水至高電價季節，因此高流量的時間點亦影響發電量。

2.6 氣候變遷對水庫防洪之衝擊

Nash and Gleick (1991; 1993)利用流域尺度水文模式模擬美國科羅拉多河支流的河川流量，並模擬多目標水庫的供水可靠度的變化。研究中利用現有水庫操作程序與水權的分配，評估現有的水庫系統的衝擊影響。在不同情境的變化下水文特性有所改變，研究中顯示水文特性雖只有少許的減少，然而高流量發生之頻率增加，對於水庫的系統特性造成嚴重影響。Kang et al.(2007)利用 CCSM(Community Climate System Model)模式與 SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model)區域模式進行動力降尺度，以氣候變遷 B1 情境之結果，模擬 2000-2019 年 Geum 河川流域 Yongdam Dam 之情況，並評估氣候變遷下河川流域系統之敏感度，評估結果顯示河川平均流量將增加 38.7%，洪水風險管理系統呈現退化之情形，雖然洪水事件於未來發生之總數相似，但單一洪水事件的強度與其復原的能力將使情況惡化。童慶斌(2009)探討氣候變遷對石門水庫減洪能力之影響，研究顯示操作規線的調整對於水庫仍無顯著改善，不論是否調整水庫操作規線，水庫平均每年約有 70 天水位會超過 248 公尺，顯示氣候變遷仍然對於水庫減洪能力產生影響。

第三章研究方法

台灣地區倚重水庫功能調度管理水資源，藉由水庫攔蓄水源，供給民生與不同產業之需求，其供水功能極為重要。防洪功能於颱風豪雨時期發揮功效，水庫可延緩下游洪峰發生時間並降低洪峰流量，減緩下游災害。而部分水庫具有發電功能，藉由尖峰時間的發電，分擔其他發電方式之發電需求量。氣候變遷在雨量上呈現極端的變異，影響豐枯水期的流量，使得水庫入流量差異增大，間接衝擊水庫的供水與蓄洪功能。枯水期流量的減少可能影響水庫的供水能力，進而影響其發電功能；而颱風時期的極端暴雨，產生之高流量可能危及水庫防洪功能，並產生水庫安全相關問題。水庫無論是供水、發電或者防洪功能，對整體社會經濟、秩序以及人民的安全具有密切之關係，因此氣候變遷對於整個水資源系統的衝擊評估，及其後續之水資源管理是氣候變遷中重要的議題之一。

本研究以新店河流域之翡翠水庫為研究區域，探討氣候變遷對於翡翠水庫供水、發電以及防洪功能之衝擊。研究將分別針對氣候變遷情境資料之應用、未來河川流量之評估、氣候變遷對水庫供水與發電功能評估、氣候變遷對防洪功能之評估進行分析(圖 3-1)。應用大氣環流模式(General Circulation Model, GCMs)對氣候變遷情境之預測資料，選擇鄰近研究區域的網格點資料，用以修正歷史氣象資料之統計特性。並藉著水文模式模擬集水區之水平衡，推估未來南勢溪與北勢溪之流量。並以水庫運轉規則為基礎，模擬翡翠水庫之運轉操作，並考量水庫之下游需求，下游需求量由計畫需水量與板新二期工程完成後支援板新地區用水量綜合評估，藉此以水庫水平衡模擬水庫運轉。結合以上環節，可推估水庫未來蓄水量、發電量，評估在未來氣候變遷之衝擊下，翡翠水庫之標的功能是否受影響，並進一步探討減緩影響之調適策略。

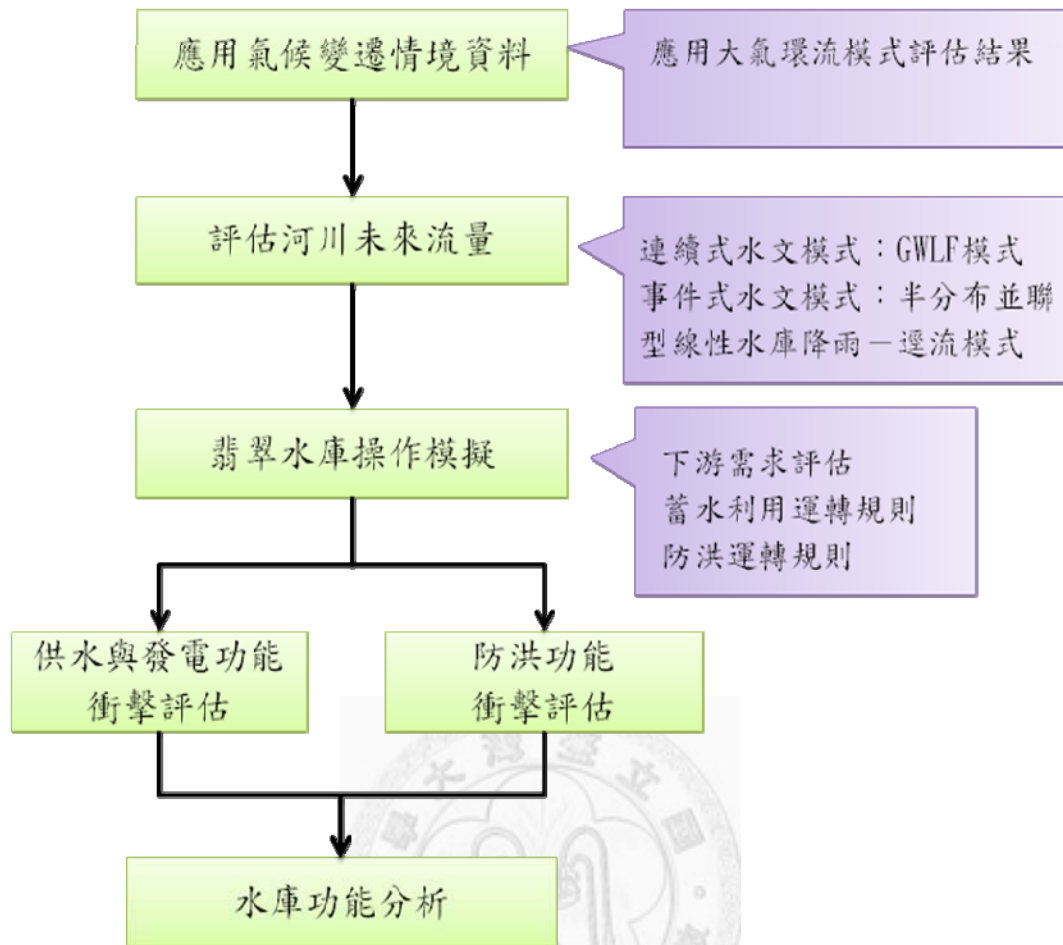


圖 3-1、研究架構圖

3.1 研究區域簡介

新店溪流域

新店溪屬於台灣北部淡水河系，全長約 82 公里，流域面積總計 909.54 平方公里，主要源頭有北勢溪與南勢溪，至龜山下游匯合後稱為新店溪。北勢溪發源雪山山脈，因地勢緣故較南勢溪和緩，水質較佳，河長 50 公里，流域面積 310 平方公里，於翡翠谷興建翡翠水庫，作為大台北地區供水之用。而南勢溪發源於棲蘭山、拳頭母山，於烏來與桶後溪交會，河長 45 公里，流域面積 332 平方公里，新店溪流域內除建有翡翠水庫外，尚有直潭與青潭等攔河堰，為台北市縣重要之水源地區。

翡翠水庫

翡翠水庫位於新店溪支流北勢溪上(圖 3-2)，完工於民國 76 年，其範圍包含台北縣坪林鄉，以及雙溪鄉、石碇鄉、新店市之一部份。翡翠水庫集水面積為 303 平方公里，集水面積包含坪林鄉、雙溪鄉、石碇鄉及新店市之部分區域，總蓄水量為 40,600 萬立方公尺，目前有效蓄水量則有 34,011.7 萬立方公尺，由翡翠水庫管理局管理，其主要設施包含：大壩、副壩、落水池、壩頂溢洪道、排洪隧道、沖刷道、河道放水口，大壩下游並設有翡翠電廠，由台灣電力公司管理。

翡翠水庫主要標的功能為供應用水，兼具發電、防洪功能，其供水方式主要係以南勢溪天然流量為主，當南勢溪天然流量不足以供應下游需求時，由翡翠水庫放水提供不足之需水量。翡翠水庫之下游依序有直潭壩、青潭堰，並設有取水構造物，藉著壩堰抬高水位，再經由取水構造物於河川取水，經由輸送管線運輸至各淨水廠處理。直潭壩引水至直潭淨水場；而青潭堰攔蓄水源，並取水至長興淨水場與公館淨水廠，於淨水場消毒過濾等處理後，經過加壓站、配水池配水至各用戶。翡翠水庫之供水範圍包括：全台北市、台北縣新店、永和、中和、三重、淡水、三芝等地區。

翡翠電廠

新店溪系統中除翡翠電廠外，亦包括南勢溪之烏來電廠與桂山電廠，以及新店溪的粗坑電廠。本研究評估氣候變遷對翡翠水庫供水、發電與防洪功能之影響，因此在發電部份係以翡翠電廠為主要考量對象。翡翠水庫附設有翡翠電廠，以發電供水為原則提供大臺北地區所需用水，利用翡翠水庫放流量進行發電。翡翠電廠位於大壩下游(圖 3-3)，當翡翠水庫放水以供應下游時，水庫放水量首先由發電輸水路引至翡翠電廠發電，發電後尾水再放流至北勢溪，與南勢溪天然流量合併流往下游直潭壩及青潭堰，供應下游需求。翡翠水庫之放流量除洪氾時期之洩洪以及維修檢查外，其放流量均先經由發電廠發電，尾水再流入下游河道(圖 3-4)。

翡翠電廠之設備包括 70,000 千瓦發電機組一部、變電及開關場一座、輸電系統。由台電桂山電廠進行遠端遙控翡翠電廠，並監控其狀況；輸電系統將翡翠電廠之發電運輸至粗坑及七張變電所。翡翠電廠之發電運轉需根據「臺北翡翠水庫運用要點」，按照其水庫水位與下游需求量執行。翡翠電廠的發電量可由發電尾水量、發電係數評估而得，其中發電係數為水位之函數，發電尾水量則為水庫放流量，翡翠電廠發電量可由式(1)計算。式中P為翡翠電廠發電量，PC為發電係數；而 Q_p 為發電尾水量。

$$P=PC \times Q_p \quad (1)$$



圖 3-2 新店溪流域



圖 3-3、翡翠電廠位置圖

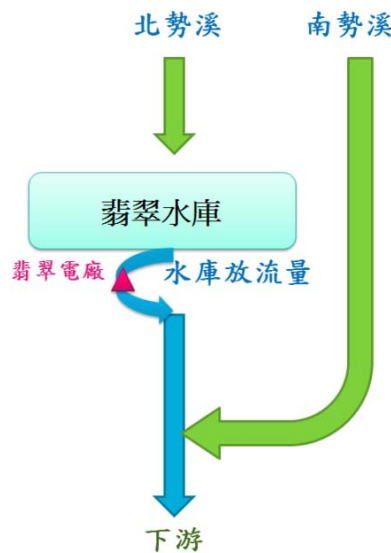


圖 3-4 翡翠供水系統示意圖

3.2 氣候變遷情境與應用

本研究於氣候變遷資料之應用，源於大氣環流模式(General Circulation Model, GCMs)之預測資料，大氣環流模式考量溫室氣體之漸變試驗情境為氣候變遷模擬之依據，進行全球尺度之模擬，模式輸出結果可由 IPCC 網站取得，模擬結果包含未來情境下不同時期氣溫與雨量等資料，與基期資料比較計算其修正值。IPCC 提供二十四個大氣環流模式相關資料，其中均提供 A2、A1B 與 B1 情境模擬溫度以及雨量之模式共有十個，分析各模式基期能否反映研究區域之歷史氣候特性，以

此為基準選擇合適本研究區域之大氣環流模式。並將挑選後的大氣環流模式模擬結果之月平均特性以簡易降尺度應用於研究區域，即將鄰近研究區域網格點之變化值視為研究區域氣候特性之變化量。取得氣候變遷對歷史特性之變化量後，將分為兩部分研究；首先為長時間連續模擬之流程，用以評估水庫供水與發電功能；另一部分為事件式操作，即為當水庫面臨洪水事件時，翡翠水庫防洪運轉之模擬。因此後續氣象資料以不同方式推估。在長時間連續模擬水庫供水、發電運轉時，將氣候變遷之變化量用以修正歷史資料之統計特性，並藉由氣象合成模式合成日溫度、雨量資料，並以 GWLF 模式模擬集水區之水平衡，推估未來南勢溪與北勢溪之流量，進行後續水庫供水與發電之研究；而事件式運轉模擬則是將氣候變遷之修正值，應用於歷史颱風事件與設計雨型，修正小時降雨量，模擬河川流量後進行水庫防洪操作，本節研究流程如圖 3-5 所示。

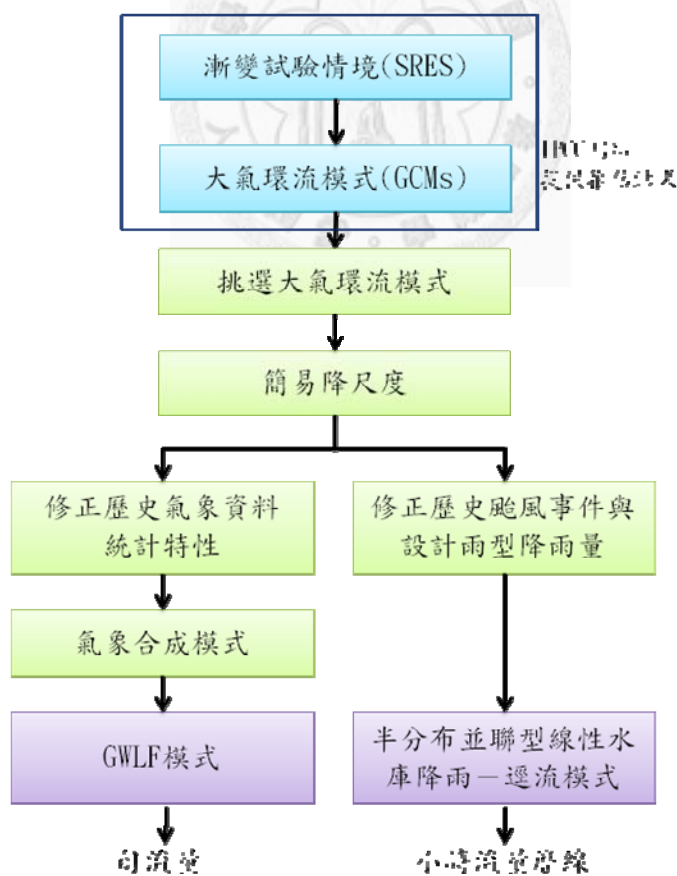


圖 3-5、氣候變遷情境應用流程

3.2.1 漸變試驗情境簡介

本研究採用漸變試驗情境之模擬結果設定未來氣候變遷情境，漸變試驗情境是根據 SRES(Special Report on Emissions Scenarios，簡稱 SRES)溫室氣體排放情境模擬氣候逐年之變化(圖 3-6)。SRES 預設情境屬於溫室氣體排放情境，亦即依照預測未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展趨勢，提出可能之溫室氣體排放趨勢。SRES 考慮到未來可能致力於經濟發展，或是朝永續利用的目標等不同程度的可能情形，以及考慮全球性或是區域性不同發展帶來的影響。分成了 A1、A2、B1、B2 四類情節，其中 A1 情境中又細分為 A1FI、A1T 與 A1B，說明如下：

A1：代表快速的經濟成長，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後便開始下降，並且擁有有效的科技技術。主要的課題在於實際人口的減少、地區的聚合、建築物的容積、教育的增進與社會的影響。A1 情境依據能源系統的不同方向，進一步細分為三種情況：

(1) A1FI：化石燃料密集型

(2) A1T：非化石燃料能源

(3) A1B：各種能源之間的平衡，平衡為不過分依賴於某種特定能源

A2：描述一個非常多變異性組成的世界。主要課題在於各國自力更生，與維持地方發展，而全球人口不斷地增加。經濟成長主要為區域性成長，而每人經濟成長率及技術的改進較其他情節破碎且緩慢。

B1：如同 A1 情節，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後開始下降，但經濟結構卻朝向一個服務與資訊的經濟結構。能源使用減少，並引用較乾淨且有效率之技術。注重經濟、社會與環境的永續性，卻不考慮額外的起始氣候條件。

B2：主要描述地方性經濟、社會與環境永續性的結果。全球人口持續增加，卻比 A2 情節慢。經濟發展中等，而科技的改變比 B1，A1 較緩且更多相異性。而

情節主要也以社會平等與環境的保護為目標，且發展為區域性發展。

綜合以上說明，SRES 情節可由圖 3-7 說明，四個情節主要差異在於經濟發展或致力於環境維護以及區域性發展或全球性發展等不同程度而分成的四個情境，而不同的經濟、人口、環境發展將導致不同的排放情形，也因此未來的發展與調適策略將影響排放程度，而排放程度亦影響未來發展與調適策略。

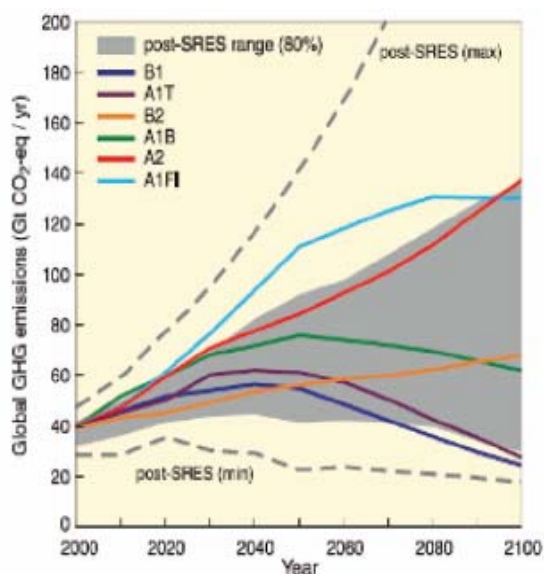


圖 3-6 SRES 情境溫室氣體排放情境(來源:IPCC,2007)

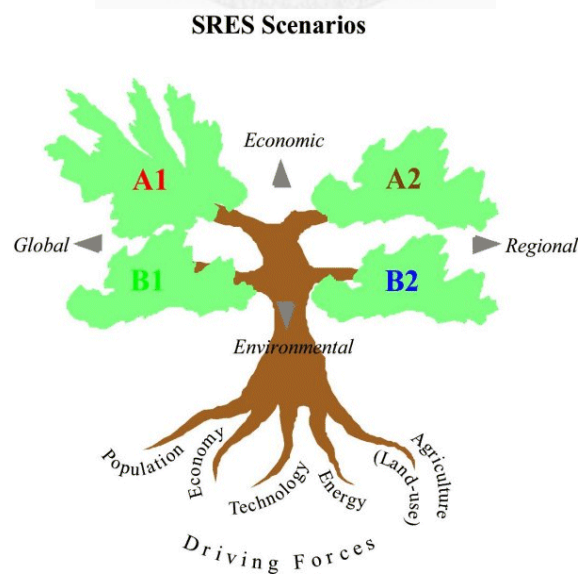


圖 3-7、SRES 四個情節說明(摘自 IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Fig4-1.1)

3.2.2 大氣環流模式挑選

氣候變遷相關研究逐漸受到重視，目前國際間許多研究於氣候變遷層面之考量，應用大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs)之結果進行後續研究評估。大氣環流模式將全球網格化推估氣候變遷下全球氣候之變化，其中亦考量SRES 情境作為未來氣候變遷情境，部分單位推估之結果可於政府間氣候變化專門委員會取得，並進一步應用於各領域之研究。政府間氣候變化專門委員會（ Intergovernmental Panel on ClimateChange, IPCC）提供多國研究單位研發之大氣環流模式(表 3-1)，對於未來氣候變遷進行全球尺度之模擬，目前針對氣候變遷之相關研究常應用大氣環流模式輸出結果，藉此評估氣候變遷之衝擊。目前大氣環流模式推估之情境多為 A1B、A2 與 B1 三種情境，然而目前僅有十個模式完整提供 A1B、A2 與 B1 三種情境的輸出資料，因此本研究將從這十個大氣環流模式中進行挑選，以模式基期反映歷史特性的能力為依據，從十種模式中選擇較適合本研究區域之大氣環流模式，應用於後續研究。

表 3-1 大氣環流模式簡介表

研發單位與所屬國家	單位簡稱	模式	簡稱
Beijing Climate Center (China)	BCC	CM1	BCCM1
Bjerknes Centre for Climate Research(Norway)	BCCR	BCM2.0	BCM2
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis(Canada)	CCCMA	CGCM3(T47) CGCM3(T63)	CGMR CGHR
Centre National de RecherchesMeteorologiques(France)	CNRM	CM3	CNCM3
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation(Australia)	CSIRO	Mk3.0	CSMK3

Max-Planck-Institut for Meteorology(Germany)	MPI-M	ECHAM5-OM	MPEH5
Meteorological Institute, University of Bonn (Germany) Meteorological Research Institute of KMA (Korea) Model and Data Groupe at MPI-M(Germany)	MIUB METRI M&D	ECHO-G	ECHOG
Institute of Atmospheric Physics(China)	LASG	FGOALS-g1.0	FGOALS
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(USA)	GFDL	CM2.0 CM2.1	GFCM20 GFCM21
Goddard Institute for Space Studies(USA)	GISS	AOM E-H E-R	GIAOM GIEH GIER
Institute for Numerical Mathematics(Russia)	INM	CM3.0	INCM3
Institut Pierre Simon Laplace(France)	IPSL	CM4	IPCM4
National Institute for Environmental Studies(Japan)	NIES	MIROC3.2 hires MIROC3.2 medres	MIHR MIMR
Meteorological Research Institute(Japan)	MRI	CGCM2.3.2	MRCGCM
National Centre for Atmospheric Research(USA)	NCAR	PCM CCSM3	NCPCM NCCCSM
UK Met. Office(UK)	UKMO	HadCM3 HadGEM1	HADCM3 HADGEM
National Institute of Geophysics and Volcanology(Italy)	INGV	SXG 2005	INGSXG

註：簡稱欄有灰色底者表示IPCC-DDC有提供A2、A1B與B1三種情境之預測值

根據經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)研究可知，不同大氣環流模式在模擬基期(1961~1990年)之氣溫方面有較佳的結果，其模擬值與實際值之間的相關性皆為 0.99 以上；然而在模擬雨量的部分上，不同大氣環流模式所模擬雨量表現差異性大，與歷史實際雨量間的相關係數呈現極為不同之結果，而流量模擬受雨量的影響極大，因此在雨量模擬不確定高的情況下，如何挑選適當的大氣模式為本研究的重點之一，因此研究中針對大氣環流模式模擬之基期降雨量進行進一步的探討，以與研究區域最鄰近網格點之輸出資料進行分析，研究流程如圖 3-8 所示。選擇北勢溪坪林雨量站與碧湖雨量站，以及南勢溪的福山雨量站及大桶山雨量站之歷史雨量資料為分析對象。其中坪林、大桶山與福山雨量站之紀錄年分由 1977 年起始，然而因資料缺漏之緣故，本研究取 1979~1990 期間雨量資料作分析；而碧湖雨量站之紀錄年分由 1971 年起始，統計完整年份 1972~1990 年期間資料。

本研究中延續前人全年相關性分析，針對模式模擬雨量與歷史雨量評估其相關性，以全年的相關係數為評估項目，將大氣環流模式基期推估值之月平均雨量與歷史月平均雨量進行相關性分析，藉由模式基期能否反映歷史月平均雨量特性，呈現豐水期與枯水期間明顯之趨勢，探討 GCMs 在模擬歷史豐枯水期趨勢上是否有合理的表現，以選擇合適應用於研究區域之大氣環流模式。另一方面，由於相關係數僅代表模擬值與實際值有相似的趨勢，模擬值與實際值間不一定具有相近值。因此研究中加入均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)之考量，探討 GCMs 模擬之基期雨量與實際雨量之間量值是否接近，此部分分為豐水期、枯水期分析討論。本研究在評估大氣環流模式反映歷史特性的能力部分，共分為全年相關係數、枯水期 RMSE、豐水期 RMSE 三項評估項目。均方根誤差由式(2)計算

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{sim,i} - X_{obs,i}}{X_{obs,i}} \right)^2}{n}} \quad (2)$$

接著研究中以排名法與扣分法進行 GCMs 之挑選之分析。排名法為針對十種模式進行排名，當相關係數最接近 1 表示與實際值趨勢愈相近，因此排名至最前；而在 RMSE 之部分，以 RMSE=2 為例，代表模擬誤差 200%，因此 RMSE 越小表示模擬值與實際值愈接近，排名愈前面。將三個評估項目排名後，將名次加總，總分愈小顯示排名愈前，表示該模式對歷史雨量特性之模擬具有較優異表現，則優先予以挑選。

第二種以及第三種方法皆為扣分法，其差異在於扣分所設之門檻值不同，Suppiah et al. (2007)之研究評估空間中 GCMs 模擬值與觀測值間的關係，取觀測值與模式模擬值 1961-1990 季平均資料，將 GCMs 對澳洲全區域內插為數個 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 網格點，並將各網格內之觀測資料計算平均值，分析全區域之 RMSE 和相關係數。而其技術得分使用 demerit point system (Whetton et al.,2005)，Whetton et al. (2005) 將溫度和雨量之相關係數門檻值設定為 0.6，RMSE 門檻值為 2；而 Suppiah et al. (2007) 使用其方法並將門檻予以修正，當溫度、雨量之相關係數低於 0.8 或 RMSE 高於 2 扣一分，若相關係數低於 0.6 或 RMSE 高於 4 再扣一分，依此記錄得分並加總各季節分數，挑選扣分較少之模式。

Suppiah et al. (2007)、Whetton et al. (2005)依四季分別評估澳洲全區域數個網格點空間關係，而本研究區域為新店溪流域，使用鄰近網格點資料(一點)，分析同一格點與觀測資料於全年、豐水期與枯水期之相關係數以及 RMSE，探討模擬值與觀測值時間之關係，兩者分析對象有所不同，後續研究可持續深入探討。研究於挑選方法參考 Suppiah et al. (2007)、Whetton et al. (2005)之概念，但因分析對象的不同，並且門檻值對本研究區域鑑別力具有差異，將門檻值予以修正；而在計分部分，Suppiah et al. (2007)、Whetton et al. (2005)設定為若相關係數或 RMSE 其中任一未達門檻值則扣一分，但對於本研究區域，此計分方式會使得多數模式皆為同分，無法予以挑選，並且三個評估項目對象並不相同(全年、豐水期與枯水期)，因此研究中將各別項目獨立扣分並累加總分。

本研究使用之扣分法如下，考量相關係數門檻值為 0.6 時，對於本研究區域較具有鑑別力，因此將扣分法 A 與扣分法 B 之相關係數門檻值設定為 0.6，若評估項目之相關性小於 0.6，則扣 1 分；另一方面，在 RSME 的部分，因本研究中 RMSE 大多低於 1，因此若將門檻值設定為 4 或 2，在本研究區域中無鑑別效果，無法在此評估項目區分模式優劣，因此研究中分別將 RMSE 之門檻值設為 1 和 0.5。扣分法 A 將 RMSE 之門檻值訂定為 1，若評估項目之 RMSE 值大於 1，則扣 1 分，反之則不予以扣分，將所有評估項目加總後，選擇扣分較少者。而扣分法 B 之門檻值略有不同，相關係數之門檻依舊訂定於 0.6，而 RMSE 之扣分門檻值則訂定於 0.5，六種評估項目加總後挑選總分較高者。

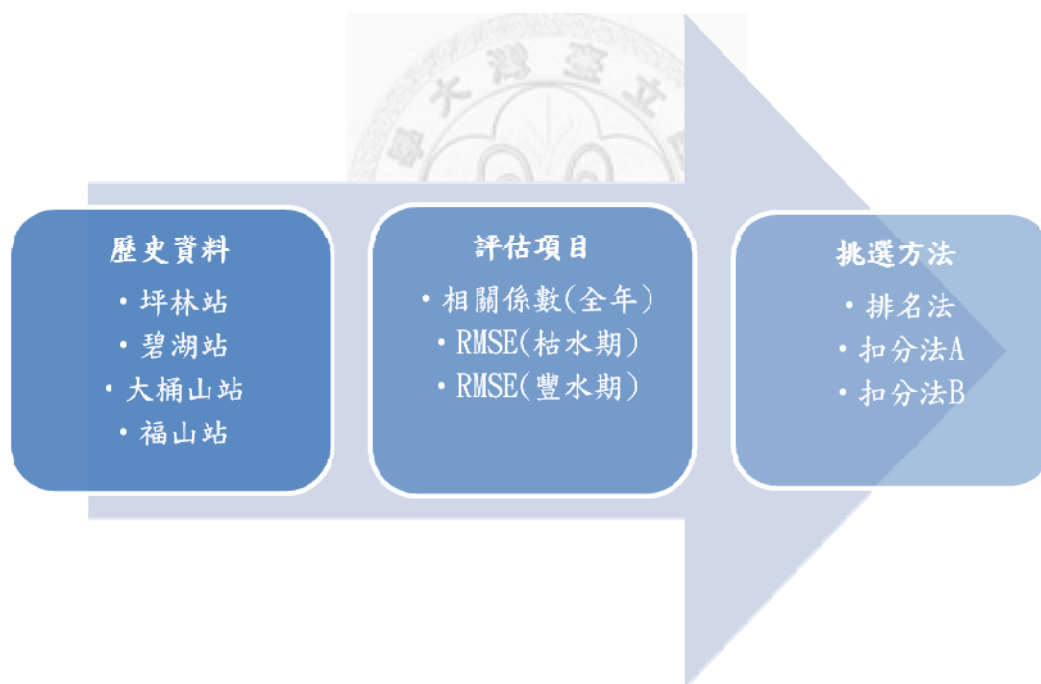


圖 3-8、模式挑選流程

相關性及 RSME 分析結果

研究分析十個大氣環流模式基期雨量與四個雨量站(坪林站、碧湖站、大桶山站、福山站)之歷史資料間相關性與 RSME，圖 3-9 為各雨量站與大氣環流模式基

期之相關性比較，圖 3-10 與圖 3-11 分別為各雨量站與大氣環流模式基期之枯水期 RMSE 與豐水期 RMSE。分析各模式基期月平均雨量與歷史月平均雨量之相關性，結果顯示較大之差異(圖 3-9)，各個模式表現不一，少數模式呈現較低的相關性(MIMR 模式)或負相關(IPCM4 模式)；而部分模式具有較佳相關性，顯示模式推估之基期雨量表現豐、枯水期趨勢，能反映本研究區域豐枯差異之特性。分析 GCMs 基期雨量與四個雨量站歷史雨量之 RMSE，顯示在量值方面，模擬值與實際值差異皆大，均方根值皆在 0.5~0.9 之間。然而同一雨量站歷史資料與十個模式模擬基期比較，模式間之差異不如相關性明顯，以坪林雨量站為例(表 3-2)，與十個模式基期枯水期雨量之 RMSE 在 0.417 至 0.713 之間，而同模式與不同雨量站間也有相近的結果，唯碧湖雨量站較其他雨量站有略高之 RMSE(圖 3-10、3-11)。而於同一模式中，無論豐、枯水期之 RMSE 結果差異不大，因此在研究中若僅以 RMSE 為篩選條件，可能不足以選出合適的大氣環流模式。四個雨量站與十個模式間之比較，三項評估項目計算列於下表 3-2 至表 3-5。

表 3-2 大氣環流模式與坪林站歷史雨量評估

坪林	R(全年)	RMSE(枯水期)	RMSE(豐水期)
GFCM2.0	0.646	0.713	0.769
GFCM2.1	0.626	0.518	0.676
CSMK3	0.498	0.535	0.638
HADCM3	0.449	0.492	0.669
INCM3	0.459	0.681	0.602
MIMR	0.103	0.473	0.525
MPEH5	0.736	0.417	0.565
MRCGCM	0.360	0.593	0.709
NCCCSM	0.450	0.468	0.628
IPCM4	-0.125	0.508	0.726

表 3-3 大氣環流模式與碧湖站歷史雨量評估

碧湖	R(全年)	RMSE(枯水期)	RMSE(豐水期)
GFCM2.0	0.842	0.829	0.853
GFCM2.1	0.718	0.699	0.790
CSMK3	0.620	0.690	0.763
HADCM3	0.289	0.678	0.779
INCM3	0.403	0.799	0.720
MIMR	0.365	0.512	0.686
MPEH5	0.695	0.630	0.714
MRCGCM	0.214	0.736	0.806
NCCCSM	0.342	0.640	0.755
IPCM4	-0.015	0.679	0.813

表 3-4 大氣環流模式與大桶山站歷史雨量評估

大桶山	R(全年)	RMSE(枯水期)	RMSE(豐水期)
GFCM2.0	0.634	0.713	0.769
GFCM2.1	0.518	0.518	0.676
CSMK3	0.524	0.535	0.638
HADCM3	0.361	0.492	0.669
INCM3	0.343	0.681	0.602
MIMR	0.210	0.473	0.525
MPEH5	0.580	0.417	0.565
MRCGCM	0.254	0.593	0.709
NCCCSM	0.515	0.486	0.632
IPCM4	-0.254	0.508	0.726

表 3-5 大氣環流模式與福山站歷史雨量評估

福山	R(全年)	RMSE(枯水期)	RMSE(豐水期)
GFCM2.0	0.588	0.713	0.769
GFCM2.1	0.617	0.518	0.676
CSMK3	0.452	0.535	0.638
HADCM3	0.457	0.492	0.669
INCM3	0.490	0.681	0.602
MIMR	0.028	0.473	0.525
MPEH5	0.749	0.417	0.565
MRCGCM	0.457	0.593	0.709
NCCCSM	0.741	0.486	0.632
IPCM4	-0.147	0.508	0.726

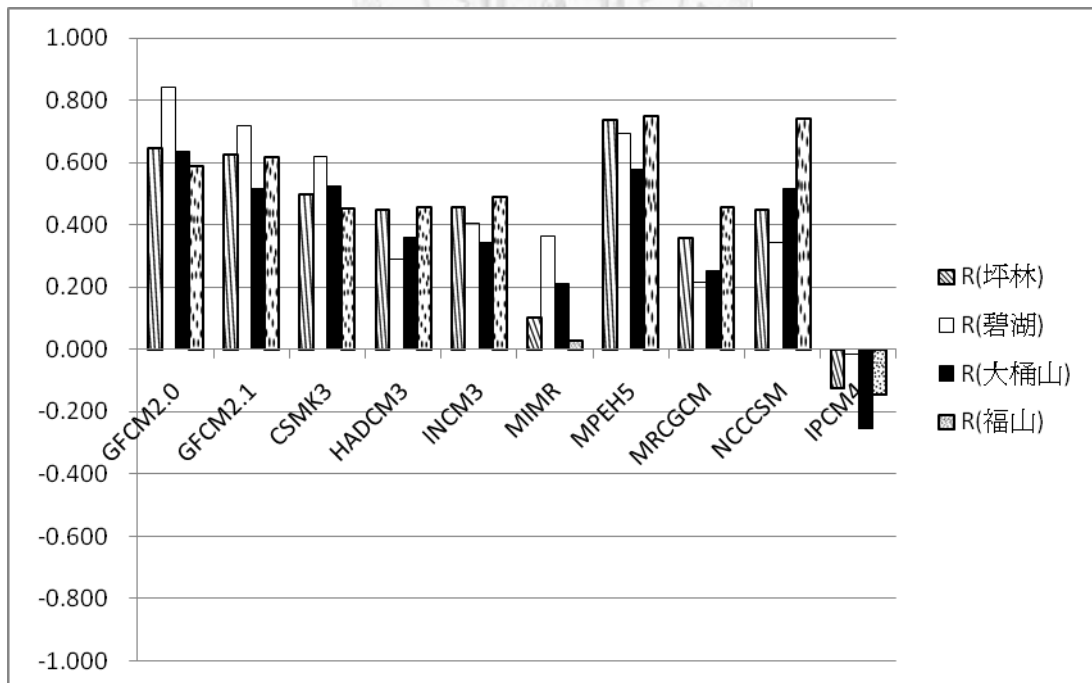


圖 3-9、各雨量站與大氣環流模式基期之R比較

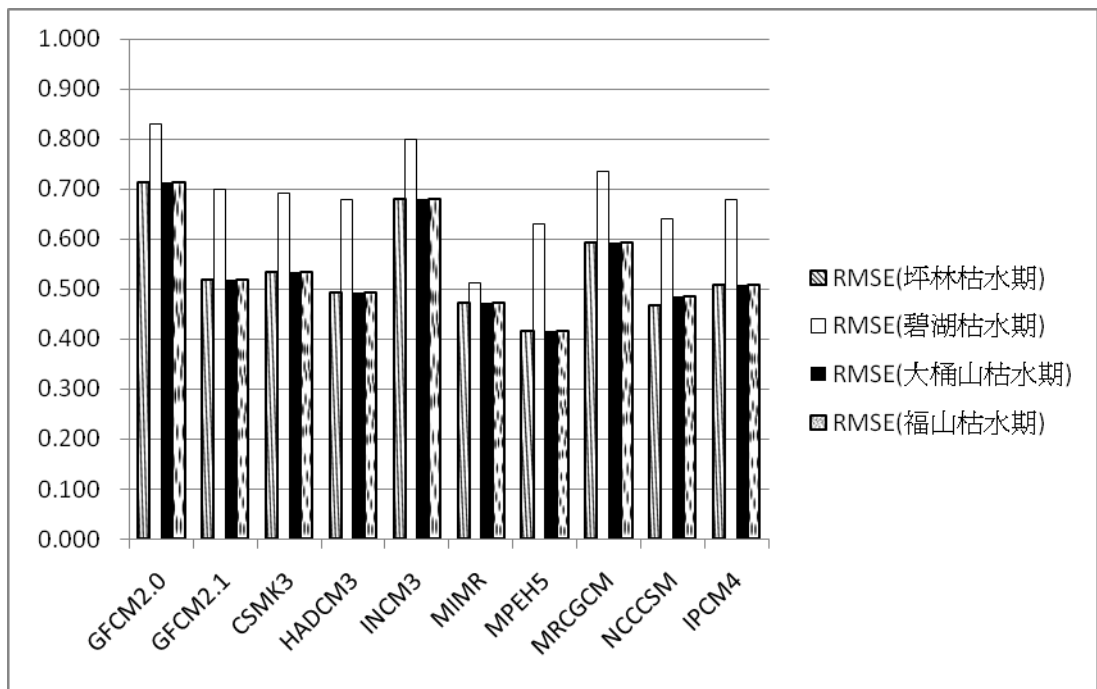


圖 3-10、各雨量站與大氣環流模式基期之RMSE比較

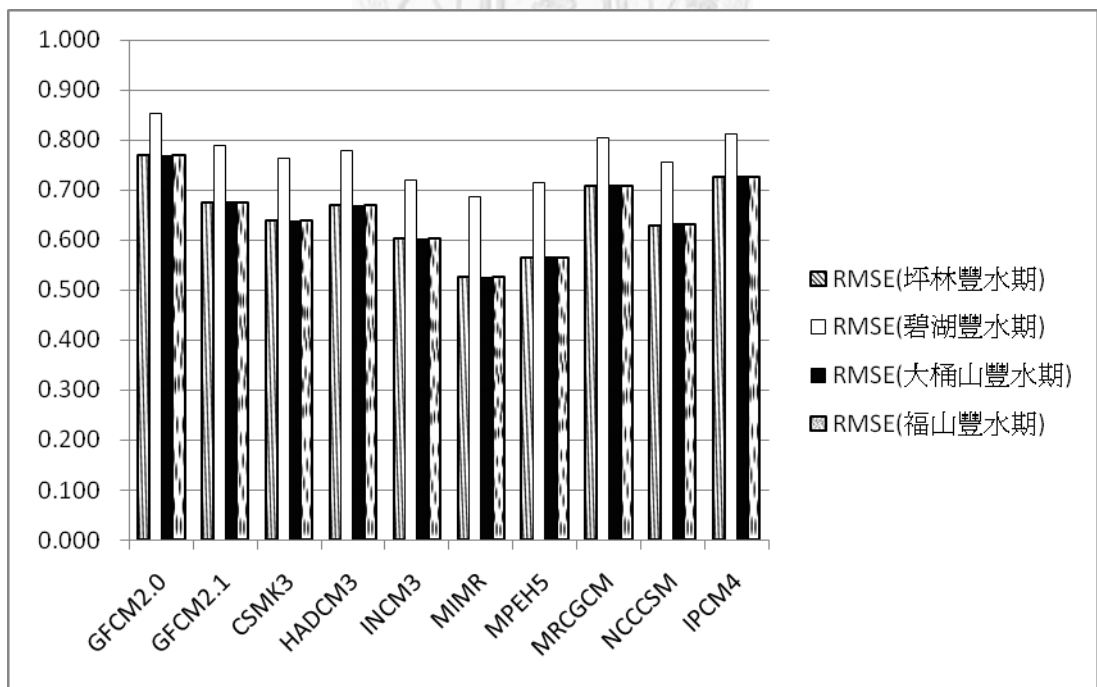


圖 3-11、各雨量站與大氣環流模式基期之RMSE比較

模式挑選結果

同時考量相關係數與 RMSE 為選擇條件，分別評估全年相關係數、枯水期 RMSE、豐水期 RMSE 三個項目，以此為大氣環流模式評估項目，使用排名法與扣分法進行大氣環流模式挑選，結果如表 3-6 至 3-8。

排名法為將十個模式在相關係數(R)與均方根誤差(RMSE)不同項目裡的表現進行排名，相關係數最接近 1 排名至最前，表示與實際值有愈相近之趨勢；而 RMSE 越小排名愈前面，代表模擬值與實際值愈接近。最後將三個評估項目加總，總分愈小顯示排名愈前。在排名法的應用上，首先發現依序排名再加總可能產生問題，若相關係數排序的第三名和第四名差距甚遠，然而在 RMSE 值很接近卻各列於第六名與第四名，加總後以名次顯出優劣，卻不易表達其中的差距。

研究中另外使用扣分法進行挑選，藉由門檻扣分的觀念，評斷模式於該評估項目之表現，將相關係數門檻值設定為 0.6，而 RMSE 之扣分門檻值分別設定為 1(扣分法 A)與 0.5(扣分法 B)。然而扣分法之門檻值設定不易，並且在不同區域可能適用不同門檻值，合適的門檻值對模式挑選具有鑑別力，能區分模式於該評估項目之優劣，然而各地區之歷史雨量特性已具有差異，與大氣環流模式模擬基期之月平均雨量之 RMSE 相異，若要訂定適用於各集水區且皆具有鑑別效果之門檻值實屬不易，並且與欲選擇之模式數目有關。

分析結果可發現門檻值之設定確實影響挑選結果，比較扣分法 A 與扣分法 B，相關係數門檻值相同；RMSE 門檻值分別為 1 和 0.5。扣分法 A 的 RMSE 扣分門檻值為 1，對於本研究區域所有值皆低於 1 的情況則無法篩選，相當於只以相關係數為篩選條件之結果，以表 3-7 中扣分法 A 應於大桶山站為例，只篩選出一個模式 GFCM2.0，其餘模式皆為同分，若想於此雨量站挑選數個大氣環流模式，則難以選出合適之模式。而當 RMSE 扣分門檻值定為 0.5，則可篩選出不同的等級，則較合適挑選，如表 3-8 所示，各雨量站皆出現不同分數階層，以本研究欲挑選較多大

氣環流模式而言，扣分法 B 之門檻設定於篩選結果呈現明顯之區分，相較於扣分法 A 較有利於挑選。

綜合評估排名法、扣分法 A 與扣分法 B 之結果，雖然因方法和門檻的不同，造成模式呈現順序差異之情形，但研究中並非只挑選一或兩種模式，而是根據多篇文獻之建議下，挑選多個大氣環流模式結果進行後續研究，而這三種方法所選出之較佳模式，即使順序不同，但大多為相同的數種模式。綜合評估三種挑選方法的結果，最後選出 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3、NCCCSM 與 GFCM2.0 共 6 個大氣環流模式，其中 GFCM2.1 為 GFCM2.0 之進階，因此兩者中選擇 GFCM2.1，因此研究中將應用 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM 五個大氣環流模式之輸出結果，修正歷史氣候統計資料，透過氣象合成模式，模擬產生未來之氣象資料。

表 3-6 排名法挑選大氣環流模式

排名法	坪林	碧湖	大桶山	福山
1	MPEH5	MIMR	MPEH5	MPEH5
2	MIMR	MPEH5	NCCCSM	NCCCSM
3	NCCCSM	NCCCSM	MIMR	MIMR
4	CSMK3	CSMK3	CSMK3	GFCM2.1
5	GFCM2.1	GFCM2.1	HADCM3	HADCM3
6	INCM3	INCM3	GFCM2.1	INCM3
7	HADCM3	HADCM3	INCM3	CSMK3
8	GFCM2.0	GFCM2.0	GFCM2.0	MRCGCM
9	MRCGCM	IPCM4	IPCM4	GFCM2.0
10	IPCM4	MRCGCM	MRCGCM	IPCM4

註：顏色相同之區塊代表總分相同

表 3-7 扣分法A挑選大氣環流模式

扣分法A (0.6,1)	坪林	碧湖	大桶山	福山
1	MPEH5	GFCM2.0	GFCM2.0	MPEH5
2	GFCM2.1	GFCM2.1	GFCM2.1	NCCCSM
3	GFCM2.0	CSMK3	CSMK3	GFCM2.1
4	IPCM4	MPEH5	MPEH5	IPCM4
5	NCCCSM	MIMR	MIMR	MRCGCM
6	MRCGCM	INCM3	INCM3	MIMR
7	MIMR	NCCCSM	NCCCSM	INCM3
8	INCM3	MRCGCM	MRCGCM	HADCM3
9	HADCM3	INCM3	INCM3	CSMK3
10	CSMK3	HADCM3	HADCM3	GFCM2.0

表 3-8 扣分法B挑選大氣環流模式

扣分法B (0.6,0.5)	坪林	碧湖	大桶山	福山
1	MPEH5	GFCM2.0	MPEH5	MPEH5
2	MIMR	GFCM2.1	MIMR	NCCCSM
3	NCCCSM	CSMK3	GFCM2.0	MIMR
4	GFCM2.0	MPEH5	NCCCSM	HADCM3
5	HADCM3	MIMR	HADCM3	GFCM2.1
6	GFCM2.1	IPCM4	IPCM4	IPCM4
7	IPCM4	NCCCSM	MRCGCM	MRCGCM
8	MRCGCM	MRCGCM	INCM3	INCM3
9	INCM3	INCM3	CSMK3	CSMK3
10	CSMK3	HADCM3	GFCM2.1	GFCM2.0

不同流域間模式挑選分析

使用同樣評估項目與挑選方法，應用於大漢溪流域(何宜昕，2010)和頭前溪流域(莊立昕，2010)，挑選出的大氣環流模式皆為 INCM3、MPEH5、MRCGCM、NCCCSM 與 HADCM3，卻與新店溪流域選出模式有若干相異。在大氣環流模式裡將全球分為網格狀，雖然大氣環流模式模擬網格尺度較大，但在大漢溪流域與新店溪流域除 NCCCSM 模式以外，最接近的網格點皆為同一點，然而由於降雨量受地形之影響大，例如山脈走向特性、迎風面與背風面的差異等等，相同集水區內的雨量站可能已經略有差異，不同集水區的地形條件差異更大，因此可能選出不同大氣環流模式。以新店溪流域的坪林站、大漢溪流域的秀巒站以及頭前溪流域的梅花站之歷史雨量進行分析，討論三個集水區之全年、枯水期與豐水期之雨量相關性情形，結果如圖 3-12 至 3-14 所顯示，由圖 3-12 與圖 3-13 可知坪林站與秀巒站及梅花站在枯水期相關性差，雖然坪林站與秀巒站在全年與豐水期相關性較高，然坪林站與梅花站在豐水期與全年相關性都非常低；但秀巒站與梅花站間無論是全年、豐水期或枯水期相關性皆優(圖 3-14)，表示秀巒站與梅花站之歷史雨量特性相似，因此易挑選到相同模式。

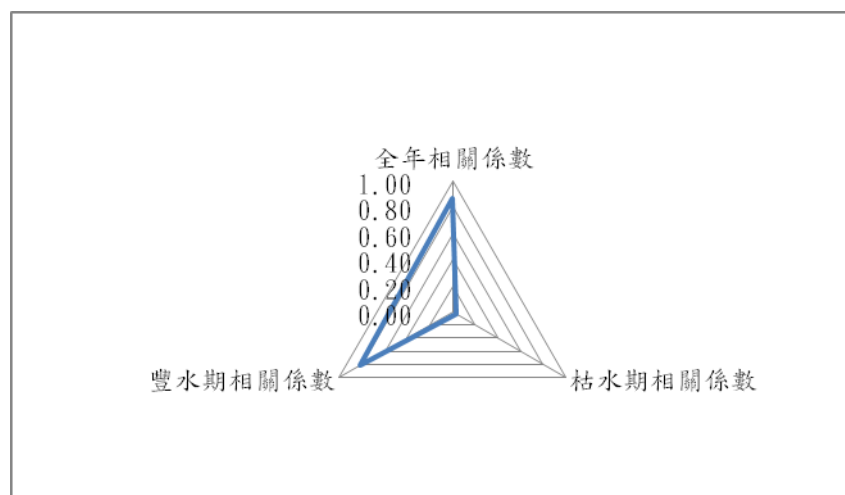


圖 3-12、坪林站與秀巒站雨量相關性

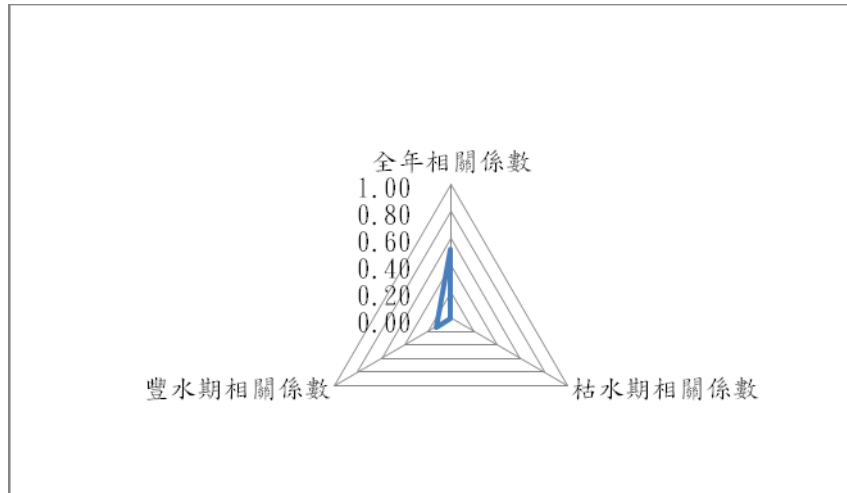


圖 3-13、坪林站與梅花站雨量相關性

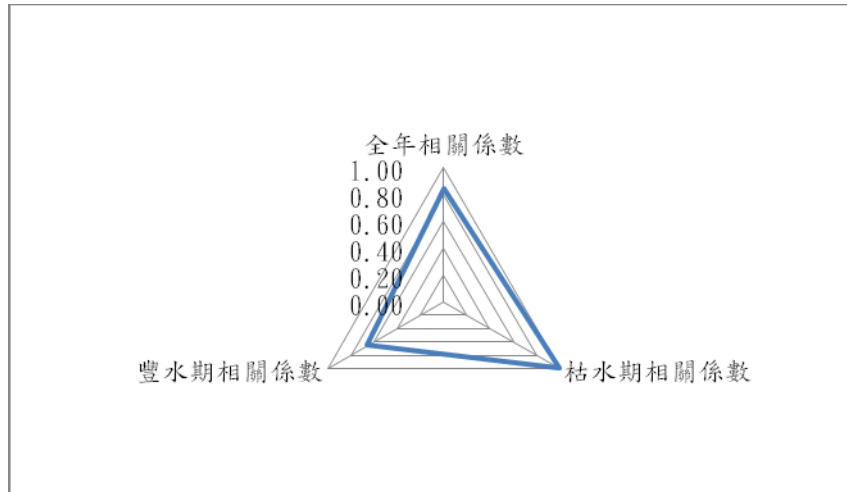


圖 3-14、秀巒站與梅花站雨量相關性

經過評估項目與挑選方法分析後，綜合挑選合適本研究區域之大氣環流模式，分別為 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM 五個模式，利用大氣環流模式提供的全球網格點氣候資料，選擇與研究區域翡翠水庫集水區地理位置最為相近的網格點資料，作為該地修正歷史資料統計特性的依據，分別修正歷史溫度與雨量統計特性：歷史月平均氣溫加上修正溫度值；歷史月平均雨量乘上修正雨量比值。修正後之溫度、雨量特性代表氣候變遷條件下之特性，並以氣象合成模式繁衍為日溫度、雨量資料。

3.2.3 氣象合成模式

修正後的統計資料表現未來氣候變遷之統計特性，本研究使用「氣象合成模式」，藉由降雨機率與降雨量的模擬，將未來氣候月統計特性繁衍成日氣象資料，產成多組未來可能氣象序列，藉由未來日溫度、雨量資料進一步模擬未來河川流量。本研究採用之溫度及降雨合成模式如(Tung and Haith, 1995)，簡單說明如下：

(1) 日溫度模擬模式

未來氣候條件下日溫度之模擬，由月平均溫度，透過一階馬可夫鏈做模擬(Pickering et. al, 1988；Tung, 1995)，其方程式如下：

$$T_i = \mu_{T_m} + \rho(T_{i-1} - \mu_{T_m}) + V_i \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2} \quad (3)$$

方程式中 T_i 為第 i 天的溫度， μ_{T_m} 為對應該月平均溫度， ρ 為該月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階系列相關係數 (First order serial correlation coefficient)。 V_i 屬於 $N(0,1)$ (Normal sampling deviate)， σ_T 為歷史資料對應該月份之標準偏差。假設每月的第一天溫度以該月的月平均溫度代替；可經由歷史溫度資料模擬出未來新的日溫度資料。

(2) 日降水量模擬模式

日降雨量之模擬，可分為降雨事件和降雨發生時之降雨量。降雨事件之模擬以歷史資料為演算依據，統計各月中第 $I-1$ 日降雨時，第 I 日降雨的機率，表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $I-1$ 日不降雨時，第 I 日降雨的機率，表示為 $P(W|D)$ 。當每月第一天，模擬產生 $(0,1)$ 間之亂數 RN ，當 RN 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；每月除第一日外，其餘日則利用前一日的降雨情形判定為降雨日或非降雨日，依照 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 的歷史資料統計值，若亂數 RN 小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日。第 I 天降雨事件判別如下：

若第 $I-1$ 天降雨量 >0 ，則當 $RN \leq P(W|W)$ ，第 I 天降雨；否則第 I 天不會降雨

若第 I-1 天降雨量=0，則當 $RN \leq P(W/D)$ ，第 I 天降雨；否則第 I 天不會降雨

未來降雨量值之模擬，根據洪念民（1996）可知由指數分佈(Exponential distribution)可模擬出理想的氣候資料。指數分佈方程式如下：

$$P = \mu_p(I) \times [-\ln(1-RN)] \quad (4)$$

上列方程式中 P 為日降雨量 (cm)， $\mu_p(I)$ 為對應第 I 月份雨天之平均降雨量 (cm)，RN 為介於 (0,1) 間的隨機亂數。

3.3 水文模式

3.3.1 GWLF(Generalized Watershed Loading Functions)模式

本研究評估水庫供水之穩定性主要可由連續性水文模式進行評估，因此本研究採用 GWLF (Haith and Shoemaker, 1987) 之流量子模式(後續簡稱 GWLF 模式)進行水庫入流量之評估。GWLF 模式藉由描述集水區各水文項目及其平衡關係模擬流量，開始於降雨將水帶入集水區系統，當降雨到達地面後，一部分之降雨則將形成地表逕流，直接流入河川；而另一部份之降雨入滲至土壤中，入滲之雨水補充未飽和含水層之含水量，當未飽和含水層土壤水分大於田間含水量 (Field Capacity)，則超過水分會因重力影響向下繼續滲漏到淺層飽和含水層，最後淺層飽和含水層將產生地下排水；地下排水量與逕流量之總和即為河川流量，模式水平衡概念如圖 3-15 表示。由上而下分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分之水平衡關係求得。

地表

集水區中水循環首先從降雨起始，當雨水降至地面之後，一部份則形成地表逕流，並直接流入河川；另一部份之降雨經由入滲至未飽和含水層中。其中降雨、入滲、與地表逕流之關係可以下列方程式表示：

$$I_t = R_t - Q_t \quad (5)$$

其中 I_t 是入滲量， R_t 是降雨量，而 Q_t 是地表逕流，單位為 cm/day。在GWLF中，採用Curve Number方法 (Ogrosky and Mockus,1964) 計算地表逕流，合理地反應土地利用方式及土壤水分含量。地表逕流量可計算如下：

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.8W_t)} \quad (6)$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100 \quad (7)$$

式中 CN 即為 Curve Number，其值因土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分而不同 (Tung and Haith, 1995)。

未飽和含水層

經由入滲之水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，其部分水分將滲漏至淺層飽和含水層。未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而被帶離土壤。未飽和層之水平衡式可以式(8)表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (8)$$

其中 U_t 是未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量， ET_t 是蒸發散量，而 PC_t 是滲漏量，式中所用的單位為cm/day。式(8)中之蒸發散量 (ET_t) 則受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影響，可由下式決定：

$$ET_t = \text{Min} [K_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (9)$$

蒸發散量 (ET_t) 估算的方法可以潛勢能蒸發散量 (PET_t) 乘上一個覆蓋係數 (K_{ct})

計算之，但其易受限於未飽和層之可利用之水分，因此本式取計算之蒸發散量與未飽和層水分之較小值，作為估算之蒸發散量。其中覆蓋係數決定於土地利用方式。一般評估潛勢能蒸發散量常使用Penman公式，但其所需資料包含風速及大氣濕度（或露點溫度）等。這些資料在氣候變遷之研究上不易取得或不確定性太高。IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] 曾對氣候變遷衝擊研究提出建議，當資料不足時，應利用需要參數較少之較簡單模式，在GWLF模式中潛勢能蒸發散量便由Hamon公式進行計算（1961）：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273} \quad (10)$$

其中 PET_t 是第 t 天潛能蒸發散量， H_t 是在第 t 天的日照時間（時）， e_{0t} 是飽和蒸氣壓， T_t 是日平均溫度（ $^{\circ}C$ ）。飽和蒸氣壓（ e_{0t} ）是溫度之函數，可由下列方程式決定：

$$e_{0t} = 33.8639 [(0.00738 \times T_t + 0.8072)0.8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136] \quad (11)$$

淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (12)$$

其中 S_t 是淺層飽和含水層之土壤水分含量， PC_t 是由未飽和含水層滲漏至飽和含水層之水量， G_t 是由飽和含水層排出至河川之水量（ G_t 之計算係考慮飽和含水層為一線性水庫，即 $G_t=r \times S_t$ ），而 D_t 是入滲至深層侷限含水層之水量，式中所用的單位為cm/day。在本研究中將入滲至侷限含水層之水量（ D_t ）假設為零。

未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量（ PC_t ）可由下式算出：

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \quad (13)$$

由於 U^* 是最大土壤水分容量，即田間含水量減去凋萎點間之水分容量，由此可知滲漏量即是指高於田間含水量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分。單位為 cm/day。

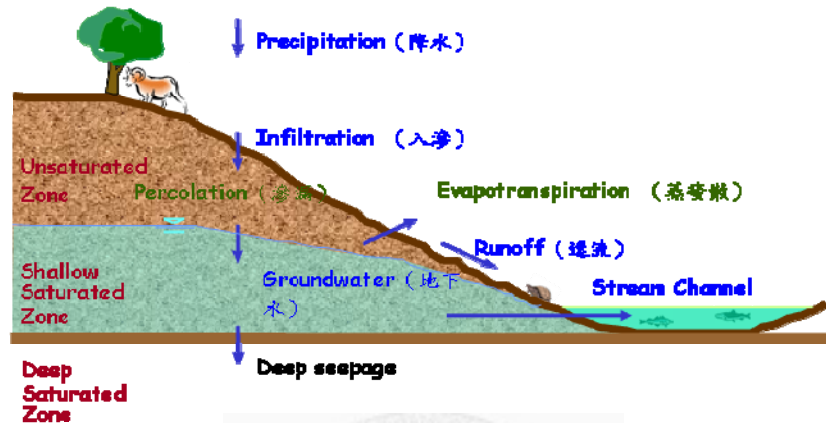


圖 3-15、GWLF 模式水平衡關係示意圖

3.3.2 半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式

本研究評估翡翠水庫防洪功能，主要聚焦在水庫於颱風事件之操作，包括水庫水位變化以及洩洪量是否能維持水庫安全。本研究使用半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式（王如意、謝龍生,1996；Hsieh,1999）作為本研究分析颱風事件水庫入流洪水歷線之水文模式。

本節為王如意、謝龍生(1996)與 Hsieh(1999)對於半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式建立之闡述，Nash(1957)指出一個集水區可視為 n 個線性水庫串聯之結果，每一個線性水庫具有相當之蓄水常數 K 。假設一單位之有效降雨量瞬間均勻地落集水區上，如圖 3-16 所示，則其降雨在集水區中遵循多條流路流達出口 (Rodriguez-Iturbe,1979a.b)。模式將每一流路中各核胞之漫地流與河渠流視為不同狀態；且將每一流路比擬為由數個不同狀態所串聯而成，而每一狀態比擬為一線性水庫。因此，每一流路之反應是由數個不同線性水庫串聯之結果，而該集水區出口處之反應乃是由所有流路之反應並聯線性所疊加而成，如圖 3-17 所示。

半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式中之蓄水常數 $K_{o_{nm}}$ 或 $K_{s_{nm}}$ ，其意義為洪水波峰流經所需之時間，亦即集流時間。模式中之蓄水常數估算乃採用 1994 年李、顏兩氏所推導之結果，以 V 型漫地流模型分別代表每一子集水區，漫地流之平均逕流時間可表示如式(14)：

$$K_{o_{ij}} = \left[\frac{N_o \overline{L_{o_{ij}}}}{S_{o_{ij}}^{1/2} q^{m-1}} \right]^{1/m} \quad (14)$$

式中 $\overline{L_{o_{ij}}}$ 為流路 i 第 j 個核胞之平均漫地流長度； $\overline{S_{o_{ij}}}$ 為流路 i 第 j 個核胞之漫地流平均坡度； N_o 為漫地流平均粗糙係數； q 為漫地流平面之均勻側入流量，在實際應用時以降雨強度代入； m 為運動波理論中漫地流水深之指數，若由曼寧公式之關係可得 $m=3/5$ 。而河渠流部份之逕流時間可表示為式(15)：

$$K_{s_{ij}} = \frac{B_{ij}}{2qL_{o_{ij}}} \left[\left(\frac{2qN_c \overline{L_{o_{ij}}} \overline{L_{c_{ij}}}}{S_{c_{ij}}^{1/2} B_{ij}} + h_{co_{ij}}^m \right)^{1/m} - h_{co_{ij}} \right] \quad (15)$$

式中 $\overline{S_{c_{ij}}}$ 為流路 i 第 j 核胞之河渠平均坡度； N_c 為河渠之平均糙度係數； B_{ij} 為流路 i 第 j 個核胞出口處之河渠寬度； $h_{co_{ij}}$ 為流路 i 之第 j-1 個核胞之逕流流入第 j 個核胞河渠之水深，當 $j=1$ 時， $h_{co_{ij}} = 0$ 。

各狀態之逕流時間可藉由各條流路之地文參數及降雨強度求得，模式中待估參數為漫地流平均粗糙係數(N_o)與河渠之平均糙度係數(N_c)。當集水區只劃分成一個核胞時，參數 N_o 與 N_c 分別為漫地流與河渠流之平均糙度係數；若將集水區劃分大於或等於兩個核胞時，參數 N_o 仍是代表漫地流之平均糙度係數，而參數 N_c 即已不是河道之平均糙度係數，其原因是模式結構係採用並聯型形式，將河道分割成數條獨立之流路，每一條流路之流量皆小於真實河道之流量，但為了模擬真實河

道洪水波峰之流速與逕流時間，因此需將每一條流路之參數值降低才足以模擬實際情形，所以參數 N_c 即已無實際物理意義，而只是一概念參數。

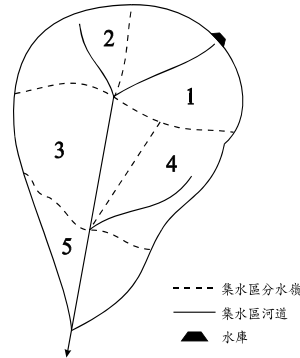


圖 3-16 集水區示意圖(Hsieh,1999)

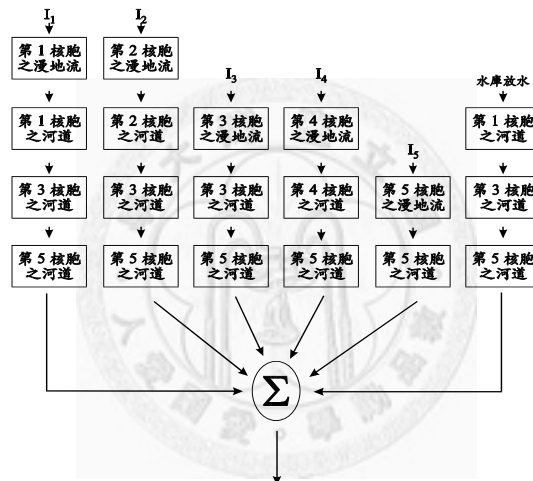


圖 3-17 模式結構示意圖(Hsieh,1999)

3.4 翡翠水庫水平衡與發電模式

為分析翡翠水庫在氣候變遷影響之下是否合乎其標的功能，需要模擬水庫運轉操作，以估算水庫蓄水量、發電量等資料。評估水庫供水功能時，水庫蓄水量表達其供給下游之庫存水量；評估發電功能時，其發電量藉由水位與放流量推估而得，可評估發電量之變化；而評估水庫防洪功能時，水庫的水位可由蓄水量推求，顯示洪災之下水位是否超過最大可能洪水位，確保水庫的安全性。因此，本研究以新店河流域之翡翠水庫為研究區域，建立水庫操作模式以模擬在不同情況下，翡翠水庫蓄水量、發電量變化。水庫蓄水量之變化，由水庫入流量與放流量所決定，上游河川北勢溪提供水庫入流量，而放流量則由南勢溪流量、下游需求

與水庫規則所共同決定(圖 3-18)。利用水庫水平衡方程式，可由式(16)計算出水庫蓄水量。

$$RS_t = RS_{t-1} + RQ - RR \quad (16)$$

式(16)為水庫水平衡方程式， RS_t 為本旬旬末蓄水量，而 RS_{t-1} 為上旬旬末可供水量， RQ 則為北勢溪流量， RR 為翡翠水庫放流量。

翡翠水庫水平衡與發電模式之建立，需要上游入流量與放流量進行水庫水平衡計算。翡翠水庫之入流量源於北勢溪流量，而水庫的放流量主要為補足南勢溪天然流量供應下游之缺乏。北勢溪與南勢溪之流量皆可由前節 GWLF 模式模擬而得。因此建立翡翠水庫水平衡與發電模式最關鍵的部分，乃是如何決定水庫之放流量。水庫的標的功能在於提供下游需求用水，然而根據不同水庫蓄水量，可能影響水庫提供較需求更多，或減低需求標準兩種截然不同之情況。另外在洪颯時期，水庫水位若超過規則中設定水位，將以洩洪方式調節使水庫水位回復。故本研究於計算水庫放流量，考量下游需求、蓄水利用運轉規則及防洪運轉規則三個重要的因子(圖 3-18)。

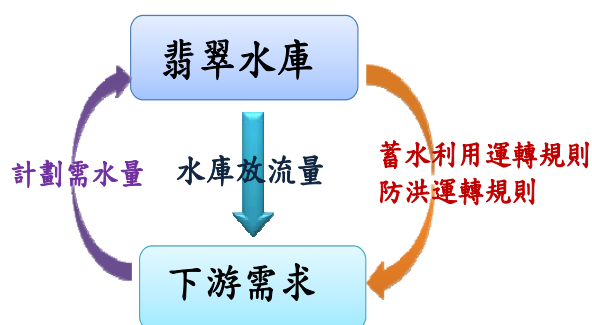


圖 3-18、翡翠水庫水平衡與發電模式建立之因子

下游需求

(1) 計畫需水量

各用水單位於每年十一月前，擬定次年度用水計畫需水量，並與翡翠水庫管理局協商同意後辦理。此計畫需水量為下游用水需求，由於翡翠水庫供給下游需求主要係以南勢溪流量為主，若南勢溪流量足夠供應計畫需水量，則翡翠水庫不需提供下游水量，反之，若南勢溪流量不足以提供計畫需水量，則水庫必須放水補足所需之水量。

(2) 板新地區供水改善計畫

為因應北部地區公共用水需求，水利署訂定「板新供水改善計畫」，由新店溪支援大漢溪水源，原供應板新淨水場之大漢溪水源調度至桃園地區，藉由區域間調度支援，協助減緩石門水庫供水壓力，板新地區原由大漢溪流域中石門水庫與鳶山堰提供水源，然而僅以大漢溪供應無法滿足板新地區之需求，藉由此計畫以新店溪作為支援，以水資源共享滿足板新地區的用水需求。「板新供水改善計畫」分為兩期，其工程期間、支援設備能力與支援地區整理於表 3-9。

表 3-9 板新工程簡介

	第一期工程	第二期工程
工程期間	民國90年至93年	民國96年至101年
可輸送設備能力	每日53萬公噸	每日101萬公噸(含一期)
支援區域	八里、三重、中和、五股、泰山、蘆洲、及新莊、板橋、土城部分地區之板新地區用水	樹林、鶯歌、三峽全部及板橋、新莊、土城等之用水可全部改由新店溪水源供應。
備註		主要工程項目為第二原水輸水幹線、直潭第六座淨水處理設備、信義支線、安華加壓站及安華新店線等。

綜合計畫需水量與板新地區供水改善計畫評估未來下游需求，除考量歷史計畫需水量，因板新二期計畫訂定於民國 101 年完工，新店溪水源將支援樹林、鶯

歌、三峽、板橋、新莊、土城等地區之用水，研究中將二期工程最大輸送量每日 101 萬噸納入考量，結合歷史計畫需水量與板新二期完成後最大輸水量，推估未來下游需水量，進一步評估氣候變遷對翡翠水庫供水與發電之影響。

蓄水利用運轉規則

水庫的放水量除評估下游需求量以外，必須根據水庫蓄水利用運轉規則，因此放水量會依水庫蓄水量在不同規線範圍有所變動。翡翠水庫的規線分別有上限、中限、下限、嚴重下限(圖 3-19)。由當翡翠水庫水位在中限以上時，除滿足計畫需水量外，可提供翡翠電廠發電：上限以上得滿載發電，上限到中限間得配合電力系統於尖峰時滿載發電。當水庫水位於中限到下限間，則以滿足計畫需水量為主；但若水位低於下限，得降低標準供水，與相關單位協商辦理。

因此在模擬放水時，本研究考量蓄水利用運轉規則評估發電放水量，發電放水量在規則中為彈性的描述，惟限制水位超過規線時之發電上限，而放水量與當時狀況、過去經驗以及簽定契約發電量皆有關係，在無法確知其發電放水量的情況下，研究中以該規線中最大值為考量：上限以上 24 小時滿載發電、中限至上限尖峰 6 小時滿載發電。並計算供水部份之需求放水量，即為下游需求量扣除南勢溪流量之值，其中下游需求量为計畫需水量與板新二期工程支援量之和。

比較發電放水量與需求放水量並考量水庫水位，以判斷模擬放水量。水位位於中限以上時，取發電放水量與需求放水量較大者為模擬放水量，亦為翡翠水庫水平衡與發電模式中的放水量；當水位低於中限時，模擬放水量即為需求放水量。並且由於洪災期間的洩洪量不經過翡翠電廠發電，直接由排洪設施放流至下游，故另計為洩洪量。至於水庫水位若低於下限或嚴重下限，則將與相關單位協商需求量作打折考量。根據臺北翡翠水庫管理局、財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會(2003)建議，在板新二期工程完成後，若水位下限至嚴重下限間，將對下游需求量打八折；若水位低於嚴重下限，基於考量後續期間之供水，對下游需求

量打六折。當水位位於各規線範圍，對應之模擬放水量列表於表 3-10。

表 3-10 模式模擬放流量之規則

	發電放水量	需求放水量	模擬放水量
水位>上限 (得滿載發電)	以24小時 滿載發電量 推估發電放水量	下游需求量- 南勢溪流量	取較大者
上限>水位>中限 (得尖峰時滿載發電)	以6小時 滿載發電量 推估發電放水量		
中限>水位>下限 (滿足計畫需水量)	由需求放水量 決定	需求放水量	
下限>水位>嚴重下限 (打折供水)	由需求放水量 決定		
水位<嚴重下限 (打折供水)	由需求放水量 決定		

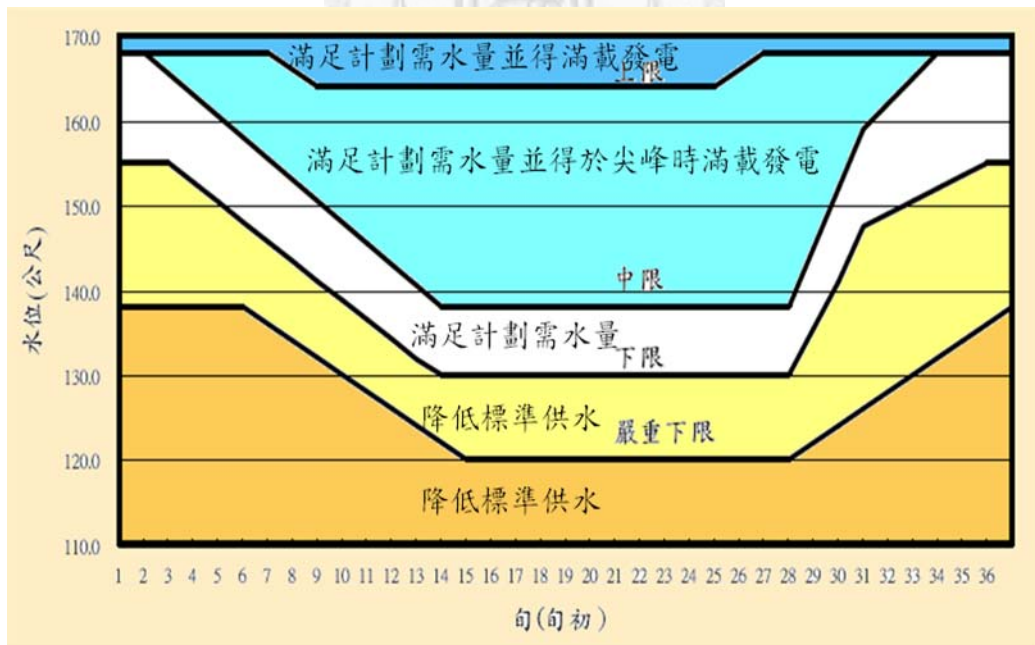


圖 3-19 翡翠水庫規線圖(來源：翡翠水庫管理局)

防洪運轉規則

翡翠水庫在一般時期由計畫需水量與蓄水利用運轉規則判斷放流量，供應下游需求，藉此實施水庫運轉操作。而在颱風、暴雨事件發生時，為因應豪雨導致之高入流量，翡翠水庫設立防洪運轉規則計算水庫放流量，在合適的時機放流至下游，以維護下游地區與水庫安全。翡翠水庫颱風情況下將啟動防洪運轉規則，此規則根據水庫入流量之變化，將颱風事件劃分為三階段進行操作(圖 3-20)：事件開始至水庫入流量不大於五百秒立方公尺為洪水來臨前階段；當水庫入流量大於五百秒立方公尺則進入洪峰發生前階段，而當入流量連續兩小時小於前一小時流量時，進入洪峰發生後階段。水庫在三個不同的階段中，各依據預估總降雨量、水位、入流量等因子進行評估，規範其放流量之範圍，並進行洩洪操作以確保水庫安全。然而，水庫的排洪設施包括壩頂洪道、排洪隧道與沖刷道等各具有設計流量，因此在防洪運轉時須格外注意其設計流量(表 3-11)，以期在操作下合理評估防洪功能。

表 3-11 設施設計放水量

設施名稱	設計放水量
八扇壩頂溢洪道	7670cms
三扇沖刷道	700cms
排洪隧道	1500cms

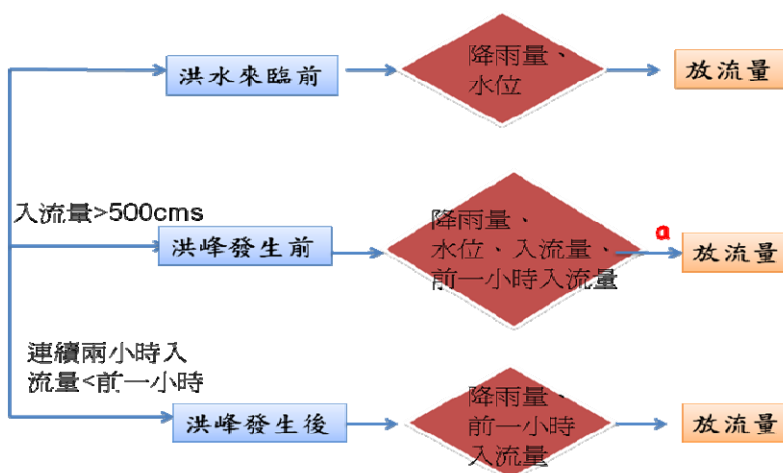


圖 3-20 翡翠水庫防洪運轉規則示意圖

第四章 氣候變遷下翡翠水庫供水與發電評估

近年來全球均有氣候異常或極端事件發生，氣候變遷議題逐漸受到重視。當氣候變遷對溫度及雨量產生影響，進而影響豐枯水期河川流量時，水庫預設之標的功能亦將造成影響。舉例來說，枯水期流量減少將影響水庫的供水與發電功能，而颱風時期之極端降雨將對水庫防洪功能帶來考驗。因此本研究以新店溪之翡翠水庫作為研究區域，評估氣候變遷對翡翠水庫供水、發電以及防洪之影響。

翡翠水庫主要標的功能為供水，其下游設有翡翠電廠附帶發電功能。翡翠水庫供給下游之放流量，首先經由電廠發電，發電尾水再供應至下游需求，兼具供水及發電之果效，而若發生颱風或豪雨事件時，翡翠水庫防洪功能將發揮功用，維護下游安全並水庫安全性。翡翠水庫具有供水、發電與防洪三項功能。研究探討氣候變遷對於翡翠水庫標的功能使否產生影響，並進一步提出建議。本章著重於分析水庫供水與發電功能在氣候變遷影響下所受之衝擊；而氣候變遷導致之極端降雨事件，對於水庫防洪功能之衝擊評估，則於第五章評估與討論。

本研究以新店溪之翡翠水庫為研究區域，探討氣候變遷對水庫功能之衝擊。IPCC 提供各國研究單位大氣環流模式 (GCMs) 對氣候變遷情境評估之結果，其中共有十個模式提供 B1、A1B 與 A2 情境之溫度、雨量推估值。經由分析十個模式基期反映歷史氣象特性之能力，從中挑選適合研究區域之大氣環流模式。並以簡易降尺度，將鄰近網格點之變化量，視為研究區域歷史特性之變化量，應用模式輸出之鄰近點格點資料，修正歷史溫度、雨量特性，並利用氣象合成模式繁衍未來氣象資料。合成之未來氣象資料經由 GWLF 模式 (Generalized Watershed Loading Functions) 評估氣候變遷預設情境下水庫可能的入流量，並由研究中建立之翡翠水庫水平衡與發電模式，考量水庫規則與下游需求，判斷水庫放流量，由水庫水平衡計算水庫蓄水量與發電量，評估氣候變遷對翡翠水庫供水與發電能力之影響。

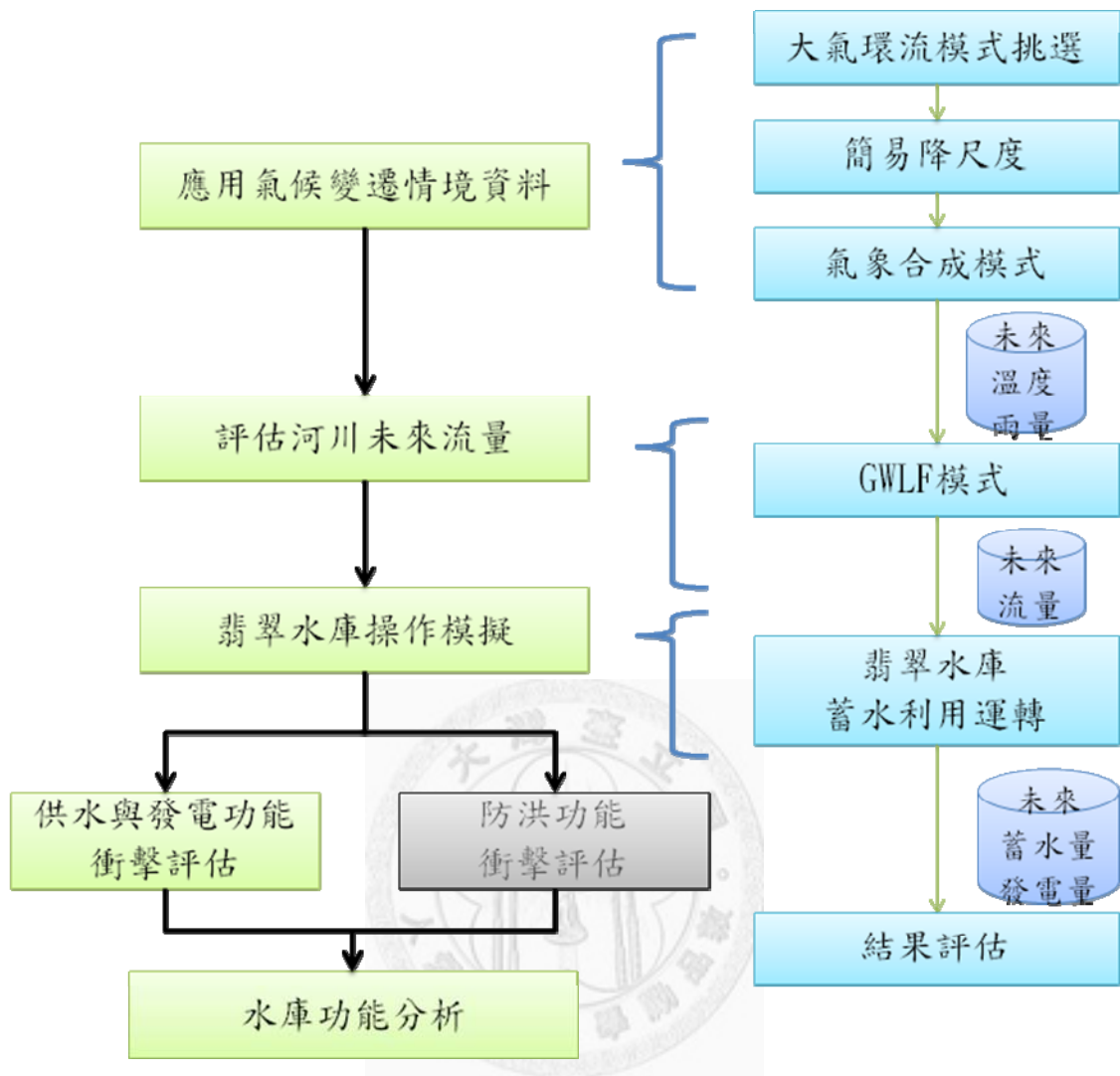


圖 4-1 氣候變遷翡翠水庫供水與發電功能評估流程圖

4.1 GWLF模式驗證

本研究藉由 GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 模式之流量子模式模擬南勢溪流量與北勢溪流量，作為計算水庫水平衡之必須來源，並模擬翡翠水庫蓄水量及發電量，評估氣候變遷對水庫供水與發電功能之衝擊。為推估不同氣候變遷下北勢溪與南勢溪流量，首先需要氣候變遷之日溫度、雨量資料。氣候變遷之氣象資料源於應用大氣環流模式輸出結果，將歷史氣象資料之統計特性予以修正，並經由氣象合成模式推估未來日溫度、雨量資料，作為未來氣候變遷氣象資料。GWLF 模式利用氣候變遷日溫度、雨量資料，並考量集水區的土地利用、土壤特性，藉由水平衡模擬未來氣候變遷之河川流量。

探討氣候變遷對 GWLF 模式參數產生之影響，GWLF 模式中的參數包括集水區面積、退水係數與相關土地利用等。由於北勢溪、南勢溪上游為水源保護區，由經濟部水利署台北水源特定區管理局管轄，維護土地使用、水土保持以保護集水區水量以及水質，因此在集水區面積、土地利用、土壤特性受保護的情況下，假設退水係數與土地利用面積不受影響，因此 GWLF 模式於氣候變遷條件下可應用於南勢溪與北勢溪流量評估。

為模擬氣候變遷下北勢溪與南勢溪流量，首先須驗證歷史流量資料，以確認此模式模擬本研究區域流量之合理性。模式除建立該集水區地文資料以外，需要評估集水區之退水係數，因此利用 1996 年至 2007 年暴雨事件之雨量及流量，分別計算北勢溪及南勢溪之平均退水係數。研究中採用 1996 年至 2007 年之歷史氣象資料，其中歷史溫度採用翡翠綜合氣象站之資料，北勢溪雨量資料採用翡翠水庫集水區雨量資料，南勢溪集水區則採用大桶山雨量站資料。

由 GWLF 模式模擬北勢溪與南勢溪之流量，驗證北勢溪與南勢溪歷史流量關係，如圖 4-2 至圖 4-5 所呈現，圖 4-3 標示高流量之模擬值與實際值比較，在圖 4-2 略有重疊分別為 170 旬與 171 旬。模式推估之流量較實際流量為低，北勢溪流量較實際值低估約 14%；而南勢溪流量則低估約 20%，顯示 GWLF 模式在模擬流量時呈現低估，於後續研究可持續探討此現象。然而應用 GWLF 模式推估流量於後續研究，評估現況與氣候變遷下之水庫功能，比較現況與未來變化時，GWLF 模式推估誤差之影響將相互抵消。而北勢溪旬實際流量與旬模擬流量之間 Nash-Sutcliffe 效率係數(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)為 0.94，相關係數為 0.98；而南勢溪之 Nash-Sutcliffe 效率係數為 0.79，相關係數為 0.88，由效率係數與相關性分析之結果，此模式對於本研究區域流量之模擬於可接受的範圍。

表 4-1 北勢溪與南勢溪驗證相關資料

流域名稱	北勢溪	南勢溪
雨量站	集水區雨量站	大桶山雨量站
氣溫站	翡翠綜合氣象站	翡翠綜合氣象站
流量資料	翡翠水庫入流量	桂山電廠流量
驗證年份	1996~2007	1996~2007
退水係數	0.1582	0.089
Nash-Sutcliffe效率係數	0.94	0.79
相關係數	0.98	0.88

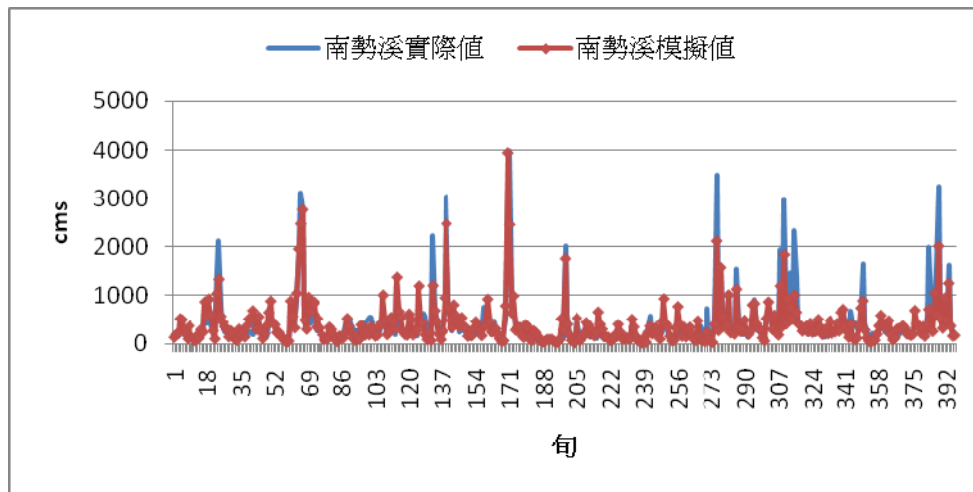


圖 4-2 南勢溪流量驗證

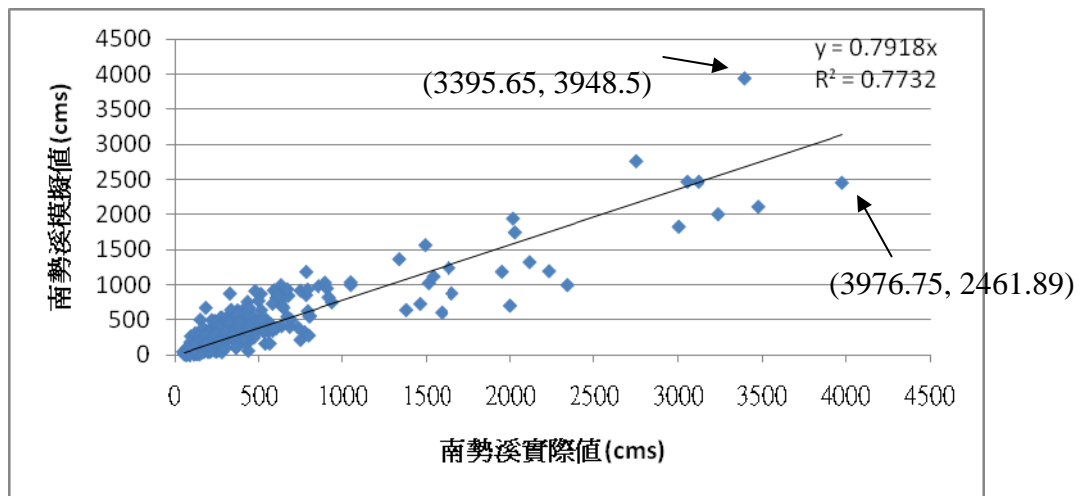


圖 4-3 南勢溪模擬流量與實際流量之相關性

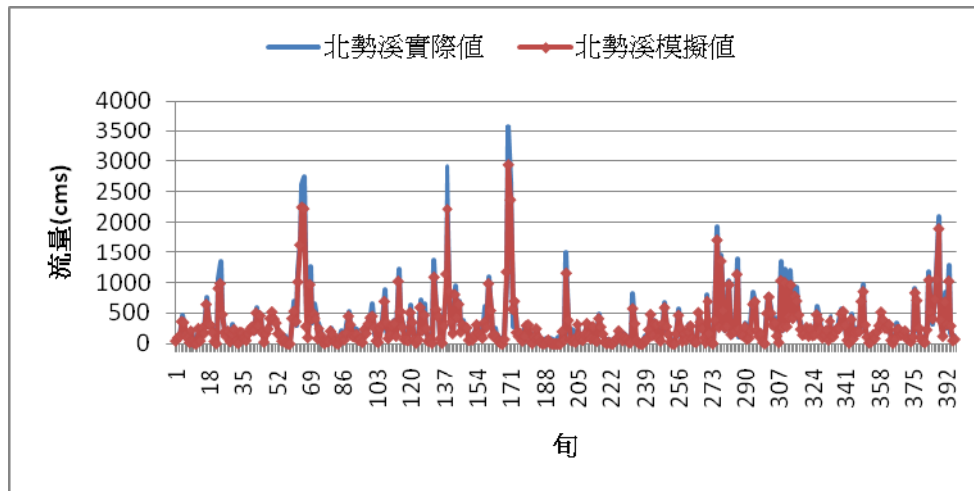


圖 4-4 北勢溪流量驗證

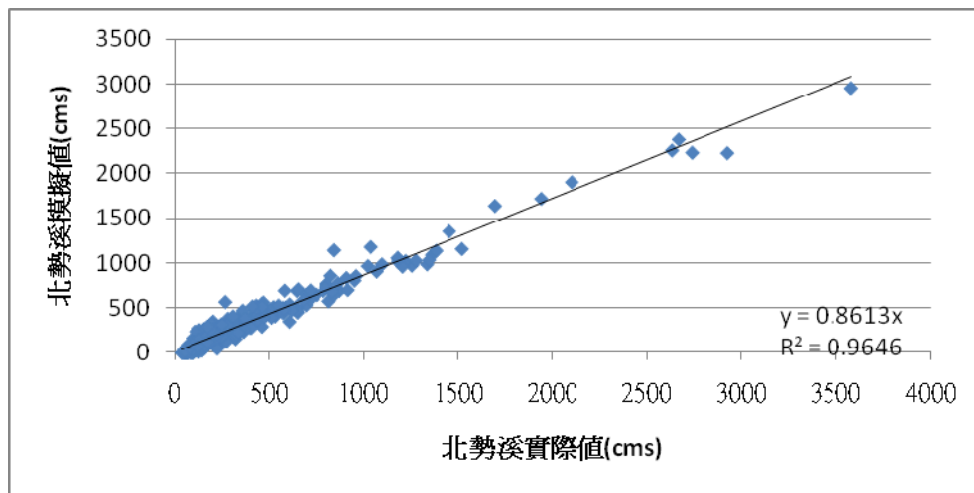


圖 4-5 北勢溪模擬流量與實際流量之相關性

4.2 翡翠水庫水平衡與發電模式驗證

翡翠水庫水平衡與發電模式建立之目的，在於藉由模擬水庫蓄水利用運轉規則之操作，評估氣候變遷下水庫蓄水量及發電量，進一步分析水庫供水與發電之標的功能是否受氣候變遷之影響。翡翠水庫入流量源於北勢溪流量，而南勢溪流量雖非翡翠水庫之來源，卻為下游供水之重要來源，因翡翠水庫放流量主要先考量南勢溪流量與下游需求，藉以判斷水庫可能需要供給之需求放水量；除此之外，亦依照水庫水位評估發電放水量，若水位高於上限，則模式中設定發電放水量為

24 小時滿載發電所需之水量；而若水位位於上限與中限間，則為尖峰 6 小時滿載發電之發電放水量。因此研究中依據下游需求、南勢溪流量評估需求放水量，並以水位評估發電放水量，比較兩者後模擬放流量，由上一旬末水庫蓄水量、北勢溪入流量、模擬放流量計算本旬蓄水量，推求水位並計算發電函數，與放流量相乘後評估該旬發電量。翡翠水庫放水量除洪水事件的洩洪量外，皆須流經翡翠電廠進行發電，於發電後再放流至下游。為模擬翡翠水庫運轉，本研究建立翡翠水庫水平衡與發電模式模擬水庫操作情況，考量下游需求、蓄水利用運轉規則、防洪運轉規則決定水庫放流量後，藉著入流量和放流量之水平衡計算，可模擬出翡翠水庫蓄水量之變化。在防洪運轉規則之部分，因模式操作時間尺度為旬，而颱風事件水庫運轉為小時操作，因此模式於連續模擬時如遭遇洪水事件，則評估整旬之水位，若超過規則中限制水位，則以洩洪方式進行水庫放流使水位回復，並繼續進行連續模擬。而颱風事件中按照防洪運轉規則小時操作，獨立於第五章進行模擬分析。水庫模式中亦考量翡翠水庫中設施與下游淨水廠之設計流量。

蓄水量驗證

為驗證翡翠水庫水平衡與發電模式，本研究以 2005 年 11 月上旬(枯水期開始)作為起始，至 2007 年 10 月下旬(豐水期結束)，進行連續兩年模擬操作。以北勢溪與南勢溪實際旬流量為入流量，以實際計畫需水量為下游需求，考量規則操作，驗證連續操作下翡翠水庫之旬蓄水量(圖 4-6)。由圖可知模擬蓄水量與實際蓄水量有相似的變化，但在較高的蓄水量時，下一旬的蓄水量呈現較為低估的現象，探討其原因可能如下：當蓄水量加上北勢溪入流量高於上限時，模式判斷放水量為滿足計畫需水量並且二十四小時滿載發電，然而研究中操作尺度為旬，無法如實際操作依照即時情況調整，以上述情形為例，當模式判定該旬為 24 小時滿載發電放流，但實際操作可能為低於上限後即時判斷減少滿載發電時數，因此模擬放流量較實際放流量多，使模擬蓄水量與實際蓄水量產生差異。

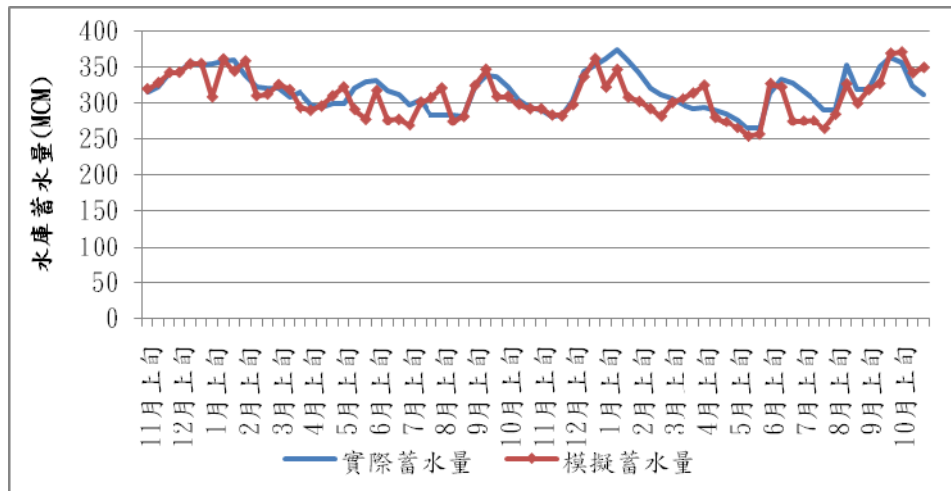


圖 4-6、驗證 2005 年 11 月至 2007 年 10 月翡翠水庫蓄水量

發電量驗證

翡翠水庫之放流量除洩洪量外，均先流經翡翠電廠進行發電後，放流至下游。發電量以發電係數乘上發電尾水量計算而得，其中發電係數為水位之函數，而發電尾水量為水庫放流量。水庫模式以旬為時間單位進行操作模擬，因此研究中經由發電放水量與需求放水量計算模擬放水量後，以整旬的模擬放水量作為發電尾水量(Q_p)，旬中平均水位計算發電係數(PC)，藉此計算整旬發電量，並進一步換算單位為度。

由於模擬期間(2005 年 11 月至 2007 年 10 月)翡翠電廠有設施更換之情形，包括勵磁機、用電配電盤、冷卻管汰換等，因此部分時間電廠並無發電；並且蓄水利用運轉規則於發電量部分為彈性之描述，惟限制水位超過規線時之發電量最大值，因此研究中設定發電量即為最大發電量，按水位與規線相對位置不同，設定 24 小時滿載發電、6 小時滿載發電和依據需求連帶發電，模式設定並非依照實際操作考量當時狀況、過去經驗、契約需求等發電，也由於模擬時間尺度為旬，無法如實際狀況隨時調整，因此以豐水期與枯水期作為檢驗之時間尺度，計算豐、枯水期模擬發電量與實際發電量之比值，驗證結果如圖 4-7。

由圖 4-7 可知，模式輸出之模擬發電量大多較實際發電量高，探討原因為當上旬末的蓄水量與北勢溪入流量合併後若高於上限，模式以滿足計畫需水量並且 24 小時滿載發電量評估放流量，然而實際操作依據經驗以及即時狀況，並非整旬皆採用 24 小時滿載發電放流，因此模擬結果呈現高估的情形。然而於 2007 年 9 月與 10 月，因韋帕颱風、921 大雨、柯羅莎颱風接連襲台，翡翠水庫以滿載發電操作，有時即使水位未達該旬之上限，但此時為預備水庫蓄洪之空間，於洪水來臨前將以 24 小時滿載發電放流調節水位，並且於洪峰發生後，水庫持續滿載發電放流使水位回復，因此造成較高之發電量。

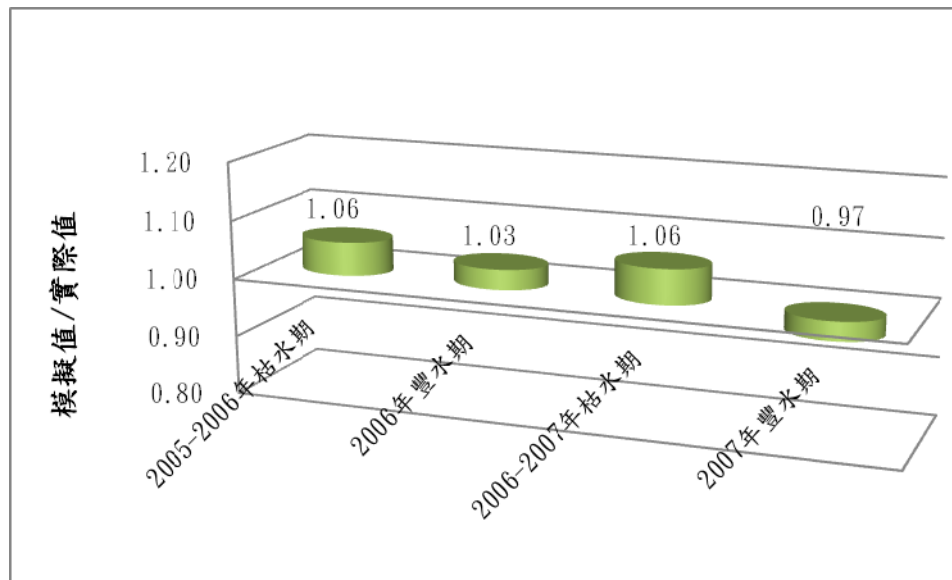


圖 4-7 2005 年 11 月至 2007 年 10 月豐水期與枯水期累計發電量

4.3 氣候變遷下翡翠水庫供水與發電評估

本研究以新店河流域之翡翠水庫為研究區域，應用 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM 五種大氣環流模式之輸出結果，將鄰近本研究區域的網格點之修正值，修正研究區域中歷史氣候資料之統計特性，成為代表氣候變遷之統計特性，並以氣象合成模式將修正後的溫度、雨量統計特性，繁衍未來氣象資料。將此氣象資料使用連續性水文模式 GWLF(Generalized Watershed

Loading Functions), 推估未來南勢溪與北勢溪之流量, 運用翡翠水庫水平衡與發電模式模擬水庫蓄水量與發電量, 評估氣候變遷對水庫供水與發電方面之影響。

研究結果分為兩部分, 第一為代表歷史特性, 以歷史統計特性重新生成, 第二為代表未來氣候變遷影響下三十種可能的結果, 分別由五種大氣環流模式在短期(2010-2039)與中期(2040-2069)的三個情境(B1、A1B 與 A2)。評估蓄水量與發電量皆依循蓄水利用運轉規則, 但若於颱風月份蓄水量過高, 則以洩洪作為調節, 使水位回復並繼續下一旬之運轉模擬。而下游需求的部分, 歷史需水量以歷史平均計畫需水量為考量; 而未來之需水量, 則合併考量歷史平均計畫需水量與板新二期計畫的輸送量。以下將依序分析氣候變遷對翡翠水庫供水與發電之影響。

供水

氣候變遷下翡翠水庫各旬之蓄水量如圖 4-8 至圖 4-13, 其中呈現歷史蓄水量 (rehis), 並將未來蓄水量以不同情境為分類(B1 短期、中期; A1B 短期、中期; A2 短期、中期), 依照 5 種大氣環流模式每旬蓄水量計算各旬 95%信賴區間, 以區域方式呈現未來翡翠水庫推估蓄水量。由圖 4-8 至圖 4-13 可見, 各個情境中蓄水量於各旬間可能分布範圍, 多數情境於枯水期區間狹窄, 而豐水期期間蓄水量分布廣, 顯示多數模式推估枯水期蓄水量具有相近結果; 進一步比較各情境豐水期之模擬蓄水量, 於 B1 情境短期、A1B 情境中期和 A2 情境中期之蓄水量呈現較寬之區間分布。上述現象可歸因於兩點: 模式間評估雨量變化之差異, 以及豐水期高流量導致水庫操作之結果。圖 4-14 至圖 4-16 為氣候變遷雨量和歷史雨量之比值, 氣候變遷雨量由大氣環流模式推估之修正值, 修正歷史統計特性並經由氣象合成模式繁衍日雨量之統計結果; 歷史雨量為歷史統計特性經由氣象合成模式重新生成日雨量之統計結果。圖 4-14 為五個大氣環流模式在 B1 情境推估之雨量與歷史雨量比值; 圖 4-15 為 A1B 情境推估之雨量與歷史雨量比值; 而圖 4-16 則是 A2 情境推估之雨量與歷史雨量比值。以圖 4-14 中豐水期雨量比值為例, 左邊顯示 B1

情境短期之豐水期雨量比值，而右邊則是 B1 情境中期之豐水期雨量比值，由圖可見 B1 情境短期雨量比值在各模式之結果較中期分散，因此 B1 情境短期在豐水期蓄水量分布較廣。並且 B1 短期豐水期之降雨比值較中期大，雨量增加導致流量增加，在水庫運轉操作中，容易使水位接近上限，但水庫模式對於水位高於上限或未達上限，具有截然不同之規則，因滿載發電量時間分別為 24 小時與 6 小時，放流量差異增大，因此導致豐水期蓄水量分布廣。

綜觀各情境於各旬蓄水位分布範圍，雖因各情境雨量變化不同，影響蓄水量分布範圍狹窄或寬廣，與歷史蓄水量比較如下，未來蓄水量區域相較於歷史蓄水量位置並無嚴重降低之現象，多數情境下歷史蓄水量落在或接近未來蓄水量區間。進一步將未來蓄水量與規線比較：多數時間蓄水量位於上限至中限之間，而在翡翠水庫規則中當水位低於下限，翡翠水庫管理局與相關單位協商降低供水標準，故模式在低於下限才採取打折供水，研究結果顯示未來氣候變遷之蓄水量於多數旬皆位於中限以上，惟有 11 月中旬至 2 月上旬略低於中限，但與歷史水位相近且未達下限。

除 95% 信賴區間顯示之結果外，研究中統計各模式之缺水旬數呈現於表 4-2、4-3，模擬總旬數共計為 10728 旬，所有模式、時期與情境之組合數，共有 30 種模擬結果。其中大多數模式推估結果顯示缺水旬數較少，唯獨 GFCM2.1 模式之 A1B 中期與 A2 中期情境顯示稍多分別占總旬數之 3.6% 和 1.6%，缺水率分別為 2.79% 與 1.23%。研究使用 GWLF 模式模擬流量，並經翡翠水庫水平衡與發電模式模擬而得蓄水量，由 95% 信賴區間顯示之結果說明氣候變遷下水庫蓄水量與歷史蓄水量相近，但豐水期區間變大，表示氣候變遷確實對水庫蓄水量造成影響；由統計缺水旬數結果可知，大多情境顯示缺水旬數較低，唯獨 GFCM2.1 在兩個情境中顯示偏高之比例，但仍值得持續關注，以確保翡翠水庫供水之穩定性。

表 4-2 模式缺水旬數統計表

模式缺水旬數					
	MPEH5	MIMR	GFCM2.1	CSMK3	NCCCSM
B1短期	0	0	68	0	7
B1中期	0	7	0	3	1
A1B短期	0	0	5	0	0
A1B中期	1	10	381	0	4
A2短期	27	1	1	1	5
A2中期	24	0	168	0	13
模擬總旬數	10728				

表 4-3 模式缺水旬數範圍統計表

缺水旬數範圍	個數
0	12
1~5	9
6~10	3
11~30	3
>30	3

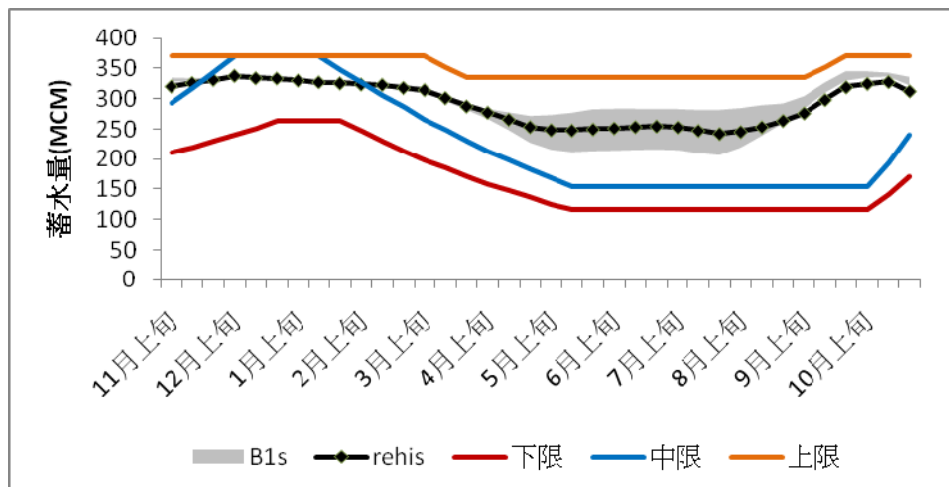


圖 4-8 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(B1 短期情境)

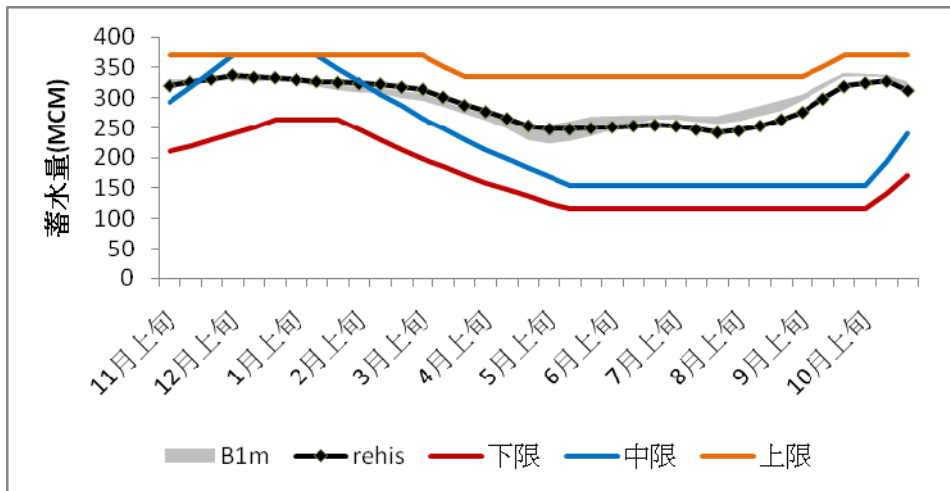


圖 4-9 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(B1 中期情境)

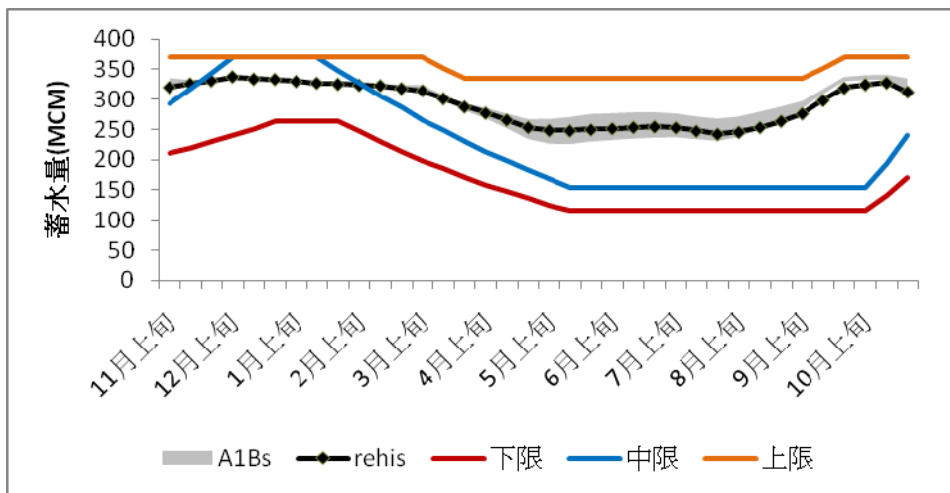


圖 4-10 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A1B短期情境)

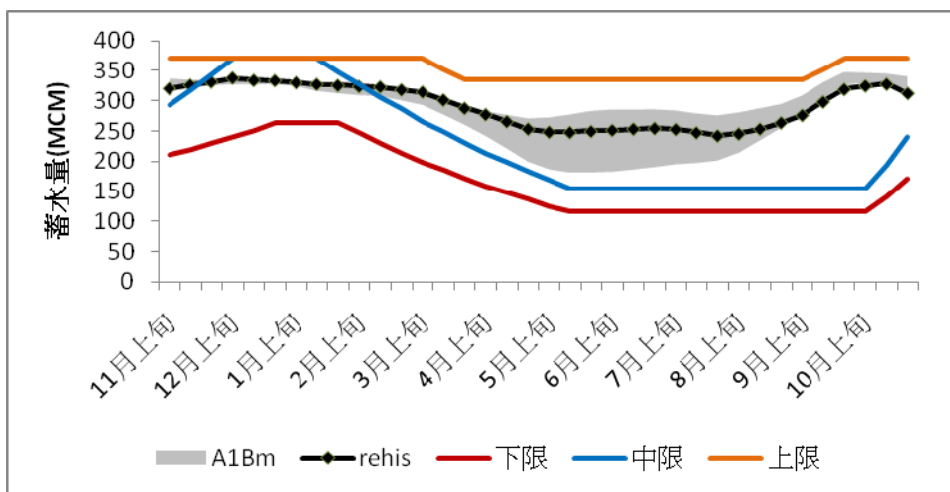


圖 4-11 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A1B中期情境)

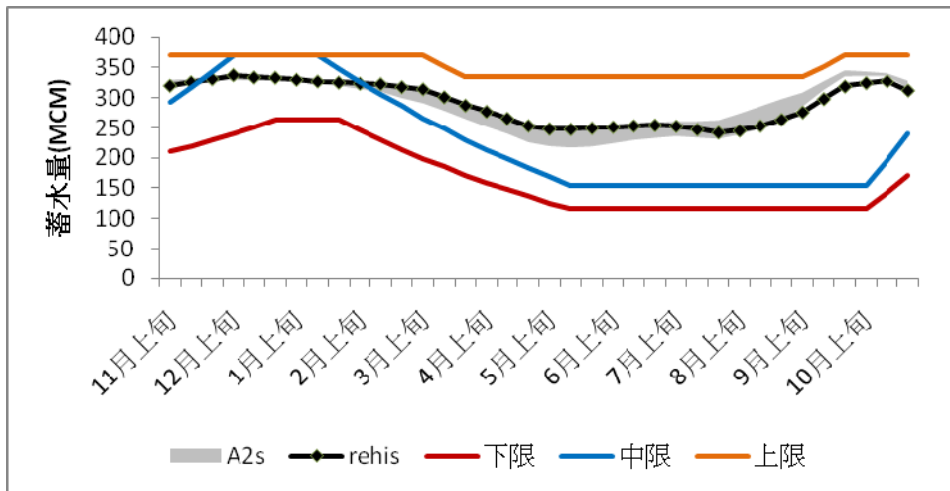


圖 4-12 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A2 短期情境)

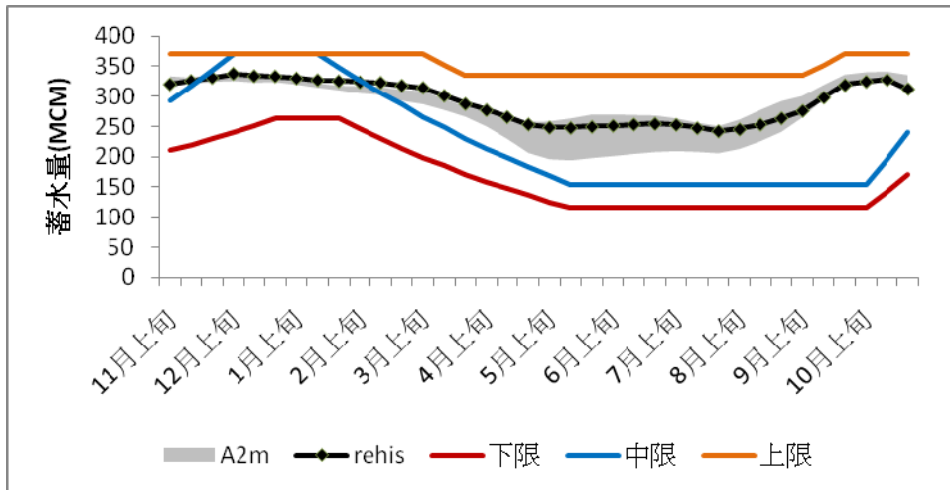


圖 4-13 氣候變遷下翡翠水庫之模擬蓄水量(A2 中期情境)

(a) 枯水期

(b) 豐水期

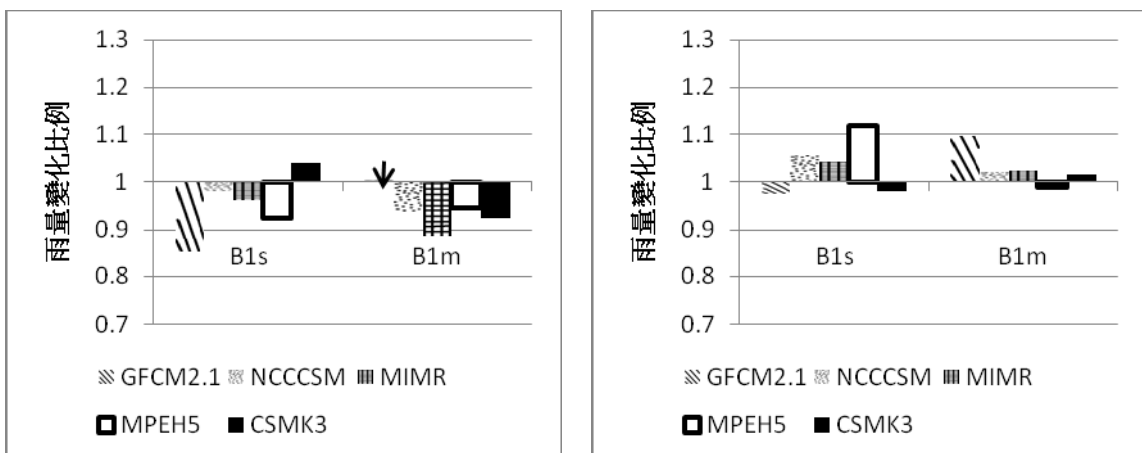
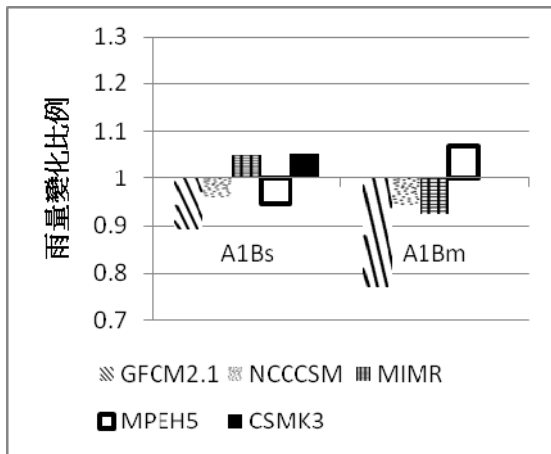


圖 4-14 B1 情境雨量比值

(a) 枯水期



(b) 豐水期

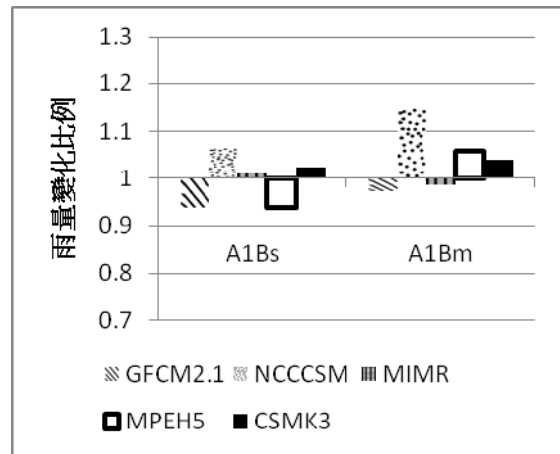
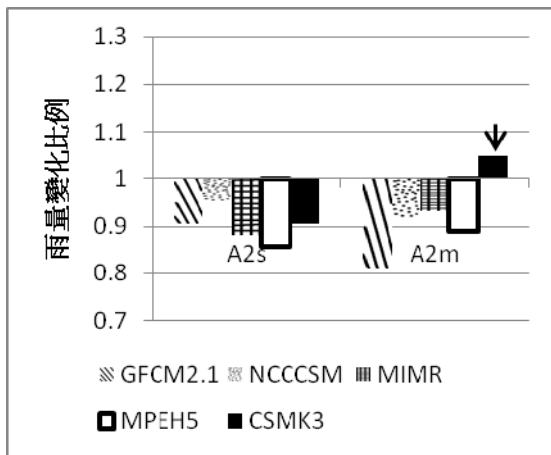


圖 4-15 A1B 情境雨量比值

(a) 枯水期



(b) 豐水期

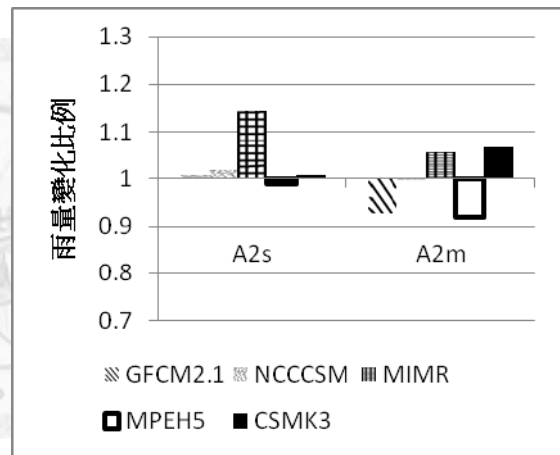


圖 4-16 A2 情境雨量比值

討論雨量變化對缺水率之影響，計算模擬期間 10728 旬之各旬缺水率，分別累加各模式豐水期(5 至 10 月)與枯水期(11 至 4 月)之缺水率，並且以相同方式計算歷史豐水期缺水率、枯水期缺水率，代表歷史特性之豐、枯水期缺水率皆為 0；而雨量變化為豐水期及枯水期之雨量與歷史雨量的比值。分析豐、枯水期缺水率和雨量變化之關係，圖 4-17 為枯水期缺水率與雨量變化之關係，枯水期雨量變化的範圍約為歷史之 0.77-1.07 倍，雖然雨量呈現減少之現象，但對翡翠水庫供水區域而言缺水率變化不大，缺水率多為 0，最大缺水率為 0.28%，發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式，其枯水期雨量在各模式中亦為減少最多者；而圖 4-18 為豐水期缺水率與雨量變化之關係，豐水期雨量變化比例為 0.92-1.62 倍，缺水率在多數模

式皆為 0，最大缺水率亦發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式之 1.24%，可歸因於枯水期雨量減少引發缺水之延續，且與該模式情境推估之豐水期起始(五、六月)雨量較低有關。

分別討論枯水期與豐水期期間，缺水率與雨量變化之關係，結果顯示在氣候變遷影響下，未來雨量發生變化，枯水期雨量約為歷史之 0.77-1.07 倍，豐水期雨量變化比例為 0.92-1.62 倍，但經由水庫儲蓄、調配水源，缺水率受雨量變化影響不顯著，部分模式推估結果稍受影響，而多數模式呈現供水穩定之情形。

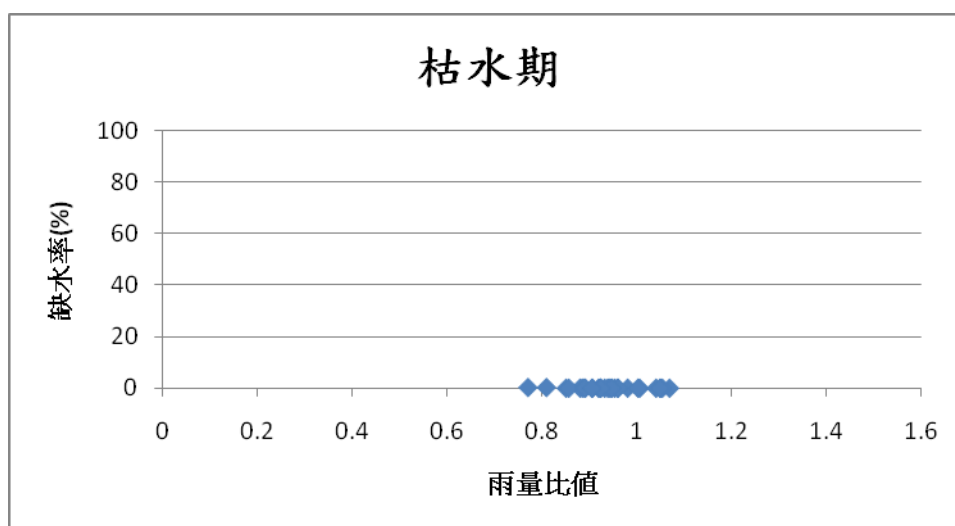


圖 4-17、枯水期缺水率與雨量變化之關係

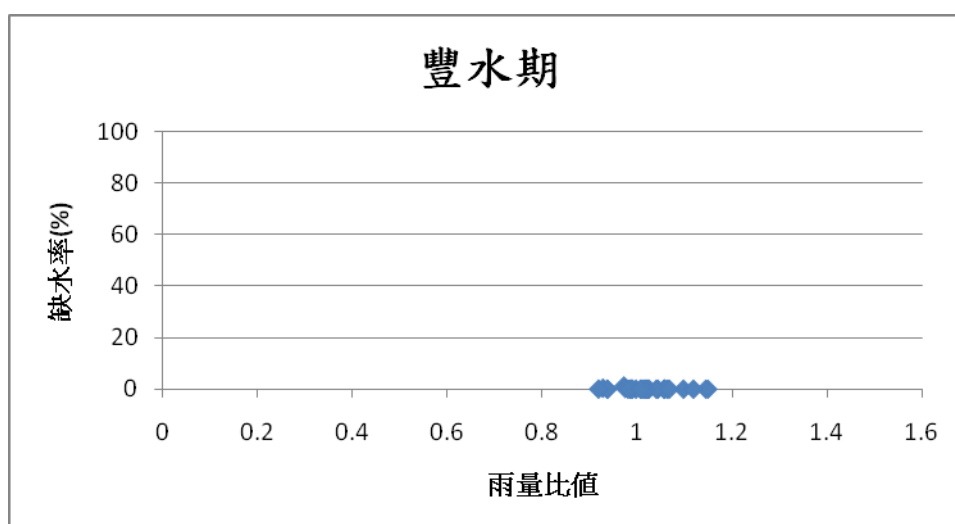


圖 4-18、豐水期缺水率與雨量變化之關係

發電量

氣候變遷影響下翡翠電廠發電量依照情境(B1、A1B、A2)為分類，以豐、枯水期分別討論，將模擬期間各旬發電量平均為每旬平均發電量，並按照豐、枯水期分別累加，將豐水期(18旬)旬平均發電量予以累加；枯水期期間旬平均發電量累加為枯水期總發電量，以此方式分別計算各情境下各時期之豐、枯水期總發電量。圖 4-19 為五個大氣環流模式在 B1 情境下，由歷史至短期、中期發電量的變化；圖 4-20 為 A1B 情境推估發電量之結果；而圖 4-21 則是 A2 情境發電量之變化。其中歷史代表依照歷史特性以氣象合成模式重新生成資料所推估之結果。

由圖 4-19 至 4-21 可見無論在各情境中，枯水期各個模式間推估之發電量變化較為一致，而豐水期發電量變化因模式差異明顯，呈現分布範圍也較大，以 A2 短期情境為例，比較各模式豐水期總發電量(18 旬累計)，模式間最大差值為 4 千 2 百萬度；同情境之枯水期總發電量(18 旬累計)最大差距為 2 千萬度，探討原因如下，一部分為模式間於同情境同時期之模擬雨量已產生差異，並且於豐水期雨量差異更為顯著使得流量不同，間接導致模式所推估之發電量範圍分布廣；並且因豐水期雨量豐沛，在流量較多之情況下，水庫水位常接近上限，但在模式中水位位於上限以上或上限以下，設定發電量截然不同，若在上限以上，將 24 小時滿載發電；而水位若低於發電量，模式中設定於尖峰時滿載發電，因此於豐水期間容易產生發電量之差異。

不同大氣環流模式預估結果經過不同期間發展相異。以 A2 情境之枯水期為例(圖 4-21)，除 CSMK3 模式以外，其餘模式中中期發電量較歷史皆呈現減低的現象；而比較 B1 情境枯水期之發電量(圖 4-19)，除 GFCM2.1 模式中中期發電量高於歷史年發電量以外，其餘推估中期時發電量相較於歷史發電量皆減少。分析發電量變化之因素，探討發電量公式中兩個重要的因素：水位與放流量。首先水位的變化與每旬的初始水位、入流量、放流量有關，入流量主要可溯源至雨量；而放流量

根據水庫規則，與水位(位於上限或中限以上)和下游需求相關，然而由於翡翠水庫無農業用水，下游需求於每旬之間無顯著差異。因此針對年發電改變之分析，著重在不同模式推估未來雨量與歷史雨量間的變化。

分析上段之例子：A2 情境中 CSMK3 模式在中期相較於歷史雨量增為 1.05 倍(圖 4-16)，因此成為該情境中唯一年發電量升高者；而 GFCM2.1 模式在 B1 情境中期之雨量，為歷史雨量之 1.01 倍(圖 4-14)，而其餘四個情境推估中期雨量比值皆小於 1，因此相較於歷史發電量皆減少。

(a) 枯水期

(b) 豐水期

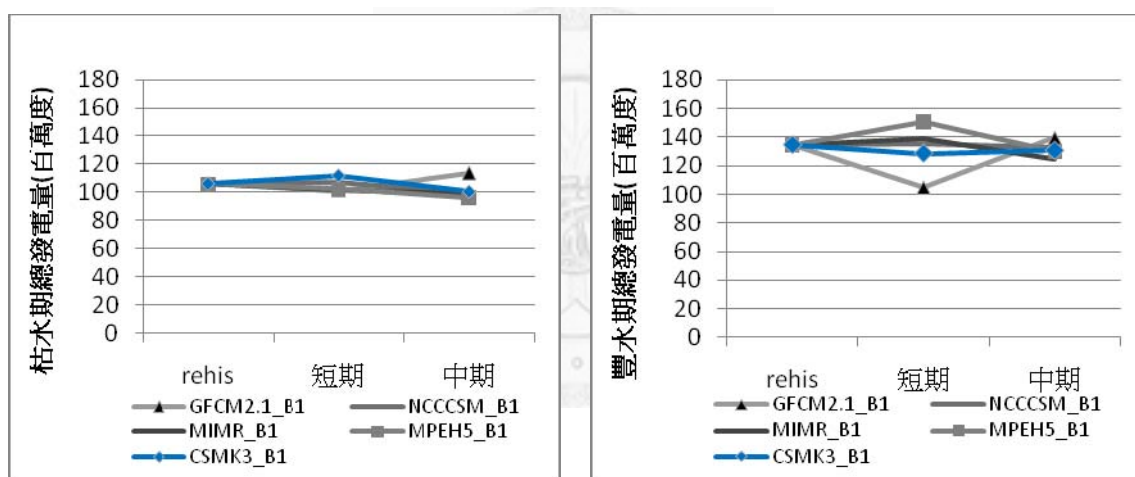


圖 4-19、B1 情境模擬發電量

(a) 枯水期

(b) 豐水期

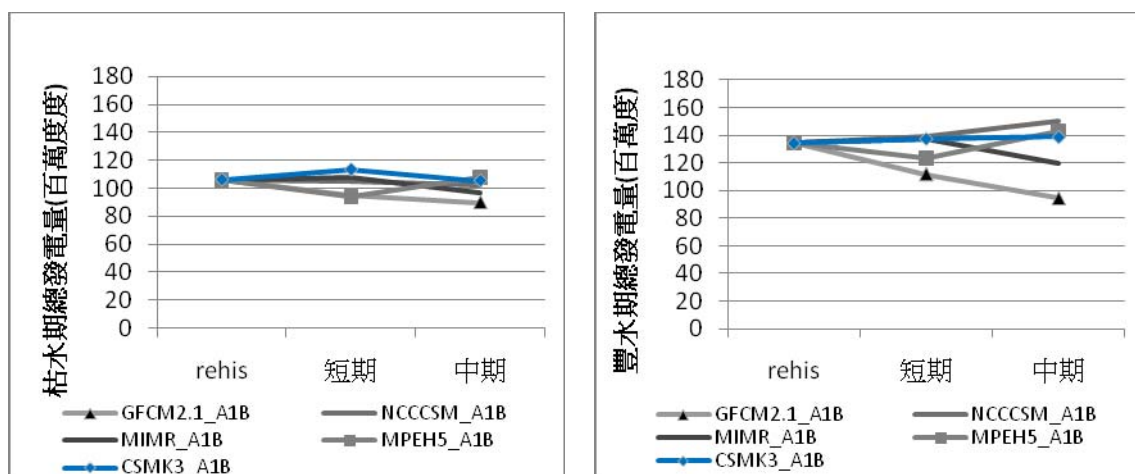
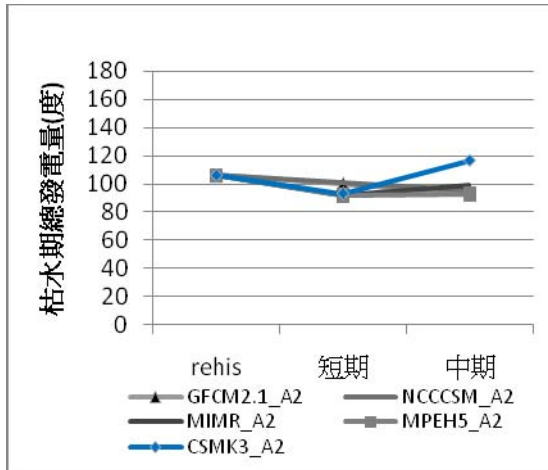


圖 4-20、A1B 情境模擬發電量

(a) 枯水期



(b) 豐水期

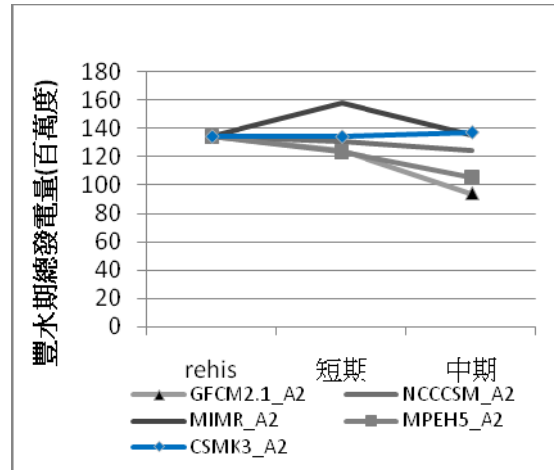


圖 4-21、A2 情境模擬發電量

分析發電量於各旬間的變化(圖 4-22)，將相同時期內同情境下的五個模式推估結果組合，共有歷史發電量與六項組合值，包括 A1B 短期組合、A1B 中期組合、B1 短期組合、B1 中期組合、A2 短期組合、A2 中期組合。將發電量分為豐、枯水期累加計算，檢驗發電量與雨量間之關係。分別將 5 至 10 月與 11 至 4 月發電量累加後，再分別與歷史發電量計算比值；雨量也分為豐水期及枯水期之雨量與歷史雨量的比值。分析兩個時期之發電量比值和雨量比值之關係，進一步探討相關細節。由圖 4-23、4-24 可發現，於枯水期旬雨量的增加使得旬發電量隨之增加，增加之幅度相近；而在豐水期期間，雨量增加的比例與發電量增加的比例不一定如同雨量相近，以 A2 短期 GFCM2.1 模式為例，雨量與歷史雨量比值為 1.01，但發電量只有歷史的 0.93 倍，這是由於在豐水期時若遭遇洪水事件，可能因此啟動洩洪機制，由於洩洪量不經由發電廠發電，直接流入下游，因此發電量增加的比例較雨量增加比例低。另外 GFCM2.1 於 B1 短期豐水期雨量為歷史 0.97 倍，但發電量卻減為 0.78，探討原因如下，其歷史蓄水量加上北勢溪的入流量位於上限以上，啟動最大 24 小時滿載發電，但在 B1 中因雨量減低，導致入流量降低，蓄水量與北勢溪入流量之和降至上限至中限之間，在規則中最大為 6 小時滿載發電，因此發電量驟降。

由此兩例可得知發電量受水位對於上限之相關位置影響甚大，尤其豐水期流量較高之特性，因此在模式設定規則以上限區分最大發電放水量，在發電量結果易受影響。然而模式在發電發流量是計算該範圍之最大值，並且與下游需求合併考量，按蓄水量之高低衍生不同的結果；但在實際水庫操作，依經驗、需求與當時情況等評估實際的放水量，其操作結果影響蓄水量的變化，並且改變下一個時期的起始蓄水量，因此與實際操作發電量具差異。

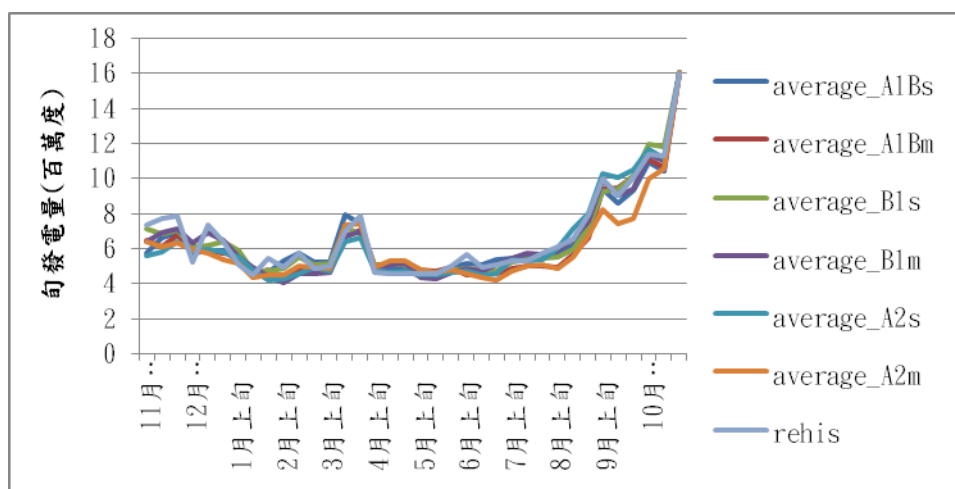


圖 4-22、氣候變遷下翡翠水庫之模擬發電量

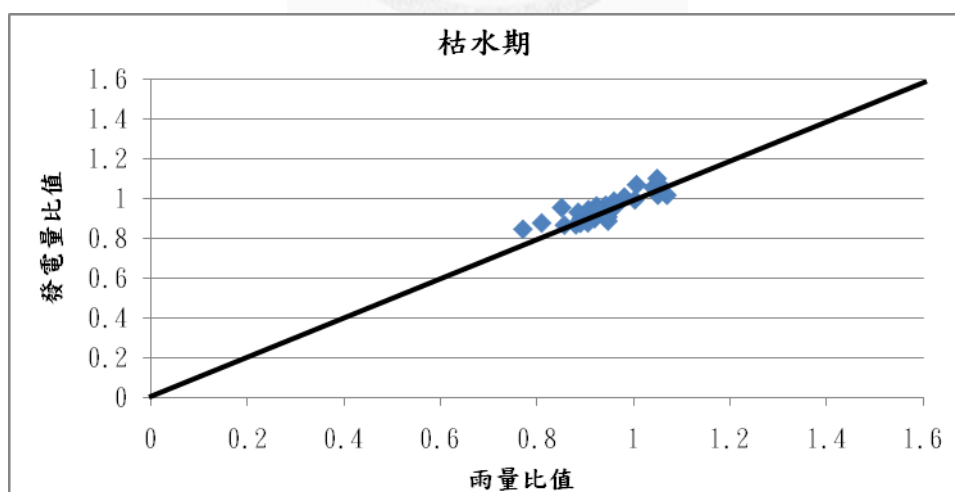


圖 4-23、發電量變化與雨量變化之關係(枯水期)

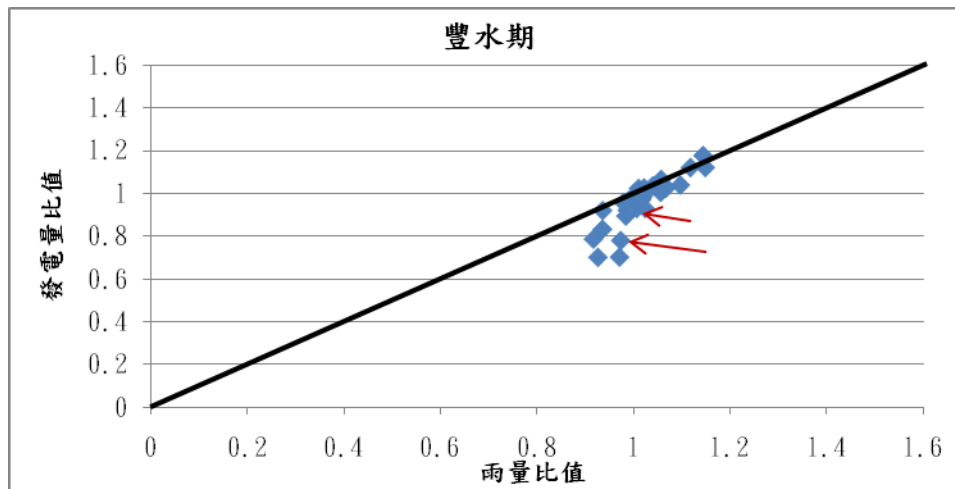


圖 4-24、發電量變化與雨量變化之關係(豐水期)

4.4 小結

本章評估氣候變遷對翡翠水庫供水與發電功能之影響，研究中利用大氣環流模式（GCMs）輸出結果，應用鄰近點格點資料修正歷史溫度、雨量之統計特性，並以氣象合成模式推估未來氣象資料。將未來氣象資料經由 GWLF 模式（Generalized Watershed Loading Functions）評估氣候變遷預設情境下水庫可能的入流量，並以翡翠水庫水平衡與發電模式，考量水庫運轉規則模擬水庫蓄水量與發電量，評估氣候變遷對水庫供水與發電能力之衝擊。分析結果如下：

1. 將模擬蓄水量以 95% 信賴區間呈現結果，各情境中枯水期區間較豐水期狹窄，顯示模式間評估之蓄水量具有相近結果；而各情境於豐水期間之比較，則與模式對雨量推估之差異相關，並且若雨量為增加之情況，因流量增加而導致水位接近上限，引發不同操作而產生差異。

2. 未來氣候變遷情境之蓄水量於 11 月中旬至 2 月上旬略低於中限，但與歷史水位相近且未達下限，而多數情境蓄水量區間與歷史蓄水量重疊或鄰近，且蓄水量多旬皆位於中限以上，說明氣候變遷於供水方面造成影響，然而不至於過度衝擊其供水功能。

3. 分析各模式推估結果，統計各模式於模擬期間缺水旬數之總和，模擬期間總旬數共計為 10728 旬，所有模式、時期與情境之組合數，共有 30 種模擬結果。其中大多數模式在各情境推估結果顯示缺水旬數較少，共計 12 個結果顯示不缺水，15 個結果缺水旬數在 30 旬以下，唯獨 GFCM2.1 模式之 A1B 中期與 A2 中期情境顯示缺水旬稍多分別占總旬數之 3.6% 和 1.6%，缺水率分別為 2.79% 與 1.23%。多數情境顯示缺水旬數較低，唯獨 GFCM2.1 在兩個情境中顯示偏高之比例，值得持續關注以確保翡翠水庫供水之穩定性。

4. 氣候變遷下翡翠水庫於中期情境枯水期發電量略為減低，然而豐水期各模式推估之結果截然不同，可歸因於大氣環流模式推估之雨量已具有差異，並且因水庫模式中，當水位位於上限以上或未達上限，設定發電量各為 24 小時滿載發電和 6 小時滿載發電，因此對發電量產生劇烈變化。

5. 分析氣候變遷對供水與發電功能之結果顯示，各模式在枯水期蓄水量與發電量皆具有相近之結果，而與歷史蓄水量及發電量比較如下，蓄水量於枯水期與歷史蓄水量相近；而發電量因降雨減少於枯水期略減，平均各情境、模式之結果，枯水期期間(18 旬累計)至短期減低約 230 萬度電量，而至中期將減低 566 萬度之電量。氣候變遷下豐水期之蓄水量與發電量推估範圍較廣，除模式間雨量推估之差異外，受模式設定之放流量影響極大，因而產生不同之結果。平均各情境於豐水期推估之總發電量(18 旬累計)，於短期將增加 182 萬度電量，而中期較歷史增加約 82 萬度之發電量。

6. 分析影響蓄水量範圍與發電量範圍之因素，包括大氣環流模式推估之雨量變化，模式間推估結果不同而產生之差異，以及因水庫操作規則設定導致之變化。枯水期模式間推估之雨量變化較具有一致性，並且由於枯水期多為雨量減少，因此較不易達水庫上限，降低水庫操作規則造成之影響。反之，豐水期多為降雨更為豐沛之推估，在易達上限之情況下，推估結果受操作規則設定之影響。

第五章 氣候變遷下翡翠水庫防洪評估

氣候變遷導致雨量特性改變，極端水文事件增加，近幾年來颱風事件強度增強，並且暴雨事件頻傳，河川流量短時間匯集暴漲，對民眾安全與社會經濟皆帶來衝擊。水庫可攔蓄洪水，減緩洪水事件短時間對下游之影響，其防洪功能於颱風豪雨時期極為重要，然而面對氣候變遷之挑戰，水庫原先設計防洪運轉規則，以及防洪設施之設計排洪量能否即時調節洪水為關鍵問題，關乎下游民眾安全、水庫安全與社會經濟。

在考慮氣候變遷的影響時，本研究同時考量雨型及雨量。研究中以 2007 年柯羅莎颱風為例，評估氣候變遷導致雨量增加對翡翠水庫防洪功能之衝擊，並進一步探討氣候變遷下不同雨型之颱風事件所造成的影響，雨型部分以柯羅莎颱風為基礎設計三種尖峰之雨型。以柯羅莎颱風與柯羅莎颱風為基礎之三種設計雨型為例，配合大氣環流模式鄰近網格點資料，從 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM 五個模式中選出颱風季雨量最大修正比例，作為颱風事件雨量之修正值，修正柯羅莎颱風與三種設計雨型之雨量資料，而產生代表未來颱風事件之降雨量，接著以半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式推估颱風事件之流量，並根據翡翠水庫防洪運轉規則啟動翡翠水庫防洪運轉，根據每階段規則中之影響因子，計算水庫小時放流量，經水庫水平衡推算水位，評估水位變化是否維持於最大洪水水位以下，確保水庫安全性。

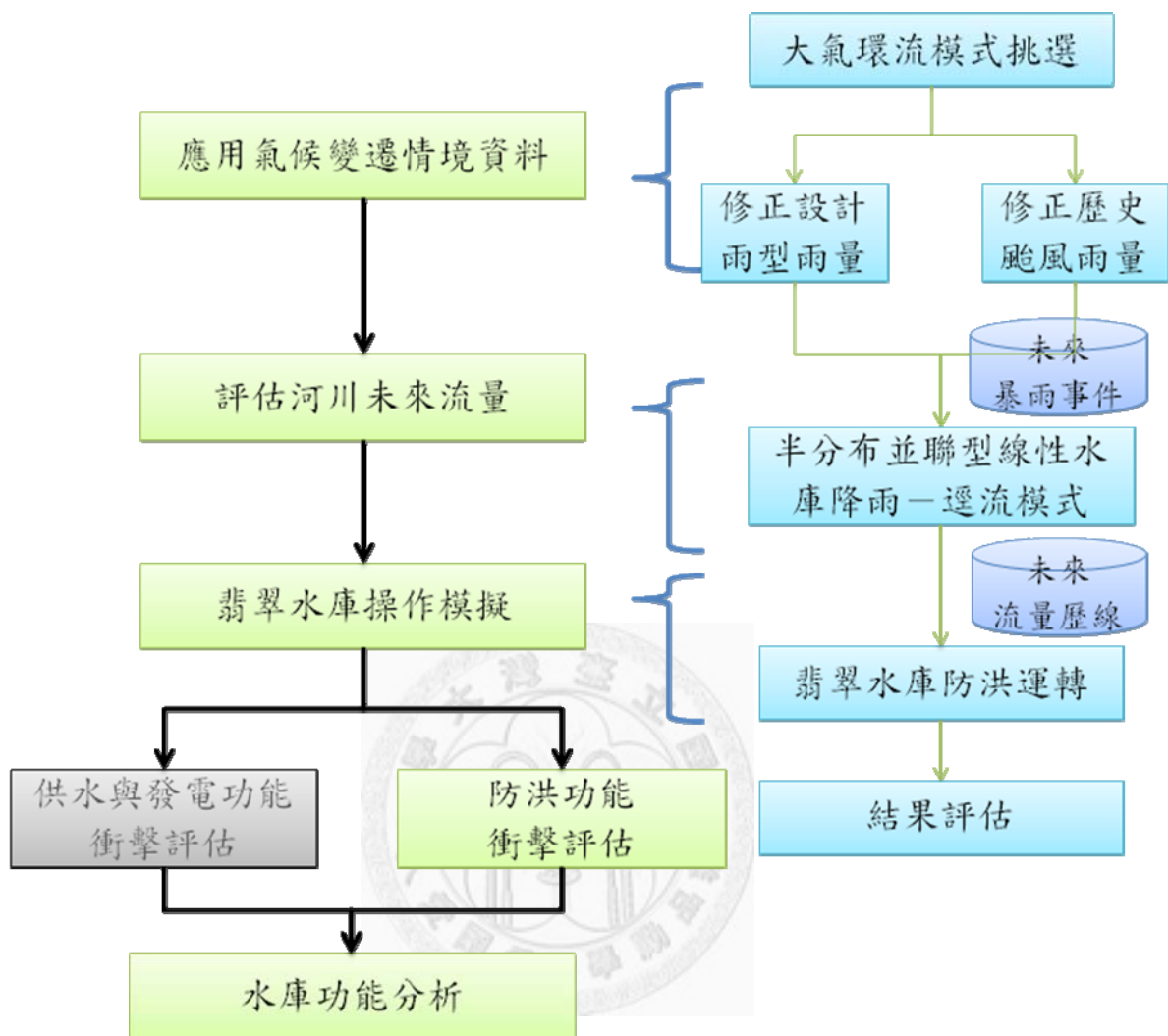


圖 5-1 氣候變遷下翡翠水庫防洪評評估流程

5.1 半分布並聯型線性水庫降雨-逕流模式驗證

本節探討翡翠水庫於颱風豪雨期間之操作，取得氣象資料後藉由半分布並聯型線性水庫降雨-逕流模式評估未來氣候變遷下颱風事件流量。首先須將集水區分割為數個核胞，並且建立集水區中各核胞之地文資料，接著經由歷史颱風事件檢定並驗證模式所需之參數，最後將半分布並聯型線性水庫降雨-逕流模式應用於研究中颱風事件降至北勢溪流域之降雨，所匯集而成之流量。

將翡翠水庫集水區分為七區(圖 5-2)，並計算各區面積與坡度、支流長度等地文資料(表 5-1)。在圖中集流方式由上游核胞逐漸集流至翡翠水庫入流處。圖 5-2 呈現翡翠水庫集水區之核胞分區方式，集流方式以圖為例，核胞 1 流至核胞 2，核胞 2、3、4 匯流至核胞 5，接著流往核胞 6、核胞 7，最終流入翡翠水庫，成為颱風時期翡翠水庫之入流量。

半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式需檢定之參數為漫地流糙度係數(N_o)與渠道流糙度係數(N_c)，因此研究中挑選 2004 年艾利颱風與 2005 年海棠颱風進行參數的檢定，將艾利颱風與海棠颱風之小時降雨量及小時流量做為輸入值，分別檢定漫地流和渠道流的糙度係數。利用與實際流量比較計算各參數模擬流量之相關係數、效率係數、尖峰流量差值、尖峰流量抵達時間差值等指標，利用指標對參數組合進行排名，藉此檢定合適之漫地流糙度係數與渠道流糙度係數。渠道流糙度係數受降雨強度之影響，因此艾利颱風與海棠颱風檢定之參數略有不同，但於同一集水區中需使用同樣的參數，將兩個颱風所檢定之參數相互模擬流量，選擇一組較合適之參數，檢定結果顯示於圖 5-3、5-4，艾利颱風之模擬流量有相近之結果；海棠颱風因渠道流糙度係數之影響，於模擬結果略有差距。檢定漫地流糙度係數為 0.28，渠道流糙度係數為 0.016，根據HEC(1985,1990)中說明可知，漫地糙度係數範圍為 0.05~0.8，而Chow(1959)亦提出渠流之糙度係數範圍為 0.011-0.15，可知檢定結果皆在合理範圍中。

再以 2005 年泰利颱風以及 2007 年柯羅莎颱風的實際降雨量為輸入值，驗證模擬流量，泰利颱風模擬流量與實際流量(圖 5-5)相關係數為 0.95、效率係數為 0.82；而柯羅莎颱風模擬流量與實際流量(圖 5-6)相關係數為 0.97、效率係數為 0.94，檢定驗證結果整理於表 5-2，根據結果顯示，半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式對於翡翠水庫集水區之颱風事件流量模擬具合理表現。

表 5-1、北勢溪集水區核胞地文資料

核胞編號	面積(平方公尺)	長度(公尺)	坡度
1	57793708.072	11728.483	0.012
2	56711520.085	16495.424	0.005
3	79020336.397	16628.084	0.022
4	24216595.088	12444.987	0.039
5	1963157.881	1716.101	0.084
6	36403276.080	11630.918	0.004
7	46842294.201	4854.137	0.016

表 5-2、半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式檢定驗證結果

颱風	檢定		驗證	
	艾利颱風	海棠颱風	泰利颱風	柯羅莎颱風
效率係數	0.85	0.52	0.82	0.94
相關係數	0.94	0.86	0.95	0.97
尖峰流量差值(cms)	-0.54	24.78	21.68	-0.41
尖峰流量抵達時間 差值(hr)	0	-2	1	-1

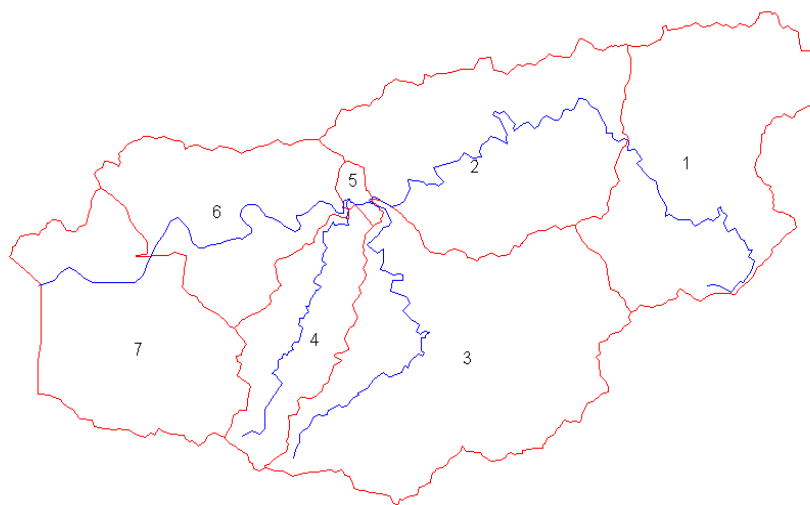


圖 5-2 北勢溪集水區核胞圖

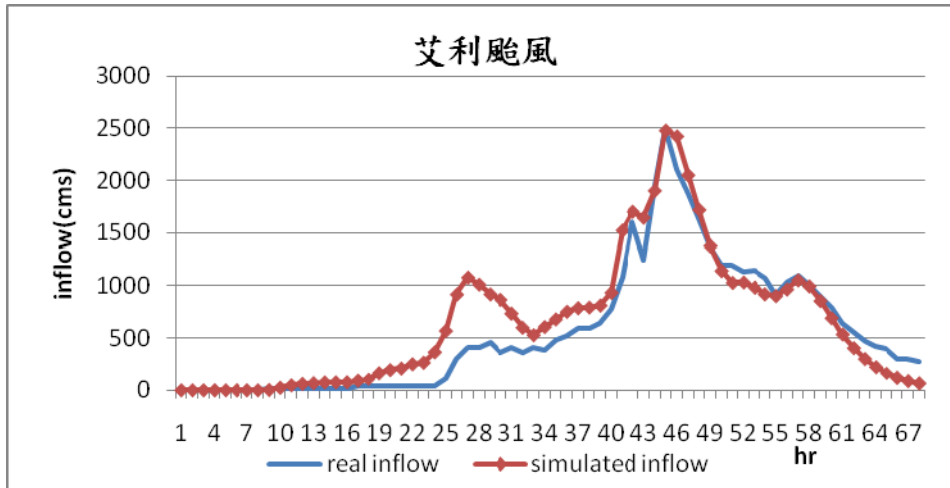


圖 5-3 艾利颱風流量檢定

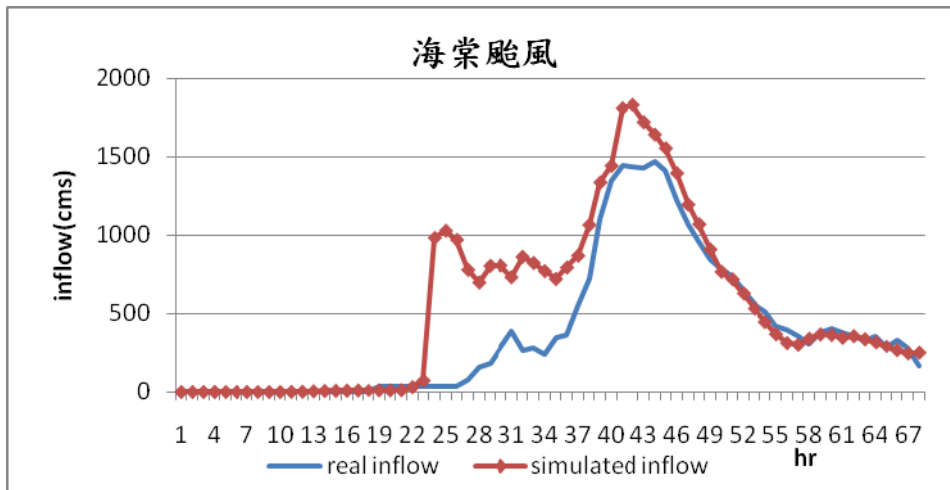


圖 5-4 海棠颱風流量檢定

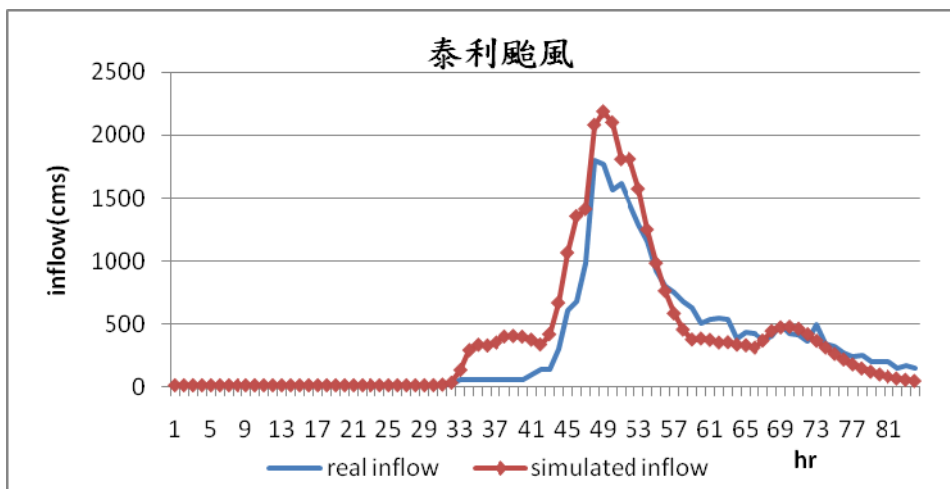


圖 5-5 泰利颱風流量驗證

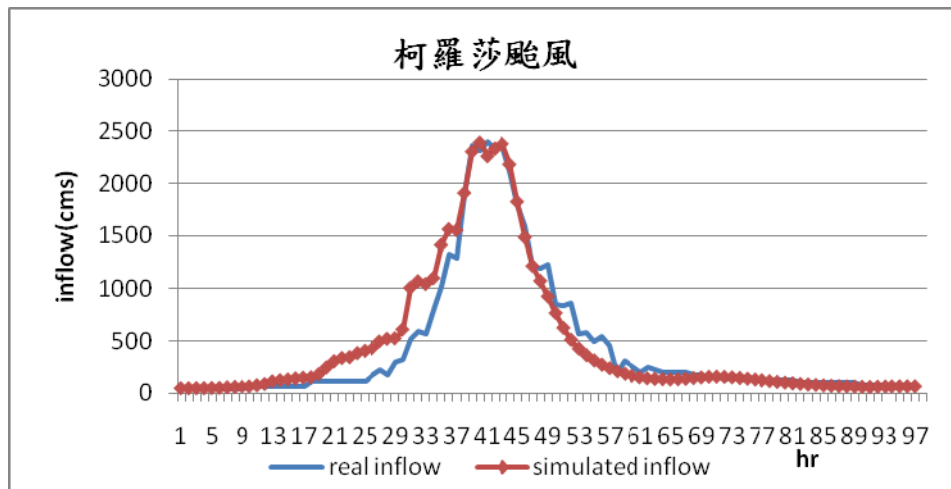


圖 5-6 柯羅莎颱風流量驗證

5.2 翡翠水庫洪水操作驗證

為評估氣候變遷下翡翠水庫防洪功能是否遭受衝擊，本研究依照翡翠水庫防洪運轉規則建立模式，以入流量為啟動機制，將颱風事件分為三個階段：洪水來臨前階段、洪峰發生前階段，以及洪峰發生後階段。颱風事件的起始為洪水來臨前階段，隨著時間推移水庫入流量逐漸增加，當入流量超過 500cms 時，防洪操作進入洪峰發生前階段，洪峰發生後連續兩小時小於前一小時之入流量，則進入洪峰發生後階段。

洪水來臨前階段、洪峰發生前階段，以及洪峰發生後階段之放流量依規則計算放流量，按預估總降雨量、水位和入流量等因子為條件推估各階段放流量。洪水來臨前階段依照預估總降雨量分級，若預估總降雨量小於 600mm，則此階段目標為維持水位於 167.5m；若預估總降雨量超過 600mm，則以維持水位於 165m 為目標，並且此階段之放水量不得超過 500cms。當防洪運轉進入洪峰發生前階段，將預估總降雨量分為六級，各級依照水位與入流量估計參數，並計算此階段放流量，此階段洩洪量以不得超過水庫入流量為限。當運轉達洪峰發生後階段時，目標回復水位至 165m，根據前一小時入流量以及水位計算放流量，此階段洩洪量不得超過洪峰流量。計算各階段水庫放流量後，由上旬末蓄水量、實際入流量、放

流量，以水庫水平衡推算每旬末蓄水量，再換算為水庫水位，模擬颱風事件下翡翠水庫水位變化，藉此分析翡翠水庫之防洪功能。

翡翠水庫防洪運轉藉由兩個歷史颱風事件作為驗證，分別為 2005 年泰利颱風與 2007 年柯羅莎颱風，將颱風事件實際水位訂定為起始水位，並以實際入流量輸入模式，按防洪運轉規則分別計算各階段小時放水量，驗證翡翠水庫於泰利颱風、柯羅莎颱風事件中防洪運轉下水位之變化，模擬水位與實際水位驗證如圖 5-8 與圖 5-9，結果顯示水庫防洪運轉下模擬水位與實際水位變化相似，於泰利颱風之防洪運轉水位極為相近；在柯羅莎颱風水位模擬稍有變化，但仍在可接受之範圍，模擬水位與實際水位之差異，可歸因於防洪運轉規則中於洪水來臨前階段與洪峰發生後階段放流量之設定，規則中按預估總降雨量、前時刻進流量以及水位訂定該階段放流量之上限與下限，無確切規定放流量因而產生模擬放流量之差異，間接影響模式模擬水位與實際水位。

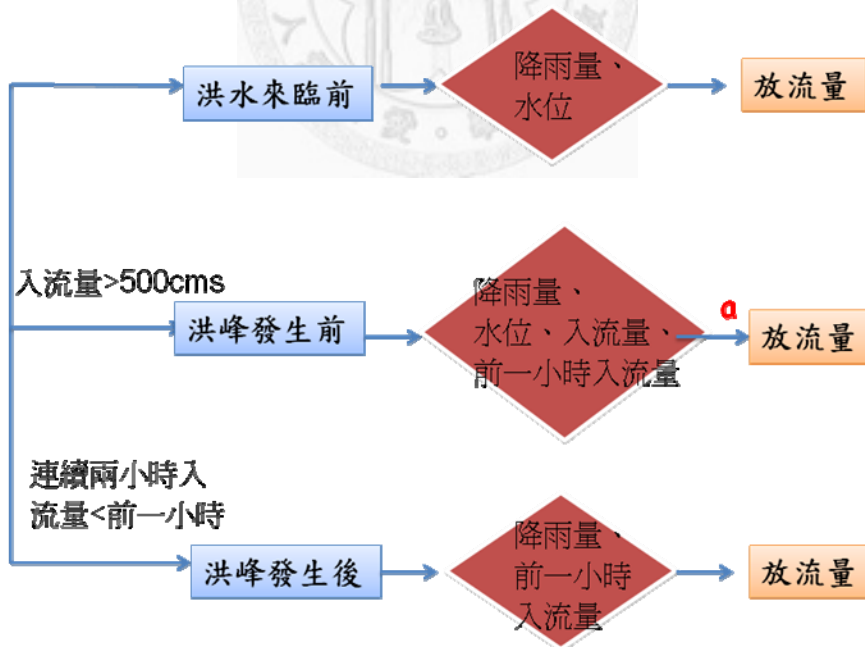


圖 5-7 翡翠水庫防洪運轉

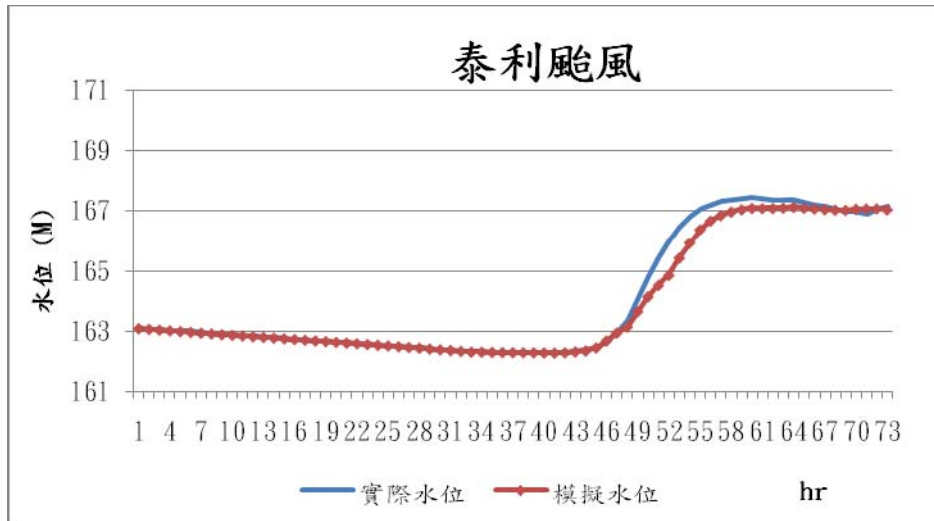


圖 5-8 泰利颱風防洪運轉下水位驗證

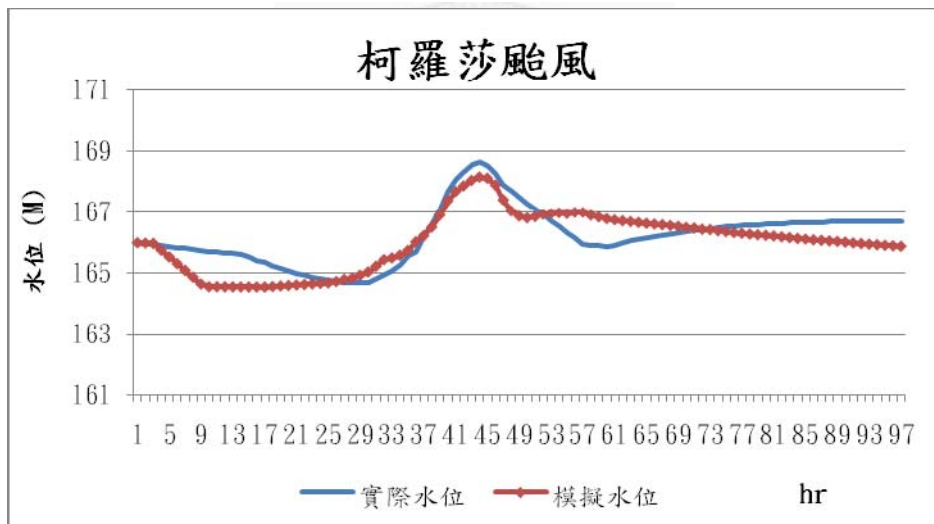


圖 5-9、柯羅莎颱風防洪運轉下水位驗證

5.3 氣候變遷下翡翠水庫防洪影響評估

本節評估氣候變遷對翡翠水庫防洪之衝擊，首先以歷史柯羅莎颱風事件為基礎，並由五個大氣環流模式(MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM)中選出颱風季雨量修正比例之最大值，作為氣候變遷下雨量之修正值，修正颱風事件小時雨量，接著以半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式推估未來流量歷線，並根據翡翠水庫防洪運轉規則模擬水庫小時放流量與水位變化。第二部分應

用設計雨型觀念，以柯羅莎颱風雨量為基礎，設計三種尖峰之設計雨型，以探討不同尖峰雨型在氣候變遷下對水庫防洪功能之影響。以修正比例修正設計雨型，產生未來颱風事件之降雨量，以半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式模擬流量歷線，根據水庫防洪運轉評估氣候變遷下翡翠水庫之防洪功能。

柯羅莎颱風降雨量

本節為評估氣候變遷下水庫防洪標的是否遭受影響，選擇近幾年對翡翠水庫影響較大，且洪水事件中水庫於各階段有洩洪放流之颱風，以驗證防洪運轉規則之細節，因此選擇以 2007 年柯羅莎颱風為研究對象。以柯羅莎颱風實際降雨兩型為例，分別評估代表現況與代表未來氣候變遷之不同降雨量之結果。首先，柯羅莎颱風即為代表現況之颱風事件，而代表未來氣候變遷則是以柯羅莎颱風為基礎，應用大氣環流模式推估雨量變化結果，修正 2007 年柯羅莎颱風歷史降雨量。雨量修正值由五個大氣環流模式(MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM)中選擇，將颱風季節之雨量修正比例之最大值 1.49(MIMR 模式於 A2 短期八月雨量修正比例)，作為颱風事件雨量修正值(表 5-3)。並藉由半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式進一步評估未來颱風事件流量，作為氣候變遷下翡翠水庫入流量，並依入流量啟動翡翠水庫防洪運轉中不同階段，按照各階段預估降雨量、水位、前一小時入流量等因子計算每小時放流量，並以水庫水平衡計算翡翠水庫小時水位，評估氣候變遷下以柯羅莎颱風原始雨型為例之水庫安全性，安全性以水位是否超過最大可能洪水位為考量。

由圖 5-10 代表氣候變遷之水位變化與現況之比較，由於入流量之增加，代表氣候變遷之防洪操作於第 22 小時即進入洪峰發生前階段，相較於現況提早 8 小時，因此水位仍略高於 165m，並且因氣候變遷高入流量使得水位於洪峰發生前階段增加幅度較高，而進入洪峰發生後階段時水位高達 169.66m，引發放流量之大幅增加，導致水位迅速降低。而在水庫安全性方面，由於洪水來臨前階段，水庫經

由放流有效將水位降至 165.28m，雖略高於目標 165m，仍可因應後期高流量入庫之庫容需求。因此，雖然因氣候變遷降雨量增加使得入流量增多，在防洪運轉下最大放流量由 8.77 增至 13.17cms(表 5-4)，氣候變遷下最高水位上升為 169.66m，有效控制於最高可能洪水位 171m 以下，並於洪峰來臨後使水位逐步回復。

表 5-3、大氣環流模式颱風季節雨量比值

	月份	A2 短期	A2 中期	A1B 短期	A1B 中期	B1 短期	B1 中期	最大值
GFCM2.1	7	1.14	1.13	1.10	1.18	0.99	1.15	1.49
	8	1.07	0.98	1.12	1.16	1.12	1.26	
	9	1.10	0.88	0.93	1.02	1.01	1.05	
	10	0.85	0.82	0.69	0.75	0.90	0.89	
MPEH5	7	1.04	1.01	0.81	1.00	1.34	1.09	
	8	1.13	1.05	0.78	1.04	0.97	1.02	
	9	0.90	0.86	1.12	1.19	1.21	1.02	
	10	0.88	0.80	0.79	0.84	1.08	0.78	
NCCCSM3	7	0.96	0.85	0.98	1.07	0.95	1.00	
	8	0.85	0.91	1.06	1.04	1.10	0.95	
	9	1.27	1.08	1.13	1.31	1.29	1.19	
	10	1.04	1.12	1.12	1.23	1.04	0.98	
CSMK3	7	1.19	1.04	1.12	1.12	1.07	1.03	
	8	0.93	1.16	1.03	1.06	0.90	0.94	
	9	0.98	0.91	0.91	1.11	0.98	0.97	
	10	0.85	1.14	1.04	0.97	1.00	1.03	
MIMR	7	1.33	0.96	1.21	1.29	1.22	1.08	
	8	1.49	1.46	1.01	1.07	1.10	0.95	
	9	1.15	1.00	0.90	0.91	0.96	0.88	
	10	0.90	1.02	0.89	0.93	1.02	1.03	
		1.49	1.46	1.21	1.31	1.34	1.26	

表 5-4 柯羅莎颱風現況與未來氣候變遷之模擬結果

		尖峰雨量(mm)	最高水位(m)	最大放水量(cms)
柯羅莎颱風	現況	34.80	168.17	8.77
	氣候變遷	51.85	169.66	13.17

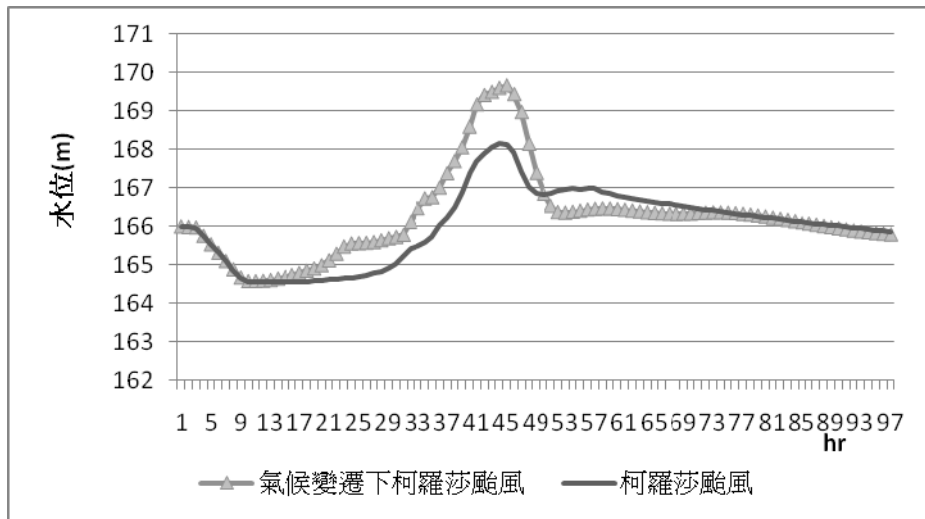


圖 5-10 氣候變遷下柯羅莎颱風雨型防洪運轉下水位

設計雨型

研究以柯羅莎颱風實際小時雨量(圖 5-11)為設計雨量之數值，在柯羅莎颱風洪水操作記錄中，自 10 月 5 日 0 時起始，5 時 30 分中央氣象局發布強烈颱風柯羅莎海上陸上颱風警報，柯羅莎颱風於 10 月 6 日 22 時 30 分登陸，23 時 20 分出海，10 月 7 日 17 時 30 分中央氣象局解除陸上颱風警報，而記錄中第 72 小時(10 月 7 日 24 時)後連續 17 小時未降雨，之後有零星降雨紀錄，因此取 10 月 5 日 0 時至 10 月 7 日 24 時之小時雨量值重新排列順序為設計雨型。而 73 小時至 96 小時視為洪水事件運轉後，觀察水位回復之時期。

設計雨型採用 Rao(1986)提出之平衡雨型概念，以圖 5-12 為例進行說明，首先將雨量由大到小進行排序並依序編號，若尖峰雨量發生於第 36 小時，則將雨量 1 置於 36 小時，第 35 小時為雨量 2 號，第 37 小時為雨量 3，第 38 小時為雨量 4，第 34 小時為雨量 5，而雨量 6 位於第 33 小時，以此類推。以上述排序方式設計尖

峰位於颱風事件中間之雨型；而尖峰在颱風事件四分之一(尖峰在前)，以及尖峰在颱風事件四分之三(尖峰在後)之雨型，則是衍生自平衡雨型之觀念，以尖峰在前之雨型為例，將尖峰雨量置於整場颱風事件四分之一的的位置，依平衡雨型排序方式左右排列，事件前期(左方)排列完後，其餘雨量依序排於右方。三種雨型分別排序後均於第 73 小時起加上時間作為颱風後水位觀察時段，與真實柯羅莎颱風記錄時間長度相同，作為代表現況之設計雨量(圖 5-13)。

而代表氣候變遷下設計雨量，則由上述三種尖峰設計雨型雨量為基礎，由挑選出的大氣環流模式中颱風季節月雨量比值最大者(表 5-3)，作為設計雨型在氣候變遷下雨量修正比值，與基礎之設計雨型相乘，為氣候變遷下尖峰在前、尖峰在中與尖峰在後之雨型(圖 5-14)。取得颱風事件之雨量後，使用半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式評估河川流量。

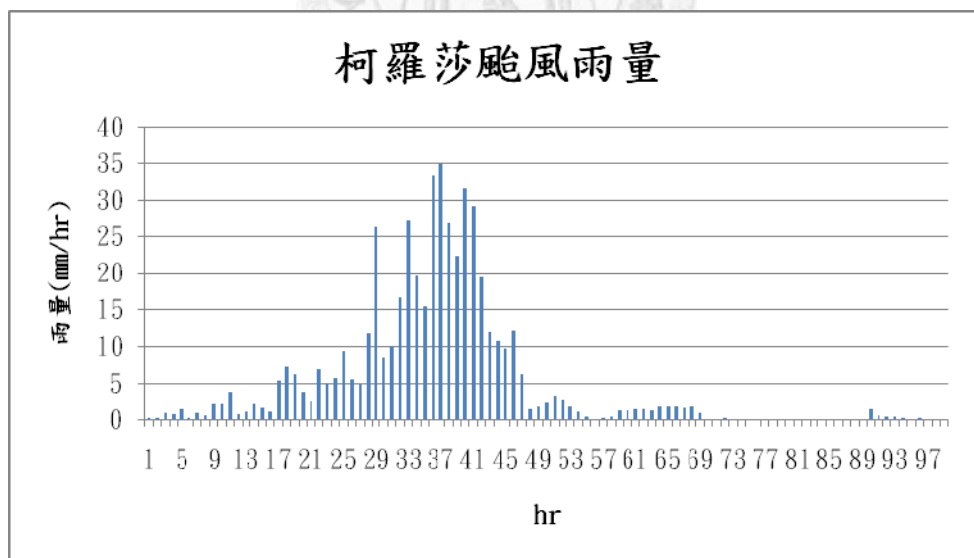


圖 5-11 柯羅莎颱風小時雨量記錄

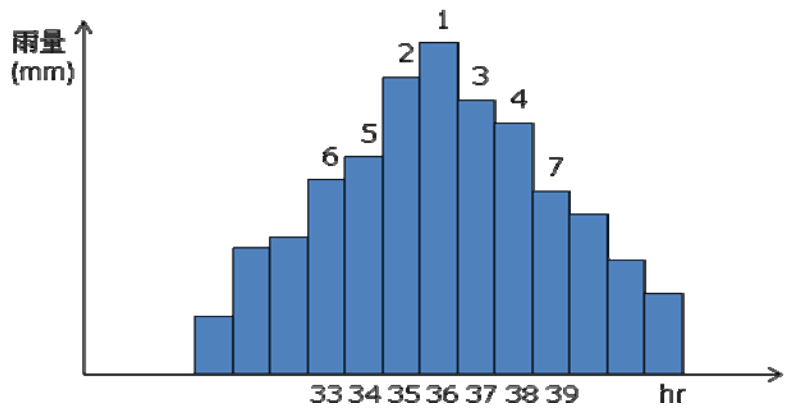


圖 5-12 平衡雨型示意圖

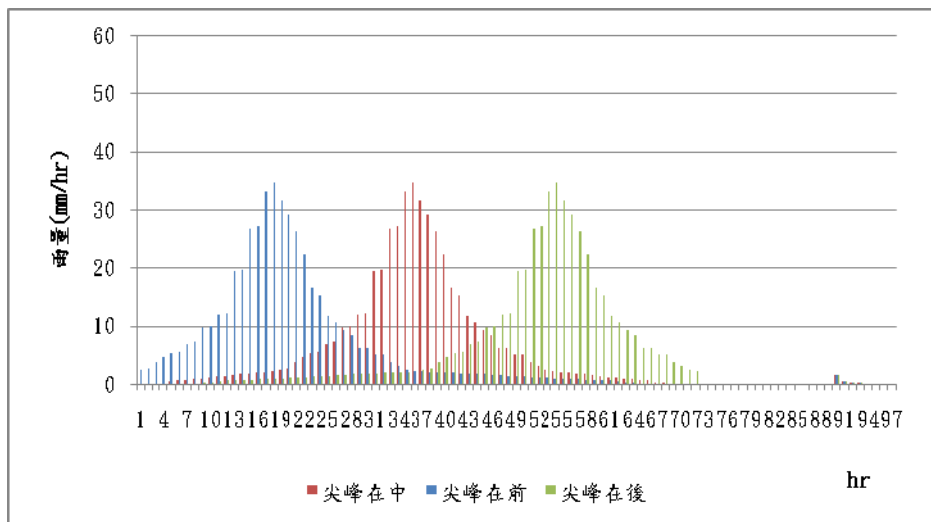


圖 5-13 尖峰位置設計雨型

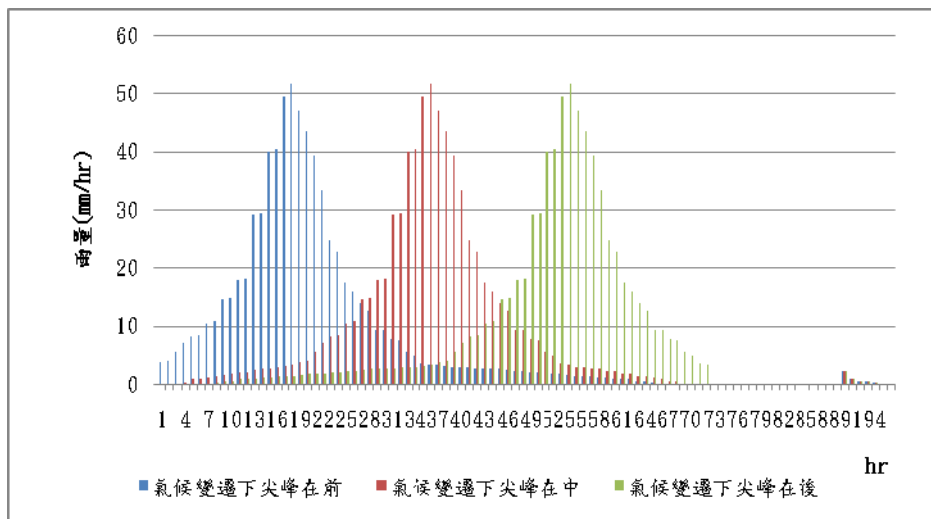


圖 5-14 氣候變遷下尖峰位置設計雨型

流量評估

由 5.1 節所檢定驗證半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式於翡翠水庫之參數，分別針對現況與氣候變遷之設計雨型模擬颱風事件流量，以取得翡翠水庫之入流量。圖 5-15 為設計雨型經由半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式所模擬之流量，包括代表現況與氣候變遷之設計雨型，由圖 5-13 與 5-14 可知，不同尖峰設計雨型間，雖尖峰雨量發生於整場颱風事件不同位置，然而型態相似，因此其流量亦呈現相似型態，但尖峰流量抵達時間相異；代表氣候變遷設計雨型之推估流量亦有相同情況。

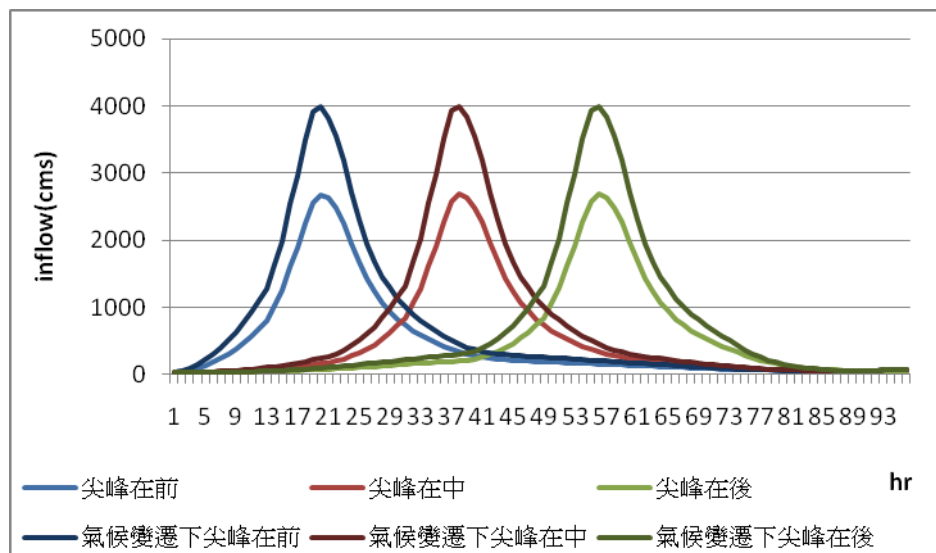


圖 5-15 設計雨型之模擬流量

水庫放流功能評估

分別將代表現況與未來氣候變遷的三種尖峰雨型，經由水文模式模擬颱風事件流量作為水庫入流量，以翡翠水庫防洪運轉規則操作放水，並以水平衡計算小時水位。翡翠水庫防洪運轉依水庫入流量啟動不同階段之操作，三個階段分別為洪水來臨前階段、洪峰發生前階段以及洪峰發生後階段，依據每階段不同因子分級評估該小時水庫放流量，並且計算翡翠水庫防洪運轉下之小時水位如圖 5-16 及

圖 5-17，由圖可看出即使入流量尖峰抵達時間相異，翡翠水庫水位呈現具有時間推移但形狀相似的型態；氣候變遷下防洪運轉水位變化亦呈現相似的情形。

圖 5-16 為代表現況之雨型，比較尖峰在前雨型以及尖峰中雨型之入流量，於翡翠水庫防洪運轉下水位變化為例，雖然因雨型不同而造成颱風尖峰流量抵達水庫時刻相異，洪水來臨前階段時間長度不同(防洪操作起始至入流量達 500cms)，所累積之入流總量隨著尖峰較晚抵達而逐漸增加，但經由水庫放流調節可將水位維持於此階段目標 165m，為要來的洪水預留空間，確保面臨尖峰流量階段翡翠水庫之安全性。因此無論尖峰流量的位置位於整場颱風事件位置之前、中或者後方，在此階段藉著洩洪持續調節水位，將水位控制於 165m，使得水庫面對尖峰流量保有滯洪空間，因此無論尖峰流量抵達時間，在洪水來臨前階段結束並邁入洪峰發生前階段，若能有效將水位控制於約 165m，則將有利於提供庫容於下階段滯洪。

當翡翠水庫入流量大於 500cms，防洪運轉進入洪峰發生前階段，以圖 5-18 尖峰流量在前與尖峰流量在中為例，無論尖峰流量在前抵達或在中間抵達，流量大於 500cms 至尖峰流量的時間是固定的，此階段流量數值雖略有差異但序列相似，並且由於上一階段皆維持水位約在 165m，故具有相似之起始值，因此在此階段水庫水位也呈現類似的變化。接著水庫入流量連續兩小時小於前一小時流量，水庫進入洪峰發生後階段，根據翡翠水庫防洪運轉規則計算放水量，以期將水位回復至 165m。若流量小於目標蓄水至標高 170 m 關閉調節洪水閘門之條件，則可考慮關閉排洪設施。

若觀察代表現況與氣候變遷設計雨型推估之流量(圖 5-19)，兩者的起始水位皆為 165.99m，超過洪水來臨前階段之目標維持水位(165m)，因此啟動防洪運轉進行排洪操作，此階段排洪上限為 500cms，代表氣候變遷之颱風流量因雨量增加，在此階段與代表現況之颱風皆採取最大放水，但由於氣候變遷之颱風入流量較高，降低水位之速度較現況慢，加上因流量增加導致第 8 小時流量即超過 500cms，因

此提前 3 小時以較高水位為起始值進入洪峰前階段，放水量依據該階段規則所評估，因此兩者水位變化較具有差異，並且水位為計算放流量參數之一，水位改變後放流量亦些微變化。然而兩者洪峰流量抵達時間相同，因此進入洪峰後操作時間點相同，兩者水位已相差 1.52m。根據此階段相同目標將水位恢復至 165m，因此在此足夠的時間內，水位皆可逐步緩和至正常水位。

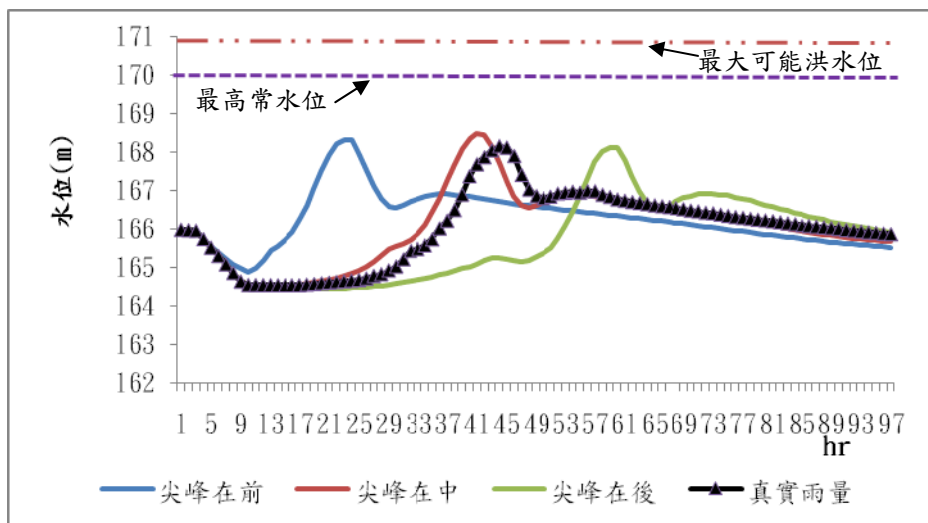


圖 5-16 防洪操作模擬水位(現況)

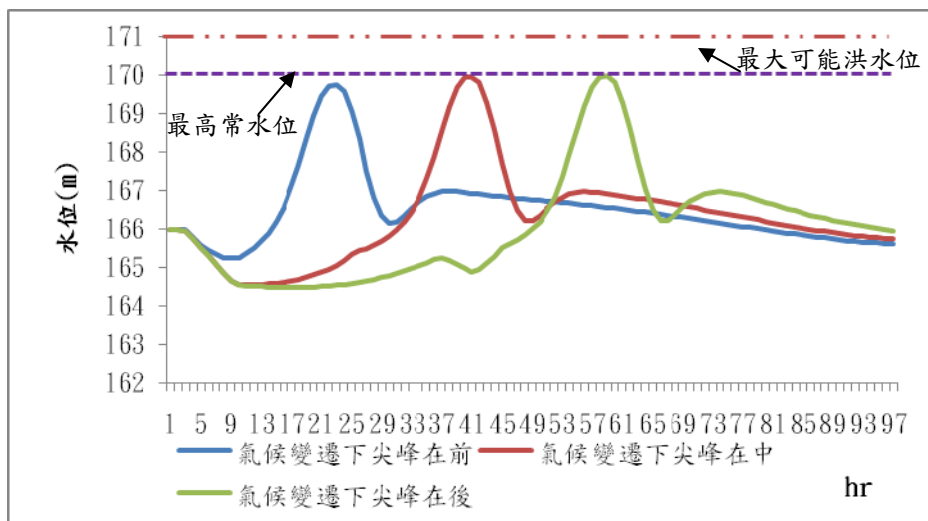


圖 5-17 氣候變遷下防洪操作模擬水位

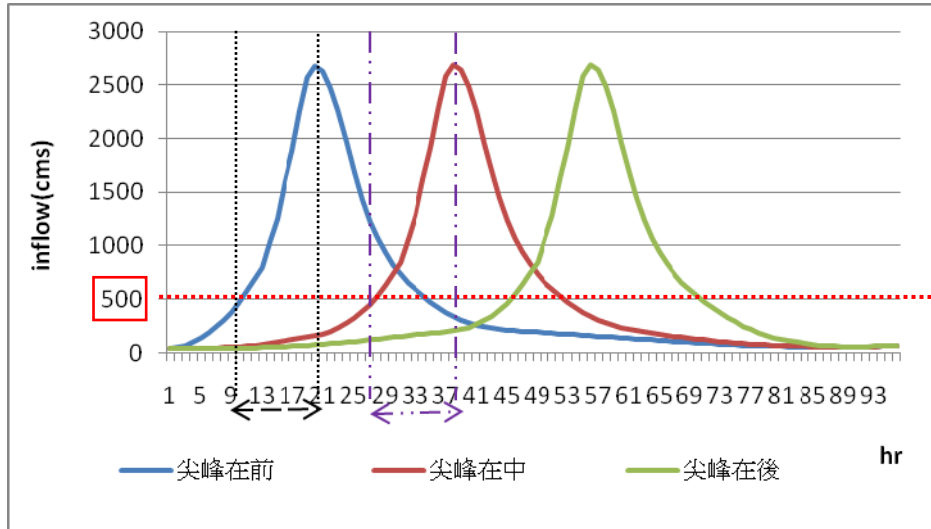


圖 5-18 現況設計雨型入流量分析

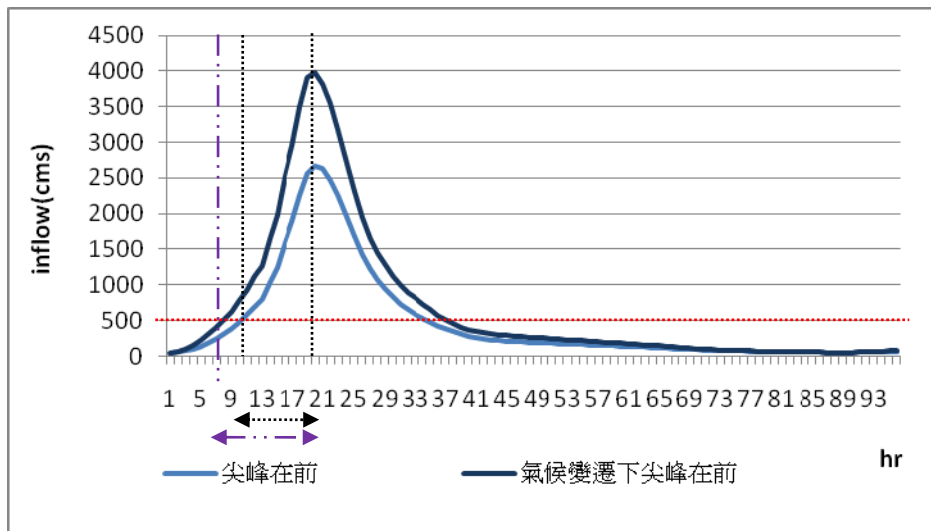


圖 5-19 現況與氣候變遷設計雨型入流量分析比較

評估代表氣候變遷下颱風事件，雖然因雨量增加而流量增多，但經由水庫防洪運轉規則操作，於洪水來臨前階段洩洪調節水位，將水位有效控制於 165m，皆能藉此消滅洪水對水庫之影響，並維持水庫安全。然而若將起始水位由 165.99m 提高至 167.5m(尚低於上限 168m)，則氣候變遷下尖峰在前之雨型所形成的入流量，由於在洪水來臨前階段，受限於最大放流量不得大於 500cms，無法及時將水位由 167.5m 降至 165m 附近，預留足夠空間面對接踵而來之洪水，水位可能因此超過最大可能洪水位標高 171m(圖 5-20)，對水庫安全造成危險。

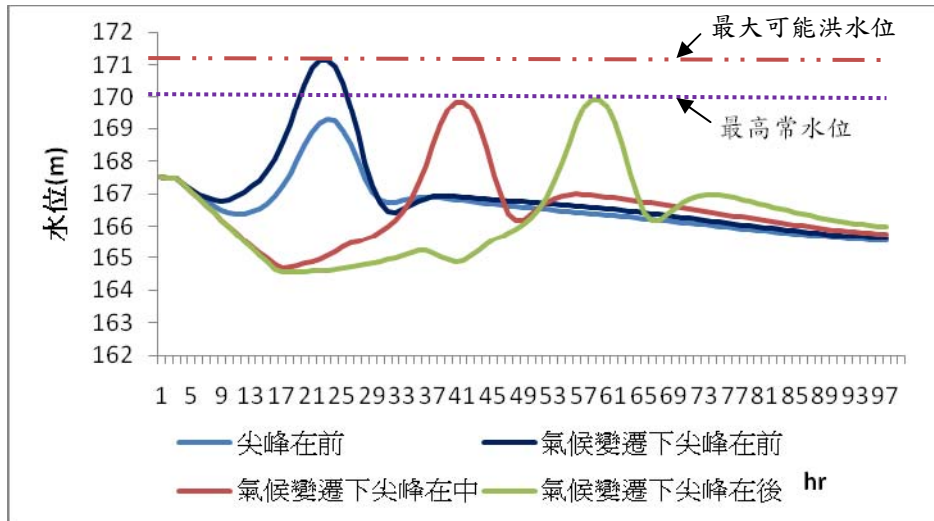


圖 5-20 氣候變遷設計雨型之水位變化(起始水位為 167.5m)

5.4 小結

本章評估氣候變遷下翡翠水庫防洪功能，以 2007 年柯羅莎颱風為例，首先評估柯羅莎颱風雨型與氣候變遷下柯羅莎颱風雨型，降雨落至翡翠水庫集水區，匯流至庫區後，經由防洪運轉操作紀錄翡翠水庫水位之變化。第二部份以柯羅莎颱風為基礎，應用平衡雨型之觀念，設計不同尖峰之雨型，評估不同尖峰雨型所形成雨量是否影響操作，並進一步以氣候變遷資料修正設計雨型，評估氣候變遷下不同尖峰雨型，是否影響水庫安全性，分析結論如下：

1. 在氣候變遷的影響下，無論是柯羅莎颱風原有雨型，或三種尖峰之設計雨型，均因氣候變遷雨量的增加導致流量增大，進而影響水位上升之幅度，因此呈現較現況高之水位。

2. 在柯羅莎颱風歷史水位(165.99m)為事件起始水位，無論何種雨型，即使在氣候變遷下，經由翡翠水庫防洪運轉操作，在洪水來臨前階段有效降低水位並預留蓄洪空間，因此至尖峰期間水庫水位皆維持低於最大可能洪水水位(171m)，不影響水庫安全性。

3. 若颱風起始水位高於 167.5m，則代表氣候變遷尖峰在前雨型，因尖峰時間提前來到，在洪水來臨前階段無法及時將水位降至 165m，不足以容納後來之洪水流量，因此在後期將超過最大可能洪水位 171m，因而危及水庫安全。

4. 洪水來臨前階段之操作與起始水位極為關鍵，因其可控制水庫蓄洪空間對後續洪水之容納量，而尖峰在前之雨量可能使得此階段時間縮減，並因氣候變遷流量增加，流量迅速超越 500cms，也使洪水來臨前階段提前結束，水位可能因此無法及時降至此階段目標水位；因此若面對氣候變遷之颱風事件，洪水來臨前階段之放流量上限與階段入流量界限可略為調整，以期在該階段中有效控制水位，維護氣候變遷下水庫安全。



第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究以新店溪流域之翡翠水庫為研究區域，評估氣候變遷對水庫供水、發電及防洪功能之衝擊。由於氣候變遷將對溫度及雨量造成影響，因此研究中應用不同大氣環流模式針對 B1、A1B 與 A2 漸變試驗情境之輸出結果，修正歷史溫度及雨量統計特性。而為了瞭解不同大氣環流模式基期能否反映研究區域之歷史氣候特性，並選擇合適本研究區域之大氣環流模式，研究中將不同模式於鄰近點輸出資料及歷史溫度及雨量資料，利用相關性及 RMSE 值以排名法與扣分法進行分析，並以該結果挑選 MPEH5、MIMR、GFCM2.1、CSMK3 及 NCCCSM 等五個模式做為後續研究使用。接著，研究中針對氣候變遷對水庫之供水與發電之影響進行評估。將氣候變遷之變化量用以修正歷史資料之統計特性，並藉由氣象合成模式合成日溫度、雨量資料，並以 GWLF 模式模擬未來南勢溪與北勢溪流量，藉由翡翠水庫蓄水利用運轉規則模擬水庫蓄水量及發電量。

將五個模式推估之模擬蓄水量以 95% 信賴區間表現，結果顯示各情境蓄水量於枯水期與歷史蓄水量相近；而豐水期蓄水量大多與歷史蓄水量產生重疊，八月至十月未來蓄水量區間略高於歷史蓄水量。比較不同情境之豐水期與枯水期之蓄水情況可發現，枯水期蓄水量區間範圍集中，顯示模式間評估之蓄水量具有相近結果；而豐水期蓄水量區間分布較廣，在 B1 短期、A1B 中期與 A2 中期較其他情境推估範圍更寬。此情形與大氣環流模式間對雨量推估之差異相關，並且若未來雨量增加，使流量增加而導致水位接近上限，引發水庫模式判斷不同之放流量而產生差異，因而呈現較寬之蓄水量範圍。此外在不同氣候變遷情境中，蓄水量於 11 月中旬至 2 月上旬略低於中限，但與歷史水位相近並且未達下限，但多數情境蓄水量多旬皆位於中限以上，說明氣候變遷於供水方面造成影響，但不至於過度衝擊其供水功能。

研究中亦分析模擬期間缺水總旬數，在多數情境結果顯示缺水旬數較少，共計 12 個結果顯示不缺水，15 個結果缺水旬數在 30 旬以下，唯獨 GFCM2.1 模式之 A1B 中期與 A2 中期情境顯示缺水旬稍多，分別占總旬數之 3.6% 和 1.6%，而缺水率分別為 2.79% 與 1.23%，值得持續關注以確保翡翠水庫供水之穩定性。

分別討論氣候變遷下枯水期與豐水期期間，缺水率與雨量變化之關係，枯水期雨量變化的範圍約為歷史之 0.77-1.07 倍，多數模式推估結果顯示缺水率為 0，其中最大缺水率為 0.28%，發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式，其枯水期雨量亦為減少最多之模式；而豐水期雨量變化為歷史雨量之 0.92-1.62 倍，缺水率在多數模式皆為 0，最大缺水率亦發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式之 1.24%，可歸因於枯水期缺水情況之延續，並且由於模式推估之豐水期起始(五、六月)雨量較低。分析結果顯示經由水庫儲蓄、調配水源，缺水率受雨量變化影響不顯著，部分模式推估結果稍受影響，而多數模式呈現供水穩定之情形。

由於氣候變遷對水庫入流量造成影響，推估發電量於枯水期略減，各模式於各情境下平均結果顯示，枯水期期間(18 旬累計) 發電量至短期減低約 230 萬度，而至中期將減低 566 萬度。然而各模式於豐水期推估之結果較無一致性，可歸因於大氣環流模式之間推估之雨量已具有差異，並且因水庫蓄水利用規則於發電量為較彈性之描述，規則惟設定上限以上與中限至上限間之發電量最大值，故模式操作規則中發電量設定為最大值，但實際操作依據即時狀況與過去經驗決定發電放水量，導致設定發電量與實際不同。模式中發電量設定各為 24 小時滿載發電和 6 小時滿載發電，因此若水庫水位較高，水位超過上限或未達上限將影響發電放水量之變化，間接對發電量產生影響，因此各模式自歷史到中期推估豐水期發電量無一致之趨勢。平均各模式於各情境之豐水期總發電量(18 旬累計)，短期將增加 182 萬度電量，而中期較歷史增加約 82 萬度。

總結研究中影響蓄水量範圍與發電量範圍之因素，包括大氣環流模式推估之

雨量變化結果，模式間推估結果不同而產生之差異，以及因水庫模式規則之設定導致影響。枯水期模式間推估之雨量變化較具有一致性，並且由於枯水期多為雨量減少之推估，因此較不易達水庫上限，降低水庫操作規則造成之影響。反之，豐水期多為降雨更為豐沛之推估，在易達上限之情況下，推估結果受操作規則設定之影響。

而在氣候變遷對水庫防洪功能評估上，研究中將氣候變遷於颱風月份之雨量修正值，應用於歷史颱風事件與設計雨型，修正暴雨事件雨量，以半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式模擬颱風流量歷線，並以水庫防洪運轉規則模擬水庫防洪操作，評估氣候變遷對水庫防洪功能的影響。

根據研究結果顯示，在氣候變遷的影響下，無論是柯羅莎颱風歷史雨型，或以前者為基礎三種尖峰之設計雨型，均因氣候變遷雨量增多導致流量增大，高流量使得水位上升幅度增加，因此水位較現況水位高。當以柯羅莎颱風當時之起始水位(165.99m)為事件起始水位時，在不同設計雨型下，都可在洪水來臨前階段有效降低水位並預留蓄洪空間，因此至尖峰期間水庫水位皆保持於最大可能洪水水位(171m)以下；但若起始水位改變為 167.5m 時，則氣候變遷下尖峰在前雨型產生之流量歷線可能威脅水庫安全，這是由於氣候變遷雨量增加使水庫入流量提前超過 500cms，並且由於尖峰在前，故洪水來臨前階段時間縮減，提早進入洪峰來臨前階段，在起始水位較高之情況下無法及時將水位降至 165m，不足以容納後來之入流量，因此在後期將超過最大可能洪水位 171m，危及水庫安全。

研究分析結果顯示兩因素對水庫防洪運轉具有關鍵影響：第一為洪水來臨前階段之操作；第二為起始水位。兩因素影響蓄洪空間，尖峰在前之雨型可能使得此階段時間縮減，並因氣候變遷流量增加，流量迅速超越 500cms，也使洪水來臨前階段提前結束，水位可能因此無法及時降至此階段目標水位，因此面對氣候變遷颱風事件，洪水來臨前階段之放水上限與階段結束之入流量界線可略為調整，

以期在此階段中有效控制水位，維護氣候變遷下水庫安全。表 6-1 統整氣候變遷下翡翠水庫供水、發電與防洪功能之評估結果。

表 6-1、氣候變遷下翡翠水庫供水、發電與防洪功能影響評估

	時期	評估結果
供水	枯水期	枯水期雨量變化約為歷史之 0.77-1.07 倍，多數模式缺水率為 0，最大缺水率為 0.28%，發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式。
	豐水期	豐水期雨量變化比例為 0.92-1.62 倍，缺水率在多數模式皆為 0，最大缺水率(1.24%)發生於 A1B 情境中期 GFCM2.1 模式。
發電	枯水期	平均各模式於各情境之枯水期總發電量(18 旬累計)，短期減低約 230 萬度電量，而至中期將減低 566 萬度之電量。
	豐水期	平均各模式於各情境豐水期總發電量(18 旬累計)，於短期將增加 182 萬度電量，而中期發電量較歷史增加約 82 萬度。
防洪	颱風季節	若起始水位高於 167.5m，則代表氣候變遷尖峰在前雨型，在後期將超過最大可能洪水位 171m，因而危及水庫安全。

6.2 建議

1. 本研究於大氣環流模式之選擇，以模式基期能否反映歷史特性為考量，不同集水區相同鄰近點可能為同一點，但因各地地形等因素造成降雨型態差異，因此在評估項目上難以訂定門檻，建議未來可多分析若干集水區，設立統一且具有鑑別力之門檻值。
2. 評估翡翠水庫於氣候變遷之蓄水量與發電量結果顯示，受水庫規則設定影響大，尤其當水位於上限以上與中限至上限間，設定放流量對模擬結果極為重要，若能以更詳細相關資料修改模式中設計規則，可使結果更貼近實際操作情況。
3. 建議未來在水庫模式設計中可納入經濟的元素，包括考量水價、電價，並採取夏季用電需求較大以致電價較高之情形，將豐水期水量有效調度，供給尖峰用電需求並產生較高獲利，將供水、發電、經濟綜合評估進一步發展模式。
4. 評估翡翠水庫防洪部分，以柯羅莎颱風和以其為基礎之設計雨型為例，研究結果顯示洪水來臨前階段之運轉操作與起始水位為關鍵因素，氣候變遷下尖峰在前雨型之流量歷線，若水庫起始水位較高，則無法及時在洪水來臨前階段有效控制水位以提供蓄洪空間。因此在面臨氣候變遷之情況下，可考慮修正此階段之最大放水量 500cms，以期有效降低水位。
5. 研究中使用大氣環流模式輸出之月雨量比值，修正歷史颱風事件與設計雨型，然而月雨量之變化能否反應颱風事件極端降雨量之改變，以及整場颱風事件之修正量是否一致，或者尖峰需要較高之修正量，可於後續研究探討評估。
6. 研究評估翡翠水庫防洪運轉之部分，結果顯示相同雨量可能因尖峰雨量發生位置差異，因而對水庫造成不同影響，甚至對水庫安全性造成衝擊，後續研究可建立各類型之設計雨型，考量不同的分佈或者連續事件等情況，並進一步評估翡翠水庫之防洪功能是否遭受影響。

7. 本研究評估起始水位對翡翠水庫防洪操作之影響，發現相同的雨型、雨量，因颱風事件之起始水位差異，可能導致危急翡翠水庫安全之現象，建議可加入不同重現期距與不同設計雨型之颱風事件，尋找對應之起始水位，並設立其事件起始水位門檻值，確保水庫安全性。
8. 颱風期間石門水庫與翡翠水庫進行防洪操作，兩水庫之洩洪量將匯集於下游，而下游河道能否在短時間內容納洪水並排洪入海，維護下游居民生命財產安全，需要進一步之分析探討。



參考文獻

1. 王如意、謝龍生，「半分布並聯型線性水庫降雨－逕流模式之研究」，第八屆水利工程研討會論文集，1996。
2. 何宜昕，「氣候變遷對石門水庫供水與防洪能力衝擊評估方法之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2010。
3. 林俊成、李國忠，「全球溫暖化對畢祿溪試驗集水區河川流量衝擊評估」，台灣林業科學，第 15 卷，第 1 期，p.51-60，2000。
4. 洪念民，「氣候變遷對大安溪水資源營運之影響」，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文，1996。
5. 莊立昕，「氣候變遷對頭前溪流流域水資源系統供水承载力影響」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2010。
6. 陳思瑋，「淡水河流域水資源永續性評估暨管理之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2005。
7. 童慶斌、洪念民、陳主惠，「氣候變遷對水資源影響評估與適應策略研擬」，中國農業工程學報，第 45 卷，第四期，p.73-90，1999。
8. 童慶斌，「系統動態模式建構概論」，環境系統動態理論與應用研習會，2001。
9. 童慶斌、李宗祐，「氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估」，中國農業工程學報，第 47 卷，第一期，p.65-74，2001。
10. 童慶斌、吳明進、張斐章、李明旭、柳文成、謝龍生，「氣候變化網要公約國家通訊衝擊調適資料建置-氣候、水文、生態部分(一)」，行政院環境保護署專題研究計畫報告，2002。
11. 童慶斌、李明旭、葉欣誠、范正成、陳韻如、連宛渝、楊智翔，「水庫系統在變遷氣候中之脆弱度評估與支援決策技術發展(三)」，2009。

12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力總報告」，2008。
13. 臺北翡翠水庫管理局，「臺北翡翠水庫運用規則」，1989。
14. 臺北翡翠水庫管理局，「翡翠水庫運用要點」，2007。
15. 臺北翡翠水庫管理局、財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會，「翡翠水庫洪水調節運轉作業檢討(二)」，2003。
16. 經濟部水利署，<http://www.wra.gov.tw/>
17. Ayer, M. A., Wolock, D. M., McCabe, G. J., Hay, L. E., and Tasker, G. D., 1994. Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change. U. S. Geological Survey water Supply Paper 2442.
18. Baltas, E. A.* & Mimikou, M. A., 2005." Climate Change Impacts on the Water Supply of Thessaloniki". Water Resources Development: Vol. 21, No. 2, 341-353.
19. Boosik Kang and Jorge A. Ramirez., 2007. Response of Streamflow to Weather Variability under Climate Change in the Colorado Rockies, Journal of Hydrologic Engineering ASCE / JANUARY/FEBRUARY.
20. Chiew, F.H.S., Teng, J., Vaze, J., Kirono, D.G.C., 2009." Influence of global climate model selection on runoff impact assessment". Journal of Hydrology. Vol. 379, 172-180.
21. Chow, V. T., 1959. Open Channel Hydraulic, Mcgraw-Hillbook co., New York.
22. Cole, J.A., Slade, S., Jones, P.D. & Gregory, J.M., 1991. "Reliable yield of reservoirs and possible effects of climatic change". in Hydrological Sciences Journal, Vol 36: 579-597.

23. Fiona Johnson and Ashish Sharma., 2009. "Measurement of GCM Skill in Predicting Variables Relevant for Hydroclimatological Assessments." American Meteorological Society,
24. Gleick, P. H., 1986. Method for Evaluation the regional hydrologic impacts of global climate changes. *Journal of Hydrology*, 88: 97-161.
25. Haith, D. A. and L. L. Shoemaker, 1987. "Generalized Watershed Loading Functions for Stream Flow Nutrients", *Water Resources Bulletin*, 23(3): 471-478.
26. Hamon, W.R., 1961. Estimating potential evapotranspiration, *Journal of Hydraulics Division*, Vol.83(7): 107-120
27. Hamon, W.R. and Walk, W.R., 1979. "Evapotranspiration under Depleting Soil Moisture," *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE 105(IR4), pp.392-402.
28. Hans Thodsen, 2007. "The influence of climate change on stream flow in Danish rivers", *Journal of Hydrology*, Vol. 333, pp. 226-238.
29. Hsieh, L. S. and Wang, R. Y., 1999. 'A Semi-Distributed Parallel-Type Linear Reservoir Rainfall-Runoff Model and Its Application in Taiwan', *Journal of Hydrological Processes*, 13, pp.1247~1268.
30. Hydrologic Engineering Center., 1990. "HEC-1 Flood hydrograph package: User's manual and programmer's manual," U.S. Army Corps of Engineers. Davis, California.
31. Idos, S. B., 1984. Rising atmospheric carbon dioxide concentration may increase streamflow. *Nature*, 312: 51-53.
32. IPCC, 2007. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate.

33. Kang , B., Seung-Jong Lee, Dong-Hyun Kang, Young-Oh Kim., 2007. "A flood risk projection for Yongdam dam against future climate change." *Journal of Hydro-environment Research* 1: 118-125.
34. Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Mamassis, N., Christofides, A., 2008. "On the credibility of climate predictions." *Hydrological Sciences Journal*. v53(4).
35. Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F. & Stakhiv, E.Z., 1999. "Water resources implications of global warming: a US regional perspective". in *Climatic Change* Vol. 43: 537-579.
36. Matthew W. Wiley and Richard N. Palmer., 2008." Estimating the Impacts and Uncertainty of Climate Change on a Municipal Water Supply System". *Journal of Water resources Planning and Managemant*. Vol.134:3:239-246.
37. Nash, J. E., 1957. "The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph", IASH Publication No.45, Vol. 3- 4 pp. 114-121.
38. Nash, L.L. and Gleick, P.H., 1991. " The sensitivity of streamflow in the Colorado basin to climatic changes. *Journal of Hydrology*. Vol. 125: 221-241.
39. Nash, L.L. & Gleick, P.H., 1993. *The Colorado River Basin and climatic change: the sensitivity of streamflow and water supply to variations in temperature and precipitation*. US Environmental Protection Agency. EPA230-R-93-009. Washington D.C. 121pp.
40. Ogrosky, H. O. and V. Mockus., 1964. "Hydrology agricultural lands. In , *Handbook of Applied Hydrology* , V. T. Chow(Editor)", McGraw-Hill, New York.
41. Perkins, S.E., Pitman, A.J., Holbrook, N.J., McAneney, J., 2007. "Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum

temperature, minimum temperature and precipitation over Australia using probability density functions. ” *Journal of Climate* 20, 4356–4376.

42. Pickering, N.B., Stedinger, J.R. and Haith, D.A., 1988. Weather Input for Nonpoint-source Pollution Models, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, Vol.114(4): 674-690

43. Pickering, N.B., Hansen, J.W., Jones J.W., Wells, C.M., Chan, V.K. and Gowin, D.C., 1994. WeatherMan: A Utility for Managing and Generating Daily Weather Data, *Agronomy Journal*, Vol.86(2):332-337

44. Rao, D.V. and Clapp, D., 1986. Rainfall Analysis for Northeast Florida, Part I: 24-hour to 10-day Maximum Rainfall Data. Technical Publication SJ86-3. St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida.

45. Rodriguez-Iturbe and J. B. Valdes, 1979. “The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response”, *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1409-1420.

46. Rodriguez-Iturbe, G. Devoto and J. B. Vades, 1979. “Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity : The Interrelation between the Geomorphologic IUH and the Storm Characteristics” *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1435-1444.

47. Suppiah, R., Hennessy, K.J., Whetton, P.H., McInnes, K., Macadam, I., Bathols, J., Ricketts, J., Page, C.M., 2007. “Australian climate change projections derived from simulations performed for the IPCC 4th assessment report. ” *Australian Meteorological Magazine* 56, 131–152.

48. Tung, C. P. and Haith, D. A., 1995. Global Warming Effects on New York Streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(2): 216-225.

49. Vicuna, S., Leonardson, R., Hanemann, M. W., 2008.” Climate change impacts on high elevation hydropower generation in California’s

Sierra Nevada: a case study in the Upper American River”. *Climatic Change*: 87 (Suppl 1):S123–S137.

50. Whetton, P.H., McInnes, K.L., Jones, R.N., Hennessy, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Bathols, J. and Durack P. 2005. Climate change projections for Australia for impact assessment and policy application: A review. CSIRO Technical Paper. 001, Aspendale, Vic., CSIRO Marine and Atmospheric Research, 34p. http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/whettonph_2005.pdf

51. Wilby, R.L., Whitehead, P.G., Wade, A.J., Butterfield, D., Davis, R.J., Watts, G., 2006. “Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK”. *Journal of Hydrology*, Vol. 330, pp. 204-220.

52. The IPCC Data Distribution Centre, <http://ipcc-ddc.cru..uea.ac.uk/>

