

氣候變遷對大甲河流域發電量之衝擊

The Impact of Climate Change on Hydropower Generation in Dajia River Basin

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究助理

周 容 辰

Jung-Chen Chou

國立成功大學
水利及海洋工程學系
副研究教授

楊 道 昌

Tao-Chang Yang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士後研究員

郭 振 民

Chen-Min Kuo

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士候選人

曾 宏 偉

Hung-Wei Tseng

國立成功大學
水利及海洋工程學系
特聘教授/
工學院院長

游 保 杉*

Pao-Shan Yu

摘 要

本研究主要是探討氣候變遷對於未來水庫水力發電量之影響，並選定大甲溪系列電廠為研究區域，以提供未來面臨氣候變遷下水力發電量改變之因應。本研究透過 A1B 情境之 7 個全球環流模式(general circulation model)降尺度資料分析未來可能的降雨與溫度的變化，接著利用水文模式分析未來情境下之可能水庫上游入流量，再選用合適的水庫發電模式模擬大甲溪系列水庫的發電操作方式，以分析氣候變遷改變下未來水庫水力發電量的變化。本研究著眼於未來 20 年的變化分析，為了探討氣候變遷資料所造成之不確定性，隨機繁衍 30 組未來雨量與溫度資料，以模擬氣候變遷影響下未來流量與發電量之變化，並藉由統計檢定方式分析基期與情境發電量是否有顯著的差異，結果指出大多數月份的基期與情境發電量有顯著差異。最後，根據多重模式系集平均之發電量可知，氣候變遷衝擊下將可能於枯水期(11 至 4 月)減少約 15%，而豐水期(5 至 10 月)則平均減少約 6%。

關鍵詞：氣候變遷，水力發電，水庫系統。

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系特聘教授/工學院院長，70101 台南市東區大學路 1 號，yups@ncku.edu.tw

ABSTRACT

This study aims to investigate the impact of climate change on hydropower generation on Dajia river serial hydropower plants. With the understanding of the variation of hydropower generation under climate change situation, it can provide possible power shortage information in the future. The hydrologic model and the possible variation of rainfall and temperature calculated through the general circulation model (GCM) downscaling data (7 GCMs under A1B scenario) are used to estimate the future inflows of the reservoirs. With a suitable operation rule simulation of the serial hydroelectric plants, the variation of the hydropower under climate change scenario can be estimated. In order to explore the uncertainty caused by the generating meteorological data in next twenty years, the 20-year rainfall and temperature which are generated thirty times simulate the flow and hydropower generation. By the hypothesis testing, the future hydropower generation of mostly months have significant different when compared with baseline data. According to the results of MME data, the hydropower generation will represent a decrease of about 15% during dry season (Nov to Apr) and 6% during wet season (May to Oct.)

Keywords: Climate change, Hydropower generation, Reservoir model.

一、前 言

大甲流域中上游河床陡峻、落差大，擁有台灣最豐沛的水力資源，具有一連串的水力發電設施。水力發電不但是水資源開發的重要標之一，更是可大規模開發的再生能源。水力電廠不會消耗水量，發電後的水依然可供下游的用水所需，且可提供系統快速備轉容量，確保供電安全與穩定，亦可降低系統發電成本，減少二氧化碳之排放量。水力發電量主要取決於流量與高程落差，利用水流由高處向低處流動所產生的動量來驅動發電機進行發電。若水文特性受氣候變遷影響而有所改變，將可能直接衝擊到需依靠水源提供之水力發電，一旦發電量之多寡受到衝擊，將進而影響發電結構與電力之調度。

由於水力發電對於降雨量與河川流量之變化相當敏感，因此在國內外亦有氣候變遷對於水力發電之相關研究。洪念民等人(1998)探討溫室氣體濃度增加時，溫度增加對於后里圳小型水力發電廠發電量之影響，利用全球環流模式(general

circulation model, GCM)與降水量資料配合歷史資料修正，建立適合大安溪地區的氣候變遷方案。GCM 為環流模式之統稱，各國研究機構分別發展其模式，目前氣候模式大都耦合大氣環流與海洋環流模式，兩模式間透過海平面氣溫(sea surface temperature, SST)、海冰延伸與厚度(sea ice extent and thickness)、覆蓋海冰與未覆蓋表面之反照率、表面 CO₂ 分壓、海表面鹽分濃度進行交互作用。該研究結果顯示枯水期時流量減少的情形十分明顯，季節性水資源調配與抗旱將更加重要。對小型水庫而言，考量氣候條件發電量大幅下降 20%，而僅考量溫度變化也下降 10%。戴嘉慧(2010)以翡翠水庫為研究區域，應用 GCM 對未來氣候預設情境之評估結果推估流量，並且依據計畫需水量與水庫運轉規則，模擬水庫蓄水量與發電量之變化。結果顯示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。Madani and Lund (2010) 評估在氣候暖化(warming-only)、乾燥暖化(dry



圖 1 大甲溪水庫與電廠位置圖

warming)與潮濕暖化(wet warming)三種情境下，對於加州地區高海拔水力發電廠的影響，結果指出：暖化與乾燥暖化之情境下發電量分別減少 1.3%與 19.7%；潮濕暖化情境下發電量則增加 5.8%。Koch *et al.* (2011)發展數個未來氣候情境模擬多瑙河上游流域在 2021 至 2030 年與 2051 至 2060 年的發電量。為了涵蓋不確定性的範圍，從 A1B 情境和 4 個區域性氣候情形以隨機的形式合併輸出 16 個氣候情境事件。結果顯示，根據不同的情境模式，發電量會出現自輕微至嚴重的減少。Minville *et al.* (2009)藉由調查加拿大 Peribonka River 水資源系統在氣候變遷下的適應潛力，利用氣象繁衍模式以及分布式水文模式模擬未來的氣候條件以及水文流量，再利用最佳化模式適應水資源系統的操作規則。分析結果顯示每年平均發電量在 2010 至 2039 年期間減少 1.8%，然而在 2040 至 2069 年以及 2070 至 2099 年分別增加了 9.3%以及 18.3%。

本研究為了探討氣候變遷下水文與發電量之衝擊，根據未來情境資料以氣象繁衍模式繁衍日尺度之雨量與溫度序列，接著由經參數率定後適合於德基水庫上游集水區之水文模式模擬未來之情境流量，最後根據本研究所建立之大甲溪水庫發電模式模擬未來之情境發電量，其中以逐步優化過程尋找近似實際操作之水庫

操作策略。

二、研究區域與資料介紹

2.1 研究區域

大甲溪位於台灣中西部，發源於中央山脈之南湖大山與雪山山脈，全溪長 124.2 公里，流域面積為 1235.73 平方公里，上游地勢陡峻、河床陡急，從德基水庫至石岡壩約 70 公里之水平距離，落差高達 1000 公尺，且流量均勻豐富，使大甲溪流域蘊藏台灣最豐富的水力資源。除了供大台中地區之用水需求，亦大幅開發電力能源，具有一連串的水庫與水力發電設施。研究中以大甲河流域之串聯水庫系統及其電廠作為研究對象，系統內考慮德基、青山、谷關、天輪與馬鞍水庫及其發電廠，其相關位置如圖 1 所示。

2.2 水文資料蒐集與處理

本研究為模擬德基水庫集水區之水文情況，需蒐集該集水區之歷史流量、雨量與溫度資料，資料分析年限為 1975 至 2007 年。由於德基水庫位於該集水區之出口，故以德基水庫之每日入流量做為該集水區之日流量資料。圖 2 為德基水庫上游集水區所選用之地面測站位置圖，雨量資料為 9 個隸屬於台電公司之地面雨量站所測得，並經徐昇網法計算得到面積雨量。另外，溫

表 1 本研究所使用 GCM 之資訊

模式名稱	模式縮寫	研發單位(所屬國家)
CGCM3.1(T63)	CCCMA	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)
CSIRO-Mk3.5	CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)
ECHAM5/MPI-OM	ECHAM5	Max - Planck Institute for Meteorology (Germany)
GFDL-CM2.0	GFDLCM20	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA (USA)
GFDL-CM2.1	GFDLCM21	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA (USA)
MRI-CGCM2.3.2	MRI	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency (Japan)
MIROC3.2(hires)	MIROC	Center for Climate System research / National Institute for Environment Studies / Frontier Research Center for Global Change (Japan)

資料來源：IPCC，2007

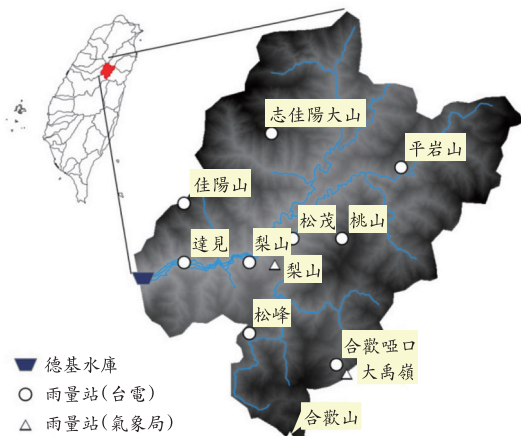


圖 2 德基水庫集水區地面測站之位置

度資料利用中央氣象局自記式地面雨量有各站之時溫度資料，將流域內各站時溫度平均後，即可求得集水區的日平均溫度。而由此獲得之平均溫度資料年限係由 1990 年 8 月開始，為使溫度、雨量及流量紀錄之起迄年限一致，本研究再利用中央氣象局台中站的溫度資料並利用回歸方式，將 1975 至 1990 年之集水區日平均溫度資料予以補齊。

2.3 未來情境資料

近年來國內眾多學者對台灣地區做降尺度研究，但過去研究因使用的降尺度方法、溫室氣體排放情境、GCM、基期年份與未來推估年份的不同，導致降尺度結果並不一致，使得比較上有難度。故本研究採用國科會「台灣氣候變遷情境

推估與資訊平台建置計畫」(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project, TCCIP)所提供的雨量與溫度空間降尺度結果作為未來情境設定之依據，此結果為未來時段(2020 至 2039 年)在不同 GCM 與各種溫室氣體排放情境下相較於基期時段(1980 至 1999 年)的雨量與溫度相對變化。

本研究欲探討未來氣候變遷下對水力發電量之影響，以提供電力主管單位之參考，因此選擇未來最有可能發生的 A1B 情境作為本研究之溫室氣體排放情境。A1B 情境係描述全球經濟大幅成長，市場經濟導向，窮國與富國之間的差距消失，人類大幅投資教育與提高生活水準，科技的成長與資訊流通順暢，再生能源與石化燃料並用，土地使用變遷速度適中。而台灣的降雨主要來自梅雨季節與颱風的影響，根據 Chu and Yu (2010)研究，在考慮各 GCM 模擬東亞季風與熱帶氣旋指數情況的分析中，發現有 7 個 GCM (表 1) 在模擬此類氣候型態時(Caron and Jones, 2008；Min *et al.*, 2004；Kitoh and Uchiyama, 2006)其結果與現況十分相近，因此本研究選用此 7 個 GCM 的降尺度結果作為後續研究的輸入依據。

三、氣象繁衍模式與水文模式

3.1 氣象繁衍模式

由於全球環流模式及其空間降尺度資料多為月時間尺度，而本研究探討的水庫發電量變化之模擬演算時間尺度為日，為了結合全球環流模式之空間降尺度資料，因此本研究應用氣象繁衍

模式(吳至剛, 2000)分析日尺度的未來氣候變遷情境, 同時配合降尺度結果調整參數, 以繁衍各個氣候變遷情境之水文氣象變量。氣象繁衍模式分為雨量與溫度兩部分敘述如下:

3.1.1 雨量繁衍

繁衍日雨量分為兩部分:(1)利用乾濕日移轉機率決定降雨與否,(2)利用機率分布決定濕日降雨量之多寡。

(1)乾濕日移轉機率

降雨與否之模擬係根據歷史日雨量資料的移轉機率統計特性進行演算, 統計各月歷史資料分為 $P(W|W)$ 與 $P(W|D)$, 其中 W 表示降雨(wet), D 表示不降雨(dry)。而 $P(W|W)$ 表示第 $t-1$ 日降雨(wet)且第 t 日降雨(wet)的機率, $P(W|D)$ 表示第 $t-1$ 日不降雨(dry)但第 t 日降雨(wet)的機率。當模擬每月第一天時, 在(0,1)間隨機挑選一亂數, 若此亂數值小於或等於該月的降雨日發生機率 $P(W)$ 時, 表示該日為降雨日; 若該亂數值大於該月的降雨日發生機率 $P(W)$ 時, 則表示該日為非降雨日。每月第二天起降雨判斷均是利用前一日的降雨情形以序率方法決定降雨或不降雨, 方法如下: 針對每日產生一個隨機亂數值, 若亂數值小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時, 判定該日為降雨日; 若亂數值大於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時, 判定該日為非降雨日。

(2)繁衍降雨量

降雨日的降雨量繁衍, 應用機率觀念將雨量套配至合適的機率分布予以模擬。首先根據研究區域之歷史資料分析其日雨量機率分布, 並求取該機率分布之參數, 用以建立機率分布的累積分布函數, 再藉由機率觀點模擬任一降雨日之降雨量。根據吳至剛(2000)研究結果表示 Weibull 分布較適合應用於台灣地區, 故本研究以 Weibull 分布來套配研究區域的日雨量。模擬過程先由隨機亂數產生器隨機產生一個(0,1)間的均勻分布亂數, 該亂數便代表著日雨量的累積機率值, 再配合日雨量的累積機率分布函數來推求日雨量值, 即可模擬出日降雨量。繁衍氣候變遷情境下之日雨量則可利用未來情境雨量變化比值, 調整累積分布函數之參數(本研究為調整平均值), 即

可應用於未來氣候變遷情境下的日雨量資料模擬。

3.1.2 溫度繁衍

日溫度的序列繁衍則是利用自回歸模式進行, 一階自回歸模式表示如下:

$$T_k(t) = [\mu_k + \Delta\mu_k] + \left\{ \rho_{1k} \cdot [T_k(t-1) - \mu_k] + \sqrt{1 - \rho_{1k}^2} \cdot \sigma_k \cdot v_k(t) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

其中,

- $T_k(t)$: k 月之第 t 日溫度(°C);
- $T_k(t-1)$: k 月之第 $t-1$ 日溫度(°C);
- μ_k : k 月之平均溫度(°C);
- $\Delta\mu_k$: k 月之情境溫度增減變化量(°C);
- σ_k : k 月溫度之標準偏差(°C);
- ρ_{1k} : k 月一階自相關係數;
- $v_k(t)$: k 月之第 t 日隨機常態分布標準化改變量。

由分析歷史溫度之統計特性並配合氣候變遷情境, 模擬未來各年各月之參數值, 再代入溫度繁衍模式進行未來日溫度序列之繁衍。

3.2 水文模式

本研究採用修正型 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 模式來模擬流量序列, 經研究證實在台灣集水區有良好的流量模擬能力(楊道昌, 1999)。此模式可考慮氣候變遷情境下雨量及溫度的變化對於河川流量的影響, 可適用於本研究。

修正型 HBV 模式為連續-集塊型模式, 是將集水區降雨-逕流之機制概念化為上、下兩個水桶進行長期逕流量的連續模擬。模式架構包含三個主要部分: 土壤含水量作用機制、逕流反應機制與土壤層與上、下水桶之水平衡方程式。以下針對修正型 HBV 模式進行概略說明:

3.2.1 土壤含水量作用機制

由土壤含水量之多寡依式(2)將降雨量分為提供逕流反應部份之水量與貯蓄於土壤表層之

水量。

$$Q_s(t) = \left[\frac{S_{sm}(t)}{FC} \right]^\beta \cdot P(t) \dots\dots\dots(2)$$

其中，

- $Q_s(t)$: 第 t 日提供逕流反應之水量 (mm/day) ;
- $P(t)$: 第 t 日之降雨量(mm/day) ;
- $S_{sm}(t)$: 第 t 日之土壤含水量(mm) ;
- FC : 田間容水量(mm) , 待率定參數 ;
- β : 待率定參數。

貯蓄於土壤表層之水量為 $P(t)$ 扣除 $Q_s(t)$ 後之剩餘量，由土壤含水量之多寡依式(3)計算實際蒸發散量。

$$E_a(t) = \begin{cases} E_p(t) \cdot S_{sm}(t) / LP & S_{sm}(t) \leq LP \\ E_p(t) & S_{sm}(t) > LP \end{cases} \dots\dots(3)$$

其中，

- $E_p(t)$: 第 t 日之勢能蒸發散量(mm/day) ;
- $E_a(t)$: 第 t 日之實際蒸發散量(mm/day) ;
- LP : 待率定參數，當土壤含水量大於此值時，實際蒸發散量等於潛勢蒸發散量。

蒸發散量的估算部份，利用 Hamon 公式 (Hamon, 1961)計算勢能蒸發散量，Hamon 公式考慮氣溫及日照時數等資料進行勢能蒸發散量的估計，公式如下：

$$E_p(t) = \frac{0.21H(t)^2 e_0(t)}{T(t) + 273} \dots\dots\dots(4)$$

其中，

- $H(t)$: 第 t 日的日照時數(hr) ;
- $e_0(t)$: 第 t 日的飽和蒸氣壓(hPa) ;
- $T(t)$: 第 t 日的平均溫度(°C)。

飽和蒸氣壓為溫度的函數，可由下式表示：

$$e_0(t) = 33.8639 [(0.00738 \times T(t) + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \cdot T(t) + 48| + 0.001316] \dots\dots(5)$$

由於蒸發散量的推估具有較大的不確定性，因此導入 C_e 參數(Zhang and Lindström, 1997) 進行勢能蒸發散量推估之修正，即將公式推估的勢能蒸發散量乘以 C_e 後得到修正後的勢能蒸發散量，再代入水文模式中進行運算。

3.2.2 逕流反應機制

逕流反應部分主要將集水區降雨與逕流之機制概念化為上、下兩個水桶，上層水桶接受提供逕流反應部分之水量(Q_s)，迅速釋放地表逕流與中間流為快速反應層，並部分提供滲漏量到下層水桶。而下層水桶接受來自於上層水桶之滲漏量後，釋出基流量為慢速反應層。由降雨量提供逕流反應部分之水量(Q_s)流入上層水桶後，並依式(6)與(7)計算上、下層水桶之出流量，上、下層水桶之出流量和為集水區總出流量。修正型 HBV 模式逕流反應部分之架構如圖 3 所示。

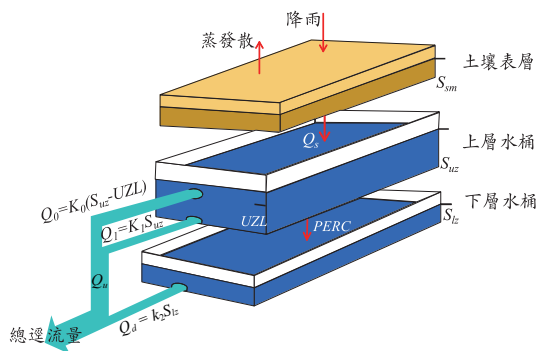


圖 3 修正型 HBV 模式逕流反應機制示意圖

$$Q_u(t) = \begin{cases} S_{uc}(t) \cdot (K_0 + K_1) - K_0 \cdot UZL & S_{uc}(t) > UZL \\ K_1 \cdot S_{uc}(t) & S_{uc}(t) \leq UZL \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

$$Q_d(t) = K_2 \cdot S_{lc}(t) \dots\dots\dots(7)$$

表 2 修正型 HBV 模式於德基水庫集水區之最佳參數值

參數 單位	FC mm	β -	LP/FC -	$PERC$ mm	UZL mm	K_0 day ⁻¹	K_1 day ⁻¹	K_2 day ⁻¹	C_e -
	105.48	8.63	0.55	12.92	76.42	0.10	0.11	0.02	1.65

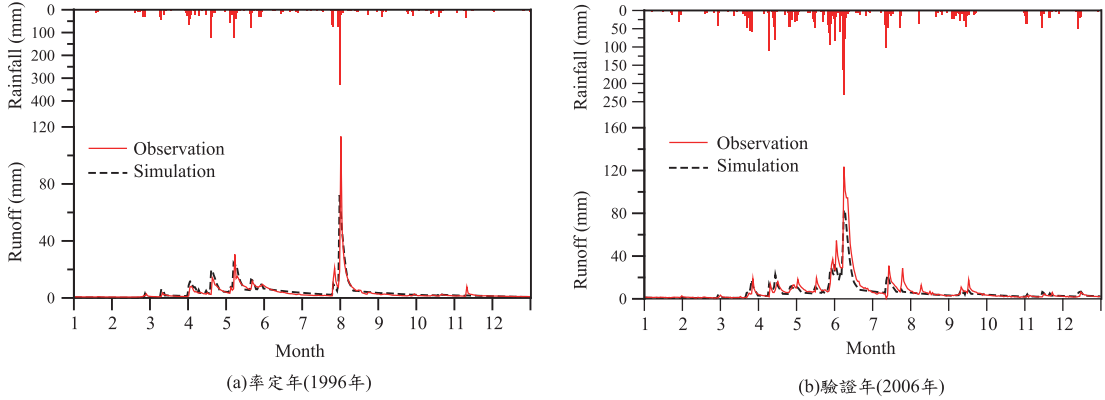


圖 4 修正型 HBV 模式之逕流量模擬結果

$$Q(t) = Q_u(t) + Q_d(t) \dots\dots\dots(8)$$

其中，

- $Q_u(t)$ ：第 t 日之上層水桶出流量(mm/day)；
- $Q_d(t)$ ：第 t 日之下層水桶出流量(mm/day)；
- $Q(t)$ ：第 t 日之總逕流量(mm/day)；
- $S_{uz}(t)$ ：第 t 日之上層水桶貯蓄量(mm)；
- $S_{lz}(t)$ ：第 t 日之下層水桶貯蓄量(mm)；
- UZL ：上層水桶孔口高度(mm)，待率定參數，值越大表示上層水桶之貯蓄能力愈大，釋放至地表逕流量越小；
- K_0 ：上層水桶孔口高度 UZL 之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至地表逕流量越大；
- K_1 ：上層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至中間流量越大；
- K_2 ：下層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示下層水桶釋放至基流量越大。

3.2.3 連續方程式

模式模擬各時段之土壤含水量、上層水桶蓄

水量與下層水桶蓄水量之變化，將依下述三個連續方程式進行演算。

$$dS_{sm} / dt = P - Q_s - E_a \dots\dots\dots(9)$$

$$dS_{uz} / dt = Q_s - Q_u - PERC \dots\dots\dots(10)$$

$$dS_{lz} / dt = PERC - Q_d \dots\dots\dots(11)$$

式中， $PERC$ 為上層水桶至下層水桶之滲漏量(mm/day)。

3.3 水文模式之率定與驗證

本研究蒐集德基水庫集水區共 33 年之雨量、流量與溫度資料用以進行模式參數之率定與驗證，其率定與驗證年限分別為 1975 至 1996 年與 1997 至 2007 年。修正型 HBV 模式共有 9 個參數需要率定，分別為 FC 、 LP 、 β 、 UZL 、 $PERC$ 、 K_0 、 K_1 、 K_2 與 C_e 。經模式率定後，德基水庫集水區之最佳參數值如表 2 所示。

圖 4(a)為修正型 HBV 模式之率定結果(以 1996 年為例)；圖 4(b)為模式之驗證結果(以 2006 年為例)，圖中實線與虛線分別代表歷史觀測流量與模擬流量，圖上方之長條圖呈現對應時間之歷

表 3 修正型 HBV 模式模擬結果之評鑑指標

	流量比	均方根誤差 (mm/day)	相關係數
率定	1.10	3.76	0.81
驗證	0.84	8.28	0.73

史觀測雨量。由前述圖中可看出：模式在高流量時會有略微低估的情形，而模式在低流量的情況有較好的表現，但整體而言，本研究所採用的水文模式可適當反應出流量的豐枯變化情況。

為了進一步分析模式模擬結果，本研究使用流量比(flow ratio, R_{flow})、均方根誤差(root mean squared error, RMSE)以及相關係數(correlation coefficient, CC)等 3 種指標進行模式評鑑，其中流量比的定義為模擬流量總體積除以觀測流量總體積。流量模擬評鑑結果如表 3 所示。率定及驗證資料的流量比分別為 1.10 及 0.84，此即代表本研究採用的水文模式可適切模擬整體流量體積；而率定與驗證資料的均方根誤差分別為 3.76 和 8.28 mm/day；最後由相關係數可得知模擬與觀測流量屬於中高度相關。根據此 3 種指標分析結果均指出本水文模式能夠合理的模擬流量。

四、大甲溪水庫發電模式

4.1 大甲溪水庫發電模式之建立

本研究僅針對大甲溪串聯式水資源系統之德基、青山、谷關、天輪與馬鞍水庫及其發電廠進行研究探討。建立模式時需做部分假設與系統之模擬條件，使該模式符合模擬之目的。建立模式時有下列之假設與模擬條件：

- (1) 以日尺度為模擬演算期距。
- (2) 各水庫之呆容量不參與發電用水量供應，模擬過程均以有效容量為之。
- (3) 假設各水庫之初始狀況為滿水位。
- (4) 模擬過程假設電力系統運作均正常，不考慮機組故障之情形。
- (5) 假設天候狀況為正常。
- (6) 不考慮上游發電水量至下游水庫之集流時間，即假設上游水庫尾水於一日內流至下游水庫。

(7) 各水庫之水量損失僅考慮蒸發量損失，忽略因滲漏、輸水或操作所造成之損不考慮海上、陸上颱風警報或地區豪大雨發佈之排洪運轉情形失，且以每日起始之水位面積計算蒸發量損失。

(8) 由於德基水庫之庫容量遠大於其他下游水庫，並且為大甲溪發電水源之總調度，因此在支流引水的部分僅考慮志樂溪的引水量，其餘水庫的支流引水量均與側流量一同考慮。

(9) 德基水庫具有排洪隧道，從隧道排洪門排出之洪水經由隧道直接排至青山水庫下游，而排洪隧道之最小洩洪量為 300 秒立方公尺，最大為 3000 秒立方公尺。

(10) 天輪與新天輪分廠均由天輪水庫取水發電，為簡化系統，將兩者合併為 1 個天輪分廠，合併後之總裝置容量為兩廠之和。

其中，不考慮排洪運轉情形，係因大甲溪發電廠實際之排洪運轉情形係根據每小時之水庫入流量、水位、颱風警報或地區豪大雨發佈等進行判定。根據歷史排洪記錄來看，德基水庫在颱風排洪期間幾乎不進行發電操作，而是直接利用排洪道調整水庫庫容。又本研究之模擬演算期距為日尺度，且探討氣候變遷下長期統計平均之發電情況，故模式中暫時不考慮防洪操作。

4.1.1 水平衡方程式

本模式以模擬法進行水庫水量運用分析，主要依據水平衡方程式描述各水庫之操作。水平衡方程式與條件如式(12)至(14)所示，根據每個時期的入流量、蒸發量與放流量決定水庫庫容之變化。

$$V(t+1) = V(t) + I(t) - E(t) - O(t) \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{cases} \text{if } V(t+1) > V_{\max} \Rightarrow V(t+1) = V_{\max}; q(t) = V(t+1) - V_{\max} \\ \text{if } V(t+1) \leq V_{\max} \Rightarrow V(t+1) = V(t+1); q(t) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

$$0 \leq V(t+1) \leq V_{\max} \dots\dots\dots (14)$$

其中，

- $V(t+1)$: 第 t 時期之期末庫容量(10^4m^3) ;
- $V(t)$: 第 t 時期之期初庫容量(10^4m^3) ;
- $I(t)$: 第 t 時期之水庫入流量(10^4m^3) ;
- $E(t)$: 第 t 時期之水庫蒸發量(10^4m^3) ;
- $O(t)$: 第 t 時期之水庫放水量(10^4m^3) ;
- V_{max} : 水庫之最大容量(10^4m^3) ;
- $q(t)$: 第 t 時期之水庫溢流量(10^4m^3) 。

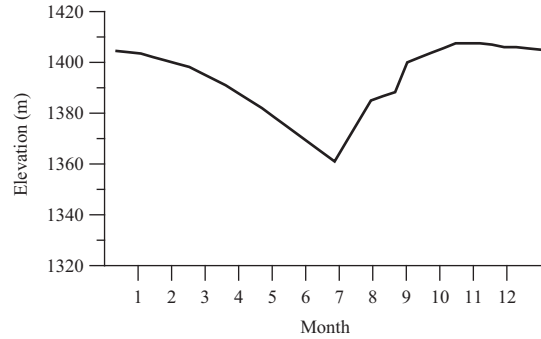


圖 5 德基水庫運用規線圖

進行德基水庫系統模擬時，需利用到水庫之相關資料，包含水庫高程-面積-容量關係與下游需水量資料。本研究依據大甲溪發電廠於民國 100 年淤積測量結果，整理德基、青山、谷關、天輪與馬鞍水庫之高程-面積-容積(H-A-V)資料。而下游需水量分為公共需水量與農業需水量。本研究根據豐原淨水廠目前實際之處理能力為每日 85 萬立方公尺，做為下游之公共需水量。農業需水量則採用民國 89 年經濟部水利處「大甲溪流可能水源利用方案檢討規劃報告」所提供之大甲溪各灌溉區域之農業計畫需水量，係統計民國 81 至 85 年石岡壩灌區及上下游灌區之平均計畫需水量。

4.1.2 發電量計算

大甲溪發電廠為了能快速由流量換算得到發電量，因此算換出各分廠之電水比。電水比為流量與發電量的比例關係，即在特定水位時，該標高發電 1 百萬瓦電量與所需水量之比例。應用電水比與發電放水量可計算發電量，如式(15)所示。

$$E = Q_{power} \times R(h) \div 0.36 \dots\dots\dots(15)$$

其中，

- E : 發電量(MWH) ;
- Q_{power} : 發電用水量(10^4m^3) ;
- $R(h)$: 該時期水位標高 h 公尺所對應之電水比(MW/cms) 。

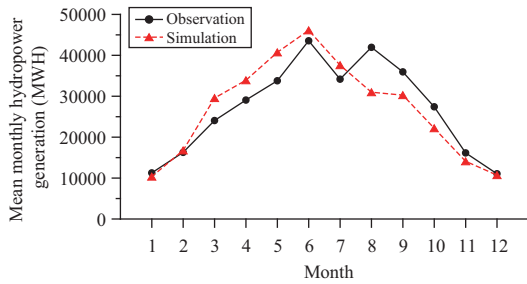
4.2 水庫操作策略

大甲溪流域中僅有德基水庫有運轉規線(圖 5)，而其他下游水庫的操作則盡量維持、接近於最高運轉水位，並沒有訂其運轉規線。此外，德

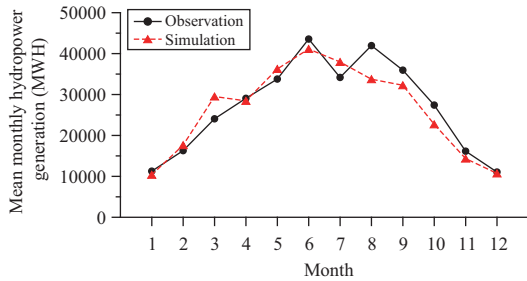
基水庫之發電放水量係接受台電公司調度處之指揮，若當日水位低於運轉規線則之水位時，以下游需水量為主。假若當日水位高於規線，除了下游需水量之考量外，調度處會根據當日水位、中央氣象局之降雨預報以及水利署中區水資源局之供水需求量等多方資訊彙整並酌量節制放水。當大甲溪發電廠之遙控中心接收到調度處所決定德基水庫放水量多寡之指令後，再由遙控中心之值班人員監視、調整與控制各水庫之水位，使各水庫之水位維持於可運轉水位間，且將當日所需之發電總量分配至各水庫電廠。由此可知，水庫雖有操作規則與原則，在操作上仍仰賴操作者之經驗判斷。故本研究以德基水庫上游集水區之歷史流量來模擬大甲溪水庫發電模式，採用逐步優化過程來尋找接近操作人員經驗之水庫操作策略，以供模擬未來氣候變遷之發電量變化時水庫操作之依據。大甲溪調度情形主要係操控於德基水庫，因此本研究首先將制訂德基水庫於模式中之操作策略，再根據德基水庫之操作策略決定下游水庫之操作。

4.2.1 德基水庫之操作策略

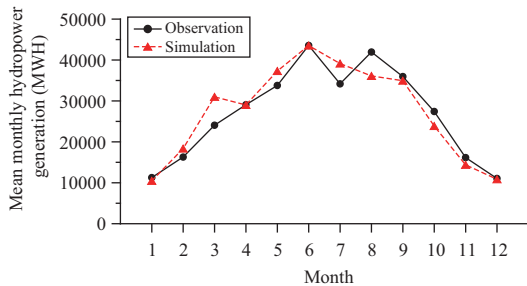
德基水庫之操作原則：當日水位低於運轉規線時，以下游需水量為主，但放水量均不可小於德基入流量或下游需水量兩者中較小者；當水庫水位高於規線時，除需考慮下游需水量之外，可酌量節制放水。制訂德基水庫之操作策略之方法為依據上述之操作原則並加入部分假設，以發電為標的設計不同方案帶入模式進行模擬，模擬結果以平均月發電量呈現，且藉由平均絕對值誤差



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

圖 6 德基水庫操作策略各方案之發電量模擬結果與歷史觀測之比較

率(mean absolute percentage error, MAPE)與均方根誤差(root mean squared error, RMSE)評估各方案與歷史平均月發電量是否相近，特別需注意豐水期(5 至 10 月)之模擬結果，因為此段時間亦是台灣夏季之用電高峰期。平均絕對值誤差率之公式如下：

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \left| \frac{E_{obs}(t) - E_{sim}(t)}{E_{obs}(t)} \right| \times 100\% \dots (16)$$

其中，

$E_{obs}(t)$ ：歷史之 t 月平均月發電量(MWH)；

$E_{sim}(t)$ ：模擬之 t 月平均月發電量(MWH)；

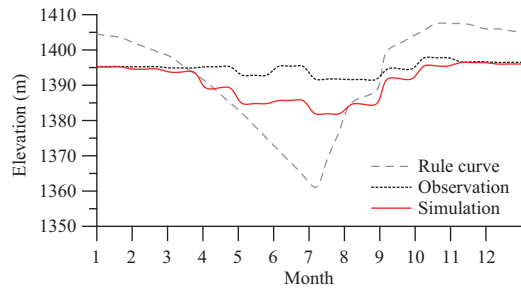


圖 7 德基水庫操作策略方案一之水位比較圖

m ：一年中之月份數，即為 12。

首先根據德基水庫之操作規線制訂德基水庫操作策略之方案一，內容如下：

- (1) 水庫最高運轉水位標高 1408 公尺。
- (2) 依據德基水庫操作運轉規線，當水庫水位高於基準線時，以尖峰 6 小時之設計最大發電用水量做為水庫放水量。
- (3) 當水位低於基準線時，放水原則為減少使用水量使水位恢復至基準水位，故水庫放水量取當時期之下游需水量與入流量較小者。

圖 6(a)為方案一之發電量模擬結果，以年平均月發電量呈現，圖中實線為歷史值，虛線為模擬值。由圖可知，方案一之模擬值於 1 月、2 月、11 月與 12 月均與歷史值相近，模擬結果相當不錯，而 3 至 7 月有高估的狀況，8 至 10 月則較歷史值為低，尤其以 8 月之差距甚大。而此方案之平均絕對值誤差率為 13.63%，均方根誤差為 5.04 百萬度/月。

於此無法單從發電量判斷如何改善水庫操作策略，而水庫的操作中水位為一重要的影響因子，故進一步加以探討歷史平均水位與模擬水位之關係。由圖 7 可得知，所模擬之平均水位於 3 至 7 月已高於規線，因此以方案一之策略係由尖峰 6 小時之設計最大發電用水量進行發電，直到水位與規線相同。8 至 10 月之模擬水位則是低於規線，故以下游需水量或入流量做為發電用水量。然而再對照歷史平均水位，8 月期間歷史水位係高於規線，故造成 8 月份模擬與歷史發電量之差。更由歷史紀錄中發現，即使水位已高於規

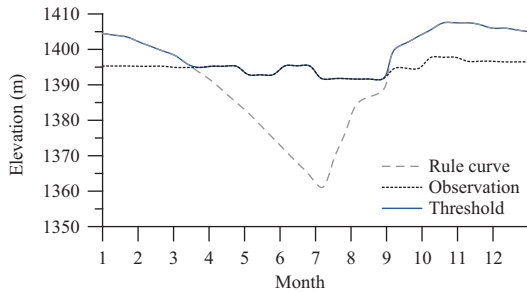


圖 8 德基水庫操作門檻之設定方法

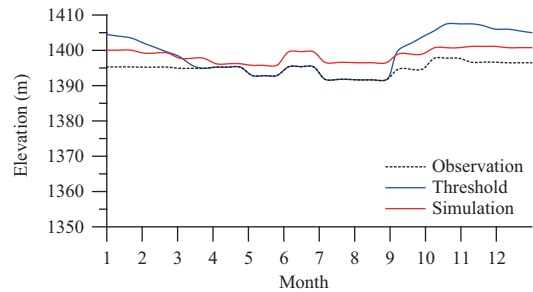


圖 9 德基水庫操作策略方案二之水位比較圖

線，仍維持於標高 1390 至 1400 公尺之間，由此可證實際之操作並非僅依照操作原則，其中可能參雜人為之操控。

綜合以上之結果，方案一之策略於水位低於規線時，可代表實際之操作，而高於規線時多受操作規線之限，尚無法與實際操作相仿。為尋求符合模擬目標之操作策略，本研究將合併實際操作規線與歷史平均水位來設定操作門檻，如圖 8 所示，設定 1 至 2 月和 10 至 12 月之實際水庫操作規線與 3 至 9 月之歷史平均水位為操作門檻，以此操作門檻做為方案二之模擬基準。

方案二之制訂係根據方案一之模擬結果進行改善，內容如下：

- (1) 水庫最高運轉水位標高 1408 公尺。
- (2) 依據修正之操作門檻，當水庫水位高於該時段之門檻時，以尖峰 6 小時之設計最大發電用水量做為水庫放水量。
- (3) 當水位低於該時段之門檻時，放水原則為減少使用水量使水位恢復至門檻水位，故水庫放水量取當時期之下游需水量與入流量較小者。

該方案之發電量模擬結果如圖 6(b)所示，而平均絕對值誤差率為 10.49%，均方根誤差為 3.71 百萬度/月。由發電量模擬結果與兩誤差指標均可看出模擬值與歷史值更為相近，比較方案一之結果，4 至 6 月之高估情形與 8 至 9 月之低估情形均有改善。另外，圖 9 顯示方案二之模擬水位與歷史水位之趨勢亦相近。

但在豐水期期間，6 月份之模擬發電量於方案一時較歷史平均值大，而在方案二時卻比歷史

值小；8 月份之模擬值相較於歷史之差值於方案二雖比方案一少，但仍較歷史值減少約 19%。因此本研究進一步探討，發現因水庫運作會受限於水庫容量，故在豐水期時，即使有大量降雨量產生，也並非所有水量均可蓄存於水庫中。方案二設定中，若超過水庫之最大庫容，多餘的水量並不被使用於發電，而是直接溢流至下游。

因而在制訂方案三時，將溢流量加入考慮，使用部分可能為溢流之水量進行發電，如此亦可妥善利用此水量。下列為方案三之操作：

- (1) 水庫最高運轉水位標高 1408 公尺。
- (2) 依據本研究設定之操作門檻，當水庫水位高於該時段之門檻時，以尖峰 6 小時之設計最大發電用水量做為水庫放水量。
- (3) 當水位低於該時段之門檻時，放水原則為減少使用水量使水位恢復至門檻水位，故水庫放水量取當時期之下游需水量與入流量較小者。
- (4) 當水庫該日可能發生溢流時，發電用水量將根據該日可能之溢流量增加 1 至 2 小時之設計最大發電用水量。

此方案所模擬之發電量結果與歷史值之平均絕對值誤差率為 9.68%，均方根誤差為 3.43 百萬度/月，相較於方案一與方案二之誤差明顯下降，如表 4 所示。另由模擬值與歷史值之比較圖(圖 6(c))可明顯看出，各月份所模擬之發電量大部分與歷史發電量相近。整體而言，該方案之策略可代表實際之水庫操作規則，故本研究即採用方案三做為大甲溪水庫發電模式之德基水庫操作策略。

表 4 德基水庫操作策略之各方案誤差指標

	平均絕對值誤差 (%)	均方根誤差 (MWH)
方案一	13.63	5044.75
方案二	10.49	3712.54
方案三	9.68	3428.11

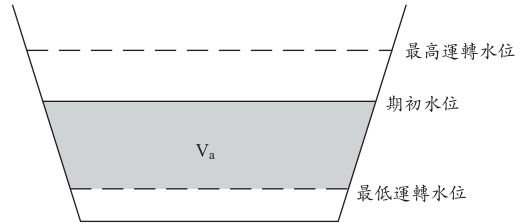


圖 10 水庫可運轉之水量示意圖

4.2.2 德基下游水庫之操作策略

青山、谷關、天輪與馬鞍水庫並不具有實際操作規線，且無複雜之操作規則，實際之操作原則上係各水庫水位需維持於可運轉水位。本研究基於此操作之原則並配合上一小節所制訂的德基水庫操作策略，同樣以發電為標的制訂一套德基下游水庫之操作策略。本模式模擬水庫之運轉係遵守水平衡方程式，由式(12)可知水庫之運轉主要受到上一時期之庫容量、該時期之入流量、蒸發量與放流量之影響，其中蒸發量之影響程度較小。而在制訂下游水庫之策略時，主要影響因子為水位標高，因此必須考量該時期水庫中可運轉之水量，再加上水庫該時期之入流量以決定其放流量。該時期水庫中可運轉之水量(available volume, V_a)之定義為該時期之期初水位至最低運轉水位之間的容量，圖 10 為其示意圖。

下游水庫之操作策略以該時期水庫可運轉之水量加上該時期之入流量，做為放流量之判斷依據。當該時期可運轉之水量加上該時期之入流量大於等於該水庫之尖峰 6 小時之設計最大發電用水量時，以該時期德基水庫之放流量與該水庫之尖峰 6 小時之設計最大發電用水量兩者較大值做為該水庫該時期之放流量，此目的係在於使各水庫能夠妥善利用可用水量進行發電。若該時期可運轉之水量加上該時期之入流量小於該水庫之尖峰 6 小時之設計最大發電用水量，放流量則以該時期之入流量為主。因為此時若水庫仍以尖峰 6 小時之設計最大發電用水量進行發電，將會造成下一時期之水位低於最低運轉水位，導致無法進行發電運轉。上述可由式(17)與(18)表示之。此外，該策略亦與德基水庫之操作策略同樣，當水庫該日可能發生溢流時，發電用水量將

根據該日可能之溢流量增加 1 至 2 小時之設計最大發電用水量，更能有效利用水資源。

$$V_a(t)+I(t) \geq \text{各水庫發電 6 小時之用水量}$$

→ 放流量=Max(德基放流量, 各水庫發電 6 小時之用水量)..... (17)

$$V_a(t)+I(t) < \text{各水庫發電 6 小時之用水量}$$

→ 放流量=入流量..... (18)

將所制訂之操作策略帶入模式進行模擬，各水庫所模擬之發電量與歷史平均發電量其平均絕對值誤差率介於 8-12%之間。而模擬與歷史平均發電量之比較，如圖 11 所示，由圖可知模擬之平均月發電量與歷史值十分相符。整體而言，該策略可用以代表實際之操作，進行大甲溪水庫發電之模擬。

五、氣候變遷下之水文與發電量分析

本章將分別以氣象繁衍模式、修正型 HBV 模式與大甲溪水庫發電模式等模式所模擬之結果加以分析，以探討氣候變遷下水文與發電量之衝擊。然而，這些數值模式皆有其假設與限制，模式模擬結果與實際觀測資料之間經常存有一定程度的偏差，使得模擬結果無法和真實情況完全相互契合。針對模式偏差，本研究將模式的現況模擬結果作為基期資料，再與未來情境模擬結果進行比較，如此即可消除模式偏差所造成的影響，較能夠合理反應出氣候變遷對於水文與發電量的衝擊。

5.1 氣象繁衍結果

利用 TCCIP 所提供未來情境下雨量變化比

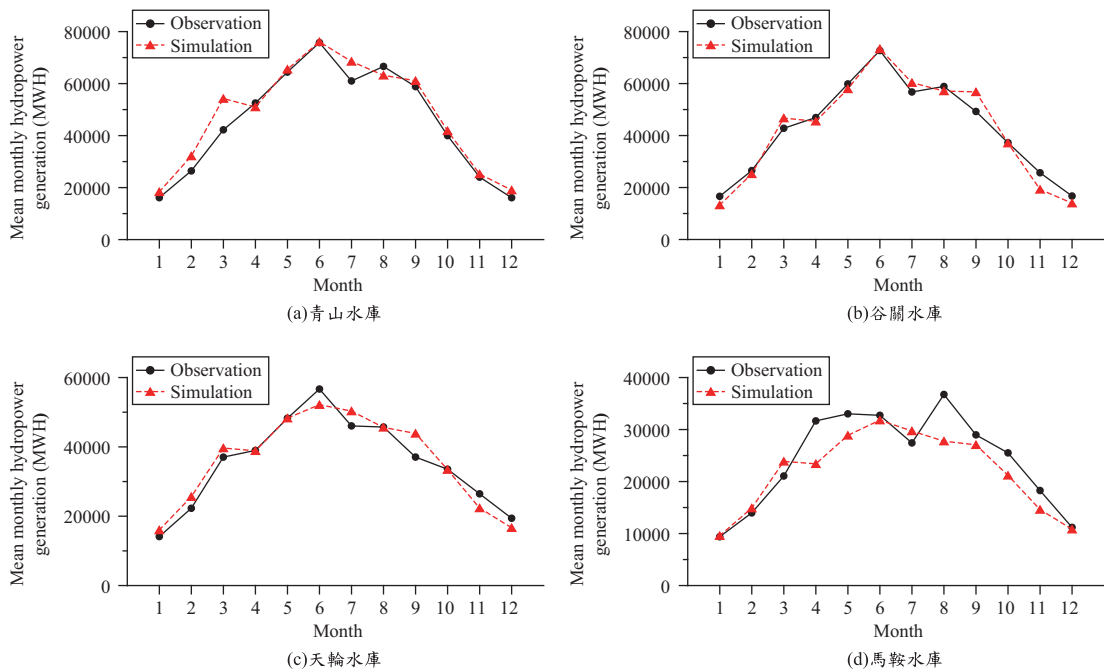


圖 11 德基水庫下游水庫操作策略之發電量模擬結果與歷史觀測之比較

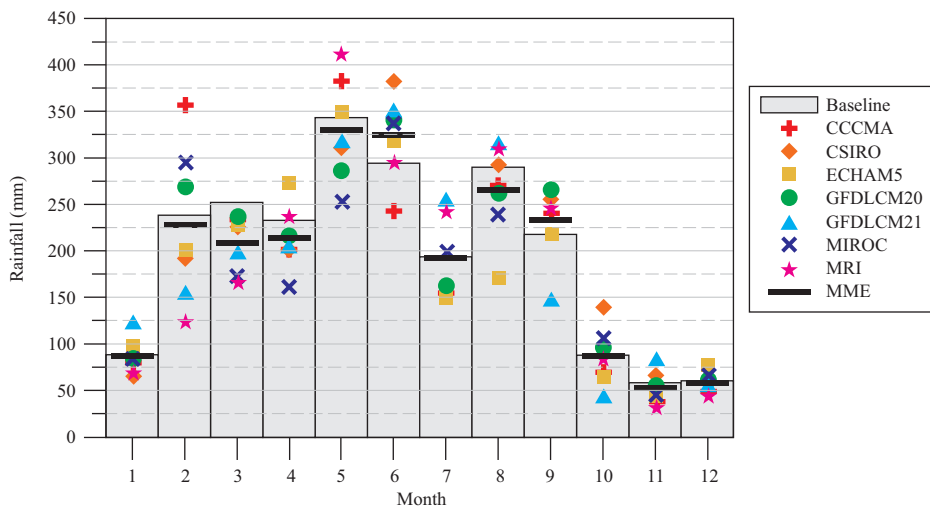


圖 12 基期與情境雨量之比較

值與溫度變化差值，進行調整氣象繁衍模式之參數，即可繁衍出情境日雨量與日溫度。本研究以基期時段(1980至1999年)之歷史觀測資料針對7個GCM繁衍30組時間長度皆為20年的日序列資料。此外，本研究亦考慮多重模式系集平均(multi-model ensemble, MME)之結果，以MME

代表全體GCM結果，方便觀察整體模式的平均特性。

圖12為基期與不同GCM之平均月雨量比較，由比較結果可得7個GCM在各月份雨量增加或減少之趨勢不一，但各月份大都半數以上之GCM雨量較基期少，僅有6月與9月中大多數

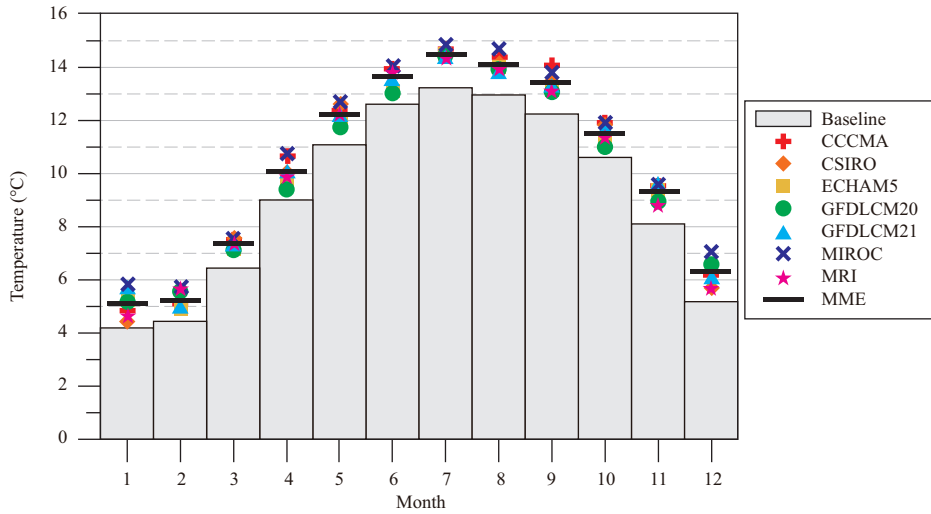


圖 13 基期與情境溫度之比較

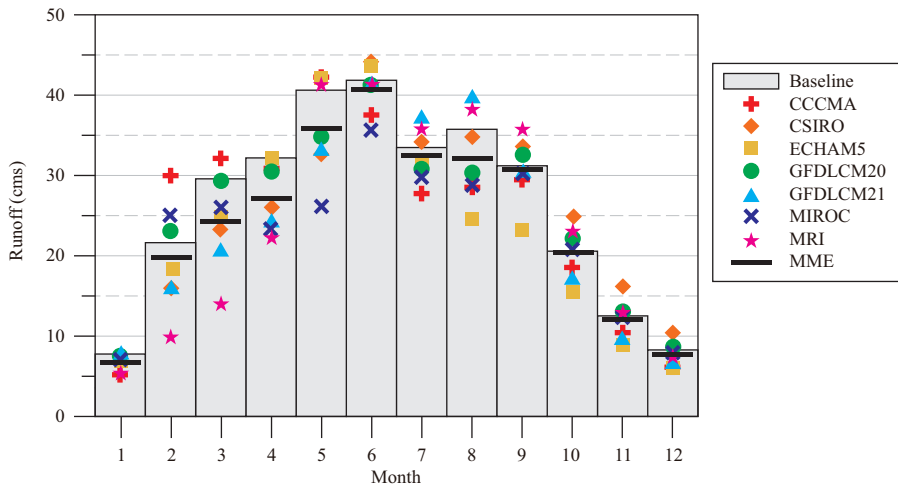


圖 14 德基水庫上游集水區基期與情境流量之比較

GCM 之雨量高於基期雨量，整體而言，模式間並無相同的趨勢變化。繁衍溫度結果如圖 13 所示，其中 7 個 GCM 之各月平均溫度皆較基期為上升的，但各模式間相差約 1°C，其模式間差異性並不大。以上結果與 TCCIP 所提供之雨量變化率與溫度差值趨勢相同，亦可證明氣象繁衍模式可合理反應出氣候變遷對平均值的影響。

5.2 未來情境之流量模擬結果

修正型 HBV 模式經率定與驗證後，配合氣

象繁衍模式所繁衍之基期與未來情境下各模式 30 組 20 年之日雨量與日溫度資料進行流量之模擬，模擬結果即為德基水庫上游集水區於基期與未來情境下之日逕流量。為方便討論未來情境流量之整體趨勢變化，本研究將模擬之日流量累積為月流量，再進行後續之分析探討。圖 14 為基期流量與 A1B 情境下 7 個 GCM 情境流量之比較圖，由圖可知 7 個 GCM 於各月份相較於基期流量均有增有減，情境流量之間並沒有是一致的趨勢。不過就 MME 的結果而言，流量的增減情況

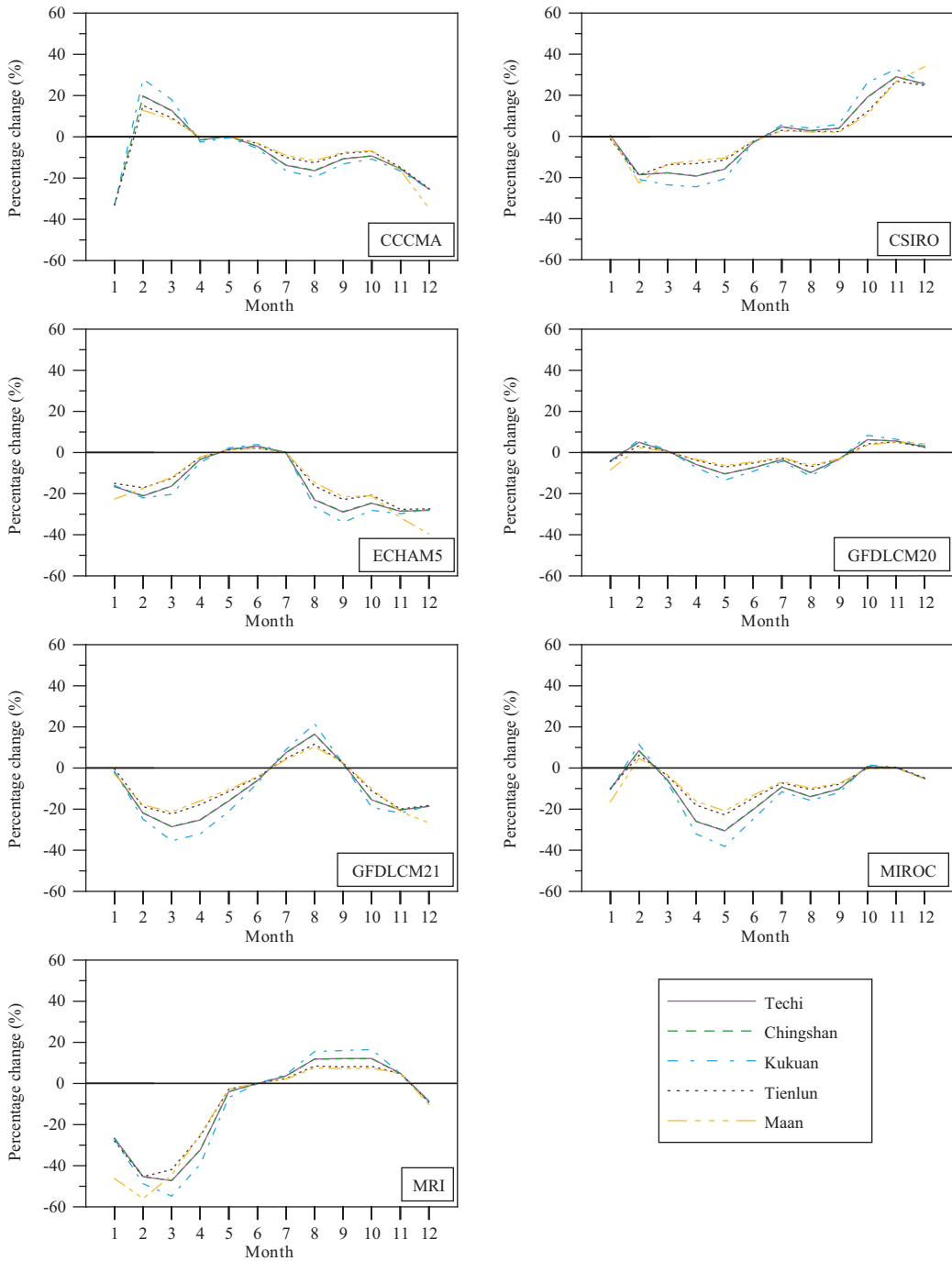


圖 15 不同 GCM 下各水庫相較於基期之平均月發電量變化率

則較為一致，其情境流量相較於基期流量均有減少的趨勢，其中 3 月、4 月、5 月與 8 月的情境流量有較明顯的減少。

5.3 未來情境之發電量分析

本研究藉由氣象繁衍模式繁衍未來情境雨量與溫度，修正型 HBV 模式模擬情境流量，最

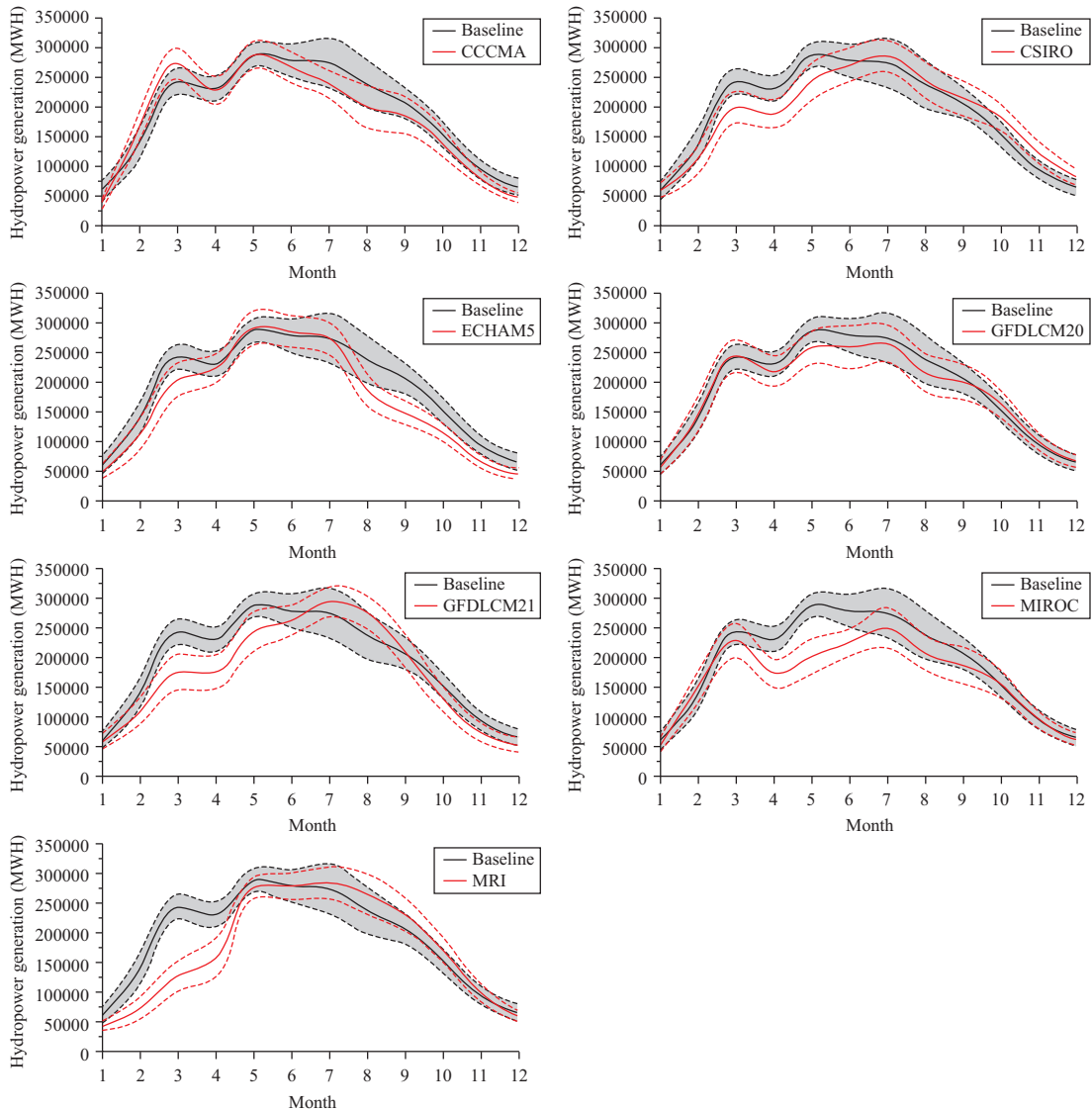


圖 16 基期與不同 GCM 之各月平均發電量比較

後經由大甲溪水庫發電模式以模擬水庫運作情形，並推估未來之情境發電量。圖 15 為不同 GCM 下各個水庫之情境發電量相較於基期發電量之比值，圖中可明顯看出不同 GCM 下其增減趨勢並不相同，且 GCM 間並無一致趨勢，但德基、青山、谷關、天輪與馬鞍等 5 個水庫之趨勢是一致的，故後續均將 5 個水庫之發電量加總為大甲溪流域之總發電量，以探討大甲溪流域整體發電量之衝擊。

探討氣候變遷對發電量之衝擊時，進一步考慮未來近 20 年氣候繁衍資料所造成之不確定性。圖 16 為基期分別與 7 個 GCM 之各月平均發電量之比較，圖中細、粗實線分別代表基期及情境模擬結果之平均，而細、粗虛線則分別為 30 組基期及情境模擬結果之 90% 信賴區間，信賴區間的範圍可表示 30 組模擬結果之變化情形(即水文變異)。為了方便視覺上之判讀，將基期模擬結果之 90% 信賴區間以灰底顯示之。由圖可明顯看

表 5 不同 GCM 之各月發電量假設檢定結果

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
CCCMA	-	+	+			-	-	-	-	-	-	-
CSIRO		-	-	-	-	-	+		+	+	+	+
ECHAM5	-	-	-	-		+		-	-	-	-	-
GFDLCM20				-	-	-	-	-		+	+	
GFDLCM21		-	-	-	-	-	+	+		-	-	-
MIROC	-	+	-	-	-	-	-	-	-			-
MRI	-	-	-	-	-		+	+	+	+	+	-

+表示基期與情境發電量有顯著差異，且較基期為增加

-表示基期與情境發電量有顯著差異，且較基期為減少

表 6 不同 GCM 下各月份相較於基期之發電量變化率

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
CCCMA	-35.64	19.96	12.33	-1.29	0.06	-4.34	-13.12	-15.74	-10.15	-8.90	-15.98	-26.80
CSIRO	-0.08	-20.12	-17.63	-18.41	-15.38	-2.66	4.23	2.83	3.87	18.37	29.80	26.65
ECHAM5	-16.80	-20.16	-15.81	-3.31	1.47	2.86	-0.11	-21.71	-28.04	-24.43	-29.37	-29.54
GFDLCM20	-4.73	4.58	0.63	-5.43	-9.95	-6.94	-3.46	-9.21	-2.95	6.11	5.63	3.03
GFDLCM21	-1.63	-21.90	-28.00	-24.26	-15.47	-5.75	6.91	15.83	2.25	-14.98	-21.10	-19.73
MIROC	-11.07	8.39	-5.73	-24.88	-29.71	-19.14	-9.05	-13.25	-9.78	0.70	0.20	-5.17
MRI	-29.71	-47.97	-47.74	-31.69	-4.13	-0.09	3.37	11.42	11.52	11.99	4.73	-9.08

出，豐水期之水文變異較枯水期大，而枯水期水文變異則較小。然而受到水文變異的影響，從圖 16 並無法直接判讀基期與情境發電量之差異是否為氣候變遷所造成，因此本研究使用統計學上之假設檢定(Hypothesis testing)，以瞭解基期與情境發電量是否有顯著的差異，其檢定過程如下：

(1) 建立虛無假設(null hypothesis, H_0)與對立假設(alternative hypothesis, H_a)：

H_0 ：基期平均發電量 = 情境之平均發電量

H_a ：基期平均發電量 \neq 情境之平均發電量

(2) 決定適合之檢定統計量(test statistic)：本研究之研究對象均屬於大樣本數($n \geq 30$)，故選用統計值 z 值做為檢定統計量，其公式如下：

$$z = \frac{\bar{x}_{Baseline} - \bar{x}_{scenario}}{\sqrt{S_{Baseline}^2/n_{Baseline} + S_{scenario}^2/n_{scenario}}} \dots (19)$$

其中

$\bar{x}_{Baseline}$ ：基期發電量之平均數；

$\bar{x}_{scenario}$ ：情境發電量之平均數；

$S_{Baseline}$ ：基期發電量之標準差；

$S_{scenario}$ ：情境發電量之標準差；

$n_{Baseline}$ ：基期發電量之組數；

$n_{scenario}$ ：情境發電量之組數。

(3) 選取顯著水準 $\alpha = 0.1$ ，即兩組數據具有顯著性差異的可能性為 90%。

(4) 根據計算之 z 值與理論 z 值比較，便可判斷其差異之顯著性。若 $z < -1.645$ 或 $z > 1.654$ ，則拒絕 H_0 ，即基期發電量與情境發電量有顯著差異。

表 5 為檢定之結果，表中「+」即表示該月份之情境發電量與基期發電量有顯著差異，且較基期為增加；「-」表示該月份之情境發電量與基期發電量有顯著差異，且較基期為減少。結果指出大多數月份的基期與情境發電量有顯著差異，其中 6 個 GCM (GFDLCM20 模式除外) 結果指出至少有 10 個月份的情境發電量有受到氣候變遷影響而呈現增加或減少的趨勢。表 6 則為不同 GCM 之各月發電量較基期之增減率，其中淺

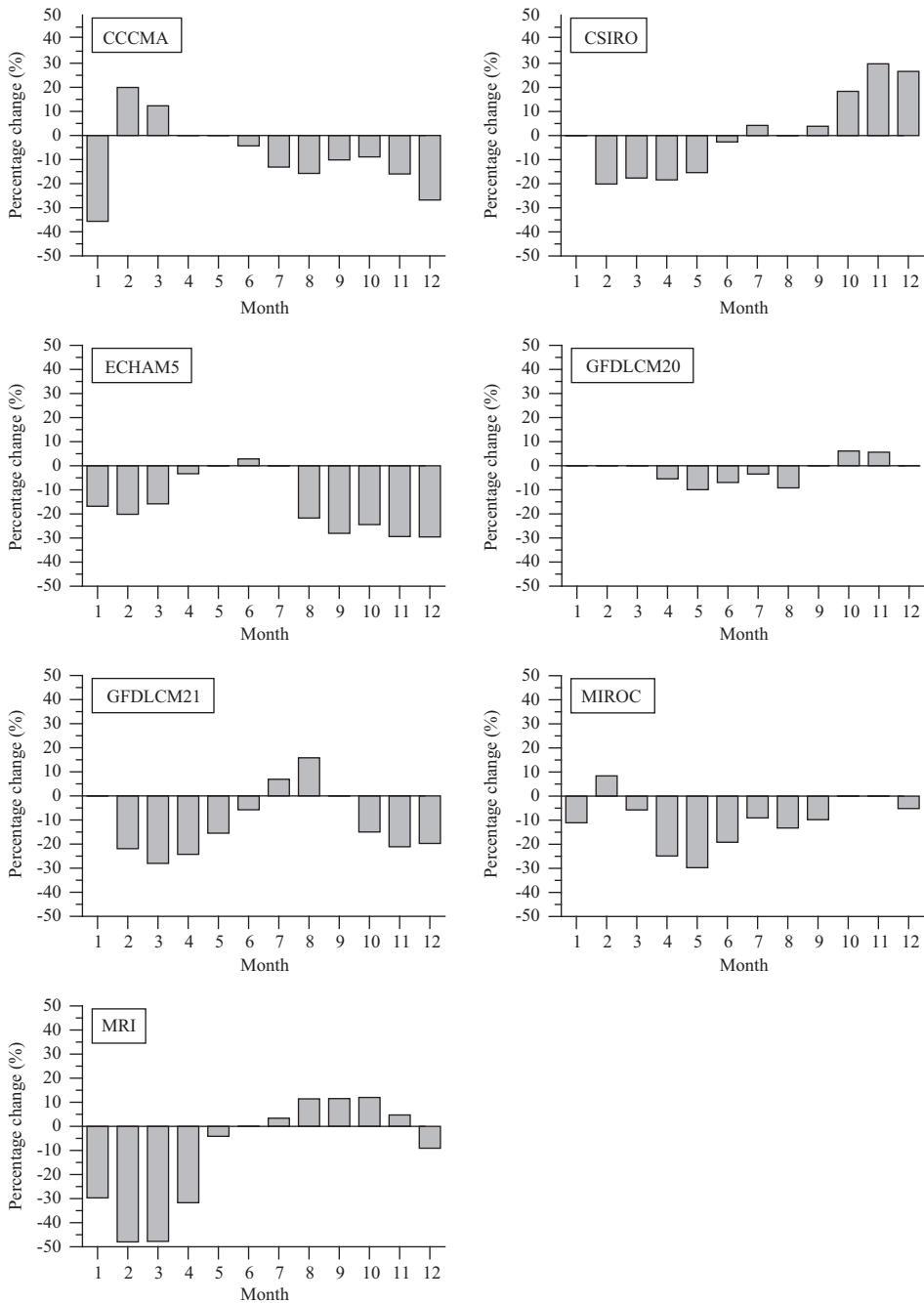


圖 17 不同 GCM 下各月份相較於基期有顯著差異之發電量變化率

色之增減率為未有顯著差異者。以 CCCMA 模式結果為例，4 至 5 月的情境發電量相較於基期發電量分別為減少 1.29%與增加 0.06%，兩者的增減量在統計上並無顯著差異，若由圖 16 內

CCCMA 模式結果來看，4 至 5 月基期與情境發電量的 90%信賴區間幾乎重合。本研究針對發電量增減較無顯著差異的月份均予以排除，僅呈現有顯著變化的結果，其結果如圖 17 所示。由該

表 7 基期與 MME 平均月發電量之比較

	Baseline (MWH)	MME (MWH)	增減量(MWH)	增減百分比(%)
1 月	60341.76	46279.26	-14062.49	-23.30
2 月	140724.69	121540.39	-19184.30	-13.63
3 月	243124.94	201559.71	-41565.22	-17.10
4 月	230814.16	189281.13	-41533.02	-17.99
5 月	287900.78	244919.34	-42981.44	-14.93
6 月	278323.84	261636.70	-16687.15	-6.00
7 月	274823.16	269731.42	-5091.73	-1.85
8 月	238231.06	225267.24	-12963.83	-5.44
9 月	206919.69	193438.78	-13480.91	-6.52
10 月	154087.91	151046.14	-3041.76	-1.97
11 月	94188.54	90060.29	-4128.24	-4.38
12 月	64946.72	58055.30	-6891.41	-10.61

圖可知，7 個 GCM 之各月份發電量大都呈現減少之趨勢，尤其是 ECHAM5 模式與 MIROC 模式幾乎全年發電量為減少，而 GFDLCM20 模式為變動最小者。台灣之夏季尖峰用電時期為 6 至 9 月，因此需特別注意到 CCCMA 模式、ECHAM5 模式與 MIROC 模式，此 3 個模式在該時期將可能減少 2-28%，直接影響可調度電力。

為瞭解未來氣候變遷下影響大甲溪水力發電可能之發電量，因此本研究以 MME 代表未來情境下之整體平均變化情形。如表 7 所示，未來情境下各月份都將可能較基期為減少，其中又以枯水期(11 至 4 月)較為嚴重，平均減少約 15%，豐水期(5 至 10 月)則平均減少約 6%。以增減量來看，3 至 5 月將可能減少約 42 百萬度，其他亦有 5 至 20 百萬度之減少量，全年加總將較基期減少 222 百萬度。由於水力發電係負責電力系統尖峰負載之調整，若未來水力發電量減少，而尖峰負載之缺口無法即時補足，將可能導致整個電力系統的不穩定。特別是氣候變遷下溫度持續上升，導致夏季之電力需求亦提昇之情況下，水力發電量減少將會對整個電力系統造成相當程度之衝擊。

在面臨未來氣候變遷可能造成之水力發電量減少，採用之相關調適策略建議可分為內部調適與外部調適，其中內部調適策略如：不同發電排程、操作方式與發電機組容量更新。外部調適

策略如：(1)於尖峰時段使用緊急發電機，包括安置在私人建築、醫院、及公共設施；(2)增加蓄電量，除抽水蓄能式的水力發電外，電子運輸器材透過使用電池的方式可迎合高峰期用電量的需求；(2)縮減高耗電量設備，藉由使用高效能的電器像是冷氣、洗衣機與照明設備，或改變生活方式以減低不需要的耗電。

六、結 論

本研究以大甲溪流域為研究區域，藉由氣象繁衍模式、水文模式與大甲溪水庫發電模式分別模擬未來情境之雨量、溫度、流量與發電量，並分析探討研究區域受氣候變遷之影響，以下針對本研究分析總結，提供數點結論供相關研究學者之參考。

1. 本研究使用 1975~2007 年的雨量、溫度和流量資料進行修正型 HBV 水文模式的參數率定與模式驗證。評鑑指標顯示：水文模式可合理模擬研究區域之流量資料。雖然該模式在颱風期間之尖峰流量有略微低估的情形，但整體而言此水文模式能夠適切的掌握流量豐枯變化情形。
2. 由於德基水庫之實際操作受到實際用電需求與操作人員的習慣之影響，而無法直接用方程式表示。因此本研究考慮實際的運轉水位紀錄、水庫操作規線以及水庫需要排洪時延長發

電，經操作策略之逐步優化過程，發現合併實際操作規線與歷史平均水位設定操作門檻，並配合(1)水位於門檻之上以尖峰6小時之設計最大發電用水量做為水庫放水量，門檻之下以下游需水量與入流量較小者為放水量；(2)當水庫該日可能發生溢流時，發電用水量根據可能之溢流量增加1至2小時之設計最大發電用水量等規則時，為最合適的德基水庫操作模擬方法。

3. 本研究將基期與情境之模擬結果進行比較以消除模式之系統誤差，更進一步探討未來近20年氣候繁衍資料所造成之不確定性，隨機繁衍30組未來雨量與溫度資料，以模擬氣候變遷影響下未來流量與發電量之變化，並藉由統計檢定方式分析基期與情境發電量是否有顯著的差異，結果指出大多數月份的基期與情境發電量有顯著差異。
4. 根據統計檢定之結果，發現7個GCM之各月份發電量大部分呈現減少之趨勢。而台灣之夏季尖峰用電時期為6至9月，因此需特別注意到CCCMA模式、ECHAM5模式與MIROC模式，此3個模式在該時期將可能減少2-28%，將可能直接影響可調度電力。
5. 由多重模式系集平均之發電量可知，氣候變遷衝擊下將可能於枯水期(11至4月)減少約15%，而豐水期(5至10月)則平均減少約6%。以增減量來看，3至5月將可能減少約42百萬度，其他亦有5至20百萬度之減少量，全年加總將較基期減少222百萬度。

謝 誌

感謝台灣電力公司大甲溪發電廠提供相關研究資料，使本研究可順利進行。

參考文獻

1. 行政院國家科學委員會，2010，「台灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置計畫」。
2. 吳雷根，2004，「曾文水庫枯水期長期入流量預測之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
3. 洪念民、童慶斌與譚義績，1998，「后里圳小型水力發電受氣候變遷之影響」，台電工程月刊，第601期，1-11頁。
4. 楊道昌，1999，「區域連續型降雨-逕流模之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文。
5. 經濟部水利處水利規劃試驗所，2000，「大甲溪可能水源利用方案檢討規劃報告」。
6. 戴嘉慧，2010，「氣候變遷對翡翠水庫供水、發電與防洪功能之衝擊評估」，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
7. Caron, L. P. and Jones, C. G., 2008, "Analysing present, past and future tropical cyclone activity as inferred from an ensemble of coupled global climate models," *Tellus*, 60(1), 80-96.
8. Chu, J. L. and Yu, P. S., 2010, "A study of the impact of climate change on local precipitation using statistical downscaling," *Journal of Geophysical Research*, 115, D10105.
9. Hamon, W. R., 1961, "Estimating potential evapotranspiration," *Journal of Hydraulics Division*, 87(3), 107-120.
10. IPCC, 2007, "Climate change 2007, The physical science basis."
11. Kitoh, A. and Uchiyama, T., 2006, "Changes in onset and withdrawal of the east asian summer rainy season by multi-model global warming experiments," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84(2), 247-258.
12. Koch, F., Prasch, M., Bach, H., Mauser, W., Appel, F. and Weber, M., 2011, "How will hydroelectric power generation develop under climate change scenarios? A case study in the upper Danube basin," *Energies*, 4, 1508-1541.
13. Madani, K. and Lund, J. R., 2010, "Estimated impacts of climate warming on California's high-elevation hydropower," *Climatic Change*, 102, 521-538.
14. Min, S. K., Park, E. H. and Kwon, W. T., 2004, "Future projections of East Asian climate change

from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations,” Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(4), 1187-1211.

15. Minville, M., Brissette, F., Krau, S. and Leconte, R., 2009, “Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower,” Water Resour Manage, 23, 2965-2986.
16. Zhang, X. and Lindström, G., 1997, “Developed

of an automatic calibration scheme for the HBV hydrological model,” Hydrological Processes, 11(12), 1671-1682.

收稿日期：民國 101 年 9 月 11 日

修正日期：民國 102 年 1 月 3 日

接受日期：民國 102 年 2 月 19 日