

氣候變遷對水資源影響評估與適應策略研擬

The Impacts of Climate Change on Water Resources and Response Strategies

國立臺灣大學農業工程學系
助理教授

童慶斌

Chin-Pin Tung

國立臺灣大學農業工程學系
博士班研究生

洪念民

Nine-Ming Hong

中國工商專科學校土木科
副教授

陳主惠

Chu-Hui Chen

摘 要

本研究擬根據未來可能之氣候變遷預設情境，建立水文模擬與水資源影響評估之模擬程序，以評估水資源可能遭受到氣候變遷之衝擊。自工業革命以來，由於人類活動大量增加大氣中之溫室氣體，影響了地球之能量平衡關係，進而可能改變氣候狀態。目前一般的預測在大氣 CO₂ 濃度增加為兩倍時，全球溫度將上升 1.5 到 4.5 °C 之間。溫度上升將增加蒸發散量，也因而減少了河川流量，如此，河川乾旱的情況可能變得更嚴重。降雨的增加或減少亦會直接影響水資源。本研究目的為評估水資源受氣候變遷影響之損害度及提出適應對策，將台灣分成四區，每區選擇主要河川評估河川流量受到之衝擊，包括北勢溪、大甲溪、曾文溪及秀姑巒溪。探討不同用水標之需求量之影響機制，及對蓄水容量需求進行評估，缺水風險亦於本研究中探討。流量模擬方面，年流量方面北部與中部增加約 10% 以內，但對於南部地區增加幅度則較大，對於 UKMO 模式結果由於對於豐水期雨量修正可高達 50% 其適用仍須進一步評估；對於豐水期流量皆呈現增加趨勢，約 6% 至 20%，各模式結果相當一致；枯水期流量模擬方面呈現減少趨勢，減少約 10%。水庫容量方面，GISS 模式與 CCCM 模式結果較為一致，由於德基水庫與曾文水庫用水量以農業用水為大宗，因此農業用水量以溫度改變做修正時，將使需求量大幅增加，致使水庫容量增加，雖然預測未來年流量增加，但因為豐、枯水期差異增加，對水庫容量規劃仍屬不利影響，用水調配可能更加困難。

關鍵詞：氣候變遷，水資源，全球暖化，溫室效應。

ABSTRACT

Simulation procedure for hydrology and water resources impact assessment was

developed. Based on future climate scenarios, the impacts of climate change on water resources were evaluated. Greenhouse gases have increased due to human activities since industrial revolution, which affects the earth's energy balance and further influence climate. Global mean temperature is expected to increase 1.5~4.5 °C due to doubling atmospheric CO₂. Higher temperature may increase evapotranspiration and thus reduce streamflow. Therefore, drought may become more serious. Besides, increasing or decreasing precipitation will also affect water resources directly. The purposes of this study are to evaluate the vulnerability of water resources due to climate change, and to propose possible response strategies. Taiwan is divided into four regions, and one major river is selected for each region. The selected rivers include the Bashi creek, Tachia creek, Tsengwen Creek, and Hsogunaw creek. Active storage requirements were evaluated, and the risks of water supply deficit were also assessed. The simulation results indicate annual streamflow increases 10% in the North and Central regions. Streamflow increases 6%~20% in humid season, and decreases about 10% for arid seasons. The simulation results of active storage requirements are consist based on GISS and CCCM scenarios. Agricultural water demand will increase due to higher temperature, which causes to larger active storage requirements in the Tachia creek and Tsengwen creek. Although annual streamflows may increase in climate change conditions, increase of streamflow difference between humid and arid seasons may also bring more difficulties for water management.

Keywords: Climatic change, Water resources, Global warming, Greenhouse effect.

一、前 言

因爲人類活動，增加溫室氣體之排放，因而加強大氣溫室效應。主要溫室氣體包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)及氟氯碳化物(CFCs)。加強溫室效應可能造成全球氣候變遷，且因此改變各區域溫度及降雨。一般預測大氣CO₂濃度增加爲兩倍時，全球溫度約將上升 1.5 到 4.5 °C，且全球降雨量將增加(IPCC, 1995)^[14,15]，但各地區降雨變化將有不同。

台灣年平均降雨量 2510 mm，約爲世界平均降雨量之 2.6 倍，但每人分配平均降雨量卻只有世界平均的 1/6 弱，而且因爲河流短、地勢陡，降雨量大都直接奔流入海。民國 82 年爲乾旱年，年降雨量僅約 1640mm，根據資料分析(水資源局，1996)^[5]，約有 46.2%之降雨量直接流入海中，而 33.3%爲蒸發散損失，使得可利用水量僅佔降雨量之 20.5%。每人分配之可利用水量更形

稀少，因此台灣乃屬於水資源貧乏地區。此外，降雨量分佈不均，約 80%集中於 5-10 月之豐水期，且大部分爲颱風暴雨，因此使水資源調配益發困難。

河川流量取決於降雨和蒸發散量，降雨將水帶進集水區，而經由蒸發散帶離此系統。蒸發散量又決定於溫度與太陽輻射等氣候因子，因此河川流量的可利用量受到氣候條件的密切影響。溫度上升將增加蒸發散，也因而減少了河川流量，如此，河川乾旱的情況可能變得更嚴重。降雨的增加或減少亦會直接影響水資源。國外有關氣候變遷對水資源之衝擊研究均已積極展開。

當河川流量改變，將影響水資源可利用量，若根據目前各流域之管理策略，是否會導致各標的的供給量受到影響？民生及農業用水是否足夠？水庫防洪空間是否滿足？都必須加以進一步探討。此外，不同之水資源標的之需求亦可能受到氣候變遷影響而改變。例如溫度升高可能導

致蒸發散量之增加，因而提高農業用水量。台灣水資源是有限的，如何事先評估環境改變所帶來之影響，並據以擬定因應對策，是促進台灣永續發展不可或缺之重要工作。

二、文獻回顧

國外相關研究說明，氣候改變可能改變可供應水量 (Chang *et al.*, 1992^[7]; Tung and Haith, 1995 & 1998^[21,22]; Waggoner, 1990^[24])。高溫可能增加蒸發散量，因而減少河川流量(Fennessey and Kirshen, 1994^[9]; McCabe and Ayers, 1989^[16]; McCabe *et al.*, 1990^[17]; Rao and Al-Wagdany, 1995^[20]; Tung and Haith, 1995^[21])。此外，也會影響需求量，包括農業、工業及民生用水，然除了農業用水之影響評估外，對工業及民生之影響評估研究較少。國科會(1994)^[11]曾完成有關全球變遷之五年研究規劃，然相關研究仍然不多。經濟部水資會(1995)^[4]曾進行氣候變遷對台灣水資源之影響評估，利用水桶模式進行水文模擬，但水桶模式具有統計特性之參數並不適合。童慶斌(1996)^[6]則利用水平衡方程式評估大甲溪上游河川流量受氣候變遷之影響，但並未探討供水量及適應策略。

本研究主要目的是在探討氣候變遷對台灣地區水資源之衝擊及適應對策。將以供給面出發，並期探討需求面之影響機制，以作為擬定適應對策之依據。本研究根據未來可能之氣候變遷，建立水平衡模擬程序以評估水資源可能遭受到之衝擊。將台灣分成四區，每區選擇主要河川評估河川流量受到之衝擊，並探討供水影響，最後並依據模擬結果，建議適應策略。

三、研究方法

本研究主要是評估氣候變遷對台灣主要河川流量之影響，工作將包含研究區域選定、氣候變遷型態之分析、河川模擬模式之驗證與應用、及水資源供需影響評估。研究區域選定，將台灣分成四區，每區選擇具有水庫主要河川進行影響評估。選擇研究區域如下：北區 — 翡翠水庫上游集水區；中區 — 德基水庫上游集水區；南區

— 曾文水庫上游集水區；東區 — 秀姑巒溪上游集水區。

在氣候變遷考量上，目前有關氣候變遷之考量主要可分為三方面，分別為(1)歷史氣候資料之變化分析(2)假設可能之變化範圍(3)物理模式預測，目前最成熟之物理模式為全球氣候變遷模式 (General Circulation Model, GCM)。本研究採用之氣候變遷將以 GCM 模式之預測值為主。目前於各國之相關研究常應用的為美國之 GFDL 與 GISS 模式、英國之 UKMO 模式、及加拿大之 CCCM 模式。此四個模式之預測值均將應用於本研究之中。而模擬流量所須之日氣象資料將由一氣象模擬模式產生，本研究採用 Tung and Haith (1995)^[21]發表論文中之氣象模擬模式。

流量模擬部分，本研究將應用兩個水平衡模式評估流量，並比較其模擬結果。兩個水平衡模式分別為美國 Country Study Program 所提供之水平衡概念模式(Water Balance Model, the WatBal)及 Haith and Shoemaker(1987)^[10]所發展之 GWLF 模式中之集水區水文模式。

3.1 The WatBal Model

該模式為在 MicroSoft Excel 環境下工作，並以 Visual Basic 設計模式及輸入、輸出之功能。該模式所考慮之水平衡關係如下：有效降雨至地面後，一部分成為直接逕流流入河川中；而另一部分則會入滲至土壤中。入滲水進入土壤後，將可能成為地表逕流 (surface runoff)、伏流 (subsurface runoff) 與基流 (base flow) 而排至河川。因此，河川流量可考慮為直接逕流 (direct runoff)、地表逕流 (surface runoff)、伏流 (subsurface runoff) 與基流之總和。可以下式表示：

$$R = R_d + R_s + R_{ss} + R_b \dots\dots\dots (1)$$

上式中 R 為河川流量， R_d 是直接逕流， R_s 是地表逕流， R_{ss} 是伏流，而 R_b 是基流量。除了基流必須分析歷史資料決定外，其他可由下列公式計算。

$$R_d = \beta P_{eff} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_s = \begin{cases} z^\epsilon (P_{eff} - R_b) & \text{if } P_{eff} > R_b \\ 0 & \text{if } P_{eff} \leq R_b \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

$$R_{ss} = \alpha z^\gamma \dots\dots\dots(4)$$

上式中 α 、 β 、 γ 、 ϵ 為參數， z 為集水區土壤相對含水量($0 \leq z \leq 1$)，而 P_{eff} 為有效降雨。降雨入滲至土壤中，除了成為地表逕流(surface runoff)、伏流(subsurface runoff)與基流(base flow)外，亦會因蒸發散(evapotranspiration, Ev)而損失。此外，在過程中亦會改變土壤水份，可由下列方程式表示：

$$S_{max} \frac{dz}{dt} = P_{eff} (1 - \beta) - R_s - R_{ss} - R_b - Ev \dots\dots\dots(5)$$

上式中 S_{max} 是集水區土壤最大含水量，上述平衡關係另繪於圖1。式中之蒸發散量可由下式計算：

$$Ev = PET z \dots\dots\dots(6)$$

其中PET為潛能蒸發散量，可由Priestly-Taylor Method估算。模式中所需要參數可透過參數檢定及驗證過程求得，Country Study Program所提供之WatBal模式具有自動尋求最佳參數之能力。在模式參數經過檢定驗證後，可應用於模擬不同氣候條件下之河川流量。

3.2 The GWLF Model

此模式能反應氣候變遷及土地利用對流量之衝擊，此外，該模式將不需檢定參數，其參數

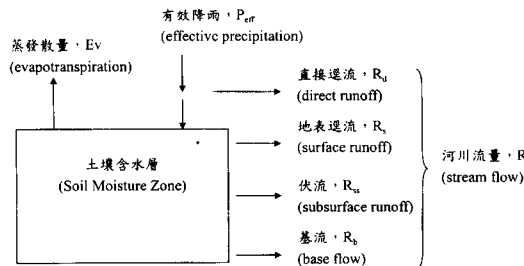


圖1 水平衡關係

可根據集水區之土地利用及土壤等特性決定，可以降低評估結果之不確定性。此模式所考慮之水平衡關係如下：降雨將水帶入集水區，而展開集水區水平衡的序幕。雨水降至地面後，一部分的水會入滲至土壤中；而另一部分則成為地表逕流，並直接流入河川中。此關係可以下列方程式表示：

$$I_t = P_{eff,t} - Q_t \dots\dots\dots(7)$$

方程式中 I_t 是入滲量， $P_{eff,t}$ 是降雨量，而 Q_t 是地表逕流量，模式中所用的單位為公分。入滲水將補充未飽和層之土壤水份，如未飽和層之土壤水份超過土壤最大含水量，則水份將滲漏至飽和層。此外，未飽和層之土壤水份亦可能因蒸發散而帶離土壤。未飽和層之水平衡可以下列方程式表示：

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

上式中 U_t 是未飽和層之土壤水份含量， Ev_t 是蒸發散量，而 PC_t 是滲透量，式中運算以深度為單位。

土壤自由含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \dots\dots\dots(9)$$

上式中 S_t 是淺層飽和層之土壤水份含量， PC_t 是未飽和層滲漏至飽和層之水量， G_t 是飽和層滲漏至河川之水量，而 D_t 是入滲至受限含水層之水量，式中運算以深度為單位。當河川水位高於地下水水位時，河川補注土壤，則 G_t 為負值。在此研究中入滲至受限含水層之水量(D_t)假設為零。未飽和層滲漏至飽和層之水量(PC_t)可由下式算出

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \dots\dots\dots(10)$$

上式中 U^* 是最大土壤水份容量。年河川流量(SF_a)約等於年地下水排出量(G_a)加上年逕流量(Q_a)。

有各種不同的方法可用於估算地表逕流，如合理化公式、及Curve Number方法(Ogrosky and Mockus, 1964)^[18]等。在本研究中，將採用Curve

Number 方法(USDA, 1978)^[23]，主要是此種方法在計算地表逕流時可合理的反應土地利用方式及土壤水份之影響。而在(8)式中蒸發發量(Ev)等於潛蒸發發量(PET)乘以一個土壤水份因子(K_s)及一覆蓋係數(CV)，且受限於未飽和層可利用水份，可表示為

$$Ev_t = \text{Min}[K_s \times CV_t \times PET_t, U_t + I_t] \dots\dots(11)$$

覆蓋係數將隨土地利用方式的不同而不同。藉由此概念性模式，可以評估土地利用與氣候變遷對水資源之衝擊。有關 GWLF 之水平衡觀點可由圖 2 說明。

3.3 水資源供需影響評估

根據該集水區水資源管理策略及模擬之河川流量，探討氣候變遷對不同用水標的供應量之影響。水庫操作規則常根據上游入流量或蓄水量進行配水及防洪調節，如果氣候變遷改變上游入流量統計特性，則使用水庫容量需求及配水方式將可能改變，因此本研究將利用模擬之河川流量，評估氣候變遷可能對供水造成之影響。

不同用水標的需求量對氣候變遷之敏感性不同，本研究將探討不同標的受氣候變遷之影響機制。惟影響水資源需求量之因子，除了氣候外，亦受到經濟及社會發展程度之影響，較難預測。因此本研究在需求面將著重於機制建立，以作為配合經濟社會發展研究之基礎。

3.3.1 水庫容量(Active Storage)評估

前面探討氣候變遷對河川流量之影響，而河川流量改變是否會影響供水能力，在假設需求不變，或者是不同成長時，是否需要額外之蓄水容量來加以調蓄？本節將就 Sequence Peak Method 加以介紹，說明如何估算水庫容量，並探討其受氣候變遷之衝擊。

A. 年間調節容量 (Over-year Active Storage, koa)

用以調節年間水資源所需之容量，在此稱為年間調節容量，其以年流量為考慮，若已知 n 年之流量資料及年需水資料，則所需容量可以下式決定：

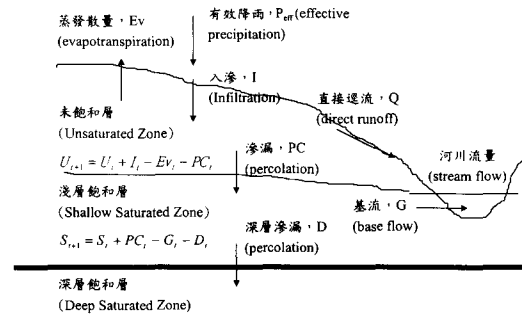


圖 2 The GWLF 模式水平衡關係示意圖

$$k_i = \begin{cases} D - Q_i + k_{i-1} & \text{if } D - Q_i + k_{i-1} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$k_a^o = \text{Max}_{i=1, \dots, n} (k_i)$$

其中 D 為年需水量， Q_i 為第 i 年之上游河川流量， k_i 為第 i 年所需累積之水庫容量。

B. 季節間調節容量 (Within-year Active Storage, k_a^w)

為調節一年中在季節間流量供應需求不足，所需之額外水庫容量稱為季節間調節容量。決定水庫容量之方法與上節相同，惟必須使用季節性入流量及需求量。若已知 n 年 m 個期間之流量資料及季節性需水資料，則

$$k_{ij} = \begin{cases} D_j - Q_{ij} + k_{i,j-1} & \text{if } D_j - Q_{ij} + k_{i,j-1} \geq 0 \text{ for } i = 1, \dots, n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad j = 1, \dots, m$$

$$k_a = \text{Max}_{i=1, \dots, n} \text{Max}_{j=1, \dots, m} (k_{ij})$$

$$k_a^w = k_a - k_a^o \dots\dots\dots(13)$$

其中 D_j 為第 j 期間之需水量， Q_{ij} 為第 i 年第 j 時期之上游河川流量， k_{ij} 為第 i 年第 j 時期所需累積之水庫容量， k_a 為必須之水庫總容量。

3.3.2 水資源需求量影響評估方法

探討如何評估在氣候變遷下之用水需求，著重於主要之用水項目，包括工業用水、農業用水與民生用水三大部分。受氣候變遷(溫度上升)影響最顯著的為農業用水，其他用水量則多受社會環境及經濟發展影響較為顯著。

台灣地區平均每人每日用水量為386公升，已經超出世界標準很多，而台灣地區於西元2021年其民生用水推估約增加一倍(經濟部水資源局，1997)^[10]，因此本研究假設西元2050年民生用水將達到現用水量的兩倍。農業用水主要在灌溉，而灌溉之目的是為滿足蒸發散量之需求。由於溫度的上升，勢必造成作物蒸發散量的增加，致使農業計畫用水量增加，因此本研究將以溫度改變所造成潛能蒸發散量增加的比例，作為農業用水量的修正率。此外，本研究亦考慮國內有釋放農地的政策，將釋出約20%的農地面積，可使農業用水量大幅降低。工業用水量往往需配合上位之計畫來訂立，其需求量往往因為計畫的執行而有極大的改變，單就各工業本身特性實難以估算工業用水量，就本研究三個水庫所供給的工業用水而言，因其供水標的工業用水量所佔並非大宗，但台灣各區域大多面臨缺水壓力與現有水庫往往需提供新建水庫的部分水量調配的前提下，即使農業用水量釋出，其水量亦將轉用於其他供水標的或供其他水庫調配，因此本研究將假設在當農業用水釋出後，其水量完全轉用於工業與民生用水，仍具有不足額時，未來需水量則向上再做修正。因此未進一步詳細分析未來工業用水需求量。

綜合上述，本研究的需求量方有兩個方案，第一方案為以目前土地利用情形作為考量，僅修正因溫度上升所造成農業用水量的增加，工業與民生用水不加以修正；第二方案為考量農地減少20%，但仍須修正農業需水量，並將農地面積減少，因減少而釋出的水量全部轉移至工業與民生使用，當不足需求量時，需求量則向上修正。

3.3.3 水資源損害度評估方法

以10年紀錄之降雨與溫度統計資料為基準，重新模擬300年的日溫度與日降水資料，利用WatBal及GWLF水平衡模式模擬河川流量，以每10年為基準並配合不同的需求量推估水庫容量，因此可得到30組不同水庫容量，取其平均值為平均水庫容量；在年間調節容量方面，亦利用相同於水庫容量方法加以模擬。利用較長時期模擬結果，以求得更穩定水文特性，進而推估

平均之結果。

本研究定義以實際的河川流量與不同的需求量所推得之水庫容量訂為零受損度的水庫容量，並配合三組GCM所模擬的流量推算不同的氣候變遷條件下的水庫容量，其水庫容量增加量對零受損度水庫容量的比值即為受損度一受損指標。此外，本研究進一步對於推估之全部水庫容量進行滿足實際供水的風險分析，探討全部水庫容量運用供水情況下，供水量無法滿足的發生機率、平均水庫缺水量，以及以現有水庫容量配合不同的河川流量進行分析，比較風險與缺額之差異。

四、氣候變遷預擬情境

目前有關氣候變遷之考量主要可分為三方面，分別為(1)歷史氣候資料之變化分析(2)假設可能之變化範圍(3)物理模式預測，目前最成熟之物理模式為全球氣候變遷模式(General Circulation Model, GCM)。本研究採用之氣候變遷將以GCM模式之預測值為主。目前於各國之相關研究常應用的為美國之GFDL與GISS模式、英國之UKMO模式、及加拿大之CCCM模式。此四個模式之預測值均將應用於本研究之中。而模擬流量所需之日氣象資料將由一氣象模擬模式產生，本研究採用Tung and Haith (1995)^[21]氣象模擬模式。

氣候變遷影響評估主要目的，在於評估現今氣候條件與未來氣候條件下，氣候與自然環境的改變及影響程度。氣候預設情境主要在決定氣候可能之改變情形，包含氣候因子中溫度或蒸發散量與降水的改變；或以大氣環流模式GCM所輸出，修正氣候因子的改變情形。本研究採以四種GCM最為可能之氣候變化狀況，包括溫度差與降水量改變率，作為可能氣候改變的修正。本研究以四大集水區中氣象站位置，相應GCM最近的格點作輸出。

採以美國NCAR所提供之主要全球變遷模式預測值，包括CCCM、GFDL、GISS與UKMO等四個模式，考慮最接近各流域雨量站的模式格點作為溫度與降水量輸出值。考慮氣候變遷下，

各月平均溫度修正為原各月平均溫度加上 GCM 模擬 $2\times CO_2$ 與 $1\times CO_2$ 的溫度差值。各月平均降水量修正為原各月平均降水量乘以 GCM 模擬 $2\times CO_2$ 與 $1\times CO_2$ 的降水量比值，如方程式(14)與(15)。

$$T_{mi}' = T_{mi} + (T_{m2\times CO_2} - T_{m1\times CO_2}) \dots \dots (14)$$

$$P_{mi}' = P_{mi} \cdot (P_{m2\times CO_2} / P_{m1\times CO_2}) \dots \dots (15)$$

方程式中 T_{mi}' 與 P_{mi}' 為修正後的月平均溫度與降水， T_{mi} 與 P_{mi} 為修正前歷史資料月平均溫度與降水量，斜體字即為各 CGM 模式輸出值。再由各月平均氣候特性代入氣候模擬模式，模擬十組三十年氣候資料，在新合成之溫度與降水日資料輸入水平衡模式中模擬新的河川流量資料。

溫度修正考慮差值而降水量修正考慮比值，主要基於溫度乃大範圍氣體之特性，溫度改變也較一致；就降水量而言，區域性的差異較大，當同一氣團進入時不同地區將會生不同的大小降水，以差值修正較不適宜，宜採比例修正。

五、模擬試驗結果

5.1 參數檢定與模式驗證分析

水文模式的適用性必須符合原有流量紀錄，藉由其模式的穩定性推估因為降水與溫度變化所造成之流量改變。校正過程乃建立模式所需參數，驗證過程則驗證模式的適用性。惟物理性參數若所需資料充足時，其參數具有物理意義，則直接進行模式驗證。

5.1.1 WatBal 參數檢定與驗證

水平衡模式 WatBal 在本研究中，以各河川基流取其紀錄中最低之日平均流量為代表，並且不隨其他參數改變而改變。雖然此假設可能略為低估實際基流量，但可大為簡化流量歷線分離基流及直接逕流之工作，也可避免任意假設基流帶來模式之偏差。選擇偏差最小及相關係數最高者為該河川之模擬參數。各河川主要之優選參數列於表 1，參數檢定之預測值與紀錄值之相關係數列於表 2。經過參數優選後，用同一組參數，但不同之流量及氣象資料進行模式驗證，模擬值與

表 1 流量模擬模式(WatBal)參數

	WatBal 模式主要參數			
	Smax(mm)	ϵ	β	Rb (mm/day)
北勢溪	301	0.75	0.5	0.5
大甲溪	501	0.75	0.3	0.9
曾文溪	500	0.42	0.3	0.1
秀姑巒溪	516	0.9	0.5	0.6

表 2 參數檢定與模式驗證相關係數

	參數檢定相關係數		模式驗證相關係數	
	逐月	月平均	逐月	月平均
北勢溪	0.92	0.93	0.92	0.93
大甲溪	0.86	0.83	0.82	0.85
曾文溪	0.99	0.99	0.94	0.96
秀姑巒溪	0.82	0.96	0.92	0.97

表 3 GWLF 模式驗證相關係數

	參數相關係數		模式參數	
	逐月	月平均	CN2	RG
北勢溪	0.85	0.92	71.5	0.01
大甲溪	0.90	0.94	62.8	0.01
曾文溪	0.95	0.99	70.5	0.03
秀姑巒溪	0.80	0.98	80.0	0.01

記錄值之相關係數列於表 2，流量模擬結果如圖 3-圖 6。從該表與圖中可看到，除了大甲溪相關係數在 0.82 與 0.86 間略低且高流量模擬較差外，皆有相當不錯的相關性，表示本研究檢定之參數可配合模式合理模擬四個主要河川。

5.1.2 GWLF 參數與驗證

因為 GWLF 模式其參數選定並非引用校正方法求得，主要參數為土地利用條件 CN2 值與退水係數 RG 值，土地利用參數以 SCS 曲線值法依照不同土地利用、土壤水分條件與土壤特性相對應 CN2，退水係數一般採用為 0.01，若結果與實際不符合可作適當修正，其範圍介於 0.01 至 0.2 之間，其驗證記錄時間為 WatBal 校正與驗證記錄時間相同。經由各區土地利用，所得之土地利用參數與模式模擬驗證結果如表 3。其與 WatBal 相較中部地區模擬資料較為準確，北部地區結果較不理想，其他地區的相關係數也很相

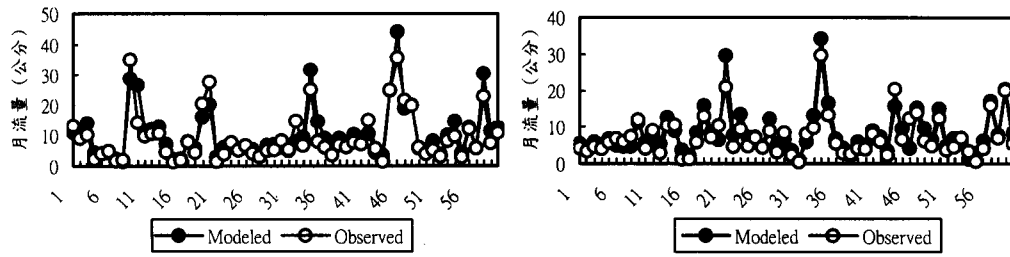


圖 3 北勢溪河川流量(a)參數檢定(b)模式驗證(The WatBal Model)

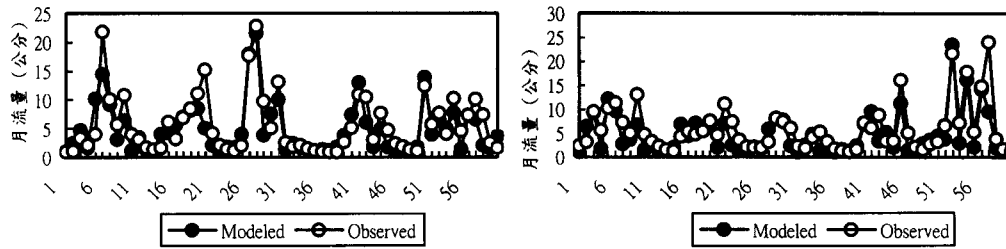


圖 4 大甲溪河川流量(a)參數檢定(b)模式驗證(The WatBal Model)

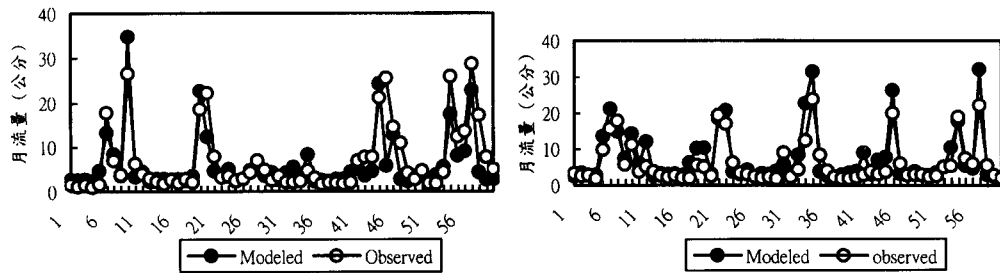


圖 5 秀姑巒溪河川流量(a)參數檢定(b)模式驗證(The WatBal Model)

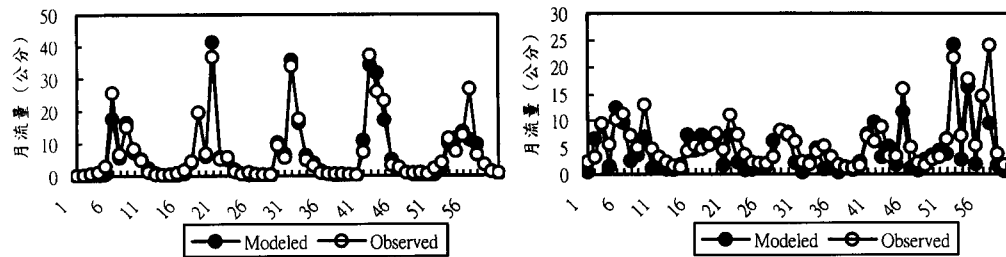


圖 6 曾文溪河川流量(a)參數檢定(b)模式驗證(The WatBal Model)

近。就相關係數而論，GWLF 平均模擬結果較 WatBal 為佳。模擬驗證結果如圖 7(a)至(d)。

5.2 河川流量受氣候變遷之影響評估

本節是根據第四節章設定之氣候變遷情境進行流量模擬，因為氣候變遷本身資料具有不確定性，在氣候變遷條件下預測河川流量也因為所引用大氣模式資料不同而不同，因此在討論上將以改變之百分比來討論，並比較因為模式差異而顯現出結果的異同性。

利用 WatBal 模式與 GWLF 分析結果，表 4 顯示年逕流量除了秀姑巒溪在 GISS 條件下有減少之情況，其他均呈現上升之趨勢，主要是因為降雨量之增加。雖然利用不同 GCM 模式之模擬結果不同，但可看出在年流量之變化上南部大於

北部。西部之大甲溪及曾文溪流域平均改變率大於東部之秀姑巒溪。總結，年流量受氣候變遷之影響為；具有上升趨勢且西南地區增加率較高，且不同模式對於其結果相當一致。

表 5、6 為各流域豐水期及枯水期之流量改變率。豐水期之變化如年流量，除了秀姑巒溪在 GISS 條件下有流量減少之情況，其他均呈現上升之趨勢。而在枯水期之流量方面，GISS 之預設情境流量將增加，如果為真，則對台灣水資源有正面效益，惟其他三個 GCM 模式之預設情境均預測枯水期流量將減少。豐水期之洪災及枯水期流量不足一直是台灣水資源之困境，在氣候變遷下豐水期流量將增加而枯水期流量減少，即洪災及乾旱均可能加劇。因此相關當未宜事先加強探討並訂定因應對策。

表 4 預設情境下之年平均流量改變率

	年平均流量改變率 (%)				年平均流量改變率 (%)			
	WatBal				GWLF			
	CCCM	GFDL	GISS	UKMO	CCCM	GFDL	GISS	UKMO
北勢溪	4	6	11	12	3	9	10	11
大甲溪	8	2	13	28	8	0	13	25
曾文溪	20	10	26	41	22	8	25	56
秀姑巒溪	15	7	-13	37	16	6	-15	42

表 5 在預設情境下之豐水期流量改變率

	豐水期流量改變率 (%)				豐水期流量改變率 (%)			
	WatBal				GWLF			
	CCCM	GFDL	GISS	UKMO	CCCM	GFDL	GISS	UKMO
北勢溪	20	17	18	42	18	19	17	40
大甲溪	20	6	19	59	17	2	19	53
曾文溪	24	12	28	50	23	8	25	59
秀姑巒溪	21	11	-16	50	22	10	-20	56

表 6 在預設情境下之枯水期流量改變率

	枯水期流量改變率 (%)				枯水期流量改變率 (%)			
	WatBal				GWLF			
	CCCM	GFDL	GISS	UKMO	CCCM	GFDL	GISS	UKMO
北勢溪	-17	-8	1	-28	-12	-2	3	-17
大甲溪	-11	-4	2	-22	-7	-3	3	-18
曾文溪	-6	-3	10	-21	4	9	12	10
秀姑巒溪	-11	-8	-4	-20	-10	-9	3	-43

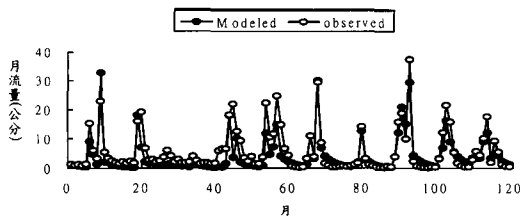


圖 7(a) 北勢溪模式驗證(GWLF)

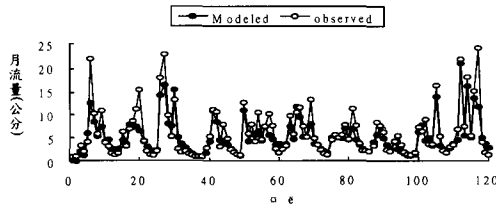


圖 7(b) 大甲溪流量驗證(GWLF)

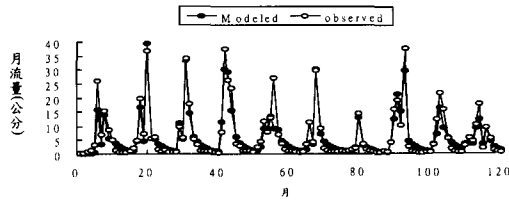


圖 7(c) 曾文溪流量驗證(GWLF)

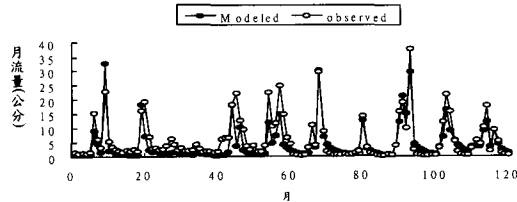


圖 7(d) 秀姑巒溪流量驗證(GWLF)

兩模式大部分的模擬結果皆相當一致，惟於曾文溪流域地區，枯水期方面兩者結果相差極大，GWLF 呈現正向修正，WatBal 呈現負向修正，顯示兩個不同模式架構對模擬結果可能有所影響，GWLF 枯水期流量增加原因，主要在十一與十二月份，其河川流量呈現 10%至 20%的正向修正，主要是因為豐水期時降雨量的大量增加，而且曾文溪枯水期流量極低，致使飽和層除水量大為增加，於十一與十二月補注所致，也就是 GWLF 對於土壤延遲時間較長。UKMO 模式結果於豐水期雨量增加高達 50%與其他模式差異較大，其結果與台灣地區年雨量多集中於豐水期

相比對，年雨量將高達 5000 公釐，其結果與實在很難與現實狀況互相比較，因此進一步的水資源分析將不採用此一模式結果。

根據不同氣候變遷預設情境之河川流量影響評估結果，豐水期之河川流量可能因為雨量之增加而增加，也因而使年流量增加。而枯水期之河川流量，模擬結果顯示趨於減少。考慮氣候變遷對台灣水資源之影響，在河川流量部份可看出極端化之趨勢，即豐水期洪水與枯水期乾旱愈嚴重，這對台灣水資源調配將有極大之影響。

5.3 水庫容量需求受氣候變遷之影響評估

台灣因為豐枯水期分布不均，因此必須透過水庫蓄流過多之流量以提供枯水期使用。在第三節介紹如何在入流量及需求已知情況下，決定水庫容量需求。本節將介紹在水資源供給需求不變及流量隨氣候變遷影響下之容量需求變化，包括目前土地利用狀況與未來土地利用狀況，其需求量推估在前面已經論述，其結果如表 7。因為秀姑巒溪為河川引水，無水庫相關資料，因此在本節中將暫不予討論。表 7 中，“a”指的目前土地方式加上農業用水受氣候變遷影響修正；而“b”指農地轉出 20%後再加上氣候變遷用水修正。

表 8、表 9 及表 10 分別為在預設情境下全部水庫容量(Total Active Storage)、年調節水庫容量(Over-year Active Storage)、及季調節水庫容量(Within-year Active Storage)之改變率。雖然在預設情境下，年降水量呈現上升趨勢，增加幅度也高達 17-20%(不包括 UKMO)，但是對於現在各

表 7 水庫目前與未來需水量受氣候變遷影響情形

		需求量改變率 (%)			
		CCCM	GFDL	GISS	UKMO
翡翠水庫	(a)	0	0	0	—
	(b)	0	0	0	—
德基水庫	(a)	18	16	20	—
	(b)	17	15	19	—
曾文水庫	(a)	17	16	16	—
	(b)	17	16	16	—

表 8 在預設情境下之全部水庫容量(Total Active Storage)受損度

	全部水庫容量(Total Active Storage)需求改變率 (%)					
	WatBal			GWLF		
	CCCM	GFDL	GISS	CCCM	GFDL	GISS
翡翠水庫 (a)	0	24	0	0	11	0
(b)	0	0	0	0	0	0
德基水庫 (a)	43	65	39	74	150	66
(b)	39	57	35	74	138	62
曾文水庫 (a)	24	62	9	5	49	0
(b)	23	61	9	5	48	0

表 9 在預設情境一下之年調節水庫容量(Over-year Active Storage)受損度

	年調節水庫容量(Total Active Storage)需求改變率 (%)					
	WatBal			GWLF		
	CCCM	GFDL	GISS	CCCM	GFDL	GISS
翡翠水庫 (a)	0	24	0	0	0	0
(b)	0	0	0	0	0	0
德基水庫 (a)	43	65	39	257	783	126
(b)	39	57	35	199	682	106
曾文水庫 (a)	24	62	9	0	80	0
(b)	23	61	9	0	78	0

表 10 在預設情境一下之在預設情境一下之季調節水庫容量(Within-year Active Storage)受損度

	季調節水庫容量(Total Active Storage)需求改變率 (%)					
	WatBal			GWLF		
	CCCM	GFDL	GISS	CCCM	GFDL	GISS
翡翠水庫 (a)	0	0	0	0	24	0
(b)	27	26	19	35	30	38
德基水庫 (a)	41	47	41	61	86	60
(b)	38	43	36	62	83	57
曾文水庫 (a)	31	0	56	48	20	43
(b)	31	0	56	48	20	43

水庫主要供水標的上，除翡翠水庫外，其他皆以農業用水為主要供水標的，農業用水會因為溫度的改變而有所修正，因此德基水庫與曾文水庫量全部水庫容量皆呈現增加，值得注意的翡翠水庫在 GFDL 情境下，考慮民生用水增加一倍時其水庫容量仍須增加 24%，因此在 GFDL 情境下雖然年流量略有增加，但是因為流量差異增大對於水資源呈現不利影響。

年調節水庫方面，明顯看出 GFDL 改變極為顯著，以中部地區為例因為溫度上升將提高農業用水量高達 15,000 萬噸，對於年調節水庫容量(WatBal)而言由原來 1,844 萬噸增加至 6,583 萬噸，也因此增加幅度極大。季調節水庫容量，由於豐、枯水期差異增大且需求量增加，季調節水庫容量也因此而增大。配合圖 8、圖 9 可以明顯看出各大氣模式的輸出差異與水庫容量於年間或是年中的調節情形。

雖然不同水平衡模式模擬結果略有不同，但大致上趨勢皆屬相同，增加的原因主要乃因為需水量增加與豐、枯水期水量不均所致。年調節水庫容量的改變多以充分提供需要的水量，也因此季節性調配水量較少。

5.4 水庫營運風險評估

本研究利用不同的需求量與河川流量，配合推估全部水庫容量與實際水庫容量進行風險評估，如 CCCM_0 代表現在土地利用情形，CCCM_1 代表未來土地利用情形，HIS 為歷史資料的需求量。翡翠水庫的缺水情形在未來情形更為嚴重，缺水風險在未來年河川流量增加時也會隨著增加，而現況情形則較佳。德基水庫情形風險上各模式皆呈現提高的現象，對於現況需求量風險反而較小，平均儲水量約 6,000 至 8,000 萬噸。曾文水庫而言，風險情形約 3%至 10%然而缺水量則大致為 2,000 萬噸，與現況比較其缺額相差無幾，但平均儲水量在氣候變遷考量下則大幅增加。曾文水庫為以推估水庫容量其產生風險與現況水庫容量相近，平均儲水量亦因為推估水庫容量較大而使平均儲水量增大，但缺額情形改變不大。

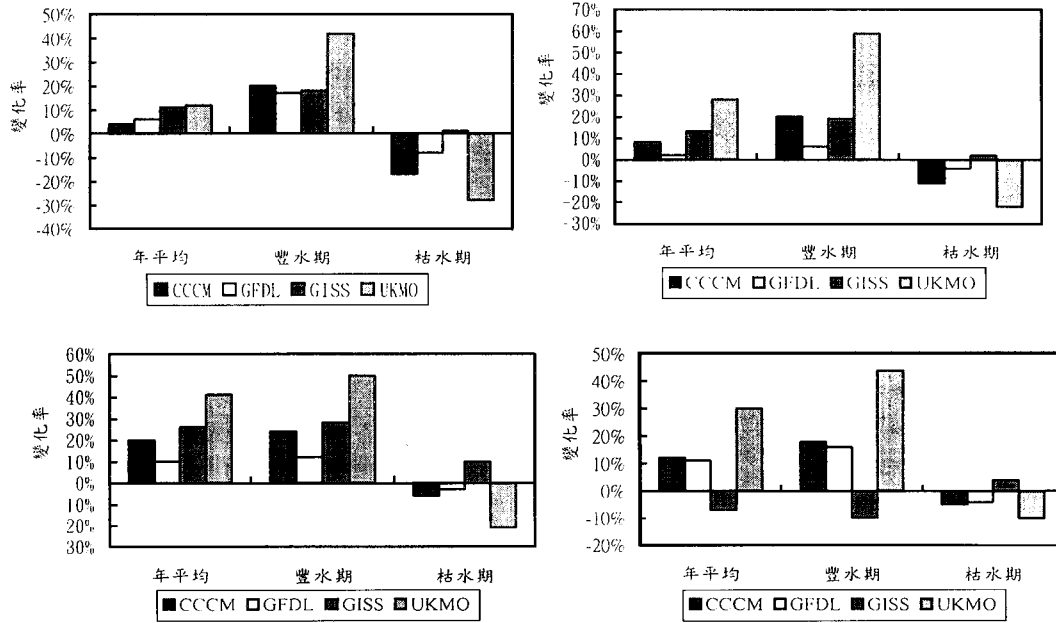


圖 8 年及季節性流量改變率(a)北勢溪；(b)大甲溪；(c)曾文溪；(d)秀姑巒溪

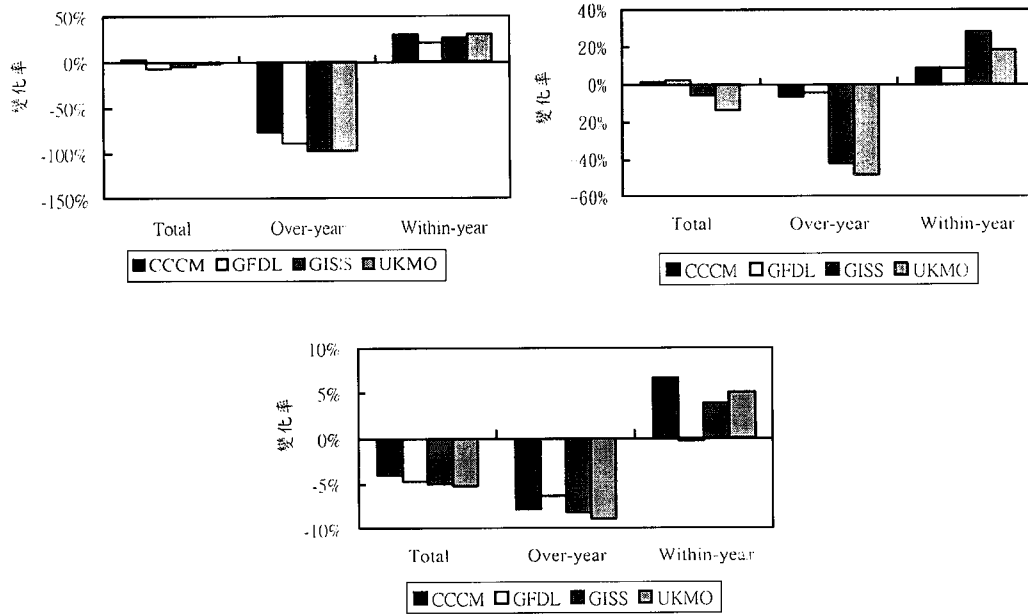


圖 9 水庫容量需求受氣候變遷影響之改變率-(a)北勢溪；(b)大甲溪；(c)曾文溪

表 11 氣候情境—翡翠水庫營運風險

WatBal	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	0%	0%	7%	0%	2%	0%	1%
平均缺額	0	0	3656	0	0	0	0
平均儲水量	35475	35124	17183	35279	21203	35565	22757
GWLF	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	0%	0%	7%	0%	2%	0%	2%
平均缺額	0	0	4322	0	3795	0	3315
平均儲水量	35882	35734	18328	35799	23219	35872	24396

表 12 氣候情境—德基水庫營運風險

WatBal	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	8%	21%	19%	19%	18%	20%	19%
平均缺額	1523	2367	2329	2088	1997	2120	2033
平均儲水量	8716	6780	6914	6954	7128	6911	7043
GWLF	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	4%	12%	11%	16%	15%	11%	11%
平均缺額	1916	3184	3153	2542	2488	2670	2569
平均儲水量	10862	8953	9158	8051	8300	9048	9244

表 13 氣候情境—曾文水庫營運風險

WatBal	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	5%	7%	7%	12%	12%	6%	6%
平均缺額	5551	7582	7543	7599	7614	6404	6489
平均儲水量	34997	33813	33805	26992	27038	35372	35367
GWLF	HIS	CCCM_0	CCCM_1	GFDL_0	GFDL_1	GISS_0	GISS_1
風險	7%	7%	7%	13%	13%	7%	7%
平均缺額	6401	7739	7693	7438	7433	6899	6927
平均儲水量	35933	37937	37874	30015	29985	38845	38811

總結，產生營運風險增加狀況以德基水庫最為嚴重，曾文水庫較為不明顯，平均缺額情形即使推估的水庫容量高於實際水庫容量，但其缺額情形相差不多，可見在未來可能缺水發生頻率增加，但其缺水水量差異不大。

流量模擬方面，年流量方面北部與中部增加約 10% 以內，但對於南部地區增加幅度則較大，對於 UKMO 模式結果由於對於豐水期雨量修正可高達 50% 其適用仍須進一步評估；對於豐水期流量皆呈現增加趨勢，約 20% 至 6%，各模式結

果相當一致；枯水期流量模擬方面呈現減少趨勢，減少約 10%。水庫容量方面，GISS 模式與 CCCM 模式結果較為一致，由於德基水庫與曾文水庫用水量以農業用水為大宗，因此農業用水量以溫度改變做修正時，將使需求量大幅增加，致使水庫容量增加，雖然預測未來豐水期流量增加，但因爲豐、枯水期差異增加，對水庫容量規劃仍屬不利影響，用水調配更加困難。

六、適應對策

6.1 水資源政策分析

本節主要在探討水資源主管機關近年之重要水資源政策，並分析其可能受氣候變遷影響之敏感性。水資源局彙集近年來推動之水資源政策及方案，於民國八十五年發佈水資源政策白皮書，書中說明台灣水資源現況、發展課題、情勢分析、及水資源政策，雖然報告中對氣候變遷影響略有著墨，但對台灣水資源量化影響之因應說明尚缺，因此本節將依據前面之評估結果，探討應加強之政策。

水資源政策之主要依據爲「水資源政策綱領」，其揭櫫水資源政策爲(一)維護自然生態環境，提昇國民生活品質，促進水資源永續發展；(二)致力消滅旱澇災害損失，確保人民生命財產安全；(三)配合國土綜合開發規劃，合理調配利用水資源，促進經濟建設與區域均衡發展，奠定國家長期發展基礎。然氣候變遷可能帶來豐枯水期流量極端化，會加強了台灣未來水資源發展之壓力，豐水期之洪水增加將可能造成人民生命財產損失、枯水期之乾旱將影響各標的供水水準，此外豐枯水期水資源分配不均，對配合國土綜合開發規劃，合理調配利用水資源，促進經濟建設與區域均衡發展之政策目標亦是一大挑戰。

6.2 氣候變遷對水資源影響之適應對策

從本研究針對氣候變遷對水資源影響之分析結果可歸納幾項主要特性，包括豐水期流量增加及枯水期流量減少趨勢、豐枯水期水量差異之擴大。豐水期流量增大，也隱含洪水災害增強之可能性，因此防洪及救災功能之因應策略是必

須；枯水期是台灣地區主要發生乾旱時期，枯水期流量減少，說明乾旱情況可能嚴重化，因此加強抗旱及救旱工作亦是不可忽視；台灣豐枯水期(尤其南部地區)可利用水源之差異，台灣水資源本即需要適當調節，豐枯水期水量差異之擴大，水資源調配之相關措施，亦應積極加強推動。氣候變遷之影響評估仍有不確定性，必須加強相關水資源科技研究方能降低不確定性。此外，水資源政策有效推動必須要有有效率之主管機關及民眾之配合，因此整合與強化主管機關及社會大眾之教育宣導工作，亦必須加以考量。

因此本研究在氣候變遷對水資源影響之適應對策上，提出六項工作項目，分別爲(一)加強防洪及救災功能；(二)加強抗旱及救旱措施；(三)加強水資源調配彈性；(四)加強水資源科技發展；(五)行政組織功能整合及加強；(六)教育宣導。各工作項目之適應對策分別說明如下。

A. 加強防洪及救災功能

台灣颱風季節常常帶來洪水災害，而造成對人民生命財產之損失，對公共工程建設亦有嚴重衝擊，因此政府花費大筆經費於建構防洪及排水工程。根據模擬分析結果，豐水期流量增加，可能導致更大之洪水，或改變洪水之回歸周期，因此對原有之防洪措施及防洪設計規範均會帶來嚴重之挑戰。因爲水庫及堤防之建造屬於中長期工作，所以有必要檢討目前防洪措施因應未來可能衝擊之能力；洪水強度之改變對水工結構物亦可能帶來威脅，其安全性評估亦是不可忽視，如水庫壩體之安全；此外，亦受洪災區域亦必須加以檢討，方能在訂定中長期土地規劃方案中，提出參考依據。總結上述說明，在此工作項目建議之因應對策如下：

- (1)水庫防洪功能風險評估
- (2)堤防防洪能力及設計規範之檢討
- (3)壩體及其他水工結構安全評估
- (4)洪災高危險群地區之檢討與建立防災措施

B. 加強抗旱及救旱措施

台灣雖然年降雨量豐沛，但因分佈不均，枯水期常有缺水之情況發生。目前農業用水約佔

75%左右，在乾旱時期常常優先將農業用水轉為民生及工業使用，未來乾旱情況加強，將增加農業用水轉移之需求。若要轉移農業用水，就必須先做好農業之農業抗旱措施，此外必須加強農業水土資源利用之彈性，以利作最佳決策以因應氣候改變。防範乾旱並非轉移農業用水即可完成解決，各使用標的亦應針對未來不同乾旱強度及頻率訂定水資源利用方案。此工作項目建議之因應對策如下：

- (1) 農業抗旱措施之加強
- (2) 農業水土資源利用彈性之加強
- (3) 乾旱時期水資源利用方案之建立

C. 加強水資源調配彈性

豐枯水期流量差異變大將對水資源調配帶來衝擊，必須積極開發新水源，包括地面水及地下水。地下水之水量穩定，為降低水資源調配困難之重要水源，必須妥為評估各地之安全抽水量，以作為救旱之主要水源，並建立區域之地面水及地下水聯合營運機制。然而水資源調配上，對需求量亦必須妥為評估，因此本研究建議必須加強中長期農業、工業及民生用水受氣候影響之預測模式，配合河川流量評估，方能及早並有效的完成水資源調配規劃，並應加強彈性，以因應可能擴大之範圍。在未來增設蓄水容量是必須，然在新建水庫不易情況下，替代蓄水措施之發展將是不可忽略。本工作項目建議之因應策略如下：

- (1) 積極開發新水源，包括地面水及地下水
- (2) 建立中長期農業受氣候影響之水資源需求預測模式
- (3) 建立中長期工業及民生水資源需求預測模式
- (4) 水資源管理策略彈性之加強
- (5) 替代蓄水措施及替代水源之發展
- (6) 建立區域性地面地下水聯合營運機制

D. 加強水資源科技發展

氣候變遷之影響評估受限於目前研究方法，在臺灣地區之研究成果具有不確定性，必須加強研究方法，其中以物理性水文分析模式為首要工作，傳統統計模式並不適用於氣候變遷研

究，而目前使用之物理模式多來自國外，其模式未必符合台灣水文及地文特性，因此必須積極發展適合於台灣地區之物理性水文分析模式。此外，亦應加強氣候異常及變異之預測能力，如此方能將因應策略在時間上做妥善安排。氣候變遷對水資源永續發展無疑將帶來影響，因此應加以評估，並建立永續指標，以顯示影響程度。本工作項目建議之因應策略如下：

- (1) 發展適合於台灣地區之物理性水文分析模式
- (2) 氣候異常及變異之預測模式
- (3) 水資源永續發展之影響評估

E. 行政組織功能加強及整合

目前台灣水利機關權責分散，事務推動導致事倍功半之結果，為因應將來水資源之挑戰，必須要有效率之主管機關，因此整合水利機關將是在機制應變措施中不可或缺。在整合之機關中亦應加強應變機制，中央主管機關應在暨有組織中強化對氣候變遷影響之監測功能，隨時注意氣候或水資源之變異及變遷，以便即時採取應變措施。因為將來洪水及乾旱情況均有惡化現象，在地方機構應加強乾旱及洪水災害之處理應變能力。根據以上說明，在科技發展上首要工作如下：

- (1) 整合水利機關及加強應變機制
- (2) 中央主管機關應在暨有組織中強化對氣候變遷影響之監測功能，建立長期水文觀測站。
- (3) 地方機構應加強乾旱及洪水災害之處理應變能力

F. 教育宣導

水資源建設應該是全民共同負擔，因此，在因應氣候變遷影響之工作上，必須透過教育宣導手段使民眾了解水資源問題之影響程度，及使民眾了解水資源政策之背景，以便加強政府及民眾合作關係。此外，亦必須透過教育宣導，積極推廣節約用水，一方面可減少開發新水源之壓力，另一方面可增加水源調配彈性。本研究在此工作項目歸納兩個主要因應對策為：

- (1) 加強民眾對氣候變遷對水資源影響之認知

(2)積極宣導推廣節約用水

水資源政策白皮書已針對台灣未來水資源發展提出規劃方向，然氣候變遷會改變以往之水文及水資源特性，對中長期水資源規劃會造成顯著影響。本章根據影響評估結果，提出六項工作項目及二十一款因應對策，可做為水資源政策訂定或修正之參考。

七、結論與建議

本研究選定北勢溪、大甲溪、曾文溪、及秀姑巒溪集水區為研究區域，分別代表台灣北、中、南、東區之不同水文特性。選擇前三個集水區主要是其溪流上分別有重要水庫，分別為翡翠水庫、德基水庫、曾文水庫，而東部並無主要水庫，因此選擇主要河川—秀姑巒溪。

目前本計畫利用美國 Country Study Program 所提供之 WatBal 模式，進行參數檢定與驗證，結果可合理模擬四個主要集水區之河川流量。此外，另利用 GWLF 模式模擬河川流量。由 GWLF 模式模擬結果來看，其相關係數均較 WatBal 模式為優，而且 GWLF 模式基本上屬於較具物理性之模式，參數決定較不受氣候變遷之影響，因此其模式本身之不確定性較低。

利用 GCMs 模式預測值之設定氣候變遷預設情境，並將其帶入 WatBal 模式中評估氣候變遷對河川流量之衝擊。初步結果可看出河川流量可能受氣候變遷之影響而有極端化之現象，即豐水期之流量增加、枯水期之流量減少，因此豐水期之防洪與枯水期之救旱都將更行困難，是政府單位必須及早進一步擬定因應對策之課題。在河川流量之評估方法中，本研究將另應用 GWLF 概念式水平衡模式，在流量之影響評估上與 WatBal 有相同之變化趨勢。

有關氣候變遷對水資源調配之影響評估，因為氣候變遷可能發生在 50、60 年後，屆時水庫淤積情況難以預測，因此無法利用現行水庫操作規線及模擬之河川流量進行分析。本研究以逆向思考方式進行分析，即探討在氣候變遷影響下之河川流量及不同之標的供應量下其所需之水庫蓄水容量，據以比較現行規劃水庫容量是否足

夠。估算水庫容量方法為 Sequent Peak Algorithm。評估所得之蓄水容量再進一步分析發生缺水之風險，將來可進一步應用於容量規劃分析。

從本研究影響評估之分析可歸納幾項主要結果，包括年流量增加、豐水期流量增加及枯水期流量減少趨勢、豐枯水期水量差異之擴大。此外，因為溫度上升，造成農業用水需求增加，所以調蓄容量亦隨之增加。如此結果在水資源管理上可能導致洪災及乾旱更嚴重、調配不易、及開發新調蓄容量之問題。針對本研究分析之結果，建議因應對策應包含六大工作項目及二十一款因應對策，茲整理如表 14。

表 14 氣候變遷影響之適應對策

工作項目	因應措施
一、加強防洪及救災功能	1. 水庫防洪功能風險評估 2. 堤防防洪能力及設計規範之檢討 3. 壩體及其他水工結構安全評估 4. 洪災高危險群地區之檢討與建立防災措施
二、加強抗旱及救旱措施	1. 農業抗旱措施之加強 2. 農業水土資源利用彈性之加強 3. 乾旱時期水資源利用方案之建立
三、加強水資源調配彈性	1. 積極開發新水源，包括地面水及地下水 2. 建立中長期農業受氣候影響之水資源需求預測模式 3. 建立中長期工業及民生水資源需求預測模式 4. 水資源管理策略彈性之加強 5. 替代蓄水措施及替代水源之發展 6. 建立區域性地面地下水聯合營運機制
四、加強水資源科技發展	1. 發展適合於台灣地區之物理性水文分析模式 2. 氣候異常及變異之預測模式 3. 水資源永續發展之影響評估
五、行政組織功能整合及加強	1. 整合水利機關及加強應變機制 2. 中央主管機關應在暨有組織中強化對氣候變遷影響之監測功能，建立長期水文觀測站 3. 地方機構應加強乾旱及洪水災害之處理應變能力
六、教育宣導	1. 加強民眾對氣候變遷對水資源影響之認知 2. 積極宣導推廣節約用水

氣候變遷對水資源影響評估之研究包括河川流量及需求量之評估等，在模擬模式選定上，又必須考慮氣候變遷對模式本身帶來之不確定性，此外，社會經濟因子之影響也必須加以考量。然此繁多項目，實難在短程中做到完全考量，惟本研究在合理假設下，完成多項評估結果，也據以分析影響趨勢，並做成具體政策建議。氣候變遷對水資源影響具有較高不確定性，其不確定性來源包括氣候變遷預測、水文模式、未來不同用水標的需求預測等。中長期水資源政策必須考慮水資源受氣候變遷之影響，因此有賴進一步研究，以降低評估結果之不確定性，方能做為訂定政策實施計畫之依據。

參考文獻

1. 行政院國家科學委員會，全球變遷研究五年中程計畫-台灣的現況與展望，八十三年
2. 林務局農林航空測量所，「曾文水庫集水區航測調查報告」，林務局農林航空測量所叢刊第 93 號，八十六年
3. 經濟部水資會，「臺灣地區之水資源」，八十四年十一月
4. 經濟部水資會，八十四年，氣候變遷對台灣水文環境之研究
5. 經濟部水資源局，八十五年，台灣地區之水資源
6. 童慶斌，八十五年，氣候變遷對大甲溪上游河川之衝擊，第八屆全國水利工程研討會，台北市，八十五年七月八、九日
7. Chang, L. H., Hunsaker, C. T., Draves, J. D. 1992. Recent research on effects of climate change on water resources. *Water Resources Bulletin* 28(2):273-286.
8. Childs, S. W., Gilley, J. R., and Splinter, W. E. 1977. A simplified model of corn growth under moisture stress. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 20: 858-865.
9. Fennessey, N. M., Kirshen, P. H. 1994. Evaporation and evapotranspiration under climate change in New England. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120(1):48-69.
10. Haith, D. A. and Shoemaker, L. L. 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resources Bulletin* 23(3): 471-478.
11. Haith, D. A., Mandel, R., and Wu, R. S. 1992. *Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0 User Manual*. Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
12. Hunter, R. B., Tollenaar, M., and Breuer, C. M. 1977. Effects of photoperiod and temperature on vegetative and reproductive growth of a maize (*Zea mays*) hybrid. *Canadian Journal of Plant Science* 57: 1127-1133.____
13. IPCC Working Group I. 1990. Policymakers Summary. in *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Edited by Houghton, J.T., Jenkins, G. J., and Ephraums, J. J., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
14. IPCC Working Group I. 1995. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Edited by Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N. Kattenberg, A. and Maskell, K., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
15. IPCC Working Group II. 1995. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Edited by Watson, R. T., Zinyowera, M. C., and Moss, R. H., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
16. McCabe, G. J., Jr., Ayers, M. A. 1989. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River Basin. *Water Resources Bulletin* 25(6): 1231-1242.
17. McCabe, G. J., Wolock, D. M., Hay, L. E., Ayers, M. A. 1990. Effects of climatic change on the Thornthwaite moisture index. *Water*

- Resources Bulletin* 26(4):633-643.
18. Ogrosky, H. O. and Mockus, V. 1964. Hydrology agricultural lands. In: *Handbook of Applied Hydrology*, V. T. Chow (Editor). McGraw-Hill, New York, New York.
19. Peterson, D. F., and Keller, A. A. 1990. Effects of climate change on U.S. irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(2):194-210.
20. Rao, A. R., Al-Wagdany, A. 1995. Effects of climatic change in Wabash River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(2):207-215.
21. 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.
22. Tung, C.P. 1995. The Impacts of Land Use and Climate Changes on Streamflows and Corn Grain Yields and the Effects of Corn Production Response Strategies, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY.
23. U.S. Soil Conservation Service. 1978. Soil survey of Marion County, Indiana. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
24. Waggoner, P. E. (ed.). 1990. Climate Change and U.S. Water Resources. John Wiley, New York.

收稿日期：民國 88 年 9 月 16 日
修正日期：民國 88 年 10 月 17 日
接受日期：民國 88 年 10 月 29 日