

氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估

Climate Change Impact Assessment of the ChiChiaWan Creek Streamflow

國立台灣大學農業工程學系
助理教授

童慶斌

Ching-Pin Tung

國立台灣大學農業工程學系
大四專題研究生

李宗祐

Tsung-Yu Lee

摘 要

氣候條件的改變使得河川流量產生變化，流量變化不僅影響水資源管理，亦對水質及水生生態造成嚴重的衝擊。本研究評估七家灣溪在不同氣候變遷預設情境下河川流量所受到的衝擊。本研究考慮之氣候變遷預設情境分為兩類：(一)假設全年平均溫度增加兩度，降雨量變化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ ；(二)利用四個 GCM (General Circulation Model) 模式預測之溫度及降雨量變化。模擬結果顯示，預設情境一中若溫度上升、降雨量減少，則河川流量減小之百分比大於降雨量，且枯水期減少之百分比較豐水期大，若降雨量增加則因為溫度的影響，雖然河川流量增加，流量上升的幅度與降雨量增加幅度相近；預設情境二中，雖然平均年流量均有增加的趨勢，但卻有豐水期流量遽增及枯水期流量遽減的現象。研究發現，七家灣溪流量受氣候變遷影響最重要之課題為豐枯水期流量極端化。

關鍵詞：全球暖化，溫室效應，模擬，水資源。

ABSTRACT

Streamflow will be effected by climatic conditions. The change of streamflow not only influences the management of water resource but also may cause serious impact on river ecosystem. This research evaluated the impacts of climate change on the ChiChiaWan creek's streamflow. Two types of climate scenarios were considered. One was to add 2°C to the daily mean temperature and change the rainfall from -10% to $+20\%$. The other one was to use the data projected by General Circulation Models. The results revealed that in the first kind of climate condition the period of low water changed more severe than the one of high water when rainfall was decreased, and the decrease of

streamflow was more severe than the one of rainfall. Because of temperature, the increase of the streamflow was close to the one of rainfall when rainfall increases. The other kind of climate showed that although the average of annual streamflow was increased, severe increase of high water and decrease of low water were detected. This study found that it has to put emphasis on extreme change of streamflow in both the period of low water and high water.

Keywords: Global warming, Greenhouse effect, Simulation, Water resources.

一、前言

七家灣溪為台灣國寶魚櫻花鉤吻鮭最後之棲息地。根據前人的研究（李培芬、李玉琪，1996），櫻花鉤吻鮭的棲息環境較為嚴苛，需有適當之蔽蔭、冷冽清靜之溪水，且有淺瀨、急灘、及深潭之多樣性河床與礫石底質，和豐富的水生昆蟲等條件，其中對水溫的要求最為嚴格，櫻花鉤吻鮭會選擇在水溫 13°C 的水域產卵，更有許多研究顯示，櫻花鉤吻鮭從未在水溫超過 18°C 的水域出現。河川流量是影響水溫的重要因子之一，流量越低則吸收相同能量下，溫度變化越大。本研究之目的是希望應用河川流量模式模擬七家灣溪之流量，並評估在不同氣候變遷預設情境下流量變化，本研究結果未來可再結合水溫評估模式，模擬在不同流量下水溫變化情形，期對生態保育有所貢獻。

降雨將水帶入集水區後，部份的水形成地表逕流流入河川，部分經由蒸發散散失到空氣中，其餘則入滲至土層內形成地下水。蒸發散量決定於氣溫、飽和蒸氣壓與風速等氣象因子，溫度升高使得蒸發散量增加，河川流量亦會隨之改變，降雨量改變更直接影響河川流量，由此可見河川流量受到氣候條件影響之密切關係。隨著工業革命後人為經濟活動之快速發展，大量溫室氣體 (CO₂, CH₄, N₂O, CFCs 等) 被排放至大氣中，氣候條件可能因為加強全球溫室效應而改變，目前一般預測在大氣 CO₂ 濃度增加為兩倍時，全球溫度將上升 1.5°C 到 4.5°C 之間。溫度上升可能增加蒸發散量，也因此使得河川流量減少，河川乾旱的

情況可能變得更嚴重，河川溫度亦可能隨之升高，影響水中生態。不管是考慮生態保育或是水資源的永續利用，均宜事先評估此影響以提供規劃因應措施之參考。

國內外學者均已積極展開氣候變遷對水資源衝擊之研究，並已有許多成果可供參考。Ayers et al. (1994) 就美國 Delaware River 流域水資源受氣候變遷衝擊之相關問題進行評估，而 Gleick (1986), Idos (1984), Tung and Haith (1995) 等亦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出水資源對氣候變遷之敏感度非常高。柳中明等 (1994) 就台灣地區可能之氣候變遷進行評估；經濟部水資會 (1995) 則利用水筒模式評估氣候變遷對台灣水文環境之影響，惟該研究並未應用大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 之預測值，此外水筒模式之參數乃是根據目前水文情況檢定所得，是否適用於氣候變遷下之情況仍值得商榷。童慶斌等 (1999) 曾利用兩種水平衡模式評估台灣地區河川流量受氣候變遷之影響，但並未特別針對生態環境重要之七家灣溪進行評估。

為了模擬河川流量，本文中將應用一概念性水平衡模式以模擬氣候變遷下之河川流量。此外，目前之溫度與降雨將依據大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 之預測值及假設之氣候條件予以修正，經過修正之溫度與降雨再應用於估算氣候變遷下之河川流量。本文中將考慮數種可能的氣候變遷預設情境，以評估在不同氣候型態下七家灣溪河川流量受到之衝擊，以作為水資源規劃及生態保育之參考。

二、七家灣溪流域環境說明

七家灣溪全長約 15.3 公里，集水面積約 5,603 公頃，是大甲溪的主要源流，七家灣溪本身源自由雪山而下之無名溪（又名武陵西溪）與由桃山而下之桃山溪，七家灣溪集水區主要涵蓋七家灣溪、武陵溪和有勝溪 3 水系(如圖 1)，最後匯流至德基水庫。七家灣溪平均年流量為 5.4cms（七家灣溪站），流量受夏季豐水期降雨之影響頗大，水位因而有冬枯夏豐之變化。七家灣溪為台灣國寶魚—櫻花鉤吻鮭僅存之棲地，選擇此一研究區域即考量其在生態保育上之重要性。

經比較與七家灣流量站之經緯度，本研究以松茂測站之氣溫與平岩山之雨量代表七家灣流域之氣候狀況。根據測站觀察紀錄結果，本研究區域之平均年雨量為 2096mm，年平均溫度為 16.3℃（1976~1994 年）。

七家灣溪集水區之土地利用包含天然林、人造林(包括針葉林與針闊葉混合林)、草地、崩塌地、溪流區，另有林務局武陵山莊。近年來由於觀光事業發展，包括茶園、果園、蔬菜地、建築用地、道路暨公共建設等替代舊有的原始林風貌，對水土保持造成相當嚴重的衝擊。不當的土地利用使得地基沖刷，土壤涵養水分的功能喪失殆盡，政府有鑑於水土保持破壞之嚴重性，已逐年推動德基水庫集水區水土保持整體規劃，以期改善水土保持破壞。惟氣候變遷是一全球性改變，是否對七家灣溪流量及進一步對生態環境帶來影響是本研究所關心的重點。

三、評估方法之建立

國外已有許多氣候變遷對水資源衝擊的相關研究，其大都採用水平衡模式作為主要的評估模式。本研究採用 GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 模式 (Haith and Shoemaker, 1987) 中之河川流量模式，本節將就其水平衡觀念作簡單之介紹，此模式在驗證可合理預測七家灣溪河川流量後將應用於評估氣候變遷對七家灣溪流量之衝擊。模式水平衡概念如圖 2 所示，

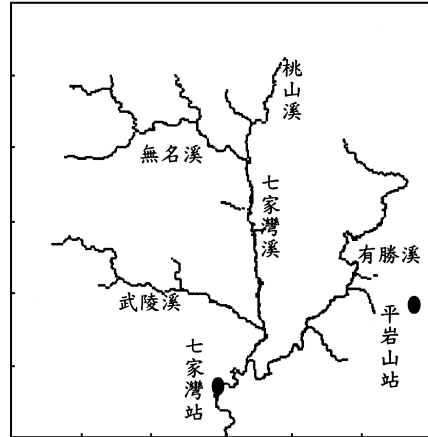


圖 1 七家灣溪集水區流域圖

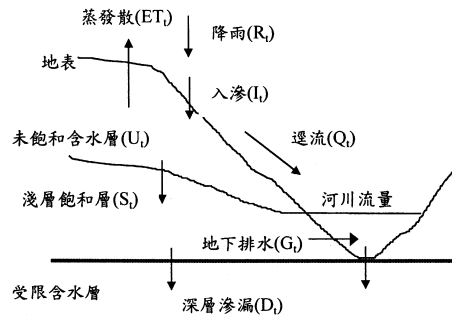


圖 2 水平衡關係示意圖

我們將集水區的水平衡模式分為三個主要部分，分述如下。

(一) 地表

集水區之水從降雨開始，降雨將水帶入了這個系統。當雨水降至地面後，一部份的水經由入滲至未飽和含水層中；而另一部份則成為地表逕流，並直接流入河川中。其關係可以下列方程式表示：

$$I_t = R_t - Q_t \dots\dots\dots(1)$$

其中 I_t 是入滲量， R_t 是降雨量，而 Q_t 是地表逕流，式中所用的單位為公分。

估算地表逕流有很多不同的方法，如合理化公式及 Curve Number 方法(Ogrosky and Mockus,

1964) 等。在 GWLF 中，採用 Curve Number 方法，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分。逕流量可計算如下：

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

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100 \dots\dots\dots(3)$$

上式中 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，詳見 Tung and Haith (1995)。

(二) 未飽和含水層

部分經由入滲的水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，則水分將滲漏至淺層飽和含水層。此外未飽和層之土壤水分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：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \dots\dots\dots(4)$$

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，式中所用的單位為公分。

在(4)式中蒸發散量 (ET) 受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影響，可由下式決定：

$$ET_t = \text{Min}[CV_t \times PET_t, U_t + I_t] \dots\dots\dots(5)$$

其估算的方法可等於潛能蒸發散量 (PET) 乘上一個覆蓋係數 (CV)，但其易受限於未飽和層可利用之水分，因此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。一般潛勢能蒸發散之計算上常用 Penman 公式，但其所需資料較多，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 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由 Hamon 公式計算 (1961)：

$$PET_t = \frac{0.021H_t e_{0t}}{T_t + 273} \dots\dots\dots(6)$$

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 (°C)。飽和蒸氣壓是溫度的函數，可由下列方程式決定：

$$e_{0t} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)0.8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136] \dots\dots\dots(7)$$

(三) 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：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \dots\dots\dots(8)$$

其中 S_t 是淺層飽和層之土壤水分含量， 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 (G_t 計算考慮飽和層為一線性水庫，即 $G_t = rS_t$)，而 D_t 是入滲至深層受限含水層之水量，式中所用的單位為公分。在本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：

$$PC_t = \text{Max}[0, U_t + I_t - ET_t - U^*] \dots\dots\dots(9)$$

上式中 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。

利用上述公式估算地表逕流 (Q) 加上地下水排出量 (G) 即為河川流量。

四、參數之設定

本研究採用之水平衡評估方法中，必須決定集水區之相關參數，包括估算逕流之 CN 值、估算蒸發散之覆蓋係數與日照時數、及飽和含水層之退水係數。逕流之 CN 值由土地利用及土壤特性決定，覆蓋係數亦與土地利用有關，而退水係數則根據 GWLF 模式操作手冊(Haith et al., 1992) 建議以河川流量紀錄推求。

(一) 逕流係數 CN2

根據(李培芬、李玉琪, 1996) 報告, 七家灣溪土地利用如表 1 所示, 以林地面積超過 88% 為主要土地利用方式。根據德基大壩工程竣工報告(台電達見工程處, 1974), 本研究區域之土壤屬於壤土, 因此本研究考慮七家灣溪集水區之土壤排水特性屬於 B 群, 因此可查表取得平均土壤水份狀態下之逕流係數 (CN2) 如表 1。再利用上述公式(2)、(3)即可估算地表逕流。

表 1 土地利用之相關資料

土地利用	面積 (%)	CN2 值
林地	88.35	55
草生地	6.44	48
崩坍地	3.59	86
茶園	0.07	71
果園	0.73	65
高冷蔬菜	0.67	79
建物	0.04	98
道路	0.11	98

(二) 日照時數與覆蓋係數

月平均日照時數為 Hamon 公式之一項重要因子, 其值與研究區域所在緯度有關, 本研究區域接近北緯 24 度, 日照時數可由 GWLF 操作手冊查表取得, 如表 2。蒸發散量覆蓋係數與土地利用有關, 不同土地利用有不同之覆蓋係數, 其值亦可由 GWLF 操作手冊查表取得, 而集水區之蒸發散係數則由面積權重計算決定。表 2 中一月覆蓋係數小於 1, 主要是一月平均溫度小於 10°C, 模式將其視為非生長季所至致。

表 2 研究區域之日照時數與蒸發散係數

月份	日照時數	蒸發散係數
一月	10.7	0.72
二月	11.2	1.00
三月	11.9	1.00
四月	12.6	1.00
五月	13.1	1.00
六月	13.4	1.00
七月	13.3	1.00
八月	12.8	1.00
九月	12.1	1.00
十月	11.4	1.00
十一月	10.9	1.00
十二月	10.6	1.00

(三) 退水係數

退水係數 r 為估算地下水排出量的重要係數, 我們假設在一場暴雨過後, 河川流量在到達峰值後的 N 天為退水段,

$$N = 0.83A^{0.2} \dots\dots\dots(10)$$

其中 A 為集水區面積 (km²), 地下水排出量為河川補注的主要來源, 從第 N 天開始取連續三天遞減的流量, 取其 log 斜率, 即為退水係數, 經由資料分析, 本研究區域之平均退水係數為 0.085。再利用公式 $G_r = rS_r$ 即可估算由地下水補注至河川的水量。

歷史資料來檢定物理參數的合理性, 並進而模擬氣候變遷下之流量變化, 為氣候變遷研究中常用之分析流程, 為相關研究所採用 (Gleick, 1987; McCabe, 1989; Tung and Haith, 1992)。

在根據研究區域之水文、土壤特性及土地利用資料等物理性參數下, 本研究採用之模式模擬平均年流量為 4.73 cms, 與紀錄資料之 5.40cms 略有差異, 由圖 3 可明顯看到主要是 1976~1978 與 1982~1988 期間, 模擬值均較觀測值低, 其主要原因除了模式本身之模擬誤差外, 亦可能是採用之雨量紀錄未實際反應整個集水區之降雨特性。平均月流量資料模擬結果可看表 3 與圖 4, 模擬結果顯示在十到十二月, 平均月流量有低估之情形, 其主要影響可能是退水係數, 為增加模式預測準確性, 將來可針對退水係數之決定進行改善。

五、模式驗證

在應用第三節所描述之水平衡公式前必須驗證其預測值之合理性。因此利用台灣電力公司平岩山站記錄之 1976 至 1994 年降雨資料及松茂站之溫度資料, 模擬七家灣溪之河川流量, 並與七家灣站 1976 至 1994 年之流量記錄比較。利用

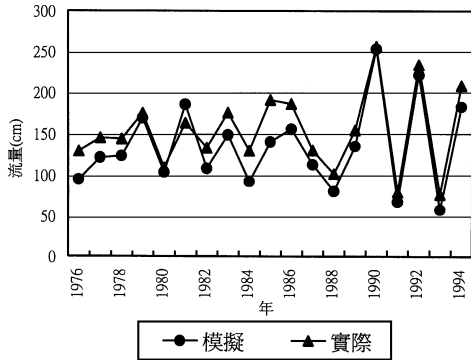


圖 3 七家灣溪模擬與觀測年流量

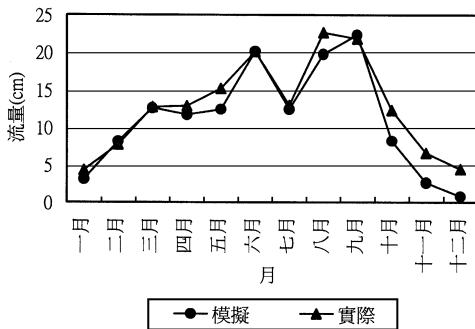


圖 4 七家灣溪模擬與觀測之平均月流量

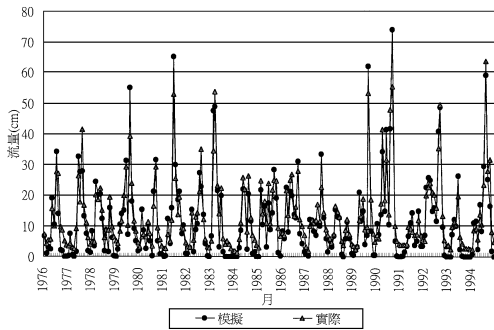


圖 5 七家灣溪模擬與觀測之逐月流量

雖然在年流量及部分月份平均流量略為低估，但由水平衡模式模擬結果顯示不管是年流量、平均月流量或是逐月流量其模擬結果與紀錄資料相關性均相當高(如圖 3 至圖 5)，相關係數分別達到 0.91、0.94 及 0.88，可見本模式可合理預測流量變化趨勢。因此本研究進一步利用此流

表 3 模式模擬平均月流量與實際平均月流量之比較

	觀測 (cms)	模擬 (cms)
一月	1.78	1.29
二月	3.53	3.71
三月	5.26	5.24
四月	5.50	5.03
五月	6.28	5.14
六月	8.59	8.60
七月	5.37	5.16
八月	9.37	8.19
九月	9.32	9.56
十月	5.11	3.40
十一月	2.83	1.13
十二月	1.84	0.31
平均	5.40	4.73

量模式，評估不同氣候變遷預設情境對七家灣溪流流量之衝擊。

六、氣候變遷預設情境

一般考慮氣候變遷預設情境可分為三種(1)歷史資料分析；(2)假設；(3)模式預測。本研究共考慮九組可能之氣候變遷預設情境，前五組為假設之氣候條件，其分別為 Case1：將逐日之氣溫增加兩度、Case2：將逐日之氣溫增加兩度，降雨增加 10%、Case3：將逐日之氣溫增加兩度，降雨量減少 10%、Case4：將逐日之氣溫增加兩度，降雨增加 20%、及 Case5：將逐日之氣溫增加兩度，降雨量減少 20%；另外四組為考慮大氣在兩倍二氧化碳時之氣候條件，許多模式已被發展來預測氣候變遷，而其中以大氣環流模式 (GCM) 最為成熟。因此本研究有關氣候變遷之預設情境 (後四組) 將根據大氣環流模式中加拿大之 CCCM (Canadian Centre for Climate) 模式、美國之 GFDL (Geophysical Fluid Dynamic Laboratory) 與 GISS (Goddard Institute for Space Studies) 模式、及英國之 UKMO (United Kingdom Meteorological Office) 模式預測來設定 (Tung, 1992; Tung and Haith, 1995)。

大氣環流模式是將全球劃分成格網，根據大

表 4 CCCM, GFDL, GISS 及 UKMO 模式中使用格點之經緯度

七家灣		CCCM		GFDL		GISS		UKMO	
經度	緯度	經度	緯度	經度	緯度	經度	緯度	經度	緯度
121.3	24.3	120.0	24.1	120.0	23.5	120.0	27.4	120.0	23.8

表 5 CCCM, GFDL, GISS 及 UKMO 模式預測溫度變化量 (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) 及降雨變化比例 (R_p , cm/cm)

月 份	CCCM		GFDL		GISS		UKMO	
	ΔT	R_p	ΔT	R_p	ΔT	R_p	ΔT	R_p
一 月	2.71	0.81	3.84	1.06	2.74	1.13	2.61	0.85
二 月	3.66	1.05	2.82	0.99	2.59	0.68	2.85	0.64
三 月	4.73	0.67	4.14	1.02	3.31	1.03	2.86	0.77
四 月	4.16	1.11	3.02	0.92	3.75	1.33	2.71	0.86
五 月	4.21	1.13	2.28	1.08	3.58	0.91	2.80	1.74
六 月	2.52	1.39	2.67	0.95	4.69	1.51	2.74	2.05
七 月	2.09	1.00	2.20	0.93	4.52	1.30	2.75	1.10
八 月	1.75	1.19	2.12	1.32	4.18	1.23	2.74	1.15
九 月	2.62	1.40	3.02	1.12	3.52	1.30	3.05	1.44
十 月	2.45	1.01	2.78	1.53	2.92	0.98	2.72	1.56
十一 月	2.39	0.86	2.77	0.73	3.72	1.15	2.25	0.63
十二 月	3.42	0.66	3.55	1.10	2.42	0.94	2.37	0.84
平均變化	3.02	1.02	2.93	1.06	3.50	1.12	2.70	1.14

氣原理，以數值分析的方法計算每個格點之氣候狀態。本研究考慮之氣候變遷是指大氣二氧化碳濃度增加到兩倍的情況下之溫度及降雨變化。此變化可利用大氣環流模式模擬兩倍現今二氧化碳濃度下之氣候狀態，然後在模擬兩倍現今二氧化碳濃度下之氣候狀態，兩個模擬結果之差別即為氣候變遷值。

因為大氣環流模式並未正確的預測現今氣候狀態，因此在此研究中只利用其預測之溫度及降雨變化量，並假設某區域之氣候變化與其最近格點的變化量一致。在氣候變遷研究一般假設小區域溫度變化量及降雨量變化比例與代表大範圍之格點資料一致，即

$$T'_{ymi} = T_{ymi} + \Delta T_m \dots\dots\dots(11)$$

$$P'_{ymi} = P_{ymi} \cdot R_{p_m} \dots\dots\dots(12)$$

其中 T_{ymi} 為第 y 年 m 月第 i 天之日均溫 ($^{\circ}\text{C}$)， ΔT_m 為 GCM 預測 m 月之溫度變化 ($^{\circ}\text{C}$)， T'_{ymi} 為氣候變遷下之日均溫 ($^{\circ}\text{C}$)；同理， P_{ymi}

為第 y 年 m 月第 i 天之降雨量 (cm)， R_{p_m} 為 GCM 預測 m 月之降雨變化率 (cm/cm)， P'_{ymi} 為氣候變遷下之日降雨量 (cm)。

本研究中使用美國 NCAR 提供之主要大氣環流模式預測值，包含 CCCM, GFDL, GISS 及 UKMO 四個模式。七家灣站與四個模式最接近七家灣站之格點之經緯度列於表 4，而其相對之變化量列於表 5。

七、模擬結果

將本研究考慮之九組可能氣候狀況，分別與以近年來氣候狀況模擬之流量做比較，得到氣候變遷下流量變化百分比之情形整理於表 6、表 7 中，並根據模擬結果討論如下：

1. 考慮自行假設之氣候變遷狀況下 (Case1 至 Case5 五組)
 - (1) 氣溫增加兩度，豐水期平均月流量減少 4~8%；枯水期減少 7~30%。
 - (2) 流量變化隨著降雨量增加而增加，反之亦然。降雨量增加時，平均月流量增加 2~

表 6 模擬不同氣候變遷預設情境下七家灣溪之平均月流量變化百分比

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
Case1	-16	-7	-6	-5	-7	-5	-6	-5	-4	-8	-15	-30
Case2	8	11	10	10	10	9	9	10	9	7	6	2
Case3	-38	-25	-21	-21	-24	-20	-20	-20	-17	-22	-33	-50
Case4	33	29	25	24	28	24	24	24	23	21	26	38
Case5	-57	-44	-36	-36	-42	-34	-34	-34	-30	-36	-50	-69
CCCM	-67	-17	-41	-19	2	36	7	19	43	17	-21	-62
GFDL	-20	-11	-7	-15	-4	-8	-15	31	17	39	-5	-48
GISS	-8	-40	-19	23	-10	37	36	24	30	5	-5	-25
UKMO	-56	-57	-48	-34	84	127	39	15	44	58	-3	-59

表 7 模擬不同氣候變遷預設情境下七家灣溪之平均年流量與豐枯水期流量變化百分比

	平均年流量	豐水期流量	枯水期流量
Case1	-6	-5	-8
Case2	9	9	9
Case3	-21	-20	-24
Case4	25	24	27
Case5	-36	-34	-41
CCCM	8	24	-30
GFDL	3	9	-12
GISS	14	24	-9
UKMO	31	61	-43

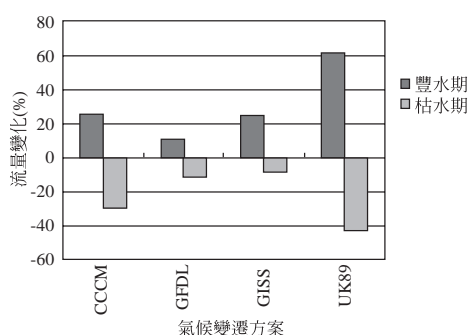


圖 6 GCM 預測氣候變遷情境下豐枯水期流量變化百分比圖

38%；降雨量減少時，平均月流量減少 4~69%。

- (3)降雨量增加使得平均年流量增加，且流量增加的比率與降雨量之變化相近，降雨量增加 10%，使得平均年流量增加 9%；降雨量增加 20%，造成平均年流量增加 25%。因為溫度增加使得雨量增加引起的逕流增強效應打了折扣。
- (4)降雨量減少使得平均年流量減少，且其減少的幅度大於降雨量減少的比率，降雨量減少 10%，使得平均年流量減少 21%；降雨量減少 20%，造成平均年流量減少 36%。

2. 考慮 GCM 模式預測之氣候變遷狀況下 (CCCM、GFDL、GISS 及 UKMO 四組)

- (1)平均年流量可能增加 3~31%。
- (2)豐水期流量可能增加 9~61%。

(3)枯水期流量可能減少 9~43%。

(4)UKMO 預測之每月溫度變化量與其他模式相較較趨於一致，但豐水期的降雨變化比例明顯大於其他模式，且枯水期降雨變化明顯小於其他模式，導致豐水期流量變化高達 61%，及枯水期流量變化達 43%。

根據九組氣候變遷情況之模擬結果，由前五組模擬可以看出本研究區域之河川流量受到降雨量變化之影響大於氣溫的變化影響，即未來氣候變遷的降雨變化將可能主導此區域河川流量變化情形；而由 GCM 預測氣候變遷（後四組）之模擬結果可以看出，儘管模擬結果有些許差異，但同樣具有豐水期流量增加，枯水期流量減少之趨勢（如圖 6 所示），其中又以枯水期的水量大幅減少最令人感到憂心。因為各國發展之全球環流模式(GCM)所考慮影響氣候變化因子不同（如雲量、海冰等），造成模擬上的差異，未

避免因模式間的差異，造成結果誤判，所以本研究選擇四個不同大氣環流模式之預測結果，並以觀察氣候變遷下流量之變化趨勢為現階段之目的。

從模擬的結果看來，大氣在兩倍二氧化碳濃度影響下，將加大豐枯水期的流量差異，儘管豐水期流量增加，卻使得枯水期缺水情形更為嚴重，因此在氣候變遷下合理調配及管理水資源更形重要。除了需考慮防旱外，在生態問題上，由於流量驟降可能使得棲地面積大規模的減少，造成許多水生動植物生命受到威脅；另外，流量短少可能將使得水溫升高，使得生活在特定溫度區間的魚類活動受到限制，例如本研究流域內之櫻花鉤吻鮭。從以上種種影響看來，氣候變遷對流量的影響甚至對水資源及生態所造成的衝擊不可不加以重視。

八、結論與建議

本研究利用一水平衡概念模式，經驗證所設定之各項參數可合理模擬七家灣溪之流量特性，因此將其應用於模擬不同氣候變遷預設情境下之流量，以評估氣候變遷對七家灣溪流量所造成之衝擊。結果發現七家灣溪豐水期及枯水期流量分別明顯增加與減少是其在氣候變遷下所面臨最主要之問題，在可能產生雨季洪水、乾季缺水的情況下，合理的水資源管理及分配更為重要；除此之外，流量變化對生態所造成之衝擊亦不容忽視，尤其台灣的國寶魚—櫻花鉤吻鮭正活動於七家灣溪，合理的管理對生態保育而言更有意義。為了因應氣候變遷下流量變化趨勢，必須進一步探討下列問題：

1. 豐水期可能增加洪水頻率及洪峰流量對棲地環境之衝擊。
2. 枯水期流量再減少，是否造成間歇流阻斷河川生態。
3. 氣候變遷影響流量進一步對水溫之衝擊。

本篇研究是以生態保育的觀點作為出發點，以達到櫻花鉤吻鮭具有舒適的活動空間為最終目的，在未來將可結合水溫預測模式，合理推估在不同流量下所造成之水溫變化，進而了解在

不同時期適合櫻花鉤吻鮭活動的河段，再合理掌握本研究區域之流量變化後，進行生態保育的工作將更精確也更有意義。

參考文獻

1. 台電達見工程處，「德基大壩工程竣工報告」，1974。
2. 李培芬、李玉琪，「七家灣溪集水區之遙測監測」，1996。
3. 柳中明、王維強、吳明進，「台灣地區未來氣候之評估」，台灣地區氣候變遷因素及影響研討會，第1頁至第74頁，1994。
4. 經濟部水資源統一規劃委員會，「氣候變遷對台灣水文環境影響」，1995。
5. 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73至90頁，1999。
6. 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.
7. Gleick, P. H., 1986. Method for Evaluation the regional hydrologic impacts of global climate changes. *Journal of Hydrology*. 88: 97-161.
8. Gleick, P. H., 1987. The development and testing of a water balance model for climate impacts assessment: Modeling the Sacramento Basin. *Water Resources Research*, 23(6), 1049-1061.
9. Haith D. A., Ross Mandel and Wu R. S., 1992. Generalized Watershed Loading Functions Version 2.0 User's Manual. Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University.
10. Hamon, W. R., 1961. Estimating potential evapotranspiration. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division* 87(HY3): 107-120.
11. Idos, S. B., 1984. Rising atmospheric carbon

- dioxide concentration may increase streamflow. *Nature*. 312: 51-53.
12. McCabe, G. J. Jr., and Ayers, M. A. 1989. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River Basin. *Water Resources Bulletin*, 25(6), 1231-1242.
 13. 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.
 14. Pickering, N. B., Stedinger, J. R., and Haith, D. A., 1988. Weather input for nonpoint-source pollution models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 114(4): 674-690.
 15. Tung, C. P., 1992. The impacts of climate change on the New York streamflows. M. S. Thesis presented to the Graduate School, Cornell University, Ithaca, New York.
 16. 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.

收稿日期：民國 89 年 10 月 16 日

修正日期：民國 89 年 11 月 18 日

接受日期：民國 89 年 11 月 24 日