



氣候變遷對櫻花鈎吻鮭適當棲地之衝擊

The Climate Change Impact Assessment of Formosan Landlocked Salmon Suitable Habitat

國立台灣大學生物環境系統工程學系
教授

童慶斌*

Ching-Pin Tung

國立台灣大學生物環境系統工程學系
研究助理

楊奕岑

Yi-Chen Yang

摘 要

本研究利用一物理性的水溫模式進行國寶魚櫻花鈎吻鮭棲地水溫的模擬，評估氣候變遷對於其生存棲地在時間與空間考量下，所可能產生的影響。由於台灣的地形特性，使得上游河川多蜿蜒於陡峻的山壁之間，因此國外發展之水溫模式，在沒有考慮地形遮蔽的效應下，將無法適用於台灣地區。本研究在櫻花鈎吻鮭棲地之一：高山溪流域進行水溫模擬，同時將地形遮蔽以及植生遮蔽之效應納入水溫模式的計算當中，使得模擬結果更為準確。在研究中利用 CCCM、GISS、CGCM2 以及 HADCM3 等「大氣環流模式」提供未來氣候變遷之下的氣候資料，進行未來氣候條件下的水溫模擬。研究結果指出，現況氣候條件下，一年當中僅 7 月之最高水溫會超過 17°C，成為「不適當棲地」；此外，7 月之「不適當棲地」長度僅約 700 公尺。但是在氣候變遷的影響之下，6、7、8 三個月份之最高水溫都將超過 17°C；且 7 月份之「不適當棲地」的長度，將增加到約 1500~2200 公尺。研究結果顯示櫻花鈎吻鮭的「適當棲地」，在時間與空間的尺度上，均有被壓縮的情形出現。

關鍵詞：櫻花鈎吻鮭，氣候變遷，水溫，生態水文，模擬。

ABSTRACT

This study provides a physics-based model for predicting the climate change impact on stream temperature and in turn on Formosan Landlocked Salmon (*Oncorhynchus masou formosanus*) habitat. Because upstream watersheds in Taiwan are surrounded with high and steep mountains, the foreign water temperature models without consider terrain shading effect are not suitable for Taiwan. This study modeling one of the Formosan Landlocked Salmon's habitats: the GaoShan creek and consider both terrain and

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，106 北市大安區羅斯福路四段 1 號，cptung@ntu.edu.tw

vegetative shading effect to provide reasonable simulation of water temperature. Projections based on the predictions of GCMs, including CCCM, GISS, CGCM2 and HADCM3 models, provided information on future climatic conditions, and then water temperature in the future can be predicted accordingly. According to the results, under current climate condition, the highest water temperature will be above 17 °C only in July, which causes length of the 700 meters of “unsuitable habitat.” Under the future climate change impacts, the highest water temperature will be above 17 °C in June, July and August. Moreover, the length of the “unsuitable habitat” will extend to about 1500 to 2200 meters. It indicates that under the impact of climate change, the suitable habitat for Formosan Landlocked Salmon will be compressed temporally and spatially.

Keywords: Formosan landlocked salmon, Climate change, Water temperature, Ecohydrology, Simulation.

一、前言

生存於大甲溪最上游的台灣國寶魚櫻花鉤吻鮭是目前全球鮭魚分佈的最南界，同時也是台灣島曾經發生構造運動的重要證據。生為太平洋鮭屬之魚種，嗜冷水的生活習性，使得該物種的生活棲地相當容易受到氣候變遷之下溫度升高的影響。根據過去的研究顯示，其生活水域的水溫需介於 9~17°C 之間，到了繁殖、孵化期間水溫更需降低至 12°C 以下(楊正雄, 1997)。而 IPCC (2001)的報告指出，從 1990 年到 2100 年，全球的氣溫可能會上升 1.4 到 5.8°C。全球氣候變遷所造成的衝擊，除了區域氣候的改變之外，對於區域的自然環境，例如水文與水資源、陸域與海域生態，以及人類健康與社會經濟發展都會產生影響。由於氣溫與水溫呈現高度的正相關，因此氣溫上升將有可能導致水溫上升。

櫻花鉤吻鮭自從上世紀初發現以來，數量即不斷遞減。雪壩國家公園成立之後，對於櫻花鉤吻鮭的棲地採取積極的保育策略，保護區內禁止一切人為開發，因此未來對於櫻花鉤吻鮭最大的衝擊將來自於自然界的災害。近年來的調查報告顯示，七家灣溪流域在民國 74 年至 86 年間，其溪流平均溫度之 12°C 等值線往上游退縮約 1.56 公里(楊正雄, 1997)，嚴重影響櫻花鉤吻鮭之棲地分布，因此探討未來氣候變遷下河川水溫變動

所造成的棲地改變，將成為櫻花鉤吻鮭是否能夠永續生存的重要課題。

本文的研究目的希望利用一物理性的水溫模式，進行櫻花鉤吻鮭棲地的河川水溫模擬，配合「大氣環流模式」(General Circulation Models, GCMs)所提供之未來氣候變遷下的氣候資料，進而預測未來的河川水溫。同時根據過去的文獻，本文定義「最高水溫<17°C」的河段為櫻花鉤吻鮭之「適當棲地」，利用模式模擬結果評估氣候變遷衝擊下，櫻花鉤吻鮭之「適當棲地」可能的變化情形，並分析櫻花鉤吻鮭是否能夠永續的生存在其現行的棲地當中。

二、文獻回顧

太平洋鮭屬的鮭鱒魚類，由於其「嗜冷水」的生存特性，因此在氣候變遷對於陸域生態之影響的相關研究中較受到重視。氣候變遷所導致的氣溫上升，很有可能連帶造成水溫上升的效應出現，而冷水性的鮭鱒魚類將首當其衝。國外有許多學者投入氣候變遷對水溫影響的研究，且建立模式的最初動機，也都是為了生態方面的考量。Stefan and Sinokrot(1993)就用其所建立的水溫模式評估氣候變遷下對水溫的影響，氣候變遷預設情境的設定亦是根據 GCMs 所預測的變化量來修正歷史的氣象資料，模擬的結果顯示，其採用之四種氣候變遷預設情境水溫均有明顯上升的

情形，對於生態保育而言是相當負面的消息；另外，Sinokrot and Stefan(1995)又將氣候變遷下水溫預測的結果應用到可用棲地面積的預測，根據不同魚種所能承受的最高水溫，預測氣候變遷下可用棲地面積的改變，結果顯示氣候變遷下冷水性魚種(鮭、鱒魚類)其棲地面積將會向上游縮減，魚群活動的範圍將因而減少。Petersen and Kitchell (2001)則研究 Columbia River 集水區中，在氣候變遷的影響之下幼年的太平洋鮭魚被其他魚種掠食的機率。兩人利用模式分析在氣候變遷衝擊之下食物來源短缺的狀況中，幼年的太平洋鮭魚被捕食率有可能因此而增加。這些研究都顯示氣候變遷對於鮭鱒魚類的生存的確造成了威脅。

過去國內關於櫻花鉤吻鮭的研究，多半著重於實際野外調查的部分。例如早期由台大動物系林曜松等人(1988a,1998b)開始針對七家灣溪流域進行水溫以及相關資料(水深、流速、水質...等)的量測工作，清大生科系曾晴賢教授則從 1994 年開始針對整個七家灣溪流域的櫻花鉤吻鮭族群數量進行調查(曾晴賢，1994, 1995, 1996, 1997, 1998~2003)，並於 1997 年之後開始進行河川水溫量測的工作。這些野外實測的研究，提供相關研究者相當有用的資料，並且也紀錄了櫻花鉤吻鮭在最近十多年來的生存環境與族群變化。然而，野外實測的研究卻沒有辦法提供未來資料，因此在未來可能的氣候變遷衝擊下，櫻花鉤吻鮭生存棲地的變化，將無法由野外調查研究中得知。因此本文希望透過水溫模式模擬未來櫻花鉤吻鮭生存棲地的水溫，期望可以彌補野外調查無法進行「預測工作」的缺憾。

三、河川水溫模式

本文使用由李宗祐(2003)建立，並由楊奕岑(2004)修正的水溫模式進行水溫模擬工作。該模式考量在明渠流中，沿水流方向的一維熱平衡方程式(如式(1))來計算水溫(Kim and Chapra, 1997)：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{q}{A} (T_L - T) + \frac{H_T w}{c_w \rho_w A} + \frac{H_B p}{c_w \rho_w A} \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 T 為斷面的河川平均水溫($^{\circ}\text{C}$)、 u 為河川平均流速(m/s)、 D 為沿水流方向的擴散係數(m^2/s)、 T_L 為測流水溫($^{\circ}\text{C}$)、 q 為測流流量(cms)、 H_T 為水體表面的熱通量($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)、 w 為河寬(m); p 為河道潤周長(m)、 A 為斷面面積(m^2); H_B 為河床底部的熱通量($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)、 c_w 為水的比熱($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$); ρ_w 為水的密度(kg/m^3)。

關於沿水流方向的擴散係數，過去已有相當多的研究提出了理論性與經驗性的公式，本研究採用式(2)來計算擴散係數(Kim and Chapra, 1997)：

$$D = C_d R u^* \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 C_d 為擴散常數、 u^* 為剪力流速(m/s)、 R 為水力半徑(m)。擴散常數的值通常在“6”(平滑渠道)到“500”(自然渠道)之間變動(Kim and Chapra, 1997)。本文利用試誤法的方式將擴散常數的值設定在 500。剪力流速則利用式(3)來計算

$$u^* = \sqrt{g R S_0} \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中 g 為重力加速度(m/s^2)、 S_0 為河川坡降。在台灣高山地區的河川其水深(h)往往遠小於河寬(w)，因此水力半徑 R 可以近似成爲水深(h)。本文設定 $R \cong h$ 並帶入式(2)與式(3)，得到：

$$D = C_d (g S_0)^{1/2} h^{3/2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

同時在河道寬淺的狀態之下，潤周長(p)亦可以用河寬(w)來取代，因此可以將式(1)改寫成爲

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{q}{A} (T_L - T) + \frac{H_T + H_B}{c_w \rho_w h} \quad \dots\dots\dots(5)$$

模式首先利用 40 公尺解析度之數值高程模式(Digital Elevation Model, DEM)進行水文演算，得到河川網格，進而計算每一河川網格的能量平衡。模式中計算能量平衡的物理量包含：短波輻射(I_{direct})、大氣向下長波輻射(L_d)、水體向上長波輻射(L_u)、環境向下長波輻射(L_r)、蒸發散(H_E)、潛熱(H_H)、河床傳導熱(H_B)、河床摩擦熱(H_f)，這些通過水體表面以及河床的熱通量之總和可以利用式(6)來計算之。關於每一個能量項詳

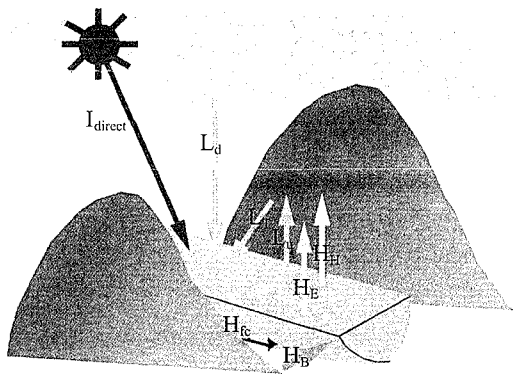


圖 1 河川水溫輻射能量平衡概念圖

細的計算方式，請參考李宗祐(2003)以及 Tung, et al. (2005)。

$$H_T + H_B = (I_{direct} + L_d - L_u + L_T - H_E - H_H + H_{fc}) + H_B \dots\dots\dots(6)$$

在式(5)中等號右邊第二項為計算側流所帶入的能量，在本研究中利用「面積比例」的方式，假設每一河川網格的測流量，與該網格其上游的「集流面積」成正比，以此方式來推求每一個河川網格的側流量，而測流水溫則根據文獻(Todd, 1980)設定為「年平均氣溫+1°C」。側流

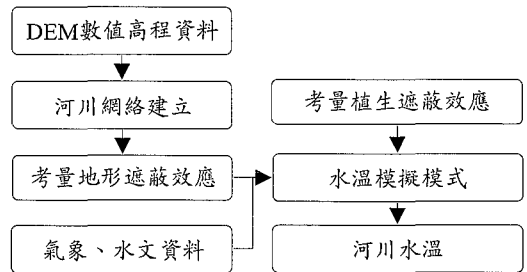


圖 2 水溫模式架構圖

水溫與河川水溫的混合則利用最後的式(7)來計算。在求解偏微分方程式時，本文利用 Crank-Nicolson 的方法來離散式(5)的偏微分水溫控制方程式。Crank-Nicolson 方法的穩定條件並不會受到所選擇之網格大小以及時間間距的影響(Yogesh and Torrance, 1986)，過去的文獻均指出該方法很適合用來求解拋物線型式的微分方程式(Kim and Chapra, 1997; Sinokrot and Stefan, 1993)。本文所設定的時間間距為 6 分鐘，將式(5)離散之後，可將原有的偏微分方程式轉變為式(7)的形式，最後利用矩陣求解，模式便可計算得知每一河川網格，每一時間點的水溫。模擬流程如圖 2 所示。

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{1}{2}u_j^{n+1} - \frac{D_{j-1/2}^{n+1}}{\Delta x}\right)T_{j-1}^{n+1} + \left(2\frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{D_{j+1/2}^{n+1} + D_{j-1/2}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta x \frac{q_j^{n+1}}{A_j^{n+1}}\right)T_j^{n+1} + \left(\frac{1}{2}u_j^{n+1} - \frac{D_{j+1/2}^{n+1}}{\Delta x}\right)T_{j+1}^{n+1} \\ & = \left(\frac{1}{2}u_j^n - \frac{D_{j-1/2}^n}{\Delta x}\right)T_{j-1}^n + \left(2\frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{D_{j+1/2}^n + D_{j-1/2}^n}{\Delta x} - \Delta x \frac{q_j^n}{A_j^n}\right)T_j^n + \left(-\frac{1}{2}u_j^n + \frac{D_{j+1/2}^n}{\Delta x}\right)T_{j+1}^n \dots\dots\dots(7) \\ & + \Delta x \left[\frac{q_j^n}{A_j^n} (T_L)_j^n + \frac{q_j^{n+1}}{A_j^{n+1}} (T_L)_{j+1}^{n+1} \right] + \frac{\Delta x}{C_w \rho_w} \left[\frac{(H_T + H_B)_j^n}{h_j^n} + \frac{(H_T + H_B)_{j+1}^{n+1}}{h_{j+1}^{n+1}} \right] \end{aligned}$$

本文以「高山溪」(舊稱雪山溪或武陵溪)流域，作為模擬分析的研究區。高山溪流域是目前除了七家灣溪之外，櫻花鉤吻蛙最主要的棲息地。原本在其流域中有 4 座攔砂壩，但是在 2001 年 6 月已全數因為「生態保育」的緣由而拆除完畢。因此目前高山溪相對於七家灣溪而言，反而是一條暢行無阻的河道。

在進行水溫模擬時，尚須配合相關之氣象、

流量、水文資料，以及兩岸植生遮蔽的資料。其中氣象資料包括：日最高、最低氣溫，風速、大氣壓力、相對濕度等。本文所採用之氣象資料來自於「松茂」以及「環山」兩個氣象站。流量資料來自於「七家灣溪」流量站。水文資料則是用來描述模擬當時的河川狀態，本文利用實測資料(葉昭憲等人，1998-2002)計算高山溪不同河段之坡度，並回歸出「流量 Vs. 水深」以及「流量

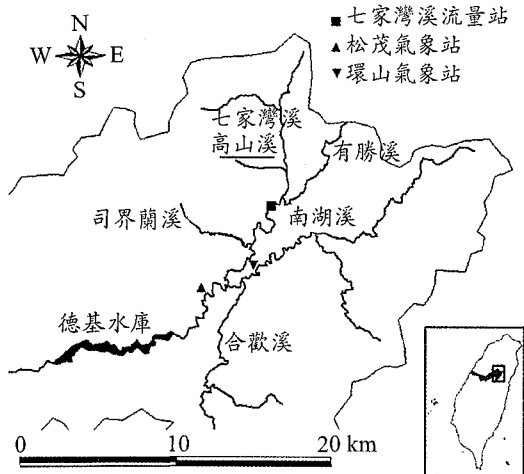


圖 3 模擬研究區：高山溪集水區

「 V_s vs. 河寬」的關係式，如式(8)與式(9)。

$$w = aQ^b \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$h = cQ^d \quad \dots\dots\dots(9)$$

其中 Q =流量(cms)、 w =河寬(m)、 h =水深(m)。研究區範圍以及實測資料來源測站之位置如圖 3 所示。在植生遮蔽的部分，本文利用「必爾定律」(the Beer's Law)來描述太陽輻射因為穿過植生的樹冠層所造成的消滅，如式(10)所示。

$$R_v = R_0 \exp(-kLAI) \quad \dots\dots\dots(10)$$

其中 R_0 代表在樹冠層頂部所接受到的輻射量， R_v 代表穿過樹冠層之後的輻射量， k 為一衰減係數， LAI 為葉面積指數(Campbell and Norman, 1998)。本文以現地實際量測的方式，取得 k 與 LAI 的數值，關於河岸植生所造成太陽輻射衰減的詳細計算方式，請參考楊奕岑(2004)。

本文選用 1996 年 1 月 3 號以及 7 月 7 來進行模擬，分別代表冬季以及夏季的水溫狀態，模擬河段長 4400 公尺。相關之氣象、流量資料、水文、植生資料分別如表 1、表 2 所示。實測水溫資料來自於楊正雄(1997)的研究結果。圖 4(a) 為高山溪一號壩於 1996 年 1 月 3 日的模擬結果；圖 4(b)則為高山溪一號壩於 1996 年 7 月 7 日的模擬結果。橫軸代表一日的時間，縱軸則代表水溫。在圖中分別展示了考量不同遮蔽效果之

表 1 高山溪水溫模擬-氣象、流量相關資料

資料	1996/01/03	1996/0707
最高氣溫(°C)	18	29.2
最低氣溫(°C)	-2	15.6
相對濕度(%)	77	62
大氣壓力(mb)	643	640
風速(m/s)	1	0.8
流量(cms)	1.17	2.3

表 2 高山溪水溫模擬-水文、植生相關資料

河段	坡度	a	b	c	d	LAI	k
四號壩上游	0.07	4.46	0.27	0.26	0.50	3.00	0.22
四號壩~三號壩	0.07	5.70	0.14	0.20	0.70	2.42	0.34
三號壩~二號壩	0.02	4.82	0.26	0.26	0.35	2.40	0.23
二號壩~一號壩	0.02	4.22	0.32	0.23	0.54	2.03	0.25
一號壩下游	0.12	4.50	0.31	0.24	0.55	2.12	0.26

下的模擬水溫，其結果顯示不論在冬季或是夏季，同時考慮地形與植生遮蔽效應的模擬水溫，與實測資料最為接近，代表同時考慮地形與植生遮蔽效應在高山溪流流域的水溫模擬，確實有其必要性。儘管模式在低水溫的部分，有稍大的模擬誤差，但是在高水溫的部分，模擬結果與觀測結果則相當接近。由於櫻花鉤吻鮭是屬冷水性的魚種，因此只有過高的水溫會對於其造成衝擊。固模式對於高水溫較為準確的模擬，依然可以成為分析氣候變遷衝擊的工具。

四、氣候變遷預設情境

氣候變遷衝擊影響評估研究之關鍵即在於未來氣候情境的設立。一般氣候變遷預設情境可分成下列四大類(1)大氣環流模式(GCMs)預測；(2)時間類比；(3)空間類比；及(4)假設。其中只有透過第一項「大氣環流模式預測」方能真正以物理性評估大氣溫室氣體加強導致全球暖化之特性。本文利用 GCMs 所產出的氣溫以及降雨變化量來進行氣候變遷之下的未來氣候條件設定。

在本研究中研究區未來的氣候條件被設定成為與 GCMs 之最鄰近輸出網格相似，因此未來氣溫以及降雨的資料可利用式(11)與式(12)來估計：



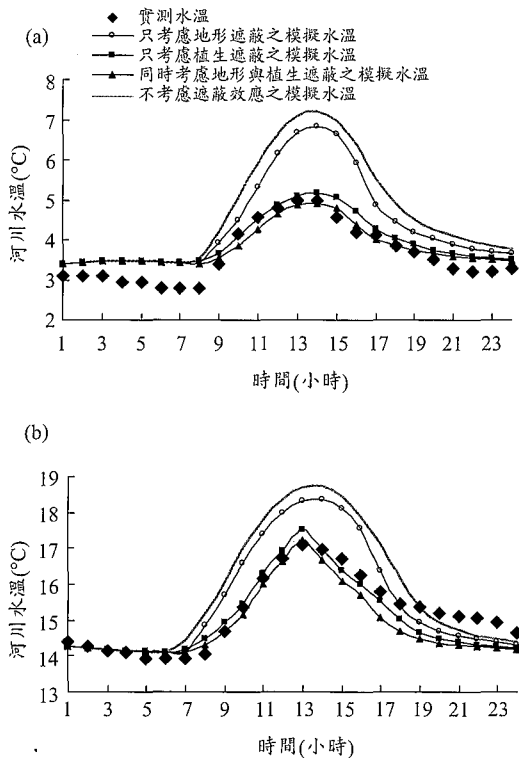


圖 4 水溫模式於高山溪 1 號壩之模擬結果
(a)1996/01/03 : (b) 1996/07/07

$$\mu'_{mT} = \mu_{mT} + (\mu_{mT,Future} - \mu_{mT,Current}) \dots\dots(11)$$

$$\mu'_{mP} = \mu_{mP} \times (\mu_{mP,Future} / \mu_{mP,Current}) \dots\dots\dots(12)$$

其中 μ_{mT} 與 μ'_{mT} 分別代表現況以及未來氣候的氣溫(°C)， $\mu_{mT,current}$ 和 $\mu_{mT,Future}$ 則代表 GCMs 所模擬得到現況與未來的氣溫； μ_{mP} 與 μ'_{mP} 分別代表現況以及未來氣候的降雨(cm)， $\mu_{mP,Current}$ 和 $\mu_{mP,Future}$ 則代表 GCMs 所模擬得到現況與未來的降雨。此外氣溫降雨的改變亦會影響河川流量，本研究採用童慶斌和李宗祐(2001)的模擬結果同樣針對河川流量進行修正如式(13)

$$\mu'_{mQ} = \mu_{mQ} \times (\mu_{mQ,Future} / \mu_{mQ,Current}) \dots\dots\dots(13)$$

其中 μ_{mQ} 與 μ'_{mQ} 分別代表現況以及未來氣候流量(cms)， $\mu_{mQ,current}$ 和 $\mu_{mQ,Future}$ 則代表 GCMs 所模擬得到現況與未來的流量。本文所選用的氣候變遷預設情境分成平衡試驗預設情境與漸變試驗預

設情境兩種。平衡試驗所描述的是 2 倍工業革命二氧化碳(280ppm)時的氣候條件，本文所使用的平衡試驗模式分別為 CCCM (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) 以及 GISS (Goddard Institute for Space Studies)。而漸變試驗則是根據 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)之溫室氣體排放情境模擬氣候逐年變化。可分為短、中、長期三個時間點，短期代表由西元 2010~2039 年，中期代表由西元 2040~2069 年，長期代表由西元 2070~2099 年的氣候條件。本文所使用的漸變試驗模式分別為 CGCM2 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)以及 HADCM3 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research)。上述四種氣候變遷預設情境所造成每個月之溫度、降雨以及流量的改變量，分別如表 3、表 4、表 5 所示。

本文選定每月 15 號為該月之代表，先利用現況月平均的氣候資料、流量資料、以及 15 號當天之短波輻射量模擬現況之下每月的水溫變化，再配合表 3 到表 5 的氣溫、降雨、流量修正量，針對不同月份的資料進行修正，進一步的模擬氣候變遷之下每月的水溫。

五、模擬結果與比較

根據過去的文獻指出，櫻花鉤吻鮭生存水域的上限水溫約在 17°C 或是 18°C。因此本文以較為嚴謹的標準訂定水溫 17°C 為櫻花鉤吻鮭的致死溫度。同時定義「月最高水溫<17°C 之河段」為櫻花鉤吻鮭的「適當棲地」；反之「月最高水溫>17°C 之河段」則為其「不適當棲地」。此外本文在進行氣候變遷之模擬結果比較時，將時間面向(年水溫變化)與空間面向(上、下游水溫變化)分開討論。此一方式有助於釐清氣候變遷在不同的分析角度之下對於高山溪水溫所產生的影響，進而分析櫻花鉤吻鮭適當棲地的變化。

5.1 時間面向

在時間面向的分析部分，本研究選擇「比較河段上單一個網格點，在現況以及氣候變遷之下的每月最高最低水溫分佈情形」的分析方式。研

表 3 不同氣候變遷預設情境之每月氣溫改變量(°C)

	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
CGCM2S	0.94	1.81	1.25	0.6	-0.46	1.09	1.18	0.52	0.45	0.43	0.47	1.41
CGCM2M	1.62	2.57	2.64	1.82	2.78	3.62	2.26	2.05	1.90	1.81	2.10	2.43
CGCM2L	2.76	3.27	3.78	4.64	4.54	5.62	4.52	3.45	3.12	2.68	2.53	2.81
HADCM3S	0.84	0.46	0.52	0.61	0.29	0.63	0.53	0.40	0.60	0.91	0.75	0.90
HADCM3M	1.82	1.55	1.44	1.52	1.35	1.35	1.32	1.37	1.46	1.5	1.47	1.75
HADCM3L	3.11	2.4	2.45	2.49	2.2	2.33	2.28	2.23	3.04	2.99	2.59	3.10
CCCM	2.71	3.66	4.73	4.16	4.21	2.52	2.09	1.75	2.62	2.45	2.39	3.42
GISS	2.74	2.59	3.31	3.75	3.58	4.69	4.52	4.18	3.52	2.92	3.72	2.42

表 4 不同氣候變遷預設情境之每月降雨改變量(%)

	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
CGCM2S	22	35	30	13	10	3	-8	19	18	-8	10	-4
CGCM2M	12	1	3	-20	-18	-21	-7	3	-3	-1	24	-12
CGCM2L	2	-11	-12	-24	-46	-30	-30	23	29	9	-20	-31
HADCM3S	13	-5	-5	13	8	30	14	21	27	7	-15	8
HADCM3M	-15	-32	7	31	30	21	10	27	-2	53	-20	0
HADCM3L	-5	0	-8	28	38	1	37	39	25	47	-9	-12
CCCM	-19	5	-33	11	13	39	0	19	40	1	-14	-34
GISS	13	-32	3	33	-9	51	30	23	30	-2	15	-6

表 5 不同氣候變遷預設情境之每月流量改變量(%)

	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
CGCM2S	23	43	40	25	18	7	-10	19	23	4	0.2	-1
CGCM2M	1	-1	-3	-26	-37	-40	-33	-6	-7	-8	7	-5
CGCM2L	-31	-23	-25	-43	-74	-70	-69	4	27	15	-14	-57
HADCM3S	14	-2	-8	9	13	36	29	30	33	19	-5	-10
HADCM3M	-30	-43	-11	30	43	32	18	34	5	36	22	-20
HADCM3L	-47	-25	-25	35	59	15	32	49	38	49	25	-25
CCCM	-57	-16	-39	-22	3	38	11	19	41	16	-15	-55
GISS	-0.3	-36	-18	23	-11	40	38	26	29	6	-3	-15

究中所採用之樣本點為高山溪與七家灣溪的匯流點，即為高山溪的最下游地區。現況與氣候變遷下的月水溫模擬結果如圖 5 所示。

圖 5(a)為現況與平衡試驗的比較圖，各月份的水溫在氣候變遷下均有上升的趨勢。同時若以 17°C 作為櫻花鉤吻鮭是否能夠生存的臨界水溫來看，就現況而言，7 月的最高溫已經超過了 17°C，而在氣候變遷的衝擊之下，GISS 預設情境所得到的模擬結果，6、8 兩個月份的最高水溫已逼近 17°C，而 CCCM 預設情境所得到的模擬

結果，6、7、8 三個月份的最高水溫均超過 17°C，顯示在 2 倍二氧化碳的氣候條件下，對於櫻花鉤吻鮭而言，適合生存的月份將會減少。

圖 5(b)與圖 5(c)分別為現況與漸變試驗預設情境 CGCM2 與 HADCM3 的模擬結果。由於漸變試驗預設情境是根據溫室氣體排放的速率來模擬大氣的條件，因此可以分析不同時間點(短、中、長期)的水溫變化趨勢。圖 5(b)與(c)的結果均顯示，隨著時間的增加，此地的水溫將有越來越明顯的增溫趨勢。就短期(以 2025 年為代

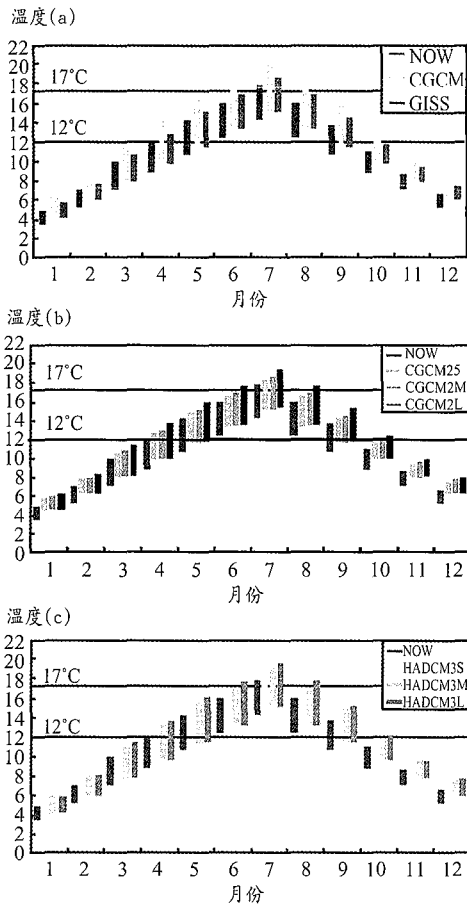


圖 5 現況與氣候變遷影響下水溫分佈圖 (a)平衡試驗 CCCM 與 GISS 預設情境、(b)漸變試驗 CGCM2 預設情境、(c)漸變試驗 HADCM3 預設情境

表)而言，不論是 CGCM2 或是 HADCM3 均只有 7 月的最高水溫超過 17°C。到了中期(以 2055 年為代表)，CGCM2 預設情境中 6 月與 8 月的最高溫已經相當接近 17°C，而 HADCM3 的 8 月最高溫已經超過 17°C。長期的模擬時(以 2085 年為代表)，兩種預設情境都顯示 6、7、8 三個月份之最高水溫都將超過 17°C，此一結果與平衡試驗預設情境類似，顯示在氣候變遷之衝擊下，適合櫻花鈎吻鮭生存的月份將有減少的趨勢。

5.2 空間面向

根據時間面向的分析顯示，7 月為一年當中

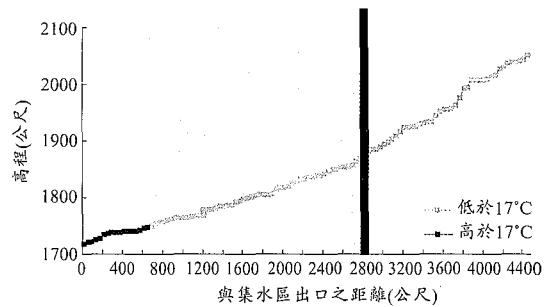


圖 6 高山溪 7 月現況水溫變化縱剖面圖

水溫最高的月份，因此在進行空間面向的分析時，本文便以一年當中最暖月：7 月做為代表，評估現況以及未來氣候條件下，櫻花鈎吻鮭在高山溪「適當棲地」的長度變化。圖 6 為在現今氣候條件之下，7 月時高山溪水溫變化的縱剖面圖。其中橫軸代表與集水區出口的距離，縱軸則代表高程。圖中淺色的線段代表「適當棲地」，也就是水溫低於 17°C 的河段。深色的線段則代表「不適當棲地」，也就是水溫高於 17°C 的河段。此外，距集水區出口 2800 公尺處直線，則代表經過現地調查之後，櫻花鈎吻鮭在此溪流分佈的天然上限，該處唯一高聳之瀑布，在無外力協助下，櫻花鈎吻鮭將不可能往更上游的地方尋覓棲地。根據圖 6 顯示，在現今氣候條件之下，一年當中最暖月的「不適當棲地」之長度，大約由最下游往上游延伸到距集水區出口約 700 公尺處，此地大約是高山溪一號壩的位置。因此就現況而言，對於櫻花鈎吻鮭來說最為嚴酷的生存棲地僅發生在七月份，且其長度約只有 700 公尺。因此當下游的水溫逐漸增加時，櫻花鈎吻鮭尚有 2100 公尺的「適當棲地」可以溯溪而上尋找較為適合的生存空間。

圖 7 是兩種平衡試驗預設情境 CCCM 和 GISS 預設情境所得到的 7 月水溫分佈圖。深灰色的區塊代表現況之「適當棲地」的範圍。由圖中可以看出「不適當棲地」的長度明顯的向上游延伸，在 GISS 預設情境中，延伸到距匯流口約 1950 公尺處，而在 CCCM 預設情境中更是延伸到距匯流口 2250 公尺處，此地大約是高山溪四號壩的位置。根據分析結果可推論，儘管模式的

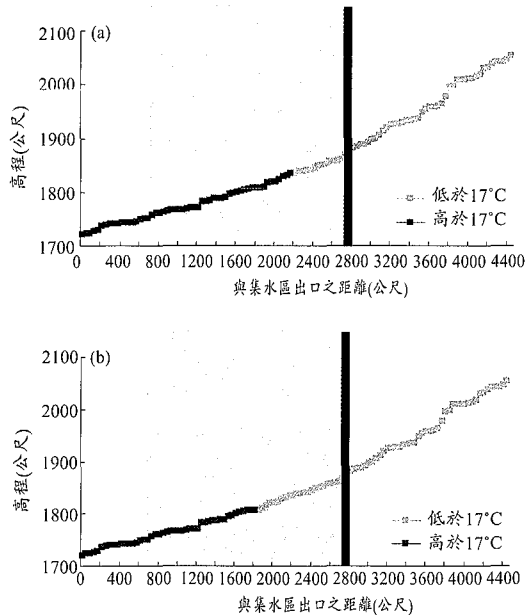


圖 7 高山溪 7 月水溫變化縱剖面圖平衡試驗預設情境(a)CCCM、(b) GISS

模擬顯示，在距集水區出口 2800 公尺更上游的地區還有足夠的「適當棲地」可以供櫻花鉤吻鮭生存，但是由於天然上限分佈的限制，使得櫻花鉤吻鮭必須在距集水區出口 2800 公尺以下的河段生活，而氣候變遷的影響將「不適當棲地」上推到距匯流口 2250 公尺處，代表未來櫻鮭將只能在短短的約 550 公尺的河段中找尋適當的棲地。其生存的空間將嚴重的短缺。更甚者，若是氣候條件越趨惡劣，則「不適當棲地」甚至有可能上推超過 2800 公尺，到時候，高山溪將變成不在適合櫻花鉤吻鮭生存的溪流。

圖 8 與圖 9 分別為漸變試驗氣候變遷預設情境 CGCM2 與 HADCM3 預設試驗短(2025 年)、中(2055 年)、長期(2085 年)的高山溪水溫縱剖面圖，同樣深灰色的區塊代表現況之「適當棲地」的範圍。由漸變試驗的模擬結果可以很明顯的發現，「不適當棲地」的長度，有隨著時間增加而增長的趨勢。平均來說，短期的「不適當棲地」約長 1700 公尺，中期增加到 1950 公尺，長期的「不適當棲地」則增加到 2100 公尺。此一圖形更證明，在高山溪地區可供櫻花鉤吻鮭生存的河

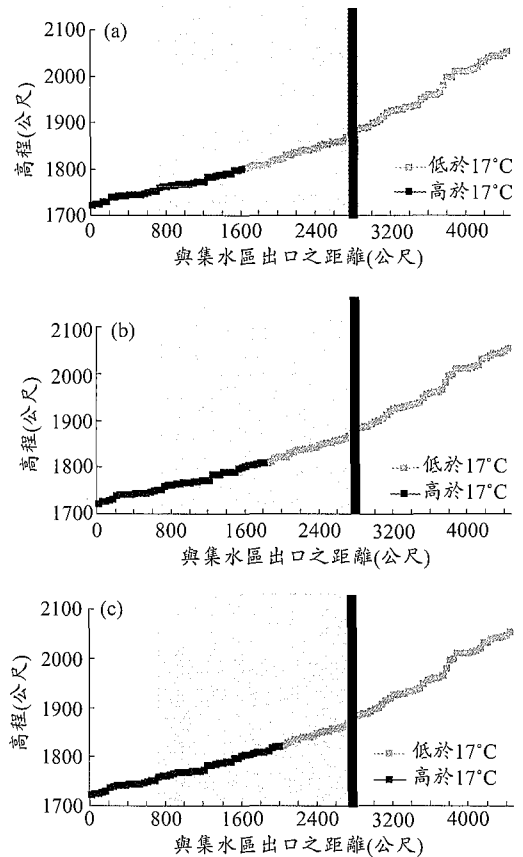


圖 8 高山溪 7 月水溫變化縱剖面圖 CGCM2 預設情境(a)短期、(b)中期、(c)長期

段，將隨著時間的推移而越來越少。也就代表在時間與空間上，櫻花鉤吻鮭可以生存的棲地均將被壓縮。

六、討論

綜合時間與空間面向，氣候變遷對於河川整年度、上下游水溫的影響將如表 6 所示。表 6 展示了不同氣候變遷預設情境，各月份水溫增溫的百分比，並以「/」符號分別呈現兩個地點：「高山溪三號壩(代表較上游地區)」以及「高山溪與七家灣溪之匯流口(代表較下游地區)」的數值。根據表 6 的結果，氣候變遷對於水溫增溫百分比的影響，在上下游地區是幾乎一致的，也代表氣候變遷對於「增溫程度」的影響，在同一集水區來說並沒有上下游之分，但是由於上下游地區原

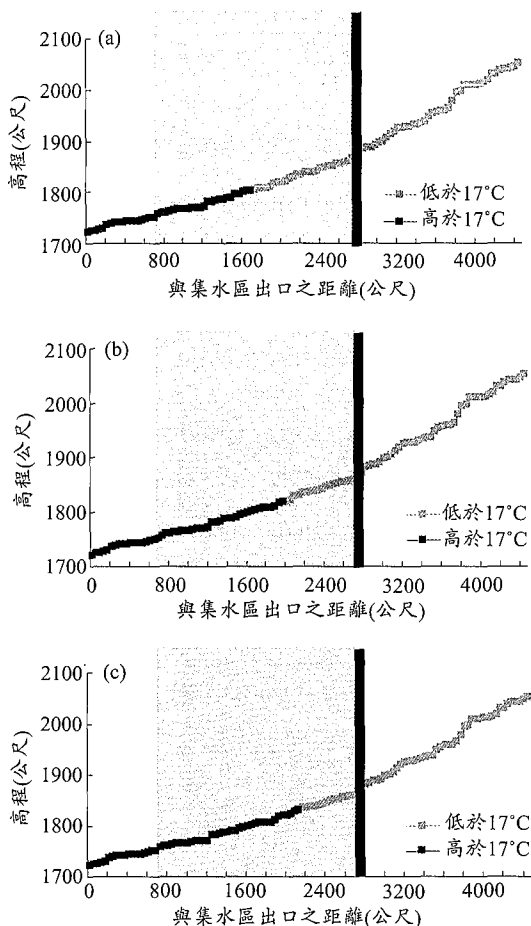


圖 9 高山溪 7 月水溫變化縱剖面圖 HADCM3 預設情境 (a)短期、(b)中期、(c)長期

本即有溫度差，因此增溫之後下游地區將較容易超過櫻花鉤吻鮭的致死溫度，也就是說氣候變遷對於「棲地」的衝擊將是下游比上游嚴重。

此外，表 6 亦顯示出氣候變遷在冬季所造成的增溫將比夏季來得嚴重。冬季(11、12、1 月)的平均增溫約在 18.9%，夏季(6、7、8 月)的平均增溫則僅約 8.5%，冬季與夏季之間的增溫約相差 10%，顯示冬季受到氣候變遷的衝擊將比夏季來得高。冬季(特別是 11 月)為櫻花鉤吻鮭魚卵是否能夠孵化的關鍵期，水溫超過 12°C 將導致魚卵的死亡率達到 100% (楊正雄, 1997)，因此冬季增溫較嚴重的趨勢若是持續下去，則很有可能對於櫻花鉤吻鮭魚卵的孵化形成威脅。

若以現況每月的「適當棲地」長度作為標準，在不同 GCMs，不同月份之下的櫻花鉤吻鮭「適當棲地」長度變化的百分比，如表 7 所示。表 7 顯示在氣候變遷之下，每年 1 月到 5 月以及 9 月到 12 月之「適當棲地」長度與現況是相同的。但是在 6、7、8 三個月份則呈現了縮減的情形。6 月份的棲地在氣候變遷之下平均長度為現況之 86%，8 月份的棲地在氣候變遷之下平均長度為現況之 88%。七月份則最為嚴重，氣候變遷之下平均長度僅為現況之 41%。以櫻花鉤吻鮭來說，就算一年當中有九個月的棲地狀態適合其生存，但是夏季三個月份的棲地惡化，特別是 7 月的「適當棲地」下降到不到現況的二分之一，也足以使得此地的櫻花鉤吻鮭面臨滅絕的命運。

七、結論與建議

本文利用一物理性水溫模式在櫻花鉤吻鮭的生活棲地之一：高山溪進行水溫模擬，在同時考量地形遮蔽與植生遮蔽的條件下，得到了較為準確的水溫模擬結果。並以此結果為基礎，評估櫻花鉤吻鮭「適當棲地」在氣候變遷影響下時間與空間的變化情形。模擬結果顯示氣候變遷的影響，將造成每個月的平均水溫均有上升的趨勢，此外月最高水溫超過 17°C 的月份，由原本的 7 月增加為 6、7、8 三個月。顯示在時間尺度上，適合櫻花鉤吻鮭生存的月份將會變少了；另一方面，以全年最暖之月份 7 月為分析對象，在空間尺度上，超過 17°C 的河段，即所謂「不適當棲地」，亦有增長之趨勢。以現在來說，7 月之「不適當棲地」長度約為 700 公尺，在不同的氣候變遷預設情境之下，此一「不適當棲地」之長度，在不同的氣候變遷預設情境下將增加到 1500 到 2200 公尺，約現況之 2 到 3 倍。相對而言「適當棲地」的長度，平均將減少到現況的 41%。代表在空間尺度上，適合櫻花鉤吻鮭生存的河段亦將會減少。

同時研究結果亦顯示氣候變遷對於水溫增加的百分比雖然有上下游的一致性，但是由於下游水溫原本即較上游高，因此氣候變遷對於「棲地」的影響將是下游較上游嚴重。此外冬季的增

表 6 氣候變遷下高山溪不同地點水溫增溫百分比(單位：%，三號壩/匯流口)

	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
CGCM2S	23/20	15/13	11/8	8/6	6/5	5/4	5/4	5/4	7/5	9/8	12/11	16/14
CGCM2M	24/22	16/15	12/10	10/8	8/7	7/7	6/6	7/6	8/7	10/9	13/12	17/16
CGCM2L	27/25	19/19	15/15	13/13	12/12	10/10	9/9	10/10	10/11	12/12	15/14	19/18
HADCM3S	24/20	15/14	11/9	9/7	7/6	6/5	5/5	6/6	8/6	10/8	12/11	16/15
HADCM3M	27/25	19/18	15/15	12/13	11/12	10/9	9/9	10/11	10/11	12/12	14/14	19/18
HADCM3L	30/28	21/21	17/18	15/16	14/15	13/12	11/12	12/14	12/14	13/13	16/16	20/20
CCCM	31/30	23/23	19/21	16/19	17/18	15/14	13/14	14/15	13/16	14/15	17/17	22/21
GISS	25/22	17/15	13/11	10/9	8/7	7/7	6/6	7/7	9/8	10/10	13/12	17/16

表 7 氣候變遷下高山溪每月「適當棲地」與現況比較長度變化百分比

適當棲地%	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
CGCM2S	100	100	100	100	100	100	55	100	100	100	100	100
CGCM2M	100	100	100	100	100	100	45	100	100	100	100	100
CGCM2L	100	100	100	100	100	81	36	86	100	100	100	100
HADCM3S	100	100	100	100	100	100	51	100	100	100	100	100
HADCM3M	100	100	100	100	100	86	38	87	100	100	100	100
HADCM3L	100	100	100	100	100	69	30	73	100	100	100	100
CCCM	100	100	100	100	100	54	28	60	100	100	100	100
GISS	100	100	100	100	100	100	45	100	100	100	100	100

溫效應比夏季高出約 10%，亦有可能在未來對櫻花鉤吻鮭魚卵的孵化造成一定威脅。

由於實測水溫資料取的較為不易，因此本文所使用之水溫模式僅在少數的時間點進行測試，未來待有更多實測水溫資料時，將可對模式進行更多的測試，使得模擬結果更符合自然之現況。此外對於櫻花鉤吻鮭「適當棲地」的評估，除了「水溫」之外，河川「微棲地的組成」例如：深潭(pool)、淺灘(riffle)以及緩流(run)之面積比例，亦為該河川是否成為櫻花鉤吻鮭「適當棲地」之重要指標，本文僅從「水溫」的角度出發，確有稍顯不足之處。後續研究可結合「水溫」以及「微棲地」評估的工作，使得「適當棲地」的分析結果更為可靠。

參考文獻

1. IPCC Working Group II, Technical Summary: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Edited by Manning (New Zealand), M. and Nobre, C. (Brazil), Cambridge University Press, UK, 2001.
2. Campbell, G. S. and Norman, J. M., An Introduction to Environmental Biophysics. Springer-Verlag New York, Inc. New York, 1998.
3. Kim, K. S. and Chapra, S. C., "Temperature model for highly transient shallow streams," *Journal of Hydraulics Engineering*, **123**(1), 30-40, 1997.
4. Petersen, J. H. and Kitchell, J. F., "Climate regimes and water temperature changes in the Columbia River: bioenergetic implications for predators of juvenile salmon," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **58**(9), 1831-1841, 2001.
5. Stefan, H. G. and Sinokrot, B. A., "Projected global climate change impacts on water temperatures in five river central U.S. streams," *Climatic Change*, **24**, 353-381, 1993.
6. Sinokrot, B. A. and Stefan, H. G., "Stream

- temperature dynamic: measurement and modeling,” *Water Resources Research*, **29**(7), 2299-2312, 1993.
7. Sinokrot, B. A., Stefan, H. G., McCormick, J. H. and Eaton, J. G., “Modeling of climate change on stream temperature and fish habitats below dams and near groundwater inputs,” *Climatic Change*, **30**, 181-200, 1995.
 8. Todd, D. K., Groundwater Hydrology. Wiley. New York, 1980.
 9. Tung, C. P., Lee, T. Y. and Yang, Y. C., “Modeling climate change impacts on stream temperature of Formosan Landlocked Salmon habitat,” *Hydrological Processes*, **accepted**, 2005.
 10. Yogesh, J. and Torrance. K. E., Computational Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation. Washington, D.C., 1986.
 11. 李宗祐，「氣候變遷對櫻花鉤吻鮭棲地水溫及族群數量之影響」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2003。
 12. 林曜松、楊平世、梁世雄、曹先紹、莊鈴川，「櫻花鉤吻鮭生態之研究(一)魚群分佈與環境因子之關係初步研究」，行政院農委會生態研究第 023 號，1988a。
 13. 林曜松、曹先紹、張崑雄、楊平世，「櫻花鉤吻鮭生態之研究(二)族群分佈與環境因子間關係之研究」，行政院農委會生態研究第 012 號，1988b。
 14. 曾晴賢，「櫻花鉤吻鮭族群調查及觀魚台附近河床之改善研究」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1994。
 15. 曾晴賢，「櫻花鉤吻鮭復育研究」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1995。
 16. 曾晴賢，「櫻花鉤吻鮭族群數量和生態調查」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1996。
 17. 曾晴賢，「櫻花鉤吻鮭族群生態調查和育種場位」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1997。
 18. 曾晴賢，「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(一)~(六)」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1998~2003。
 19. 童慶斌，李宗祐，「氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估」，農業工程學報，第 47 卷第 1 期，pp.65-74，2001。
 20. 楊正雄，「水溫對櫻花鉤吻鮭族群之影響」，國立清華大學生命科學研究所碩士論文，1997。
 21. 楊奕岑，「模擬氣候變遷對櫻花鉤吻鮭域外放流棲地水溫與潛在族群數之衝擊」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2004。
 22. 葉昭憲、段錦浩、連惠邦，「七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(一)~(五)」，內政部營建署雪壩國家公園管理處，1998~2002。

收稿日期：民國 94 年 4 月 19 日

接受日期：民國 94 年 11 月 30 日

