

因應氣候變遷雪霸圈谷融雪對七家灣溪流量之影響

簡俊豪⁽¹⁾ 林政侑⁽²⁾ 林昭遠⁽³⁾

摘要

雪為影響雪霸圈谷與七家灣溪生態系之重要因子，其以固態的形式滯留於圈谷，當氣溫上升時融化並產生逕流注入河川或滲入為地下水，具有穩定集水區內河川流量與水溫變化之作用，若全球暖化加速圈谷融雪速率，使水資源難以雪的型態於冬季儲存，將影響下游櫻花鉤吻鮭之生態基流量，為此分析氣候變化對七家灣溪基流量之影響極為重要。本研究藉由氣象觀測站所測得之雨量及氣溫資料，搭配衛星影像所計算之 NDSI 萃取雪覆面積，加入融雪逕流模式(SRM)模擬冬、旱時期集水區之流量歷線，另利用不同氣候變遷情境推估集水區流量歷線變化，探討氣候變遷對圈谷融雪及其下游流量之影響。結果顯示桃山西溪與池有溪匯流口之流量，部份時期未能符合櫻花鉤吻鮭生態基流量 0.06cms 之基本需求，由此推測櫻花鉤吻鮭僅能存活於桃山西溪與池有溪匯流口下游河段，此外；在氣候變遷模擬下，七家灣溪沿線(桃山西溪至高山溪)逕流量約減少 0.07~8.71%，造成低於生態基流量河段增加，天然棲地減少之情況發生。

(**關鍵詞**：雪霸國家公園、氣候變遷、SRM 模型)

Snowmelt of Shei-Pa cirque on the discharge of Chechawan creek in response to climate change

Jiun-hau Jian⁽¹⁾ Cheng-Yu Lin⁽²⁾ Chao-Yuan Lin⁽³⁾

Graduate Student⁽¹⁾ Ph.D.Student⁽²⁾ Professor and corresponding author⁽³⁾

Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Snowfall is an important factor affecting Shei-Pa Cirque and its nearby ecosystems of Chechiawan creek, which stores at the Cirque areas in a solid form and melts becoming runoff to recharge river and groundwater by infiltration process as temperature increase. This phenomenon shows that the function of stabilizing watershed river discharge and water temperature in the drought season. Global warming could accelerate the snow

(1) 國立中興大學水土保持學系研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系博士生

(3) 國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail：cylin@water.nchu.edu.tw)

melting rate, and the loss of water resources could severely affect the downstream ecological base flow of Formosan landlocked salmon. This is why climate change plays critical roles on the variations of the Chechiawan creek in the interest watershed. This study mainly simulated the discharge hydrograph of the Chechiawan creek using SRM model. Precipitation and air temperature data were derived from the meteorological stations, and the data of snow-cover area were extracted from satellite imagery. In addition, a series of scenarios were presented to understand the effects of climate change on the snowmelt of Cirque and the ecological base flow of the downstream. The result shows that the discharge of Taoshansi creek to the intersection with Chiyou creek doesn't reach 0.06cms which is the ecological base flow of Formosan landlocked salmon. Therefore, Formosan landlocked salmon can only exist in the downstream of the intersection of Taoshan creek and Pintian creek. Furthermore, discharge of the Chechawan creek river section (Taoshansi creek to Gaoshan creek) has decreased 0.07~0.87%. It will increase the amount of creek with discharge lower than ecological base flow, and make natural habitat reduce.

(Key words : Shei-Pa National Park, Climate change, SRM model)

前言

高海拔地區冬季降雪與春季融雪逕流是旱季河川水源補注主要來源，在國外部分地區民生用水的水源取得與農牧業灌溉用水提供也依靠融雪所產生之逕流，其中有六分之一以上的全球人口須依賴山區等大面積集水區所提供的水資源，並藉著規律性氣候變化所產生的融雪逕流生活(Barnett 等 2005; Viviroli 等 2007)，因此山區水資源的量化評估與規劃利用尤為重要。在台灣僅玉山、合歡山及雪山等高山地區才有降雪機會，雖每年降雪範圍不大、降雪量有限，卻是維繫高山生態不可或缺之環境因子，而最近一次冰河時期結束後，許多冰河時期的孑遺動植物因溫度上升而被迫困於高山地區形成台灣特有種，在台灣最有名的即是七家灣溪中的櫻花鉤吻鮭(汪靜明, 1995)，因其對水溫與水質的環境敏感性可視為環境變遷的指標物種。

高山生態系水循環中，雪是循環不可或缺的一部分，因此降雪和融雪是水文循環的一部分(Boudhar, 2010)，而冬季降雪也會造成土壤孔隙中的水分凍結，阻礙融雪逕流滲入土壤，而臨時回暖的氣溫則會造成降雨和融雪滲流入土壤孔隙，當氣溫再次下降會形成薄冰和凍層造成土壤表面被冰覆蓋(Yukiyoshi, 2011)，在此時所降下的水會因此凍層形成地表逕流。而七家灣溪雪期為每年12月到2月，春季時融雪產生逕流成為七家灣溪流量補充來源之一，當低於溪水溫度的逕流進入七家灣溪時，將有助於降低溪水溫度。而影響降雪最直接的因子就是氣溫與降水量，溫度達不到冰點或是濕度不足皆無法發生降雪事件，積雪在時間與空間的動態變化上可以作為反應在氣候變遷上之指標(Bloschl, 1999)。

童慶斌和李宗佑(2001)曾評估氣候變遷對七家灣溪的流量造成之衝擊，研究結果顯

示在氣候變遷的影響下，七家灣流域之平均年流量有增加之趨勢，但豐枯水期流量趨於極端化。就平均而言氣溫每上升 1°C 將造成水溫上升 0.75°C (Stefan, 1993)，此可能壓縮了遺生物生存空間，在無法適應其環境下向更高海拔遷移，最後失去其生存空間而滅絕，因此氣候變遷對於高山生態是不可回復之衝擊。本研究藉由梨山、南山、思源、三六九、黑森林、圈谷等氣象站，搭配衛星影像萃取雪覆面積資料，來推估降雪量與融雪後產生的逕流量，並評估對七家灣溪之影響，當在降雪量的情況不變的情況下，藉由國家災害防救科技中心 NCDR 氣候變遷研究團隊所提供氣候變遷資料，來模擬雪融化產生逕流對圈谷集水區與七家灣溪流量上之變化狀況。

材料與方法

1. 研究流程

本研究主要分為兩部分，第一部分為利用七家灣溪氣象資料與背景參數，搭配七家灣溪流量站流量資料與衛星影像所萃取之雪覆面積。建置七家灣溪集水區融雪量與流量之關係；第二部分為推估圈谷集水區與七家灣溪各河段逕流量在氣候變遷下之情形，找出變遷影響之河段是否衝擊櫻花鉤吻鮭生存之區位。(圖 1)。

2. 研究樣區

七家灣溪集水區為大甲河流域之源頭，內有七家灣溪、有勝溪、高山溪、詩崙溪、桃山溪、桃山西溪、池有溪、品田溪等溪流(圖 2)，本研究樣區以七家灣溪流量站作為集水

區出口，其中包含武陵農場、雪東線登山步道、雪山圈谷及有勝溪流域，集水區總面積約為 10,534 公頃，最低海拔為 1,105m，最高海拔 3,881m，屬於高山氣候，冬季雪覆蓋區域主要位於海拔 2,800m 以上之高山地區，中海拔區位於海拔 2,200-2,800m，小於海拔 2,200m 大多為農地。每年 11 月山區氣溫遽降，路面有結冰現象，12 月至隔年的 3 月冬季冰雪覆蓋，直至 5 月大地回暖。

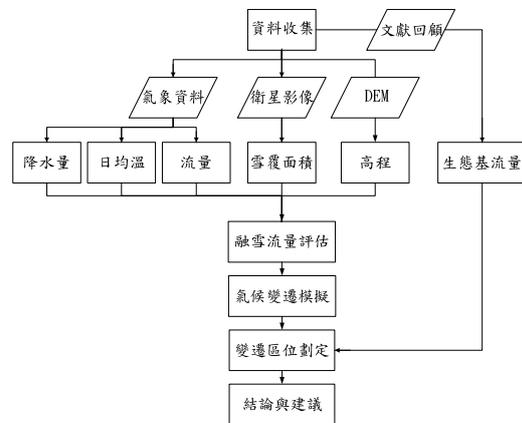


圖 1 研究流程

Figure 1 Flow chart of the study



圖 2 地理位置與行政區域

Figure 2 Geographical and administrative locations of study areas

3. 研究材料

氣象資料取自魏聰輝及林博雄(2009)於雪霸國家公園氣象調查所設立之簡易氣象站，搭配氣象局測站及七家灣溪流量站如(圖 3，表 1)，作為 SRM 模擬時之背景數據；利用自中央大學太空及遙測中心所購得之 2007-2011 每年 12 月至 3 月之 SPOT 衛星影像萃取雪覆面積，以呈現集水區雪面積之消長；另使用國家災害防救科技中心氣候變遷研究團隊對台灣地區氣候變遷建置之資料，以推估氣候變遷對七家灣溪造成之衝擊區位。

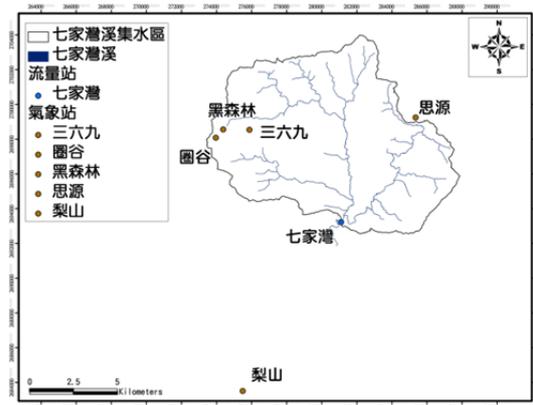


圖 3 氣象測站與流量站分布圖

Figure 3 Locations of meteorology and discharge station

利用內政部國土測繪中心 DEM 資料，萃取樣區之高程及水系，並劃定七家灣溪之集水分區，雪覆蓋的區域利用 SPOT4(20m X 20 m)及 SPOT5(10m X 10m)之 14 期冬季 12 月至春季 3 月共三個年度的衛星影像來萃取，而氣象資料則分為兩部分，一部分為氣象局自記式氣象測站之資料，一部分為雪山地區高山生態系長期生態調查研究計畫所設立簡

易氣象測站，搭配 SRM 模式所需驗證流量資料，因此選定七家灣溪流量站所測流量資料作為模擬之驗證(表 2)。

表 1 氣象站與流量站資料

Table 1 Information of meteorological and discharge station

測站	名稱	坐標 TWD97		標高(m)
		x	y	
流量站	七家灣溪	280274	2693428	1,685
氣象站	梨山	275497	2683502	1,980
	思源	285358	2699244	2,036
	369 山莊	275879	2698536	3,142
	黑森林	274386	2698560	3,405
	圈谷	273961	2698080	3,854

表 2 各圖層之屬性資料

Table 2 Attributes of the related coverages

資料名稱	屬性	時間	空間解析度	來源
DEM	高程	2003	5m*5m	內政部
氣象	氣溫 降雨量	2009-2011	日資料	氣象測站 七家灣流量站
衛星影像	NDSI	2007/12/11	20m X 20m(SPOT4)	中央大學 太空及遙測中心
		2008/1/11	20m X 20m(SPOT4)	
		2008/2/21	10m X 10m(SPOT5)	
		2008/3/3	20m X 20m(SPOT4)	
		2008/12/20	20m X 20m(SPOT4)	
		2009/1/10	20m X 20m(SPOT4)	
		2009/2/25	20m X 20m(SPOT4)	

2009/3/18	20m X 20m(SPOT4)
2009/12/12	10m X 10m(SPOT5)
2010/2/11	20m X 20m(SPOT4)
2010/3/19	20m X 20m(SPOT4)
2010/12/27	10m X 10m(SPOT5)
2011/2/27	10m X 10m(SPOT5)
2011/3/5	10m X 10m(SPOT5)

4. 研究方法

本研究利用 NCDR 氣候變遷之概念搭配 SRM 模式來模擬氣候變遷雪霸圈谷融雪對七家灣溪流量之影響：

(1) 覆雪面積萃取

覆雪面積萃取是利用常態化差異雪體指標(Normalized Difference Snow Index NDSI)及非監督式分類等兩種方法萃取雪覆面積。NDSI 為雪對光譜反射率不同，利用綠光(G)與短波紅外光(SWIR)反射差的相對大小，來萃取雪覆蓋面積 (Salomonson and Appel, 2004)，使其可將影像像元辨別為積雪或是非積雪之像元，其運算公式如下：

$$NDSI = \frac{(G - SWIR)}{(G + SWIR)}$$

G：綠光光譜值；SWIR：短波紅外光光譜值。非監督式分類法不需事先選取資料樣本來作訓練與驗證，將影像以集群分析方法進行光譜值之分類，利用數學統計方式計算出各群集的平均值、標準差，藉由影像經螢幕所呈現出之顏色類別判斷是否符合實際情況來調整分類項目數後，達到分類目的，通

常可以經由不同顏色呈現表示分類結果，自動化程度高。且使用 EDARS 影像處理軟體即可以將光譜值作群集分析，常態化差異雪體指標(圖 4)計算完後將雪覆蓋區位為以白色所展示。

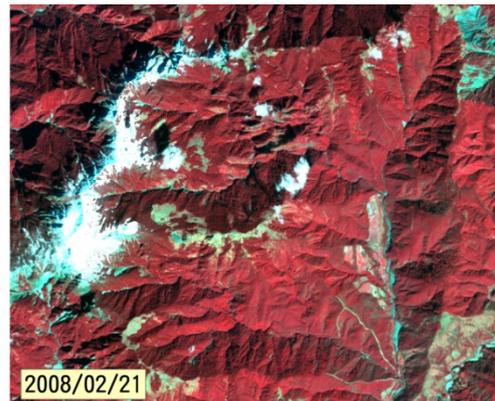


圖 4 非監督分類提取積雪覆蓋面積示意圖

Figure 4 Areas of Snow cover extracted by unsupervised classification

(2) SRM 模型

融雪逕流模式(Snowmelt Runoff Model, SRM)原為模擬小流域的融雪逕流所建立的半物理機制模式，並在全球十多個國家之流域進行試驗及應用，世界氣象組織也曾於 1982 年及 1992 用此模式進行模擬。此模式能夠藉由氣溫、雨量與衛星影像等資料快速對全流域融雪流量逕行推估，故選此模式來模擬圈谷 12 月~5 月之流量歷線。藉由七家灣流量站之流量資料配合比流量法來推估圈谷集水區之流量，作為模式驗證之參考，其中 SRM 流量計算公式如下：

$$Q_{n+1} = [c_{sn} \cdot a_n(T_n + \Delta T_n)S_n + c_{Rn}P_n] \times$$

$$\frac{A \cdot 10000}{86400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1}$$

式中：

Q：每日得平均流量(m³•s⁻¹)；

c：分為兩種，c_S為融雪逕流係數，而 c_R是降雨逕流係數；

a：單位溫度上升所融化的積雪深度；單位度-日因子(cm•°C⁻¹d⁻¹)，

T：每日氣溫(°C•d)；

ΔT：溫度在垂直高程上的遞減率(°C•d)；

S：各區雪覆蓋面積和各區面積的比值；

P：日降水量(cm)；

A：集水區面積(km²)；

k：衰退係數，表示在沒有融雪或降雨時段內的逕流下降值；

n：時間序列，代表日數；

10000/86400：流量與逕流量的單位換算係數；

其中 T、S、P 為主要輸入的變量，c_S、c_R、ΔT、T_{crit}、k、a、A 都是基本參數，當樣區高程超過 500m 時需分層給定不同基本參數，以確保推估融雪逕流量的準確性，讓不同區所產生逕流量模擬可更準確。以下將 A 分為 A_A、A_B、A_C、A_D 來代表四個不同高程之分區，而分區後的流量推估公式如下：

$$Q_{n+1} =$$

$$\left\{ \begin{aligned} & [c_{sAn} \cdot a_{An}(T_{An} + \Delta T_{An})S_{An} + c_{rAn}P_{An}] \frac{A_A \cdot 10000}{86400} + \\ & [c_{sBn} \cdot a_{Bn}(T_{Bn} + \Delta T_{Bn})S_{Bn} + c_{rBn}P_{Bn}] \frac{A_B \cdot 10000}{86400} + \\ & [c_{sCn} \cdot a_{Cn}(T_{Cn} + \Delta T_{Cn})S_{Cn} + c_{rCn}P_{Cn}] \frac{A_C \cdot 10000}{86400} + \\ & [c_{sDn} \cdot a_{Dn}(T_{Dn} + \Delta T_{Dn})S_{Dn} + c_{rDn}P_{Dn}] \frac{A_D \cdot 10000}{86400} \end{aligned} \right\}$$

$$\times (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1}$$

因氣候條件會隨海拔高度而改變，需帶入不同氣象資料使 SRM 模擬融雪逕流量可得到精確結果，故將七家灣溪由低海拔至高海拔分為四個高程分區(圖 5，表 3)，以便帶入各子集水分區模擬時所需之氣象資料；為瞭解各主支流交匯口流量變化，利用各匯流口劃分為七個子集水分區搭配四個高程分區的氣象資料，來模擬融雪對七個集水分區逕流量所造成之影響(圖 6)。

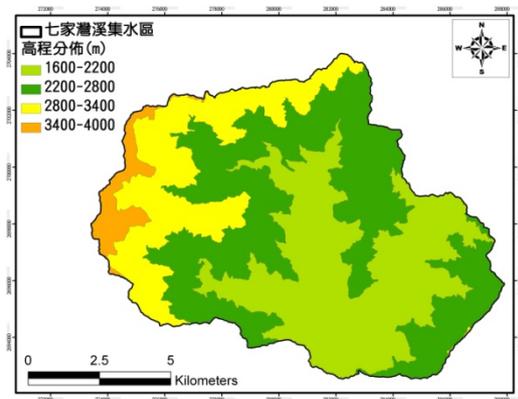


圖 5 高程分布圖

Figure 5 Spatial distribution of elevation

表 3 高程分布資料表

Table 3 Information of the elevation zones

高程帶	高程範圍(m)	面積(km ²)	面積百分比(%)
1	1,600~2,200	37.09	35

2	2,200~2,800	43.22	41
3	2,800~3,400	21.00	20
4	3,400~4,000	4.03	4
全流域	1,600~4,000	105.34	100

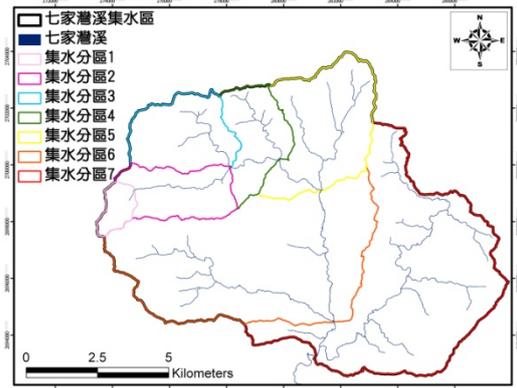


圖 6 集水分區示意圖

Figure 6 Spatial distribution of sub-watersheds.

a. 模式變數給定

在 SRM 模式中，溫度、降雨、積雪覆蓋率皆主要輸入之變數，藉由這三項主要變數來模擬集水區之流量資料。其中溫度為融雪逕流過程中的重要角色，是啟動融雪之關鍵，且雪融速度將隨溫度上升而加快，然七家灣溪之流量除受融雪影響外，降雨亦為逕流量一重要影響因子。

(a) 氣溫與降雨

本研究之氣溫與降雨資料來自梨山、思源、三六九、圈谷等四個氣象站，用此四個氣象站分別代表每個高程帶的天氣變化，依海拔由下而上分別為梨山之平均氣溫為 9.48℃、思源之平均氣溫為 9.22℃、三六九之平均氣溫為 5.13℃及圈谷之平均氣溫為 2.43℃

(圖 7)。七家灣溪集水區的年雨量約為 2,000~2,500mm(圖 8)。

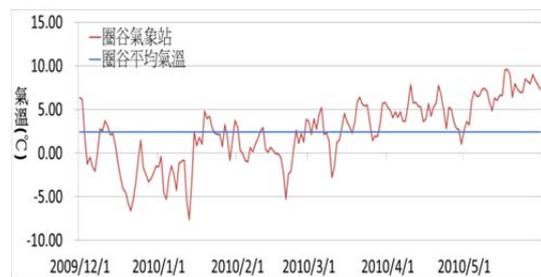
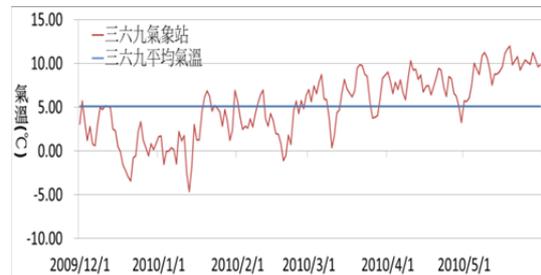
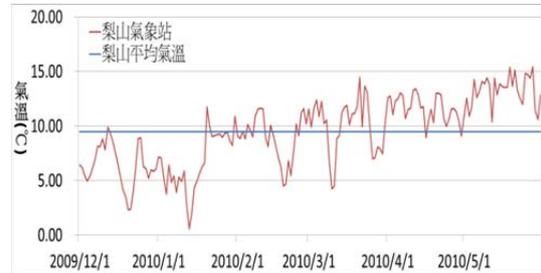


圖 7 各氣象站日溫度變化與平均溫度

Figure 7 Variations of daily and mean temperature for the meteorological stations

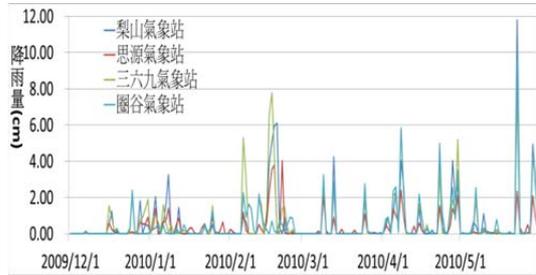


圖 8 各氣象站日雨量變化

Figure 8 Daily rainfall of meteorological stations

(b)積雪覆蓋率

積雪覆蓋率為雪覆面積和流域面積之比值。本研究利用 SPOT 衛星影像計算 NDSI 萃取積雪面積，並計算 2007-2011 年間各高程帶的積雪覆蓋率，利用三年 14 期各月份之衛星影像來模擬冬季積雪面積變化之情形，其餘資料不足部份將進行內插，以此結果作為模式所需的積雪覆蓋率資料(圖 9)。在高程帶 1、2 冬季時並無積雪覆蓋，在此兩個高程帶的積雪覆蓋率為 0；高程帶 3 冬季積雪主要集中在 2、3 月份；高程帶 4 為積雪主要之分布區域，此區積雪範圍廣且分布較為連續，2、3 月的積雪覆蓋率更可高達 51%，為融雪逕流量主要貢獻區位。

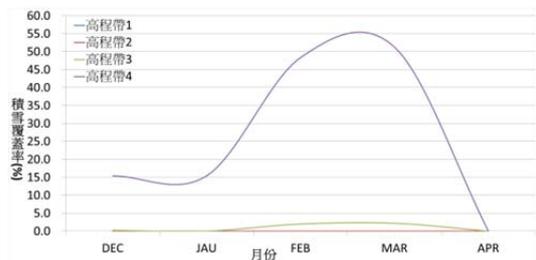


圖 9 七家灣溪集水區不同高程帶之積雪覆蓋率

Figure 9 Variations of snow cover rate for the elevation zones in Chechawan watershed

b.模式參數給定

SRM 模式中有溫度與流量相關背景參數，藉由這兩大類背景參數輸入來模擬樣區的氣候與環境資料，其中溫度相關背景參數都為經驗值，需藉由歷年氣象資料來推估，而流量相關背景參數除遲滯時間外，逕流係數與衰退係數需藉由計算氣象與流量資料獲得。

(a)溫度相關背景參數

SRM 模式中和溫度有關之背景參數有三種分別為溫度變化率(Temperature lapse rate)、單位度-日因子($\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}$)及臨界溫度(Critical temperature)。其中溫度變化率依 SRM 操作手冊直接給定為 0.65，代表意義為溫度變化率為海拔高度每上升 100m，平均氣溫會下降 0.65°C ；單位度-日因子則為溫度上升 1°C 所能造成的融雪深度，反映融雪深度與溫度之關係，計算公式如下：

$$M = a \cdot T$$

其中 M 為融化深度(cm)，T 為每日平均溫度 ($^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)。利用圈谷氣象站所量測的積雪深度與氣溫關係作簡單迴歸，經計算後得到當 0°C 上升至 1°C 時 a 值為 0.52，故本研究區位的 a 值皆採用 0.52(圖 10)。

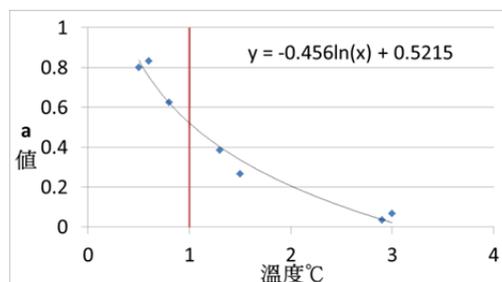


圖 10 溫度與 a 值關係圖

Figure 10 Relationship between temperature and a value

最後臨界溫度為降雨與降雪事件判斷之門檻，其單位表示為(°C•d)，當日溫度低於此臨界溫度時，則該場降水事件會被視為降雪，故本研究以 0°C 作為此臨界值。

(b)流量相關背景參數

和流量有關之背景參數有集流時間(Time lag)、逕流係數(Runoff coefficient)、衰退係數(Recesson coefficient)等三項，其中集流時間代表降雨或融雪逕流發生時所延遲進入河道之時間，通常與集水區面積大小有相關，本研究利用 SRM 操作手冊內的集水區面積與集流時間之計算出迴歸式(圖 11)，並把七個子集水分區面積帶入迴歸式計算出集流時間(表 4)，可得到最短的集流時間為集水分區 1 的 1.07 小時，及最長的集流時間為 7.68 小時。

逕流係數 c 可以分為兩類，融雪逕流係數與降雨逕流係數，其值介於 0~1 之間。逕流係數為流量與降雨量之比值，因此逕流係數會隨降雨事件而改變。

表 4 集水分區面積與集流時間關係表

Table 4 Relationship between watershed area and time lag

集水分區編號	面積(km ²)	集流時間(hr)
1	1.71	1.07
2	8.09	3.56
3	16.48	4.71
4	23.12	5.25
5	36.78	5.99
6	71.7	7.07
7	105.34	7.68

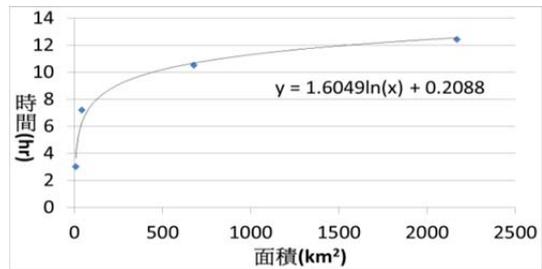


圖 11 集水區面積與集流時間關係圖

Figure 11 Relation curve for watershed area and time lag

在融雪逕流係數的部份，因雪霸圈谷地區春季土壤還是為凍土之狀態，融雪後雪水不易滲入土壤，加上氣溫偏低所以不易造成蒸發散作用發生，會導致逕流量偏高，本研究參考張一馳(2006)提到降雨逕流係數一般等於或略小於融雪逕流係數，因此給定融雪時逕流係數為 0.6；而降雨逕流係數與流量歷線的上升段有關，而比照衰退係數之關係式，計算雨量與流量上升段之關係(圖 12)，因此能夠得到在不同的降雨事件下的降雨逕流係數(圖 13)。

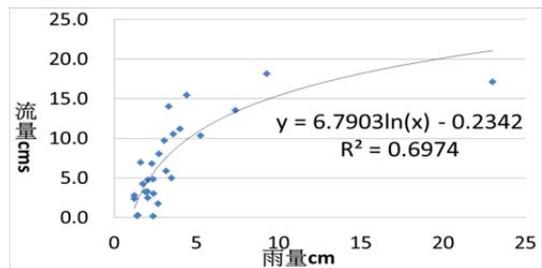


圖 12 雨量與流量之關係圖

Figure 12 Relation curve for rainfall and discharge

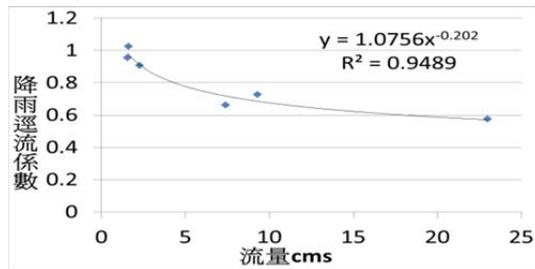


圖 13 流量與逕流係數之關係圖

Figure 13 Relation curve between discharge and runoff coefficient

衰退係數表示在沒有融雪或降雨時段內的逕流下降值。其計算方式為利用 SRM 操作手冊中所提公式做計算，計算公式如下：

$$K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y}$$

$$\log K_{n+1} = \log x - y \log Q_n$$

式中 n：為天數； Q_n ：為第 n 天流量； K_{n+1} ：為第 n+1 天之 K 值，分別對 Q_n 及 Q_{n+1} 取 log 後配合 SRM 操作手冊(圖 14)可以得到 Q_n 及 Q_{n+1} 與 K_{n+1} 的關係，利用不同降雨事件與流量變化計算出降雨事件與衰退係數之關係，式 5 中的不同事件下的 x, y 值可以與流量關係繪製成(圖 15)，並獲得新的 X, Y 係數關係式。經由計算後得到全年度平均的 $x=1.034$, $y=0.089$ ，便可搭配流量與降雨資料之轉換公式，來推估衰退係數之值。

c. 模式驗證

利用 SRM1.00 版本，對七家灣溪集水區進行 2009 年 12 月至 2010 年 5 月的融雪逕流逕行模擬，模擬結果如下(圖 16)可以得到七家灣溪流量站實測年逕流量為 47,481,984 m^3 ，與模擬年逕流量為 50,932,109 m^3 ，實測日平均流量為 3.02 m^3/s ，模擬日平均流量 3.24

m^3/s 。

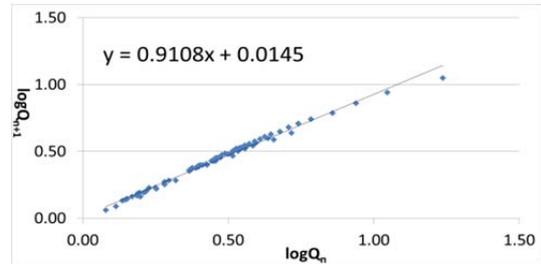


圖 14 Q_n 及 Q_{n+1} 關係圖

Figure 14 Relationship between Q_n , and Q_{n+1}

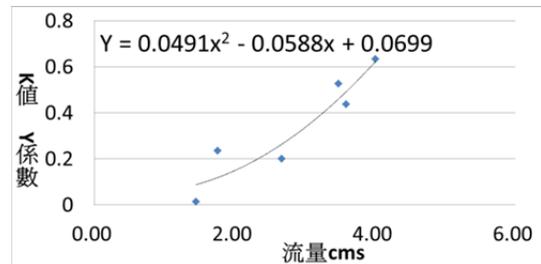
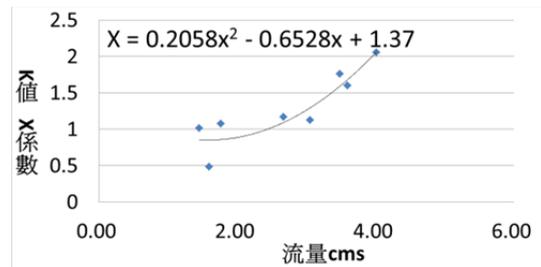


圖 15 流量與 K 值之 X, Y 係數關係圖

Figure 15 Relationship between discharge and X or Y coefficient for the K value

其中誤差主要出現在 2 月中旬，推測原因為較大降雨事件造成模式的假設參數無法完全符合實際情況，因此模擬的逕流歷線峰值達不到實測歷線峰值而產生誤差。而研究中主要探討部分為融雪對於生態基流量之影響，因此就整體而言 2009 年 12 月到 2010 年 2 月初，及 2010 年 3 月至 5 月期間基流量部

分的模擬結果與實測流量之趨勢一致。

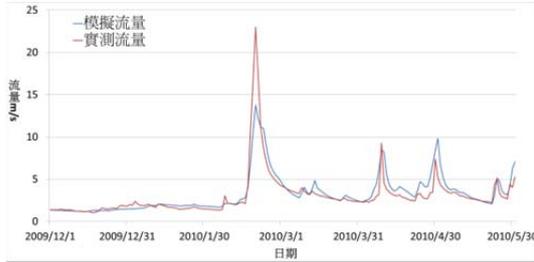


圖 16 實測與模擬之逕流歷線圖
Figure 16 Hydrograph of runoff derived from measurement and simulation

融雪逕流模式(SRM)運用判定係數(the coefficient of determination)及標準偏差(the deviation of the runoff volumes)之概念，對模擬結果精度檢驗，其判定係數公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

式中： Q_i ：實測日逕流量； Q'_i ：模擬日逕流量； \bar{Q} ：實測日逕流量之平均值； Q_i ：模擬日逕流量； R^2 ：判定係數，值為 0~1 之間，

值越接近 1 代表模擬精確度越高。

$$D_v(\%) = \frac{V_R - V'_R}{V_R} \cdot 100$$

式中： V_R ：實測逕流體積； V'_R ：模擬逕流體積； D_v ：絕對值越小代表模擬精確度越高。模擬結果判定係數 $R^2=0.7656$ 及標準偏差 $D_v = -7.2825\%$ 。誤差原因為 SRM 在模擬流量的過程中簡化了許多的參數因子，例如雪密度的改變，土壤結凍、壓密，熱收支的平衡等其他物理因素，用較易取得的溫度、降雨、雪覆率等來模擬，模擬結果還在可以接受範圍內。

(3)氣候變遷模擬情境

IPCC 於排放情境特別報告(IPCC Special Report on Emissions Scenarios, SRES)中對未來主要設定四種不同的發展可能導致的溫室氣體排放情境，國家災害防救科技中心 NCDR 氣候變遷研究團隊針對不同情境計算台灣地區之降尺度氣候變化資料，各情境請見(表 5)：

表 5 氣候變遷模擬之情境
Table 5 Simulation scenarios of climate change.

氣候變遷情境	情境描述
A1	A1FI 人類仍大幅使用石化燃料。
	A1T 再生能源進展迅速，人類不使用石化燃料。
	A1B 再生能源與石化燃料平衡使用。
A2	A2 情境描述全球經濟成長幅度不等，而導致工業國家與開發國家的收入差異仍大，科技與人口流動較不通暢，強調家庭或族群生產力，A2 的人口成長率是 4 個情境中最高者。
B1	情境描述全球的環境與社會意識高漲，並結合全世界的力量來追求永續的發展，經濟發展程度適中，科技發展扮演重要的角色，世界各國貧富差距縮小。
B2	情境描述世界各國的人類對於環境與社會的永續發展日趨重視，政府政策為有環境意識的公民所影響，全球化的腳步減緩，而地域性的決策機制顯得更受重視。

表 6 氣候變遷每月變化量(%)

Table 6 Monthly variation of climate change

氣溫		
時間基期(年)	近未來	世紀末
	2020-2039	2080-2099
1 月	0.6129	1.5735
2 月	0.6518	1.5354
3 月	0.6513	1.5696
4 月	0.5709	1.4845
5 月	0.6677	1.5972
6 月	0.5482	1.4761
7 月	0.5849	1.4813
8 月	0.6306	1.5071
9 月	0.6772	1.5601
10 月	0.5749	1.4354
11 月	0.5543	1.4071
12 月	0.7072	1.5953
雨量		
時間基期(年)	近未來	世紀末
	2020-2039	2080-2099
1 月	-3.5862	-7.3448
2 月	5.9544	5.7093
3 月	-10.9983	-8.9315
4 月	-3.9307	-3.2888
5 月	-0.6416	4.1627
6 月	-1.9559	9.1837
7 月	9.1432	19.1069
8 月	3.3291	7.6102
9 月	4.2495	7.4943
10 月	-0.77	3.5766
11 月	-1.4106	-5.2372
12 月	-0.8646	-4.1233

因台灣近年來保育意識抬頭，開始重視環境保育與生態永續發展，除追求經濟發展外，對於重大公共建設與重大開發案會主動監督政府，並提出保育、保護等訴求，故本研究選用 B1 之情境作為變遷之模擬，搭配樣區選定 GCM 編號 164 之點位，利用編號 164 點位所提供 B1 情境下的氣溫與雨量變率作

情境模擬，其變遷方向為環境與社會意識高漲，經濟能夠適度的發展，在科技扮演重要腳色下，並且追求永續的發展，而雨量與氣溫變遷的趨勢如(表 6)

結果與討論

1. 圈谷集水區三年模擬結果

圈谷集水區總面積約為 0.7 km² 佔七家灣溪集水區 1.6%，對於七家灣流域所佔比例不大，是冬季降雪之主要區位，可調節下游水溫，而經模擬七家灣溪上游圈谷區位 2009~2011 年間 12 月 1 日至翌年 5 月 31 日之流量歷線可知，各年度之逕流量分別為 727,574 m³、660,700 m³、562,723 m³，比較 2009、2010、2011 三年的逕流量相比，其變異係數達 12.7% (圖 17，表 7)。

圈谷集水區因集水面積較小且集流時間較短，降雨事件易明顯反應在逕流歷線上而形成峰值(圖 18)，經計算後最低流量分別為 0.016、0.000、0.019cms，櫻花鉤吻鮭潛勢分布之物理棲地限制因子流量為 0.060 cms (林晏詩，2006)，皆不符合此流量條件，故圈谷集水區以下至池有溪出口段受流量限制皆不適合櫻花鉤吻鮭之生存，與櫻花鉤吻鮭的分布範圍由七家灣溪至池有溪出口段此實際結果相符(曾晴賢，2002)。

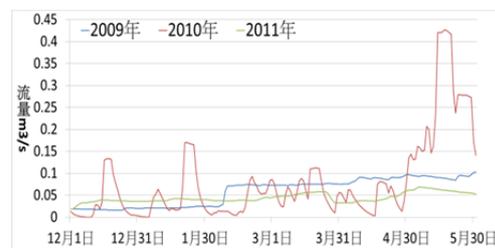


圖 17 各年之逕流量變化

Figure 17 The annually variation of runoff

表 7 各年之逕流量變異係數

Table 7 The annually coefficient of variation of runoff

年度	2009~2010	2010~2011	2011~2012
逕流量(m ³)	727,574	660,700	562,723
平均值(m ³)	727,574	660,700	562,723
標準差(m ³)	829,13		
變異係數(%)	12.7		



圖 18 各年之降雨與流量之時序圖

Figure 18 Stochastic map of rainfall and discharge

2. 圈谷集水區氣候變遷模擬結果

圈谷集水區氣候變遷下於近未來與世紀末之情境中發現，原逕流量與氣候變遷兩個階段下的逕流量相比，其變異係數僅介於 0.10~2.36%(圖 19, 表 8)。由圖 5-3 可知，在變遷的情境下 12~1 月份圈谷集水區皆低於物理限制因子之流量 0.060 cms。其中 2010 年及 2011 年流量歷線從 2 月之後就開始下降，未變遷與世紀末之變遷情境二者差異最大可達 8.1%，而可以知道短時間的流量變化率大於長時間變化，但長時間的極端流量事件可能對水中生物帶來更大的威脅(吳淑涵, 2012)，因此，在氣候變遷情境下，不利於櫻花鉤吻鮭之保育。另外氣溫會影響水溫，NCDR 之變遷模式中，氣溫變化的情境皆是上升，最少會增加 1.4354%，而最多可增加 1.5972%，因此可推估當水溫會隨氣溫上升，間接造成櫻花鉤吻鮭生存空間壓縮。



圖 19 年度流量氣候變遷下之變化

Figure 19 Variations of discharge under climate change

表 8 年度逕流量氣候變遷下變異係數

Table 8 Coefficient of variation for the discharge under climate change

逕流量(m ³)	2009 年	2010 年	2011 年
現況	727,574	660,700	562,723
近未來 2020-2039	728,957	644,112	545,702
世紀末 2080-2099	728,784	641,952	537,753
平均值(m ³)	728,438	648,922	548,323
標準差(m ³)	753	10,258	12,918
變異係數(%)	0.1	1.58	2.36

3. 全流域模擬

為了解七家灣溪流量受氣候變遷衝擊區段，因此模擬各集水分區逕流量受氣候變遷之影響 (圖 20，表 9)，在世紀末情境下圈谷至億年橋各集水分區之逕流量減少從 0.44~0.79 % 不等，但億年橋至有勝溪出口段，近未來與世紀末增加比例分別為 10.82 % 及 9.52 %，其水資源有增加之趨勢。然品田溪匯流口至七家灣溪此段為櫻花鉤吻鮭生存之區域，水資源多寡會對整體生態系產生影響並改變動、植物的形態與種類，使生態系轉

變產生新的食物鏈，因應氣候變遷與維護櫻花鉤吻鮭之生態棲地，可於集水區內邊坡之天然滯蓄區位營造保水之生態池，延長入滲時間，讓水資源以地下水形式補注七家灣溪，來減緩氣候變遷所造成水資源減少之衝擊。

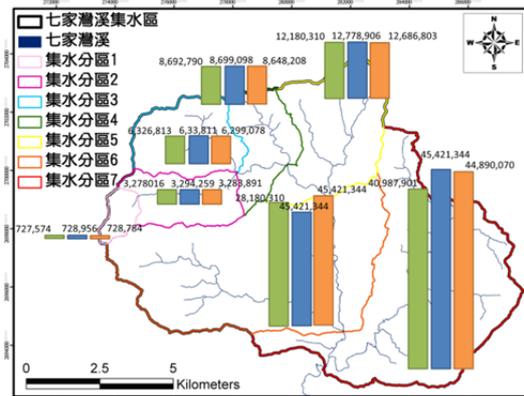


圖 20 各集水分區在氣候變遷下之逕流量分佈

Figure 20 Sub-watershed runoff under climate change

表 9 各集水分區在氣候變遷下之年逕流量變化(m³)

Table 9 Variations of runoff for the sub-watersheds under climate change (m³)

集水分區編號	1	2	3	4	5	6	7
2009 年	727,574	3,278,016	6,326,813	8,692,790	12,787,564	28,180,310	40,987,901
近未來 2020-2039	728,956	3,294,259	6,333,811	8,699,098	12,778,906	25,715,232	45,421,344
變遷百分比 (%)	0.19	0.50	0.11	0.07	-0.07	-8.75	10.82
世紀末 2080-2099	728,784	3,283,891	6,299,078	8,648,208	12,686,803	29,522,880	44,890,070
變遷百分比 (%)	0.17	0.18	-0.44	-0.51	-0.79	4.76	9.52
	圈谷地區	桃山西溪匯流處	桃山西溪品田溪匯流處	池有溪匯流處	桃山溪師崙溪匯流處	高山溪匯流處	有勝溪匯流處

結論

在變遷趨勢上，短期內每年之間的變化率大，年逕流量變異係數達 12.70%，長期變化率不大僅 2.36%，但本研究就單以雨量、溫度、降雪面積等三項主要因子下去參考，可以由衛星影像可以快速計算出大範圍的雪面積及模擬逕流量，但未考慮到日輻射量、迎風面、植物相等其他皆會影響到融雪因子，如果要再進一步精求得確融雪量，應考慮其他因子與融雪之關係。

就高山生態系而言，最佳情況為人類不加以干擾，物種會以演化或演替的方式自行調適保留適合生存之物種。而當環境變遷後，為保存某部份生態特色就需局部人為方式營造特定物種的適生環境，以供保育物種得以綿延生存。如果因氣候變遷其生存環境已被破壞，僅能由人工繁殖圈養。

氣候變遷下圈谷集水區僅改變七家灣溪源頭生態基流量，如何增加入滲量補充地下水，與延遲地表水進入主河道，來替代固態的水資源「雪」，在未來將會是一重要課題。圈谷為天然滯蓄區位，是否能在低窪處建立霸體等設施，把水截蓄在上游，讓冬季蓄水自然結冰保存在圈谷區位，而平時也可以延長逕流入滲土壤的時間，利用氣候變遷的長期趨勢，使土壩建立後藉由自然的入滲過程，細顆粒土壤逐漸填實蓄水區底部孔隙，形成人工湖泊以達到把水資源保留在圈谷集水區。

謝誌

本研究承雪霸國家公園委託研究報告(PG10101-0046)補助經費，謹此致謝。

參考文獻

1. 汪靜明(1994)，「丕遺的國寶-台灣櫻花鉤吻鮭專輯」，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
2. 林晏詩(2006)，「應用地形與降水資訊探討台灣櫻花鉤吻鮭潛勢物理棲地分布」，碩士論文，國立台灣大學。
3. 吳淑涵(2012)，「應用極端流量及水溫評估氣候變遷對櫻花鉤吻鮭棲地之衝擊」，碩士論文，國立台灣大學。
4. 張一馳、李寶林、包安明、周成虎、陳曦、張學仁(2006)，「開都河流域融雪逕流模擬研究」，中國科學 D 輯 地球科學 36，24-32。
5. 國家災害防救科技中心(2010)，「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」，災害防救電子報，54。
6. 雪霸國家公園管理處(2012)，「雪山地區高山生態系長期生態調查研究」。
7. 童慶斌、李宗佑(2001)，「氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估」，中國農業工程學報 47(1)：第 65-47。
8. 魏聰輝、賴彥任、張振生、吳宜穗、陳信雄、林博雄(2007)，「溪頭地區 2005

- 年 3 月降雪事件熱量收支之探討」, 作物、環境與生物資訊, 4, 第 314~328 。
9. Bloschl, G (1999), Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological Processes* 13, 2149–2175.
 10. Dankers, R., De Jong, S.(2004), Monitoring snow-cover dynamics in Northern Fennoscandia with SPOT VEGETATION images. *International Journal of Remote Sensing* 15 (25), 2933–2949.
 11. IPCC (2007), “Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” IPCC Climate Change.
 12. Martinec, J Rango, A and R. Roberts (2008), Snowmelt Runoff Model (SRM) User’s Manual, WinSRM Version 1.11.
 13. Liston, G.E.(1999), Interrelationships among snow distribution, snowmelt, and snow cover depletion: implications for atmospheric, hydrologic, and ecologic modeling. *Journal of Applied Meteorology* 38, 1474–1487.
 14. Salomonson, V., Appel, I. (2004), Estimating fractional snow cover from MODIS using the Normalized Difference SnowIndex. *Remote Sensing of Environment* (89), 351–360.
 15. Singh, P., Kumar, N.(1997), Impact assessment of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river. *J. Hydrol.* 193 (1–4), 316–350.
 16. Stefan, H. G. and Sinokrot, B. A.(1993), Projected Global Climate Change Impact on Water Temperatures in Five River Central U.S. Streams. *Climate Change*, 24:253-381
 17. Viviroli, D. Dürr, H. Messerli, B. Meybeck, M. Weingartner, R.(2007), Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43 W07447. oi:10.1029/2006WR005653.
 18. Yuki Yoshi Iwata, Manabu Nemoto, Shuichi Hasegawa, Yosuke Yanai, Kazunobu. (2011), Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan. *Journal of Hydrology Volume* 401 (3-4), 165–176.
-

102 年 05 月 03 日收稿

102 年 05 月 08 日修改

102 年 05 月 14 日接受