

雪霸國家公園管理處委託辦理計畫

評估水文條件改變及河床-河水交互作用對七家灣溪河川
流量與溪流棲地之影響

成果報告

委託單位：雪霸國家公園管理處

執行單位：國立臺灣師範大學地理學系

計畫主持人：李宗祐

計畫協同主持人：黃誌川、邱永嘉

本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見

中華民國 105 年 12 月

摘要

此計畫從 2016/6/28 完成契約簽訂後開始執行計畫。期間計畫分析了長時間武陵地區的溫度、降雨、流量資料及降雨—流量之關係，並測試了低流量推估模式於七家灣溪及有勝溪之適用性，於三個潛在的斷流河段做了現地考察與流量的觀測，於有勝溪河床設置了河川與地下水水位及溫度觀測井，於七家灣溪及桃山北溪設置了河川水位計，並於復育中心的水井放置水位計。

根據七家灣河流域長時期氣象及流量分析之結果，發現就平均雨量、無降雨天數、降雨強度、平均流量、極端流量在年、月、乾季、濕季的長期變化而言並沒有顯著的變化趨勢；七家灣溪流量站的流量翻轉次數顯著增加，但每次翻轉的流量增加率跟減少率卻趨緩；整個七家灣河流域的降雨特性從 2002 年開始有較明顯的季節性變化，但 SPI 確有豐則越豐、枯則越枯的趨勢，可能影響棲地的穩定性，氣候變遷的影響評估有其必要性；環山站的溫度則顯示顯著的上升趨勢，但其鄰近的松茂卻有迥異的變化趨勢，建議需釐清。

有勝溪逕流係數偏低、退水速度快，加上其斷流處流量降低趨勢顯著，顯示有勝溪潛在斷流處具有較高斷流的風險，研究期間在 2016 年 7 月底至 9 月初間確實觀測到兩次斷流與復流的過程，並記錄了河水-地下水水位及溫度交互作用的現象，顯示河水與地下水水位間的差異和河床剖面的溫度變化此兩現象與河段發生斷流的潛勢高度相關，可做為斷流河段的判斷依據；利用福衛二號衛星影像紀錄到有勝溪及桃山北溪的斷流都反應在 $SPI < 0$ 的時期，顯示水文條件對於斷流發生的影響，然而七家灣溪主流的地下水提供一穩定的河川基流量，降低其斷流的潛勢；本研究所建議之低流量推估模式，得以合理推估近一個月無降雨所造成之流量降低現象，提供河溪生態低流量預警的良好工具。

Abstract

The project contract was signed on Jun. 28, 2016. The long-term record of air temperature, rainfall, streamflow and the rainfall-runoff relation have been analyzed. A low flow estimation model has been applied to Chichiwan Creek and Yousheng Creek to examine its capability. Field survey and streamflow measurement have been implemented for three potential fragmented reaches in Wuling area. Water-stage recorder and temperature probe have been installed in the riverbed of the fragmented reach in Yousheng Creek. Water-stage recorders were also installed in Chichiwan Creek and Toushan North Creek to monitor the water depth. Moreover, one more water-stage recorder (WL-1) has been installed in the well by Taiwan Salmon Eco Center.

According to the preliminary analysis on the long-term weather and streamflow record, no significant and consistent trend was found from the indicators of rainfall amount, no-rain day, rainfall intensity, streamflow amount, extreme streamflow at annual, monthly, and seasonal timescale. The reversals of streamflow in Chichiawan Creek have been significantly increasing, although both the rise rate and fall rate have become moderate. The rainfall pattern seems changed after 2002 while the seasonality of rainfall is clearer. SPI data reveal more extreme pattern, likely influencing the stability of the aquatic habitat. It would be essential to understand the impacts of climate change in advance. Air temperature at Huanshan Station has been significantly increasing. However, the neighboring Songmao Station revealed a significant decreasing trend.

Yousheng Creek is featured by low runoff coefficient and rapid recession. In addition, vivid phenomenon of hyporheic flow suggests Yousheng Creek has high risk occurring fragmented reaches. We did record a succession of losing and gaining processes. It is found the differences of water levels between river and groundwater and the temperature profiles in the riverbed could be two indicators deciphering the processes. The fragmented reach was found from satellite images while SPI is less than 0, indicating the hydrological controls on the occurrence of the fragmentation. The water level data at WL-1 reveals a stable groundwater source maintaining the base flow of the main stem of Chichiwan Creek and reducing the risk being fragmented. The low flow estimation model has been demonstrated to well estimate the streamflow in the recession period lasting for about one month, indicating a good tool for low flow warning system.

目錄

第一章	序論.....	1
1.1.	研究緣起與背景.....	1
1.2.	計畫目標.....	1
1.3.	前人研究.....	1
第二章	材料與方法.....	5
2.1.	氣象及流量測站資料.....	5
2.1.1.	雨量之分析指標.....	5
2.1.2.	氣象及流量測站資料.....	7
2.1.3.	趨勢分析方法.....	7
2.1.4.	退水常數分析.....	9
2.1.5.	低流量模擬.....	9
2.2.	復育中心之地下水井監測.....	9
2.3.	斷流河段監測.....	11
2.3.1.	流量觀測.....	11
2.3.2.	河床地下水位與溫度監測.....	11
第三章	結果與討論.....	16
3.1.	水文條件之變化趨勢.....	16
3.1.1.	平均雨量之變化趨勢.....	16
3.1.2.	無降雨天數之變化趨勢.....	16
3.1.3.	降雨強度之變化趨勢.....	16
3.1.4.	缺水指數之變化趨勢.....	16
3.1.5.	流量變化趨勢.....	17
3.1.6.	溫度變化趨勢.....	17
3.1.7.	降雨-流量之關係.....	17
3.1.8.	退水係數之結果.....	18
3.1.9.	低流量模擬之結果.....	18
3.2.	斷流河段之觀測結果.....	18
3.2.1.	有勝溪斷流處之流量變化.....	18
3.2.2.	七家灣溪斷流處之流量變化.....	19
3.2.3.	桃山北溪斷流處之流量變化.....	19
3.2.4.	潛在斷流處之水位觀測.....	20
3.3.	河床-河水交互作用觀測井之初步結果.....	20
3.3.1.	河水—地下水水位變化.....	20
3.3.2.	河水—地下水溫度變化.....	22
3.3.3.	河水—地下水溫度剖面變化.....	23

3.3.4. 復育中心地下水井之觀測.....	24
第四章 結論與建議.....	25
4.1. 結論.....	25
4.2. 建議.....	27
參考文獻.....	28
表格.....	31
圖片.....	46

圖目錄

圖 2.1. 各氣象及流量測站位置圖.....	46
圖 2.2. 求取 SPI 過程圖(摘錄自 Benjamin,2012).....	46
圖 2.3. 標準化降雨指標機率分佈圖(摘錄自經濟部水資源局,1999).....	47
圖 2.4. IHA 之分類表 (摘自覃炳皓, 2012)	47
圖 2.5. 基流量推估模式於卑南溪之推估結果 (摘自 Tung et al., 2004)	48
圖 2.6. 於復育中心旁水井進行水位監測.....	48
圖 2.7. 地下水位變化分析:(a) 受氣壓影響,(b) 受降雨影響,(c) 受抽水影響	49
圖 2.8. 沈水式壓力式水位計觀測井中安裝示意圖.....	49
圖 2.9. In-Situ Troll 400 沈水式壓力式水位計:(a)沈水式壓力轉換儀與資料記錄器(含電池), (b) 傳輸電纜,(c) 電腦連接纜線,(d) Mini-Diver,(e) In-Situ Baro Troll (摘自 https://in-situ.com/products/water-level-loggers/level-troll-700-data-logger/)	50
圖 2.10. 桃山北溪(左圖)、七家灣溪(中)及有勝溪(右)曾斷流之河段.....	51
圖 2.11. 流速面積法子斷面切分示意圖.....	51
圖 2.12. 有勝溪河床上水位及溫度監測井之位置(紅點,共三處)及相關照片(已遭 2016/9/15 侵台之梅姬颱風沖毀)	52
圖 2.13. 上游河段水位及水溫觀測井(Well A)之配置圖(已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖 毀)	53
圖 2.14. 中游河段水位及水溫觀測井(Well B)之配置圖(已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖 毀)	53
圖 2.15. 下游河段水位及水溫觀測井(Well C)之配置圖(已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖 毀)	54
圖 2.16. Minilog-II 自記式溫度計.....	54
圖 2.17. 降雨、地表水及地下水之時間序列(摘自 http://me.water.usgs.gov/gwswpi.html) .	55
圖 2.18. 河水與河床間之交互作用:(a) 獲得河川、(b) 流失河川、(c) 流失不連通河(摘 自 Brunner et al., 2011)	55
圖 2.19. 理想中河道與地下水可能發生的四種交互作用:(a) 河川由底層沉積物獲得補注, (b) 河川補注至底層沉積物,(c) 無水流事件的間歇性河道,(d) 有水流事件的間歇 性河道(摘自 Stonestrom and Constantz, 2003)	56
圖 2.20. 間歇性河流之河床表面溫度變化(摘自 Constantz et al., 2001)	56
圖 2.21. 河床沉積物年(日)溫度包絡線之關係圖(摘自 Stonestrom and Constantz, 2003)	57
圖 3.1. 桃山雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢.....	58
圖 3.2. 思源雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢.....	59
圖 3.3. 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年內平均流量增加率.....	60
圖 3.4. 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年內平均流量減少率.....	60
圖 3.5. 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年流量逆轉次數.....	61
圖 3.6. 有勝溪流量站及七家灣溪流量站集水區 1996-2014 年間平均之月降雨與月流量之關係 圖.....	61

圖 3.7. 七家灣溪及有勝溪流量之退水常數與退水段啟始流量之關係圖.....	62
圖 3.8. 低流量推估模式模擬七家灣溪連續 7 天、14 天及 21 天退水之流量結果.....	63
圖 3.9. 近距離展示低流量推估模式模擬七家灣溪連續 7 天(左圖)及 21 天(右)退水之流量結果	64
圖 3.10. 低流量推估模式模擬有勝溪連續 7 天、14 天及 19 天退水之流量結果.....	65
圖 3.11. 近距離展示低流量推估模式模擬有勝溪連續 7 天(左圖)及 19 天(右)退水之流量結果 66	66
圖 3.12. 福衛二號 2010-2015 年有勝溪斷流處之影像 (箭頭所指之處懷疑為 2013 年新生之崩 塌地)	67
圖 3.13. 有勝溪斷流處流量量測位置圖 (攝於 2016/7/1)	67
圖 3.14. 有勝溪於 Well B 附近開始發生斷流 (照片左邊為下游方向, 攝於 2016/8/10)	68
圖 3.15. 有勝溪於 Well C 附近斷流之情形 (照片朝向下游, 攝於 2016/8/10)	69
圖 3.16. 有勝溪 Well A 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形, 研究河段河床抬升近 1 公尺 (照片朝向上游, 左右兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)	69
圖 3.17. 有勝溪 Well A 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲後之情形(照片朝向下游, 攝於 2016/11/9)	70
圖 3.18. 有勝溪 Well B 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形, 河水已改道(照片朝向下游, 左右兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)	70
圖 3.19. 有勝溪 Well C 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形 (照片朝向下游, 左右兩照片 分別攝於 2016/8/11 與 2016/11/9)	70
圖 3.20. 有勝溪 Well C 下游處於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形 (照片朝向下游, 左右 兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)	71
圖 3.21. 有勝溪 2016/7/1 逐漸隱沒之溪流分支 (箭頭為拍攝位置, 箭頭方向為拍攝中心方向)	71
圖 3.22. 有勝溪 2016/7/1 河川隱沒分支下的含水情形	72
圖 3.23. 有勝溪 2016/7/14 伏流水 (照片右側) 與主流 (左側) 水色有顯著的差異	72
圖 3.24. 七家灣溪斷流處流量量測 (C') 位置圖 (攝於 2016/7/14)	73
圖 3.25. 七家灣溪斷流處流量量測 (C) 位置圖 (攝於 2016/9/8)	73
圖 3.26. 桃山北溪斷流處流量量測位置圖 (攝於 2016/7/14)	74
圖 3.27. 2016/7/15 至 9/13 間於有勝溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形。為了清楚展示 兩個事件各河段河川退水的情形, 右邊兩張圖將 Well A 及 Well B 退水的啟始水位平 移 (以虛線表示) 至與 Well C 相同。.....	74
圖 3.28. 2016/8/11 至 9/7 間於桃山北溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形。為了清楚展 示各河段河川退水的情形, 右邊兩張圖將 T1 及 T3 退水的啟始水位平移 (以虛線表示) 至與 T2 相同。.....	75
圖 3.29. 2016/9/8 至 9/13 間於桃山北溪 (T1) 及七家灣溪 (C1) 觀測河川平均日水位之變化 及退水情形。.....	75
圖 3.30. 上游井 (well A) 河川與地下水水位歷線圖	76
圖 3.31. 中游井 (well B) 河川與地下水水位歷線圖	77

圖 3.32. 下游井 (well C) 河川與地下水水位歷線圖	78
圖 3.33. 上游井 (well A) 的河川與地下水溫度歷線圖	79
圖 3.34. 中游井 (well B) 的河川與地下水溫度歷線圖	80
圖 3.35. 下游井 (well C) 的河川與地下水溫度歷線圖	81
圖 3.36. 上游 1 吋井 (well A) 不同深度的地下水溫度歷線圖	82
圖 3.37. 上游 1 吋井 (well A) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (8/2 - 8/5)	83
圖 3.38. 中游 1 吋井 (well B) 不同深度的地下水溫度歷線圖	84
圖 3.39. 中游 1 吋井 (well B) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (8/2 - 8/5)	85
圖 3.40. 下游 1 吋井 (well C) 不同深度的地下水溫度歷線圖	86
圖 3.41. 下游 1 吋井 (well C) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (7/27 - 8/5)	87
圖 3.42. 上游井 (well A) 溫度隨深度變化剖面圖	88
圖 3.43. 中游井 (well B) 溫度隨深度變化剖面圖	88
圖 3.44. 下游井 (well C) 溫度隨深度變化剖面圖	89
圖 3.45. 櫻花鉤吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 水位歷線圖	90
圖 3.46. 櫻花鉤吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 溫度歷線圖	91
圖 3.47. 2004 年開始思源 (自動) 雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢	92
圖 3.48. 2004 年開始桃山雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢	92

表目錄

表 2.1. 各氣象及流量測站坐標及紀錄時間.....	31
表 2.2. 乾旱指標分級對照表(摘錄自 McKee et al. (1993)).....	32
表 2.3. In-Situ Level Troll 400 沈水式壓力式水位計及 Baro Troll 自計式氣壓計之規格.....	32
表 2.4. Eijkelkamp Mini-Diver 沈水式壓力式水位計之規格.....	33
表 2.5. Mini-Log II 自計式溫度計之規格.....	33
表 3.1. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量值[mm].....	34
表 3.2. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	34
表 3.3. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者).....	34
表 3.4. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均無降雨天數[天].....	35
表 3.5. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季無降雨天數之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	35
表 3.6. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季無降雨天數之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者).....	35
表 3.7. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均降雨強度[mm/day].....	36
表 3.8. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季降雨強度之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	36
表 3.9. 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季降雨強度之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者).....	36
表 3.10. 各雨量測站於觀測期間之 SPI-3、SPI-6、SPI-9 及 SPI-12 之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	37
表 3.11. 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均流量[cms].....	38
表 3.12. 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季流量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	38
表 3.13. 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季流量之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者).....	38
表 3.14. 各流量測站於觀測期間之極端流量之平均值[cms].....	38
表 3.15. 各流量測站於觀測期間之極端流量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註).....	38
表 3.16. 各流量測站於觀測期間之極端流量之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者).....	38
表 3.17. 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年流量逆轉次數.....	39
表 3.18. 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年流量逆轉次數之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註) ...	39
表 3.19. 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年	

流量逆轉次數之變化率（Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者）	39
表 3.20. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度[度 C]	39
表 3.21. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度之變化趨勢（Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註）	39
表 3.22. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度之變化率（Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者）	39
表 3.23. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之平均[度 C]	40
表 3.24. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之變化趨勢（Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註）	40
表 3.25. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之變化率（Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者）	40
表 3.26. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之平均[度 C]	40
表 3.27. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之變化趨勢（Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註）	40
表 3.28. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之變化率（Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者）	40
表 3.29. 有勝溪斷流處流量量測值[cms].....	41
表 3.30. 七家灣溪斷流處流量量測值[cms].....	41
表 3.31. 桃山北溪斷流處流量量測值[cms].....	41
表 3.32. 有勝溪觀測井基本資料與儀器配置.....	42
表 3.33. 上游井（well A）溫度敘述統計資料表	43
表 3.34. 中游井（well B）溫度敘述統計資料表	44
表 3.35. 下游井（well C）溫度敘述統計資料表	45

第一章 序論

1.1. 研究緣起與背景

為了維持櫻花鉤吻鮭的永續生存，政府長期支持武陵地區的調查研究，不管是藻類、生態模式建構、水文與物理棲地、水質與營養鹽來源、水溫、水棲昆蟲、魚類、壩體改善工程等研究等，都與水文的歷程息息相關，然而在全球暖化的影響下，臺灣氣候有趨於極端化的趨勢，過去極端氣候大多著重於洪水的研究，例如：洪水對於櫻花鉤吻鮭族群的影響已經透過七家灣溪一號防砂壩改善工程疏通鮭魚迴游的路徑，然而枯水期流量對櫻花鉤吻鮭的影響並不亞於豐水期的影響卻較少被討論，枯水期的流量小、流速慢、水溫低、溶氧高等特性，或許是這些環境條件的特殊性，使得櫻花鉤吻鮭在演化的過程中選擇以枯水期做為其繁殖的季節，因此枯水期溪流環境的變化更直接衝擊到櫻花鉤吻鮭下一代的發展，然而因為枯水期的流量小、流速慢等特性，而使得武陵地區在枯水期期間甚至有斷流的情形，斷流造成棲地的縮減將直接衝擊櫻花鉤吻鮭，其重要性應高於上述的研究課題卻鮮少被探討，河川少了水更遑論溪流生態，在氣候變遷的影響下可能越形嚴重，值得進一步研究。降雨、流量等水文條件的改變將直接關係到斷流的發生，而河床與河水的交互作用更是瞭解斷流發生所在河段的重要關鍵，本年度計畫將透過分析七家灣溪及有勝河流域長時間的降雨及流量資料，並透過地下水位的監測，瞭解枯水期，尤其是多日不降雨情況下流量的變化趨勢，更針對局部河段的河道—河水交互作用進行量測，瞭解斷流發生的可能原因，提供預警的機制。所收集資料與分析結果將可用於後續棲地改善之評估依據。枯水期正值鮭魚的繁殖季節，維持枯水期的棲地完整才是櫻花鉤吻鮭得以永續生存的關鍵因素。

1.2. 計畫目標

本研究欲利用近兩年的時間，從水文條件的改變以瞭解七家灣溪未來發生斷流的潛勢及從河床—河水交互作用以瞭解七家灣溪斷流的現象及原因，做為溪流生態保育永續發展的科學依據。其第一年具體的工作項目如下所示。

1. 完成流域歷史降雨、流量的趨勢分析，並瞭解降雨—流量之變化關係
2. 完成低流量的模擬，成功推估連續不降雨日情況下流量歷線退水段的流量
3. 開始監測地下水位，彙整監測資料並初探地下水位變化與流量變化之關係
4. 完成斷流河段的現地探勘，選取適合安裝設備之河段以利枯水期期間的資料蒐集

1.3. 前人研究

在氣候變遷的影響下，最令人擔憂的即是流量的極端化，李宗祐（2003）的研究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，防洪、抗旱與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，流量驟降可能使得水生動植物棲地面大規模的減少，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；童慶斌（2007）也在其國科會研究計畫案中以雪霸國家公園網站敘述櫻花鉤吻鮭之生存限制溫度為 16 度，及產卵所需的 12 度（楊正雄，1997），評估氣候變遷下可用棲地範圍的變化。其根據現階段氣溫及降雨統計特性，再透過氣候合成工具產生出不同氣候變遷情境下未來可能發生的氣象條件，再帶入水溫模式中評估氣候變遷下可用棲地範圍，結果顯示在現階段的氣候條件下，7、8、9 月三號壩以下河段已經超過 16 度的水溫限制，氣候變遷下氣溫的升高，將會逐漸對可用棲地範圍造成影響；若從產卵的環境條件來看，現階段氣候條件下，產卵季節（10、11、12 月）三號壩下游亦已經超過其最適合的產卵溫度。事實上在這些河段內，都還是可以看到櫻花鉤吻鮭活動與產卵的蹤跡，因為魚具有移動的能力，有選擇往較低溫處活動的能力，但該研究模擬的是潛在的危機，也就是在 1 天之內有任何一刻超過其最適合之溫度條件，則視為不可用棲地，此種表現方式才能將櫻花鉤吻鮭具有的潛在危機完全展現出來；而配合 CGCM2 氣候模式的輸出模擬氣候變遷情境下可能的棲地範圍變化，結果顯示氣候變遷下適用棲地縮減的趨勢相當顯著，長期影響下有半年期間櫻花鉤吻鮭無法生活在適當的水溫環境，冬季期間雖然棲地仍適合成魚生存，但是魚卵存活的空間已經越來越小。總括而言，水溫在氣候變遷的影響下，適用棲地縮短、棲地不適用時間拉長，對於對水溫反應更敏感的幼魚而言，這樣的變化趨勢勢必造成更大的影響，幼魚的數量減少將直接影響到維持櫻花鉤吻鮭族群的數量。面對日益增加的水溫，Lee et al. (2012) 曾針對七家灣溪河川兩岸植栽的降溫效果進行評估，藉由模式模擬不同植栽策略下的水溫狀況。結果顯示，七家灣溪河岸植栽的仰角必須高於 50 度，才能提供有效之遮蔽效應，所有植栽策略當中，以上游植栽仰角為 70 度的降溫效果最好，但在夏季因太陽高度角接近 90 度，其降溫效果仍有限。該研究建議以上游植栽為優先選擇方案，西岸植栽次之，因為上游河道寬度相對較窄，有機會讓兩岸的樹冠層延伸到河道中央，若上游植栽角度到達 90 度，則夏天會多出 1 公里適合生存的棲地。另外，研究中也發現地形走勢提供了天然的遮蔽效應，研究區中東西走向河川的水溫系統性的比南北走向河川來得低，為櫻花鉤吻鮭選擇域外放流棲地提供了參考準則。研究中植栽策略的模擬及地形與水溫關係的分析可提供有關單位作為復育棲地的重要參考依據，以減緩全球暖化所造成的衝擊。當氣候變遷使生態系統面臨崩潰時，河岸植栽能提供溪流及其周圍生態系一個中短期的暫時庇護所（Davis, 2010），減緩水溫上升的速度，然而，在枯水期流量降低與氣溫持續升高的威脅下，上游水溫的持續升高，仍可能超過生物所能容忍的極限，因此，如何面對長期的溫度變化，將是未來研究的一大考驗。但如果流量過低造成斷流的現象，再多集水區尺度的補救措施也將無濟於事。

在物理棲地方面，武陵地區也一直有再持續進行調查。葉昭憲（2003）發現河道受到壩體建造施工與林木等阻礙物的影響，河道地形變遷造成該河段水深與流速有些許變化，這一改變有可能影響河道棲地環境，與河中生物；葉昭憲（2004）在延續性的調查中發現，七家灣溪或高山溪之各河段之大粒徑底質皆呈現增加的趨勢，為粗粒化之底質組成，一號壩以下至匯流口，因高程落差大，床面巨礫較多，再加上來自上游之泥砂量較大，多呈現階梯狀河

床。匯流口之對岸有受洪水衝擊之趨勢，並有明顯之泥砂堆積現象；並於葉昭憲（2005）調查中提出，不論在高山溪或七家灣溪的觀測河段中，十月份調查的粒徑及流量皆呈現出偏大的趨勢，原因是颱風季大水來襲將大多數的細顆粒帶往下游，而使得河床底質呈現粗粒化的趨勢，高山溪河道中過去存在許多的倒伏木，雖然部分倒伏木的排列會恰巧形成類似丁壩或潛壩之機制，進而產生挑流造灘或進一步形成象徵穩定的階梯狀河床；但是倒伏木在高山溪二號壩上游面壩口阻塞的情形所可能造成的問題，已在倒伏木清除後有所改善。在七家灣一號壩改善工程完工後，亦有若干計畫針對壩體改善工程對物理棲地的影響進行調查，王筱雯（2012）認為七家灣溪側岸屬沖積岸壁，因降雨事件而造成之岸壁崩塌乃為合理之河相變動發展，雖因此增加河道泥沙運移量，但較一次大型崩塌所可能造成之更大危害之風險為小，位於壩下游河段之臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心未來若發生如 50 年重現期距以上之颱風，其滿岸流量會造成溢淹危險，期望藉由長期的環境調查與紀錄提供國內壩體改善河相變化之與環境衝擊之重要參考依據。王筱雯（2015）進一步由 2013 年 6 月 26 日、2014 年 5 月 17 日及 2015 年 3 月 20 日三次調查得知，於非汛期期間，河道坡度皆由陡變緩，以致通洪斷面減少之情形。2013 及 2014 年隨後發生之蘇力颱風(近 5 年重現期距流量)、麥德姆颱風(近 2 年重現期距流量)之後，皆使下游河道可通洪流量增加，其評估臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道淹水潛勢，目前河道通洪能力可容納 20 年重現期距流量之颱風事件。葉昭憲（2015）在壩體改善工程後表示流量大小會影響石頭的搬運與岸邊坡地侵蝕與堆積，有勝溪有些河段有發現這樣的現象，而壩體的建設可能會影響河道變遷，了解並掌握河道變遷才能規畫後續的建設。在理想狀況下，棲地改善工程應針對渠道穩定(包括河床及河岸)、水力狀態之影響(如流速或水深)、以及河道之暴雨含量等三方向加以評估(Hey, 1996)。其中，增加河川型態之多樣性不僅有助於河川本身之承載力(carrying capacity)，並且能提供魚類生命週期中各階段所需之棲息環境。此外，多樣性之河川型態也可提供給河川周圍賴以生存的動植物生態所需的自然歧異性(natural diversity)，直接或間接地對所欲保育的河川生物提供更佳的棲息環境(Larsen, 1996)。除此之外，曾晴賢（2003）於 5/31~6/4 執行櫻花鉤吻鮭族群數量調查時，發現桃山北溪下游斷流乾枯曾經達到匯流點以上約 175 公尺左右，並有族群被小水窪隔絕的現象；葉昭憲（2015）亦在有勝溪進行河道斷面量測時，發現汛期前面均有斷流的現象，斷流處正位於成功域外放流之羅葉尾溪下游，將直接影響到櫻花鉤吻鮭棲地的完整性；根據武陵工作站同仁指出，甚至在 2015/3/5，在七家灣溪二號壩至三號壩間緊鄰大崩塌前也發生 200-300 公尺長的斷流，凸顯斷流研究的重要與急迫性。

過去物理棲地的相關研究大多著重在洪水對於物理棲地產生之影響，然而河道沉積物的沖蝕與堆積影響著河床底質與地形的改變，進而影響到河床與河水間的交互作用，在探討地表水與地下水的交互作用時，河水透過河床（streambed）沈積物入滲至地下水中（或地下水透過河床補注至河川）扮演極為重要的角色，兩者的交互作用不僅為水文循環中非常重要的一環，對於整個水文生態環境(ecohydrological system)的影響更是舉足輕重。河床(streambed)已被公認為河水(地表)與鄰近含水層(地下水)間流體、營養鹽及生物間交換之重要通道，而河床的物理與化學變化過程將與地表與地下水之水文交互作用有著高度相關。河水通過河床沉積物所產生之化學反應會改變水中的組成成分並影響其水質(溶氧、硝酸鹽、氯離子等)，水中的溶解物質會因礦物溶解、水流和其他反應，導致水中溶質濃度發生變化。伴隨著水流

通過河床沈積物時的化學反應，將使水中溶質之飽和度增加，若此地下水流再度流入河川，地下水的化學組成將再度改變，並立即影響原有河川的化學組成。河水與淺層河床內的地下水交互作用又稱之為伏流水區的交互作用（*hyporheic zone processes*），與一般所謂的地下水流最主要的差異在於，地下水流主要為單一方向流動（*uni-direction*，例如：河水往下入滲至河床或河床內的地下水補注至河川），伏流水的流動方向則是雙向的流動（*bi-direction*，例如：河水往下入滲至河床，爾後在短暫的時間內又經由河床補注至河川），伏流水的流動路徑因探討的尺度不同而有所差異，伏流水與地下水間的區分往往也因尺度探討上的差異而有所不同（Boano et al., 2014）。不論是伏流水或地下水，由於流動路徑上的差異，流經環境或孔隙顆粒間的改變，亦將造成水質成分的顯著不同，其間的交互作用已成為影響水質變化，甚而污染物質傳輸或其他生態相關物種改變的基礎過程，進而擴大影響範圍至整個河川生態環境或集水區流域，此相關議題在國外已受到許多研究團隊的重視與關注（Sophocleous, 2002; Boulton et al., 2010; Hester and Gooseff, 2010; Krause et al., 2014）。此作用在枯水期的影響應該更為顯著，但相關的探討在過去的研究中並未多見，但過去的調查結果卻提供此計畫重要的參考依據。欲準確的描述河床內地表水與地下水之交互作用依然為一項艱困的任務（Anibas et al., 2009），主要受限於地表水與地下水間之流體通量（*water flux*）無法直接進行量測，自 2000 之後，不論是美國、澳洲及歐洲各國，開始廣泛的以溫度為示蹤劑，在研究區域內利用河水與河床長時間溫度監測資料及不同深度的溫度剖面資料，進行河水與河床的入滲機制或交互作用研究（Bastola and Peterson, 2016），透過佈設數個深度約 1.5 -2.0 m 的監測井，在每個監測井中，於 4 -6 個不同深度埋設水位計及溫度探測儀，分別進行地下水位監測與河床溫度量測，藉此觀測河床—河水間交互作用之情形。

第二章 材料與方法

2.1. 氣象及流量測站資料

本計畫預期利用七家灣流域內的雨量資料，探討雨量變化的趨勢，並利用七家灣溪上的七家灣流量站及有勝溪上的有勝溪流量站，探討流量變化的趨勢，建立連續不降雨天數時的低流量推估模式，為此蒐集之氣象及水文測站資料如表 2.1 所示，而其所在的位置如圖 2.1 所示。

2.1.1. 雨量之分析指標

雨量分析的指標包含了武陵地區各雨量測站之年、月、乾溼季及標準化降雨量指標 (Standardized Precipitation Index, SPI) 進行趨勢分析，其中標準化降雨量指標是由 McKee et al. (1993) 發展並首先應用在科羅拉多地區之評估該地區乾旱可用水量之方法，SPI 可以針對不同時間尺度分析該時期降雨量與歷史雨量相比是否有不足或缺少的狀況，SPI 指標分析數值可反應乾旱對於不同地區的可用水量之影響，本計畫欲利用 SPI 來估算七家灣溪集水區從過去到現在之乾旱指數，並從中了解 SPI 乾旱指數與河川斷流之關聯性，分析了解降雨的趨勢，後續將利用水文模式配合大氣環流模式氣候變遷預設情境之降雨及氣溫推估未來河川流量資料，有效了解氣候變遷下未來河川流量之變化趨勢。SPI 之計算方程式如下：

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

其中：

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

x 為月降雨量， $x > 0$

α 為形狀參數， $\alpha > 0$

β 為比例參數， $\beta > 0$

計算參數 α 與 β 之方法為最大概似法，如以下所示

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right]$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

其中：

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

n 在這裡為所使用之降雨量參數

最後可由這兩參數決定不同時間尺度下之常態化累積降雨機率，如下所示

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

假設 $t=x/\beta$ ，則上式成為

$$G(x) = \frac{1}{\gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

考慮在部分樣本(降雨量)為零之狀況下，Gamma分布之累積機率方程式可修正如下：

$$H(x) = q + (1-q)G(x)$$

其中， q 為總樣本 n 中具有 m 個樣本為零的機率，即 $q=m/n$ 。最後再由降雨量尋求其累積機率 $H(x)$ ，再由相同之累積機率 $H(x)$ 利用標準化之過程求其SPI值，就是所謂之標準化降雨指標SPI，其求取過程如圖2.2所示。由於若每次計算都需由圖形來求SPI值，將造成不便與可能誤差過大之狀況，所以可以先從降雨量求取累積機率值，再由標準化之公式利用累積機率求取SPI值，其公式為：

$$\text{當 } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad z = \text{SPI} = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

$$\text{當 } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad z = \text{SPI} = + \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

其中：

$$\text{當 } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x)^2} \right)}$$

$$\text{當 } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)}$$

其中：

$$c_0 = 2.515517 \quad c_1 = 0.802853 \quad c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788 \quad d_2 = 0.189269 \quad d_3 = 0.001308$$

經過轉換之標準化降雨指標將會變成標準化與常態化分布，如圖2.3所示，而乾旱指數對照表則如表2.2所示。

其中SPI不同的延時具有不同的缺水意義，以下僅針對SPI-1、SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12，也就是1個月、3個月、6個月、9個月、12個月延時降雨量於缺水指數上的意義進行說明。SPI-1反映的是短時間的狀態，其應用於乾旱氣候類型地區並與短期土壤濕度及生長季作物壓力密切相關。SPI-1近似作物濕度指數(Crop Moisture Index)所代表的條件，而他是Palmer乾旱嚴重性指數(Palmer Drought Severity Index)的一部分。在一個月內降雨量通常較低的區域，即使相對偏離平均值較小，也可能產生數值很大的負或正的SPI而造成誤導。

SPI-3提供了特定期間3個月的降水與歷史紀錄中每年同樣3個月期間的降水總量的比較。SPI-3反映短期和中期的溼度條件，提供季節性的降水指標。與SPI-1一樣，在給定任何3個月通常都是乾旱的地區，SPI-3也容易被誤解。負值或正值很大的SPI可能與總降水量有

關而與平均沒有太大的差別。這可以解釋加州、北非與南歐的地中海型氣候，那裡降雨很少或是分布在一年中的不同時期。因為這些時期的特徵是少雨，相應的歷史總和也是小的，且與平均值相對小的誤差值可以導致大的正值或負值的 SPI。相反的，這個時間序列對於世界上某些季風地區是個很好的指標。

SPI-6 分析為連續 6 個月的降水比較同一地區連續 6 個月的所有前幾年的降雨數據得來，SPI-6 分析表示季節或是年中降雨趨勢，他仍然可以被思考是較 Palmer Index 條件來的敏感的時間尺度，SPI-6 可以非常有效地顯示在不同季節的降水，SPI-6 之信息會開始取決於地區與這一年的時間反應異常流量與水庫水位之信息。

SPI-9 指標顯示跨季節之降雨變化，乾旱通常會發生超過一個季節或者是更長，SPI 指數小於 -1.5 可以顯示這段時期有較乾的狀況，並且可能明顯衝擊農業或其他活動上，在這一時間尺度的分析是短時期乾旱可能被串聯起來成為長時期的乾旱的起點。

SPI-12 反應長時間尺度降雨型態，SPI-12 是一個連續 12 個月的降水比較同一地區連續 12 個月的所有前幾年的降雨數據得來，短時期的降雨的累積成果可能會高於低或正常，比較長的 SPI 往往會傾向於 0，除非有發生較為明顯的乾或濕的趨勢，SPI-12 應用的分析包含流量，水庫水位，或是長時間地下水水位變化為主。

2.1.2. 流量之分析指標

流量分析是利用 Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) 來進行各種流量分析，IHA 是一個利用長時間觀測的流量資料，以流量的量、時間、頻率、期距及變化率等面向探討其變化趨勢的工具。依據流量特性 IHA 分為 5 組，各組 IHA 所包含之參數如圖 2.4 所示。第 1 組參數考慮流量的量的特性，主要用於評估各月份流量大小，包括一月至十二月平均流量，共計 12 個 IHA；第 2 組參數考慮流量的頻率及延時的特性，主要用於評估極端流量的狀況，包括年最大及最小 1 日、3 日、7 日、30 日及 90 日流量，另有一參數為年最小 7 日流量對年平均流量的比值，此參數可視為河川的基流特性，本組共計 11 個 IHA；第 3 組參數考慮流量的時間特性，主要用於評估極端流量的發生時間，包括年最大及最小 1 日流量的發生日期，共計 2 個 IHA；第 4 組參數考慮流量的頻率及延時的特性，主要用於評估高流量及低流量的發生頻率及延時，包括每年高流量及低流量的發生頻率及延時，共計 4 個 IHA。藉由 IHA 所產生出有關流量的各種分析後，利用 Mann-Kendall 檢定法來觀察歷年來流量指標相關變化趨勢，分析七家灣溪流域內流量長期趨勢是否有改變，做為評估未來斷流發生機會的參考依據。

2.1.3. 趨勢分析方法

Mann-Kendall

Mann-Kendall (MK) 檢定法是一種無母數統計法，由 Kendall tau (τ) 發展而來(Mann, 1945；Kendall, 1975)，可用來檢定兩組資料之間的關係(rank correlation)，如將其應用在各種

水文性質的統計，其中一組數列通常為時間序列，另外一組數列則為隨著時間變化的資料序列。水文資料中，常常存在極端值或是資料缺漏，但此兩項因素並不會嚴重影響檢定值 S 為其優點。

MK 檢定法判斷趨勢的核心方法，是經由比較數列前後數值的大小來判定是否有一定程度的趨勢。將虛無假設定為該數列並不存在明顯趨勢，檢定統計值 S 定義為：

$$\text{Sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, & X_j - X_i > 0 \\ 0, & X_j - X_i = 0 \\ -1, & X_j - X_i < 0 \end{cases}, S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sign}(X_j - X_i)$$

{X1、X2、X3、...、Xn} 為依照時間{T1、T2、T3、...、Tn} 排列的流量資料，n 為資料個數。當 n 趨近於無限大時，S 的機率分布曲線會呈現常態分佈，其平均值為 0；另外，在 n 大於 10 的情形下，S 的標準差可用以下近似解代入：

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

若其中一個數列中出現重複項，在本研究中，長時間的河川流量資料數列很有可能會有重複的數值，因此，Kendall 修改上式近似解為：

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{u=1}^v u(u-1)(2u+5) \right]$$

u 為資料數列中的重複數值的個數；最後，將統計檢定值 S 進行標準化(normalization) 成為 Z 值，如下所示：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma}, & S < 0 \end{cases}$$

當 Z 值為正數時，表示該數列具有上升趨勢；相對地，當 Z 值為負數時，表示該數列具有下降趨勢。此時，所求得的 Z 值需再經過顯著性檢定，方可決定其趨勢是否顯著。假設顯著水準為 α ，若 $|Z| \geq Z\alpha$ ，則拒絕虛無假設，表示該數列擁有明顯趨勢，反之則無明顯趨勢。本研究使用的顯著水準 $\alpha=0.05$ ，若 $|Z| \geq 1.96$ 則該數列存在顯著趨勢，若 $|Z| < 1.96$ 則該數列不存在顯著趨勢。

Theil-Sen 推估法

Theil-Sen 推估法(Theil, 1950 ; Sen, 1968)常被用來計算趨勢的斜率，趨勢的斜率 β 定義如下：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right), \text{ for all } i < j$$

$$X(t) = \beta t + C$$

$$X(t) = X_1 \sim X_n, t = 1 \sim n$$

利用流量資料序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$ 和時間項 t 的中位數代入上式，可求出常數項的 C 值。本推估法計算出的斜率值 β 不同於使用線性回歸(linear regression)所求出的斜率，因為取其中位數值，所以具有不受極端值影響的特性，分析時經常與 MK 檢定法一起使用(Burn et al., 2002; Gocic and Trajkovic., 2013; Kriegel et al., 2013)。當斜率 β 為正數時，代表資料擁有上升趨勢；反之，當斜率 β 為負數時，代表資料擁有下降趨勢。

2.1.4. 退水常數分析

流量歷線中基流退水段，代表地下水流出的情形，關係著河川低流量之變化情形，而此退水的速度常以退水常數 K 來表示，Barnes (1939) 提出一經驗公式，公式中可利用退水曲線的斜率來表示流量歷線退水的快慢程度，即 $Q_t = Q_0 K^t$ ，其中 Q_0 表示退水段的啟始流量， Q_t 表示經過 t 時間後 (t 在本研究的單位為天) 的流量。我們假設在一場暴雨過後，河川流量在到達峰值後的 N 天為基流退水段，其中 $N=0.83A^{0.2}$ ， A 為集水區面積 (km^2)，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來計算 K 值 (小於 1)。 K 值越大則表示退水越慢，反之， K 值越小則表示退水越快。

2.1.5. 低流量模擬

本計畫利用 Tung et al.(2004)於 Hydrological Processes 期刊發表利用 Boussinesq equation 推導基流量預測模式，推估七家灣溪及有勝溪之退水段流量，其方程式如下所示。

$$\frac{1}{Q_t} = C + 2 \frac{1}{Q_{t-T}} - \frac{1}{Q_{t-2T}}$$

其中 Q_t, Q_{t-T}, Q_{t-2T} 分別為乾旱時期連續三天之河川流量，即基流量。其以 $C=0$ 的條件下推估卑南溪的基流變化如圖 2.5 所示。

2.2. 復育中心地下水井之監測

研究中並在復育中心旁的地下水井設置水位計，做為武陵地區地下水變化情形的參考依據(圖 2.6)。地下水位之變動受諸多因素影響，包括：海潮(ocean tide)、固體潮(earth tide)、氣壓(圖 2.7a)、降雨(圖 2.7b)及人類活動(圖 2.7c)等。受壓含水層(confined aquifer)

與自由含水層 (unconfined aquifer) 對於氣壓之反應不同，自由含水層對於氣壓反應，主要受控於非飽和層 (unsaturated zone) 的厚度、地質材料之滲透性等因素，且地下水位最終將與大氣壓力達到平衡，地下水位會隨時間回復到原本位置，而受壓含水層對於氣壓反應則來自於上層阻水層 (aquitard) 將自地表的承壓變化直接傳遞至與含水層相接的交界面，部分壓力由水體與地質材料吸收，抵銷後的壓力透過地下水位反應，受壓含水層之地下水位對應地大氣壓力變化會持續反應，且水位變化型態與大氣壓力變化型態相似。

降雨為地下水位變化之主要影響因素，降雨形成地表逕流並匯集至河流，期間受重力沿土壤及岩石空隙入滲地下，並影響含水層所承受的地表荷重。地下水位面起伏型態會與地形變化相近，而降雨對地下水位之影響幅度取決於地表地質水文條件，最終呈現的地下水位反應該含水層承受的荷重變化以及補注 (recharge) 與排水 (discharge) 平衡後的結果。降雨對地下水位的影響可分為短期大量降雨與季節性降雨，大雨過後，如颱風期間，短期內帶來豐沛的雨量，充分補注地下水，使得地下水位迅速上升。在乾濕季節分明的區域，豐水期為地下水補注之重要時期，而枯水期補注量大幅減少，地下水位在豐枯水期交替下呈現週期性的規律變化。

本研究計畫以壓力式水位計進行地下水位監測工作，壓力式水位計的主要元件包括：沈水式壓力轉換儀 (submarine pressure transducer)、壓力感應儀、傳輸電纜、資料記錄器及電腦連結纜線。沈水式壓力轉換儀屬於電阻式轉換儀的一種，主要利用壓阻原理進行量測，現今沈水式壓力轉換儀的精度與解析度已相當精進。沈水式壓力轉換儀與壓力感應儀及資料記錄器整合之後，即為壓力式水位計，能直接置入水面下量測地下水位或地表水位，由於水位計已將資料記錄器進行整合，因此可收發數月至數年的資料。

沈水式壓力式水位計之操作與設定需考量研究目的與現地狀況，壓力計直徑一般介於 1-2 公釐，適於 2 吋井徑以上之觀測井。沈水式壓力式水位計 (或沈水式壓力轉換儀) 應安裝於一固定的穩定懸掛點，垂直放至適當深度，該深度應為井水位最低季節變化範圍以上，以確保旱季最低水位時仍能確實紀錄地下水位變化，並置於該轉換儀最大承載壓力範圍內，避免承壓過高 (圖 2.8)。此外，因訊號強弱與傳輸電纜長度呈反比，纜線越長訊號強度越弱，故選擇可設置之深度範圍內時，仍不宜放置過深以免影響資料品質。水位計所設置的觀測井應儘量避免人為的干擾，如：抽水，所預定監測之特定含水層的地下水位，觀測井在其特地含水層深度應進行開篩，使觀測井內之井水高成充分反應含水層之地下水位。

由於研究區域屬於多雨潮濕的環境，且長期監測下，地下水之腐蝕性應予以考量，因此在水位計選配時，應以較高耐用性之水位計為首要選擇。本研究計畫選用以 In-Situ 公司所生產的 Level Troll 400 以及 Eijkelkamp 所生產的 Mini-Diver 沈水式壓力式水位計進行長時間的地下水位監測。其儀器設備如圖 2.9 所示，沈水式壓力轉換儀已與資料記錄及電池進行整合 (圖 2.9a)，將其連接至傳輸纜線 (圖 2.9b)，再與電腦連結纜線 (圖 2.9c) 連結上手提電腦或平版電腦後，即可開始進行監測設定，當設定完成與啟動監測之後，即可將手提電腦與電腦連結纜線分離，僅留沈水式壓力轉換儀與傳輸纜線於現地，不需將手提電腦置留於現地。Mini-Diver (圖 2.9d) 的操作與設定方式與 Level Troll 400 相似。本計畫所選用的沉水式壓力

式水位計屬於未通氣型 (non-vented)，在記錄地下水位變化時，亦將大氣壓力之變化一併記錄其中，為能將大氣壓力變化所造成之影響移除，在進行地下水位分析之前，必需針對地下水位進行大氣補償校正的工作；換句話說，需於現地另外安裝一大氣壓力記錄器，紀錄現地的大氣壓力變化用以進行後續的補償校正工作。本計畫所選用的大氣壓力計為 In-Situ 公司所生產的 Baro Troll(圖 2.9e) Level Troll 400、Baro Troll、Mini-Diver 的詳細規格如表 2.3-2.4。

2.3. 斷流河段監測

經武陵管理站同仁的指示，整個七家灣溪流域共有三個潛在的斷流河斷，分別為在有勝溪上游 (Y)、桃山北溪 (T) 及七家灣溪主流 (C) 上 (圖 2.10)。其中，七家灣溪主流觀測的河段再經由武陵工作同仁的指引下由原先的 C' 河段改至 C 河段。

2.3.1. 流量觀測

斷流的情形將直接反映在流量的觀測上，為了瞭解流量在斷流河段之變化情形，本研究於斷流河段之上、中、下游選定三點進行流量的觀測。流量定義即為即為單位時間內通過某斷面之水容積，因此必須透過流速、水深與河床寬度之量測，來達到流量計算之目的。

流速面積法為直接量測渠道流量最基本方法之一，其原理係由測得各部分斷面之平均流速及其通水斷面積後，進而計算其流量再予以相加得全斷面流量。實務作業方式則係以儀器直接量測水面下垂向多點之流速而得各子斷面平均流速，再乘以各子斷面通水面積後可得各子斷面流量值，將各子斷面流量累加後即可得渠道流量。流速面積法子斷面切分示意如圖 2.11 所示。推估流量之計算式為 $Q = \sum q_i = \sum U_i A_i$ ，其中 Q 為橫斷面總流量， q_i 為子斷面流量， U_i 為子斷面之平均流速， A_i 為子斷面之通水面積。

2.3.2. 河床地下水位及溫度之監測

河道上地下水水位及溫度的觀測將有助於瞭解河水—河床交互作用的情形，而此交互作用關係著斷流發生的機制，河床上水位及溫度監測井之示意圖如圖 2.12 所示，本計畫以有勝溪斷流處做為監測的地點，其監測的位置如圖 2.12 所示，從 2016/7/15 開始執行連續之觀測。

為瞭解河床-河水交互作用的情形及水文模式建立之基礎資料蒐集，地下水位紀錄與變化分析為其中非常重要的工作項目之一。地下水會由較高的總水頭 (hydraulic head) 流向較低的總水頭，其中，總水頭為水位 (elevation head) 和水壓 (pressure head) 的總和。河川表面和地下水面的壓力水頭為零 (相對於大氣壓力)，因此，地下水面和河川表面的相對水位差異即為河川與鄰近地下水間流動之方向。河床沉積物之透水性及水力梯度 (hydraulic gradient) 則會影響地表水和地下水系統之間的移動速率 (Freeze and Cherry, 1979)。

為量化河川與地下水間之補注 (或流失) 的速率、位置及時間關係，所有的儀器感測器陣列需佈署於河川和相鄰的河床之間。本計畫選定於有勝溪進行河床地下水位監測與河床溫度量測，透過監測資料分析結果進行河床與地下水間之流體通量推估，現地監測系統設計將

參照 Bastola and Peterson 於 2016 年所提出的方法進行規劃。本計畫在有勝溪的河床上共設立三個觀測點，依照其相對位置依序命名為上游 (well A)、中游 (well B)、下游 (well C) 觀測井。每個觀測點各設有一口直徑為 2 吋及一口直徑為 1 吋的地下監測井。2 吋的監測井中裝設自計式水位計，用於監測 (河床) 地下水位變化；1 吋的監測井中則於 6 個不同深度裝設溫度計，用於監測不同深度的 (河床) 地下水溫變化。

監測井設置與結構示意圖如圖 2.13 所示，監測井的內側井管所用的材料為直徑 1 吋及 2 吋的 PVC 管，2 吋井管於井底開篩 0.5 m，目的為測量河床特定深度的地下水位和溫度資料；1 吋井管則是採取全開篩的方式設立，其主要用意為裝設及拆卸不同深度的溫度計之便而規劃，此外，選用 1 吋井管的另一目的為減少井管內產生自然的熱對流 (free convection)，由於裝設的溫度計直徑恰小於 1 吋，溫度計與內管壁之間空隙狹小，可避免管內熱對流的產生，且一吋管由於直徑較窄，當熱能傳輸時所需達到平衡的時間也較短。PVC 管外側均套有一鐵製防護套管，以減低監測井受到水流和石塊碰撞所造成之損傷，並在井口鎖上防護蓋，避免其它外在因素干擾到監測井內的監測環境。無奈相關的設施已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風全數沖毀。

水位計的裝設深度 (距河床表面) 由上游至下游分別為 360、310 及 360 cm，而溫度計於每口觀測井的裝設深度則為 20 cm、40 cm、75 cm、125 cm、225 cm 及 360 cm (中游 1 吋觀測井溫度計最深深度為 310 cm)。中游的水位計及溫度計裝設深度與上、下游不同之原因主要與中游觀測井施工問題有關，造成 2 吋井管深度不足，僅 310 cm，故最深層之溫度計裝設深度為配合 2 吋井管深度，故僅能設置距河床 310 cm 的深度 (圖 2.14)。此外，每個觀測井之河床表面亦裝設水位計，用以記錄河水水位及溫度變化。本計畫所選用的水位計為 In Situ 所生產的 Troll 400，溫度計為 VEMCO 所生產的 Minilog-II-T，而記錄河川水位的水位計則為 Eijkelkamp 所生產的 Mini-Diver。

本研究計畫選用 VECOM 所生產的以 Minilog-II-T 自記式溫度計 (圖 2.16) 進行河床溫度剖面監測，其體積小且固定方便，可將多個 Minilog-II-T 組成溫度鏈，藉以觀測河床不同深度的溫度變化來描繪溫度剖面。自計式溫度計之原理與沈水式壓力轉換儀相似，溫度感應器已與資料記錄及電池進行整合，將其連接至傳輸纜線，再與電腦連結纜線連結上手提電腦或平版電腦後，即可開始進行監測設定，當設定完成與啟動監測之後，即可將手提電腦與電腦連結纜線分離，僅留自計式溫度計與傳輸纜線於現地，不需將手提電腦置留於現地，自計式溫度計的詳細規格如表 2.5。

此外，地表水 (或河川) 與地下水間之交互作用，亦會影響地下水位之變化 (圖 2.17)，假設地下水位僅受河川影響，當河川水位較低時 (gaining stream, 圖 2.18a)，地下水將會透過河床補注至河川，形成地下水位的降低，反之，當河川水位較高時 (losing stream, 圖 2.18b)，地表水將會透過河床入滲至地下水體，造成地下水位的上升。在 losing stream 的情形下，又有一特殊情形，當地下水位遠低於河床高程時，河床表面與地下水位面之間形成一非飽和的情形 (unsaturated zone)，此特殊情形則稱之為流失不連通河 (losing disconnected stream, 圖 2.18c)。地表水與地下水間的補注與流失關係並非維持固定不變，有其空間與時間上的變異，並非整條河川皆為補注或流失的情形，在空間上，有可能部分區段為補注或流失，在時間上，

亦有可能特定時間為補注或流失，外加地下水位變化並非僅受到河川水位高低之影響，因此造就了非常複雜的地下水位變化。綜觀以上分析，地下水位反應該含水層與當地區域應力分佈、地形起伏、降雨、氣壓與人為活動等因素相互作用達平衡之呈現結果，故地下水位之變動分析往往需考量多項因素，才能將地表水與地下水間交互通量予以釐清。

利用熱能做為水文示蹤劑相較於化學示蹤劑有以下幾個明顯的優勢：(1) 信號來自於大自然，(2) 主要測量的參數為相對便宜的溫度參數，(3) 溫度資料可以立即檢視及分析。每當流動路徑中的兩個點之間存在著溫度差，熱能即會隨著兩點間的水流進行傳輸，稱之為熱對流(advection)，熱能的傳輸獨立於非移動固體及液體之間，則稱之為熱傳導(conduction)。熱能正好適合用來描繪小規模尺度的流動路徑，在自然環境下，河川周邊通常都具有較大且快速的溫度變化，清晰的熱能訊號容易被識別和偵測，河床的溫度分佈及變化不僅受到孔隙介質內流體流動的熱對流影響，亦受到河床沈積物間的熱傳導影響。

一般而言，熱能的運動是利用河川及河床的相對溫度變化模式進行探討，透過連續監測資料，即可即時顯示出水流型態的一般特徵。例如，當河床沉積物的溫度波動遠低於河水溫度波動時，這表明其中有高比例的地下水補注至河川當中；相反地，河床沉積物的溫度波動趨勢與河川相近時，表示有高量的水由河川入滲至河床沉積物中。在一定的深度之內，河床沈積物的溫度將受到河川溫度所影響，當深度較淺時，河床沈積物的溫度受地表因素的影響程度大。在達到一定深度以下，河床沈積物的溫度受到地表因素影響的比例將逐漸降低，轉而趨向於受深層地下水所調控，此時河床沈積物的溫度將維持一穩定溫度。若再往更深部地層探討，受到地溫梯度的影響，溫度將隨深度逐漸升高。

圖 2.19 描繪出四種河床條件的溫度及水位圖，圖 a 和圖 b 說明河川與地下水系統相互補注的情形，圖 c 和圖 d 則說明間歇性河川(ephemeral)與地下水系統間相隔一個未飽和層的河道系統，在其有水流(濕潤)或無水流(乾燥)的過程中對於河床沈積物溫度之影響。圖中標示出各種河床條件監控設備所安裝的相對位置圖，並依照各自獨特的溫度訊號進行說明。每張圖的右側附有河川流量圖，左側為相對應河川與地下水的溫度歷線圖，溫度歷線圖顯示出河川與地下水水溫的日溫度變化量，由溫度歷線圖(即使無壓力資料)即可觀察出明顯的補注或滲流事件。

以地下水補注至河川為例(圖 2.19a)因地下水的總水頭較高於河川，使得整體水力梯度呈現向上補注的趨勢。河川水溫具有大幅度的日變化量。河床沉積物之溫度則因其水源是由深層地層(依”日”時間尺度可視為恆定)所補注，而僅有微幅的晝夜變化。河床沉積物的溫度變化反映出了物質的熱傳導以及藉由液體流動向上傳輸的熱對流之間的平衡。大量的地下水補注會使得河床溫度擁有較小的改變量；反之，當地下水補注量較小時，河床溫度的改變量會隨之增加，其變化量隨著深度增加而遞減。有鑒於此，在地下水補注至河川的情形下，溫度測量設備(不論是內建於水壓計或直接埋設於河床沉積物)必須設至於河床較為淺層的位置以獲得較為顯著的特徵溫度變化。以河川補注至地下水為例(圖 2.19b)，其水力梯度呈現向下流動的趨勢(地下水的總水頭低於河川水位)，河川的熱能隨著向下的水流方向傳輸至河床沉積物，造成河床溫度的日變化量增加。此外，由於區域地下水不再補入河川，使得河川溫度的日變化幅度變得更為劇烈。因此，為獲得河川流失的特徵溫度變化，溫度測量設備

必須設至於較深的河床深度較深之位置，方能觀察到河水水溫與地下水水溫間顯著的差異 (Constantz, 1998)。

以間歇性河川 (ephemeral) 為例，河床表面與地下水系統間相隔一個未飽和層 (河道沉積物的孔隙水壓相對於大氣壓力為一負壓，負孔隙水壓存在於未飽和材料，如潮濕的海綿或毛巾，雖明顯有水的存在，但卻無法被水壓計所測量；相反地，大氣壓力會在管柱內推擠低於大氣壓力的水份)，在河床為乾枯的情形下 (圖 2.19c)，河床表面溫度會因為白天日曬和夜間冷卻的效應，產生較大日變化量；相對的，乾燥物質對於熱能的傳輸能力比濕潤物質差，因此，較大的河床日溫度變化將被阻絕於相對淺層的河床沈積物中，深層的沈積物溫度將相對維持一穩定溫度。在河床有一短暫水流事件的情形下 (圖 2.19d)，水流事件發生的同時會伴隨著一個明顯的溫度訊號出現，水壓計將紀錄水流向下入滲至地下水水面時所測量到的訊號 (此時紀錄訊號為地下水水面高度)，短暫水流事件會使得河川水溫變化幅度減低，事件的初期會有高比例的水流向下入滲，河床會因此快速產生熱能反應，如圖中突然上升的溫度訊號。除河川水溫與地下水溫之相對應變化關係之外，當河川本身之水位發生變化甚至凍結或乾枯時，皆會對河床表面之溫度變化產生顯著的影響 (圖 2.20)，而此顯著的溫度變化型態的改變，亦可用於判斷河川所處狀態之依據。

除了透過河川與河床沈積物的溫度歷線圖，可分析獲得河川與地下水的交互作用關係之外，河床沈積物的溫度隨深度變化剖面亦可用於分析兩者的交互作用。將特定深度所有測量之溫度資料彙整後，即可得到其溫度變動範圍，當中包含了溫度循環 (年循環或日循環) 的最大和最小值，此最大與最大值將形成河床循環溫度曲線的包絡線 (temperature envelope)，以年循環為例，通常是以一月及七月的溫度曲線做為循環溫度曲線的包絡線，而日循環則是以清晨及下午做為循環溫度曲線的包絡線。圖 2.21 為假想的河床循環溫度曲線的包絡線圖，圖中分別標示出在自然熱循環下 (一日或一年)，河川流失 (水流向下) 與補注 (水流向上) 之溫度曲線。在河川流失的情形下，向下移動之水流會在地表被加熱或冷卻，河床沈積物的溫度循環變化因水流向下流動之影響，加劇 (加乘作用) 溫度循環變化範圍與深度，溫度變動範圍則會向河床下方延伸，因此形成較寬、較長的包絡線。相反地，在河川獲得補注的情形下，向上移動之水流主要源自於較為深部的地層，這種水流具有相對恆溫且接近週期性平均值的特性，溫度穩定的地下水如同緩衝劑一般，減低因河川溫度循環變化所影響的範圍與深度，溫度變動範圍會向河床表面靠攏，因此形成較窄、較扁的包絡線。在日循環中亦可發生同樣的現象，但其循環溫度變化範圍較小。

利用熱能進行河水與河床間水流通量之估算時，熱能通量為熱傳導係數 (thermal conductivity) 與溫度梯度 (thermal gradient) 之乘積，又稱之為傅立葉熱方程 (Fourier heat equation)，在已知河床沈積物的熱傳導特性的前提下，透過河床表面與河床沈積物的溫度量測，可進行河水與河床間流量的推估，並推估河床內地表水與地下水之交互行為。控制熱能傳輸的傅立葉熱方程可類比於控制水流流動的達西定律，然而，其最大的差異在於河床沈積物之流體或熱能傳導特性的之估計。由於河床沈積物的顆粒組成差異，其水力傳導係數可相差數個量級的變化，而熱傳導係數僅為倍數上的變化 (圖 2.21)，造成兩個傳導係數對於顆粒大小敏感度差異的主要因為，熱能可直接通過固體和流動液體完整的截面傳輸，水流僅能透過孔隙間曲折的路徑進行移動。因此，在河水與河床間水流通量之估算時，若能獲取高精

度的溫度量測資料，所推估的通量將較為準確，相對於透過水位量測資料進行通量推估，較不易產生量級上的誤差。透過溫度資料準確的推估河水與河床間水流通量之後，搭配地下水位記錄與水力梯度計算，可進一步推估河床之水力滲透性 (permeability)，驗證地表水與地下水間之交互通量。透過追蹤熱能的傳輸可以更容易的理解河川/地下水交互作用之機制，並幫助量化河川與河床沈積物溫度變化所產生之影響。

第三章 結果與討論

3.1. 水文條件之變化趨勢

3.1.1. 平均雨量之變化趨勢

利用趨勢分析方法進行檢定，分析的項目包括雨量測站觀測年份之年、月、與乾、濕季的平均雨量之變化趨勢，分析七家灣溪流域內雨量長期趨勢是否有改變，做為評估未來斷流發生機會的參考依據。其具體結果如表 3.1 至表 3.3 所示（時間至 2015 年止）。就長時期平均雨量的變化而言，七家灣溪流域鄰近的 9 個雨量測站，其平均降雨不管在年平均、各月平均、乾季、濕季均沒有顯著的變化趨勢。除了志佳陽大山在一月及乾季、思源在十二月的平均降雨有些微增加。

3.1.2. 無降雨天數之變化趨勢

利用趨勢分析方法進行檢定，分析的項目包括雨量測站觀測年份之年、月、與乾、濕季的無降雨天數之變化趨勢，分析七家灣溪流域內雨量長期趨勢是否有改變，做為評估未來斷流發生機會的參考依據。其具體結果如表 3.4-表 3.6 所示。就長時期無降雨天數的變化趨勢而言，除了環山於四月、志佳陽大山於乾季、捫山於乾季及年、思源於一月、十二月及乾季、武陵農場於十二月有逐漸降低之趨勢外，其餘大部分的測站在所分析的時間尺度下並未有顯著之變化。

3.1.3. 降雨強度之變化趨勢

利用趨勢分析方法進行檢定，分析的項目包括雨量測站觀測年份之年、月、與乾、濕季的降雨強度（降雨量除以降雨天數）之變化趨勢，分析七家灣溪流域內雨量長期趨勢是否有改變，做為評估未來斷流發生機會的參考依據。其具體結果如表 3.7-表 3.9 所示。此計畫定義降雨強度為有降雨天數的平均降雨，除了松茂站於七月及年、志佳陽大山於四月、武陵農場於七月有增加的趨勢外；志佳陽大山於九月、桃山於一月及五月、捫山於十一月及濕季有降低的趨勢外，大部分的測站在所分析的時間尺度下並未有顯著之變化。

3.1.4. 缺水指數之變化趨勢

武陵地區各雨量測站於觀測期間之 SPI-3、SPI-6、SPI-9 及 SPI-12 的變化趨勢如表 3.10 所示，而以桃山及思源雨量測站為例的 SPI 時序變化如圖 3.1 及 3.2 所示。就 SPI-1 而言，僅有松茂在中度乾旱情形有顯著增加的趨勢；就 SPI-9 而言，環山測站輕微乾早有減少的趨勢，而松茂測站不乾旱情形則有增加的趨勢，思源測站的中度乾旱情形則有減少的趨勢。雖然大部分分析項目的 Mann-Kendall 檢定 Z 值均為達顯著水準，但從桃山雨量測站 SPI 隨時間變化

之趨勢看來(圖 3.1)，確有豐者越豐、枯者越枯的趨勢(尤其是 SPI-9 及 SPI-12)；思源雨量測站豐者越豐、枯者越枯的趨勢則較不明顯。

3.1.5. 流量之變化趨勢

利用趨勢分析方法進行檢定，分析的項目包括流量測站觀測年份之年、月、與乾、濕季流量，與 1-day、3-day、7-day、30-day、90-day 最大(max)及最小(min)日流量，與年內平均流量增加率(Rise rate)、年內流量平均減少率(Fall rate)及每年流量逆轉次數(Reversals)之變化趨勢，分析七家灣溪及有勝溪長期趨勢是否有改變，做為評估未來斷流發生機會的參考依據，其具體結果如表 3.11-3.19 所示。就平均流量而言(表 3.11-表 3.13)，除了七家灣溪流量站於十二月、有勝溪流量站於濕季有些為增加外，在其他分析的時間尺度下並未有顯著之變化。就極端流量而言(表 3.14-表 3.16)，七家灣溪流量站在 1-day min、3-day min、7-day min 及 30-day min 均有增加的趨勢；而有勝溪流量站則在 7-day min、30-day min 及 90-day max 有增加的趨勢。就年內平均流量增加率來看，七家灣的增加率達顯著降低，且年內平均流量減少率呈顯著的上升(每次降低的量逐漸變小)，且每年流量逆轉的次數成顯著增加(表 3.17-表 3.19)；有勝溪的流量資料較短，上述參數均為達統計顯著水準，然而其各項變化趨勢均與七家灣溪相符，暗示亦有隨時間變化之趨勢，如圖 3.3-3.5 所示。

3.1.6. 溫度變化趨勢

利用上述趨勢分析方法進行檢定，分析的項目包括氣溫測站觀測年份之年、月、與乾、濕季的平均溫、最高溫、與最低溫之變化趨勢，分析七家灣溪流域內溫度長期趨勢是否有改變，做為評估集水區內是否受到全球暖化影響的參考依據。其具體結果如表 3.20-表 3.28 所示。就平均溫度在四個氣溫站的變化趨勢而言(表 3.20-表 3.22)，環山溫度測站不管在年、各月、乾季及濕季均呈現上升的趨勢；而鄰近的松茂站卻大都呈現下降的趨勢；武陵農場則在五月及十一月呈現上升，而在六月呈現下降趨勢；思源(自動)則在一月、四月、十月、十二月及乾季呈現下降的趨勢。就最高溫度的變化趨勢而言(表 3.23-表 3.25)，思源(自動)在所有分析的時間尺度上(除二月外)，均呈現下降的趨勢；就最低溫度的變化趨勢而言(表 3.26-表 3.28)，松茂在四月、七月、九月、乾季、濕季及年均呈現上升的趨勢；而思源(自動)則在五月及六月呈現上升的趨勢。

3.1.7. 降雨—流量之關係

流量的變化雖然與降雨變化高度相關，但隨著集水區的地質、土壤、土地利用條件等條件的不同，其反應也不會相同。有勝溪流量站及七家灣溪流量站集水區 1996-2014 年間平均之月降雨與月流量之關係圖如圖 3.6 所示，而年流量除以年雨量，代表單位降雨下有多少比例的降雨變成了逕流，為日後建立集水區水文模式的基礎。研究中發現以 2002 年做為界，無論是七家灣溪或是有勝溪在雨量與流量在季節性的分佈上有很大的變化，2002 年之前的季節

性變異較小，反之，2002 年之後的變異較大；有勝溪流域的年降雨多於七家灣溪流域，然而有勝溪流域之逕流深度卻明顯低於七家灣溪流域。有勝溪流域的年降雨多於七家灣溪流域，然而有勝溪流域之逕流深度卻明顯低於七家灣溪流域，反應在年流量除以年雨量的比例上，有勝溪從 2002 年前的 0.41 增加之 2002 年後的 0.53，而七家灣溪則從 0.66 增加至 0.82，顯示有勝溪的低出水效率。

3.1.8. 退水係數之結果

七家灣溪及有勝溪流量之退水常數與退水段啟始流量之關係如圖 3.7 所示。研究結果指出，在同樣的退水啟始流量下，有勝溪的退水係數大約比七家灣溪的退水係數低了約 10%，顯示有勝溪溪流水退水較快的特性。綜合上述降雨—流量之關係，顯示有勝溪出水少、退水快，比七家灣溪更可能遭遇斷流的危機。

3.1.9. 低流量模擬之結果

在 $C=0$ 的情況下，此模式模擬七家灣（圖 3.8、圖 3.9）及有勝溪（圖 3.10、圖 3.11）連續 7 天至 21 天退水之流量有不錯的成效，瞭解低流量的變化將有助於斷流的預警，可推估的時間越長則預警的時間越充裕。計畫中所提之低流量推估模式得以合理推估七家灣溪退水段的流量，在連續 7 天至 21 天退水的流量推估上有很成功的表現，退水的啟始流量越低則推估結果越好。此低流量推估模式同樣得以合理推估有勝溪退水段的流量，在連續 7 天至 19 天退水（觀測資料上找不到長於 19 天的退水資料）的流量推估上有很好的表現，同樣地，退水的啟始流量越低則推估結果越好。

3.2. 斷流河段之觀測結果

從 2016 年 2 月 Google 所使用的衛星影像上可以看出三個河斷均為明顯的曲流(圖 2.10)，且在凸岸有明顯的泥砂礫石堆積，據了解，斷流的發生幾乎都從凸岸的最頂端附近開始。為了瞭解流量在三個河段之變化情形，研究團隊分別於三個斷流河段做了曲流的上、中、下游的流量觀測。

從福衛二號歷史的影像可以清楚的看到(圖 3.12)，曲流的發生可能是造成斷流的原因之一，2010 年至 2012 年間有勝溪在此河段行進的方向較為筆直，直到 2013 年開始，河水開始沿著右岸的坡腳行進，無獨有偶，此時衛星影像上河水的位置開始較不明顯。估計河水從 2013 年開始，較多時間以曲流得方式行進(如圖 3.13 中的 Y 圖)，2013 年河水似乎也在攻擊岸造成了崩塌，崩塌的發生不知道是否與曲流發生的原因相關，時至今日此崩塌依舊清晰可見。

3.2.1 有勝溪斷流處流量變化

有勝溪斷流處上、中、下游流量觀測的位置如圖 3.13 所示，而流量量測的結果列於表 3.29。

2016/7/1 於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.17 cms (Y-1)、0.08 cms (Y-2)、0.03 cms (Y-3) 顯著降低，並在伏流水匯入的下游處增加至 0.06 cms (Y-4)。2016/7/14 於有勝溪斷流處量測之流量亦有上述之現象，從曲流上游到下游分別是 0.26 cms (Y-1)、0.17 cms (Y-2)、0.15 cms (Y-3) 些微降低，然而伏流水匯入的影響不顯著，仍維持 0.15 cms (Y-4)。2016/8/10 於有勝溪斷流處則觀測到斷流的現象，各觀測河段的斷流情形如圖 3.14 到圖 3.15 所示，流量的觀測從曲流上游的 0.15 cms (Y-1) 顯著降低至 0.026 cms (Y-2)，在 Y-3 處完全沒有水流，Y4 則成一靜止的水潭，值得一提的是，武陵地區在 2016/8/11 下了一場累積約 25mm 的降雨，斷流的情形立即獲得了舒緩 (圖 3.19 左圖)；2016/9/7 於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.18 cms (Y-1)、0.14 cms (Y-2)、0.065 cms (Y-3) 顯著降低，並在伏流水匯入的下游處增加至 0.11 cms (Y-4)；2016/11/19 為梅姬颱風侵襲過後的第一次流量量測，河道發生了大規模的改變，除了河水在 Well A 跟 Well B 之間明顯改道外，河道估計抬升了近 1 公尺，河床的地質也趨於均質 (如圖 3.16 至圖 3.20 所示)，但流量的變化情形與過去相當類似，從曲流上游到下游分別是 0.16 cms (Y-1)、0.067 cms (Y-2)，並在伏流水匯入的下游處稍微增加至 0.079 cms (Y-4)，其中原測量點 Y-3 因為河道改變的關係已經不復存在。

現地考察時常可發現斷流及伏流水的跡象，以 2016/7/1 考察作業時為例，於有勝溪發現逐漸隱沒之溪流分支 (圖 3.21)，其隱沒河段河床下之含水情形如圖 3.22 所示，以圓鋤挖開隱沒河段之河床，其仍為飽和狀態。我們並在 2016/7/14 的考察作業時，發現曲流下游處有疑似伏流水流出的現象 (圖 3.23)，其流量穩定而顯著，並與當日主流的的水色有顯著的差異，顯示其來自於不同的流路，並暗示有勝溪河水與地下水頻繁交互作用的情形。

3.2.2 七家灣溪斷流處流量變化

七家灣溪更新之流量觀測的位置如圖 3.25 所示，更新前的位置如圖 3.24 所示，而流量量測的結果列於表 3.30。2016/7/15 於七家灣溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 2.21 cms (C'-1)、2.24 cms (C'-2)、2.26 cms (C'-3) 沒有顯著變化 (圖 3.24 及表 3.30)；2016/9/8 更新了量測的河段，從河段上游到下游分別是 0.67 cms (C-1) 至 0.61 cms (C-2) 沒有顯著變化；2016/11/10 在梅姬颱風過後的流量量測結果，從上游的 1.02 cms (C-1) 至下游的 0.83 cms (C-2) 有稍微降低的現象，估計與颱風過後現場觀測有河道堆積的現象有關。

3.2.3 桃山北溪斷流處流量變化

桃山北溪斷流處上、中、下游流量觀測的位置如圖 3.26 所示，而流量量測的結果列於表 3.31。2016/7/15 於桃山北溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.42 cms (T-1)、0.46 cms (T-2)、0.35 cms (T-3) 呈現些微降低的趨勢 (圖 3.26 及表 3.31)；2016/9/8 則從上游的 0.19 cms (T-2) 到下游的 0.18 cms (T-3)；2016/11/10 則從上游的 0.46 cms (T-2) 稍微降低到下游的 0.33 cms (T-3)。

3.2.4 潛在斷流處之水位觀測

2016/7/15 至 9/13 間於有勝溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形如圖 3.27 所示，為了清楚展示兩個事件各河段河川退水的情形，右邊兩張圖將 Well A 及 Well B 退水的啟始河水水位平移至與 Well C 相同，從觀測資料中發現，Well A 與 Well B 的退水速率似乎比較接近，比 Well C 來得較慢，但退水速率最大的差異發生在斷流發生前，此觀測期間 Well B 與 Well C 發生了兩次斷流（即水深等於 0 處），Well B 與 Well C 的河川水位都在斷流前急速下降，且 Well C 下降的速度又比 Well B 來得快很多。2016/8/11 至 9/7 間於桃山北溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形(圖 3.28)，同樣地，為了清楚展示各河段河川退水的情形，右邊兩張圖將 T1 及 T3 退水的啟始水位平移至與 T2 相同，三個河段退水的情形並沒有顯著的差異。2016/9/8 至 9/13 間於桃山北溪 (T1) 及七家灣溪 (C1) 觀測河川平均日水位之變化及退水情形(圖 3.29)，儘管兩個觀測點分別位在支流與主流，但河川水位變化趨勢相當一致，也兩處退水的效率沒有太大的差異。受到今年多個颱風侵襲的影響，目前河水水位觀測的時間較為零碎，將透過更長時間且密集的觀測資料來探討各河段退水特性的差異。

3.3 河床-河水交互作用觀測井之初步結果

本計畫透過有勝溪河床監測儀器的設置，記錄有勝溪之河川水位、地下水位、河川水溫及地下水溫變化，並繪製出水位歷線圖 (hydrography)、溫度歷線圖 (thermography) 及溫度剖面 (temperature-depth profile)，用以探討河川與河床間之交互作用，分析兩者間的流失或補注時空分佈，並嘗試提出斷流發生的機制與時間。各口觀測井所裝設之儀器及紀錄之資料種類整理於表 3.32 中。由於 9/13 中央氣象局預測莫蘭蒂颱風 (第 12 號颱風) 路徑將侵襲台灣東部及東北部，為確保儀器的完整，本團隊人員前往現地將監測儀器取回，並暫停監測。爾後，陸續有多個颱風侵襲台灣，直到梅姬颱風 (第 17 號颱風)，在宜蘭太平山地區降下超過 1000 mm 以上的雨量，颱風過後前往有勝溪現勘，超大豪雨及暴漲的河水，造成裝設於河床中的三口監測井皆因大量的礫石堆積而被掩埋無法繼續使用。因此，三口河床中的監測井資料僅有約 2 個月紀錄，而復育中心旁的地下水井 (WL-1) 則因不受颱風與暴雨的影響，至今仍持續監測當中，以下將針對僅有的觀測資料進行說明與分析。

3.3.1 河水—地下水水位變化

上、中、下游觀測井之地下水位及河川水位歷線圖如圖 3.30-3.32 所示。由於所有觀測井皆在 7/15 完成建置，隨後立即安裝監測儀器，新建置的觀測井需要一段平衡期以恢復至原本的狀態 (12-24 小時)，當整個系統達到穩定平衡之後，觀測資料才具有足夠的代表性，因此在資料分析的過程中，最前段的 24 小時資料僅作參考之用，不納入分析之中 (但依然呈現於圖中)。

首先，圖 3.30 為上游井 (Well A) 的河川與地下水水位歷線圖，由圖中可以明顯的觀察到，不論是河川水位或地下水位，對於降雨事件皆有著良好的反應，例如：7/18 與 7/19 在中

央氣象局所記錄的資料中顯示有降雨事件的發生，同一時間河川水位與地下水位皆有明顯的上升紀錄，上升幅度約為 5-10 cm。在 7/19 之後，由於連續多日沒有發生降雨事件，河川水位與地下水位呈現持續下降的趨勢；直到 7/30 再度發生零星的降雨事件，而此降雨事件也反應在河川水位與地下水位微小幅度的變化。在 8/6-8/12 之間發生數次較大的降雨事件，而河川水位或地下水位亦有較大的上升趨勢，而後 8/19、8/27、9/3 及 9/6 再度發生間歇性的強降雨，地下水位皆有相對應的上升現象，水位上升幅度並非完全與降雨事件強度成正比，此現象可能與區域性降雨分佈有關，雨量站的設置位置並非緊鄰有勝溪的觀測井，因此所記錄到的雨量資料或許並未完全呈現現地的實際情況，然而，由水位資料與雨量記錄的相對變化，可以證明觀測井之水位對於雨量具有相當的敏感度。此外，若進一步仔細檢視水位資料可以發現，不論是河川水位或地下水位，皆有非常小幅度的規律變化（約 1-2 cm），且呈現一天二次的週期，此現象主要是由於地體潮或地潮響應（earth tide）所造成的影響。在 7/15-9/13 的監測時間內，河川水位皆高於河床水位，差距約介於 3-8 cm 之間，而此差距已明顯大於水位計之準確度，因此可以研判在此觀測時間內，河川的水往下入滲補至河床中。

圖 3.31 為中游井 (Well B) 的河川與地下水水位歷線圖，由圖中依然可以明顯的觀察到，不論是河川水位或地下水位，對於降雨事件皆有著良好的反應，監測期間內較強的降雨事件，如 7/18、7/19、8/3、8/6、8/9、8/11、8/12、8/27、9/3、9/6 及 9/9，亦可觀測到河川水位和地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。在 7/15-9/13 的監測時間內，河川水位皆高於河床水位，可推測在此觀測時間內，河川的水亦是往下入滲補至河床中，河川與地下水位的差距約介於 4-10 cm 之間（無斷流發生時），略大於上游觀測井水位間的差距。在 7/19 之後的連續多日無降雨事件發生期間，河川水位與地下水位的變化型態與上游觀測井的水位變化型態極為不同，在 8/1 之後，中游的地下水位 (Troll 400) 可以明顯的觀察到地下水位快速下降的情形 (8/1-8/9)，僅在降雨事件發生時，有快速的水位上升，而河川水位則呈現一持平的情況，亦僅在降雨事件發生時，有小幅度（相較於地下水位）的水位上升。此特殊之水位變化與有勝溪發生斷流有關，河川水位呈現一持平的情況即表示河道上處於乾涸的狀態，由於此段河道是河川的水往下入滲補至河床中，當發生斷流時，地下水因缺乏河川水的補注而呈現快速下降的情形。當斷流發生期間有零星降雨事件發生時，因降雨快速入滲補注至河床，地下水位快速上升，而河床屬多孔隙介質，對於一特定降雨量之反應較為顯著，地下水位上升量較河川水位大。在 9/1-9/3 期間，河道再度發生斷流的情形，而河川與地下水位變化趨勢也與前一次發生斷流時一致。本研究團隊於 8/10 正好前往現地進行量測工作與資料蒐集，有觀察到中游觀測井附近之河道乾涸的情形，也證實了有勝溪發生斷流的事實，並驗證上述水位資料分析之推論。

圖 3.32 為下游井 (Well C) 的河川與地下水水位歷線圖，由圖中再次明顯的觀察到，不論是河川水位或地下水位，對於降雨事件皆有著良好的反應，監測期間內較強的降雨事件，亦可觀測到河川水位和地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。在 7/15-9/13 的監測時間內，河川水位遠高於河床水位，兩者間的差距約介於 10-34 cm 之間（無斷流發生時），是所有觀測井中差距最大的位置，監測結果顯示河川的水快速且大量的往下入滲補至河床中。在 7/19 之後，下游的水位可觀察到與中游的水位相似的變化情形，當有勝溪在 7/28 發生斷流時，由於河道乾涸，使得河川水位呈現持平的情況，在缺乏河水補注的情形下，地下水位快速的下降，且下降幅度與速率遠高於中游的地下水位變化（下降幅度高達 117 cm）。斷流時期的地

下水位在零星降雨事件發生時，亦有快速上升的情形，且上升幅度較河川水位顯著。斷流發生的現象維持到8/11日的強降雨事件才停止，河道恢復濕潤有水的情形。更進一步分析發現，在斷流發生時，地下水位快速下降，並明顯的低於河床表面，在河床表面與淺部河床之間形成非飽和的狀態，造成流失不連通河的特殊情形。在7/28-8/11斷流發生時期，河道明顯的呈現乾涸的情形，在缺乏河水補注的前提下，地下水位確有三次小幅度的上升(8/1、8/3、8/7)，造成水位上升的原因推測可能與上游入滲的河水經深部地下含水層流至中游，亦或來自河道兩側水位較高的地下水(地勢較高)的測向補注。河道斷流的情形於8/29-9/3期間再度發生，而河川與地下水位變化趨勢也與前一次發生斷流時一致。本研究團隊於8/10進行現地進行工作時，有觀察到下游觀測井附近，甚至更下游地區有河道乾涸的情形。對照圖3.31及圖3.32可觀察出，發生斷流的前期會先經歷一段連續無明顯降雨的時期，而乾涸的河道要恢復有水的情形則需發生較大且持續的降雨事件，在河水向下入滲速率高過於河床內地下水向深部含水層入滲速率(percolation rate)的條件下，河床獲得大量河水的補注，入滲的河水將非飽和層孔隙填滿，地下水位快速且大幅度的上升，使得河道恢復有水的狀態。

3.3.2 河水—地下水溫度變化

上、中、下游井的溫度基礎敘述統計資料如表3.33-3.35。圖3.33為上游井的河川與地下水溫度歷線圖，由圖中可以觀察得知，河水與地下水溫度呈現規律的週期日夜變化(diurnal pattern)，與氣溫的日夜變化趨勢非常一致。氣溫的日夜變化範圍較大，介於9-32°C之間，而河水的日夜變化範圍介於14-20°C之間，地下水溫的變化範圍則較小，介於14-16°C之間。河水與地下水間的最高溫溫差僅約2-4°C，而最高溫的時間延遲約4-6小時。在8/11-8/13及8/29-8/30期間，由於受到鋒面影響，造成溫度的日夜變化範圍縮小。依據熱對流與熱傳導之理論，地下水溫的變化明顯受到河川水溫變化之影響，由此可推論在上游地區河道的河水主要向下補注至河床地下水，而此推論與前一小節水位觀測紀錄之分析吻合。

圖3.34為中游井的河川與地下水溫度歷線圖，此區段的溫度歷線圖與上游非常類似，圖中依然可以觀察到河水與地下水溫度呈現規律的週期日夜變化，與氣溫的日夜變化趨勢非常一致。河水與地下水溫的變化範圍亦非常相近，介於13-21°C之間，河水與地下水間的最高溫僅有1°C溫差，且最高溫的時間延遲約2小時，遠短於上游的4-6小時。在8/11-8/13及8/29-8/30期間，依然可以觀察到溫度的日夜變化受到鋒面的影響而縮小的情形。地下水溫的變化受到河川水溫變化之影響更甚於上游，較小的溫差及較短的時間延遲，可推論中游地區河道的河水主要向下補注至河床地下水之外，補注速率將大於上游，此推論與前一小節水位觀測紀錄之分析非常吻合。在中游的溫度歷線圖中，較值得關注的溫度變化型態改變發生於8/1-8/9及9/1-9/3兩個期間，河川水溫的變化範圍驟然增大，與地下水溫間的溫差由1°C增加至8°C，且與氣溫變化範圍趨於一致，此現象主要是因為河道發生乾涸，Mini-Diver裸露於河床上，其所紀錄到的溫度變化即氣溫變化(水位計裝設於河床表面的觀測井旁，因為礫石或觀測井的遮蔽，河水溫度變化可能稍微略小於氣溫變化)；地下水溫的變化範圍則沒有大幅度的改變，此結果暗示在河床深度360 cm的位置(Troll 400安裝於河床深度360 cm)依然有水的存在，而其溫度的規律變化更進一步顯示從河床表面至深度360 cm的區間，其孔隙

間依然完全被水所填充，地表的熱能依然可以透過向下快速補注的河水傳遞至深部河床。

圖 3.35 為下游井的河川與地下水溫度歷線圖，此區段的溫度歷線圖與中游非常類似，除了可觀察到河水及地下水溫度與氣溫呈現規律的週期日夜變化之外，在斷流發生時(7/28-8/11 及 8/29-9/3)，由於河道乾涸所造成的水位計裸露，使得河川水溫的變化範圍與氣溫變化範圍趨於一致的現象，也可在下游資料中顯著的觀察到。河水與地下水溫的變化範圍非常相近，介於 15-19°C 之間，河水與地下水間的最高溫幾乎沒有溫差（小於 1°C），且最高溫的時間延遲小於 1 小時，遠短於上游的 4-6 小時及中游的 2 小時。在未發生斷流的時候，地下水溫的變化受到河川水溫變化之影響是所有觀測井中最為劇烈，較小的溫差及較短的時間延遲，可以推論下游地區河道的河水向下補注至河床地下水之速率為所有觀測點中 fastest，此推論亦與前一小節水位觀測紀錄之分析非常吻合。然而，在斷流發生時的地下水溫變化則與中游的地下水溫變化型態不同，下游的地下水溫在斷流發生三日之後，由原本隨河川水溫改變的趨勢轉為呈現一恆溫的情形。依據水位資料的分析結果得知，此時在河床表面與深部河床間已發生不連續的情形，產生了非飽和層，因此地表的熱能在向下傳輸的過程中，僅能透過乾燥的沈積物（低含水量）以熱傳導的方式進行傳遞，然而位於深度 360 cm 的地下水，因與河床表面之距離過遠，熱傳導的效應無法傳遞至此深度，而此深度的地下水來源應該為周遭兩側較高水位的地下水補注，使得地下水溫呈現一恆溫的狀態。綜合上、中及下游的溫度歷線圖分析得知，河水與河床間之交互方式除了可以透過水位資料進行分析之外，亦可經由分析河水與地下水間的溫度差異與時間延遲，判斷河水與河床間的相互補注關係，藉由溫度型態的改變，也可以同時掌握河川斷流現象的發生與否。

3.3.3 河水—地下水溫度剖面變化

圖 3.36 為上游 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，河水與不同深度的地下水溫度依然呈現規律的日夜週期變化，雖然河水與地下水溫的變化趨勢非常相近，但兩者間的最高溫差約 1-2°C，時間上的延遲約 2 小時。若進一步細看各深度水溫的變化情形可以發現(圖 3.37)，深度 20、40、75、125 cm 的地下水溫變化與深度 225、360 cm 的地下水溫變化有著明顯的差異，兩者間存在著溫差與時間延遲。造成不同的溫度變化型態之原因可能與河床的非均質性（heterogeneity）有關，在深度 125-225 cm 之間可能存在一介面分隔淺部（20-125 cm）與深部（225-360 cm）河床，而淺部與深部河床沈積物在組成上有所差異，導致河水向下補注的流速不同，熱對流傳遞的過程亦不同。

圖 3.38 為中游 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，不同深度之地下水溫變化趨勢與上游之水溫變化趨勢相似，僅在斷流發生期間（圖 3.39 為擷取斷流發生期間 8/2-8/5 之觀測結果），深度 20 cm 的地下水溫變化呈現與氣溫及河川水溫一致的情形，而此現象即說明此時的地下水位可能介於 20-40 cm 之間，深度 20 cm 的河床因受到太陽輻射的加熱，透過熱傳導的方式直接傳遞。進一步檢視斷流發生前的水溫資料，並無發現淺部(20-125 cm)與深部(225-60 cm)河床地下水溫度間有所差異，此結果表示淺部與深部河床沈積物在組成上非常一致，而透過上游溫度資料所推測的介面可能位於更深的位置。

圖 3.40 為下游 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，由於溫度計的異常，造成了 8/11-9/6

期間的資料遺失，於9/7進行溫度計重新設定後，隨即恢復溫度紀錄功能。下游區段不同深度之地下水溫變化趨勢與上游及中游之水溫變化趨勢相似，唯有在斷流發生時，呈現截然不同的變化型態。當斷流發生河道乾涸時，在缺乏河水的補注情況下，地下水位快速下降，在河床表面與深部河床間形成了非飽和層，原本重合在一起的水溫變化，隨著地下水位面的降低，逐漸分離出來，首先是深度20 cm的水溫資料，其次為深度40及75 cm，最後為深度125 cm，而深度225及360 cm之水溫資料則依然重合在一起（圖3.41）。分離出來的水溫資料，在越接近河床表面，受到大氣溫度之影響越劇烈，其溫度變化幅度也越大；隨著深度的增加，熱傳導的效應將逐漸遞減，水溫呈現一恆溫的情形。上述之現象在強降雨事件發生過後，河道重新復流，非飽和層消失，所有深度之地下水溫又重新疊合在一起，隨河水呈現規律的日夜週期變化。

將不同深度之溫度資料，取一日的時間，以每2小時為單位，隨深度繪製一溫度曲線，一天之內可繪製出13條曲線，即可構成溫度隨深度變化剖面圖（temperature-depth profile）。圖3.42-圖3.44分別為上、中、下游井在8/2 13:00 - 8/3 13:00的溫度隨深度變化剖面圖，在圖3.42中可以明顯的觀察到，越接近河床表面之溫度變化較為劇烈，隨深度的增加而有遞減的趨勢，在白天的時候，接近河床表面的水溫較高，深度大於20 cm的水溫逐漸趨於一致；在夜晚的時候，所有深度的水溫則趨於一致。在圖3.43中亦可觀察到與上游溫度剖面相同的變化趨勢，越接近河床表面之溫度變化較為劇烈，隨深度的增加而有遞減的趨勢。由於中游區段有發生斷流的現象，因此造成河床表面的溫度變化範圍較上游大，深部地下水溫也因較為快速向下補注的河水而有較大的溫度變化範圍，不論是白天或夜晚，深度大於40 cm的水溫逐漸趨於一致。圖3.44中所呈現的溫度剖面圖則與上或中游的剖面圖有極大的差異，由於下游區段不僅發生斷流的現象，亦有未飽和層的形成，因此深度大於80 cm的水溫呈現恆定的狀態，不隨著地表的日夜週期規律變化；深度小於80 cm的水溫，由於位處於未飽和層，溫度的變化主要受到熱傳導的影響，其效應隨著深度的增加而遞減。

3.4 復育中心地下水井之觀測

圖3.45為櫻花鈎吻鮭復育中心旁的地下水井（WL-1）水位歷線圖，所裝設的水位計為Troll 400，由於缺乏此監測井的建井與開篩的資料，故僅能依據有限的資料進行分析（深約25 m，開篩位置未知），而監測之目的是希望獲取深部含水層之基本相關資料。由圖中可觀察到地下水位的變化幅度約20-40 cm之間，部分的地下水位變化與強降雨事件有關，而小幅度的地下水位變化則推測與復育中心養殖抽水有關。地下水位在9/27時出現一異常變化，查閱中央氣象局的資料發現，適逢梅姬颱風來襲，大量的降雨所導致的地下水位快速上升，然而大雨過後穩定的地下水位，暗示七家灣溪有一穩定的地下水源補注其基流量。

圖3.46為櫻花鈎吻鮭復育中心旁的地下水井（WL-1）溫度歷線圖，由溫度資料觀察得知，地下水溫不受氣溫之影響，不隨著氣溫的日夜變化而有規律性的變動。自7/15水溫呈現一緩慢上升的趨勢，在9/18達到最高溫，隨後逐漸下降。地下水的溫度變化範圍非常小，僅介於15.2-16.3°C之間。地下水溫在9/27時出現一異常變化，應該與梅姬颱風來襲所造成的強降雨事件有關。

第四章 結論與建議

4.1 結論

根據七家灣河流域長時期氣象、流量分析與河床—河水交互作用觀測的結果，我們提出以下幾點結論：

1. 根據計畫期間的實驗結果，難以提出斷流與防砂壩之關連性。有勝溪觀測河段接近思源埡口，離下游防砂壩仍有數公里之遙，在觀測期間有發生斷流；反觀於桃山北溪觀測之河段，雖緊鄰三號壩上游，卻未發生斷流，且不管在流量於河段的連續性，及河川水位的變化上，均不見斷流之潛勢；七家灣溪的觀測河段也沒有觀測到斷流，亦沒有斷流的潛勢，且其下游之二號壩早已破損。
2. 近年來有紀錄到的斷流都反應在 $SPI < 0$ 的觀測雨量上，如 Google 影像顯示在 2013/12/6 跟 2014/1/20 間有勝溪發生斷流，此時思源（自動）雨量測站的各項 SPI 指標均小於 0（圖 3.47）；福衛二號每年一張的衛星影像顯示（拍攝時間未知，圖 3.12），有勝溪從 2013 年至 2015 年間均陸續有發生斷流的現象及本計畫期間 2016 年 7 月底至 9 月初紀錄到的兩次斷流，也反應在思源（自動）雨量測站 SPI 的各項指標都偏低的現象，顯示集水區的降雨多寡是影響斷流與否的因素之一。福衛二號衛星於 2015/3/18 與 2015/4/15 拍攝的影像顯示，桃山北溪有斷流的現象，亦反應在桃山雨量測站的 $SPI < 0$ 的觀測數值（圖 3.48）；然而經由口述在 2015 年 3 月在七家灣溪發現的斷流卻未能在衛星影像上得到驗證，雖然此時 $SPI < 0$ ，但估計發生斷流的時間或是規模較小而無法被衛星影像及時掌握。SPI 越低表示該時期的降雨越低於長期的平均，從目前有限的斷流資料看來，斷流的發生與低 SPI 有密切的關係，但不見得低 SPI 就會有斷流，也不表示高 SPI 時沒有發生斷流，如果 SPI 能與氣候指標，如聖嬰、反聖嬰有關，將可以提供長時間尺度的預警（如：未來 3-5 年可能為相對乾旱時期的推論）。
3. 桃山北溪的斷流位置應與攔砂壩的堆積有關，但其下游與桃山西溪交匯，提供櫻花鉤吻鮭可能的避難棲地；七家灣溪發生斷流的時間短暫，其下游至一號壩位置前仍為鮭魚適合之棲地，亦能降低斷流之衝擊，然而上述兩斷流處仍無法避免棲地破碎（如：小水窪）對魚類之影響；有勝溪發生斷流的時間長、頻率高，且其下游非鮭魚適合之棲地，對於羅葉尾溪成功的域外放流將造成較大之威脅。
4. 七家灣河流域長期的降雨平均特性並無顯著的變化趨勢，僅在部分測站的部分時期之變化趨勢得通過統計檢定，極少測站顯示乾季平均降雨的增加及不降雨天數的減少甚至可以避免斷流的發生。然而降雨型態濕則越濕、乾則越乾的趨勢及流量翻轉次數的增加，考驗著棲地的穩定性。流量快速的下降會增加魚類受困淺灘的機會，流量快速的上升則增加魚類被沖至下游甚至河岸上的機會，雖然七家灣溪的流量翻轉次數增加，但每日流量增加率及減少率趨緩，估計對於魚類的影響較小。
5. 環山與松茂為兩個鄰近的氣溫站，確有著迥異的溫度變化趨勢，記錄到的為地區性自然產生的差異或是人為操作上所造成的結果，有進一步釐清的需要。
6. 相較於整個七家灣河流域，有勝溪的年雨量較高但年逕流量較低，年逕流量除以年雨量

的比值顯著低於七家灣溪流域，有勝溪的逕流水低產出率暗示有一大部分的雨水並未流經最下游的流量測站，懷疑有一部份的水不是以地表水（河川水）的形式流出集水區，但仍待進更多的觀測資料來驗證。

7. 成功的低流量推估將有助於河溪生態的預警，本計畫使用之低流量推估模式可以有效推估近一個月流量下降的情形。透過模式將可以知道未來一個月內若沒有降雨情形下，流量可能的變化情形，可以做為河溪生態預警的有效工具。
8. 有勝溪斷流處流量的顯著降低、清晰可見的伏流水現象、再加上其逕流產出率低、退水速度快等特性，無疑提供了一個天然的實驗場，讓我們有機會瞭解河水—河床交互作用的現象及其於河溪生態可能所扮演的角色。尤其有勝溪斷流處正位於羅葉尾溪下游，儘管櫻花鉤吻鮭於羅葉尾溪已域外放流成功，斷流的發生將限制櫻花鉤吻鮭棲地的擴張。透過河水與河床間的交互作用的研究，瞭解斷流的機制，將有助於維持櫻花鉤吻鮭及溪流生態系的永續發展。
9. 本計畫顯示溫度與水位之實驗設計、儀器設置能有效掌握河水-地下水交互作用的情形。有別於過去的計畫以量測河水在河床之上水平移動的溫度變化為主，本計畫量測的是河床垂直剖面的溫度，探討表面河水入滲至河床內所造成的溫度變化。在有勝溪進行量測的河段中，氣溫的日夜變異明顯大於表面水溫與地下水溫，地下水溫的日夜變化在大部分的時間與表面水溫一致，只是地下水溫日最高溫較低、地下水溫日最高溫發生於河水日最高溫之後，比對三組量測河床剖面的溫度資料，顯示該河段具有河川水向下補助地下水之潛勢，且以實際發生斷流之剖面其向下補助量最大。根據河川與河床地下水位監測資料證實有勝溪的河水主要透過河床向下補注至地下水，溫度示蹤劑的結果亦獲得相同的推論，補注速率由上游至下游逐漸增加。此結果亦與河川流量之觀測結果吻合。
10. 經由水位及水溫資料，證實有勝溪確實會發生斷流，且發生時間與乾濕季節無明顯相關性，只要在多日連續不降雨的時候，因河水快速向下補注河床並入滲至深部地下水，當河川補注來源缺乏時，由於向下快速補注地下水，將導致流量迅速降低，最終形成斷流的現象。
11. 根據本研究之監測結果推斷，斷流發生之位置主要介於有勝溪監測點的中游至下游區段，且斷流發生的過程應該首先發生於下游區段置，而後逐漸往上由延伸至中游區段。
12. 此外，在斷流發生的過程中，由於河道乾涸，在缺乏水源補注的情形下，地下水位快速降低，在河床表面與深部河床間產生了未飽和的狀態，形成罕見的流失不連通河道。
13. 經由本計畫的執行，驗證了以熱能作為示蹤劑，應用於河水與河床間交互作用之可行性。透過熱能傳輸模式，研析兩者間的相互補注關係，透過溫度歷線圖及溫度隨深度變化的剖面圖，探討河道不同區段之補注行為與補注速率，並深入探討河川發生斷流的行為與形成機制。
14. 據研究團隊文獻的蒐集，類似的實驗設計常用於觀測河床—河水交互作用之研究，然而卻鮮少人能夠詳實紀錄到溪流水從斷流到復流過程中水分及能量在河水與地下水間的移動情形，此計畫的觀測將是瞭解櫻花鉤吻鮭棲地穩定性重要的科學基礎。包含可以透過觀測瞭解斷流前的訊號以做為斷流前的預警，抑或透過觀測的資料建立熱傳遞模式合理模擬河床—河水間的交互作用，量化地表水、伏流水及地下水在斷流河段的重要性等，

均可作為未來棲地管理的基礎。

15. 綜合上述研究發現，有紀錄到之斷流都是明顯的乾期，顯示斷流與水文條件之關連性，氣候變遷下的衝擊影響值得進一步討論，但發生位置的估計仍有待後續研究解決；七家灣溪有一穩定地下水源的補注，而使得斷流情形不若勝溪及桃山北溪的斷流那樣容易被紀錄到。

4.2 建議

立即可行之建議

主辦機關：雪霸國家公園管理處

水文條件明顯為控制斷流的重要因素之一，在氣候變遷極端事件發生趨於頻繁的影向下，建議透過氣候變遷影響評估的工作事先的瞭解氣候變遷對七家灣溪流域之水文衝擊，作為擬定行動方針的依據。

主辦機關：雪霸國家公園管理處

有勝溪斷流處緊鄰羅葉尾溪下游，其頻繁發生之斷流已經對域外放流櫻花鉤吻鮭族群拓展棲地造成衝擊，建議可設立即時且連續的水位監測，即時發現斷流發生的情形。

長期性之建議

主辦機關：雪霸國家公園管理處

有勝溪斷流河段有顯著河水向下補注地下水的現象，建議後續可研擬相關計畫評估減緩此補注現象之各種方法對於改善斷流之成效。

參考文獻

- 王筱雯，2012。「七家灣溪一號壩壩體改善後河道環境衝擊評估」，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 王筱雯，2015。七家灣溪水文影像監測計畫，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 李宗祐，2003。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。台北。
- 童慶斌，2007。強化櫻花 吻鮭棲地氣候變遷衝擊評估與季節性預警系統—水溫、水質與極端降雨逕流。國科會。
- 覃炳皓. (2012). 利用河川生態指標評估水文合成序列模型重現歷史觀測資料能力之研究. 臺灣大學土木工程學研究所學位論文, 1-98.
- 曾晴賢，2003。櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查（六），內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 楊正雄，1997。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。新竹。
- 葉昭憲，2003。高山溪河道變化及物理棲地調查研究，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 葉昭憲，2004。高山溪河道變化及物理棲地調查研究(二)，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 葉昭憲，2005。武陵地區長期監測暨生態模式建立—環境改變對河道地形及物理棲地變化趨勢之影響，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 葉昭憲，2015。武陵地區七家灣溪及有勝河流域壩體改善後溪流物理棲地調查監測，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 陳文福、張閔翔、黃智昭、王詠絢、江崇榮（2012）利用溫度日變化推算河床入滲流速，農業工程學報，第 58 卷，第 4 期，第 67-79 頁。
- 經濟部水資源局，「乾旱指標之建立-中部及南部區域」，1999
- Anibas, C., Fleckenstein, J.H., Volze, N., Buis, K., Verhoeven, R., Meire, P., Batelaan, O. (2009). Transient or steady state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange, *Hydrological Processes*, 23, 2165-2177.
- Barnes, B. S. (1939). The structure of discharge-recession curves. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 20(4), 721-725.
- Bastola, H., Peterson, E.W. (2016). Heat tracing to examine seasonal groundwater flow beneath a low-gradient stream in rural central Illinois, USA, *Hydrogeology Journal*, 24, 181-194.
- Boano, F., Harvey, J.W., Marion, A., Packman, A.I., Revelli, R., Ridolfi, L., Wörman, A. (2014). Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications, *Reviews of Geophysics.*, 52, 603-679.
- Boulton, A.J., Detry, T., Kasahara, T., Mutz, M., Stanford, J.A. (2010). Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains, *Journal of the North American Benthological Society*, 29, 26-40.
- Brunner, P., Cook, P.G., Simmons, C. (2011). Disconnected surface water and groundwater: From

- theory to practice. *Ground Water*, 49(4), 460-467.
- Constantz, J. (1998). Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in alpine streams, *Water Resources Research*, 34, 1609-1616.
- Constantz, J., Stonestrom, D., Stewart, A.E., Niswonger, R. (2001). Analysis of streambed temperature in ephemeral channels to determine streamflow frequency and duration, *Water Resources Research* 37(2), 317-328.
- Davies PM. 2010. Climate Change Implications for River Restoration in Global Biodiversity Hotspots. *Restoration Ecology* 18; 261–268.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
- Hester, E.T., Gooseff, M.N. (2010). Moving beyond the banks: Hyporheic restoration is fundamental to restoring ecological services and functions of streams, *Environmental science & technology*, 44, 1521–1525.
- Hey, R.D. (1996) Environmentally Sensitive River Engineering. In: G. Petts et al (eds.) *river Restoration: Selected Extracts from the Rivers Handbook*. Blackwell Science Ltd.
- Kendall, M. (1975). *Multivariate analysis*. Charles Griffin.
- Krause, S., Boano, F., Cuthbert, M.O., Fleckenstein, J.H., Lewandowski, J. (2014). Understanding process dynamics at aquifer-surface water interfaces: An introduction to the special section on new modeling approaches and novel experimental technologies, *Water Resources Research*, 50, 1847-1855.
- Larsen, P. (1996) Restoration of River Corridors: German Experiences. In: G. Petts et al (eds.) *river Restoration: Selected Extracts from the Rivers Handbook*. Blackwell Science Ltd.
- Lee, T. Y., Huang, J. C., Kao, S. J., Liao, L. Y., Tzeng, C. S., Yang, C. H., Kalita, P. K., Tung, C. P., 2012. Modeling the effects of riparian planting strategies on stream temperature: Increasing suitable habitat for endangered Formosan Landlocked Salmon in Shei-Pa National Park, Taiwan. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.8440.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International journal of climatology*, 22(13), 1571-1592.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: The state of the science, *Hydrogeology journal*, 10, 52-67.
- Stonestrom, D.A., Constantz, J. ed. (2003). Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams. *USGS Circular 1260*. USGS.

- Thiel, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. In Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A (Vol. 53, pp. 1397-1412).
- Tung, C. P., Hong, N. M., Chen, C. H., & Tan, Y. C. (2004). Regional daily baseflow prediction. Hydrological processes, 18(11), 2147-2164.

表 2.1 各氣象及流量測站坐標及紀錄時間

氣象測站	二度分帶坐標_x	二度分帶坐標_y	紀錄時間		缺漏時間	
			雨量資料	氣溫資料	雨量資料	氣溫資料
環山	279282	2690537	1950-2014 年	1961-2015 年		1961-1968 年, 1985 年 1988 年
松茂	277315	2686660	1970-2014 年	1970-2015 年	1970 年 1-4 月, 1976 年 10-12 月, 1978 年 2、8 月, 1981 年 1-6 月	1970 年 1-4 月, 1976 年 10-12 月, 1981 年 1-6 月, 1982-1985 年, 1988 年, 2015 年 3 月
志佳陽大山	276008	2694265	1967-2002 年			
平岩山	285819	2692008	1967-2002 年			
桃山	278551	2699559	1969-2016 年		1969 年 1-7 月, 2016 年 1-8 月	
捫山	280851	2686573	1970-2002 年			
思源	284995	2699838	1958-2014 年		1958 年 1-6 月	
思源(自動)	284995	2699838	1995-2016 年	1995-2015 年	1995 年 1-6 月	1995 年 1-7 月, 2015 年 4-12 月
武陵農場	285760	2697911	1985-1998 年 2012-2015 年	1985-1998 年	1999 年-2011 年	1985 年 10-12 月, 1986 年 10 月, 1998 年 12 月
流量測站	二度分帶坐標_x	二度分帶坐標_y	紀錄時間		缺漏時間	
七家灣	280275	2693429	1969-2015 年		1984 年 2/29	
有勝溪	280009	2692080	1996-2015 年		1999 年 9 月, 2005 年 7/18-8/17, 2008 年 7/28-10/13, 2012 年 7/10-2013 年 1/15	

表2.2 乾旱指標分級對照表(摘錄自McKee et al. (1993))

SPI 值	乾旱程度	發生機率
0 ~ -0.99	輕微乾旱	34%
-1.00 ~ -1.49	中度乾旱	9.2%
-1.50 ~ -1.99	嚴重乾旱	4.4%
≤-2.0	極端乾旱	2.3%

表 2.3 In-Situ Level Troll 400 沈水式壓力式水位計及 Baro Troll 自計式氣壓計之規格

General	Level TROLL 400	Level Baro TROLL
Temperature ranges ¹	Operational: -20-80°C (-4-176°F) Storage: -40-80°C (-40-176°F) Calibrated: -5-50°C (23-122°F)	Operational: -20-80°C (-4- 176°F) Storage: -40-80°C (-40-176°F) Calibrated: -5-50°C (23-122°F)
Diameter	1.83 cm (0.72 in.)	1.83 cm (0.72 in.)
Length	21.6 cm (8.5 in.)	21.6 cm (8.5 in.)
Weight	197 g (0.43 lb)	197 g (0.43 lb)
Materials	Titanium body; Delrin® nose cone	Titanium body; Delrin nose cone
Output options	Modbus/RS485, SDI-12, 4-20 mA	Modbus/RS485, SDI-12, 4-20 mA
Battery type & life ²	3.6V lithium; 10 years or 2M readings	3.6V lithium; 10 years or 2M readings
External power	8-36 VDC	8-36 VDC
Memory Data records ³ Data logs	2.0 MB 130,000 50 logs	MB 65,000 2 logs
Fastest logging rate	2 per second	1 per minute
Fastest output rate	Modbus: 2 per second SDI-12 & 4-20 mA: 1 per second	Modbus: 2 per second SDI-12 & 4-20 mA: 1 per second
Log types	Linear, Fast Linear, and Event	Linear
Sensor Type/Material	Piezoresistive; titanium	Piezoresistive; titanium
Range	Absolute (non-vented) 30 psia: 11 m (35 ft) 100 psia: 60 m (197 ft) 300 psia: 200 m (658 ft) 500 psia: 341 m (1120 ft)	30 psia (usable up to 16.5 psi; 1.14 bar)
Accuracy	±0.05% full scale (FS) ±0.1% FS	±0.05% FS ±0.1% FS
Resolution	±0.005% FS or better	±0.005% FS or better
Units of measure	Pressure: psi, kPa, bar, mbar, mmHg, inHg, cmH2O, inH2O Level: in., ft, mm, cm, m	Pressure: psi, kPa, bar, mbar, mmHg, inHg, cmH2O, inH2O
Temperature Sensor	Silicon	Silicon
Accuracy ⁴	±0.1°C	±0.1°C
Resolution	0.01°C or better	0.01°C or better
Units of measure	Celsius or Fahrenheit	Celsius or Fahrenheit
Warranty	3 years	3 years
Notes	¹ Temperature range for non-freezing liquids. ² Typical battery life when used within the factory-calibrated temperature range. ³ 1 data record = date/time plus 2 parameters logged (no wrapping) from device within the factory-calibrated temperature range. ⁴ Across factory-calibrated pressure range. ⁵ Across factory-calibrated pressure and temperature ranges. ⁶ Up to 5-year (total) extended warranties are available for all sensors—call for details. Delrin is a registered trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company. Specifications are subject to change without notice.	

表 2.4 Eijkelpkamp Mini-Diver 沈水式壓力式水位計之規格

DI 501 - 10 meter water column		DI 502 - 20 meter water column	
Pressure range	10 mH ₂ O	Pressure range	20 mH ₂ O
accuracy	±0.5 cmH ₂ O	accuracy	±1.0 cmH ₂ O
resolution	0.2 cmH ₂ O	resolution	0.4 cmH ₂ O
DI 505 - 50 meter water column		DI 510 - 100 meter water column	
Pressure range	50 mH ₂ O	Pressure range	100 mH ₂ O
accuracy	±2.5 cmH ₂ O	accuracy	±5.0 cmH ₂ O
resolution	1.0 cmH ₂ O	resolution	2.0 cmH ₂ O
Temperature		Wetted materials	
range	-20 °C to 80 °C	housing	Stainless steel (316L)
compensated range	0 °C to 50 °C	O-ring	Viton®
accuracy	±0.1 °C	pressure sensor	Ceramic (Al ₂ O ₃)
resolution	0.01 °C	cap/nose cone	Nylon PA6 30% glass fibre
Other			
operating elevation range	300 to 5,000 m MSL		
memory	2 x 24,000 measurements		
battery life	10 years with 1 minute or greater sample interval within the compensated temperature range		
weight	55 grams		
sample interval	0.5 second to 99 hour		
sample method	fixed		
Other specifications according to the Diver manual.			

表 2.5 Mini-Log II 自計式溫度計之規格

Specifications			
Temp Range:	-30°C to +80°C	Battery Life:	10 years at typical sampling rates (1 sample per 2 mins)
Temp Accuracy:	Specified: +/- 0.1°C from -5°C to 35°C	Submersible:	Up to 500m
Resolution:	0.01°C	Storage:	1-million samples per deployment
Weight in Air:	52.2 g	Sample Rates:	1 sample per second to 1 sample per day
Weight in Water:	11.5 g		
Physical:	Length: 9.8 cm Diameter: 2.3 cm Weight: 52.2 g	Start Time:	Delayed or immediate study start date selectable
Clock Stability:	+/-1 minute per month	Thermal Time Constant:	63% at ~2min 30 sec, and 90% at less than 5 min, both in stirred bath

表 3.1 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量值[mm]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	92	172	190	190	266	327	236	273	247	102	68	71	783	1453	2236
松茂	86	179	202	232	299	322	211	264	196	90	60	71	817	1384	2154
志佳陽大山	79	188	197	185	285	256	170	233	203	96	56	59	763	1243	2006
平岩山	87	157	157	158	232	268	209	285	285	138	62	62	682	1418	2101
桃山	81	143	160	172	252	225	206	278	248	121	64	72	679	1314	1993
捫山	106	207	223	247	359	388	287	327	299	150	77	80	941	1810	2750
思源	89	116	109	107	167	201	264	376	427	292	175	118	998	1721	2428
思源(自動)	121	158	127	137	201	213	354	412	423	384	224	181	959	2028	2889
武陵農場	63	151	137	157	182	202	155	294	175	66	38	52	593	1073	1667

表 3.2 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	0.28	-0.55	-0.55	1.08	1.24	-0.37	0.28	-0.32	-0.99	0.99	-0.60	1.21	0.77	0.25	1.11
松茂	-1.46	-0.85	-0.18	0.09	-0.18	-0.54	1.21	-0.37	-0.33	-0.27	0.00	1.23	0.22	0.92	1.60
志佳陽大山	2.72	0.98	0.96	1.57	-0.34	-1.16	-0.47	-0.44	-1.86	-0.21	-0.46	1.56	1.97	-1.21	0.56
平岩山	-0.23	-0.17	-0.27	1.57	-0.23	-1.01	-0.31	-0.52	-0.85	-0.66	-0.82	0.66	0.08	-1.07	-0.98
桃山	-1.57	-0.05	-0.17	0.43	-1.90	-1.17	1.31	-0.12	-1.27	0.24	0.29	1.01	0.18	-0.18	0.27
捫山	1.35	0.56	0.82	1.14	-0.98	-1.03	0.16	-0.96	-1.30	0.70	-1.77	0.74	1.39	-1.40	0.02
思源	1.28	0.98	-0.60	1.22	0.77	-1.45	0.17	-0.51	-0.97	0.86	-0.49	3.20	1.44	0.05	0.65
思源(自動)	-0.96	-1.12	-1.40	0.08	0.80	-0.80	0.18	0.26	0.48	-0.55	-0.40	-0.55	-1.04	0.08	-0.48
武陵農場	-0.76	1.15	-1.58	0.14	0.91	0.05	1.53	0.38	-0.91	0.32	0.26	1.79	0.05	1.10	1.67

表 3.3 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均雨量之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山															
松茂															
志佳陽大山	2.43												14.42		
平岩山															
桃山															
捫山															
思源												1.69			
思源(自動)															
武陵農場															

表 3.4 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均無降雨天數[天]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	21	17	18	18	15	13	18	17	18	24	23	23	122	106	228
松茂	22	18	18	17	14	14	18	16	17	24	23	23	121	105	225
志佳陽大山	22	18	18	18	15	15	20	17	17	23	23	24	123	106	230
平岩山	22	17	18	18	15	14	19	16	17	22	23	24	122	103	224
桃山	21	18	18	17	14	15	20	17	16	22	23	23	120	104	224
捫山	19	17	18	17	13	13	16	14	15	19	20	21	112	93	202
思源	17	15	18	18	14	14	17	13	11	13	13	15	97	82	179
思源(自動)	10	9	14	12	10	11	14	9	5	6	8	8	62	54	116
武陵農場	25	18	22	19	18	18	23	20	19	26	25	24	133	124	257

表 3.5 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季無降雨天數之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	1.34	0.23	-0.02	-2.19	-0.72	-0.03	0.42	0.42	0.14	0.16	-0.36	-0.25	-0.58	0.16	-0.76
松茂	1.06	0.60	1.10	-0.41	0.94	-0.47	1.01	0.63	1.53	1.38	0.86	-0.39	1.48	1.15	1.29
志佳陽大山	-1.44	-1.26	-0.21	-1.21	0.43	0.21	0.35	-0.96	0.14	-0.09	-0.23	-1.86	-1.96	-0.29	-1.08
平岩山	0.38	0.18	0.82	-1.82	0.18	-0.17	0.17	-0.93	-0.14	-0.37	1.21	-0.69	-0.50	-0.50	-0.96
桃山	-1.15	0.27	0.16	-1.18	0.85	-0.15	0.14	0.09	-0.11	0.18	-0.92	-1.40	-1.42	0.36	-0.63
捫山	-0.67	-0.89	-0.53	-1.23	0.14	0.00	-1.89	-0.60	-0.72	-1.23	-0.42	-1.35	-2.15	-1.73	-2.49
思源	-2.25	-1.53	-0.77	-1.54	-0.14	0.62	0.74	0.22	-1.06	-1.88	-0.02	-3.69	-3.05	-0.53	-1.85
思源(自動)	-0.40	1.56	0.80	-0.36	0.00	0.56	0.33	0.77	0.59	-0.04	0.70	-0.33	0.84	0.80	1.28
武陵農場	0.14	-0.33	1.62	-0.48	-1.39	0.43	-0.29	-0.86	0.91	-0.38	-0.24	-2.16	-0.33	-0.53	-0.62

表 3.6 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季無降雨天數之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山				-0.07											
松茂															
志佳陽大山													-0.50		
平岩山															
桃山															
捫山													-0.44		-0.23
思源	-0.10											-0.17	-0.48		
思源(自動)															
武陵農場												-0.43			

表 3.7 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均降雨強度[mm/day]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	9.57	14.26	14.99	15.54	16.12	19.55	19.34	20.14	19.94	18.60	9.56	9.16	13.19	19.28	16.61
松茂	9.20	13.87	14.27	15.61	17.03	19.11	16.33	17.71	14.15	14.92	7.30	9.07	13.18	17.31	15.51
志佳陽大山	9.35	15.12	15.30	14.21	17.46	16.65	13.87	16.58	15.52	13.44	8.03	8.63	12.90	16.01	14.80
平岩山	9.79	11.67	11.14	11.90	14.51	16.22	17.41	18.37	20.71	16.02	8.85	7.81	11.20	17.65	14.95
桃山	8.41	11.24	11.86	12.21	14.89	14.67	18.38	19.34	17.59	13.99	7.53	8.65	11.05	16.89	14.32
捫山	9.02	14.99	16.04	16.94	19.96	22.96	19.72	20.18	19.24	13.19	8.07	8.76	13.15	19.86	17.10
思源	6.54	8.10	8.90	8.44	9.81	12.41	18.23	20.93	23.12	16.22	9.97	7.40	11.86	17.32	13.29
思源(自動)	5.65	7.95	7.38	7.13	9.98	11.28	20.24	18.32	16.78	15.03	10.24	7.87	7.96	15.62	11.93
武陵農場	9.57	11.15	13.30	11.95	14.98	14.17	19.28	25.11	21.18	10.72	7.01	7.09	11.39	18.92	15.40

表 3.8 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季降雨強度之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	1.04	-0.01	-0.30	-0.16	0.90	-0.38	0.05	-0.28	-1.13	1.08	0.04	1.51	0.69	0.43	0.74
松茂	-1.10	-0.25	0.58	0.21	0.64	-0.89	2.22	-0.31	0.31	0.84	1.60	1.94	1.50	1.85	2.67
志佳陽大山	1.48	1.02	0.99	2.30	0.41	-0.74	-0.70	-1.02	-2.12	-0.29	-1.34	0.74	1.34	-1.53	-0.37
平岩山	-0.02	-0.43	0.59	0.99	-0.15	-1.77	-0.03	-0.76	-1.59	-0.85	0.13	0.65	0.17	-1.28	-1.40
桃山	-2.90	0.06	0.12	-0.30	-1.95	-1.66	1.65	-0.26	-1.08	1.07	-0.50	1.05	-0.37	0.52	0.16
捫山	1.42	0.84	1.44	1.00	-0.52	-1.03	-1.11	-1.11	-1.36	0.26	-2.45	0.06	1.14	-2.05	-0.93
思源	-0.04	0.51	-1.61	-0.05	1.31	-1.08	0.36	-0.26	-1.74	-0.29	-0.61	1.57	-0.11	-0.64	-0.76
思源(自動)	-1.12	-0.56	-1.24	0.00	-0.22	-1.28	0.26	0.48	0.92	-0.04	0.40	-0.55	-1.60	0.32	-0.24
武陵農場	-1.19	0.81	-1.48	-0.43	-0.53	-0.14	2.01	0.00	0.43	0.69	0.92	1.05	-0.33	1.00	1.39

表 3.9 各雨量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季降雨強度之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山															
松茂							0.23								0.13
志佳陽大山				0.26					-0.24						
平岩山															
桃山	-0.11				-0.15										
捫山											-0.16			-0.14	
思源															
思源(自動)															
武陵農場							1.11								

表 3.10 各雨量測站於觀測期間之 SPI-3、SPI-6、SPI-9 及 SPI-12 之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	SPI	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12
環山	SPI>0(不乾旱)	0.08	0.79	0.71	1.31	1.54
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	-0.09	0.45	-0.75	-2.16	-1.02
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	0.26	-1.07	-0.53	-0.21	-0.85
松茂	SPI>0(不乾旱)	-0.24	1.66	1.63	2.06	1.94
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	-0.48	-0.64	-0.65	-0.66	-0.37
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	2.70	0.29	0.36	0.76	-0.13
志佳陽大山	SPI>0(不乾旱)	0.66	1.11	-1.62	1.31	1.05
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	0.29	-0.25	0.19	-1.15	-0.23
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	-0.69	-1.07	0.03	-1.45	-1.48
平岩山	SPI>0(不乾旱)	-1.68	-0.19	0.31	-0.12	-1.13
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	1.16	1.18	-0.26	-0.63	0.07
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	-1.11	-0.74	0.25	-0.14	0.46
桃山	SPI>0(不乾旱)	-0.07	0.49	0.20	0.24	1.19
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	-0.72	-0.93	-0.97	-0.47	-0.94
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	0.77	-1.14	0.42	0.72	0.28
捫山	SPI>0(不乾旱)	-0.47	-0.45	1.02	0.77	0.86
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	0.47	1.10	-0.85	-1.35	-1.35
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	0.00	-1.04	0.37	0.19	0.09
思源	SPI>0(不乾旱)	0.89	1.52	0.62	1.20	0.46
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	-0.92	-0.40	-1.24	-1.43	-1.03
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	0.65	-1.81	-1.43	-2.03	-1.78
思源自動	SPI>0(不乾旱)	-1.06	-0.96	-1.60	-1.76	-1.21
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	1.33	1.00	1.76	1.47	1.07
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	0.00	1.62	0.48	-0.85	0.99
武陵農場	SPI>0(不乾旱)	0.86	0.33	-0.48	0.24	0.86
	0 \geq SPI>-1.0(輕微乾旱)	-0.29	0.43	1.48	0.67	0.72
	-1.0 \geq SPI>-1.5(中度乾旱)	-0.05	0.48	-0.74	-1.05	-0.53

表 3.11 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均流量[cms]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
七家灣	2.22	3.37	4.50	4.98	6.19	9.09	7.33	11.06	10.4	7.34	3.36	2.55	3.49	8.47	6.04
有勝溪	0.45	0.62	0.64	0.63	0.79	1.27	1.34	2.75	2.49	2.17	0.91	0.70	0.65	1.77	1.20

表 3.12 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季流量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
七家灣	1.18	1.15	-0.22	0.22	0.34	-0.72	1.48	1.10	0.08	0.64	1.12	2.10	1.26	0.80	1.64
有勝溪	1.12	-0.56	0.16	0.72	1.68	-1.12	0.48	1.58	1.11	1.48	1.13	0.87	-0.16	2.00	1.84

表 3.13 各流量測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季流量之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
七家灣												0.02			
有勝溪														0.06	

表 3.14 各流量測站於觀測期間之極端流量之平均值[cms]

測站	1-day min	1-day max	3-day min	3-day max	7-day min	7-day max	30-day min	30-day max	90-day min	90-day max
七家灣	1.33	113.4	1.36	73.68	1.40	46.39	1.61	21.64	2.57	12.43
有勝溪	0.19	36.42	0.21	22.16	0.22	13.13	0.29	5.43	0.44	3.23

表 3.15 各流量測站於觀測期間之極端流量之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	1-day min	1-day max	3-day min	3-day max	7-day min	7-day max	30-day min	30-day max	90-day min	90-day max
七家灣	2.56	1.21	2.53	1.15	2.23	1.21	2.33	0.92	1.48	0.84
有勝溪	1.39	1.31	1.57	1.57	2.09	1.66	2.09	1.57	1.83	2.00

表 3.16 各流量測站於觀測期間之極端流量之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	1-day min	1-day max	3-day min	3-day max	7-day min	7-day max	30-day min	30-day max	90-day min	90-day max
七家灣	0.01		0.01		0.01		0.02			
有勝溪					0.01		0.01			0.06

表 3.17 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年流量逆轉次數

測站	年內平均流量增加率	年內平均流量減少率	每年流量逆轉次數
七家灣	0.55	-0.21	73.57
有勝溪	0.063	-0.049	89.1

表 3.18 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年流量逆轉次數之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	年內平均流量增加率	年內平均流量減少率	每年流量逆轉次數
七家灣	-3.45	2.93	4.42
有勝溪	-0.28	1.03	1.84

表 3.19 各流量測站於觀測期間之年內平均流量增加率、年內平均流量減少率[cms]、與每年流量逆轉次數之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	年內平均流量增加率	年內平均流量減少率	每年流量逆轉次數
七家灣	-0.0104	0.0029	0.67
有勝溪			

表 3.20 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度[度 C]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	8.70	10.32	12.85	15.64	17.73	19.12	20.00	19.45	18.67	16.37	13.30	9.97	11.79	18.55	15.20
松茂	8.33	10.13	12.76	16.13	18.75	20.29	21.00	20.15	18.61	15.58	12.46	9.12	11.53	19.08	15.42
武陵農場	8.86	10.10	13.70	16.69	18.84	20.76	21.48	20.78	19.11	16.71	13.38	10.02	12.16	19.68	16.02
思源自動	4.89	6.69	9.37	12.12	14.39	16.26	16.72	16.32	14.85	12.17	9.54	5.62	7.94	15.09	11.63

表 3.21 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值，達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	0.75	2.24	2.13	1.92	4.46	4.89	4.59	4.65	4.02	2.64	1.96	-0.09	2.39	5.12	3.98
松茂	-4.22	-3.17	-3.57	-2.39	-1.21	-0.04	-0.41	-1.96	-4.78	-4.36	-3.13	-2.55	-4.65	-3.98	-5.00
武陵農場	0.82	1.26	2.00	0.07	0.22	-2.45	-0.67	0.07	1.11	0.00	2.75	1.77	1.70	-0.67	0.96
思源自動	-2.40	0.16	-1.12	-2.35	-0.17	0.00	-0.88	-1.12	0.56	-2.40	-1.04	-2.24	-2.46	-1.44	-1.68

表 3.22 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季平均溫度之變化率 (Theil-Sen 斜率，僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山		0.03	0.02		0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.02		0.02	0.05	0.04
松茂	-0.10	-0.07	-0.06	-0.03				-0.03	-0.07	-0.11	-0.08	-0.08	-0.08	-0.03	-0.06
武陵農場			0.20			-0.10					0.16				
思源自動	-0.12			-0.08						-0.09		-0.10	-0.05		

表 3.23 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之平均[度 C]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	16.71	17.58	19.73	21.96	23.40	25.04	27.01	26.32	25.60	23.85	21.22	18.23	19.24	25.21	22.25
松茂	17.96	18.69	20.82	22.93	24.33	25.94	28.11	27.52	26.64	25.08	22.29	19.26	20.42	26.31	23.47
思源自動	8.82	11.04	14.40	16.75	18.63	20.52	21.66	21.02	18.84	15.69	13.02	9.25	12.10	19.38	15.88

表 3.24 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	0.63	1.13	1.72	0.72	2.10	1.72	0.80	0.93	1.25	0.71	1.20	-0.64	1.77	1.30	1.95
松茂	-1.82	-0.28	-0.22	-2.04	-1.37	-0.40	-1.30	-1.74	-1.42	-0.92	-1.07	-3.33	-1.74	-1.83	-2.00
思源自動	-3.99	-1.04	-2.48	-3.48	-3.48	-2.96	-3.43	-3.83	-2.16	-3.51	-3.19	-3.59	-4.23	-4.31	-4.47

表 3.25. 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最高溫度之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山					0.04										
松茂				-0.07								-0.08			-0.04
思源自動	-0.23		-0.18	-0.19	-0.11	-0.12	-0.09	-0.09	-0.09	-0.21	-0.14	-0.20	-0.15	-0.10	-0.12

表 3.26 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之平均[度 C]

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	4.26	5.85	8.29	10.69	12.90	14.24	13.99	14.19	13.38	10.68	7.98	4.88	7.00	13.22	10.15
松茂	4.30	6.25	8.66	11.48	13.97	15.31	15.03	15.25	14.13	11.47	8.43	5.22	7.42	14.20	10.93
思源自動	1.63	3.22	5.50	8.70	11.30	13.28	12.91	12.70	11.48	8.98	6.50	2.46	4.57	11.73	8.27

表 3.27 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之變化趨勢 (Mann-Kendall 檢定 Z 值, 達顯著水準者以粗體標註)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山	-1.08	0.63	-1.28	0.91	-0.71	-0.38	0.43	-0.48	0.14	-1.07	0.53	-0.09	-0.48	-0.46	-0.61
松茂	0.99	1.94	1.69	2.84	0.76	1.92	3.02	1.71	2.88	1.18	1.72	1.40	2.56	3.29	2.79
思源自動	-1.84	0.88	-0.88	-0.44	2.05	2.48	1.28	1.20	1.28	-0.64	0.48	-1.68	-0.99	1.76	1.36

表 3.28 各氣溫測站於觀測期間之年、月、與乾、濕季最低溫度之變化率 (Theil-Sen 斜率, 僅顯示 Mann-Kendall 檢定 Z 值達顯著水準者)

測站	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	乾季	濕季	年
環山															
松茂				0.05			0.04		0.03				0.03	0.03	0.02
思源自動					0.11	0.04									

表 3.29 有勝溪斷流處流量量測值[cms]

日期\斷面	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4
坐標	24°23'27.54"N 121°21'02.58"E	24°23'26.55"N 121°20'54.97"E	24°23'24.68"N 121°20'54.60"E	24°23'22.92"N 121°20'51.94"E
2016/7/1	0.17	0.08	0.03	0.06
2016/7/14	0.26	0.17	0.15	0.15
2016/8/10	0.15	0.026	斷流	無流動水
2016/9/7	0.18	0.14	0.065	0.11
2016/11/9	0.16	0.067	河川改道	0.079

表 3.30 七家灣溪斷流處流量量測值[cms]

日期\斷面	C'-1	C'-2	C'-3
2016/7/15	2.21	2.24	2.26
日期\斷面	C-1	C-2	
坐標	24°23'29.27"N 121°18'33.61"E	24°23'22.52"N 121°18'37.43"E	
2016/9/8	0.67	0.61	
2016/11/10	1.02	0.83	

表 3.31 桃山北溪斷流處流量量測值[cms]

日期\斷面	T-1	T-2	T-3
坐標	24°23'57.35"N 121°18'32.10"E	24°23'54.88"N 121°18'32.45"E	24°23'51.92"N 121°18'33.02"E
2016/7/15	0.42	0.46	0.35
2016/9/8	未測	0.19	0.18
2016/11/10	未測	0.46	0.33

表 3.32 有勝溪觀測井基本資料與儀器配置

位置 監測資料	上游 (well A)		中游 (well B)		下游 (well C)		復育中心 (WL-1)
	1 吋井	2 吋井	1 吋井	2 吋井	1 吋井	2 吋井	2 吋井
監測時間	07/15-09/13	07/15-09/13	07/15-09/13	07/15-09/13	07/15-08/10 09/07-09/13	07/15-09/13	07/15-11/09
大氣壓力	-	-	-	Baro Troll	-	-	-
大氣溫度	-	-	-	Baro Troll	-	-	-
河川水位	Mini-Diver	-	Mini-Diver		Mini-Diver	-	-
地下水位	-	Level Troll 400	-	Level Troll 400	-	Level Troll 400	Level Troll 400
土壤溫度	Minilog-II-T	Level Troll 400	Minilog-II-T	Level Troll 400	Minilog-II-T	Level Troll 400	Level Troll 400
水質	-	Multi-Parameter Troll 9500	-	Multi-Parameter Troll 9500	-	Multi-Parameter Troll 9500	Multi-Parameter Troll 9500

表 3.33 上游井 (well A) 溫度敘述統計資料表

°C	大氣 (baro)	0 cm (mini-diver)	20 cm (minilog)	40 cm (minilog)	75 cm (minilog)	125 cm (minilog)	225 cm (minilog)	360 cm (minilog)	360 cm (level troll 400)
平均數 (Mean)	18.60	15.95	15.62	15.62	15.55	15.57	15.55	15.55	14.91
標準誤 (SD)	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
中間值 (Median)	17.13	15.59	15.26	15.27	15.20	15.23	15.25	15.26	14.82
眾數 (Mode)	17.13	14.88	14.87	14.94	14.74	14.87	14.76	14.74	14.64
標準差 (SE)	4.88	1.36	1.21	1.19	1.19	1.17	1.08	1.07	0.61
變異數 (Variance)	23.78	1.84	1.47	1.41	1.41	1.36	1.16	1.14	0.37
最小值 (Minimum)	8.60	13.49	13.65	13.70	13.62	13.66	13.68	13.71	13.53
最大值 (Maximum)	32.60	22.54	24.17	23.14	22.60	22.78	22.13	21.49	21.08
資料數 (Number)	5759	5757	5764	5764	5765	5765	5765	5765	5757

表 3.34 中游井 (well B) 溫度敘述統計資料表

°C	大氣 (baro)	0 cm (mini-diver)	20 cm (minilog)	40 cm (minilog)	75 cm (minilog)	125 cm (minilog)	225 cm (minilog)	310 cm (minilog)	360 cm (level troll 400)
平均數 (Mean)	18.60	16.21	16.24	15.99	15.99	15.94	15.97	15.96	15.96
標準誤 (SD)	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
中間值 (Median)	17.13	15.26	15.45	15.41	15.40	15.36	15.41	15.42	15.49
眾數 (Mode)	17.13	14.63	15.20	14.81	14.73	14.81	14.87	14.77	15.15
標準差 (SE)	4.88	2.60	2.24	1.73	1.72	1.72	1.70	1.66	1.51
變異數 (Variance)	23.78	6.78	5.03	3.00	2.96	2.95	2.88	2.75	2.28
最小值 (Minimum)	8.60	12.56	13.25	13.43	13.47	13.43	13.49	13.49	13.59
最大值 (Maximum)	32.60	29.09	26.12	22.52	25.22	23.87	23.83	24.28	21.09
資料數 (Number)	5759	5715	5754	5755	5760	5761	5761	5761	5713

表 3.35 下游井 (well C) 溫度敘述統計資料表

°C	大氣 (baro)	0 cm (mini-diver)	20 cm (minilog)	40 cm (minilog)	75 cm (minilog)	125 cm (minilog)	225 cm (minilog)	360 cm (minilog)	360 cm (level troll 400)
平均數 (Mean)	18.60	16.59	17.15	17.94	17.76	17.46	17.01	16.67	16.30
標準誤 (SD)	0.06	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
中間值 (Median)	17.13	16.49	16.50	17.19	17.45	17.52	17.29	16.58	16.30
眾數 (Mode)	17.13	16.42	16.08	16.25	15.88	18.82	17.54	16.42	16.39
標準差 (SE)	4.88	0.94	2.34	2.48	1.84	1.41	1.01	0.89	0.91
變異數 (Variance)	23.78	0.87	5.50	6.14	3.40	2.00	1.03	0.80	0.84
最小值 (Minimum)	8.60	14.72	12.14	14.36	14.67	14.72	14.73	14.70	14.32
最大值 (Maximum)	32.60	22.39	28.23	28.01	25.73	23.36	22.70	23.02	22.06
資料數 (Number)	5759	3082	5756	3085	3085	3085	3085	3085	5757

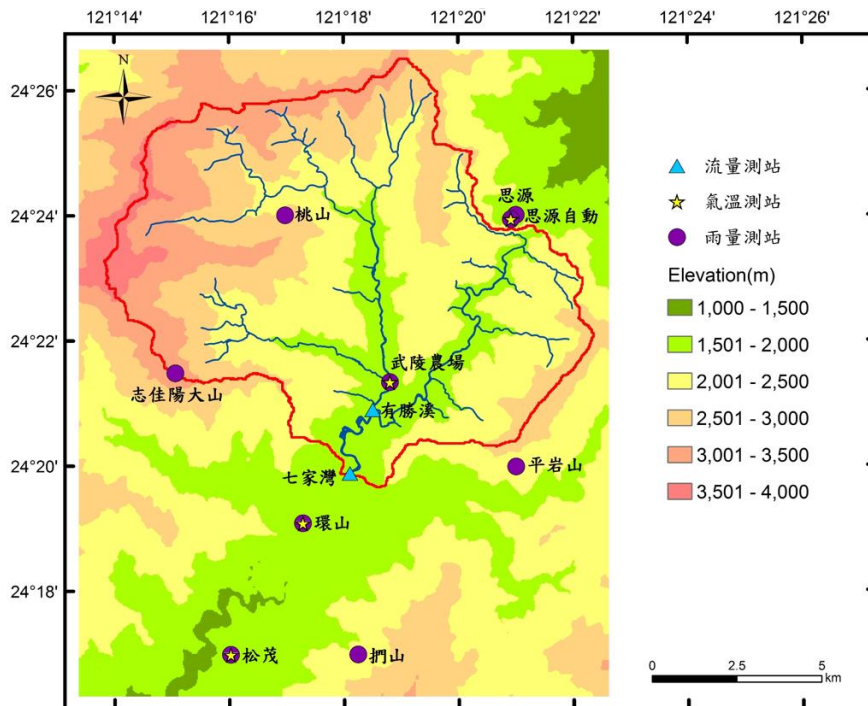


圖 2.1 各氣象及流量測站位置圖

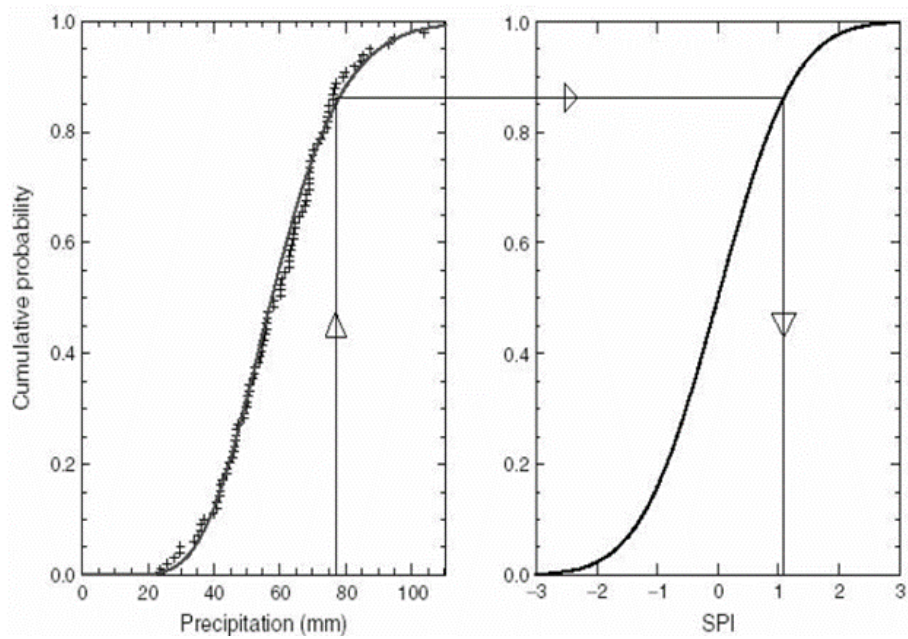


圖 2.2 求取SPI過程圖(摘錄自 Benjamin, 2012)

Standardized Precipitation Index

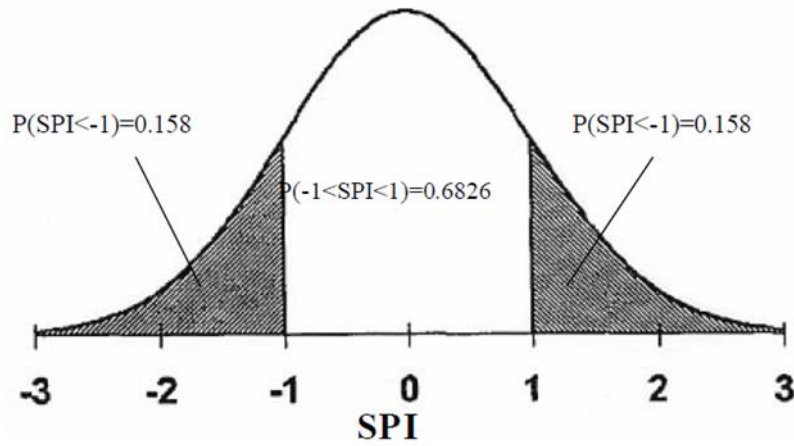


圖 2.3 標準化降雨指標機率分佈圖(摘錄自經濟部水資源局,1999)

組別	內容	IHA	代號
1	每個月之流量	各月份之流量平均值	月份(英文)
2	年極端值之量	年最小 1 日流量平均值	1-day min
		年最大 1 日流量平均值	1-day max
		年最小 3 日流量平均值	3-day min
		年最大 3 日流量平均值	3-day max
		年最小 7 日流量平均值	7-day min
		年最大 7 日流量平均值	7-day max
		年最小 30 日流量平均值	30-day min
		年最大 30 日流量平均值	30-day max
		年最小 90 日流量平均值	90-day min
		年最大 90 日流量平均值	90-day max
3	年極端值之發生時間	年最小 7 日流量平均值對年平均流量比值	Base flow
		年最大 1 日流量發生時間	Date max
4	高及低流量之頻率及延時	年最小 1 日流量發生時間	Date min
		每年發生高流量之次數	Hi pulse #
		每年發生低流量之次數	Lo pulse #
		高流量平均延時	Hi pulse L
5	流量變化之改變率及頻率	低流量平均延時	Lo pulse L
		流量平均增加率	Rise rate
		流量平均減少率	Fall rate
		每年流量逆轉次數	Reversals

圖 2.4 IHA 之分類表 (摘自覃炳皓, 2012)

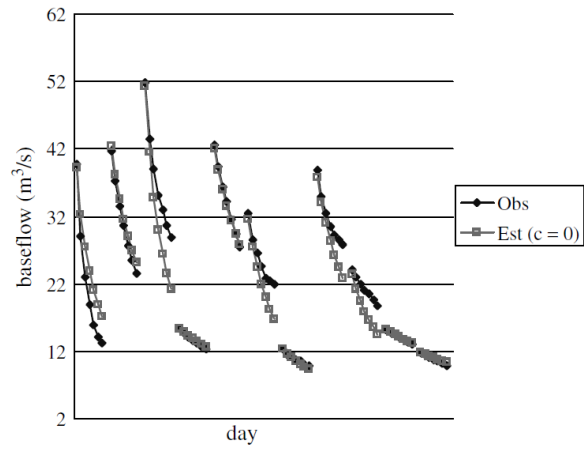
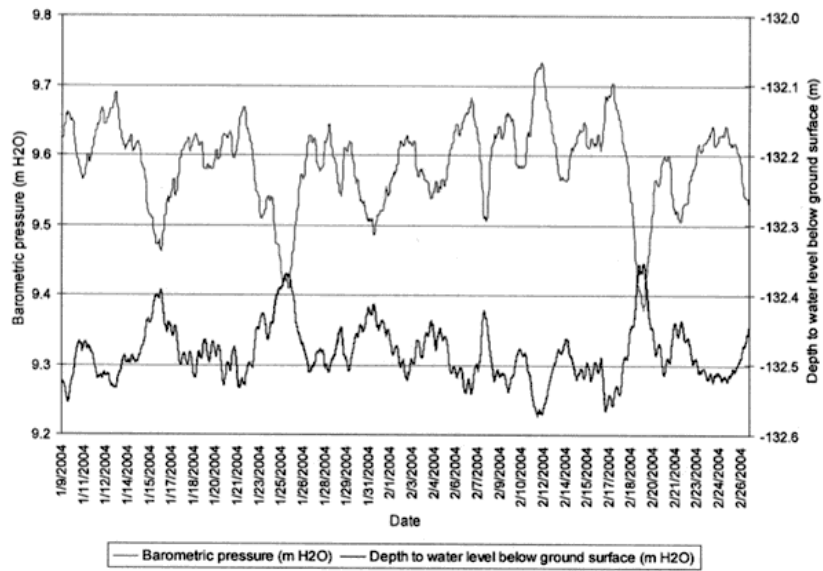


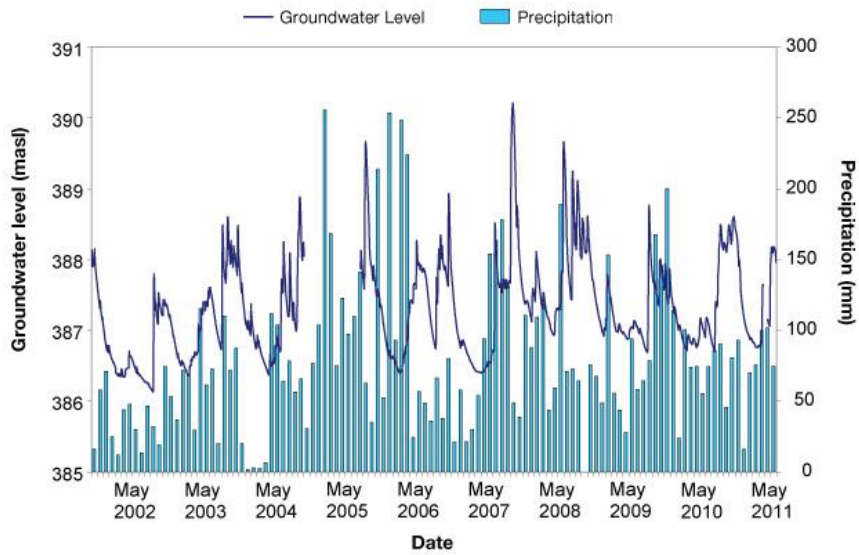
圖 2.5 基流量推估模式於卑南溪之推估結果（摘自 Tung et al., 2004）



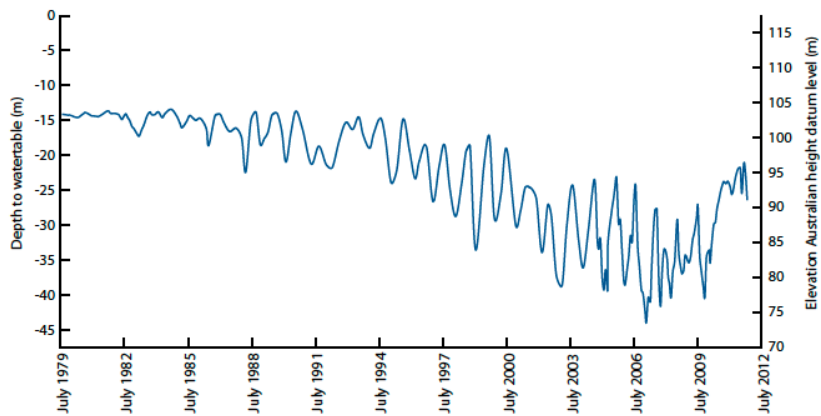
圖 2.6 於復育中心旁水井進行水位監測



(a)



(b)



(c)

圖 2.7 地下水水位變化分析：(a) 受氣壓影響，(b) 受降雨影響，(c) 受抽水影響

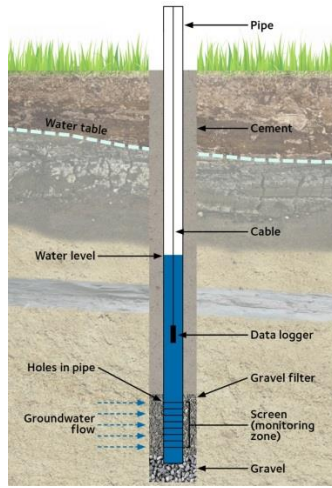


圖 2.8 沈水式壓力式水位計觀測井中安裝示意圖



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 2.9 In-Situ Troll 400 沈水式壓力式水位計：(a)沈水式壓力轉換儀與資料記錄器(含電池)，(b) 傳輸電纜，(c) 電腦連接纜線，(d) Mini-Diver，(e) In-Situ Baro Troll (摘自 <https://in-situ.com/products/water-level-loggers/level-troll-700-data-logger/>)

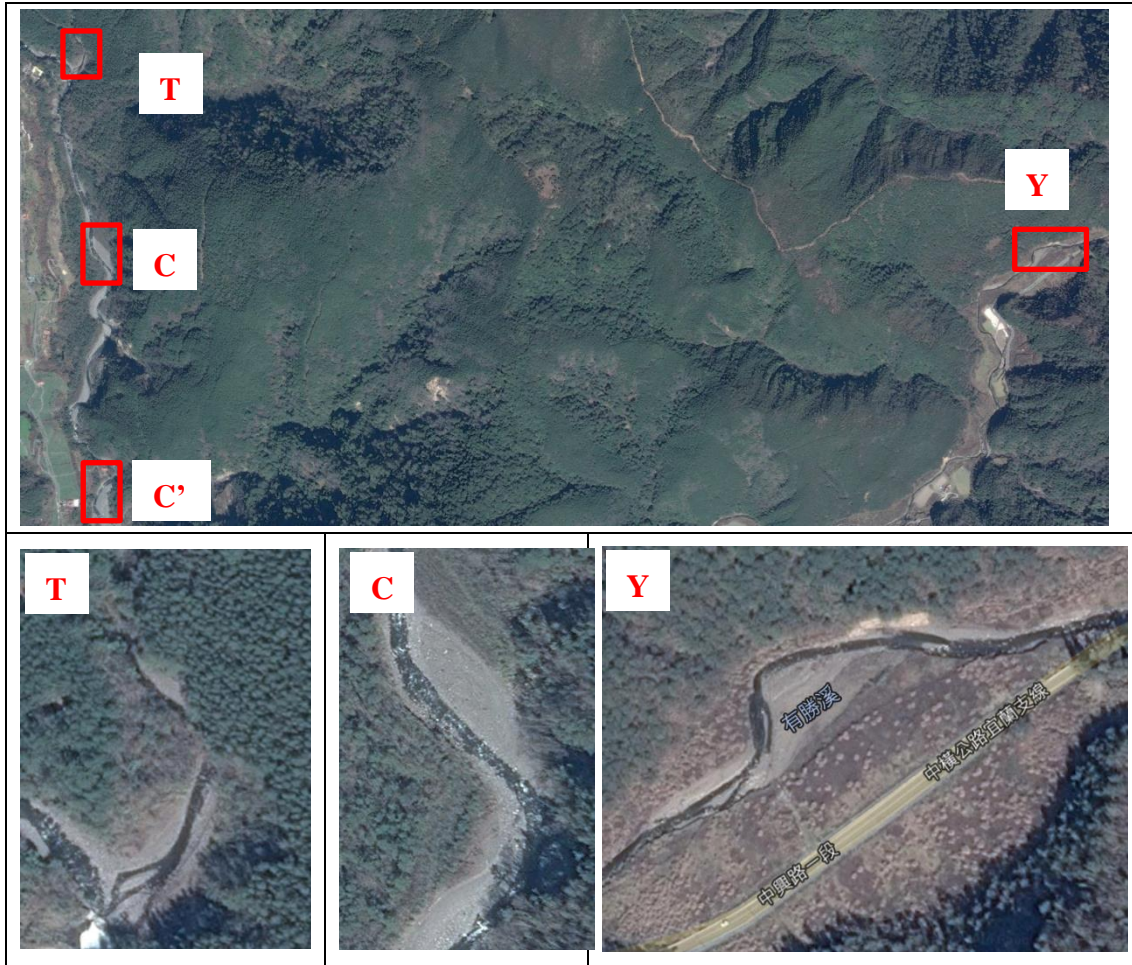


圖 2.10 桃山北溪（左圖）、七家灣溪（中）及有勝溪（右）曾斷流之河段

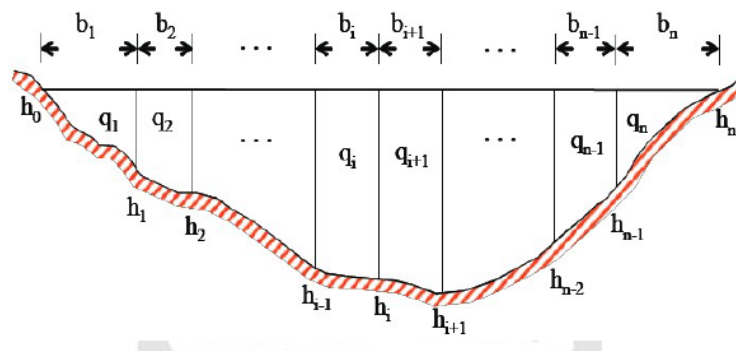


圖 2.11 流速面積法子斷面切分示意圖



圖 2.12 有勝溪河床上水位及溫度監測井之位置（紅點，共三處）及相關照片（已遭 2016/9/15 侵台之梅姬颱風沖毀）

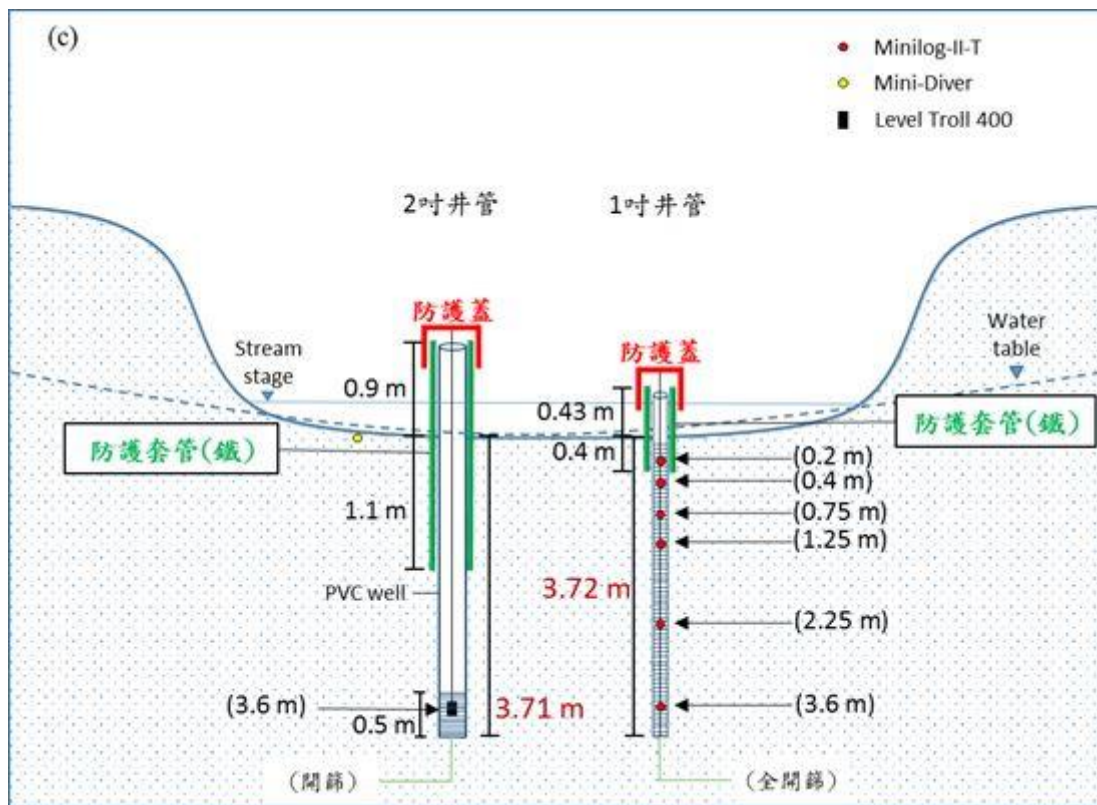


圖 2.13. 上游河段水位及水溫觀測井 (Well A) 之配置圖 (已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖毀)

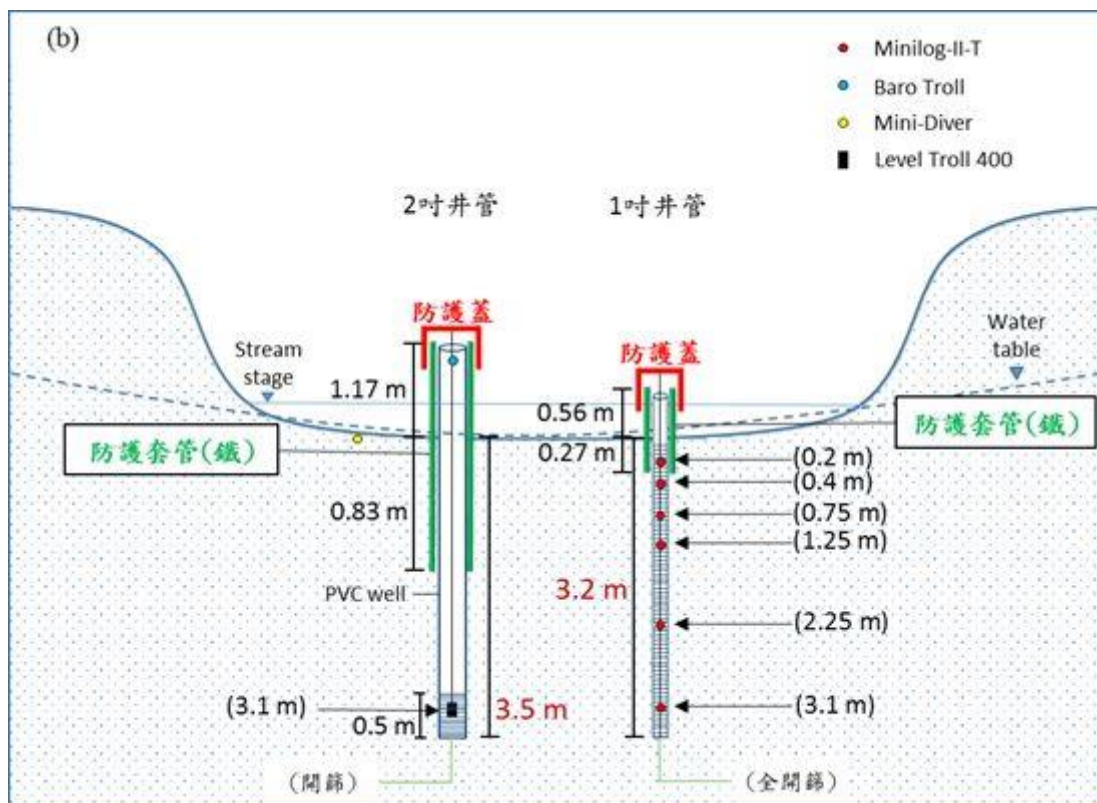


圖 2.14. 中游河段水位及水溫觀測井 (Well B) 之配置圖 (已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖毀)

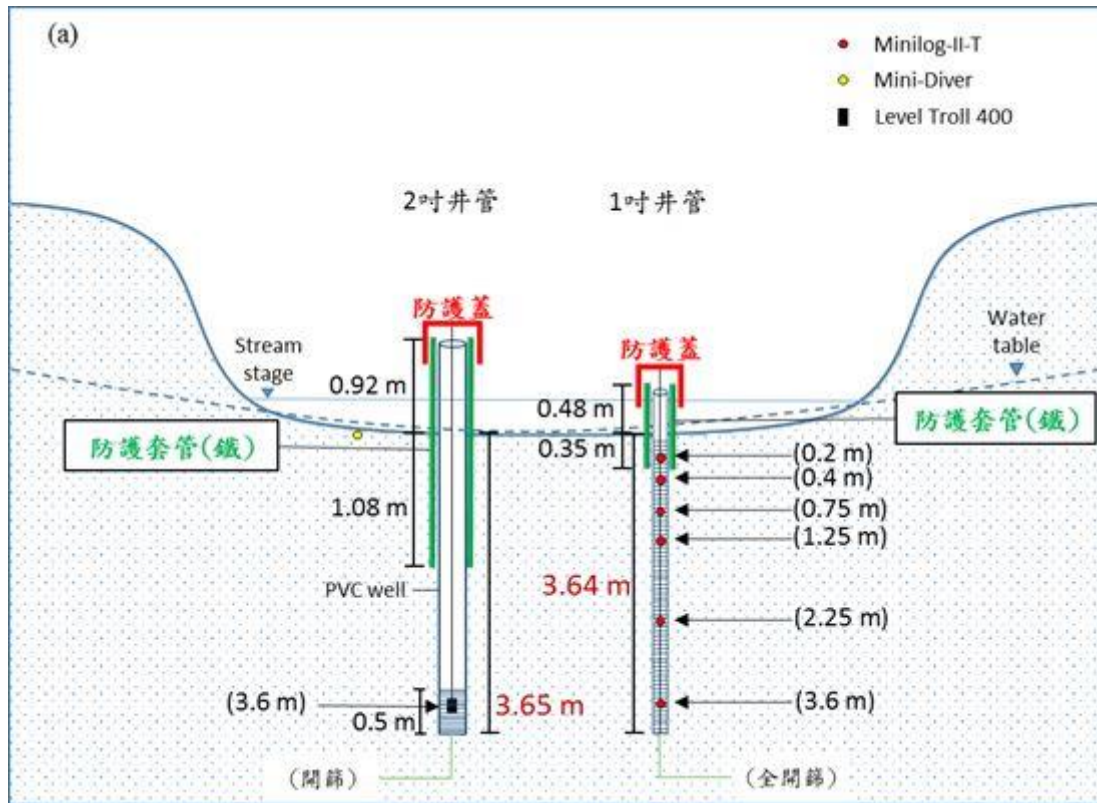


圖 2.15. 下游河段水位及水溫觀測井 (Well C) 之配置圖 (已遭 2016/9/25 侵台之梅姬颱風沖毀)



圖 2.16 Minilog-II 自記式溫度計

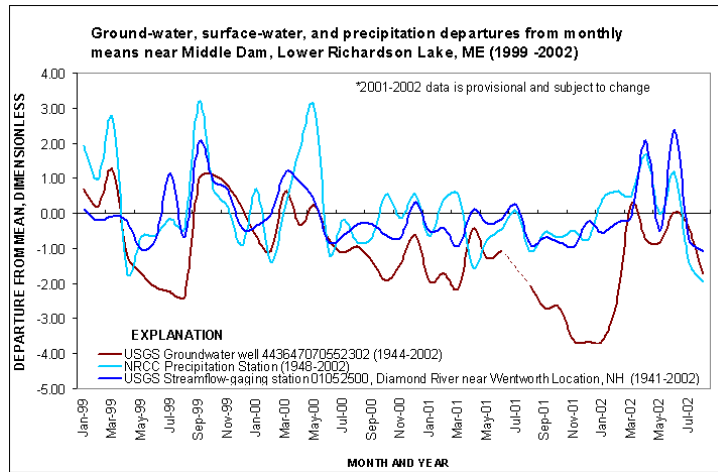


圖 2.17 降雨、地表水及地下水之時間序列 (摘自 <http://me.water.usgs.gov/gwswpi.html>)

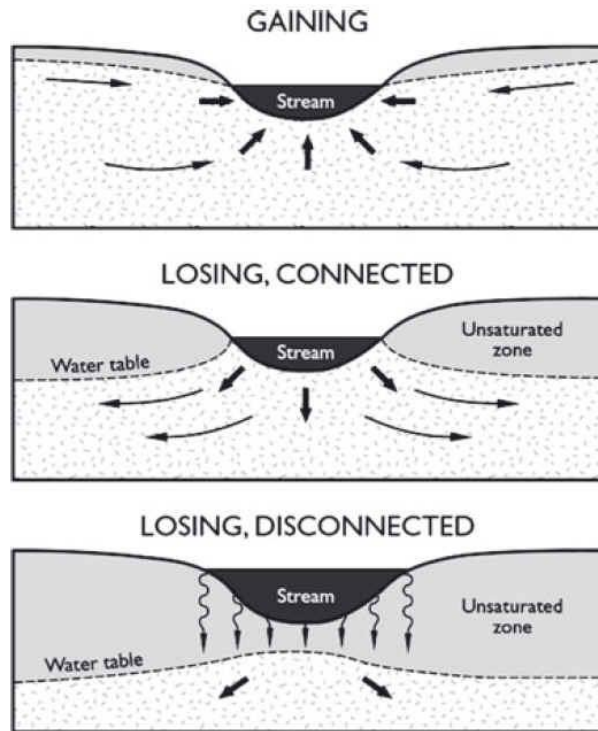


圖 2.18 河水與河床間之交互作用：(a) 獲得河川、(b) 流失河川、(c) 流失不連通河 (摘自 Brunner et al., 2011)

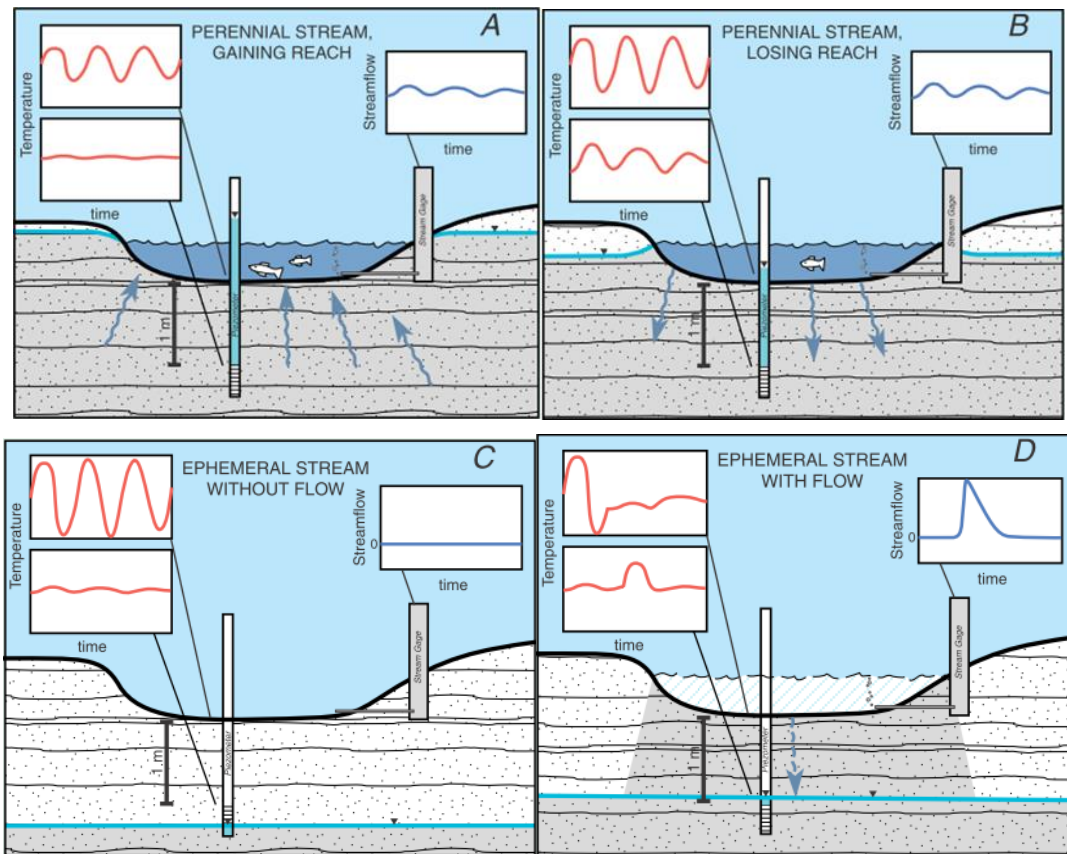


圖 2.19 理想中河道與地下水可能發生的四種交互作用：(a) 河川由底層沉積物獲得補注，(b) 河川補注至底層沉積物，(c) 無水流事件的間歇性河道，(d) 有水流事件的間歇性河道（摘自 Stonestrom and Constantz, 2003）

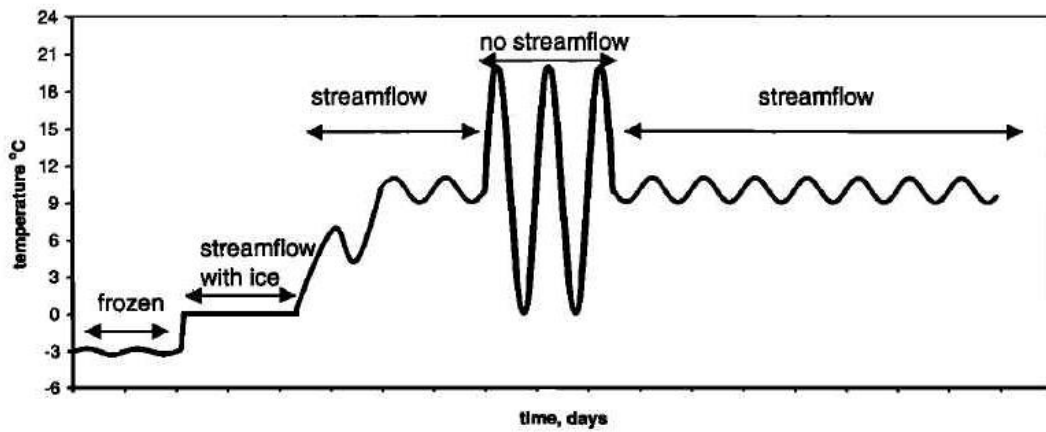


圖 2.20 間歇性河流之河床表面溫度變化（摘自 Constantz et al., 2001）

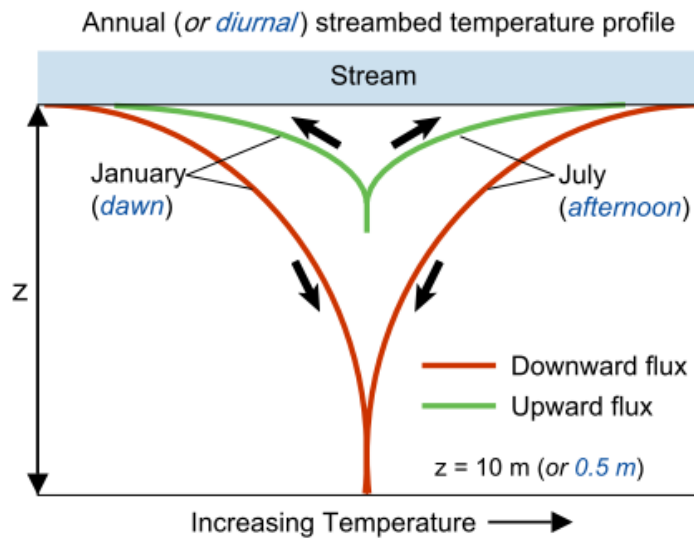


圖 2.21 河床沉積物年（日）溫度包絡線之關係圖（摘自 Stonestrom and Constantz, 2003）

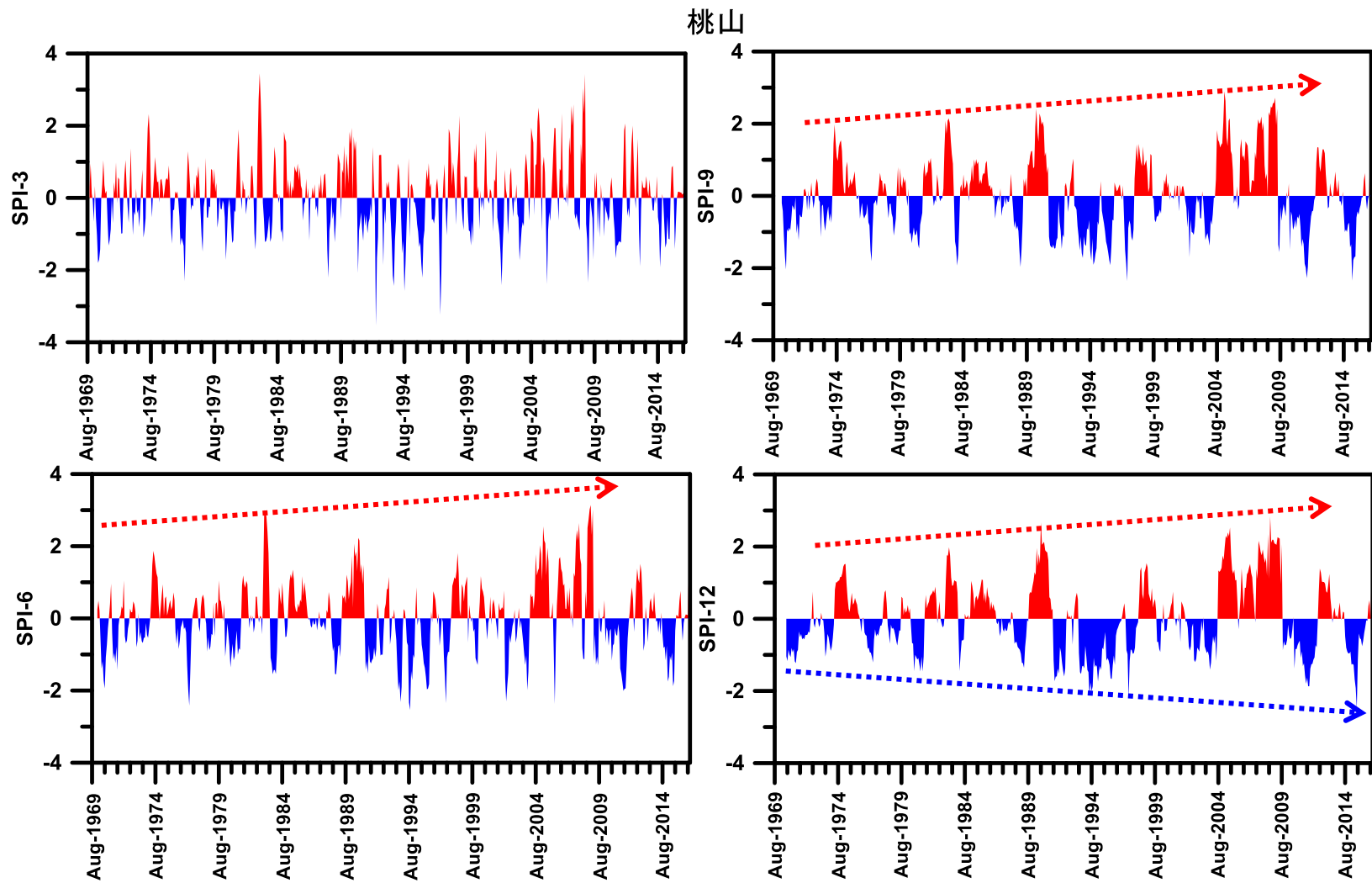


圖 3.1 桃山雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢 (有箭頭指示者表示通用 Mann-Kendall 統計檢定)

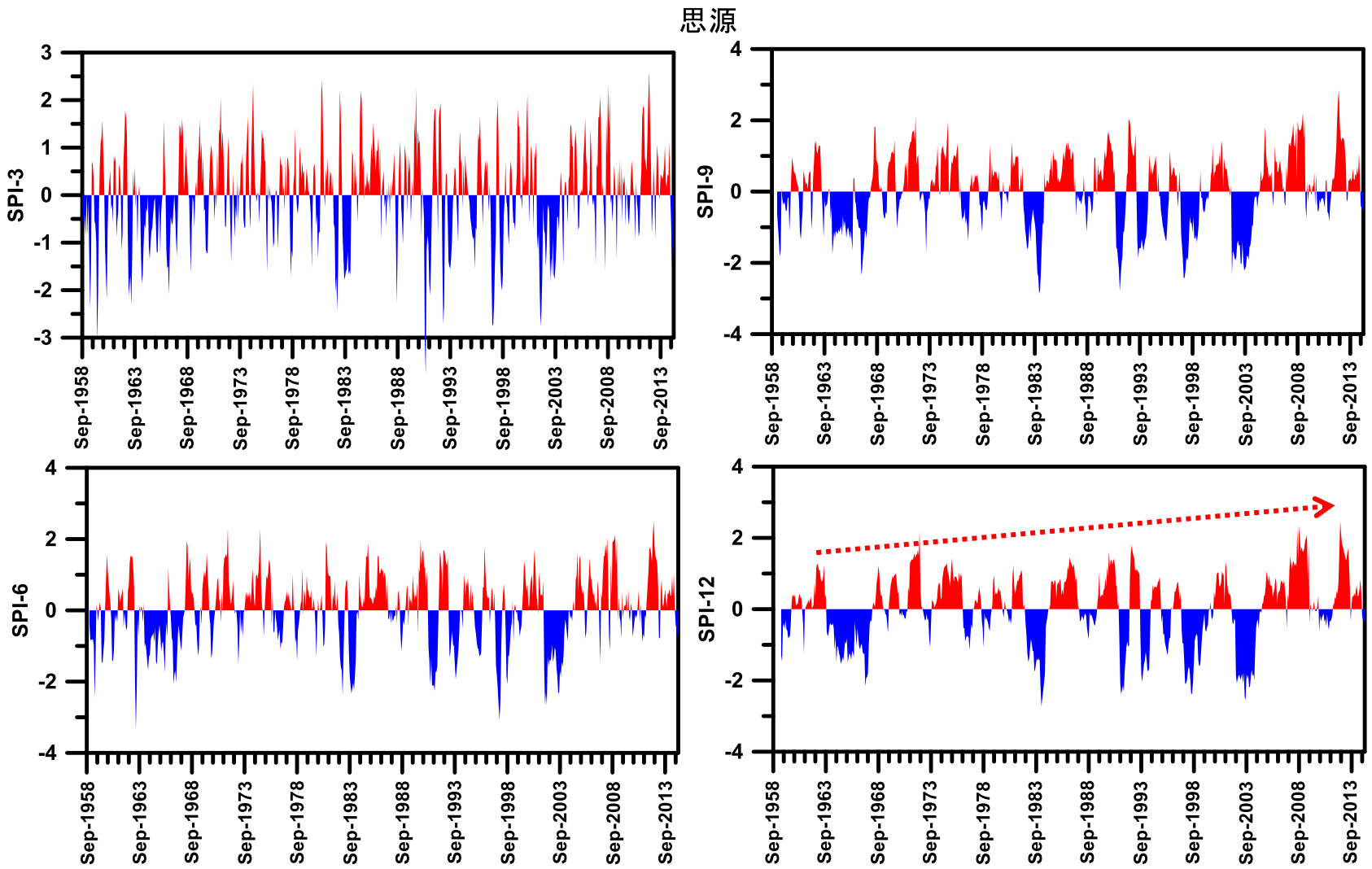


圖 3.2 思源雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢 (有箭頭指示者表示通用 Mann-Kendall 統計檢定)

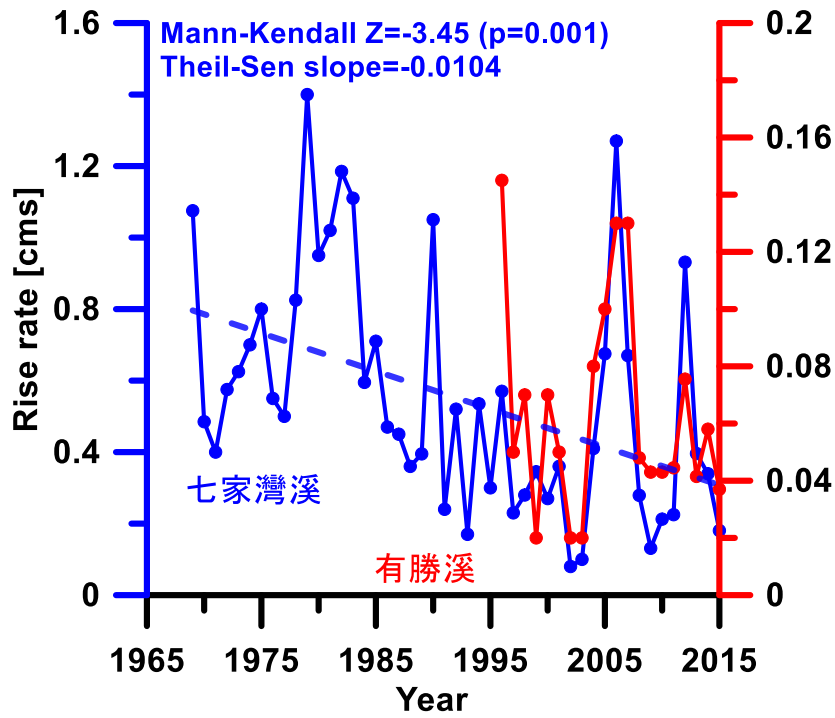


圖 3.3 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年內平均流量增加率 [cms]

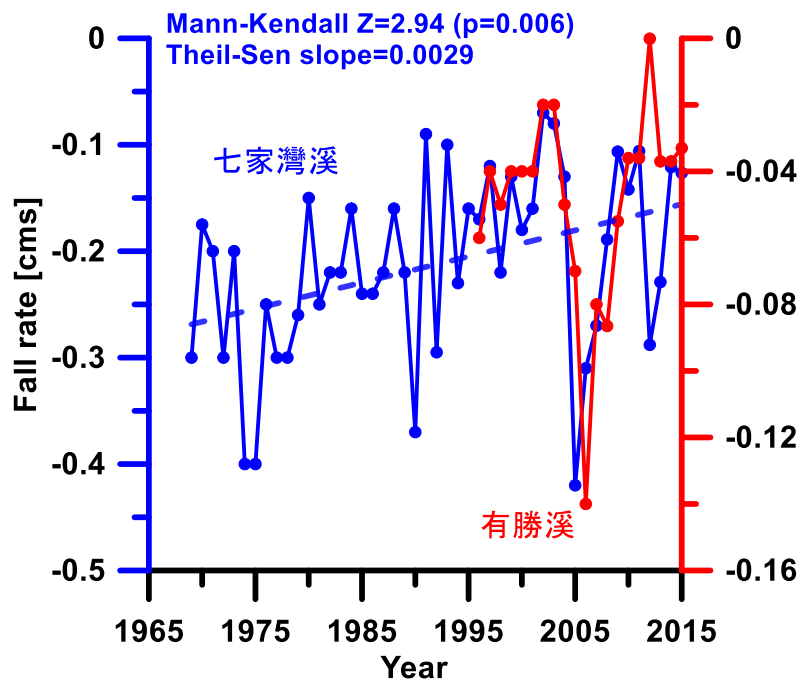


圖 3.4 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年內平均流量減少率 [cms]

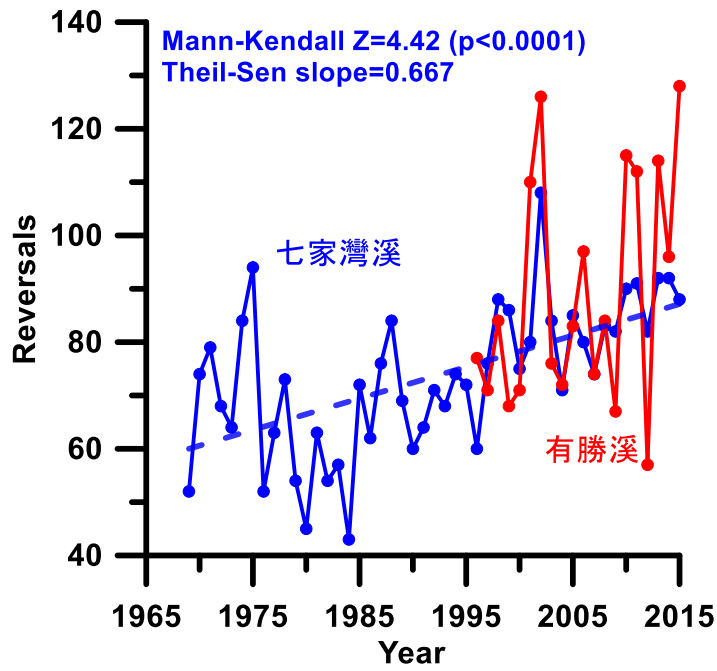


圖 3.5 七家灣溪及有勝溪流量站於觀測期間之年流量逆轉次數

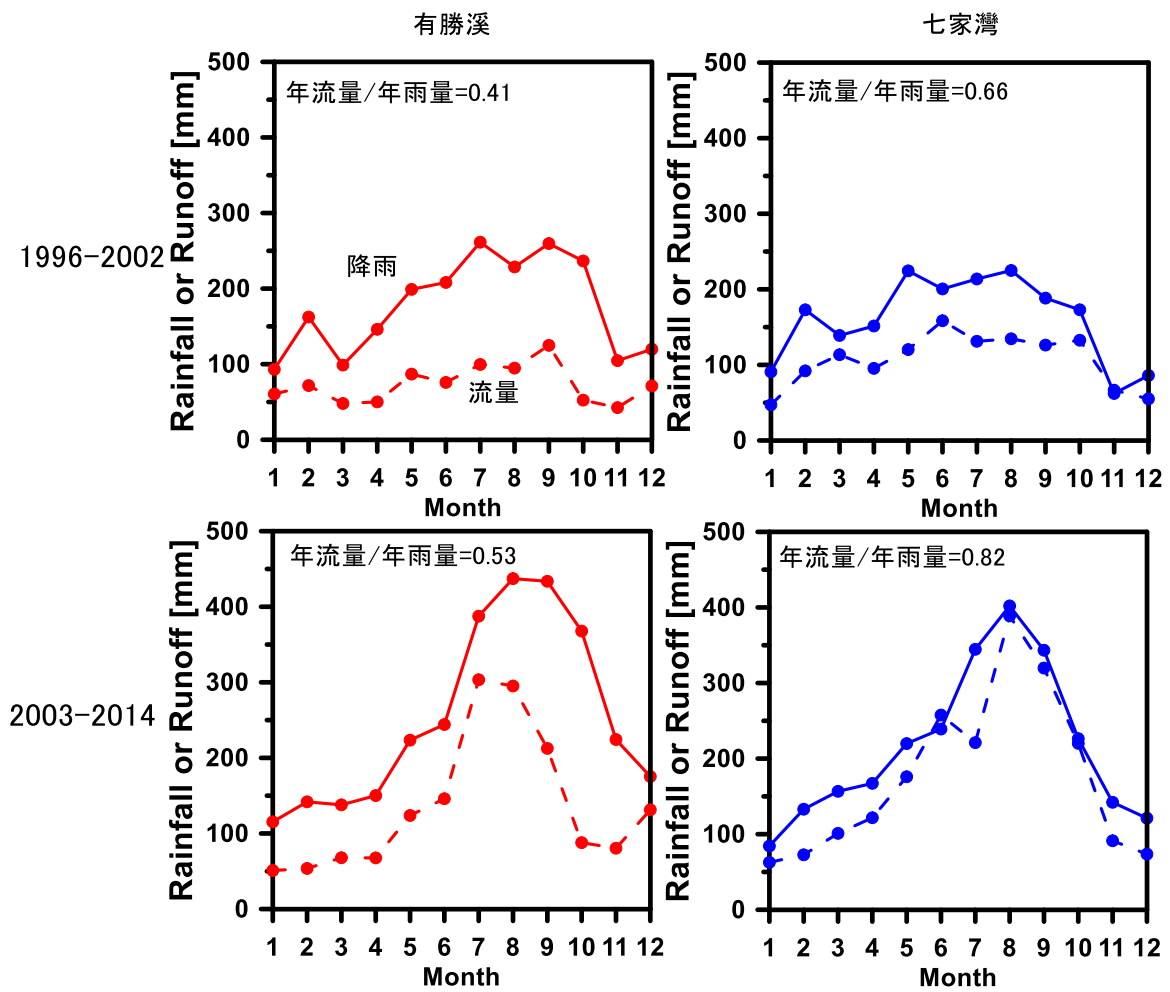


圖 3.6 有勝溪流量站及七家灣溪流量站集水區 1996-2014 年間平均之月降雨與月流量之關係

圖

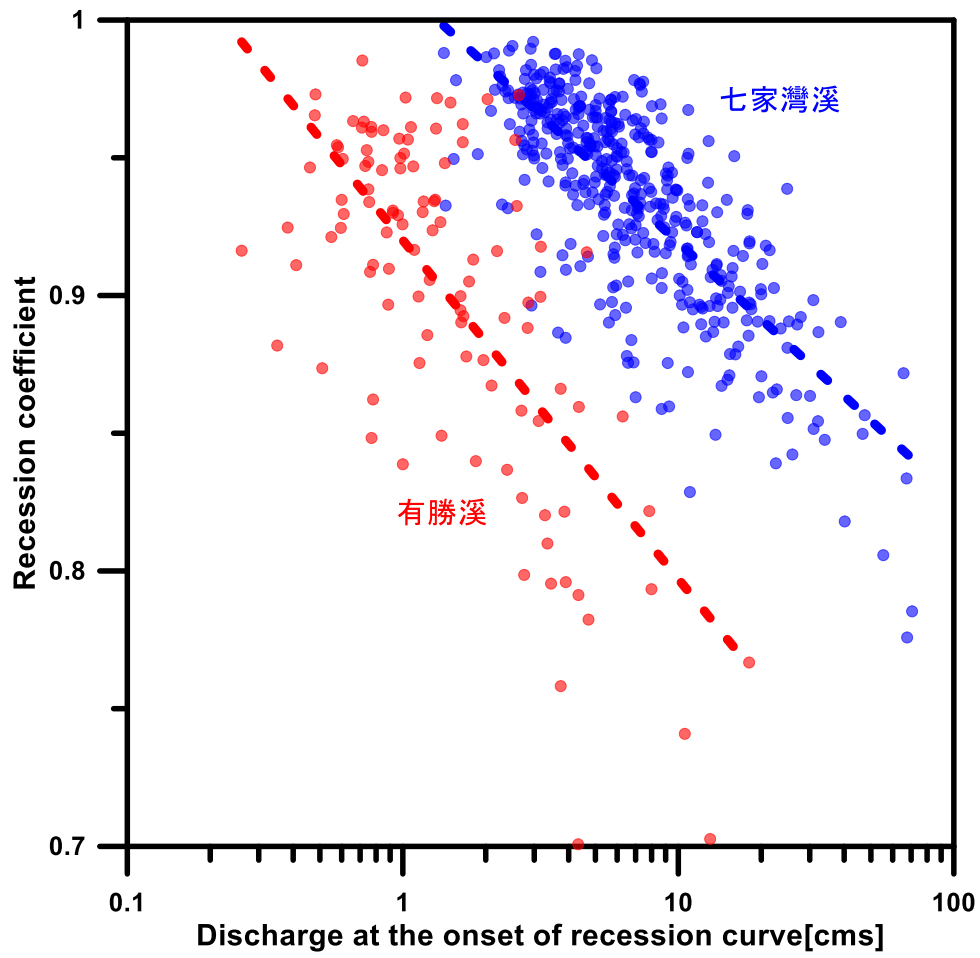


圖 3.7 七家灣溪及有勝溪流量之退水常數與退水段啟始流量之關係圖

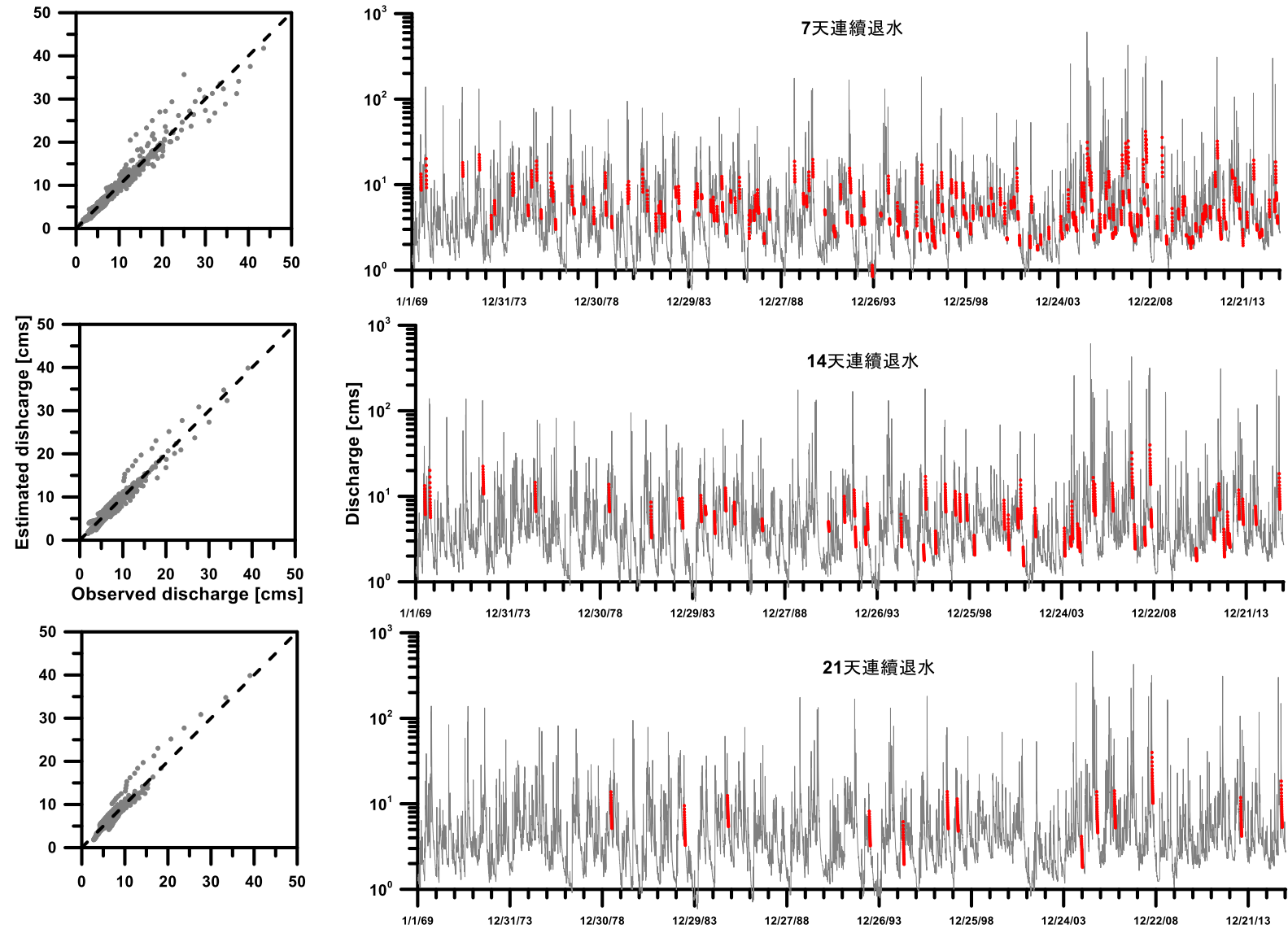


圖 3.8 低流量推估模式模擬七家灣溪連續 7 天、14 天及 21 天退水之流量結果

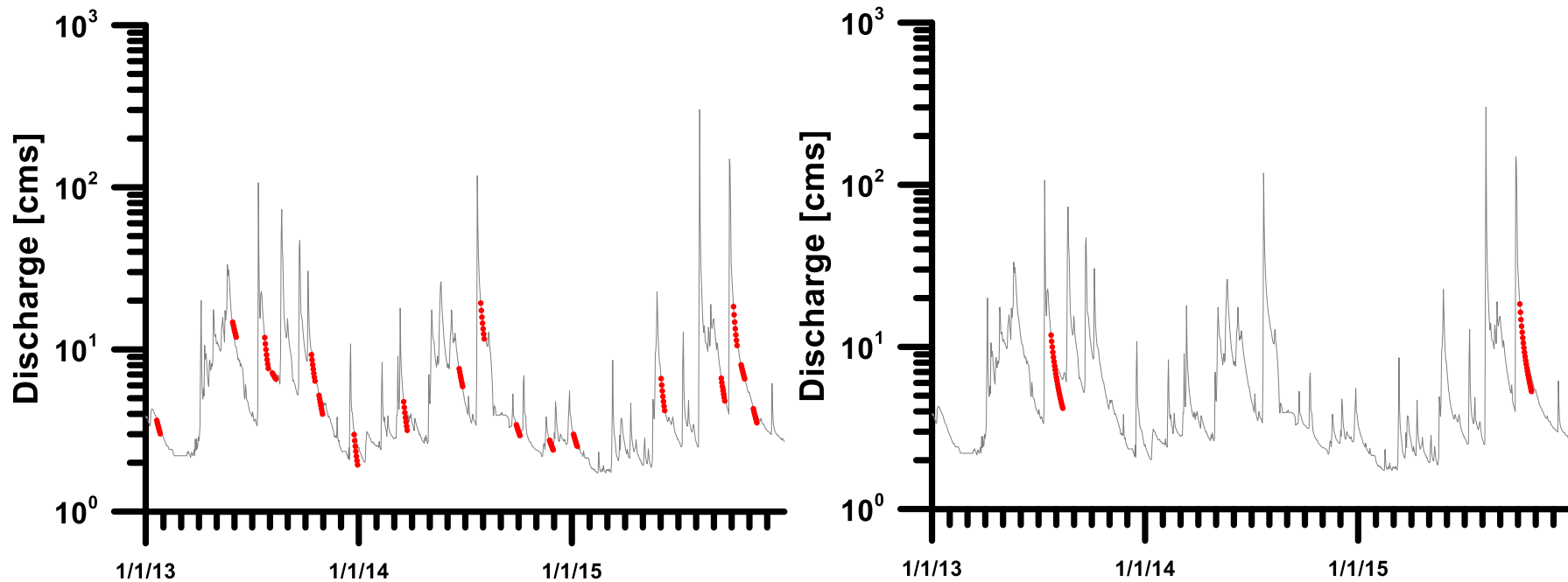


圖 3.9 近距離展示低流量推估模式模擬七家灣溪連續 7 天(左圖)及 21 天(右)退水之流量結果

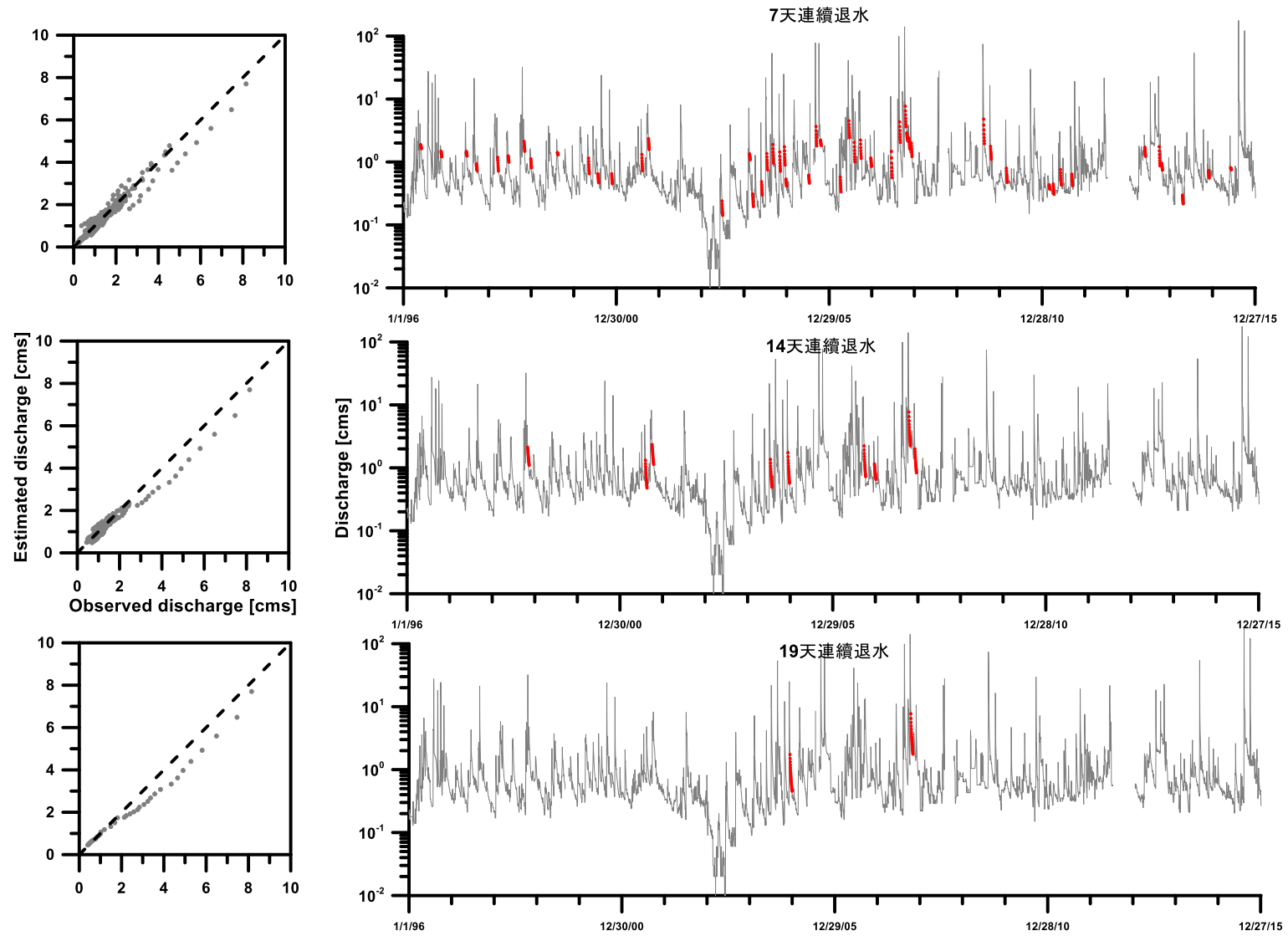


圖 3.10 低流量推估模式模擬有勝溪連續 7 天、14 天及 19 天退水之流量結果

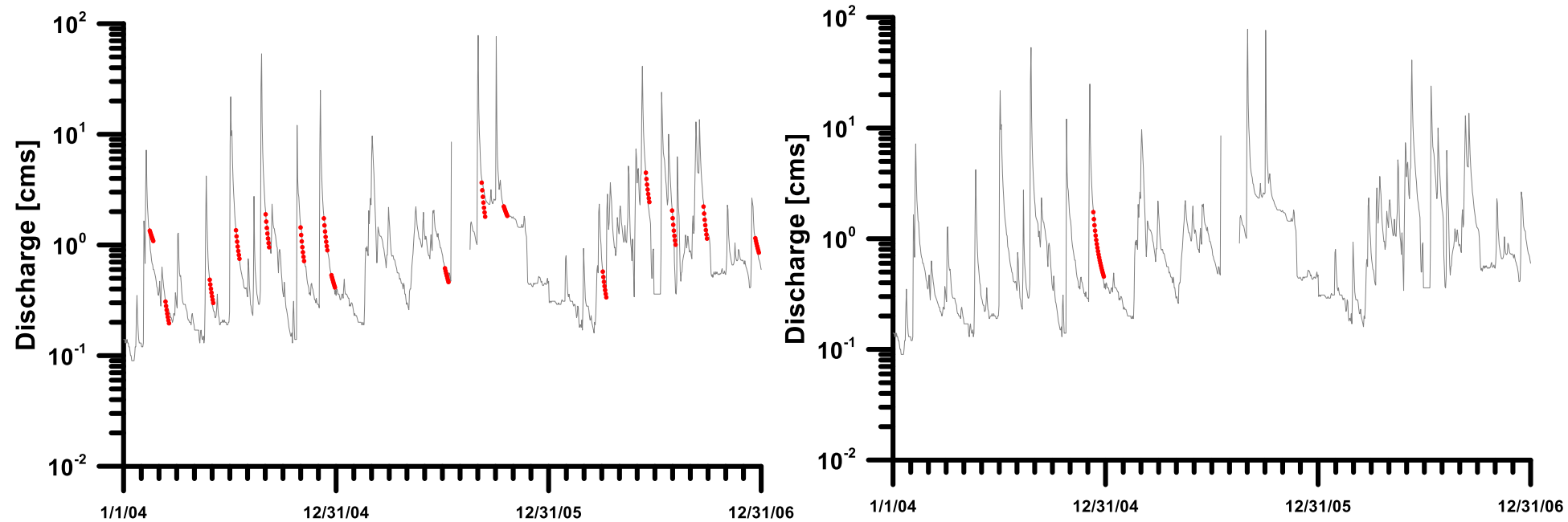


圖 3.11 近距離展示低流量推估模式模擬有勝溪連續 7 天(左圖)及 19 天(右)退水之流量結果



圖 3.12 福衛二號 2010-2015 年有勝溪斷流處之影像 (箭頭所指之處懷疑為 2013 年新生之崩塌地)



圖 3.13 有勝溪斷流處流量量測位置圖 (攝於 2016/7/1)



圖 3.14 有勝溪於 Well B 附近開始發生斷流（照片左邊為下游方向，攝於 2016/8/10）



圖 3.15 有勝溪於 Well C 附近斷流之情形 (照片朝向下游，攝於 2016/8/10)



圖 3.16. 有勝溪 Well A 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形，研究河段河床抬升近 1 公尺(照片朝向上游，左右兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)



圖 3.17 有勝溪 Well A 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲後之情形 (照片朝向下游, 攝於 2016/11/9)



圖 3.18 有勝溪 Well B 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形, 河水已改道 (照片朝向下游, 左右兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)



圖 3.19. 有勝溪 Well C 於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形 (照片朝向下游, 左右兩照片分別攝於 2016/8/11 與 2016/11/9)



圖 3.20 有勝溪 Well C 下游處於 2016/9/27 梅姬颱風侵襲前後之情形 (照片朝向下游，左右兩照片分別攝於 2016/8/10 與 2016/11/9)

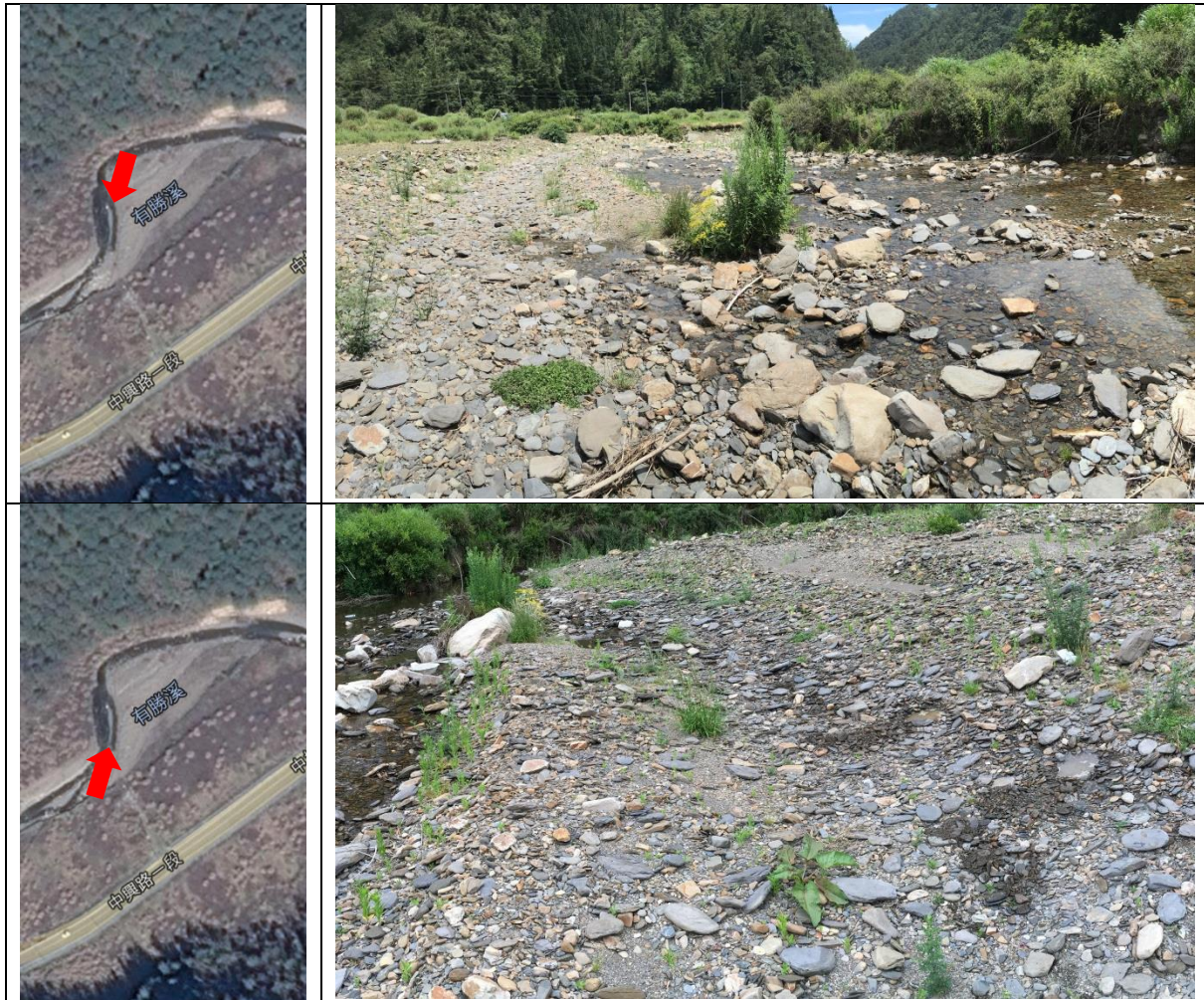


圖 3.21 有勝溪 2016/7/1 逐漸隱沒之溪流分支(箭頭為拍攝位置，箭頭方向為拍攝中心方向)



圖 3.22 有勝溪 2016/7/1 河川隱沒分支下的含水情形



圖 3.23 有勝溪 2016/7/14 伏流水（照片右側）與主流（左側）水色有顯著的差異

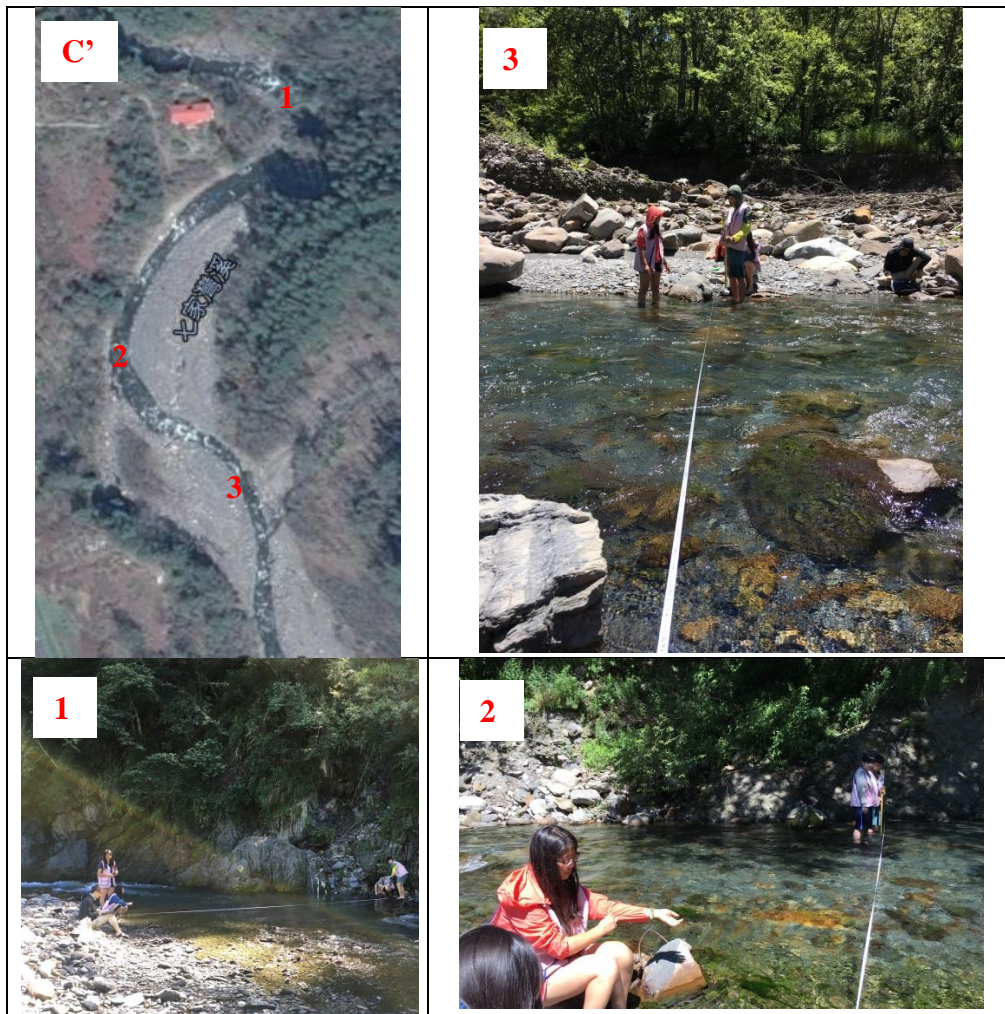


圖 3.24 七家灣溪斷流處流量量測 (C') 位置圖 (攝於 2016/7/14)

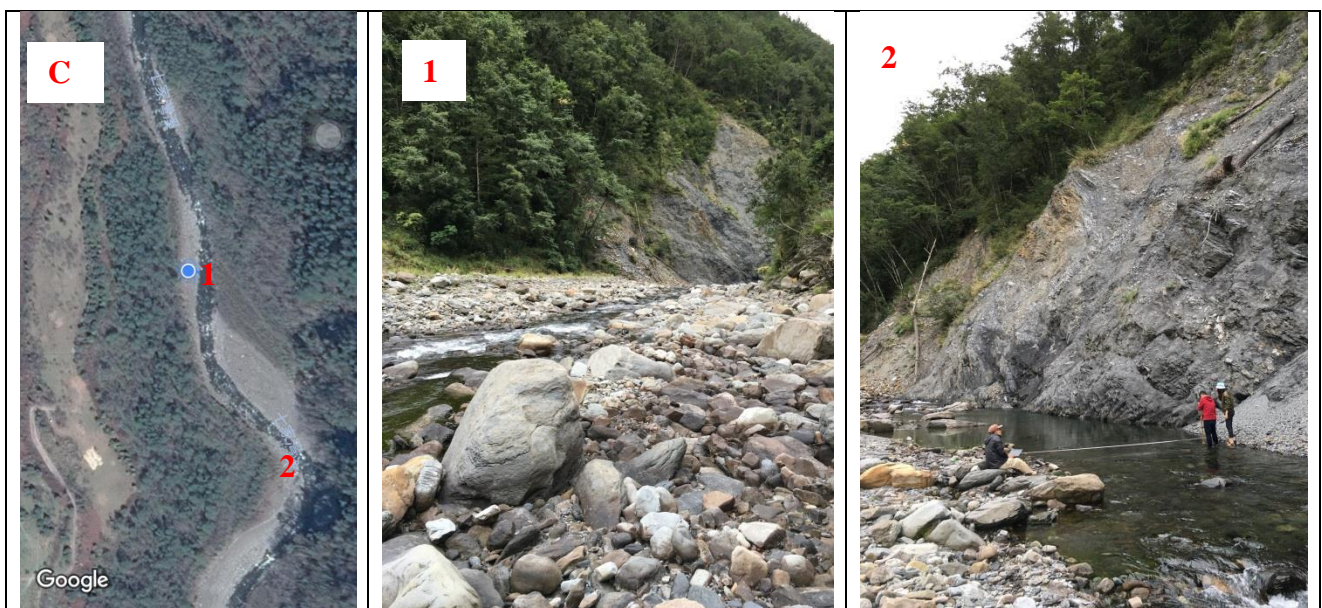


圖 3.25 七家灣溪斷流處流量量測 (C) 位置圖 (攝於 2016/9/8)



圖 3.26 桃山北溪斷流處流量量測位置圖 (攝於 2016/7/14)

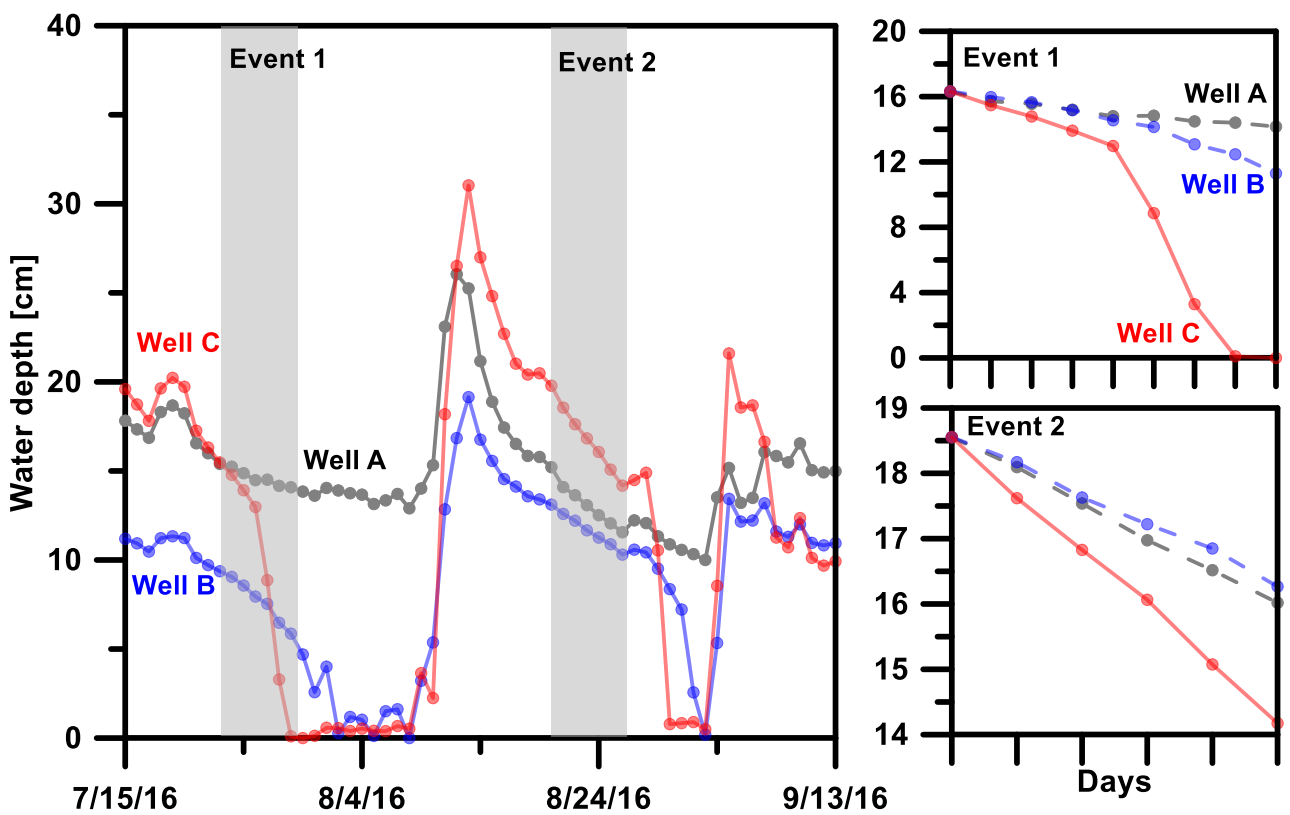


圖 3.27 2016/7/15 至 9/13 間於有勝溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形。為了清楚展示兩個事件各河段河川退水的情形，右邊兩張圖將 Well A 及 Well B 退水的啟始水位平移（以虛線表示）至與 Well C 相同。

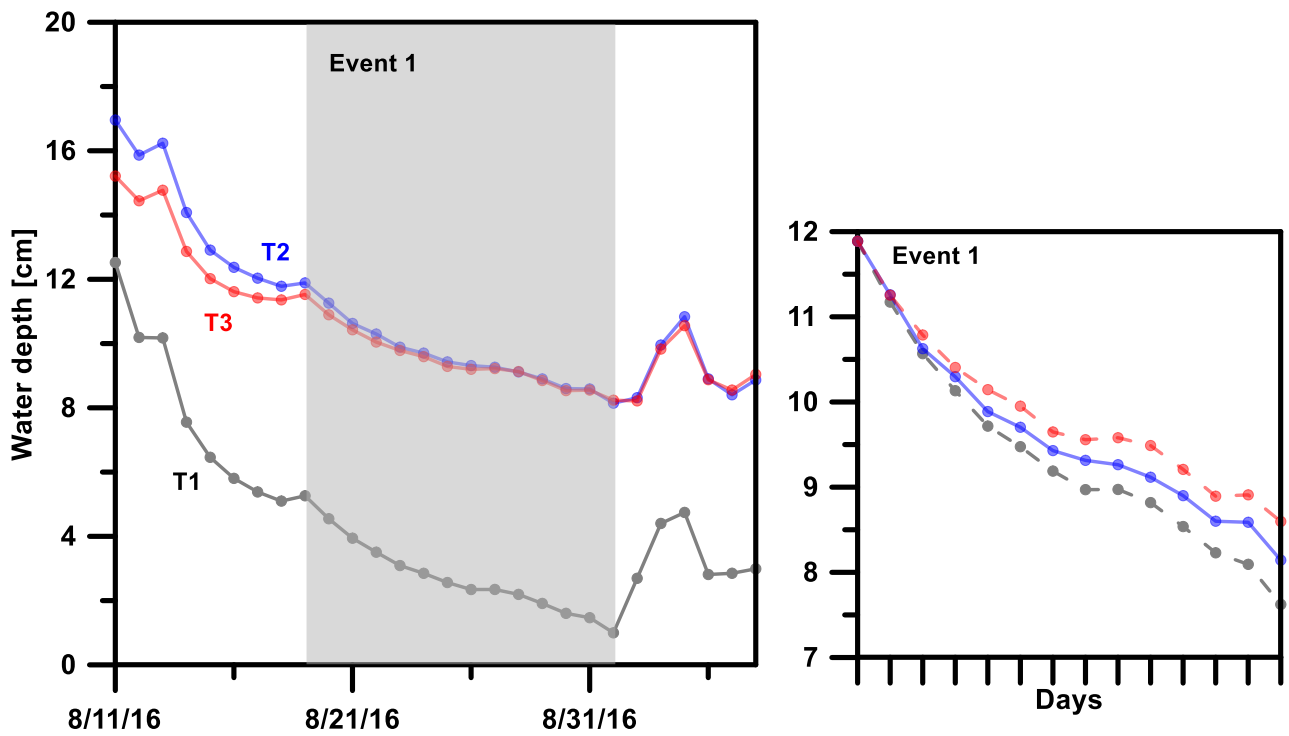


圖 3.28 2016/8/11 至 9/7 間於桃山北溪觀測河川平均日水位之變化及退水情形。為了清楚展示各河段河川退水的情形，右邊兩張圖將 T1 及 T3 退水的啟始水位平移（以虛線表示）至與 T2 相同。

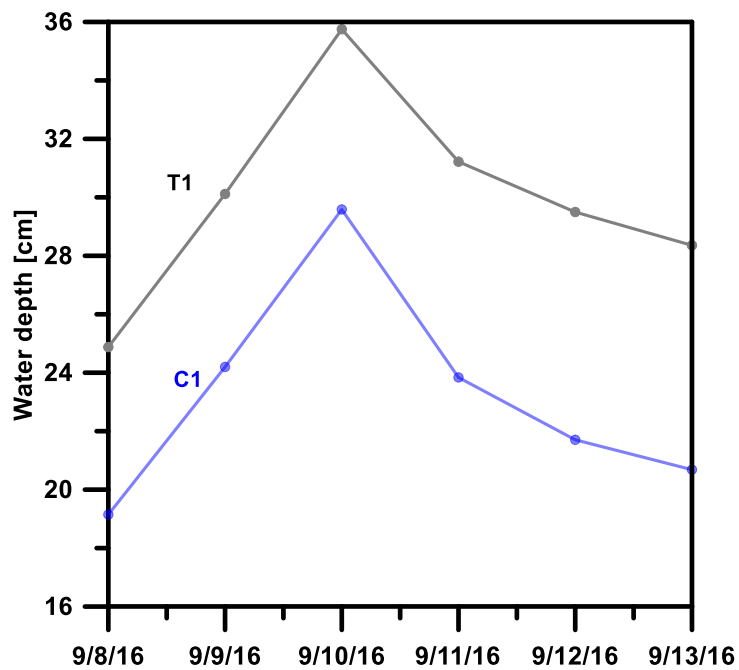


圖 3.29 2016/9/8 至 9/13 間於桃山北溪 (T1) 及七家灣溪 (C1) 觀測河川平均日水位之變化及退水情形。

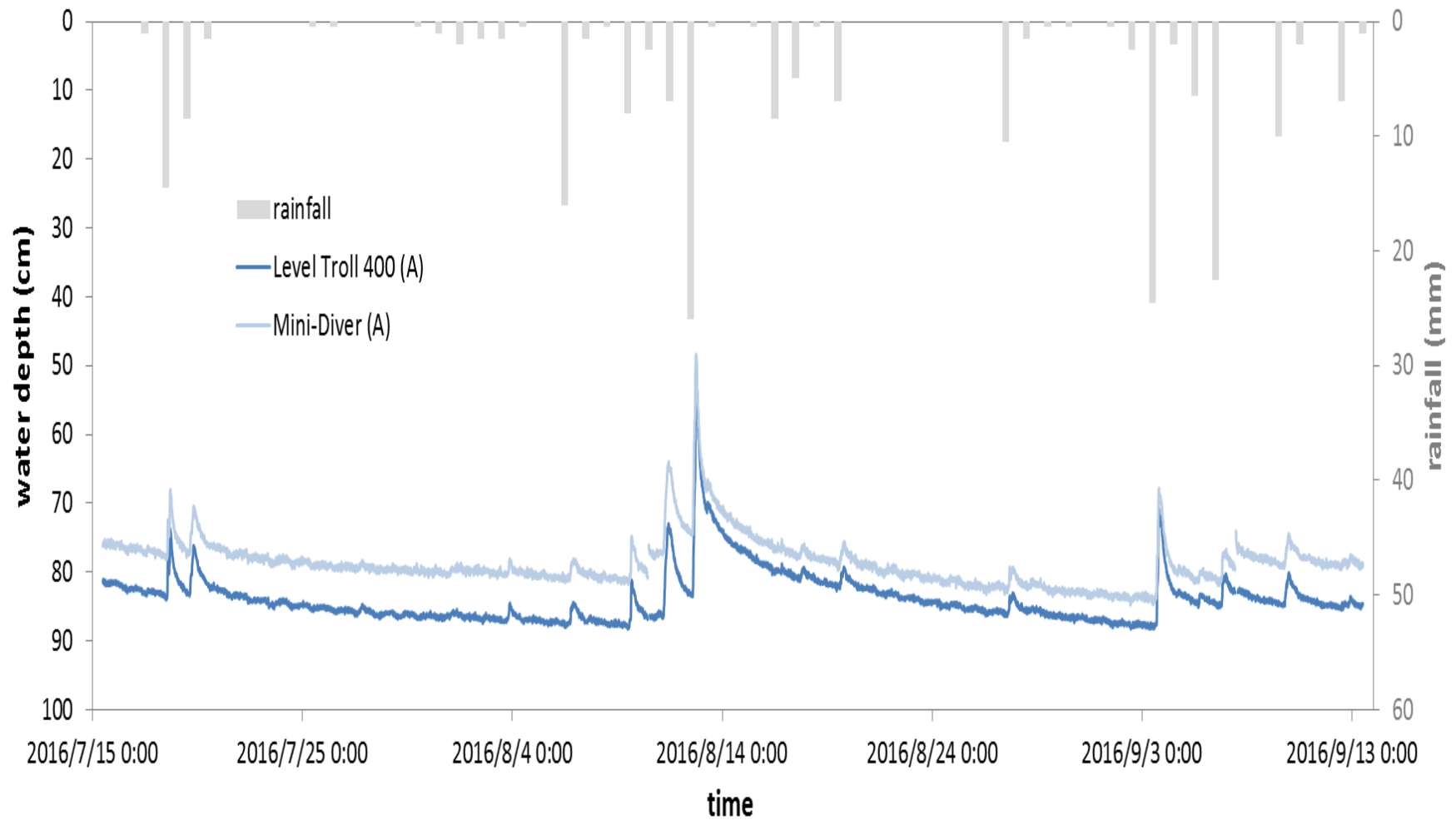


圖 3.30 上游井 (well A) 河川與地下水水位歷線圖 (Level Troll 400 表地下水水位、Mini-Diver temp 表河川水位，從井頂起算)

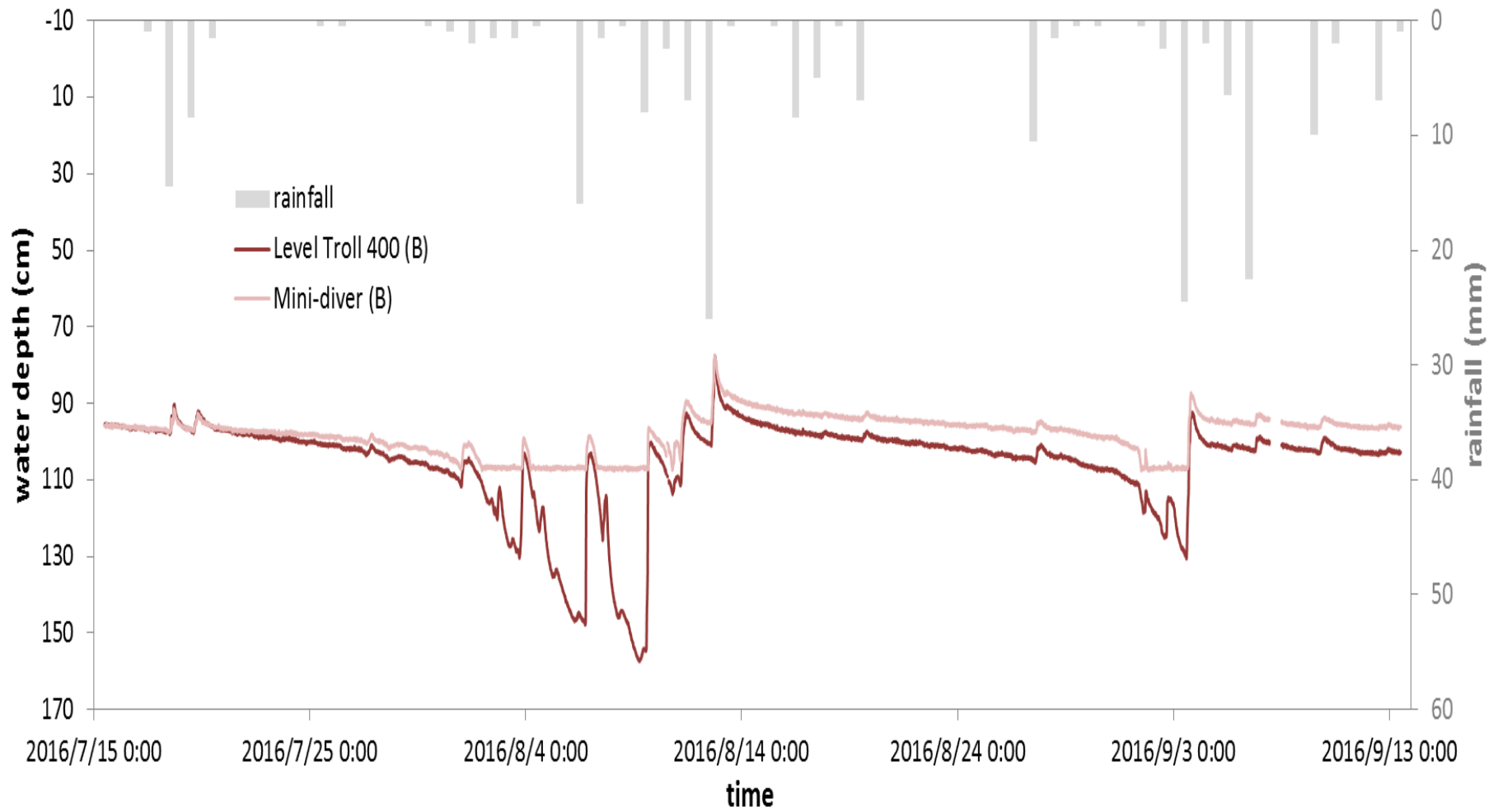


圖 3.31 中游井 (well B) 河川與地下水水位歷線圖 (Level Troll 400 表地下水水位、Min-Diver temp 表河川水位，從井頂起算)

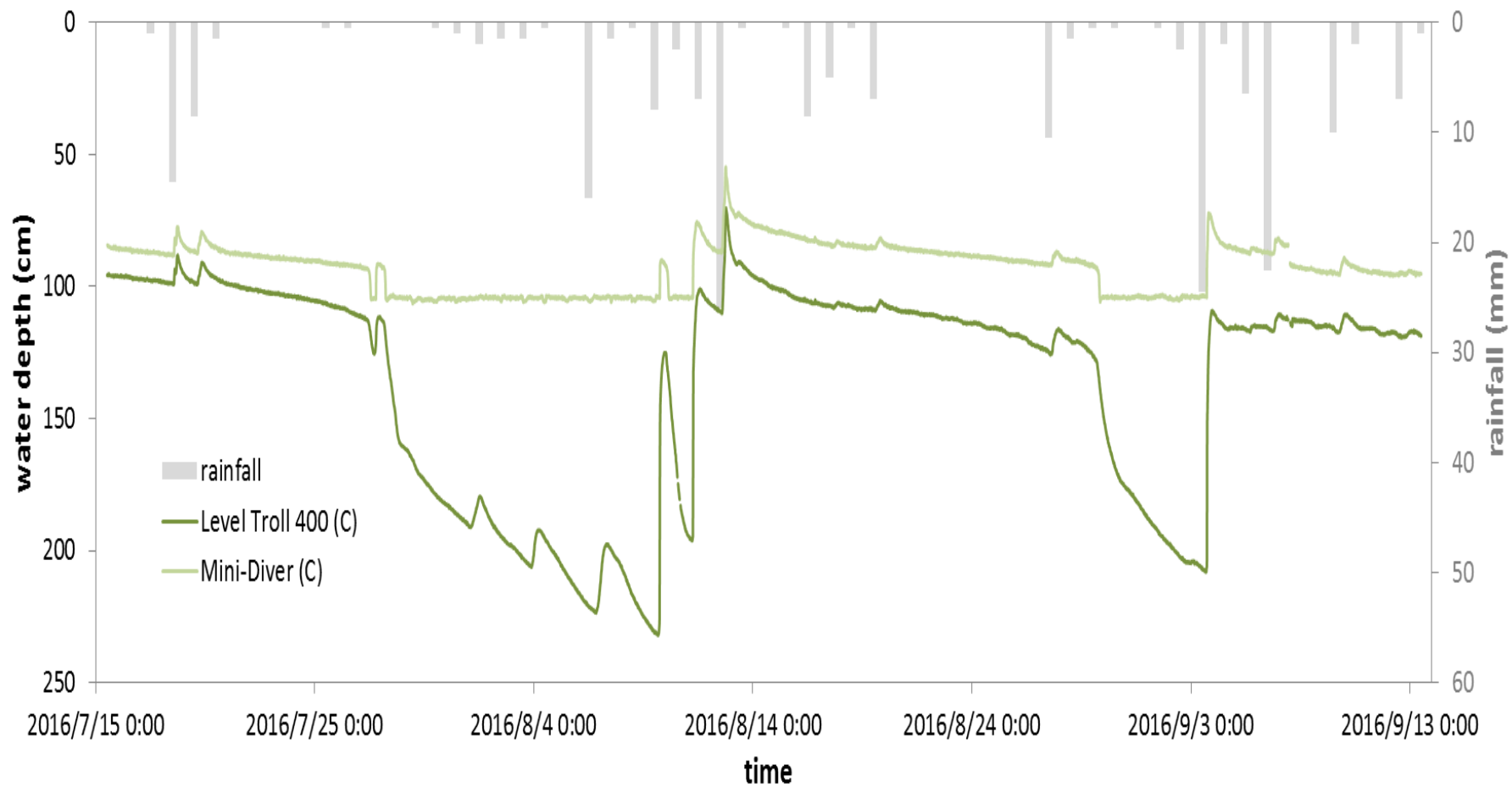


圖 3.32 下游井 (well C) 河川與地下水水位歷線圖 (Level Troll 400 表地下水水位、Min-Diver temp 表河川水位，從井頂起算)

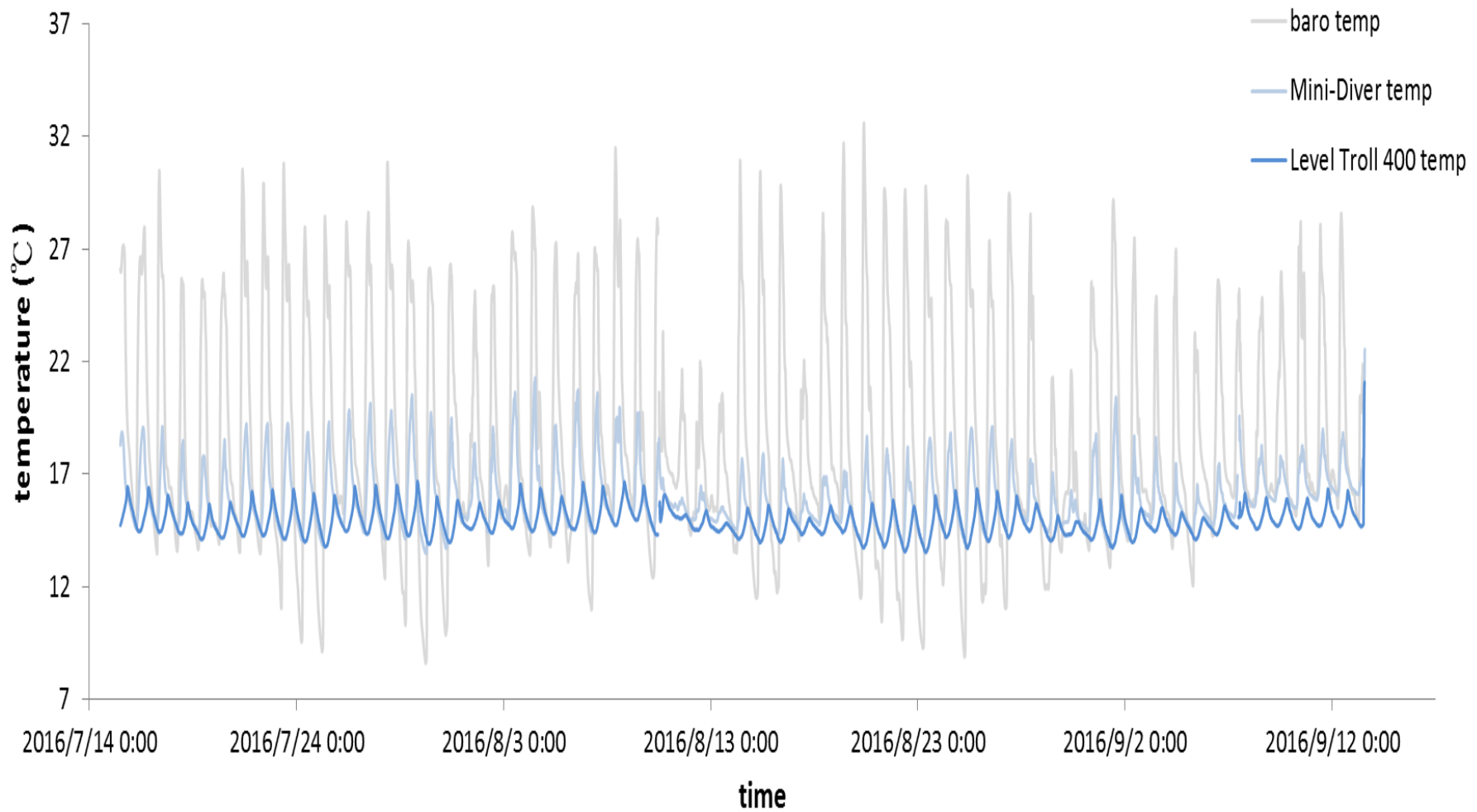


圖 3.33 上游井 (well A) 的河川與地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫、Level Troll 400 temp 表地下水溫)

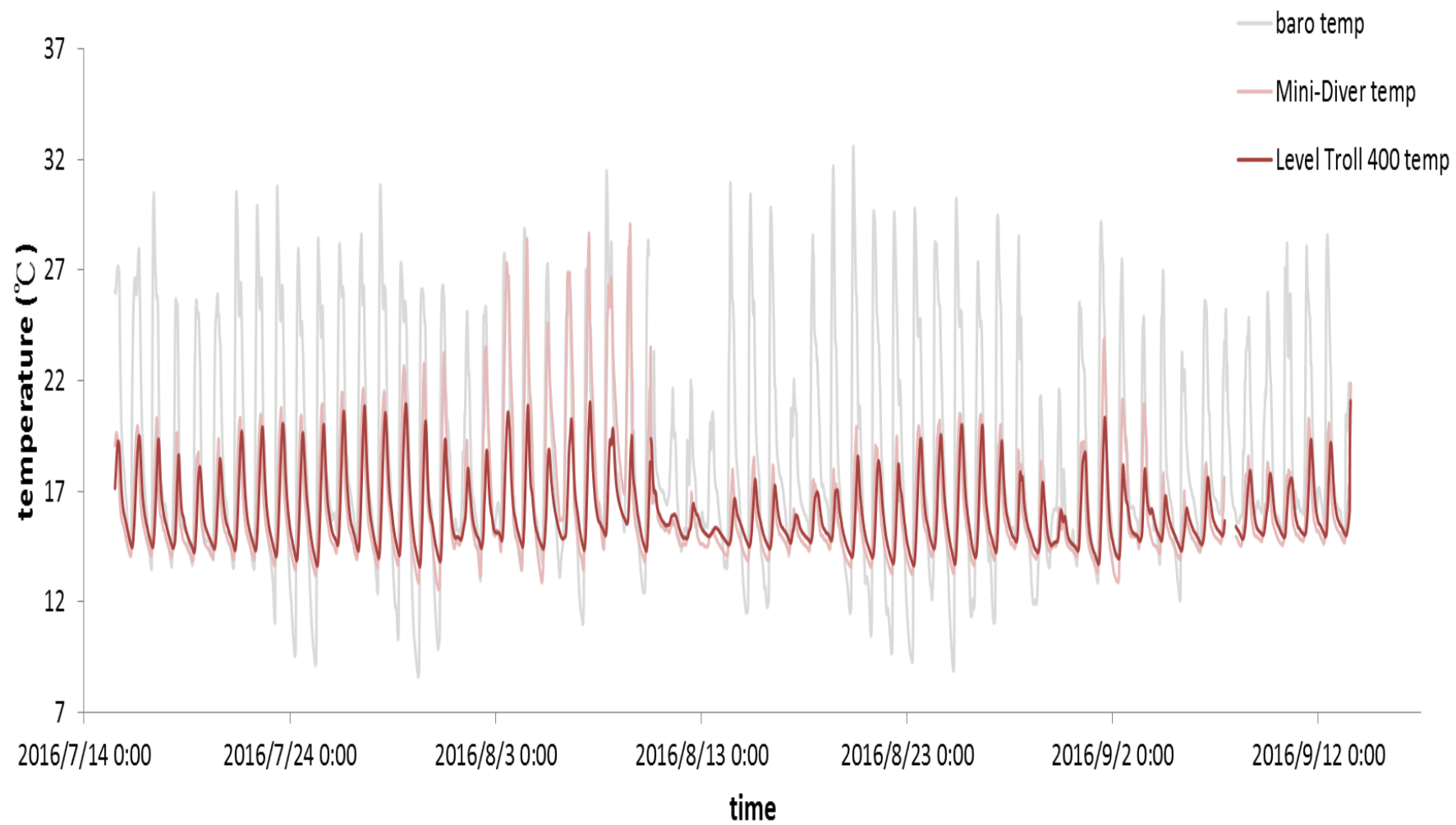


圖 3.34 中游井 (well B) 的河川與地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫、Level Troll 400 temp 表地下水溫)

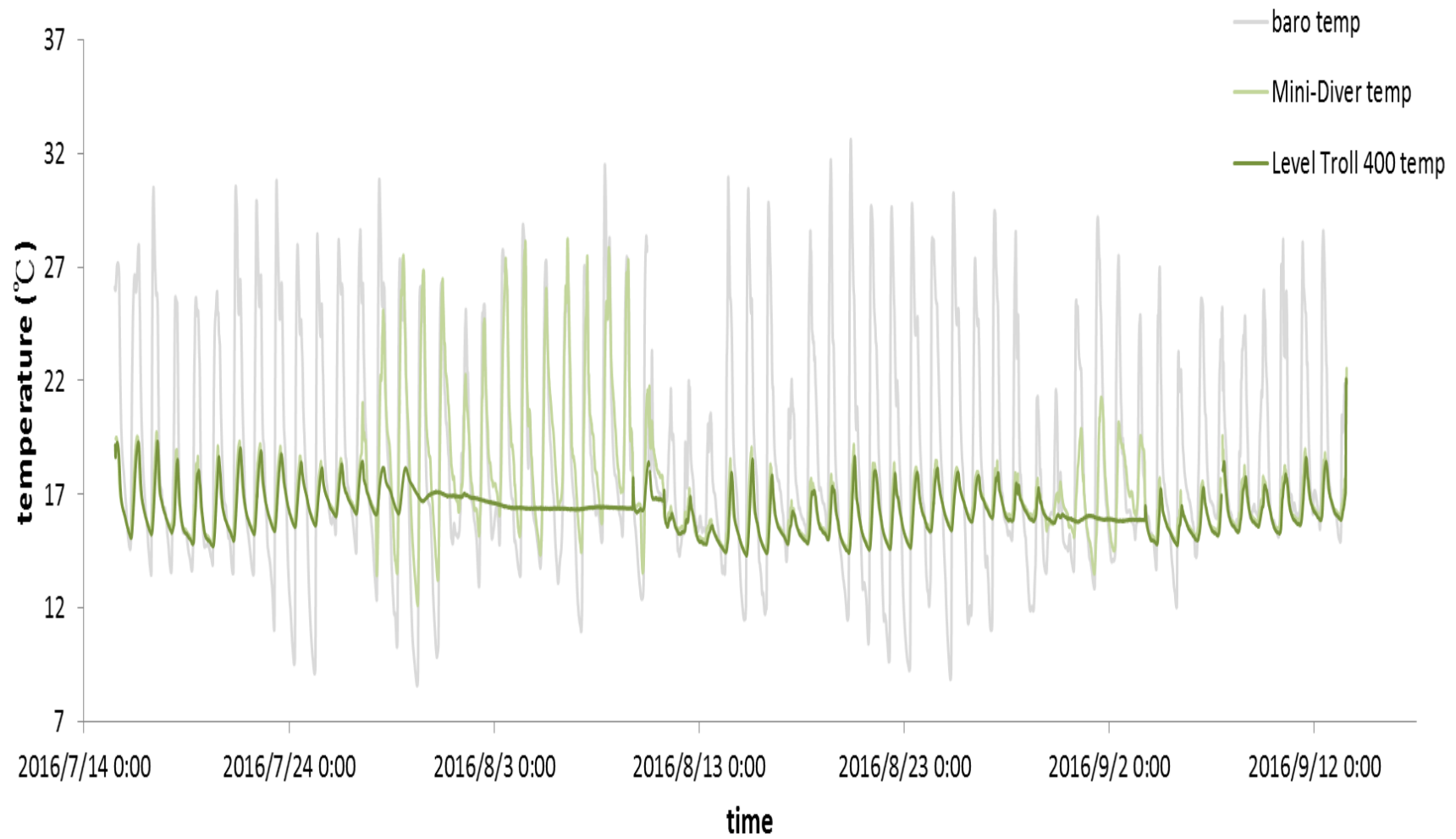


圖 3.35 下游井 (well C) 的河川與地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫、Level Troll 400 temp 表地下水溫)

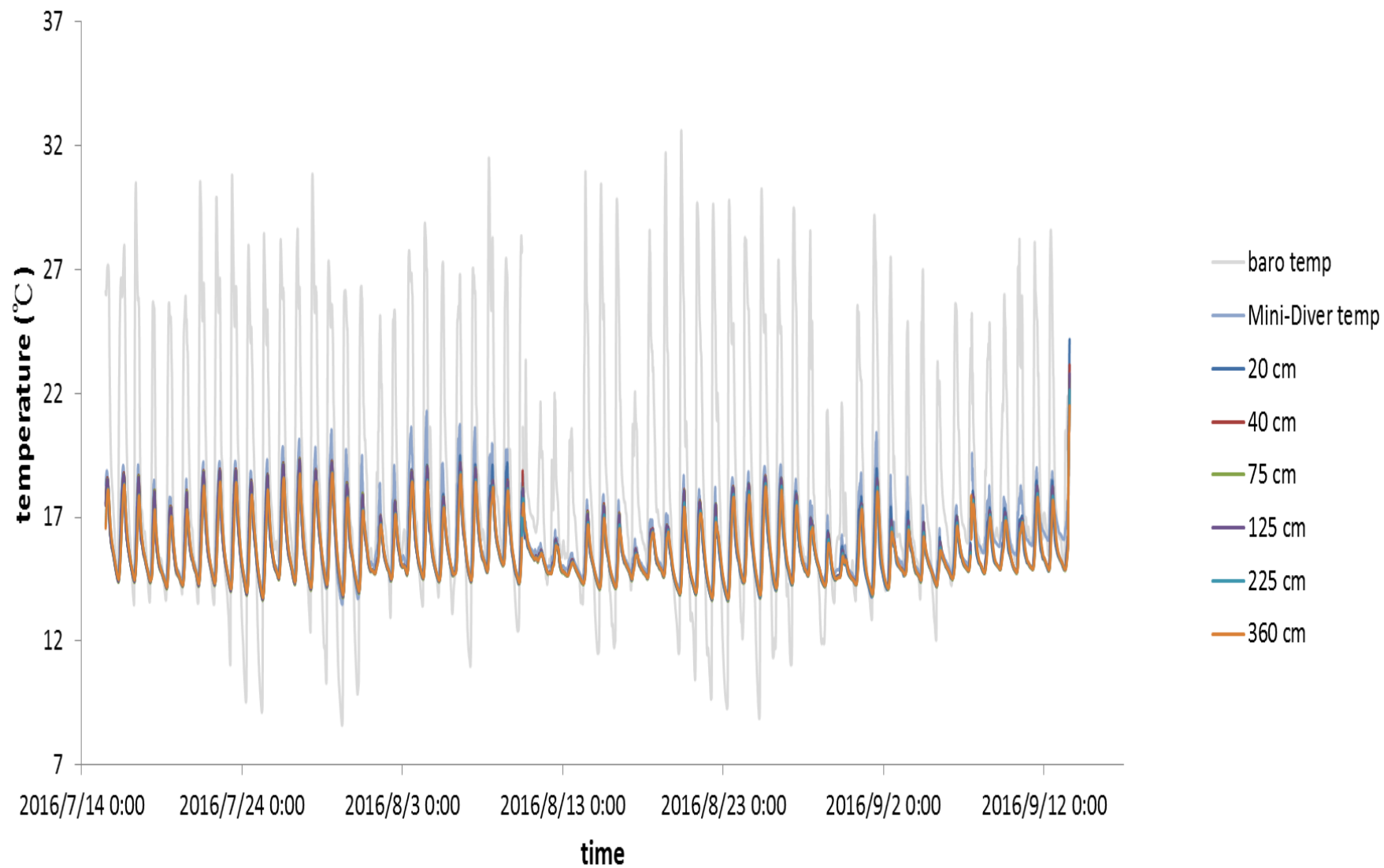


圖 3.36 上游 1 吋井 (well A) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫)

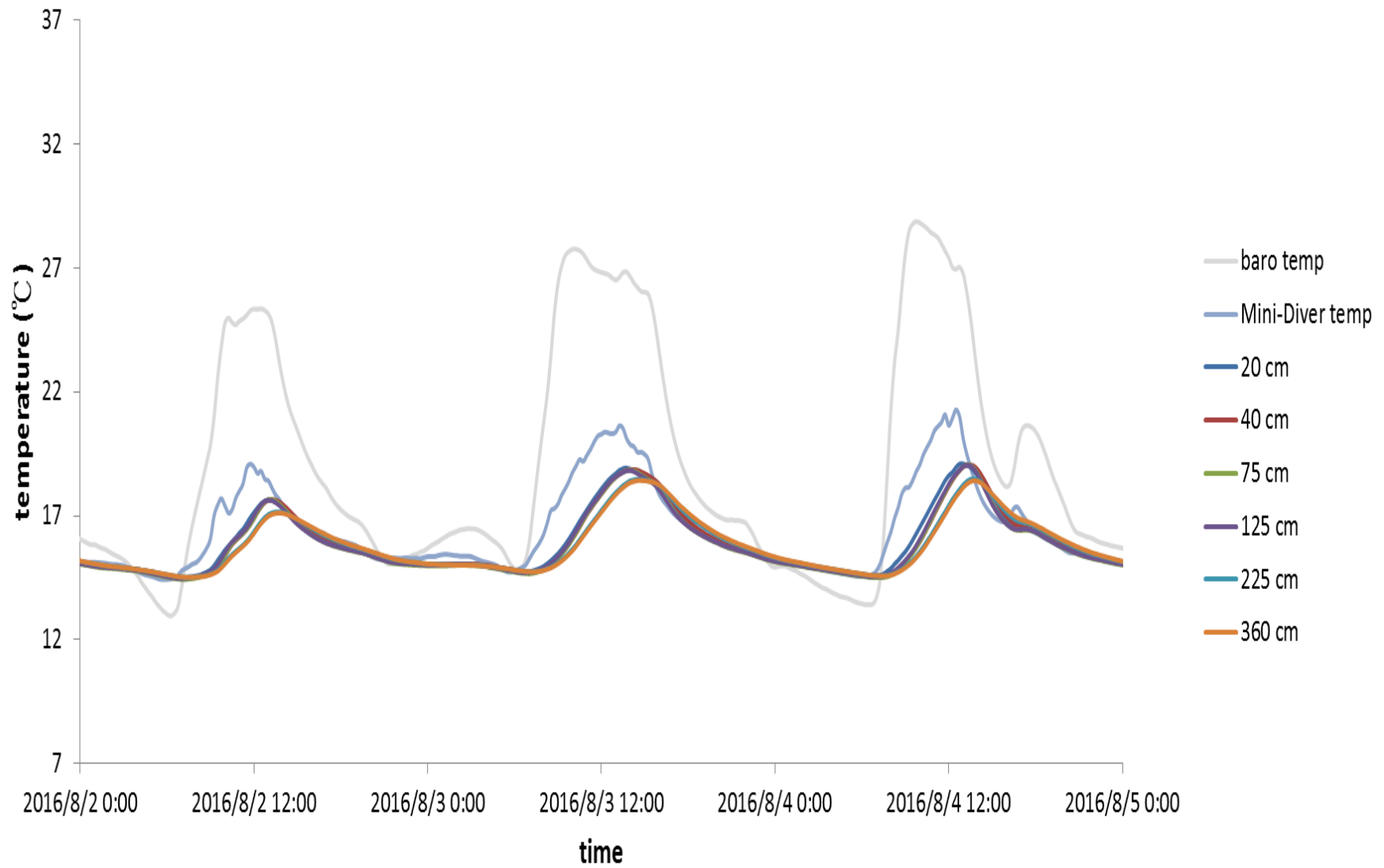


圖 3.37 上游 1 吋井 (well A) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (8/2 - 8/5) (baro temp 表氣溫、Min-Diver temp 表河川水溫)

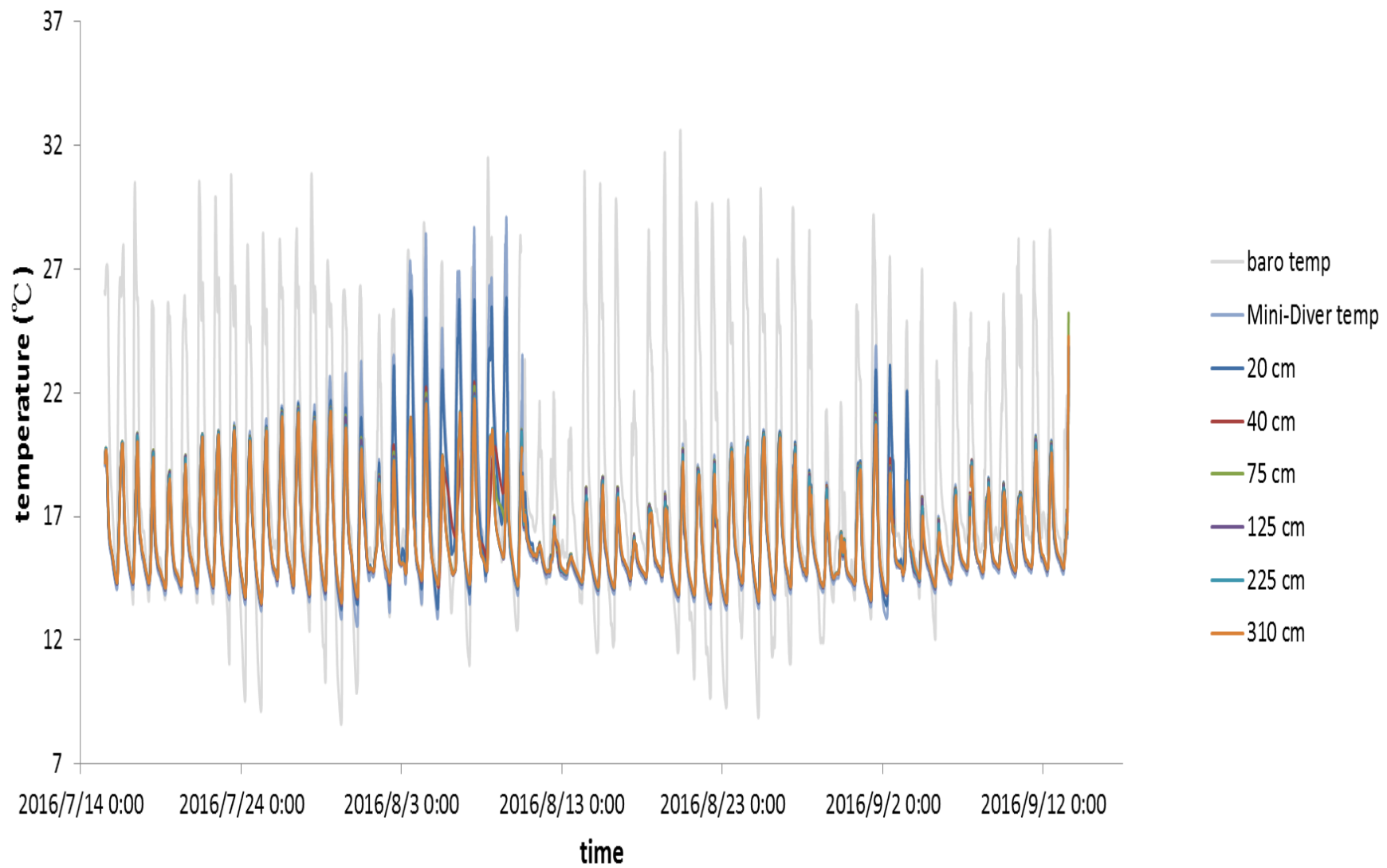


圖 3.38 中游 1 吋井 (well B) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Min-Diver temp 表河川水溫)

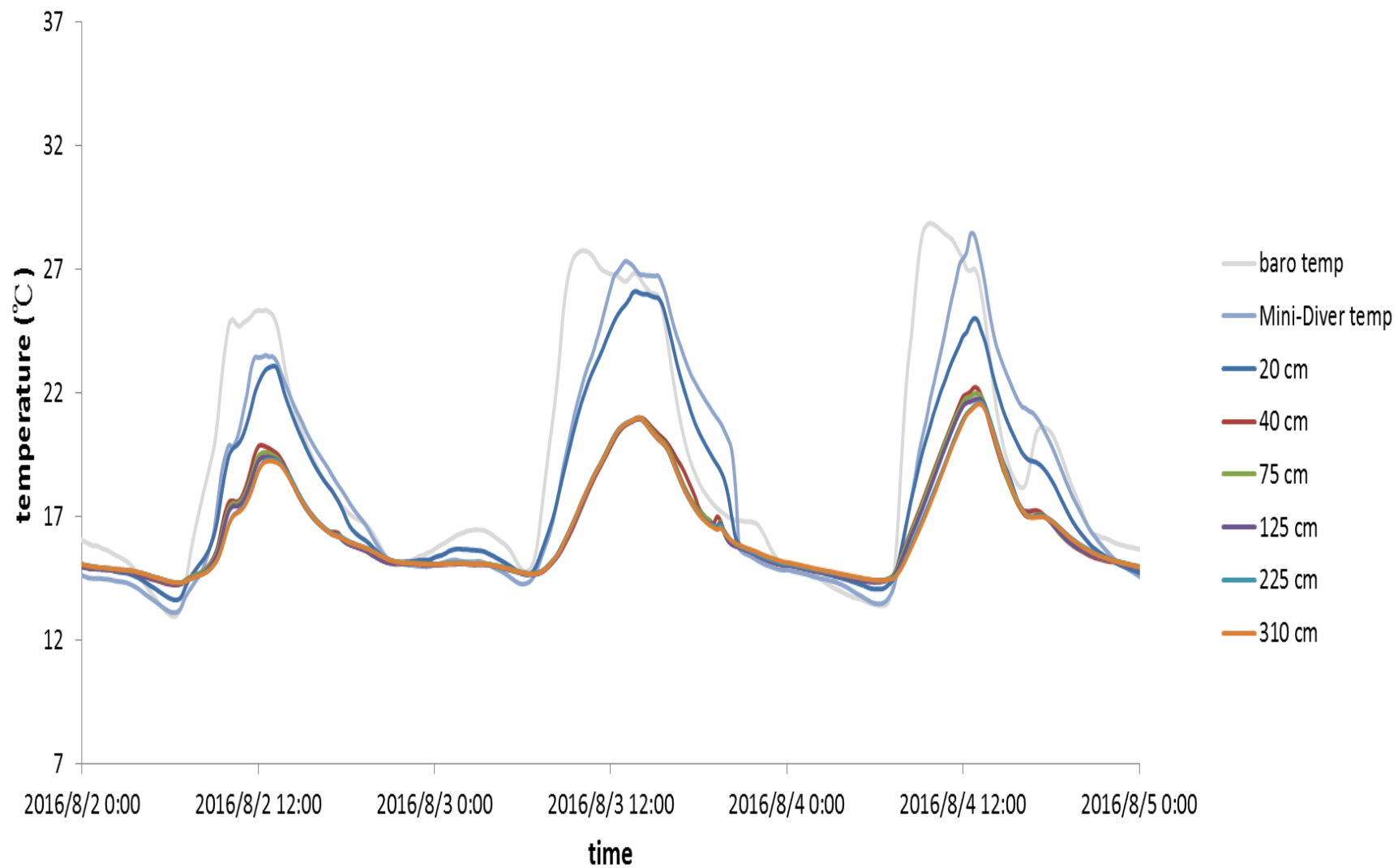


圖 3.39 中游 1 吋井 (well B) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (8/2 - 8/5) (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫)

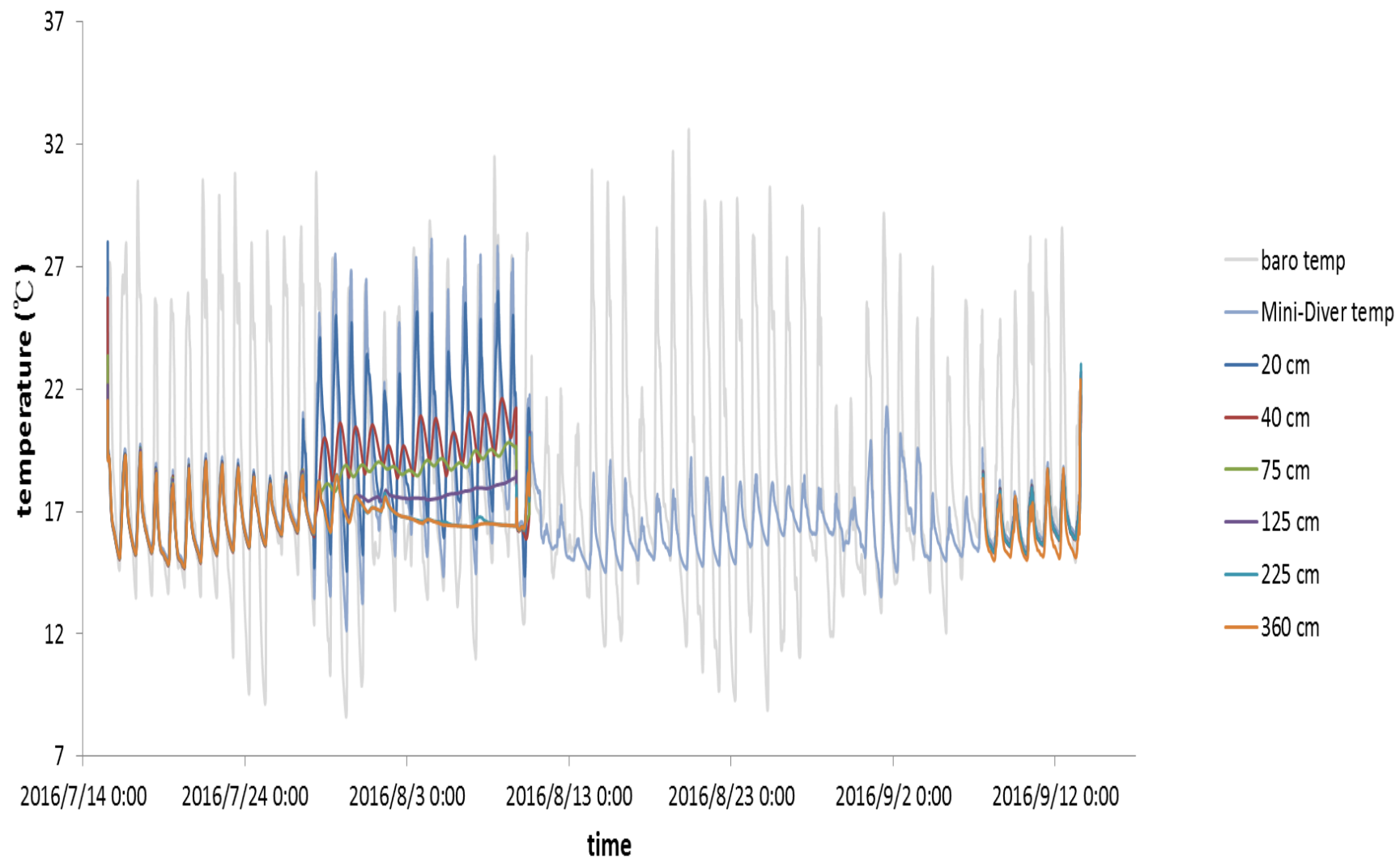


圖 3.40 下游 1 吋井 (well C) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫)

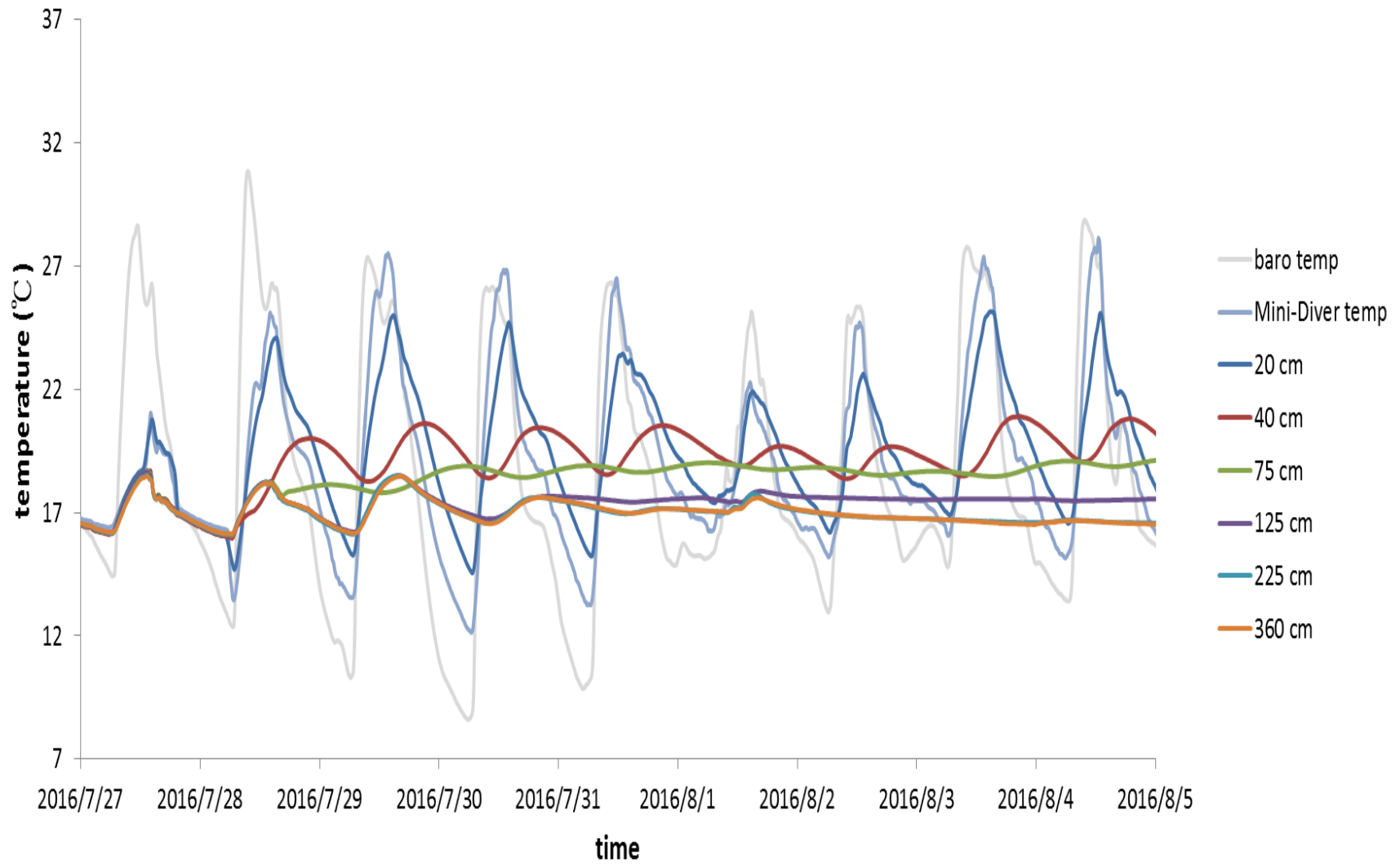


圖 3.41 下游 1 吋井 (well C) 不同深度的地下水溫度歷線圖 (7/27 – 8/5) (baro temp 表氣溫、Mini-Diver temp 表河川水溫)

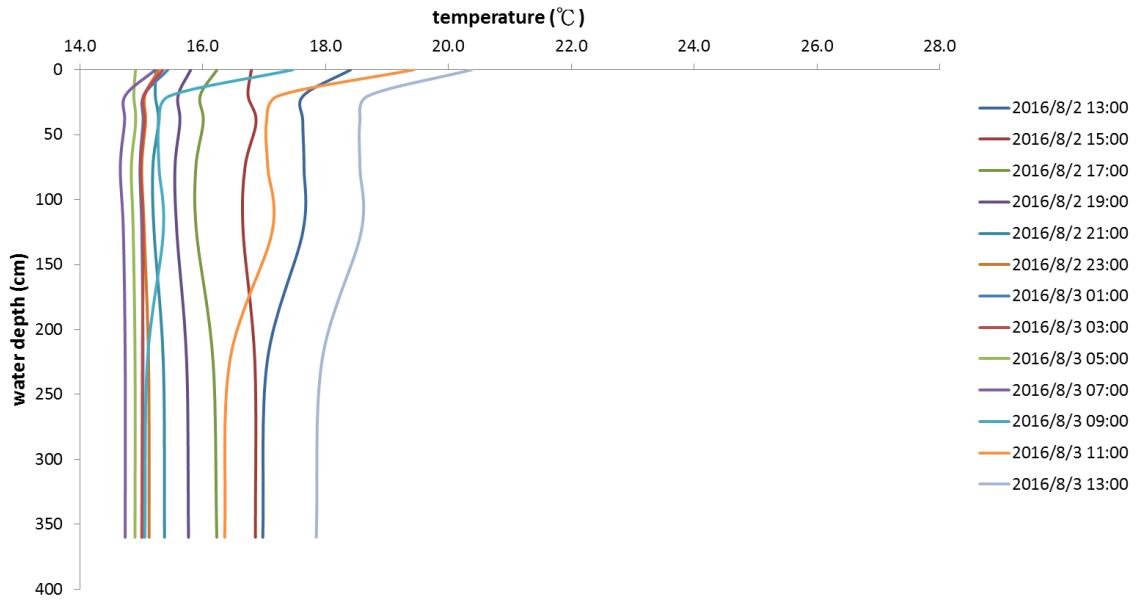


圖 3.42 上游井 (well A) 溫度隨深度變化剖面圖

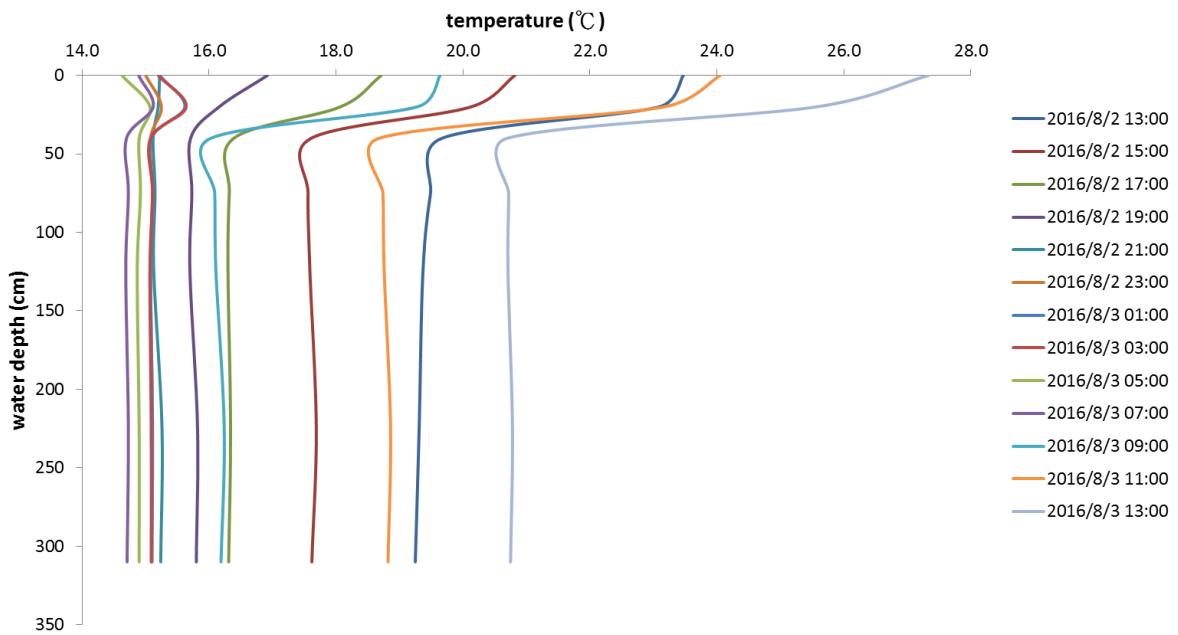


圖 3.43 中游井 (well B) 溫度隨深度變化剖面圖

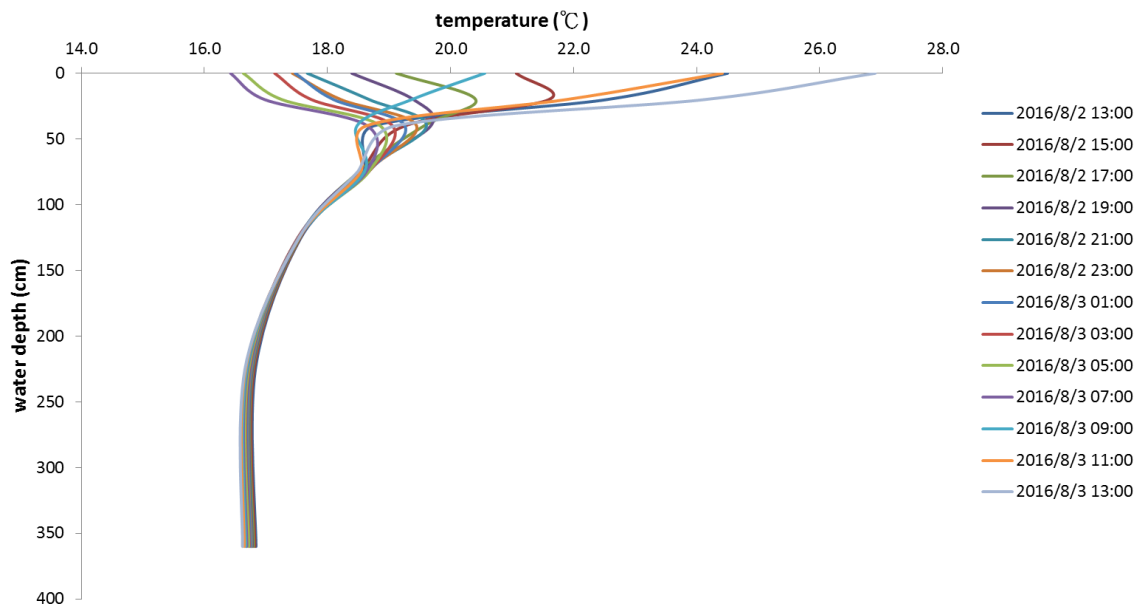


圖 3.44 下游井 (well C) 溫度隨深度變化剖面圖

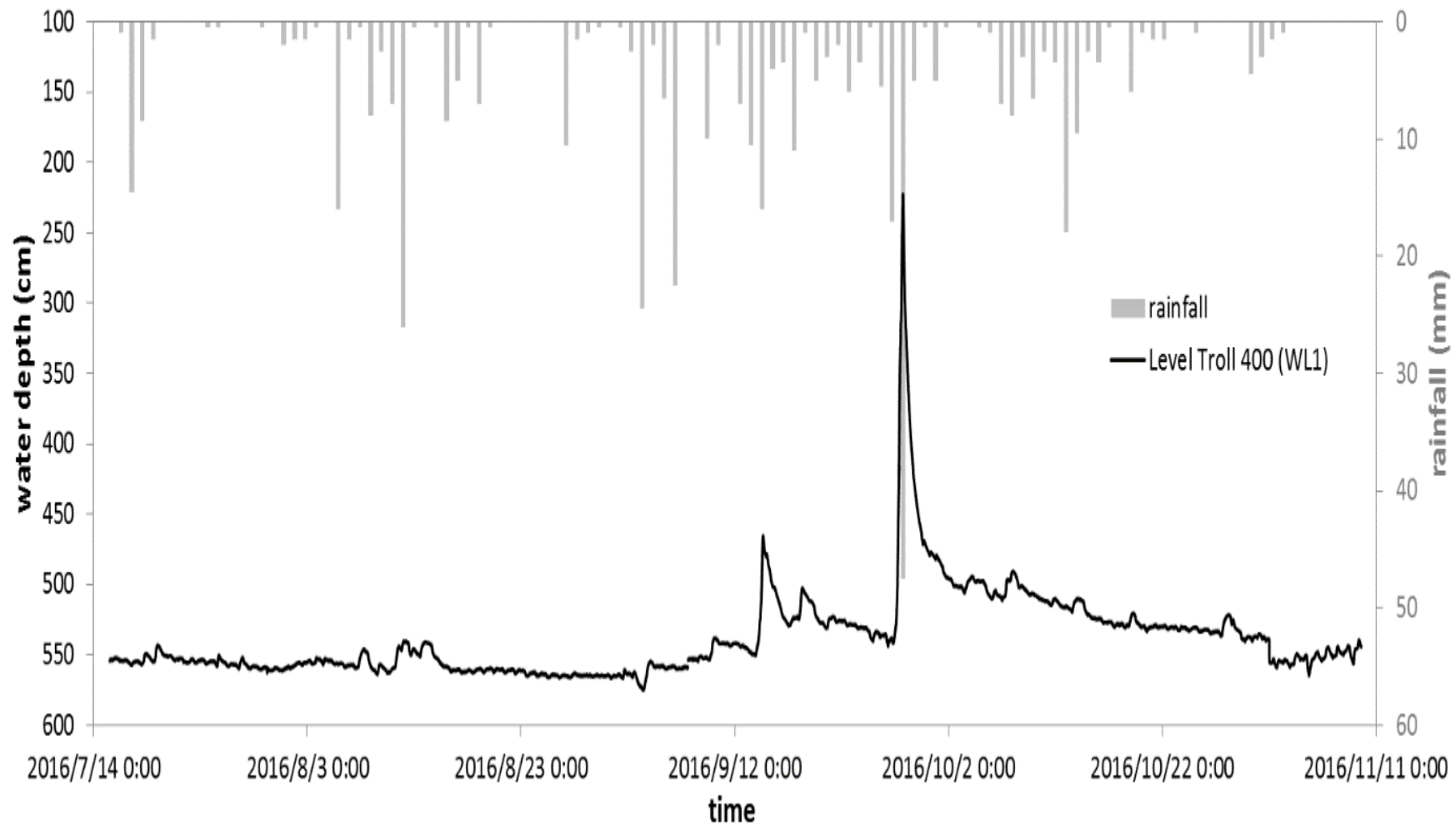


圖 3.45 櫻花鈎吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 水位歷線圖

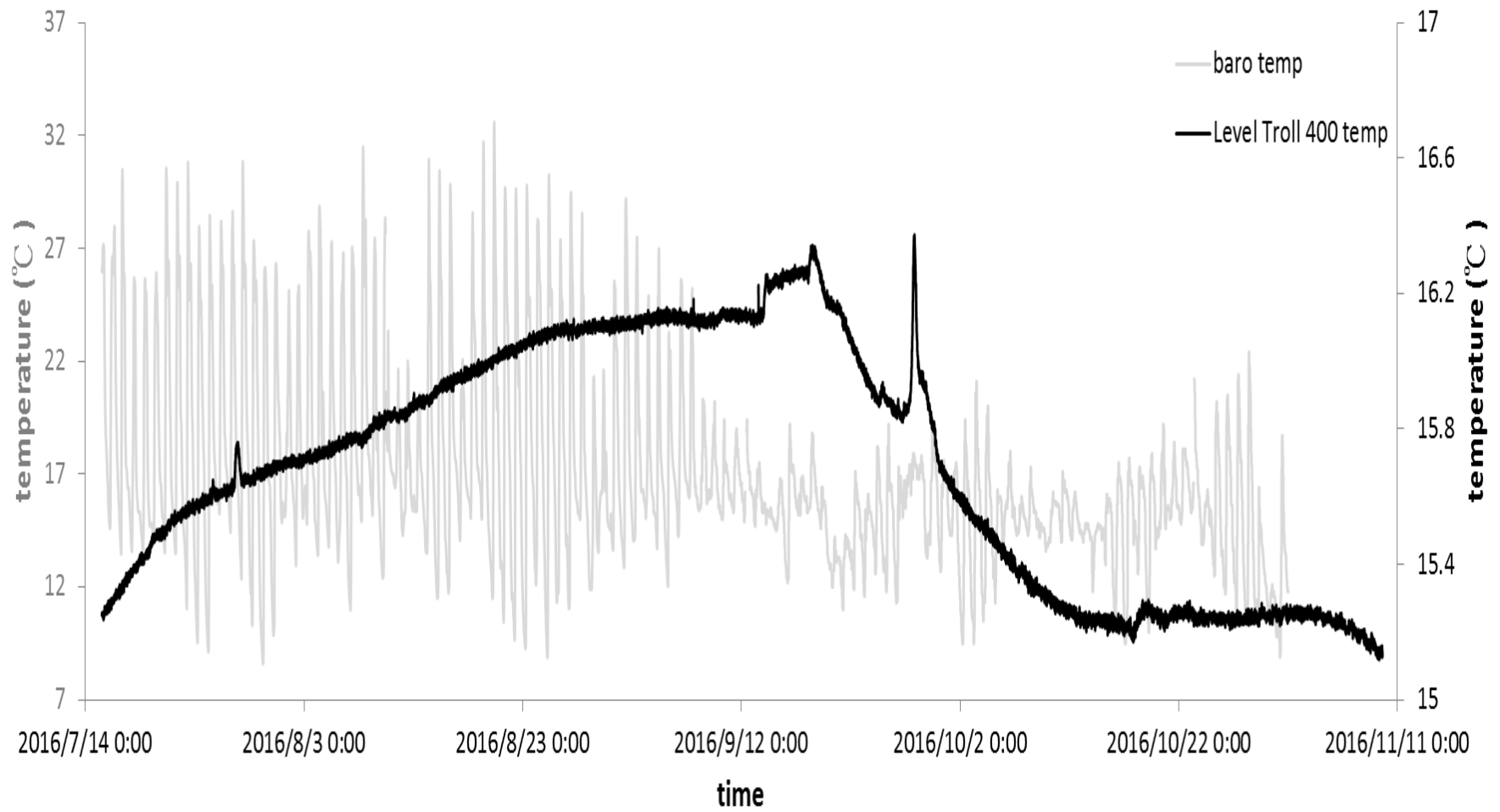


圖 3.46 櫻花鈎吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 溫度歷線圖

思源

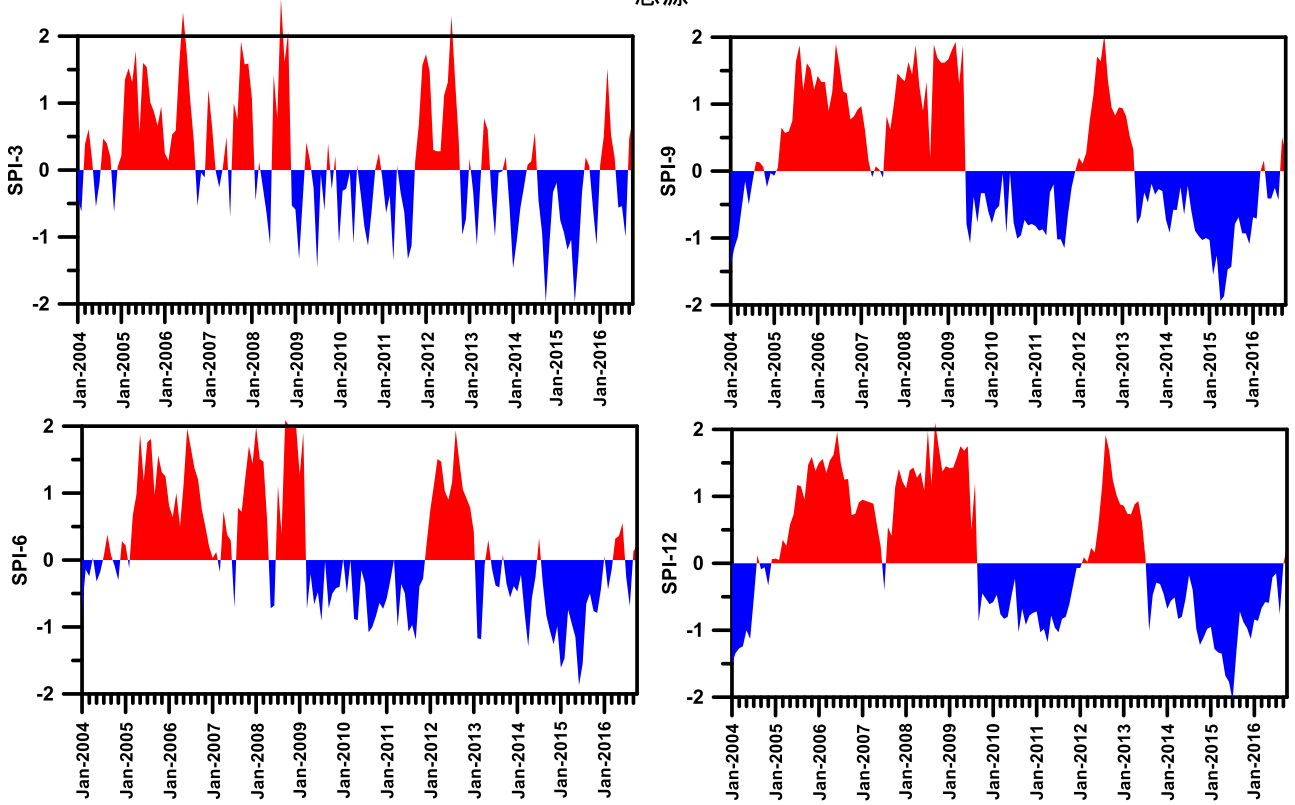


圖 3.47 2004 年開始思源 (自動) 雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢

桃山

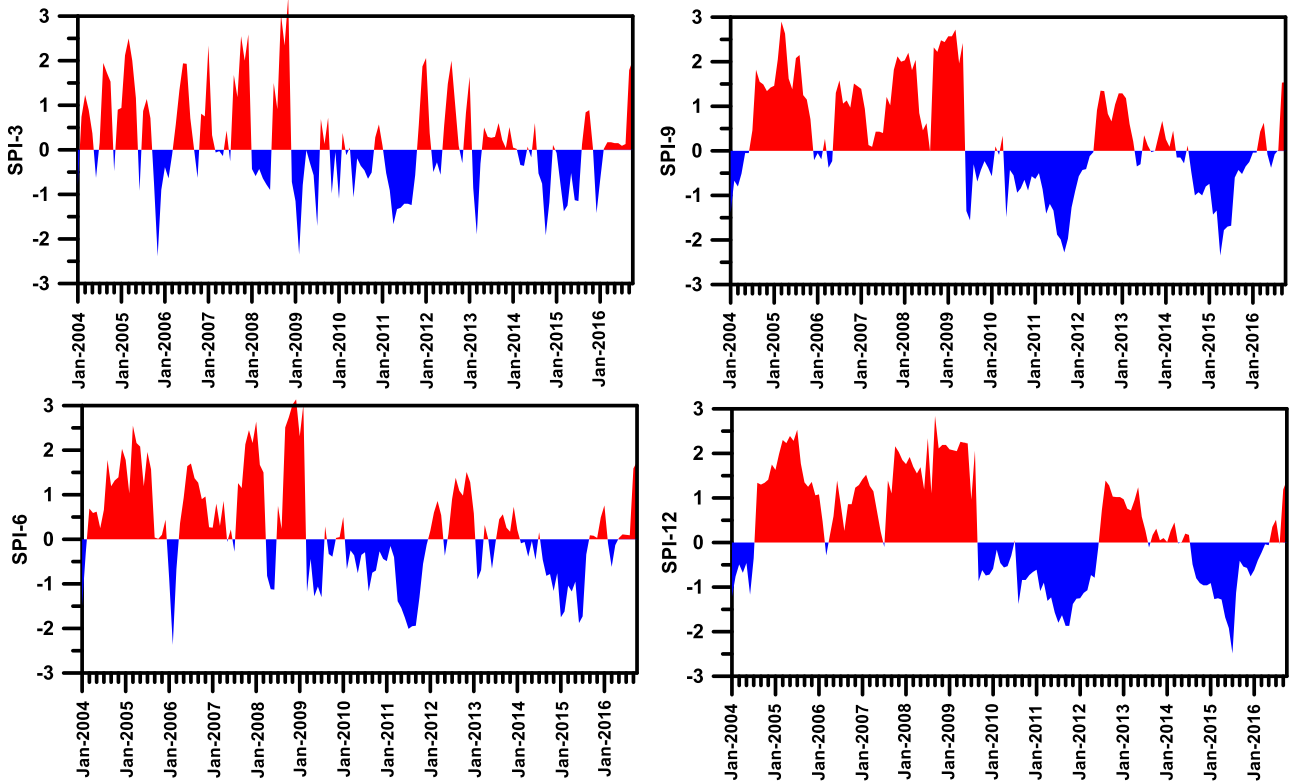


圖 3.48 2004 年開始桃山雨量測站 SPI-3、SPI-6、SPI-9、SPI-12 隨時間變化之趨勢

期中審查會議回覆辦理情形

審查意見	辦理情形
<p>林昭遠委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 僅水文分析不妥，宜再蒐集地文、土地利用以及相關大數據(big data)加以探討。 2. 地下水水位觀測採河道點位，需有目的說明。 3. 宜以環境指標做加值利用，可採水文收支方式或相關模式加以探討。 4. 曲流與斷流之解釋宜有明確的量化分析，請補充說明。 5. 以降雨退水曲線解釋河道斷流潛勢有待商榷。 6. 各站資料宜有集水區空間分布之趨勢分析。 7. 逕流係數分析部分數據大於1違反自然現象，請再檢核修正。 8. 野溪斷流宜採河道大斷面測量之資料加以分析其可能斷流點位。 9. 雪量會影響河道流量，是否考量分析？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 水文是斷流與否的關鍵因素之一，後續水文模擬時將會考慮地文、土地利用等相關因子。武陵地區斷流相關的資料仍非常有限，以大數據的方法探討目前仍有其困難。 2. 根據文獻的收集，在河道上量測地下水位的變化，配合河水水位的變化將可以瞭解河水 河床的交互作用，判定水流動的方向。 3. 水文的收支將配合後續水文模式的建立一併探討。 4. 曲流與斷流之關連性為現地觀察中之初步發現，將於後續計畫中做深入探討。 5. 我們認為斷流的發生跟斷流前的降雨量有關，而河川的退水直接反應流量降低的趨勢，若能瞭解兩者與斷流發生時機的關係，將可以做有效的預警。此計畫試圖建立已知斷流河段與測站降雨及流量站之關係，並非根據降雨及流量資料來判斷各個河段之斷流潛勢，特此說明。 6. 將配合後續水文模式建立時一併討論。 7. 過去「武陵地區長期生態監測暨生態模式建立」計畫發現，武陵地區流量 水位率定曲線在推求颱風時期流量時，若缺乏高水位時期流量觀測資料時，會發生高估流量之情形，而導致逕流係數大於1。 8. 感謝委員的建議，本計畫將在後續考量斷流河段之河道斷面。 9. 會後將與保育課索取雪的相關資

	<p>料做為參考。圈谷地區僅佔七家灣溪流量站集水面積的 0.6%，融雪對流量的影響遠小於降雨的影響，且融雪多透過入滲方式以地表下逕流或地下水方式流入河川，其影響將反應在退水的變化趨勢上。</p>
<p>曾晴賢委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫對於武陵地區環境保護與生態之保育有相當大的助益，在極短時間即進入狀況，實屬不易。 2. 研究重點宜再注意七家灣溪，而非有勝溪之斷流問題而已。 3. 溪流棲地的變化與瞬間極端流量與動床之間的關係，此部份是否有特別分析。 4. 圖 1 之相觀測站、標誌名稱宜再檢討確認。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的肯定。 2. 感謝委員的提醒，會再後續計畫期間更深入討論七家灣溪的斷流問題。 3. 彙整流量記錄、葉昭憲老師空間及時間上連續的斷面量測、曾晴賢老師過去長時間魚群數量的調查將有機會瞭解委員之提問，但並不在此計畫的工作項目內，本研究著重在已知斷流河段河水 河床之交互作用。 4. 將進一步確認，並在期末報告時做完整的修正。
<p>伍技佐珍曄</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請問降雨和逕流是同時段監測的嗎？逕流是否會有段時間為延遲效益。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 降雨跟逕流的確會有延遲的關係，本計畫目前是透過比較月時間尺度的降雨跟逕流的關係來降低延遲效應的影響，後續將以季時間尺度來探討降雨 逕流關係。
<p>廖主任林彥：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究案為主要是七家灣溪長期生態調查很久，獨缺水深、伏流水及缺水狀況越來越嚴重等相關資訊，發現近年來七家灣溪的水量越來越少，且七家灣溪有二處斷流及有勝溪有一處斷流之情形，希望受託單位幫忙找出原因及解決方式，在本處經營管理 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的提醒，委員所提即為此計畫之目標，我們將竭盡所能達成目標。

<p>上十分重要。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 測站之座標須和地理位置是一致的，若不一致須確認或建議捨棄不用。研究團隊 2-3 個月進行測量時，建議從源頭(下游、中游或上游)設定幾個固定測量站，測量流量部份。 3. 有勝溪部分缺水事件影響很大，在羅葉尾溪 2009 年放流五百多尾的鮭魚至今已有一千多尾，魚多到都跑到有勝溪，在斷流地區卻無法往下跑，因此斷流部分對鮭魚的拓展影響很重要。今年研究調查少了 9/10，只剩五十多尾，包含斷流部份或南湖溪電線桿施工有工程進行，而影響鮭魚族群數量，希望能找出解決斷流的方式。 4. 有勝溪通常水量還蠻多的，但近年來溪流內的水位日漸減少，建議能否提供有勝溪支流增加衛星雲圖或調出前人研究資料，做今昔對照進行比較，另外，是否因上游有農耕情形，使有勝溪的水量日漸枯竭值得探討。 	<ol style="list-style-type: none"> 2. 座標位置我們將做進一步確認。在固定地點(斷流河段的上、中、下游)做流量的觀測也是目前計畫執行的方式之一。 3. 感謝委員的提醒，委員所提即為此計畫之目標，我們將竭盡所能達成目標。 4. 近十年開始才有解析度較高的衛星影像，在 2 公尺最佳解析度的情況下還是很難判定支流流量的情形，且衛星影像所需的費用較高，利用衛星影像來探討農業活動對流量的影響在此計畫並不可行。
<p>于課長淑芬：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 流量及降雨使用平均不適當，請修正。期中報告書 13 頁小結七家灣溪流量於 12 月較高，原因為何？ 2. 蒐集資料中有勝溪及七家灣溪的雨量降雨部分有勝溪比七家灣溪高，但是退水比較多，退水的原因為何(水留不住)？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 計畫中所探討的是各項極端指標在長時間下的變化情形，用平均兩字導致誤解，將予以修正。七家灣流域內雨量站於 12 月的觀測記錄，雖然沒有通過統計的檢定，但均顯示上升的趨勢，志佳陽大山的乾季雨量甚至有顯著上升的趨勢，顯示七家灣溪 12 月流量的上

<p>3. 期中報告書缺少前人研究、材料方法及參考文獻，請按照將雪管處固定撰寫之格式撰寫。</p>	<p>升與降雨的增加有關。</p> <p>2. 退水情況是由流量觀測記錄所推求之結果，理論上反應集水區地下水流出的特性，與地質條件、土壤特性有關，然而農業取水抑會造成觀測流量的降低，也會造成推估退水較快的情形。</p> <p>3. 感謝于課長提醒，將遵照契約書的規定撰寫報告。</p>
<p>李技士佩如：</p> <p>1. 期中審查報告請依照契約書內服務建議書內容及格式修正，另外期中報告內容缺少英文摘要部份，請於會後補正。</p>	<p>1. 感謝提醒，將補上英文摘要，並遵照契約書的規定撰寫報告。</p>

期末審查會議回覆辦理情形

審查意見	辦理情形
<p>曾晴賢委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請補充歷次審查意見回覆。 2. 期末簡報中武陵七家灣溪研究調查背景資料參考文獻不足，請於成果報告書中補充說明。 3. 七家灣溪、有勝溪兩流量站的確實名稱應釐清。 4. 期末報告書請將建議和結論分開，期末報告書中並未有明確的建議，請受託單位提供建議及經營管理策略供管理處參考。 5. 缺少地下水溫日夜溫差的資料和氣溫、河水水溫、地下井深度相關資料，請補充。另外，圖 3.33 baro temp, Mini-Diver temp, Level troll 400 temp 請補充說明，何者為水溫?請加註說明。目前量測河水溫度方式和過去研究調查方式不同，請老師補充說明，另外請加註氣溫、水溫及地下水溫之關聯性的資料。 6. 斷流的發生原因與防砂壩的關係請加以探討。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已於成果報告中補充歷次審查意見回覆。 2. 已於成果報告中補足武陵七家灣溪研究調查之背景資料與參考文獻。 3. 七家灣溪、有勝溪兩流量站隸屬於台電，已經再次與其水文資料庫確認，本計畫所使用之名稱資料無誤。 4. 已於成果報告中將建議與結論分開。 5. baro temp 為氣溫，Mini-Diver temp 為河川水溫，Level troll 400 temp 則為 2 吋井底之地下水溫。有別於過去的計畫以量測河水在河床上水平移動的溫度變化為主，本計畫量測的是河床垂直剖面的溫度，探討表面河水入滲至河床內所造成的溫度變化。在進行量測的河段中，氣溫的日夜變異明顯大於表面水溫與地下水溫，地下水溫的日夜變化在大部分的時間與表面水溫一致，只是地下水溫日最高溫較低、地下水溫日最高溫發生於河水日最高溫之後，比對三組量測河床剖面的溫度資料，顯示該河段具有河川水向下補助地下水之潛勢，且以實際發生斷流之剖面其向下補助量最大。 6. 關於斷流發生原因與防砂壩有關乙節，根據目前的實驗結果，難以

<p>7. 請於成果報告書增加斷流河段的位置說明，例如在幾 K 位置之類的說明。</p>	<p>提出斷流與防砂壩之關連性。有勝溪觀測河段接近思源埡口，離下游防砂壩仍有數公里之遙，在觀測期間有發生斷流；反觀於桃山北溪觀測之河段，雖緊鄰三號壩上游，卻未發生斷流，且不管流量於河段的連續性，及河川水位的變化上，均不見斷流之潛勢；七家灣溪的觀測河段也沒有觀測到斷流，亦沒有斷流的潛勢，且其下游之二號壩早已破損。</p> <p>7. 已於報告書中增加斷流河段位置座標。</p>
<p>葉昭憲委員：</p> <p>1. 斷流河段之監測樣點之座標或明顯地物相對位置應予以適當說明。</p> <p>2. 水位井深度以目前觀測資料而言，尚足以提供資料，但經沖毀若欲重設，其深度及保護設施應先考量。建議未來施工前，在水位井設置的前方打鋼軌，避免風災時期被沖斷。</p> <p>3. 針對桃山雨量站 SPI 時間變化趨勢(圖 3.1)之結論，從圖中如何看出豐則越豐、枯則越枯之現象，請增加文字</p>	<p>1. 有勝溪的斷流河段位置如下：Y1: 24°23'27.54"N, 121°21'02.58"E、Y2: 24°23'26.55"N, 121°20'54.97"E、Y3: 24°23'24.68"N, 121°20'54.60"E、Y4: 24°23'22.92"N, 121°20'51.94"E；七家灣溪的斷流位置如下：C1: 24°23'29.27"N, 121°18'33.61"E、C2: 24°23'22.52"N, 121°18'37.43"E；桃山北溪的斷流位置如下：T1: 24°23'57.35"N, 121°18'32.10"E、T2: 24°23'54.88"N, 121°18'32.45"E、T3: 24°23'51.92"N, 121°18'33.02"E</p> <p>2. 感謝委員的建議，我們會納入施工考慮。</p> <p>3. 針對桃山雨量站 SPI 時間變化趨勢(圖 3.1)之結論，我們已經分別把 SPI 大於 0 及小於 0 的部分作 Mann-Kendall 趨勢分析，並將結果</p>

<p>解說。此外，流量變化在七家灣溪之趨勢對於生態可能衝擊面向亦應說明。</p> <p>4. 結論提到有勝溪為較低逕流深度之可能原因，可否從植被、地質的條件補充說明，另外是否與地下集水區及地表集水區之間有關聯。</p> <p>5. 地下水溫剖面顯示深度 125-255cm 之介面導致地下水流補注流速不同，建議重新設置水位井時，進行鑽孔取樣，由地質專家判斷其組成。</p> <p>6. 本研究所得資料以雨季為主，建議持續進行以獲得乾季相關資料。</p>	<p>更新於成果報告中。流量快速的下降會增加魚類受困淺灘的機會，流量快速的上升則增加魚類被沖至下游甚至河岸上的機會，雖然七家灣溪的流量翻轉次數增加，但每日流量增加率及減少率趨緩，估計對於魚類的影響較小。</p> <p>4. 感謝委員的建議，我們也懷疑有勝溪的地下集水區與地表不同，但因本計畫無法驗證，因此並未就此說明；從地質圖上看來有勝溪斷流河段的地質條件的確與七家灣溪及桃山北溪不同，未來或許可以列為討論的方向。</p> <p>5. 感謝委員的建議，我們會納入施工時考量。</p> <p>6. 感謝委員的建議，我們會納入施工時考量。</p>
<p>廖主任林彥</p> <p>1. 從 30-40 年的照片觀察，相同地方生態已發生改變，有勝溪的鮭魚族群被隔絕，七家灣溪 2 號到 3 號壩之間某時期會有斷流情形，可否將 30-40 年來變化的原因，造成雨量有豐則越豐、枯則越枯的關係、全年平均水量降低、或可能與土石崩塌、颱風來襲造成河床改道使其保水率不佳、、、等原因，造成斷流進行說明。自然之改變，顯然在經營管理上很難有積極</p>	<p>1. 根據目前計畫調查結果，斷流的發生與雨量的多寡有顯著的關連，但受限於有限的斷流記錄，無法歸納出降雨多寡與斷流發生與否的關係；然而本計畫使用的低流量推估模式，可以合理推估連續不降雨日數的流量變化，將有機會做為預警的工作。</p>

<p>處理，但於保育策略上可以擴大鮭魚溪流放流的區域。未來報告中是否能提供在枯水期來臨前先提供某些警訊，以利管理處能進行一些緊急的處置(如移除某部分魚類暫時安置，待豐水期再放回之類之建議)。</p>	
<p>于課長淑芬：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告書圖表資料相當豐富，但報告書中說明太少老師在結論部分以文字方式補充說明。 2. 雨量分析指標 SPI，能否更進一步詳細說明，如河川缺水情況下是否會影響生物，有無相關資料可以提供並說明。 3. 斷流情況於中游發生較嚴重，是否為本身地質的原因，若不是那若植被完整，能否能幫助水恢復，改善斷流之情形。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已於成果報告中補充說明目前計畫的結論。 2. SPI 越低表示該時期的降雨越低於長期的平均，從目前有限的斷流資料看來，斷流的發生與低 SPI 有密切的關係，但不見得低 SPI 就會有斷流，也不表示高 SPI 時沒有發生斷流，如果 SPI 能與氣候指標，如聖嬰、反聖嬰有關，將可以提供長時間尺度的預警（如：未來 3-5 年可能為相對乾旱時期的推論）。 3. 目前計畫的結果很明確的告訴我們，有勝溪的斷流河段有明顯地河川水向下補助地下水的潛勢，能改善此一現象的方法理論上都有助於改善斷流的情形，但相關的方法仍須要更詳細的評估作業。
<p>許秘書嘉祥：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書中結果與建議請區分開。 2. 第 24 頁，第 12 點內容請補充說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 於成果報告書中將結果與建議分開。 2. 已於成果報告書中補充說明。