

106 年度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

受委託單位：國立臺灣師範大學地理學系

研究主持人：李宗祐

協同主持人：黃誌川、邱永嘉

研究期程：中華民國 106 年 1 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣壹佰貳拾萬元

雪霸國家公園管理處 委託研究
中華民國 106 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

本計畫透過衛星影像的蒐集、雨量與流量之分析，瞭解斷流發生之時機；並於河床設立監測井，監測地表水與地下水之溫度與水位，並透過模擬瞭解河床-河水交互作用及斷流發生之機制；並透過評估氣候變遷下對七家灣流域流量之變化，評估氣候變遷下斷流發生之潛勢。

從 2016 年 7 月於有勝溪斷流河段設置觀測井開始，有勝溪幾乎每個月均有斷流發生；桃山北溪亦在 2017 年 2 月發生超過一個月的斷流；七家灣溪則沒有斷流發生。有勝溪頻繁的斷流發生始於 2012 年颱風季節過後，河床的堆積、水流方向的改變及低降雨量似乎為斷流發生之必要條件，在現在曲流的狀況下思源雨量站 $SPI-1 < 0$ 及有勝溪流量低於 0.53 cms 即非常有可能發生斷流；有勝溪河床監測井的分析與模擬結果亦顯示斷流處河水向下入滲地下水之高潛勢，而在低入滲潛勢與地下水流出河水的河段則不易發生斷流；SWAT 模擬河道流量之結果顯示，有勝溪河川入滲至河床的潛勢高於七家灣溪的 30 倍，而七家灣溪應有穩定的地下水源注入河川，與衛星影像中均不見七家灣溪斷流的結果相呼應。氣候變遷的衝擊下，流量將隨著溫室效應的增加越趨於極端，枯水期流量的降低將增加斷流的風險，代表生態基流量的 Q95 更是顯著的降低，可能發生斷流的天數亦明顯增加，而豐水期流量的增加亦可能增加河道的堆積與變遷，也將影響到斷流的潛勢。

Abstract

This project (1) collects the satellite images and analyzes the rainfall and streamflow data to understand the occasion of fragmented reach, (2) builds up the wells and monitors/models temperature and water level to understand the mechanisms in the fragmented reaches, (3) assesses the impacts of climate change on streamflow in the Chichiwan watershed to understand the potential fragmentation in the future.

The field survey beginning in the mid-2016 reveals that Yousheng Creek has fragmented reaches in the most of the time. Toushan North Creek has fragmented reaches in February and lasts for more than 1 month. There are no fragmented reaches in the Chichiawan Creek. Frequent occurrence of fragmented reach started after the post-typhoon season in 2012. Riverbed deposition, flow direction change, and low rainfall are essentials resulting in fragmented reaches. In the current condition of the meandering reach, fragmentation very likely occur when $SPI-1 < 0$ and flow rate < 0.53 cms. The well data also reveal the fragmented reaches in Yousheng Creek have high infiltration potential from the surface streamflow to the groundwater. It is hardly to find the fragmented reaches in the Chichiawan Creek from the satellite images. SWAT modelling results show that both low infiltration potential and groundwater input impede the occasion of fragmentation in the Chichiawan Creek. And the infiltration rate in the Yousheng Creek is 30 times larger than in the Chichiawan Creek. As for the climate change impact assessment, streamflow will be more extreme if the air temperature is getting higher. Lower streamflow in the drought season will increase the risk of fragmentation. Higher streamflow in the flood season will increase the channel deposit which will also enhance the risk of fragmentation. Q95 will be decreasing and the occurrence of fragmentation will be increasing.

目錄

第一章 序論	
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
2.2 衛星影像資料	7
2.3 復育中心地下水井之監測	7
2.4 斷流河段監測	8
2.4.1 流量觀測	8
2.4.2 河床地下水位及溫度之監測	8
2.4.3 以熱能為示蹤劑探討河水與地下水交互作用	10
2.5 河水—河床熱傳遞模式 (VS2D)	12
2.5.1 熱傳輸模式	12
2.5.2 數值模式率定	14
2.5.3 數值模式建置	14
2.6 水文模式	15
2.6.1 GWLF 模式	15
2.6.1.1 地表	15
2.6.1.2 未飽和層	15
2.6.1.3 淺層飽和層	16
2.6.1.4 退水係數及地下水流出	16
2.6.2 SWAT 模式	17
2.6.2.1 地表逕流模擬	17
2.6.2.2 側向流模擬	18
2.6.2.3 淺層地下水量模擬	19
2.6.2.4 河道水量模擬	19
2.7 氣候變遷影響評估	20
2.7.1 氣候變遷情境	20
2.7.1.1 氣象資料合成模式	20
2.7.1.2 日溫度模擬模式	21
2.7.1.3 日降雨量模擬模式	21
第三章 結果與討論	23
3.1 河道變遷與斷流之關係	23
3.1.1 桃山北溪之河道變遷	23

3.1.2	七家灣溪之河道變遷.....	23
3.1.3	有勝溪之河道變遷.....	25
3.2	水文條件與斷流之關係.....	27
3.2.1	雨量與斷流之關係.....	27
3.2.2	流量與斷流之關係.....	28
3.3	斷流河段之觀測結果.....	29
3.3.1	有勝溪斷流處流量變化.....	29
3.3.2	七家灣溪斷流處流量變化.....	30
3.3.3	桃山北溪斷流處流量變化.....	30
3.3.4	七家灣溪及桃山北溪之水溫及水位觀測.....	31
3.4	河床—水文之交互作用.....	31
3.4.1	河水—地下水水位變化.....	33
3.4.2	河水—地下水溫度變化.....	36
3.4.3	河水—地下水溫度剖面變化.....	38
3.5	復育中心地下水井之觀測.....	41
3.6	河水—河床熱能傳遞模擬結果.....	41
3.6.1	河床水力傳導係數不隨時間改變.....	41
3.6.2	河床水力傳導係數隨時間改變.....	42
3.7	集水區流量模擬結果.....	44
3.7.1	有勝溪流量站.....	44
3.7.2	七家灣溪流量站.....	45
3.8	氣候變遷對流量之影響.....	46
3.8.1	氣候變遷下之氣象變化.....	47
3.8.2	氣候變遷下之流量變化.....	48
3.8.3	氣候變遷下之斷流天數變化.....	48
第四章	結論與建議.....	50
4.1	結論.....	50
4.2	建議.....	52
參考文獻	53

表目錄

表 2.1 各氣象及流量測站坐標及紀錄時間.....	56
表 2.2 乾旱指標分級對照表(摘錄自 McKee et al. (1993)).....	57
表 2.3 本研究蒐集自 2004 年至 2016 年共 33 張衛星影像圖檔.....	57
表 2.4 In-Situ Level Troll 400 沉水式壓力式水位計及 Baro Troll 自計式氣壓計之規格.....	58
表 2.5 Eijkelkamp Mini-Diver 沉水式壓力式水位計之規格.....	59
表 2.6 Mini-Log II 自計式溫度計之規格.....	59
表 2.7 Starmon mini 自計式溫度計之規格.....	60
表 2.8 有勝溪觀測井基本資料與儀器配置.....	61
表 2.9 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	62
表 2.10 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	63
表 2.11 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	64
表 2.12 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	65
表 2.13 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	66
表 2.14 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	67
表 2.15 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	68
表 2.16 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	69
表 2.17 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	70
表 2.18 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	71
表 2.19 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	72
表 2.20 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化.....	73
表 2.21 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	74
表 2.22 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	75
表 2.23 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	76
表 2.24 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例.....	77
表 3.1 本研究蒐集衛星影像對應月分之 SPI 指標.....	78
表 3.2 有勝溪斷流處流量量測值[cms].....	80
表 3.3 七家灣溪斷流處流量量測值[cms].....	81
表 3.4 桃山北溪斷流處流量量測值[cms].....	81
表 3.5 VS2DH 模式率定結果 (水力傳導係數不隨時間改變).....	82
表 3.6 VS2DH 模式率定結果 (水力傳導係數隨時間改變).....	83
表 3.7 有勝溪 SWAT 模式參數檢定表.....	84
表 3.8 七家灣溪 SWAT 模式參數檢定表.....	85

圖目錄

圖 2.1 各氣象及流量測站位置圖.....	85
圖 2.2 求取 SPI 過程圖(摘錄自 Benjamin,2012).....	86
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).....	86
圖 2.4 於復育中心旁水井進行水位監測.....	87
圖 2.5 桃山北溪(左)、七家灣溪(中)及有勝溪(右)曾斷流之河段.....	87
圖 2.6 流速面積法子斷面切分示意圖.....	88
圖 2.7 有勝溪監測點位置圖.....	88
圖 2.8 有勝溪監測點 2 吋及 1 吋觀測井設置及儀器配置示意圖:(a) A1、B1、C1、D1,(b) B2、B3、B4.....	89
圖 2.9 自計式溫度計:(a) Minilog-II 自記式溫度計 (b) Starmon mini 自記式溫度計.....	90
圖 2.10 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).....	90
圖 2.11 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).....	91
圖 2.12 河床沉積物年(日)溫度包絡線之關係圖(摘自 Stonestrom and Constantz, 2003) ..	91
圖 2.13 VS2D 數值模式設定示意圖.....	92
圖 2.14 水平衡關係示意圖.....	92
圖 2.15 水在 Kinematic storage model 中假定之狀態.....	93
圖 3.1 桃山北溪、七家灣溪與有勝溪變遷河段分布位置.....	93
圖 3.2 桃山北溪 Zone-T1 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01).....	94
圖 3.3 桃山北溪 Zone-T1 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12).....	95
圖 3.4 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01).....	96
圖 3.5 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01).....	97
圖 3.6 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12).....	98
圖 3.7 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01).....	99
圖 3.8 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01).....	100
圖 3.9 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12).....	101
圖 3.10 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01).....	102
圖 3.11 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01).....	103
圖 3.12 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12).....	104
圖 3.13 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(1980.11-2006.07).....	105
圖 3.14 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2006.11-2009.12).....	106
圖 3.15 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2010.01-2012.08).....	107
圖 3.16 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2012.10-2014.01).....	108
圖 3.17 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2014.04-2017.02).....	109
圖 3.18 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01).....	110

圖 3.19 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)	111
圖 3.20 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)	112
圖 3.21 有勝溪 Zone-Y3 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01)	113
圖 3.22 有勝溪 Zone-Y3 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12)	114
圖 3.23 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)	115
圖 3.24 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)	116
圖 3.25 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)	117
圖 3.26 有勝溪 Zone-Y5 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01)	118
圖 3.27 有勝溪 Zone-Y5 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12)	119
圖 3.28 SPI-1 與有勝溪斷流之關係.....	120
圖 3.29 1999 年 4 月 7 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量：0.230 cms).....	121
圖 3.30 2003 年 3 月 11 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量：0.020 cms).....	121
圖 3.31 2012 年 1 月 28 日、7 月 2 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.793cms、0.550 cms)；2012 年 8 月 14 日、10 月 22 日衛星影像顯示有勝溪斷流(無觀測流量).....	122
圖 3.32 2013 年 1 月 31 日、7 月 11 日、11 月 26 日、12 月 2 日及 12 月 6 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.486 cms、0.5 cms、0.478 cms、0.405 cms、0.377 cms).....	122
圖 3.33 2014 年 1 月 20 日、1 月 30 日、4 月 18 日及 10 月 29 日衛星影像則顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.480 cms、0.258 cms、0.233 cms、0.531 cms).....	123
圖 3.34 2015 年 1 月 24 日、3 月 18 日、4 月 15 日、12 月 13 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.470、0.396、0.399、0.472 cms).....	123
圖 3.35 2016 年 2 月 8 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：2.12 cms).....	124
圖 3.36 2011 年 1 月 1 日、6 月 18 日及 12 月 28 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.234、0.375、1.313 cms).....	124
圖 3.37 2010 年 1 月 14 日、12 月 9 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.619 cms、0.479 cms).....	125
圖 3.38 2009 年 1 月 17 日、12 月 13 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.640、0.448 cms).....	125
圖 3.39 2008 年 6 月 10 日、12 月 1 日、12 月 11 日、12 月 21 日衛星影像與航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.505 cms、0.857 cms、0.854 cms、0.771cms).....	126
圖 3.40 2007 年 1 月 29 日、7 月 21 日、10 月 28 日衛星影像與航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流分別為 0.570 cms、0.230 cms、2.400 cms).....	126
圖 3.41 2006 年 1 月 31 日、7 月 19 日及 11 月 12 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.550 cms、4.850cms、0.660cms).....	127
圖 3.42 2005 年 7 月 1 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.840cms).....	127
圖 3.43 2004 年 12 月 16 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.920cms).....	128
圖 3.44 2001 年 10 月 20 日航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.920cms).....	128
圖 3.45 2016 年七家灣溪與桃山北溪流量變化情況.....	129
圖 3.46 2015 年 3 月 5 日現地調查發現七家灣溪主流斷流(觀測流量：1.775 cms)；2015 年 3 月 18 日與 4 月 15 日衛星影響顯示桃山北溪斷流(觀測流量：2.293 cms、2.625 cms) ...	129

圖 3.47 2003 年 5 月 31 日至 6 月 4 日過去研究報告指出桃山北溪斷流(觀測流量：1.32 cms 至 1.27 cms).....	130
圖 3.48 2013 年 11 月 26 日、12 月 2 日與 12 月 18 日衛星影像顯示桃山北溪未斷流(觀測流量：2.857 cms、2.391 cms、10.82 cms).....	130
圖 3.49 有勝溪(上)、七家灣溪(左下)、桃山北溪(右下)流量觀測點.....	132
圖 3.50 桃山北溪潛在斷流處之水位觀測.....	133
圖 3.51 七家灣溪潛在斷流處之水位觀測.....	134
圖 3.52 A1 河川與二吋井地下水水位歷線圖.....	135
圖 3.53 B1 河川與二吋井地下水水位歷線圖.....	136
圖 3.54 C1 河川與二吋井地下水水位歷線圖.....	137
圖 3.55 D1 河川與二吋井地下水水位歷線圖.....	138
圖 3.56 B 剖面井群 (B1、B2、B3、B4 二吋井) 地下水水位歷線圖.....	139
圖 3.57 A1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖.....	140
圖 3.58 B1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖.....	141
圖 3.59 C1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖.....	142
圖 3.60 D1 的河川與二吋井地下水溫度歷線圖.....	143
圖 3.61 A1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖.....	144
圖 3.62 B1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖.....	145
圖 3.63 C1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖.....	146
圖 3.64 D1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖.....	147
圖 3.65 well A1 一吋井溫度包絡線.....	148
圖 3.66 well B1 一吋井溫度包絡線.....	149
圖 3.67 well C1 一吋井溫度包絡線.....	150
圖 3.68 well D1 一吋井溫度包絡線.....	151
圖 3.69 櫻花鈎吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 水位歷線圖.....	152
圖 3.70 櫻花鈎吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 溫度歷線圖.....	153
圖 3.71 Well A1-D1 二吋井 VS2D 模擬結果.....	154
圖 3.72 Well A1-D1 一吋井 VS2D 模擬結果.....	157
圖 3.73 Well A1-C1 二吋井降雨前後 VS2D 模擬結果.....	160
圖 3.74 Well A1-C1 一吋井降雨前後 VS2D 模擬結果.....	163
圖 3.76 有勝溪流量檢定成果圖.....	166
圖 3.77 有勝溪流量檢定散佈圖(一般與對數軸).....	166
圖 3.78 有勝溪流量驗證成果圖.....	167
圖 3.79 有勝溪流量驗證散佈圖(一般與對數軸).....	167
圖 3.80 有勝溪 Y1 井流量檢定成果圖.....	168
圖 3.81 有勝溪 Y1 井流量檢定散佈圖.....	168
圖 3.82 七家灣溪流量檢定成果圖.....	169
圖 3.83 七家灣溪流量檢定散佈圖(一般與對數軸).....	169
圖 3.84 七家灣溪流量驗證成果圖.....	170

圖 3.85 七家灣溪流量驗證散佈圖(一般與對數軸).....	170
圖 3.86 氣候變遷情境下思源氣象站(有勝溪流域)之溫度變化.....	171
圖 3.87 氣候變遷情境下桃山氣象站(七家灣溪流域)之溫度變化.....	172
圖 3.88 氣候變遷情境下思源氣象站(有勝溪流域)之降雨變化圖.....	173
圖 3.89 氣候變遷情境下桃山氣象站(七家灣溪流域)之降雨變化.....	174
圖 3.90 氣候變遷情境下有勝溪流量變化.....	175
圖 3.91 氣候變遷情境下七家灣溪流量變化.....	176
圖 3.92 氣候變遷情境下有勝溪 Q95 流量變化率.....	177
圖 3.93 氣候變遷情境下七家灣溪 Q95 流量變化率.....	178
圖 3.94 有勝溪斷流天數百分比變化成果圖.....	179

—

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，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，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，去年度的研究結果顯示，僅在緊鄰羅葉尾溪下游的有勝溪發生斷流的現象，且與河水入滲至河床的潛勢相關，無奈 2016 年 9 月 25 日侵台的梅姬颱風將觀測裝置全數沖毀，因此於本年度重新設置觀測網，更全面的瞭解斷流河段河床與河水間的交互作用，瞭解斷流發生的可能原因。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。

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流域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。第二年具體的工作項目如下所示。

1. 完成標準化降雨指標與斷流相關性之分析
2. 完成水文模式建立，並評估氣候變遷下對流量之影響
3. 完成斷流河段的水位、水溫等資料蒐集與分析
4. 綜合觀測與分析結果歸納斷流發生的原因

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積大規模的減少，造成許多水生動植物生命受到威脅；另外，流量短少可能使得水溫升高，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 月 31 日~6 月 4 日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，發現汛期前後均有斷流的現象，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 年 3 月 5 日，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流出至河川)，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 年之後，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

本計畫利用七家灣流域內的雨量資料，與七家灣溪上的七家灣流量站及有勝溪上的有勝溪流量站，建立水文模式，做為探討氣候變遷對流量衝擊評估之基礎。並分析斷流時期的雨量與流量，探討雨量與流量和發生斷流間的關係。本研究所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。

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訊息。

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-9 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-12 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。

2.2. 衛星影像資料

本研究蒐集自 2004 年至 2016 年共 33 張衛星影像圖檔(表 2.3)，以分析有勝溪及七家灣溪各時期之水流狀況，其中有 19 張「福衛二號」(FS-2) 衛星影像由國立中央大學太空及遙測研究中心提供；11 張「福衛二號」(FS-2) 衛星影像由行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網提供；3 張「陸地衛星 8 號」(Landsat 8) 衛星影像自 Google Earth 截圖取得；其中，在近思源有勝溪持續發生斷流的河段處，另增加由農林航測所提供之 10 張網站上可預覽之航照正射影像，做為判斷斷流與否的參考依據。

福爾摩沙衛星二號衛星影像，簡稱為「福衛二號」(FS-2)，「福衛二號」(FS-2) 由法國 EADS Astrium 公司製造，重量約 760 公斤，外觀高 2.4 公尺，外徑約 2.06 公尺；於 2013 年 2 月 11 日發射，飛行高度為 891 公里，與太陽軌道同步，每日通過台灣上空二次，繞行地球一圈時間約為 103 分鐘，衛星影像多頻譜 (MS) 與全色態 (PAN) 的解析度分別為 8 公尺與 2 公尺，因為福衛二號具有高空間解析度與時間解像力特性，常被應用於台灣各領域之相關研究，無奈國家實驗研究院太空中心於 2016 年 8 月 19 日正式宣布福衛二號功成身退，停止提供服務。「陸地衛星 8 號」(Landsat 8) 為美國陸地探測衛星系列之衛星，於 2013 年 2 月 11 日發射，飛行高度為 705 公里，與太陽軌道同步，每日繞行地球 15 圈，繞行地球一圈時間約為 99 分鐘，共有 9 個波段，包含紅外光及可見光之波長範圍，Landsat 8 之可見光、近紅外光、短波紅外光空間解析度為 30 公尺、全色態空間解析度為 15 公尺。

2.3. 復育中心地下水井之監測

本研究計畫在復育中心旁的地下水井(圖 2.4) 設置自計式水位計，做為武陵地區地下水變化情形的參考依據。本研究計畫選用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：沉水式壓力轉換儀 (submarine pressure transducer)、壓力感應儀、傳輸電纜、資料記錄器及電腦連結纜線。沉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，現今沉水式壓力轉換儀的精度與解析度已相當精進。沉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。

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，因此在自計式水位計選配時，應以較高耐用性之水位計為首要選擇。本研究計畫選用由 In-Situ 公司

所生產的 Level Troll 400 沉水式壓力式水位計進行長時間的地下水位監測。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；Level Troll 400、Baro Troll 詳細規格如表 2.4。

2.4. 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 2.5)。其中，在近兩個年度的觀測中，僅於有勝溪河段及桃山北溪接近三號壩位置發現斷流的現象。

2.4.1. 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 2.6 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。

2.4.2. 河床地下水位及溫度之監測

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，基礎水文資料紀錄與變化分析為其中非常重要的工作項目之一，在本研究計畫中進行河川水位、地下水水位、氣溫、河川溫度及地下水溫度的觀測，所蒐集的資料將有助於瞭解河水—河床交互作用的情形，而此交互作用關係的釐清將可應用於斷流發生機制的探討，以及斷流發生前的預警工作。

有鑑於在去年的觀測中，僅於有勝溪河段發現斷流的現象，本計畫以有勝溪斷流處做為主要監測的地點，由於前一年度所建置完成的三組監測井於去年九月受到梅姬颱風侵襲全數損毀，因此本研究計畫於今年度 (實際鑽井為 2016 年 12 月) 重新規劃新的監測地點。有鑑於前一年度所選定的監測地點缺乏地下水流往上補注河川的情形，因此本年度較前一年度於有勝溪下游多增加一個監測點，用以觀測地下水流是否有向上補注河水的現象。此外，為

更進一步完整建立 3 維河水與地下水交互作用水文模式，增加了一組垂直於河道的監測橫斷面，用以觀測地下水的側向流動情形。因此，本年度計畫共於七個地點進行監測，其監測的位置如圖 2.7 所示。依照監測點所在相對位置由上至下游依序命名為 well A1、well B1、well C1 及 well D1，而 well B1 井所在河道剖面另有三個監測點，依序為 well B2、well B3 及 well B4。每個監測點各設有一口直徑為 2 吋及一口直徑為 1 吋的監測井，每口井的深度為 4 m。所有監測井於 2016 年 12 月 5 日完成，隨後立即安裝監測儀器，開始執行連續觀測。

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。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 2.8 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 (350–400 cm)，目的為測量河床特定深度的地下水位和溫度資料；1 吋井管則是在預定的監測深度開篩 20 cm (10-30, 40-60, 90-110, 165-185, 265-285, 380-400 cm)。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。水位計裝設於二吋井管內，深度（距河床表面）為 375 cm，而溫度計則裝設一吋井管內，深度分別則為 20 cm、50 cm、100 cm、175 cm、275 cm 及 390 cm。此外，於每個監測點的河床表面亦裝設水位計，用以記錄河水水位及溫度變化（圖 2.8a）。受限於監測儀器數量限制，僅在 well B2、well B3 及 well B4 的一吋井深度 50 cm 及 275 cm 裝設溫度計（圖 2.8b）。

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 與 Star:oddi 所生產的 Starmon mni，而記錄河川水位的水位計則為 Eijkelkamp 所生產的 Mini-Diver。Mini-Diver 的操作與設定方式與 Level Troll 400 相似，詳細規格如表 2.5。以 Minilog-II-T（圖 2.9a）與 Starmon mni 自記式溫度計（圖 2.9b）進行河床溫度剖面監測，其體積小且固定方便，可將多個感應器組成溫度鏈，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 2.6 及 2.7，各觀測井的儀器配置及紀錄資料種類與時間整理於表 2.8 中。

2.4.3. 以熱能為示蹤劑探討河水與地下水交互作用

河水與地下水的交互作用在地表水與地下水中扮演極為重要的角色，假設地下水位僅受河川影響，當河川水位較低時 (gaining stream, 圖 2.10a)，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 2.10b)，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 2.10c)。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流出至河川當中；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 2.11 描繪出四種河床條件的溫度及水位圖，圖 2.11a 和圖 2.11b 說明河川與地下水系統相互補注的情形，圖 2.11c 和圖 2.11d 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。

以地下水流出至河川為例 (圖 2.11a) 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。大量的地下水流出會使得河床溫度擁有較小的改變量；反之，當地下水流出量較小時，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，在地下水流出至河川的情形下，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 2.11b），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加劇烈。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 2.11c），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 2.11d），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，此最大與最小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 2.12 為假想的河床循環溫度曲線的包絡線圖，圖 2.12 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。

2.5. 河水—河床熱傳遞模式 (VS2D)

2.5.1 熱傳輸模式

熱能-水流耦合傳輸模式可用以模擬熱能與孔隙水之間的傳輸模式，並將熱能作為示蹤劑來估計地下水流量。熱能與水在孔隙介質中傳輸的基礎物理分析是由 Philip and deVries 於 1956 年所提出。兩位學者以數學方式呈現液態水和氣態水在不飽和孔隙介質中透過固態、液態及氣態的方式傳輸熱能。依據他們的分析結果顯示，熱能與水的氣相傳輸在未飽和土壤中特別明顯，主要發生在乾燥的環境當中 (Scanlon and Milly, 1994)。隨著土壤水飽和度的增加，造成氣體的不連續，導致氣相的熱傳輸會隨之下降，當土壤中的水達到飽和時，氣相的熱傳輸也會隨之消失 (Stonestrom and Rubin, 1989)。一般的情況下，濕潤河道下的河床沉積物均為飽和狀態，可直接忽略氣相的傳輸，也就是當河道有逕流的時期，則不必依照 Philip and deVries 所提出的方法來分析熱能與水的傳輸，在這個時期即可用一個簡單的單相流 (single phase) 模式來描述河床沈積物中的熱能與水流傳輸行為。Suzuki (1960) 及 Stallman (1963, 1965) 兩人為首次以單相流系統建立水流與熱傳輸數學模式，經由解析解的推導，透過地下水觀測溫度來推估飽和介質中的水流通量，而他們的研究成果奠定了以熱能做為示蹤劑來量化地下水流通量的可行性與理論基礎，並將其應用範圍擴展，從深層地下水系統 (Bredehoeft and Papadopoulos, 1965) 至潮濕坡地 (Cartwright, 1974) 環境，皆可利用熱能示蹤劑來量測與推估水流通量。

Stallman (1963) 提出了可同時描述熱能與流體流動的方程式，其研究指出地下水的溫度可用來確定水流方向和水的移動速率，溫度與水力梯度的結合，則可推估沉積物的水力傳導係數。Stallman's 方程式描述熱與水在飽和沉積物中一維垂直方向 (z 方向) 的傳輸模式，其方程式如下：

$$K_r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q C_w \frac{\partial T}{\partial z} = C_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中， K_r 為河床沉積物的熱傳導係數 ($W/m^\circ C$)； T 為溫度 ($^\circ C$)； q 為水通過沉積物的流速 (m/s)； C_w 及 C_s 分別為水和沉積物的體積熱容量 (volumetric heat capacity, $J/m^3^\circ C$)； z 為深度 (m)； t 為時間 (s)。此方程式在不考慮擴散效應的情形下，依然可成功的預測地下水溫度資料。 q 值由達西定律所控制，其值為水力傳導係數與總水頭梯度的乘積，當 q 值為 0 時，方程式將簡化為傅立葉熱方程，可用來計算熱傳導的熱能轉換；當 q 值較大時，熱能傳遞方式主要為熱對流，且溫度變化範圍會擴及整個孔隙介質。

河床沈積物的熱傳導特性可經由方程式推估獲得，沉積物的體積熱容量可由沉積物的組成密度和比熱的乘積依比例加權得知，其方程式如下：

$$C_s = f_s (c_p)_s + f_w (c_p)_w + f_a (c_p)_a \quad (2)$$

式中， f_s 、 f_w 及 f_a 分別為沉積物、水及空氣的體積比； C_s 、 C_w 及 C_a 各代表沉積物、水及空氣的比熱 ($J/kg^\circ C$)； ρ_s 、 ρ_w 及 ρ_a 則分別為沉積物、水和空氣的密度 (kg/m^3)。將比熱與密度相乘後，即可得到體積熱容量，其中沉積物的體積熱容量約為 $0.8 \times 10^6 J/m^3^\circ C$ ，水的體積熱容量為 $4.2 \times 10^6 J/m^3^\circ C$ ，而空氣的體積熱容量則為 $0.001 \times 10^6 J/m^3^\circ C$ (de Vries, 1963)。

除式 (1) 之外，以對流-擴散方程式 (convective-dispersion equation) 描述能量傳輸的方程式亦常用於探討熱與流體在沈積物中傳輸與流動的行為，對流-擴散方程式在沈積物中傳輸與流動的過程首先由 Kipp 所提出 (1987)，此方程式包含了式 (3)、式 (4) 及式 (5)，分述如下：

$$\frac{\partial [\theta C_w + (1-\phi) C_s] T}{\partial t} = \nabla \cdot K_t(\theta) \nabla T + \nabla \cdot \theta C_w D_h \nabla T - \nabla \cdot \theta C_w T q + Q C_w T_s \quad (3)$$

式中， θ 為體積含水量 (volumetric water content)； ϕ 為沉積物之孔隙率 (無因次)； D_h 為熱機械擴散張量 (thermomechanical dispersion tensor, m^2/s)； q 為流體的流速 (m/s)； Q 為源或匯的交換速率； T_s 為源或匯的溫度。式 (3) 的左側代表單位體積內能量隨時間的變化量；式 (3) 右側的第一項為透過熱傳導方式的能量傳輸，第二項為熱機械擴散方式的能量傳輸，第三項為熱對流方式能量傳輸，而最後一項代表著單位體積內進入或移出的熱源。熱機械擴散張量 (Healy, 1990) 之定義為：

$$D_h = \alpha_T |v| \delta_{ij} + \frac{(\alpha_l - \alpha_t) v_i v_j}{|v|} \quad (4)$$

式中， α_l 與 α_t 分別為縱向 (longitudinal) 和橫向 (transverse) 的延散性 (dispersivity, m)； δ_{ij} 為 Kronecker delta 函數； v_i 與 v_j 則分別為 i 與 j 方向上的速度向量 (m/s)。

在飽和度改變的情形下，地下水流在沈積物中流動的情形可透過 Buckingham (1907) 水流方程式的修改成為廣為人知的理查方程式 (Richard equation, Richard, 1931) 進行描述，其式如下：

$$C(h, x) \frac{\partial h(x)}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h, x) \nabla (H, x)] \quad (5)$$

式中， $C(h, x)$ 為比水容量 (specific moisture capacity)，即土壤保水曲線 (soil water retention curve) 之斜率 (m)； h 為水壓 (m)； H 為總水頭高 (m)； K 為水力傳導係數 (m/s)。

熱傳導係數 (K_t) 與水力傳導係數 (K) 會隨著質地 (texture) 和飽和度的差異而變化，然而兩者間的關鍵區別在於，同樣材質或顆粒組成中的 K_t 與 K 有著截然不同的不確定性，在正常情況下，河床沉積物為飽和狀態時，其 K_t 的不確定性會遠小於 K 。以砂質河床為例，砂質沈積物在飽和狀態下的 K_t 值約介於 1.0 和 $2.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 的範圍之間，因此 K_t 值可假設為 $1.5 \text{ W/m}^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (van Duin, 1963)。反之，砂質沈積物在飽和狀態下的 K 值可能介於 10^{-2} 到 10^{-6} m/s 之間 (Freeze and Cherry, 1979, p. 29)，當沈積物的飽和度降低時， K 值範圍則會降低至 10^{-5} 到 10^{-10} m/s 之間 (Constantz, 1982)。

2.5.2 數值模式率定

本研究計畫的目標之一為彙整有勝溪的河川與地下水的觀測資料後，探討河水與河床的交互作用，並透過數值模式，量化兩者間的水流通量，評估河水與河床的交互作用對於水文生態環境之影響。然而，為使數值模式更具有可信度及準確性，模式率定 (model calibration) 為必要的工作之一，本研究計畫將模擬軟體 VS2D 與自動化參數率定軟體 PEST (Watermark Numerical Computing, 2016) 進行連結，透過分析能力強大的 PEST，進行水文及熱傳導參數之率定，冀望達到模擬結果與現地溫度量測結果相符。

模式率定過程中之目標函數為：

$$\min_{\theta} \Phi = \sum_{i=1}^N (T_i^{sim}(\theta) - T_i^{obs})^2 \quad (6)$$

式中， Φ 為目標函數(objective function)； θ 為欲率定的參數； $T_i^{sim}(\theta)$ 為 VS2DH 所模擬的溫度，為欲率定的參數函數，隨著參數的不同，所得到的 T_i^{sim} 也將不同； T_i^{obs} 為所量測的地下水溫； N 為觀測點數量。PEST 中所使用之逆推演算法為 Gauss-Marquardt-Levenberg 法(Doherty, 2005)。

2.5.3 數值模式建置

本研究計畫以地下水流與熱傳輸耦合數值模式 VS2DH 進行河水與河床交互作用之模擬，依據 105 年度所建置的 2 吋及 1 吋觀測井進行模式建置，並以 7 月 15 日至 9 月 13 日兩個月期間的觀測資料進行數值模式率定。模式率定的軟體選用參數自動化率定軟體 PEST (Watermark Numerical Computing, 2016)，透過分析能力強大的 PEST，進行數值模式中水文及熱傳導參數之率定，冀望達到模擬結果與現地溫度量測結果相符。

考量觀測點的分佈，模式建置主要以一維模式為主，模擬河水與河床間垂直方向上的水流通量，由上游至下游，分別針對 2 吋及 1 吋觀測井共建置 6 個一維數值模式，每個模式建置如圖 2.13 所示。模式在垂直方向深度為 4.0 m，每個網格高 0.1 m，共離散分為 40 個網格。在地下水流方面，模式左右兩側為無流量邊界 (no flow boundary)，模式上下方則為給定水頭邊界 (given head boundary)，上方以觀測的河水水位進行輸入，下方則以 2 吋井的地下水水位進行輸入；在熱傳輸方面，模式左右兩側依然為無熱傳導邊界 (no heat transfer boundary)，模式上下方則為給定溫度邊界 (given temperature boundary)，上方以觀測的河水水溫進行輸入，下方則是參考復育中心的地下水水溫進行輸入。

在模式率定上，主要針對河床垂直方向上的水力傳導係數 (vertical hydraulic conductivity)、河床的熱傳導係數 (thermal conductivity)、河床的比熱 (heat capacity)、熱延散係數 (heat dispersivity) 及河床的孔隙率 (porosity) 進行率定。以 2 吋井為建置基礎的模式中，在深度

3.75 m 的位置設置一地下水溫觀測點，用以輸出模擬水溫，並與觀測水溫進行擬合。以 1 吋井為建置基礎的模式中，分別在深度 0.2、0.4、0.75、1.25、2.25、及 3.6 m 的位置設置地下水溫觀測點，用以輸出模擬水溫，並與觀測水溫進行擬合。

2.6. 水文模式

本研究分別使用 GWLF 及 SWAT 兩種水文模式。以 GWLF 模式評估氣候變遷下，七家灣溪流域流量的變化趨勢，IPCC 建議在做氣候變遷影響評估時，參數較少之水文模式將能降低模式本身在模擬未來流量時之不確定性，而 GWLF 即具有此一優勢；而以 SWAT 模式，利用現階段觀測之降雨—流量關係，檢視河水入滲至河床下的情形。

2.6.1 GWLF 模式

七家灣溪水文模式的建立，將有助於模擬不同降雨型態所引發之流量變化，特別是氣候變遷下雨量改變對於流量之影響。本研究擬採用 GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 模式 (Haith and Shoemaker, 1987) 中之河川流量模式，此模式再驗證後將應用於評估氣候變遷對七家灣溪與有勝溪流量之衝擊。模式水平衡概念如圖 2.14 所示，本研究將集水區的水平衡模式分為三個主要部分，分述如下：

2.6.1.1 地表

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

$$I_t = R_t - Q_t$$

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

估算地表逕流有很多不同的方法，如合理化公式及 Curve Number 方法 (Ogrosky and Mockus, 1964) 等。在 GWLF 中，採用 Curve Number 方法，主要是此種方法在計算地表逕流時可合理的反應土地利用方式及土壤水分。逕流量可計算如下：

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

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100$$

上式中 CN 即為 Curve Number，其值因土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分而不同，詳見 Tung and Haith (1995)。

2.6.1.2 未飽和層

部分經由入滲的水補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，則水分將滲漏至淺層飽和含水層。此外未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而帶離土

壤。未飽和層之水平衡可以下列方程式表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t$$

其中 U_t 是未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量， ET_t 是蒸發散量，而 PC_t 是滲漏量，式中所用的單位為公分。

蒸發散量 (ET) 受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影響，可由下式決定：

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

其估算的方法可等於潛能蒸發散量 (PET) 乘上一個覆蓋係數 (CV)，但其受限於未飽和層可利用之水分，因此取計算之蒸發散量與未飽和層水分之較小值，作為估算之蒸發散量。其中覆蓋係數決定於土地利用方式。一般潛勢能蒸發散之計算上常用 Penman 公式，但其所需資料較多，包含風速及大氣濕度（或露點溫度）等。這些資料在氣候變遷之研究上不易取得或不確定性太高。IPCC 曾對氣候變遷衝擊研究提出建議，當資料不足時，應利用需要參數較少之較簡單模式，在 GWLF 模式中潛勢能蒸發散量由 Hamon 公式計算（1961）：

$$PET_t = \frac{0.021H_t e_{0t}}{T_t + 273}$$

其中 PET_t 是第 t 天潛能蒸發散量， H_t 是在第 t 天的日照時間（時）， e_{0t} 是飽和蒸氣壓， T_t 是日平均溫度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。飽和蒸氣壓是溫度的函數，可由下列方程式決定：

$$e_{0t} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136]$$

2.6.1.3 淺層飽和層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t$$

其中 S_t 是淺層飽和層之土壤水分含量， PC_t 是未飽和層滲漏至飽和層之水量， G_t 是飽和層滲漏至河川之水量（ G_t 計算考慮飽和層為一線性水庫，即 $G_t = r \cdot S_t$ ），而 D_t 是入滲至深層受限含水層之水量，式中所用的單位為公分。在本研究中入滲至受限含水層之水量（ D_t ）假設為零。未飽和層滲漏至淺層飽和含水層之水量（ PC_t ）可由下式算出：

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

上式中 U^* 是最大土壤水分容量，即田間含水量減去凋萎點間之水分容量，由此可知滲漏量即是指高於田間含水量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分。

利用上述公式估算地表逕流（ Q ）加上地下水排出量（ G ）即為河川流量。

2.6.1.4 退水係數及地下水流出

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

$$N = 0.83A^{0.2}$$

其中 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，取其 \log 斜率，即為退水係數。再利用公式

$$G_t = r \times S_t$$

即可估算由地下水流出至河川的水量。

2.6.2 SWAT 模式

SWAT 模式(全名為 Soil and Water Assessment Tool)為美國水土保持局 Jeff Arnold 博士開發，目的是為了預測不同土地利用與土壤等因子對於水、輸砂、水質輸出的影響，此模式以物理為基礎結合經驗公式，並透過各種參數的輸入計算流量、水質與輸砂等輸出量，物理過程包括水的流動、泥沙輸送、氮磷循環的模擬為主其餘則是透過經驗方程式進行運算。

SWAT 模式為半分布式(semi-distributed)水文模式，次集水區的劃分則是透過河流交會點來繪製，接著透過輸入土地利用、土壤與坡度等參數，定義門檻值劃分次集水區以及每一個水文單元(Hydrological Response Unit, HRU)藉以去模擬單元內之流量、輸砂、營養鹽等等的輸出，主要應用在非點源污染研究與集水區經營管理等用途，模式透過土地利用與氣候等資料輸入後，即能針對流量成果進行檢定驗證確定水文參數的數值，以下將針對各項目模擬方法進行簡介。

2.6.2.1. 地表逕流模擬

地表逕流模擬為水文研究重要的一環，是流量與非點源污染模擬研究的基礎。SWAT 模式模擬地表逕流以 SCS Curve Number 法進行估算，該方程式最早也是由美國開發並應用在小型的鄉村集水區，藉由雨水與逕流之關係建立而成，估算土地利用與土壤條件產生的地表逕流量(Rallison et al., 1982)。

SCS curve number 公式為:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S}$$

Q_{surf} 是累積地表逕流量或超滲降雨量($\text{mm H}_2\text{O}$)， R_{day} 為當天之降雨深度($\text{mm H}_2\text{O}$)， I_a 是初始入滲量($\text{mm H}_2\text{O}$)， S 為保留係數($\text{mm H}_2\text{O}$)會因為土壤與土地利用變化而改變，而 S 參數的估算如下:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

這裡的 CN 值為當天該地區的 CN 值，另外 I_a 為初始入滲量，通常會被設定為 $0.2S$ ，因此完整公式如下

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{R_{day} - 0.8S}$$

當降雨量大於 I_a 時，才会有地表逕流的發生，若小於 I_a 則會全部入滲到土中，如果用圖表來呈現 CN 值對應到之降雨-逕流轉換量，則如圖 3-18 所示。

在較大的降雨事件下，洪峰之模擬與地表逕流不同，洪峰流量是採用合理化公式進行模擬，其公式如下：

$$Q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3.6}$$

Q_{peak} 是指洪峰流量($m^3 s^{-1}$)， C 為逕流係數， i 為降雨強度(mm/hr)， $Area$ 為集水區面積(km^2)， 3.6 為單位換算之係數。

地表逕流產生後，流入河道需有一段延時，尤其在比較大的次集水區，更需要時間流入河道，此時河道中水量則需要考量地表逕流延遲參數來進行計算，如下式所示：

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \times \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]\right)$$

上式中 Q_{surf} 為主河道河川流量($mm H_2O$)， Q'_{surf} 為次集水區當天產生之地表逕流量($mm H_2O$)， $Q_{stor,i-1}$ 為前幾天儲存或延遲在次水區之地表逕流量($mm H_2O$)， $surlag$ 為地表水延遲參數， t_{conc} 為次集水區之集流時間。

2.6.2.2.側向流模擬

除地表逕流會流入河道外，側向流同為另一個水流移動途徑，當水進入到土壤中，有些水會在表層土壤中進行流動，尤其是水力傳導度較高的土壤中，坡長與坡度都會影響側向流的計算。SWAT 模式中側向流之模擬是採用 Sloan et al. (1984) 的方法，假定飽和地表下逕流與側向流都是在飽和區間平行移動，且水力傳導度與坡度需要夠達到該門檻值才會發生，該示意圖如圖 2.15 示：

圖中， D_{perm} 為表層可透水之土壤深度， L_{hill} 為坡長， a_{hill} 為斜坡的坡度，在 Kinematic wave 概念上，將側向流與飽和地表下逕流歸類為一起，假定水流位於飽和區與不滲透層之間，沿著邊坡底岩平行流動，在邊坡的飽和水量計算上則是利用以下公式 5 進行計算：

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \cdot H_0 \cdot \phi_d \cdot L_{hill}}{2}$$

$SW_{ly,excess}$ 為坡地每單位面積之飽和水層含水量(mm)， H_0 為坡地出水口顯示之飽和水層厚度(mm/mm)， L_{hill} 為坡長(m)， 1000 為公尺轉換為毫米之單位轉換，側向流之計算主要由上式跟邊坡飽和水量計算等參數組合而成，如下式 6 所示：

$$Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right)$$

Q_{lat} 為邊坡側向流量(mm)， $SW_{ly,excess}$ 為坡地每單位面積之飽和水層含水量(mm)， K_{sat} 為

飽和水力傳導度(mm/h)， slp 為高程單位距離。

2.6.2.3.淺層地下水水量模擬

淺層地下水層為河川基流補注來源，淺層地下水來源為地表水滲透，滲透過程將會把地表與土壤中的成分帶入淺層地下水層，這些過程在河川流量與水質模擬尤其重要，以下將介紹 SWAT 模式中有關河川基流補注等相關公式。

淺層地下水總水量的計算是透過水平衡，將河川基流補助與地表水滲透等進行計算，藉以了解淺層地下水總水量，公式如下：

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}$$

上述公式 $aq_{sh,i}$ 為淺層地下水在第*i*天的水儲存量(mm H_2O)， $aq_{sh,i-1}$ 為淺層地下水在第*i-1*天的水儲存量(mm H_2O)， $w_{rchrg,sh}$ 為進入補助淺層地下水水量(mm H_2O)， Q_{gw} 為從淺層地下水流出補注河川基流之水量(mm H_2O)， w_{revap} 為土壤缺水時從淺層地下水流出回土壤的量(mm H_2O)， $w_{pump,sh}$ 這裡指的是人為抽水量(mm H_2O)。

淺層地下水主要來源為雨水，雨水除了成為地表逕流，同時還會滲透入土壤中，隨著重力往下流動，進入淺層地下水層中，其計算公式則與土壤滲透有關，該公式如下：

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) * w_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right] * w_{rchg,i-1}$$

上述公式中 $w_{rchrg,i}$ 為第*i*天進入補注的淺層地下水水量(mm H_2O)， δ_{gw} 為水流從地表流入淺層地下水的延時(天)， w_{seep} 是每天通過土壤底層的水量(mm H_2O)， $w_{rchg,i-1}$ 為第*i-1*天補注的淺層地下水水量(mm H_2O)。

河川基流來自淺層地下水的補注，調節了河川乾季的水量與河川生物的存活，河川基流為淺層地下水減少的因素之一，其每日河川基流量計算方式如下：

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} * \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t] + w_{rchrg,sh} * (1 - \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t])$$

$$Q_{gw,i} = 0$$

if $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$
if $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$

上述公式中 $Q_{gw,i}$ 為淺層地下水流出第*i*天的河川基流量(mm H_2O)， $Q_{gw,i-1}$ 為第*i-1*天的淺層地下水流出的河川基流量(mm H_2O)， α_{gw} 為退水常數， Δt 為一天經過的時間， $w_{rchrg,sh}$ 為第*i*天淺層地下水層補充量(mm H_2O)， aq_{sh} 是第*i*天初始的淺層地下水儲存量(mm H_2O)， $aq_{shthr,q}$ 為發生河川基流補注之淺層地下水水量門檻值(mm H_2O)。

2.6.2.4.河道水量模擬

SWAT 模式中河道水量模擬主要參照曼寧流速公式計算，其流量與流速之計算公式如下：

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} R_{ch}^{2/3} slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

上述公式中 q_{ch} 為河道流量， A_{ch} 為河道橫斷面面積， R_{ch} 為濕周水體深度， slp_{ch} 為河道坡度， n 則為曼寧粗糙係數， v_c 則為該河道段流速。

此外 SWAT 模式尚有考量水在河道傳遞過程中的損失，水大多從河道底部下滲入深層地下水或者是河川兩岸的儲水層，該公式如下所示：

$$tloss = K_{ch} \times TT \times P_{ch} \times L_{ch}$$

上述公式中， $tloss$ 指水在河道傳遞過程的損失量(立方公尺)， K_{ch} 為河道水力傳導度(mm/hr)， TT 為水的傳遞時間(hr)， L_{ch} 為河道長度(km)，因此 K 值決定了水在河川移動的下滲量，並且隨著河川長度越長，其流失水量將會越多。

2.7 氣候變遷影響評估

本研究利用台灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室所開發之「氣候變遷整合評估模式」(Taiwan Water Resources Assessment Program to Climate Change, TaiWAP)以模擬氣候變遷情境下有勝溪及七家灣溪流量之變化，TaiWAP 包含了氣候變遷風險評估所需的氣候情境以及氣象合成模式，同時針對氣候變遷下水資源風險評估整合了 GWLF 水文模式、農業需水量評估模式、水資源模式等，並提供多準則排序評估法作為氣候變遷調適的支援決策工具(Liu et al., 2009, Tung et al., 2014)。TaiWAP 採用 TCCIP-AR5 台灣統計降尺度情境，本計畫利用其中 5 種大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM)：HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0、MIROC5、CCSM4，以統計降尺度模擬 5 公里解析度未來 2021-2040 年、2041-2060 年、2061-2080 年、208-2100 年四個時期在各種大氣二氧化碳濃度條件 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5) 下之月溫度變化量(表 2.9-12、2.17-20)及雨量變化率資料(表 2.13-16、2.21-24)。本研究選定思源氣象測站及桃山氣象測站，分別代表有勝溪流域及七家灣溪流域之氣象站代表，以該測站所位於該 5 公里網格之溫度變化與降雨變化情境，再搭配 GWLF 水文模式探討未來情境下有勝溪及七家灣溪流量變化。

2.7.1. 氣候變遷情境

2.7.1.1. 氣象資料合成模式

因為本計畫後續相關氣候變遷之影響評估需要日氣象資料當做輸入值，然在氣候變遷研究上，大氣環流模式所模擬之月統計特性變化之可信度較高，較少直接利用日資料，因此以

月統計特性透過氣象資料合成模式以產生日氣象資料並能因此產生極端之氣象條件。利用各情境所提供之預測值修正現況之溫度與降雨量的月平均統計特性，將修正後的溫度及降雨量資料代入氣象資料合成模式中，可模擬得氣候變遷下根據各預設情境可能發生之日溫度與日降雨量資料，利用以上現況之氣象資料與氣候變遷情境修正後之氣象資料，便可分別進行現況與氣候變遷影響下水文量之模擬，以探討氣候變遷影響下對水文量所造成之衝擊。本研究採用之溫度及降雨合成模式（Tung and Haith, 1995）說明如下。

2.7.1.2. 日溫度模擬模式

在溫度模擬方面，先利用溫度的歷史資料計算其統計特性，包括月平均溫度($\overline{T_m}$)、月溫度標準偏差(T_m)、和 Lag-one 自相關係數(ρ_m)，模式中假設每月第一天氣溫為該月之平均溫度，則將各參數代入下列方程式經過不斷的迭代即可產生與歷史統計特性相同之日溫度分佈（Tung and Haith, 1995）。

$$T_{m,t} = \overline{T_m} + \rho_m (T_{m,t-1} - \overline{T_m}) + V_i \sigma_m \sqrt{(1 - \rho_m^2)}$$

其中 $T_{m,t}$ 表示第 m 月第 t 天的溫度， V_i 表示平均值為 0，標準偏差為 1 的常態分佈亂數。

在氣候變遷下溫度模擬方面，因為研究中僅利用大氣環流模式所預測之月均溫變化 (ΔT_m)，所以在未來氣溫的模擬上僅改變上式中之月平均溫度 ($\overline{T_m}$)，即根據預設情境的選擇改變原有的月平均溫度為 $\overline{T_m} + \Delta T_m$ 。

2.7.1.3. 日降雨量模擬模式

在降雨模擬方面，一樣先利用降雨的歷史資料計算其統計特性，包括月下雨天平均降雨 ($\overline{R_m}$) 及月平均降雨機率，而月平均降雨機率包含了月降雨機率 ($P_m(W)$)、前天下雨今天亦下雨的機率 $P_m(W/W)$ 和前一天沒下雨今天下雨的機率 $P_m(W/D)$ 三種，我們先利用一亂數決定今天是否下雨，若是下雨再利用另一亂數決定其降雨量，若為晴天則降雨量為零，其模擬的過程如下所示。

假如為某月的第一天，則

$$\begin{aligned} \text{if } \varepsilon \leq P_m(W) & \quad \text{the day is wet} \\ & \quad \text{the day is dry,} \quad \text{otherwise} \end{aligned}$$

除了第一天之外的天數，則

$$\begin{aligned} \text{if } & \text{the day before is wet, and} \\ \text{if } \varepsilon \leq P_m(W/W) & \quad \text{the day is wet} \\ & \quad \text{the day is dry,} \quad \text{otherwise} \\ \text{if } & \text{the day before is dry, and} \\ \text{if } \varepsilon \leq P_m(W/D) & \quad \text{the day is wet} \\ & \quad \text{the day is dry,} \quad \text{otherwise} \end{aligned}$$

其中 ε 為介於 0~1 之間的亂數。若判定出來為下雨天則根據洪念民（1996）可知由指數分佈

(Exponential distribution)可模擬出理想的降雨資料。

$$\begin{aligned} \text{if } \quad \text{the day is wet} \quad R_{m,t} &= \overline{R_m} \times [-\ln(1 - RN)] \\ &= 0 \quad \quad \quad , \text{otherwise} \end{aligned}$$

其中 $R_{m,t}$ 表示第 m 月第 t 天的降雨量，而RN為不同於 ε 另一組介於 0~1 之間的亂數。

在氣候變遷下降雨模擬方面，因為研究中僅利用大氣環流模式所預測之月平均降雨變化比例變化 (R_{p_m})，所以在未來氣溫的模擬上僅改變月下雨天數平均降雨量($\overline{R_m}$)，即根據預設情境的選擇改變原有的平均降雨量為 $\overline{R_m} + R_{p_m}$ 。

第三章 結果與討論

3.1. 河道變遷與斷流之關係

本計畫透過衛星影像判釋桃山北溪、七家灣溪與有勝溪三條流路的河道地形變遷(各河段之編號與位置標示於圖 3.1)，主要參考 2004 年至 2015 年間的 19 張福衛二號衛星影像，期間除缺乏 2005 年的影像，以及 2004、2007、2008 三年度各採用 1 張影像外，其餘年度皆採用 2 張影像，時間分別落在年初的 1 月與年末的 10 月或 12 月。此外，在有勝溪主要斷流河段部分，並再增加判釋行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網 246 GIS 平台上的衛星影像、google earth 衛星影像與農航所的航照正射影像，挑選共計有 39 張影像，時間歷時至 2017 年。以下將從三條流路的影像判釋成果來說明各段具顯著流路變化之河道地形變遷特徵，並探討與斷流現象之關係。

3.1.1. 桃山北溪之河道變遷

根據衛星影像判釋及比對成果，桃山北溪僅一處 Zone-T1 河段具顯著變遷特徵，其餘河段皆屬谷壁限縮的峽谷河段，從野外觀察可見具有埋積再下切之特徵，但基本上河道並無顯著變遷。變遷河段位於 3 號壩上游側之桃山北溪、桃山西溪匯流處(圖 3.2、圖 3.3)，本河段之谷床已埋積至壩頂高度。在 2006 年 1 月 31 日前，桃山北溪大致穩定維持在緊貼左岸谷壁的單一流路，自 2006 年 11 月 12 日則可見流路向右岸方向多分出兩條分流，至 2008 年 12 月 11 日時雖仍可見 2 條平行分流，但兩分流更趨靠近，分流之間所夾之河中沙洲面積顯著變小。兩分流自 2008 年 12 月 11 日至 2012 年 1 月 28 日期間持續維持，幾乎沒有變化。但從 2012 年 10 月 22 日開始，流路則又開始出現顯著之變化，原先偏向右岸的兩條分流流路逐漸向左岸偏移，雖從影像上仍可見具顯著之分流流路特徵，但流路之水量已有顯著差異，河水大致集中於偏左岸側的分流流路。至 2013 年 12 月 2 日，主要流路又偏移至右岸分流流路，自此到 2015 年 12 月 13 日期間兩分流流路水量雖有出現消長變化，但分流河道大抵上仍維持不變，並無明顯變遷。且在所有蒐集的衛星影像中，並無明顯斷流之現象。

3.1.2. 七家灣溪之河道變遷

根據衛星影像判釋及比對成果，七家灣溪可分為 3 段具顯著河道變遷的河段(由上至下游依序編號為 Zone-C1、Zone-C2 與 Zone-C3 河段)(圖 3.4-3.12)，這 3 段河道的共同特徵為埋積旺盛且谷床寬廣的河段，河道周遭為谷壁或為河岸邊緣堆積的土石流扇，扇端邊緣已遭七家灣溪切割形成顯著的地形崖，大抵上河道的變動被限制在下切之地形崖與谷壁之間。以下將分別說明 3 段具顯著河道變遷河段之變化特徵。

Zone-C1 河段的左岸谷壁大致平直，右岸則相對彎曲，經現地觀察，右岸在地形上為向七家灣溪傾斜的土石流扇，本河段右岸之彎曲應為七家灣溪切割土石流扇末端的結果，並有顯著的地形崖落差。流路大抵上在此被侷限於此寬廣的埋積河床之間遷移，具瓣狀河系的分流特徵，依上下游順序可再細分為 Zone-C1 上游、Zone-C1 中游與 Zone-C1 下游三小段。七

家灣溪自 3 號壩上游由桃山北溪與桃山西溪兩支流匯流後，向下游先流經一谷壁緊縮河段。進入 Zone-C1 上游河段後，流路大致鄰近於右岸，並逐漸受到外凸之右岸影響，使流路漸向左岸偏移，主要以分流的形式漸變遷移。在更下游處，流路在兩岸之間來回擺盪，使流路時而偏向左岸，時而偏向右岸。根據 2004 年 12 月 16 日的衛星影像，流路較早先自右岸擺移至左岸，但從 2006 年 1 月 31 日起到 2013 年 01 月 31 日之間，流路則轉變為沿著外凸之右岸順勢一路向東偏移至左岸，期間主要流路沒有太大變化，僅於 2008 年 12 月 11 日開始在偏移過程中出現分流流路特徵。七家灣溪流路在歷經約 9 年的穩定期後，自 2013 年 12 月 2 日起則開始在同樣距離河段內產生由右到左、左到右的 2 次擺盪，此現象並可持續到 2015 年 12 月 13 日。Zone-C1 中游河段同為埋積河段，本段流路在寬闊的谷床中向右岸彎曲突出，從 2004 到 2007 年的影像可看到較細的流路，至 2008 年 12 月 11 日時，本段流路則顯著變寬，並可持續到 2013 年 1 月 31 日。自 2013 年 12 月 2 日開始，流路則縮小至緊鄰左岸的谷壁邊緣。Zone-C1 下游河段呈 2 條分流流路，流路中間夾有一狹長的河中沙洲，流路型態基本上沒有變化，僅有河中沙洲面積之消長變化。根據衛星影像，從 2010 年 12 月 9 號開始，偏左岸的流路漸向右岸靠近，至 2014 年 10 月 29 日，分流則遷移至更上游處，下游處則合併為單一流路，流路並逐漸向右岸突出，至 2015 年 12 月 13 日，原先存在的主要 2 條分流已完全合併為單一流路，並在下游處又發育出小型的分流流路。經由現地觀測，Zone-C1 下游河段之左岸為一大面積的崩塌地，根據本段流路逐步併水並向右岸突出的現象，可推知崩塌地在 2010 年 1 月 14 日之後應有顯著的變遷，本河段流路可能受持續的崩塌作用影響造成顯著變遷。

Zone-C2 河段，兩岸相對曲折，左岸為底岩谷壁，右岸同為七家灣溪下切土石流扇扇端形成的地形崖，流路的變化同樣被限制在兩者之間，同屬於辮狀河系，分流在本河段更為發達。根據衛星影像判釋成果，流路在進入本河段時，大致先順沿兩岸形成 2 道分流，2 道分流自 2004 年到 2012 年間幾乎沒有變化。2012 年 10 月 22 日之後則不見左岸分流，僅剩右岸流路存在。右岸流路可持續維持到 2015 年 1 月 24 日，在 2015 年 12 月 13 日右岸流路也開始往左岸偏移。再往下游處，從各期影像上可以明顯看到河流在通過一瓶頸河段要進入到下游側更寬闊的谷床之前，流路具有顯著的彎曲特徵，並有分流流路之出現。流路進入到最寬的谷床範圍後，流路可擺移的空間更為寬闊，流路漸從右岸橫跨到左岸，又因左岸的谷壁屏障，致使流路再向西偏移回右岸。在偏移的過程中，似乎流路與本段河谷走向的交角愈大，則受左岸谷壁屏障造成流路之彎曲與出現新分流流路之變化會更趨顯著，例如從 2012 年 10 月 22 日與 2013 年 1 月 31 日兩期影像來看，流路相對趨於西北—東南流向，這兩期流路有顯著之分流與彎曲特徵。反之，觀察其他數期影像，流路則相對為接近南北流向的單一流路，幾乎無變動。

Zone-C3 河段兩岸大致平直，谷壁為底岩所構成，谷壁之間因埋積作用旺盛而成寬谷，下游端谷床較上游端顯著寬廣，流路主要在此寬谷中擺移。根據衛星影像判釋結果，上游端河段具顯著的變遷，2004 年 12 月 16 日為分流流路，2006-2007 年則轉變單一流路，2008 年該流路以近乎 90 度的轉折自右岸偏移到左岸，在 2009 年 12 月 13 日則又形成分流流路，近乎直角的轉折與分流流路同時存在約 3 年之久，至 2012 年 10 月 22 日，急遽轉折的流路消失，但分流流路也同時擴大到整個上游端河段，至 2013 年 12 月 2 日後分流流路亦消失，流路偏移到左岸轉變為單一流路。本段流路在上、下游端之間河谷屬於一彎曲的谷壁緊縮段，流路通過此瓶頸處向下游再次進入到寬谷時，順應谷壁的彎曲變化，流路遂開始產生彎曲與分流

流路，值得一提的是，分流流路在此具有顯著的縱向遷移、流路水體寬窄等變化特徵。從 2004 年 12 月 16 日的影像來看，寬谷中僅有單一流路，自右岸逐步彎曲到左岸。2006 年開始，流路已顯著偏移到左岸，並有分流流路，此特徵並持續維持到 2007 年左右，在 2008 年 12 月 11 日可看到分流繼續向下游側擴大，並可延續到 2012 年 1 月 28 日。到了 2012 年 10 月 22 日，左岸的分流已逐漸消失，僅剩右岸分流。至 2013 年 12 月 2 日，殘存的右岸分流又開始在其下游側發展新的分流流路，並持續到 2015 年 1 月 24 日，期間原先消失的左岸流路似有復流之徵兆，到了 2015 年 12 月 13 日，新生的分流已然消失。雖然根據武陵工作站同仁的現地觀測，曾在 2015/3/5 於 Zone-C1 處發現斷流，但在所有蒐集的衛星影像中，並未發現七家灣溪主流有發生過斷流的現象。

3.1.3. 有勝溪之河道變遷

根據衛星影像判釋及比對成果，有勝溪可分為 5 段具顯著河道變遷的河段(由上至下游依序編號為 Zone-Y1、Zone-2、Zone-Y3、Zone-Y4 與 Zone-Y5 河段)，在影像上僅觀察到 Zone-Y1 河段有數次斷流現象，其餘 4 段則無。這 5 段河道皆為埋積旺盛且谷床寬廣的埋積谷，河道周遭為谷壁或為有勝溪下切形成的地形崖，大抵上河道的變動被限制在下切之地形崖與谷壁之間。以下將分別說明 5 段具顯著河道變遷河段之變化特徵。

Zone-Y1 河段為本計畫唯一發現有持續發生斷流之河段，因此本計畫挑選 1980 至 2017 歷時 37 年的 Zone-Y1 河段影像資料，以判釋其河道變遷狀況。將影像挑選出來後，利用 ArcMap 將影像中之河道水體數位化，並擷取各時期影像的相同範圍河段，以影像並列的方式，以觀察不同時期有勝溪河道變遷與河道斷流之關係(圖 3.13-圖 3.27)。根據影像判釋結果，Zone-Y1 河段的變遷大抵上可以 2012 年為界，在 2012 年 7 月之前，本段流路持續維持在直流流路特徵，期間雖有幾期影像可見偶有小型分流流路之出現，但流路特徵幾乎沒有太大變化。特別的是，從 1999 年 4 月 7 日與 2003 年 3 月 11 日影像可看見斷流現象，除了 1999 年的斷流河段較長外，2003 年斷流河段明顯較短，上述斷流現象係發生在流路相對穩定，無顯著變遷之時期。

本河段在 2012 年 7 月 2 日的影像中仍無明顯變化，到了 2012 年 8 月 14 日，原先覆蓋植被的河岸地區已可見大量埋積的沉積物，有勝溪流路也開始顯著變寬，流路開始由原先的直流流路，向右岸靠近並彎曲為曲流流路。到了 2013 年 1 月 31 日，開始可在河道流路顯著變化之處看到斷流現象，自 2013 年 3 月至 12 月間的數期影像皆可見到本河段大規模的斷流現象，並斷斷續續可持續到 2015 年的 12 月，2016 年 2 月 8 日的影像雖然沒有斷流，但 2017 年 2 月 16 日則又出現斷流現象，並擴張到更下游的河段。根據影像判釋結果，研判可能在 2012 年 7 月 2 日至 2012 年 8 月 4 日期間，有勝溪河道發生巨大之事件使河道發生變遷，從影像中可顯著看出河道因充填大量的沉積物而使流幅擴大，暗示該事件提供了大量的沉積物進入到河道堆積，進而造成河道變遷與斷流現象。比較本河段在 2012 年前、後發生的斷流現象，在 2012 年前的河道並無顯著變遷，雖然曾有斷流現象，但在相鄰的幾期影像中並未再見到斷流，顯示斷流的延時並不長，研判在 2012 年之前的斷流似乎為短期的各別事件，顯然與河道變遷無關；但在 2012 年之後的斷流，該時流路具顯著的變化，流幅明顯變寬且開始轉變為曲流流路，顯示因為一場大事件造成河道沉積物的大量淤埋進而引發大規模的流路變遷，

有勝溪遂可能因廣大的沉積物埋積而造成相對連續、長延時的斷流現象。根據官文惠(2012)調查結果顯示，2012年10月與2012年6月相較，有勝溪南胡登山口附近的河床（斷流處上游）河床因颱風造成的堆積有顯著的抬高，瓣狀流的發生分散了河川的流量而使得斷流更容易發生。

Zone-Y2 河段為一谷床寬廣的曲流河段，流路大致上緊貼於河岸而流，並有向對岸偏移之流路。大抵上流路的變化趨勢不大，僅在前幾期影像可觀察到幾處鄰近河岸處具有外凸之變化，推測與匯入河道的溪溝帶來的沉積物有關。後幾期，流路則不復見外凸之現象，流路貼於右岸谷壁而流。

Zone-Y3 河段位於勝光派出所附近，本河段之左岸有一支流注入，過去曾有幾次的土石流事件，本段河道之變化與支流之土石流作用密切相關。從2012年1月28日以前的數期影像來看，該支流於匯入有勝溪谷口處堆積形成一土石流扇，致使有勝溪河道向右岸偏移。從2012年10月22日的影像則可看出該支流因產生旺盛的土石流作用，河道拓寬數倍，連帶影響到主支流匯流口及有勝溪下游河段的顯著變遷，此大規模變化與該支流所輸入大量的沉積物密切相關。從2012年10月到2013年1月，有勝溪順著新生的土石流扇外緣而流，流路被趕往右岸的幅度顯著擴大，可知因支流的土石流作用致使有勝溪河床被墊高，進而造成流路遷移。2013年12月2日可見有勝溪流路已向左岸偏移至河道中心，顯示支流所帶來的沉積物相對較不旺盛，因此有勝溪流路可以向左岸偏移，但此流路並無維持很久，自2014年10月29日時有勝溪流路又再度被之流逼至右岸，顯示支流又再度發生堆積旺盛的土石流作用，造成有勝溪流路的顯著變遷。但儘管如此，卻不見斷流發生的現象。

Zone-Y4 河段兩岸緊鄰谷壁，從影像中可見本段流路亦具有埋積河道的特徵，谷床寬闊，且兩岸有顯著下切的地形崖，流路於地形崖之間呈自由彎曲。根據衛星影像的判釋成果，流路幾乎沒有太大變化，僅有小部分之遷移特徵，大抵以2012年為變化之分界，2012年1月以前的影像顯示流路幾乎沒有變化，2012年10月則可見主要流路漸向右岸遷移，並有分流流路之變化，舊河道水量已顯著減少或為乾河道狀態。此外，流路的流幅寬度也在2012年10月之後顯著變細，顯示有勝溪的流量有明顯降低。雖然從影像上看來，本段流路並沒有太大的變化，但從2015年1月與12月的兩期影像能可判釋出一顯著差異，原先被植被覆蓋的右岸灘地顯著轉變為河道中的新生灘地，且仍保有乾河道的流路特徵，暗示在2015年中應曾發生一顯著的事件，造成灘地的變化，但流路可能未受該事件的影響變遷或是在短短的幾個月內就已恢復至原始狀態。

Zone-Y5 河段為連續的曲流河段，兩岸為河階地與谷壁，在河道轉折處同樣屬於埋積河段的寬谷，本河段僅於較下游側的第2個曲流河段有些微變化。2004年12月16日的衛星影像顯示當時僅有單一流路，且流幅相對寬闊。自2006年1月31日時可見分流流路，仍舊以靠南岸的主流流路為主，靠右岸的分流流路相對水量少很多。分流流路約維持1年的時間，自2008年12月11日起，右岸的分流流路則呈現出無水的乾河道狀態，其形態特徵仍可維持。到了2012年，從年初(1月28日)與年末(10月22日)的兩期影像則可看出原有的乾河道已然消失，且原有河道中附有植被的河中沙洲也消失，整個河床顯然有被大量的沉積物再堆積的現象，推測在2012年之間應曾經歷過大事件，但在事件發生前後，流路位置並無顯著之差異，且到2015年年底，本段流路亦維持在單一流路狀態，幾乎沒有變化。

綜合上述，本計畫經由判釋衛星影像與航照正射影像，分別找出桃山北溪1處、七家灣

溪 3 處與有勝溪 5 處，在歷年具顯著變遷之河段，以探討河道變遷與斷流現象之關聯性。根據判釋成果，桃山北溪與七家灣溪流路雖皆曾發生顯著的變遷，但並無發生明顯斷流的現象；而有勝溪則有數次的斷流事件，並僅發生在 Zone-Y1 處，且斷流的現象可以 2012 年中分為前後兩期，前期在有勝溪上游 Zone-Y1 的斷流河段較短；2012 年後期河道發生顯著的變遷，且發生相對連續、長延時的斷流現象，推論主要導因於埋積作用造成流幅加寬並形成曲流流路所致。

3.2. 水文條件與斷流之關係

本節將就有勝溪流域之標準化降雨指標(SPI)與流量等水文條件，尋找與有勝溪斷流之關係，企圖透過歸納降雨、流量等可測量與推估之因子作為判斷河川斷流之指標。七家灣溪及桃山北溪則因為斷流的事件相當有限，因此無特別討論。

3.2.1. 雨量與斷流之關係

本計畫計算出有勝溪自 1995 年 7 月至 2017 年 9 月之 SPI-1、SPI-3、SPI-6、SPI-9 及 SPI-12，並配合有勝溪之衛星影像與航空照片及現地調查，以判釋有勝溪斷流是否與該期間之 SPI 有關。從有勝溪之衛星影像顯示，斷流事件包含了 1999 年 4 月、2003 年 3 月、2011 年 6 月、2012 年 10 月、2013 年 1 月、3 月、7 月、8 月、12 月、2014 年 1 月、4 月、10 月、2015 年 1 月、3 月、4 月、12 月的有勝溪河段均有斷流之情形；另外，2016 年 7 月、8 月、9 月以及 2017 年 1 月至 9 月間進行現地調查均發現有勝溪河段有斷流之情形。對應各衛星影像之時間點上的 SPI-1 介於-2.38 至 1.8 之間，SPI-3 則介於-2.61 至 2.22 之間，SPI-6 介於-1.8 至 2.01 之間，SPI-9 介於-1.99 至 2.06 之間，及 SPI-12 介於-1.4 至 1.96 之間(表 3.1)，因此，由表 3.1 可得知，除 2013 年 1 月、2015 年 3 月、2016 年 9 月、12 月、2017 年 3 月、4 月、5 月及 6 月以外，總計 27 場斷流事件的月份中，共有 20 個月份之 SPI-1 皆小於 0，且以 SPI-1 與斷流事件的關係最好，表示短延時的乾旱即可能引發斷流，表示短期的氣候預測將有助於斷流的預測。

惟將歷年 SPI-1 與斷流與否之關係畫於圖 3.28，很明顯的可看出未斷流期間(圖 3.28 第 II、III 象限)有許多月份之 SPI-1 值小於 0 卻未見斷流之情形，與上述歸納之結論有明顯出入，就 SPI-1 小於 0 卻未斷流之月份來討論(圖 3.28 第 III 象限)，8 個 SPI-1 小於 0 但未斷流之事件均發生在 2012 年 10 月之前，配合有勝溪之衛星影像，顯示除 1999 年與 2003 年兩次偶發的短延時斷流事件外，在 2012 年 10 月以前均無發現較長延時的斷流情形，唯當時行水區接近直線狀，不若 2012 年以後的行水區已成彎曲狀，故斷流的發生不僅與雨量相關，可能也與河川走向的改變有關(詳見 3.1.3)；而 SPI-1 值大於 0 卻發生斷流事件(圖 3.28 第 I 象限)，均發生在 2012 年 10 月之後，亦證實了河段變遷對於斷流發生的影響。

3.2.2. 流量與斷流之關係

自所有蒐集的影像中，首張從航空照片判定有勝溪發生斷流之時間點為 1999 年 4 月 7 日之正射影像(圖 3.29)，該時間點有勝溪流為 0.230 cms；2003 年 3 月 11 日(圖 3.30)之航空照片顯示有勝溪發生斷流事件，該時間點流量為 0.020 cms；2012 年 8 月 14 日、10 月 22 日(圖 3.31)之正射影像與衛星影像顯示有勝溪發生斷流事件，惟該時間點有勝溪流量測站故障，無法取得該時間點之流量資料；2013 年 1 月 31 日、7 月 11 日、12 月 2 日、12 月 6 日(圖 3.32)之衛星影像顯示有勝溪發生斷流事件，該時間點流量為 0.486 cms、0.500 cms、0.405 cms、0.377 cms；2014 年 1 月 20 日、1 月 30 日、4 月 18 日、10 月 29 日(圖 3.33)之衛星影像顯示有勝溪呈現斷流，各時間點流量分別為 0.480 cms、0.258 cms、0.233 cms、0.531 cms；2015 年 1 月 24 日、3 月 18 日、4 月 15 日、12 月 13 日(圖 3.34)之衛星影像皆顯示有勝溪發生斷流事件，各時間點流量分別為 0.470、0.396、0.399、0.472 cms。因此依據上述各斷流時間點衛星影像與相對應流量之結果，可歸納出當下游有勝溪流量站量測之流量低於 0.531cms 時，有勝溪即可能發生斷流事件。

然而，透過搜尋 2012 年 10 月 22 日斷流時間點之衛星影像卻發現，在 2012 年 10 月 22 日以前，除了 2003 年 3 月 11 日、1999 年 4 月 7 日與 2011 年 6 月 18 日之流量低於 0.531 cms 且有發生斷流外，其餘時間點有勝溪流量雖低於 0.531 cms 時均未發生斷流之現象，例如：2011 年 1 月 1 日、6 月 18 日(圖 3.36)、2010 年 12 月 9 日(圖 3.37)、2009 年 12 月 13 日(圖 3.38)、2007 年 7 月 21 日(圖 3.40)之衛星影像均顯示有勝溪於曲流處未斷流，但該時間點流量分別為 0.234 cms、0.375 cms、0.479 cms、0.448 cms、0.230 cms。由此可見，低流量並非為有勝溪段流之主要因素之一，2012 年 10 月 22 日之後的衛星影像顯示有勝溪水流靠近山壁，呈現彎曲狀，流量低於 0.531 cms 即發生斷流；相較於 2012 年 7 月 2 日以前的水流走向趨於直線狀，即使於低流量仍未見斷流發生，故依上述所言，推論河道走向亦為有勝溪發生斷流之重要因素之一。

而七家灣溪過去現地調查發現曾於 2015 年 3 月 5 日(圖 3.46)曾出現斷流事件，該時間點七家灣溪站流量為 1.775 cms，的確處於相對低流量的位置，然而我們無法從七家灣溪有限的斷流資料中(僅一次)歸納出發生斷流之門檻。桃山北溪過去研究報告提到 2003 年 5 月 31 日至 6 月 4 日(圖 3.47)發生斷流事件，該時期七家灣溪流量站流量為 1.32 cms 至 1.27cms；從衛星影像顯示 2013 年 11 月 26 日、12 月 2 日、12 月 18 日、2015 年 3 月 18 日、4 月 15 日(圖 3.48、圖 3.46)為未發生斷流現象(最後兩次事件在重新審視後由去年報告書中的斷流改為未斷流)，該時間點流量分別是 2.857 cms、2.391 cms、10.82 cms、2.293 cms、2.625 cms 均顯示桃山北溪未發生斷流。雖然過去的研究中，已經說明了三號壩後土砂的堆積是造成北溪斷流的原因，但由於發生斷流的數量非常有限(報告書中 1 次斷流事件，自行觀測到 2 次)，因此難以推論桃山北溪斷流與七家灣溪站流量之關連性。

3.3. 斷流河段之觀測結果

本計畫於有勝溪、七家灣溪及桃山北溪潛在斷流處進行現地流量測量，以及利用設置於河道上之水溫及水位計蒐集時續性數據，監測有勝溪、七家灣溪及桃山北溪是否有發生斷流之潛勢與現象。

3.3.1 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 3.49 所示，而流量量測的結果列於表 3.2。2016 年 7 月 1 日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 年 8 月 10 日於有勝溪斷流處則觀測到斷流的現象，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 年 8 月 11 日下了一場累積約 25mm 的降雨，斷流的情形立即獲得了舒緩；2016 年 9 月 7 日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 年 11 月 9 日為梅姬颱風侵襲過後的第一次流量測，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，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。

由於梅姬颱風侵襲將本研究於有勝溪之觀測井摧毀，故於 2016 年 12 月 6 日於有勝溪河段進行第二次打井之作業，並於下游農地旁 Well D 處再新增一個流量觀測點 (Y-5)。2016 年 12 月 6 日於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.24 cms (Y-1)、0.07 cms (Y-2)、0.04 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)，在下游之農地旁增加至 0.13 cms (Y-5)；2017 年 1 月 19 日於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游之流量為 0.04 cms (Y-1)、惟下游 Y-2、Y-3 兩點已呈現斷流之情形，故實地測量之流量均為 0 cms，在伏流水匯入的下游處亦呈現斷流之情形，實測流量為 0 cms (Y-4)，至下游農場旁流量微幅上升至 0.015 cms (Y-5)，值得注意的是，現場發現 Y-5 之河水來源並非由地下水流出，主要是來自側向邊坡支流之匯入；2017 年 3 月 3 日於有勝溪斷流處量測之流量，測量之結果與同年 1 月 19 日類似，從曲流上游之流量為 0.04 cms (Y-1)、下游 Y-2、Y-3 兩點已呈現斷流之情形，故實地測量之流量均為 0 cms，並在伏流水匯入的下游處亦呈現斷流之情形，實測流量為 0 cms (Y-4)，至下游農場旁流量微幅上升至 0.005 cms (Y-5)，Y-5 之河水亦主要是來自側向邊坡支流之匯入；2017 年 4 月 13 日於有勝溪斷流處量測之流量亦與同年 1 月 19 日與 3 月 3 日類似，下游 Y-2、Y-3、Y-4 三點已呈現斷流之情形，故實地測量之流量均為 0 cms，惟儲存當日測量資料之筆記型電腦於下午淋雨受潮，資料已救不回來，故僅陳述當天觀測到之事實；2017 年 5 月 12 日於有勝溪斷流處量測之流量，

從曲流上游之流量為 0.15 cms (Y-1)，下游 Y-2、Y-3 兩點亦呈現斷流之情形，並在伏流水匯入的下游處亦呈現斷流之情形，實測流量為 0 cms (Y-4)，至下游農場旁流量微幅上升至 0.003 cms (Y-5)，水量主要從側向邊坡之流匯入；2017 年 6 月 26 日於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.28 cms (Y-1)、0.12 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 0.14cms(Y-4)，在下游之農地旁增加至 0.25 cms(Y-5)。河川斷流的情形似乎於梅姬颱風造成河床堆積後更加嚴重。2017 年 8 月 18 日於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.20 cms (Y-1)，而下游 Y-2、Y-3 則呈現斷流情形，並在伏流水匯入的下游處增加至 0.03 cms(Y-4)，在下游之農地旁增加至 0.086 cms(Y-5)。2017 年 10 月 27 日於有勝溪斷流處量測之流量，從曲流上游到下游分別是 0.37 cms(Y-1)、0.096 cms (Y-2)，且在 Well B2 附近發生河流改道情況，而在伏流水匯入的下游處增加至 0.20 cms (Y-4)，在下游之農地旁為 0.33 cms (Y-5)。

3.3.2 七家灣溪斷流處流量變化

七家灣溪之流量觀測的位置如圖 3.49 左下所示，而流量量測的結果列於表 3.3。2016 年 9 月 8 日的量測結果顯示，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 年 11 月 10 日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；2016 年 12 月 5 日之流量量測結果，從上游的 0.79 cms (C-1) 至下游的 0.63 cms(C-2)有稍微降低的現象；2017 年 1 月 19 日之流量量測結果，從上游的 0.40 cms(C-1) 至下游的 0.31 cms (C-2) 有稍微降低的現象；2017 年 3 月 3 日之流量量測結果，從上游的 0.23 cms (C-1) 至下游的 0.09 cms (C-2)，顯示河川流量有明顯降低之現象，推測與乾季降雨減少導致大部分河水入滲與河川分流之影響；2017 年 4 月 13 日亦前往樣區進行流量測量，惟儲存當日測量資料之筆記型電腦於下午淋雨受潮，資料已救不回來；2017 年 5 月 12 日之流量量測結果，從上游的 3.98 cms (C-1) 至下游的 2.79 cms (C-2)，河川流量亦有稍微降低之現象；2017 年 6 月 26 日之流量量測結果，上游因流量過大而不便於量測，至下游為 4.57 cms (C-2)；2017 年 8 月 18 日之流量量測結果，從上游的 1.34 cms (C-1) 至下游的 1.97 cms (C-2) 有稍微降低的現象；2017 年 10 月 27 日在前往該樣區途中，受車輛長時間阻擋於主要通道而不便量測，故該時間點無觀測資料。

3.3.3 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 3.49 右下所示，而流量量測的結果列於表 3.4。2016 年 7 月 15 日於桃山北溪斷流處量測之流量，從上游的 0.46 cms (T-2) 到下游的 0.35 cms(T-3) 呈現些微降低的趨勢；2016 年 9 月 8 日則從上游的 0.19 cms(T-2) 到下游的 0.18 cms (T-3)；2016 年 11 月 10 日則從上游的 0.46 cms (T-2) 稍微降低到下游的 0.33cms(T-3)；2016 年 12 月 5 日則從上游的 0.12 cms(T-2)到下游的 0.10cms(T-3)，流量大致呈現一致；2017 年 1 月 19 日則從上游的 0.05 cms(T-2)到下游的 0.08cms(T-3)，流量亦大致呈現一致；2017 年 3 月 3 日桃山北溪上游之實測流量為 0.004 cms (T-2)，至

下游已成斷流之情形，故實測流量為 0 cms (T-3)；2017 年 4 月 13 日桃山北溪下游之實測流量為 0.46 cms (T-3)，未呈現斷流之情形，惟上游之實測流量資料受到筆記型電腦於淋雨受潮之影響，資料已救不回來，故僅陳述現場觀察之事實；2017 年 5 月 12 日則從上游的 0.75 cms(T-2)，至下游流量降低為 0.52 cms(T-3)；2017 年 6 月 26 日則從上游為 1.62 cms (T-2)到下游為 1.10 cms (T-3)；2017 年 8 月 18 日則上游的 0.42 cms(T-2)降至下游的 0.29 cms(T-3)；2017 年 10 月 27 日自上游為 0.20 cms(T-2)至下游為 0.20 cms(T-3)。2017 年 10 月 27 日自上游為 0.20 cms(T-2)至下游為 0.20 cms(T-3)。

3.3.4 七家灣溪及桃山北溪之水溫及水位觀測

本計畫於桃山北溪設置兩處水溫及水位觀測站，分別為 T1 及 T2(圖 3.49 右下)，自 2016 年 8 月 18 日開始觀測至 2017 年 6 月 14 日之結果顯示於圖 3.50，圖 3.50 中，T1 之水溫變化(紅線)相較於氣溫(灰線)較為穩定，介於 10 度至 20 度之間，單日變化量甚至低於 5 度；反觀 T2 之水溫變化，自 2017 年 1 月至 4 月變化劇烈，且幾乎與氣溫同步，由此可推論開時間點桃山北溪發生斷流之情形，原本置於水中之水溫計因受到桃山北溪斷流而暴露於空氣中，陽光曝曬的情況下甚至高於氣溫之數值，於 T1 之水位亦顯示 2017 年 1 到 3 月皆屬於低流量之時期，呼應下游 T2 斷流之發生。T2 之溫度量測自 2017 年 5 月 12 日之後遺失，因受到 2017 年 5 月中旬之豪雨影響，導致設置於 T2 之水溫計被沖走。

本研究團隊於七家灣溪亦設置兩處水溫及水位之觀測站，分別為 C1 及 C2(圖 3.51 左下)，相較於桃山北溪，七家灣溪之水溫及水位時序資料則未顯示該河段有發生斷流之情形(圖 3.51)，圖 3.51 中顯示，C1 及 C2 水溫之時序變化(紅線)相較於大氣溫度(灰線)變化較為穩定，數值均介於 5 度至 15 度之間，表示水溫計測量到之數值均為河水之水溫而非氣溫，證明了七家灣溪於研究期間未有斷流發生之情形，2017 年 3 月 3 日於 C2 測量之流量僅有 0.09 cms，且由水位觀測顯示該時期的確屬於低水位(圖 3.51 藍線)，但不至於斷流，惟 C1 及 C2 時序溫度測量自 2017 年 4 月 13 日後之資料因水溫計因遺失而導致監測中斷。

3.4 河床-河水之交互作用

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(hydrograph)、溫度歷線圖(thermograph)及溫度剖面(temperature-depth profile)，用以探討地下水流向、河川與河床間之交互作用，分析河水與地下水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。截至撰寫期末報告為止，監測資料長達將近 10 個月(2016 年 12 月 5 日-2017 年 10 月 19 日)，監測資料中出現不連續的情形主要導致於颱風來襲前，本團隊前往現地將監測儀器取回，待颱風過後，再逕行前往現地將監測儀器重新裝設(無資料時間：2017 年 7 月 28 日-2017 年 8 月 9 日及 2017 年 9 月 12 日-2017 年 9 月 19 日)。颱風期間，由於大量地降雨，暴漲的溪水導致大部分的 1 吋井毀損，加上受到 2017 年 10 月 12-14 日期間的滯留鋒面影響，在台灣北部、東北部降下驚人的雨量，有勝溪溪水暴漲，所有 1 吋井幾乎毀損，目前僅剩下 2 吋井仍持續監測當中。由上至下游 A1、B1、C1 及 D1 觀測井之地下水位及河川水位歷線圖如圖 3.52 - 3.55 所示，

雖然所有監測資料皆呈現於圖中，然而期中報告已針對 2017 年 4 月 24 日以前的觀測資料進行說明與分析，因此將不再於期末報告中進行贅述，僅針對期中報告之後的新增觀測資料進行說明與分析。

3.4.1 河水—地下水水位變化

首先，圖 3.52 為 well A1 井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：2017 年 6 月 2 日在中央氣象局所記錄的資料中顯示有降雨事件的發生，而在此同時河川水位與地下水位皆有明顯的上升紀錄，上升幅度約為 50 cm。而後 2017 年 6 月 3 日、7 月 2 日、8 月 27 日、10 月 13 日再度發生間歇性的降雨，河川水位與地下水位皆有相對應的上升現象，但上升幅度並非完全與降雨事件強度成正比，且並非每一次之降雨皆會反應至地下水及河水水位上，此現象可能與區域性降雨分佈有關，由於本研究選用的雨量站為思源站，測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。自 2017 年 4 月 28 日，由於缺乏連續性的強降雨事件，河川水位與地下水位皆呈現持續下降的趨勢，時間長達 15 天，直到 2017 年 5 月 17 日為止，在此期間河川水位下降約 5cm，而地下水位下降幅度遠大於河川水位下降幅度，高達 20cm。2017 年 10 月 13 日，因單日雨量高達 264.5mm 的暴雨，溪水暴漲，地下水位與地表水位急遽升高，資料顯示地下水位一度高過河床高程。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。受到颱風強降雨的影響，本團隊於 8 月 9 日前往現地重新安裝儀器時，觀察到河道及地貌明顯改變，以監測井為參考高程進行量測發現，河道兩側地表堆高了將近 45cm。2017 年 4 月 23 日–2017 年 10 月 13 日的監測時間內，河川水位皆高於地下水位，差距約介於 20–30 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 3.53 為 well B1 井的河川與地下水水位歷線圖。在河川水位方面，自 2017 年 4 月 23 日，河川水位幾乎呈現一穩定的情形，此現象即表示河道處於乾涸的狀態，即使在零星降雨事件發生時，由於降雨量相對較小，對於河川流量幾乎沒有影響，河道持續呈現乾涸的狀態。而在在強降雨事件發生時，well B1 井才開始有河床水位的變化，河道短暫的復流，例如：2017 年 5 月 16 日、2017 年 5 月 19 日、2017 年 5 月 29 日、2017 年 6 月 2 日、2017 年 6 月 14 日及 2017 年 10 月 13 日。在地下水方面，地下水位對於降雨事件有著良好的反應，監測期間內的降雨事件，如 2017 年 4 月 28 日、5 月 17 日、5 月 20 日、6 月 2 日、6 月 4 日、7 月 23 日、8 月 28 日、9 月 21 日、10 月 9 日、10 月 13 日，可觀測到地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。在 2017 年 4 月 28 日–2017 年 5 月 17 日的監測時間內，因為 well B1 井的上、下游鄰近河道幾乎處於乾涸的狀態，地下水位呈現快速下降的情形，河床高程與地下水位差最大可達到 357 cm。當降雨事件發生時，地下水位快速上升，上升幅度與降雨強度呈現正相關，河床高程與地下水位間的差距也快速縮減。在監測期間內，由於地下水位持續的低於河床高程，當河道處於有水的情形時，河川的水將往下入滲補至河床中。將 well A1 井與 well B1 井的水位變化進行比較發現，兩者間的變化趨勢極為不同，強降雨事件對於 well A1 所造成的河川水位與地下水水位變化相較於 well B1 來得小。由於此段河道亦是河川的水往下入滲補至河床中，當發生斷流時，地下水因為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，由於河床主要是由顆粒較大的礫石所組成，因此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。此外，在斷流發生時期，但地下水位有多次與降雨事件無關之大幅度上升，在缺乏河水補注的前提下，區域（或深層）地下水流對於 well B1 井的縱向（來自上游地下含水層）與側向（源自河道兩側山邊）補注亦為造成地下水位快速上升的可能原因之一。2017 年 10 月 12 – 14 日期間的強降雨事件，導致 well B1 河道重新復流，截至期末報告撰寫之前，尚未發生斷流的情形。本團隊於 2017 年 4 月 23 日、7 月 28 日、9 月 12 日至現地收取資料或回收儀器時，皆觀察到 well B1 井附近河道乾涸的情形，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。well B1 井所觀測到的水位變化情形與前一年度中游井所觀測到的水位變化非常一致，由於資料的再現性，也更進一步佐證上述的分析與推論。

圖 3.54 為 well C1 井的河川與地下水水位歷線圖。在河川水位方面，自 2017 年 4 月 23 日，河川水位幾乎呈現一穩定的情形，與 well B1 井的情形相同，河道處於乾涸的狀態，即使在零星降雨事件發生時，對於河川流量幾乎沒有影響，河道在大部分時間處於乾涸的狀態。2017 年 9 月 20 日至 10 月 20 日之間無河川水位資料，主要是因本團隊於 10 月 20 日前往現地收取資料時，河水水位過深，水流速度過快，同時監測井受到大雨沖刷而來的樹枝藤蔓所纏附，在考量團隊人員的安全之下，並未冒險涉水進行資料收集，故此段時間資料欠缺。well C1 與 well B1 對於降雨強度的反應相當一致，井鄰近之河道僅在強降雨事件發生時，才有水位的變化，河道短暫的復流，例如：2017 年 6 月 2 日及 2017 年 8 月 27 日。在地下水方面，地下水位對於降雨事件有著良好的反應，監測期間內的降雨事件，如 2017 年 4 月 28 日、2017 年 5 月 17 日、2017 年 5 月 20 日、2017 年 6 月 2 日、2017 年 6 月 14 日、2017 年 7 月 24 日、2017 年 8 月 27 日、2017 年 10 月 14 日，可觀測到地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。在 2016 年 4 月 23 日–2017 年 10 月 19 日的監測時間內，因為 well C1 井的上、下游鄰近河道幾乎處於乾涸的狀態，地下水位呈現快速下降的情形，河床高程與地下水位差最大可達到 233 cm。當降雨事件發生時，地下水位快速上升，上升幅度與降雨強度不一定呈現正相關，河床高程與地下水位間的差距快速縮減，在 2017 年 6 月 2 日及 2017 年 6 月 4 日兩次強降雨事件後，河川水位與地下水位間之差距最小，分別僅有 32 及 21 cm。在監測期間內，由於地下水位持續的低於河床高程，當河道處於有水的情形時，河川的水將往下入滲補至河床中。well C1 井的水位變化趨與 well B1 井的趨勢相當一致，但與 well A1 井則極為不同，強降雨事件對於 well C1 所造成的河川水位與地下水水位變化相較於 well A1 來得大。進一步分析發現，在 4 月 27 日、5 月 17 日、5 月 21 日、7 月 24 日的強降雨事件所導致河川復流時，在河床表面與淺部河床間皆疑似有非飽和層（unsaturated zone）的形成，形成流失不連通河（losing disconnected stream）的系統。本研究團隊於現地進行工作時，皆有觀察到 well C1 觀測井附近，甚至更下游地區有河道乾涸的情形。2017 年 10 月 12 – 14 日期間的強降雨事件，導致 well C1 河道重新復流，截至期末報告撰寫之前，尚未發生斷流的情形。對照圖 3.53 及圖 3.54 可觀察出，well B1 與 well C1 所處河道在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地下水向深部含水層入滲速率（percolation rate）的條件下，使得地下水位快速且大幅度的上升，入滲的河水將非飽和層孔隙填滿，使得河道恢復有水的狀態。

圖 3.55 為 well D1 的河川與地下水水位歷線圖。在河川水位方面，自 2017 年 4 月 23 日，

河川水位幾乎呈現一穩定的情形，與 well B1 及 well C1 井的情形相同。然而，在規劃鑽設監測井時，考量現地環境，井所在位置並非於河道的正中央，而是較靠近河的右岸，位於相對較高的高程，而此情形將導致河川在低流量時將無法真實反應在河川水位的量測資料上。本研究團隊在多次現地工作時，實際勘驗河道狀況後發現，河道中依然是有水的狀態，河道中的河川水位略低於 mini diver 水位-溫度計裝設高度，雖然河川水位資料顯示河道處於乾涸的狀態，但與事實有所差異。若進一步觀察河川水位資料可以發現，河川水位並非一穩定值，呈現不規則的起伏變化，此現象也間接說明河道中是處於有水的狀態。well D1 井鄰近之河道僅在連續性降雨或強降雨事件發生時，才有顯著的水位變化，例如：2017 年 6 月 2 日及 10 月 13 日，其餘時期則呈現穩定的水位。在地下水方面，地下水位對於降雨事件依然有著良好的反應，監測期間內的降雨事件，如 2017 年 4 月 27 日、2017 年 5 月 18 日、6 月 2 日、6 月 3 日、7 月 2 日、8 月 27 日、10 月 13 日，可觀測到地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。然而，地下水位與河川水位間之高低關係則與其餘的井呈現截然不同的情形，在 2017 年 4 月 23 日-2017 年 5 月 20 日期間，地下水位明顯的低於河川水位，隨著地下水位的逐漸上升，自 2017 年 5 月 29 日起，地下水位開始明顯的高於河川水位，在 2017 年 6 月 2 日強降雨事件過後達到最高值。此後，地下水位高度皆高於河川水位高度，在 2017 年 9 月 24 日-2017 年 10 月 4 日期間，地下水位有短時間的低於河川水位，爾後，又恢復成地下水位高度皆高於河川水位高度的狀態。此外，本研究團隊在現地以手動式水位計 (electric tape) 針對 well D1 井進行人工水位量測，量測結果驗證，地下水水位明顯的高於河川水水位。Well D1 河道的河川水位與地下水位間之關係，並非如 well A1-C1 井一樣呈現河水持續向下補注地下水的情形，隨著降雨量的多寡，兩者間之關係也隨之改變。當有勝溪處於高流量時期 (高河川水位或無斷流發生)，地下水位亦處於高水位的狀態，地下水位向上補注至河川；當有勝溪處於低流量時期 (低河川水位，甚至斷流發生)，地下水位處於低水位的狀態，河川水則向下補注至地下水。地下水流出地表水的情況為首次於有勝溪觀測到，而隨著季節性降雨的變化，有勝溪下游河段的河水與地下水交互關係也將隨時改變，往 well D1 更下游的河段是否依然有類似的情形，則需要更多的資料予以佐證。

經由水位計的長期水位監測資料及現地的實際現勘，綜合分析結果可初步建立監測河段內有勝溪的一維河水與地下水交互作用情形及水文循環概念模型。well A1-well C1 區間，不論在豐、枯水期間，皆屬於河川水向下補注至地下水的區段，well B1 井及 well C1 井之間的河道發生乾涸時，地下水的來源主要由區域深部的含水層或側向的深層地下水流出；至於 well D1 鄰近的河道，在豐水時，屬於地下水向上補注河川水的區段，而地下水開始向上補注的地點應該位於 well C1 井及 well D1 井之間，在枯水時，well D1 鄰近的河道則轉變為河川水向下補注地下水，至於 well D1 更下游的河道，其河水與地下水間之交互關係則需要更多的資料才能予以分析佐證。

由於 well A1-well D1 僅能獲得垂直方向上一維的水流資訊，藉由本計畫在 B 剖面垂直於河道水流方向所裝設的監測井群 (共 4 口井)，經由井群的地下水位資料分析，可進一步獲得地下水流的側向補注資訊 (二維地下水流向)。圖 3.56 為 well B1-well B4 的地下水水位歷線圖，由於各口井的所在高程不同，已經透過精準的地表高程量測資料進行校正 (委託文化大學團隊於完井後進行現地井頂絕對高程測量工作)，所有的水位資料皆在同一個參考高程中進

行比較，因此，圖中的地下水位為總水頭（hydraulic head or total head）。首先，B 剖面井群的地下水位變化非常一致，對於降雨事件皆有著良好的反應，監測期間內的強降雨事件，如 2017 年 4 月 27 日、5 月 20 日、6 月 2 日、8 月 27 日、10 月 13 日，可觀測到地下水位伴隨著降雨而快速上升的情形。比較 B 剖面井群的地下水位後發現，well B4 有最高的地下水位，其次為 well B3 及 well B2，而 well B1 的地下水位是所有井群中最低的。經由地下水位的相對高低研判，B 剖面的地下水流向主要是由 well B4 流向 well B1 及 well B2 流向 well B1，地下水的流向大致與地形相符，由兩側的山邊流向地勢較低的有勝溪河谷。經由地下水流向的結果，驗證了斷流發生時期，在缺乏河水向下補注的情形下，well B1 井地下水位依然受到降雨的影響，而地下水的補注來源除了來自上游的地下含水層外，山邊的側向補注應該佔有一定的比例。well C1 與 well D1 的地下水位變化趨勢與 well B1 非常一致，雖然在此兩剖面並未有監測井的裝設，但可以合理的研判此兩區段間的山邊側向補注提供了一定比例的地下水流出來源。颱風過後，於 2017 年 9 月 19 日將儀器重新設置於監測井中，量測結果發現，well B2 的地下水位些微的低於 well B1 的水位，且為剖面中最低。well B1 與 well B2 間的相對高低變化反轉，經由手動式水位計的現地量測校正之後，排除儀器誤差或重新設置水位計所造成。經由現勘之後觀察到，原本流經 well B1 的河水，受到颱風的影響而改道，改為流經 well B2，地下水受到河水改道之影響，也間接影響其流向。此外，在 2017 年 4 月 24 日–2017 年 10 月 19 日的監測時間內，地下水位的相對高低變化均相當一致，well B3 與 well B4 的水位相近，而 well B1 與 well B2 的水位則較為接近，而 well B3/B4 與 well B1/B2 間的水位則有一顯著的差異，然而在 2017 年 8 月 27 日的降雨事件之後，兩者間的差異顯著的變小，尤其在強降雨事件發生時，四口井的地下水位快速上升並趨於相同，在降雨事件發生過後，地下水位間的差異才再度出現。

3.4.2 河水—地下水溫度變化

由上至下游 A1、B1、C1 及 D1 二吋觀測井之河川及地下水溫歷線圖如圖 3.57–3.60 所示。如同水位歷線圖，所有監測資料皆呈現於圖中，然而期中報告已針對 2017 年 4 月 24 日以前的觀測資料進行說明與分析，因此將不再於期末報告中進行贅述，僅針對期中報告之後的新增觀測資料進行說明與分析。圖 3.57 為 well A1 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 33–6°C 之間，而河水與地下水溫的變化範圍較為相近，河水溫度介於 9–31°C 之間，日平均溫度為 15±2°C，地下水溫度介於 10–17°C 之間，日平均溫度為 14±1°C。河水的日夜溫差約 3–5°C，而地下水的日夜溫差僅約 1–2°C。2017 年 9 月 19 日–2017 年 10 月 19 日的監測時間內，河水溫度變化加劇，主要受到颱風的影響，河道與地形有所改變，井管位置已不再位於河道中央，裝設於河床表面的水位計裸露於地表，導致所量測到的溫度為大氣溫度，而並非河川水溫。河水與地下水的最高（或最低）溫在時間上的延遲約 2 小時。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 well A1 地區河道的河水主要向下補注至河床地下水，兩者溫度的高低峰值僅有 2 小時的延遲，表示河水向下補注的速率快速，上述推論與前一小節河川與地下水位觀測資料之分析吻合。

圖 3.58 為 well B1 的河川與地下水溫度歷線圖，well B1 的溫度歷線與 well A1 顯著不同，圖中可以觀察到氣溫與河水溫度呈現規律的週期日夜變化，河水溫度的變化範圍介於 5–47°C 之間，日平均溫度為 $18\pm 7^\circ\text{C}$ ，由於河床乾涸，發生斷流，導致溫度計 (mini diver) 裸露於河床上，受到太陽直接照射，所量測到的溫度變化範圍甚至大於氣溫的變化。然而，地下水溫度則無週期的日夜變化，呈現一較為衡定的溫度，介於 11–17°C 之間，平均溫度為 $14\pm 1^\circ\text{C}$ 。由於在監測期間河川幾乎呈現斷流的情形，在缺乏由上往下補注的水源之下，地表的熱能無法透過向下快速補注的河水傳遞至地下水，其溫度變化僅受到太陽輻射的熱能以熱傳導的方式透過河床傳遞，以及上游地下含水層與山邊側向補注的地下水以熱對流的方式傳遞所影響，因此地下水溫度維持一相對較為恆定的情形。在溫度歷線圖中，較值得關注的溫度變化型態改變發生於 2017 年 6 月 13 日–6 月 21 日及 2017 年 10 月 13 日–10 月 16 日兩個期間，河川水溫的變化範圍大幅縮小，與地下水溫間的溫差由 20°C 減少至 2°C，且與氣溫的變化範圍不同，此現象主要是因為乾涸的河道在強降雨的影響之下，河道在短時間內有水流的產生，溫度計 (mini-diver) 從原先裸露於河床上的狀態轉變成浸泡於河水之中，其所紀錄到的溫度從氣溫轉變為河水溫度。在這兩個期間，地下水的溫度變化範圍則未有大幅度的改變，此結果顯示，在河床深度 375 cm 的位置 (Level Troll 400 安裝於河床深度 375 cm)，其地下水溫並未受到向下入滲的河川水而產生溫度變化，也間接暗示自河床表面至某特性深度 (深度 375 cm 以上) 之間，其間孔隙仍處於未飽和的狀態，強降雨事件所帶來的河川流量尚不足以填充此深度區間的孔隙，因此地表的熱能在向下傳遞的過程中，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。位於深度 375 cm 的地下水，因與河床表面之距離甚遠，熱傳導的效應無法或僅有少部分傳遞至此深度，而此深度的地下水來源主要來自於上游地下含水層或兩側山邊的地下水流出，因此使得地下水溫度呈現一近似恆溫的狀態。

圖 3.59 為 well C1 的河川與地下水溫度歷線圖，如同水位歷線圖，2017 年 9 月 20 日至 10 月 20 日之間無溫度資料，主要是因本團隊於 10 月 20 日前往現地收取資料時，河水水位過深，水流速度過快，在考量團隊人員的安全之下，並未冒險涉水進行資料收集，故此段時間資料欠缺。well C1 的溫度歷線圖與 well B1 非常相似，除了可觀察到氣溫與河水的溫度呈現規律的週期日夜變化之外，在斷流發生後 (2017 年 4 月 24 日到 5 月 17 日、7 月 18 日到 7 月 28 日、8 月 15 日到 9 月 13 日)，由於河道乾涸所造成的水位計裸露，使得河水溫度的變化範圍大幅增加之外，河川水的最高溫甚至高於氣溫的最高溫，河川水溫變化介於 5–45°C 之間，日平均溫度為 $16\pm 4^\circ\text{C}$ 。地下水溫度則依然無週期的日夜變化，呈現一較為恆定的溫度，介於 12–16°C 之間，平均溫度為 $14\pm 1^\circ\text{C}$ 。在 2017 年 5 月 18 日–7 月 17 日期間，依然可觀察到與 well B1 相似的溫度變化情形，乾涸的河道在強降雨事件發生過後，河川水溫的變化範圍顯著變小，呈現與氣溫變化範圍不同的情形；地下水的溫度變化範圍亦無大幅度的改變，呈現一近似恆溫的狀態，河床表面至某特性深度 (深度 375 cm 以上) 之間，其間孔隙仍處於未飽和的狀態，地表的熱能僅能以熱傳導的方式向下傳遞，而地下水的補注依然源自於上游地下含水層或兩側山邊的地下水流出。

圖 3.60 為 well D1 井的河川與地下水溫度歷線圖，其溫度歷線圖與 well A1–well C1 井有著顯著的差異。在河水溫度方面，溫度變化介於 7–34°C 之間，日平均溫度約為 $15\pm 2^\circ\text{C}$ 。2017 年 4 月 29 日–5 月 17 日期間，河水溫度呈現大幅度的規律周期日夜變化，此現象與 well A1

所觀測到的情形相似，由於河川流量逐漸減少，河道有水的寬度亦逐漸變窄，雖然河道依然處於有水的狀態，卻導致裝設於較靠近河岸邊的 well D1 井的河水溫度計逐漸裸露於河床面上，隨著監測位置的河水深度逐漸降低，其所紀錄到的溫度變化範圍也隨之變大，導致所紀錄到的溫度變化也與氣溫變化幅度趨於一致。在地下水溫度方面，大致呈現一近似恆溫的狀態，不受地表溫度日夜周期變化所影響，僅在 2017 年 9 月 26 日–10 月 5 日期間呈現小幅度的日夜周期性變化。監測期間，地下水的溫度顯著的低於河川水溫，由於河道始終處於有水的狀態，因此可以研判此段河道的水流是由地下水向上補注河水。為驗證透過溫度歷線圖對於水流方向判斷之正確性，針對河水與地下水位資料進行檢視發現，監測期間，大部分時間地下水位皆明顯高於河川水位（圖 3.55），顯示水流方向是由地下水向上補注至河川，也驗證了上述的分析結果。在 2017 年 9 月 26 日–2017 年 10 月 5 日及期間，地下水溫度呈現小幅度的規律週期日夜變化，此現象主要是由於地下水位持續的降低，河川水位明顯高於地下水位（圖 3.55），水流方向轉為河水向下補注至地下水，河水將地表之熱能向下傳遞至地下水中，導致地下水溫度呈現日夜週期性變化。

綜合 well A1–well D1 的河水與地下水溫度歷線圖分析得知，河水與地下水間之交互方式除了可以透過水位資料進行分析之外，經由分析河水與地下水間的溫度差異，可判斷河水與地下水間的相互補注關係，藉由溫度型態的改變，亦可同時掌握河川斷流現象的發生與否，再度展現以熱能作為河水與地下水交互作用試蹤劑之可行性。

3.4.3 河水—地下水溫度剖面變化

由上至下游 A1、B1、C1 及 D1 一吋觀測井之河川及不同深度的地下水溫歷線圖如圖 3.61–3.64 所示。如同溫度歷線圖，僅針對期中報告之後的新增觀測資料進行說明與分析。監測資料中出現不連續的情形主要導致於颱風來襲，本團隊前往現地將監測儀器取回，待颱風過後，再逕行前往現地將監測儀器重新裝設（無資料時間：2017 年 7 月 28 日–2017 年 8 月 9 日及 2017 年 9 月 12 日–2017 年 9 月 19 日）。2017 年 8 月 9 日以後，颱風已將大部分的 1 吋井管損毀（well A1、well C1、well D1），故 8 月 9 日以後無一吋井管不同深度的地下水溫資料。圖 3.61 為 well A1 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，觀察溫度歷線圖可以發現，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，隨著深度的增加，溫度變化範圍逐漸減小，兩者間的最高溫差約 3°C ，時間上的延遲約 30 分鐘。若進一步細看各深度水溫的變化情形可以發現，深度 20、50、100、175 cm 的地下水溫變化與深度 275、390 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上的延遲。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 175–275 cm 之間可能存在一介面，分隔淺部（20–175 cm）與深部（275–390 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，熱能傳遞的速度亦不相同。

圖 3.62 為 well B1 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，由於河道在 2017 年 4 月 28 日到 2017 年 5 月 16 日呈現乾涸的情形，在缺乏河水補注的狀態下，地下水位快速下降，在河床表面與深部河床間形成了未飽和層。由於地表熱能僅能透過熱傳導進行傳遞，因此，水溫資

料在越接近河床表面，受到氣溫之影響越劇烈，其溫度變化幅度也越大，例如：20 cm 深度的地下水溫度；隨著深度的增加，熱傳導的效應逐漸遞減，分離出來的水溫變化幅度也逐漸減小。深度 175、275 及 390 cm 之水溫不僅重合，且呈現一恆溫的情形。2017 年 5 月 16 日–2017 年 5 月 17 日、2017 年 5 月 29 日–2017 年 6 月 26 日，河道曾因強降雨短暫復流，此時所有深度的溫度變化趨勢與範圍因受到復流河水的快速入滲，將地表的熱能帶往地下，導致河水水溫與所有深度的溫度變化趨勢呈現一規律的日夜周期變化。2017 年 6 月 26 日後，河道再度呈現乾涸的狀態，不同深度的地下水溫度歷線從原本的規律日夜週期變化，隨著地下水水位面的降低，逐漸分離出來，首先是深度 20 cm 的水溫資料，其次為深度 50 cm，最後為深度 100 cm，而深度 175、275 及 390 cm 之水溫資料則依然重合在一起。2017 年 9 月 20 日之後，地下水溫隨著不深度的不同而呈現些微的差異，2017 年 10 月 12–14 日期間的強降雨事件，快速向下入滲的河水再次使得不同深度的地下水水溫疊合在一起。此時進一步檢視斷流發生前的水溫資料（水溫資料疊合的期間），不同深度的水溫變化差異分界位於深度 275–390 cm 之間，相較於 well A1 的 175–275 cm 深，若兩者的不連續介面在空間上具有連續性，隨著河道下游地勢的降低，不連續介面往下游方向逐漸加深為一合理的情形。

圖 3.63 為 well C1 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，well C1 井不同深度之地下水溫變化與 well B1 之水溫變化趨勢相似。在斷流發生後，隨著地下水位的快速下降，地表的熱能僅能透過熱傳導的方式傳遞，不同深度的水溫亦有逐漸分離的現象，且分離的時間與地下水水位變化有關，而分離深度僅達 175 cm。當連續性的強降雨導致河水復流時，水溫變化趨勢也與 well B1 相似，因受到復流河水的向下快速入滲，地表的熱能向下傳遞，導致河水水溫與所有深度的地下水溫度重合，且變化趨勢呈現一規律的日夜周期變化。進一步檢視斷流發生前的水溫資料，並無發現不同深度水溫度間之變化差異，此結果表示河床沈積物在組成上非常一致，經由 well A1 及 well B1 溫度資料所推測的不連續介面可能位於更深的位置。

圖 3.64 為 well D1 1 吋井不同深度的地下水溫度歷線圖，well D1 井不同深度之地下水溫變化與其他井之水溫變化趨勢明顯有所不同，整體而言，所有深度的水溫幾乎呈現一穩定狀態，並不隨著氣溫或河川水溫的週期性的日夜變化而改變，且所有水溫重合在一起，溫度相同，在地下水溫假設近似恆定狀態的前提之下，此現象乃與地下水向上補注河川有關，檢視地下水與河川水位歷線圖可以得知，在水溫恆定的期間，地下水位明顯高於河川水位，因此驗證了上述之分析結果。自 2017 年 5 月 1 日開始，深度 20 cm 的地下水溫開始呈現日夜周期變化，且逐漸向下開始發展，在 2017 年 5 月 5 日之後，深度 390 cm 的地下水溫的日夜週期變化已達到深度 390 cm，日夜週期變化的幅度隨著深度的增加逐漸變小，此現象與 well A1 井所觀察到的情形一致。水溫變化型態由恆定狀態轉為日夜週期性的變化，應該與地下水與河水間的水流方向改變有關，若水流方向逐漸轉為由上往下，受氣溫所影響的河水水溫將以熱對流的方式將熱往下傳遞，熱能在往深部傳遞的過程中，日夜週期性變化的地下水溫也逐漸往深部發展。透過檢視地下水與河川水位歷線圖，此段時期的河川水位明顯的高於地下水位，因此，上述水溫變化型態改變的分析再次獲得驗證。2017 年 5 月 17 日過後，由於地下水位再度高過河川水位，此時地下水溫變化再度呈現一穩定狀態。well D1 井為所有監測井之中最為特殊的一口井，不論在水位或溫度歷線圖中，皆可明顯的觀察到，河水與地下水間的交互作用隨著時間改變，而其他監測井則無此現象。

將 1 吋井中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，即可構成溫度隨深度變化剖面圖 (temperature-depth profile)，一天之內可繪製出 12 條曲線，所有曲線的組成稱之為溫度包絡線 (temperature envelope)。為探討各口監測井在地表熱能傳遞上隨時間的變化及差異，在監測期間內挑選 4 個不同的時間進行溫度包絡線的繪製，圖 3.65–3.68 分別為 well A1–well D1 在 2017 年 4 月 25 日 0:00–22:00、2017 年 5 月 6 日 0:00–22:00、2017 年 5 月 15 日 0:00–22:00、2017 年 6 月 2 日 0:00–22:00 的溫度包絡線。圖 3.65 為 well A1 井所呈現的溫度包絡線隨時間的變化，由圖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，地表熱能以熱對流的方式所能傳遞到的深度稱之為阻尼振盪深度 (damped oscillation depth)，阻尼振盪深度以上的水溫會受到氣溫或河川水溫的影響產生週期性的規律變化，變化幅度隨著深度的增加而遞減。當河水向下補注的地下水時，隨著河川水位與地下水位的逐漸下降，阻尼振盪深度隨著時間有逐漸變淺的趨勢，當河水快速補注地下水時 (圖 3.65a)，在監測深度內只能些微的辨識阻尼振盪的深度，包絡線幾乎呈現一直線；隨著補注速率的降低 (圖 3.65b 與圖 3.65c)，阻尼振盪深度逐漸明顯，深度約在 175 cm，包絡線呈現上寬下窄的型態。當強降雨事件發生過後 (圖 3.65d)，河水再度快速的補注地下水，阻尼振盪深度逐漸消失，包絡線再度呈現一直線的型態，因受到降雨影響，氣溫的日夜變化並不顯著，因此河川水溫的變化亦不顯著，然而呈一直線的溫度包絡線依然清晰可見，阻尼振盪深度不易辨識。

圖 3.66 中為 well B1 井所呈現的溫度包絡線隨時間的變化，自 2017 年 4 月 23 日至 6 月 26 日期間，由於埋設於深度 50cm 的溫度計發生異常，資料缺失，故無資料呈現於圖中。Well B1 的溫度包絡線隨時間的變化與 well A1 井有顯著的差異，當河道乾涸、斷流發生時 (圖 3.66a–c)，包絡線在深度 50 cm 以上呈現一近似倒三角形，此現象顯示地表熱能是以熱傳導的方式進行傳遞，溫度呈一線性遞減，最大深度達 50 cm，而深度 50 cm 以下的地下水溫在一天之中幾乎維持恆定，不受地表熱能的影響。當強降雨事件發生過後 (圖 3.66d)，河水快速的補注地下水，阻尼振盪深度逐漸消失，包絡線再度呈現近一直線的型態，此時的溫度包絡線與 well A1 相似。圖 3.67 中為 well C1 井所呈現的溫度包絡線隨時間的變化，其變化形態與 well B1 則非常相似，河道斷流發生時 (圖 3.67a–c)，未飽和層於河床下形成，地表熱能以熱傳導的方式可傳遞至深度 100 cm，深度 100 cm 以下的地下水溫在一天之中幾乎維持恆定；當強降雨事件發生過後 (圖 3.67d)，河水開始補注地下水，阻尼振盪深度逐漸消失。圖 3.68 中為 well D1 井所呈現的溫度包絡線隨時間的變化，其變化形態與 well B1 及 well C1 則非常相似，然而若進一步仔細檢視河川水溫變化可以發現，well D1 的河川水溫變化幅度較小，遠小於 well B1 及 well C1 井的河川水溫變化 (圖 3.68a)，此現象即暗示 well D1 是處於有水的狀態，河水溫度的日夜周期變化只影響至深度 50cm 的水溫，50cm 以下深度的水溫皆為持恆定。經由檢視水位歷線圖得知，此時地下水位略高於河川水位，深部往上流動的地下水，其攜帶的熱能與淺部熱傳導的太陽輻射熱於深度約 50cm 處進行交會混合，顯示地表熱能的熱傳導深度僅止於 50 cm，而影響 well D1 溫度包絡線的機制與 well B1 及 well C1 井有所不同。隨著地下水位的逐漸下降，水流方向由上往下趨於強烈，阻尼振盪深度開始顯現 (圖 3.68b)；持續下降的地下水位，將造成阻尼振盪深度持續加深 (圖 3.68c)，深度 175 cm 以下的包絡線將不再呈現一恆定值，此時的包絡線型態與 well A1 井相似。當強降雨事件發生過後 (圖 3.68d)，地下水位高於河川水位，包絡線的型態又恢復成與圖 3.68a 相似。

3.5 復育中心地下水井之觀測

本計畫於櫻花鉤吻鮭復育中心旁的地下水井裝設水位計 Troll 400，記錄地下水的水位及水溫變化，並繪製出水位歷線圖及溫度歷線圖，由於缺乏此監測井的建井與開篩的詳細資料，故僅能依據有限的資料進行分析（井深約 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，自計畫執至今，監測資料長達 9 個月（2016 年 12 月 5 日–2017 年 9 月 7 日）。圖 3.69 為櫻花鉤吻鮭復育中心旁的地下水井（WL-1）水位歷線圖，在 2016 年 12 月 5 日–2017 年 9 月 7 日的監測期間，地下水位的變化幅度約介於 25–35 cm 之間，最高可達 170 cm（2017 年 7 月 30 日），部分的地下水位變化與強降雨事件有關，大量的降雨導致地下水位快速上升，然而大雨過後，地下水位呈現消退的現象（recession）；部分不規律的地下水位變化推測與復育中心抽水養殖有關。圖 3.70 為櫻花鉤吻鮭復育中心旁的地下水井（WL-1）溫度歷線圖，在 2016 年 12 月 5 日–2017 年 9 月 7 日的監測期間，地下水溫不受氣溫規律周期日夜變化之影響，自 2016 年 4 月 24 日起，地下水溫度呈現一緩慢上升的趨勢，在 2017 年 9 月 7 日達到最高溫。地下水的溫度變化範圍非常小，僅介於 10.9–15.8°C 之間。

3.6 河水—河床熱能傳遞模擬結果

計畫中以觀測的河水水位與水溫及復育中心的地下水水溫資料進行輸入，搭配 PEST 的迭代運算，其參數率定結果如下。由於模式率定分析過程中發現，受到強降雨因素的影響，河床的水力傳導係數可能會隨著時間而改變，因此針對此一特殊現象，將模式率定的過程分為兩種情境，一為水力傳導係數不隨時間改變，另一個則為水力傳導係數隨時間改變，以下針對兩種不同設定的率定結果進行討論。關於水溫變化的描述，請參照去年期末報告。

3.6.1 河床水力傳導係數不隨時間改變

一般而言，短時間內的水力傳導係數為一固定值，在此假設前提下，進行模式參數率定，上（well A1）、中（well B1）及下游（well C1）二吋與一吋井的模擬結果如表 3.5 及圖 3.71–3.72 所示。率定結果顯示，由上至下游，2 吋井的最小平方誤差（least square error）依序為 632.78、7389.4、12483.3（最小均方誤差 root mean square error，RMSE 依序為 0.332、1.180、1.474°C），1 吋井的最小平方誤差則為 8208.92、49687.8、80937.5（RMSE 依序為 0.488、1.200、2.094°C）。由圖中可以得知，模擬值與觀測值不論在趨勢上或數值上皆非常吻合，模擬的地下水溫度可準確的掌握每日規律的高、低溫度變化。即使 7/28/2016–8/10/2016 期間，河川發生斷流，下游河道乾涸時，地下水水溫呈現一穩定值，不受大氣溫度（或河水溫度）而改變，數值模式均可準確的予以呈現（圖 3.71c）。

依據二吋井的觀測資料所得到的率定參數結果顯示，中游河床有最大的水力傳導係數，其值為 2.72×10^{-2} m/s，其次為下游的 1.06×10^{-2} m/s，上游的水力傳導係數則最小，其值為 5.57×10^{-3} m/s。其餘率定的參數，包括：熱傳導係數、比熱、孔隙率及熱延散係數，則差異

不大，分別介於 $1.33 - 2.84 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、 $2.07 \times 10^6 - 3.11 \times 10^6 \text{ J/m m}^\circ\text{C}$ 、 $0.38 - 0.41$ 及 $1.38 - 1.54 \text{ m}$ 之間。依據 1 吋井的觀測資料所得到的率定結果亦呈現，中游河床有最大的水力傳導係數，其次為下游，上游的水力傳導係數則最小，依序為 $1.80 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、 $5.55 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 及 $2.34 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 。整體而言，經由二吋及一吋井的觀測資料所獲得的率定結果，河床在垂直方向上的水力傳導係數變化趨勢非常一致，然而一吋觀測井的值明顯高於二吋觀測井，造成此一差異的原因主要為一吋觀測井屬於全開篩的井管，井管內不同深度的地下水之間並非完全分隔，受到井管內垂直方向上的水體流動，不同深度的地下水水溫受到熱對流的影響，而有相互混合的情形發生，也間接造成利用不同深度的溫度變化所推估的水力傳導係數有高估的現象。

不論是二吋或一吋井的結果皆顯示水力傳導係數的高低變化有相同的趨勢，其值的大小直接反應河水垂直向下入滲量的多寡，由於中游河床具有最大的水力傳導係數，可以推斷此區間的河水將擁有最大的向下入滲量，當河川處於流量較低或乾季時期，持續大量向下入滲的河水，將增加此區段下游河道的河床呈現乾涸的現象。此外，由於下游河床擁有次高的水力傳導係數，也加劇下游或更下游區段河床乾涸的機率。上述推論不僅在河川及地下水位觀測紀錄中獲得確認，亦在本團隊每月固定前往有勝溪進行資料蒐集時，對於現地河道是否有水的觀察紀錄中獲得驗證。觀測資料中顯示，下游河道乾涸的發生均早於中游河道，中游河道區間大量向下入滲的水可解釋此一現象。現地踏勘紀錄中顯示，在絕大部分的情況，河道乾涸（斷流）的發生點均起始於中游（well B1）與下游（well C1）之間，隨著河川流量的持續遞減，乾涸的情形由起始點向上、下游發展。

進一步細看模擬水溫及觀測水溫可發現，在 8/10 - 8/12 期間的連續多日強降雨事件前後，河川及地下水水溫的規律日週期變化振幅似乎受到降雨而改變，也造成在數值模擬及模式率定上之困難，尤其在降雨過後的擬合結果較差。由於河床的水文地質特性與一般認知的地下含水層有所不同，容易受到外部營力的影響而產生改變，河床的水力特性是否因為受到連續多日的強降雨事件而有所改變，進而造成向下入滲河水通量的改變，間接影響地下水水溫的變化，將在下一小節進一步探討。

3.6.2 河床水力傳導係數隨時間改變

為進一步模擬河床水力特性受降雨事件影響而改變的效應，針對 8/10 /2016 - 8/12/2016 降雨事件，探討降雨前、後，河床水力傳導係數之改變，並針對造成其改變之機制進行研析。以 8/12/2016 為時間分界，將所有觀測資料分為降雨前後，由於河川發生斷流、河道乾涸時，河床內處於非飽和（unsaturated）的狀態，其水力特性與飽和狀態下有顯著的差異，由於本分析主要針對降雨事件對於河床水力特性之影響予以探討，因此僅針對河川尚未發生斷流、河道有水的情形進行比較。降雨前所選用的觀測資料區間，上至下游井依序為 7/15/2016 - 8/12/2016、7/15/2016 - 8/1/2016、7/15/2016 - 7/27/2016；降雨後所選用的觀測資料區間，上至下游井依序為 8/12/2016 - 9/13/2016、8/12/2016 - 9/1/2016、8/12/2016 - 8/30/2016。降雨前後欲率定的參數與前一小節相同，均包括：熱傳導係數、比熱、熱延散係數及孔隙率。

上 (well A1)、中 (well B1) 及下游 (well C1) 二吋與一吋井的模式率定與模擬結果如表 3.6 及圖 3.73 – 3.74 所示。率定結果顯示，降雨前，由上至下游，二吋井的最小平方誤差依序為 164.30、1500.50、1791.33 (RMSE 依序為 0.247、0.945、0.214°C)，一吋井的最小平方誤差則為 3600.02、5678.80、286.04 (RMSE 依序為 0.471、0.751、0.204°C)。降雨後，由上至下游，二吋井的最小平方誤差依序為 202.53、1127.90、1748.04 (RMSE 依序為 0.258、0.829、0.215°C)，上至中游，1 吋井的最小平方誤差則為 4164.52、2885.23 (RMSE 依序為 0.477、0.500°C)。由於 8/10/2016 – 9/7/2016 期間，下游一吋井的溫度計發生故障，無此區間觀測資料，故無降雨後數值模擬與模式率定結果。由圖中可以得知，不論降雨前後，模擬值與觀測值不論在趨勢上或數值上皆非常吻合，模擬的地下水溫度可準確的掌握每日規律的高、低溫度變化。在前一小節中，僅用單一水力傳導係數進行參數率定，降雨過後的擬合結果較差的情形已有所改善，不論在最小平方誤差或最小均方誤差均顯著改善，尤其是對於下游二吋井的地下水溫度資料擬合有顯著的提昇。

依據二吋井的觀測資料所得到的率定參數結果顯示，降雨前，中游河床依然有最大的水力傳導係數，其值為 3.50×10^{-2} m/s，其次為下游的 1.72×10^{-2} m/s，上游的水力傳導係數則最小，其值為 4.68×10^{-3} m/s；降雨後，中游的水力傳導係數降低至 1.92×10^{-2} m/s，下游的水力傳導係數亦降低至 7.95×10^{-3} m/s，然而上游的水力傳導係數則增加至 8.42×10^{-3} m/s。由上至下游的水力傳導係數在空間上的變化趨勢於降雨前後仍然維持一致，然而各別區段間的水力傳導係數受到降雨事件所導致在時間上的變化趨勢則並非一致，上游河道的水力傳導係數顯著的上升約 2 倍，而中、下游河道的水力傳導係數則顯著的降低為 1/2。其餘率定的參數，包括：熱傳導係數、比熱、熱延散係數及孔隙率，不論在降雨前後，均差異不大，分別介於 1.16 – 2.87 W/m°C、 1.95×10^6 – 3.60×10^6 J/m m°C、0.35 – 0.42 及 1.22 – 1.58 之間。

依據一吋井的觀測資料所得到的率定結果亦呈現與二吋井相似的結果。降雨前，中游河床依然有最大的水力傳導係數，其值為 8.00×10^{-2} m/s，其次為下游的 5.50×10^{-2} m/s，上游的水力傳導係數則最小，其值為 1.22×10^{-2} m/s；降雨後，中游的水力傳導係數降低至 2.72×10^{-2} m/s，然而上游的水力傳導係數則增加至 2.51×10^{-2} m/s (由於下游一吋井在降雨後的其間發生溫度計故障，故無降雨後的模擬與率定結果)。一吋觀測井的率定資料顯示與二吋井一致的變化趨勢，在空間上，降雨前後個區段的水力傳導係數相對高低仍然維持一致，然而各別區段間的水力傳導係數在時間上的變化趨勢則並非一致，上游河道的水力傳導係數顯著的上升約 2 倍，而中游河道的水力傳導係數則顯著的降低為 1/3。整體而言，不論降雨前後，一吋觀測井所獲得的率定結果依然有明顯高於二吋觀測井的情形，造成此差異的原因依然與一吋觀測井屬於全開篩的井管及井管內熱對流效應有關。

降雨事件對於河床水力特性之改變，上下游間距離不到 500 公尺，然而河床水力特性對於降雨事件的反應卻如此不同，其背後之控制機制為一值得深入研析之議題，而透過本研究計畫之資料分析、數值模式模擬及現地踏勘紀錄，歸納得到以下之可能機制。在上游區段，觀測期間從未發生斷流，河道長年處於有水的狀態，當乾季來臨時，河川流量開始降低，河水所攜帶的細懸浮顆粒將會逐漸沉積至河床表面或充填於河床沉積物的孔隙之中，沉積與充填的過程中將會使得河床的水力傳導係數緩慢降低，此現象可透過河川水位與地下水位間之差距 (水力梯度) 緩慢增加獲得驗證。然而，當多日連續的強降雨事件發生時，迅速增加的

河川流量將會把沉積於河床表面或充填於孔隙中的細顆粒物質沖刷帶走，甚至當河川流量突然暴增（如颱風）進而侵蝕或搬運河床表面的沉積礫石，在此強降雨的外部營力作用下，降雨過後的河床水力傳導係數將明顯的高於降雨前的值。

3.7 集水區流量模擬結果

本計畫欲探討河川入滲對於觀測流量之影響，挑選具有河道傳輸過程之 SWAT 模式進行七家灣溪流域之模擬，模擬期間為 2006 年至 2015 年，其中以 2006 至 2010 年為驗證之年段，檢定年段為 2011 年至 2015 年。七家灣溪流域調整之流量相關參數包含 CN 值、退水係數、地下水相關參數(地下水流出河川基流門檻值以及地下水流出延時等)，河道相關參數(河床水力傳導度以及滿水位深度等)，並以目標函數 Nash-sutcliffe efficiency 判斷模擬成效之依據，以下各小點為七家灣溪與有勝溪流量站之檢定驗證成果。

3.7.1. 有勝溪流量站

有勝溪流量檢定時期為 2011 至 2015 年，流量檢定成果如圖 3.76-3.77 所示，流量檢定成果 R^2 為 0.74，Nash 值為 0.74，整體流量百分比誤差為 -1.6，對比 Moriasi et al.(2015) 文章裡面的模擬成效，Nash 值位於模擬成效良好之範圍區間。有勝溪流量驗證時期為 2006 年至 2010 年，流量驗證成果如圖 3.78-3.79 所示，流量驗證成果 R^2 為 0.83，Nash 值為 0.73，整體流量百分比誤差為 33.6，Nash 值位於模擬成效良好之範圍區間，顯示 SWAT 模式能運用在有勝溪之日流量模擬，後續將以參數說明該集水區之水文特性。

有勝溪流域 SWAT 參數檢定表格如表 3.7 所示，調整的方式除了 CN 值為百分比調整外，其餘皆為數值直接取代之方式，同時搭配敏感性分析，該排名即可顯示影響有勝溪流域之主要參數，CH_D 參數為河道滿水位深度(m)，其檢定成果為 0.95，調整區間介於 0 至 2.76 之間，敏感性分析排名第一，ALPHA_BNK 為河岸之退水係數，影響河岸補注河川水流之機制，其檢定成果為 0.4，調整區間介於 0.23 至 0.47 之間，敏感性分析排名第二，TRNSRCN 參數為河道水流進入深層地下水之係數，檢定成果為 0.2，調整區間介於 0.09 至 0.23 之間，敏感性分析排名第三，GW_REVAP 參數為地下水回補未飽和含水層之係數，檢定成果為 0.11，調整區間介於 0.08 至 0.15 之間，敏感性分析排名第四，ALPHA_BF 為河川之退水係數，檢定成果為 0.84，調整區間介於 0.48 至 0.86，敏感性分析排名第五，GW_DELAY 為地表水補注地下水之延時(天)，檢定成果為 22.37，調整區間介於 17.79 至 30.89，敏感性分析排名第六，SURLAG 參數為地表逕流稽延係數，檢定成果為 19.02，調整區間介於 16.75 至 19.3，敏感性分析排名第七，CH_K2 為河道之水力傳導度，影響河水移動過程的損失量，單位為 mm/hr，檢定成果為 651.75，調整區間介於 509.52 至 705.56，敏感性分析排名第八，GWQMN 為地下水流出河川基流之深度門檻值，單位為 mm，檢定成果為 1361.31，調整範圍為 817.93 至 1386.62，敏感性分析排名第九，SHALLST 為初始地下水位深度(mm)，檢定成果為 3321.07，調整範圍介於 3091.63 至 4030.20 之間，敏感性分析排名第十，RCHRG_DP 參數為淺層地下水入滲至深層地下水之係數，檢定成果為 0.01，調整範圍介於 0 至 0.12 之間，敏感性分析排名第十一，CN2 為 SCS Curve Number 數值，各種土地利用皆對應不同之 CN 值，為影響地表逕流模擬最重要之參數，調整方式為百分比調整法，檢定成果為 -0.44，檢定範圍為 -0.46 至 -0.35，敏

感性分析排名第十二，ESCO 為土壤蒸發散補充參數，檢定成果為 0.61，檢定範圍介於 0.51 至 0.73 之間，敏感性分析排名第十三，REVAPMN 為淺層地下水回補未飽和土壤層之深度門檻值(mm)，檢定成果為 287.01，調整區間介於 277.72 至 424.01，敏感性分析排名第十四。

上述檢定成果顯示敏感性分析排名較前之參數為河道傳輸相關參數，包含滿水位之深度、河岸之退水係數、河道水流傳輸過程中入滲深層地下水之係數等等，這些參數皆顯示有勝溪集水區流量主要控制因子以河道特性為主，其次為地下水相關參數，其中河道滿水位深度(m) 為最敏感之參數，顯示河道滿水位深度對於有勝溪流量模擬非常重要，也說明河道縱剖面深度變化會明顯改變有勝溪流量，此外水在傳輸過程中，主要控制河道入滲之參數為 CH_K2 之參數，河道水力傳導度之單位為 mm/hr，代表每小時會有多少 mm 深度的水從河床進入到地下水層中，檢定成果顯示有勝溪每小時水在河道傳輸過程中會入滲約 651mm 深度的水進入地下水層，為模式手冊定義的最容易下滲之河道(K 值>127mm/hr)，手冊中定義該河道大多為岩石與大顆沙粒所組成，與有勝溪實際河床狀況相似，但其檢定數值高於 127mm/hr 門檻值非常多，說明有勝溪沉積物之堆積可能造成更多的水從河道入滲進入地下水層。有勝溪檢定時間為 2011 至 2015 年，從檢定成果圖的觀測與模擬對比，其高低流量數值非常接近，只有少數幾個時段有低流量模擬低估之現象，有勝溪流量驗證時期為 2006 至 2010 年，顯示該時期低流量有明顯低估之現象，說明利用 2011 年之後之有勝溪流量進行檢定之參數，其河床底部入滲量太高，不符合驗證時期之集水區水文特性，藉由 SWAT 模式這兩個時期日流量檢定驗證的比對，更佐證有勝溪在 2011-2015 年間的水文特性與 2006-2010 年間有明顯的變化，其中河床底部入滲量之增加，或許為低流量時期斷流影響的主要因子。

有勝溪 Y1 井之上游為未發生斷流之河段，藉由 Y1 定期之流量量測可推估出與有勝溪流量站流量之線性關係，推估為量測 Y1 之天數，SWAT 模式可分別檢定各個次集水區之流量與參數，圖 3.80-3.81 為有勝溪 Y1 井的流量檢定成果圖，幾段低流量時期有些低估之外，其餘時段其模擬與觀測大致符合，其模擬成效流量檢定成果 R^2 為 0.78，Nash 值為 0.76，整體流量百分比誤差為-3.6，Nash 值位於模擬成效良好之範圍區間。參數檢定成果河道 K 值為 444mm/hr，比前述包含斷流河段之有勝溪平均河道的 K 值 651mm/hr，入滲量少約 200mm/hr，顯示 Y1 以下之河段有較多的水從河道入滲進入地下水，進而造成低流量時期斷流之現象。

3.7.2. 七家灣溪流量站

七家灣溪流量檢定時期為 2011 至 2015 年，流量檢定成果如圖 3.82-3.83 所示，流量檢定成果 R^2 為 0.68，Nash 值為 0.65，整體流量百分比誤差為 16.9，對比 Moriasi et al.(2015)文章裡面的模擬成效，Nash 值位於模擬成效可接受之範圍區間。七家灣溪流量驗證時期為 2006 年至 2010 年，流量驗證成果如圖 3.84-3.85 所示，流量驗證成果 R^2 為 0.8，Nash 值為 0.78，整體流量百分比誤差為 30.8，Nash 值位於模擬成效良好之範圍區間，顯示 SWAT 模式能運用在七家灣溪之日流量模擬，後續將以參數說明該集水區之水文特性。

七家灣溪流域 SWAT 參數檢定表格如表 3.8 所示，調整的方式除了 CN 值為百分比調整外，其餘皆為數值直接取代之方式，同時搭配敏感性分析，該排名即可顯示影響七家灣溪流域之主要參數，表 3.8 為七家灣溪 SWAT 模式參數檢定表，CN2 為 SCS Curve Number 數值，地表逕流模擬最重要之參數，調整方式為百分比調整法，檢定成果為-0.298，檢定範圍為-0.3 至-0.25，

為最敏感之參數，RCHRG_DP 參數為淺層地下水入滲至深層地下水之係數，檢定成果為 0.005，調整範圍介於 0 至 0.27 之間，敏感性分析排名第二，GW_DELAY 為地表水補注地下水之延時(天)，檢定成果為 2.753，調整區間介於 0 至 19.316，敏感性分析排名第三，ALPHA_BF 為河川之退水係數，檢定成果為 0.217，調整區間介於 0.218 至 0.626，敏感性分析排名第四，CH_K2 為河道水力傳導度，影響河水移動過程的損失量，單位為 mm/hr，檢定成果為 24.781，調整區間介於 0 至 35.125，敏感性分析排名第五，ALPHA_BNK 為河岸之退水係數，影響河岸補注河川水流之機制，其檢定成果為 0.441，調整區間介於 0.41 至 0.803 之間，敏感性分析排名第六，GW_SPYLD 為淺層地下水輸入河川之係數，檢定成果為 0.4，調整區間介於 0.327 至 0.4，敏感性分析排名第七，REVAPMN 為淺層地下水回補未飽和土壤層之深度門檻值(mm)，檢定成果為 361.687，調整區間介於 157.236 至 381.537，敏感性分析排名第八，GWQMN 為地下水流出河川基流之深度門檻值，單位為 mm，檢定成果為 96.75，調整範圍為 0 至 500，敏感性分析排名第九，GW_REVAP 參數為地下水回補未飽和含水層之係數，檢定成果為 0.041，調整區間介於 0.032 至 0.196 之間，敏感性分析排名第十，SHALLST 為初始地下水位深度(mm)，檢定成果為 2526.175，調整範圍介於 1610.033 至 3373.541 之間，敏感性分析排名第十一，CH_D 參數為河道滿水位之深度(m)，其檢定成果為 3.209，調整區間介於 1.754 至 5.264 之間，敏感性分析排名第十二。

七家灣溪參數檢定成果顯示最敏感之參數為 CN 值，其次為地下水相關參數，河道水力傳導度敏感性分析為第五，與有勝溪參數檢定情況有所不同，七家灣溪為鎖住有勝溪參數後，在進行參數之檢定作業，因此該參數能反應七家灣溪主流之水文特性，七家灣溪的低流量檢定與驗證大多為低估之現象，顯示河川基流量之模擬嚴重不足，較為敏感之參數大多與地下水流出河川基流有關，例如 GW_DELAY 地表水補注地下水延時天數就比有勝溪之天數短了許多，也較為敏感，RCHRG_DP 為淺層地下水入滲至深層地下水之係數，該係數較有勝溪檢定值小許多，顯示七家灣溪的檢定以增加地下水位為前提，希望能增加河川基流量之補注，河道水力傳導度的部份，七家灣溪檢定數值為 24.781mm/hr，顯示七家灣溪河道傳輸過程中，水比較不容易從河道入滲至地下水，且有勝溪河道之入滲量為七家灣溪 30 倍之多，目前觀測到發生斷流之河段大多在有勝溪，七家灣溪主流目前則少有斷流之情況發生，推論河道水力傳導度的差異或許為造成兩河斷流潛勢差異的原因之一。SWAT 模式能準確模擬七家灣溪流域之中高流量的部分，低流量礙於 SWAT 模式內部地下水機制較為簡單，目前調整之參數或許無法準確模擬地下水流出河川基流的部分，後續需要搭配更完善的地下水相關模擬程式，嘗試增加地下水流出河川之基流量，提高七家灣溪低流量模擬成效，另一方面模式模擬成果說明七家灣溪主流低流量時期明顯的受到地下水的補注而免於斷流之情況，雖與有勝溪相鄰，但有著截然不同之河道與水文特性。

3.8 氣候變遷對流量之影響

水文條件關係著斷流的潛勢，氣候變遷影響水文條件之改變對棲地造成影響，有鑒於此，本研究利用 TaiWAP 模式模擬未來 2021-2100 年不同種 RCP 情境下之月流量變化比例及 Q95 流量變化率，預先瞭解七家灣溪流域在氣候變遷下可能於流量變化上所遭遇之衝擊。

3.8.1. 氣候變遷下之氣象變化

TaiWAP 利用 5 種 GCM 模式所模擬有勝溪流域(思源氣象測站)及七家灣溪流域(桃山氣象測站)未來之溫度及降雨變化顯示於圖 3.86-3.89，由溫度變化來講，思源及桃山測站在未來 2021-2100 年各種 RCP 條件下絕大部份顯示上升之趨勢，只有極少數例外，上升之幅度則介於 0.09 度至 4.90 度不等，RCP2.6 情境下 2021-2040 年變化幅度為最輕微者，思源氣象測站月均溫變化幅度介於-0.19 至 1.06 度間，平均上升幅度為 0.60 度(圖 3.86 左上)，至 2081-2100 年則上升幅度介於 0.09-2.12 度，平均上升 1.06 度(圖 3.86 左下)；而桃山氣象測站模擬之 2021-2040 年溫度變化則介於-0.16 至 1.59 度，平均上升幅度為 0.61 度(圖 3.87 左上)，至 2081-2100 年則上升幅度介於 0.12-2.11 度，平均上升 1.08 度(圖 3.87 左下)。RCP8.5 為氣候變遷情境下最不樂觀之狀況，5 種 GCM 模式模擬思源氣象站 2021-2040 年平均月均溫上升幅度為-0.07 至 1.45 度，平均上升 0.67 度(圖 3.86 右上)，至 2081-2100 年平均月均溫上升幅度為 2.32 至 4.89 度，平均上升 3.27 度(圖 3.86 右下)；而桃山氣象測站模擬之 2021-2040 年溫度變化則介於-0.05-1.44 度，平均上升幅度為 0.67 度(圖 3.87 右上)，至 2081-2100 年則上升幅度介於 2.34-4.90 度，平均上升 3.29 度(圖 3.87 右下)。

就月降雨量變化比例(未來降雨/現況降雨)而言，思源及桃山氣象測站在未來模擬情境中濕季(5 月-10 月)在多數之模式顯示該月分之降雨變化比例皆大於 1，而乾季則小於 1，代表年度之降雨量有稍微往濕季集中之趨勢，惟趨勢較不明顯，在 RCP2.6 情境下 2021-2040 年為變化最輕微者，思源氣象測站與桃山氣象測站模擬結果極為相似，預測之降雨變化比例為 0.58-1.56，將 5 種模式模擬之結果加以平均發現，月降雨變化比例大於 1 之月份為 2 月、6-9 月、11 月(圖 3.88 左上)，至 2081-2100 年模擬結果僅有些許差異，思源氣象測站預測之降雨變化比例為 0.61-1.67，5 種模式平均後得月雨量變化率大於 1 之月份為 1-2 月、5-9 月、11-12 月(圖 3.88 左下)；桃山氣象測站模擬結果則為 0.60-1.65，模式平均大於 1 之月份同樣為 1-2 月、5-9 月、11-12 月(圖 3.89 左上)，至 2081-2100 年模擬結果僅有些許差異，桃山氣象測站預測之降雨變化比例為 0.60-1.65，5 種模式平均後得月雨量變化率大於 1 之月份為 1-2 月、5-9 月、11-12 月(圖 3.89 左下)。RCP8.5 為氣候變遷情境下最不樂觀之狀況，2021-2040 年思源氣象測站模擬之月降雨變化比例為 0.53-1.67，將 5 種模式模擬之結果加以平均發現，月降雨變化比例大於 1 之月份為 6-10 月(圖 3.88 右上)，至 2081-2100 年，變化比例最為劇烈，思源氣象測站模擬之雨量變化比例為 0.35-2.25，5 種模式平均後得月雨量變化比例大於 1 之月份為 4-9 月(圖 3.88 右下)；桃山氣象測站模擬之結果為 0.53-1.64，5 種模式平均後得月雨量變化比例大於 1 之月份為 6-10 月(圖 3.89 右上)，至 2081-2100 年，變化比例最為劇烈，桃山氣象測站模擬之雨量變化比例則為 0.33-2.25，5 種模式平均後得月雨量變化率大於 1 之月份亦為 4-9 月(圖 3.89 右下)。氣候變遷下的氣象資料顯示，溫度將隨著溫室效應的增加而升高，而降雨則隨著溫室效應的增加越趨於極端，也就是枯水期降雨變小，豐水期降雨變大，從 SPI-1 小於零與斷流發生之密切關係做推論，枯水期降雨的降低將增加斷流的風險。

3.8.2 氣候變遷下之流量變化

將不同氣候變遷情境下之溫度及雨量條件帶入 GWLF 水文模式，即可模擬未來可能的流量，並與代入現況溫度及雨量模擬所得之現況流量比較，即可得到不同氣候變遷情境下之流量變化率，結果亦發現，在未來氣候變遷的影響下之流量在濕季(5-10月)流量有增加、乾季(11-4月)流量減少之趨勢(圖 3.90-3.91)。在 RCP2.6 之情境下，2021-2040 年有勝溪流量變化率為-32%-62%，將 5 種模式模擬之結果加以平均發現，月流量有增加之月份為 6-9 月(圖 3.90 左上)，至 2081-2100 年有勝溪流量變化幅度擴張至-50%-66%，5 種模式平均後得月流量有增加之月份為 1-2 月、6-9 月、12 月(圖 3.90 左下)；七家灣溪流量變化率則介於-32%-75%之間，5 種模式平均後得月流量有增加之月份為 2 月、7-10 月(圖 3.91 左上)，至 2081-2100 年七家灣溪流量變化率則介於-36%-60%之間，5 種模式平均後得月流量有增加之月份為 2-3 月、5-12 月(圖 3.91 左下)；RCP8.5 為氣候變遷情境下最不樂觀之狀況，2021-2040 年有勝溪月流量變化率為-78%-69%，5 種模式平均後得月流量有增加之月份為 6-10 月(圖 3.90 右上)，至 2081-2100 年，有勝溪流量變化率劇變為-70%-120%，5 種模式平均後得月流量有增加之月份集中於 6-9 月(圖 3.90 右下)；七家灣溪流量變化則為-39%-80%，5 種模式平均後得月流量有增加之月份為 6-11 月(圖 3.91 右上)，至 2081-2100 年，七家灣溪流量在該時期亦有明顯之改變，流量變化率為-70%-120%，5 種模式平均後得月流量有增加之月份集中於 6-9 月(圖 3.91 右下)。

在氣候變遷情境下生態基流量 Q95 的模擬結果顯示(圖 3.92-3.93 未來氣候變遷情境下 Q95 流量之變化率((未來-現況)/現況*100%)，大部分 GCM 模式在各種 RCP 情境下 Q95 流量皆呈現下降之趨勢，且自 2021-2040 年至 2081-2100 年逐期下降，有勝溪 Q95 流量變化率從 2021-2040 年之-20%左右下降至 2081-2100 年之-40%；七家灣溪更從-20%左右下降至-60%。氣候變遷下的流量結果顯示，流量將隨著溫室效應的增加越趨於極端，也就是枯則越枯、豐則越豐的現象，枯水期流量的降低將增加斷流的風險，代表生態基流量的 Q95 更是顯著的降低，而豐水期流量的增加亦可能增加河道的堆積與變遷，也將影響到斷流的潛勢。

3.8.3 氣候變遷下之斷流天數變化

本小節藉由不同氣候變遷情境下之溫度及雨量條件帶入 GWLF 水文模式，模擬有勝溪於各項氣候變遷情境下發生斷流之潛勢，為提供更確切之斷流資訊，我們依照 3.2.2 小節中所歸納出來的有勝溪斷流門檻值 0.5cms 做為依據，計算未來各時期、不同氣候模式、不同情境有勝溪的斷流天數百分比變化，圖 3.94 即為氣候變遷情境斷流天數百分比變化圖，各時期各情境模擬之斷流天數都有明顯的上升趨勢，左上的圖為 2021 年至 2040 年各種 RCP 情境之斷流天數變化百分比，圖中顯示 RCP2.6 情境斷流天數將增加約 43-47%，RCP4.5 情境斷流天數將增加約 38-58%，RCP6.0 情境斷流天數將增加約 40-52%，RCP8.5 情境斷流天數將增加約 43-54%。右上的圖為 2041 年至 2060 年各種 RCP 情境之斷流天數變化百分比，圖中顯示 RCP2.6 情境斷流天數將增加約 33-47%，RCP4.5 情境斷流天數將增加約 38-51%，RCP6.0 情境斷流天數將增加約 43-48%，RCP8.5 情境斷流天數將增加約 37-59%。左下的圖為 2061 至 2080 年各種 RCP 情境之斷流天數變化百分比，圖中顯示 RCP2.6 情境斷流天數將增加約 41-53%，RCP4.5

情境斷流天數將增加約 36-57%，RCP6.0 情境斷流天數將增加約 43-53%，RCP8.5 情境斷流天數將增加約 26-59%。右下的圖為 2081 年至 2100 年各種 RCP 情境之斷流天數變化百分比，圖中顯示 RCP2.6 情境下，斷流天數將增加約 37-45%，RCP4.5 情境斷流天數將增加約 31-57%，RCP6.0 情境斷流天數將增加約 35-58%，RCP8.5 情境斷流天數將增加約 33-63%。

由上述模擬成果可得知，五種 GCM 模式在各種 RCP 情境推估的有勝溪斷流天數將增加 3 成至 5 成，其中 CCSM4 與 HadGem2-AO 兩個 GCM 模式更可看出斷流天數會隨著 RCP 情境加劇而使得變化百分比比例大幅上升，若未來人為活動強度持續增加，有勝溪斷流之情況將越來越嚴重，前述小節氣候變遷下流量百分比變化成果說明未來將有豐水期流量增加，枯水期流量減少之現象，斷流增加的天數可能集中在枯水期的時間點，未來如何維持枯水期 Q95 生態基流量為目前最為重要之議題。

第四章 結論與建議

4.1 結論

根據本計畫監測與分析之成果，我們提出以下幾點結論：

1. 根據判釋成果，桃山北溪與七家灣溪各河段之流路雖均會隨著流量的變異而發生變遷，但卻少有斷流的現象；有勝溪各河段亦有變遷的情形，然而卻僅有在近思源處河段發生斷流，且於 2012 年中河道改變後更顯頻繁，研究中比對過往地形量測計畫所得斷面資料後確實發現，有勝溪斷流河段開始發生頻繁的斷流現象，如 2012 年颱風季節後、2016 年梅姬颱風後，河道高程均有大幅度抬升之現象，大量沖積所得之土石因較為鬆散，使得河水改以伏流水的形式在河床內流動。
2. 斷流的原因與河床上堆積的土石量有關，堆積量越大且越鬆散則較容易發生斷流，崩塌與防砂壩上游均提供大量土石堆積的條件。桃山北溪的斷流與防砂壩有關，這在過去雪霸國家公園的計畫報告中已經被提出；七家灣溪於 2015 年 3 月發生的斷流，發生在主流左岸大崩塌的上游，可能與大崩塌歷年造成的土石堆積有關；而有勝溪的斷流，亦與河床上大量的土石堆積有關，斷流處並無防砂壩，但此計畫並無法追溯堆積土石的來源。河道的埋積作用造成流幅加寬並形成曲流流路，及河道的堆積造成瓣狀河川造成河水分流均可能因此增加了斷流的潛勢。
3. 降雨為河川流量主要之來源，在水流為曲流的情況下，有勝溪斷流事件的發生與思源雨量站月降雨量有關，尤其與 SPI-1 有密切之關係，總計 25 場斷流事件發生的月份中，共有 15 個月份之 SPI-1 皆小於 0，且以 SPI-1 與斷流事件的關係最好，表示短延時的乾旱即可能引發斷流；在水流為直流的情況下，就算 SPI-1 < 0 也不會發生斷流，顯示是河道地形與水文同時在影響斷流事件的發生。七家灣溪（2015/3/5 斷流）與桃山北溪（2003/5/31-6/4 斷流）的斷流事件，同樣發生在桃山雨量站 SPI-1 < 0 的情況下，SPI-1 將有機會做為斷流預警的指標。然而 2012 年中之後，就算 SPI-1 大於 0 也會發生斷流，顯示河道改變對斷流的影響。
4. 流量表示水流在河道上的多寡，是描述斷流與否最直接的指標，在有勝溪斷流河段目前水流為曲流的情況下，有勝溪流量站的觀測流量低於 0.531 cms 時會發生斷流事件，配合有勝溪退水的特性，將可做為斷流預警的指標。
5. 水位計可即時反應河川的水深，綜合考量雨量、河川流向、流量與斷流發生的關係，本計畫建議斷流河段水位即時的連續監測，將是最有效之斷流預警，因為斷流均始於水位的持續降低，在短期無法做大規模動作的情況下，即時監測水位搭配斷流前人工協助魚的脫困，為現階段最佳的改善措施。
6. 以河段的尺度來看，若河床與河水交互作用的方向為河水往河床方向流動（如 Well B 及 Well C），則該河段比較容易發生斷流，若交互作用方向為從河床往河水方向移動（如 Well D），則不易發生斷流。從計畫執行開始，有勝溪斷流河段幾乎每月均發生斷流的狀態，該河段的河水有顯著入滲至河床的潛勢，是造成斷流的重要原因之一，亦顯示本計畫利用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，Well A1 因河水入滲至河床的潛勢較低，因此不易發生斷流；Well B1 及 Well C1 因河水入滲至河床的潛勢

很高，因此在今年度的觀測中有很長時間呈現斷流的狀態；Well D1 因為有地下水的補注而使得斷流的情形較不嚴重；從觀測井之模擬成果顯示有勝溪斷流處河床具有最大的水力傳導係數，可以推斷此區間的河水將擁有最大的向下入滲量，將增加此區段下游河道的河床呈現乾涸的現象。反觀七家灣溪及桃山北溪潛在斷流處，大部分的時間流量隨下游遞減的趨勢均不明顯。

7. 有勝溪斷流河段為曲流時有較高之斷流潛勢，暗示河床內地下水的水流方向往河道中心流動，亦與 Well B1 到 B4 橫斷面的觀測結果相互呼應，說明曲流時具有高斷流潛勢的原因。
8. 以集水區的尺度來看，若河床與河水交互作用的方向為河水往河床方向流動（如有勝溪），則該河段比較容易發生斷流，若交互作用方向為從河床往河水方向移動（如七家灣溪），則不易發生斷流。SWAT 模式模擬結果顯示，有勝溪河道水力傳導度較七家灣溪主流河道高出約 30 倍，且有勝溪上游未斷流河段河道水力傳導度較下游平均河道水力傳導度低，顯示有勝溪中下游河道具有較高的下滲能力，水從上游至下游傳遞的過程將大量下滲入地下水，易形成斷流之現象；反觀七家灣溪，模式的結果顯示七家灣溪或許有較大之地下水流出量，得以維持其基流之穩定，因此不易發生斷流。
9. 氣候變遷的衝擊下，流量將隨著溫室效應的增加越趨於極端，枯水期流量的降低將增加斷流的風險，代表生態基流量的 Q95 更是顯著的降低，而豐水期流量的增加亦可能增加河道的堆積與變遷，從 0.5cms 為門檻值判斷未來河道斷流天數變化百分比成果顯示未來有勝溪斷流天數將增加 3 至 4 成，且可能隨著 RCP 情境的增強，有勝溪斷流天數將會增加，不利於櫻花鉤吻鮭之生存，未來如何維持枯水期 Q95 生態基流量為目前最為重要之議題。

4.2 建議

立即可行之建議

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成功域外放流櫻花鉤吻鮭族群拓展棲地造成衝擊，桃山北溪是重要的櫻花鉤吻鮭棲息地，斷流發生的影響更不容忽視。在短期無法做大規模動作的情況下，斷流河段水位的連續監測，若能即時回傳資料至管理站，將是最有效之斷流預警，即時監測水位搭配斷流前或斷流初期以人工協助魚的脫困，為現階段最佳的改善措施。

主辦機關：雪霸國家公園管理處

短期水文條件(如：SPI-1 及流量)為預警斷流的指標之一，結合中央氣象局短期氣候預報系統發展季節性的預警系統，對斷流事件提出事先預警。

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往河床移動的現象，斷流時河水以伏流水的形式在河床內移動。目前觀測的結果顯示，有勝溪斷流河段的伏流水發生在河床下三米以淺的位置，一年半的觀測資料顯示，三米以深的位置終年有水，因此三米可做為潛壩設置的參考依據。然而作法的建議乃根據現地觀測數據之推論，本計畫並無法評估各作法之實際成效，仍有賴後續之研究，如透過水工模型的建立與驗證確保各作法之成效。

主辦機關：雪霸國家公園管理處

有勝溪斷流河段之曲流增加斷流發生之潛勢，在河床三米以深的位置終年有水的情況下(計畫一年半之觀測結果)，三米同可做為河道疏浚的參考依據，但仍須更詳實的評估。

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。
- 官文惠，2012。大甲溪上游台灣櫻花鉤吻鮭歷史棲地環境生態調查及溪流放流長期監測，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
- 洪念民，1996。氣候變遷對大安溪水資源營運之影響。國立臺灣大學農業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。
- 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。
- 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.
- 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., Datry, 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.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S. (1965). Rates of vertical groundwater movement estimated from earth's thermal profile, *Water Resources Research*, 1, 325-328.

- Buckingham, E. (1907). Studies on the movement of soil moisture, U.S. Dep. Agric. Bur. Soils Bull., 38, 1 – 61.
- Cartwright, K. (1974). Tracing shallow groundwater systems by soil temperature, *Water Resources Research*, 10, 847–855.
- Constantz, J. (1982). Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 26, 466– 470.
- 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.
- DeVries A. (1963). Thermal properties of soils, in *Physics of the Plant Environment*, edited by W. R. van Wijk, Elsevier, New York., 210-235.
- Doherty, J. (2005), PEST version 9 users guide, Watermark Numer. Comput., Brisbane, Queensl., Australia.
- Davies, P.M. 2010. Climate Change Implications for River Restoration in Global Biodiversity Hotspots. *Restoration Ecology* 18; 261–268.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, 604.
- Haith, D. A., & Shoemaker, L. L. (1987). Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(3), 471-478.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- 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.
- 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.
- Kipp, K.L., 1987, HST3D—A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water systems: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 86-4095, 517 p.
- 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.
- Liu, T. M., Tung, C. P., Ke, K. Y., Chuang, L. H., & Lin, C. Y. (2009). Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change. *Paddy and Water Environment*, 7(4), 301.
- 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.
- Ogrosky, H. O., & Mockus, V. (1964). Hydrology of agricultural lands. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Philip, J.R., de Vries, D.A. (1956). Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Eos Trans. AGU*, 38, 222–232.
- Richard, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1, 318–333, doi:10.1063/1.1745010.
- 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.
- Richard, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1, 318–333, doi:10.1063/1.1745010.
- Scanlon, B.R., Milly, P.C.D. (1994). Water and heat fluxes in desert soils: 2. numerical simulations, *Water Resources Research*, 30, 721-733.
- Stallman, R.W. (1963). Methods of collecting and interpreting ground-water data, *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 36-46.
- Stallman, R.W. (1965). Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature, *Journal of Geophysical Research*, 70, 2821-2827.
- Stonestrom, D.A., Rubin, J. (1989). Air permeability and trapped-air content in two soils, *Water Resources Research*, 25, 1959-1969.
- Suzuki, S. (1960). Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65, 2883-2885.
- Watermark Numerical Computing (2016), *PEST—Model independent parameter estimation*, version Pest98: Brisbane, Australia.
- Tung, C. P., Liu, T. M., Chen, S. W., Ke, K. Y., & Li, M. H. (2014). Carrying Capacity and Sustainability Appraisals on Regional Water Supply Systems under Climate Change. *British Journal of Environment and Climate Change*, 4(1),27-44.
- Tung, C. P., & Haith, D. A. (1995). Global-warming effects on New York streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(2), 216-225.

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%
≤-2.00	極端乾旱	2.3%

表 2.3 本研究蒐集自 2004 年至 2016 年共 33 張衛星影像圖檔

時間	衛星	來源
2004/12/16	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2005/7/1	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2006/1/31	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2006/7/19	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2006/11/12	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2007/1/29	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2007/7/21	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2008/6/10	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2008/12/11	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2008/12/21	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2009/1/17	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2009/12/13	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2010/1/14	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2010/1/14	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2010/12/9	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2011/1/1	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2011/6/18	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2011/12/28	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2012/1/28	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2012/7/2	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2012/10/22	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2013/1/31	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2013/7/11	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2013/12/2	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2013/12/6	Landsat 8	Google Earth
2014/1/20	Landsat 8	Google Earth
2014/1/30	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2014/4/18	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2014/10/29	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2015/1/24	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2015/4/15	FS-2	行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網
2015/12/13	FS-2	國立中央大學太空及遙測研究中心
2016/2/8	Landsat 8	Google Earth

表 2.4 In-Situ Level Troll 400 沉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 2.5 Eijkelpkamp Mini-Diver 沉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 2.6 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 2.7 Starmon mini 自計式溫度計之規格

Sensors	Temperature		
Size (diameter x length)	25mm x 130mm	Clock	Real time clock Accuracy +/- 1 min/month
Housing material	Plastic or Titanium	Sampling interval	From 1 second up to 90 hours
Weight (in air/in water)	Plastic housing: 80g	Communications	9 pin RS-232C serial cable w/USB serial converter
Memory type	Non-volatile EEPROM	Attachment hole	2.8 mm in diameter
Memory capacity	262,000 measurements (standard)	Pressure range	Plastic housing: max. 400 m / 40 bar
Memory extension option	524,250 measurements	Battery life	10 years*
Memory management	Custom programming	Warranty	12 months
Temperature resolution	0.001°C (0.0018°F)	Data retention	25 years
Temperature accuracy	+/-0.025°C (0.045°F)		
Temperature range	-2°C to +40°C (28°F to 104°F) Outside ranges available upon request		
Temperature response time	Plastic housing: Time constant (67% of full value) is 18 sec.		

表 2.8 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
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 2.9 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP2.6 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.55	0.81	0.5	0.35	0.78	0.58	0.18	0.28	0.69	0.05	0.15	0.58
NorESM1-ME	0.35	0	0.74	0.16	0.69	0.75	0.51	0.54	0.57	-0.19	0.6	0.1
CSIRO-Mk3-6-0	0.4	0.88	1.35	1.6	1.28	1.09	1.25	0.84	0.68	1.01	1.15	0.88
MIROC5	0.86	1.09	0.26	0.25	0.51	0.85	0.45	0.47	0.57	0.38	0.52	0.92
CCSM4	0.36	0.69	0.87	0.22	0.39	0.31	0.3	0.45	0.41	0.11	0.72	1.06
RCP_2.6 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.13	0.92	1.32	1.04	1	0.66	0.38	0.51	1.34	1.21	0.24	0.41
NorESM1-ME	0.63	0.64	1.16	1.26	1.12	0.78	1.01	1.06	1.19	0.53	0.95	0.97
CSIRO-Mk3-6-0	1.3	1.43	1.59	1.83	2.17	1.77	2.04	1.49	1.14	1.94	1.4	1.81
MIROC5	1.42	1.54	1.34	1.33	1.27	1.24	1.12	0.9	0.96	1.24	1.27	1.71
CCSM4	0.81	1.12	0.74	0.76	0.53	0.55	0.44	0.67	0.49	-0.1	0.9	0.81
RCP_2.6 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.24	1.4	1.11	1.09	1.28	0.68	0.46	0.37	0.97	0.12	0.48	0.41
NorESM1-ME	0.61	0.44	1.07	0.86	1.27	0.95	0.94	0.93	0.73	0.35	0.74	0.86
CSIRO-Mk3-6-0	1.86	1.77	1.78	2.45	2.31	1.66	1.61	1.45	1.27	1.24	1.53	1.64
MIROC5	1.54	1.5	1.36	1.38	1.09	1.44	0.96	1.23	1.21	1.09	0.7	1.26
CCSM4	0.71	0.69	0.33	0.27	0.28	0.45	0.37	0.37	0.3	-0.29	0.98	0.92
RCP_2.6 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.24	1.31	1.87	1.17	1.16	0.87	0.87	0.75	1.07	0.65	0.64	0.85
NorESM1-ME	0.64	1.13	0.91	0.41	0.78	0.75	0.8	0.74	0.81	0.42	0.8	1.04
CSIRO-Mk3-6-0	1.4	1.42	2.12	2.05	2.01	1.73	1.74	1.45	1.14	0.92	1.5	1.85
MIROC5	2.02	1.63	1.53	1.27	0.92	1.18	0.9	1.2	1.15	0.62	0.62	1.81
CCSM4	0.75	1.09	0.88	0.76	0.38	0.41	0.42	0.55	0.54	0.09	0.78	1.36

表 2.10 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_4.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.54	1.06	1.4	1.35	1	0.79	0.79	0.77	0.95	0.79	0.84	0.54
NorESM1-ME	0.13	0.46	1.24	0.31	0.96	0.67	0.53	0.71	0.88	0.37	0.41	0.88
CSIRO-Mk3-6-0	0.39	0.7	1.09	1.34	1.33	0.84	1.02	0.6	0.65	0.99	0.86	0.66
MIROC5	0.6	0.49	0.5	0.57	0.61	0.91	0.53	0.65	0.64	0.16	0.53	0.91
CCSM4	0.63	-0.18	0.31	0.29	0.4	0.46	0.38	0.58	0.45	0.01	0.3	0.88
RCP_4.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.28	1.51	2.05	1.44	1.52	1.62	1.26	1.53	1.74	1.02	1.09	1.3
NorESM1-ME	0.76	1.07	1.81	1.22	1.61	1.38	1.5	1.42	1.59	1.02	0.88	0.86
CSIRO-Mk3-6-0	1.42	1.89	2.24	2.16	2.25	1.81	2.13	1.73	1.63	1.9	1.63	1.86
MIROC5	1.45	1.47	1.13	1.79	1.16	1.21	1.11	1.03	1.27	1.42	0.9	1.69
CCSM4	0.99	0.95	0.83	0.9	0.72	0.83	0.69	0.78	0.86	0.47	1.03	1.66
RCP_4.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.7	1.93	2.18	2.18	2.03	1.97	1.74	1.76	2.28	1.63	1.48	1.65
NorESM1-ME	1.02	1.1	1.82	1.21	1.75	1.59	1.55	1.76	1.76	0.8	1.4	1.41
CSIRO-Mk3-6-0	2.25	1.98	2.69	2.91	3.01	2.43	2.72	2.26	1.91	1.44	1.84	2.13
MIROC5	1.72	2.1	1.41	1.65	1.3	1.44	1.41	1.62	1.84	1.62	1.81	1.78
CCSM4	1.15	1.31	0.75	0.76	0.92	0.93	0.99	1.18	0.93	0.3	1.33	1.63
RCP_4.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	2.19	1.89	2.6	2.11	1.94	1.87	1.88	1.74	2.26	1.47	1.66	1.45
NorESM1-ME	1.26	1.02	1.98	1.57	1.88	1.52	1.54	1.55	1.56	1.37	1.46	1.59
CSIRO-Mk3-6-0	2.24	2.94	3.12	3.43	3.32	2.55	2.54	2.31	1.84	2.07	2.42	2.98
MIROC5	1.84	1.96	1.92	2.12	1.57	1.91	1.65	1.96	1.7	1.4	1.6	2.23
CCSM4	1.26	1.48	0.94	0.87	1.03	1.12	0.98	1.13	1.22	0.74	1.07	1.33

表 2.11 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_6.0 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.44	0.36	0.14	-0.16	0.4	0.51	0.32	0.31	0.67	-0.3	0.04	0.17
NorESM1-ME	0.28	1.04	1.27	0.2	0.66	0.47	0.45	0.42	0.58	-0.05	0.18	0.44
CSIRO-Mk3-6-0	0.42	0.61	0.96	1.05	1.09	0.71	0.85	0.61	0.41	0.68	0.34	0.92
MIROC5	0.64	0.7	0.18	0.66	0.11	0.48	0.4	0.41	0.42	0.19	0.33	0.99
CCSM4	0.33	0.75	0.36	0.22	0.52	0.45	0.54	0.43	0.56	0.16	1.17	1.03
RCP_6.0 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	0.88	0.74	0.99	0.53	0.8	0.74	0.71	0.56	0.78	-0.09	0.66	0.4
NorESM1-ME	0.43	0.39	0.81	0.27	1.06	0.81	0.67	0.76	0.92	0.41	1.12	1.38
CSIRO-Mk3-6-0	1.16	1.72	1.36	1.89	1.55	1.2	1.41	1.19	1.02	1.24	1.01	1.56
MIROC5	0.88	0.9	0.36	0.46	0.52	1.02	0.68	0.9	0.76	0.51	0.28	1.11
CCSM4	0.93	0.95	0.56	0.59	0.57	0.59	0.73	0.78	0.96	0.35	0.94	0.92
RCP_6.0 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.61	1.34	1.65	1.53	1.45	1.35	1.04	1.16	1.51	1.15	0.68	1.23
NorESM1-ME	0.77	1.54	1.91	1.27	1.53	1.42	1.43	1.36	1.55	0.87	1.4	1.16
CSIRO-Mk3-6-0	1.26	1.72	2.07	1.84	2.31	1.9	2.1	1.84	1.43	1.23	1.25	1.67
MIROC5	1.24	1.89	1.51	1.57	1.28	1.37	1.2	1.43	1.35	1.01	1.34	1.73
CCSM4	1.41	1.53	0.95	1	0.98	1.09	0.96	0.83	0.98	0.37	0.81	1.05
RCP_6.0 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.69	1.81	1.84	1.82	2.32	1.87	1.57	1.74	2.29	1.54	1.24	1.69
NorESM1-ME	1.24	1.84	2.21	1.49	2.07	1.85	1.71	2.01	2.29	2.02	1.96	1.83
CSIRO-Mk3-6-0	2.19	1.97	2.76	3.26	2.99	2.42	2.43	2.5	2.22	2.68	2.49	2.83
MIROC5	2.36	1.73	1.56	1.87	2.04	2.2	1.87	1.95	2.1	2.16	2.23	2.45
CCSM4	1.47	1.1	1.27	1.3	1.44	1.52	1.29	1.58	1.57	0.95	1.26	1.54

表 2.12 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.34	0.37	0.85	0.63	0.61	0.47	0.46	0.43	0.81	0.54	0.06	-0.02
NorESM1-ME	0.26	0.49	1.22	0.29	0.97	0.89	0.76	0.81	1.09	0.51	0.69	0.82
CSIRO-Mk3-6-0	1	0.46	0.9	1.22	1.39	1.15	1.14	0.92	0.92	1.45	1.29	1.33
MIROC5	0.9	0.57	0.55	0.32	0.69	0.8	0.71	0.49	0.51	0.39	0.46	1
CCSM4	0.78	0.39	0.46	0.2	0.37	0.59	0.37	0.62	0.52	-0.07	0.37	0.43
RCP_8.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.32	1.54	1.65	1.27	1.9	1.67	1.28	1.36	1.58	0.46	0.98	1.5
NorESM1-ME	1.3	1.97	1.85	1.31	1.67	1.45	1.37	1.49	1.6	1.41	1.5	1.92
CSIRO-Mk3-6-0	1.74	2.42	2.52	2.59	2.68	2.46	2.34	2.18	1.77	1.66	1.6	2.01
MIROC5	2	1.84	1.64	1.87	1.59	1.56	1.43	1.55	1.68	1.11	1.66	2.2
CCSM4	1.57	1.38	0.61	0.72	1.14	1	1.18	1.34	1.2	0.78	1.45	2.04
RCP_8.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	2.56	2.34	2.61	2.24	2.63	2.26	2.18	2.18	2.84	2.19	1.88	1.71
NorESM1-ME	1.69	1.71	2.89	2.19	2.38	2.42	2.3	2.3	2.46	1.6	1.53	1.91
CSIRO-Mk3-6-0	3.41	3.5	3.16	4.14	3.8	3.18	3.36	2.95	2.69	2.31	2.86	3.82
MIROC5	3.01	3	2.38	2.37	2.57	2.83	2.09	2.31	2.62	2.74	2.7	3.23
CCSM4	2.03	1.56	1.5	1.49	1.74	1.75	1.84	1.92	2.02	1.32	1.77	1.67
RCP_8.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	3.57	3.24	3.26	2.92	3.13	3.47	2.83	2.84	3.66	3.07	2.62	2.9
NorESM1-ME	2.5	3.39	3.35	2.8	3.51	3.17	2.93	3.1	3.35	3.07	2.79	3.21
CSIRO-Mk3-6-0	3.83	4.39	4.35	4.89	4.83	4.03	4.1	3.95	3.75	3.64	3.28	4.21
MIROC5	4.1	3.56	3.17	3.11	3.2	3.42	3.1	3.17	3.4	3.27	3.73	3.64
CCSM4	2.46	2.93	2.39	2.56	2.54	2.75	2.84	2.77	2.88	2.32	2.85	2.35

表 2.13 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_2.6 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	1.061	1.387	0.75	1.451	0.672	0.939	1.237	0.864	1.167	0.95	1.157	0.763
NorESM1-ME	0.977	1.148	0.949	0.887	0.92	1.348	1.436	1.025	1.014	0.582	1.184	0.75
CSIRO-Mk3-6-0	0.834	1.007	0.842	1.028	0.909	1.133	1.09	1.265	1.276	0.837	1.109	1.04
MIROC5	1.089	0.935	0.908	0.718	0.848	0.982	1.548	1.322	0.904	0.797	1.141	1.056
CCSM4	0.91	0.78	1.172	0.758	0.879	0.96	1.282	1.554	0.786	1.064	0.941	1.066
RCP_2.6 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.104	1.16	0.786	0.851	0.939	1.041	1.13	1.393	0.99	1.104	0.766	0.684
NorESM1-ME	1.063	1.312	1.167	0.822	1.123	1.23	1.086	0.709	1.329	1.148	1.105	1.286
CSIRO-Mk3-6-0	0.945	1.08	1.177	1.297	1.181	1.176	1.345	1.378	0.937	1.974	1.012	1.195
MIROC5	0.976	1.05	0.947	0.779	1.028	1.152	1.386	1.363	1.044	0.73	0.865	1.079
CCSM4	1.099	0.596	0.878	0.642	1.115	0.993	1.035	1.565	0.983	0.894	0.947	0.909
RCP_2.6 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.05	0.853	0.718	1.39	0.807	0.902	1.172	1.025	1.313	0.656	0.956	0.976
NorESM1-ME	0.971	1.08	1.202	0.729	1.038	1.279	1.092	0.98	1.458	0.871	1.037	0.812
CSIRO-Mk3-6-0	1.074	0.942	1.042	1.381	1.077	0.916	1.494	1.182	1.161	0.791	0.922	0.931
MIROC5	0.961	1.082	0.791	0.555	1.186	0.954	1.423	1.102	1.186	0.991	0.939	1.237
CCSM4	1.049	1.235	1.198	0.762	0.929	0.992	1.428	1.397	1.11	0.673	1.258	0.929
RCP_2.6 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.022	0.749	0.736	1.02	0.951	0.963	0.807	0.846	1.099	1.034	1.143	0.838
NorESM1-ME	0.876	1.3	0.808	0.644	1.008	1.039	1.028	1.184	1.254	1.149	0.904	1.129
CSIRO-Mk3-6-0	1.06	1.519	1.216	1.584	1.208	1.24	1.268	1.459	1.009	0.876	0.973	0.928
MIROC5	1.101	1.144	1.098	0.805	1.122	1.204	1.322	0.827	1.11	0.913	1.195	1.089
CCSM4	1.072	0.972	0.794	0.605	1.108	0.946	0.904	1.673	0.756	0.862	0.894	1.114

表 2.14 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_4.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.973	0.595	0.579	0.993	0.867	1.011	0.887	1.127	1.189	0.882	0.83	0.806
NorESM1-ME	0.813	1.06	1.041	0.993	1.138	1.273	1.15	0.746	0.934	1.039	1.026	0.955
CSIRO-Mk3-6-0	1.137	1.086	1.097	1.195	1.131	1.075	1.508	1.144	1.353	1.6	1.02	0.813
MIROC5	1.097	1.349	0.966	0.812	0.994	0.989	1.205	1.198	0.86	0.778	0.947	0.793
CCSM4	0.986	1.002	1.085	0.769	0.831	0.932	1.148	1.298	0.787	0.768	0.778	0.76
RCP_4.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.002	0.85	0.575	1.23	0.969	0.774	0.906	1.061	1.09	1.08	1.155	0.652
NorESM1-ME	0.814	0.799	1.16	1	1.114	1.149	0.763	0.799	0.74	1.221	1.195	0.824
CSIRO-Mk3-6-0	1.099	1.038	1.133	1.586	1.154	1.047	1.504	1.206	1.209	0.926	0.819	0.826
MIROC5	1.181	1.095	1.025	0.682	1.126	1.153	1.048	1.212	0.822	0.659	0.839	1.165
CCSM4	1.235	1.167	0.874	0.486	1.1	0.898	1.736	1.339	0.779	1.137	0.991	1.069
RCP_4.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.949	0.73	0.627	0.974	0.902	0.743	1.012	0.907	1.279	1.031	0.918	0.611
NorESM1-ME	0.768	1.353	1.093	0.932	1.041	1.076	1.08	0.853	1.052	1.817	0.869	1.041
CSIRO-Mk3-6-0	1.128	1.108	1.484	1.358	1.333	1.223	1.633	1.381	1.355	1.133	0.77	0.751
MIROC5	0.957	0.927	0.776	0.69	1.208	1.253	1.124	1.123	0.7	0.876	0.82	1.008
CCSM4	0.988	0.744	0.995	0.603	0.849	1.208	1.059	1.313	0.938	0.978	1.138	1.188
RCP_4.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.831	0.841	0.615	1.118	0.897	0.983	0.705	1.167	1.393	0.635	0.913	0.548
NorESM1-ME	0.825	1.114	0.955	1.152	1.128	1.25	1.077	0.864	1.195	1.088	1.055	0.965
CSIRO-Mk3-6-0	0.976	1.633	1.585	1.734	1.316	1.095	1.229	1.147	1.353	0.79	0.91	0.919
MIROC5	1.109	1.068	0.883	0.747	1.211	1.127	1.39	0.791	0.926	0.872	1.197	0.943
CCSM4	0.726	0.774	1.015	0.616	1.091	1.057	1.332	1.295	1.066	1.21	0.879	0.831

表 2.15 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_6.0 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	1.406	1.003	0.845	1.48	0.942	0.843	1.008	0.871	1.207	0.812	0.903	0.816
NorESM1-ME	0.961	1.565	0.893	1.093	0.908	0.99	1.154	0.788	0.877	0.849	1.007	0.895
CSIRO-Mk3-6-0	0.947	0.947	1.091	0.986	1.029	0.95	1.248	1.152	1.006	0.992	1.017	0.904
MIROC5	0.982	0.963	1.039	0.658	1.135	1.165	1.211	1.167	0.894	0.981	0.936	1.154
CCSM4	0.898	0.604	0.835	0.808	0.781	0.964	1.088	1.394	0.811	0.89	1.067	0.754
RCP_6.0 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.037	0.886	0.639	1.167	0.914	0.888	0.98	1.075	1.41	0.755	0.81	0.987
NorESM1-ME	0.882	1.27	0.75	0.693	0.898	1.149	0.931	0.73	1.055	1.048	1.413	1.068
CSIRO-Mk3-6-0	0.945	0.926	0.788	0.972	0.928	0.848	1.168	1.289	1.504	0.808	1.043	0.945
MIROC5	0.998	0.836	0.738	0.764	0.925	1.001	0.955	1.176	1.08	0.735	0.991	1.094
CCSM4	0.934	0.626	0.884	0.718	0.841	1.166	1.23	1.622	0.841	0.663	1.024	1.065
RCP_6.0 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.814	0.712	0.769	1.021	0.968	0.807	1.057	1.115	1.093	0.688	0.977	0.792
NorESM1-ME	0.74	0.806	1.128	1.102	1.167	1.274	1.056	0.885	0.883	0.844	1.059	0.717
CSIRO-Mk3-6-0	1.055	1.07	0.894	1.151	0.953	1.168	1.471	0.942	1.278	0.866	0.965	0.842
MIROC5	0.919	1.034	0.867	0.605	1.081	1.074	1.007	1.001	1.073	1.202	1.106	1.104
CCSM4	0.94	0.832	0.975	0.667	0.81	0.914	1.258	1.891	0.799	0.867	0.835	0.662
RCP_6.0 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.78	0.99	0.727	0.898	0.718	0.877	0.987	1.027	1.402	0.773	0.758	0.432
NorESM1-ME	0.767	0.94	1.011	0.992	1.103	1.239	1.021	0.597	0.58	1.384	1.033	0.989
CSIRO-Mk3-6-0	1.067	1.596	1.286	1.329	1.249	1.138	1.121	1.21	1.327	0.946	0.911	0.93
MIROC5	1.18	0.861	0.977	0.643	1.135	0.989	1.149	1.125	0.799	0.985	1.01	1.148
CCSM4	0.846	0.657	0.766	0.518	0.912	1.042	1.291	1.822	0.822	1.075	0.883	0.865

表 2.16 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬思源氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.77	0.949	0.628	1.062	0.98	0.823	1.165	0.914	1.175	0.806	0.951	0.689
NorESM1-ME	0.776	0.76	1.153	0.849	0.919	1.024	1.108	0.842	1.159	1.095	1.169	0.913
CSIRO-Mk3-6-0	0.898	0.881	0.869	1.114	1.175	1.236	1.155	1.031	1.44	1.622	1.009	0.884
MIROC5	1.018	0.945	0.761	0.606	0.988	1.24	1.357	1.66	1.066	0.759	0.898	0.993
CCSM4	0.874	0.925	1.126	0.533	0.785	0.998	1.364	1.495	0.988	0.811	0.836	0.911
RCP_8.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.177	0.667	0.597	0.933	0.826	0.695	0.853	0.977	1.204	0.743	0.774	0.686
NorESM1-ME	0.911	0.954	1.012	0.629	1.096	1.219	1.082	0.74	1.019	1.03	1.032	1.266
CSIRO-Mk3-6-0	0.733	0.919	1.334	1.649	1.303	1.297	1.61	1.084	1.32	0.869	0.842	0.811
MIROC5	1.153	1.079	0.796	0.628	1.02	1.128	0.919	0.939	1.229	1.118	1.049	1.074
CCSM4	1.144	0.67	0.935	0.468	0.666	0.756	1.211	1.765	0.801	0.731	0.933	0.87
RCP_8.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.927	1.204	0.885	0.799	0.751	0.823	0.877	0.942	1.164	0.795	0.724	0.466
NorESM1-ME	0.798	0.814	0.867	0.667	1.174	1.187	1.536	0.861	0.795	1.209	0.924	0.825
CSIRO-Mk3-6-0	1.168	1.697	1.533	1.557	1.426	1.146	1.249	1.234	1.699	0.952	0.872	1.271
MIROC5	1.049	1.121	0.793	0.873	1.186	0.88	1.403	1.004	1.035	0.801	0.987	1.156
CCSM4	0.925	0.698	0.694	0.582	1.149	0.932	0.991	1.507	1.23	0.829	0.855	0.721
RCP_8.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.96	0.427	0.568	0.898	0.858	0.699	1.169	1.143	1.403	0.907	0.44	0.349
NorESM1-ME	0.776	0.864	0.803	1.314	1.128	1.901	1.012	0.742	1.055	1.127	1.148	0.99
CSIRO-Mk3-6-0	1.177	1.422	1.625	2.002	1.438	1.656	1.25	0.997	1.016	1.016	0.645	0.7
MIROC5	1.212	0.928	0.885	0.677	1.293	0.873	1.094	1.22	0.835	0.88	1.114	1.121
CCSM4	0.755	1.071	0.801	0.72	1.053	1.472	1.121	2.248	0.781	0.807	0.665	0.697

表 2.17 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_2.6 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.58	0.84	0.52	0.36	0.79	0.58	0.2	0.29	0.67	0.04	0.16	0.6
NorESM1-ME	0.36	0.02	0.74	0.16	0.7	0.75	0.52	0.55	0.57	-0.16	0.61	0.12
CSIRO-Mk3-6-0	0.42	0.89	1.35	1.59	1.28	1.09	1.25	0.85	0.66	1.01	1.16	0.88
MIROC5	0.88	1.07	0.28	0.27	0.54	0.86	0.46	0.51	0.57	0.39	0.49	0.93
CCSM4	0.37	0.7	0.87	0.22	0.42	0.32	0.34	0.46	0.43	0.12	0.74	1.06
RCP_2.6 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.15	0.96	1.34	1.06	1.01	0.66	0.41	0.53	1.34	1.19	0.24	0.43
NorESM1-ME	0.65	0.66	1.15	1.25	1.14	0.79	1.02	1.06	1.19	0.55	0.97	0.99
CSIRO-Mk3-6-0	1.32	1.43	1.58	1.81	2.17	1.78	2.04	1.49	1.13	1.93	1.39	1.8
MIROC5	1.45	1.53	1.36	1.34	1.3	1.24	1.11	0.92	0.95	1.25	1.25	1.72
CCSM4	0.82	1.12	0.76	0.77	0.54	0.57	0.49	0.69	0.51	-0.1	0.92	0.82
RCP_2.6 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.28	1.44	1.12	1.11	1.3	0.69	0.47	0.39	0.97	0.12	0.48	0.43
NorESM1-ME	0.63	0.47	1.07	0.88	1.28	0.97	0.93	0.95	0.73	0.39	0.75	0.88
CSIRO-Mk3-6-0	1.88	1.76	1.77	2.45	2.31	1.67	1.61	1.46	1.27	1.24	1.53	1.65
MIROC5	1.57	1.5	1.4	1.42	1.13	1.44	0.97	1.26	1.22	1.12	0.65	1.26
CCSM4	0.74	0.7	0.33	0.26	0.31	0.46	0.39	0.39	0.32	-0.28	1	0.93
RCP_2.6 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.27	1.35	1.89	1.19	1.18	0.86	0.88	0.77	1.06	0.63	0.64	0.88
NorESM1-ME	0.66	1.16	0.91	0.41	0.8	0.77	0.81	0.75	0.81	0.45	0.82	1.04
CSIRO-Mk3-6-0	1.42	1.4	2.11	2.03	2	1.74	1.76	1.47	1.12	0.93	1.5	1.86
MIROC5	2.07	1.65	1.57	1.31	0.97	1.2	0.91	1.24	1.13	0.65	0.59	1.83
CCSM4	0.78	1.1	0.9	0.76	0.4	0.41	0.43	0.58	0.55	0.12	0.8	1.37

表 2.18 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_4.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.56	1.08	1.4	1.36	1.01	0.79	0.8	0.78	0.93	0.77	0.84	0.56
NorESM1-ME	0.15	0.48	1.23	0.31	0.98	0.68	0.53	0.72	0.88	0.4	0.41	0.91
CSIRO-Mk3-6-0	0.41	0.7	1.08	1.32	1.33	0.84	1.03	0.62	0.62	0.99	0.85	0.67
MIROC5	0.62	0.48	0.52	0.59	0.63	0.92	0.54	0.68	0.64	0.19	0.52	0.93
CCSM4	0.64	-0.17	0.32	0.28	0.42	0.48	0.4	0.6	0.47	0.02	0.31	0.89
RCP_4.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.31	1.54	2.07	1.45	1.53	1.62	1.28	1.53	1.73	1	1.09	1.32
NorESM1-ME	0.78	1.09	1.8	1.22	1.62	1.39	1.5	1.43	1.6	1.04	0.88	0.88
CSIRO-Mk3-6-0	1.44	1.88	2.24	2.16	2.25	1.82	2.14	1.74	1.63	1.9	1.63	1.87
MIROC5	1.47	1.46	1.15	1.81	1.19	1.23	1.14	1.06	1.29	1.43	0.88	1.7
CCSM4	1	0.95	0.84	0.91	0.74	0.83	0.73	0.8	0.87	0.49	1.03	1.66
RCP_4.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.72	1.98	2.2	2.19	2.03	1.97	1.75	1.77	2.27	1.62	1.48	1.67
NorESM1-ME	1.04	1.13	1.81	1.22	1.77	1.6	1.56	1.75	1.76	0.82	1.42	1.42
CSIRO-Mk3-6-0	2.26	1.97	2.68	2.91	3	2.45	2.72	2.27	1.89	1.44	1.83	2.14
MIROC5	1.75	2.12	1.45	1.7	1.34	1.45	1.43	1.66	1.86	1.63	1.82	1.79
CCSM4	1.17	1.31	0.76	0.76	0.94	0.96	1.04	1.2	0.95	0.3	1.33	1.64
RCP_4.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	2.22	1.94	2.6	2.12	1.96	1.87	1.89	1.76	2.24	1.48	1.66	1.47
NorESM1-ME	1.29	1.05	1.99	1.57	1.89	1.53	1.55	1.56	1.57	1.39	1.46	1.6
CSIRO-Mk3-6-0	2.26	2.91	3.11	3.42	3.31	2.57	2.56	2.33	1.82	2.07	2.41	3
MIROC5	1.9	1.97	1.95	2.16	1.6	1.92	1.63	2	1.69	1.44	1.58	2.24
CCSM4	1.29	1.49	0.96	0.87	1.06	1.13	0.97	1.15	1.23	0.75	1.08	1.34

表 2.19 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_6.0 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.45	0.39	0.15	-0.15	0.41	0.51	0.33	0.31	0.66	-0.31	0.03	0.19
NorESM1-ME	0.29	1.07	1.27	0.21	0.67	0.48	0.47	0.42	0.57	-0.01	0.19	0.45
CSIRO-Mk3-6-0	0.42	0.58	0.96	1.05	1.09	0.72	0.86	0.62	0.39	0.68	0.32	0.93
MIROC5	0.66	0.68	0.19	0.69	0.13	0.48	0.4	0.44	0.41	0.2	0.32	1
CCSM4	0.34	0.76	0.36	0.22	0.55	0.48	0.58	0.45	0.57	0.17	1.18	1.04
RCP_6.0 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	0.89	0.78	1	0.53	0.81	0.74	0.71	0.58	0.76	-0.09	0.65	0.42
NorESM1-ME	0.44	0.41	0.81	0.28	1.08	0.83	0.69	0.78	0.92	0.44	1.14	1.4
CSIRO-Mk3-6-0	1.18	1.7	1.36	1.9	1.55	1.21	1.42	1.22	1.01	1.23	1	1.57
MIROC5	0.91	0.91	0.39	0.49	0.56	1.04	0.69	0.93	0.76	0.54	0.25	1.12
CCSM4	0.95	0.96	0.57	0.59	0.61	0.59	0.77	0.8	0.98	0.37	0.95	0.94
RCP_6.0 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.64	1.37	1.66	1.56	1.46	1.35	1.04	1.17	1.51	1.15	0.68	1.25
NorESM1-ME	0.79	1.57	1.91	1.28	1.54	1.43	1.44	1.37	1.55	0.9	1.41	1.17
CSIRO-Mk3-6-0	1.28	1.71	2.08	1.82	2.31	1.9	2.11	1.86	1.42	1.22	1.24	1.68
MIROC5	1.27	1.9	1.52	1.61	1.31	1.4	1.22	1.46	1.34	1.02	1.3	1.73
CCSM4	1.43	1.53	0.95	1.02	1.01	1.11	0.97	0.86	0.98	0.38	0.82	1.06
RCP_6.0 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.72	1.85	1.86	1.83	2.34	1.87	1.58	1.75	2.29	1.52	1.24	1.72
NorESM1-ME	1.25	1.87	2.21	1.49	2.09	1.86	1.73	2.02	2.3	2.04	1.96	1.84
CSIRO-Mk3-6-0	2.22	1.96	2.76	3.25	2.98	2.43	2.41	2.52	2.22	2.67	2.5	2.85
MIROC5	2.39	1.71	1.58	1.92	2.09	2.22	1.89	1.99	2.11	2.18	2.22	2.47
CCSM4	1.49	1.11	1.3	1.31	1.48	1.54	1.3	1.61	1.6	0.96	1.28	1.54

表 2.20 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之溫度變化

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.37	0.4	0.86	0.65	0.62	0.47	0.47	0.45	0.79	0.53	0.05	0
NorESM1-ME	0.28	0.52	1.21	0.29	0.99	0.9	0.76	0.83	1.08	0.54	0.69	0.83
CSIRO-Mk3-6-0	1.03	0.46	0.9	1.22	1.39	1.15	1.15	0.94	0.9	1.44	1.29	1.34
MIROC5	0.92	0.56	0.58	0.34	0.71	0.8	0.7	0.53	0.49	0.39	0.43	1
CCSM4	0.78	0.39	0.46	0.2	0.41	0.6	0.37	0.64	0.52	-0.05	0.37	0.43
RCP_8.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.34	1.57	1.66	1.29	1.91	1.67	1.3	1.37	1.57	0.48	0.98	1.53
NorESM1-ME	1.33	1.99	1.85	1.31	1.69	1.45	1.35	1.51	1.6	1.44	1.52	1.93
CSIRO-Mk3-6-0	1.77	2.41	2.52	2.57	2.68	2.47	2.35	2.19	1.76	1.65	1.59	2.02
MIROC5	2.03	1.84	1.66	1.92	1.63	1.58	1.45	1.58	1.68	1.13	1.65	2.22
CCSM4	1.59	1.39	0.62	0.73	1.18	1.01	1.22	1.37	1.21	0.79	1.46	2.04
RCP_8.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	2.59	2.39	2.64	2.26	2.65	2.26	2.19	2.19	2.84	2.19	1.89	1.74
NorESM1-ME	1.72	1.74	2.89	2.21	2.4	2.43	2.3	2.3	2.47	1.64	1.53	1.93
CSIRO-Mk3-6-0	3.42	3.48	3.15	4.15	3.79	3.2	3.37	2.97	2.68	2.32	2.86	3.82
MIROC5	3.05	3.02	2.41	2.4	2.6	2.85	2.09	2.35	2.62	2.76	2.68	3.25
CCSM4	2.07	1.59	1.52	1.51	1.77	1.78	1.88	1.95	2.03	1.33	1.77	1.68
RCP_8.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	3.62	3.28	3.28	2.95	3.15	3.46	2.85	2.85	3.66	3.04	2.62	2.94
NorESM1-ME	2.51	3.43	3.36	2.81	3.53	3.18	2.95	3.11	3.36	3.11	2.8	3.23
CSIRO-Mk3-6-0	3.87	4.39	4.35	4.9	4.83	4.04	4.1	3.97	3.75	3.63	3.29	4.23
MIROC5	4.15	3.56	3.21	3.15	3.24	3.45	3.12	3.22	3.42	3.31	3.73	3.65
CCSM4	2.5	2.95	2.41	2.58	2.57	2.77	2.89	2.79	2.9	2.34	2.88	2.36

表 2.21 RCP2.6 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_2.6 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	1.075	1.396	0.741	1.438	0.682	0.938	1.232	0.862	1.142	0.952	1.144	0.762
NorESM1-ME	0.976	1.15	0.948	0.888	0.919	1.347	1.44	1.023	1.039	0.581	1.16	0.724
CSIRO-Mk3-6-0	0.836	1.014	0.842	1.026	0.909	1.119	1.086	1.265	1.298	0.84	1.094	1.041
MIROC5	1.104	0.935	0.903	0.716	0.85	0.98	1.531	1.313	0.907	0.817	1.124	1.062
CCSM4	0.909	0.781	1.175	0.76	0.884	0.969	1.286	1.556	0.783	1.045	0.938	1.092
RCP_2.6 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.116	1.165	0.785	0.853	0.95	1.041	1.114	1.387	0.994	1.112	0.756	0.677
NorESM1-ME	1.063	1.318	1.17	0.818	1.121	1.224	1.089	0.707	1.399	1.148	1.087	1.277
CSIRO-Mk3-6-0	0.948	1.077	1.181	1.307	1.181	1.168	1.332	1.395	0.944	1.991	1.009	1.204
MIROC5	0.984	1.047	0.944	0.783	1.033	1.157	1.34	1.357	1.056	0.736	0.838	1.096
CCSM4	1.099	0.596	0.878	0.642	1.124	0.994	1.039	1.566	0.987	0.872	0.95	0.913
RCP_2.6 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	1.065	0.861	0.709	1.395	0.819	0.903	1.173	1.023	1.312	0.677	0.936	0.965
NorESM1-ME	0.974	1.074	1.207	0.731	1.036	1.272	1.101	0.991	1.52	0.855	1.029	0.797
CSIRO-Mk3-6-0	1.089	0.936	1.043	1.384	1.076	0.906	1.501	1.2	1.173	0.8	0.918	0.947
MIROC5	0.964	1.089	0.787	0.554	1.197	0.953	1.395	1.096	1.21	1.015	0.929	1.235
CCSM4	1.047	1.269	1.195	0.762	0.933	0.998	1.418	1.388	1.135	0.655	1.253	0.938
RCP_2.6 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	1.036	0.755	0.736	1.028	0.966	0.966	0.805	0.846	1.111	1.054	1.129	0.833
NorESM1-ME	0.879	1.303	0.803	0.644	1.006	1.033	1.032	1.191	1.305	1.136	0.895	1.118
CSIRO-Mk3-6-0	1.08	1.536	1.226	1.584	1.201	1.224	1.272	1.479	1.027	0.882	0.973	0.93
MIROC5	1.113	1.148	1.098	0.812	1.129	1.193	1.299	0.823	1.127	0.926	1.174	1.108
CCSM4	1.083	0.984	0.793	0.601	1.114	0.943	0.913	1.649	0.742	0.846	0.901	1.131

表 2.22 RCP4.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_4.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.968	0.584	0.575	0.991	0.874	1.003	0.885	1.139	1.167	0.891	0.807	0.798
NorESM1-ME	0.807	1.05	1.044	0.995	1.139	1.263	1.158	0.744	0.959	1.035	1.023	0.956
CSIRO-Mk3-6-0	1.156	1.079	1.101	1.187	1.126	1.065	1.496	1.151	1.411	1.591	1.015	0.803
MIROC5	1.118	1.35	0.966	0.815	1	0.986	1.184	1.188	0.842	0.782	0.935	0.802
CCSM4	0.987	1.009	1.088	0.765	0.834	0.934	1.142	1.293	0.764	0.752	0.777	0.756
RCP_4.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.004	0.859	0.566	1.233	0.979	0.763	0.91	1.071	1.092	1.085	1.143	0.641
NorESM1-ME	0.805	0.795	1.169	1.011	1.115	1.145	0.776	0.802	0.755	1.203	1.171	0.816
CSIRO-Mk3-6-0	1.107	1.046	1.135	1.596	1.154	1.044	1.5	1.224	1.227	0.929	0.81	0.816
MIROC5	1.193	1.099	1.021	0.681	1.128	1.154	1.057	1.212	0.816	0.677	0.821	1.184
CCSM4	1.245	1.193	0.87	0.483	1.098	0.906	1.722	1.316	0.767	1.116	0.989	1.095
RCP_4.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.959	0.732	0.622	0.97	0.908	0.739	1.011	0.918	1.32	1.069	0.905	0.596
NorESM1-ME	0.757	1.368	1.091	0.941	1.041	1.07	1.084	0.865	1.086	1.825	0.86	1.033
CSIRO-Mk3-6-0	1.148	1.114	1.506	1.353	1.329	1.196	1.61	1.403	1.394	1.124	0.762	0.753
MIROC5	0.965	0.928	0.771	0.686	1.216	1.243	1.113	1.086	0.705	0.886	0.814	1.01
CCSM4	0.996	0.749	0.988	0.596	0.856	1.205	1.057	1.309	0.929	0.951	1.145	1.188
RCP_4.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.838	0.854	0.612	1.118	0.908	0.991	0.711	1.164	1.399	0.65	0.898	0.542
NorESM1-ME	0.813	1.122	0.957	1.155	1.128	1.243	1.084	0.866	1.243	1.095	1.049	0.962
CSIRO-Mk3-6-0	0.984	1.664	1.604	1.728	1.309	1.083	1.229	1.176	1.383	0.775	0.897	0.931
MIROC5	1.124	1.076	0.875	0.755	1.212	1.125	1.376	0.792	0.932	0.886	1.18	0.938
CCSM4	0.718	0.782	1.012	0.619	1.096	1.063	1.339	1.284	1.073	1.195	0.871	0.834

表 2.23 RCP6.0 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_6.0 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	1.438	1.013	0.837	1.488	0.954	0.85	0.998	0.871	1.222	0.822	0.89	0.806
NorESM1-ME	0.957	1.573	0.892	1.096	0.909	0.979	1.157	0.786	0.928	0.844	0.993	0.874
CSIRO-Mk3-6-0	0.949	0.938	1.095	0.982	1.022	0.941	1.233	1.16	1.027	0.985	1.009	0.896
MIROC5	0.99	0.971	1.034	0.657	1.143	1.16	1.197	1.161	0.909	0.984	0.93	1.162
CCSM4	0.895	0.604	0.825	0.811	0.786	0.961	1.091	1.374	0.812	0.874	1.071	0.729
RCP_6.0 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.054	0.893	0.63	1.166	0.918	0.893	0.989	1.071	1.442	0.778	0.792	0.983
NorESM1-ME	0.88	1.273	0.746	0.7	0.895	1.148	0.931	0.729	1.117	1.044	1.396	1.063
CSIRO-Mk3-6-0	0.942	0.93	0.783	0.972	0.928	0.839	1.172	1.315	1.563	0.804	1.03	0.959
MIROC5	1.002	0.825	0.736	0.756	0.93	0.997	0.944	1.161	1.091	0.748	0.998	1.112
CCSM4	0.931	0.628	0.882	0.716	0.847	1.16	1.231	1.633	0.828	0.646	1.018	1.087
RCP_6.0 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.809	0.725	0.767	1.017	0.982	0.808	1.065	1.115	1.087	0.711	0.973	0.774
NorESM1-ME	0.728	0.796	1.127	1.105	1.164	1.262	1.059	0.883	0.895	0.845	1.053	0.697
CSIRO-Mk3-6-0	1.052	1.083	0.898	1.144	0.95	1.153	1.455	0.946	1.299	0.868	0.958	0.851
MIROC5	0.919	1.039	0.86	0.604	1.086	1.074	1.001	0.991	1.073	1.232	1.105	1.111
CCSM4	0.945	0.839	0.974	0.667	0.806	0.916	1.257	1.909	0.797	0.856	0.838	0.648
RCP_6.0 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.786	1.019	0.722	0.902	0.73	0.893	1.009	1.037	1.436	0.787	0.75	0.405
NorESM1-ME	0.759	0.936	1.009	0.989	1.104	1.229	1.028	0.599	0.6	1.389	1.033	0.978
CSIRO-Mk3-6-0	1.081	1.609	1.302	1.327	1.242	1.125	1.113	1.212	1.379	0.944	0.918	0.933
MIROC5	1.188	0.859	0.973	0.646	1.14	0.986	1.131	1.103	0.814	0.996	1.007	1.151
CCSM4	0.842	0.665	0.764	0.517	0.915	1.052	1.284	1.824	0.832	1.06	0.865	0.86

表 2.24 RCP8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬桃山氣象測站 2021-2100 年之降雨變化比例

模式	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0.765	0.963	0.622	1.07	0.994	0.824	1.153	0.915	1.143	0.815	0.951	0.676
NorESM1-ME	0.767	0.749	1.151	0.848	0.912	1.013	1.11	0.845	1.213	1.087	1.162	0.903
CSIRO-Mk3-6-0	0.9	0.886	0.867	1.117	1.173	1.234	1.151	1.037	1.453	1.634	1.008	0.897
MIROC5	1.031	0.943	0.753	0.607	0.992	1.241	1.338	1.643	1.075	0.763	0.891	1.002
CCSM4	0.875	0.948	1.131	0.534	0.789	1.002	1.361	1.486	0.997	0.8	0.837	0.934
RCP_8.5 (2041-2060)												
HadGEM2-AO	1.19	0.666	0.597	0.933	0.847	0.692	0.855	0.982	1.2	0.773	0.773	0.676
NorESM1-ME	0.903	0.954	1.015	0.63	1.095	1.217	1.089	0.743	1.059	1.018	1.032	1.268
CSIRO-Mk3-6-0	0.72	0.929	1.35	1.64	1.296	1.28	1.602	1.087	1.321	0.863	0.841	0.808
MIROC5	1.169	1.075	0.791	0.624	1.022	1.127	0.915	0.93	1.256	1.141	1.03	1.093
CCSM4	1.152	0.676	0.935	0.464	0.672	0.767	1.207	1.782	0.81	0.719	0.93	0.882
RCP_8.5 (2061-2080)												
HadGEM2-AO	0.935	1.227	0.889	0.797	0.753	0.821	0.883	0.962	1.199	0.801	0.722	0.449
NorESM1-ME	0.783	0.802	0.868	0.667	1.171	1.177	1.539	0.861	0.819	1.216	0.913	0.824
CSIRO-Mk3-6-0	1.186	1.721	1.548	1.558	1.414	1.135	1.237	1.243	1.773	0.958	0.853	1.289
MIROC5	1.055	1.128	0.785	0.868	1.194	0.881	1.36	1.005	1.054	0.817	0.983	1.181
CCSM4	0.931	0.695	0.689	0.581	1.157	0.929	0.998	1.496	1.251	0.807	0.84	0.697
RCP_8.5 (2081-2100)												
HadGEM2-AO	0.988	0.423	0.566	0.897	0.866	0.694	1.172	1.15	1.449	0.919	0.418	0.329
NorESM1-ME	0.767	0.87	0.796	1.31	1.126	1.878	1.015	0.739	1.141	1.111	1.138	0.977
CSIRO-Mk3-6-0	1.189	1.442	1.639	1.995	1.436	1.626	1.245	1.021	1.038	1.021	0.631	0.687
MIROC5	1.233	0.928	0.885	0.677	1.297	0.867	1.069	1.195	0.834	0.908	1.11	1.128
CCSM4	0.746	1.087	0.799	0.724	1.06	1.471	1.115	2.246	0.778	0.79	0.671	0.672

表 3.1 本研究蒐集衛星影像對應月分之 SPI 指標與有勝溪斷流之關係

時間	SPI1	SPI3	SPI6	SPI9	SPI12	觀測方式	斷流情形
1999 年 4 月	-0.51	-0.71	0.52	1.28	0.77	航空照片	未斷流
2001 年 10 月	-0.93	0.84	1.1	0.98	1.31	航空照片	未斷流
2003 年 3 月	-0.97	-1.61	-1.11	-1.44	-1.96	航空照片	斷流
2004 年 12 月	1.6	0.03	0.25	-0.04	0.04	衛星影像	未斷流
2005 年 7 月	1.48	1.6	1.76	1.64	1.17	衛星影像	未斷流
2006 年 1 月	1.04	0.23	0.78	1.44	1.51	衛星影像	未斷流
2006 年 7 月	0.88	1.77	1.67	1.57	1.49	衛星影像	未斷流
2006 年 11 月	0.44	-0.1	0.48	0.81	0.73	衛星影像	未斷流
2007 年 1 月	1.39	1.19	-0.01	0.97	0.95	衛星影像	未斷流
2007 年 7 月	-1.15	-0.7	-0.71	-0.1	-0.4	衛星影像	未斷流
2007 年 10 月	1.57	1.92	1.23	1	1.14	航空照片	未斷流
2008 年 6 月	-1.28	-1.11	-0.68	0.9	1.09	衛星影像	未斷流
2008 年 12 月	-0.25	-0.56	2.01	1.64	1.44	衛星影像	未斷流
2009 年 1 月	-1.11	-0.62	1.24	1.69	1.43	衛星影像	未斷流
2009 年 12 月	-0.86	0.19	-0.43	-0.63	-0.65	衛星影像	未斷流
2010 年 1 月	-0.16	-1.14	-0.02	-0.82	-0.61	衛星影像	未斷流
2010 年 12 月	-0.37	0.23	-0.77	-0.82	-0.78	衛星影像	未斷流
2011 年 1 月	0.46	-0.16	-0.61	-0.85	-0.76	衛星影像	未斷流
2011 年 6 月	-0.98	-0.34	-0.5	-0.2	-0.96	衛星影像	未斷流
2011 年 12 月	1.49	1.57	0.23	-0.01	-0.1	衛星影像	未斷流
2012 年 1 月	0.7	1.73	0.72	0.19	-0.09	衛星影像	未斷流
2012 年 7 月	1.1	1.31	1.16	1.64	1.13	衛星影像	未斷流
2012 年 8 月	1.8	2.22	1.97	2.06	1.96	航空照片	未斷流
2012 年 10 月	-1.45	0.45	1.05	0.95	1.24	衛星影像	斷流
2013 年 1 月	0.4	0.15	0.39	0.95	0.87	衛星影像	斷流
2013 年 3 月	-1.31	-1.14	-1.23	0.5	0.74	航空照片	斷流
2013 年 7 月	-0.14	-0.33	-0.38	-0.32	0.06	衛星影像	斷流
2013 年 8 月	-0.23	-0.83	-0.35	-0.4	-1.04	航空照片	斷流
2013 年 11 月	-0.43	0.13	-0.6	-0.3	-0.34	衛星影像	未斷流
2013 年 12 月	-0.78	-0.58	-0.43	-0.32	-0.5	衛星影像	斷流
2014 年 1 月	-2.38	-1.52	-0.51	-0.76	-0.71	衛星影像	斷流
2014 年 4 月	-0.64	-0.26	-1.33	-0.62	-0.86	衛星影像	斷流
2014 年 10 月	-0.58	-1.98	-1.06	-0.97	-1.22	衛星影像	斷流
2015 年 1 月	-0.73	-0.22	-1.66	-1.07	-0.99	衛星影像	斷流
2015 年 3 月	0.01	-0.94	-0.77	-1.31	-1.37	衛星影像	斷流
2015 年 4 月	-1.11	-1.22	-0.99	-1.99	-1.4	衛星影像	斷流
2015 年 12 月	-0.71	-1.16	-0.49	-1.13	-1.17	衛星影像	斷流
2016 年 7 月	-0.17	-0.54	-0.25	-0.25	-0.15	現地調查(水溫計)	斷流
2016 年 8 月	-0.74	-1	-0.69	-0.43	-0.76	現地調查(水溫計)	斷流
2016 年 9 月	1.44	0.47	0.13	0.5	-0.01	現地調查	斷流
2016 年 11 月	1	1.3	0.53	0.48	0.5	現地調查	未斷流

2016年12月	0.17	0.54	0.58	0.29	0.59	現地調査(水溫計)	斷流
2017年1月	-0.43	0.53	0.78	0.29	0.35	現地調査(水溫計)	斷流
2017年2月	-0.1	-0.35	1.23	0.4	0.37	現地調査(水溫計)	斷流
2017年3月	0.38	-0.2	0.34	0.49	0.19	現地調査(水溫計)	斷流
2017年4月	0.35	0.11	0.39	0.75	0.28	現地調査(水溫計)	斷流
2017年5月	0.21	0.32	-0.03	1.26	0.44	現地調査(水溫計)	斷流
2017年6月	0.56	0.43	0.15	0.42	0.55	現地調査(水溫計)	斷流
2017年7月	-0.86	-0.45	-0.36	-0.15	0.35	現地調査(水溫計)	斷流
2017年8月	-1.71	-1.94	-1.28	-1.18	0.11	現地調査(水溫計)	斷流
2017年9月	-1.57	-2.61	-1.8	-1.61	-1	現地調査(水溫計)	斷流

表 3.2 有勝溪斷流處流量量測值[cms]

日期\斷面	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5
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	24°23'14.36"N 121°20'49.01" E
2016/7/1	0.17	0.08	0.03	0.06	無觀測
2016/7/14	0.26	0.17	0.15	0.15	無觀測
2016/8/10	0.15	0.026	斷流	無流動水	無觀測
2016/9/7	0.18	0.14	0.065	0.11	無觀測
2016/11/9	0.16	0.067	河川改道	0.079	無觀測
2016/12/6	0.24	0.07	0.04	0.06	0.13
2017/1/19	0.04	斷流	斷流	斷流	0.015
2017/3/3	0.04	斷流	斷流	斷流	0.005
2017/4/13	資料遺失	資料遺失	資料遺失	資料遺失	資料遺失
2017/5/12	0.15	斷流	斷流	斷流	0.003
2017/6/26	0.28	0.12	0.03	0.14	0.25
2017/8/18	0.20	斷流	斷流	0.03	0.086
2017/10/27	0.37	0.096	河流改道	0.20	0.33

表 3.3 七家灣溪斷流處流量量測值[cms]

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
2016/12/5	0.79	0.63
2017/1/19	0.40	0.31
2017/3/3	0.23	0.09
2017/4/13	資料遺失	資料遺失
2017/5/12	3.98	2.79
2017/6/26	無觀測	4.57
2017/8/18	1.34	1.97

表 3.4 桃山北溪斷流處流量量測值[cms]

日期\斷面	T-2	T-3
坐標	24°23'54.88"N 121°18'32.45"E	24°23'51.92"N 121°18'33.02"E
2016/7/15	0.46	0.35
2016/9/8	0.19	0.18
2016/11/10	0.46	0.33
2016/12/5	0.12	0.10
2017/1/19	0.05	0.08
2017/3/3	0.004	斷流
2017/4/13	資料遺失	0.46
2017/5/12	0.75	0.52
2017/6/26	1.62	1.10
2017/8/18	0.42	0.29
2017/10/27	0.20	0.20

表 3.5 VS2DH 模式率定結果 (水力傳導係數不隨時間改變)

Upstream – Well A1							
Well	Time	K	K _T	C _s	n	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 9/13	5.57E-03	2.84	2.46 x 10 ⁶	0.39	1.46	632.78 (0.332)
1"	7/15 – 9/13	1.80E-02	2.17	2.07 x 10 ⁶	0.4	1.51	8208.92 (0.488)
Midstream – Well B1							
	Time	K	K _T	C _s	n	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 9/13	2.72E-02	1.48	2.55 x 10 ⁶	0.38	1.38	7389.4 (1.180)
1"	7/15 – 9/13	5.55E-02	1.33	2.70 x 10 ⁶	0.41	1.54	49687.8 (1.200)
Downstream – Well C1							
	Time	K	K _T	C _s	N	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 9/13	1.06E-02	2.25	2.51 x 10 ⁶	0.38	1.45	12483.3 (1.474)
1"	7/15 – 9/13	2.34E-02	2.69	3.11 x 10 ⁶	0.40	1.52	80973.5 (2.094)

*K = hydraulic conductivity; K_T = thermal conductivity; C_s = specific heat capacity; n= porosity; DL = dispersivity; SSE= sum of square error; RMSE = root mean square error

表 3.6 VS2DH 模式率定結果 (水力傳導係數隨時間改變)

Upstream – Well A1							
Well	Time	K	K _T	C _s	n	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 8/12	4.68E-03	2.42	2.28 x 10 ⁶	0.40	1.22	164.30 (0.247)
1"	7/15 – 8/12	1.22E-02	2.03	2.03 x 10 ⁶	0.38	1.34	3600.02 (0.471)
2"	8/12 – 9/13	8.42E-03	2.87	3.60 x 10 ⁶	0.40	1.53	202.53 (0.258)
1"	8/12 – 9/13	2.51E-02	2.69	2.18 x 10 ⁶	0.42	1.52	4164.52 (0.477)
Midstream – Well B1							
	Time	K	K _T	C _s	n	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 8/1	3.50E-02	1.30	1.95 x 10 ⁶	0.40	1.37	1500.5 (0.945)
1"	7/15 – 8/1	8.00E-02	1.16	2.04 x 10 ⁶	0.42	1.45	5678.80 (0.751)
2"	8/12 – 9/1	1.92E-02	1.49	2.46 x 10 ⁶	0.35	1.41	1127.9 (0.829)
1"	8/12 – 9/1	2.72E-02	1.73	2.74 x 10 ⁶	0.39	1.58	2885.23 (0.500)
Downstream – Well C1							
	Time	K	K _T	C _s	n	DL	SSE (RMSE)
2"	7/15 – 7/27	1.72E-02	2.20	2.44 x 10 ⁶	0.42	1.41	1791.33 (0.214)
1"	7/15 – 7/27	5.50E-02	2.49	2.78 x 10 ⁶	0.40	1.50	286.04 (0.204)
2"	8/12 – 8/30	7.95E-03	2.32	2.56 x 10 ⁶	0.37	1.47	1748.04 (0.215)
1"	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

*K = hydraulic conductivity; K_T = thermal conductivity; C_s = specific heat capacity; n= porosity; DL = dispersivity; SSE= sum of square error; RMSE = root mean square error

表 3.7 有勝溪 SWAT 模式參數檢定表

Parameter	Method	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Mar_value
CN2.mgt	relative	12	-0.44	-0.46	-0.35
ALPHA_BF.gw	replace	5	0.84	0.48	0.86
GW_DELAY.gw	replace	6	22.37	17.79	30.89
GWQMN.gw	replace	9	1361.31	817.93	1386.62
ESCO.bsn	replace	13	0.61	0.51	0.73
REVAPMN.gw	replace	14	287.01	277.72	424.01
RCHRG_DP.gw	replace	11	0.01	0.00	0.12
GW_REVAP.gw	replace	4	0.11	0.08	0.15
SURLAG.bsn	replace	7	19.02	16.75	19.30
SHALLST.gw	replace	10	3321.07	3091.63	4030.02
CH_K2.rte	replace	8	651.75	509.52	705.56
CH_D.rte	replace	1	0.95	0.00	2.76
TRNSRCN.bsn	replace	3	0.20	0.09	0.23
ALPHA_BNK.rte	replace	2	0.40	0.23	0.47

表 3.8 七家灣溪 SWAT 模式參數檢定表

Parameter	Method	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Mar_value
CN2.mgt	relative	1	-0.298	-0.300	-0.250
ALPHA_BF.gw	replace	4	0.217	0.208	0.626
GW_DELAY.gw	replace	3	2.753	0.000	19.316
GWQMN.gw	replace	9	96.750	0.000	500.000
GW_REVAP.gw	replace	10	0.041	0.032	0.196
REVAPMN.gw	replace	8	361.687	157.236	381.537
RCHRG_DP.gw	replace	2	0.005	0.000	0.270
SHALLST.gw	replace	11	2526.175	1610.033	3373.541
CH_D.rte	replace	12	3.209	1.754	5.264
CH_K2.rte	replace	5	24.781	0.000	35.125
ALPHA_BNK.rte	replace	6	0.441	0.410	0.803
GW_SPYLD.gw	replace	7	0.400	0.327	0.400

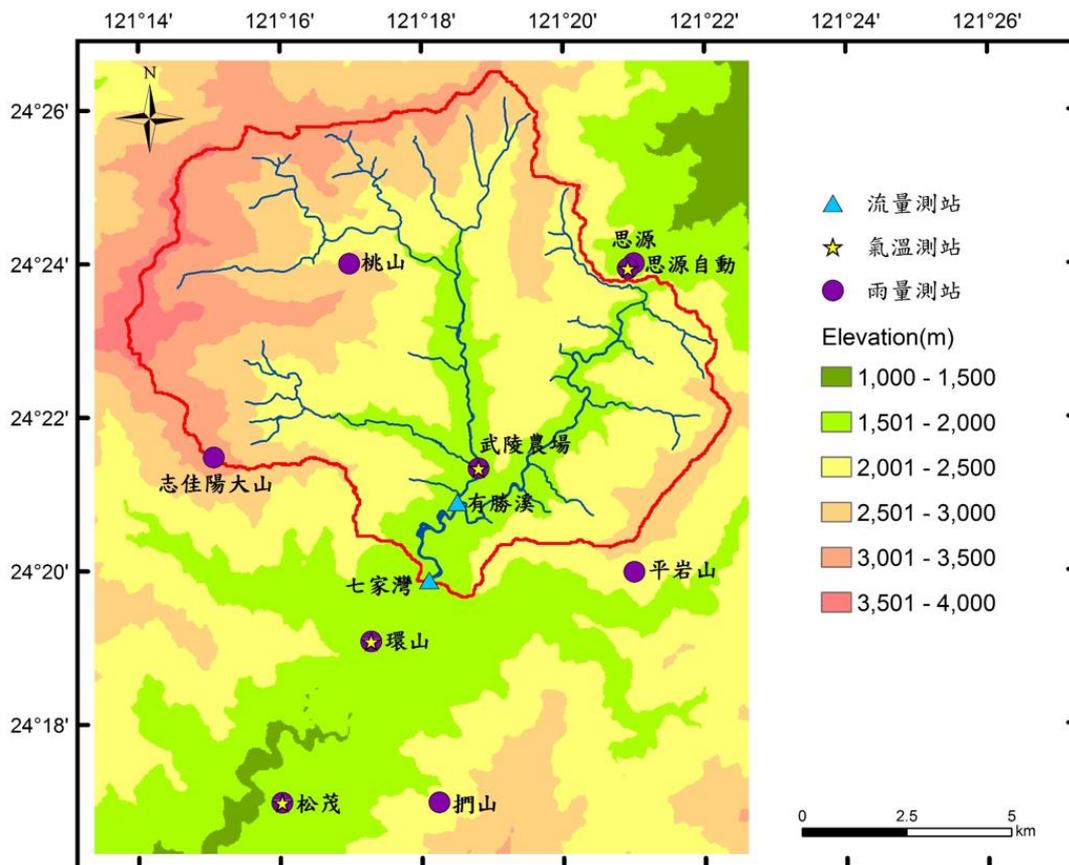


圖 2.1 各氣象及流量測站位置圖

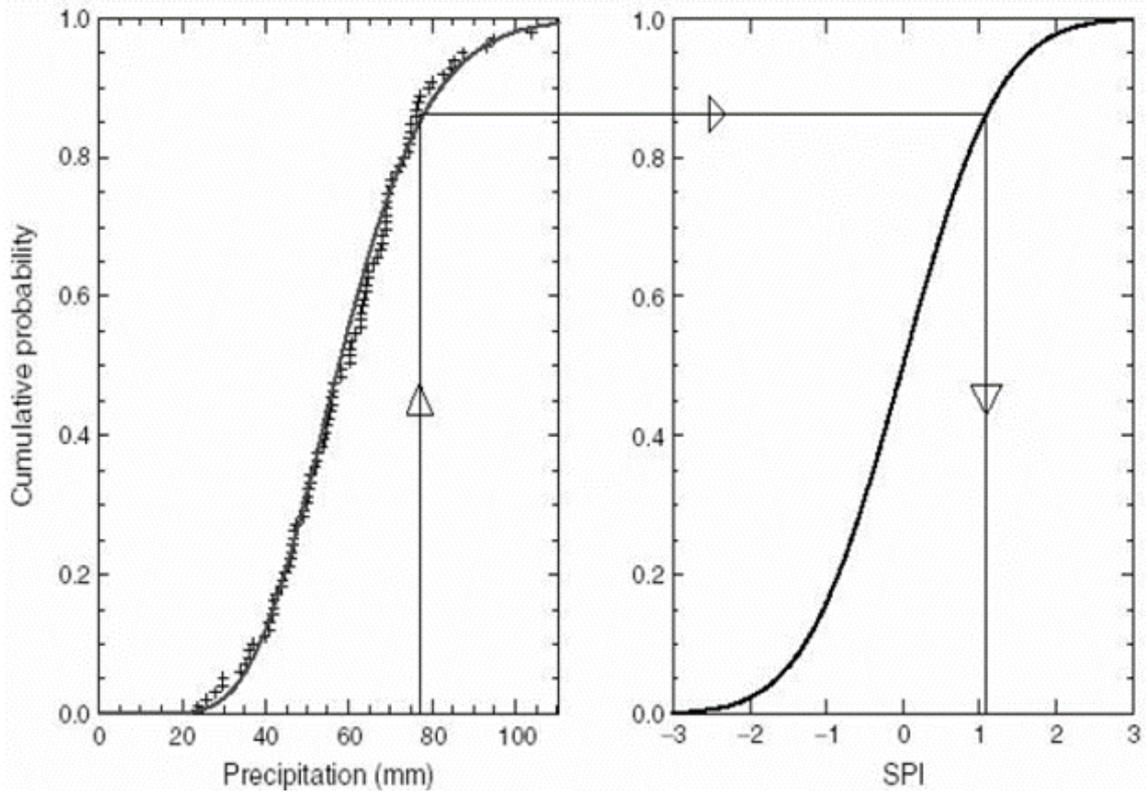


圖 2.2 求取 SPI 過程圖(摘錄自 Benjamin,2012)

Standardized Precipitation Index

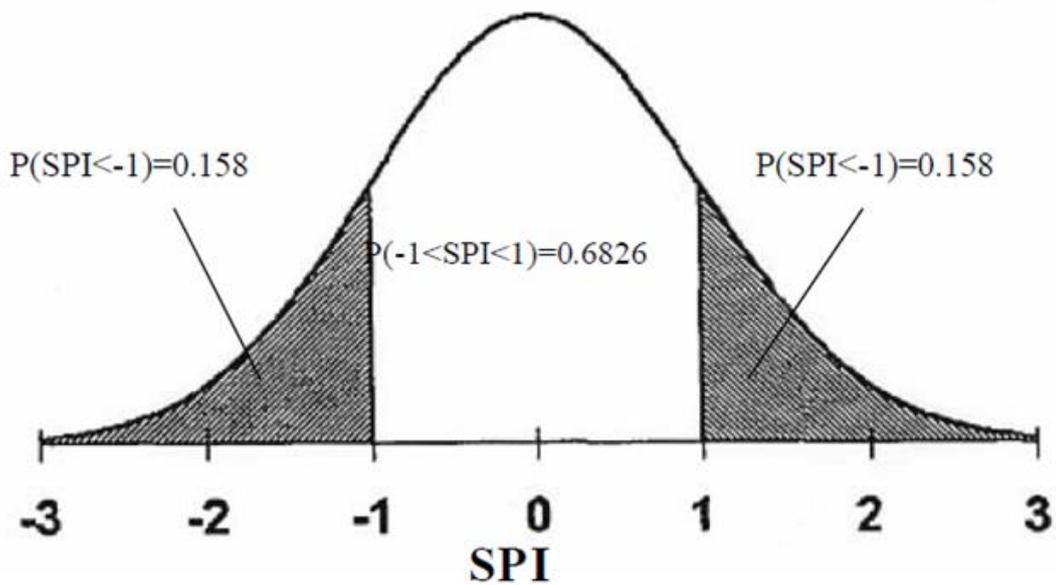


圖 2.3 標準化降雨指標機率分佈圖(摘錄自經濟部水資源局,1999)



圖 2.4 於復育中心旁水井進行水位監測

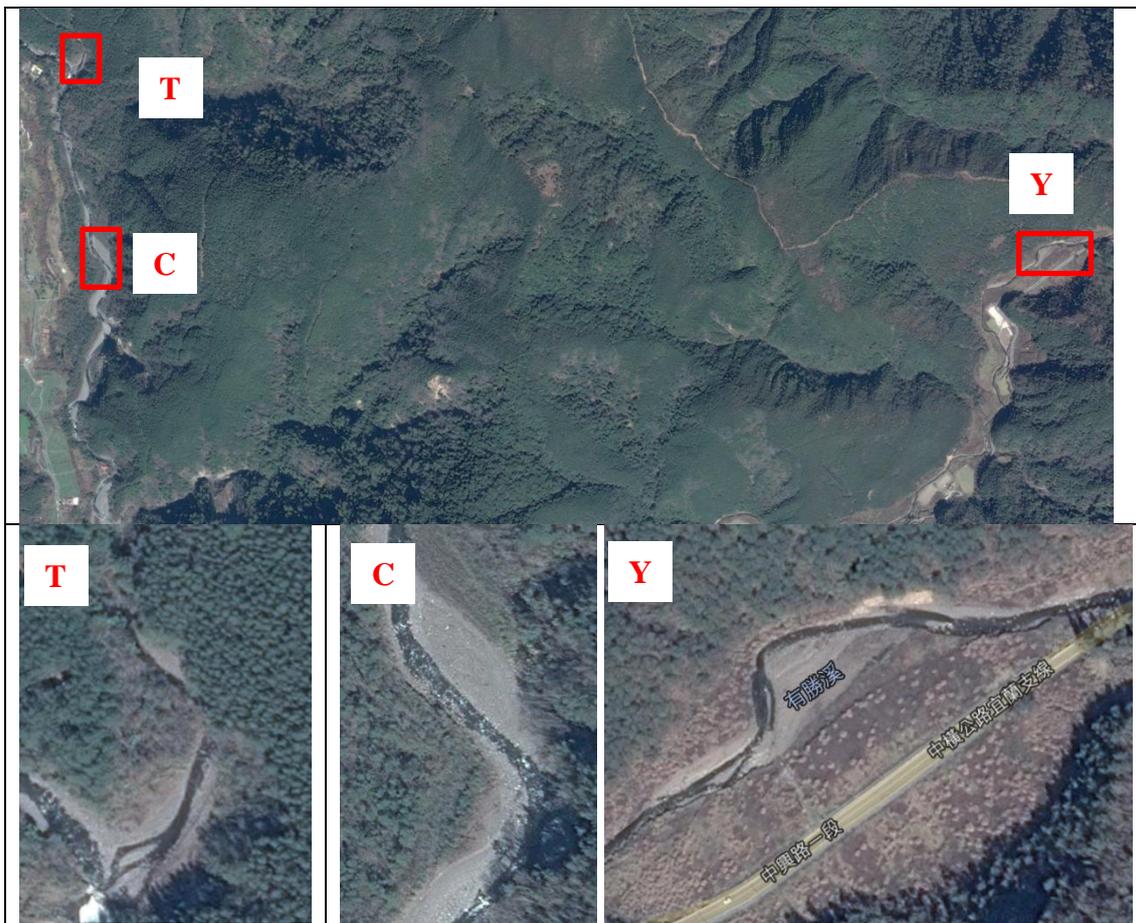


圖 2.5 桃山北溪（左）、七家灣溪（中）及有勝溪（右）曾斷流之河段

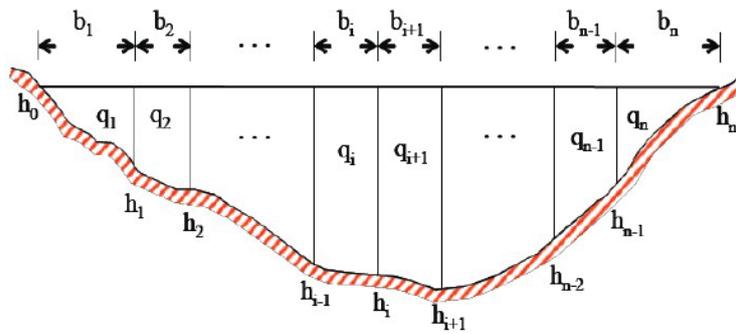


圖 2.6 流速面積法子斷面切分示意圖



井位	N(Y)	E(X)
A1 井	2698364.641	285531.455
B1 井	2698302.891	285357.097
B2 井	2698305.434	285343.200
B3 井	2698297.025	285368.070
B4 井	2698289.123	285377.249
C1 井	2698191.697	285233.182
D1 井	2698074.153	285119.800

圖 2.7 有勝溪監測點位置圖

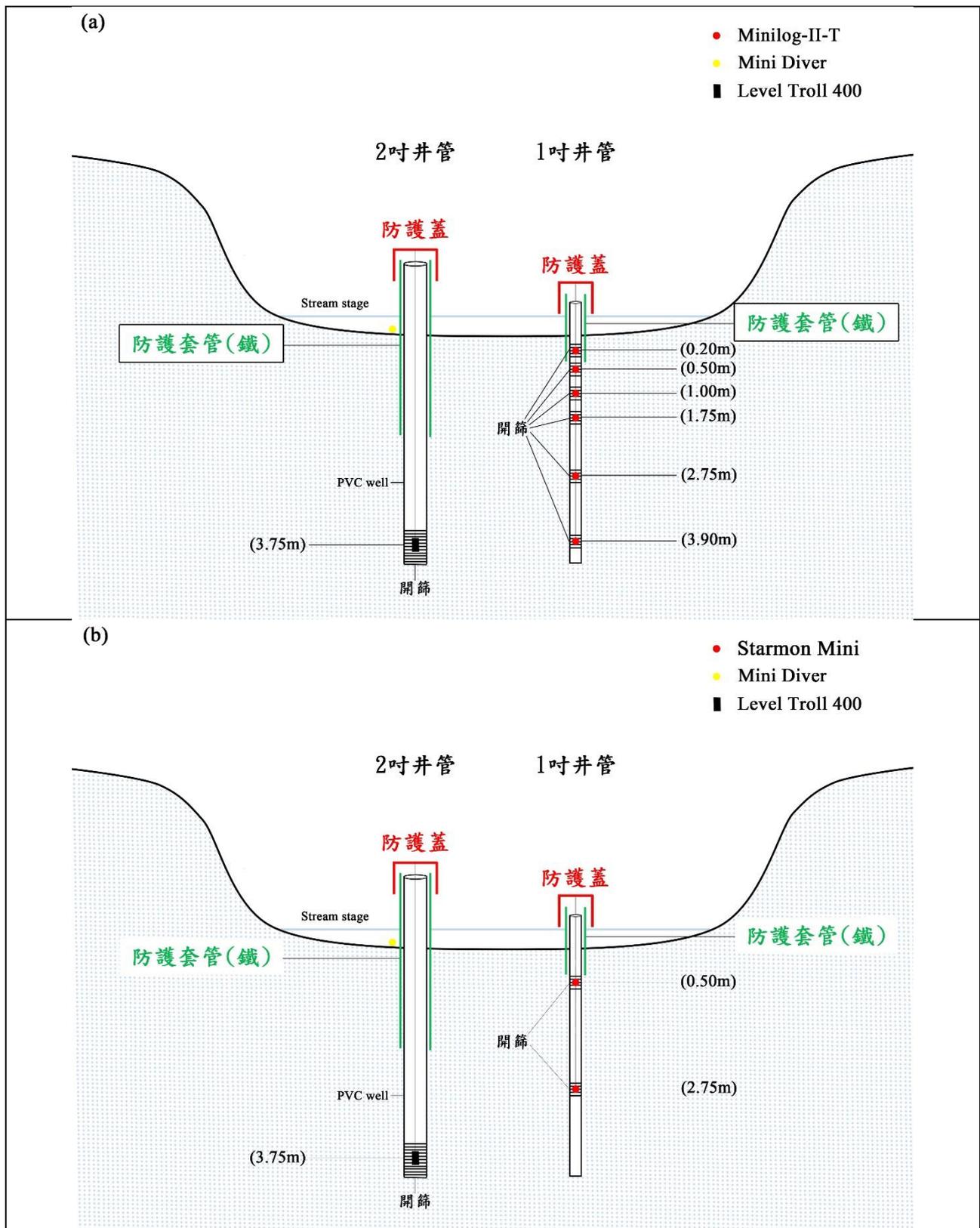


圖 2.8 有勝溪監測點 2 吋及 1 吋觀測井設置及儀器配置示意圖：(a) A1、B1、C1、D1，(b) B2、B3、B4



圖 2.9 自計式溫度計：(a) Minilog-II 自記式溫度計 (b) Starmon mini 自記式溫度計

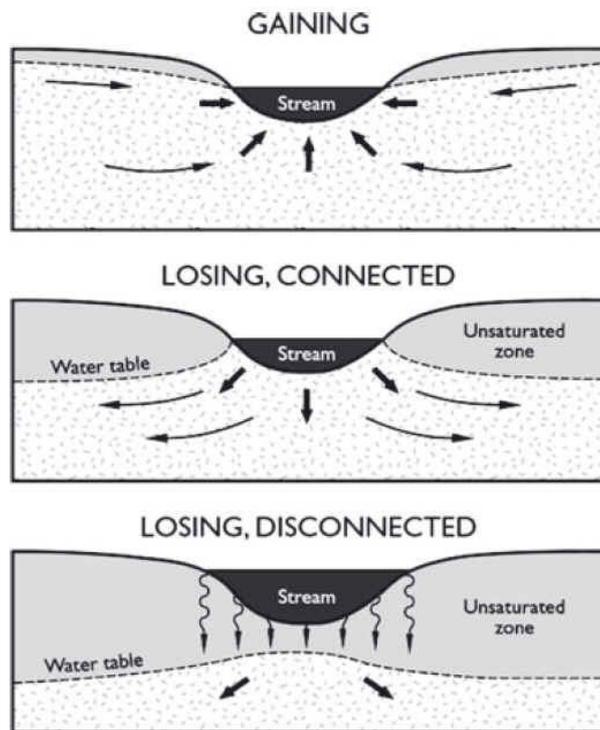


圖 2.10 河水與河床間之交互作用：(a) 獲得河川、(b) 流失河川、(c) 流失不連通河（摘自 Brunner et al., 2011）

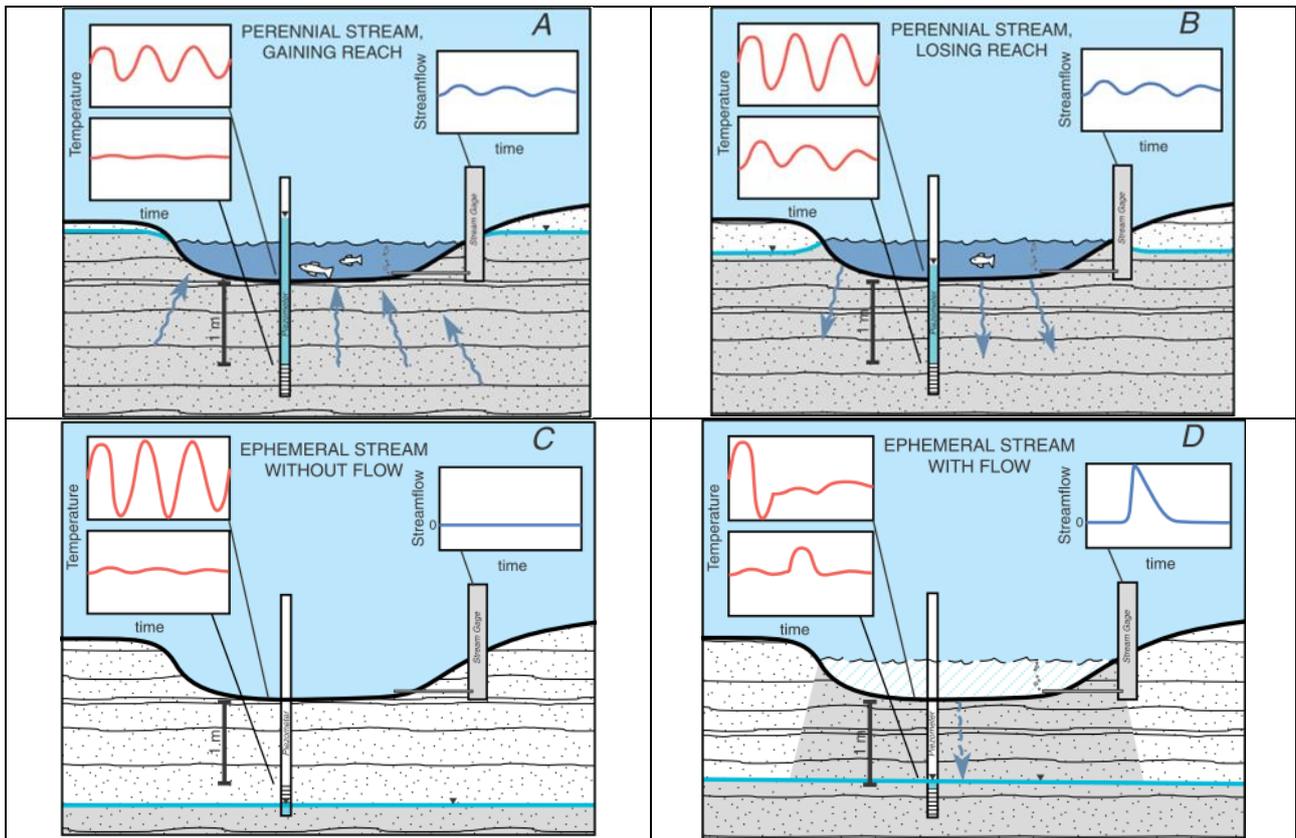


圖 2.11 理想中河道與地下水可能發生的四種交互作用：(a) 河川由底層沉積物獲得補注，(b) 河川補注至底層沉積物，(c) 無水流事件的間歇性河道，(d) 有水流事件的間歇性河道（摘自 Stonestrom and Constantz, 2003）

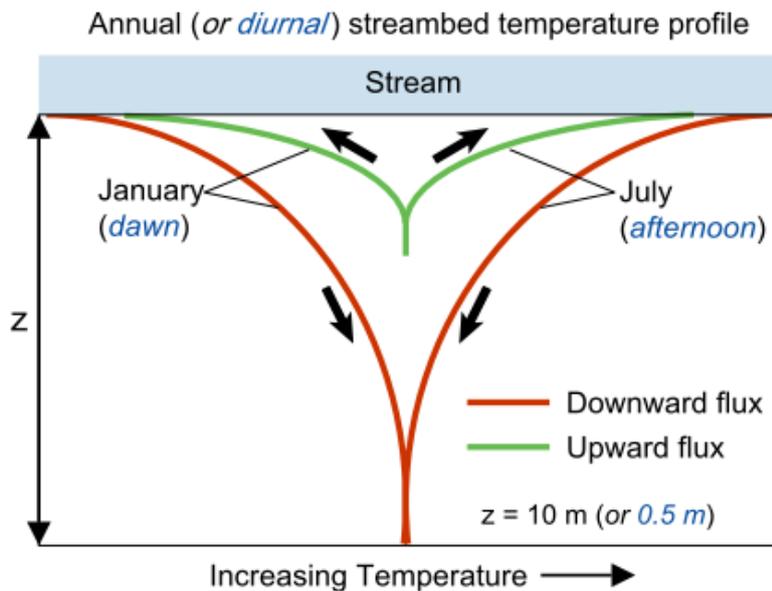


圖 2.12 河床沉積物年（日）溫度包絡線之關係圖（摘自 Stonestrom and Constantz, 2003）

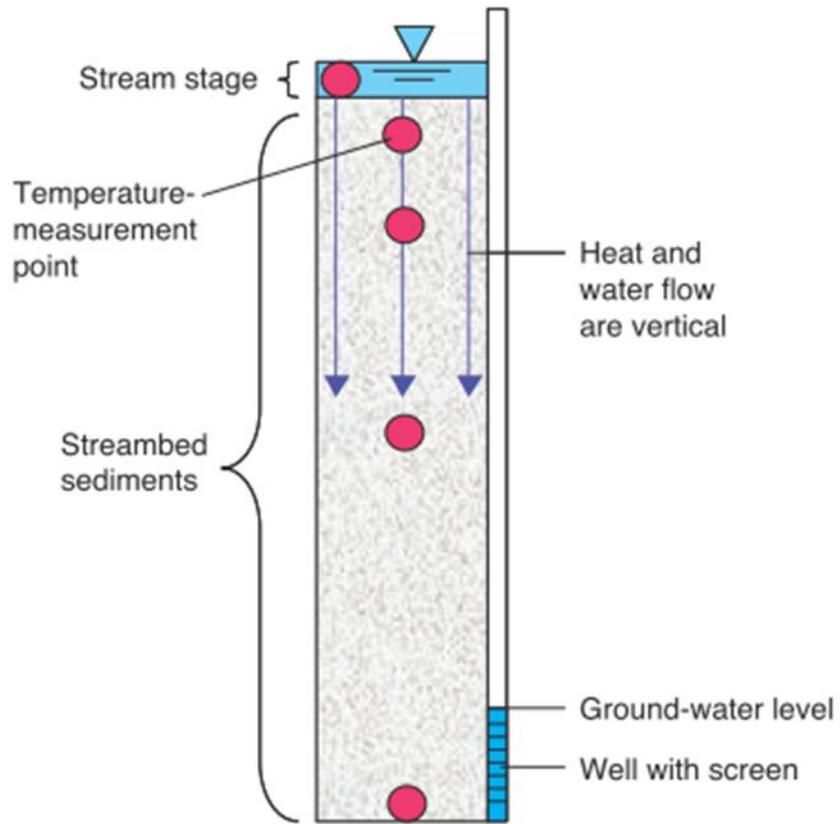


圖 2.13 VS2D 數值模式設定示意圖

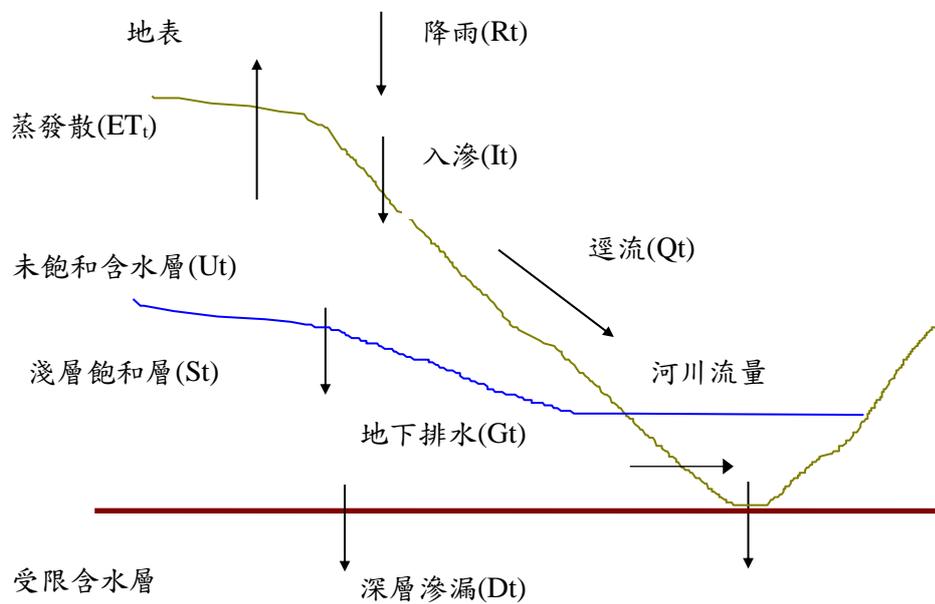


圖 2.14 水平衡關係示意圖

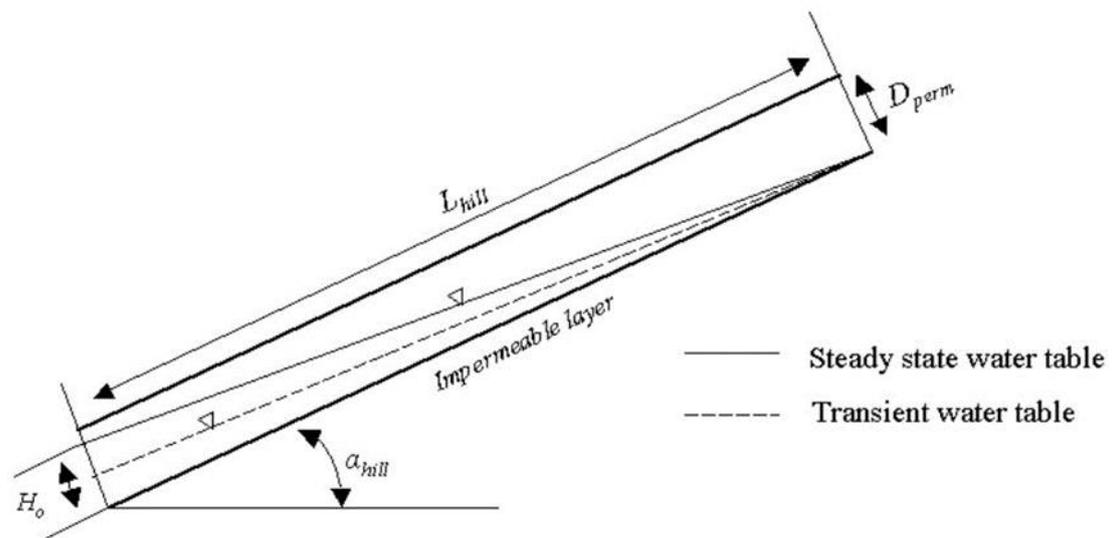


圖 2.15 水在 Kinematic storage model 中假定之狀態

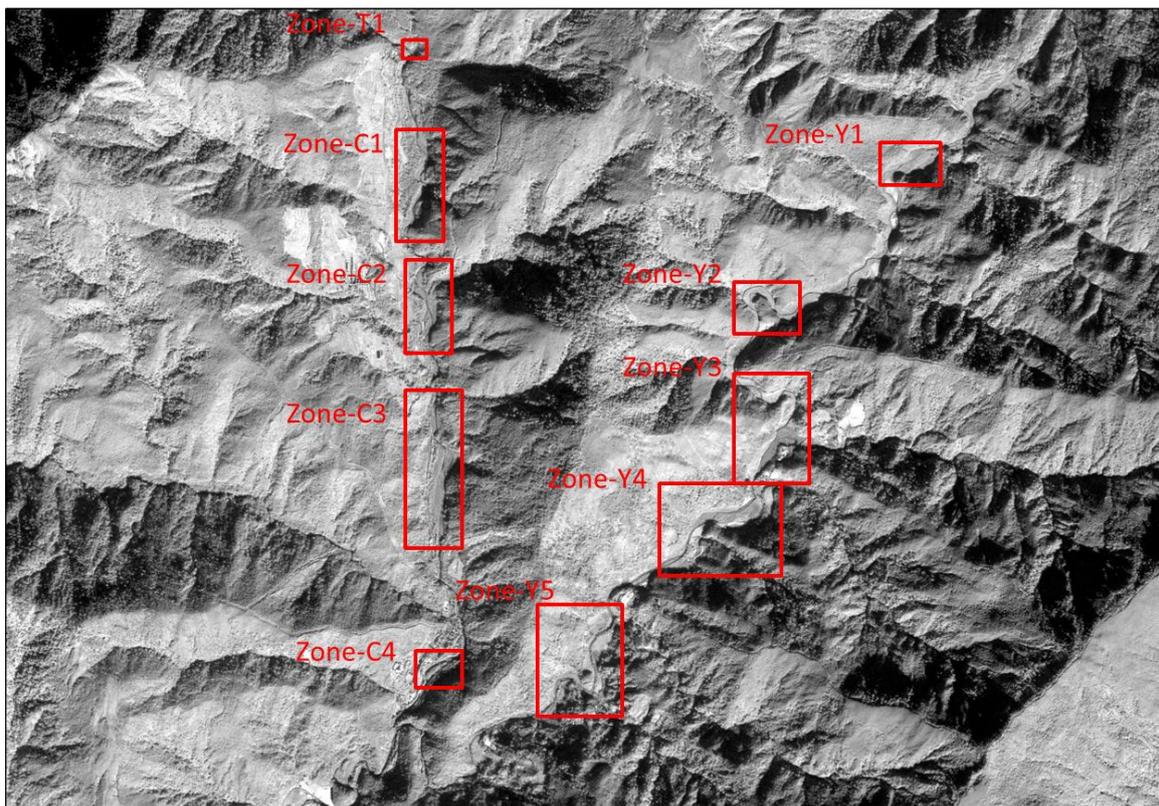


圖 3.1 桃山北溪、七家灣溪與有勝溪變遷河段分布位置

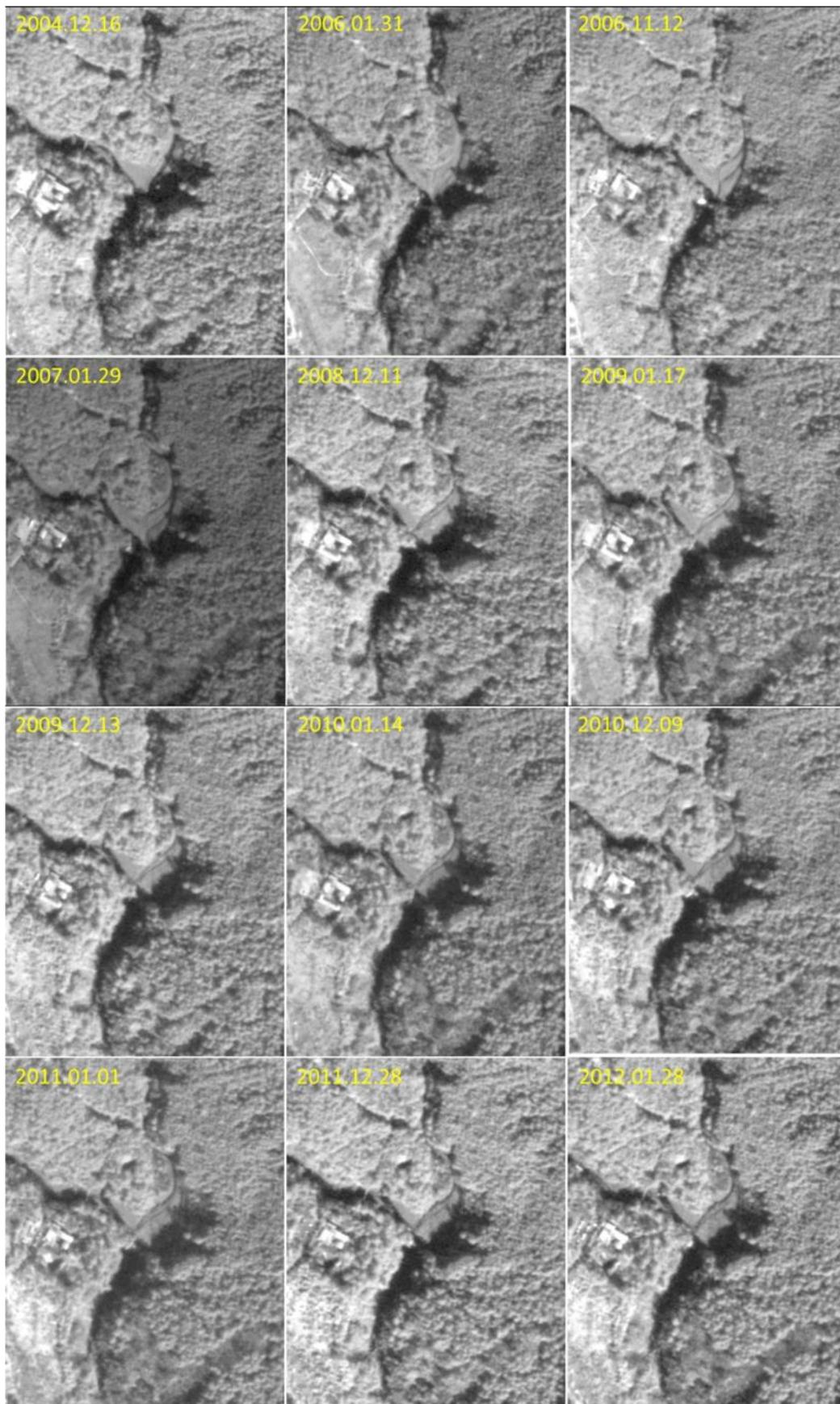


圖 3.2 桃山北溪 Zone-T1 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01)

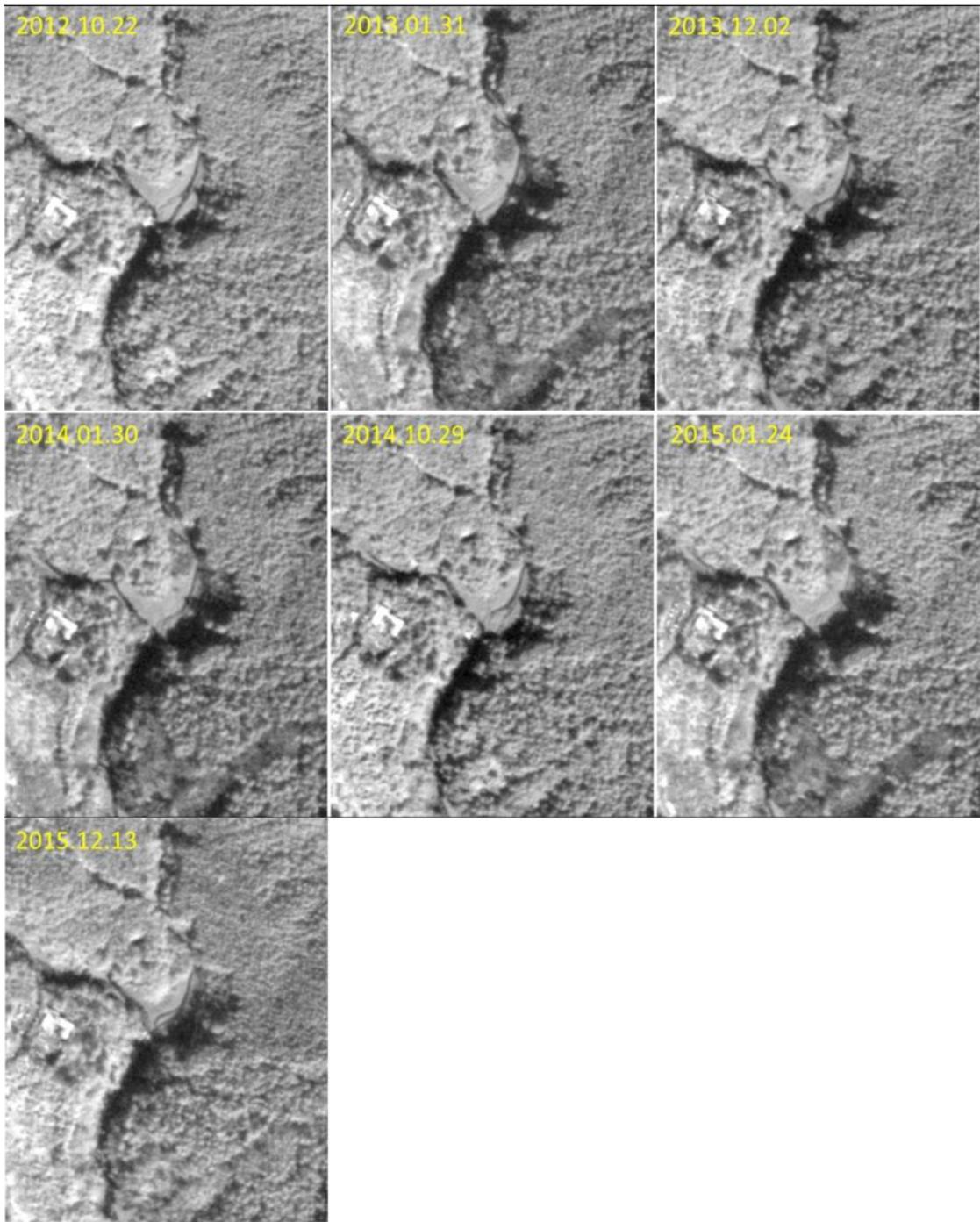


圖 3.3 桃山北溪 Zone-T1 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12 年)

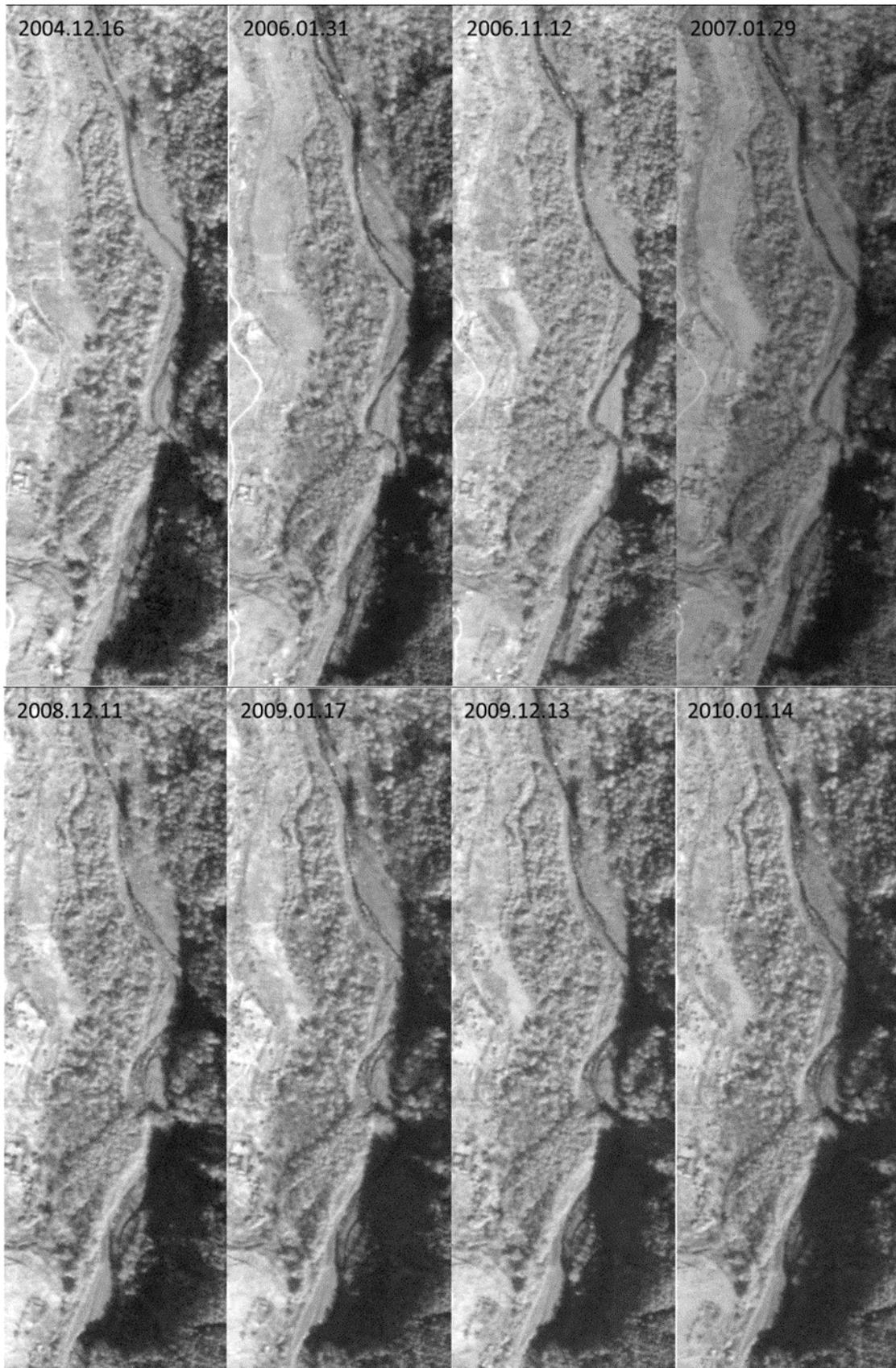


圖 3.4 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)

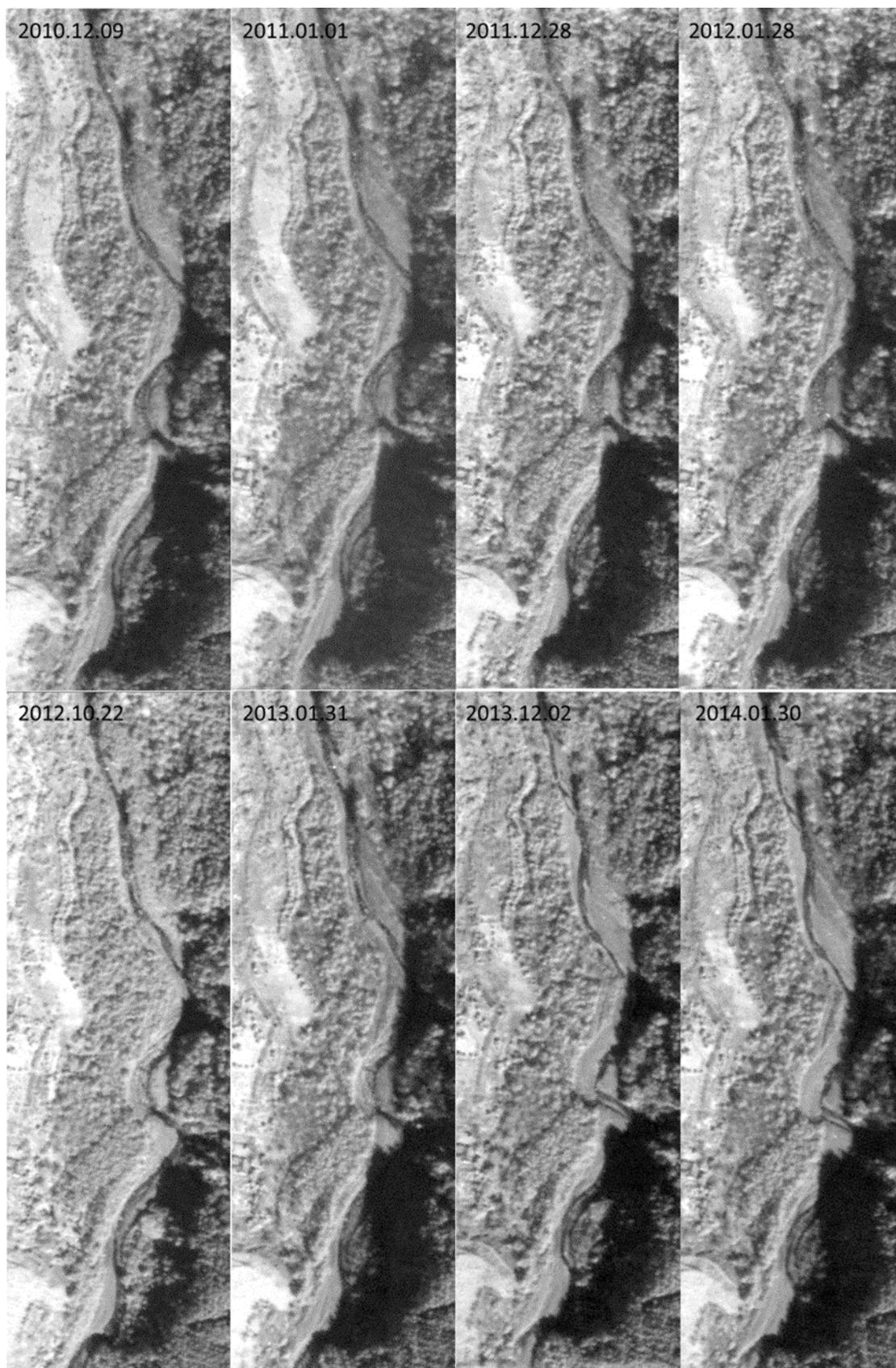


圖 3.5 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)

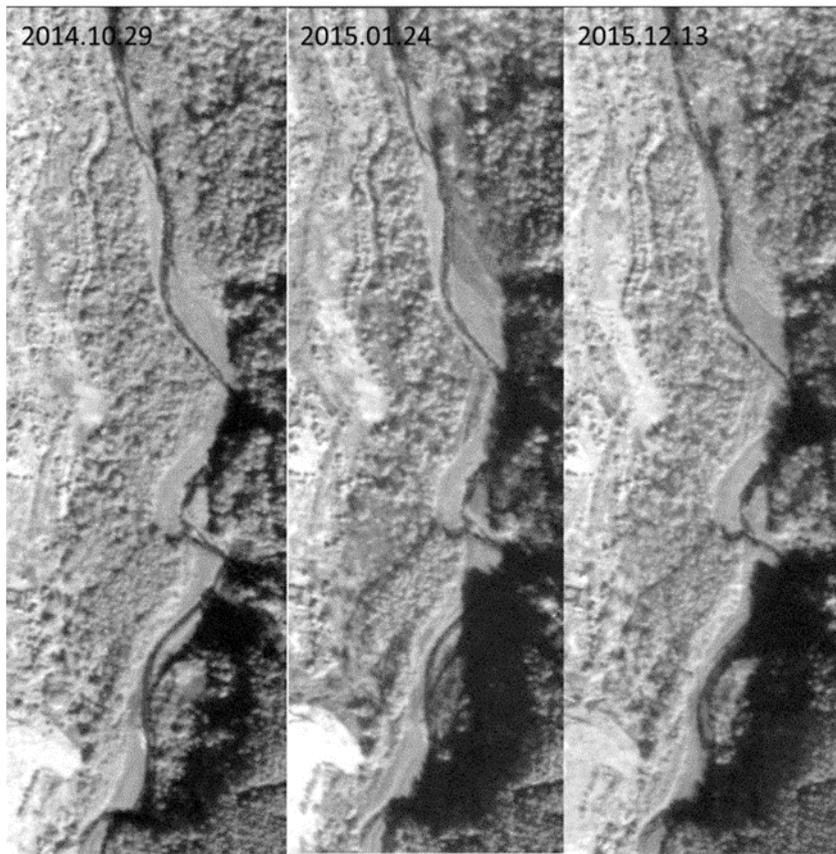


圖 3.6 七家灣溪 Zone-C1 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)

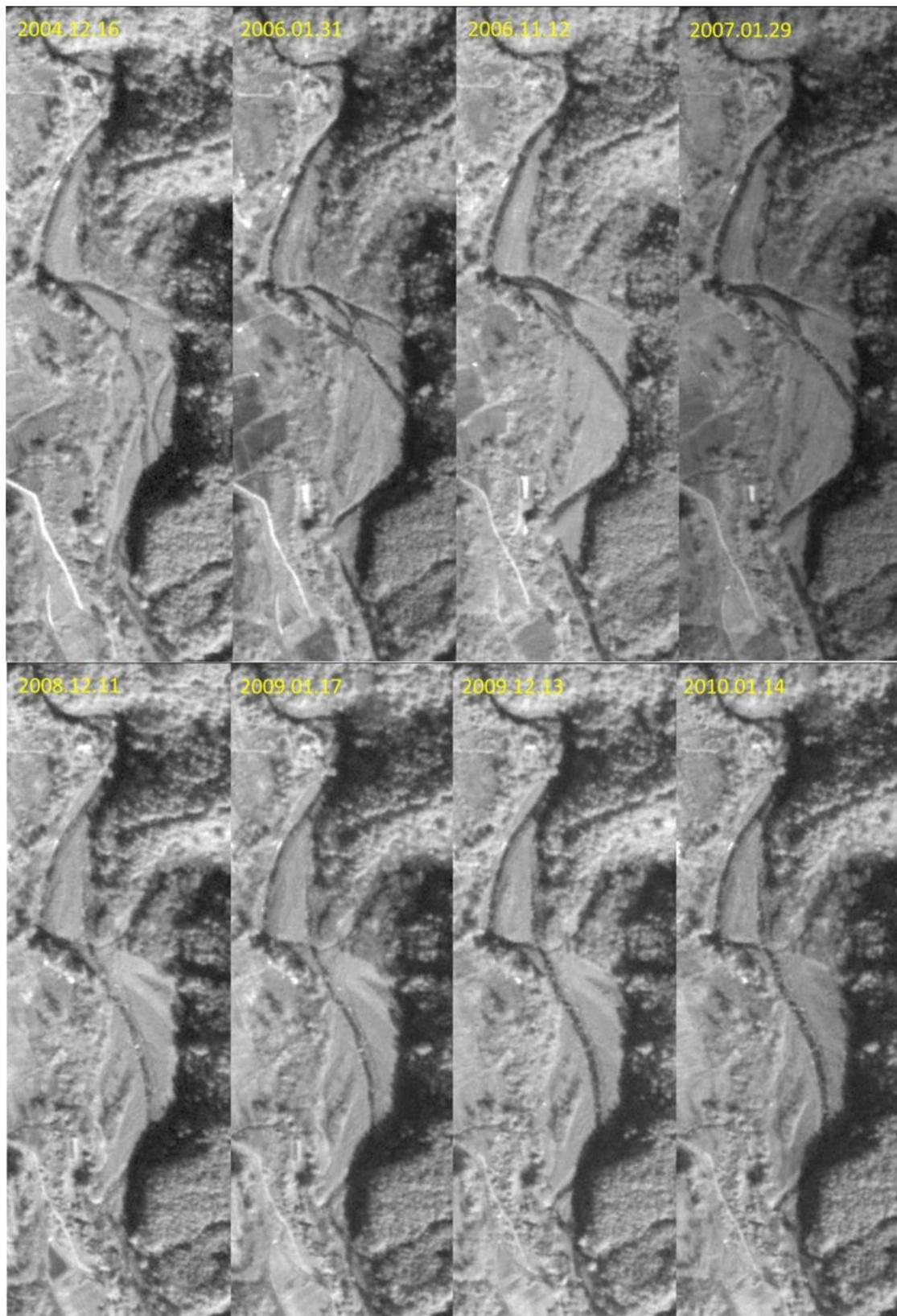


圖 3.7 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)

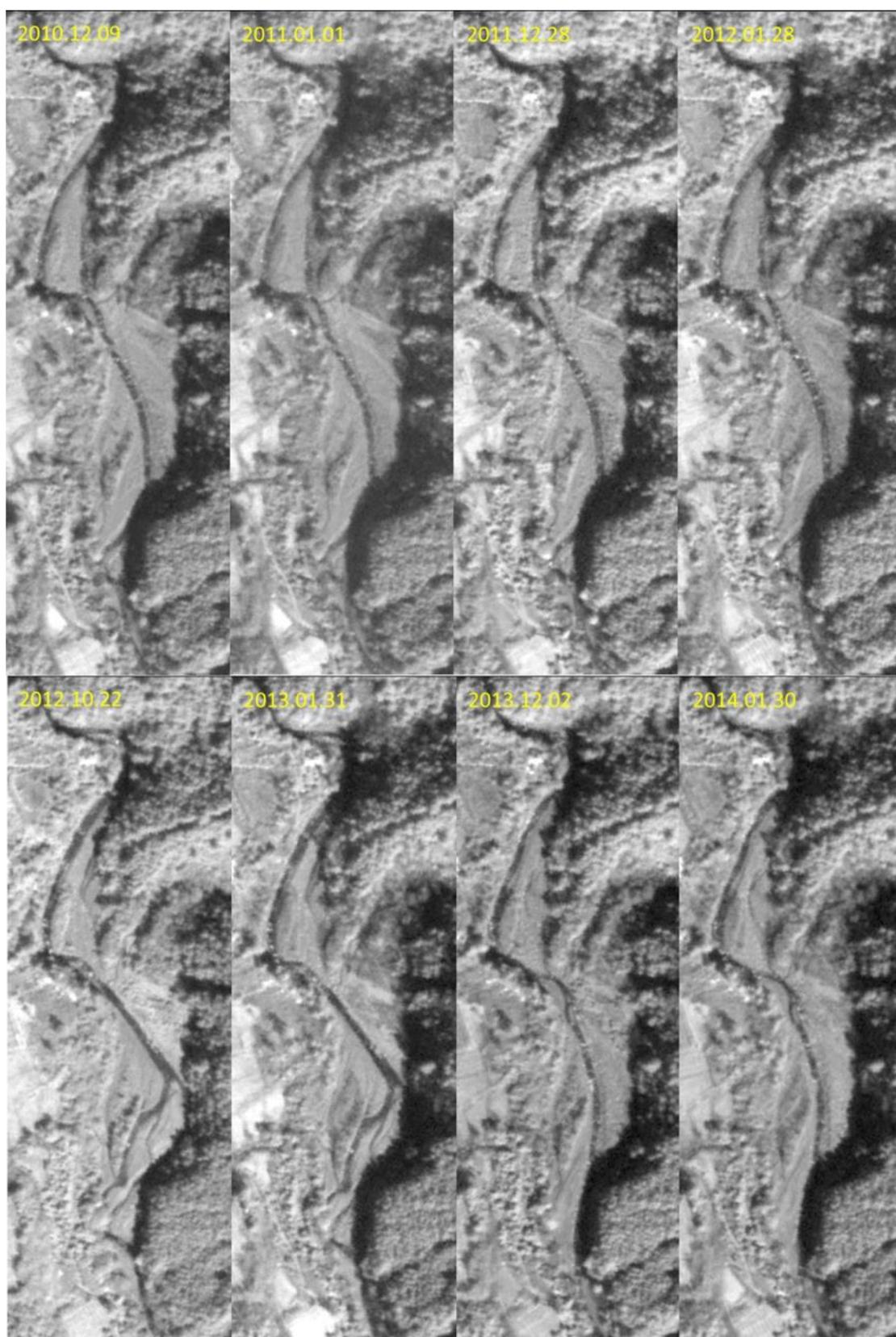


圖 3.8 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)

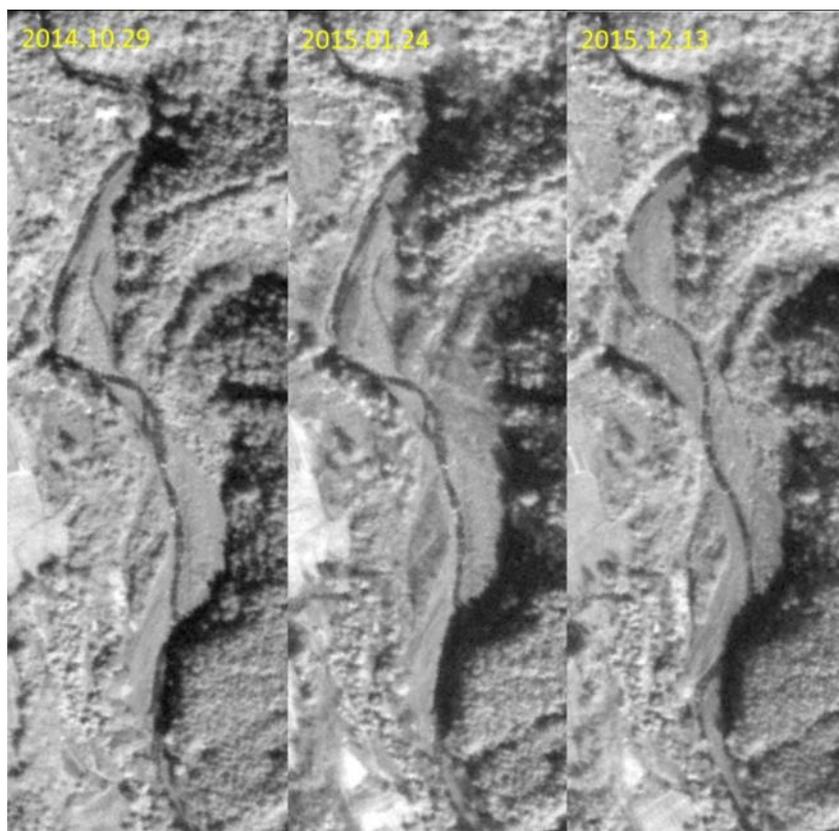


圖 3.9 七家灣溪 Zone-C2 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)

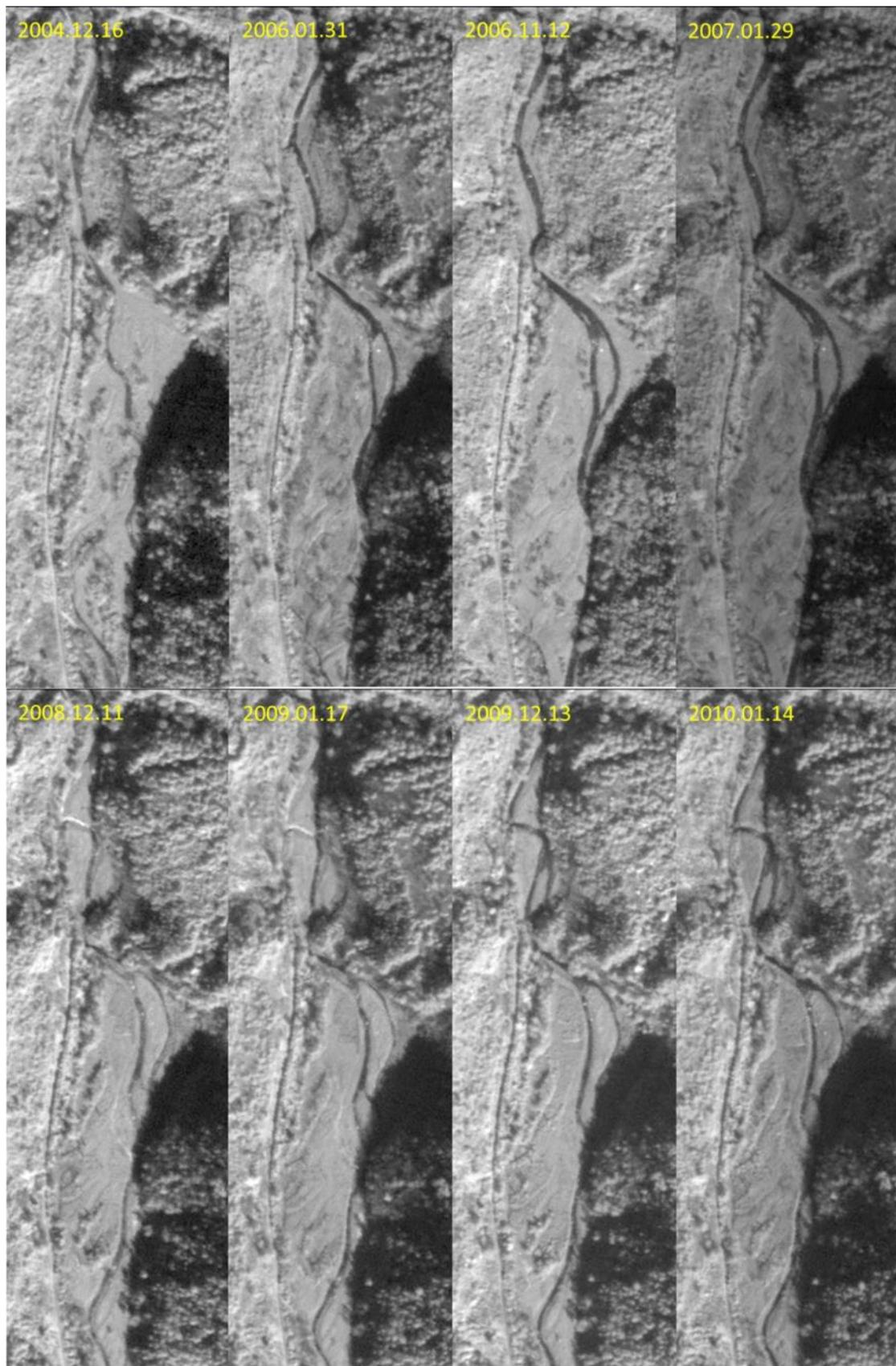


圖 3.10 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)

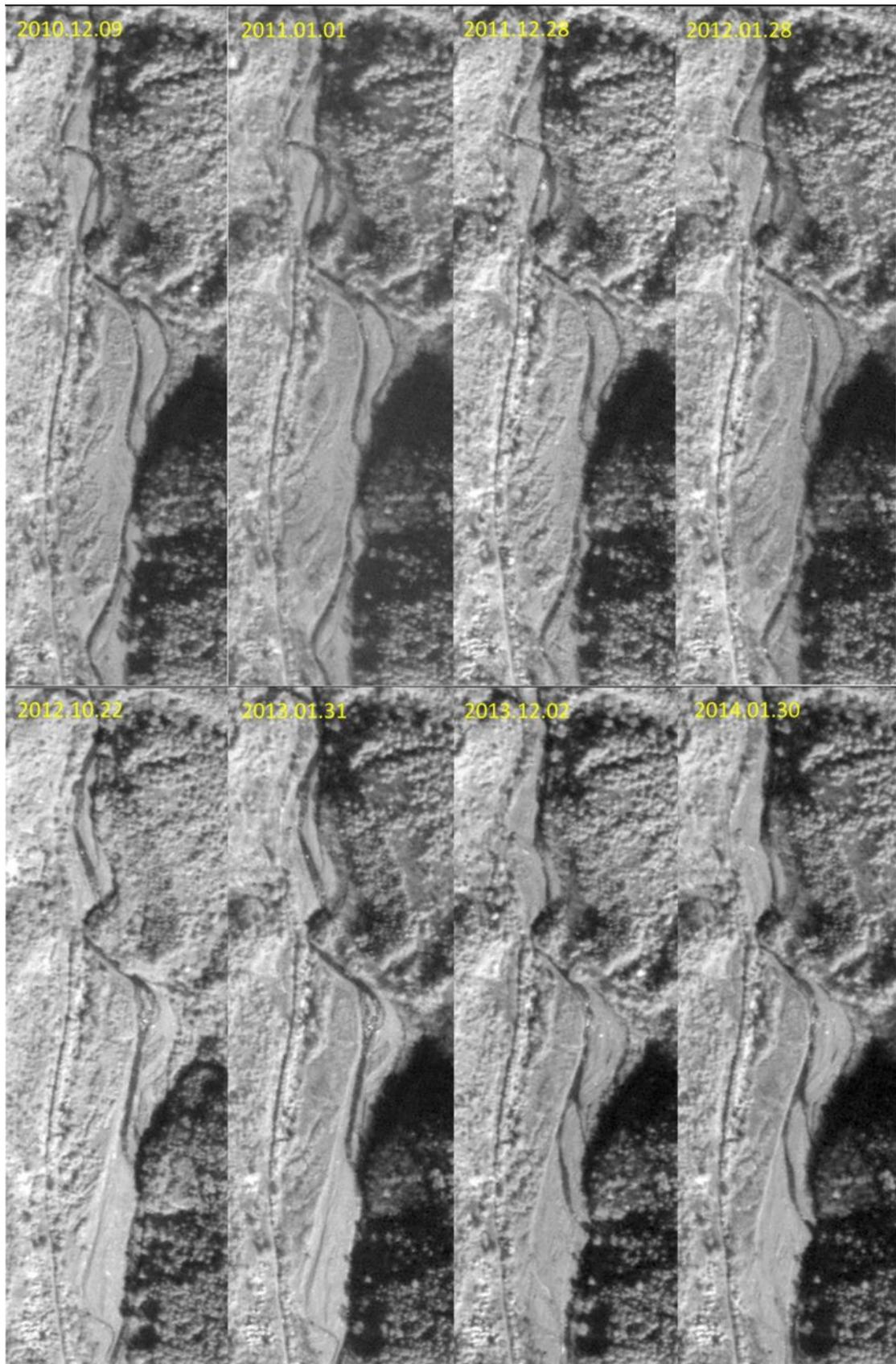


圖 3.11 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)

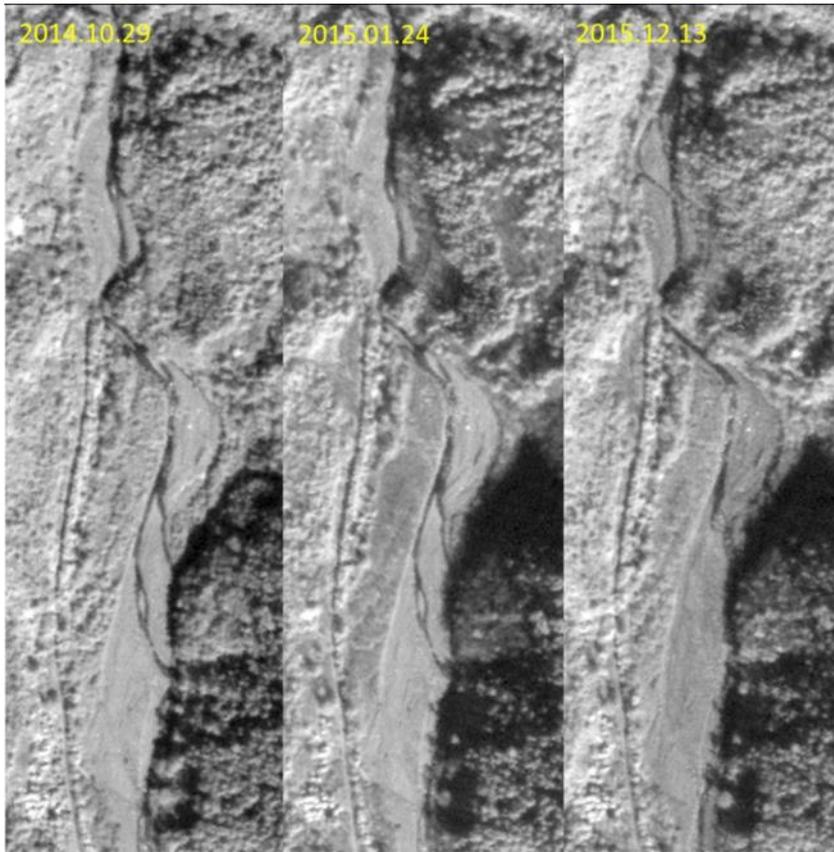


圖 3.12 七家灣溪 Zone-C3 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)

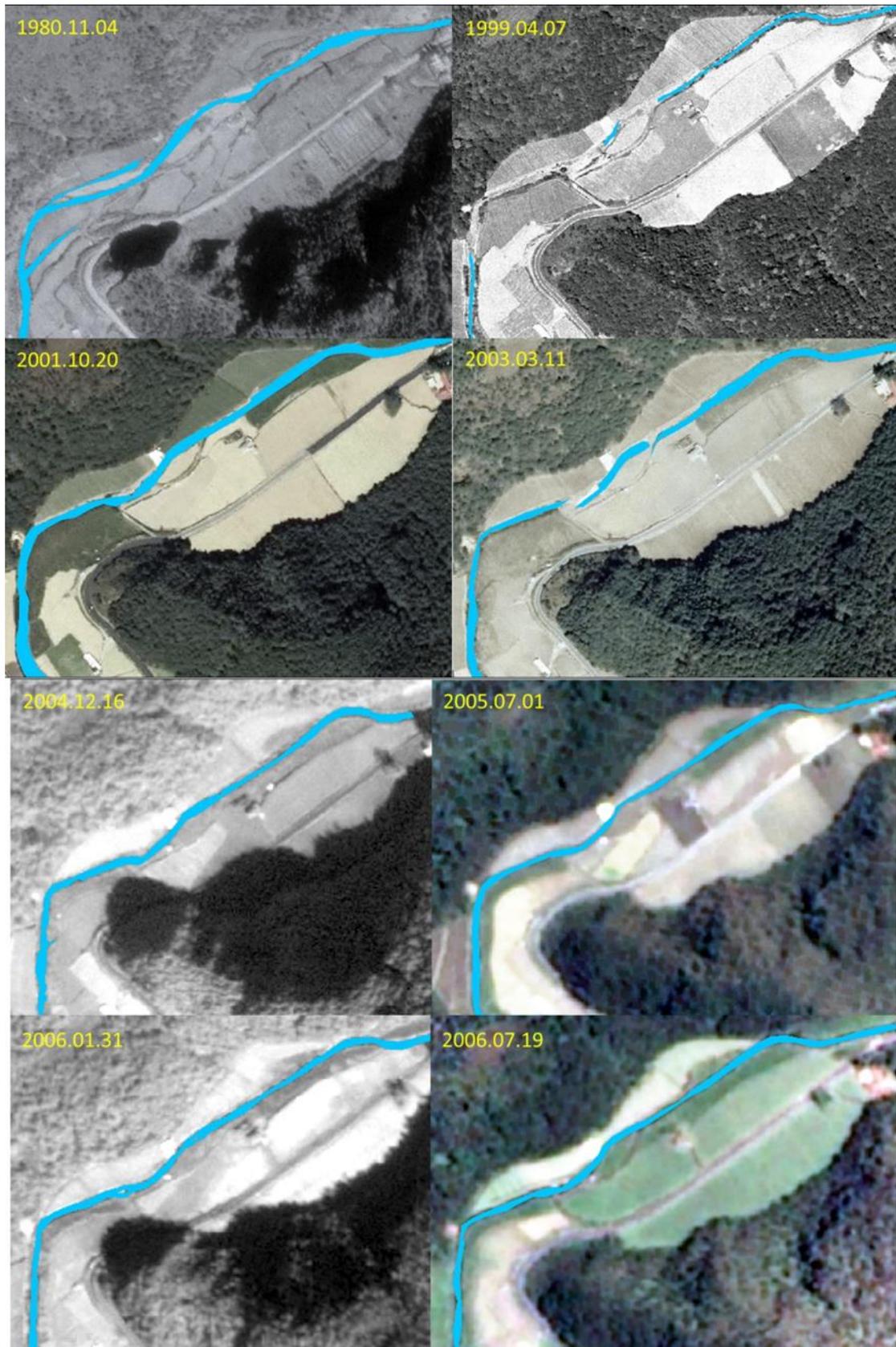


圖 3.13 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(1980.11-2006.07)

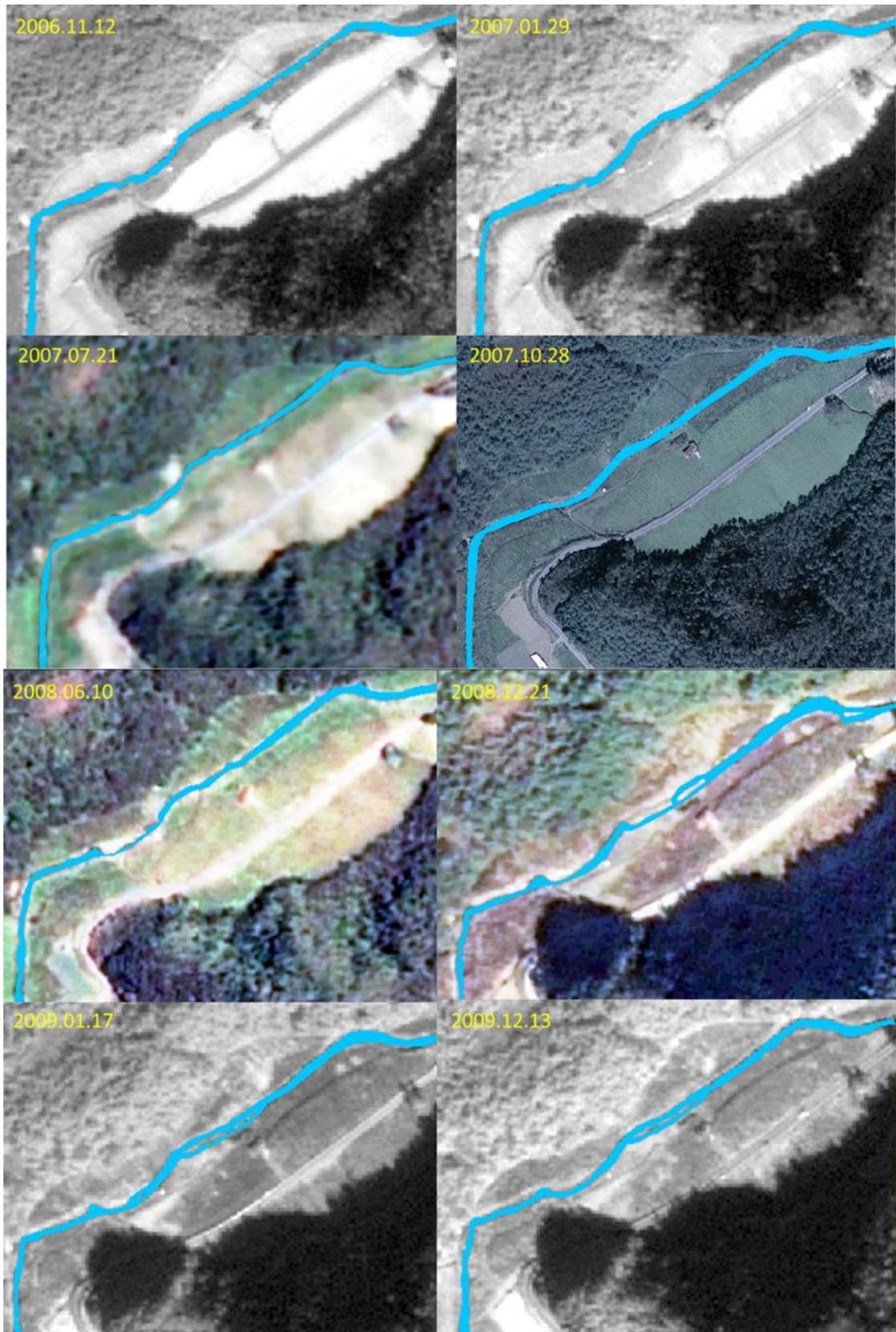


圖 3.14 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2006.11-2009.12)

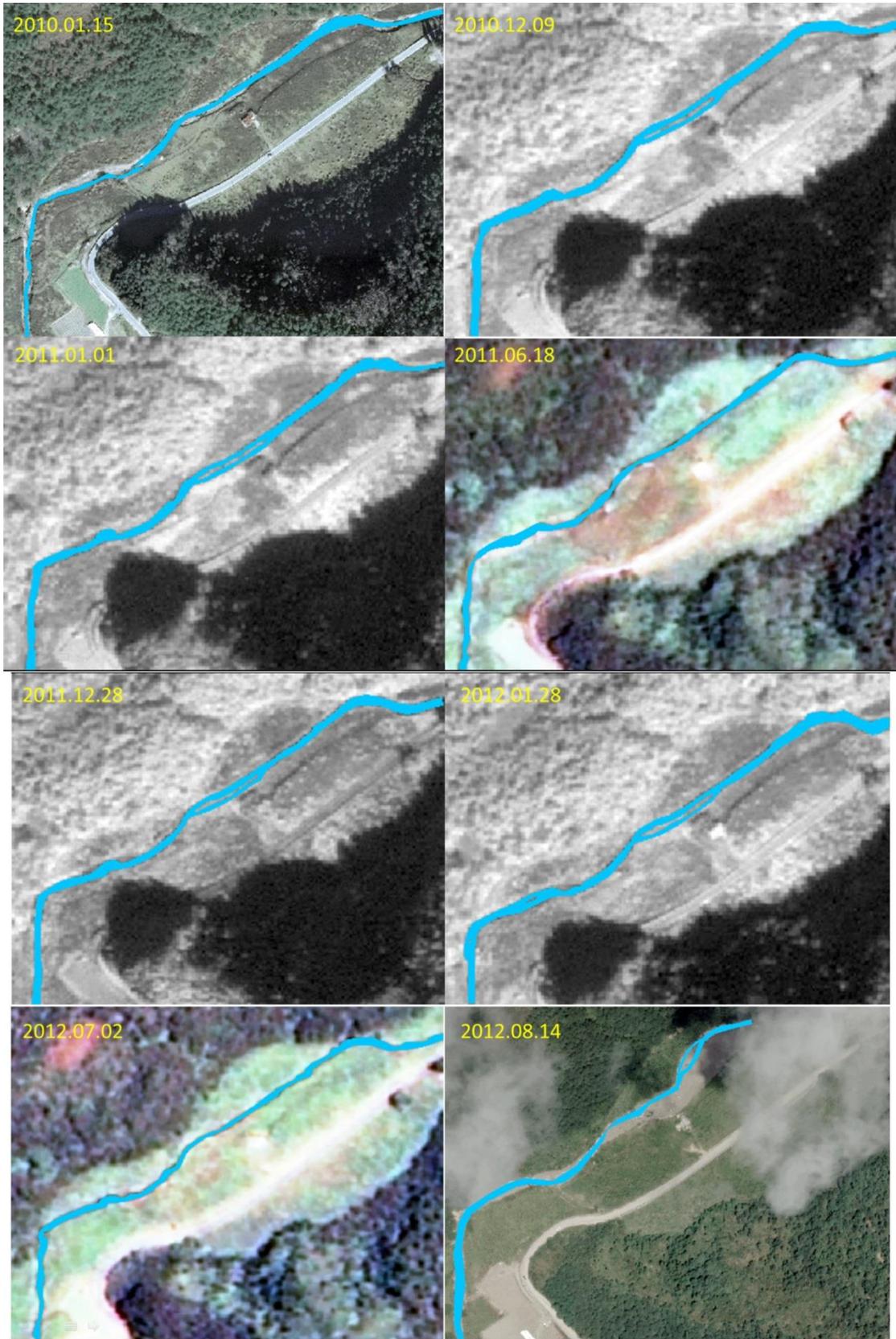


圖 3.15 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2010.01-2012.08)

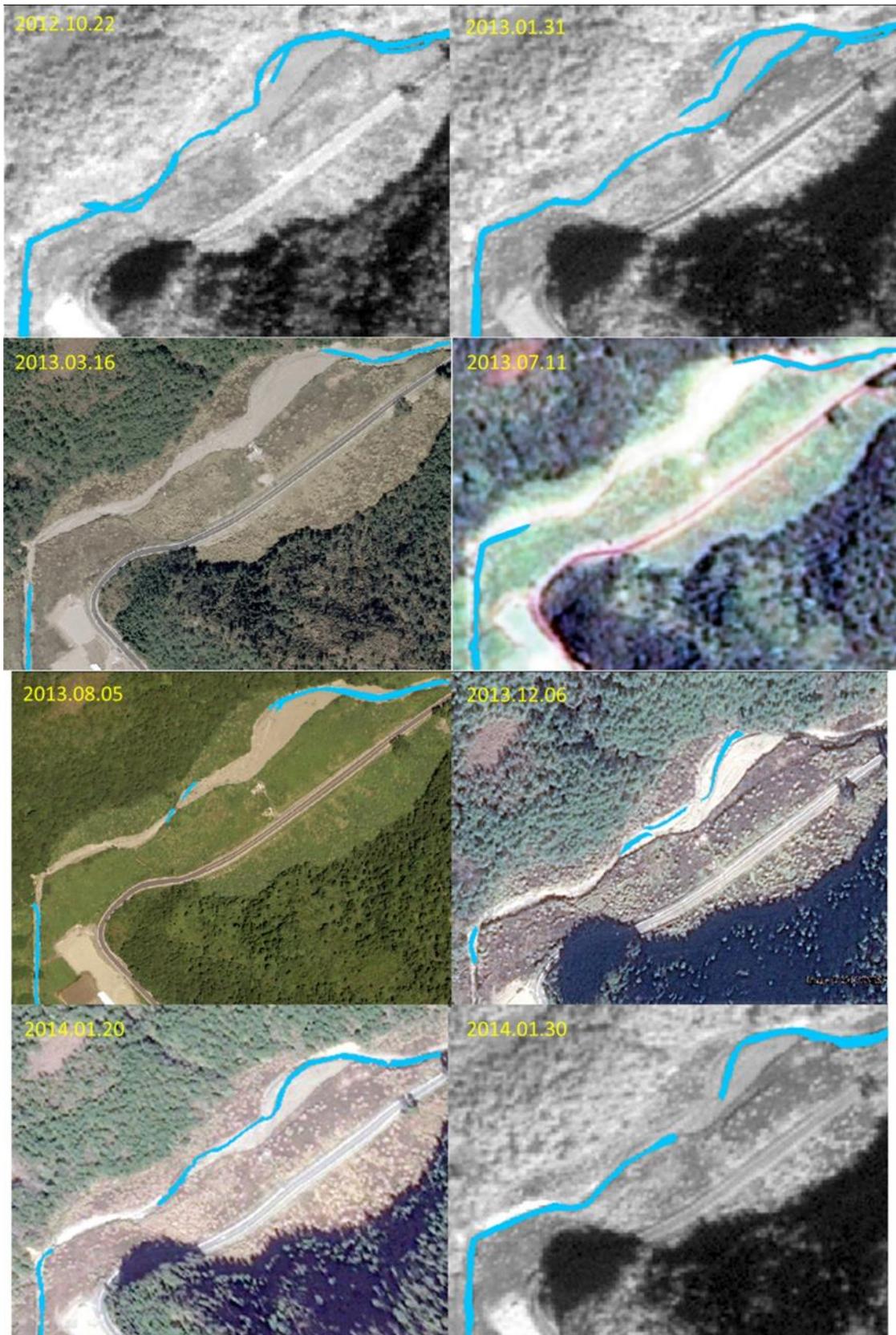


圖 3.16 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2012.10-2014.01)

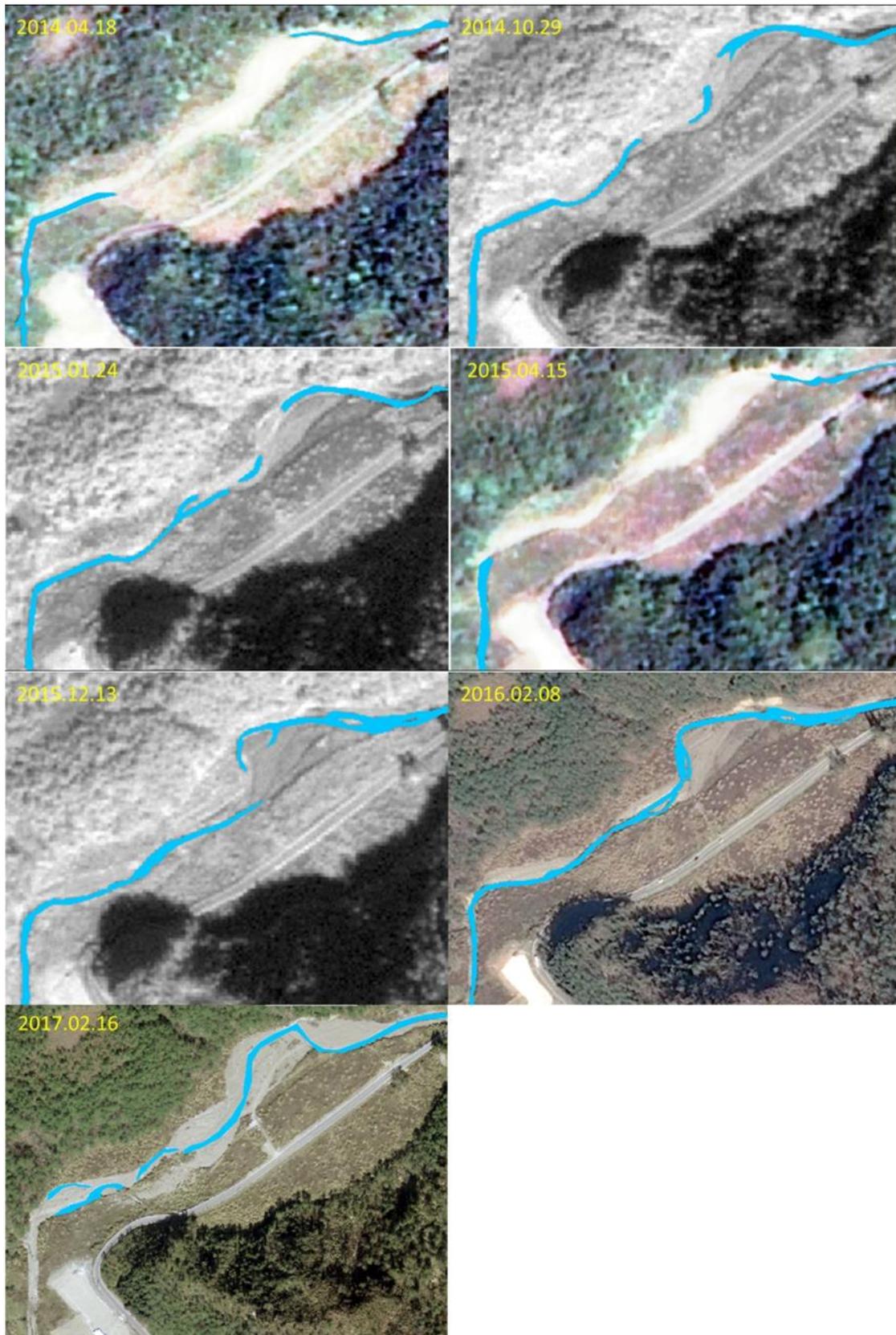


圖 3.17 有勝溪 Zone-Y1 變遷河段歷年影像圖(2014.04-2017.02)

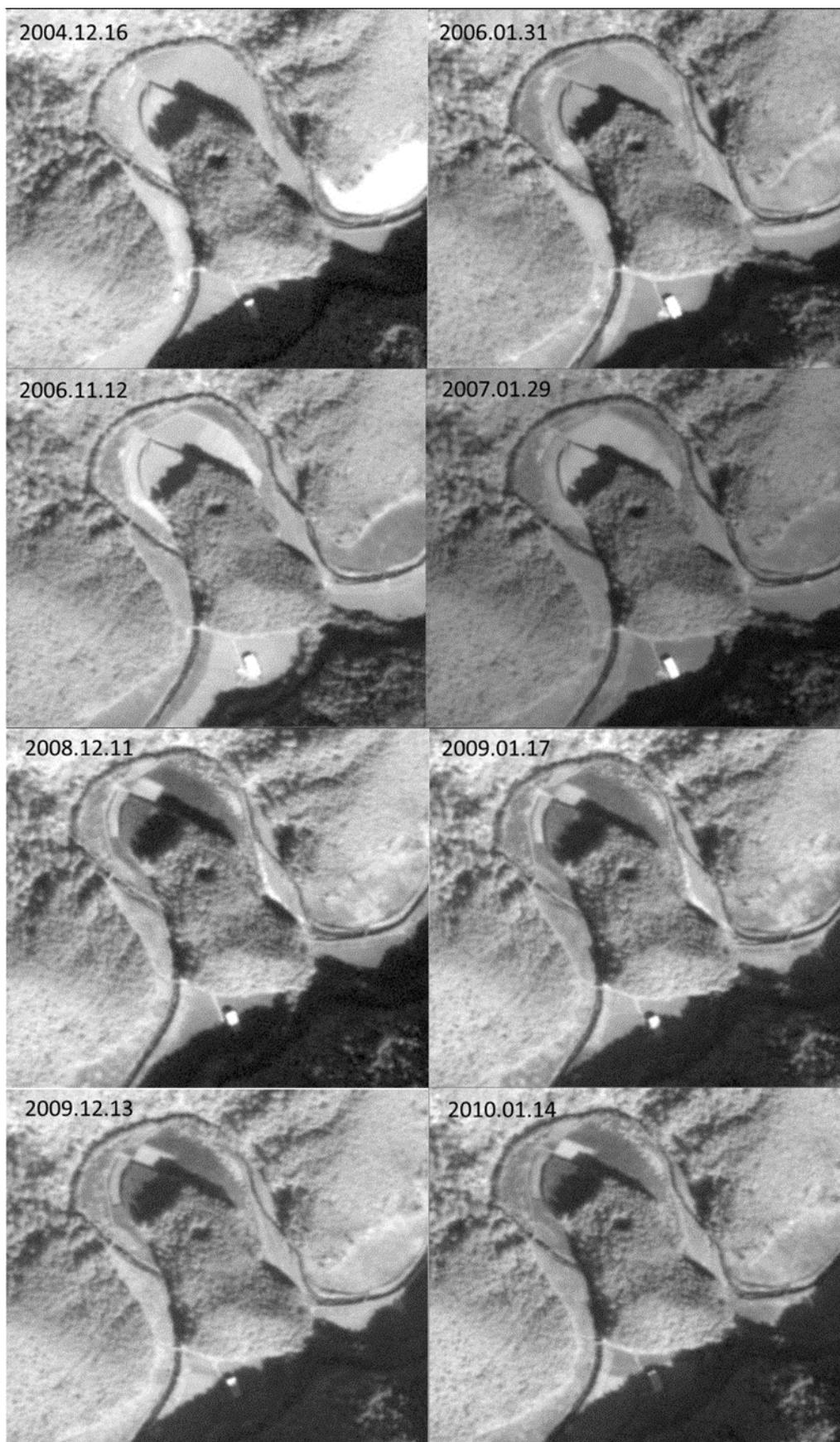


圖 3.18 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)

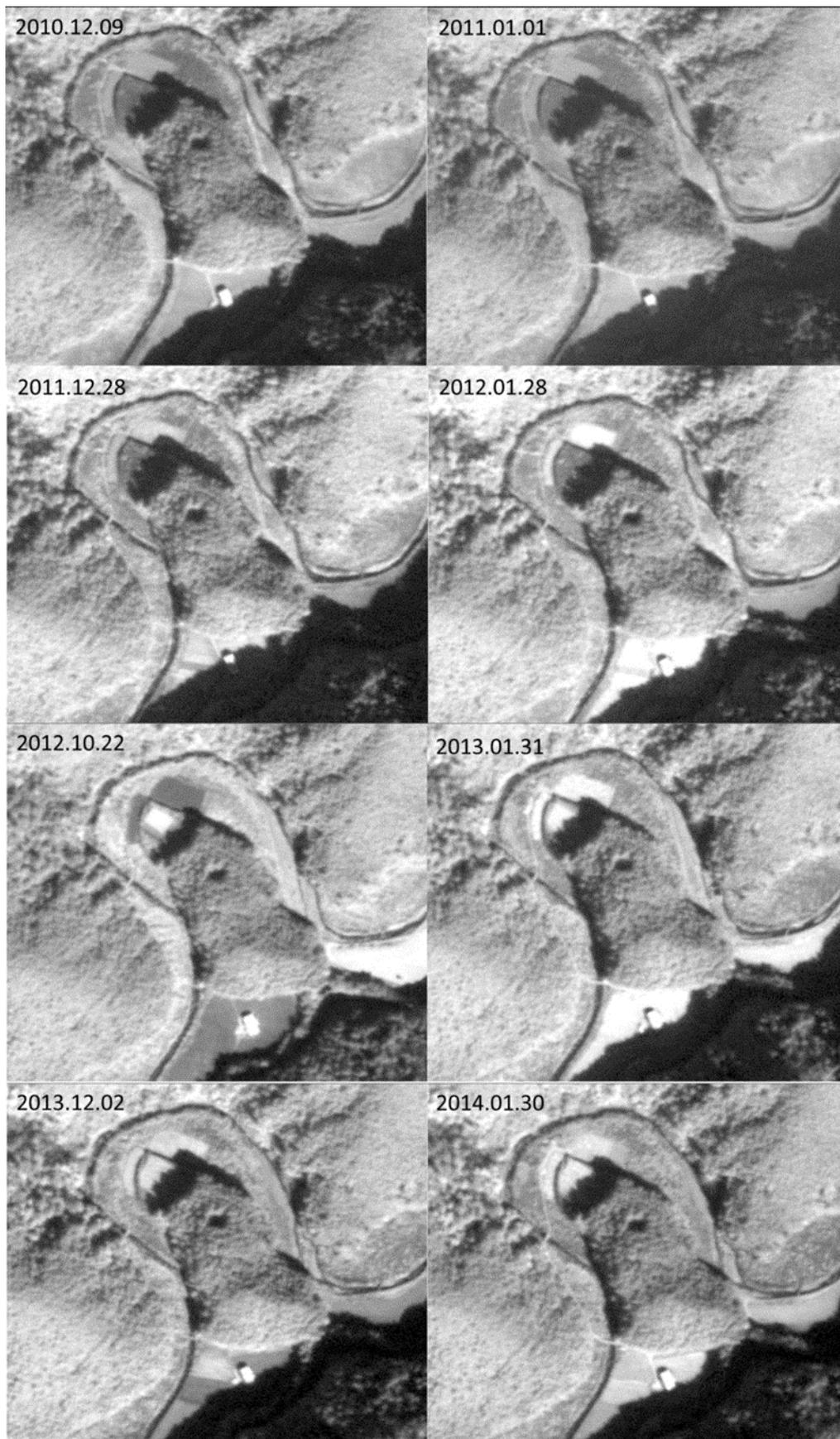


圖 3.19 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)

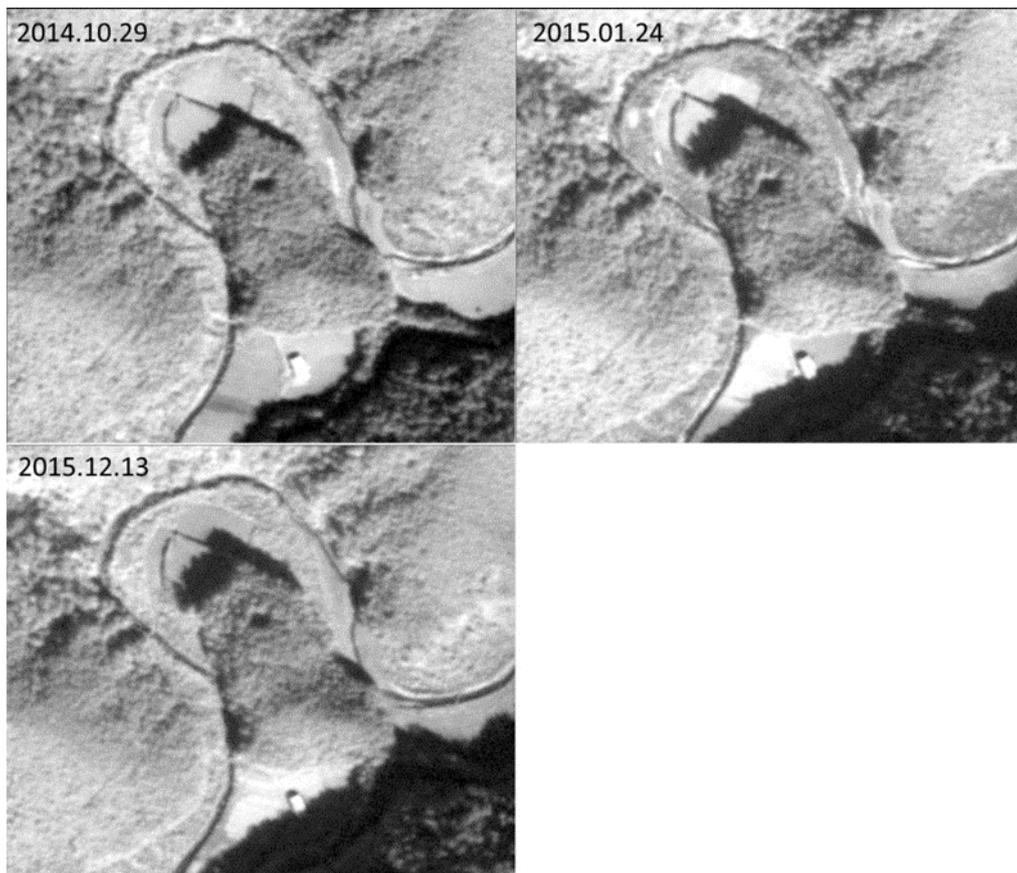


圖 3.20 有勝溪 Zone-Y2 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)

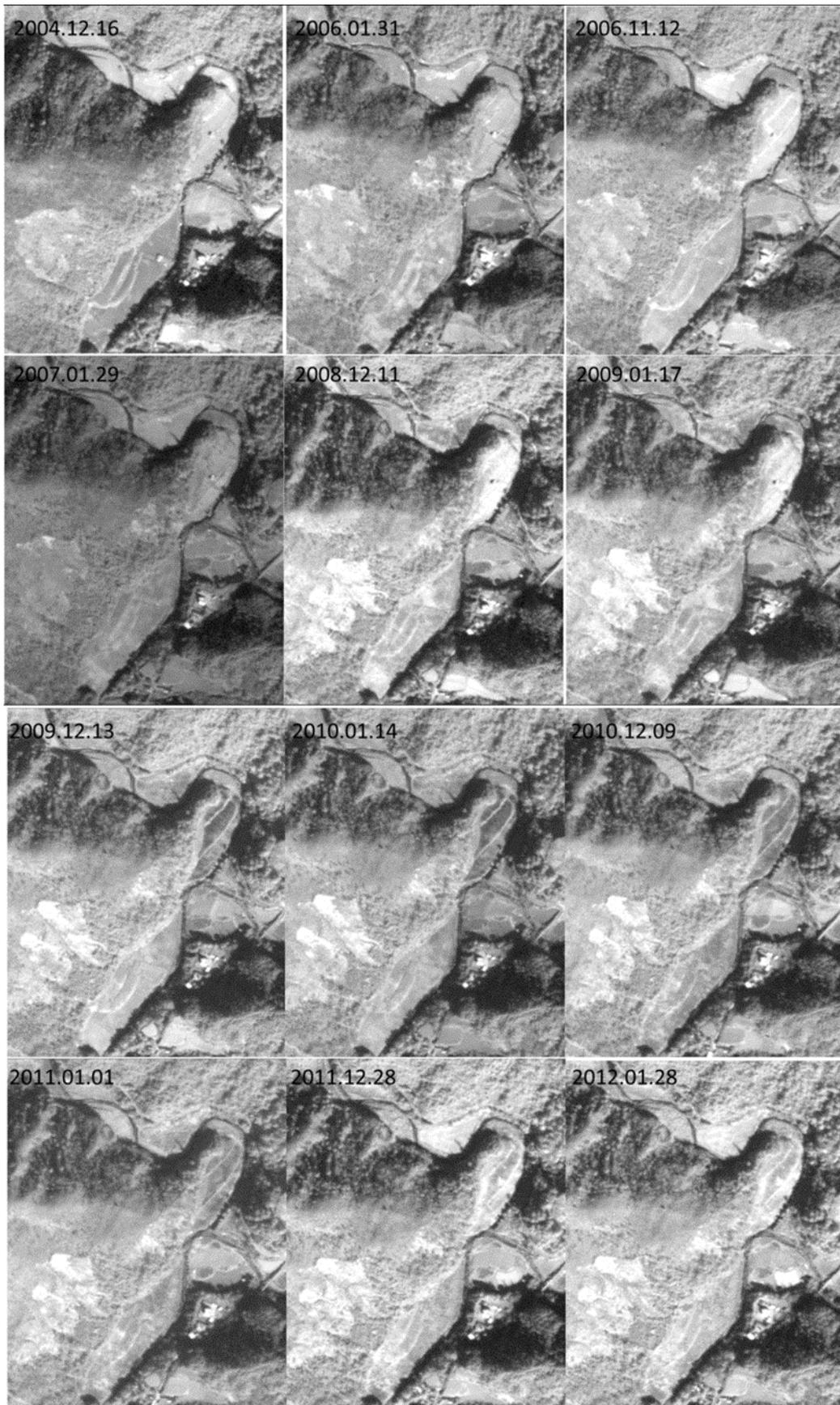


圖 3.21 有勝溪 Zone-Y3 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01)

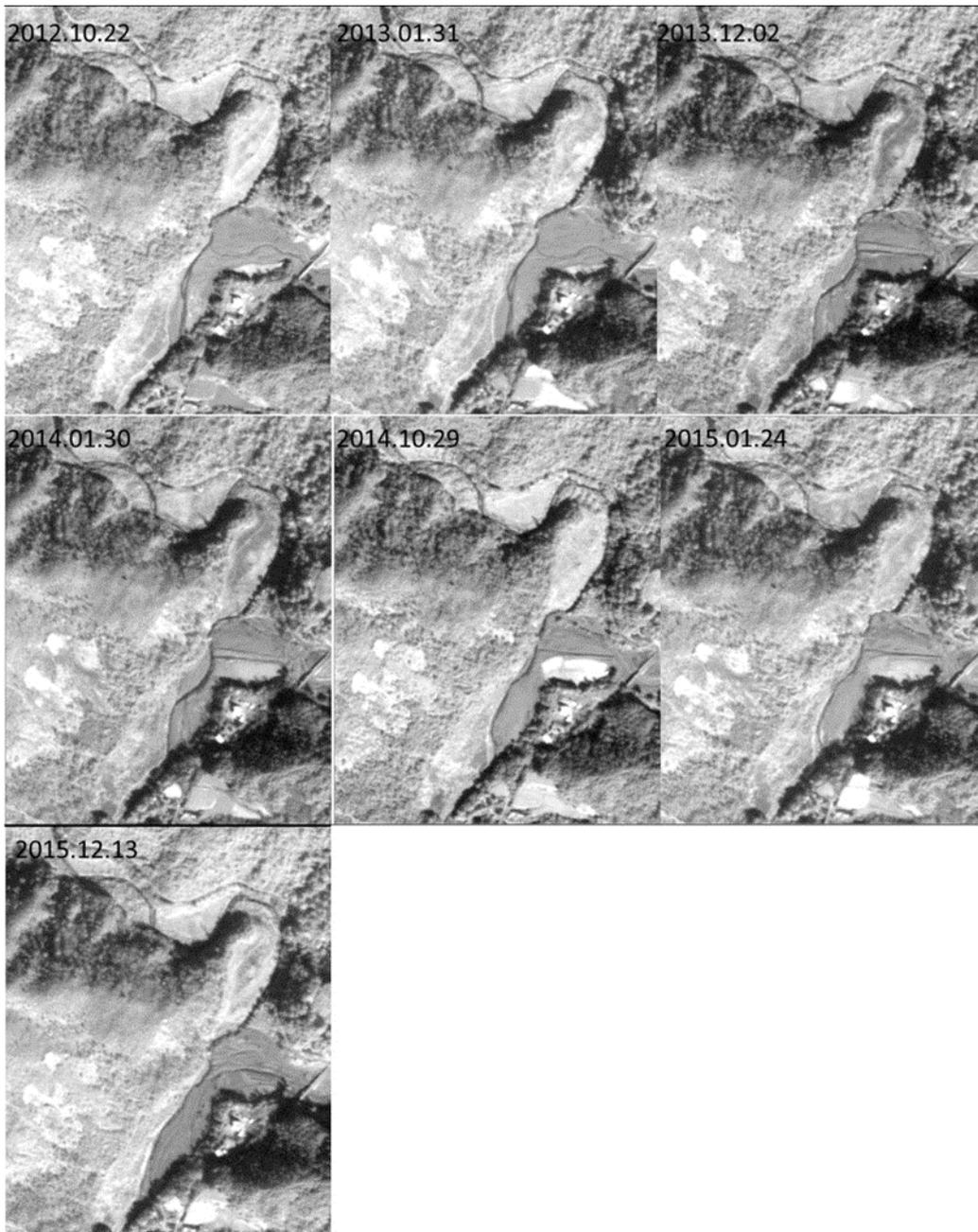


圖 3.22 有勝溪 Zone-Y3 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12)

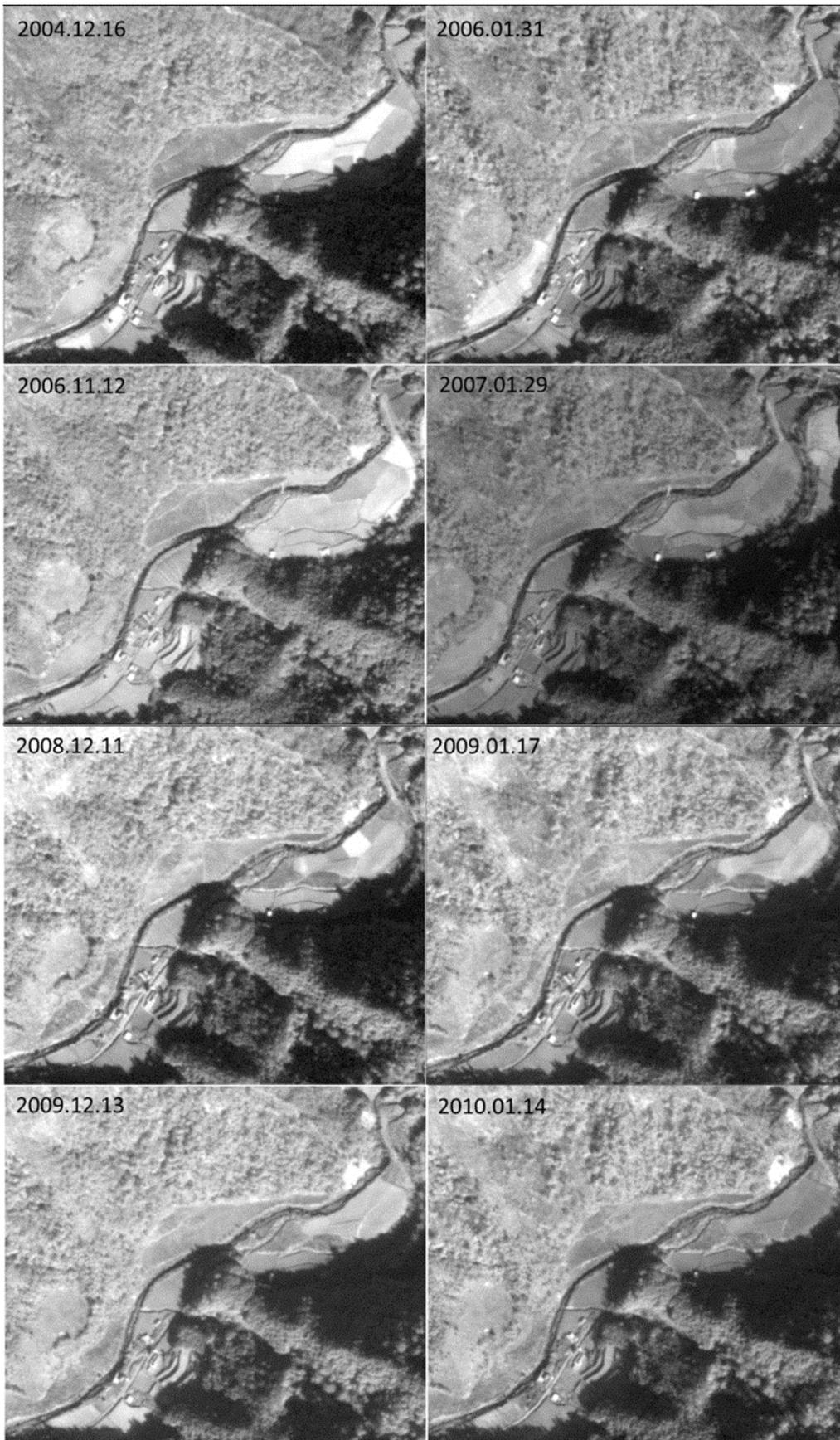


圖 3.23 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2010.01)

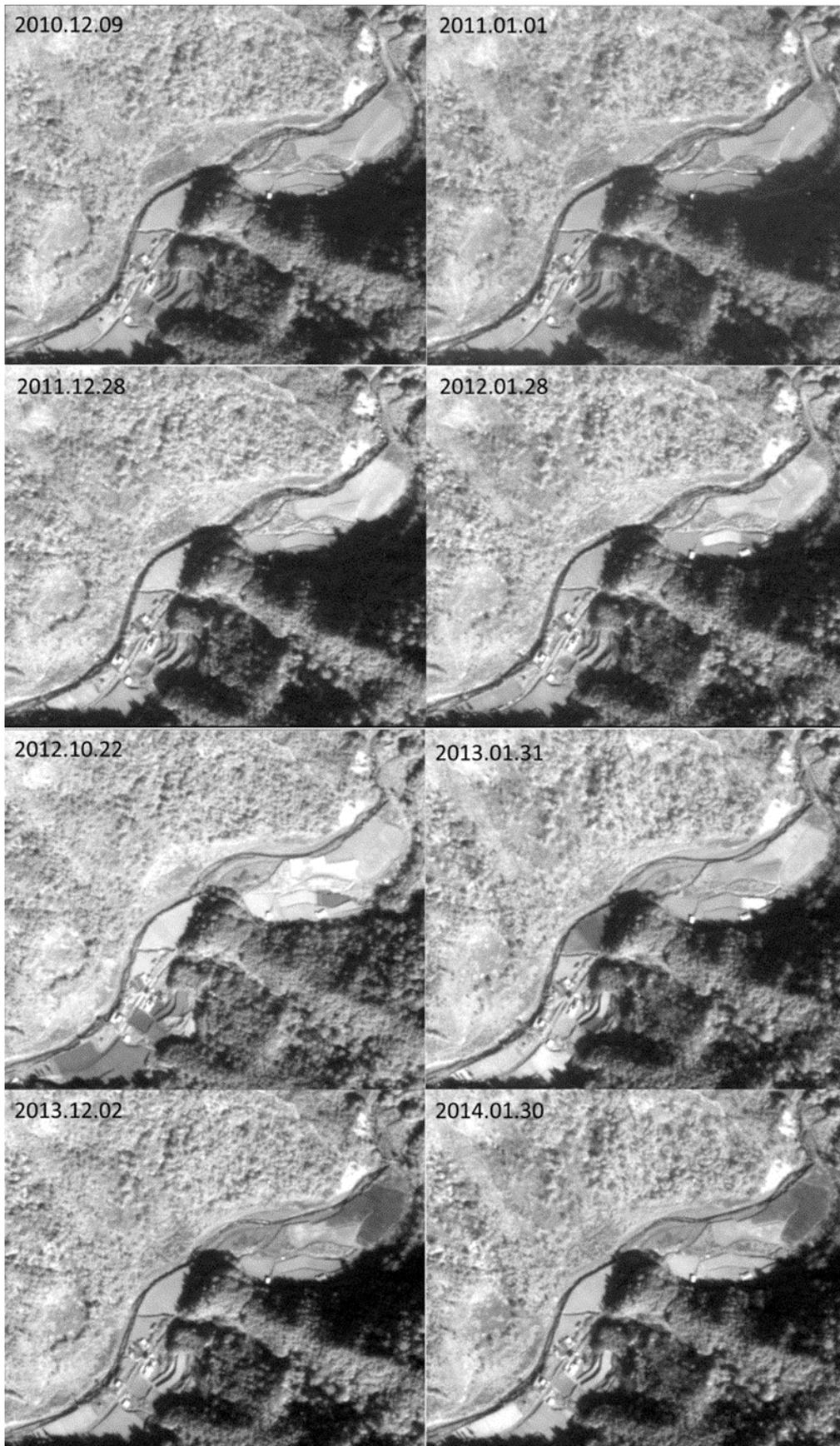


圖 3.24 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2010.12-2014.01)

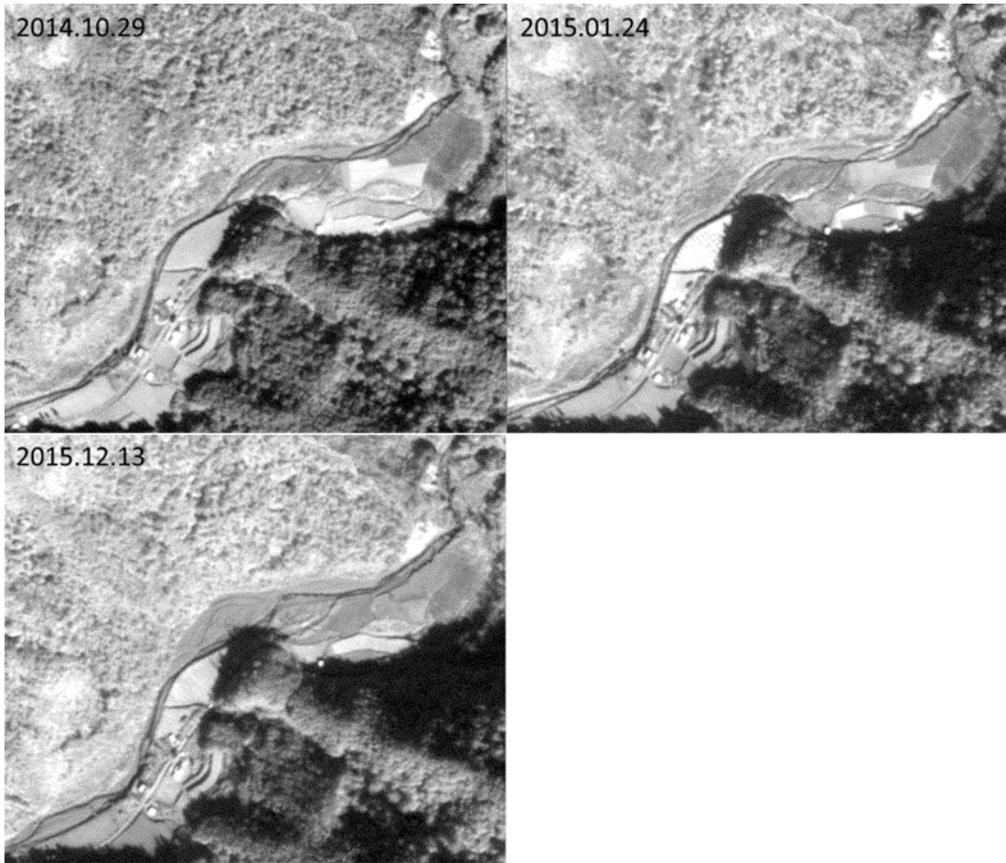


圖 3.25 有勝溪 Zone-Y4 變遷河段歷年衛星影像圖(2014.10-2015.12)

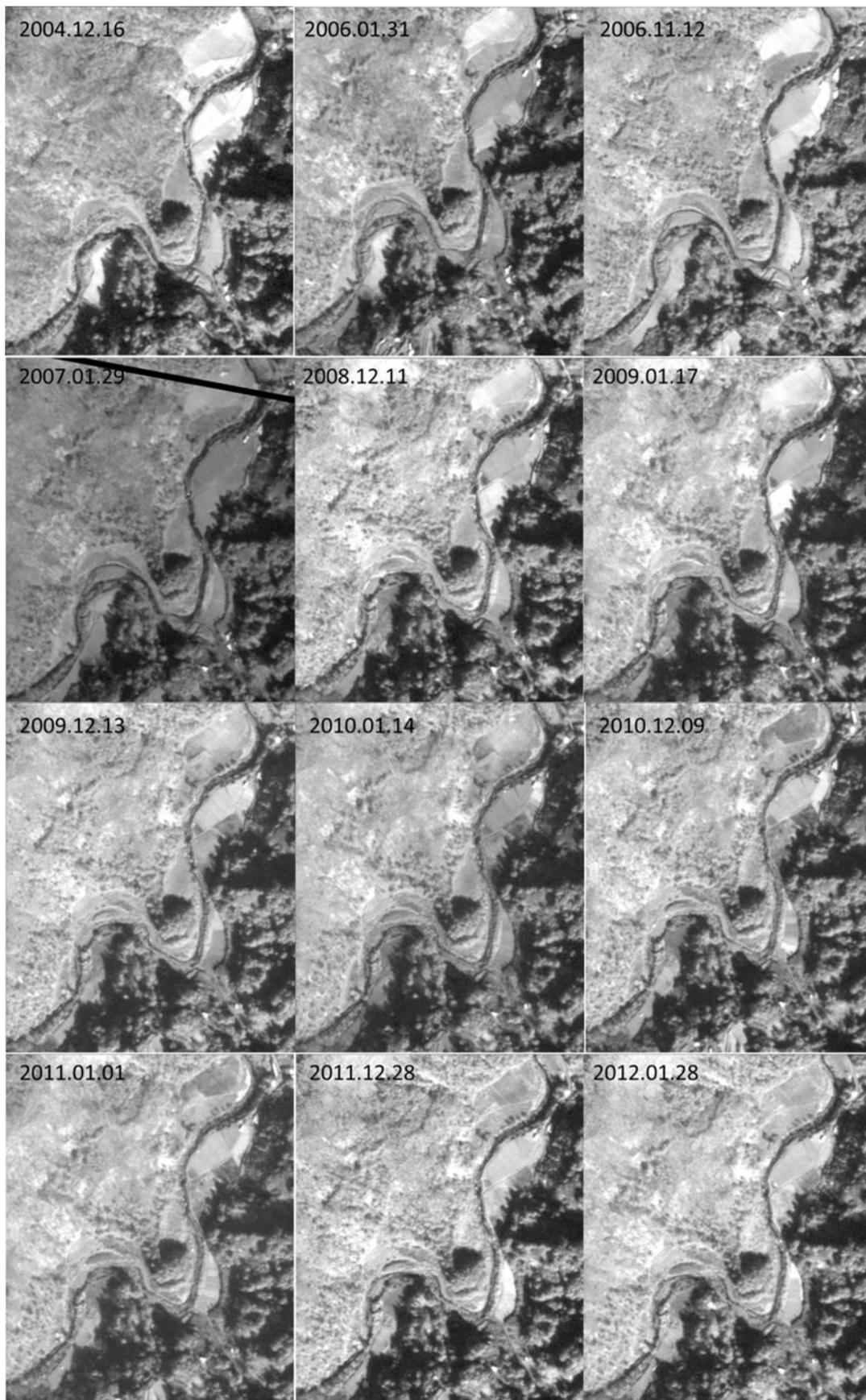


圖 3.26 有勝溪 Zone-Y5 變遷河段歷年衛星影像圖(2004.12-2012.01)

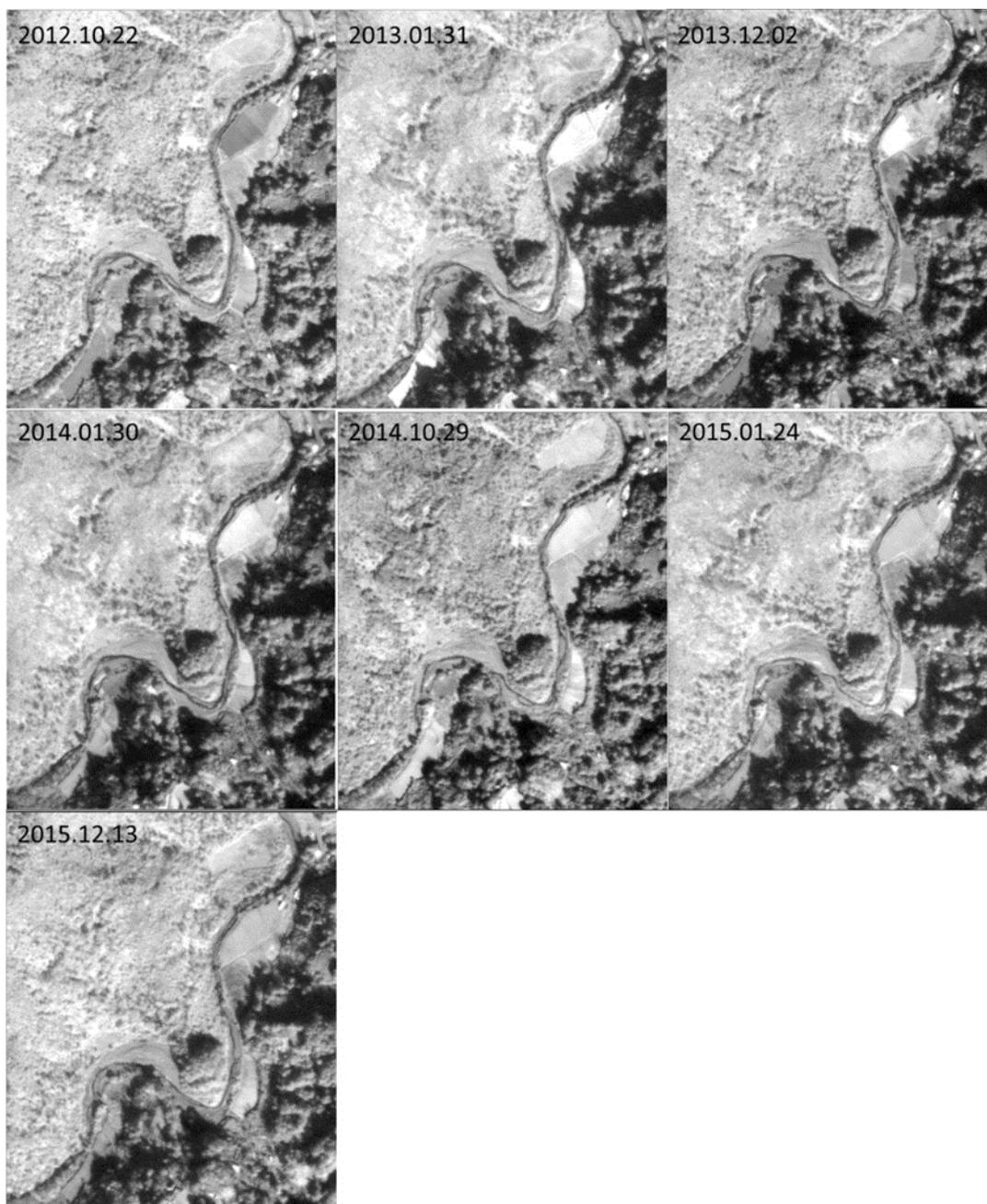


圖 3.27 有勝溪 Zone-Y5 變遷河段歷年衛星影像圖(2012.10-2015.12)

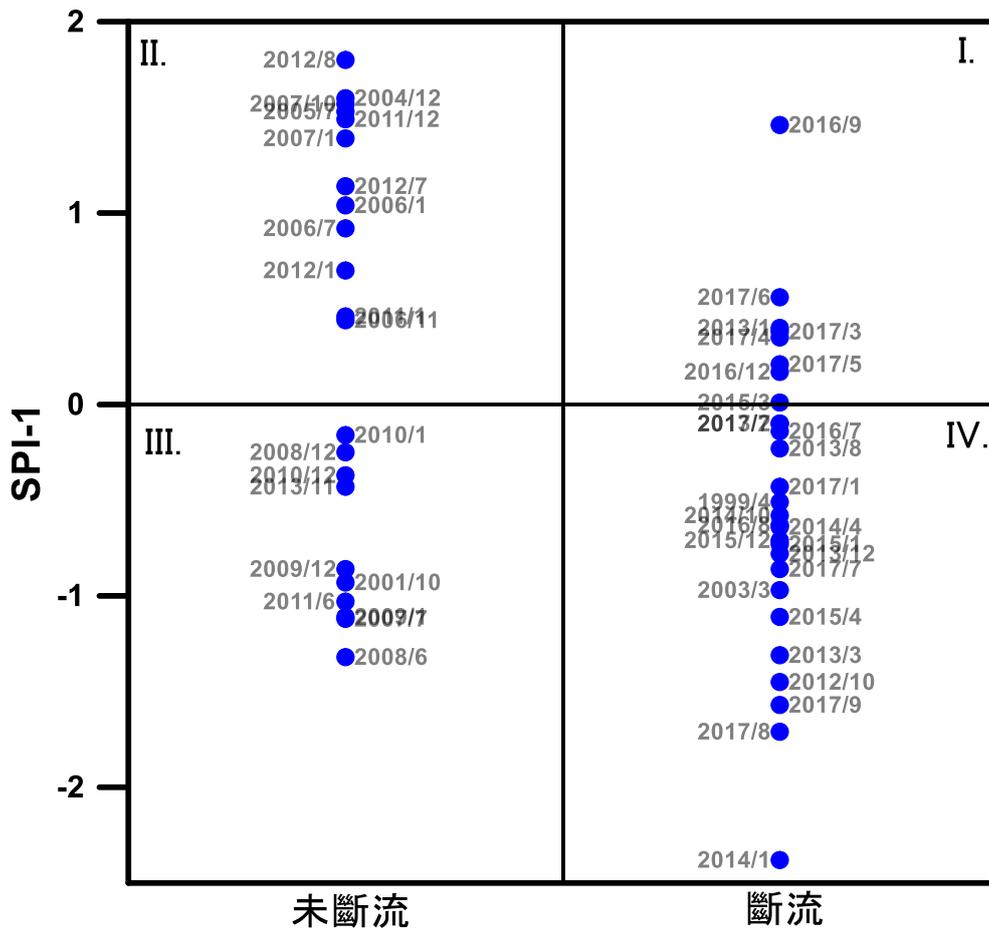


圖 3.28 SPI-1 與有勝溪斷流之關係：I 表第一象限，該時期斷流但 SPI-1 大於 0；II 表第二象限，該時期未斷流且 SPI-1 大於 0；III 表第三象限，該時期未斷流但 SPI-1 小於 0；IV 表第四象限，該時期斷流且 SPI-1 小於 0。

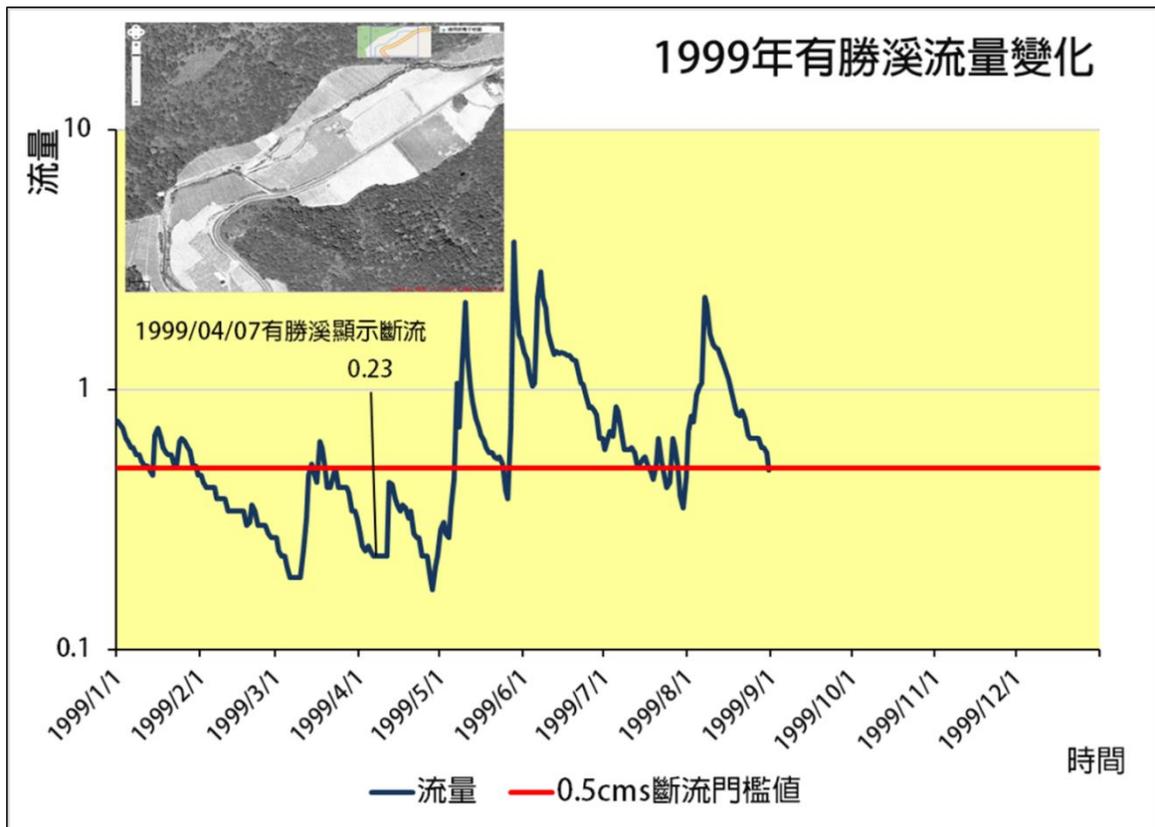


圖 3.29 1999 年 4 月 7 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量：0.230 cms)

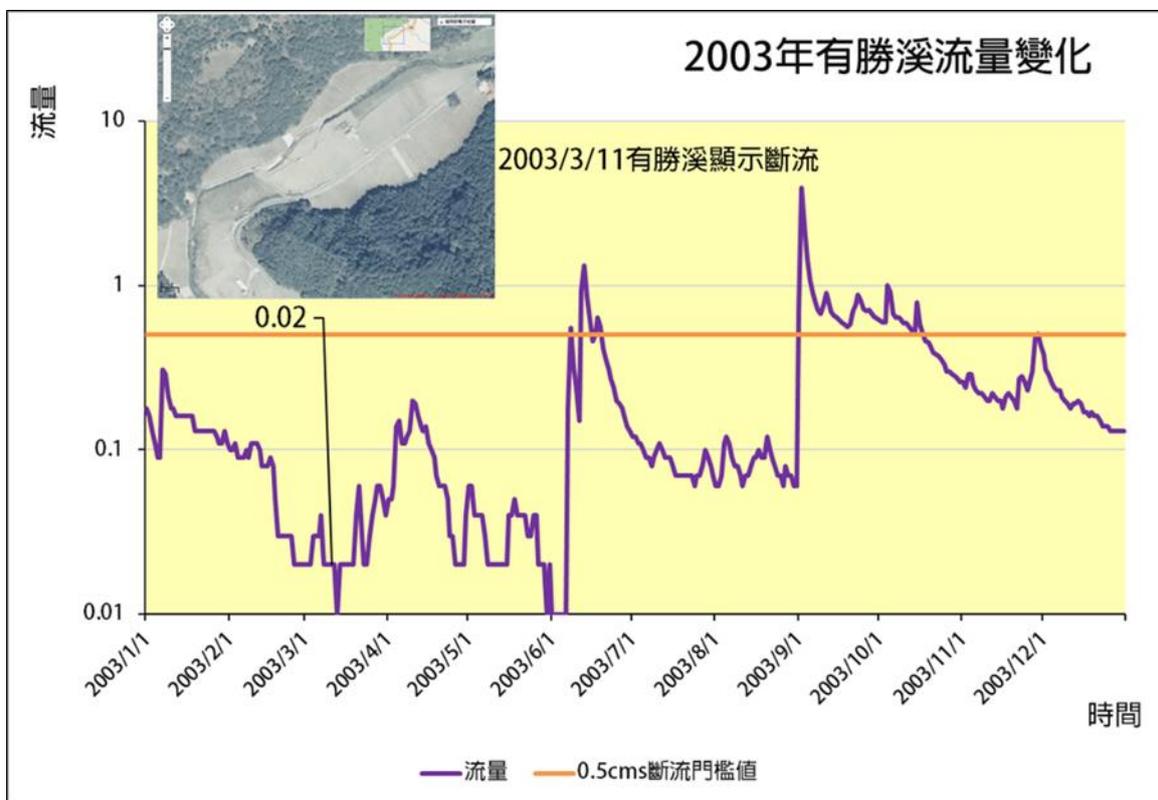


圖 3.30 2003 年 3 月 11 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量：0.020 cms)

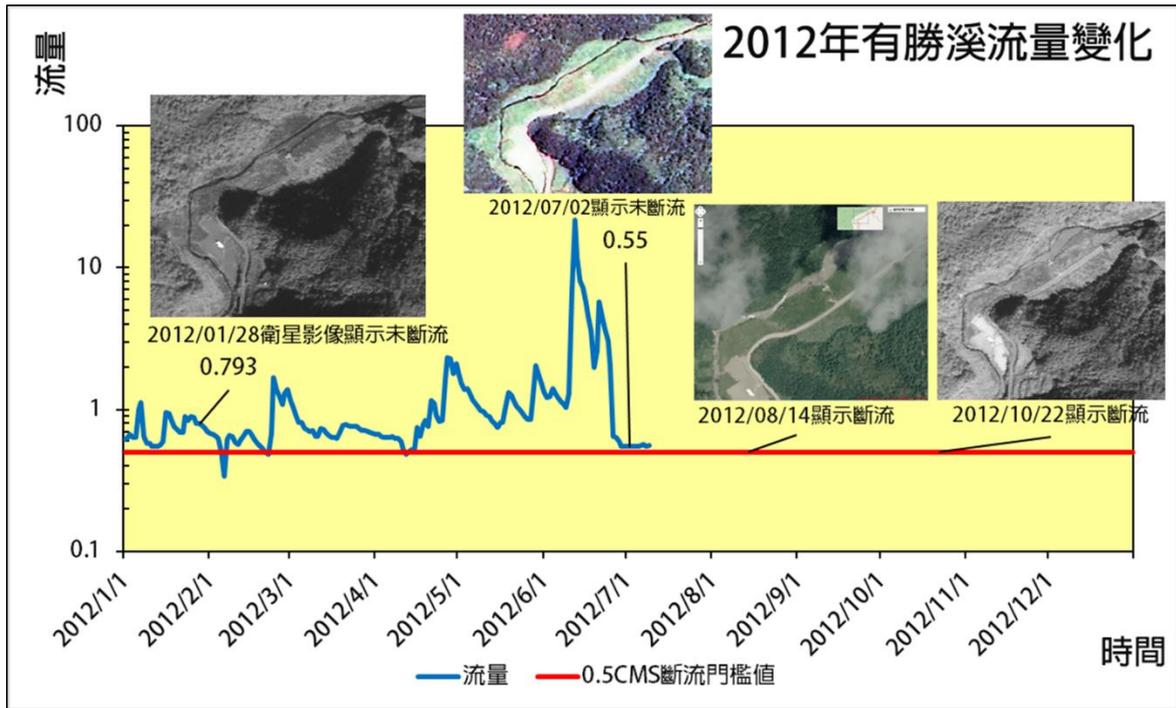


圖 3.31 2012 年 1 月 28 日、7 月 2 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.793cms、0.550 cms)；2012 年 8 月 14 日、10 月 22 日衛星影像顯示有勝溪斷流(無觀測流量)

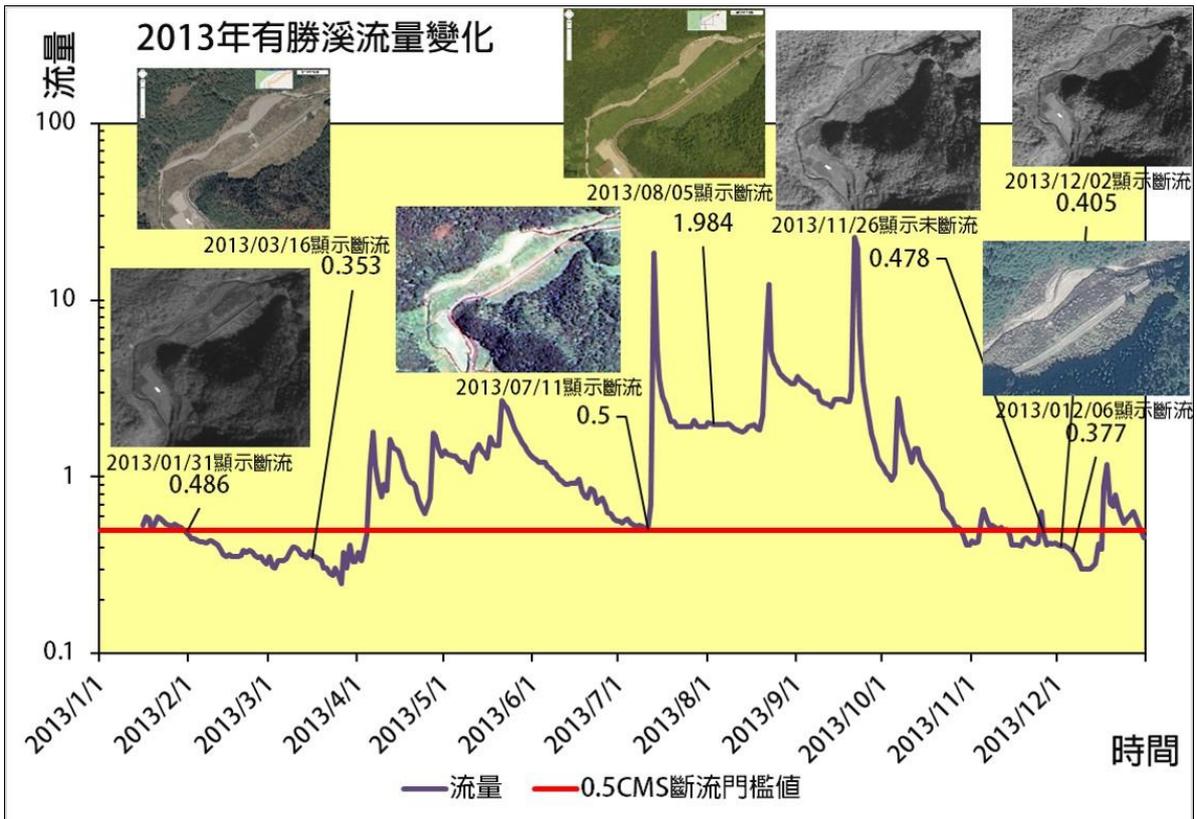


圖 3.32 2013 年 1 月 31 日、7 月 11 日、11 月 26 日、12 月 2 日及 12 月 6 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.486 cms、0.5 cms、0.478 cms、0.405 cms、0.377 cms)

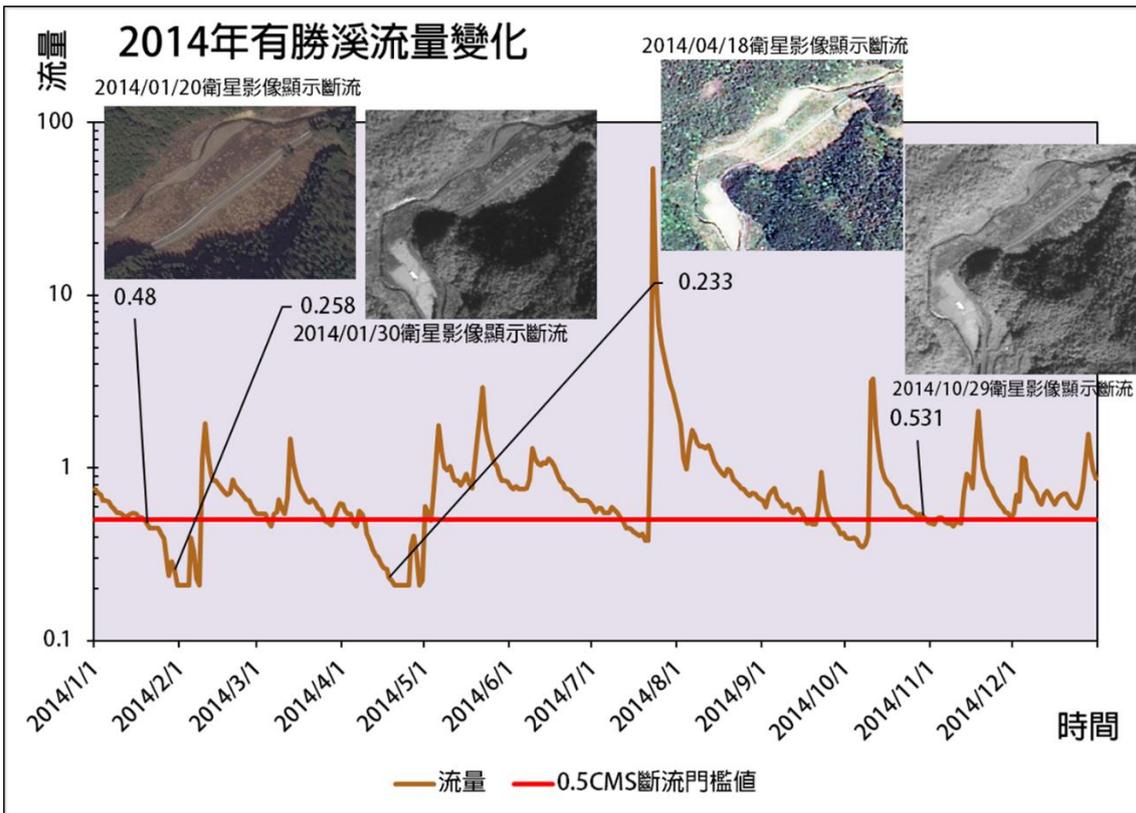


圖 3.33 2014 年 1 月 20 日、1 月 30 日、4 月 18 日及 10 月 29 日衛星影像則顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.480 cms、0.258 cms、0.233 cms、0.531 cms)

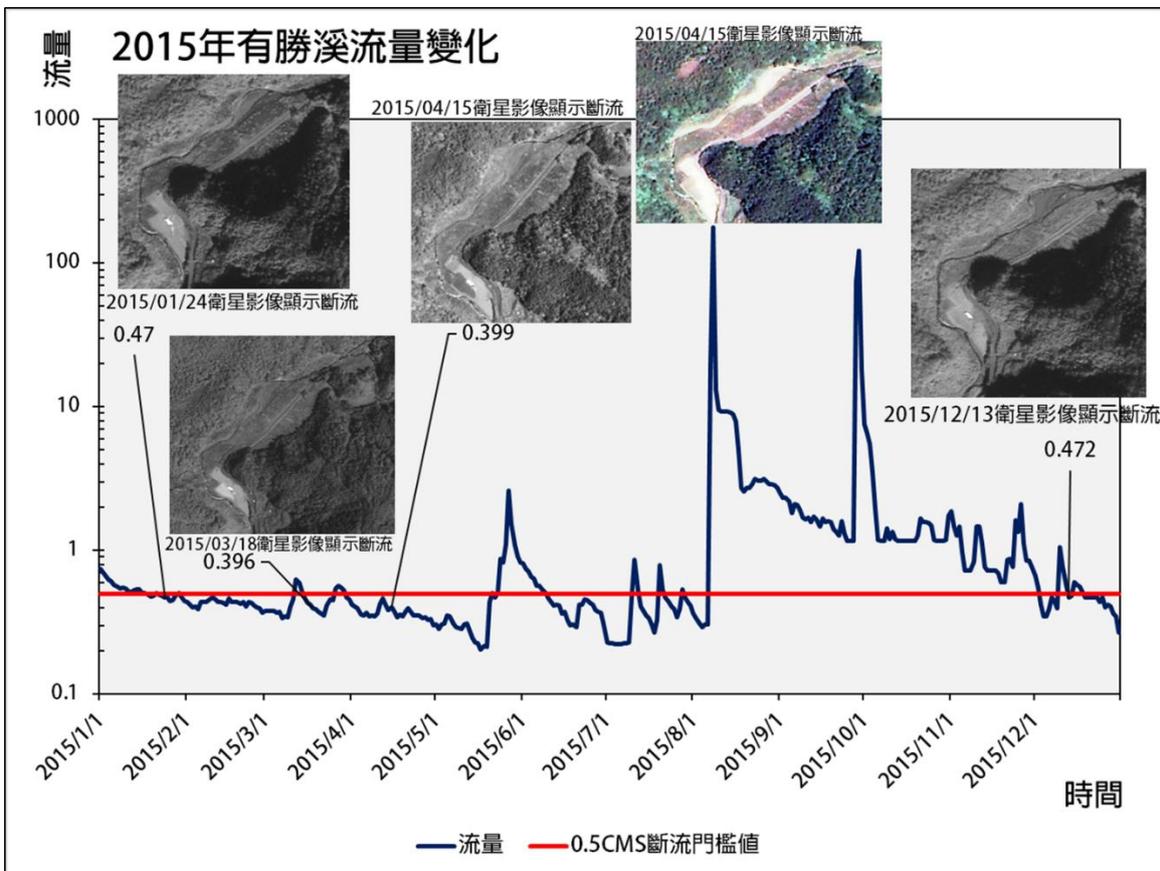


圖 3.34 2015 年 1 月 24 日、3 月 18 日、4 月 15 日、12 月 13 日衛星影像顯示有勝溪斷流(觀測流量分別為 0.470、0.396、0.399、0.472 cms)

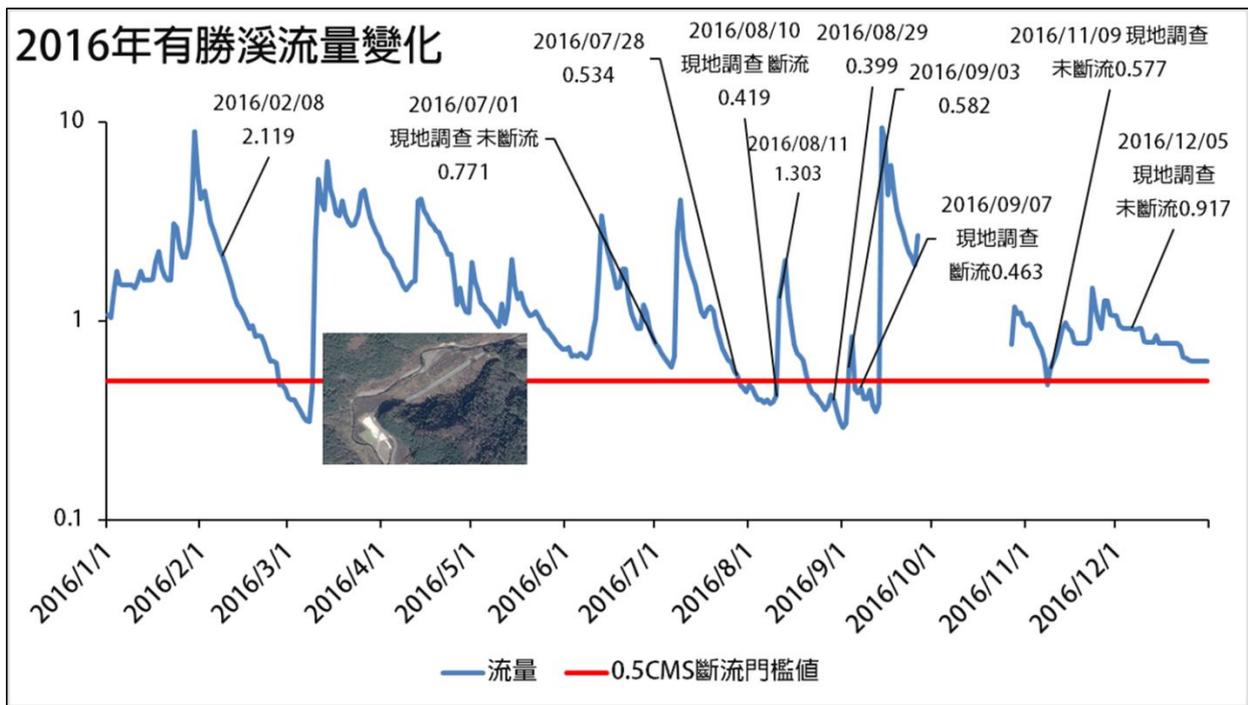


圖 3.35 2016 年 2 月 8 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：2.12 cms)

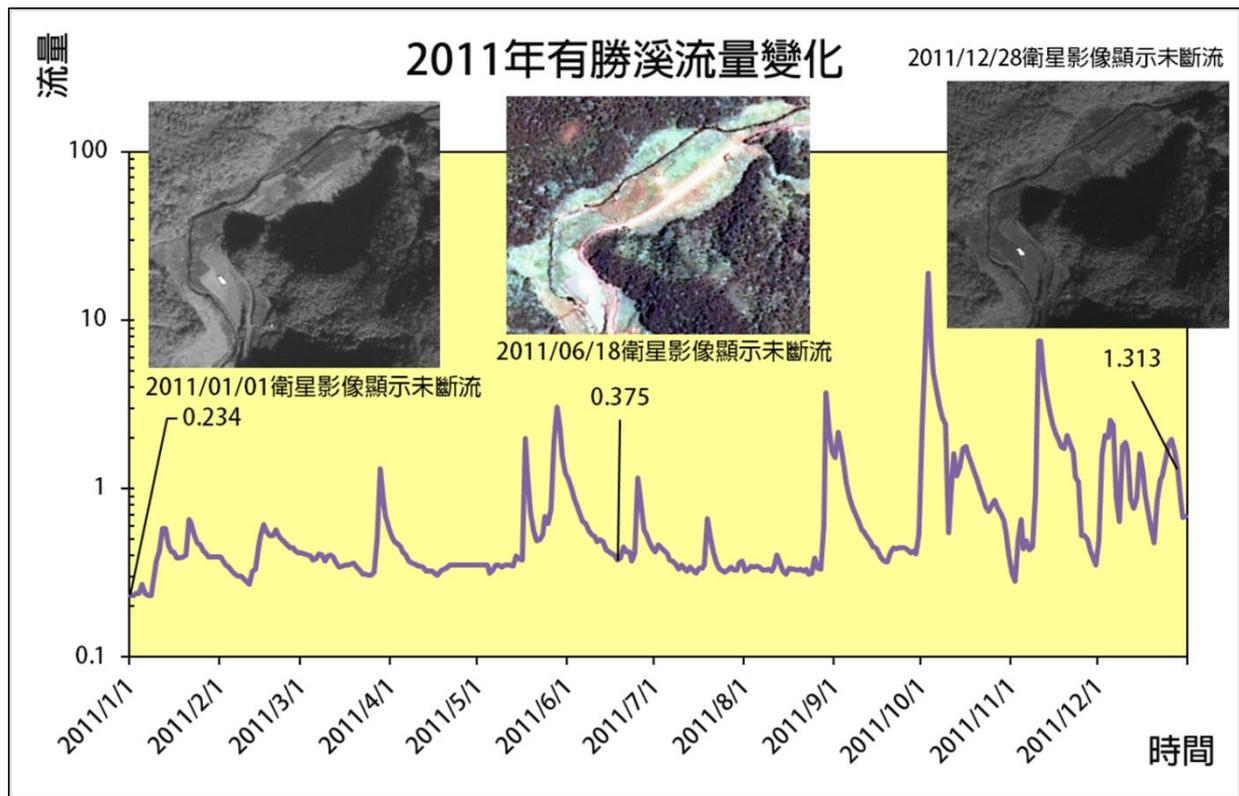


圖 3.36 2011 年 1 月 1 日、6 月 18 日及 12 月 28 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.234、0.375、1.313 cms)

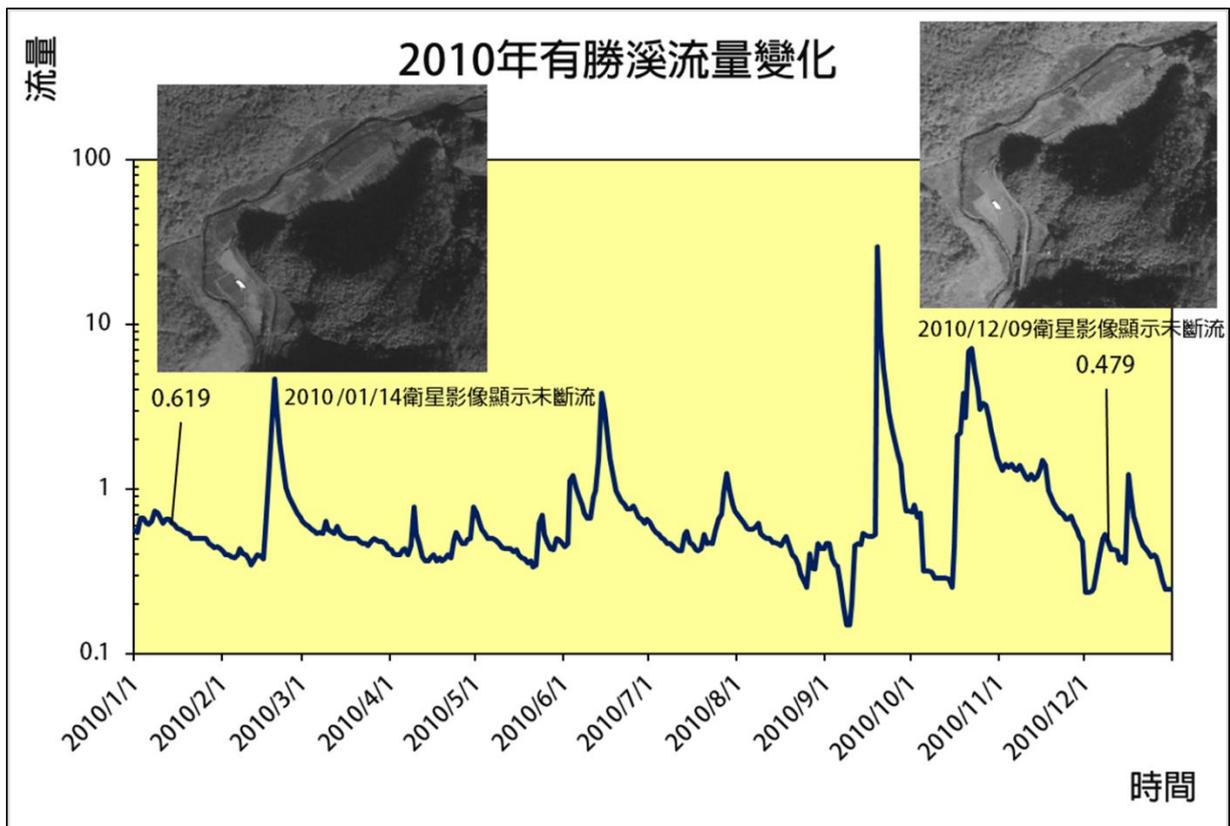


圖 3.37 2010 年 1 月 14 日、12 月 9 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.619 cms、0.479 cms)

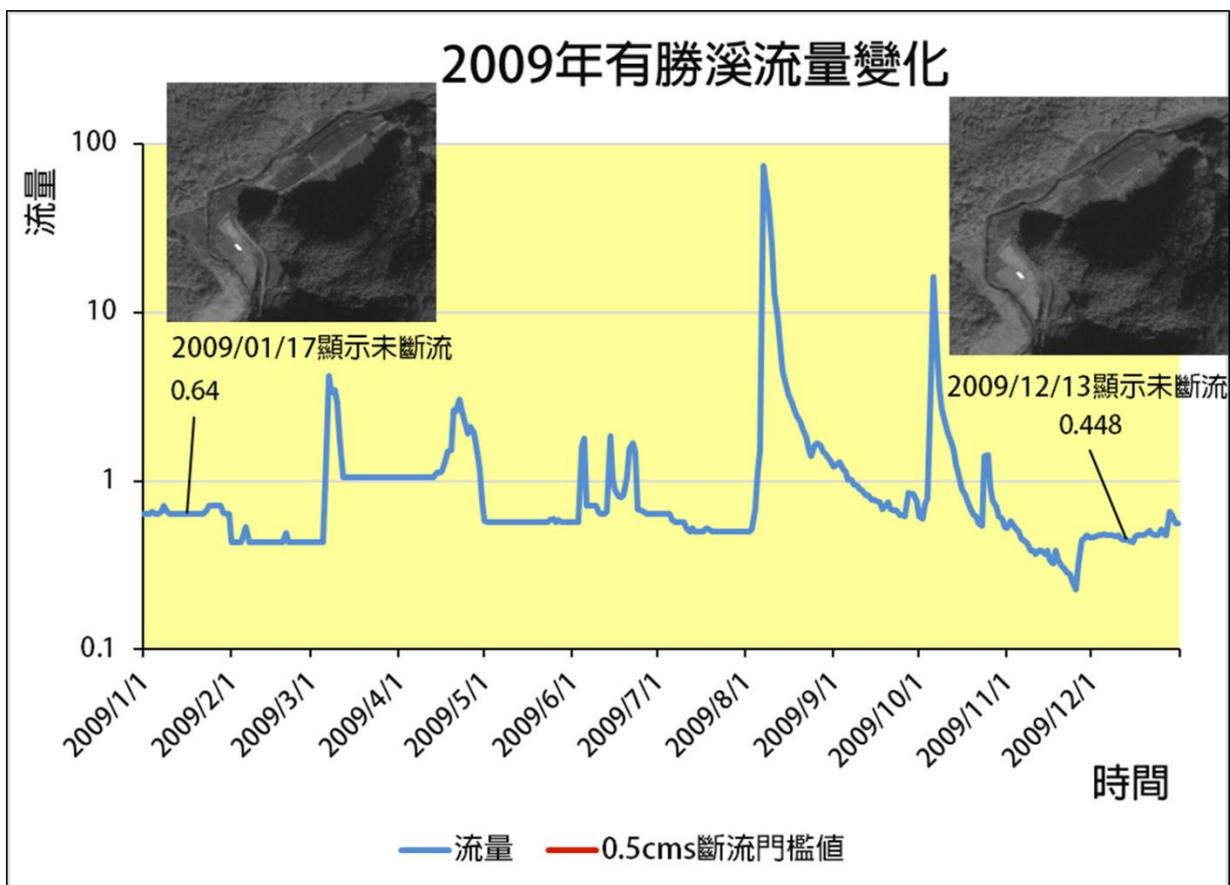


圖 3.38 2009 年 1 月 17 日、12 月 13 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量:0.640、0.448 cms)

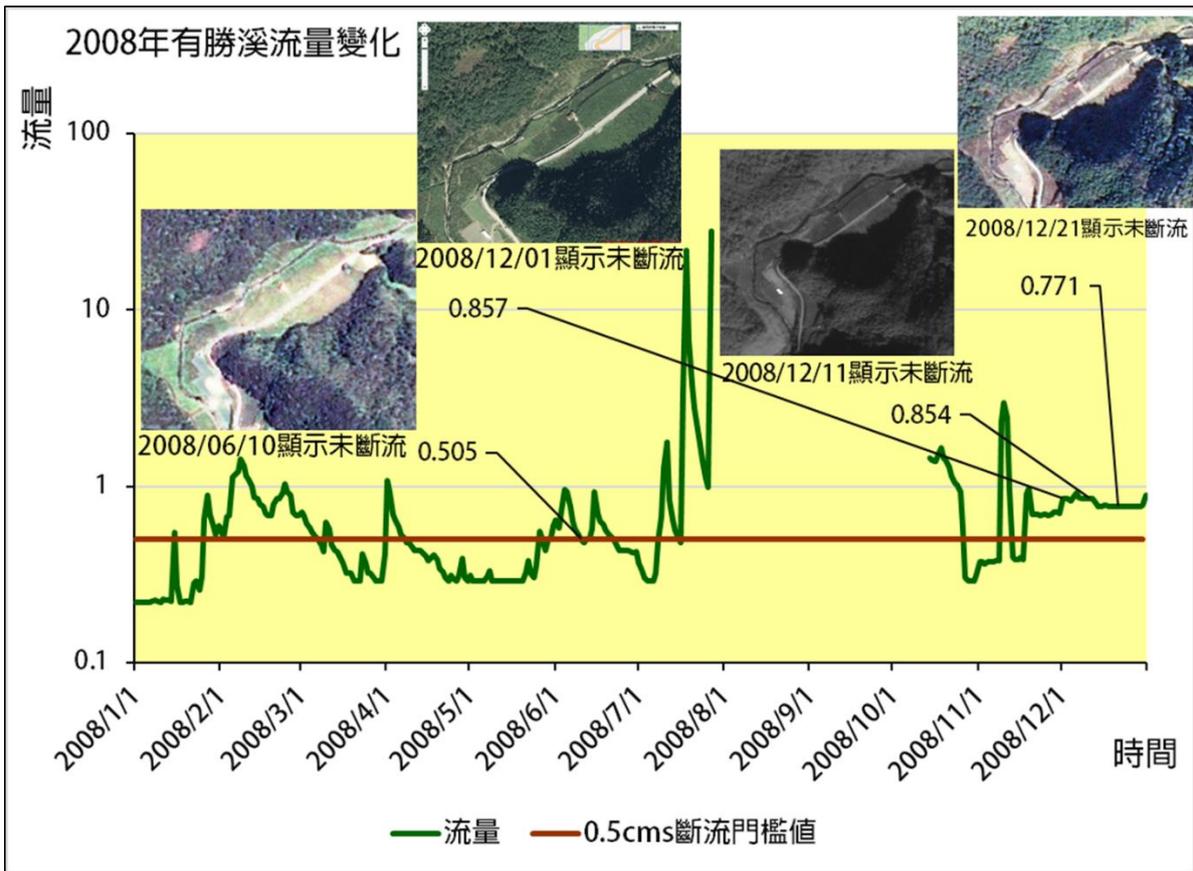


圖 3.39 2008 年 6 月 10 日、12 月 1 日、12 月 11 日、12 月 21 日衛星影像與航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.505 cms、0.857 cms、0.854 cms、0.771cms)

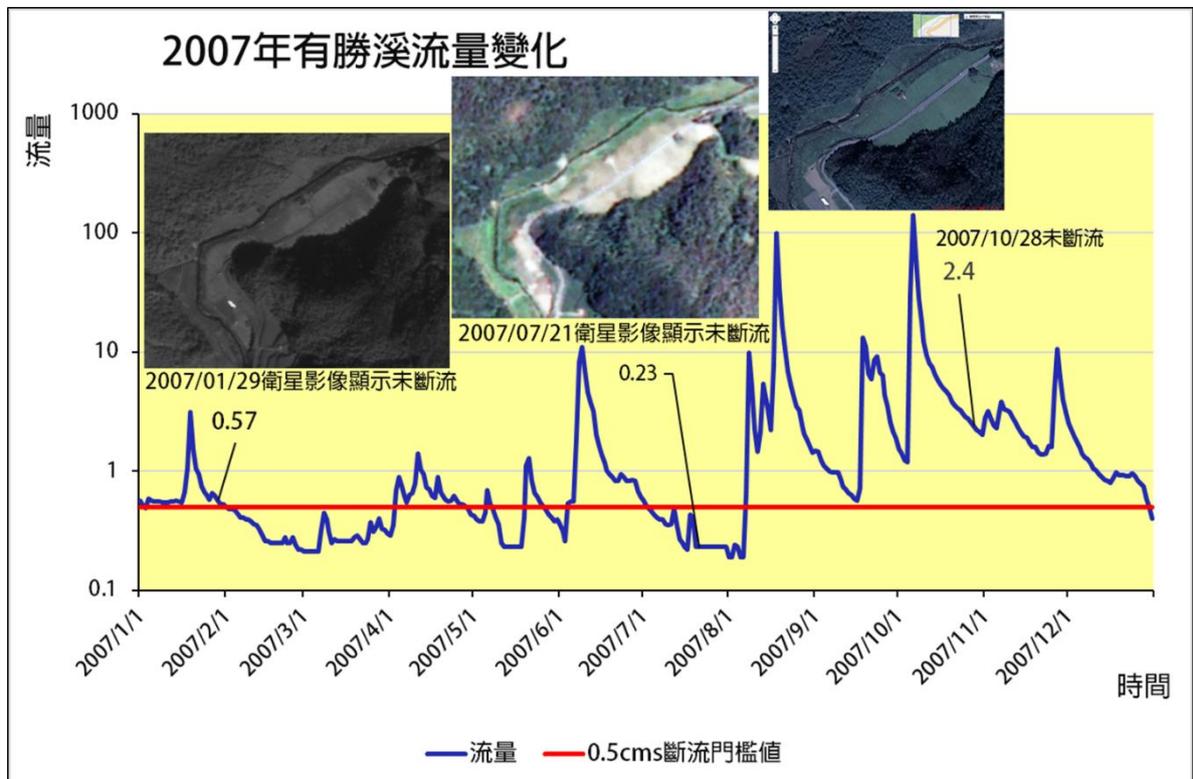


圖 3.40 2007 年 1 月 29 日、7 月 21 日、10 月 28 日衛星影像與航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流分別為 0.570 cms、0.230 cms、2.400 cms)

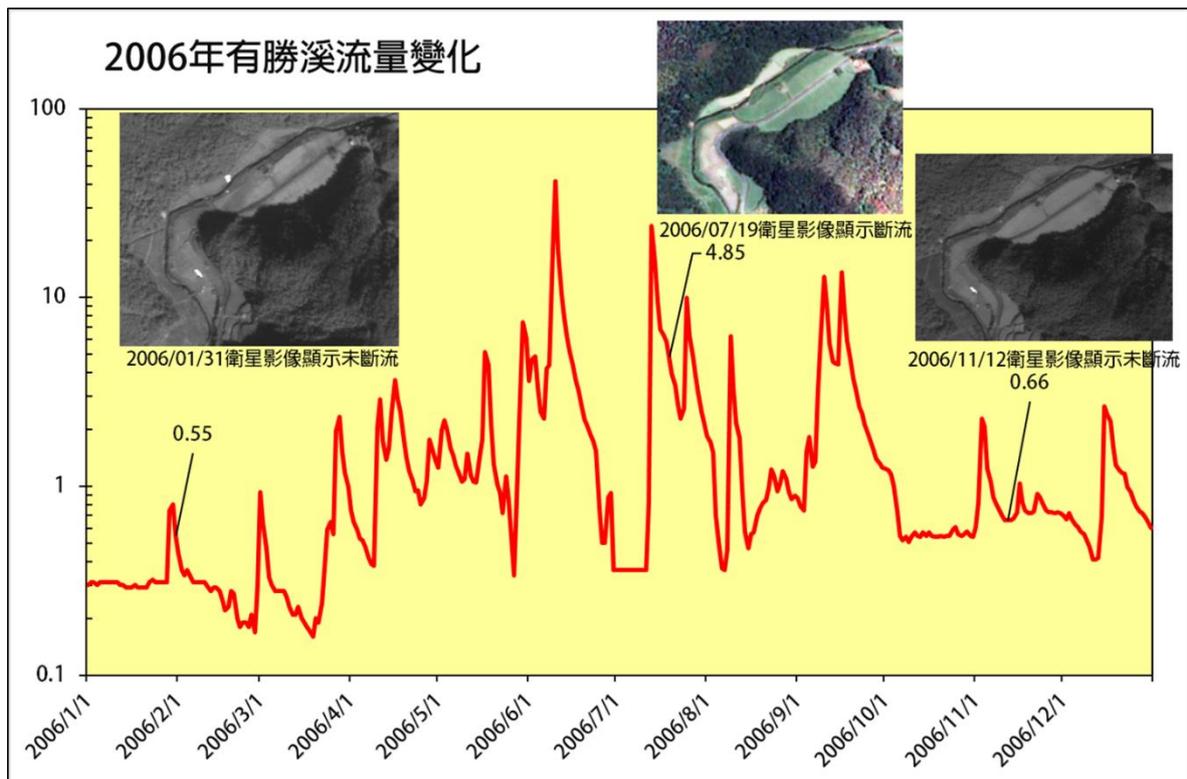


圖 3.41 2006 年 1 月 31 日、7 月 19 日及 11 月 12 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量分別為 0.550 cms、4.850cms、0.660cms)

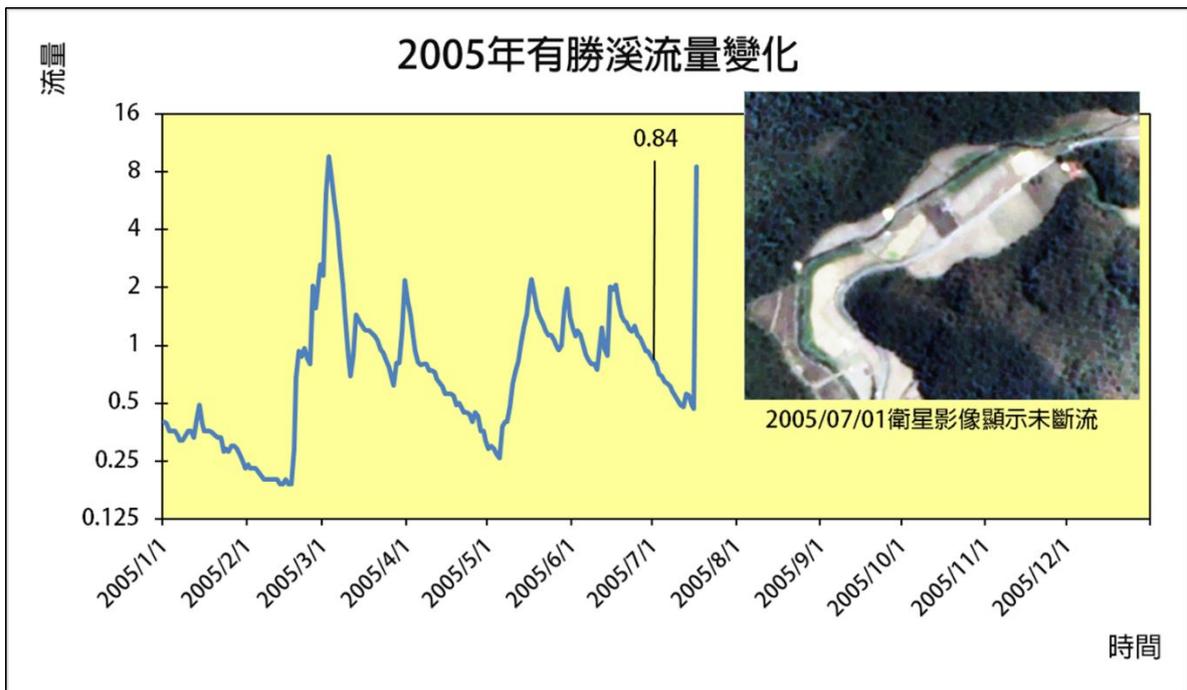


圖 3.42 2005 年 7 月 1 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.840cms)

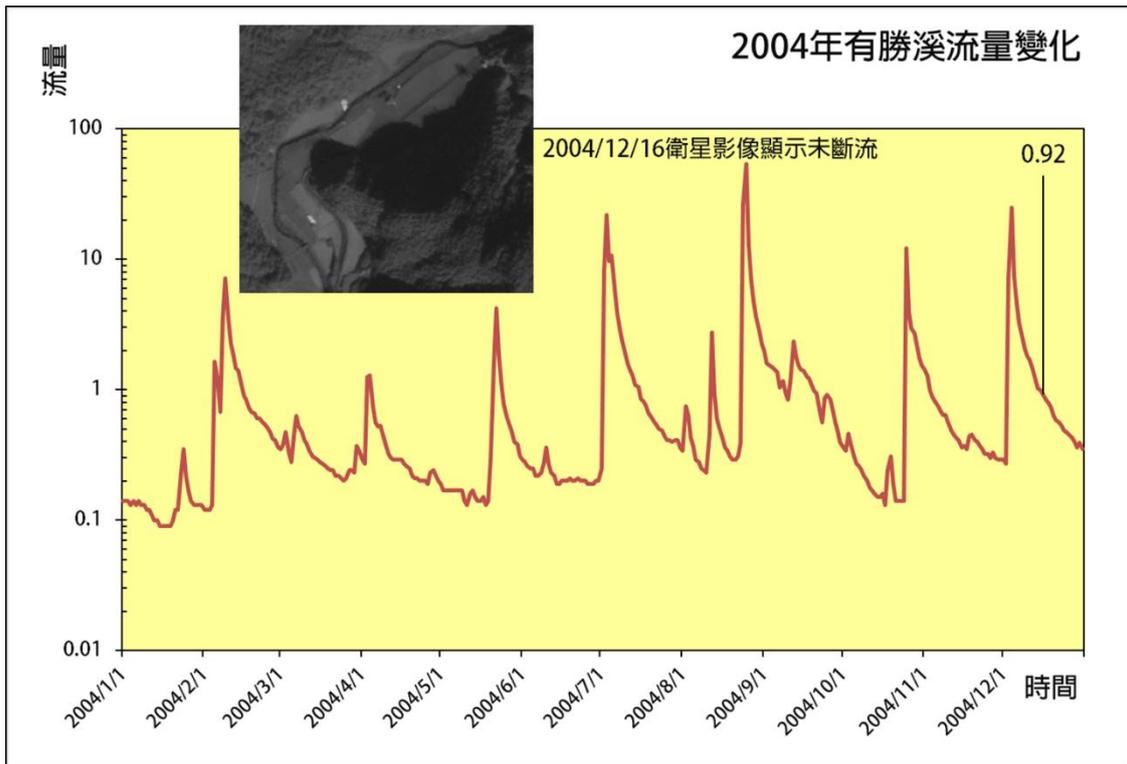


圖 3.43 2004 年 12 月 16 日衛星影像顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.920cms)

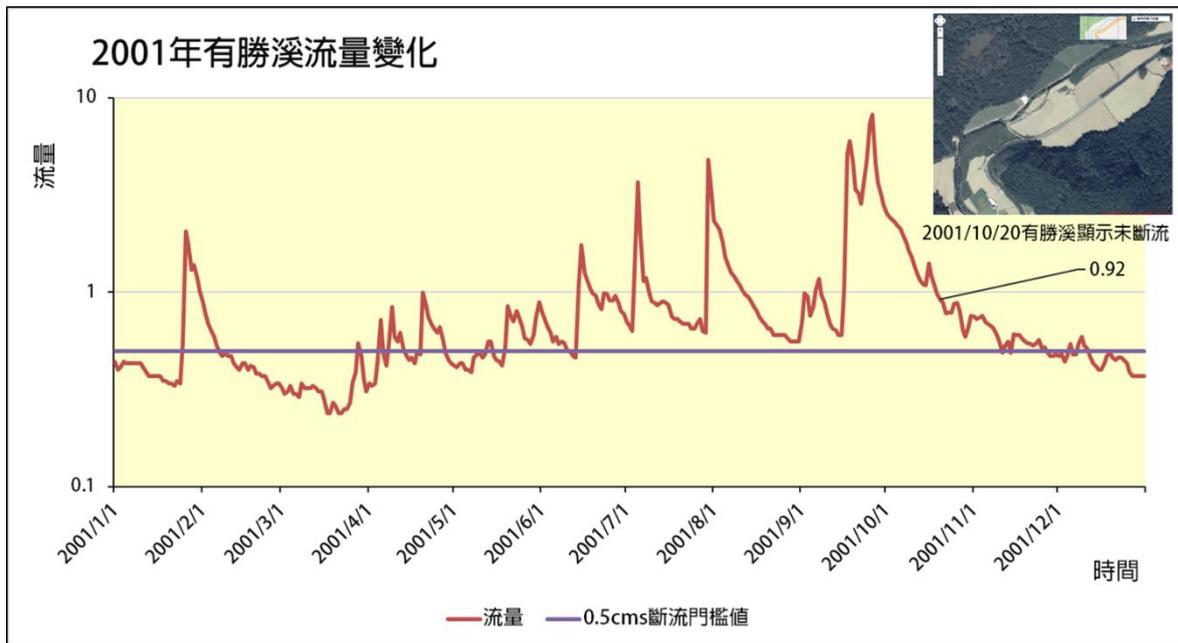


圖 3.44 2001 年 10 月 20 日航空照片顯示有勝溪未斷流(觀測流量：0.920cms)



圖 3.45 2016 年七家灣溪與桃山北溪流量變化情況

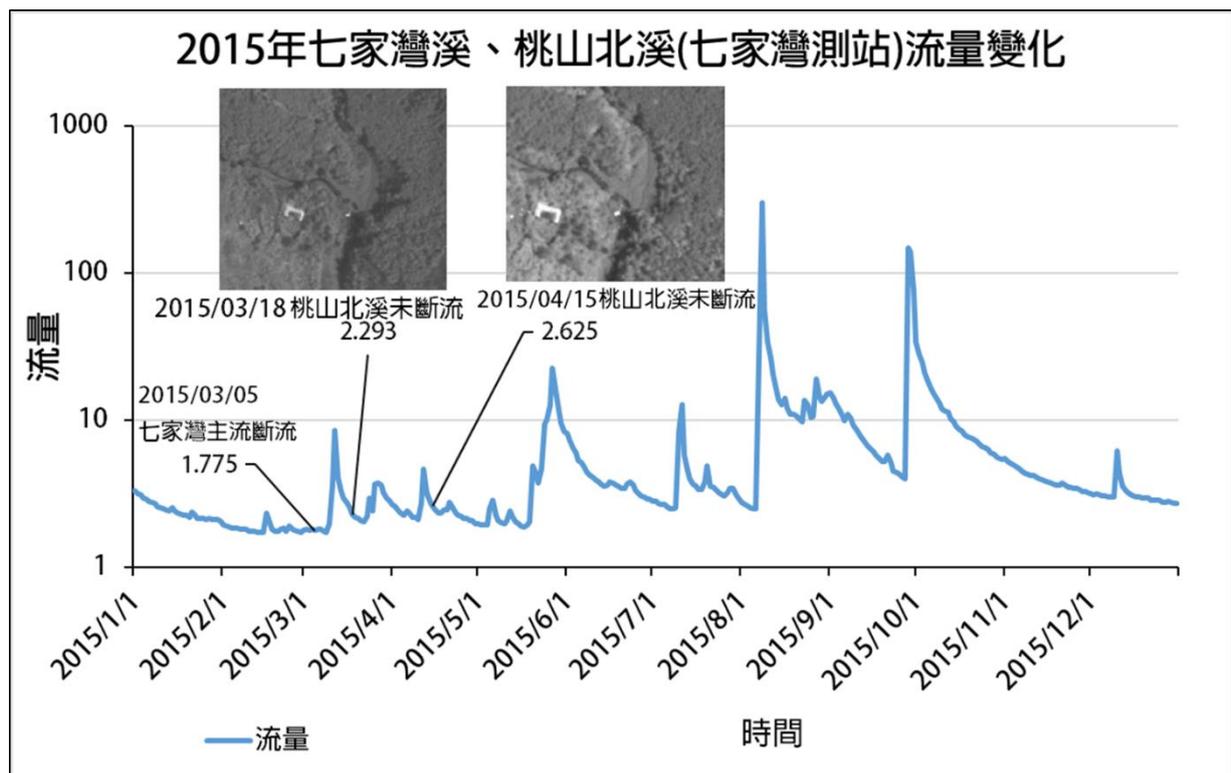


圖 3.46 2015 年 3 月 5 日現地調查發現七家灣溪主流斷流(觀測流量：1.775 cms)；2015 年 3 月 18 日與 4 月 15 日衛星影響顯示桃山北溪未斷流(觀測流量：2.293 cms、2.625 cms)

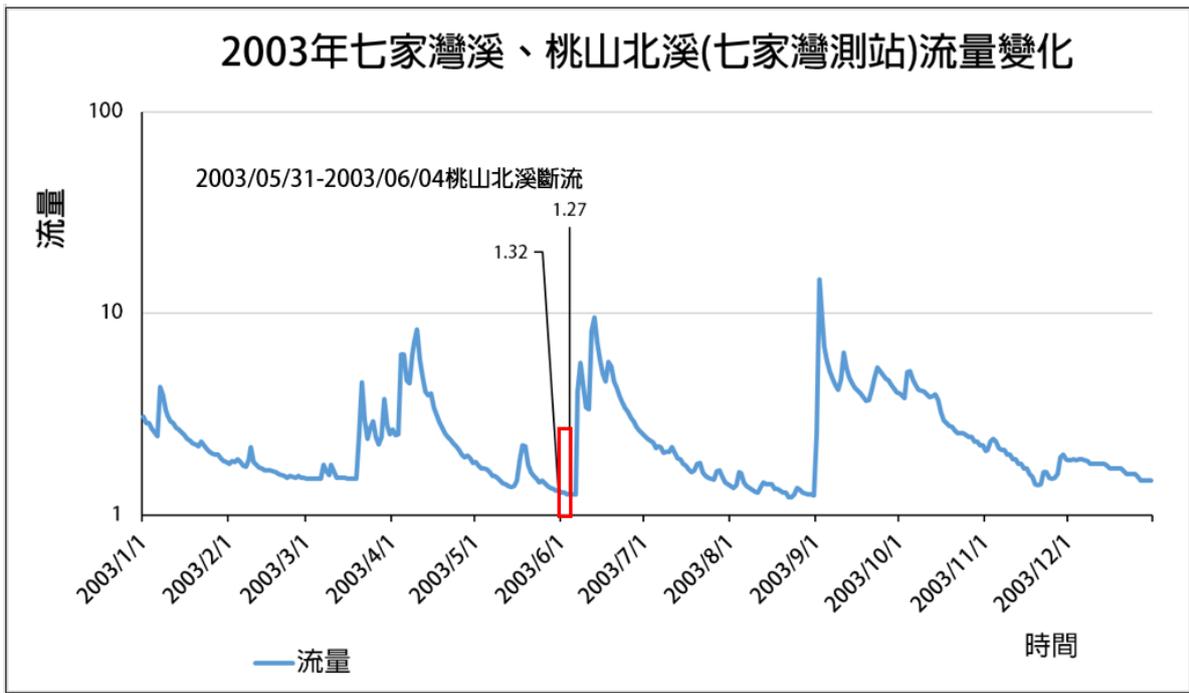


圖 3.47 2003 年 5 月 31 日至 6 月 4 日過去研究報告指出桃山北溪斷流(觀測流量：1.32 cms 至 1.27 cms)

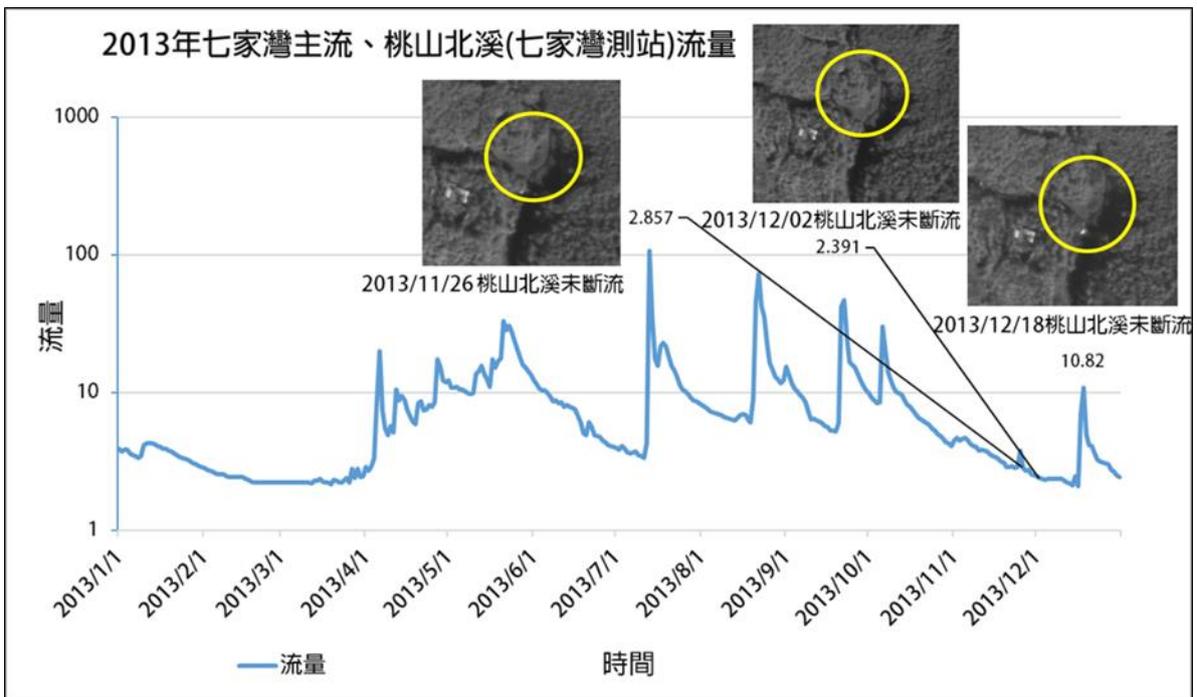


圖 3.48 2013 年 11 月 26 日、12 月 2 日與 12 月 18 日衛星影像顯示桃山北溪未斷流(觀測流量：2.857 cms、2.391 cms、10.82 cms)

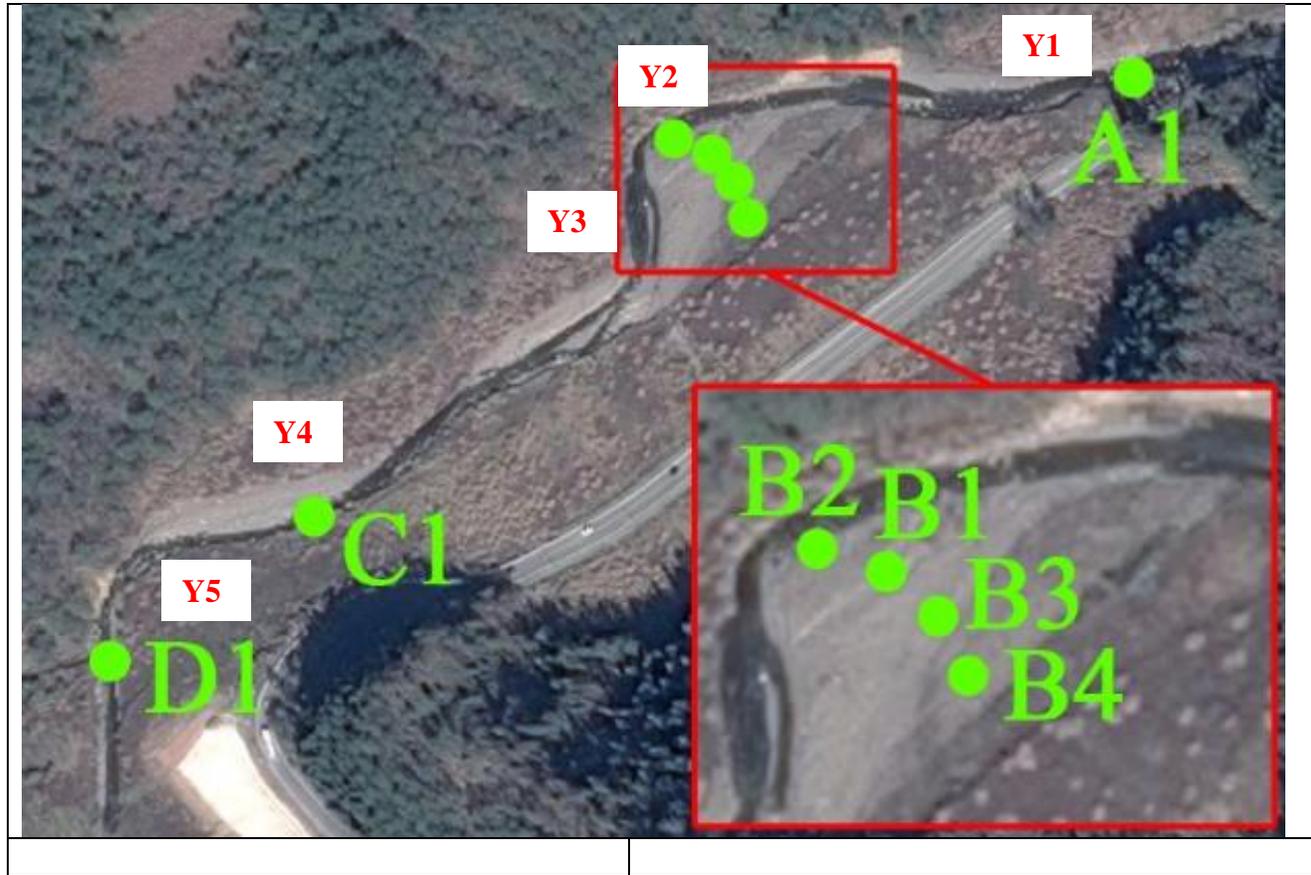




圖 3.49 有勝溪(上)、七家灣溪(左下)、桃山北溪(右下)流量觀測點

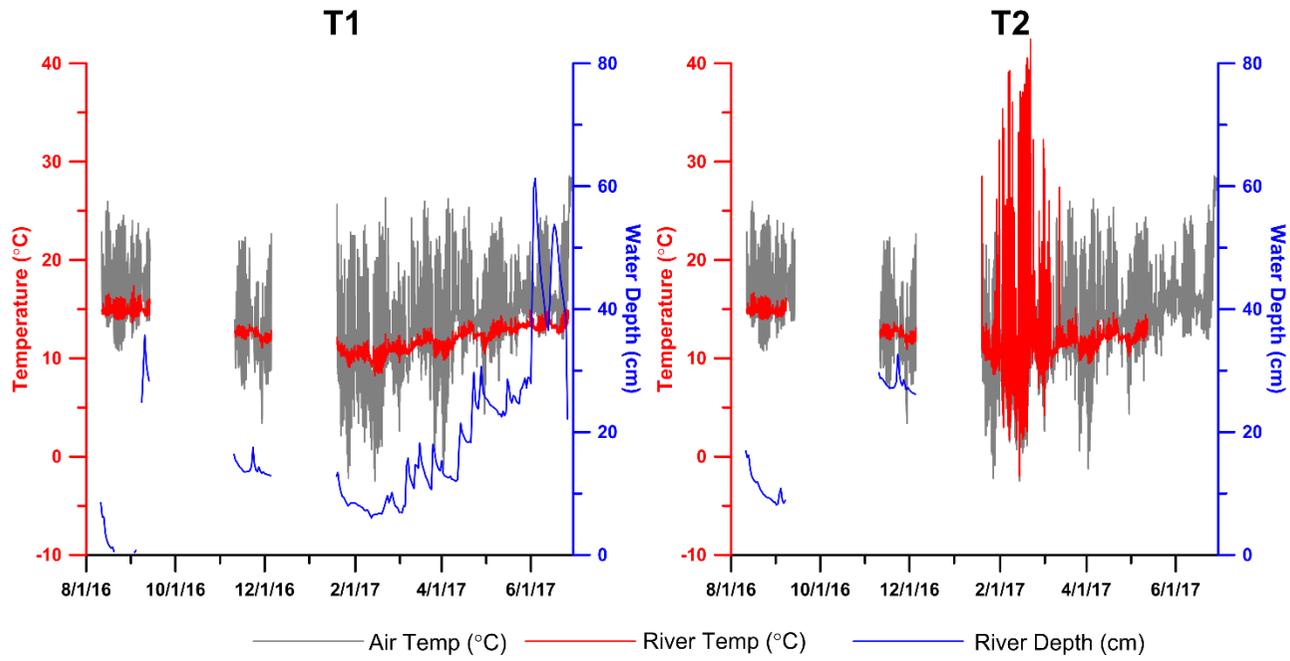


圖 3.50 桃山北溪潛在斷流處之水位觀測

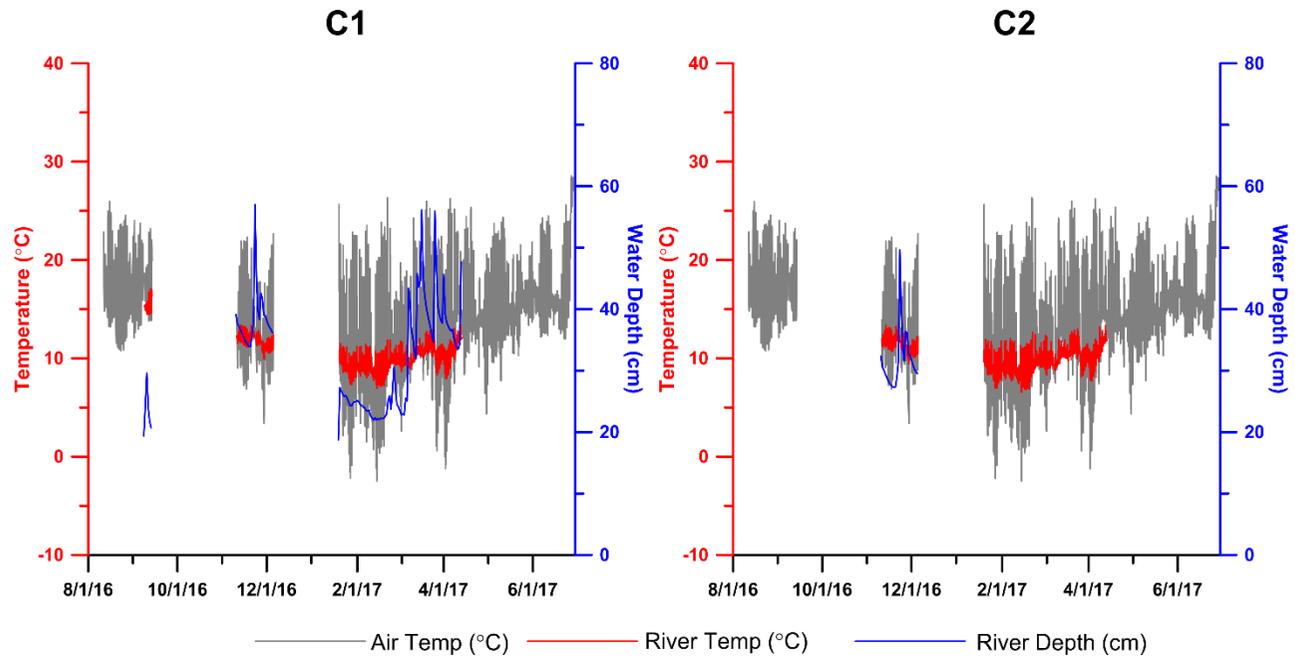


圖 3.51 七家灣溪潛在斷流處之水位觀測

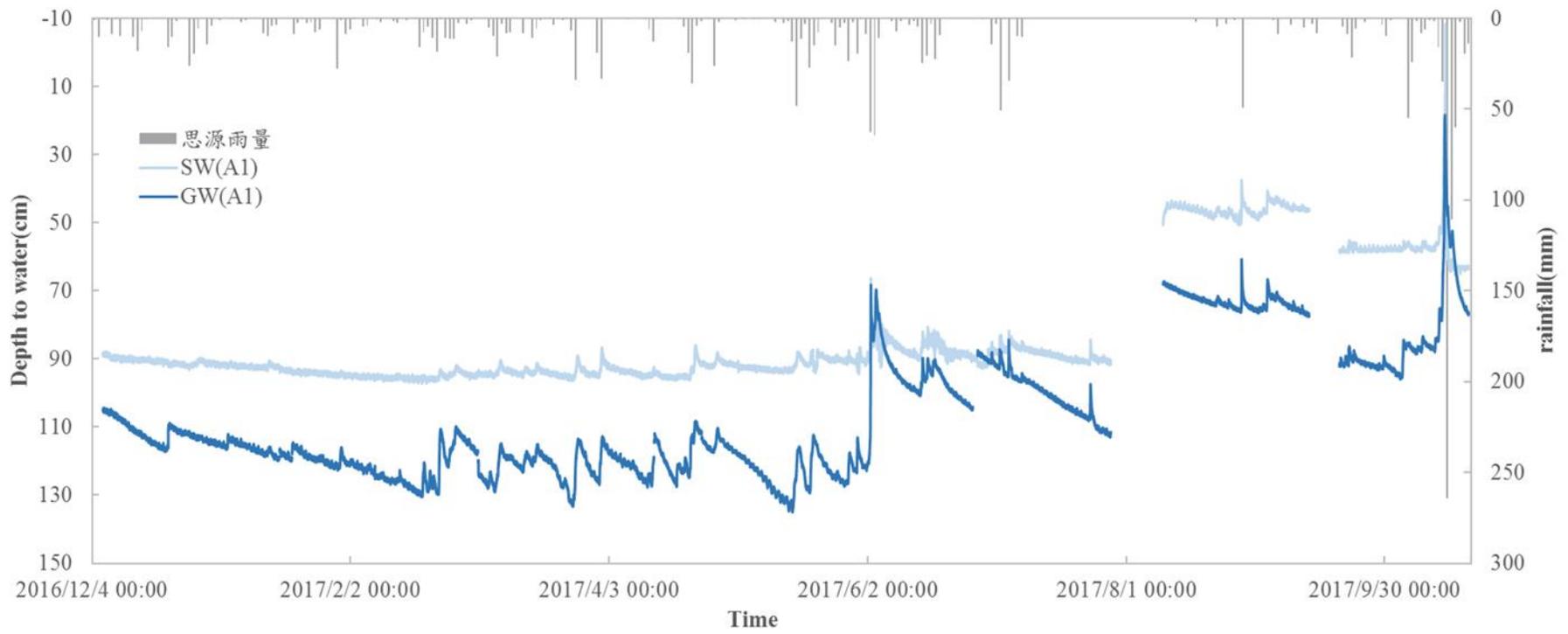


圖 3.52 A1 河川與二吋井地下水水位歷線圖

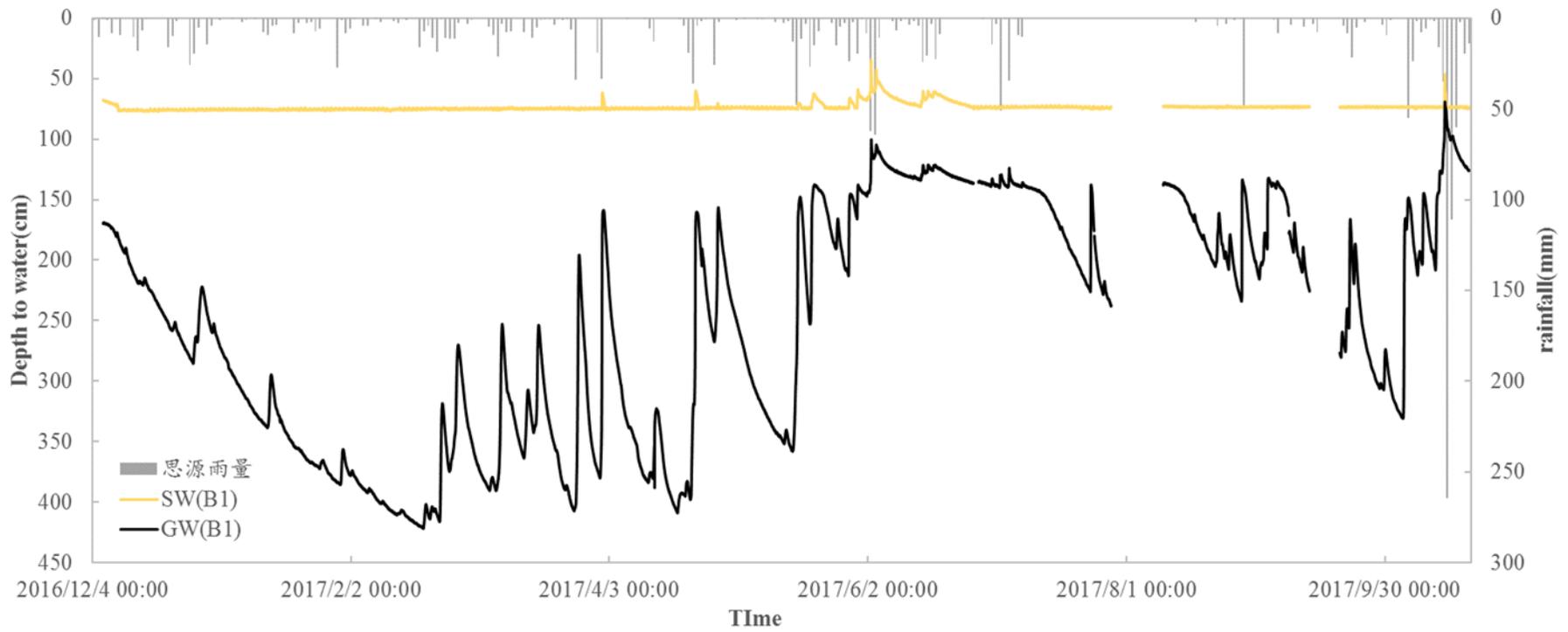


圖 3.53 B1 河川與二吋井地下水水位歷線圖

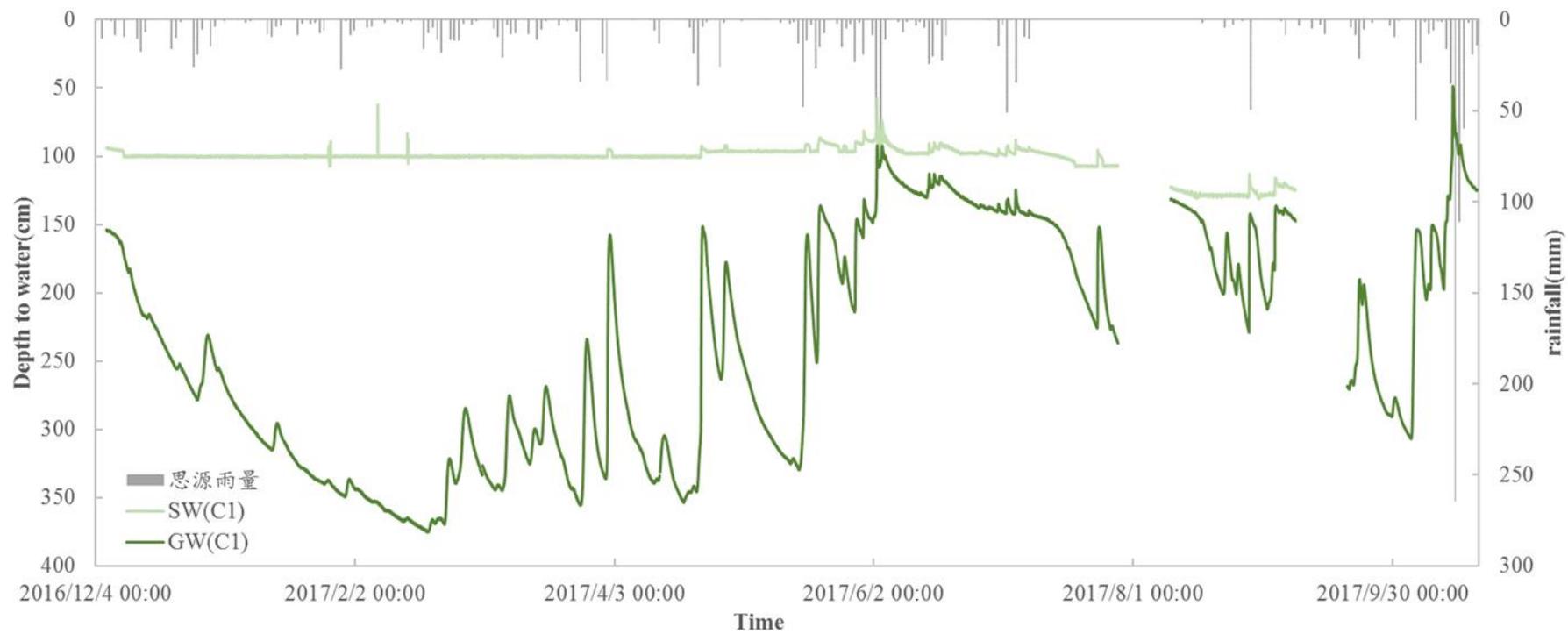


圖 3.54 C1 河川與二吋井地下水水位歷線圖

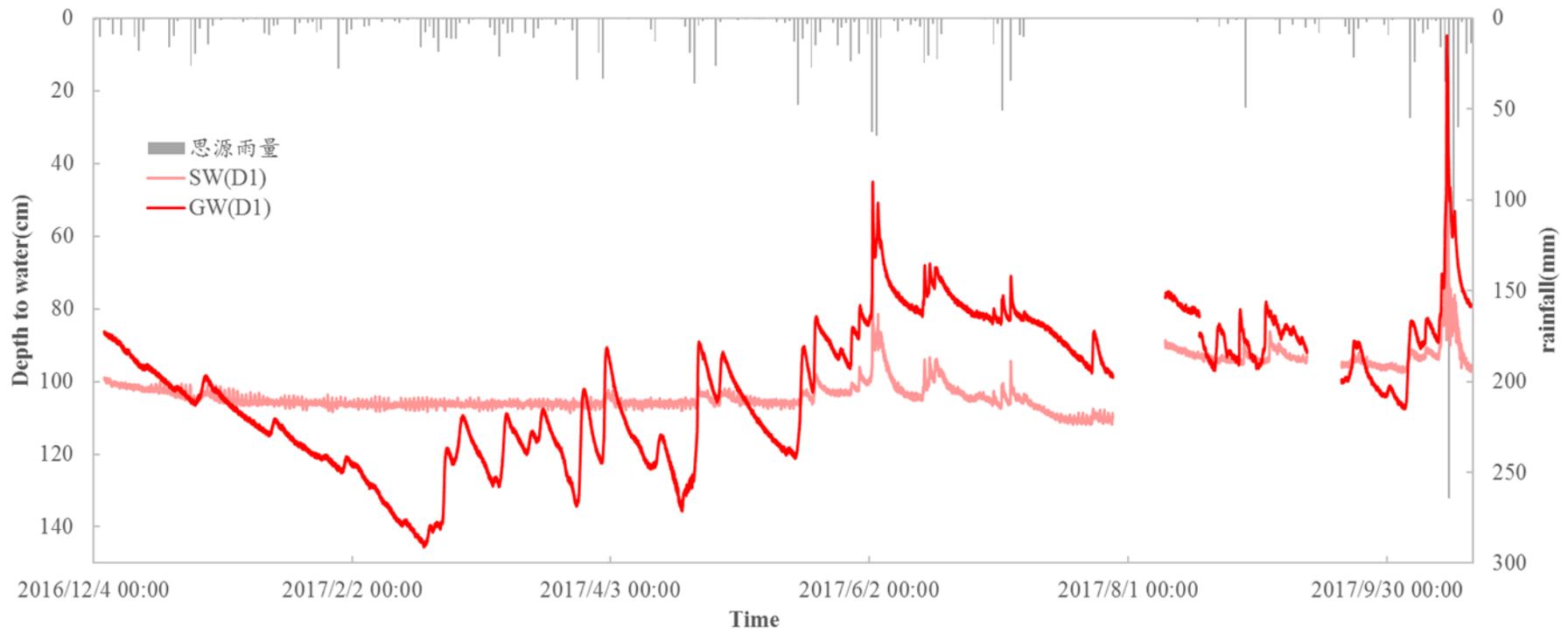


圖 3.55 D1 河川與二吋井地下水水位歷線圖

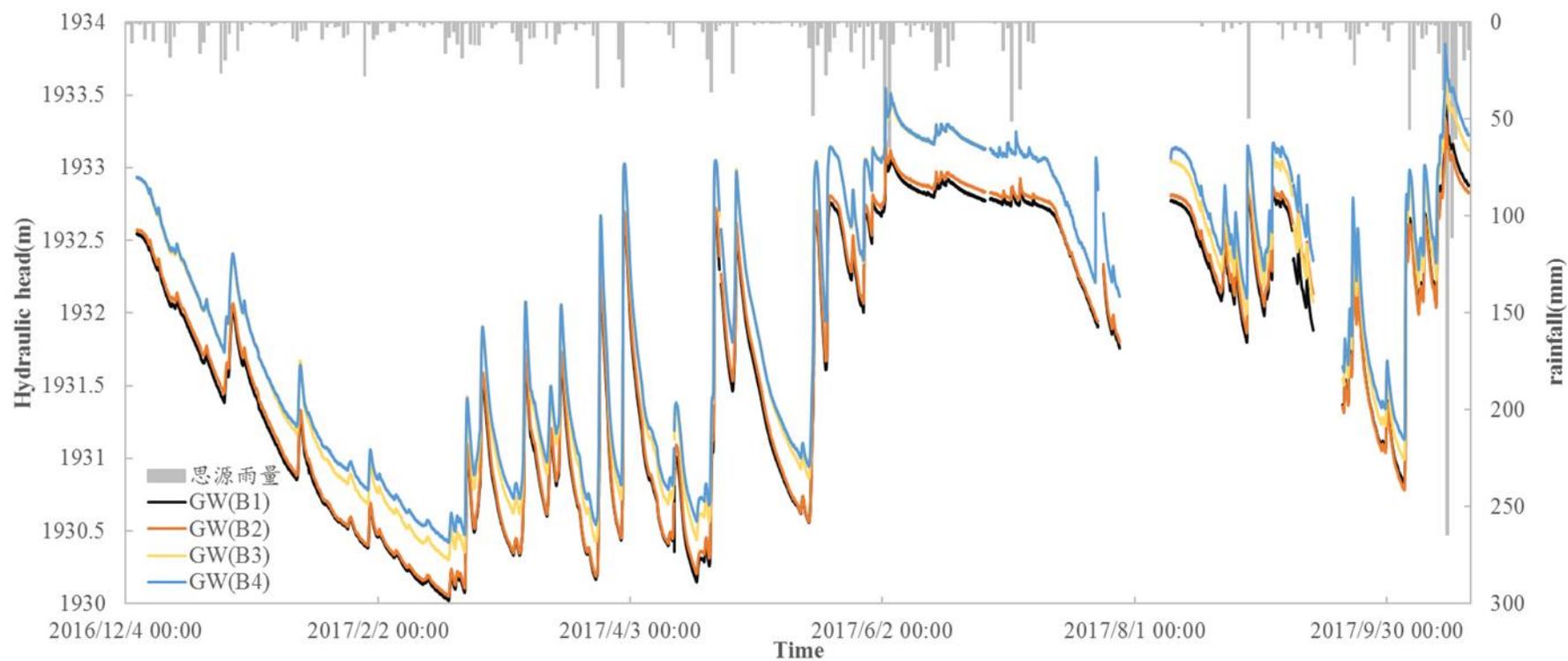


圖 3.56 B 剖面井群 (B1、B2、B3、B4 二吋井) 地下水水位歷線圖

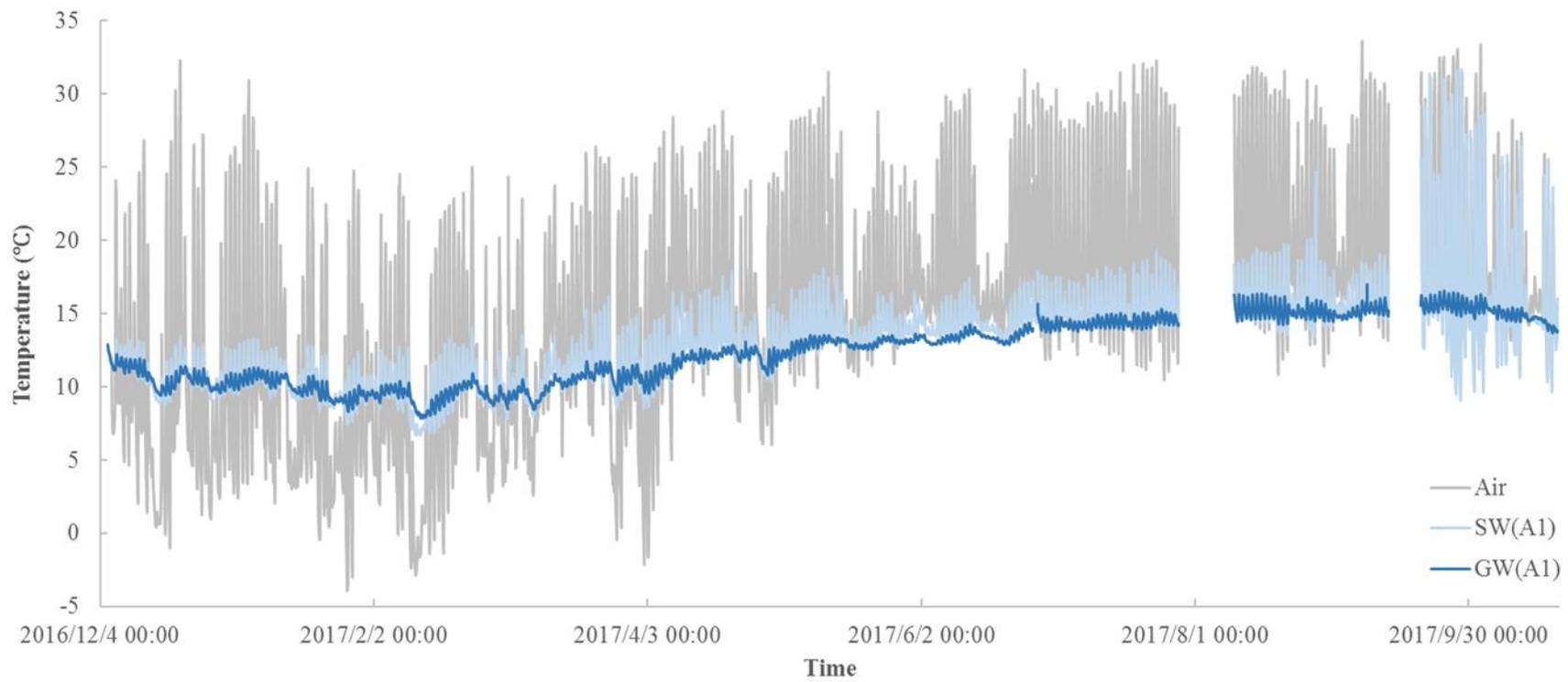


圖 3.57 A1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖

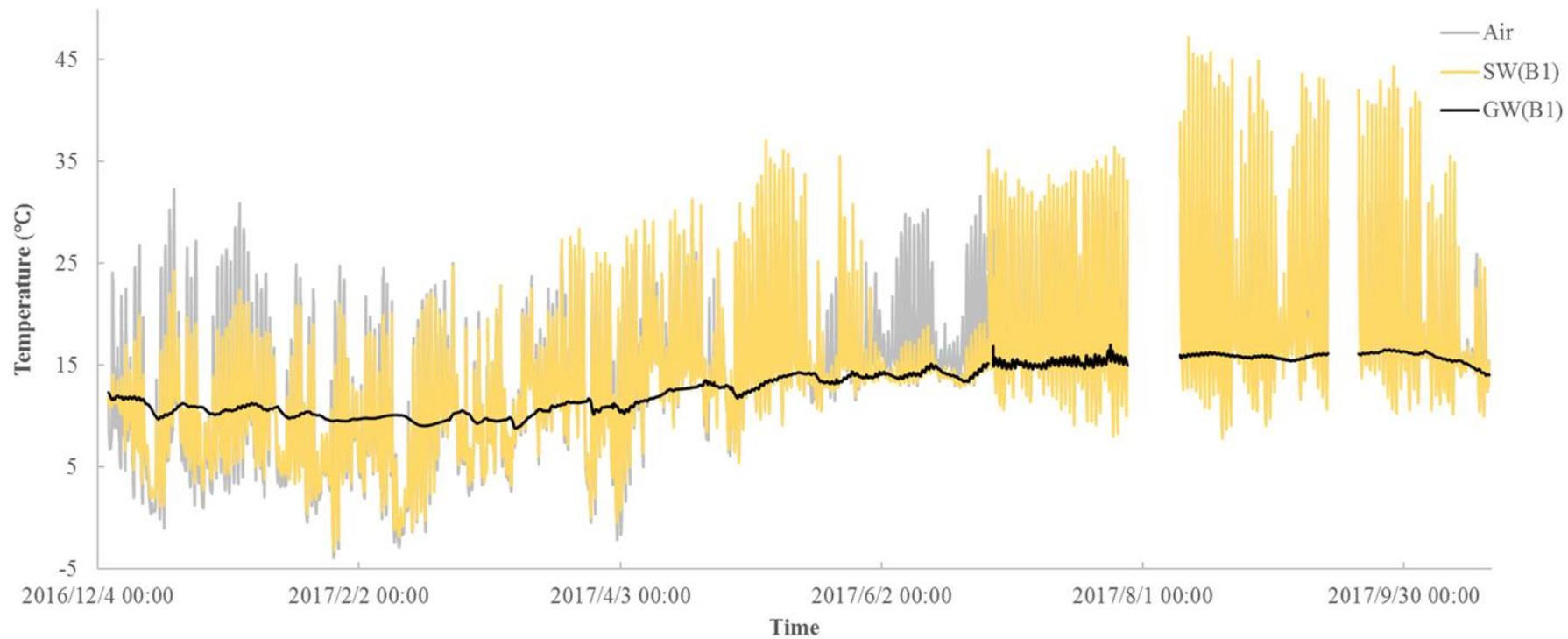


圖 3.58 B1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖

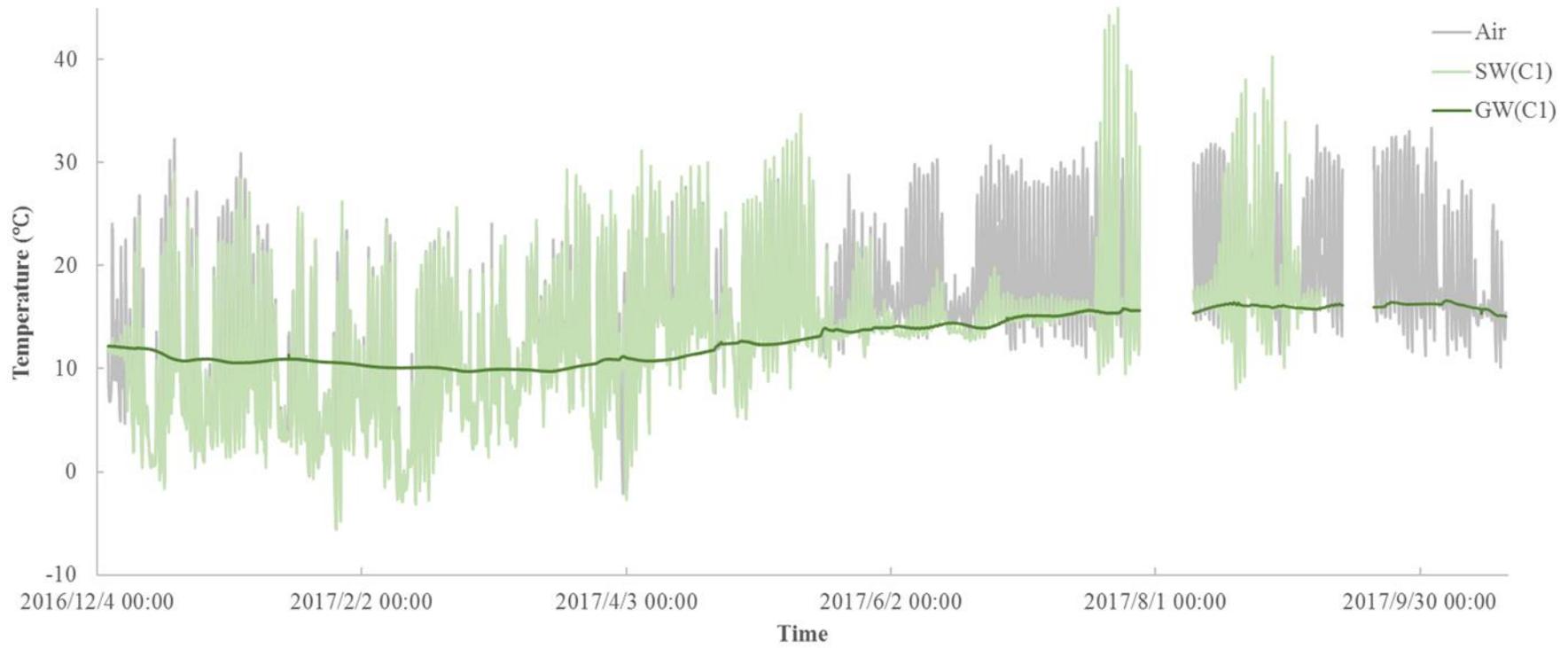


圖 3.59 C1 河川與二吋井地下水溫度歷線圖

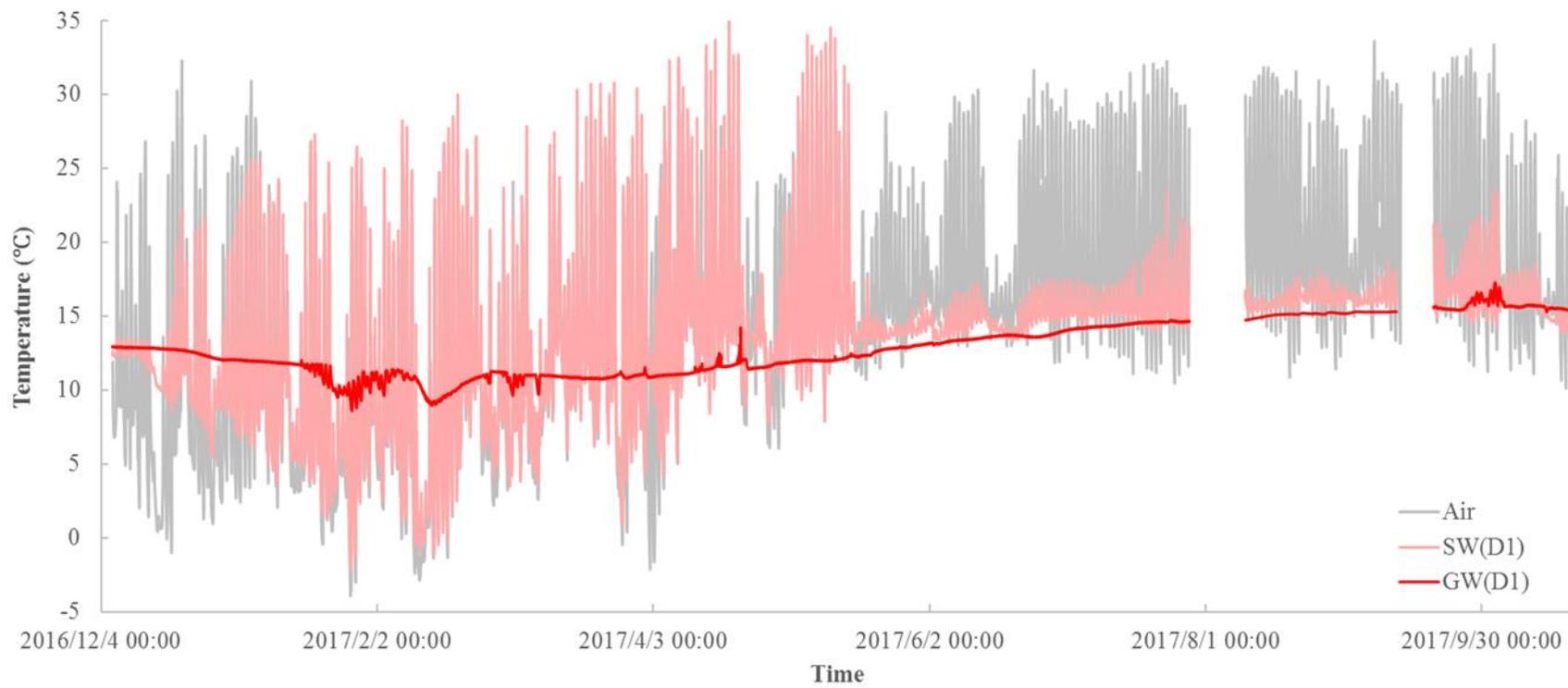


圖 3.60 D1 的河川與二吋井地下水溫度歷線圖

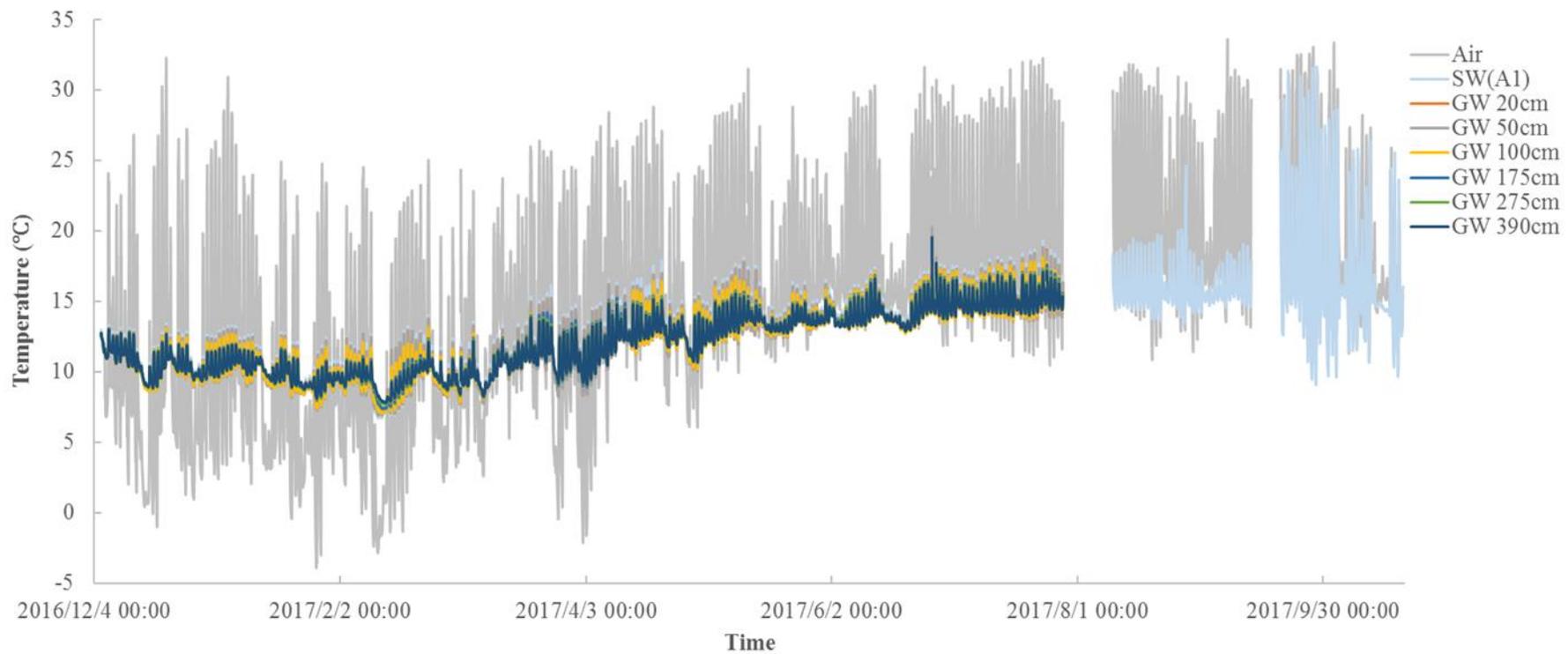


圖 3.61 A1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖

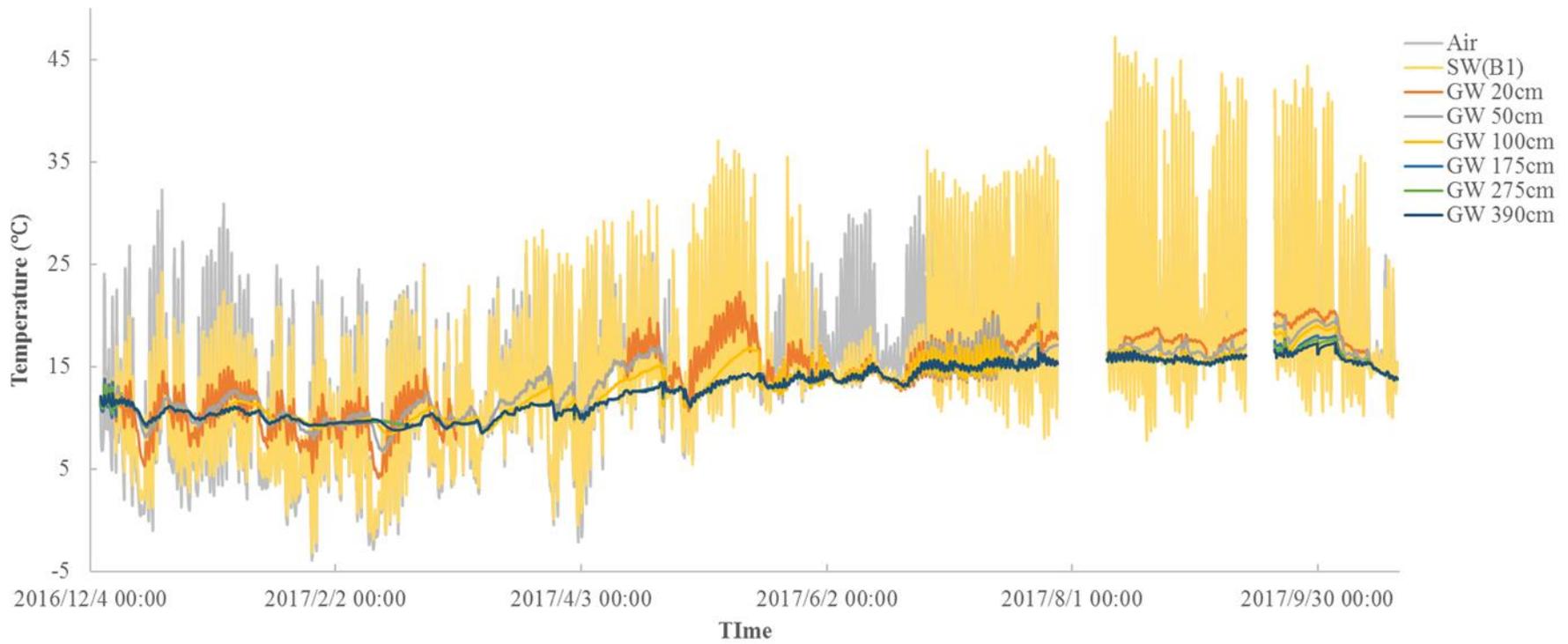


圖 3.62 B1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖

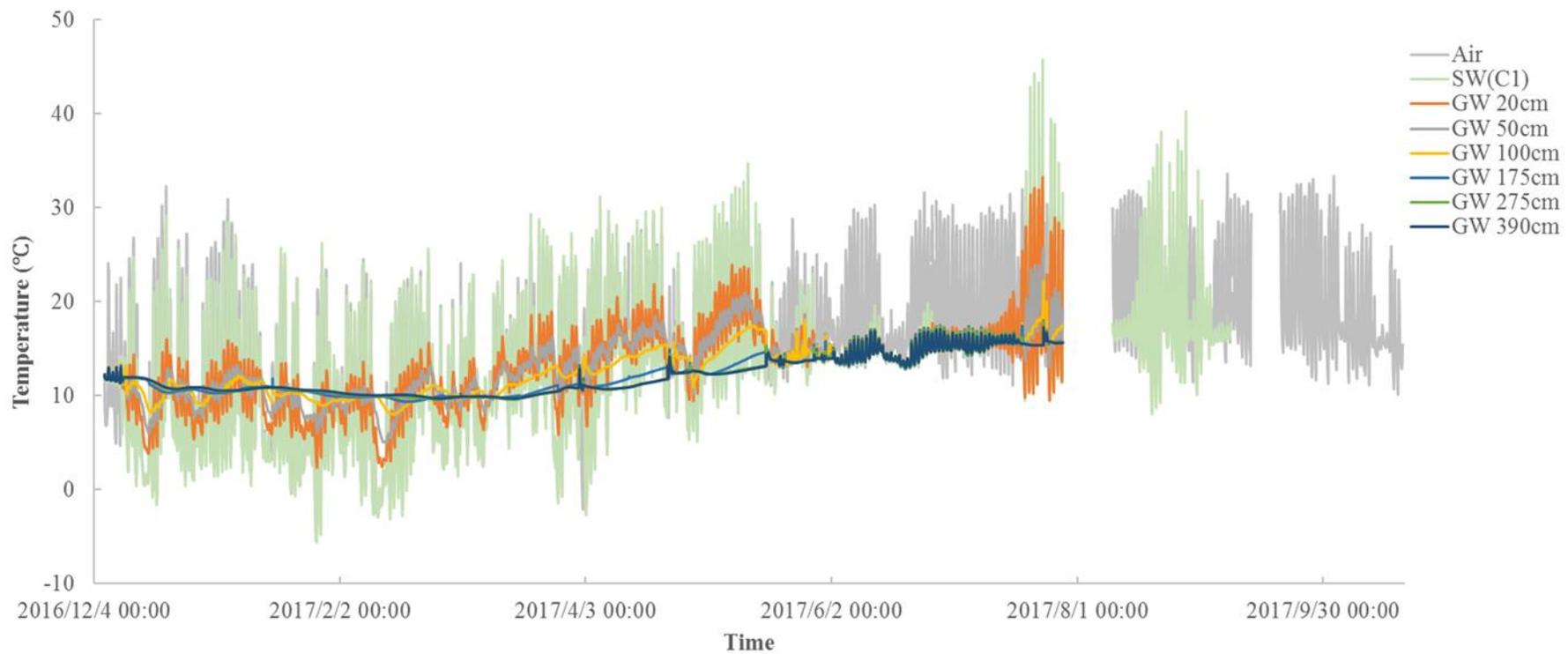


圖 3.63 C1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖

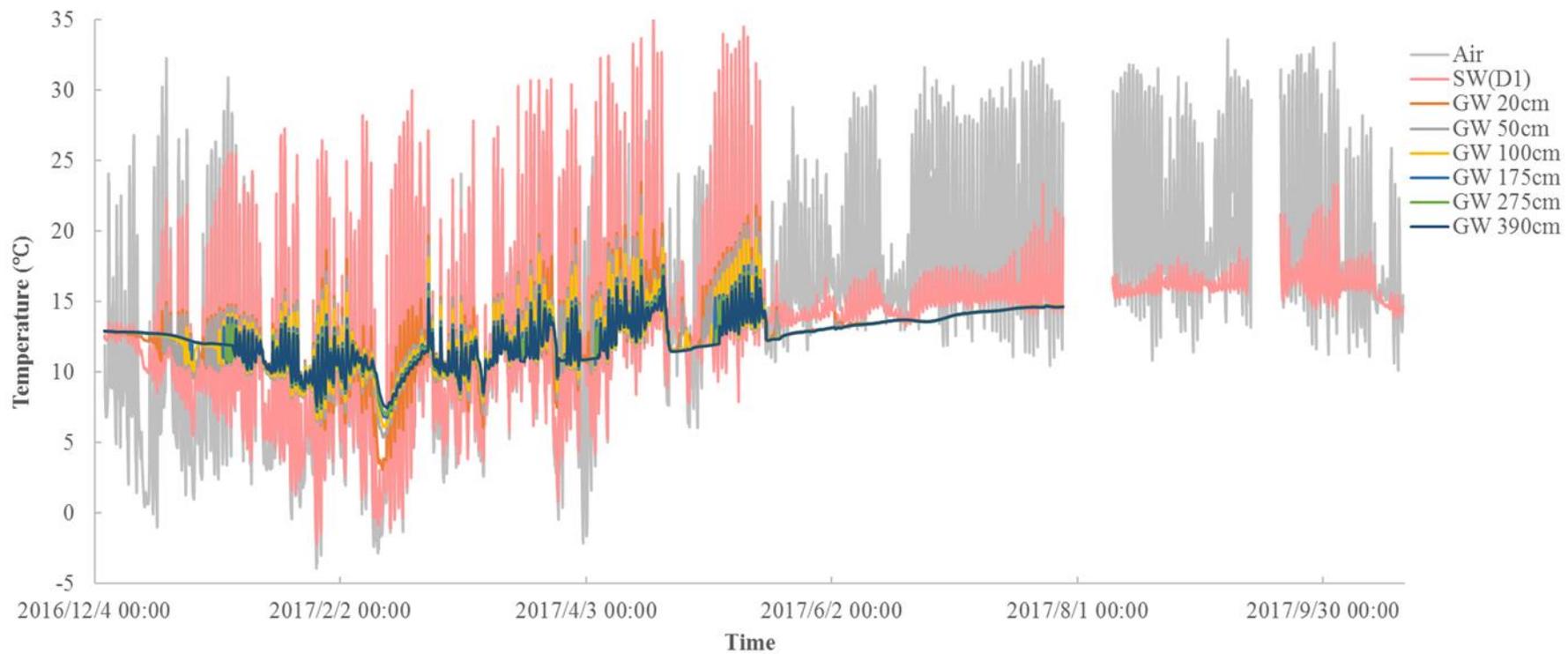


圖 3.64 D1 一吋井不同深度地下水溫度歷線圖

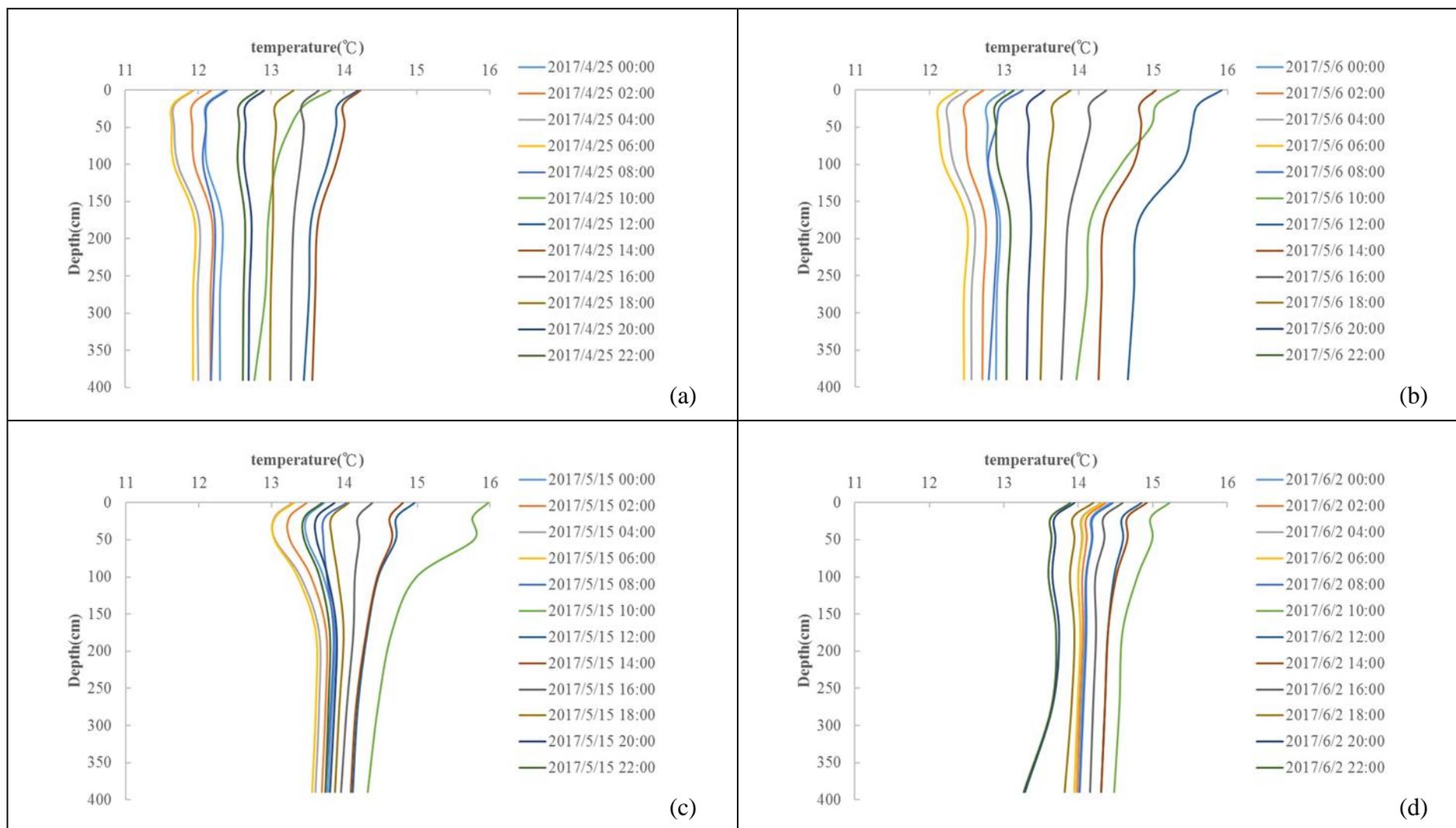


圖 3.65 well A1 一吋井溫度包絡線： (a) 2017/4/25、(b) 2017/5/6、(c) 2017/5/15、(d) 2017/6/

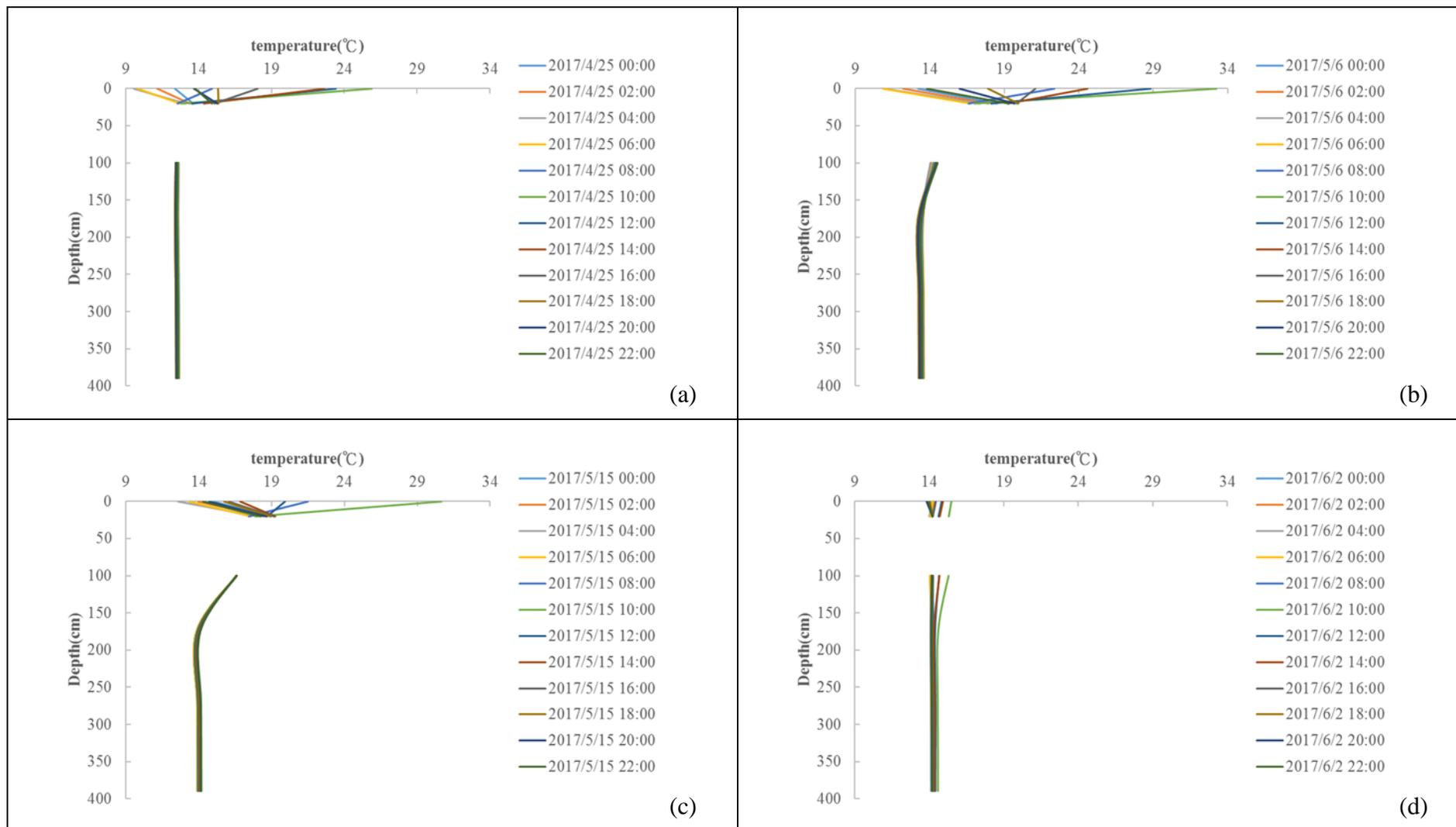


圖 3.66 well B1 一寸井溫度包絡線：(a) 2017/4/25、(b) 2017/5/6、(c) 2017/5/15、(d) 2017/6/2

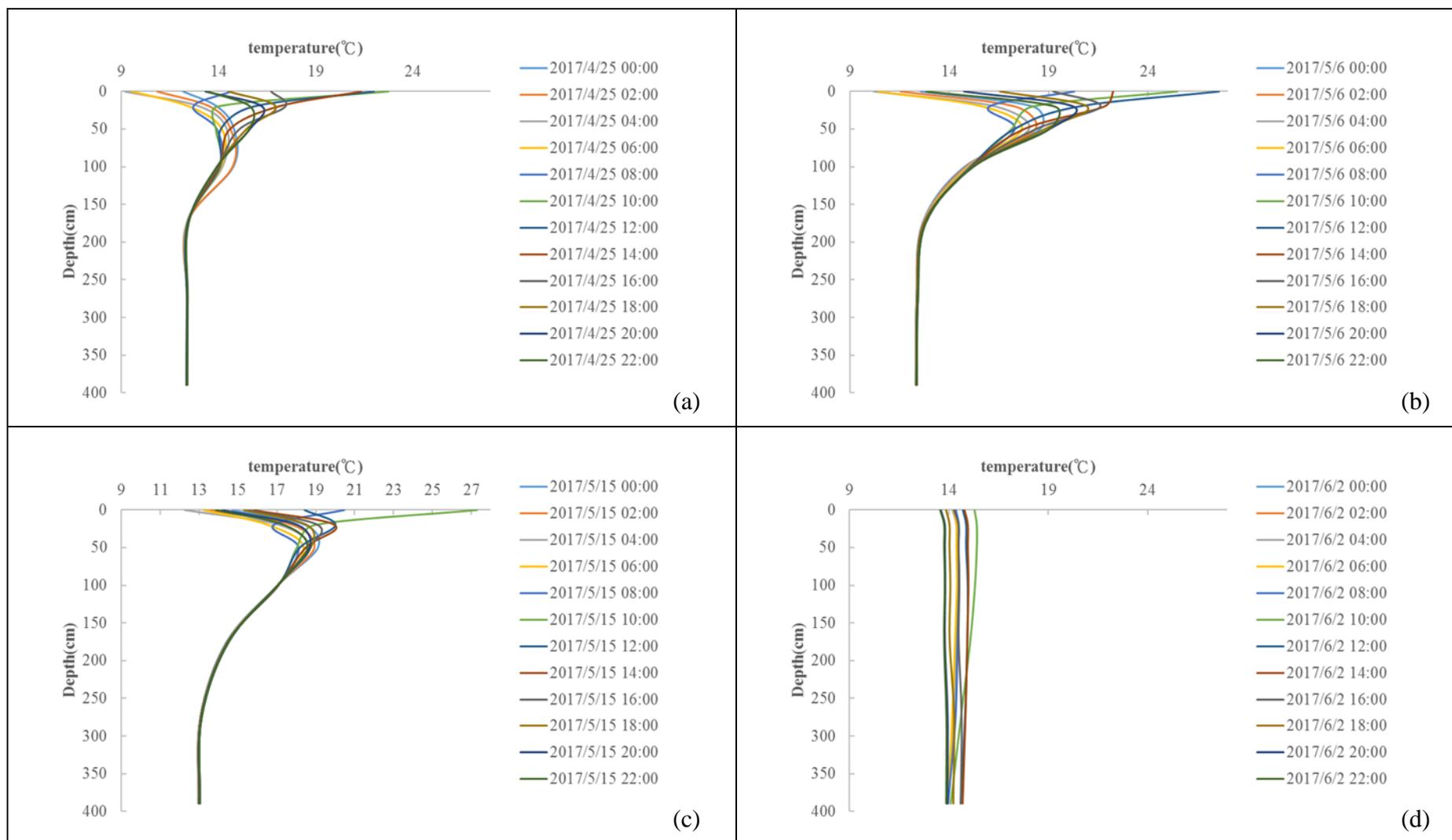


圖 3.67 well C1 一吋井溫度包絡線： (a) 2017/4/25、(b) 2017/5/6、(c) 2017/5/15、(d) 2017/6/2

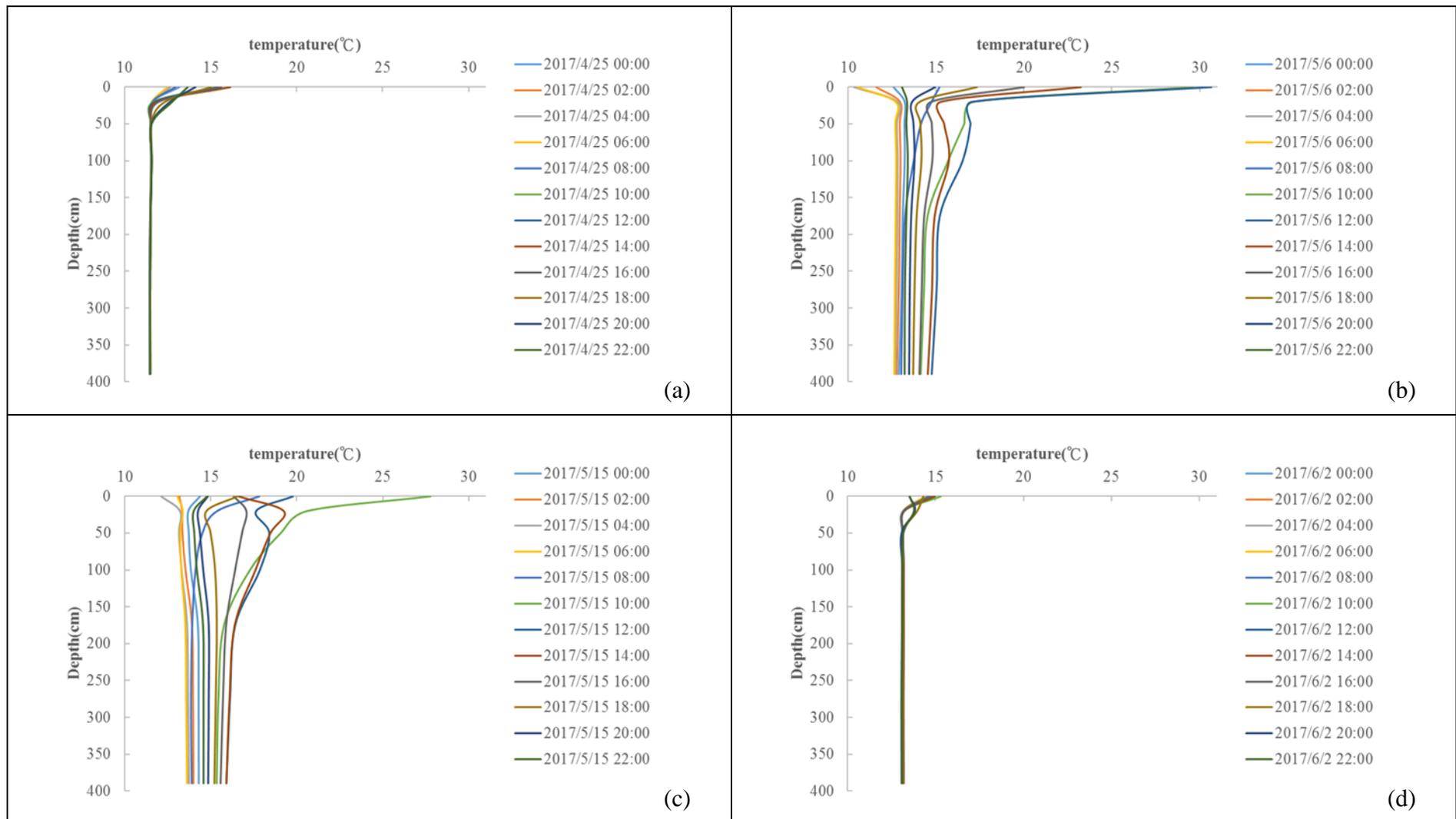


圖 3.68 well D1 一吋井溫度包絡線： (a) 2017/4/25、(b) 2017/5/6、(c) 2017/5/15、(d) 2017/6/2

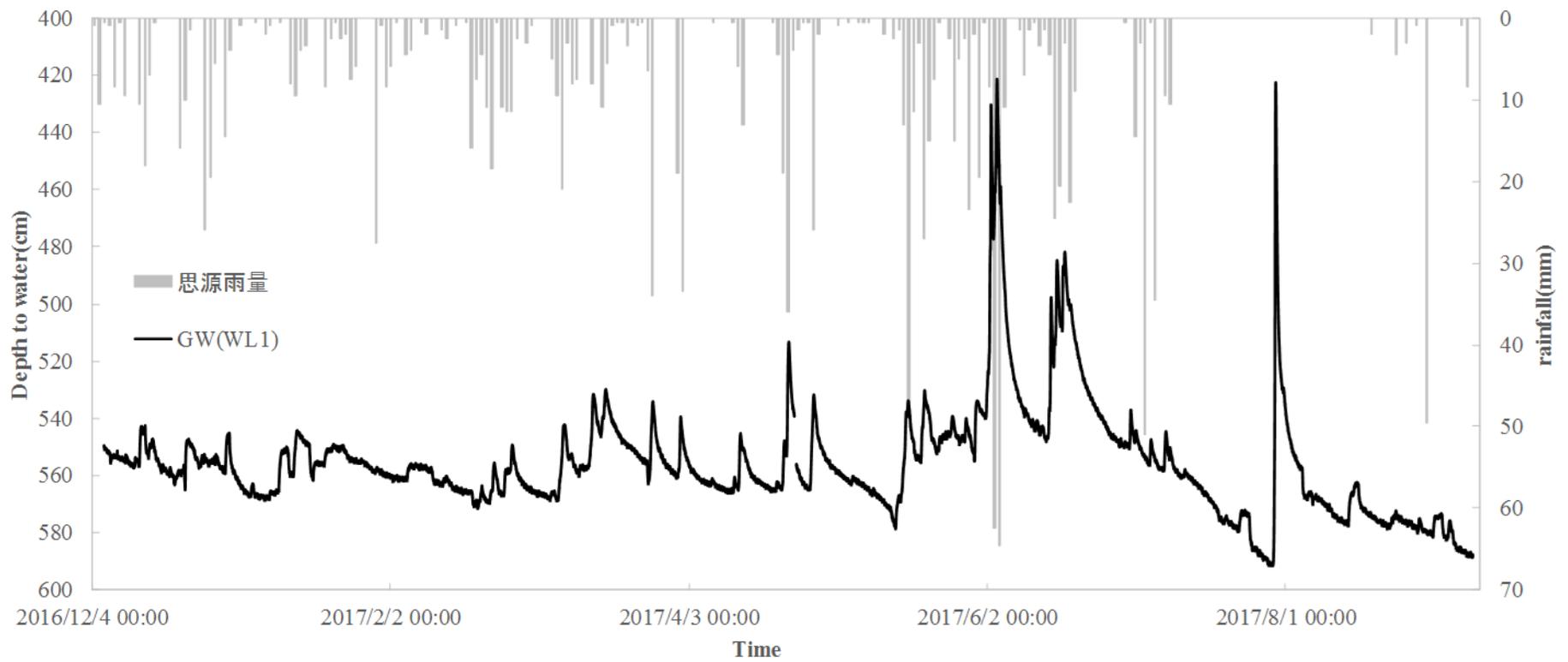


圖 3.69 櫻花鉤吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 水位歷線圖

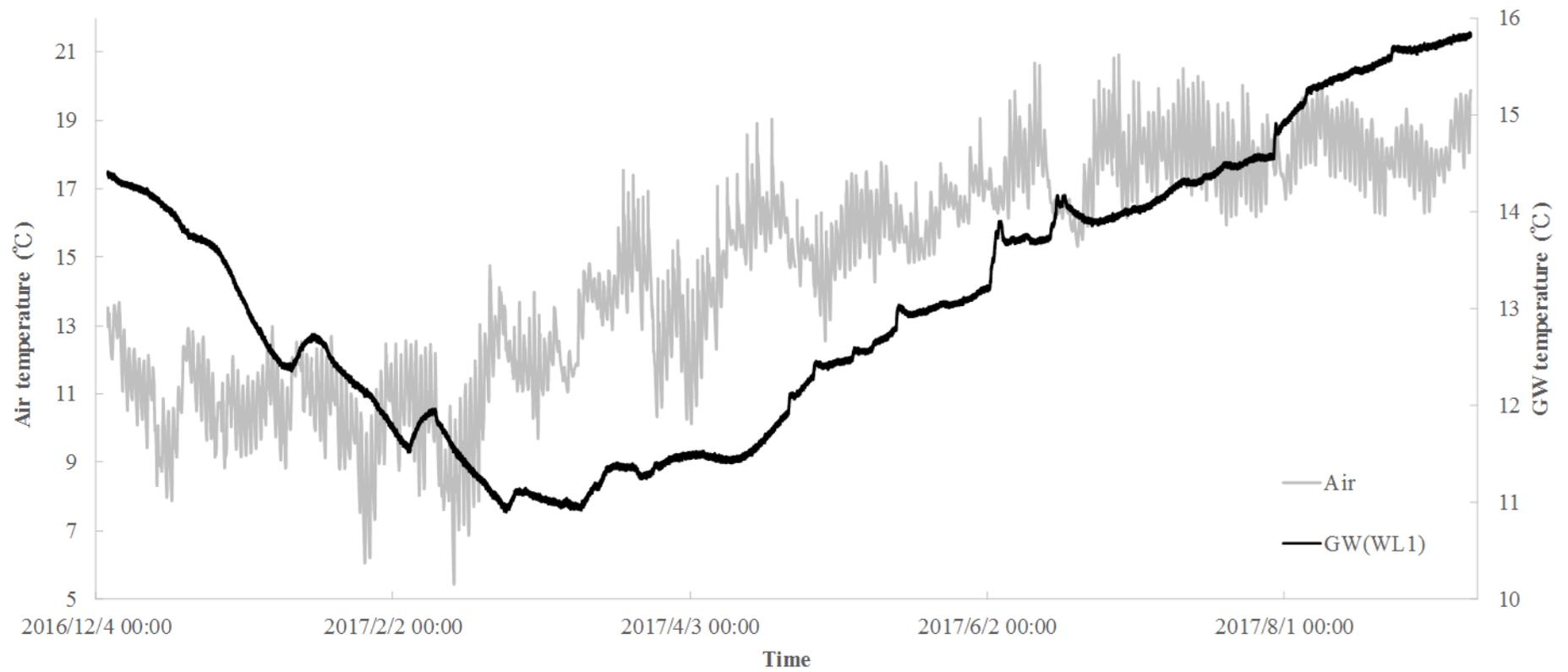


圖 3.70 櫻花鉤吻鮭復育中心地下水井 (WL-1) 溫度歷線圖

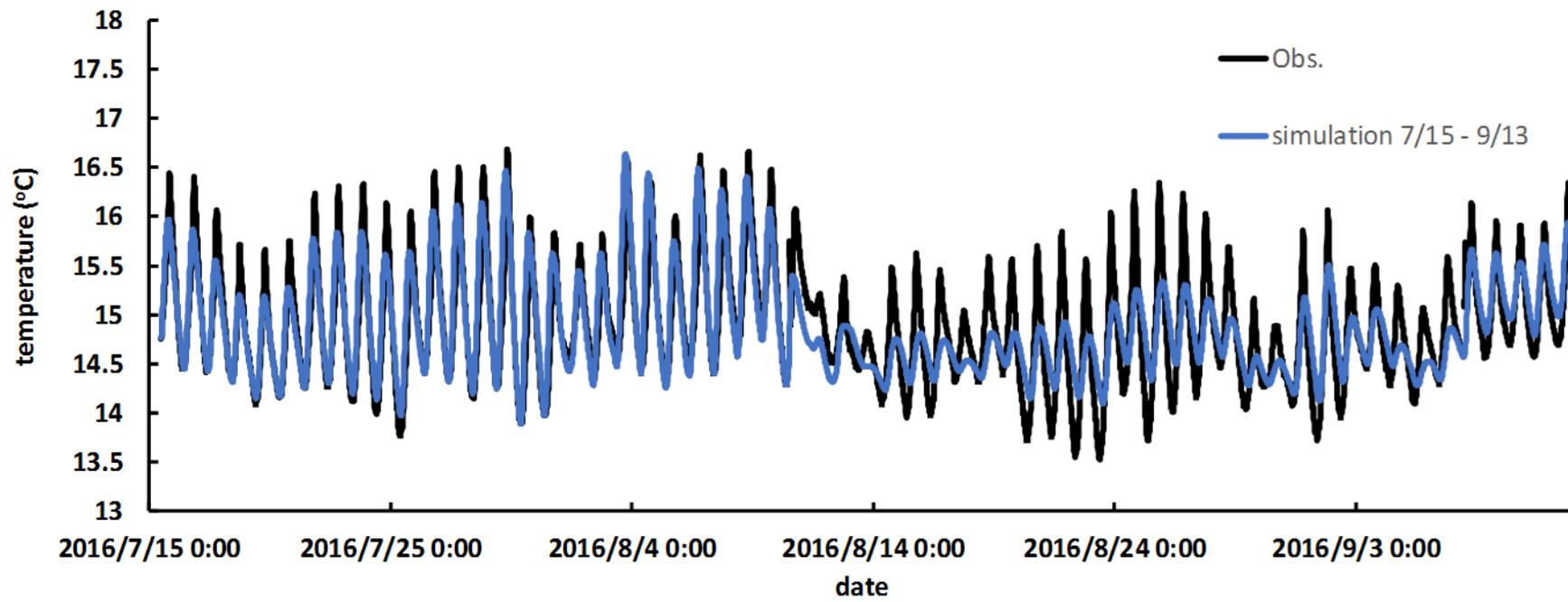


圖 3.71a Well A1 二吋井 VS2D 模擬結果

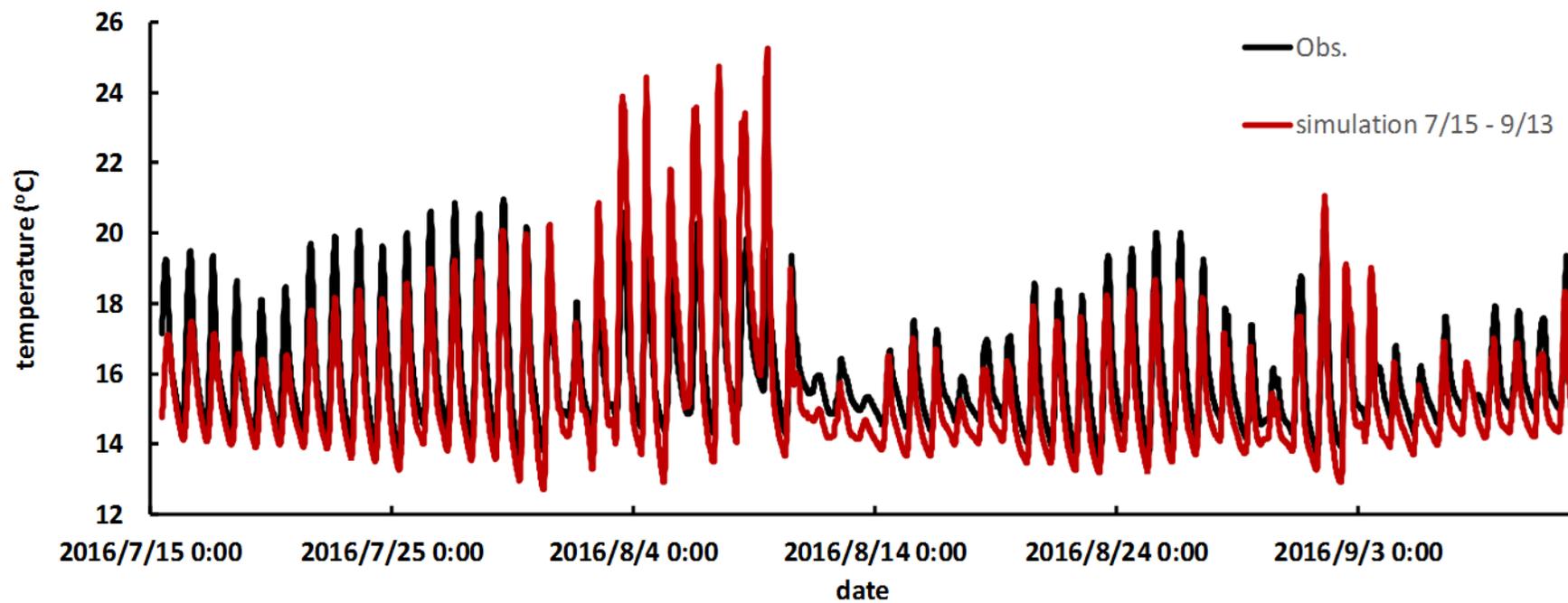


圖 3.71b Well B1 二吋井 VS2D 模擬結果

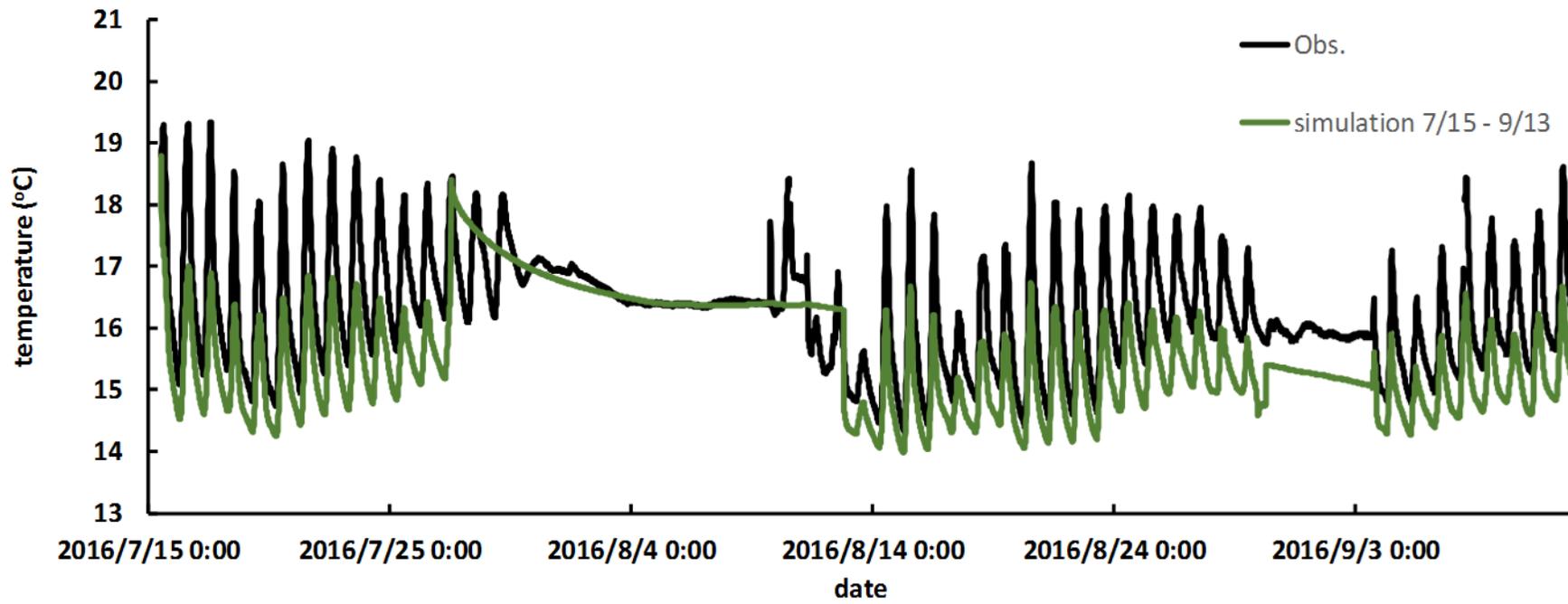


圖 3.71c Well C1 二吋井 VS2D 模擬結果

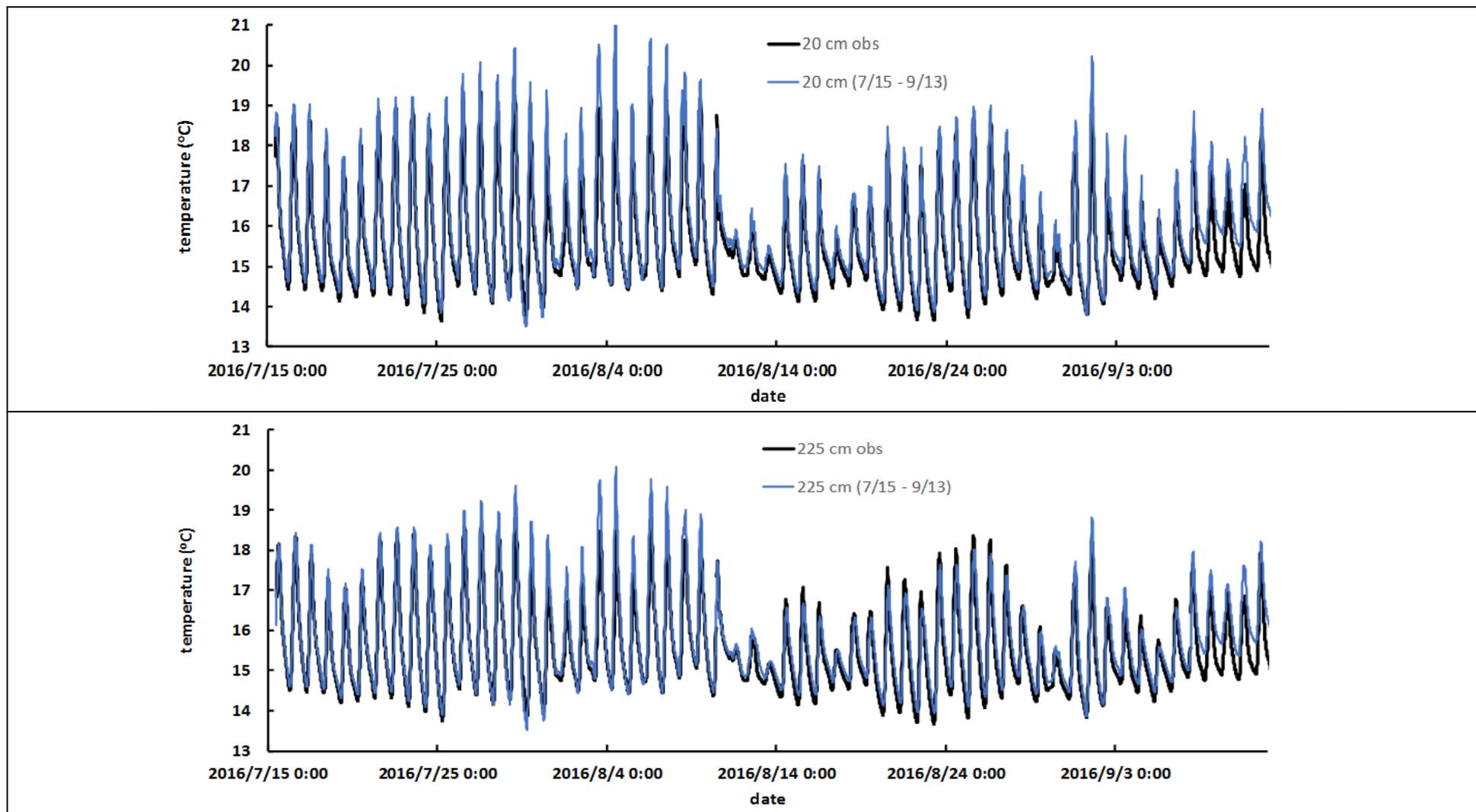


圖 3.72a Well A1 一吋井 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

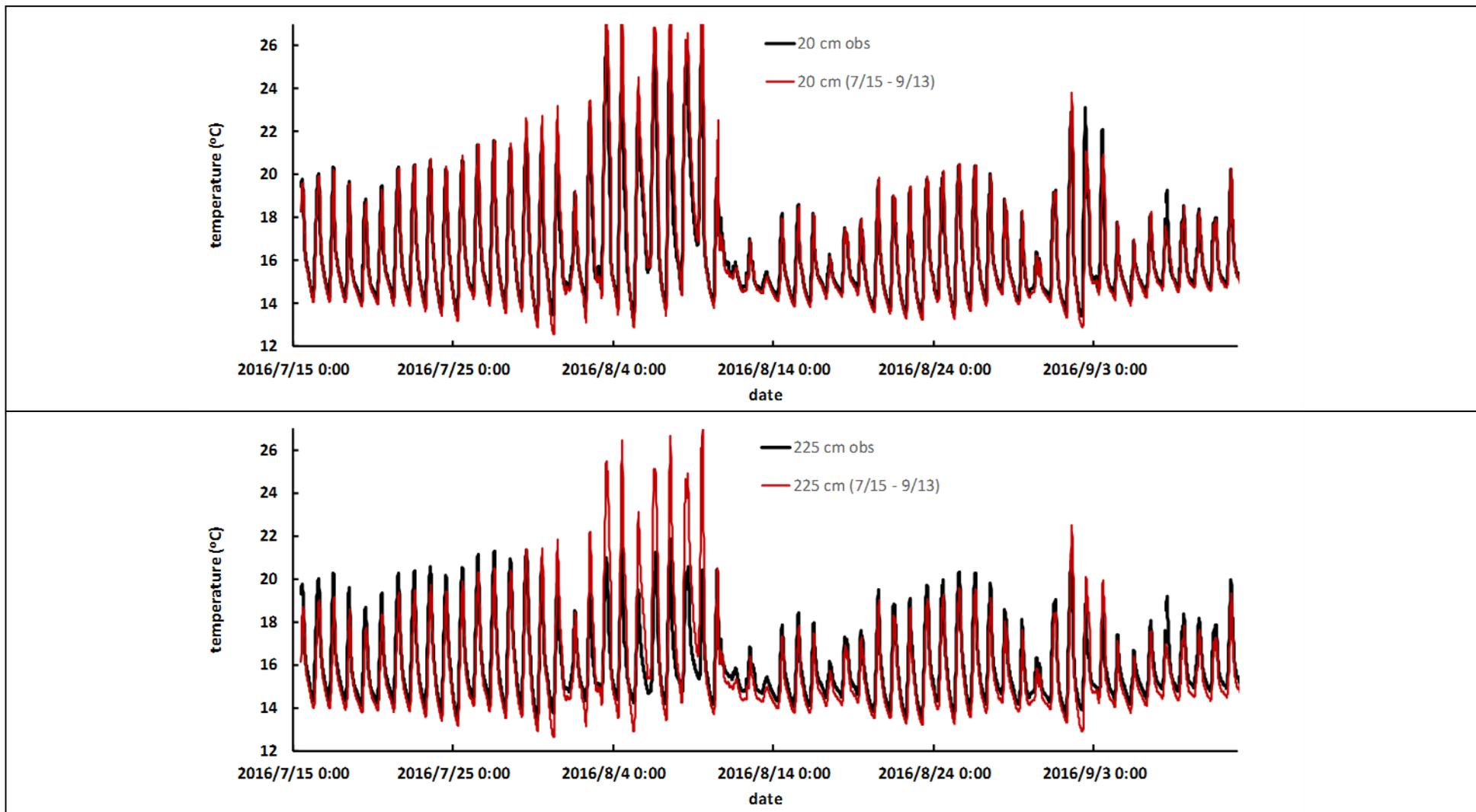


圖 3.72b Well B1 一吋井 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

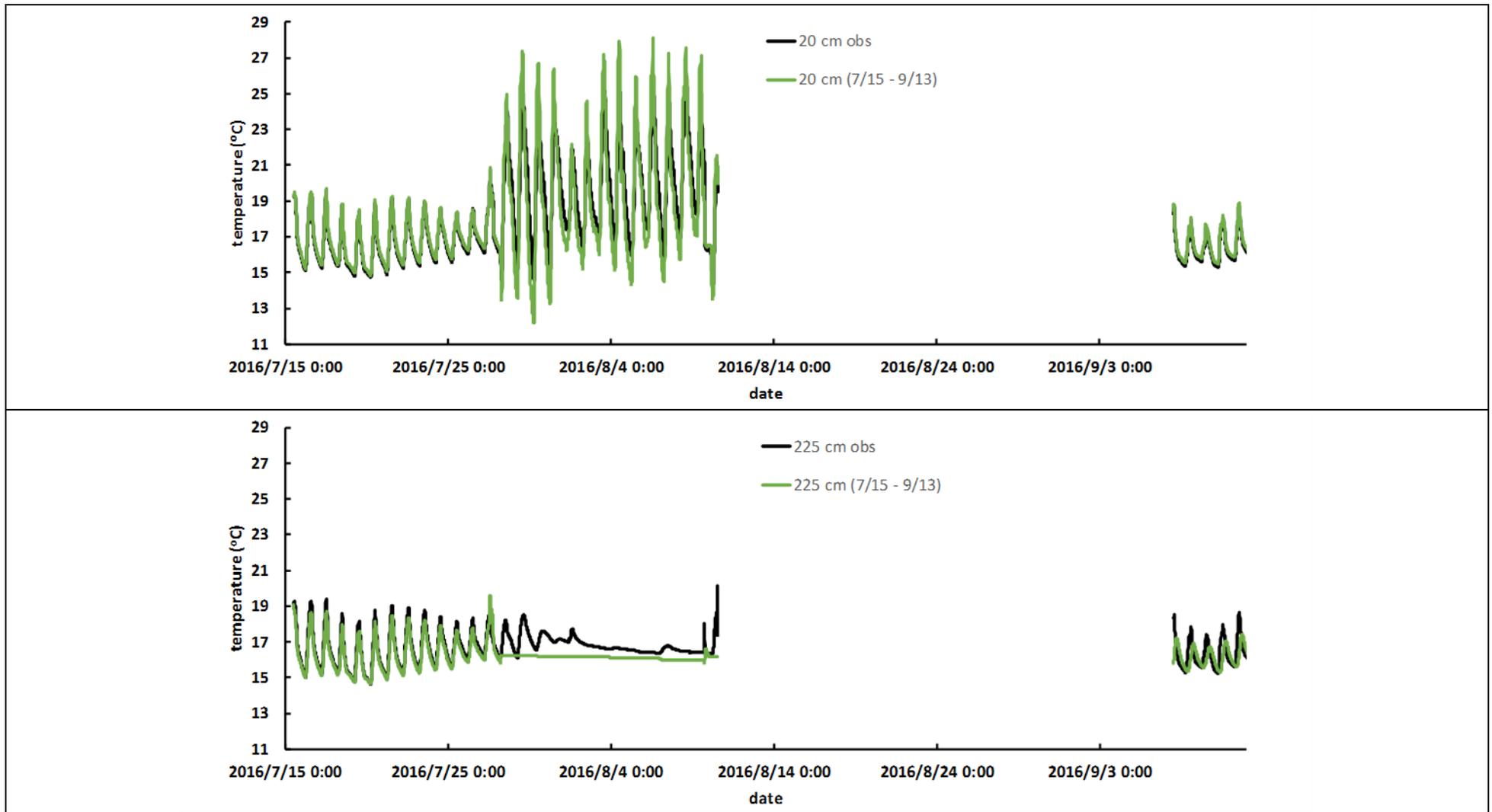


圖 3.72c Well C1 一吋井 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

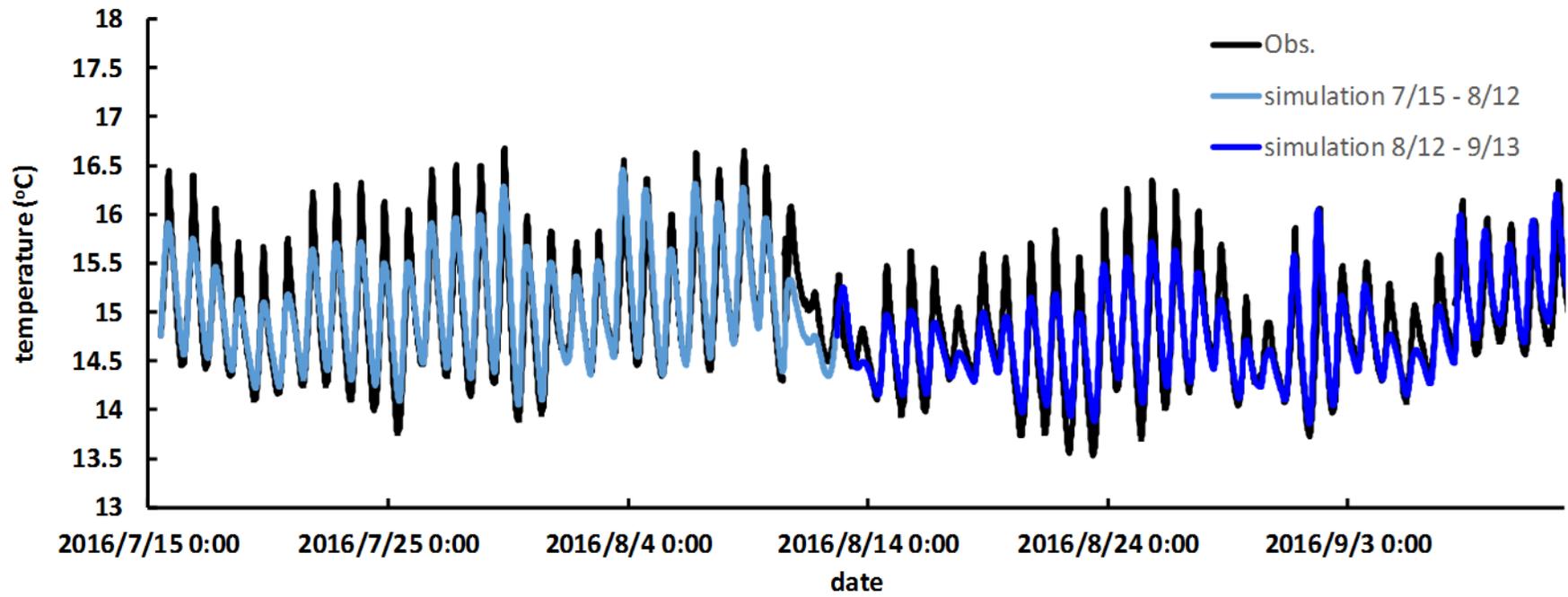


圖 3.73a Well A1 二吋井降雨前後 VS2D 模擬結果

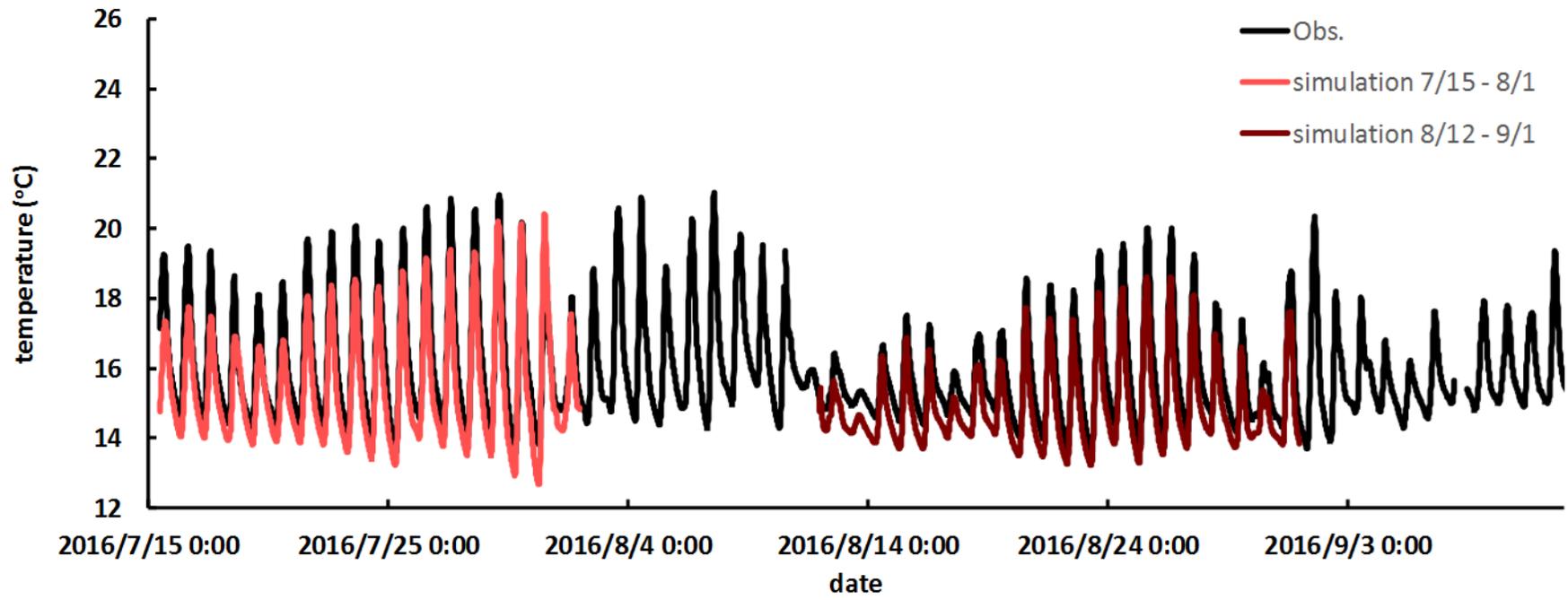


圖 3.73b Well B1 二吋井降雨前後 VS2D 模擬結果

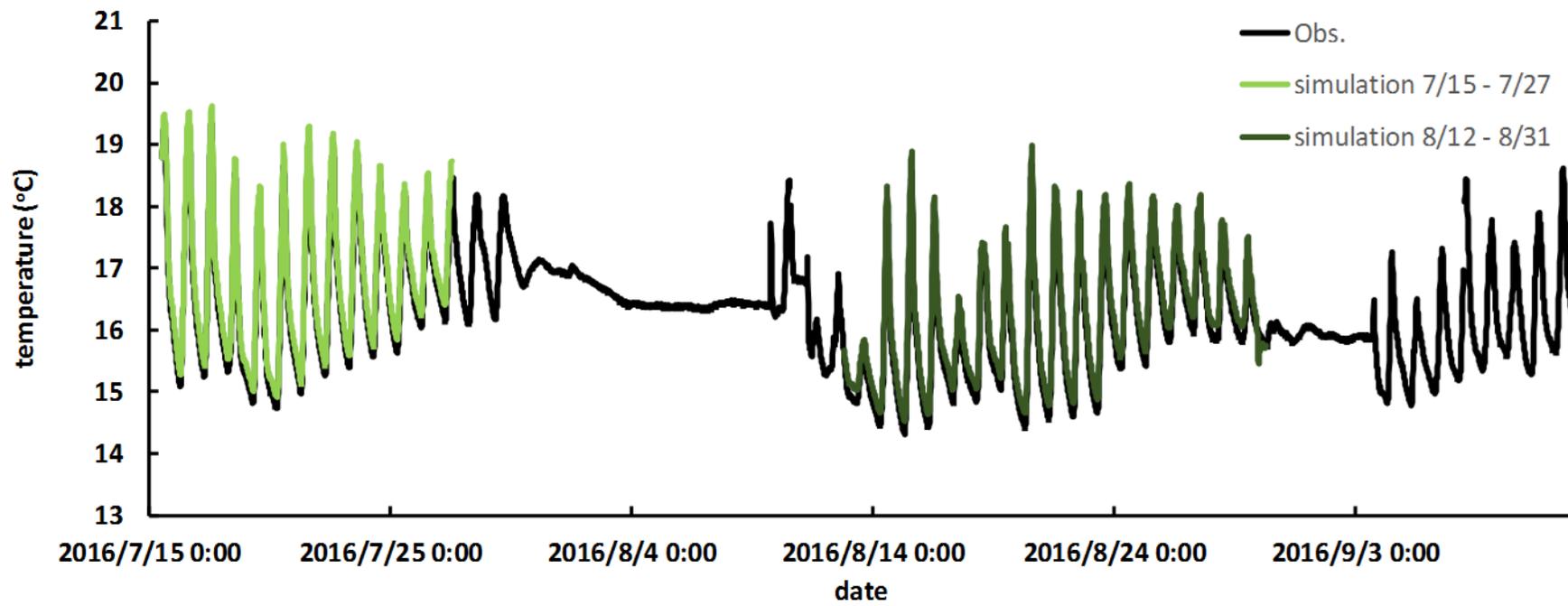


圖 3.73c Well C1 二吋井降雨前後 VS2D 模擬結果

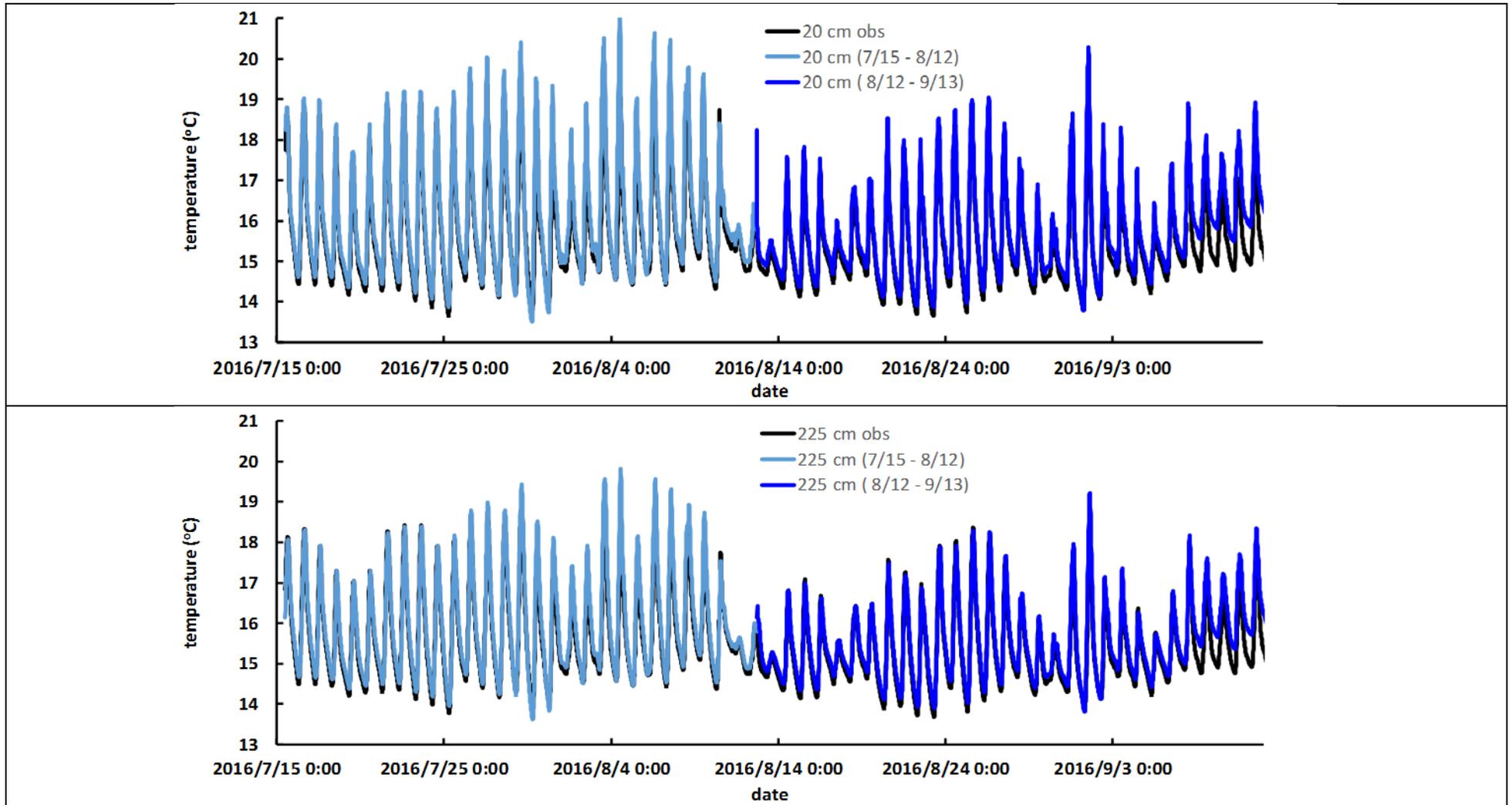


圖 3.74a Well A1 一吋井降雨前後 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

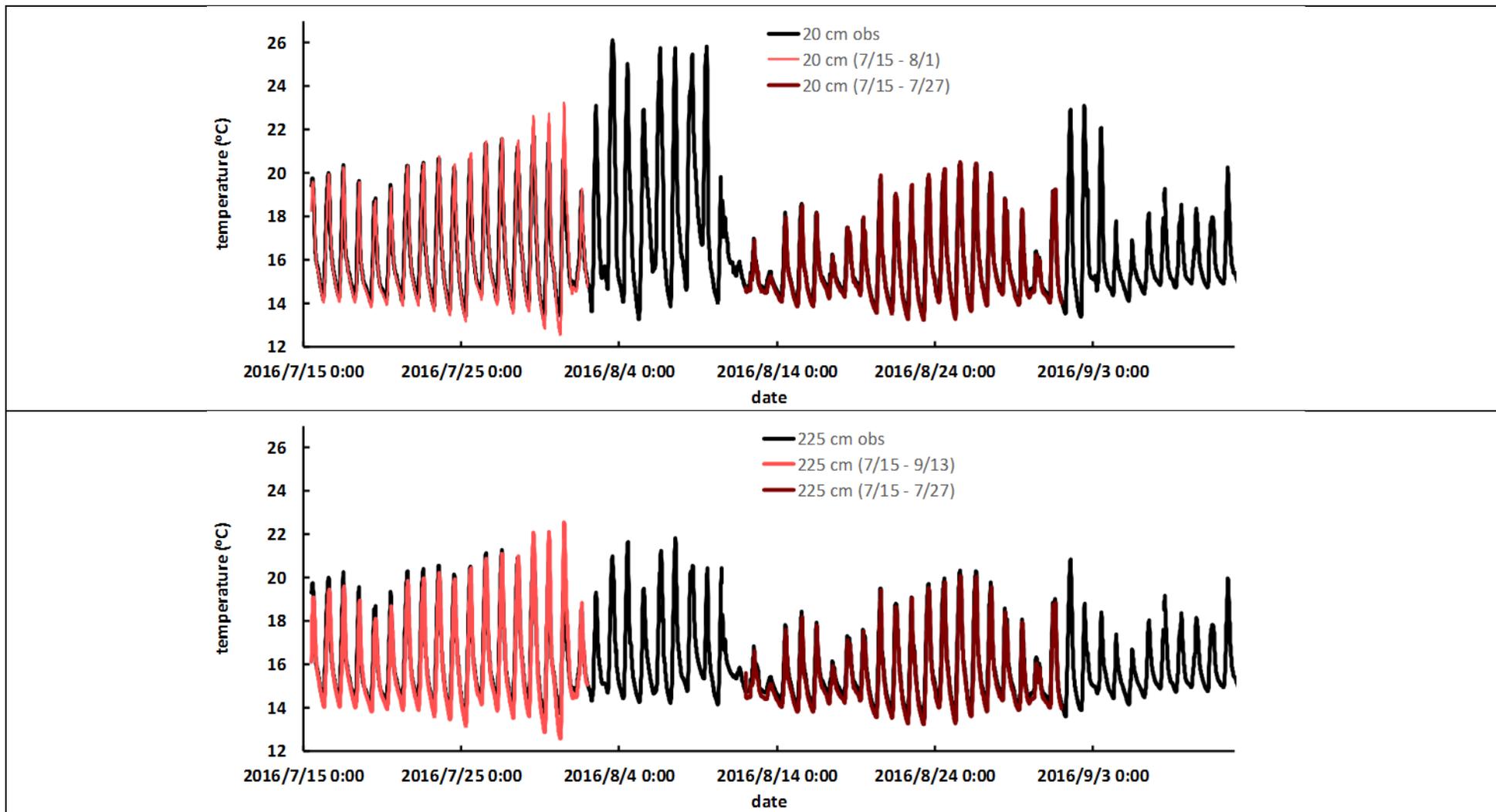


圖 3.74b Well B1 一吋井降雨前後 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

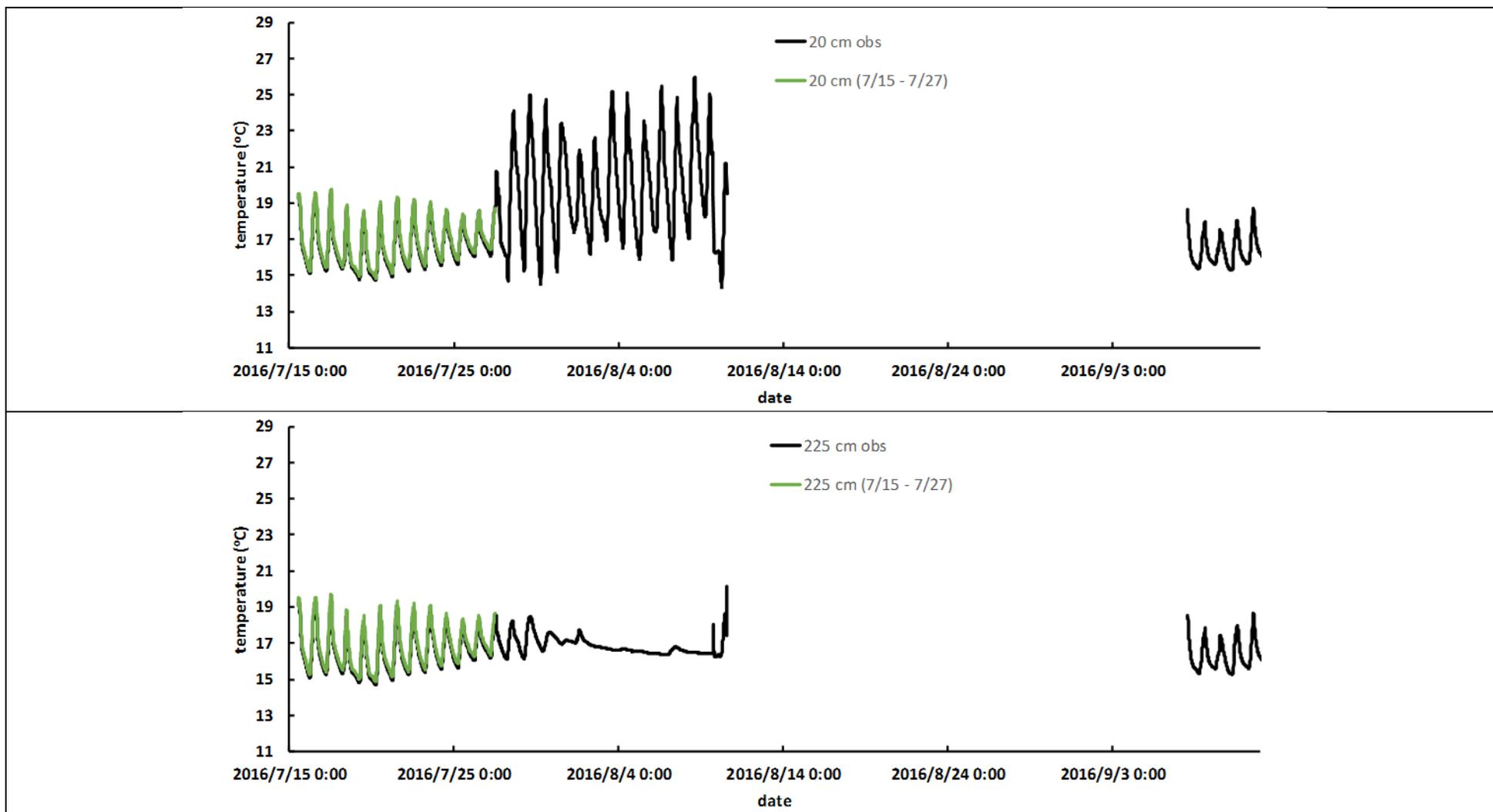


圖 3.74c Well C1 一吋井降雨前後 VS2D 模擬結果：(上) 20cm (下) 225cm

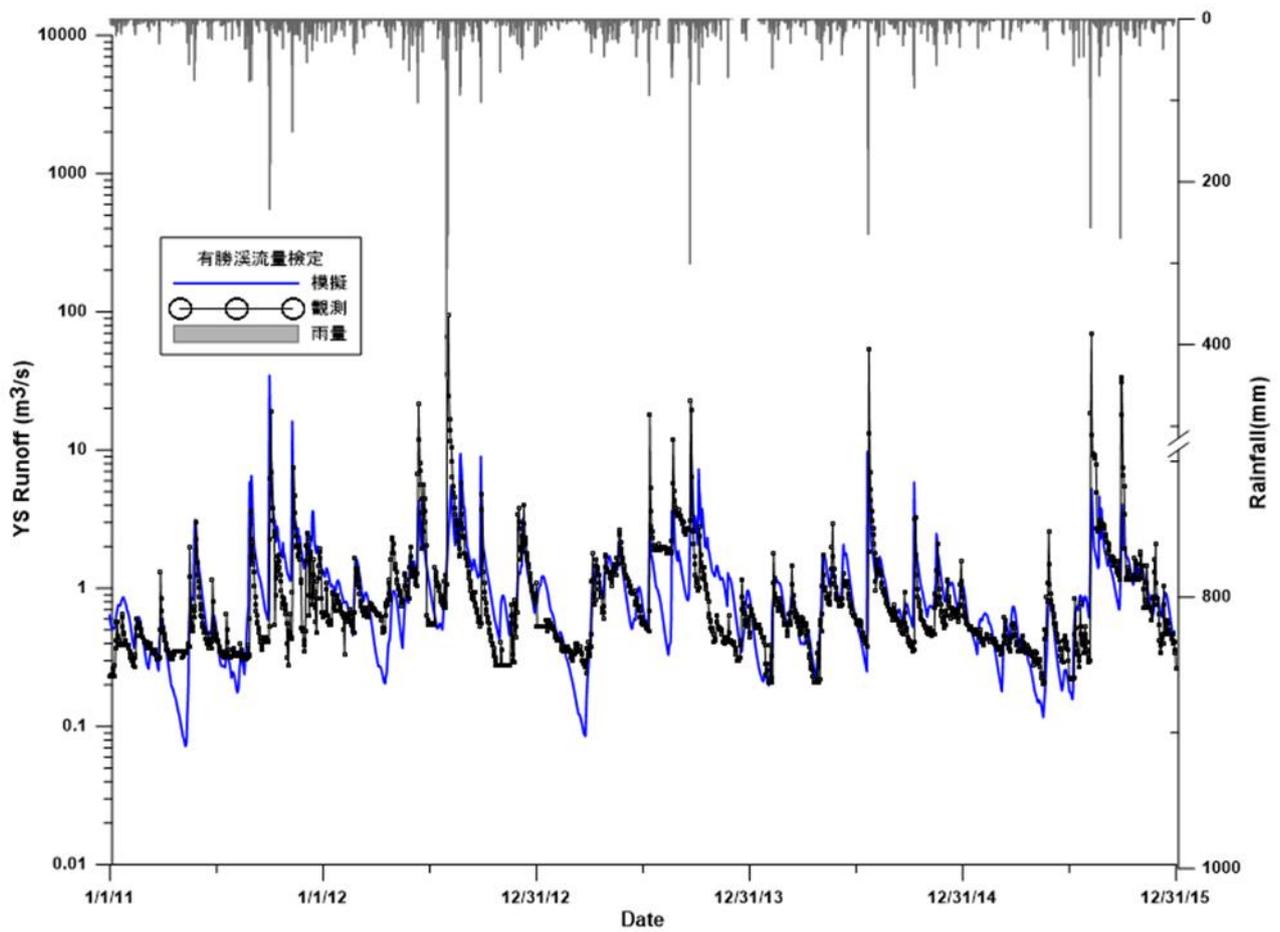


圖 3.76 有勝溪流量檢定成果圖

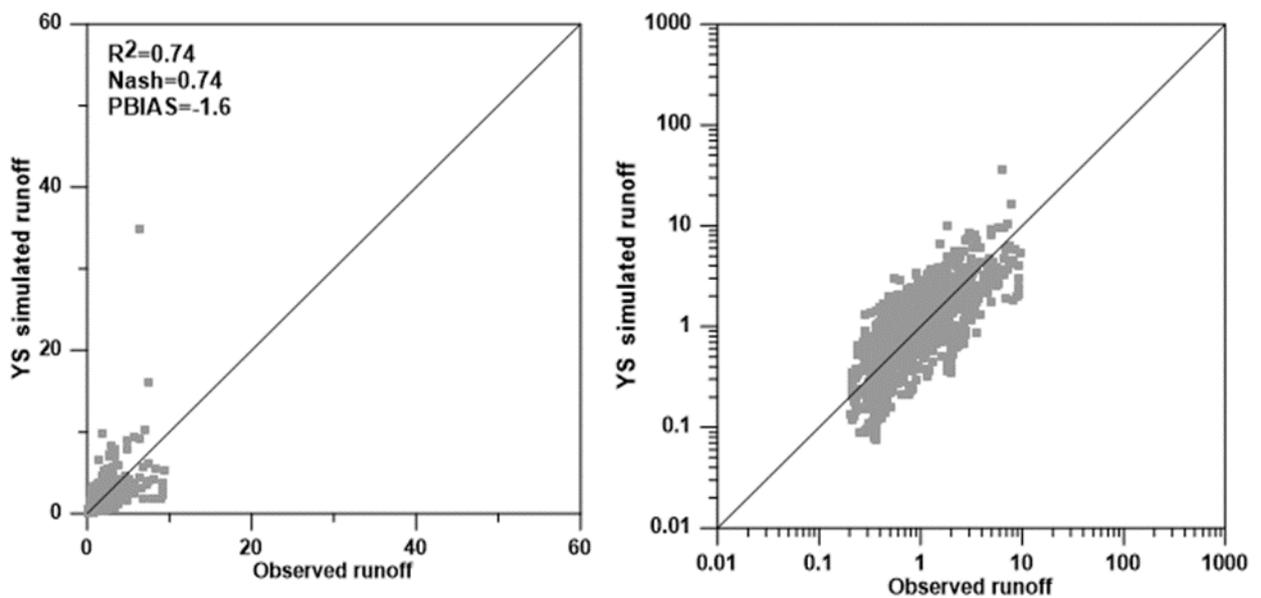


圖 3.77 有勝溪流量檢定散佈圖(一般與對數軸)

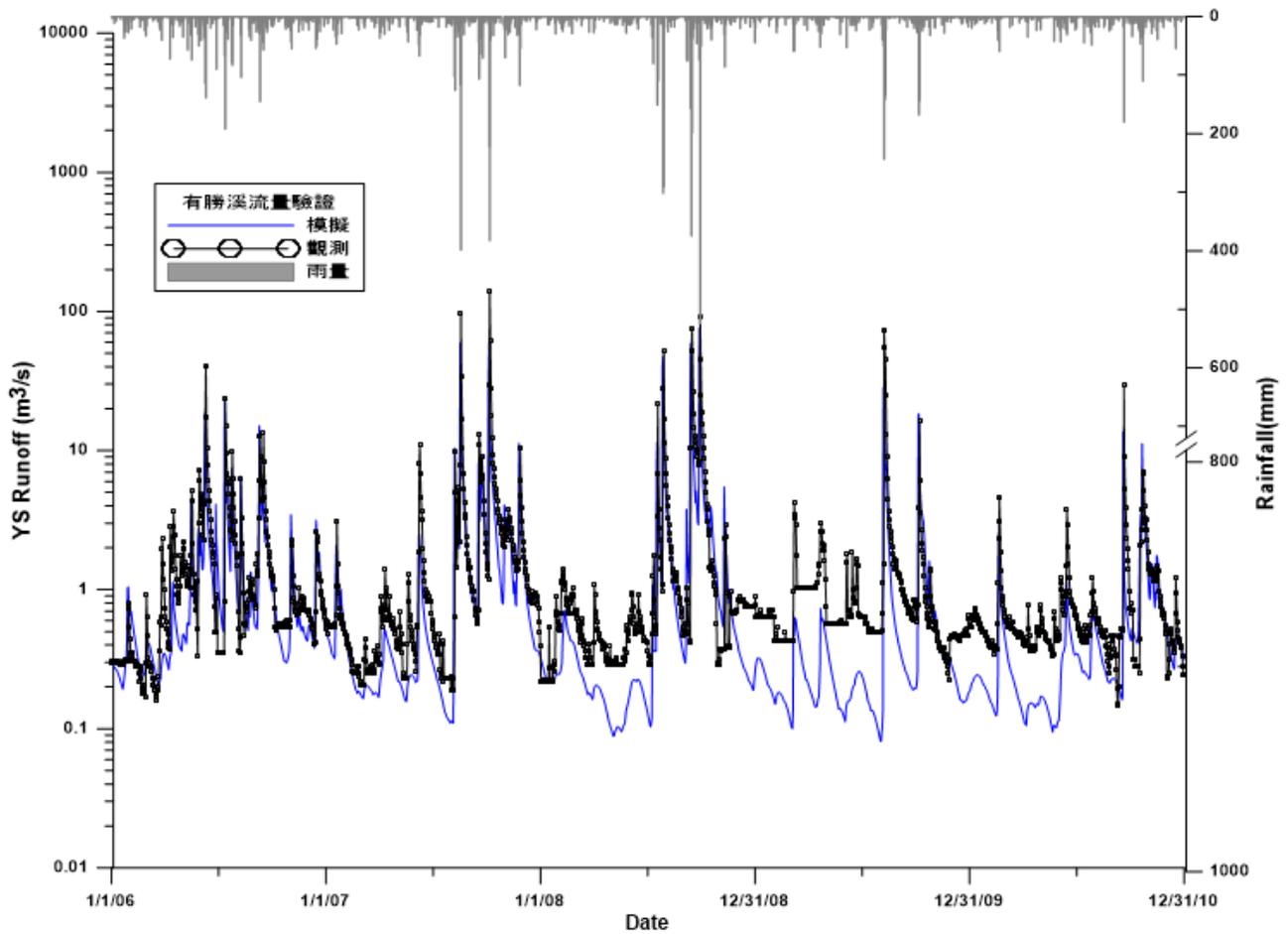


圖 3.78 有勝溪流量驗證成果圖

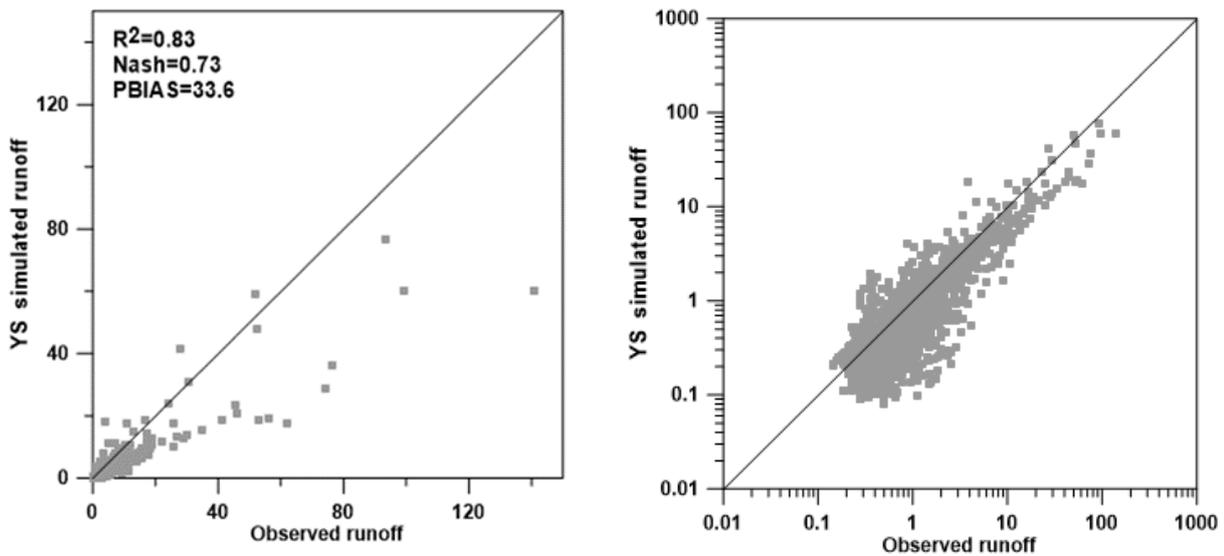


圖 3.79 有勝溪流量驗證散佈圖(一般與對數軸)

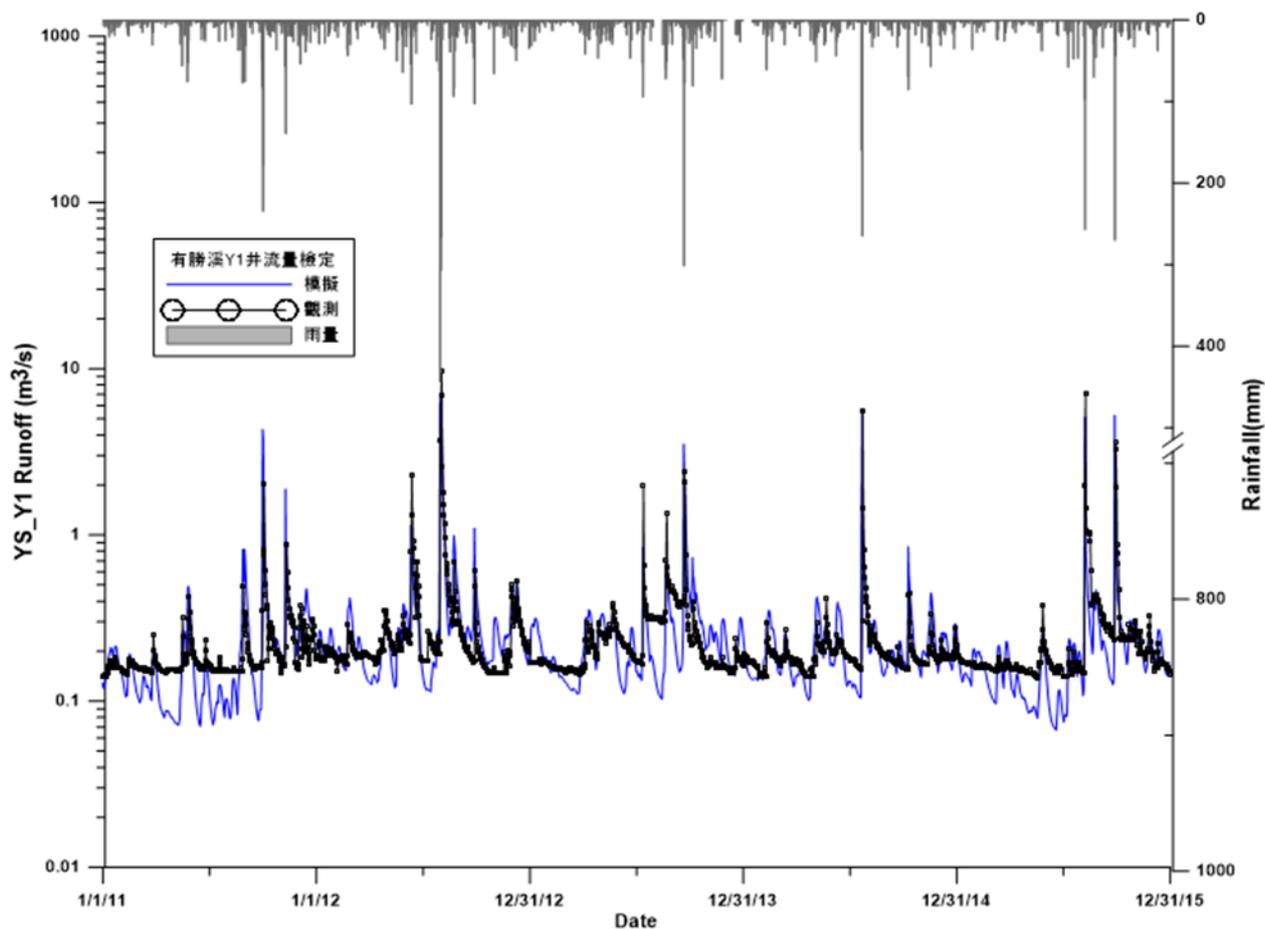


圖 3.80 有勝溪 Y1 井流量檢定成果圖

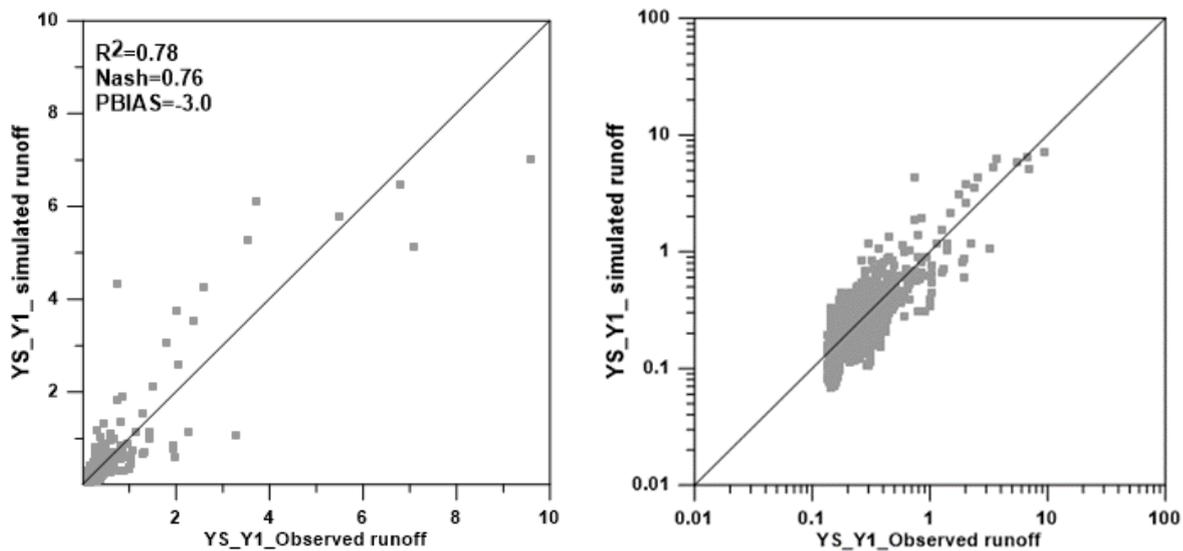


圖 3.81 有勝溪 Y1 井處流量檢定散佈圖(一般與對數軸)

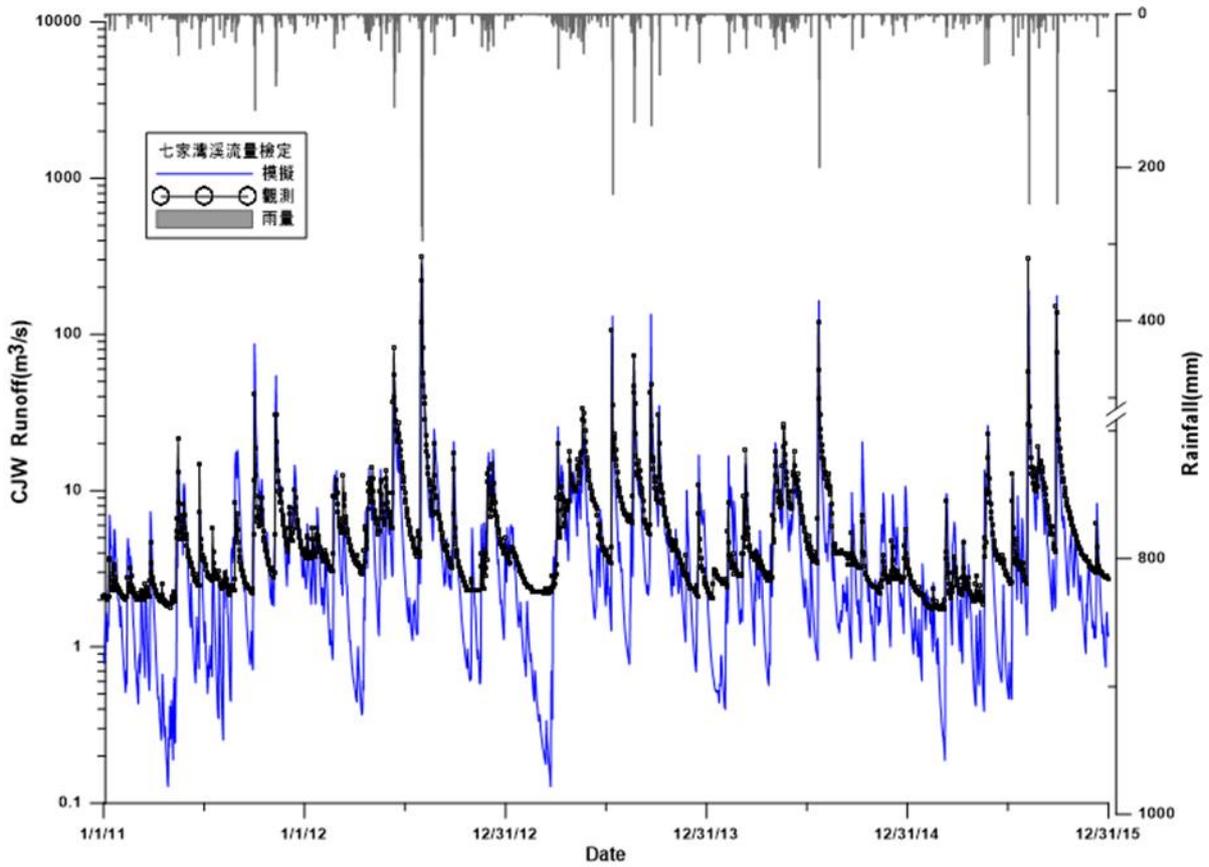


圖 3.82 七家灣溪流量檢定成果圖

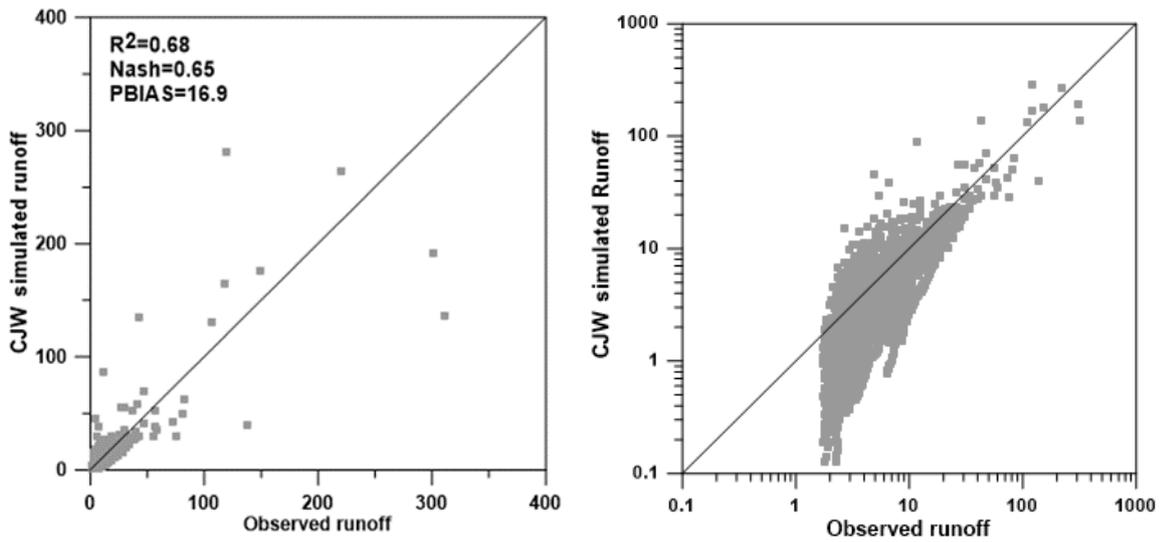


圖 3.83 七家灣溪流量檢定散佈圖(一般與對數軸)

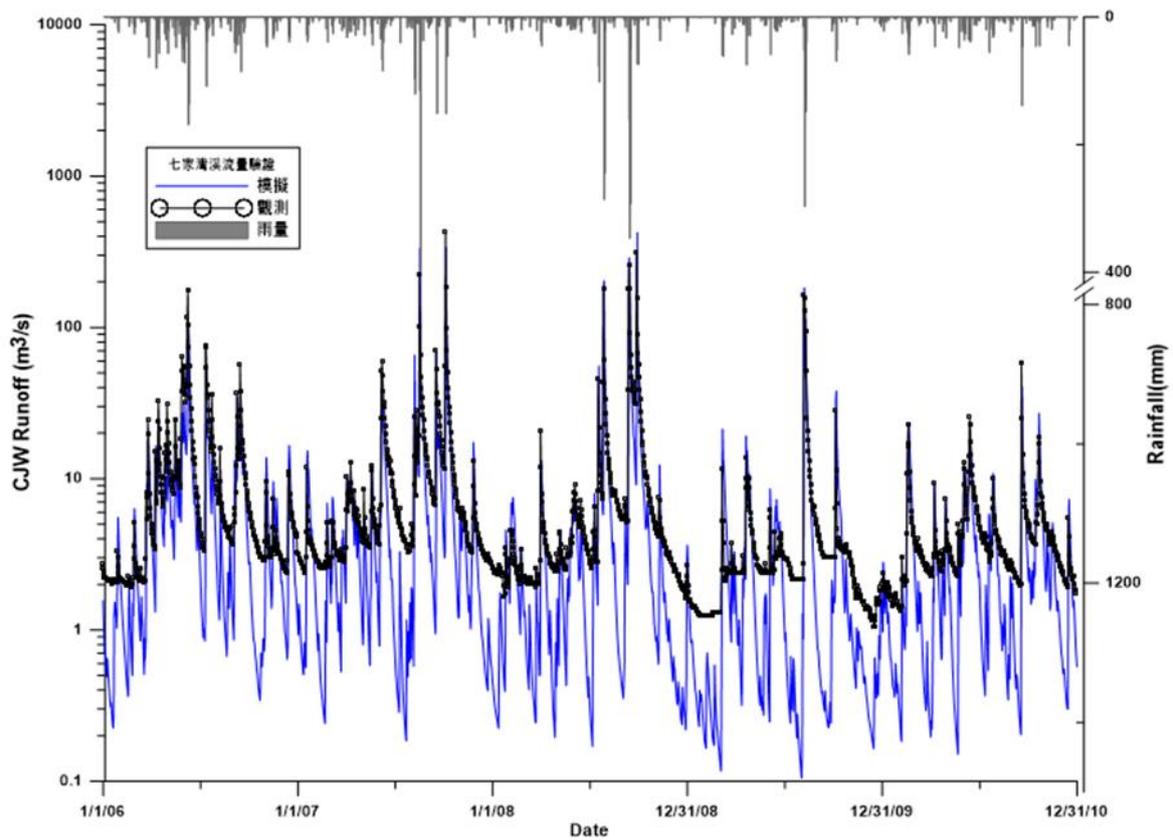


圖 3.84 七家灣溪流量驗證成果圖

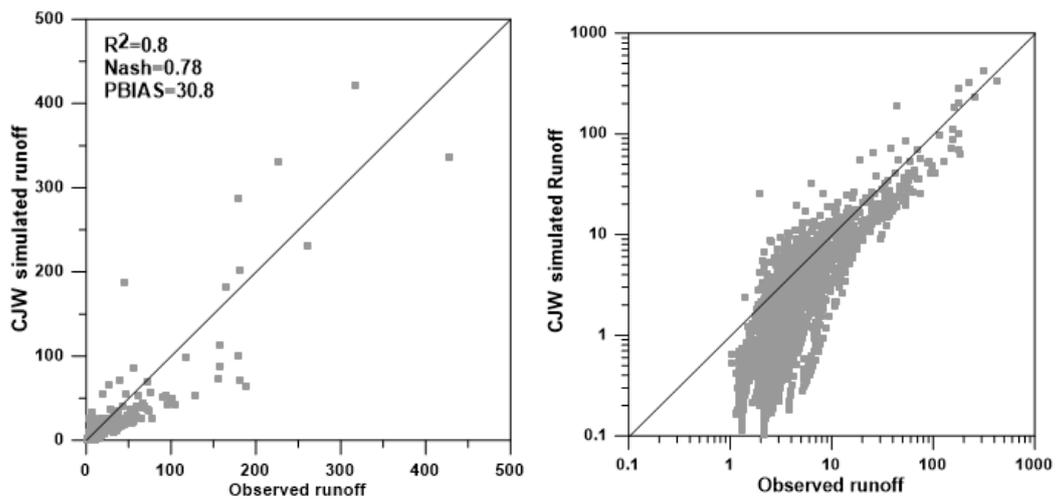


圖 3.85 七家灣溪流量驗證散佈圖(一般與對數軸)

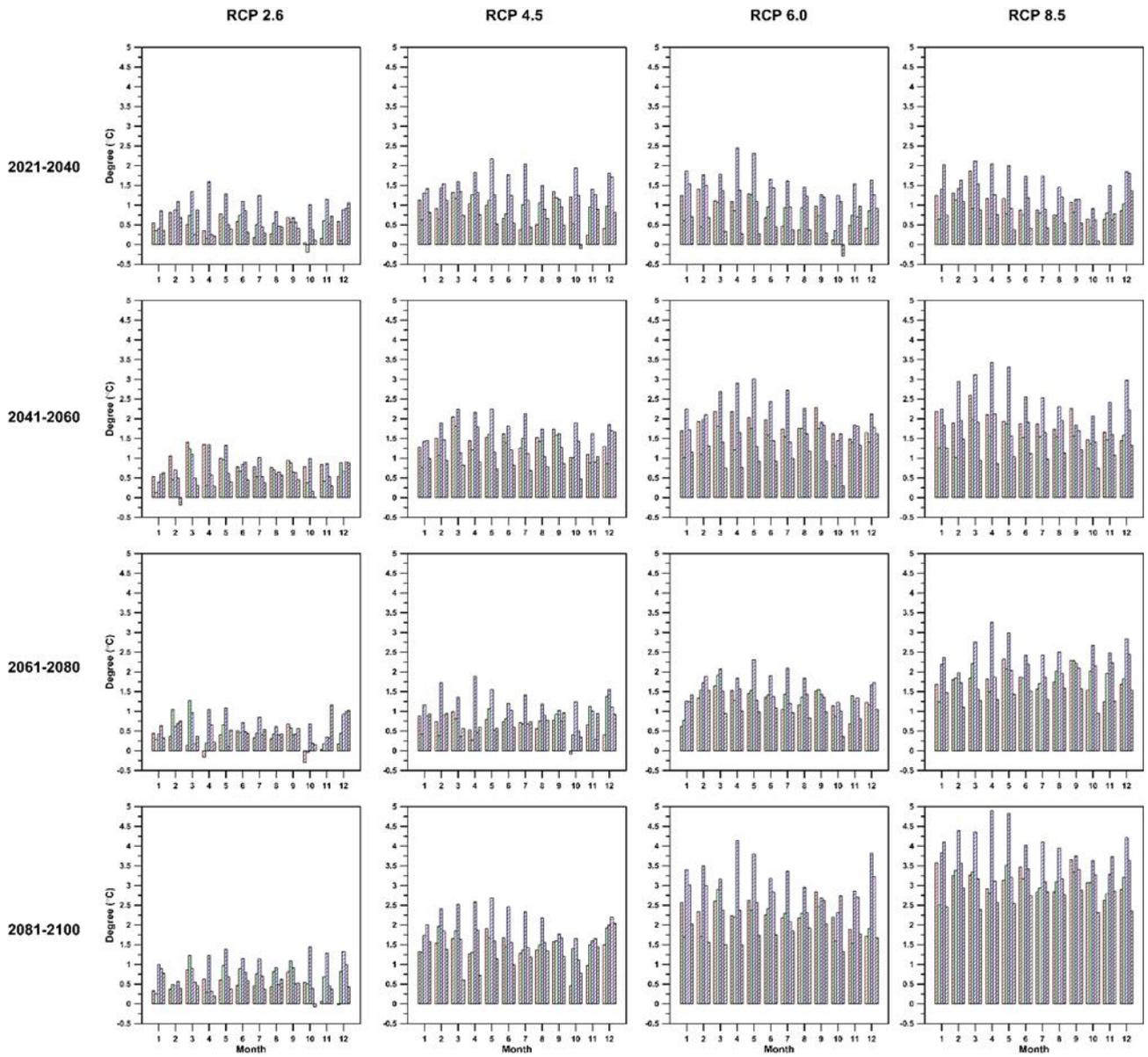


圖 3.86 氣候變遷情境下思源氣象站(有勝溪流域)之溫度變化

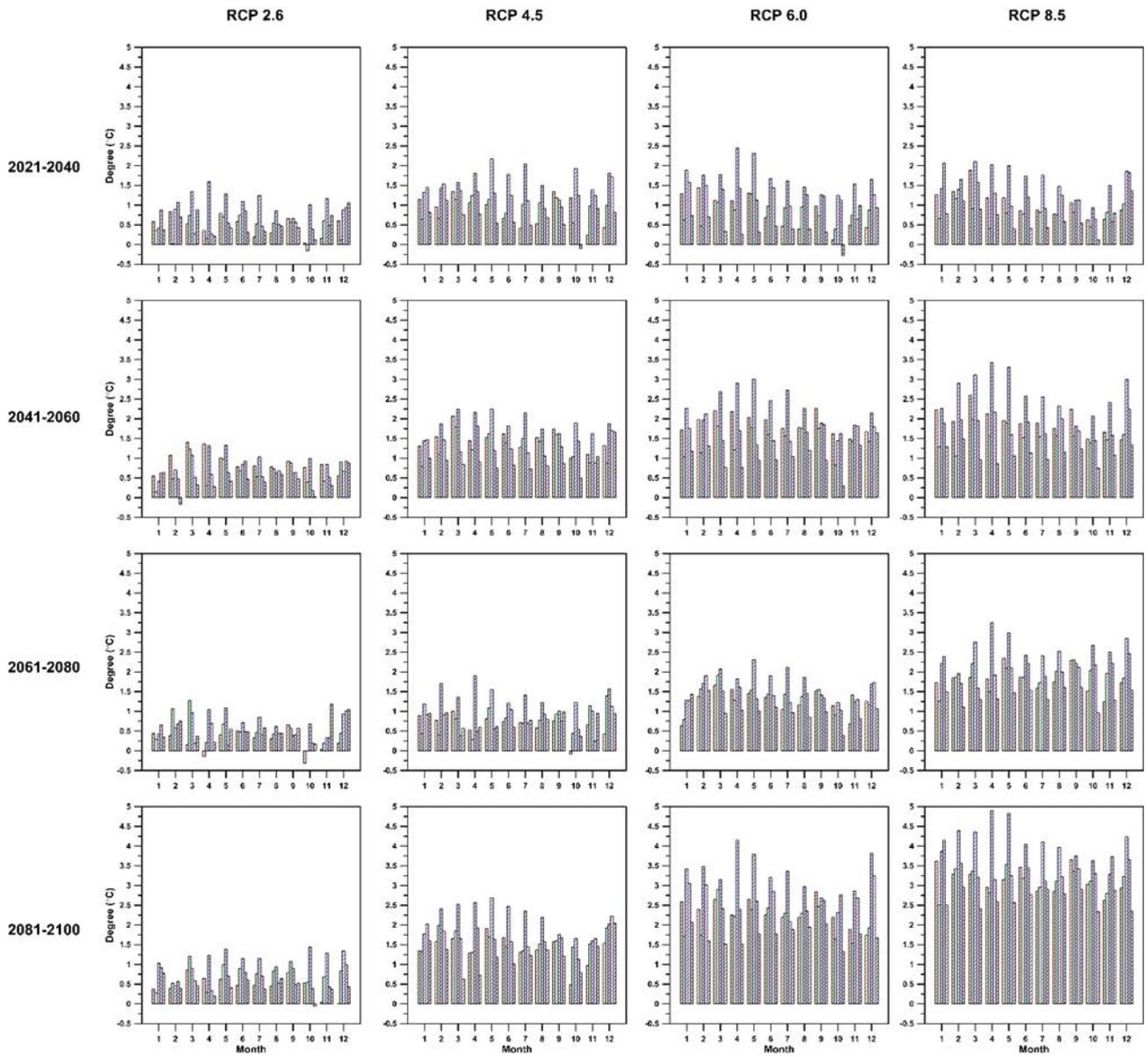


圖 3.87 氣候變遷情境下桃山氣象站(七家灣溪流域)之溫度變化

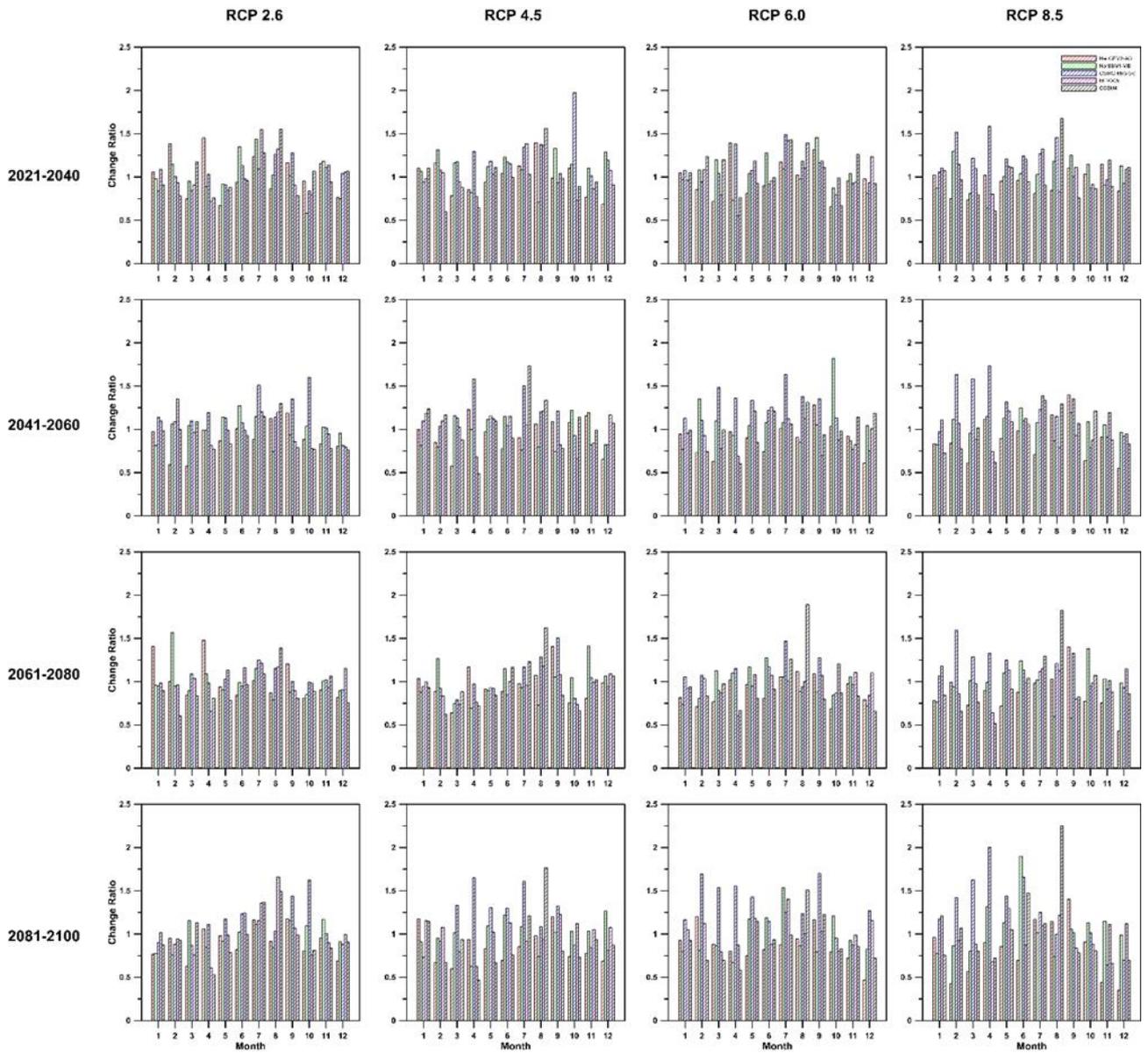


圖 3.88 氣候變遷情境下思源氣象站(有勝溪流域)之降雨變化

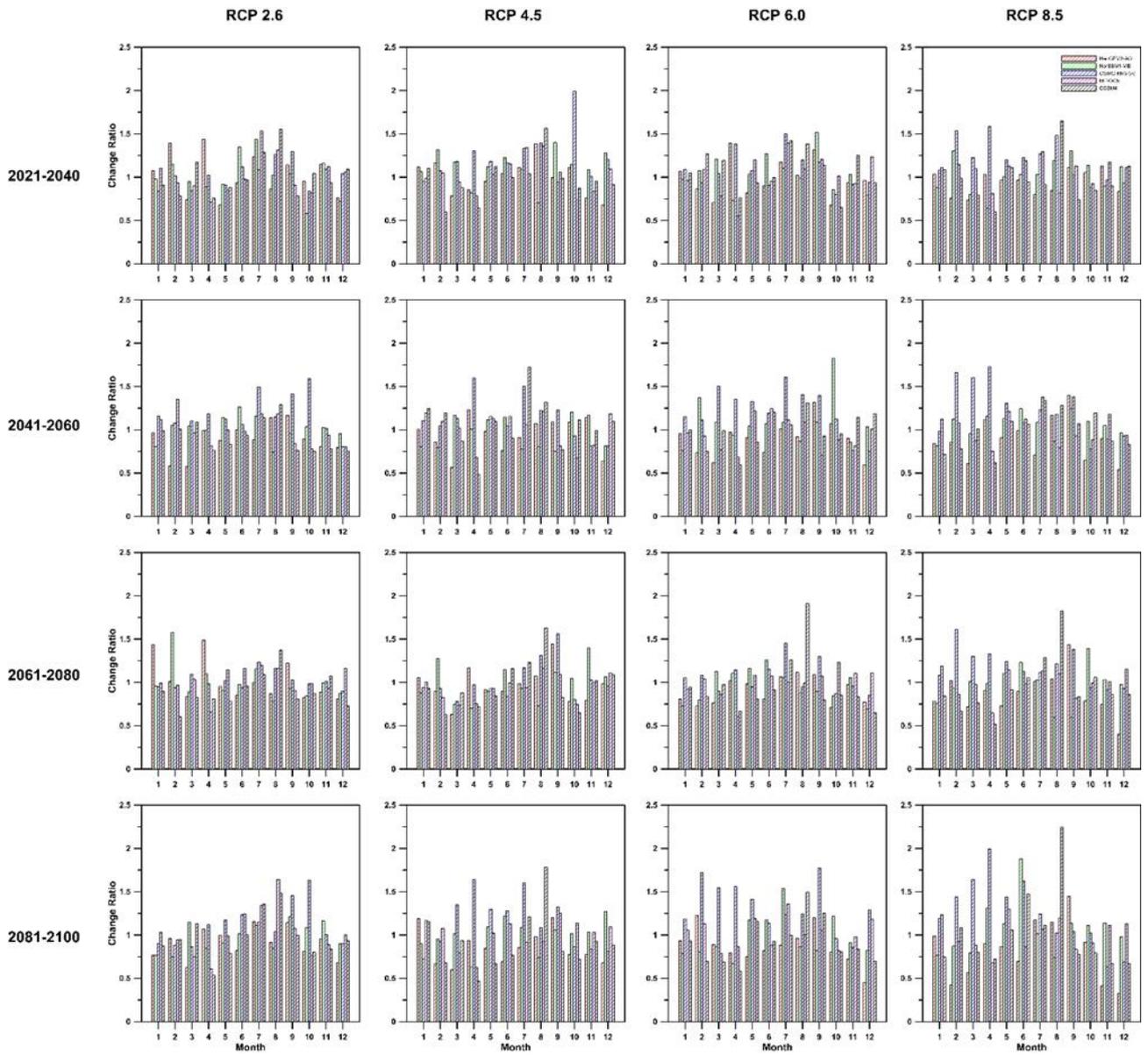


圖 3.89 氣候變遷情境下桃山氣象站(七家灣溪流域)之降雨變化

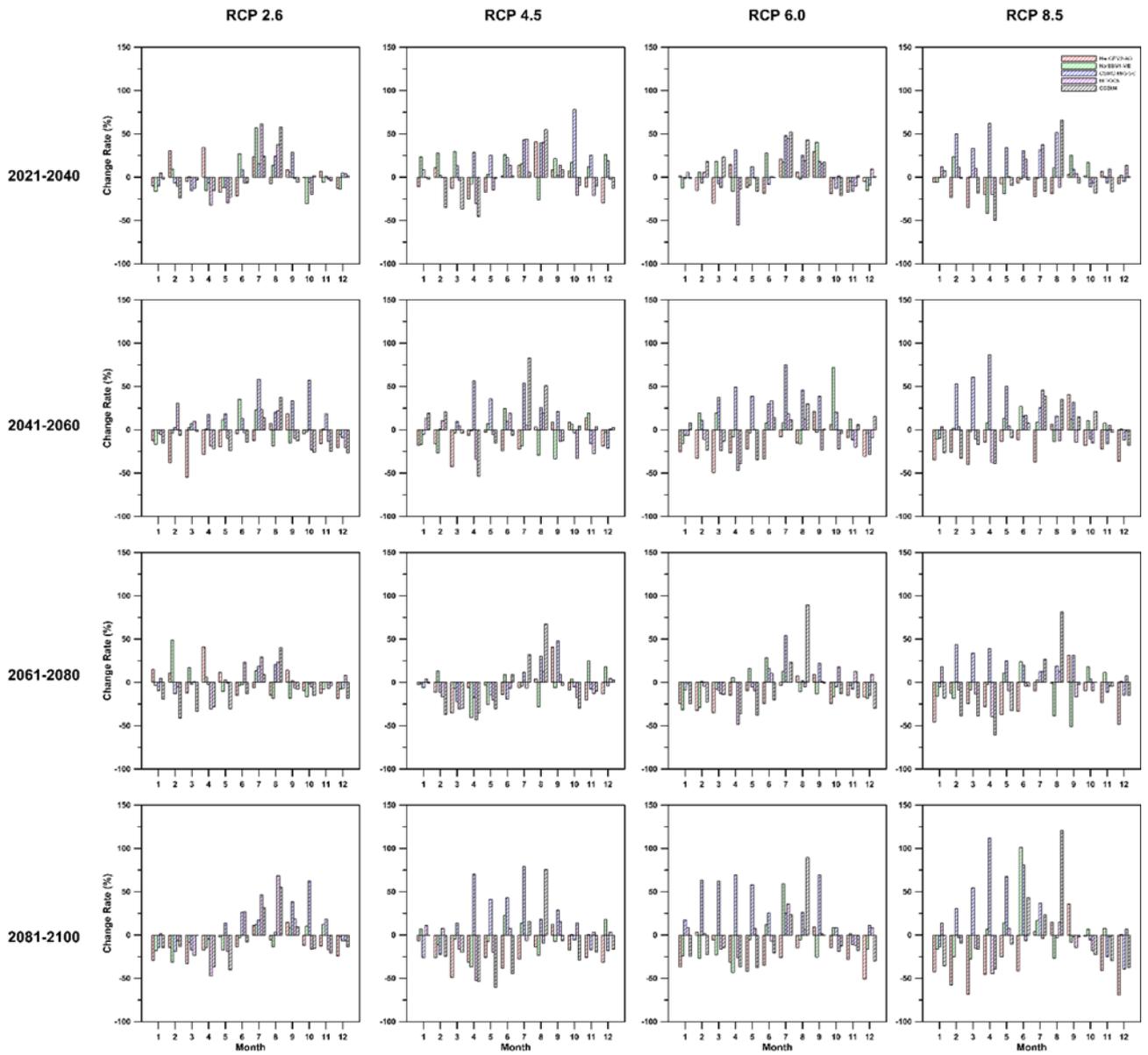


圖 3.90 氣候變遷情境下有勝溪流量變化

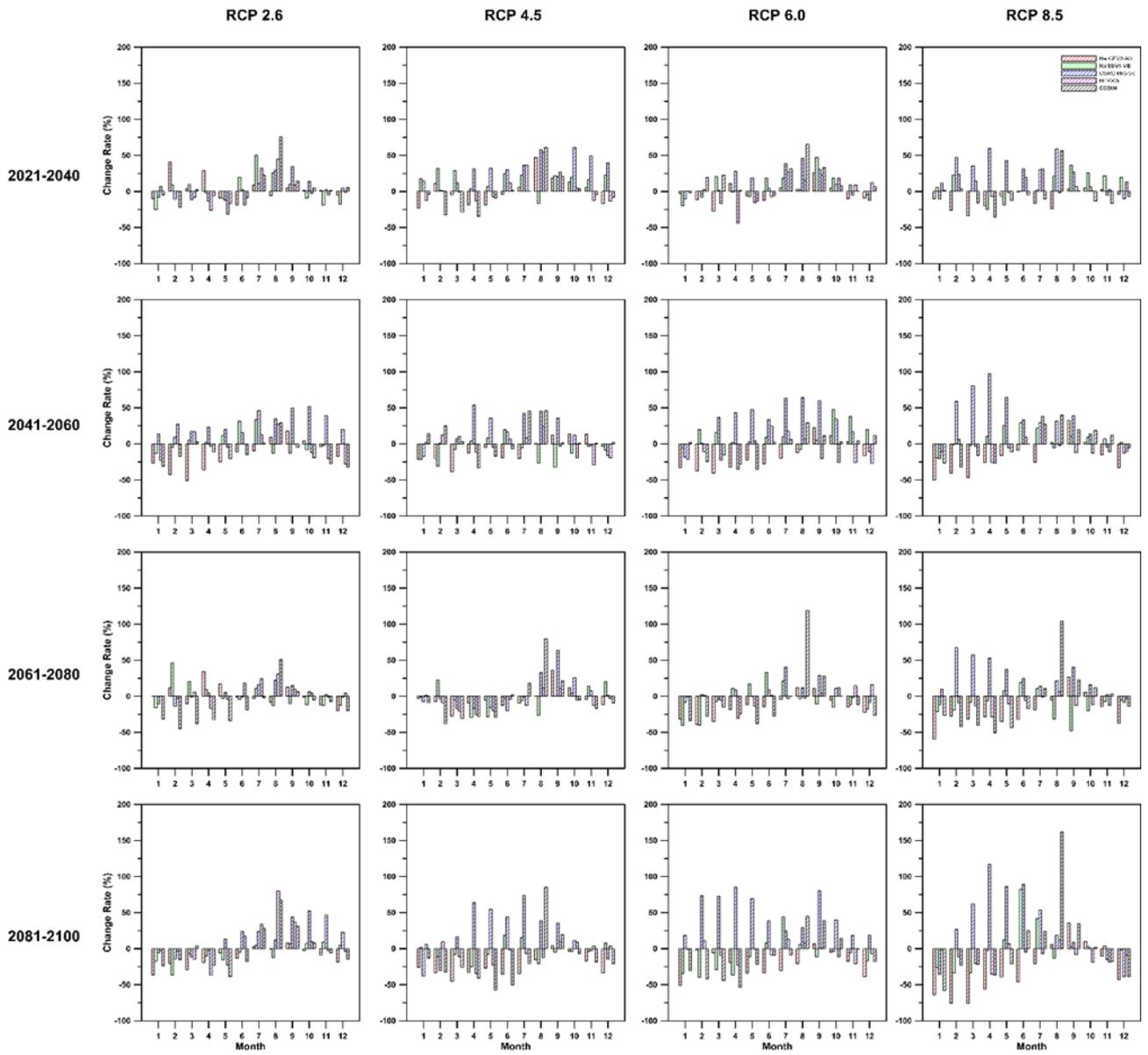


圖 3.91 氣候變遷情境下七家灣溪流量變化

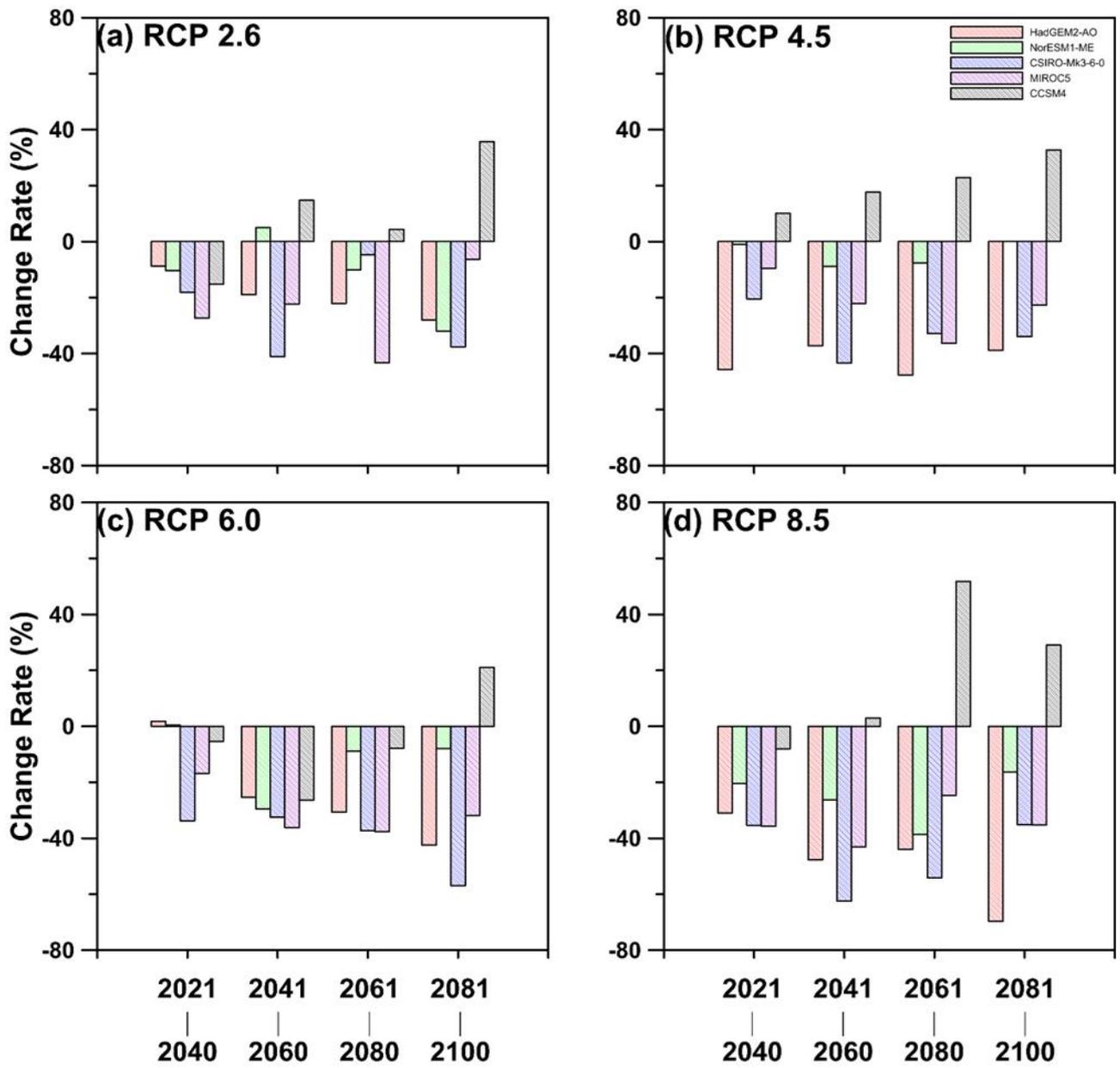


圖 3.92 氣候變遷情境下有勝溪 Q95 流量變化率

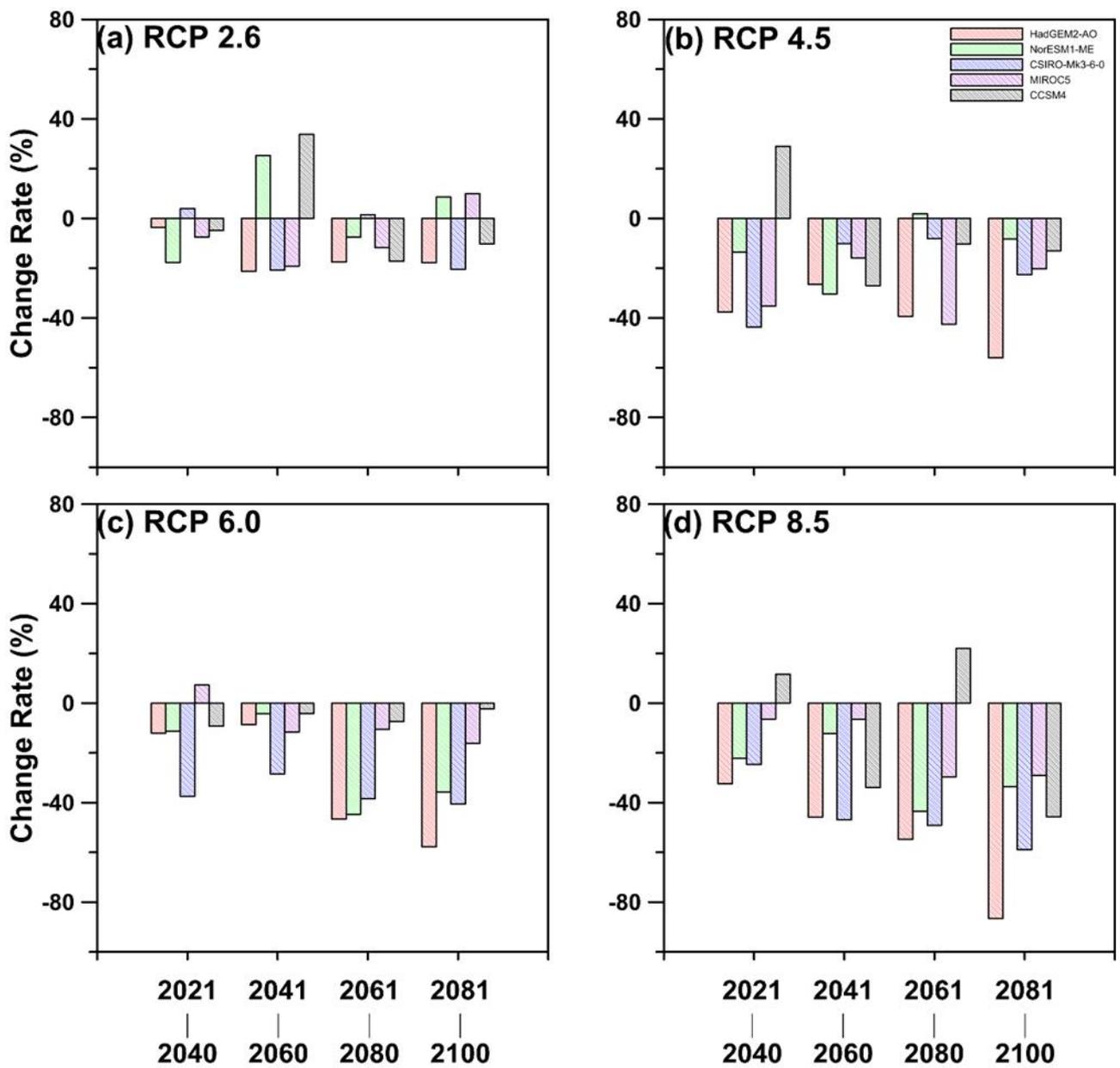


圖 3.93 氣候變遷情境下七家灣溪 Q95 流量變化率

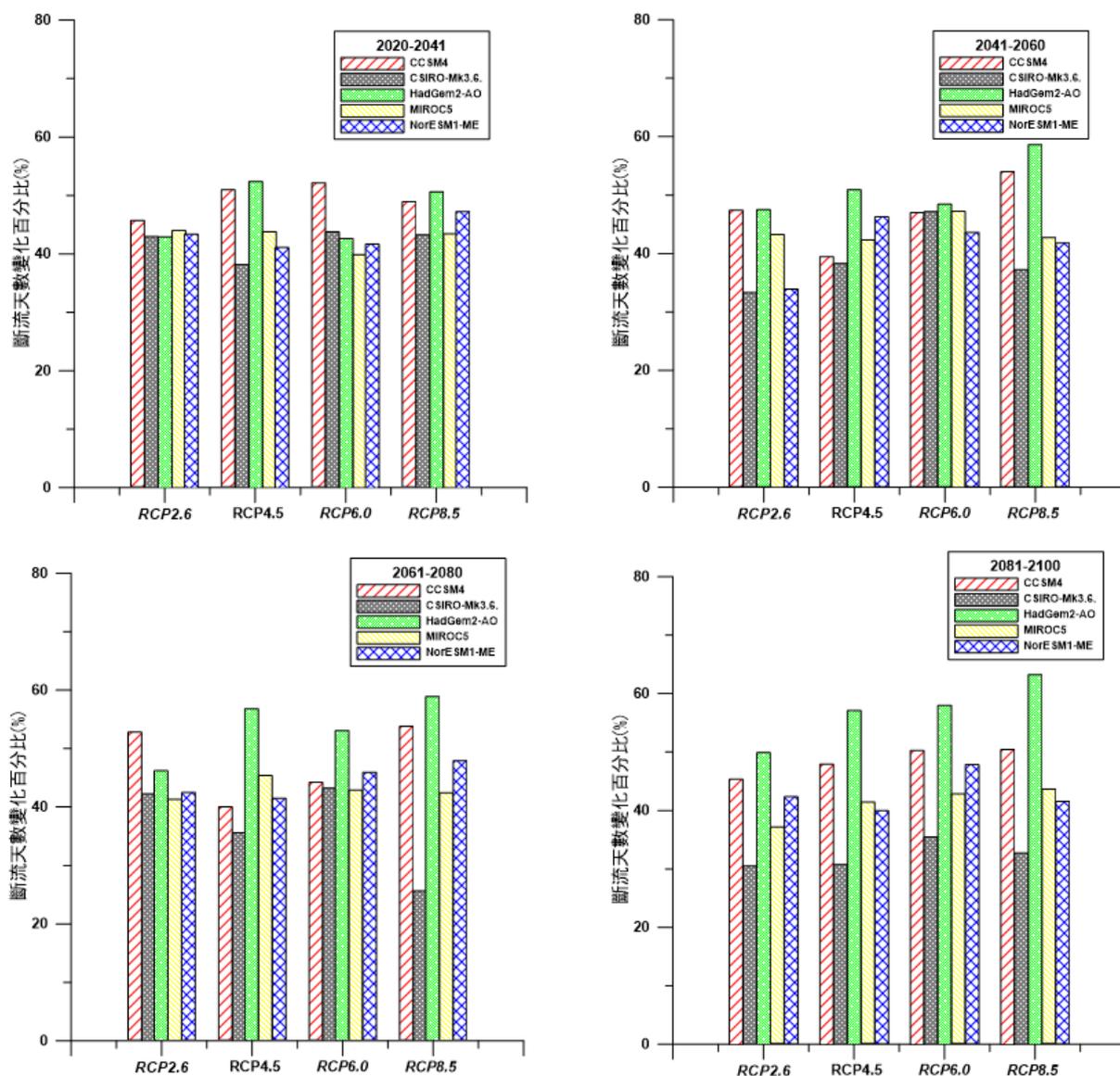


圖 3.94 有勝溪斷流天數百分比變化成果圖

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. 宜有河道斷面變遷分析、河道地文資訊，並以具體之參數量化說明。 2. 衛星影像(宜有影像處理及相關環境指標之萃取說明)。 3. 各類監測資料宜有統計分析結果加以佐證論述。 4. 斷流樣點及監測區位之篩選流程宜有說明。 5. 氣候變遷與極端事件對流量之影響請明確論述。 6. 不宜以調查樣點之資訊，擴大解釋對環境中物種的衝擊。 7. 本研究宜善用大數據做加值利用，俾計畫更臻完美。 8. 除了雨量外，冬旱季溶雪之逕流是否有分析。 9. 斷流是否有可能遭受周邊土地利用引水造成。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫係以水文條件及河床—河水交互作用的兩個面向來探討斷流河段的發生的機制，本計畫將試圖考量所提因子與斷流河段之關係。 2. 影像資料的萃取並非本計畫之工作項目，影像拍攝日期下的流量資料的分析才是本計畫的重點，影像的視覺判識雖然主觀卻不失真實，影像資料的萃取超乎計畫團隊之能力範圍。 3. 將於期末報告內納入統計分析結果。 4. 各斷流河段係由武陵工作站之工作人員依其經驗指出，本計畫亦從衛星影像中驗證桃山北溪與有勝溪斷流河段，七家灣溪的斷流河段則比對斷流時所拍攝現地照片的環境場域而獲得確認。有勝溪因為在斷流河段上有顯著的流量增減趨勢，因此得以透過幾次的現地調查選擇適合監測井的位置，分別代表斷流河段與未斷流河段之河床—河水交互作用。 5. 本計畫採用科技部支持「氣候變遷調適科技整合研究計畫—跨領域脆弱度評估與回復力建構科技

發展計畫」與「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫—臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」計畫中之評估步驟，討論氣候變遷下平均月流量與Q95(生態基流量)之變化。本計畫研究成果顯示，斷流的發生與豐水期高流量造成的堆積有關，且斷流的發生具有一最高的流量門檻，低於此門檻即發生斷流，氣候變遷下，高流量的增加與低流量的降低將使得堆積增加且更頻繁的低流量發生。

6. 感謝委員的建議，會在期末報告中注意研究結果之推論。
7. 感謝委員的建議，本計畫的資料將盡力做加值利用，唯大數據是一專門的學問，恐怕不是本計畫團隊得以勝任。
8. 本計畫並無分析融雪資料。根據「雪山地區高山生態系長期生態調查研究」計畫，2010 及 2011 年雪山高山生態系監測之降雪，其推算獲得之等量降水為各約占年雨量的 4.40% 及 6.46%，且積雪均發生在 12 月至 3 月，但本計畫于有勝溪觀測到之斷流發生於一年四季，推論降雪與斷流間的關係不大。

	9. 斷流處並無人為引水的情形。
<p>葉昭憲委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 圖 3.1 可否改以量化座標軸，配合不同符號表示，是否斷流，以呈現斷流與雨量流量對應關係。 2. 斷流預警模式以流量為變數然流量資料不易即時獲得，改以雨量資料進行模式建立之可行性如何？ 3. D1 井水位高於河川水位，是否代替水井之地下水層有下方不透水層？或是側流匯入所致〔圖 2.11(a)〕。 4. 氣候變遷情境下之各項模擬成果改以出現比例(機率)呈現變化程度，(1)例如，圖 3.44 溫度上升一度之百分比在 RCP8.5 各年份段逐漸增加；最後以表格彙整。(2)針對「流量小於 0.5cm 即可出現斷流」之前提，可否統計氣候變遷下之出現比例。 5. 工程方法改善水流狀態，可包含導流堤及地下攔水堰，其可行性、環境衝擊或其他考量，建議管理處綜合評估。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的建議，將於期末報告中以建議的繪圖方式分析斷流與降雨及流量之關係。 2. 可以嘗試，但流量應是最佳的預警因子，因流量的高低直接反應了斷流的潛勢，且流量反應的是近期集水區內的降雨，並整合了集水區內的空間降雨，會比空間離散的雨量站資料更有代表性，且因流量的退水有其規則可循，可容易作為預警的指標。 3. 從監測井設置時所保留之岩心研判，河床 4 米以淺的深度並未有不透水層。 4. 將於期末報告中以建議的方式呈現氣候變遷下氣象條件與流量之變化趨勢。 5. 相關工程方法的評估並未在本計畫預期工作內，為求嚴謹，建議未來可先以水工模型評估相關工程方法的成效與衝擊。

<p>于課長淑芬：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 結論所提河水向下補注地下水而使得斷流的情形較不嚴重，是否所有河水都有河水向下補注地下水之情況，若此現象非所以河水皆發生，為何有勝溪會出現此狀況發生斷流。 2. 有勝溪因曲流後產生斷流，2012年颱風之後，河道改道，產生斷流現象，目前其他的河水，如：七家灣溪有斷流但是否有產生曲流之狀況。 3. 報告書建議部分提及本管處後續可研擬相關計畫評估減緩補注現象改善斷流之情形，請受託單位蒐集並提供近年來是否有文獻或報告有效解決及改善斷流方法等相關資料。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 斷流並非有勝溪獨有的特性，當河川流量無法支持河床入滲量時即發生斷流，並以伏流水的方式往下游流動，河床堆積是斷流的主因，找出伏流水流動的路徑並移除其路徑上的堆積物是解決問題的關鍵。 2. 七家灣溪及桃山北溪過往的斷流亦都發生在曲流處，且該河段目前仍維持曲流的狀態，唯曲流並非斷流發生的唯一條件，斷流處的河水與地下水間的交互作用亦扮演重要的角色。 3. 河水—河床交互作用的研究相對新穎，文獻目前多著重在現象與機制的探討，應用層面的文獻並不多見，本計畫將積極追蹤最新相關文獻。
<p>劉課長金龍：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Y1 及 T5 河水流量是否有進行監測? 2. 921 地震前與地震後河川及河道之改變，其對斷流是否有影響。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 每個月例行的調查中，均會量測河川流量。 2. 從歷史資料研判，有勝溪斷流均發生在 2012 年 10 月之後，應與 921 地震無直接關連。
<p>陳秘書俊山：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究目標為歸納斷流發生的原 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝陳秘書的建議，後續會探討

<p>因，目前聚焦於某一河段，需要有自然因子(崩塌、堆積)或人為因子(開墾地使用加速斷流)的分析。</p> <p>2. 是否能分析早期櫻花鉤吻鮭族群量多時的航空照片，與現今比較進行輔助說明，若早期也存在斷流問題，其非影響鮭魚族群數量降低之原因，本管處則可評估是否有需要對斷流問題進行積極的改善及處理。</p>	<p>斷流因子屬於自然因子或人為因子。</p> <p>2. 櫻花鉤吻鮭數量多的時候得回溯到 1940 年代，航空照片有取得之困難，且處理航空照片亦不在此計畫的工作項目內。</p>
<p>鄭副處長瑞昌：</p> <p>1. 本研究案題目為「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」，期中報告內容主要為有勝溪而非七家灣溪，請受託單位說明。</p> <p>2. 有勝溪段流地區是否確認有無種植農作物。</p>	<p>1. 本計畫係以水文條件及河床—河水交互作用的兩個面向來探討斷流河段的發生的機制，從水文條件上來看，七家灣溪於記錄上僅於 2015 年 3 月斷流一次，無法將斷流的原因予以歸納；從河床—河水交互作用來看，本計畫監測井設置的方式不易在七家灣溪操作，因此均以有勝溪為案例。於七家灣溪的水位與流量觀測上，也佐證其不若有勝溪般容易發生斷流。</p> <p>2. 斷流處緊鄰羅葉尾溪下游，此處並無種植農作物的情形。</p>

<p>鍾處長銘山：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 針對斷流之發生，請分析及評估斷流發生後之因應對策。 2. 本研究案主要探討目標為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溪地之影響，而非只研究斷流的部分，請受託單位要針對主題進行河床與河水交互作用之研究。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫係以探討斷流發生的原因為主要目的，相關因應的對策不在計畫工作項目內，且應該交由生態保育的專家提出更為適切。 2. 研究中發現，水流於河床—河水交互作用中有兩個方向，一個是由河水往河床方向，一個是由河床往河水方向，水流方向與強度與是否發生斷流的潛勢吻合，為本計畫之研究方法與重點。
---	--

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. 宜再增加各期審查意見回覆表。 2. 建議宜提出解決斷流問題具體可行之作法。 3. 有無斷流河道的地形測量資料。 4. 監測井深度可否瞭解伏流水深。 5. 可否提出斷流預警和發生斷流時管理單位的作為。 6. 如測站位一致，地下水位如何高於河川水位？ 7. 請提供監測樣點的定位座標。 8. 斷流前砂藻增生的理由為何？ 9. 斷流的真正原因和崩塌地、防砂壩是否有關？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已增加期中及期末審查意見回覆於期末報告書後。 2. 具體建議之作法已經增列於期末報告書中結論與建議之章節，如潛壩的設置、河道的疏通等，然而作法的建議乃根據現地觀測數據之推論，本計畫並無法評估各作法之實際成效，仍有賴後續之研究，如透過水工模型的建立與驗證確保各作法之成效。 3. 雪霸國家公園每年均有對七家灣溪流域做全面的河道地形量測，地形量測並不在本計畫之工作項目。研究中比對過往地形量測計畫所得斷面資料後確實發現，有勝溪斷流河段開始發生頻繁的斷流現象，如 2012 年颱風季節後、2016 年梅姬颱風後，河道高程均有大幅度抬升之現象，大量沖積所得之土石因較為鬆散，使得河水改以伏流水的形式在河床內流動。 4. 可以透過監測井量測知道伏流水的水深，目前觀測的結果顯示，有勝溪斷流河段的伏流水發生在河

床下三米以淺的位置，一年半的觀測資料顯示，三米以深的位置終年有水，因此三米可做為潛壩設置與河道疏浚的參考依據。

5. 現階段建議直接在易斷流處設置水位計，可即時回傳資料至管理站，以做為斷流之即時預警，並以人工的方式協助受困魚類脫困至適合之棲地。
6. Well D 處的監測井的水位的確高於河川水面，確切的原因目前仍無法回答，但現地的觀察可以很明顯的發現，在 Well D 所在之河段，不斷有水從河床冒出，約莫佔河道的一半寬，且冒出的溫度明顯低於河川溫度，證明該河段有從河床流出至河面的水，亦與觀測到監測井水位高於河川水面之結果相呼應。
7. 每月現地流量量測之坐標如表 3.2-3.4 所示，監測井之坐標增列於圖 2.7。
8. 現地觀察發現，斷流發生前常有藻類增生的現象，估計與斷流前流量減少及流速降低的環境條件有利於藻類生長有關。

	<p>9. 斷流的原因與河床上堆積的土石量有關，堆積量越大且越鬆散則較容易發生斷流，崩塌與防砂壩上游均提供大量土石堆積的條件。桃山北溪的斷流與防砂壩有關，這在過去雪霸國家公園的計畫報告中已經被提出；七家灣溪於 2015 年 3 月發生的斷流，發生在主流左岸大崩塌的上游，可能與大崩塌歷年造成的土石堆積有關；而有勝溪的斷流，亦與河床上大量的土石堆積有關，斷流處並無防砂壩，且此計畫並無法追溯堆積土石的來源。</p>
<p>楊課長國華：</p> <p>1. 本研究期望受託單位提供斷流預警系統，供未來武陵管陵站能於斷流前即時搶救溪裡鮭魚。</p>	<p>1. 斷流河段水位的連續監測，若能即時回傳資料至管理站，將是最有效之斷流預警。</p>
<p>于課長淑芬：</p> <p>1. 報告書 P23 圖示未標號，請修正。</p> <p>2. 矽藻本身即有許多孔隙，溪流矽藻多，不太可能造成河床孔隙堵塞，請受託單位再詳細考量本報告之論述是否正確。</p>	<p>1. 已修正。</p> <p>2. 計畫中關於矽藻造成河床孔隙堵塞的推論確實過於武斷而缺乏更直接的證據，已經將相關的論述於期末報告書中移除。</p>
<p>鄭副處長瑞昌：</p>	<p>1. 計畫中關於矽藻造成河床孔隙堵</p>

<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究成果建議據實陳述，矽藻方面資料不建議放置於成果報告書。 2. 地下水上升為地面水，是否用「補注」這個名詞，請確認。 3. 請受託單位評估有勝溪段流之情形是否有需改善，並補充說明。 4. 報告提及預測斷流指數，研究團隊是否能依此指數，研擬解決斷流發生之方式。 	<p>塞的推論確實過於武斷而缺乏更直接的證據，已經將相關的論述於期末報告書中移除。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 從地下水流出成為地面水的現象應改稱為「地下水流出」較為適切。 3. 是否有需要改善並非本計畫的工作項目。但本計畫認為，若是自然現象所造成之斷流，則無須刻意改善，但若涉及櫻花鉤吻鮭棲地的擴張（如羅葉尾溪魚群棲地的擴張受到有勝溪斷流的影響，或七家灣溪斷流造成棲地的不連續），則需視雪霸國家公園的立場；而桃山北溪的斷流明顯受到人為設置防砂壩之影響，在短期無法做大規模動作的情況下，即時監測水位搭配斷流前人工協助魚的脫困，為現階段最佳的改善措施。 4. 綜合考量雨量、河川流向、流量與斷流發生的關係，本計畫建議斷流河段水位即時的連續監測，將是最有效之斷流預警，因為斷流均始於水位的持續降低。
<p>鍾處長銘山：</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 現階段建議直接在易斷流處設置

<ol style="list-style-type: none"> 1. 針對斷流之發生，請分析及評估斷流發生後之因應對策。 2. 期中審查提出本研究案主要探討目標為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溪地之影響，請受託單位要針對主題進行河床與河水交互作用之研究進行綜合分析。 3. 研究成果報告書撰寫建議以由淺入深的方式加以論述，非實質性及不確定性的觀點不建議呈現於成果資料。 	<p>可即時回傳之連續水位資料，並以人工之方式協助受困魚類脫困至適合之棲地。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 以河段的尺度來看，若河床與河水交互作用的方向為河水往河床方向流動(如 Well B 及 Well C)，則該河段比較容易發生斷流，若交互作用方向為從河床往河水方向移動(如 Well D)，則不易發生斷流。若以集水區的尺度來看亦然，水文模擬的結果顯示，若河床與河水交互作用的方向為河水往河床方向流動(如有勝溪)，則該河段比較容易發生斷流，若交互作用方向為從河床往河水方向移動(如七家灣溪)，則不易發生斷流。 3. 已經將建議改寫，考量計畫報告書讀者廣泛的背景；另外已經將非實質性及不確定性的觀點從期末報告書中移除。
---	---