

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-001(25)

氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢
評估

**Long-term trend assessment of discharge
in potential debris flow torrent under
climate change
(成果報告)**

執行單位：逢甲大學

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：楊松岳 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢評估

摘要

土石流直接威脅山區聚落、公共設施、交通要道的安全，短期間所累積之土砂，甚至會造成中下游之二次災害。土石流的發生必須有三個條件，包含充足的堆積物、豐富的水分，以及足夠的坡地。因此，流量是誘發土石流的發生的重要因子之一。然而，在不同氣候變遷情境下，土石流潛勢溪流的流量在近世紀、世紀中、與世紀末的長期趨勢需要以科學化方法進一步評估。本研究以位於台南市龜丹溪之土石流潛勢溪流(南市 DF033)為案例，以臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaption Knowledge Platform, TCCIP)所發布之最新統計降尺度日降雨資料為基礎，計算基期(1986~2005 年)、近未來(2016~2035 年)、世紀中(2046~2065 年)、世紀末(2081~2100 年)之各重現期距雨量。再將各重現期距之雨量輸入龜丹溪集水區之 SOBEK 模式，計算 DF033 土石流潛勢溪流之流量長期趨勢。

整體而言，氣候情境越惡劣，流量增加的幅度就越大，特別是 RCP 6.0 與 RCP 8.5。RCP 4.5 會導致流量略為增加。RCP2.6 並不會導致流量增加。越接近世紀末，RCP 6.0 與 RCP 8.5 越接近世紀末，增幅隨之擴大。RCP 4.5 則呈現緩慢增幅。RCP2.6 並不會導致流量增加，反而越接近世紀末，增幅會下降。低重現期 (出現頻率越高)的土石流流量增幅，會明顯大於高重現期 (出現頻率越低)的土石流流量。以 RCP8.5 為例，2、5、10 年重現期的流量增幅約為 100%。25、50、100 年重現期的流量增幅約為 80%。從土石流防災觀點，這現象必須要特別注意。因為，低重現期事件的出現頻率越高，容易導致災損。

本研究顯示氣候變遷會很明顯且直接，導致土石流潛勢溪流各重現期距洪峰流量改變。因此，如果依照歷史水文資料，設計相關水土保持設施時，會面臨到水土保持設施保護標準降低之課題，並導致水土保持設施之功能下降。目前水土保持技術規範並未訂有氣候變遷相關條文，因此未來應將氣候變遷調適納入水土保持技術規範。本研究結果顯示氣候變遷導各重現期距洪峰流量改變時，勢必會影響清水流量，進而影響土石流流量，導致土石流影響範圍的改變。因此，對於風險較高之土石流潛勢溪流應納入氣候變遷情境，以評估土石流影響範圍改變的情況，並配合影響範圍調整，以保全周邊之居民。

關鍵詞：氣候變遷、土石流、流量、土石流潛勢溪流

Long-term trend assessment of discharge in potential debris flow torrent under climate change

Abstract

The debris flows threaten the safety of mountain settlements, public facilities, and traffic roads. The accumulated debris may even cause secondary disasters downstream. There are three debris flow conditions: sufficient debris, abundant rainwater, and sufficient slope. However, under different climate change scenarios, the long-term trend of the discharges of potential debris flow torrents in the recent century, mid-century, and end-century needs to be further evaluated by scientific methods. This study takes a potential debris flow torrent (DF033) located in Guidan Stream, Tainan City, as a case. Based on the latest statistical downscaled daily rainfall data released by the Taiwan Climate Change Projection Information and Adaption Knowledge Platform (TCCIP), the various return periods rainfall of baseline (1986~2005), near future (2016~2035), mid-century (2046-2065), and end-of-century (2081-2100) were calculated. The rainfalls with different return periods were input into the SOBEK model to calculate the long-term trend of the discharge of the DF033.

In general, the more severe the climate scenario, the more significant the increase in discharge, especially RCP 6.0 and RCP 8.5. RCP 4.5 will result in a slight increase in discharge. RCP2.6 does not increase discharge. As the closer to the end of the century, the discharge growth of RCP 6.0 and RCP 8.5 will expand rapidly. RCP 4.5 will show a slow increase in discharge. RCP2.6 will not lead to an increase in discharge. On the contrary, the closer the century end, the increase will decrease. The increase of discharge with low return periods (the higher the

occurrence frequency) will be significantly more significant than that with high return periods (the lower the occurrence frequency). For RCP8.5, the discharge increases with the return period of 2, 5, and 10 years are about 100%. The discharge increases with 25-, 50-, and 100-year return periods are about 80%. From the point of view of debris flow prevention, this phenomenon must be paid particular attention to the trigger of debris flow. This is because the higher the frequency of low return period events, the easier it is to cause disaster damage.

This study shows that climate change induces obvious and direct changes in the discharge from the flood peak in each return period of the potential debris flow torrent. Therefore, if the soil and water conservation facilities are designed according to the historical hydrological data, the protection standard of the facilities will be lowered, and the function of the facilities will be reduced. There are no provisions related to climate change in soil and water conservation regulations, so climate change adaptation should be included in the regulations in the future. Climate change will lead to changes in the discharges of flood peaks with each return period, which will inevitably affect the discharges of debris flow and lead to changes in the influence areas of debris flows. Therefore, the influence areas of potential debris flow torrents with high risk should be evaluated under climate change, and the area should be adjusted to protect the surrounding residents.

Keywords: climate change, debris flow, discharge, potential debris flow torrent

目次

摘要.....	I
Abstract	III
目次.....	V
表次.....	VIII
圖次.....	X
第 1 章 緒論	1-1
第一節 研究動機.....	1-1
第二節 研究目的.....	1-1
第三節 研究架構.....	1-2
第 2 章 文獻回顧.....	2-1
第一節 全球氣候變遷.....	2-1
第二節 台灣氣候變遷.....	2-1
第三節 國外氣候變遷對於土石流災害衝擊研究	2-2
第四節 國內氣候變遷對於土石流災害衝擊研究	2-4
第 3 章 案例研究.....	3-1
第一節 龜丹溪概況.....	3-1
第二節 土石流潛勢溪流	3-4
第三節 集水區高程.....	3-5
第四節 地質與土壤.....	3-5
第五節 坡度與坡向	3-7
第六節 土地利用	3-9
第 4 章 氣候變遷情境.....	4-1
第一節 參考觀測資料.....	4-1
第二節 模式資料.....	4-2

第三節	產製流程.....	4-3
第四節	大氣環流模型擇定.....	4-6
第五節	統計降尺度.....	4-7
第 5 章	水文水理模式.....	5-1
第一節	雨量站.....	5-1
第二節	水位站.....	5-2
第三節	子集水區劃定.....	5-3
第四節	雨量頻率分析.....	5-4
第五節	雨型設計.....	5-7
第六節	降雨-逕流模式.....	5-8
第七節	SOBEK 模式.....	5-14
第八節	土石流演算.....	5-17
第九節	模式檢定驗證.....	5-18
第 6 章	不同氣候變遷情境模擬與分析比較.....	6-1
第一節	RCP 2.6.....	6-1
第二節	RCP 4.5.....	6-9
第三節	RCP 6.0.....	6-17
第四節	RCP 8.5.....	6-26
第五節	綜合比較.....	6-34
第 7 章	氣候變遷調適策略建議.....	7-1
第一節	氣候變遷下土石流潛勢溪流流量變化可 能造成之影響.....	7-1
第二節	氣候變遷調適策略建議.....	7-3
參考文獻.....		1
附錄.....		1

附錄一、計畫說明書審查意見及處理情形.....	1
附錄二、期初審查會議意見及處理情形.....	3
附錄三、期中報告書審查意見及處理情形.....	6
附錄四、期末報告書審查意見及處理情形.....	7

表次

表 1 龜丹溪集水區土石流潛勢溪流一覽表	3-4
表 2 龜丹溪集水區土壤分布表	3-6
表 3 龜丹溪集水區坡度分布表	3-8
表 4 龜丹溪集水區坡向分布表	3-9
表 5 龜丹溪集水區土地利用表	3-10
表 6 GCM 模式	4-3
表 7 台灣各氣候帶建議之前五名最適合之 GCM	4-6
表 8 龜丹溪鄰近集水區雨量站	5-1
表 9 龜丹溪集水區鄰近水位站	5-2
表 10 水文分析表	5-7
表 11 雨型設計參數表	5-8
表 12 子集水區參數表	5-10
表 13 臺灣土壤性質分類表	5-10
表 14 SCS 曲線號碼表【AMC II】	5-11
表 15 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(1/3)	5-12
表 16 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(2/3)	5-13
表 17 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(3/3)	5-14
表 18 模式檢定驗證表	5-20
表 19 RCP2.6 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表	6-1
表 20 RCP2.6 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量 比較表	6-5

表 21 RCP4.5 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表	6-9
表 22 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量比較表	6-13
表 23 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表	6-18
表 24 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量比較表	6-22
表 25 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表	6-26
表 26 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量比較表	6-30
表 27 不同重現期距在不同情境下之土石流流量變化	6-35
表 28 水土保持技術規範涉及設計流量之條文	7-2

圖次

圖 1 計畫流程.....	1-2
圖 2 龜丹溪集水區域圖	3-2
圖 3 卡玫基颱風龜丹溪土石流事件.....	3-3
圖 4 土石流潛勢溪流分布圖	3-4
圖 5 龜丹溪集水區等高線圖	3-5
圖 6 龜丹溪集水區土壤分布圖	3-6
圖 7 龜丹溪集水區地質分佈圖	3-7
圖 8 龜丹溪集水區坡度圖	3-9
圖 9 龜丹溪集水區坡向圖	3-9
圖 10 龜丹溪集水區土地利用圖	3-10
圖 11 觀測降水網格資料產製示意圖。(A)為雨量測站分 布(B)為空間解析度 5KM 之網格資料)	4-2
圖 12 GCM 模式資料內插示意圖	4-4
圖 13 日資料取樣示意圖	4-5
圖 14 修正模式資料之 ECDF 至觀測之 ECDF	4-5
圖 15 研究區統計降尺度示意圖	4-7
圖 16 龜丹溪鄰近雨量站	5-2
圖 17 龜丹溪鄰近水位站	5-3
圖 18 子集水區範圍圖	5-4
圖 19 SOBEK 模式圖	5-15
圖 20 2013 年康芮颱風模式模擬與觀測比較歷線圖.....	5-20
圖 21 2015 年蘇迪勒颱風模式模擬與觀測比較歷線圖.....	5-20
圖 22 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較 圖	6-1

圖 23 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距	
雨型	6-2
圖 24 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距	
雨型	6-2
圖 25 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距	
雨型	6-3
圖 26 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距	
雨型	6-3
圖 27 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距	
雨型	6-4
圖 28 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期	
距雨型	6-4
圖 29 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流	
量變化比較圖.....	6-5
圖 30 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距	
流量歷線圖.....	6-6
圖 31 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距	
流量歷線圖.....	6-6
圖 32 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距	
流量歷線圖.....	6-7
圖 33 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距	
流量歷線圖.....	6-7
圖 34 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距	
流量歷線圖.....	6-8

圖 35 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距流量歷線圖	6-8
圖 36 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較 表	6-9
圖 37 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 雨型	6-10
圖 38 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 雨型	6-10
圖 39 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 雨型	6-11
圖 40 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 雨型	6-11
圖 41 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 雨型	6-12
圖 42 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距雨型	6-12
圖 43 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量變化比較圖	6-14
圖 44 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-14
圖 45 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-15
圖 46 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-15

圖 47 RCP4.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-16
圖 48 RCP4.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-16
圖 49 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距土石流流量歷線圖	6-17
圖 50 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較 圖	6-18
圖 51 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 雨型	6-19
圖 52 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 雨型	6-19
圖 53 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 雨型	6-20
圖 54 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 雨型	6-20
圖 55 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 雨型	6-21
圖 56 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距雨型	6-21
圖 57 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量變化比較圖.....	6-22
圖 58 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-23

圖 59 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-23
圖 60 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-24
圖 61 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-24
圖 62 RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-25
圖 63 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距土石流流量歷線圖	6-25
圖 64 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較 圖	6-26
圖 65 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 雨型	6-27
圖 66 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 雨型	6-27
圖 67 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 雨型	6-28
圖 68 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 雨型	6-28
圖 69 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 雨型	6-29
圖 70 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距雨型	6-29

圖 71 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流 量變化比較圖	6-30
圖 72 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-31
圖 73 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-31
圖 74 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-32
圖 75 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-32
圖 76 RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距 土石流流量歷線圖	6-33
圖 77 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期 距土石流流量歷線圖	6-33
圖 78 2 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-36
圖 79 5 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-36
圖 80 10 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-37
圖 81 25 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-37
圖 82 50 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-38
圖 83 100 年重現期距不同情境下土流流量變化	6-38
圖 84 土石流影響範圍劃定流程	7-3

第1章 緒論

第一節 研究動機

由於全球氣候變遷影響，造成台灣近年氣候的不確定性有明顯增加的趨勢。人類活動造成全球氣溫升高，導致極端天氣與氣候。氣溫升高使大氣保水力增加，從而增加強降水事件的強度。以 107 年 0823 豪雨為例，即呈現短延時強降雨的災害型態。依據中央氣象局與水利署的雨量站的觀測資料分析結果。延時 1、3、6 小時最大降雨量發生在雲林縣埤梧站，1 小時累積雨量 121.5mm、3 小時累積雨量 285.0mm 及 6 小時累積雨量 384.0mm。延時 12 小時最大降雨量發生在嘉義縣鹿草站，12 小時累積雨量達 623.0mm。延時 24、48、72 小時最大降雨量則發生於台南市曾文站，24 小時累積雨量 848.0mm、48 小時累積雨量 945.0mm 及 72 小時累積雨量 956.0mm (經濟部水利署, 2019)。以往颱風是造成台灣水災或土石流災害的主要原因，然而近年來梅雨、熱帶低氣壓、對流雨等降雨事件，亦經常驅動災害的發生，造成防災應變的困難。

土石流直接威脅山區聚落、公共設施、交通要道的安全，短期間所累積之土砂，甚至會造成中下游之二次災害。土石流的發生必須有三個條件，包含充足的堆積物、豐富的水分，以及足夠的坡地。因此，流量是誘發土石流的發生的重要因子之一。同時，流量也是土石流治理工程設計的關鍵因子。然而，在不同氣候變遷情境下，土石流潛勢溪流的流量在近世紀、世紀中、與世紀末的長期趨勢為何。目前，水土保持工程的設計標準是否可以因應。上述的課題需要以科學化方法進一步評估。

第二節 研究目的

本研究預計將以位於台南市龜丹溪之土石流潛勢溪流(南市DF033)為案例，以臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaption Knowledge Platform, TCCIP)所發布之最新統計降尺度日降雨資料為基礎，計算基期(1986~2005 年)、近未來(2016~2035 年)、世紀中(2046~2065 年)、世紀末(2081~2100 年)之各重現期距雨量。再將各重現期距之雨量輸入龜丹溪集水區之 SOBEK 模式，計算 DF033 土石流潛勢溪流之流量長期趨勢。最後，提出相關的氣候變遷調適策略建議。

第三節 研究架構

本計畫之研究流程如圖 1 所示。

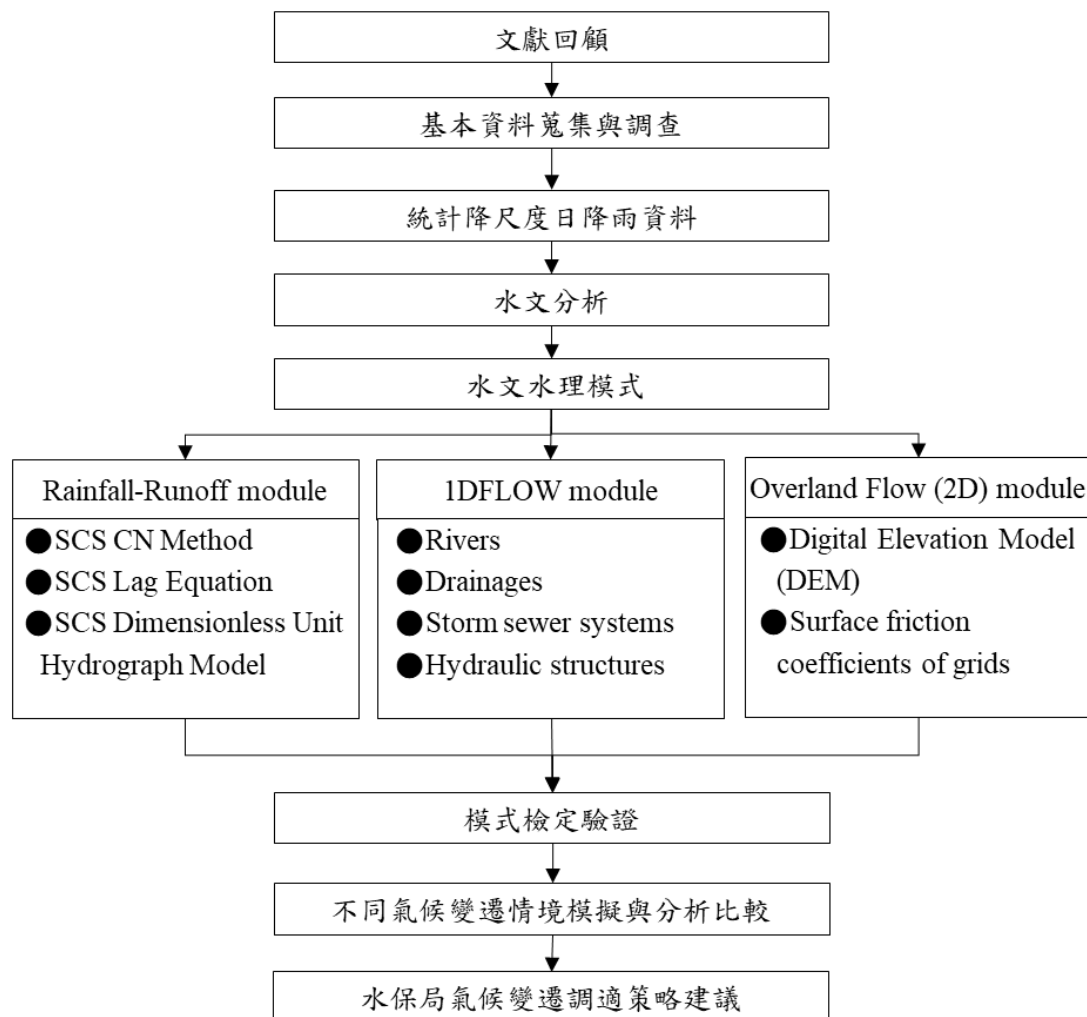


圖 1 計畫流程

第2章 文獻回顧

第一節 全球氣候變遷

上個世紀人類活動造成全球氣溫升高，導致極端天氣與氣候。氣溫升高使大氣保水力(water-holding capacity)每升高 1°C 就增加約 7%，從而增加強降水事件的強度(Min et al., 2011)。越大的大氣水分含量與越大的水分輸送到風暴中，將增加未來可能的最大可降水量(Probable maximum precipitation, PMP) (Kunkel et al., 2013)。在過去的幾十年中，全球水文循環發生了變化，包括降水量、頻率、強度與持續時間(Trenberth et al., 2003)。極端降水導致嚴重乾旱與洪水，對農業、生態系統與人類社會造成破壞性影響。許多研究表明極端降水增加現象，例如歐洲(Klein Tank and Können, 2003)、阿爾卑斯山地區(Frei and Schär, 2001)、西班牙東北部(Beguería et al., 2011)、伊比利亞半島東北部(López-Moreno et al., 2009)、葡萄牙南部(Costa and Soares, 2009)、瑞士(Schmidli and Frei, 2005)、意大利(Brunetti et al., 2004; Brunetti et al., 2000; Brunetti et al., 2001)、英國(Maraun et al., 2008; Osborn and Hulme, 2002; Osborn et al., 2000)、美國(Karl and Knight, 1998; Kunkel et al., 1999)、加拿大(Stone et al., 2000)、中國(Li et al., 2010; Liu et al., 2005; Qian and Lin, 2005; Su et al., 2006)、香港(Lenderink et al., 2011)、台灣(Chu et al., 2014)、韓國(Jung et al., 2011)、澳大利亞(Alexander and Arblaster, 2009)、荷蘭(Lenderink et al., 2011)。

第二節 台灣氣候變遷

台灣位於 western North Pacific–East Asian (WNP–EA)區域，降水主要來自亞洲季風與颱風系統(Chen et al., 2010; Chou et al., 2009)。Yu

et al. (2006)使用 33 個紀錄長達一個世紀(1897-2001)的雨量站數據，研究台灣長期降雨變化。分析結果表明，年降雨量在台灣北部呈增加趨勢，台灣中部與南部呈減少趨勢，東部無明顯趨勢。Shiu et al. (2009)分析台灣 45 年(1961-2005)每小時氣象資料，指出小降水減少($< 4 \text{ mm/h}$)，強降水增加($> 10 \text{ mm/h}$)。對台灣 21 個雨量站的降雨資料(1950-2010)進行了調查，表明降水強度與 5 天總降水量呈增加趨勢。颱風與季風誘發的降水強度在過去 60 年中均有所增加。21 個雨量計的每小時降雨量 (1970-2010) 用於調查降雨頻率、強度與持續時間的變化。小雨頻率呈減少趨勢，大雨的頻率呈增加趨勢。颱風與非颱風降雨極端強度的增加速率，遠大於 Clausius–Clapeyron thermal scaling。近幾十年來，與颱風相關的極端降雨影響台灣的時間更長。因為颱風在台灣附近以較慢的速度移動導致更頻繁、更強烈與更持久的降雨(Chang et al., 2013; Tu and Chou, 2013)。

自 1990 年代後期以來，台灣受到一系列熱帶氣旋的侵襲，降雨量非常大。除了熱帶氣旋數量增加外，自 1960 年開始每小時降雨量觀測以來，總降雨量排名前 12 位的颱風中，有 9 個發生在 21 世紀(Chang et al., 2013)。最極端的例子是 2009 年破紀錄的莫拉克颱風(Chien and Kuo, 2011; Ge et al., 2010; Hendricks et al., 2011; Lee et al., 2011)，它造成了巨大的經濟與生命損失。莫拉克颱風總共造成 681 人死亡與 18 人失蹤。其中，高雄縣甲仙鄉小林村更是慘遭滅村，474 人被活埋，是台灣氣象史上傷亡最嚴重的颱風。農業損失超過新台幣 200 億元。

第三節 國外氣候變遷對於土石流災害衝擊研究

有許多學者指出氣候變遷所導致之降雨型態改變，將會造成土石流發生的機率增加。Winter et al. (2010)評估 2004 年 8 月發生蘇格蘭

的土石流形式的滑坡，對於道路網絡的影響，並針對這類危害進行評估與排序的工作，並制定了管理與緩解策略。作者並指出氣候趨勢與未來的氣候變化，會導致降雨模式的任何變化，都有可能影響土石流的頻率與強度，從而影響此類事件相關管理策略的有效性。Chiarle et al. (2011)討論對加拿大西部科迪勒拉(Cordillera)山脈與歐洲阿爾卑斯山土石流發生的控制。透過土石流案例研究說明，冰凍圈退化如何在短期與長期的冰川及冰緣邊緣的土石流發生中，發揮重要作用。在氣候變暖將導致土石流發展的過程，包括冰川出露引起的岩石墜落與滑坡、高山永久凍土的融化、冰川湖的突然排水，以及由於冰川退縮導致的鬆散、無植被與長年被冰包覆沉積物的暴露。

Huo and Li (2013)在中國陝西省一個典型土石流流域，採用 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)研究氣候變化情景下對河流流量的影響。該模型使用每日流量記錄進行校準與驗證。研究結果顯示在 2020 年與 2030 年的情境中，年溫度升高 $0.6\sim0.9^{\circ}\text{C}$ ，季節性降水變化 $12.6\sim18.9$ 毫米，對應的流量變化約為 $0.62\sim3.67$ 。Turkington et al. (2016)以偏差校正的氣候變化預測預測(bias-corrected climate change projections)預測土石流活動趨勢。該研究採用兩種代用氣候指標：每日降水與對流可用位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)結合兩個阿爾卑斯山地區的特定濕度。對於這兩個地區，未來的氣候預測從沒有變化到在 21 世紀末土石流發生的日子，將每十年增加 6.0% 不等。Li et al. (2018)探討未來氣候變化，對中國四川省西北部岷江上游流域，土石流災害可能產生的影響。該研究採用二元邏輯回歸模型，結合當地地質、地貌、土壤、植被、氣象氣候條件篩選關鍵因素。基於兩種權重分配方法：相對度分析(Relative Degree Analysis)與粗糙集理論(rough set theory)，加權計算得到土石流災害綜合指數。研究結

果顯示研究區未來年降水量(2030-2059)預計將減少，強降雨事件將增加。在未來的氣候變化下，土石流高危區的危險性將更大，研究區被劃為高危險區的面積增加了 5.9%。Hirschberg et al. (2020)將隨機天氣發生器模型與最新的氣候變化預測相結合，為瑞士阿爾卑斯山(Illgraben)的主要土石流系統提供 hillslope-channel sediment cascade model。以每小時的時間解析度量化氣候變化的影響，及其對沉積物產量與土石流數量的不確定性。研究顯示降水與氣溫的預計變化會導致沉積物產量(-48%)與土石流發生(-23%)的減少。這種變化是由山坡的沉積物供應減少引起的，這是由霜凍天氣驅動的。

第四節 國內氣候變遷對於土石流災害衝擊研究

國內有許多學者評估氣候變遷對於坡地災害所造成之影響。相關的研究顯示氣候變遷將會造成坡地災害發生機會增加。范正成 et al. (2013)以高屏溪流域為案例以邏輯斯回歸建置崩塌潛勢評估模式，以評估氣候變遷對於崩塌潛勢之影響。研究顯示 INCM3 氣候模式之對未來之衝擊最大，其中 B1 情境在短期(2010~2039)之分析結果最符合現況。與基期(1961~1990 年)相比，「極高」崩塌發生潛勢之面積將增加 98%。吳亭燁 et al. (2017)以濁水溪流域內 40 條土石流潛勢溪流為案例，評估氣候變遷暖化情境 RCP8.5 情境下土方量之變化。雨量資料採用經動力降尺度與偏差校正後之降雨資料。採用 Hec-HMS 模擬流量，再以 Flo-2D 模擬與分析土石流衝擊及變化。研究結果顯示，21 世紀末之土砂量將增加的 11%。研究指出降雨型態改變將對於對土石流發生有直接影響，除了對於各自上游各子集水有影響外，中下游也會因為數條土石流潛勢溪流匯入大量土砂。李明熹 et al. (2017)利用高屏溪流域 1993-2012 年之雨量及氣溫資料，整合變遷整合評估模式(TaiWAP)與 TCCIP 之 AR5 情境，未來不同氣候變遷情境的年

降雨沖蝕指數等值圖。

第3章 案例研究

由於台南市龜丹溪曾經於卡玫基颱風爆發土石流。並且，經濟部水利署於龜丹溪下後旦溪設有水位觀測站，相關觀測數據可以用於模式檢定與驗證。因此，本研究選擇龜丹溪集水區做為案例研究範圍。

第一節 龜丹溪概況

龜丹溪位於台南市楠西區龜丹里，集水區域面積為 8.42 平方公里(如圖 2 所示)。依據楠西區戶政事務所最新人口統計資料，龜丹里人口約 794 人。集水區內高程介於海拔 250~880 公尺，地勢由東向溪逐漸遞減，河川集水區坡地陡峻，中下游則地勢較為平緩。集水區坡度陡峭，大部分為六級坡。由於河川流向主要係由東向西流。因此，大部分之坡向為西向與西北向。集水區地質為砂岩及頁岩互層。

依據水利署調查報告，龜丹溪紀錄到魚類 4 科 10 種。調查物種均屬為臺灣西部溪流常見之魚種。臺灣特有種魚類有臺灣馬口魚、臺灣石魚賓、粗首鱨、斑帶吻蝦虎、及明潭吻蝦虎及高身小鰾魚。外來魚種則有高身鰾魚、雜交吳郭魚。龜丹溪並無發現任何保育類物種。

龜丹溪的集水區之土地利用以天然林與人工林為主。林地種植以麻竹與刺竹為主，小部份則種植水果。在工商業部分，龜丹溪並無二級製造業產業。三級產業則是因龜丹溫泉發法展的住宿與觀光產業。龜丹溪目前現有一家民宿業者闢建休閒農場。台南市政府已經完成溫泉水集存系統。同時，林務局亦於龜丹溪鋪設龜丹溫泉步道，增加龜丹溪本之遊憩休閒功能。鄰近龜丹溪主要交通動線為臺 3 縣，北接嘉義縣大埔鄉，南通臺南市玉井區，另有南縣道 186 號接通東西向交通。

歷年龜丹溪最大土石流事件為卡玫基颱風，發生時間為 97 年 7

月 16~18 日。最大 24 小時暴雨量達 1014 毫米，造成龜丹溪水量暴增，導致河川暴漲及土石流傾洩而下，造成龜丹溫泉園區之民宿、農場、湯池等遊憩設施被毀。上游有二處崩塌地(如圖 3 所示)。

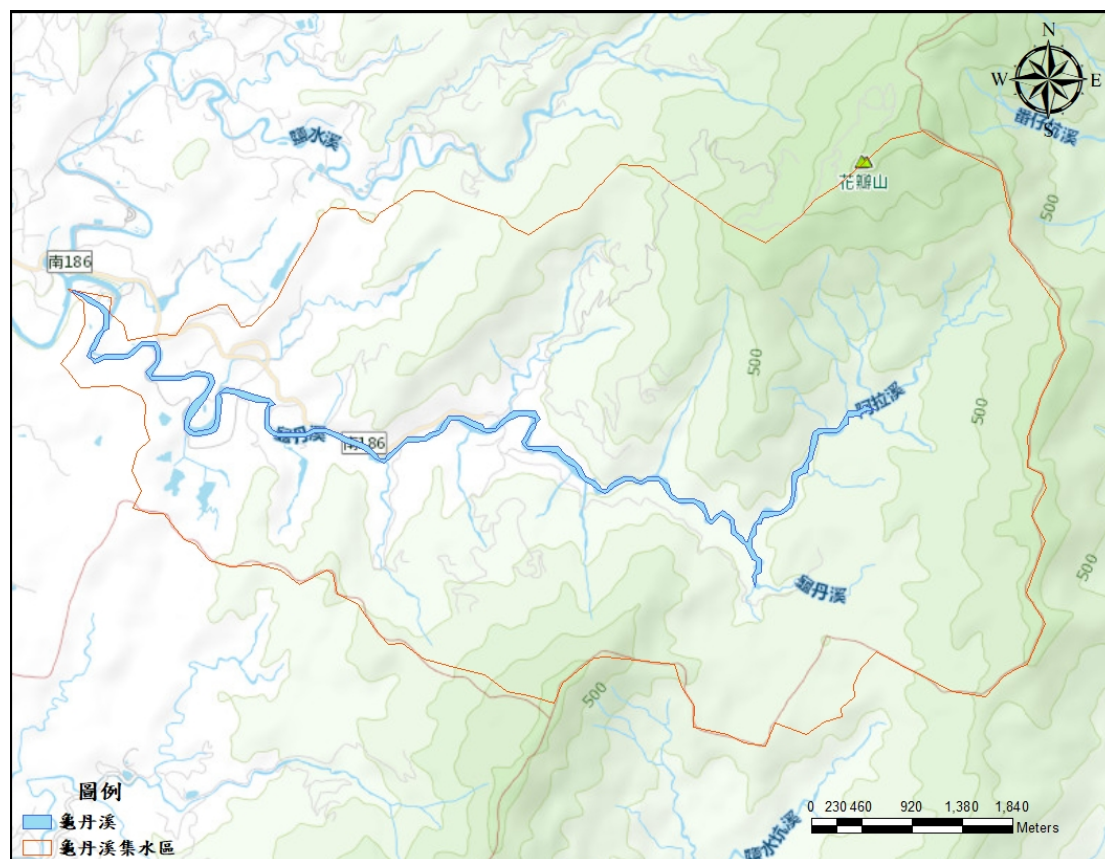


圖 2 龜丹溪集水區域圖



資料來源:土石流防災資訊網

(<https://246.swcb.gov.tw/Achievement/DisastersContent?EventID=15>)

圖 3 卡玫基颱風龜丹溪土石流事件

第二節 土石流潛勢溪流

本研究區之土石流潛勢溪流位於台南市龜丹溪(南市 DF033)，警戒雨量為 450mm，地質為細砂岩、頁岩、粉砂岩與細砂岩互層、細砂岩與粉砂質，如表 1 與圖 4 所示。

表 1 龜丹溪集水區土石流潛勢溪流一覽表

行政區	土石流潛勢溪流編號	重要地標	參考雨量站第一參考/第二參考	警戒值	潛在	地質	地質	子集水區
臺南市楠西區龜丹里	南市 DF033	鐵各山宮	玉井/楠西	450	高	新第三紀沉積岩	細砂岩、頁岩、粉砂岩與細砂岩互層、細砂岩與粉砂質	南投埤

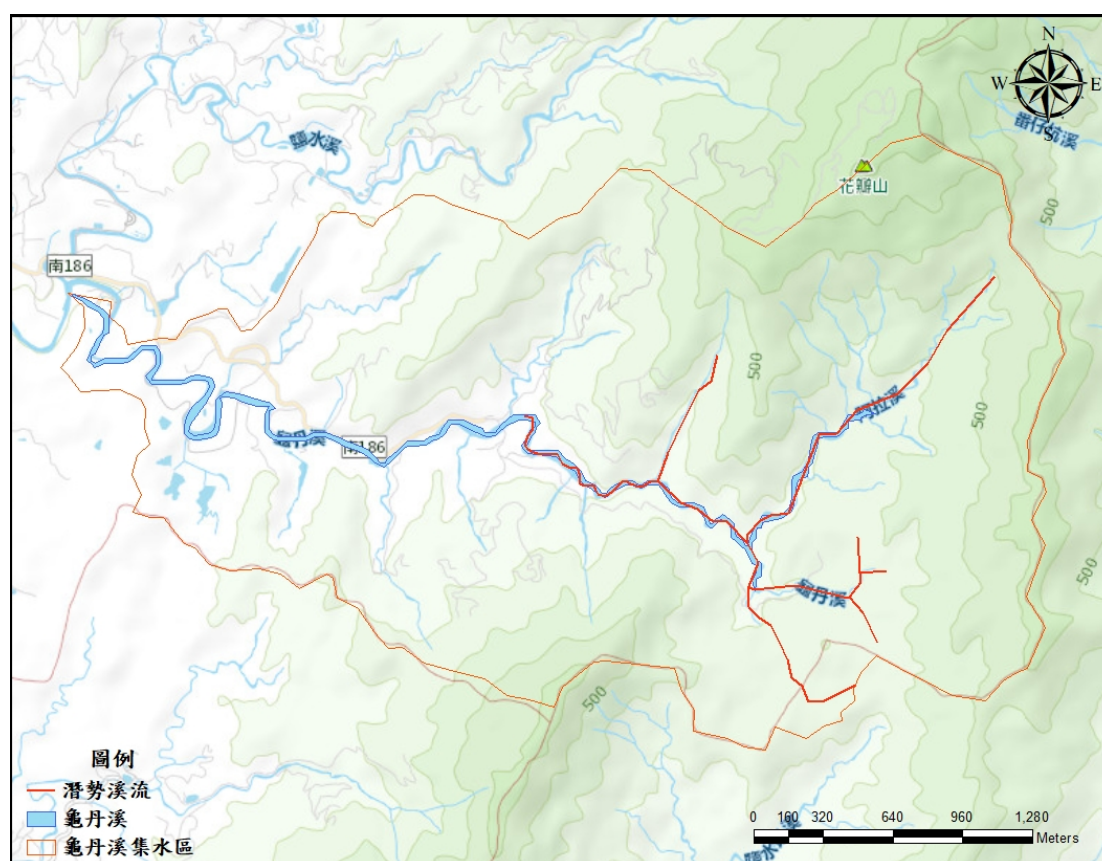


圖 4 土石流潛勢溪流分布圖

第三節 集水區高程

集水區內高程介於海拔 100~850 公尺，地勢由東向西逐漸遞減，河川上游集水區坡地陡峻，中下游則地勢較為平緩，如圖 5 所示。

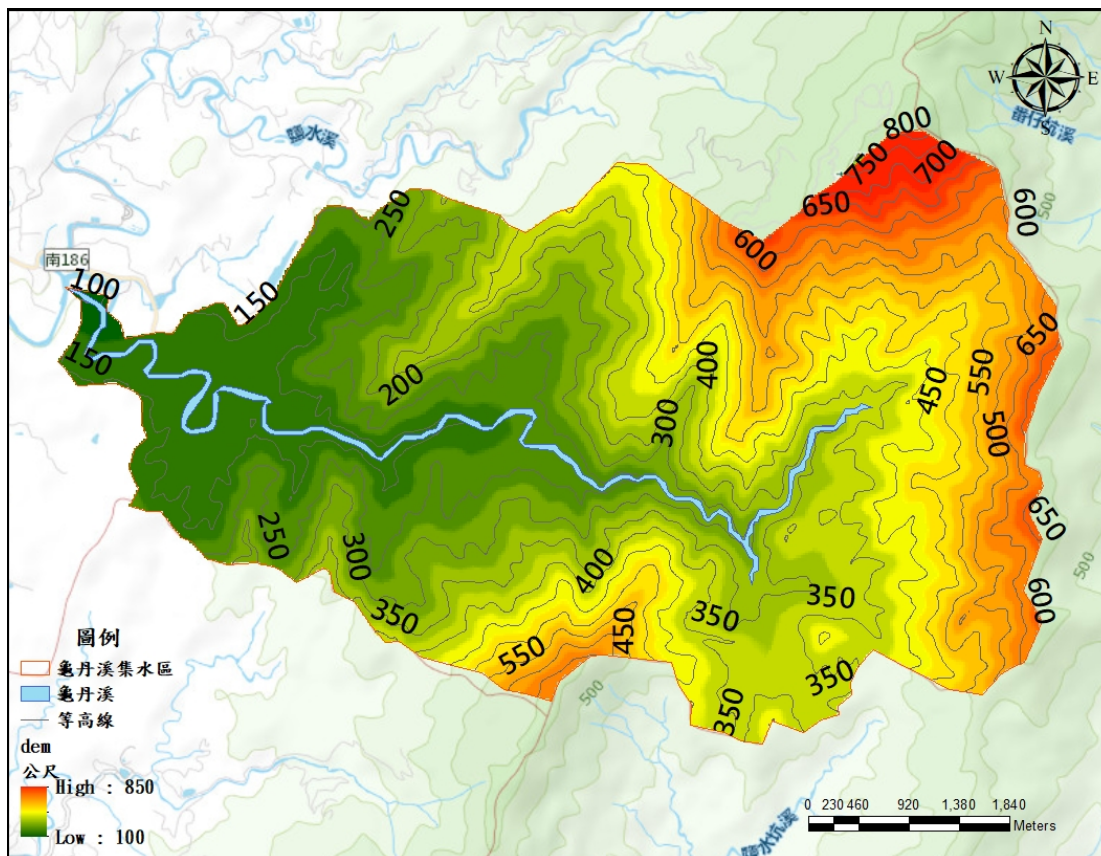


圖 5 龜丹溪集水區等高線圖

第四節 地質與土壤

龜丹溪集水區上游土壤並無調查資料，河川中游主要是由硬砂頁岩黃灰色石質土與砂頁岩石質土組成(如表 2 所示)。崩積土僅少部分位於集水區北側，砂頁岩石質土主要位於集水區中游中央(如圖 6 所示)。下游主要為砂岩頁岩非石灰性新沖積土。

表 2 龜丹溪集水區土壤分布表

土類	面積(ha)	所佔比率(%)
砂頁岩石質土	113.4	13.5%
崩積土	2.0	0.2%
砂岩頁岩非石灰性新沖積土	4.0	0.5%
硬砂頁岩黃灰色石質土	48.0	5.7%
泥岩與砂頁岩混合石質土	11.4	1.4%
無	663.2	78.7%
總計	842.0	100.0%

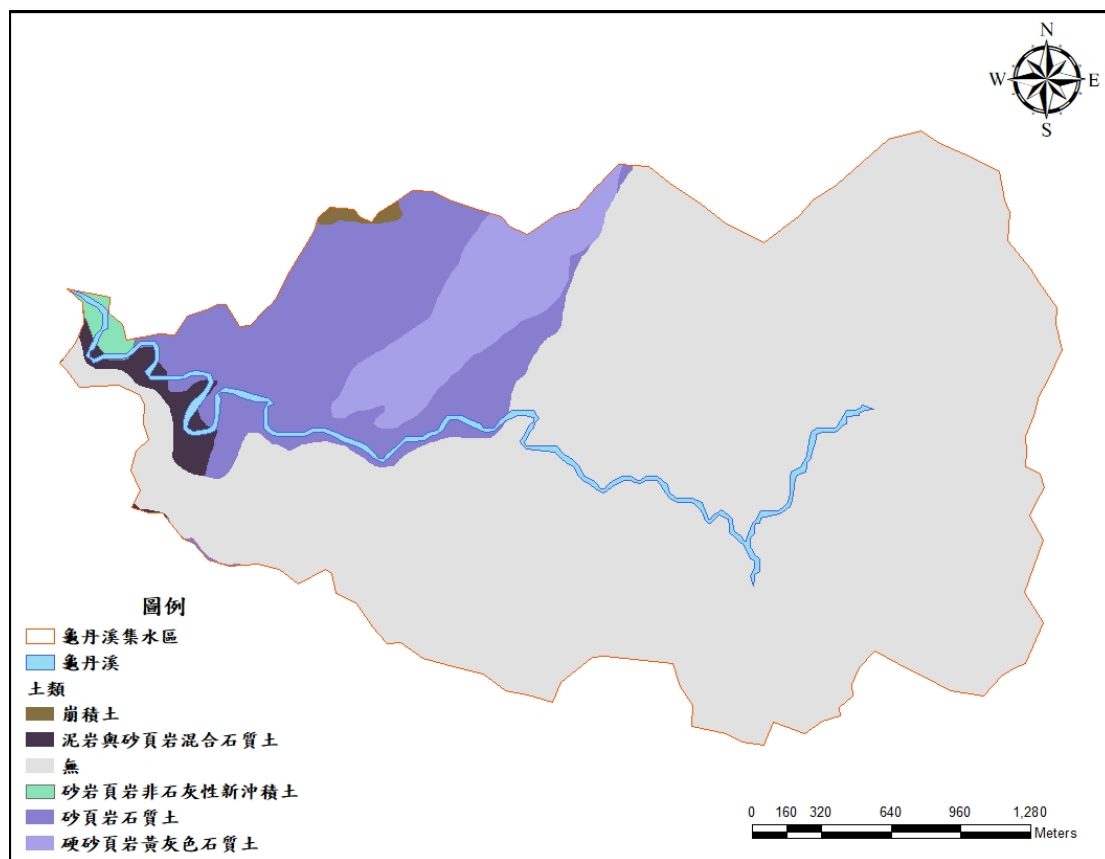


圖 6 龜丹溪集水區土壤分布圖

龜丹溪集水區上游多由茅埔頁岩、隘寮腳層及鹽水坑頁岩組成。其中茅埔頁岩為多夾 3~5cm 之細粒砂岩和泥質頁岩之薄層，膠結性不佳；隘寮腳層為條帶狀薄葉互層，僅於下部出現很多灰色細粒，為層厚約 1~2m 之砂岩層；鹽水坑頁岩則具有強烈之生物擾動現象，偶夾有砂岩或粉砂岩之凸鏡體，且因缺乏層理致風化後呈似泥岩狀。

中、下游則多為糖恩山砂岩及竹頭崎層，且擁有少部分沖積層。糖恩山砂岩當其砂岩內含石灰質量高時，岩體顯得膠結良好，堅硬緻密，呈厚層塊狀，抗侵蝕能力強；竹頭崎層含有三到五層呈透鏡狀的砂岩厚層，層面常不清晰而漸移化為頁岩或泥岩；最後則為地勢較為低平之沖積層，主要為由河流搬運礫石、砂及泥土至平原或較緩河床上之未固結沉積物。範圍內有兩條斷層經過，分別為竹頭崎斷層及龜丹溪斷層，其中龜丹溫泉之地下熱水通道可能與竹頭崎斷層與龜丹溪斷層相關。(如圖 7 所示)。

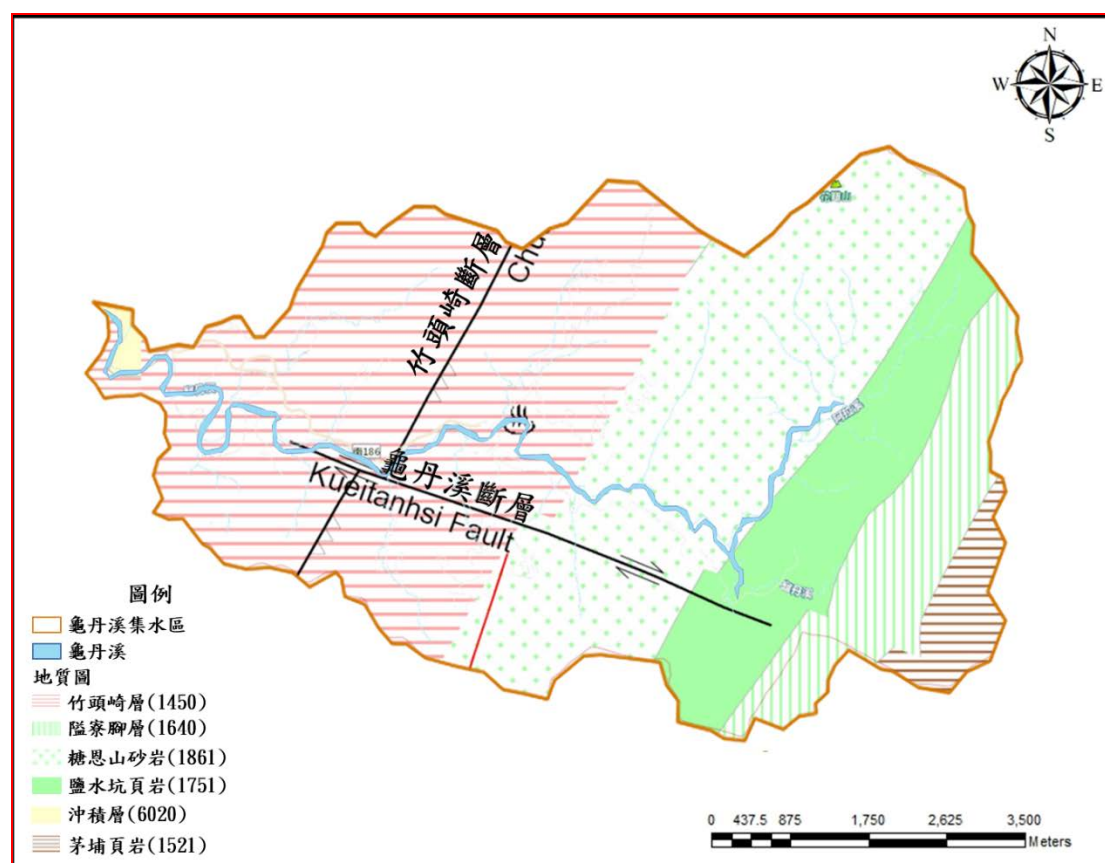


圖 7 龜丹溪集水區地質分佈圖

第五節 坡度與坡向

集水區上游坡度較陡峭，大部分為三、四級坡(如表 3 與圖 8)。中上游坡度陡峭，主要為四~六級坡。中游坡度較平緩，為一~三級坡。

下游坡度平緩，多為一、二級坡。集水區坡向如表 4 與圖 9 所示。由於河川流向主要係由東向西流。因此，大部分之坡向為西向與西北向。

表 3 龜丹溪集水區坡度分布表

分級	面積(ha)	所佔比率
一級坡	28.2	3.4%
二級坡	88.8	10.5%
三級坡	359.2	42.7%
四級坡	275.9	32.8%
五級坡	89.7	10.7%
六級坡	0.3	0.0%
總計	842	100.0%

坡度：指一筆土地之平均傾斜比，以百分比表示之，其分級如下：

- (一) 一級坡：坡度百分之五以下。
- (二) 二級坡：坡度超過百分之五至百分之十五以下。
- (三) 三級坡：坡度超過百分之十五至百分之三十以下。
- (四) 四級坡：坡度超過百分之三十至百分之四十以下。
- (五) 五級坡：坡度超過百分之四十至百分之五十五以下。
- (六) 六級坡：坡度超過百分之五十五。

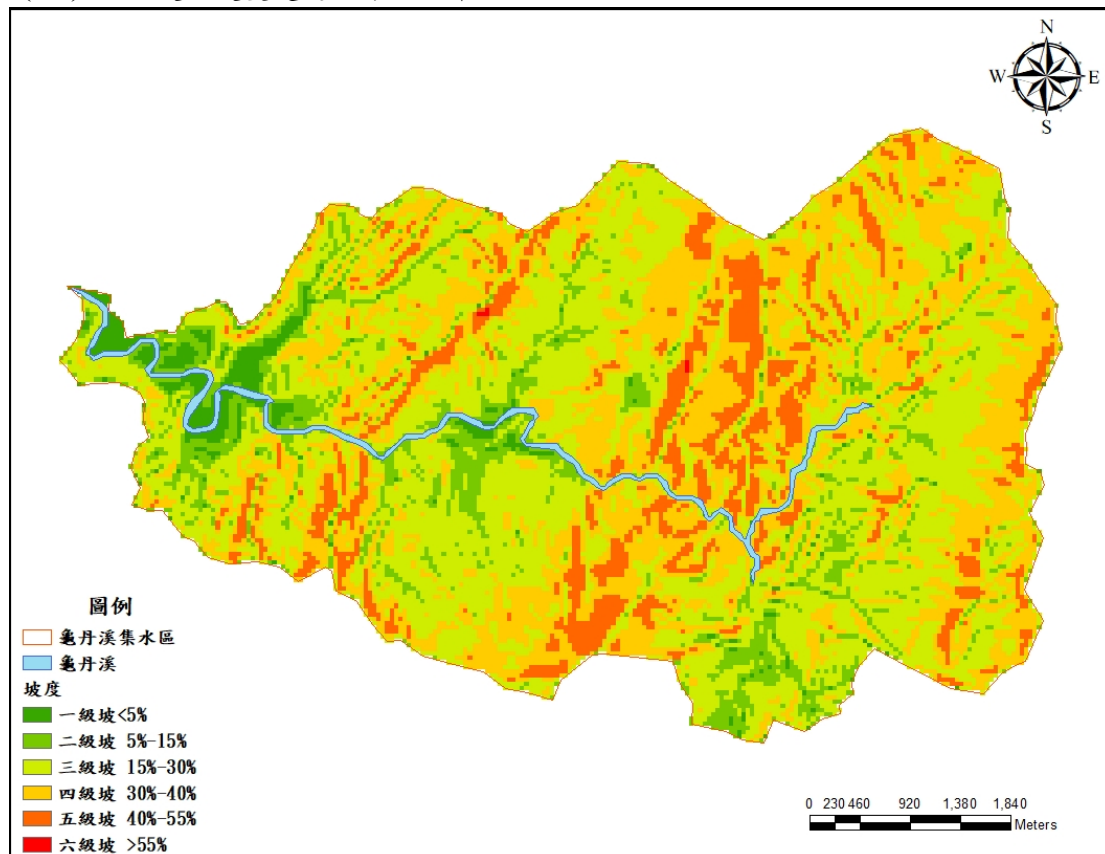


圖 8 龜丹溪集水區坡度圖

表 4 龜丹溪集水區坡向分布表

坡向	面積(ha)	所佔比率(%)
北向	60.7	7.2%
東北向	96.6	11.5%
東向	105.6	12.5%
東南向	95.3	11.3%
南向	109.1	13.0%
西南向	100.1	11.9%
西向	112.5	13.4%
西北向	162.1	19.3%
總計	842	100.0%

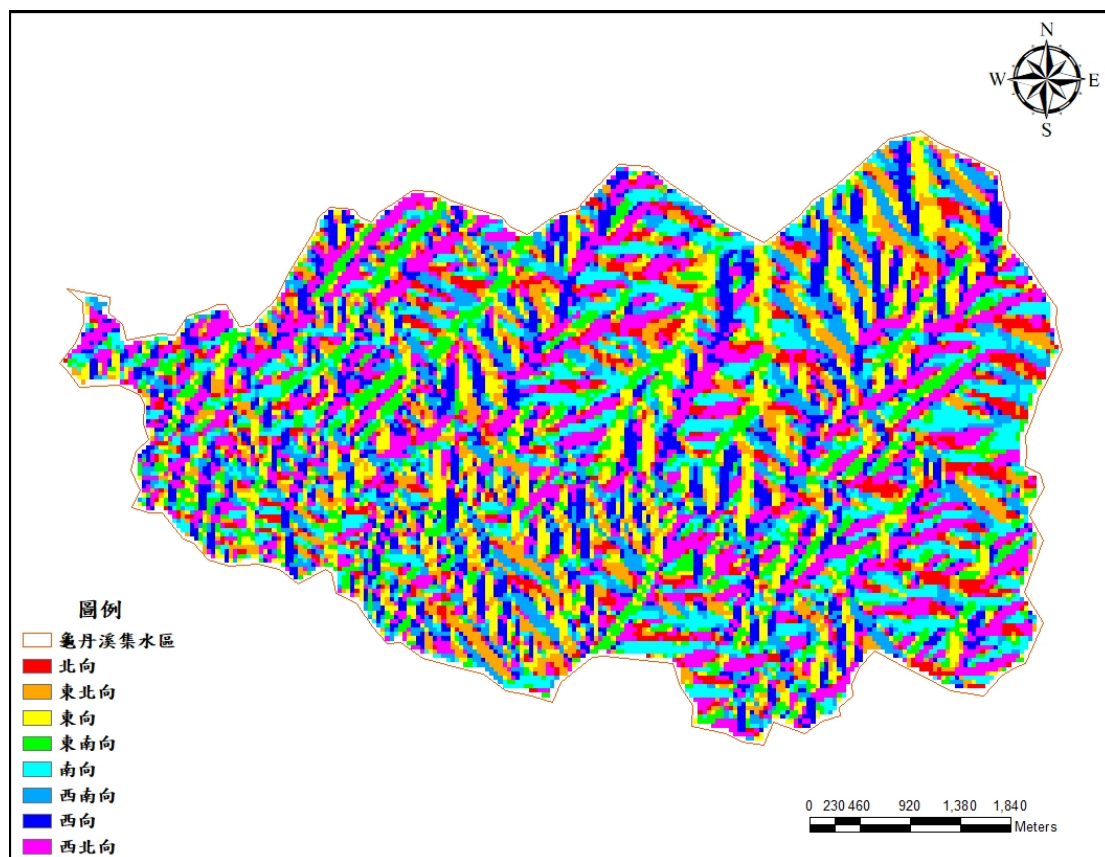


圖 9 龜丹溪集水區坡向圖

第六節 土地利用

集水區上游得土地利用主要為針葉林與闊葉林，中游部分則以農

作為主，交雜闊葉林。龜丹溪下游也以農作為主，僅少部分為住宅使用，如表 5 與圖 10 所示。

表 5 龜丹溪集水區土地利用表

土地使用	面積(ha)	所占比率(%)
農業使用土地	101.1	12.00%
森林使用土地	711.8	84.50%
交通使用土地	3.8	0.50%
水利使用土地	9.2	1.10%
建築使用土地	2.7	0.30%
公共設施使用土地	0	0.00%
其他使用土地	13.4	1.60%
總計	842	100.00%

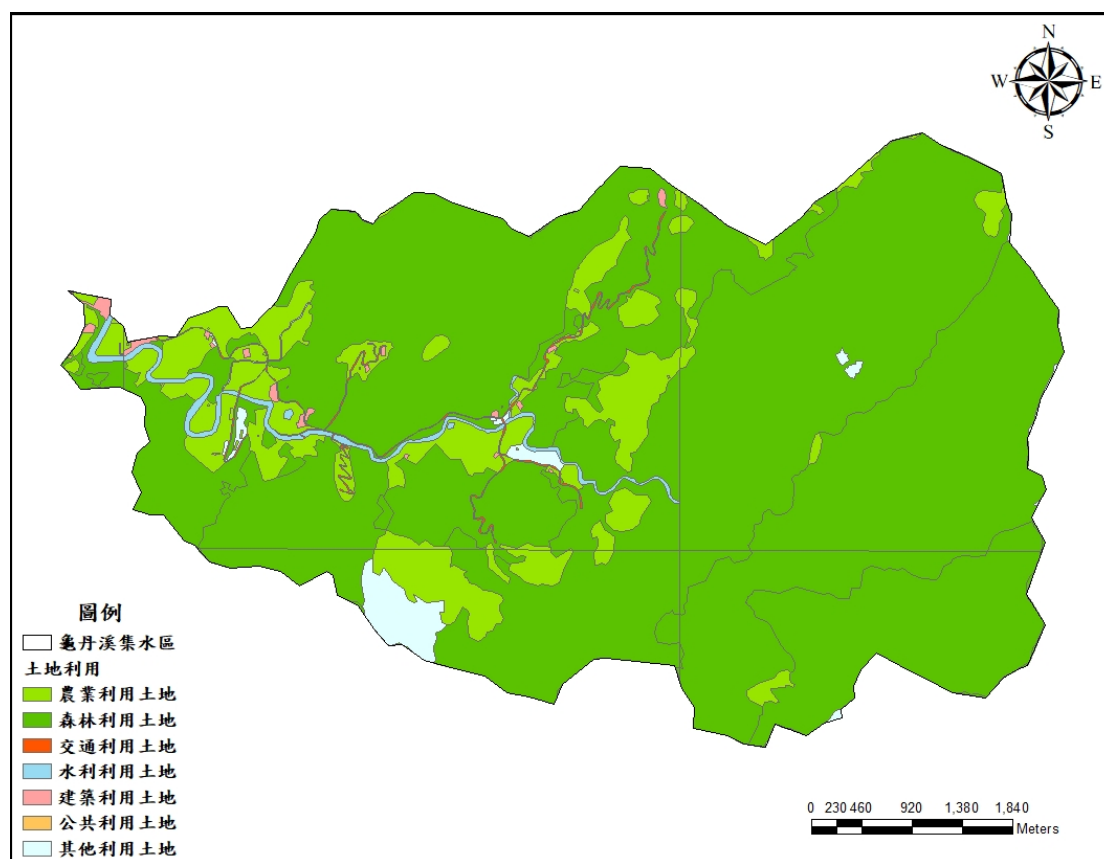


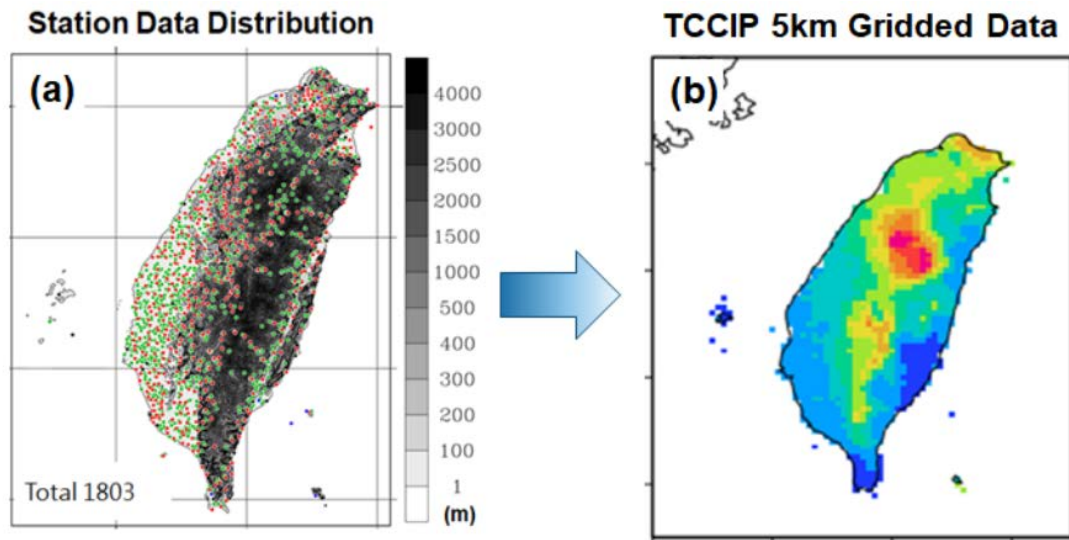
圖 10 龜丹溪集水區土地利用圖

第4章 氣候變遷情境

為了推估台灣地區受到氣候變遷影響之資訊，須採用全球氣候模式的模擬資料。但對台灣而言，全球氣候模式的空間解析度太低，因此無法直接使用，必須透過降尺度方法，以提高資訊解析度。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaption Knowledge Platform, TCCIP)發布之AR5(fifth Assessment Report)統計降尺度日資料。該方法以統計降尺度方法，以歷史觀測資料為基礎，結合模式同一時期之歷史模擬資料，以建立兩者之統計關係。最後，將此統計關係應用於未來情境之推估。本計畫將運用模式推估之日雨量資料，計算基期(1986~2005年)、近未來(2016~2035年)、世紀中(2046~2065年)、世紀末(2081~2100年)之各重現期距雨量。

第一節 參考觀測資料

本計畫採用使用 TCCIP 所產製之 5 公里×5 公里網格之觀測日資料(翁叔平、楊承道, 2018)，此觀測資料只有陸地資料，海洋上除有測站之離島外並無資料。觀測資料包含降雨、均溫、最高溫、最低溫。時間長度 1961~2005。空間範圍包含台灣本島及澎湖列島。



資料來源: TCCIP, 2019

圖 11 觀測降水網格資料產製示意圖。(a)為雨量測站分布(b)為空間解析度 5km 之網格資料)

第二節 模式資料

本資料所採用 GCM 模式，資料來源為地球系統網格聯盟(Earth System Grid Federation, ESGF) 之 CMIP5(Couple Model Intercomparison Projects Phase-5)資料庫(Stocker et al. 2013)，如表 6 所示。為與觀測網格資料之期距一致，歷史基期模擬採用相同期距 1961-2005，未來情境推估包含 4 組暖化情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)，使用 2006-2100 之日資料進行降尺度。

表 6 GCM 模式

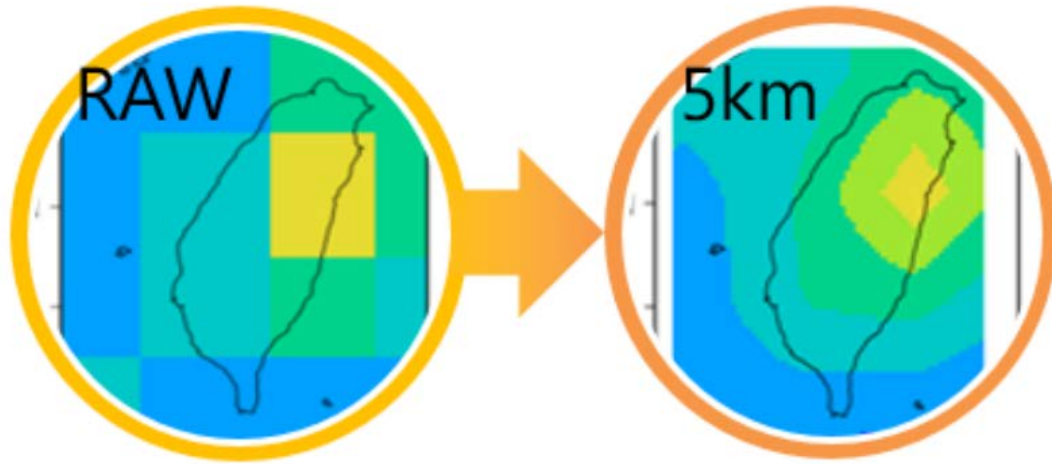
模式名稱	產製單位	run	RES.	Historical	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	r1i1p1	192x145	✓		✓		✓
ACCESS1-3		r1i1p1	192x145	✓		✓		✓
bcc-csm1-1	BCC	r1i1p1	128x64	✓	✓	✓	✓	✓
bcc-csm1-1m		r1i1p1	320x160	✓	✓	✓	✓	✓
BNU-ESM	BNU	r1i1p1	128x64	✓	✓	✓		✓
CanESM2	CCCMA	r1i1p1	128x64	✓	✓	✓		✓
CCSM4	NCAR	r1i1p1	288x192	✓	✓	✓	✓	✓
CESM1-BGC		r1i1p1	288x192	✓		✓		✓
CESM1-CAM5	CMCC	r1i1p1	288x192	✓	✓	✓	✓	✓
CMCC-CESM		r1i1p1	96x48	✓				✓
CMCC-CM		r1i1p1	480x240	✓		✓		✓
CMCC-CMS		r1i1p1	192x96	✓		✓		
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	r1i1p1	256x128	✓	✓	✓		✓
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	r1i1p1	192x96	✓	✓	✓	✓	✓
EC-EARTH	ICHEC	r1i1p1	320x160	✓				✓
FGOALS-g2	LASG-CES	r1i1p1	128x60	✓	✓	✓		✓
GFDL-CM3	NOAA-GFDL	r1i1p1	144x90	✓	✓		✓	✓
GFDL-ESM2G		r1i1p1	144x90	✓	✓	✓	✓	✓
GFDL-ESM2M		r1i1p1	144x90	✓		✓	✓	✓
HadGEM2-AO	MOHC	r1i1p1	192x145	✓	✓	✓	✓	✓
HadGEM2-CC		r1i1p1	192x145	✓		✓		✓
HadGEM2_ES		r1i1p1	192x145	✓	✓	✓	✓	✓
inmcm4	INM	r1i1p1	180x120	✓		✓		✓
IPSL-CM5A-LR	IPSL	r1i1p1	96x96	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM5A-MR		r1i1p1	144x143	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM5B-LR		r1i1p1	96x96	✓		✓		✓
MIROC5	MIROC	r1i1p1	256x128	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC-ESM		r1i1p1	128x64	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC-ESM-CHEM		r1i1p1	128x64	✓	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM-LR	MPI-M	r1i1p1	192x96	✓	✓	✓		✓
MPI-ESM-MR		r1i1p1	192x96	✓	✓	✓		✓
MRI-CGCM3	MRI	r1i1p1	320x160	✓	✓	✓	✓	✓
MRI-ESM1		r1i1p1	320x160	✓				✓
NorESM1-M	NCC	r1i1p1	144x96	✓	✓	✓	✓	✓
Total				34	22	30	17	33

資料來源: TCCIP, 2019

第三節 產製流程

一、步驟一

空間內插(Spacal Interpolate)：將 GCM 模式資料以利用線性內插(Bilinear interpolation)方法，日資料原始解析度提高 5 公里之空間解析度(如圖 7)。

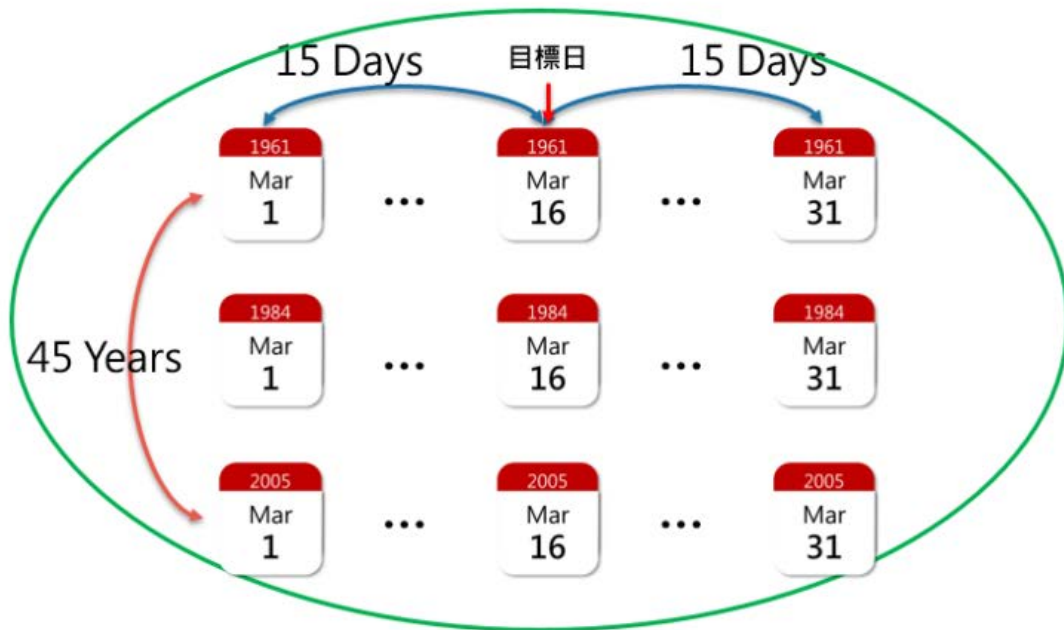


資料來源: TCCIP, 2019

圖 12 GCM 模式資料內插示意圖

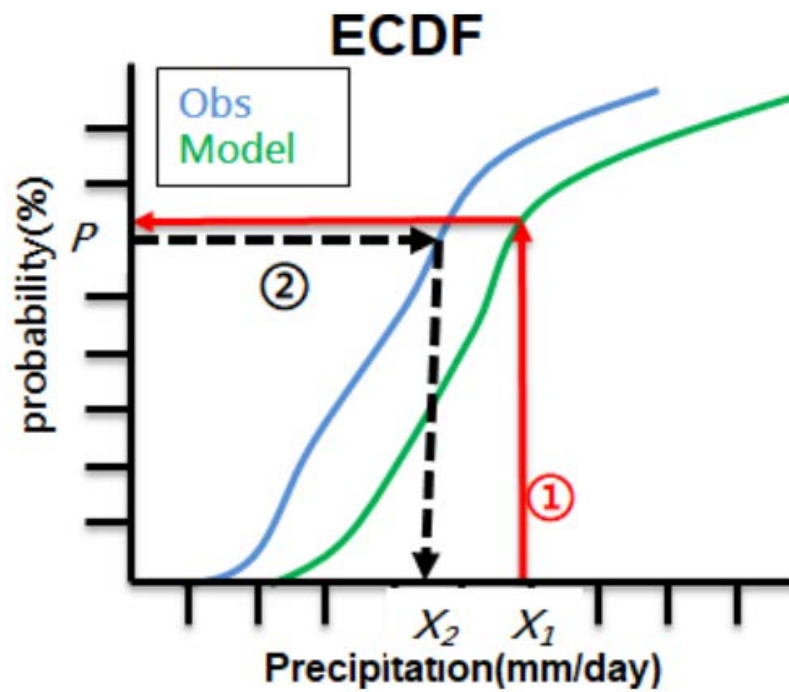
二、步驟二

偏差修正(BC, bias correction)：為保留日資料之極端值訊號，逐日將觀測與模式資料，每一年採樣包含目標日的前後各 15 天，合計 31 日曆天，全部 45 年，共可以取得 1395 天作為樣本(如圖 12 所示)。再以經驗累積機率(empirical cumulative density functions, ECDF)函數分布，以呈現兩組資料之統計特性。使模式模擬降雨與觀測降雨統計分布特性相吻合，將模式之 ECDF 調整與觀測相同，以修正模式資料之偏差值(Gobiet et al., 2015; Maurer, 2007; Wood et al., 2004; Wood et al., 2002)，如圖 14 所示。



資料來源: TCCIP, 2019

圖 13 日資料取樣示意圖



資料來源: TCCIP, 2019

圖 14 修正模式資料之 ECDF 至觀測之 ECDF

第四節 大氣環流模型擇定

表 7 列出 34 種大氣環流模型(GCM)，然而，在評估氣候風險與建設適應能力時，並不需要使用所有 GCM 數據集。(Lin and Tung, 2017)提出一個合理選擇 GCM 數據集的程序，包括氣候分區、適用性排序與模型相似性檢查。主成分分析(Principal component analysis, PCA)與聚類分析(cluster analysis)將區域氣象站劃分為不同氣候帶。然後使用加權平均排名(weighted average ranking, WAR)方法與缺陷點系統(demerit point system, DPS)，將 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)數據集之 GCM 性能進行排名。該研究以台灣作為研究區域，依據 25 個氣象站接收月平均降水數據，將氣象站分為 10 個氣候帶，每個氣候帶建議使用不同的 GCM 數據集(如表 7 所示)。本研究區屬於 South mountain 氣候區，排名第一的 GCM 為 HadGEM2-AO，本研究將採用此 GCM 進行後續研究。

表 7 台灣各氣候帶建議之前五名最適合之 GCM

Rank Name	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Rank 5
North	HadGEM2-AO	NorESM1-ME	CSIRO-Mk3-6-0	CCSM4	bcc-csm1.1m
Northeast	MRI-CGCM3	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO	NorESM1-ME
East	CESM1-CAM5	GISS-E2-R	CCSM4	bcc-csm1.1	CSIRO-Mk3-6-0
Southwest	HadGEM2-AO	MIROC5	bcc-csm1.1m	CCSM4	CESM1-CAM5
South	MIROC5	GISS-E2-R	CCSM4	CSIRO-Mk3-6-0	HadGEM2-AO
North mountain	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME	HadGEM2-AO	MRI-CGCM3
Central	MIROC5	CCSM4	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MRI-CGCM3
South mountain	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MIROC5	MRI-CGCM3	CCSM4
West island	HadGEM2-AO	MIROC5	CESM1-CAM5	bcc-csm1.1m	CCSM4
East island	GISS-E2-R	CSIRO-Mk3-6-0	CESM1-CAM5	CCSM4	bcc-csm1.1m
Taiwan	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4	MIROC5	GISS-E2-R

資料來源: Lin and Tung (2017)

第五節 統計降尺度

本次氣候變遷雨量資料為氣候變遷研究相關數值實驗之全球氣候模式推估模擬結果，再透過統計降尺度方法建立之全臺五公里解析度網格化資料，網格邊界為資料所提供之經緯度圍網格中心點，以5公里*5公里($0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$)之範圍內皆為相同之變數數值，本次研究區位於四格網格中心(如圖 15)。

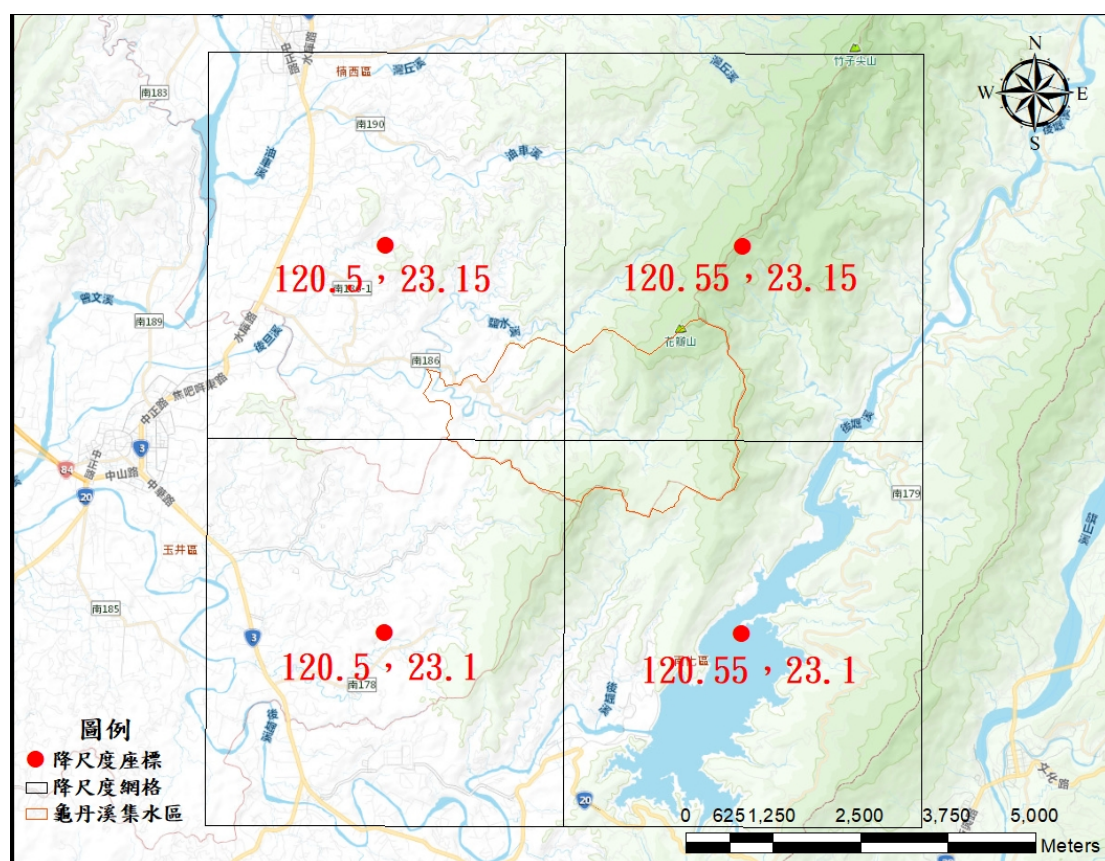


圖 15 研究區統計降尺度示意圖

第5章 水文水理模式

為評估研究區於基期(1986~2005 年)、近未來(2016~2035 年)、世紀中(2046~2065 年)、世紀末(2081~2100 年)之各重現期距流量，需建立水文水理模式。

第一節 雨量站

選擇龜丹溪鄰近地區紀錄期間較長且完整之雨量站。一般選擇 25 年以上之觀測資料做為水文分析，以合理分析各重現期降雨量。龜丹溪集水區鄰近雨量站主要四站，詳如表 8 與圖 16。

表 8 龜丹溪鄰近集水區雨量站

站名	站號	TWD97 坐標		管理機關
		橫坐標 E	縱坐標 N	
玉井	C00930	193924.45	2558540.45	中央氣象局
楠西	C10921	195589.61	2564972.36	中央氣象局
大竹坑	O1N1A	205849.4	2560250	經濟部水利署第六河川局
關山	C10880	207595.7	2563755.53	中央氣象局

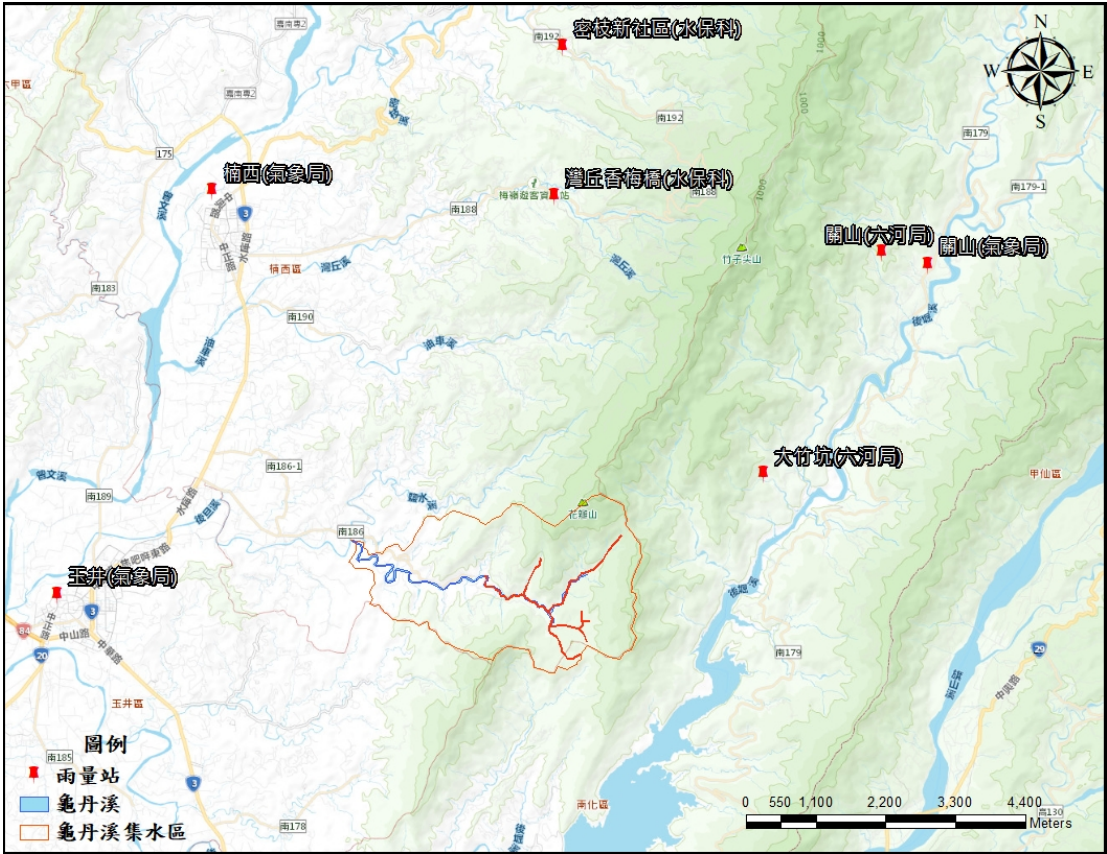


圖 16 龜丹溪鄰近雨量站

第二節 水位站

龜丹溪下游後旦溪，設有水位站 1 站，管理單位為經濟部水利署，詳如表 9 與圖 17。

表 9 龜丹溪集水區鄰近水位站

站名	站號	TWD97 坐標		管理機關
		橫坐標 E	縱坐標 N	
竹圍橋	1630H036	196497.3	2559324.7	經濟部水利署第六河川局

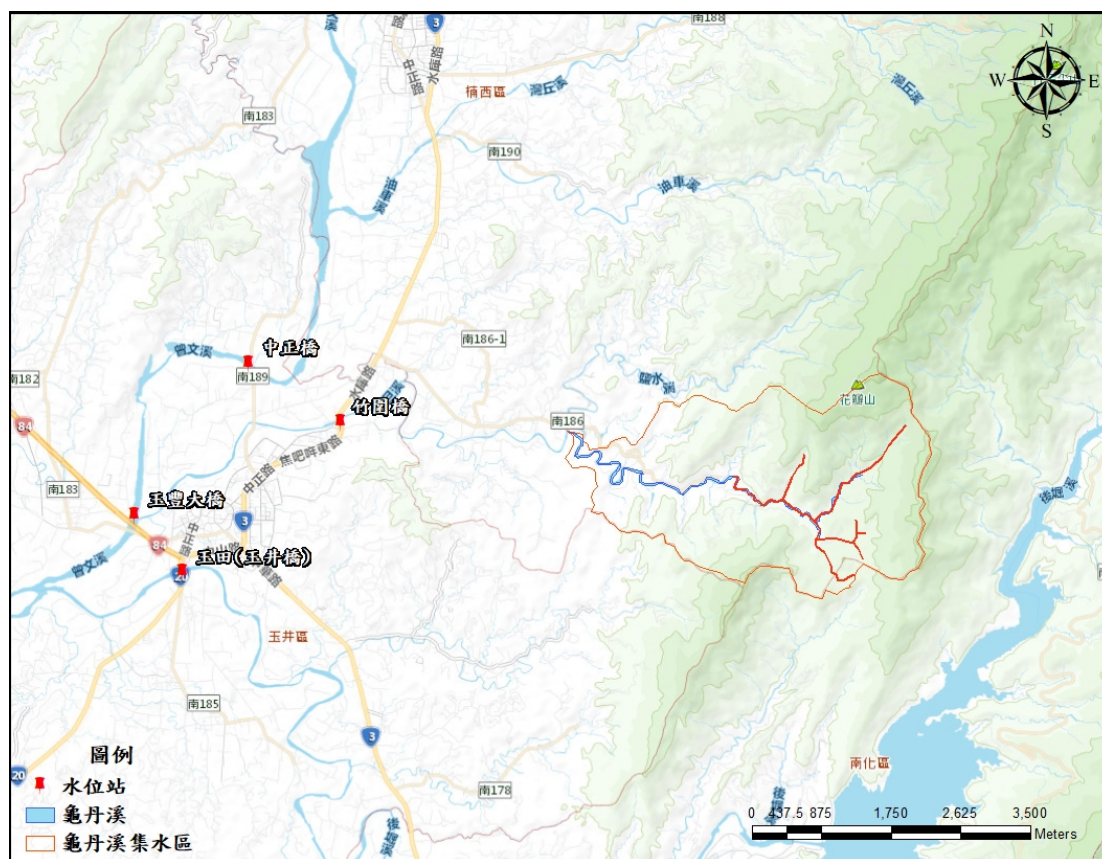


圖 17 龜丹溪鄰近水位站

第三節 子集水區劃定

子集水區劃分應基於水路特性、匯流位置、測站位置、控制點位置等原則，以水系分布與流向及地形地貌進行劃設。本計畫將之依據上述原則，劃設計畫區內之子集水區，並選定適當流量控制點，進行水文分析。為了更完整且精準模擬龜丹溪流量，並更準確計算出龜丹溪出口流量，本次計畫將模式模擬範圍擴大，以後旦溪流域為模型建構範圍。根據流域分析方式得出後旦溪流域之子集水區，根據分析結果後旦溪流域共可分為 23 個子集水區(如圖 18)，利用資料較為精確之子集水區資料，使模型模擬之結果能夠更加還原於真實狀態。

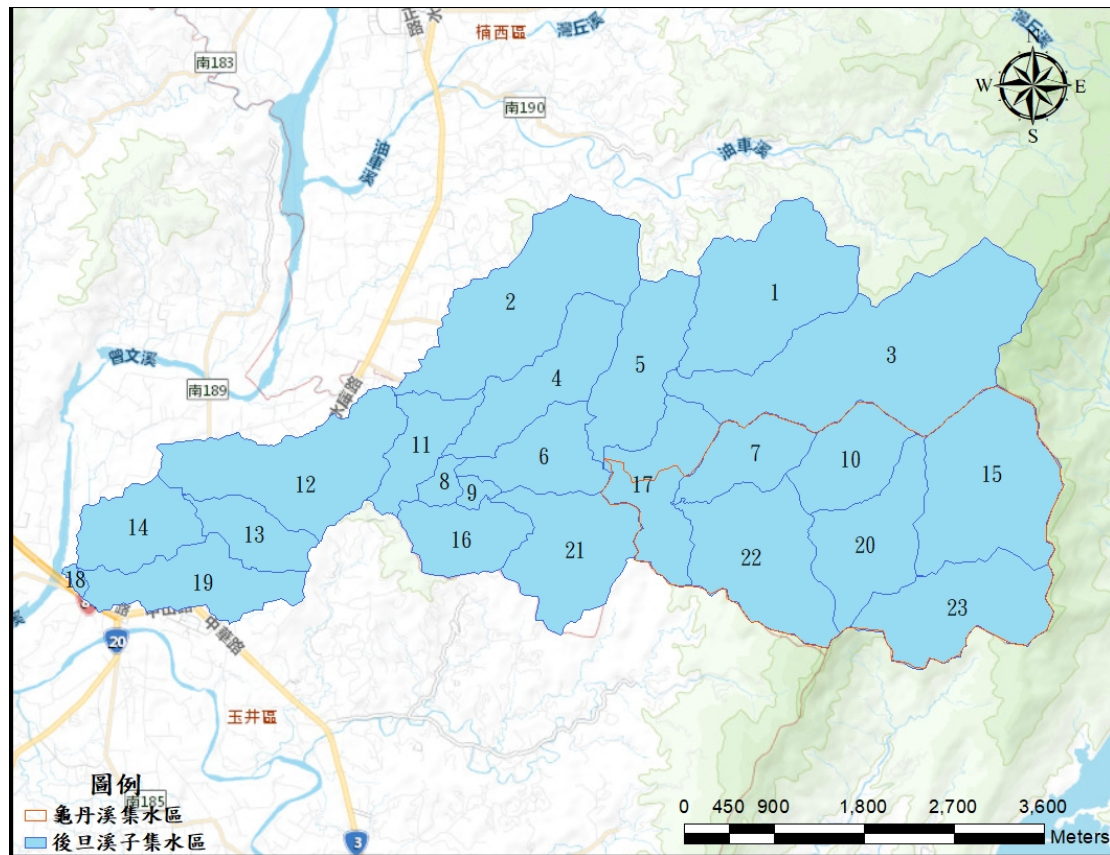


圖 18 子集水區範圍圖

第四節 雨量頻率分析

為計算個重現期之降雨量，本計畫將採用二參數對數常態(Two Parameter Log-Normal Distribution, LN2)、三參數對數常態(Three Parameter Log-Normal Distribution, LN3)、皮爾遜第三型分布(Pearson Type III Distribution, PT3)、對數皮爾遜第三型分布(Log-Pearson Type III Distribution, LP3) 及極端值 I 型(Extreme Type I Distribution, EV1)進等五種機率分布進行分析。

一、二參數對數常態

$$f(y) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-[\ln x - \mu_y]^2}{2\sigma_y^2}} \quad (1)$$

二、三參數對數常態

$$f(y) = \frac{1}{(x-a)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x-a)-\mu_y]^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2)$$

三、皮爾遜第三型分布

$$f(x) = \frac{1}{\theta\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)} \quad (3)$$

四、對數皮爾遜第三型分布

$$f(x) = \frac{1}{\theta_y x \Gamma(\beta_y)} \left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y}\right)^{\beta_y-1} e^{-\left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y}\right)} \quad (4)$$

五、極端值 I 型

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} - e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (5)$$

並採用卡方檢定(chi-square test)與 K-S 檢定法進行適合度檢定分析，以確定雨量頻率分析所此用之分布是否合適。若有多種頻率分析均通過適合度檢定，則進一步計算平方差(SE)及平方差和(SSE)，以選擇誤差值最小之頻率分析，作為最佳頻率分布。

一、卡方檢定

$$X^2 = \sum_i^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (6)$$

式中，

k : 資料分組數；

O_i : 實際觀測數量；

E_i : 期望發生數量。

計算結果後，查卡方分布表，若結果在 5%顯著水準下，則通過卡方檢定。

二、KS 檢定

KS 檢定係計算樣本分佈累積機率及理論分佈累積機率之最大差距，可以下式表示

$$D_{max} = \max |F_o(x) - F_g(x)| \quad (7)$$

D_{max} ：樣本分佈累積機率與理論分佈累積機率之最大差距

$F_o(x)$ ：理論分佈累積機率

$F_g(x)$ ：樣本分佈累積機率

x ：觀測值。

經查 KS 分佈表，如果結果在 5%顯著水準下，則通過 KS 檢定。

三、平方差和(SSE)及平方差(SE)

卡方檢定與 KS 檢定係用於排除不合適之頻率分布假設，並無法提供精確之標準，以選擇最佳之頻率分布。為了進一步確認最佳之頻率分布，可再以 SSE 及 SE 計算決定之。利用威伯法(Weibull)計算求得 SSE 及 SE 後，其值最小者為最適分布。

$$(SSE) = \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \quad (8)$$

$$(SE) = \sqrt{\frac{SSE}{(n-m)}} \quad (9)$$

X_i ：由大至小排序之觀測值

$\hat{X}_i$ ：理論累積機率對應推估值

m ：推估參數個數。

本次雨量頻率分析資料以基期(1986~2005 年)雨量為分析資料，根據結果可得知，五種機率分布結果皆通過卡方檢定及 KS 檢定，因此採用標準誤差值最低之機率分布作為本次研究使用，根據下表資料

可得知皮爾遜第三型分布之標準誤差值為五種分布中最小值，因此本研究採用皮爾遜第三型分布進行各重現期之雨量計算(表 10)。

表 10 水文分析表

分布種類 檢定方式	LN2	LN3	PT3	LPT3	EV1
卡方檢定	通過	通過	通過	通過	通過
KS 檢定	通過	通過	通過	通過	通過
標準誤差值	23.8	22.4	21.8	21.9	23.6

第五節 雨型設計

雨型分析係為建立設計降雨之總降雨深度與時間之關係，雨型分析之目的在於能設計代表該集水區降雨之延時分佈特性，以利計算出設計洪峰流量。目前在台灣，一般採用交替區塊法(Horner 公式)設計與型。

$$I = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (10)$$

式中

I ：降雨延時 t 小時內之平均降雨強度(公厘/小時)

t ：降雨延時(分)

a 、 b 、 c ：迴歸係數。

其中 a 、 b 、 c 將採用 106 年經濟部水利署發布之「台灣地區雨量測站降雨強度-延時 Horner 公式參數分析」(經濟部水利署, 2016)玉井站之 Horner 降雨強度公式之參數 a 、 b 、 c (如表 11)。

表 11 雨型設計參數表

重現期距(年)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
2	1061.807	17.597	0.624
5	999.848	18.867	0.554
10	828.426	11.049	0.490
25	634.817	0.310	0.409
50	707.491	0.000	0.397
100	821.215	0.000	0.392

第六節 降雨-逕流模式

降雨-逕流模式主要計算各子集水區內之逕流量。本計畫將採用美國水土保持局曲線值法(簡稱 SCS-CN)。此經驗公式包含降雨損失、集流時間及單位歷線。降雨損失採用 SCS Curve Number 之計算公式如下：

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (11)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (12)$$

其中

P_e : 累積有效降雨量 (mm)

P : 累積降雨量(mm)

S : 集水區最大蓄水量 (mm)

CN : curve number，本計畫參考 109 年經濟部水利署「出流管制技術手冊」(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2020)之國土利用類別與 CN 曲線值對照表(如表 13~表 17 所示)。

稽延時間(Lag time)採用 SCS Lag Equation:

$$T_{lag} = L^{0.8} \frac{(S + 25.4)^{0.7}}{4238 \cdot H^{0.5}} \quad (13)$$

其中

T_{lag} : 稽延時間 (hr)

L : 最大流路長度 (m)

H : 集水區平均坡度 (%)

S : 集水區最大蓄水量 (mm)

CN : curve number

子集水區流量採用 SCS Dimensionless Unit Hydrograph Model 計算，公式如下

$$T_{lag} = 0.6T_c \quad (14)$$

$$T_p = \frac{T_r}{2} + T_{lag} \quad (15)$$

$$Q_p = \frac{0.208AP_e}{T_p} \quad (16)$$

其中

T_{lag} : 洪峰稽延時間 (hr)

T_c : 集流時間 (hr)

T_p : 洪峰到達時間 (hr)

T_r : 單位降雨延時

Q_p : 洪峰流量 (cms)

A : 集水區面積 (km²)

P_e : 有效降雨量 (mm)

根據表 12 可得知，子集水區面積最大為 3.5 平方公里，最小為 0.04 平方公里，最大流域長度最常為 4625 公尺，最小為 143 公尺，平均坡度最陡為 37%，最緩為 2.8%，CN 值最大為 77，最小為 36。

表 12 子集水區參數表

ID	A: 集水區面積 (km ²)	L: 最大流路長 度 (m)	H: 集水區平均 坡度 (%)	CN number	curve
1	1.94	2455	17.51		65
2	2.26	3010	32.79		45
3	3.50	4625	20.84		65
4	1.12	1655	16.41		52
5	1.19	2752	6.90		61
6	0.82	1768	10.40		52
7	0.71	690	32.33		56
8	0.16	595	11.01		66
9	0.10	624	19.79		70
10	0.84	374	35.39		66
11	0.64	1330	32.33		57
12	1.85	2645	2.84		43
13	0.57	143	14.77		59
14	0.84	1453	6.64		51
15	2.00	1434	23.03		76
16	0.76	155	24.11		53
17	1.09	1595	31.29		66
18	0.04	157	21.78		60
19	1.04	1103	4.70		36
20	1.21	1615	4.51		77
21	1.32	1595	37.38		64
22	1.64	1740	31.05		71
23	1.42	695	31.05		76

表 13 臺灣土壤性質分類表

分類 代碼	表土質地分類	美國水土保持 局分類
0	粗砂土、砂土	A
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土	
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	B
4	粉質壤土、粉土	
5	壤土	
6	砂質黏壤土	
7	黏質壤土、粉質黏壤土	C
8	粉質壤土、砂質黏土	
9	黏土	

表 14 SCS 曲線號碼表【AMC II】

SCS 分類	土地利用情形	土壤分類		
		A	B	C
	耕地：			
1	無保護措施	72	81	88
2	有保護措施	62	78	78
	牧草地或放牧地：			
3	不良情況	68	79	86
4	良好情況	39	61	74
5	草地：良好情況	30	58	71
	森林：			
6	稀疏、覆蓋少、無覆蓋物	45	66	77
7	良好覆蓋	25	55	70
	空地、林間空地、公園、高爾夫球場、墓地等：			
8	良好情況：草地覆蓋面積超過 75%	39	61	74
9	稍好情況：草地覆蓋面積 50~75%	49	69	79
10	商業區(85%面積不透水)	89	92	94
11	工業區(72%面積不透水)	81	88	91
	住宅：			
12	≤1/8 英畝 (65%)	77	85	90
13	1/4 英畝 (38%)	61	75	83
14	1/3 英畝 (30%)	57	72	81
15	1/2 英畝 (25%)	54	70	80
16	1 英畝 (20%)	51	68	79
17	鋪石(混凝土或柏油)、停車場、屋頂、道路等	98	98	98
18	街道	98	98	98
19	鋪石(混凝土或柏油)道路及雨水下水道	76	85	89
20	碎石道路及泥土道路	72	82	87
21	水體	98	98	98

表 15 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(1/3)

國土利用分類						SCS 分類		
第Ⅰ類		第Ⅱ類		第Ⅲ類				
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼			
農業使用 土地	01	農作	0101	稻作	010101	2		
			0102	旱作	010102	1		
			0103	果樹	010103	2		
			0104	廢耕地	010104	1		
		水產養殖	0102	水產養殖	010200	21		
		畜牧	0103	畜禽舍	010301	9		
				牧場	010302	4		
		農業附帶設施	0104	溫室	010401	9		
				倉儲設施	010402	9		
				農產品展售場	010403	9		
				其他設施	010404	9		
		森林使用 土地	02	天然林	0201	天然針葉樹純林	020101	7
						天然闊葉樹純林	020102	7
天然竹林	020103					7		
天然竹針闊葉混淆林	020104					7		
人工林	0202			人工針葉樹純林	020201	7		
				人工闊葉樹純林	020202	7		
				人工竹林	020203	7		
				人工竹針闊葉混淆林	020204	7		
其他森林 使用地	0203			伐木跡地	020301	6		
				苗圃	020302	6		
				防火線	020303	6		
				土場	020304	6		
交通使用 土地	03			機場	0301	機場	030100	17
		鐵路	0302	一般鐵路	030201	19		
				高速鐵路	030202	19		
				鐵路相關設施	030203	18		
		道路	0303	國道	030301	18		
				省道、快速道路	030302	18		
				一般道路	030303	18		
				道路相關設施	030304	18		
		港口	0304	商港	030401	21		
				漁港	030402	21		
				專用港	030403	21		
				其他港口相關設施	030404	21		
		水利使用 土地	04	河道	0401	河川	040101	21
減河	040102					21		
運河	040103					21		
堤防	040104					18		

表 16 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(2/3)

國土利用分類						SCS 分類
第 I 類		第 II 類		第 III 類		
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼	
水利使用 土地	04	溝渠	0402	溝渠	040200	18
		蓄水池	0403	水庫	040301	21
				湖泊	040302	21
				其他蓄水池	040303	21
				人工湖	040304	21
		水道沙洲灘地	0404	水道沙洲灘地	040400	21
		水利構造物	0405	水閘門	040501	17
				抽水站	040502	17
				水庫堰壩	040503	17
				地下抽水井	040504	17
		其他設施	040505	17		
防汛道路	0406	防汛道路	040600	18		
海面	0407	海面	040700	21		
建築使用 土地	05	商業	0501	零售批發	050101	10
				服務業	050102	10
		住宅	0502	純住宅	050201	12
				兼工業使用住宅	050202	12
				兼商業使用住宅	050203	12
				兼其他使用住宅	050204	12
		工業	0503	製造業	050301	11
				倉儲	050302	11
		其他建築用地	0504	宗教	050401	9
				殯葬設施	050402	9
				興建中	050403	9
				其他	050404	9
公共設施 使用土地	06	政府機關	0601	政府機關	060100	10
		學校	0602	幼稚園	060201	9
				小學	060202	9
				中學	060203	9
				大專院校	060204	9
				特種學校	060205	9
		醫療保健	0630	醫療保健	060300	9
		社會福利建設	0604	社會福利設施	060400	10
		公用設備	0605	氣象	060501	11
				電力	060502	11
				瓦斯	060503	11
				自來水	060504	11
加油站	060505	11				
環保設施	0606	環保設施	060600	11		

表 17 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 分類表(3/3)

國土利用分類						SCS 分類
第Ⅰ類		第Ⅱ類		第Ⅲ類		
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼	
遊憩使用 土地	07	文化設施	0701	法定文化資產	070101	9
				一般文化資產	070102	9
				其他文化設施	070103	9
		休閒設施	0702	公園綠地廣場	070201	8
				遊樂場所	070202	9
				體育場所	070203	9
礦鹽使用 土地	08	礦業	0801	礦場	080101	9
				礦業相關設施	080102	9
		土石	0802	土石採取場	080201	19
				土石相關設施	080202	17
		鹽業	0803	鹽田	080301	9
				鹽業相關設施	080302	9
其他使用 土地	09	軍事用地	0901	軍事用地	090100	9
		濕地	0902	濕地	090200	21
		草生地	0903	草生地	090300	5
		裸露地	0904	灘地	090401	1
				崩塌地	090402	1
				礁岩	090403	1
				裸露空地	090404	3
		灌木荒地	0905	灌木荒地	090500	4
		災害地	0906	災害地	090600	9
		營建剩餘土石 方	0907	營建剩餘土石方	090700	9
		空置地	0908	未使用地	090801	9
				人工改變中土地	090802	9
				測量標	090803	17

第七節 SOBEK 模式

本計畫採荷蘭 Deltares 所開發之 SOBEK 模式用進行水文及水理模擬(Deltares, 2017)。SOBEK 有多個模組，包含降雨逕流模組(Rainfall-Runoff Module，RR)、一維渠流模組(Channel Flow Module，CF)、二維漫地流模組(Overland flow Module，OF)、水質模組(WQ)、即時控制模組(RTC)、輸砂計算模組(ST)、鹽分入侵模組(SI)及底床質

模組(MPR)等。SOBEK 可以整合河川、區域排水、雨水下水道、農田排水、坡地排水等，並可同時計算不同水利建造物，例如橋樑、涵洞、閘門、堰、滯洪池、農塘等，將一維之計算節點與二維之計算網格間進行流量交換計算。目前台灣第三代淹水潛勢圖即利用該模式進行模擬，並且廣泛的應用於水利工程規劃與氣候變遷情境模擬。龜丹溪集水區內以山坡地為主，SOBEK 模式仍可以適用此地形。本計畫將採用降雨逕流模組(Rainfall-RunoffModule，RR)、一維渠流模組(Channel Flow Module，CF)，以及二維漫地流模組(Overland flow Module，OF)進行分析。

一、模式建置與分析流程

本計畫將劃龜丹溪之各子集水區，配合土地利用調查成果，設定個子集水區之面積、流長、CN 值等參數，以建立降雨-逕流模組(RR)。收集龜丹溪河川與坡地排水斷面資料、跨河與水工結構物數據、正射影像、衛星影像等資料，以建構一維渠流模組(CF)。利用內政部數值地形高程(DEM)資料，與土地利用現況設定二維漫地流模組(OF)。本計畫建置 SOBEK 模式如圖 19 所示。

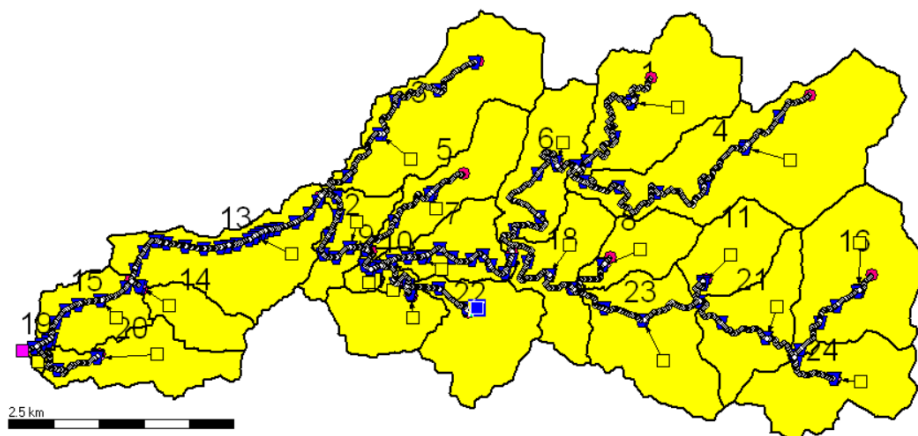


圖 19 SOBEK 模式圖

二、水理演算及淹水模擬

(一) 一維渠流模組

水路之變量流之水理現象以 de Saint Venant 方程式描述。以顯性有限差分模式求解完整 de Saint Venant 方程式。一維渠流水理模式所採用之質量與動量控制方程式分別為：

質量方程式

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (17)$$

動量方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - w_f \frac{\tau_{wind}}{\rho_w} + g A_f \frac{\xi Q |Q|}{L_x} \quad (18)$$

其中

A_f : 濕周面積 (m^2)

t : 時間 (s)

Q : 流量 (m^3/s)

x : 沿流動方向之空間座標 (m)

q_{lat} : 側入流量 (m^2/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

ζ : water level (m)

C : =Chezy 係數 ($m^{1/2}/s$)

R : 水力半徑 (m)

w_f : 河流寬度 (m)

τ_{wind} : 風剪力 (N/m^2)

ρ_w : 水密度 (kg/m^3)

ξ : 水位 (s^2/m^5)

L_x : length of branch segment (m)

(二) 二維淹水模式

二維淹水模式所採用之質量與動量控制方程式分別為：

質量方程式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

動量方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{u|\vec{u}|}{C^2 h} + au|u| = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{v|\vec{u}|}{C^2 h} + av|v| = 0 \quad (21)$$

其中

ζ : water level above plane of reference (m)

h : total water depth (= $d + \zeta$) (m)

d : 模擬區地表水深 (m)

t : 時間 (s)

u : x 方向流速 (m/s)

v : y 方向流速 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s^2)

$|\vec{u}|$: velocity magnitude ($=\sqrt{u^2 + v^2}$) (m/s)

C : Chezy 係數 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)

h : total water depth (m)

a : 邊牆摩擦係數 ($1/\text{m}$)

第八節 土石流演算

採用流入點之洪水流流量歷線乘以放大因子 BF (bulking factor) 獲得土石流流量歷線後，進行土石流流量計算。BF 值由土石流體積濃度計算如下：

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \quad (22)$$

土石流體積濃度 C_v ：參考 Takahashi (1991) 對於平衡濃度 C_D 的定義，並考量現地條件及土石流數值模擬之經驗，決定土石流數值模擬時之體積濃度及其應有範圍。一般可取 $C_v = 0.3 \sim 0.7$ ，而

$$C_v = \frac{C_D}{C^*} \quad (23)$$

平衡濃度 C_D 值可表為：

$$C_D = \frac{\rho_w \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (24)$$

其中， ρ 為清水密度； ρ_s 為土石顆粒密度； ϕ 為土石材料內摩擦角； θ 為溪床坡度； C^* 為溪床面堆積土體之體積濃度。本計畫 ρ 清水密度採用 1.00 g/cm^3 ； ρ_s 土石顆粒密度採用 2.65 g/cm^3 ； ϕ 土石材料內摩擦角採用 35° ； θ 溪床坡度採用 0.0116 ； C^* 溪床面堆積土體之體積濃度採用 0.5 。本計畫計算 BF 為 1.02 。

第九節 模式檢定驗證

一、歷史水文事件

模式完成後，會檢核其正確性，會採用歷史颱風事件進行模式檢定與驗證。本計畫選取 2013 年 8 月 29 日康芮颱風、2015 年 8 月 8 日蘇迪勒颱風作為模式檢定驗證。

二、評估指標

本研究使用四個誤差分析指標來量化竹圍橋水位站的觀測水深與模擬水深之間的誤差。這四個指標是效率係數(coefficient of efficiency, CE)、均方根誤差(root mean square error, RMSE)、峰值水深誤差(EH_p)與峰值水深發生的時間差(ET_p)。 CE 顯示模擬值與觀測值之

間的關係；越接近 1，模型越好。 $RMSE$ 顯示模擬值與觀察值之間的誤差。 EH_p 顯示了最大模擬水深與觀察到的水深之間的差異。 ET_p 顯示了最大模擬水深與觀察到的水深之間的差異。這些指數的方程式如下所示：

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [H_{sim}(t_i) - H_{obs}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [H_{obs}(t_i) - \bar{H}_{obs}(t_i)]^2} \quad (25)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=T} [H_{sim}(t_i) - H_{obs}(t_i)]^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

$$EH_p = H_{p,sim} - H_{p,obs} \quad (27)$$

$$ET_p = T_{h,p,sim} - T_{h,p,obs} \quad (28)$$

其中

$H_{sim}(t_i)$: 在時間 t 模擬水深(m)

$H_{obs}(t_i)$: 在時間 t 觀測水深(m)

$\bar{H}_{obs}(t_i)$: 平均觀測水深 (m)

T : 計算時距 (10 min)

$H_{p,sim}$: 最大模擬水深 (m)

$H_{p,obs}$: 最大觀測水深 (m)

$T_{h,p,sim}$: 最大模擬水深發生時間

$T_{h,p,obs}$: 最大觀測水深發生時間

三、模式檢定驗證結果

根據驗證結果可得知，兩場歷史事件經模式模擬後所得之結果，與真實資料相近，兩場效率係數皆大於 0.8，均方根誤差 $RMSE$ 皆小於 0.28m。以上結果顯示模式正確性。

表 18 模式檢定驗證表

事件	時間	CE	RMSE(m)	$EH_P(m)$	$ET_P(min)$
康芮颱風	2013 年 8 月 29 日	0.802	0.278	-0.756	-20
蘇迪勒颱風	2015 年 8 月 8 日	0.814	0.192	-0.463	110

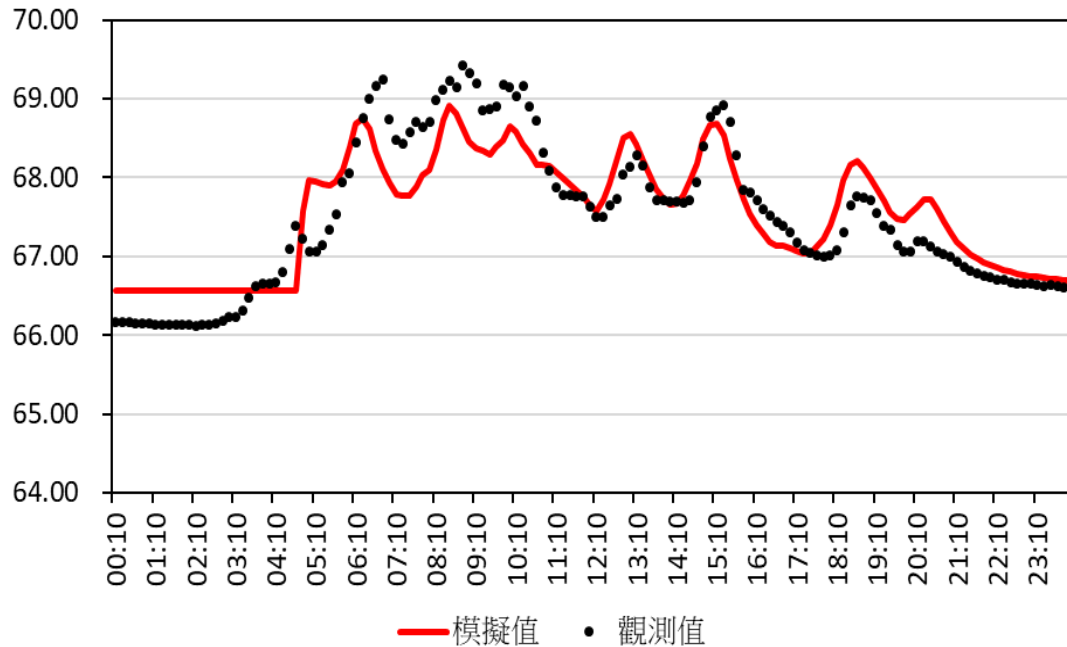


圖 20 2013 年康芮颱風模式模擬與觀測比較歷線圖

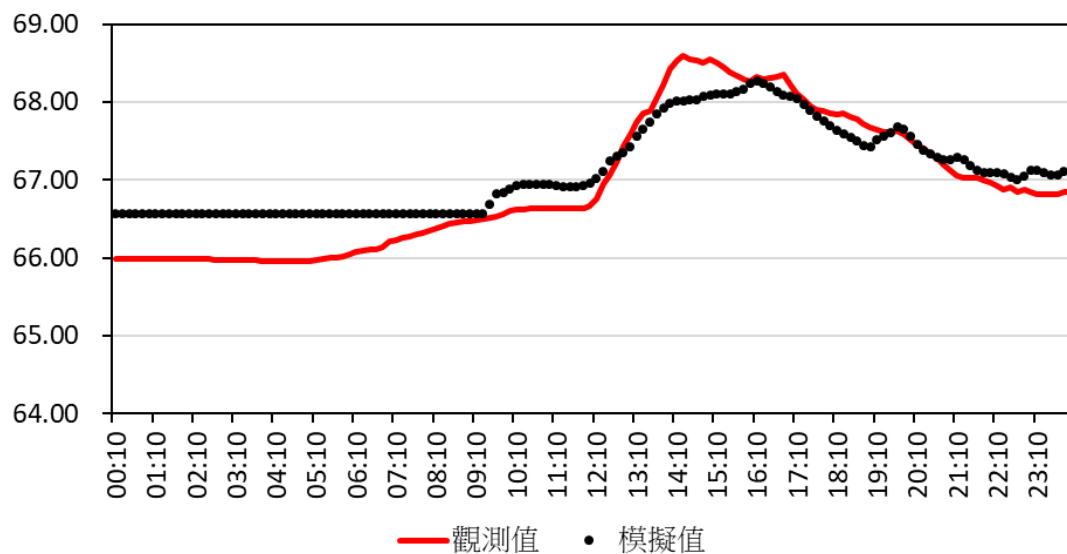


圖 21 2015 年蘇迪勒颱風模式模擬與觀測比較歷線圖

第6章 不同氣候變遷情境模擬與分析比較

第一節 RCP 2.6

一、雨量變化

RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末雨量的結果如表 19 與圖 22~圖 28 所示。圖 22 顯示 2 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 20.5%、37.5%、31.4%。5 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 13.9%、19.1%、16.3%。隨着重現期距的增加，增量逐漸減少。50 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 13.9%、19.1%、16.3%。100 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 6.4%、1.3%、-0.1%。在暖化減緩的情境下，低重現期的降雨仍會顯著增加，高重現期的降雨則是維持。

表 19 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表

重現期	基期 (mm)	近未來 (mm)	增減 (%)	世紀中 (mm)	增減 (%)	世紀末 (mm)	增減 (%)
2	244	294	20.5	335	37.5	320	31.4
5	334	380	13.9	398	19.1	388	16.3
10	389	432	10.9	435	11.7	428	9.8
25	453	489	8.1	476	5.1	469	3.6
50	497	529	6.4	503	1.3	496	-0.1
100	539	566	5.0	529	-1.8	522	-3.2

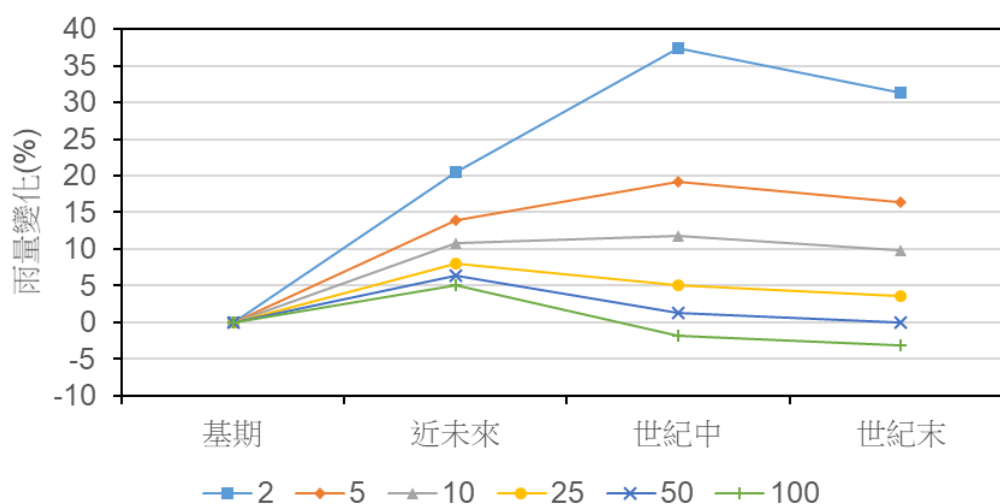


圖 22 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較圖

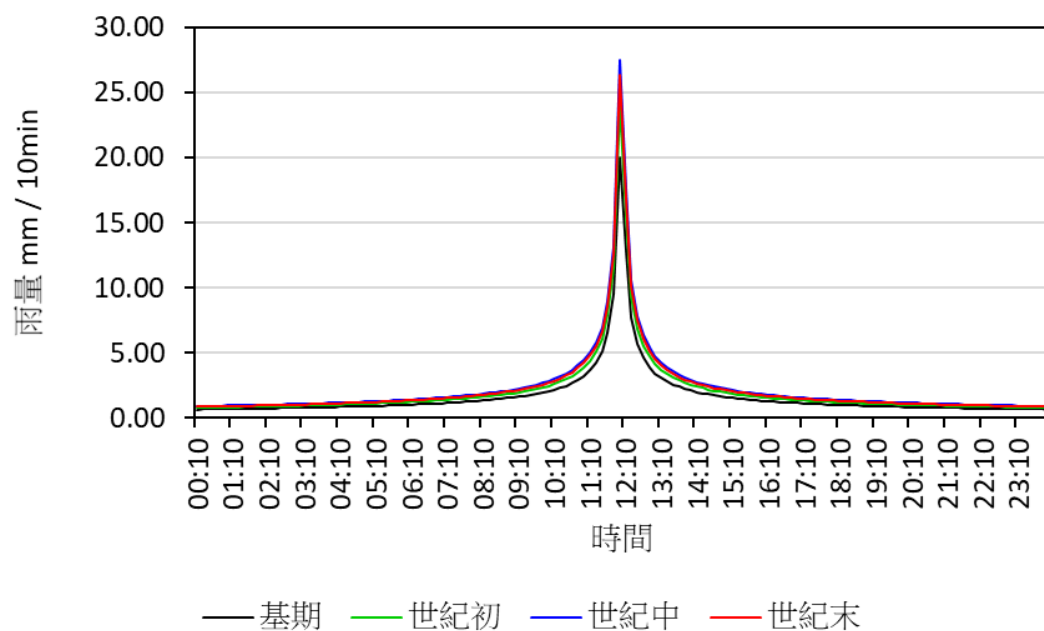


圖 23 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距雨型

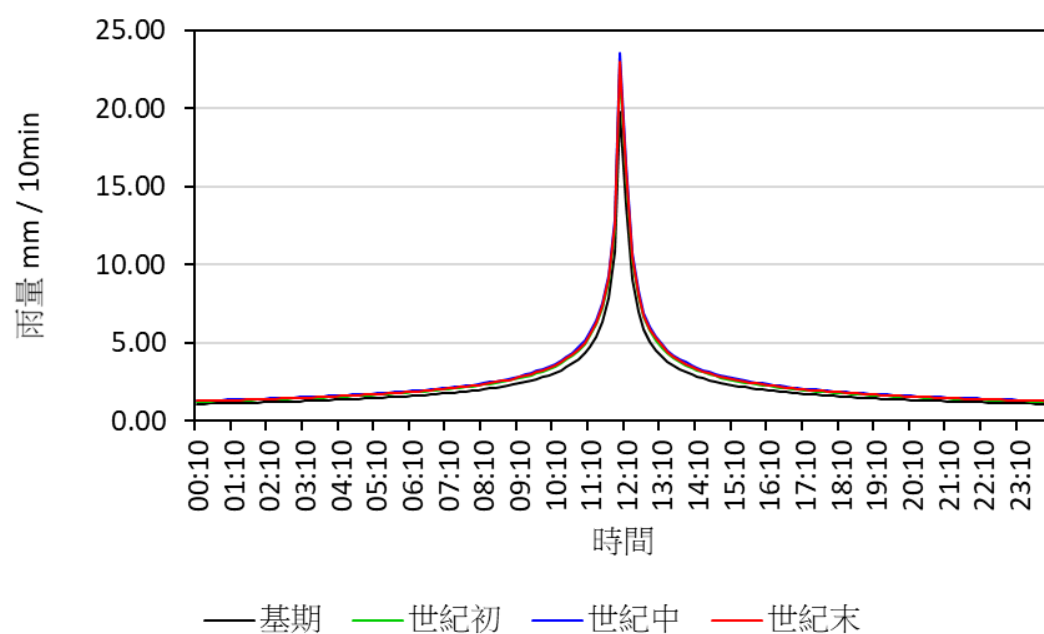


圖 24 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距雨型

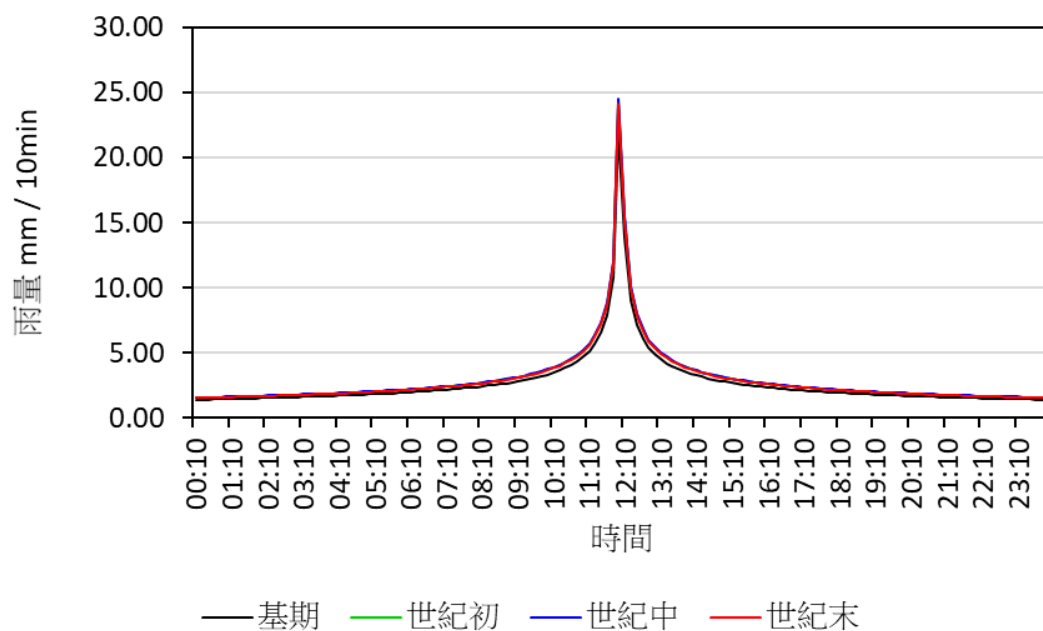


圖 25 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距雨型

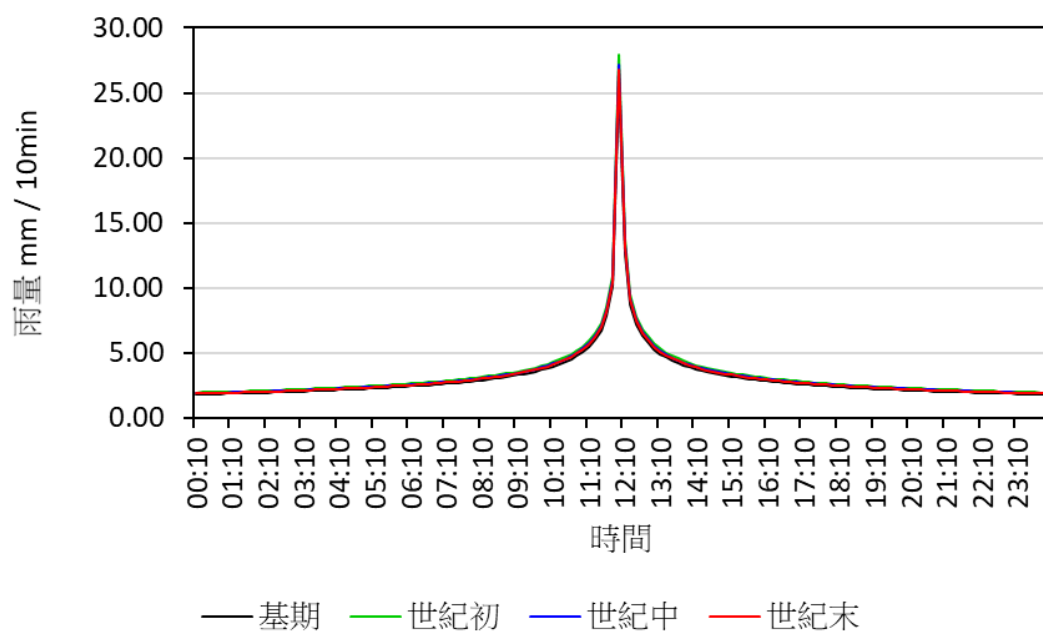


圖 26 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距雨型

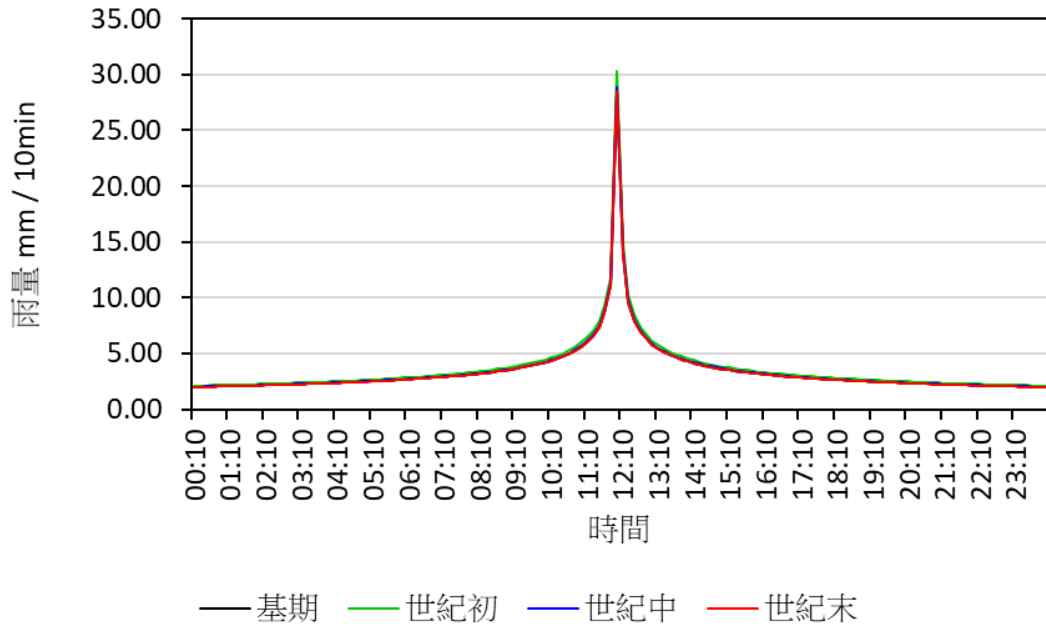


圖 27 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距雨型

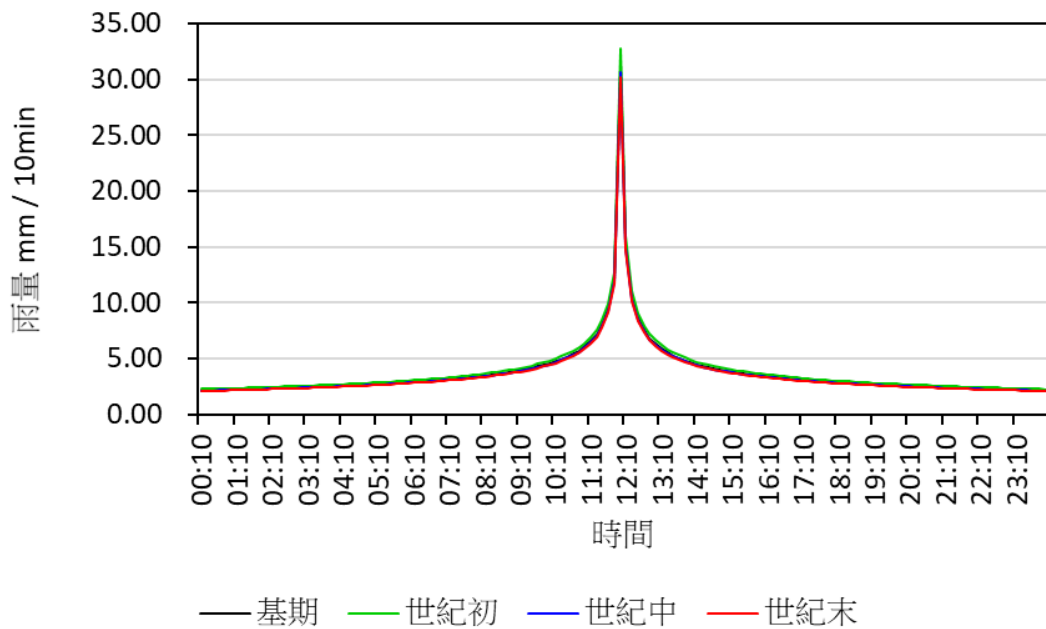


圖 28 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距雨型

二、土石流洪峰流量變化

RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量的結果如表 20 與圖 29~圖 35 所示。土石流洪峰流量變化趨勢與雨量流量變化趨勢一致。2 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量

分別為 28.7%、58.4%、47.8%。5 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 20.8%、28.8%、24.5%。隨著重現期距的增加，增量逐漸減少。50 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 8.8%、1.8%、-0.1%。100 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 6.8%、-2.4%、-4.3%。在暖化減緩的情境下，低重現期的洪峰流量仍會顯著增加，高重現期的洪峰流量是維持。

表 20RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量比較表

重現期	基期 (cms)	近未來 (cms)	增減 (%)	世紀中 (cms)	增減 (%)	世紀末 (cms)	增減 (%)
2	129	166	28.7	205	58.4	191	47.8
5	147	178	20.8	189	28.8	183	24.5
10	166	191	15.2	195	17.2	190	14.3
25	192	214	11.5	206	7.2	202	5.1
50	220	240	8.8	240	1.8	220	-0.1
100	248	265	6.8	242	-2.4	238	-4.3

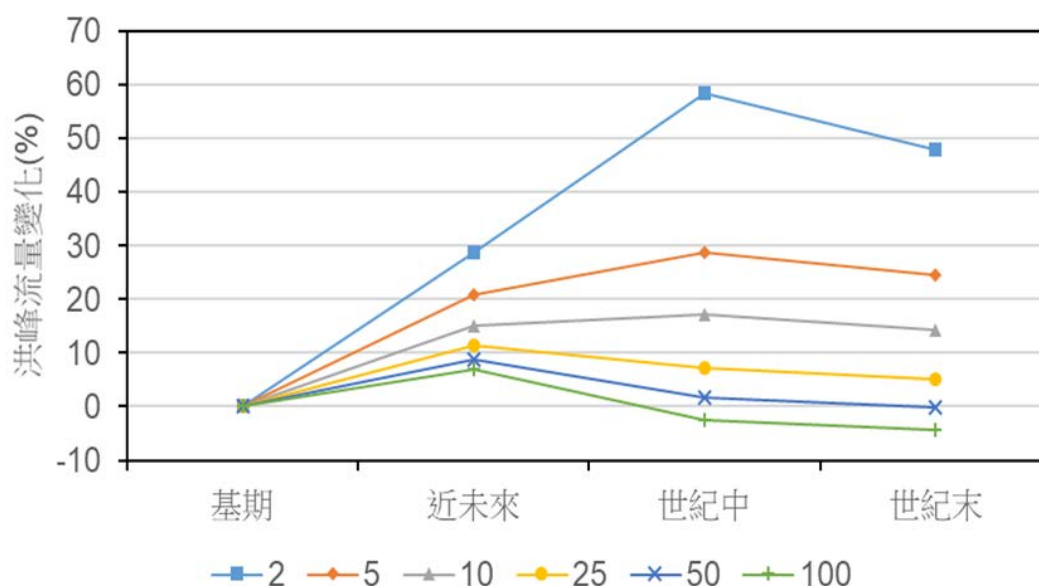


圖 29 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量變化比較圖

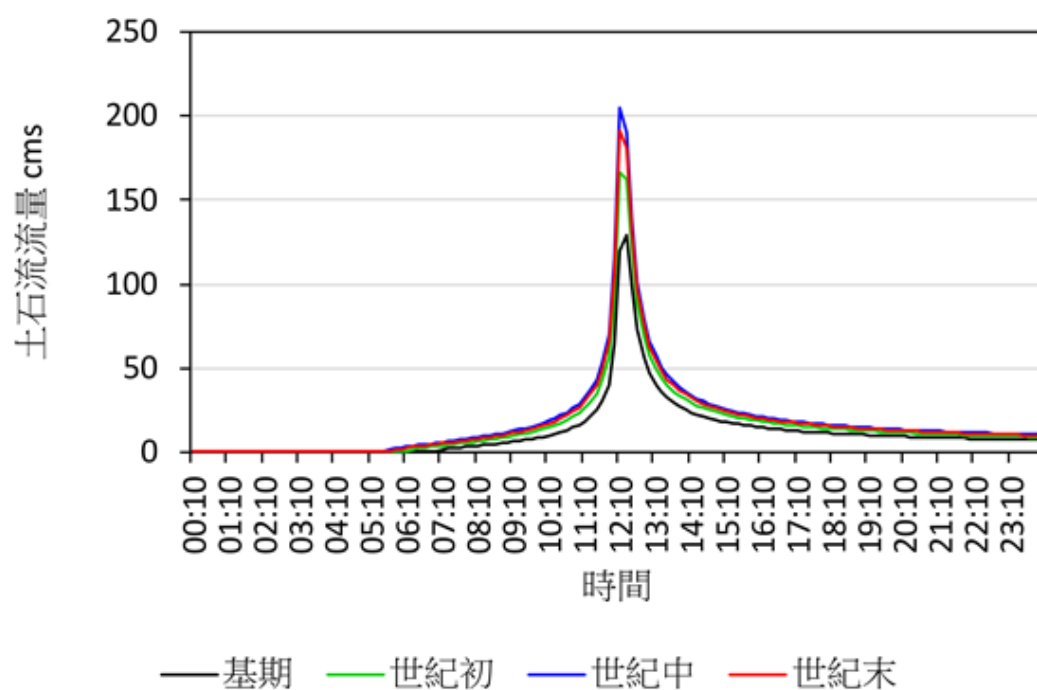


圖 30 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距流量歷線圖

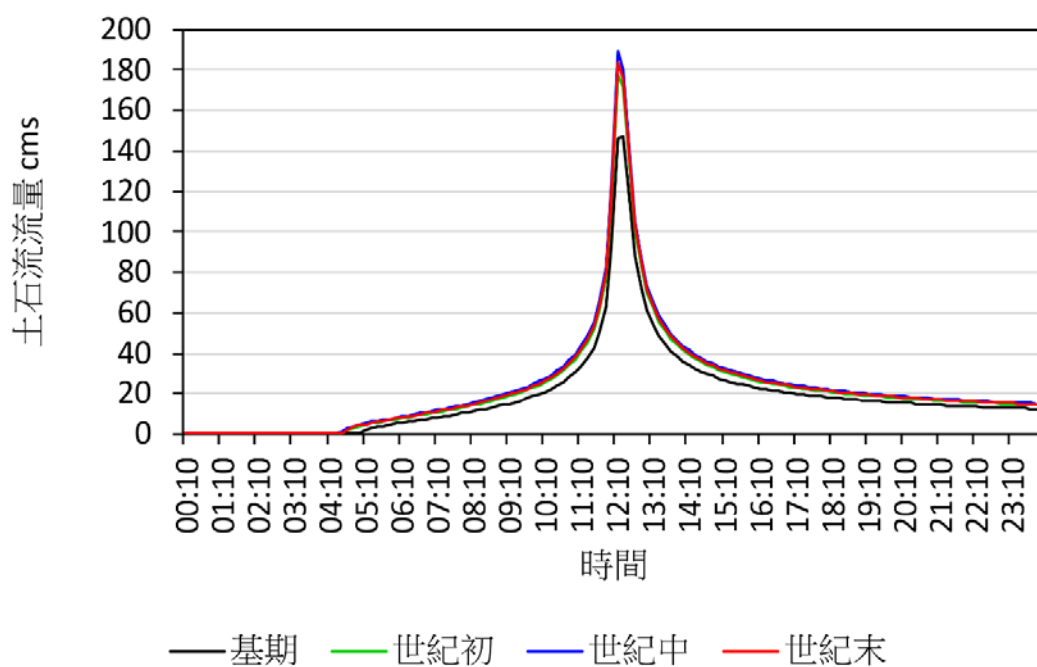


圖 31 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距流量歷線圖

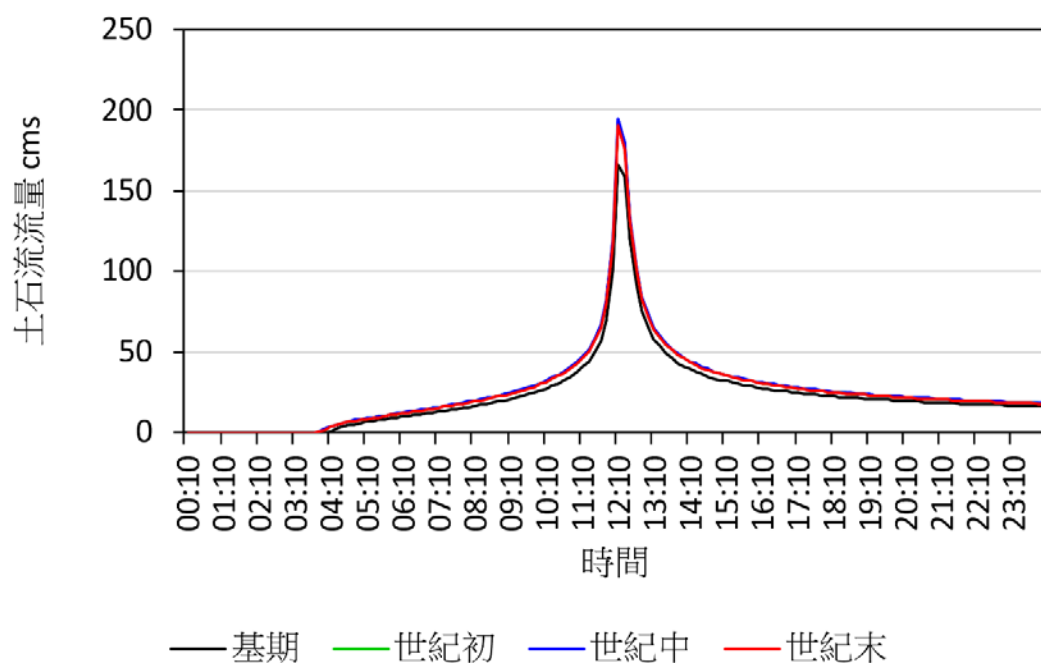


圖 32 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距流量歷線圖

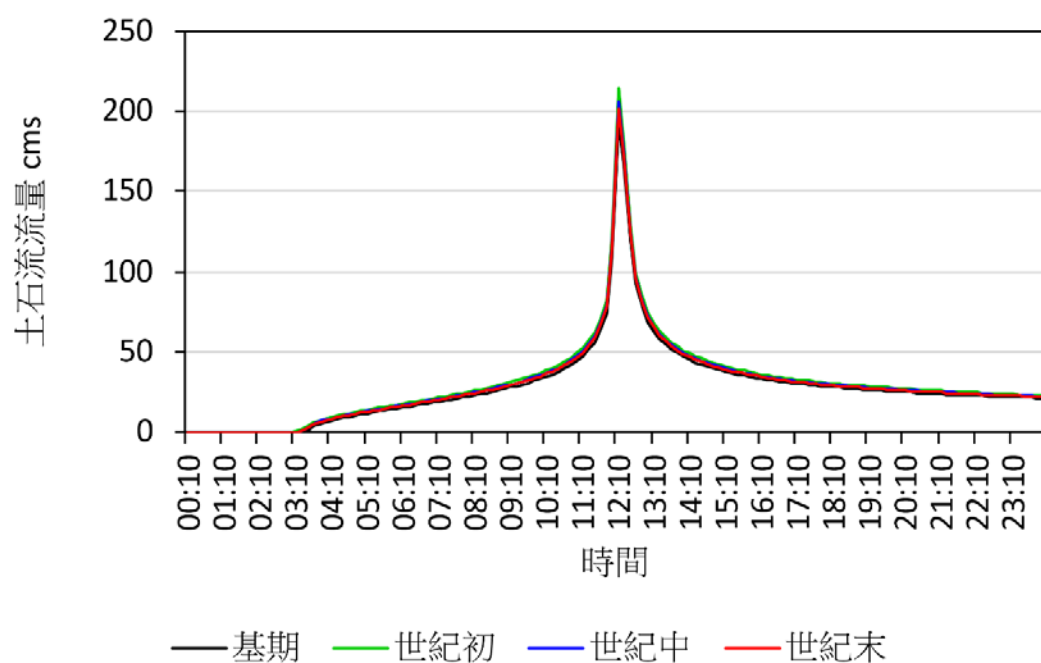


圖 33 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距流量歷線圖

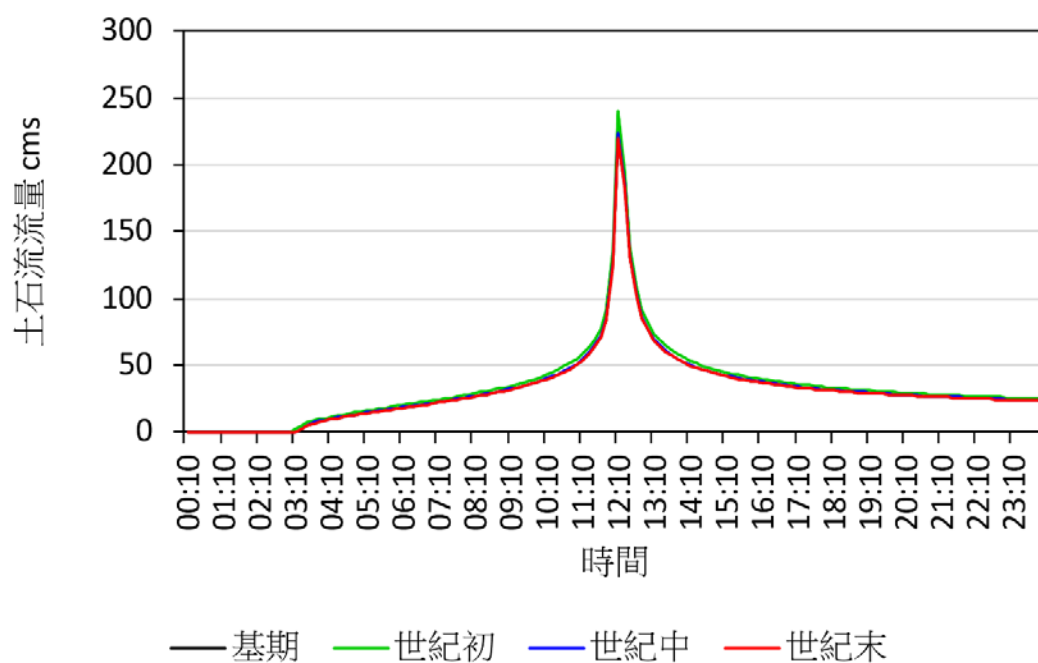


圖 34 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距流量歷線圖

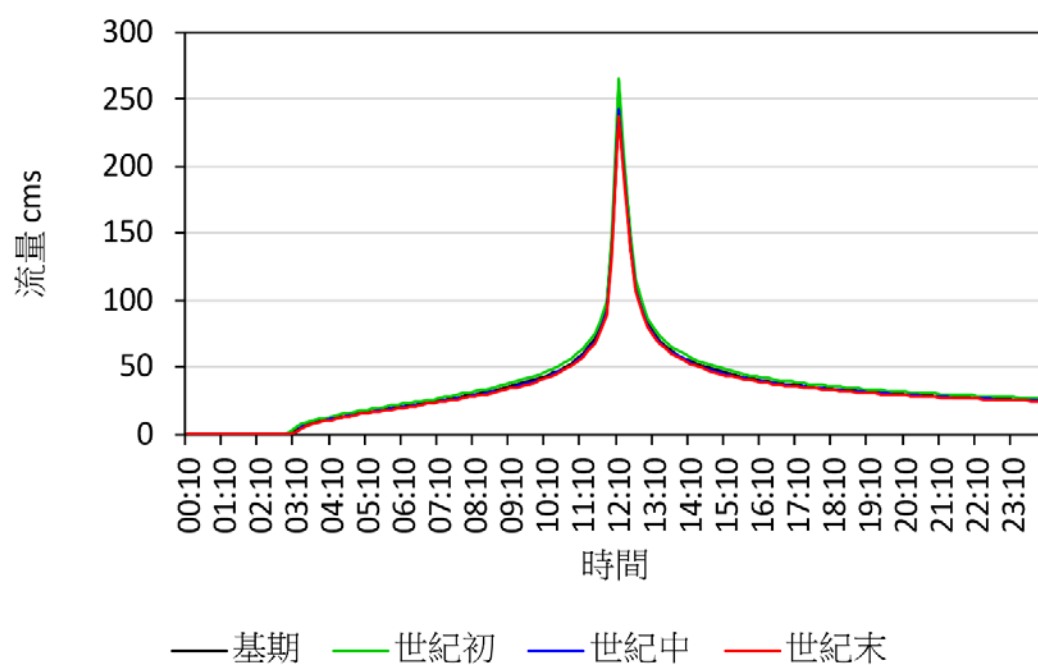


圖 35 RCP 2.6 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距流量歷線圖

第二節 RCP 4.5

一、雨量變化

RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末雨量的結果如表 21 與圖 36~圖 42 所示。2 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 18.0%、8.8%、27.0%。5 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 2.9%、8.8%、19.1%。5 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 2.9%、13.2%、19.1%。隨著重現期距的增加，增量逐漸減少。50 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 -7.9%、14.3%、6.9%。100 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 -9.1%、14.1%、4.2%。在穩定的情境的情境下，低重現期的降雨仍會顯著增加，高重現期的降雨則是微幅增加。

表 21 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表

重現期	基期 (mm)	近未來 (mm)	增減 (%)	世紀中 (mm)	增減 (%)	世紀末 (mm)	增減 (%)
2	244	288	18.0	265	8.8	310	27.0
5	334	344	2.9	378	13.2	398	19.1
10	389	381	-2.2	444	14.1	447	14.7
25	453	489	8.1	476	5.1	469	3.6
50	497	458	-7.9	568	14.3	531	6.9
100	539	490	-9.1	615	14.1	561	4.2

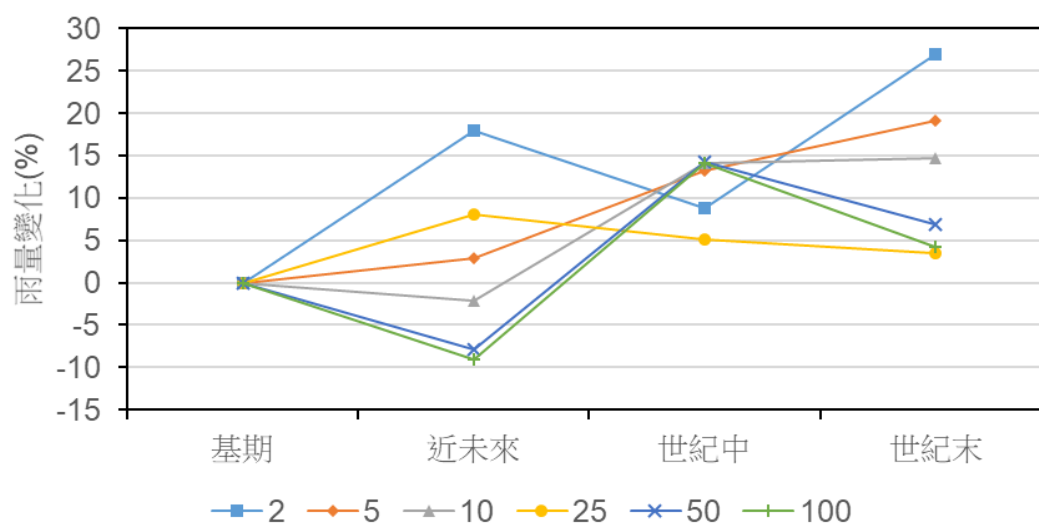


圖 36 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較表

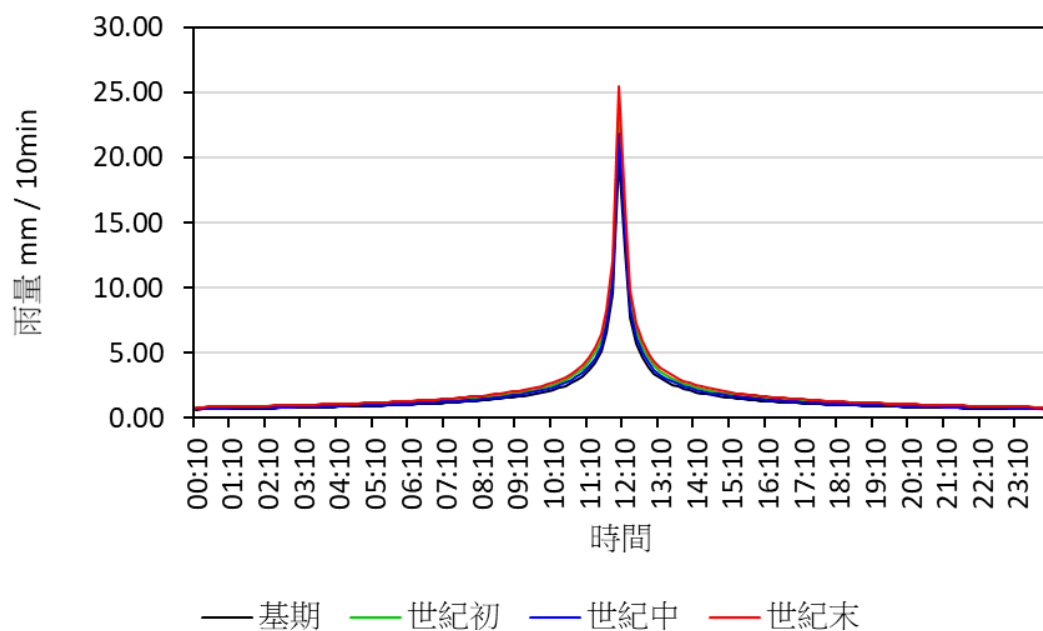


圖 37 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距雨型

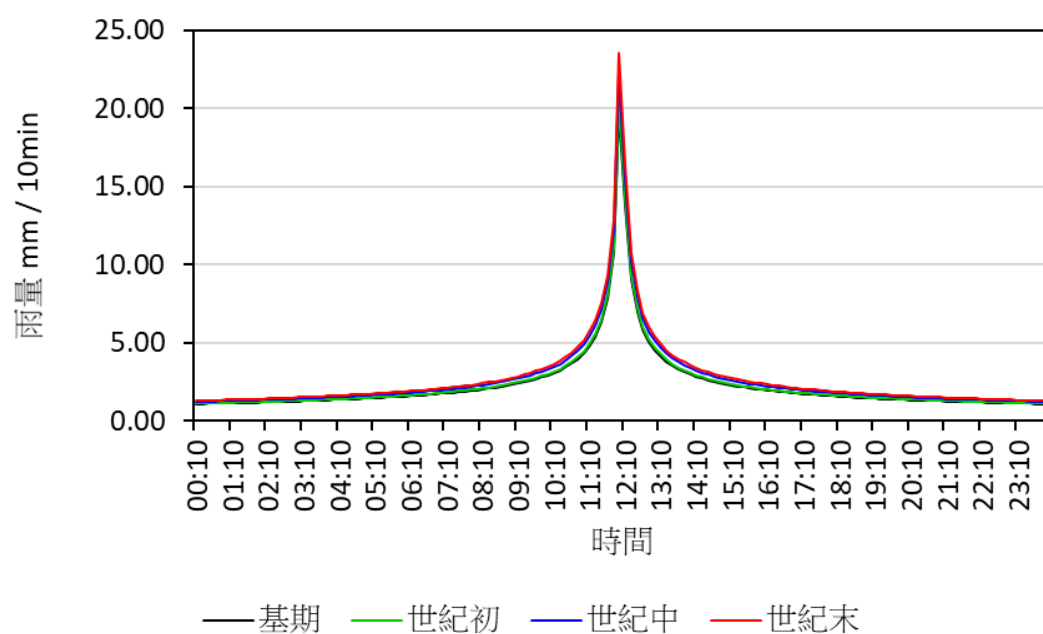


圖 38 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距雨型

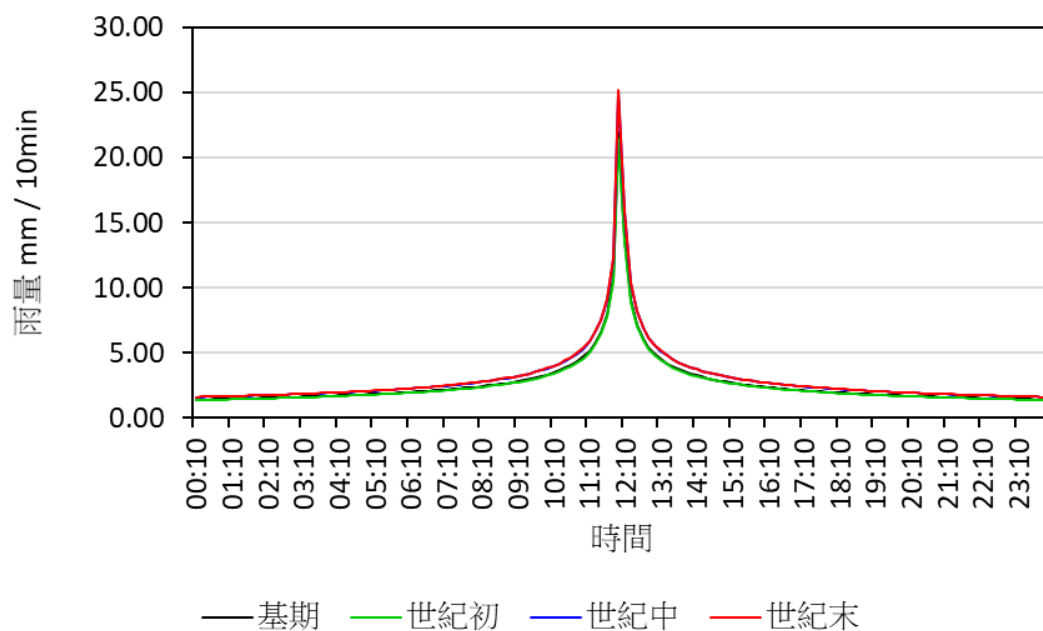


圖 39 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距雨型

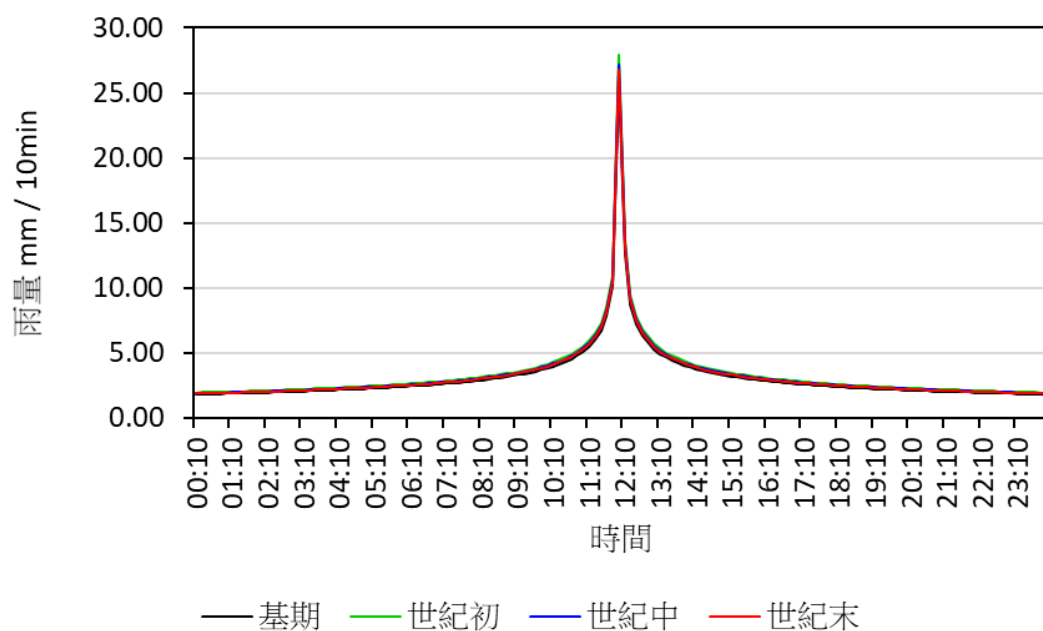


圖 40 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距雨型

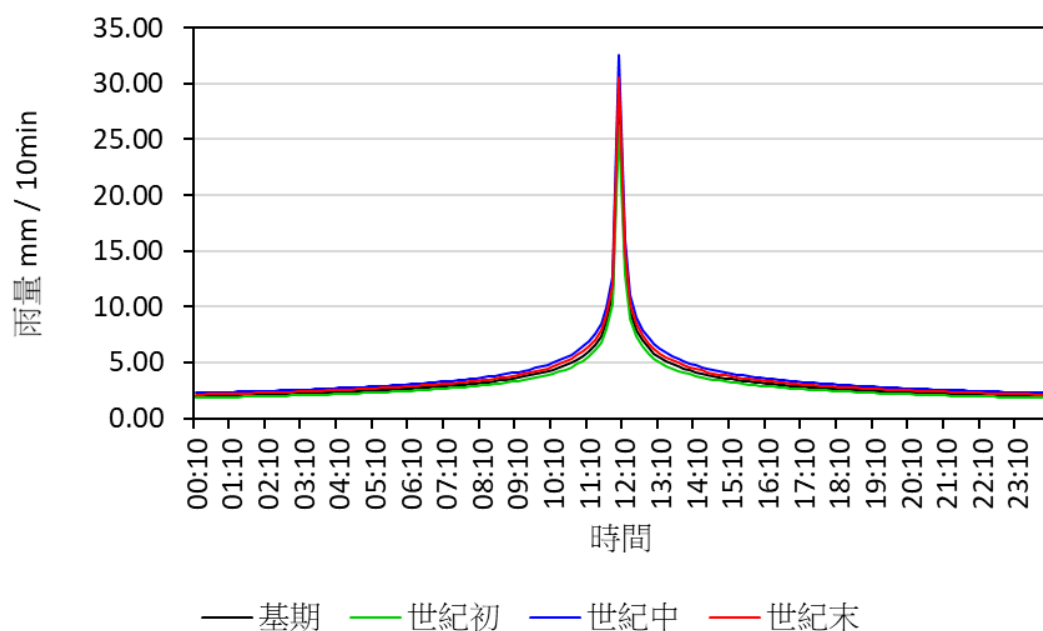


圖 41 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距雨型

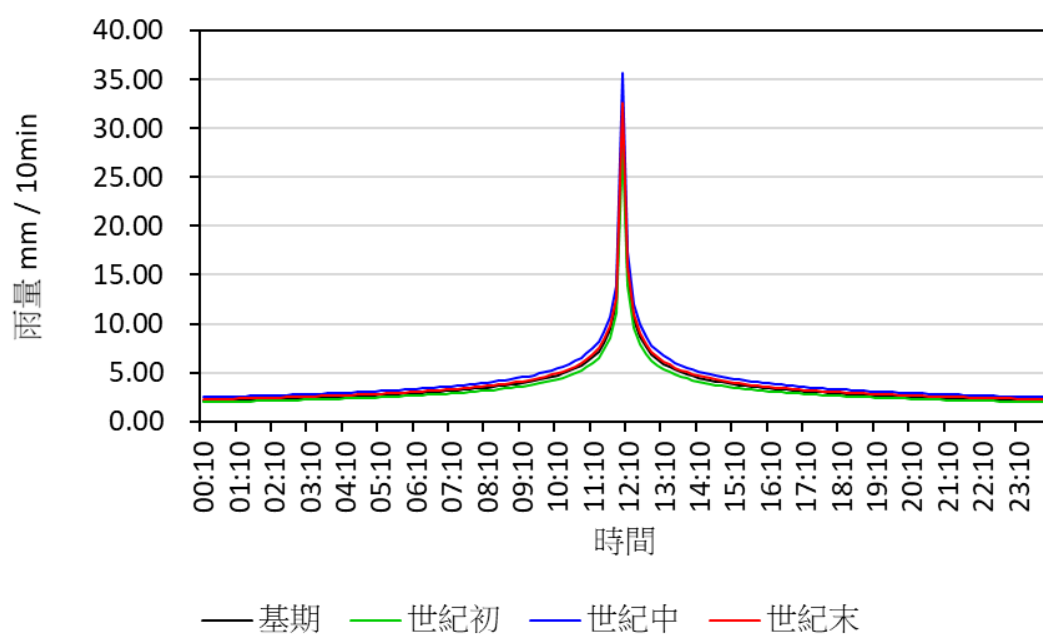


圖 42 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距雨型

二、土石流流量變化

RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量的結果如表 22 與圖 44~圖 49 所示。土石流洪峰流量變化趨勢與雨量土石流流量變化趨勢一致。2 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 24.4%、11.2%、40.1%。5 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 4.0%、19.8%、28.8%。隨著重現期距的增加，增量逐漸減少。50 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為-10.8%、19.9%、9.5%。100 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為-12.2%、19.3%、5.7%。在穩定的情境的情境下，低重現期的土石流洪峰流量仍會顯著增加，高重現期的土石流洪峰流量則是微幅增加。

表 22 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量比較表

重現期	基期 (cms)	近未來 (cms)	增減 (%)	世紀中 (cms)	增減 (%)	世紀末 (cms)	增減 (%)
2	129	161	24.4	144	11.2	181	40.1
5	147	153	4.0	176	19.8	189	28.8
10	166	161	-3.2	200	20.6	202	21.5
25	192	214	11.5	206	7.2	202	5.1
50	220	196	-10.8	264	19.9	241	9.5
100	248	218	-12.2	296	19.3	262	5.7

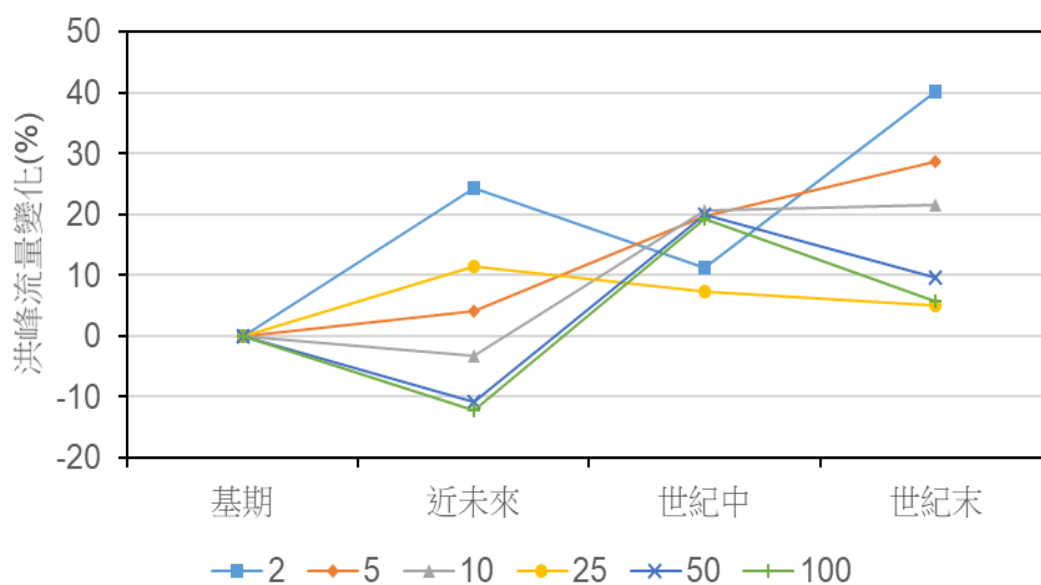


圖 43 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量變化比較圖

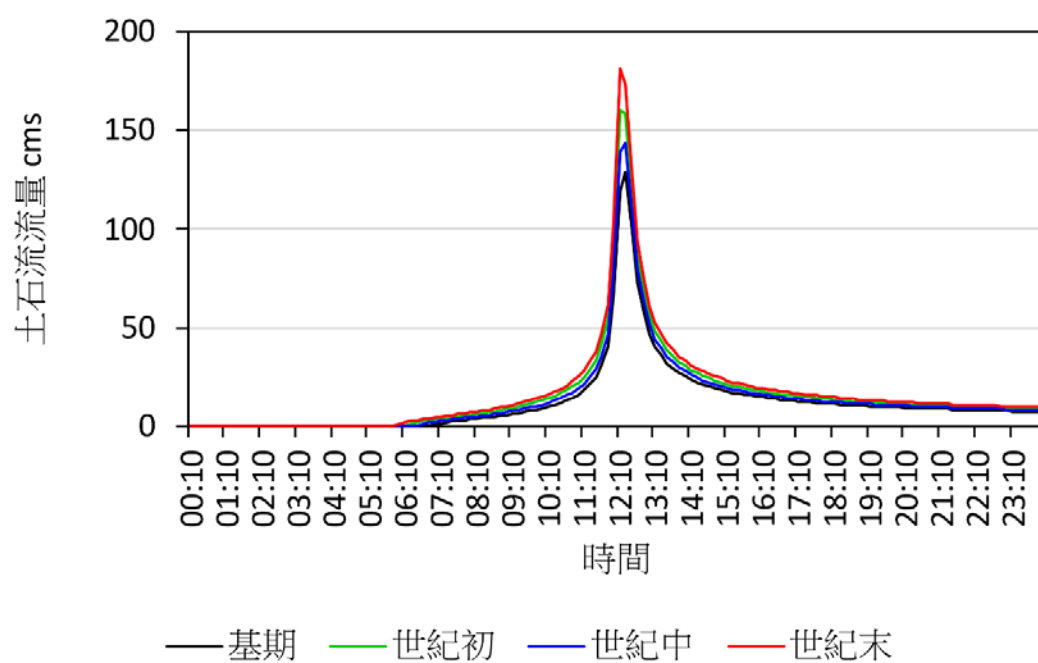


圖 44 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距土石流流量歷線圖

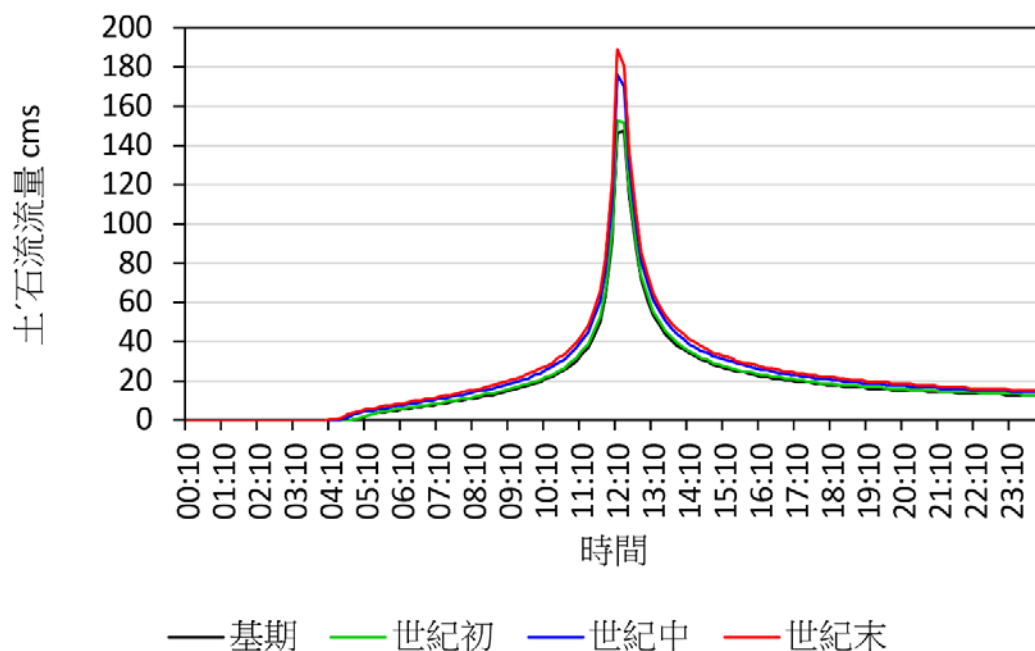


圖 45 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距土石流流量歷線圖

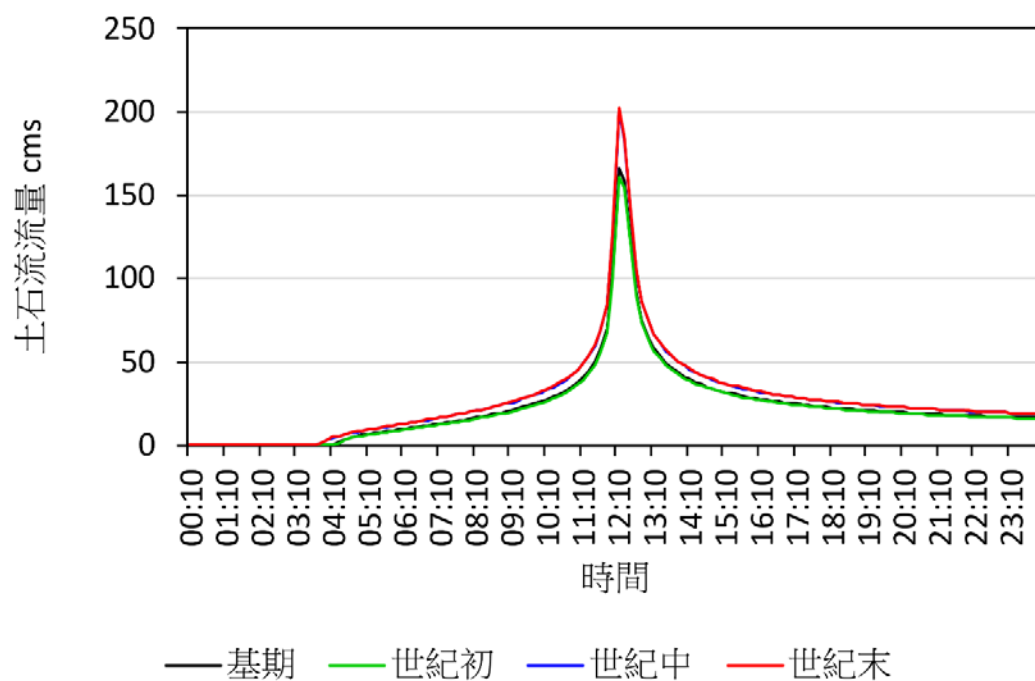


圖 46 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距土石流流量歷線圖

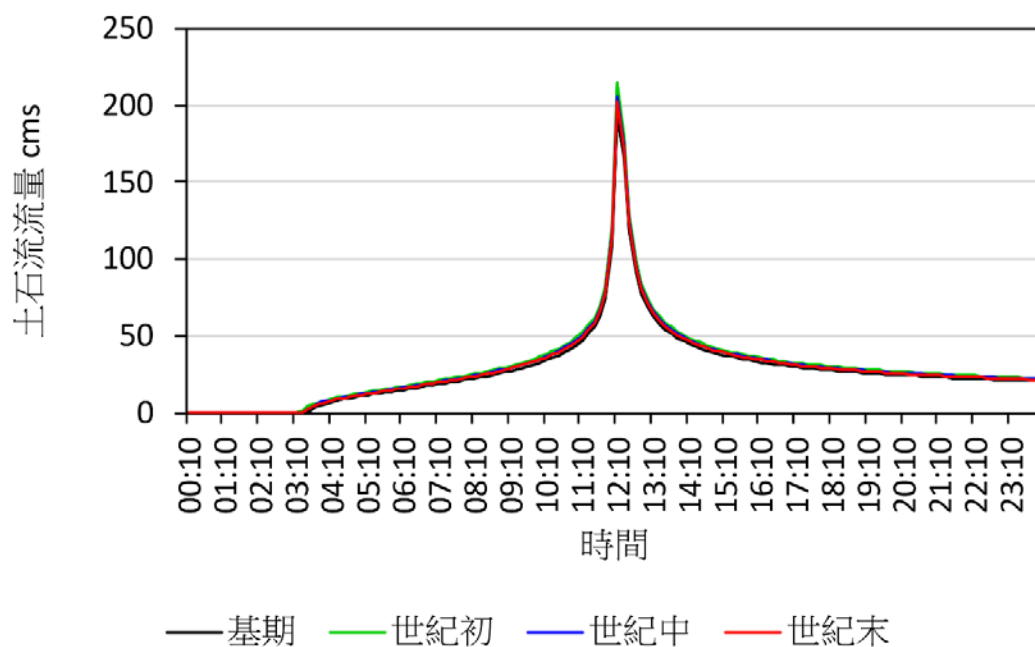


圖 47 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距土石流流量歷線圖

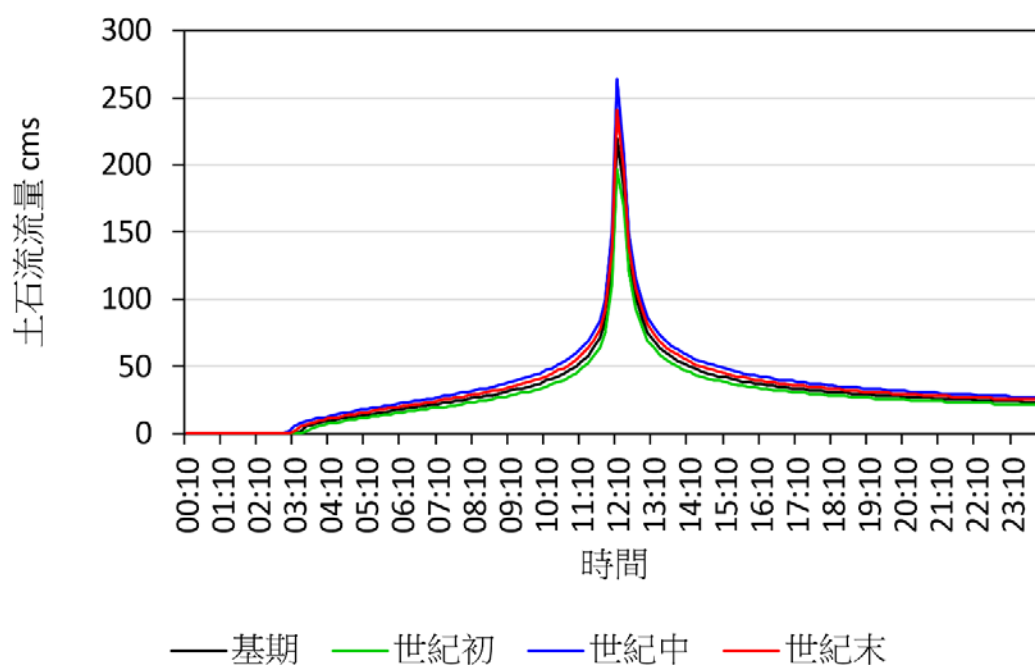


圖 48 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距土石流流量歷線圖

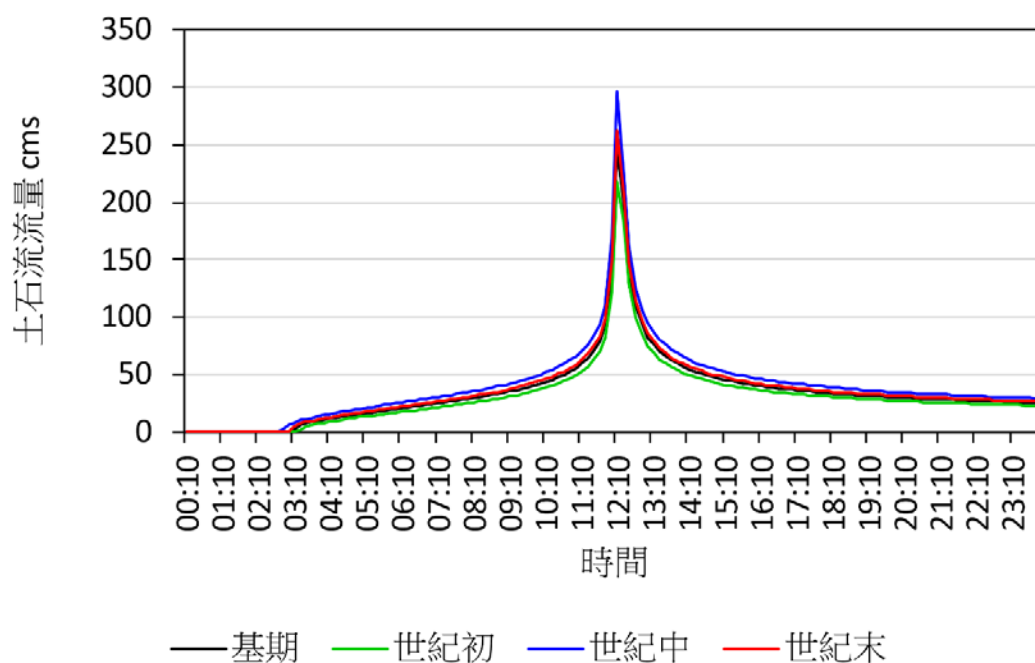


圖 49 RCP 4.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距土石流流量歷線圖

第三節 RCP 6.0

一、雨量變化

RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末雨量的結果如表 23 與圖 50~圖 56 所示。圖 50 顯示 2 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 20.1%、39.6%、65.5%。5 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 12.1%、30.0%、33.9%。隨著重現期距的增加，增量逐漸減少。50 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 10.4%、24.6%、43.0%。100 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 11.2%、24.5%、47.1%。在 RCP 6.0 情境下，低與高重現期的降雨會顯著增加。

表 23 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表

重現 期	基期 (mm)	近未來 (mm)	增減 (%)	世紀中 (mm)	增減 (%)	世紀末 (mm)	增減 (%)
2	244	293	20.1	340	39.6	404	65.5
5	334	374	12.1	434	30.0	447	33.9
10	389	430	10.4	495	27.1	527	35.4
25	453	498	10.0	567	25.2	631	39.3
50	497	549	10.4	619	24.6	711	43.0
100	539	599	11.2	671	24.5	793	47.1

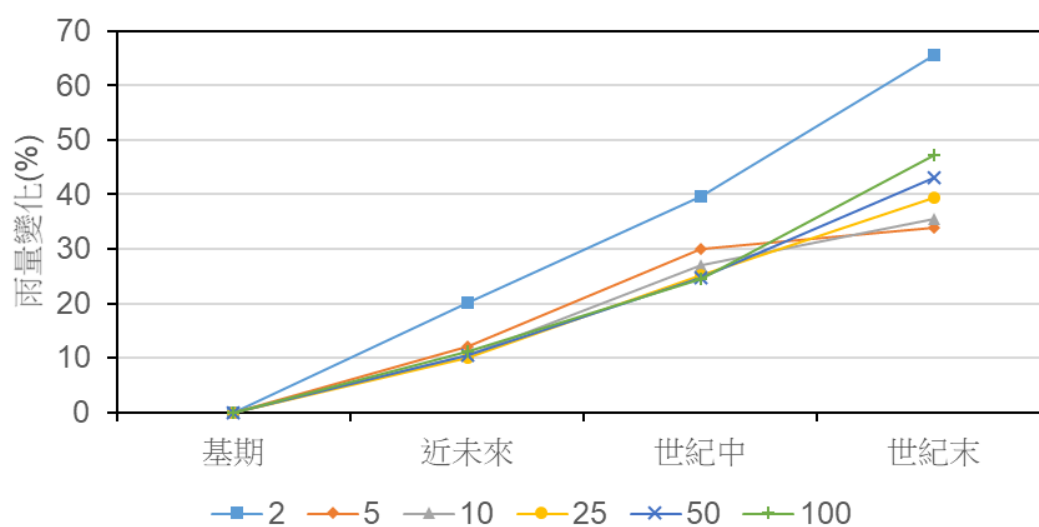


圖 50 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較圖

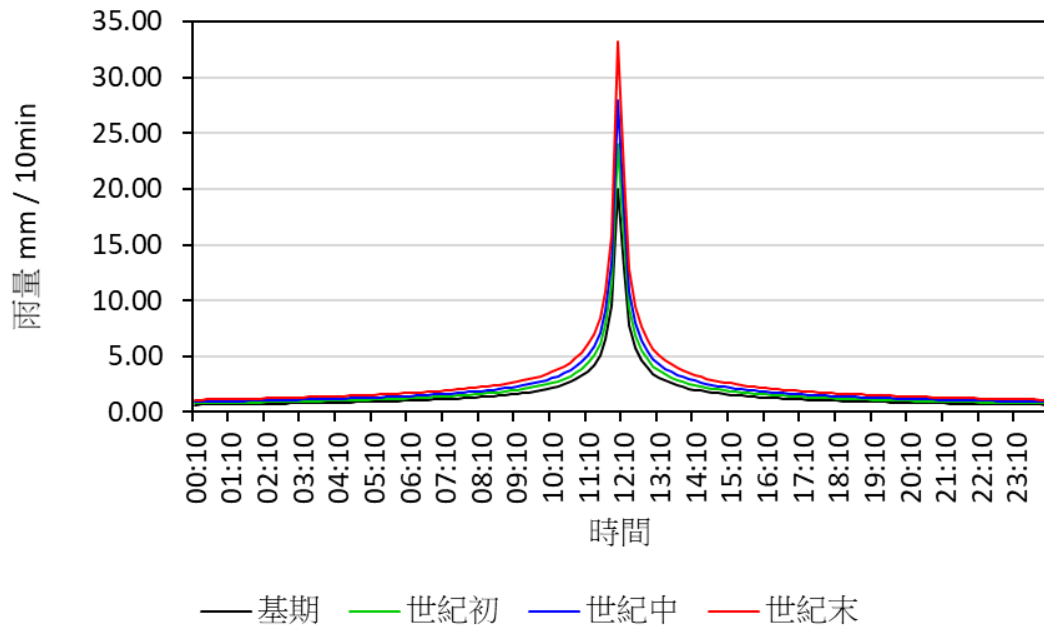


圖 51 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距雨型

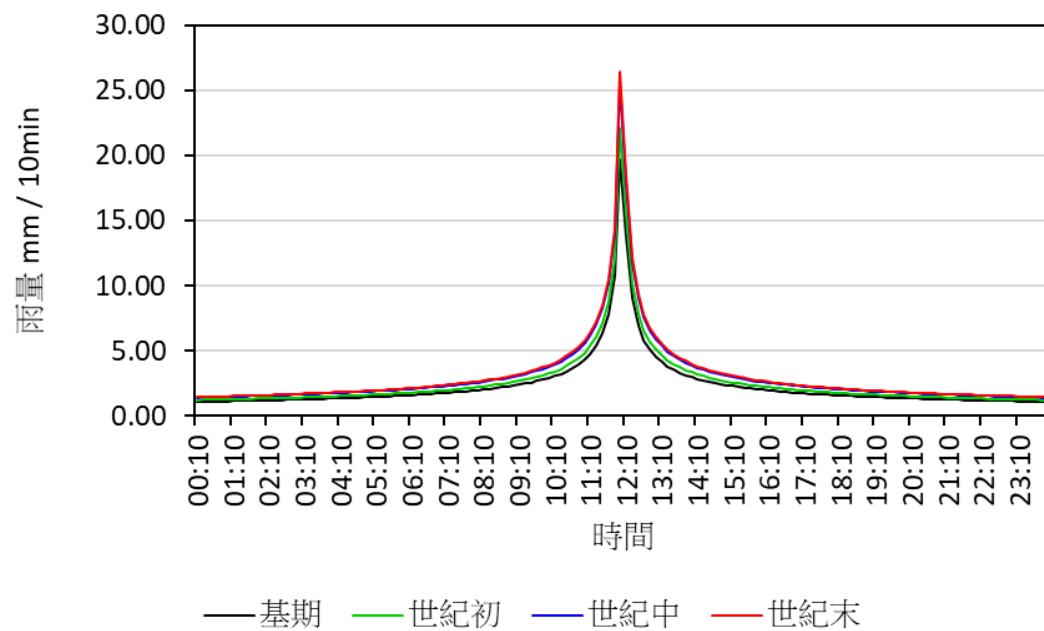


圖 52 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距雨型

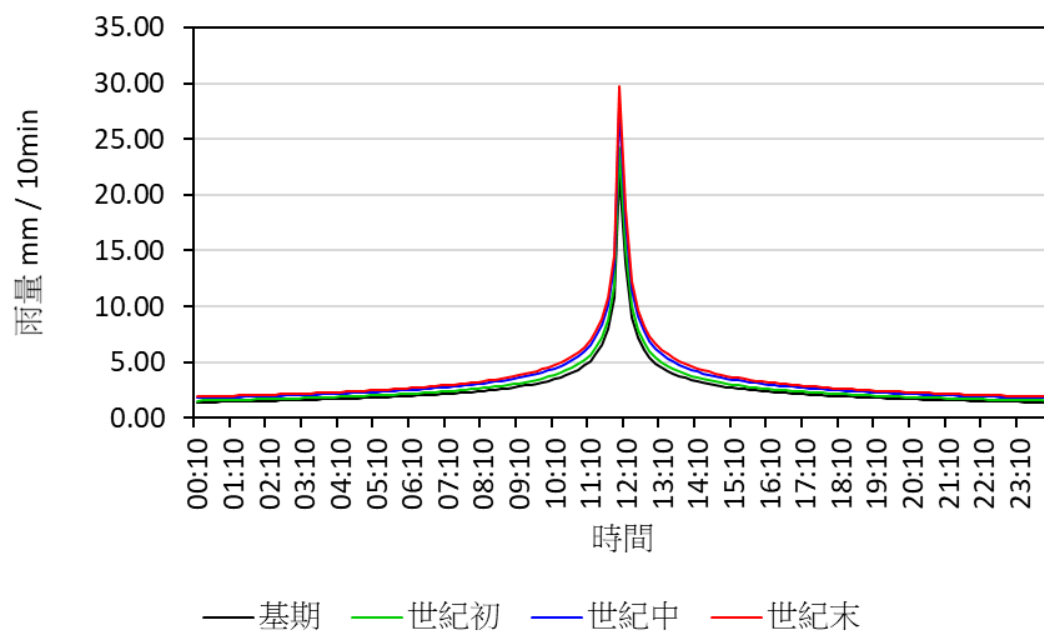


圖 53 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距雨型

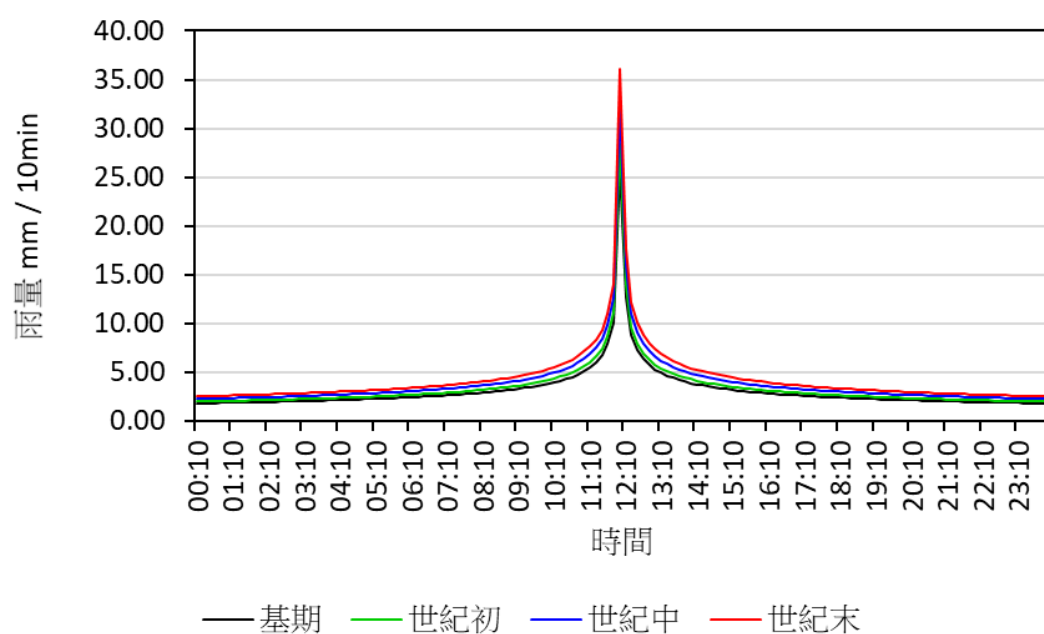


圖 54 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距雨型

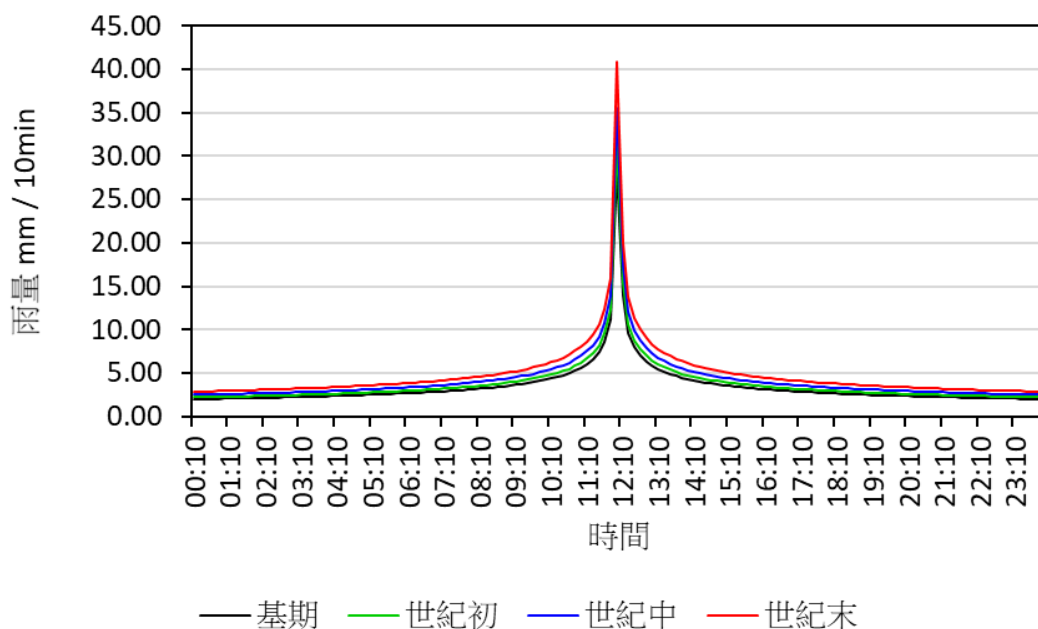


圖 55 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距雨型

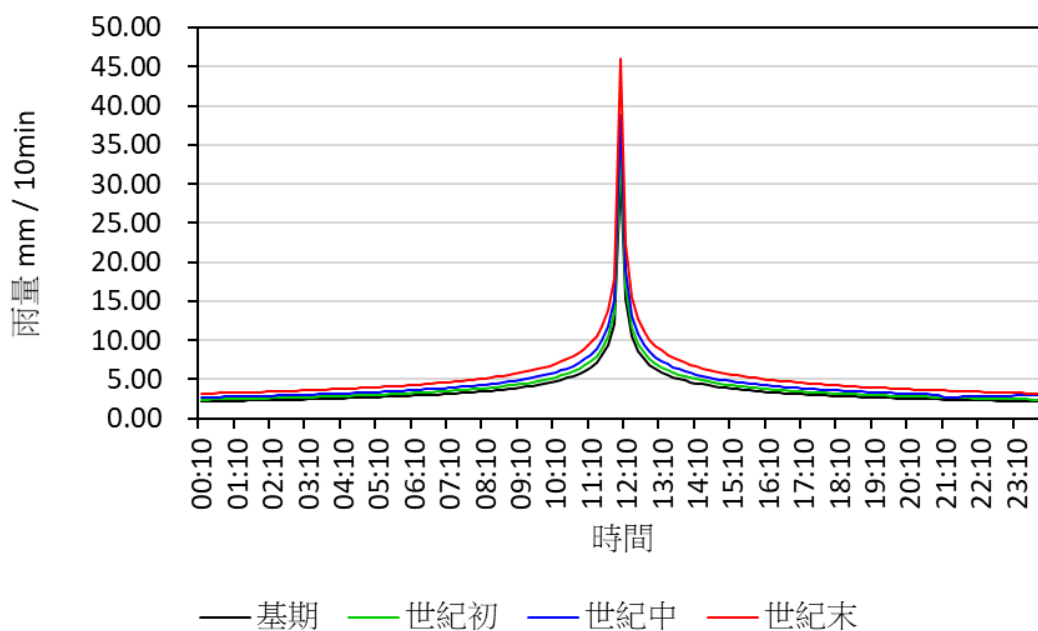


圖 56 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距雨型

二、土石流流量變化

RCP6.0 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量的結果如表 24 與圖 50~圖 56 所示。土石流洪峰流量變化趨勢與雨量變化趨勢一致。顯示 2 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增

量分別為 28.1%、62.1%、108.0%。5 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 18.1%、45.3%、51.4%。5 年重現期土石流洪峰流量的增量與 5、10、25、50、100 年重現期距的增量相當。在 RCP6.0 穩定的情境下，2 年重現期的土石流洪峰流量的增量約為其他高重現期的土石流洪峰流量的兩倍。

表 24 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量比較表

重現期	基期 (cms)	近未來 (cms)	增減 (%)	世紀中 (cms)	增減 (%)	世紀末 (cms)	增減 (%)
2	129	165	28.1	209	62.1	269	108.0
5	147	174	18.1	214	45.3	223	51.4
10	166	191	15.2	232	39.8	253	52.2
25	192	220	14.2	262	36.3	301	56.8
50	220	252	14.4	296	34.4	351	59.6
100	248	286	15.3	330	33.1	402	62.0

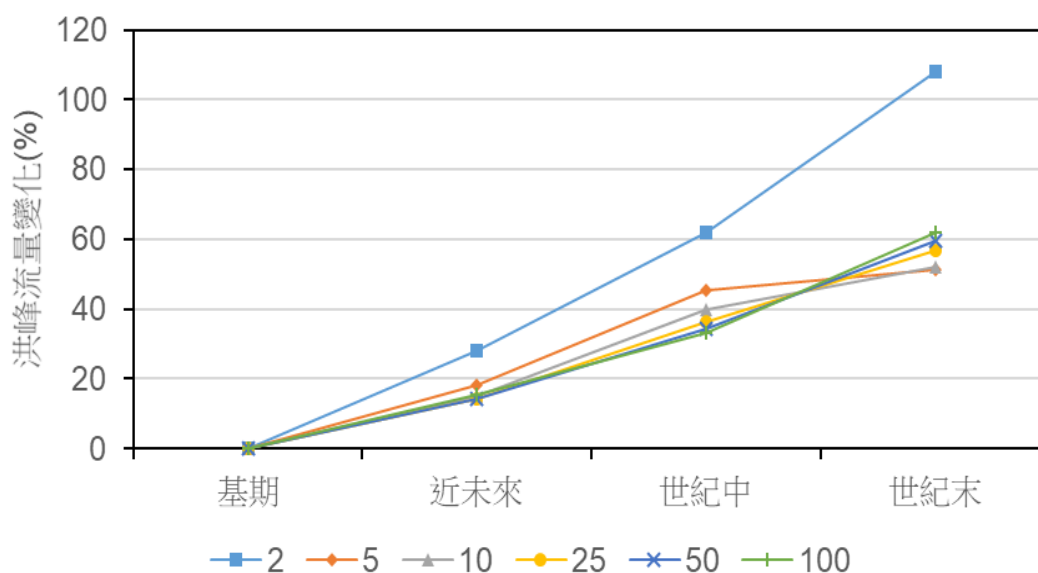


圖 57 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量變化比較圖

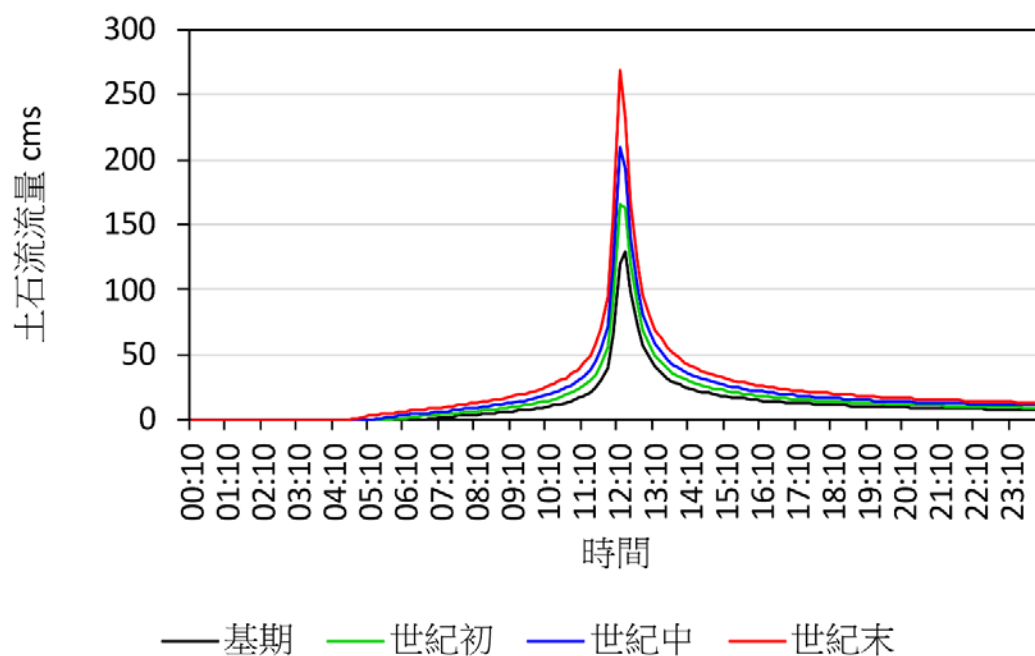


圖 58 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距土石流流量歷線圖

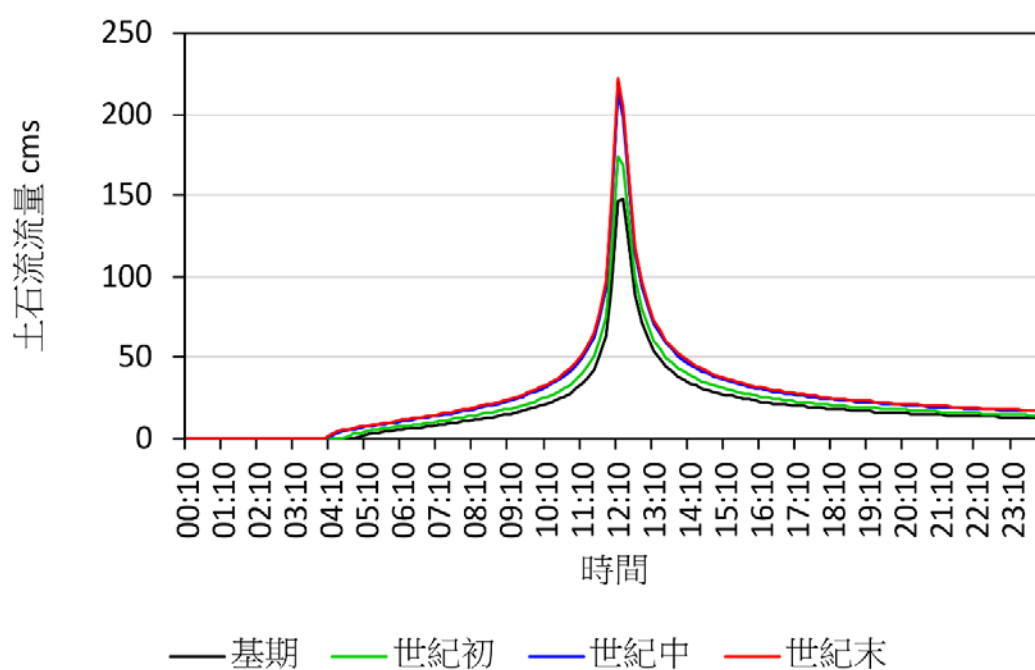


圖 59 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距土石流流量歷線圖

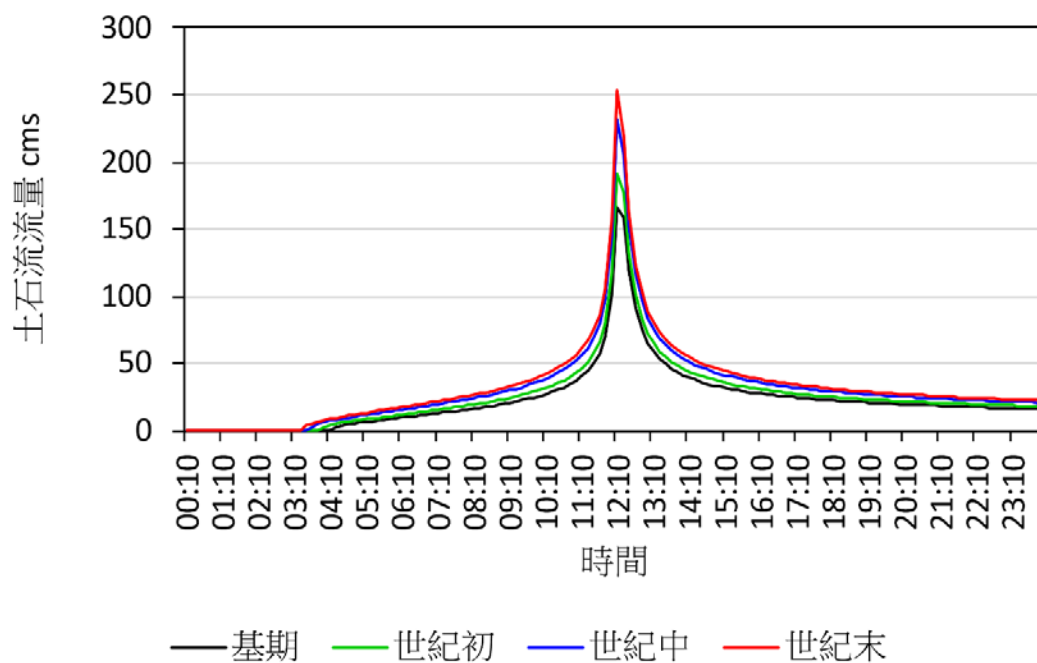


圖 60 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距土石流流量歷線圖

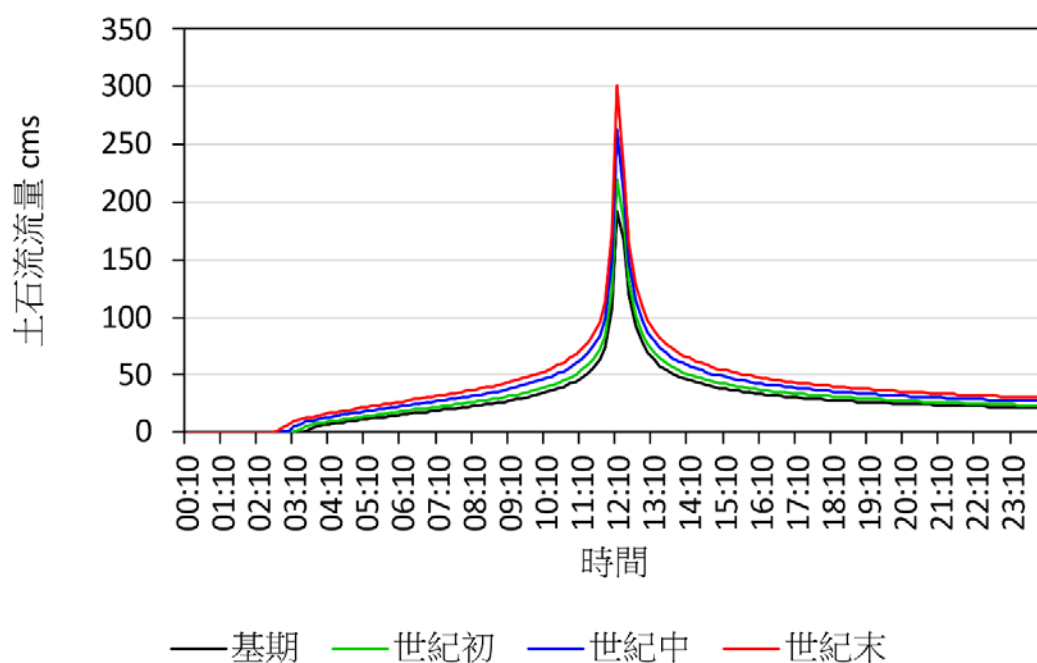


圖 61 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距土石流流量歷線圖

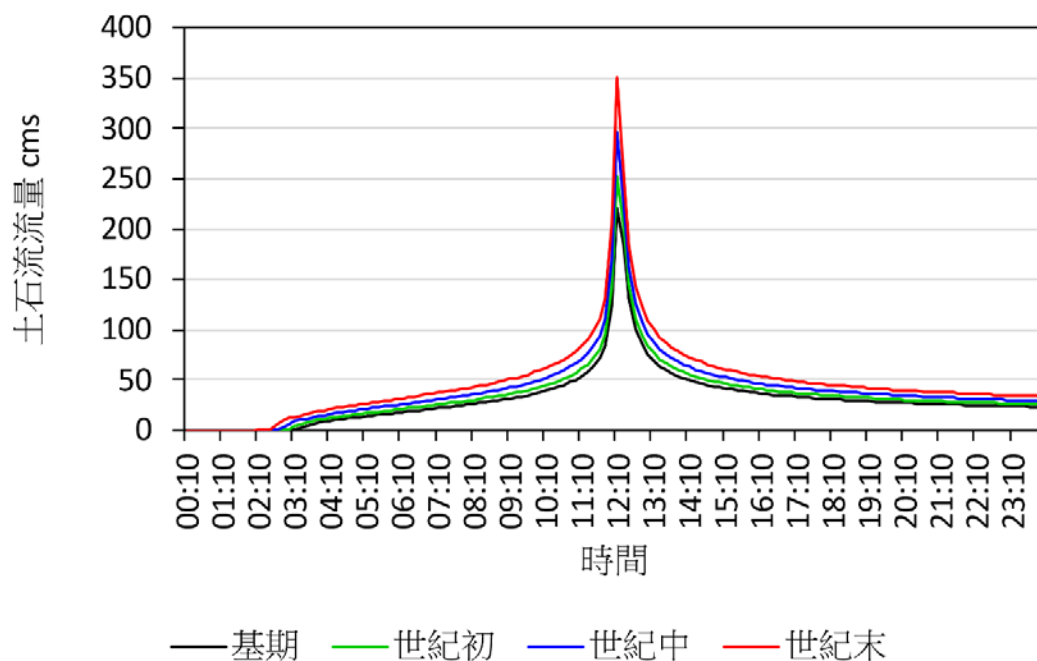


圖 62 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距土石流流量歷線圖

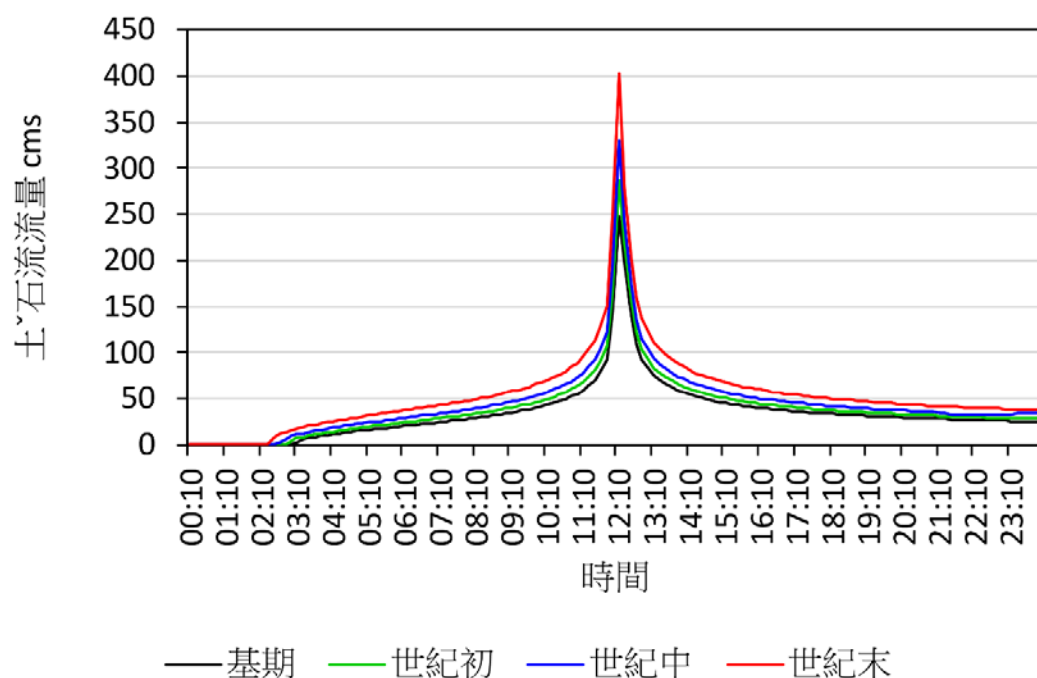


圖 63 RCP 6.0 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距土石流流量歷線圖

第四節 RCP 8.5

一、雨量變化

RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末雨量的結果如表 25 與圖 64~圖 70 所示。圖 64 顯示 2 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 31.3%、35.3%、64.2%。5 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 18.3%、26.2%、60.6%。隨着重現期距的增加，近未來增量逐漸減少。50 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 2.1%、27.9%、58.9%。100 年重現期雨量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 -1.1%、30.2%、59.1%。在溫室氣體高度排放的情境下，各高重現期的降雨會顯著增加。

表 25 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末雨量比較表

重現期	基期 (mm)	近未來 (mm)	增減 (%)	世紀中 (mm)	增減 (%)	世紀末 (mm)	增減 (%)
2	244	320	31.3	330	35.3	400	64.2
5	334	395	18.3	421	26.2	536	60.6
10	389	436	12.1	487	25.1	621	59.5
25	453	479	5.9	571	26.1	720	59.0
50	497	507	2.1	635	27.9	790	58.9
100	539	533	-1.1	701	30.2	857	59.1

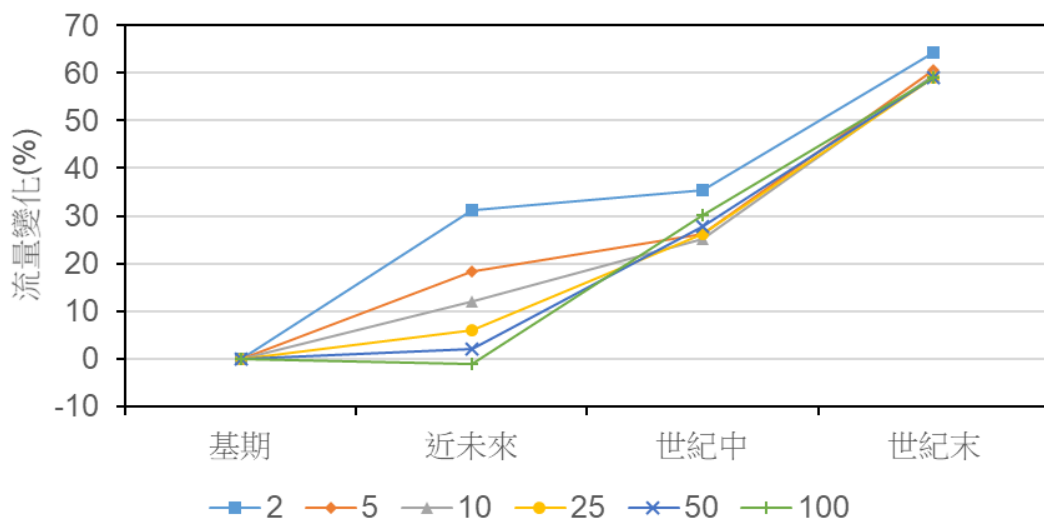


圖 64 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末雨量變化比較圖

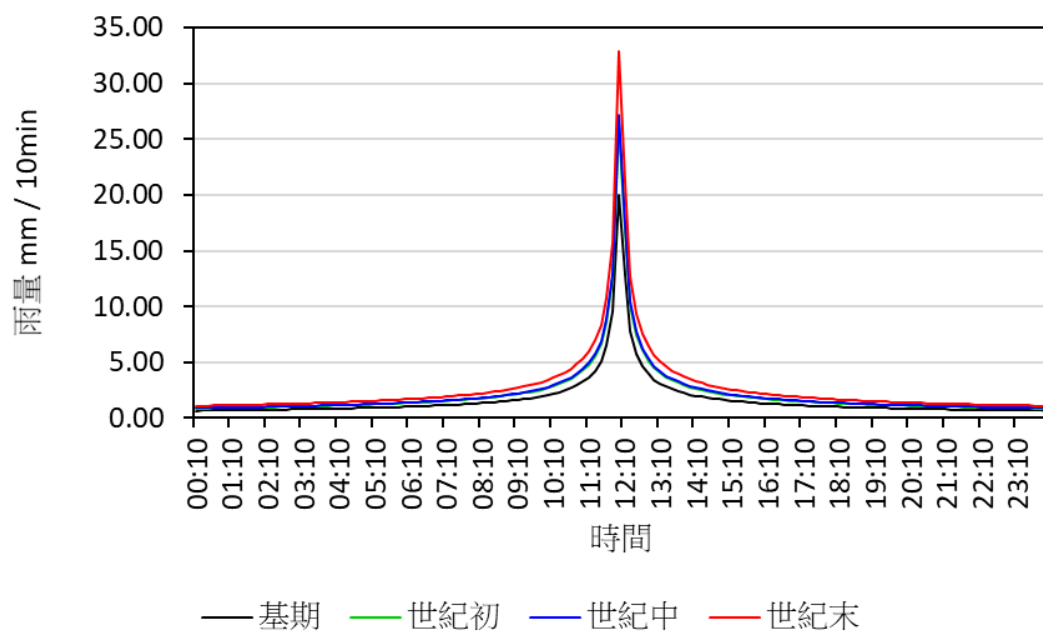


圖 65 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距雨型

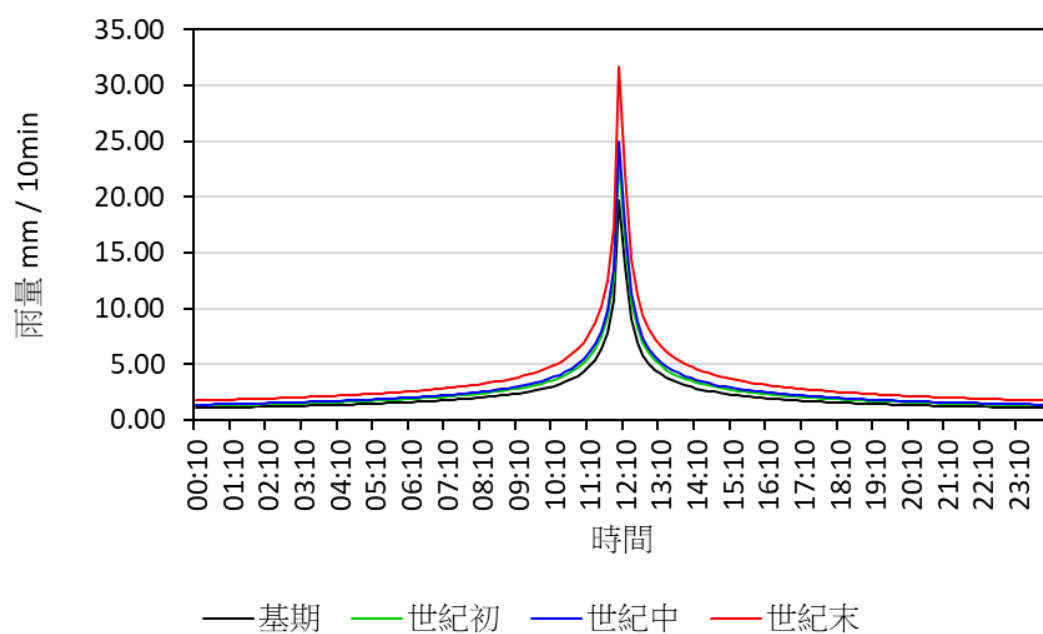


圖 66 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距雨型

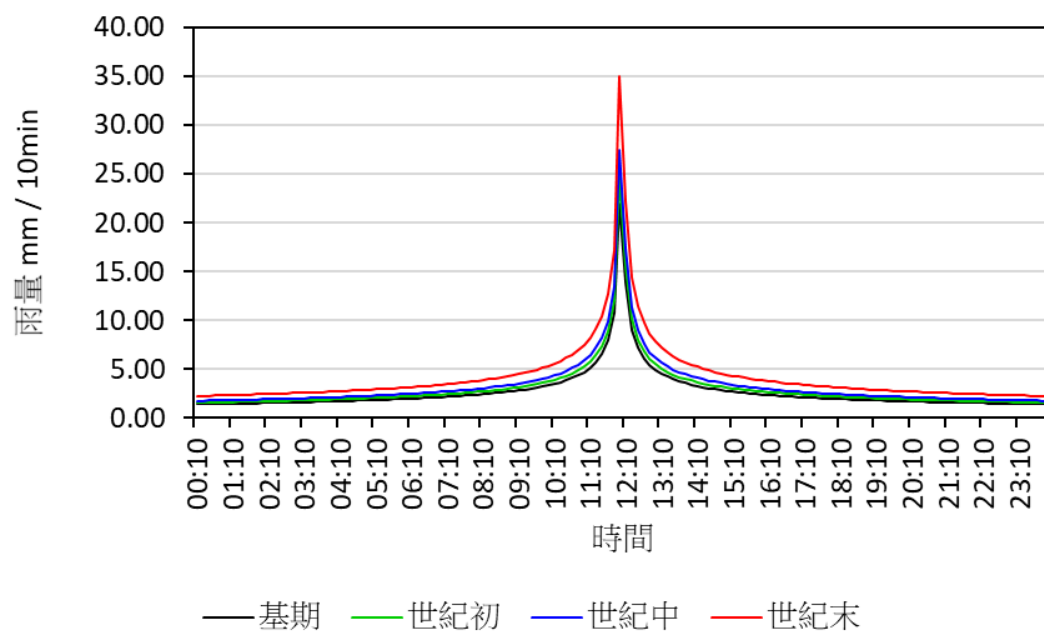


圖 67 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距雨型

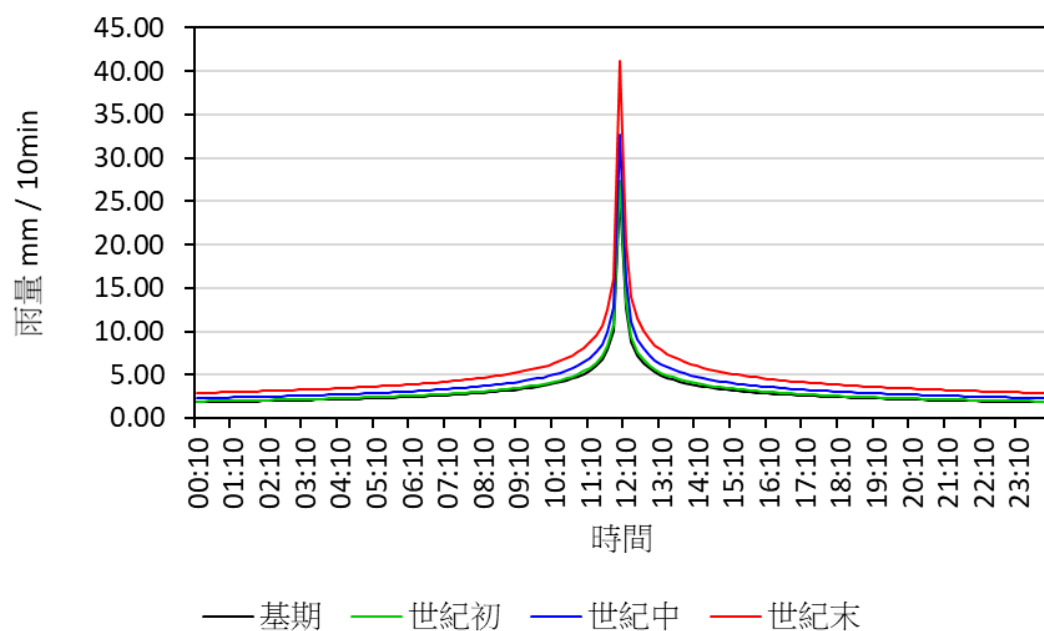


圖 68 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距雨型

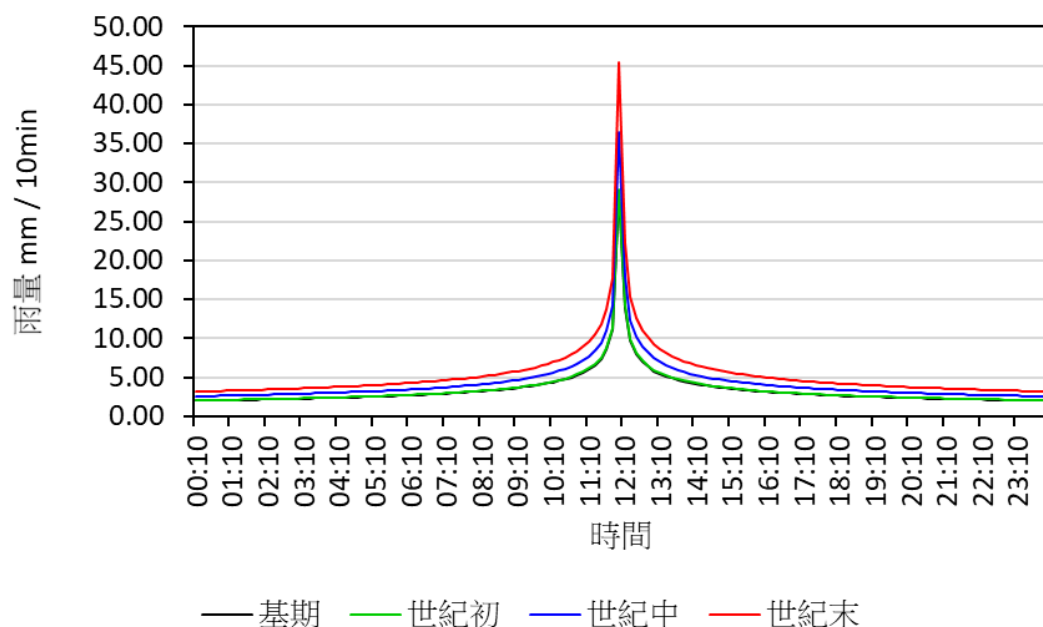


圖 69 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距雨型

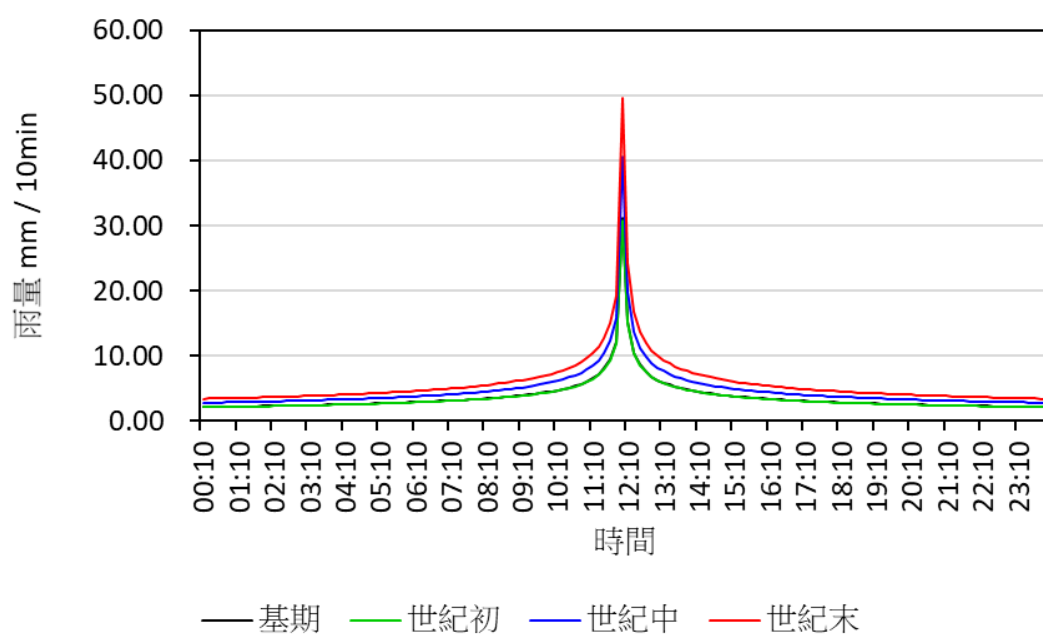


圖 70 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距雨型

二、土石流流量變化

RCP8.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量的結果如表 26 與圖 72~圖 77 所示。土石流洪峰流量變化趨勢與雨量變化趨勢一致。2 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世

紀末的增量分別為 47.5%、54.7%、105.8%。5 年重現期土石流洪峰流量在近未來、世紀中與世紀末的增量分別為 27.5%、39.6%、92.9%。5 年重現期土石流洪峰流量的增量與 10、25、50、100 年重現期距的增量相當。在溫室氣體高度排放的情境下，各高重現期的降雨會顯著增加。

表 26 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量比較表

重現期	基期 (cms)	近未來 (cms)	增減 (%)	世紀中 (cms)	增減 (%)	世紀末 (cms)	增減 (%)
2	129	191	47.5	200	54.7	266	105.8
5	147	188	27.5	205	39.6	284	92.9
10	166	196	17.7	227	36.8	313	88.4
25	192	208	8.4	264	37.6	355	84.7
50	220	226	2.9	306	39.0	397	80.3
100	248	244	-1.5	349	40.6	438	76.6

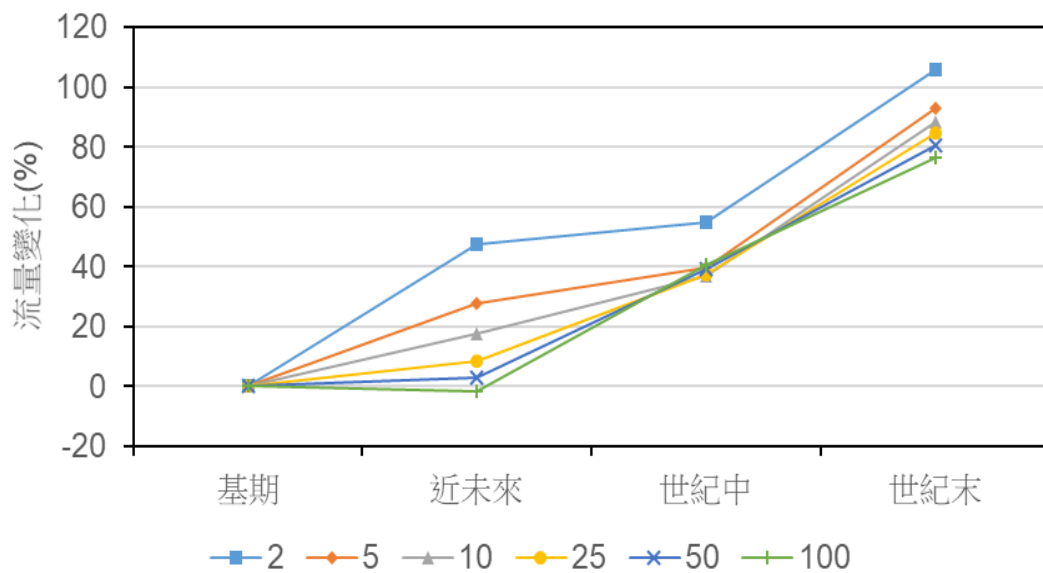


圖 71 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末土石流洪峰流量變化比較圖

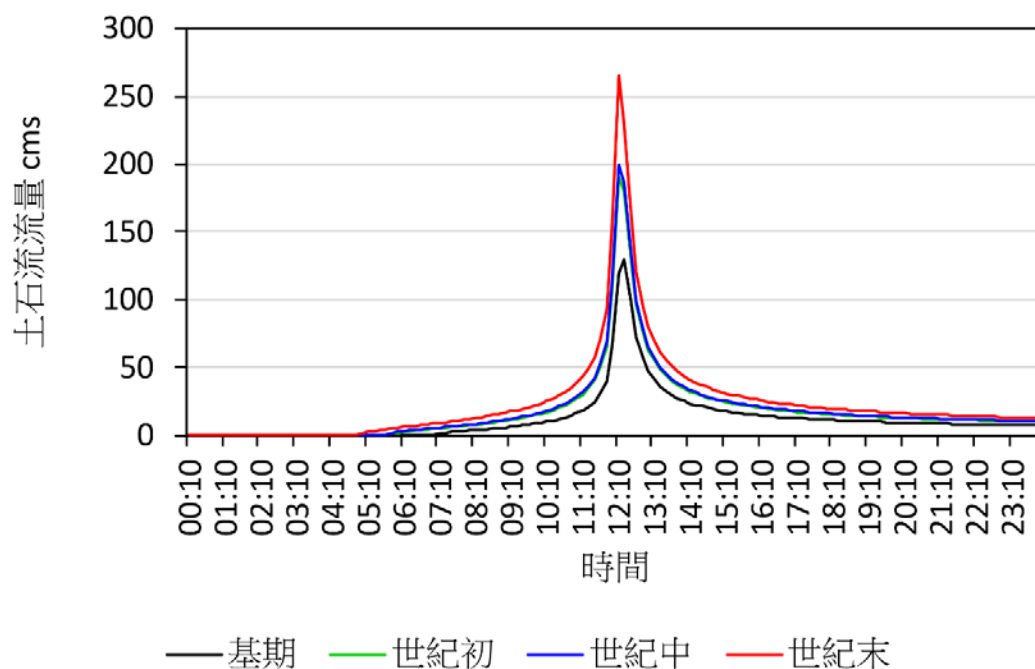


圖 72 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 2 年重現期距土石流流量歷線圖

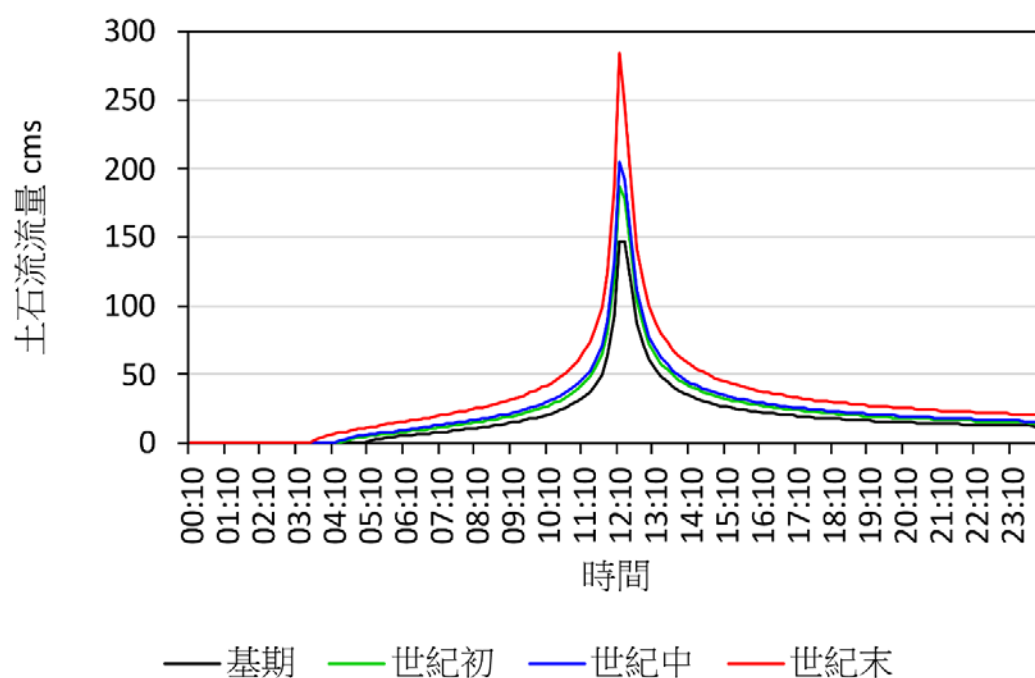


圖 73 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 5 年重現期距土石流流量歷線圖

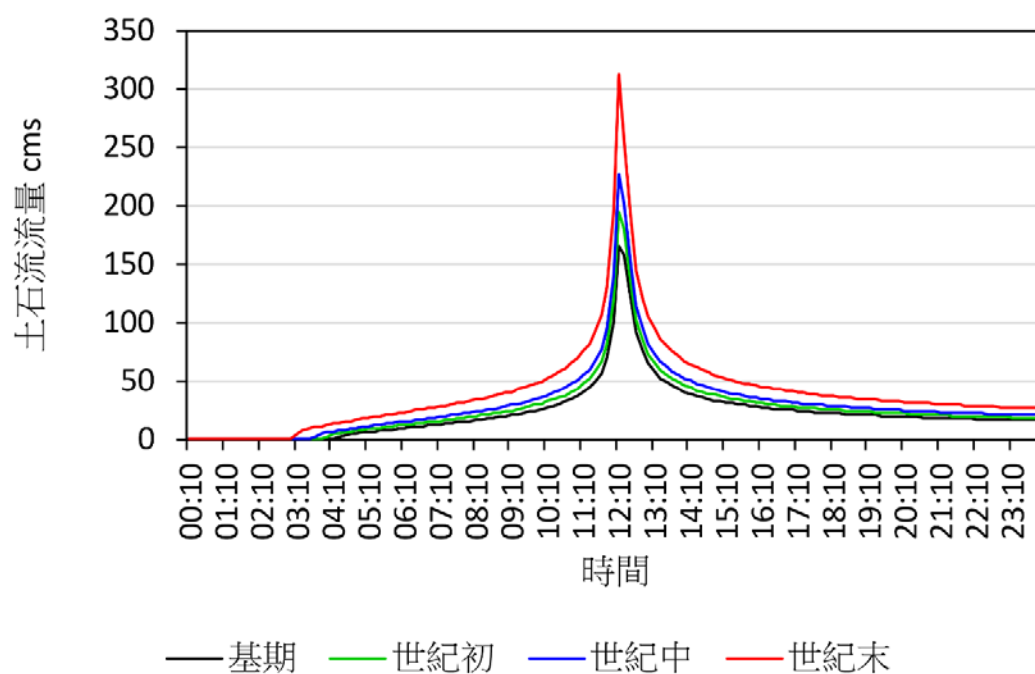


圖 74 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 10 年重現期距土石流流量歷線圖

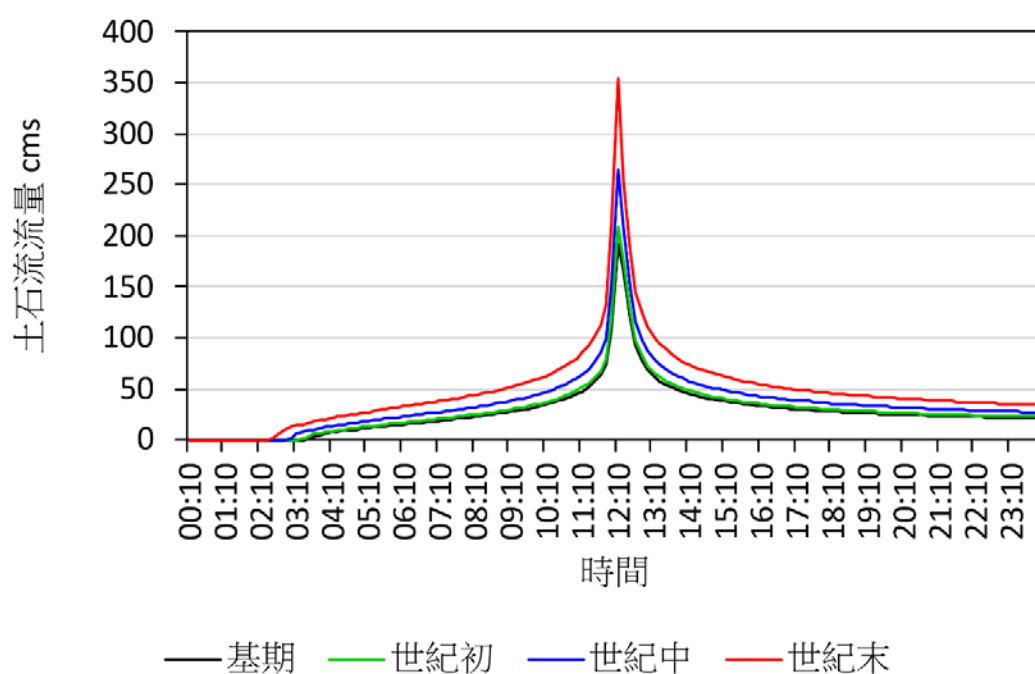


圖 75 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 25 年重現期距土石流流量歷線圖

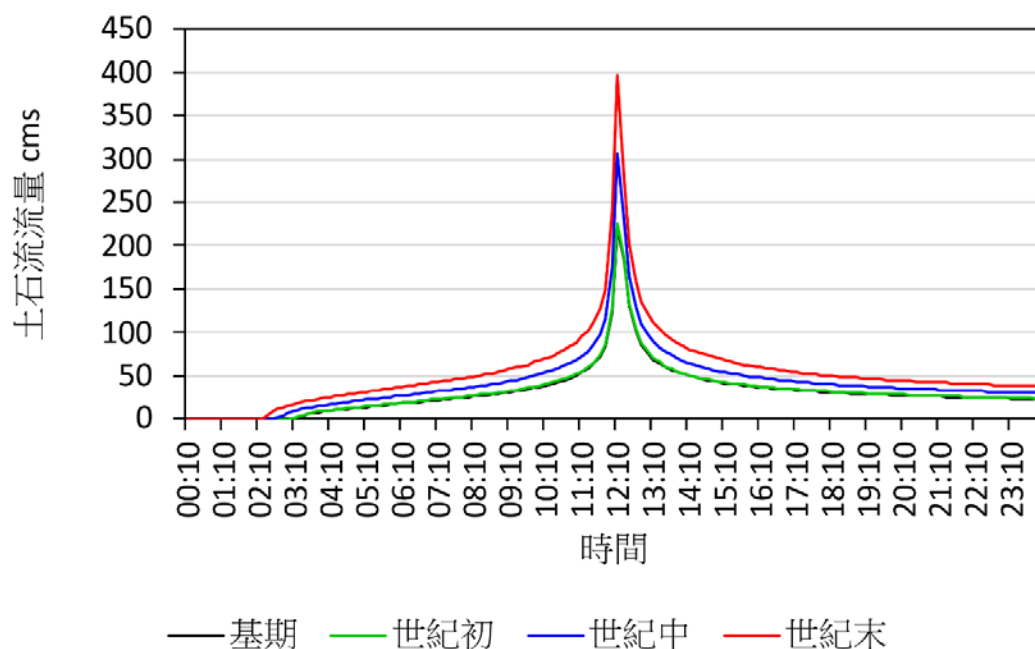


圖 76 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 50 年重現期距土石流流量歷線圖

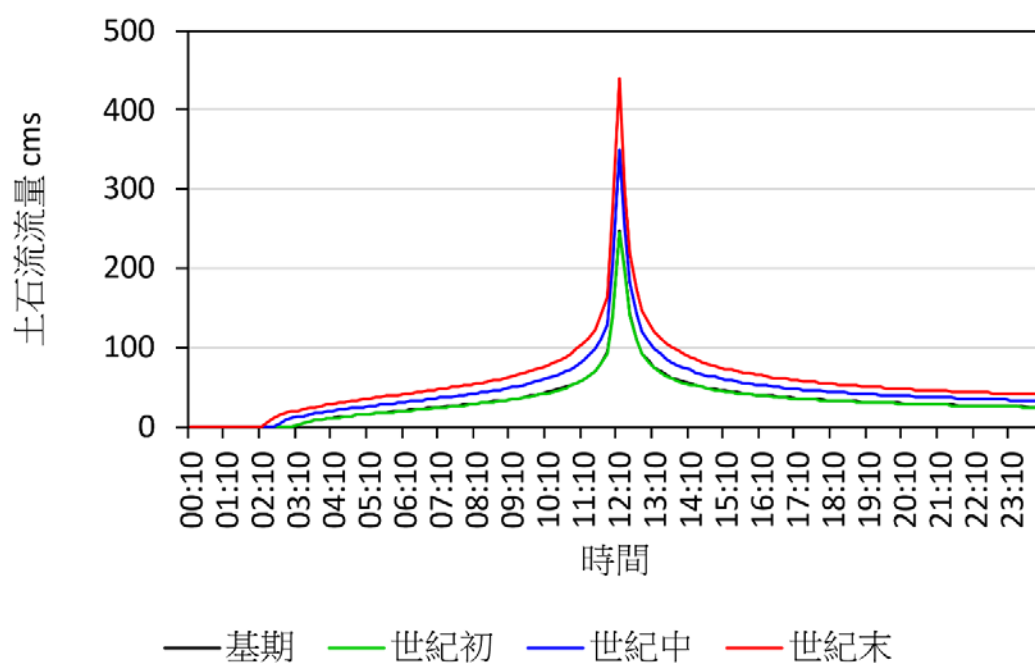


圖 77 RCP 8.5 近未來、世紀中與世紀末 100 年重現期距土石流流量歷線圖

第五節綜合比較

不同重現期距在不同情境下之土石流流量變化彙整如表 27 與圖 78~圖 83 所示。整體而言，以下幾點發現：

- 一、氣候情境越惡劣，流量增加的幅度就越大，特別是 RCP 6.0 與 RCP 8.5。RCP 4.5 會導致流量略為增加。RCP2.6 並不會導致流量增加。
- 二、RCP 6.0 與 RCP 8.5 越接近世紀末，增幅隨之擴大。RCP 4.5 會呈現緩慢增幅。RCP2.6 並不會導致流量增加，反而越接近世紀末，增幅會下降。
- 三、低重現期（出現頻率越高）的土石流流量增幅，會明顯大於高重現期（出現頻率越低）的土石流流量。以 RCP8.5 為例，2、5、10 年重現期的流量增幅約為 100%。25、50、100 年重現期的流量增幅約為 80%。從土石流防災觀點，這現象必須要特別注意。因為，低重現期事件的出現頻率越高，容易導致災損。

Huo and Li (2013)在中國陝西省一個典型土石流流域，採用 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)研究氣候變化情景下對河流流量的影響。該模型使用每日流量記錄進行校準與驗證。研究結果顯示在 2020 年與 2030 年的情景中，年溫度升高 0.6~0.9°C，季節性降水變化 12.6~18.9 毫米，對應的流量變化約為 0.62~3.67。吳亭燁 et al. (2017)以濁水溪流域內 40 條土石流潛勢溪流為案例，評估氣候變遷暖化情境 RCP8.5 情境下土方量之變化。雨量資料採用經動力降尺度與偏差校正後之降雨資料。採用 HEC-HMS 模擬流量，再以 FLO-2D 模擬與分析土石流衝擊及變化。研究結果顯示，21 世紀末之土砂量將增加的 11%。研究指出降雨型態改變將對於對土石流發生有直接影響。上述的研究與我們的研究結果是相當的。

表 27 不同重現期距在不同情境下之土石流流量變化

重現期	RCP	基期 (cms)	近未來 (cms)	增減 (%)	世紀中 (cms)	增減 (%)	世紀末 (cms)	增減 (%)
2	2.6	129	166	28.7	205	58.4	191	47.8
2	4.5	129	161	24.4	144	11.2	181	40.1
2	6.0	129	165	28.1	209	62.1	269	108.0
2	8.5	129	191	47.5	200	54.7	266	105.8
5	2.6	147	178	20.8	189	28.8	183	24.5
5	4.5	147	153	4.0	176	19.8	189	28.8
5	6.0	147	174	18.1	214	45.3	223	51.4
5	8.5	147	188	27.5	205	39.6	284	92.9
10	2.6	166	191	15.2	195	17.2	190	14.3
10	4.5	166	161	-3.2	200	20.6	202	21.5
10	6.0	166	191	15.2	232	39.8	253	52.2
10	8.5	166	196	17.7	227	36.8	313	88.4
25	2.6	192	214	11.0	206	4.0	202	2.0
25	4.5	192	172	-10.0	227	31.0	215	-5.0
25	6.0	192	220	14.2	262	36.3	301	56.8
25	8.5	192	208	8.4	264	37.6	355	84.7
50	2.6	220	240	8.8	240	1.8	220	-0.1
50	4.5	220	196	-10.8	264	19.9	241	9.5
50	6.0	220	252	14.4	296	34.4	351	59.6
50	8.5	220	226	2.9	306	39.0	397	80.3
100	2.6	248	265	6.8	242	-2.4	238	-4.3
100	4.5	248	218	-12.2	296	19.3	262	5.7
100	6.0	248	286	15.3	330	33.1	402	62.0
100	8.5	248	244	-1.5	349	40.6	438	76.6

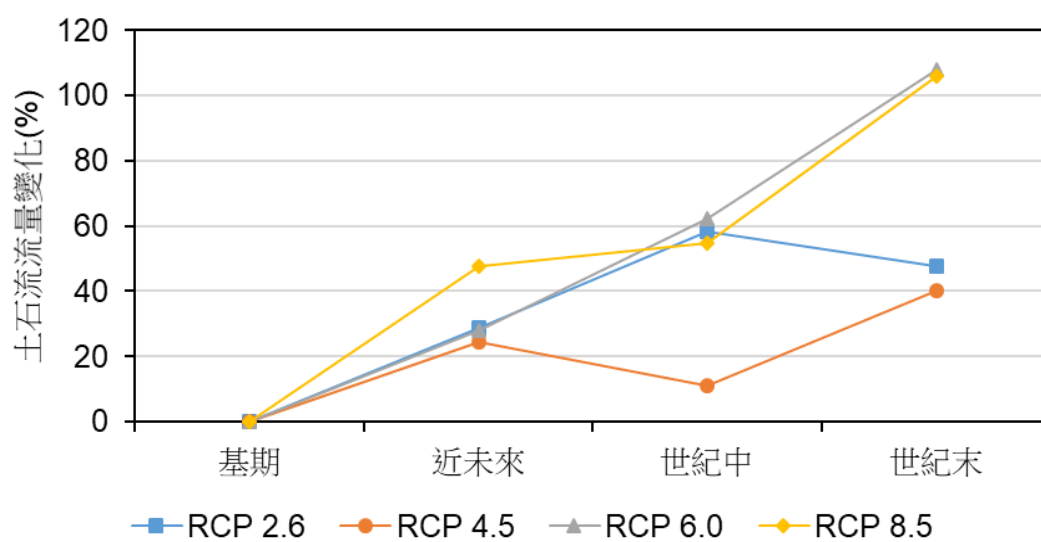


圖 78 2 年重現期距不同情境下土流流量變化

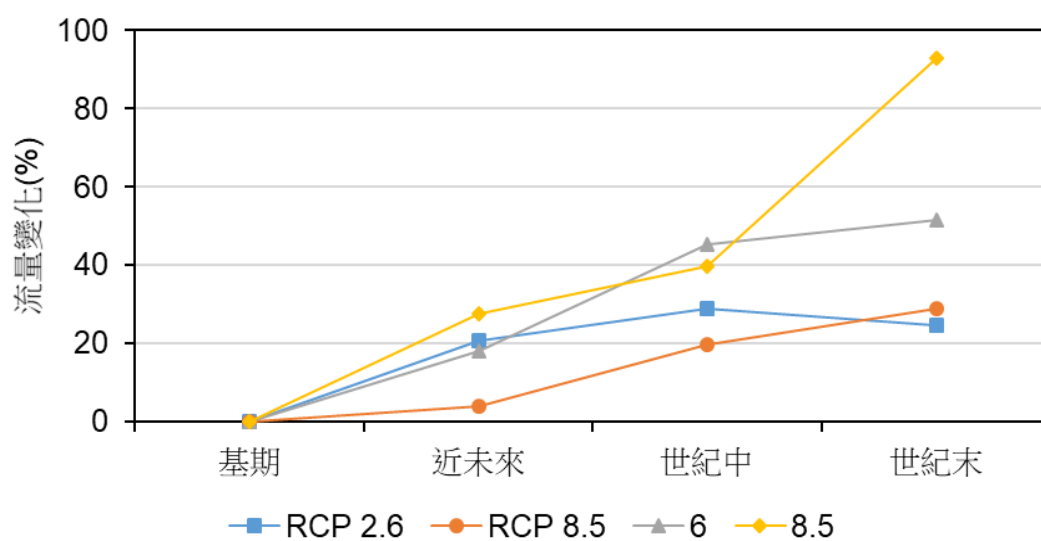


圖 79 5 年重現期距不同情境下土流流量變化

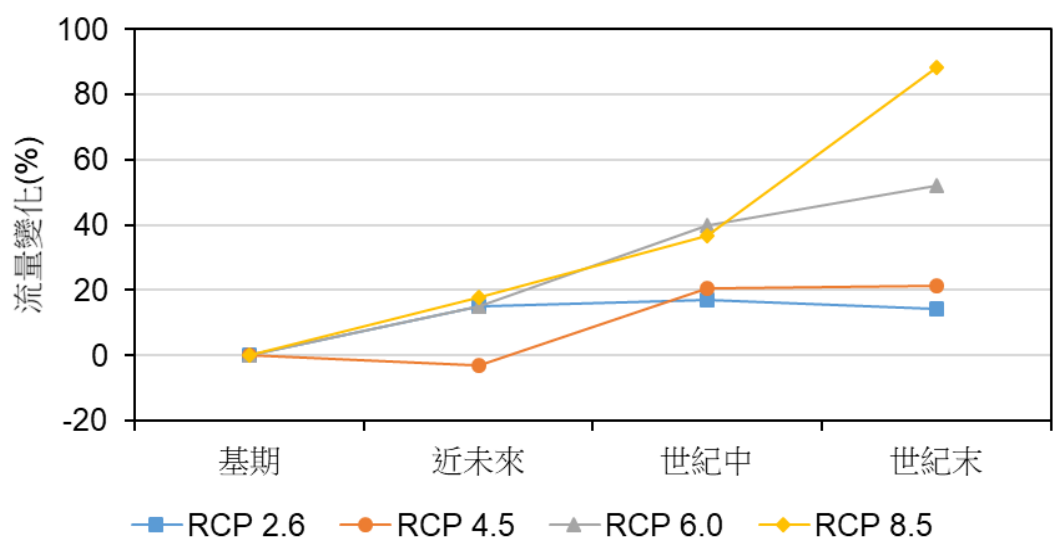


圖 80 10 年重現期距不同情境下土流流量變化

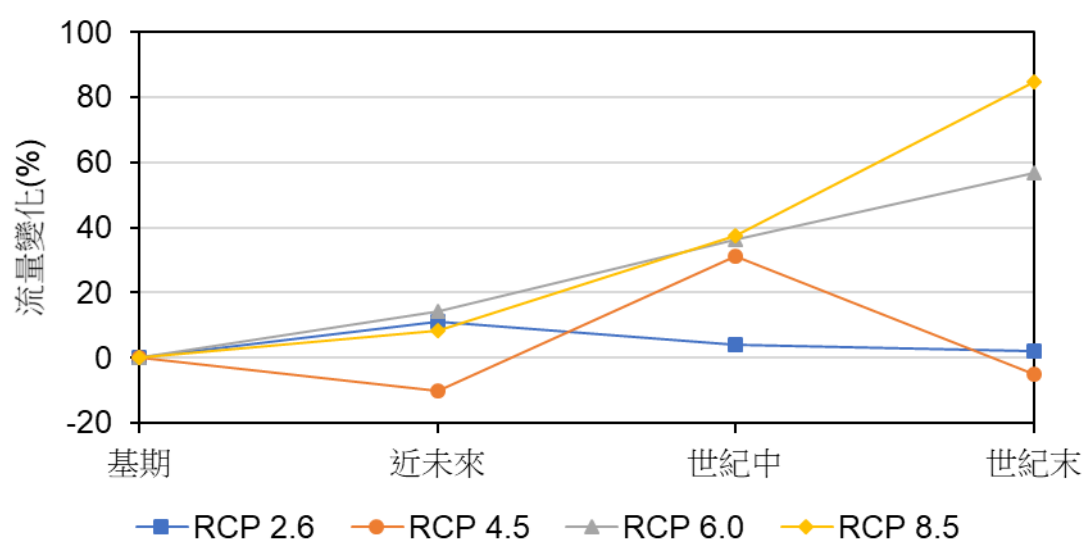


圖 81 25 年重現期距不同情境下土流流量變化

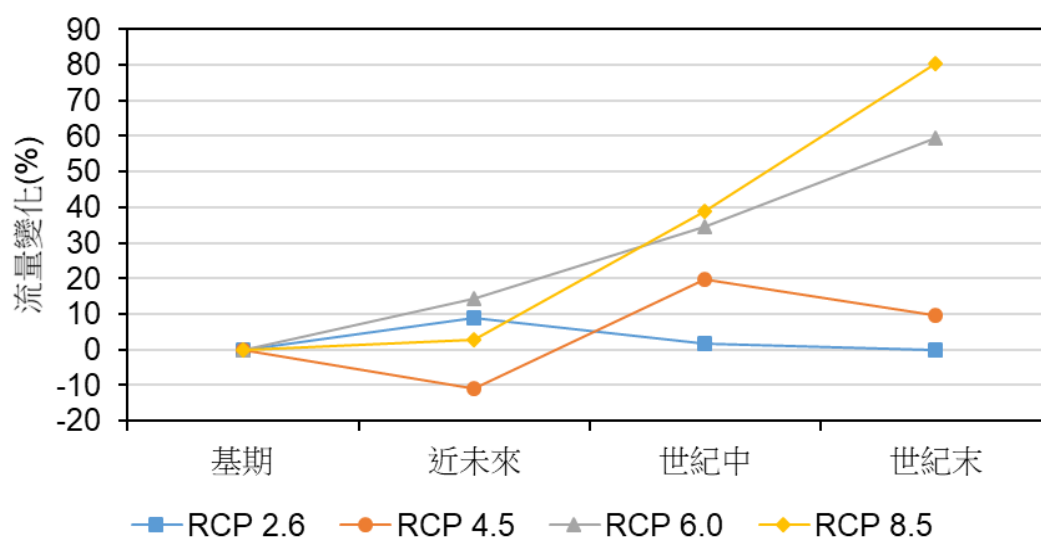


圖 82 50 年重現期距不同情境下土流流量變化

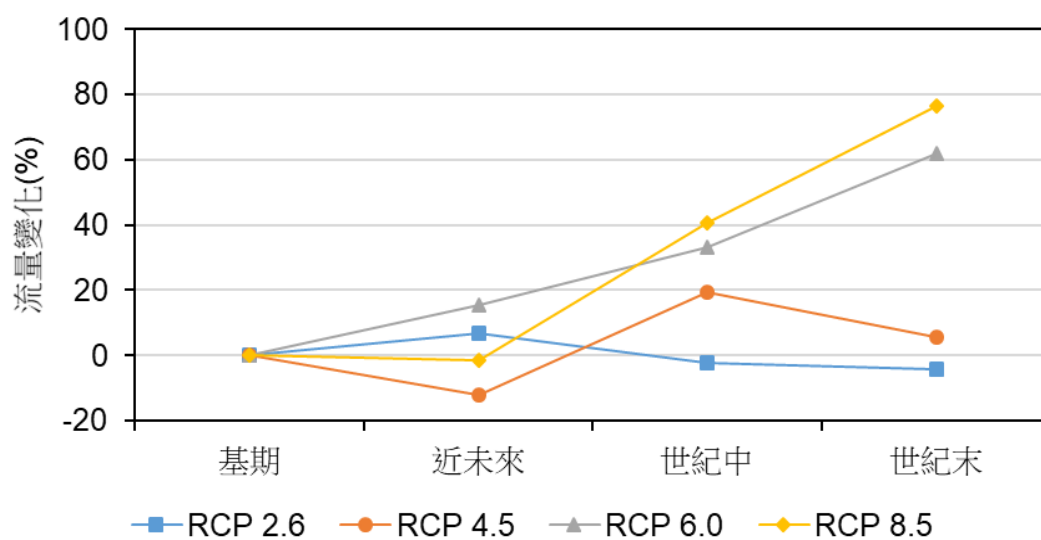


圖 83 100 年重現期距不同情境下土流流量變化

第7章 氣候變遷調適策略建議

第一節 氣候變遷下土石流潛勢溪流流量變化可能造成之影響

一、清水流量與土石流流量影響

水土保持技術規範涉及設計流量之條文如表 28 所示。該表顯示節制壩、野溪治理、坡地排水系統及滯洪設施等水土保持設施規劃設計均依據清水流量。因此，當氣候變遷導各重現期距洪峰流量改變時，勢必會影響節制壩、野溪治理、坡地排水系統及滯洪設施等水土保持設施之功能。

二、土石流影響範圍影響

目前水土保持局土石流影響範圍劃設流程如圖 84 所示。計算個重現期距雨量，輸入降雨-逕流模式以計算溢流點之清水流量。再將清水流量乘以放大因子(bulking factor, BF)，以計算土石流之流量歷線。並且，輸入土石流及其他材料之相關參數。運用 FLO-2D 進行土石流之運動及堆積模擬，以求得土石流堆積區之最大流動深度與最大流速分布，並且劃設土石流影響範圍。因此，當氣候變遷導各重現期距洪峰流量改變時，勢必會影響清水流量，進而影響土石流量。最終，導致土石流影響範圍的改變。建議可以選擇一研究地區，以 TCCIP 統計降尺度日降雨資料為基礎，計算基期、近未來、世紀中、世紀末之各重現期距雨量。再將各重現期距之雨量輸入中集水區之 FLO-2D 模式，計算土石流影響範圍之變化。

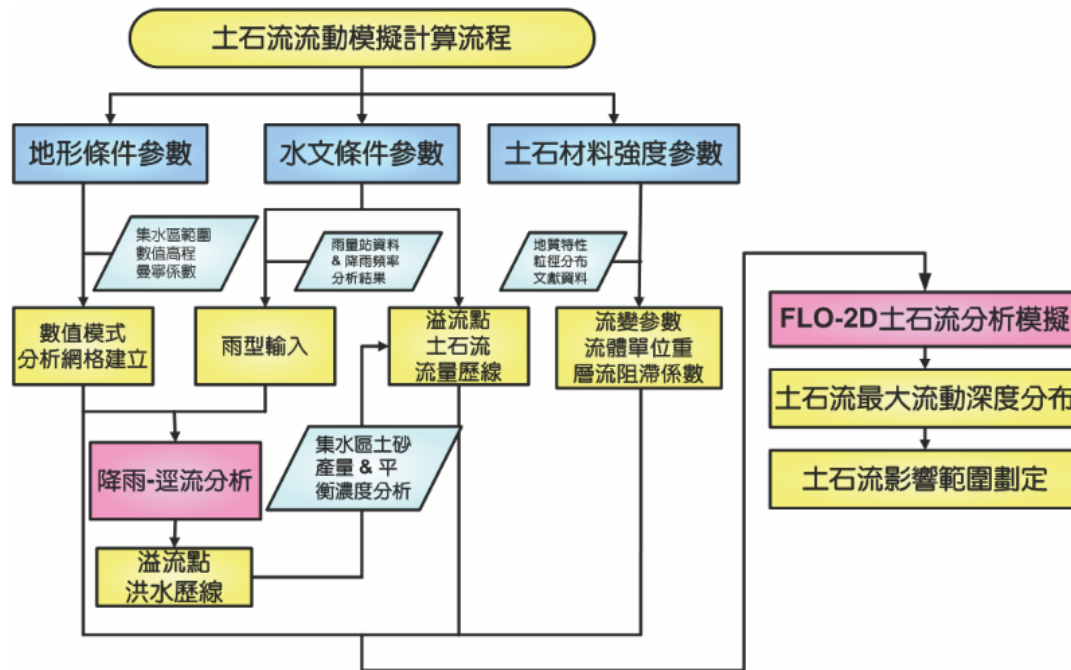
三、低重現期土石流事件影響

低重現期 (出現頻率越高)的土石流流量增幅，會明顯大於高重現期 (出現頻率越低)的土石流流量。以 RCP8.5 為例，2、5、10 年重現期的流量增幅約為 100%。從土石流防災觀點，必須特別注意，若 2、

5、10 年重現期的流量增加一倍，可能會導致土石流爆發的閾值，導致土石流的發生。並且由於出現頻率越高，會導致土石流災害發生頻仍。因此，應改採取相關調適策略，以降低災害損失。

表 28 水土保持技術規範涉及設計流量之條文

條文	內容
第 52 條	（節制壩之規劃設計） 節制壩之規劃設計要點如下： 一、設計洪水量：耐久性壩採用重現期距二十五年之降雨強度計算之，臨時性壩得用重現期距十年之降雨強度計算之。 二、計畫淤砂坡度應依上游土砂粒徑及溝床沖蝕狀況設計之。
第 65 條	（野溪治理設計洪水量估算） 野溪治理之設計洪水量估算如下： 一、防砂壩、潛壩、整流工程、堤防、護岸及丁壩等以重現期距五十年之降雨強度計算。 二、排洪斷面除出水高外，尚應考量洪水所挾帶泥砂、漂流木而加大其斷面百分之十至百分之五十。 三、土石流潛勢溪流之防治，應視實際需要，考量土石流之影響。
第 83 條	（坡地排水系統之設計洪水量） 排水系統之設計洪水量原則如下： 一、坡地農地內排水系統之設計洪水量，以重現期距十年之降雨強度計算。其他非農業使用以重現期距二十五年之降雨強度計算。 二、排水設施之斷面應參酌泥砂含量加大斷面。 三、開發區或構造物有被其上游逕流冲刷之虞者，宜在其上游處設置截水溝。 四、排水設施避免設置在填土區上，否則應加強基礎之處理。 五、排水設施縱坡度較大而有滑動之虞者，應設置止滑樁或截水牆。
第 95 條	（滯洪設施規劃設計原則） 山坡地開發利用應設置滯洪設施，並得將土地利用、建蔽率、鋪面情形等納入檢算，調整酌減滯洪量。 滯洪設施之規劃設計原則如下： 一、滯洪設施設置位置得依當地之地形、地質條件及土地利用情形等調整。 二、滯洪設施一般設置於開發區排水路之下游較低處，以利雨水自然匯入。 三、基地開發後之出流洪峰流量應小於入流洪峰流量百分之八十，並不得大於開發前之洪峰流量。且不應超過下游排水系統之容許排洪量。 四、滯洪設施之最大洪峰流量，得依合理化公式估算之。其入流歷線至少採重現期距五十年以上之洪水，出流歷線則為重現期距二十五年以下之洪水。滯洪設施對外排放之洪峰流量，不得超過開發前之洪峰流量。



資料來源：林德貴 et al. (2008)

圖 84 土石流影響範圍劃定流程

第二節 氣候變遷調適策略建議

一、將氣候變遷調適納入水土保持技術規範

本研究顯示氣候變遷導會很明顯且直接導致土石流潛勢溪流各重現期距洪峰流量改變。因此，如果依照歷史水文資料，設計相關水土保持設施時，會面臨到水土保持設施保護標準降低之課題，並導致制壩、野溪治理、坡地排水系統及滯洪設施等水土保持設施之功能下降。目前水土保持技術規範並未訂有氣候變遷相關條文，因此未來應將氣候變遷調適納入水土保持技術規範。

二、高風險土石流潛勢溪流土石流影響範圍檢討

本研究結果顯示氣候變遷導各重現期距洪峰流量改變時，勢必會影響清水流量，進而影響土石流流量，導致土石流影響範圍的改變。因此，對於風險較高之土石流潛勢溪流應納入氣候變遷情境，以評估土石流影響範圍改變的情況，並配合範圍調整，以保全周邊之居民。

三、集水區流量分配

目前無因次降雨與合理化公式經常用在水土保持工程規劃與設計。然而，上述的方法只能計算點的流量，無法以整體集水區觀念分配集水區流量。如要規劃集水區流量的分布，建議可以參考本報告所採用之方法。並且，配合滯洪池或農塘等設施，承擔高地逕流。

參考文獻

- Alexander, L.V., Arblaster, J.M., 2009. Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. *International Journal of Climatology*, 29(3): 417-435. DOI:10.1002/joc.1730
- Beguería, S., Angulo-Martínez, M., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., El-Kenawy, A., 2011. Assessing trends in extreme precipitation events intensity and magnitude using non-stationary peaks-over-threshold analysis: a case study in northeast Spain from 1930 to 2006. *International Journal of Climatology*, 31(14): 2102-2114. DOI:10.1002/joc.2218
- Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T., 2004. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and planetary change*, 40(1): 141-149.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M., Nanni, T., 2000. Precipitation intensity trends in northern Italy. *International Journal of Climatology*, 20(9): 1017-1031.
- Brunetti, M., Colacino, M., Maugeri, M., Nanni, T., 2001. Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *International Journal of Climatology*, 21(3): 299-316. DOI:10.1002/joc.613
- Chang, C.-P., Yang, Y.-T., Kuo, H.-C., 2013. Large Increasing Trend of Tropical Cyclone Rainfall in Taiwan and the Roles of Terrain. *Journal of Climate*, 26(12): 4138-4147. DOI:10.1175/jcli-d-12-00463.1
- Chen, J.-M., Li, T., Shih, C.-F., 2010. Tropical Cyclone– and Monsoon-Induced Rainfall Variability in Taiwan. *Journal of Climate*, 23(15): 4107-4120. DOI:10.1175/2010jcli3355.1
- Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G., Clague, J., 2011. Impacts of climate change on debris flow occurrence in the cordillera of Western Canada and the European Alps, *Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. Mechanics, Prediction and Assessment*. Padua, Italy, pp. 17.
- Chien, F.C., Kuo, H.C., 2011. On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D5).
- Chou, C., Huang, L.-F., Tseng, L., Tu, J.-Y., Tan, P.-H., 2009. Annual Cycle of Rainfall in the Western North Pacific and East Asian Sector. *Journal of Climate*, 22(8): 2073-2094. DOI:10.1175/2008jcli2538.1
- Chu, P.-S., Chen, D.-J., Lin, P.-L., 2014. Trends in precipitation extremes

- during the typhoon season in Taiwan over the last 60 years. *Atmospheric Science Letters*, 15(1): 37-43. DOI:10.1002/asl2.464
- Costa, A.C., Soares, A., 2009. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *International Journal of Climatology*, 29(13): 1956-1975. DOI:10.1002/joc.1834
- Deltares, 2017. SOBEK User Manual.
- Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate*, 14(7): 1568-1584.
- Ge, X., Li, T., Zhang, S., Peng, M., 2010. What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? *Atmospheric science letters*, 11(1): 46-50.
- Gobiet, A., Suklitsch, M., Heinrich, G., 2015. The effect of empirical-statistical correction of intensity-dependent model errors on the temperature climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10): 4055-4066.
- Hendricks, E.A. et al., 2011. Prediction and diagnosis of Typhoon Morakot (2009) using the Naval Research Laboratory's mesoscale tropical cyclone model. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(6): 5.
- Hirschberg, J. et al., 2020. Climate Change Impacts on Sediment Yield and Debris-Flow Activity in an Alpine Catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*.
- Huo, A., Li, H., 2013. Assessment of climate change impact on the stream-flow in a typical debris flow watershed of Jianzhuangcuan catchment in Shaanxi Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 69(6): 1931-1938.
- Jung, I.-W., Bae, D.-H., Kim, G., 2011. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. *International Journal of Climatology*, 31(3): 359-370. DOI:10.1002/joc.2068
- Karl, T.R., Knight, R.W., 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(2): 231-241.
- Klein Tank, A., Können, G., 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of climate*, 16(22): 3665-3680.
- Kunkel, K.E., Andsager, K., Easterling, D.R., 1999. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada. *Journal of climate*, 12(8): 2515-2527.
- Kunkel, K.E. et al., 2013. Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7): 1402-1408. DOI:10.1002/grl.50334

- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Kenawy, A., 2009. Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955-2006. *International Journal of Climatology*: n/a-n/a. DOI:10.1002/joc.1945
- Lee, C.-S., Wu, C.-C., Wang, T.-C.C., Elsberry, R.L., 2011. Advances in understanding the “perfect monsoon-influenced typhoon”: Summary from International Conference on Typhoon Morakot (2009). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 47(3): 213-222.
- Lenderink, G., Mok, H.Y., Lee, T.C., van Oldenborgh, G.J., 2011. Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones – Hong Kong and the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9): 3033-3041. DOI:10.5194/hess-15-3033-2011
- Li, M. et al., 2018. Impacts of future climate change (2030-2059) on debris flow hazard: A case study in the Upper Minjiang River basin, China. *Journal of Mountain Science*, 15(8): 1836-1850.
- Li, Z., Zheng, F.-l., Liu, W.-z., Flanagan, D.C., 2010. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961–2007. *Quaternary International*, 226(1-2): 92-100. DOI:10.1016/j.quaint.2010.03.003
- Lin, C.-Y., Tung, C.-P., 2017. Procedure for selecting GCM datasets for climate risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 28(1).
- Liu, B., Xu, M., Henderson, M., Qi, Y., 2005. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D8).
- Maraun, D., Osborn, T., Gillett, N., 2008. United Kingdom daily precipitation intensity: improved early data, error estimates and an update from 2000 to 2006. *International Journal of Climatology*, 28(6): 833-842.
- Maurer, E.P., 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change*, 82(3): 309-325.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470: 378. DOI:10.1038/nature09763
<https://www.nature.com/articles/nature09763#supplementary-information>
- Osborn, T.J., Hulme, M., 2002. Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796): 1313-1325.

- Osborn, T.J., Hulme, M., Jones, P.D., Basnett, T.A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International journal of Climatology*, 20(4): 347-364.
- Qian, W.-h., Lin, X., 2005. Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 90(3-4): 193-207.
- Schmidli, J., Frei, C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25(6): 753-771. DOI:10.1002/joc.1179
- Shiu, C.-J., Liu, S.C., Chen, J.-P., 2009. Diurnally Asymmetric Trends of Temperature, Humidity, and Precipitation in Taiwan. *Journal of Climate*, 22(21): 5635-5649. DOI:10.1175/2009jcli2514.1
- Stone, D.A., Weaver, A.J., Zwiers, F.W., 2000. Trends in Canadian precipitation intensity. *Atmosphere-Ocean*, 38(2): 321-347. DOI:10.1080/07055900.2000.9649651
- Su, B., Jiang, T., Jin, W., 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1-4): 139-151.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M., Parsons, D.B., 2003. The Changing Character of Precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9): 1205-1217. DOI:10.1175/bams-84-9-1205
- Tu, J.-Y., Chou, C., 2013. Changes in precipitation frequency and intensity in the vicinity of Taiwan: typhoon versus non-typhoon events. *Environmental Research Letters*, 8(1). DOI:10.1088/1748-9326/8/1/014023
- Turkington, T., Remaître, A., Ettema, J., Hussin, H., van Westen, C., 2016. Assessing debris flow activity in a changing climate. *Climatic Change*, 137(1): 293-305.
- Winter, M. et al., 2010. Debris flow, rainfall and climate change in Scotland. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(4): 429-446.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., Lettenmaier, D., 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62(1): 189-216.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., Lettenmaier, D.P., 2002. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20): ACL 6-1-ACL 6-15.
- Yu, P.-S., Yang, T.-C., Kuo, C.-C., 2006. Evaluating Long-Term Trends in Annual and Seasonal Precipitation in Taiwan. *Water Resources Management*, 20(6): 1007-1023. DOI:10.1007/s11269-006-9020-8
- 吳亭燁, 李欣輯, 陳永明, 2017. 氣候變遷資料應用於土石流衝擊與

- 土方量之推估. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 48(4): 163-174.
- 李明熹, 廖怡雯, 郭峯豪, 2017. 運用 TaiWAP 評估高屏溪集水區未來情境之降雨量與降雨沖蝕指數. *農業工程學報*, 63(4): 50-64.
- 林德貴 et al., 2008. 土石流流動模擬技術於災害風險區劃定及災損評估應用之研究. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 39(4): 391-402.
- 范正成, 楊智翔, 張世駿, 黃效禹, 郭嘉峻, 2013. 氣候變遷對高屏溪流域崩塌潛勢之影響評估. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(4): 335-350.
- 翁叔平、楊承道, 2018. 臺灣地區日降雨網格化資料庫(1960~2015)之建置與驗證. *水利期刊*, 66(4): 33-52.
- 經濟部水利署, 2016. 台灣地區雨量測站降雨強度-延時Horner公式參數分析, 台中市.
- 經濟部水利署, 2019. 107年0823熱帶低氣壓豪雨淹水檢討報告, 台灣台中市.
- 經濟部水利署水利規劃試驗所, 2020. 出流管制技術手冊, 台灣台中市.

附錄

附錄一、計畫說明書審查意見及處理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
有關計畫書格式及經費審查部分:		
一	經整體預算審查及調整，本計畫請於補助經費 500,000 元內調整編列。	1.已依據審查意見調整計畫經費。
二	執行期限請修正為自 111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日(11.2 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.2 個月內編列。	2.已依據審查意見修正計畫執行期限。
三	3.請補填計畫英文名稱。	3.已依據審查意見補填計畫英文名稱。
四	4.六(五)請查填「實施地點」。	4.已依據審查意見查填實施地點。
五	5.「26-10 雜支」:額度以不超過預算總額 10%為原則，如確有需要超過 10%，應詳列數量明細補充說明。	5.已依據審查意見調整額度。
六	6.於「23-00 按日按件計資酬金」編列主持人費外，請補填附表一「薪俸、研究主持人費明細表」主持人費。	6. 已於「23-00 按日按件計資酬金」編列主持人費。並已補填附表一「薪俸、研究主持人費明細表」。
七	7.「養護費」應以與計畫直接相關者為限，屬年度例行之保養、維護費用應由執行單位自行負擔不得編列。	7.「養護費」已刪除。
八	8.「計畫兼任助理人員」，以 2 人為限。	8. 已依據審查意見調整計畫兼任助理人員為 2 人。
為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分:		
一	題目名稱不妥，土石流潛勢溪流之流量變化依各場降雨之分佈、強度、時間之不同而異，宜釐清主題。	已依據審查意見修改計畫名稱為「氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢評估」。
二	AR5 之預測模式在對未來氣候作全球大區域、大尺度之預測，將之降尺度並作為小集水區經常性之降雨預測其雨量，如何修正微地形、微氣候之影響，宜有明確之論述與方法。	本計畫將採用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaption Knowledge Platform, TCCIP)發布之統計降尺度日資料，資料解析網格為 5 公里x5 公里。該降尺度方法係以歷史觀測資料為基礎，結合模式同一時期之歷史模擬資料，以建立兩者之統計關

項次	審查意見	回覆辦理情形
		係。最後，將此統計關係應用於未來情境之推估。
三	DF033 潛勢溪流為後旦溪之支流（龜丹溪），故其集水區及流量算法應以水保局之公告範圍為準，目前本計畫之範圍包含整個後旦溪。	已修正本計畫範圍為 DF033 土石流潛勢溪流(龜丹溪)。集水區劃設與流量算法將以水保局之公告範圍為準。
四	氣候變遷之情境對於降雨雨型設計參數或 SCS-CN 之參數有何影響宜更深入探討。	本計畫主要係評估氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢。在目前的評估流程中，主要探討日雨量改變，導致流量變化之趨勢評估。降雨雨型設計參數與 SCS-CN 之參數在本計畫中將設定為定值。氣候變遷之情境對於降雨雨型設計參數或 SCS-CN 之參數課題，亦甚為重要，建議納入後續研究課題。
五	建議分析流量改變與土石流發生頻率或規模之關係。	本計畫主要係評估氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢。流量改變導致土石流發生頻率或規模改變之關係，亦甚為重要，建議納入後續研究課題。
六	氣候變遷與土石流流量變化有研究之必要。	感謝委員對於本計畫構想之支持。
七	IPCC 已發表 AR6 報告，建議採更新資料。	目前 NCDR 正進行 AR6 之統計降尺度工作，預計 2022 年上半年前可以完成所有統計降尺度模式的模擬。待 NCDR 發布相關資料後，本計畫將採用最新資料。
八	SOBEK 模式是否適用於土石流流量計算，其適用性如何？應予說明。	SOBEK 模式目前已廣泛應用於台灣河川流量計算之實務作業。本計畫主要係評估氣候變遷下土石流潛勢溪流流量長期趨勢。因此，SOBEK 模式是可以適用的。但如果要模擬土石流發生時的高含砂水流，SOBEK 模式就不適合，必須要採用其他模式。
九	本計畫採用方式，是否需有較精細之地形資料配合？	目前 DEM 採用 20 m*20 m 網格解析度即可。如有需更精細之 DEM，將依規定申請。
十	模擬成果如何應用、推廣於不同土石流潛勢區？	本計畫主要建立一個完整的評估流程，可以供其他土石流潛勢溪流參考採用。
十一	本計畫區是否以歷史流量觀測資料驗證？	龜丹溪下游為後旦溪，水利署設有竹圍橋水位站。因此，本計畫將以歷史水位觀測資料，進行模式檢定與驗證。

附錄二、期初審查會議意見及處理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、周憲德委員		
一	1. 請補充集流時間 T_c 及累積有效降雨量 P_e 及有效降雨量 R 之差異及如何計算。	1. 利用公式(13)計算 T_{lag} ，再利用公式(15)計算 T_c 。利用公式(12)計算 S ，再利用公式(11)計算 P_e 。將 P_e 帶入公式(17)的 R 即可計算出流量。
二	2. 如何評估氣候變遷下之流量變化？是否可應用於短延時(3-6 小時)之降雨分析？	2. 本計畫利用 NCDR 提供之統計降尺度日降雨量，分析基期、近未來、世紀中、世紀末個重現期之雨量。再利用 HORNER 公式合成雨型。之再輸入 SOBEK 模式，即可計算基期、近未來、世紀中、世紀末各重現期之流量。目前 NCDR 提供之統計降尺度為日雨量資料，因此無法應用於短延時(3-小時)之降雨分析，本計畫以分析 24 小時雨量為主。
三	3. 不同之溪流流量預測對於土石流潛勢溪流之土石流發生之趨勢演變及相應之調適策略有何關連？建議於期中或期末報告補充說明。	3. 相關建議已於第七章說明。
二、劉正千委員		
一	1. 報告書中沒有交代為何選擇龜丹溪集水區作為研究區域？	1. 會選擇龜丹溪主要是兩個原因。第一龜丹溪曾經於卡玫基颱風爆發土石流。第二原因為水利署於龜丹溪下後旦溪設有水位觀測站。因此，相關觀測數據可以用於模式檢定與驗證。
二	2. 龜丹溪集水區地質分布圖顯然太簡化，使用這樣的圖資真的有幫助嗎？建議要詳加討論和說明。	2. 已依據委員意見修改圖，並且詳加說明。
三	3. P-12 和 P-14 都提到了後旦溪，是誤植嗎？	3. 是誤植，已經修改。
四	4. SOBEK 模式要如何決定所使用的各個參數值？空間分布關係為何？對結果影響為何？建議要詳加討論和說明。	4. SOBEK 集水區所使用之參數已經說明，並且列表並繪圖。並且模式也經過檢定驗證。效率係數超過 0.8，顯示模式是準確的。
三、張德鑫委員		
一	1. 目前期初報告中之雨量分析資	1. 本計畫利用 NCDR 提供之統計

項次	審查意見	回覆辦理情形
	料及採用 HORNER 之降雨強度公式，其均為利用歷史資料之推估所得，無針對降雨之時間變化趨勢進行 HORNER 公式變化之分析與探討，建議應加強不同重現期之降雨量變化趨勢此方面之方法論述。	降尺度日降雨量，分析基期、近未來、世紀中、世紀末個重現期之雨量。NCDR 提供之資料解析度只到日，並未到小時或是更小，無法進行 HORNER 公式變化之分析與探討，本研究採用固定雨型。本研究已依據委員建議加強不同重現期之降雨量變化趨勢此方面之方法論述。
二	2. 其降雨與逕流資料之模式驗證，是否僅採用蘇迪勒颱風與 2018.8.23 之熱帶性低氣壓降雨組體圖兩場暴雨進行模擬與水位驗證以調整參數，其規劃需調整包括那些水文或地文參數，及是否進行驗證。	2.SOBK 集水區所使用之參數已經說明，並且列表並繪圖。並且模式也經過檢定驗證。效率係數超過 0.8，顯示模式是準確的。
三	3. 其流量趨勢變化與土石流發生之機會與程度等應有相關因果關係之鏈結，其為增加崩塌量體或者為流量增加造成之地表與河道沖刷所造成。	3.本計畫將利用土石流流量公式，將清水流量轉換為土石流流量。
四	4. 目前選用之 SOBEK 模式是否已取得版權或授權書。	4.逢甲大學已採購 SOBEK 軟體。
五	5. 在流量推估中是採用短延時強降雨之雨型、或採用 24 小時之長延時模擬。	5.目前 NCDR 提供之統計降尺度為日雨量資料，因此無法應用於短延時(3-小時)之降雨分析，本計畫以分析 24 小時雨量為主。
李明熹委員		
一	1.請說明 SOBEK 模式之適用性。	1.SOBK 可以整合河川、區域排水、雨水下水道、農田排水、坡地排水等，並可同時計算不同水利建造物，例如橋樑、涵洞、閘門、堰、滯洪池、農塘等，將一維之計算節點與二維之計算網格間進行流量交換計算。龜丹溪集水區多為山坡地，SOBEK 模式仍適用此地形。SOBEK 模式經過檢定驗證。效率係數超過 0.8，顯示模式是準確的。
二	2.逕流量之長期趨勢評估如何用在土石流流量？	3.本計畫將利用土石流流量公式，將清水流量轉換為土石流流量。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	3.日雨量資料是否為短延時資料？	4.目前 NCDR 提供之統計降尺度為日雨量資料，因此無法應用於短延時之降雨分析，本計畫以分析 24 小時雨量為主。
四	補充說明為何選用龜丹溪為研究區域。	會選擇龜丹溪主要是兩個原因。第一龜丹溪曾經於卡玫基颱風爆發土石流。第二原因為水利署於龜丹溪下後旦溪設有水位觀測站。因此，相關觀測數據可以用於模式檢定與驗證。
五	可參考李明熹等人(2017)，農業工程學報，63 卷 4 期，P50~64	感謝委員，已列於文獻回顧。
五、黃效禹委員		
一	SOBEK 模式之使用條件及相關限制條件，建議先予以說明。是否會有僅能演算高含砂水流，當達到土石流之狀態是否仍適用。	SOBEK 目前主要是計算清水流。但計算出來的結果可以利用土石流流量公式將清水流轉換成土石流流量。目前水土保持局亦採用此方法計算。
二	水保局做土石流模擬較常用 FLOW-2D 文獻回顧亦有提列，建議可以做比較。	目前水土保持局對於土石流影響範圍係先計算出溪流清水流量。再利用土石流流量公式，將清水流流量轉換成土石流流量。決定土石流溢流點後，利用 FLOW-2D 計算土石流影響範圍。在本研究 SOBEK 主要適用溪流清水流量與土石流流量。未來研究將會以一個地區為範例，結合 SOBEK 與 FLOW-2D。
三	本案所獲得結果未來可如何應用？建議於期中報告時補充。	相關建議已於第七章說明。

附錄三、期中報告書審查意見及處理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	請補充龜丹溪歷年之土石流事件之災情照片及發生災害位置之圖示。文中 (P7) 說明發生原因是溪水爆漲所致，是否為洪水或土石流事件，上游是否有崩塌地，亦請補充說明。	歷年龜丹溪最大土石流事件為卡玫基颱風，發生時間為 97 年 7 月 16~18 日。上游有二處崩塌地。相關紀錄登載於土石流防災資訊網。已於文中附上相關資料。(詳第三章第一節，第 3-3 頁)
二	請補充土地利用與 CN 曲線值對照表，或與表 12 結合以判釋 CN 之值及範圍。	已依據委員意見補上相關表格。(詳第五章第六節，表 13~17)
三	式 (12) 與式 (14) 相同，可略去式 (14)，而式 (13) 與式 (15) 二者是否一致，亦請檢核。如 P_e 與 R 可互換，建議統一代號及中文之文字說明，以利閱讀。	已依據委員意見修改。(詳第五章第六節，第 5-9 頁)
四	用 24 小時降雨及式 (17) 求得之洪峰流量可能會明顯低於短延時 (如 1-6 小時) 之洪峰流量，請檢核。	採用長延時所計算之洪峰流量是有可能小於短延時所計算之洪峰流量。本研究主要是評估氣候變遷對於流量之影響。因此統一採用 24 小時降雨延時計算。
五	土石流影響範圍 (圖 77) 如何量化及確定，請於文中補充說明。	以於文中補充說明(詳第七章第一節，第 7-1 頁)
六	本計畫針對龜丹溪集水區進行研究，唯土石流潛勢溪流的集水區面積遠小於龜丹溪集水區，研究成果是否可以直接適用於一般的土石流潛勢溪流。	本研究建立龜丹溪整體流域之水文與水理模式，因此，龜丹溪內任何一個子集水區或河段的流量均已被計算，可以適用於其他集水區面積更小之土石流潛勢溪流。
七	建議與其他類似研究計畫比較其差異性。	本計畫以於文中討論。(詳第六章第五節，第 6-34 頁)
八	題目為土石流潛勢溪流流量之評估，但文中似乎是預定用清水流轉換為土石流流量。(用一般土石流公式) 似乎無法突顯本區域 (龜丹溪之土石流流量特性?) 是否有機會針對地區特性發展土石流流量計算公式 (或方法)	目前國內與國際間有關土流流流量之計算，大多採用計算清水流流量後，再轉換成土石流流量。

附錄四、期末報告書審查意見及處理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	目前的模式是否能套用到其他集水區，成果可能為何？2 年的回歸期反而是最高的，會造成這樣的結果的原因可能為何？	本研究所採用的方法是可以套用在其他集水區。 低重現期（出現頻率越高）的土石流流量增幅，會明顯大於高重現期（出現頻率越低）的土石流流量。以 RCP8.5 為例，2、5、10 年重現期的流量增幅約為 100%。從土石流防災觀點，必須特別注意，若 2、5、10 年重現期的流量增加一倍，可能會導致土石流爆發的閥值，導致土石流的發生。並且由於出現頻率越高，會導致土石流災害發生頻仍。
二	研究所採用的水文水理分析方法與水保局目前常用的方法不同，這兩者有甚麼差別？	目前無因次降雨與合理化公式經常用在水土保持工程規劃與設計。然而，上述的方法只能計算點的流量，無法以整體集水區觀念分配集水區流量。如要規劃集水區流量的分布，建議可以參考本報告所採用之方法。