

應用時空分析技術提升土石流警戒雨量分區推估精度之 示範研究

摘要

現今台灣地區的土石流警戒發佈機制，係依照不同土石流潛勢溪流所在位置，藉由參考鄰近代表雨量站點的觀測值，進行有效累積雨量的計算，作為土石流警戒發佈之基礎。然而，雨量站點位置在空間上的分布，常有精度較差的問題，尤其是土石流容易發生的山區，常受限於交通、電力等影響，使其雨量站網密度不足。因此，參考雨量站之觀測降雨資訊，是否能真實反映集水區之降雨情況，確實有相當程度的不確定性。緣此，本研究透過整合性降雨推估模式發展之回顧與評估，採用貝氏最大熵法(BME)，將雨量測站觀測資料及雷達回波定量降雨預報之網格點雨量資料予以綜合，藉以建立一個整合性的雨量推估模式。

為瞭解 BME 技術所推估之降雨分布，於土石流預警的適用性，以土石流潛勢溪流集水區為基礎，探討不同網格資料所選取之參考雨量，並以歷史土石流發生事件及發布土石流紅色警戒事件等歷史資料，進行模式推估的準確性分析，其測試結果顯示，本研究所發展的整合性降雨模式，相較於以往使用鄰近參考雨量站進行有效降雨的計算，確實較能準確的提前預測土石流事件的發生，同時亦能降低誤報的機率，可提供日後防災應用之參考。最後，再進一步藉由推估雨量計算網格點的變異數，作為雨量站網分析的評估依據，藉以提出研究區域內調整或增設雨量站之建議，期未來能以此計畫成果為基礎，將分析方法應用於其他區域，整體性的提升土石流警戒的能力，達到保障人民安全的目標。

關鍵字：土石流警戒、整合性降雨推估模式、雨量站網分析

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起及目的	1-1
第二節 工作項目與內容	1-4
第三節 計畫架構、預期成果與預定工作進度	1-5
第二章 計畫區域背景資料蒐集與分析	2-1
第一節 研究區域內各單位雨量站之歷年降雨資料蒐集	2-1
第二節 研究區域內雷達觀測資料蒐集	2-5
第三節 歷年土石流發生事件及警戒事件之資訊彙整	2-8
第三章 整合性降雨推估模式之發展	3-1
第一節 降雨推估技術與方式之相關文獻回顧	3-1
第二節 確定性與不確定性資料之應用	3-9
第三節 整合性降雨推估模式之建置、測試與驗證	3-11
第四章 網格化降雨推估與降雨特性分區	4-1
第一節 計畫區域的網格化降雨推估	4-1
第二節 降雨特性解析與分區探討	4-6
第五章 警戒分區設定與警戒發佈機制	5-1
第一節 警戒模式	5-1
第二節 警戒發佈機制	5-3
第三節 警戒分區設定	5-4
第六章 降雨觀測網調整或新增區位建議	6-1

第一節 土石流雨量站網說明	6-1
第二節 雨量站調整效益評估	6-3
第七章 結論與建議	7-1
第一節 結論	7-1
第二節 建議	7-2
參考文獻.....	參-1
附錄	附-1
附錄一、期初審查意見及回覆表(本計畫).....	1
附錄二、期中審查意見及回覆表(本計畫).....	3
附錄三、期末審查意見及回覆表(本計畫).....	4

表次

表 1-1 預定工作進度甘梯圖	1-8
表 2-1 研究區域內各單位雨量站一覽表	2-3
表 2-2 研究區域外各單位雨量站一覽表	2-4
表 2-3 各單位雨量資料基礎資訊及申請方式	2-4
表 2-4 台灣氣象雷達一覽表	2-7
表 2-5 土石流觀測站現有設備及其土石流警戒基準值表	2-10
表 2-6 區域內土石流災害事件資訊彙整表	2-12
表 2-7 區域內警戒事件之資訊彙整	2-13
表 3-1 雷達降雨資料相關文獻彙整表	3-2
表 3-2 空間分布推估方法之評析	3-3
表 3-3 理論半變異元模式	3-5
表 4-1 曾發佈土石流預警之降雨事件	4-4
表 4-2 共變異數模式參數率定之 RMSE 值	4-6
表 4-3 觀測站對應土石流潛勢溪流及參考雨量站	4-7
表 4-4 土石流觀測站觀測雨量與推估雨量比較	4-10
表 4-5 投縣 DF226 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性	4-12
表 4-6 投縣 DF227 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性(1/2)	4-13
表 4-7 投縣 DF227 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性(2/2)	4-14
表 4-8 投縣 DF199 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性	4-15
表 4-9 投縣 DF167 及投縣 DF165 內估計點降雨特性	4-16
表 4-10 投縣 DF190 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性	4-17
表 5-1 109 年土石流警戒基準值明細表範例	5-2
表 5-2 歷史土石流事件雨量警戒評估-100 年 0719 豪雨	5-8
表 5-3 歷史土石流事件雨量警戒評估-103 年 0520 豪雨	5-9

表 5-4 歷史土石流事件雨量警戒評估-106 年 0601 豪雨	5-10
表 5-5 紅色警戒發佈時間比較	5-11
表 5-6 採用不同土石流分區之紅色警戒誤報率	5-13
表 6-1 設站評估網格權重正規化成果分析(1/3)	6-7
表 6-2 設站評估網格權重正規化成果分析(2/3)	6-8
表 6-3 設站評估網格權重正規化成果分析(3/3)	6-9

圖次

圖 1-1 愛玉子溪土石流事件之上中下游雨量觀測情形	1-2
圖 1-2 鄰近雨量站點之降雨資訊比對檢視	1-2
圖 1-3 計畫架構與流程	1-6
圖 2-1 雨量站分布圖	2-2
圖 2-2 雷達回波圖	2-5
圖 2-3 中央氣象局雷達觀測網分布圖	2-6
圖 2-4 神木土石流觀測站位置圖	2-9
圖 2-5 豐丘土石流觀測站位置圖	2-9
圖 2-6 上安及郡坑土石流觀測站位置圖	2-10
圖 3-1 試驗半變異元示意圖	3-5
圖 3-2 運用貝氏最大熵法於降雨空間分布推估之操作流程	3-11
圖 3-3 支持向量機資料分類	3-14
圖 3-4 區隔線	3-14
圖 3-5 SVR 之示意圖	3-16
圖 3-6 非線性 SVR 之示意圖	3-16
圖 3-7 共變異數圖形成果展示	3-18
圖 4-1 實測雨量站及雷達推估降雨點位分佈圖	4-2
圖 4-2 BME 模式交叉驗證示意圖	4-2
圖 4-3 陳有蘭溪集水區網格化降雨推估點位圖	4-5
圖 4-4 降雨量時空分布推估之結果展示	4-5
圖 4-5 神木土石流觀測站對應雨量估計點	4-7
圖 4-6 郡坑及上安土石流觀測站對應雨量估計點	4-8
圖 4-7 豐丘土石流觀測站對應雨量估計點	4-8
圖 4-8 土石流觀測站降雨量與 BME 模式推估降雨量迴歸關係圖	4-9

圖 5-1 警戒發布機制流程圖	5-3
圖 5-2 土石流特性分區	5-5
圖 5-3 陳有蘭溪流域土石流特性分區	5-5
圖 6-1 考慮土石流預警需求新設雨量站建議網格	6-2
圖 6-2 雨量站調整效益評估分布圖	6-6

第一章 前言

第一節 計畫緣起及目的

一、計畫緣起

現今台灣地區的土石流警戒發布機制，係依照不同土石流潛勢溪流所在位置，參考鄰近代表雨量站點的觀測值，進行有效雨量的計算，藉以作為土石流紅色警戒的發布依據。然而，以雨量站點在空間上的分布而言，仍有精度較差的問題，特別是在土石流容易發生的山區，受限於交通、電力等影響，雨量站網的涵蓋度更為不足。因此，土石流潛勢溪流的參考雨量站所觀測的降雨資訊，是否能真實反映集水區或是發生區之降雨情況，確實有相當程度的不確定性。再者，雨量站的觀測儀器是否正常運作，意即其監測數值是否反映真實狀況，或是儀器故障、人為影響等因素造成，在未釐清造成異常訊號之成因前，仍無法針對土石流發生與否進行準確之判斷。

綜合上述，歸納現今於土石流警戒發布時，在參考雨量值所面臨的問題，包括：(1) 雨量觀測值是否能代表土石流集水區或發生區的真實雨量、(2) 雨量站的即時觀測資料的可靠性等。其中，以神木村於 2011 年 7 月 13 日在愛玉子溪的土石流事件而言，發生前七日的累積雨量僅為 85mm(神木村站)。但透過更上游地區新高口站的雨量檢視可知，前七日雨量明顯超過神木村站甚多(約 2.5 倍)，如圖 1-1 所示。故合理推論，神木村站的雨量觀測值，與上游地區的降雨分布有較大的差異，因而也導致土石流預警的困難。再者，透過關聯性雨量測站於同一時間的觀測狀況而言，也可檢視降雨趨勢是否一致，亦即可利用鄰近雨量站的降雨變化趨勢來確核資料正確性，如圖 1-2 所示，檢視從上游到下游的鄰近雨量站，如一段時間內其降雨趨勢一致的情

況下，較有信心認為監測的數值是正確的；倘若在一段時間內降雨趨勢不一致的情況下，就有必要透過其他監測儀器的數值來確認雨量觀測資料是否正確。



圖 1-1 愛玉子溪土石流事件之上中下游雨量觀測情形

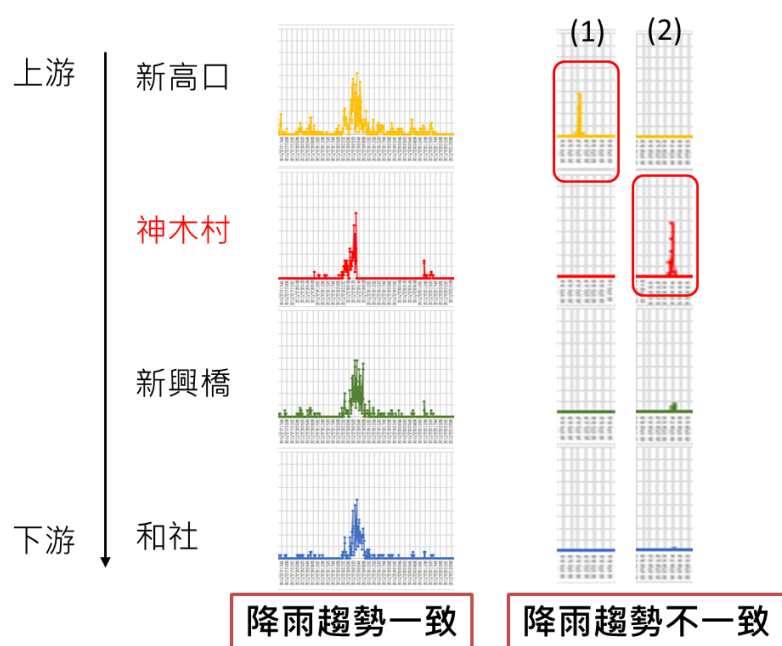


圖 1-2 鄰近雨量站點之降雨資訊比對檢視

二、全程計畫目標（本計畫為一年期計畫）

緣此，本計畫以陳有蘭流域內的六條土石流潛勢溪流為例，利用時空分析的創新技術，建立整合性降雨推估模式，並且在不改變原有土石流警戒發布相關機制的前提下，針對集水區的空間雨量進行推估，提供更準確或更能代表土石流潛勢溪流集水區的降雨資訊，藉以使警戒的發布能更有依據。其後，透過整合性降雨模式的發展，可得到集水區內各推估雨量值的不確定性大小，此一數值亦可提供予山區佈建或調整降雨觀測站網的重要參考依據。因此，期透過本計畫之執行達成預期的目標說明如下：

- (一)透過整合性降雨推估模式之發展，提升山區降雨觀測代表性，強化土石流警戒發布的可靠性。
- (二)降雨特性與警戒分區的設定，提供空間尺度上，更精準的土石流警戒發布機制，給予區域性之防災應變建議。
- (三)警戒區域雨量觀測站網之檢討，提供觀測站點調整或新增觀測站點之具體建議。

第二節 工作項目與內容

一、計畫區域背景資料蒐集與分析

- (一) 蒐集研究區域內各單位雨量站之歷年降雨資料，蒐集完成後，針對各站點資料年限，缺漏情形進行彙整與評估，藉以作為後續進行研究區域內降雨空間分布推估之基礎資料。
- (二) 蒐集可用以進行研究區域內降雨估計之雷達回波資料，其資料可提供後續進行研究區域內降雨估計之用。
- (三) 歷年土石流發生事件、警戒事件等資訊彙整

二、整合性降雨推估模式之發展

- (一) 降雨推估技術與方式之相關文獻回顧，至少應包含空間分布推估及利用氣象資料推估等。
- (二) 整合性降雨推估模式需同時考量確定性及不確定性的資料，其中確定性資料即以研究區域內或周遭的雨量站實測降雨紀錄為主；不確定性資料則以氣象資料進行降水估計之結果為主。
- (三) 結合確定性及不確定性資料的分析結果，配合時空資料推估技術，進行整合性降雨推估模式之建置、測試與驗證。

三、網格化降雨推估與降雨特性分區

- (一) 依據前述開發完成的整合性降雨推估模式，進行計畫區域的網格化降雨推估。
- (二) 依降雨推估結果，進行降雨特性解析與分區設定。

四、警戒分區設定與警戒發布機制

綜合整合性降雨模式推估與降雨特性分區成果，輔以各區土石流

警戒值的設定，提出土石流警戒分區與發佈機制的建議方案。

五、降雨觀測網調整或新增區位建議

以整合性降雨模式推估結果為基礎，輔以既有雨量觀測站網之分布，提出觀測站網調整或新增觀測站點的建議。

第三節 計畫架構、預期成果與預定工作進度

一、計畫工作內容及流程

依據前述章節之方法與步驟，本計畫工作內容分為五大項目，包括：(1) 計畫區域背景資料蒐集與分析、(2) 整合性降雨推估模式之發展、(3) 網格化降雨推估與降雨特性分區、(4) 警戒分區設定與警戒發布機制、(5) 降雨觀測網調整或新增區位建議，其內容與流程展示如圖 1-3 所示。透過各工作項目循序執行，嘗試提出更準確或更能代表土石流潛勢溪流集水區的降雨資訊並提供觀測站點調整或新增觀測站之具體建議。

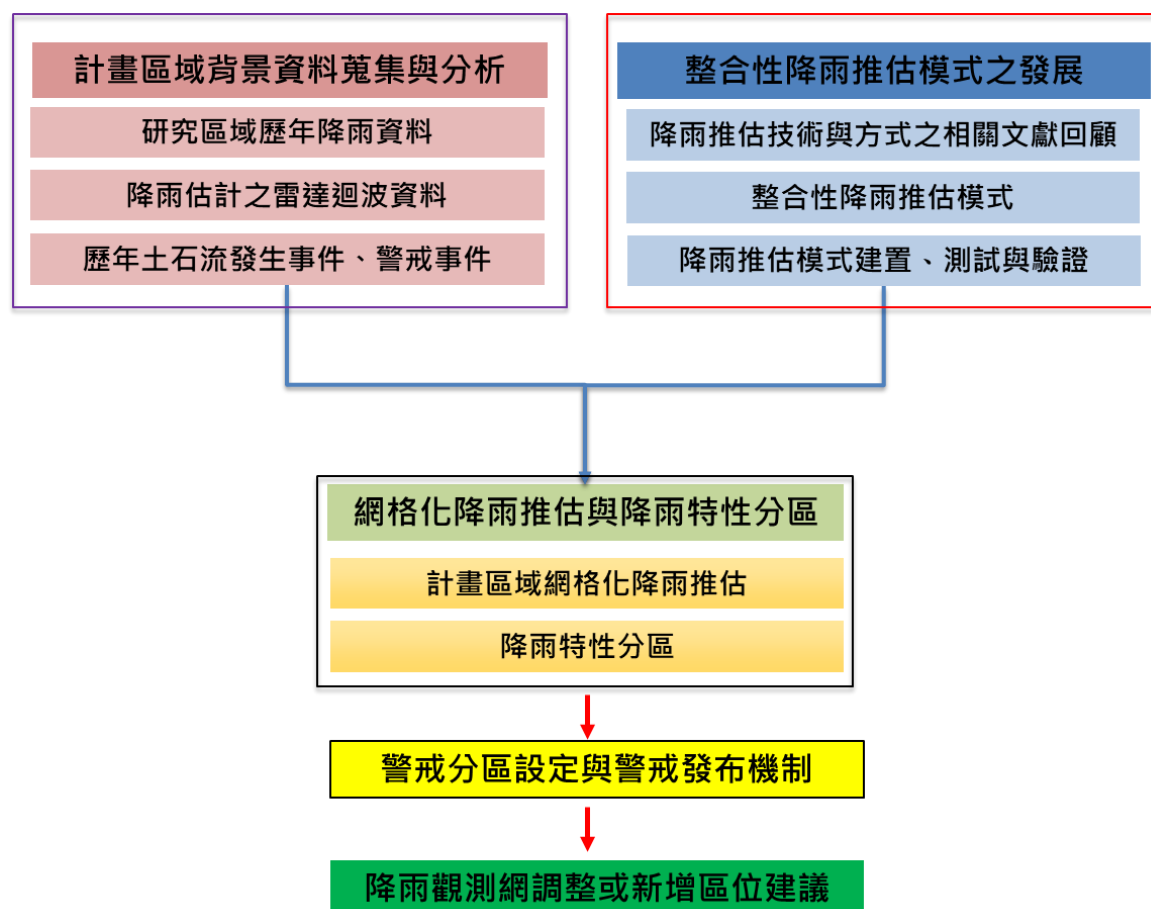


圖 1-3 計畫架構與流程

二、計畫預期效益

以土石流警戒發布機制之現況而言，係參考土石流潛勢溪流所在位置對應鄰近雨量站點觀測值，進行有效雨量計算。然而，透過以往警戒發布之記錄可知，現有的雨量觀測資料，仍有空間精度較差的問題，特別是雨量站網涵蓋度不足之土石流易發生山區。因此，透過本計畫的執行，期能改善雨量值資訊的準確性，以提高土石流警戒發布時機的適當性。

爰此，本研究採用研究區域內雨量測站之歷史雨量資料及雷達回波 QPESUMS 定量降雨預報之網格點雨量資料探討雨量之空間分布特性並提出空間分布推估之方法，進行無雨量站地區之雨量推估。茲將本計畫預期之工作效益闡述如下：

(一) 技術應用面

透過整合性降雨推估模式之發展，提升山區降雨觀測的代表性，強化土石流警戒發布的可靠性，並提供空間尺度上更精準的土石流警戒發布機制，提供區域性之防災應變建議。

(二) 制度及其他面

聘任一位專任研究助理，執行本計畫，可培養兼具水文分析、土石流警戒領域之專業人才。

三、預定工作進度

本計畫執行期限自 109 年 02 月 6 日至 109 年 12 月 31 日，根據工作項目進行排程，其預定進度如表 1-1 所示。

表 1-1 預定工作進度甘梯圖

工作項目	查核點內容	工作 比重	109 年											
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
計畫區域背景資料蒐集與分析	1. 降雨資料蒐集	10%												
	2. 雷達回波資料蒐集													
	3. 歷年土石流、警戒事件													
整合性降雨推估模式之發展	1. 相關文獻回顧	40%												
	2. 整合性降雨推估模式													
	3. 模式建置、測試與驗證													
網格化降雨推估與降雨特性分區	1. 網格化降雨推估	20%												
	2. 降雨特性分區													
警戒分區設定與警戒發佈機制	1. 土石流警戒分區	15%												
	2. 發佈機制建議方案													
降雨觀測網調整或新增區位建議	1. 提出觀測站網調整建議	15%												
	2. 提出新增觀測站點建議													
各階段報告繳交日程		日期												
工作執行計畫書		109/04/20			●									
期中報告書		109/07/31						●						
期末報告書		109/11/13										●		
成果報告		109/12/24											◎	
累計總進度		百分比	35				60		90			100		

註：●表示已完成；◎表示待完成

第二章 計畫區域背景資料蒐集與分析

第一節 研究區域內各單位雨量站之歷年降雨資料蒐集

本計畫之研究範圍為陳有蘭溪流域，包括水里鄉永興村、新山村、興隆村、郡坑村、上安村，以及信義鄉明德村、愛國村、自強村、新鄉村、羅娜村、望美村、豐丘村、神木村、同富村、東埔村等地。而在雨量資料蒐集的部分，為確保資料的完整性，除了針對計畫範圍內的土石觀測站進行蒐集之外，亦彙整計畫範圍內不同單位之 26 個雨量站。再者，更進一步的將區域外，但鄰近的 4 個雨量站一併納入蒐集，茲將蒐集雨量站之分布情形如圖 2-1 所示。其中，隸屬於水保局土石流觀測站共 4 個、中央氣象局自動測站與局屬測站共 15 個、水利署雨量站共 7 個，各單位雨量站基本資料如表 2-1 及表 2-2 所示，各單位雨量站之相關基礎資訊，如資料年份、資料型式與申請方式如表 2-3 所列。然而，從彙整資料的空間分布可知，位在陳有蘭溪流域之雨量站，在空間分布上並不均勻；以地理位置的分布而言，較上游處的雨量站密度相對較下游地區低，且山區相較於平地，佈設數量亦較少。此因素亦造成在土石流潛勢溪流發布警戒所參考的代表性雨量站，有時僅能採用距離較遠或是較接近下游平地區域的雨量站，其是否能代表或是反映土石流潛勢溪流集水區內真實的降雨特性，實有值得探討與精進之空間。

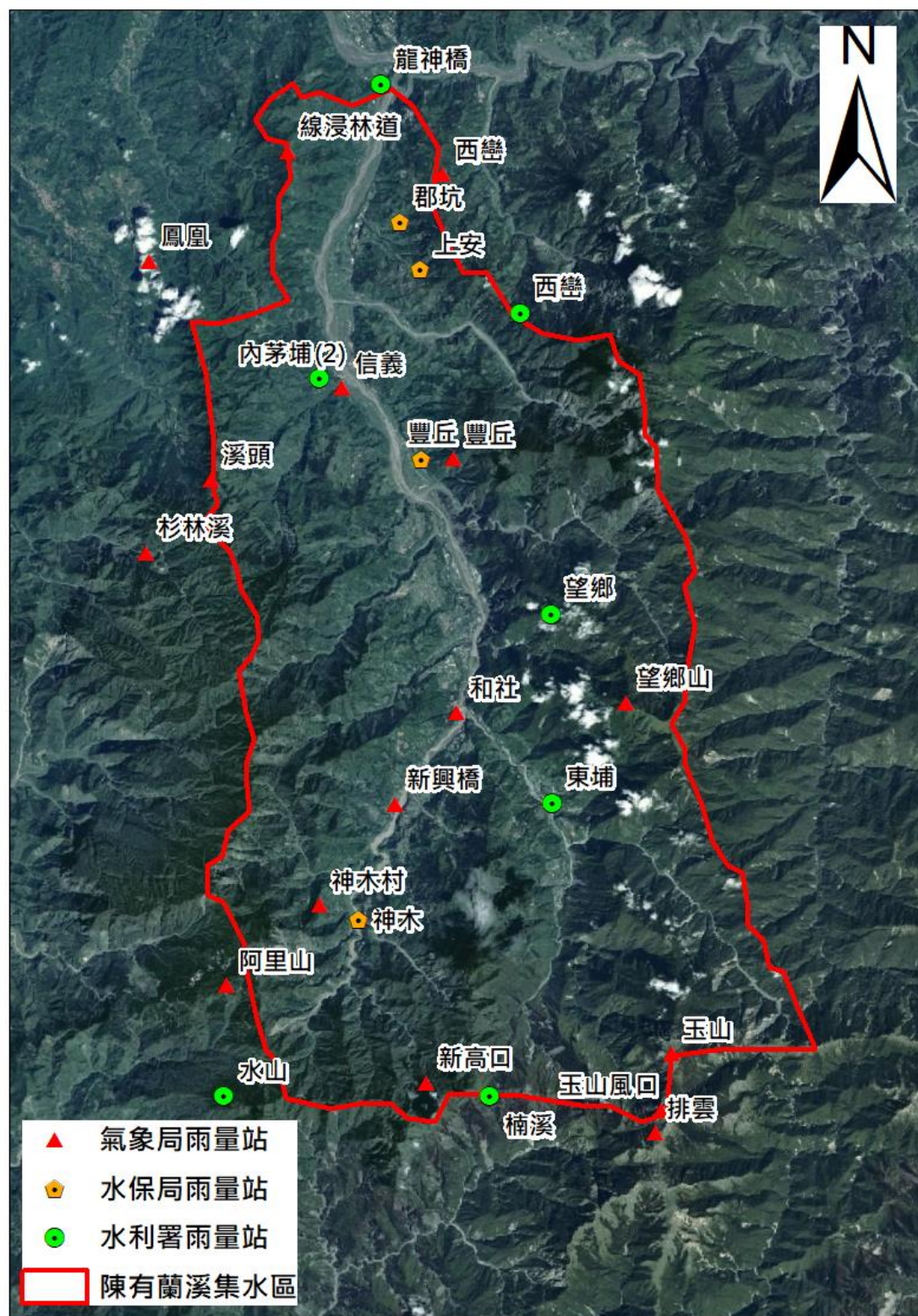


圖 2-1 雨量站分布圖

表 2-1 研究區域內各單位雨量站一覽表

站號	站名	海拔 (m)	縣市	經度	緯度	所屬單位
swc030	神木	1179	南投縣信義鄉	120.8567	23.5282	水保局
swc040	上安	459	南投縣水里鄉	120.8766	23.7254	水保局
swc050	郡坑	421	南投縣水里鄉	120.8701	23.7398	水保局
swc060	豐丘	613	南投縣信義鄉	120.8769	23.6680	水保局
C1I510	線浸林道	1208	南投縣鹿谷鄉	120.833	23.7615	氣象局
C1I310	西巒	1033	南投縣信義鄉	120.8840	23.7545	氣象局
C0I080	信義	536	南投縣信義鄉	120.8510	23.6897	氣象局
C1I290	豐丘	1151	南投縣信義鄉	120.8874	23.6682	氣象局
C1I101	溪頭	1810	南投縣信義鄉	120.8076	23.6618	氣象局
C1I070	和社	825	南投縣信義鄉	120.8889	23.5911	氣象局
C1I450	望鄉山	3025	南投縣信義鄉	120.9443	23.5942	氣象局
C1I340	新興橋	897	南投縣信義鄉	120.8687	23.5633	氣象局
C0H9A0	神木村	1595	南投縣信義鄉	120.8437	23.5327	氣象局
C1I440	新高口	2540	南投縣信義鄉	120.8789	23.4787	氣象局
467550	玉山	3844.8	南投縣信義鄉	120.9595	23.4876	氣象局
C0I520	玉山風口	3860	南投縣信義鄉	120.9560	23.4705	氣象局
O1H54	龍神橋	322	南投縣水里鄉	120.8717	23.7800	水利署
01H470	西巒	1666	南投縣信義鄉	120.9178	23.6680	水利署
01H780	內茅埔 (2)	485	南投縣信義鄉	120.8519	23.6906	水利署
01H390	望鄉	2200	南投縣信義鄉	120.9278	23.6192	水利署
01H400	東埔	1135	南投縣信義鄉	120.9283	23.5619	水利署
O1I36	楠溪	2600	南投縣信義鄉	120.9081	23.4728	水利署

表 2-2 研究區域外各單位雨量站一覽表

站號	站名	海拔 (m)	縣市	經度	緯度	所屬單位
C0I090	鳳凰	910	南投縣鹿谷鄉	120.7873	23.7281	氣象局
C1I470	杉林溪	1680	南投縣竹山鎮	120.7864	23.6395	氣象局
467530	阿里山	2413.4	嘉義縣阿里山鄉	120.8132	23.5082	氣象局
H1M230	水山	2450	嘉義縣阿里山鄉	120.8125	23.4745	水利署

表 2-3 各單位雨量資料基礎資訊及申請方式

所屬單位	資料年份	資料型式	申請方式
水保局	2000~2020	十分鐘雨量/時雨量	水土保持局觀測資料供應平台申請
氣象局	2000~2020	十分鐘雨量/時雨量	中央氣象局申購
水利署	2000~2019	分雨量/時雨量	水文資訊網申請

第二節 研究區域內雷達觀測資料蒐集

依據前人研究經驗，為改善雨量站與降雨空間分佈不均的缺點，可藉由雷達回波強度推估降雨強度，建立降雨強度與回波強度間的關係式，並將其關係式應用於未設置雨量站之地區，便於其他地區進行雨量估計，以提升防災預警的能力，茲將雷達資料之相關內容說明如下。

雷達資料是經由氣象雷達發射電磁波脈波，透過天線聚焦向空間發射出持續時間很短（微秒）的脈衝無線電波。在運作時，碟型天線先由接近水平的角度，依序朝各個方向發送特定頻率的電磁波，繞完360度後，稍微調高仰角，再發送第2圈，如此重複，直到仰角接近某個預設的角度。若空氣中只存在雨滴，電磁波經雨點反射回來的訊號被雷達接收後，即可得知降雨強度，稱為雷達回波。目前台灣中央氣象局之雷達回波圖及雷達觀測網分布圖，如圖 2-2 與圖 2-3 所示。

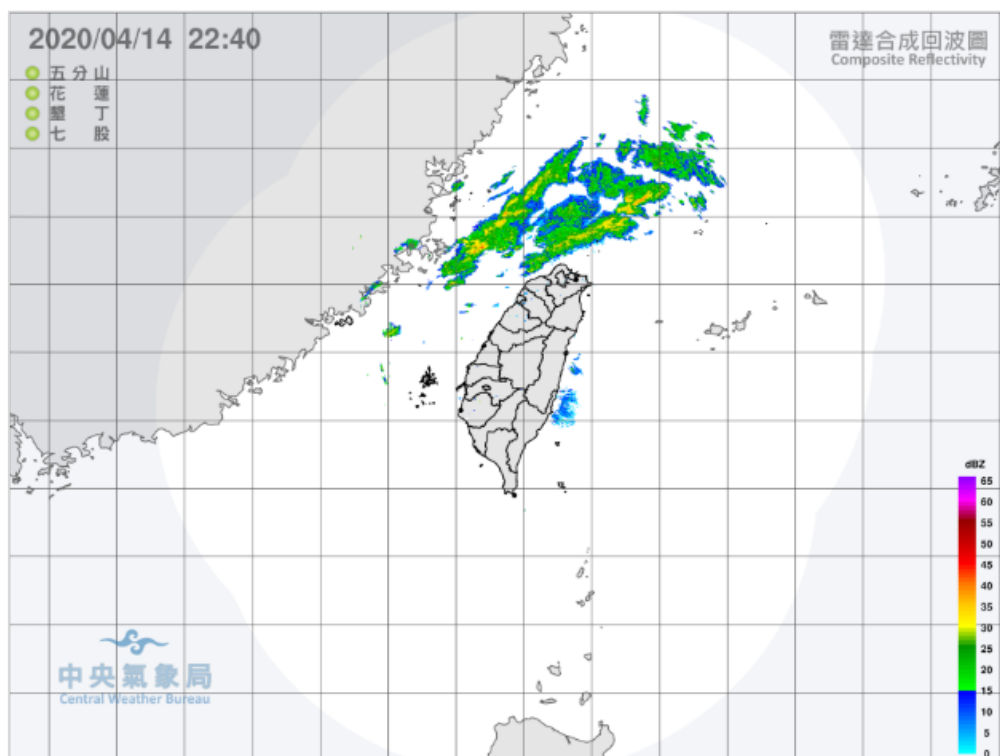


圖 2-2 雷達回波圖

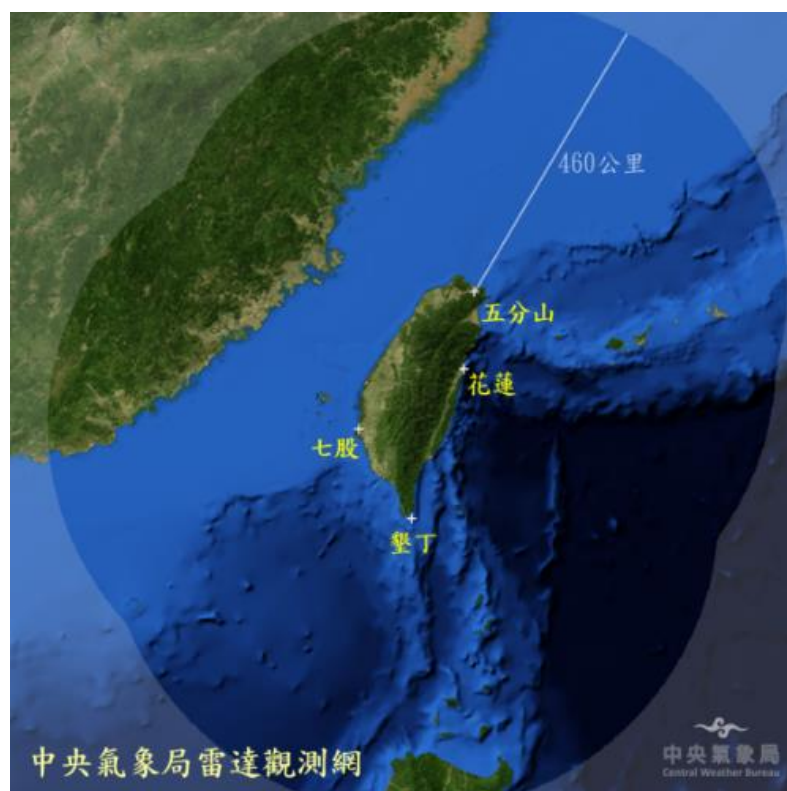


圖 2-3 中央氣象局雷達觀測網分布圖

一般而言，反射回來的訊號愈強，降雨強度愈大。都卜勒氣象雷達是以都卜勒效應為基礎，偵測雨（雪）的移動速度。如觀測的環境中有風時，雨滴在移動的情況下反射電磁波，這時便會有都卜勒效應產生。因此便能依照回波的頻率變化情況，反推出雨滴移動的速度，亦能進一步計算風的方向與速度。而雙偏極化雷達則是能夠發射沿水平和垂直這兩個方向振盪的電磁波，亦能接收水平與垂直方向的回波。雨滴的扁平度可由這兩個方向的回波加以計算與推導獲得，並依據此資訊，進而計算出雨滴粒徑分布。

目前台灣地區計有 8 座氣象雷達，其中，中央氣象局目前有 4 座 S 波段（10 公分波長）雷達，3 部為都卜勒氣象雷達、1 部為雙偏極化雷達，分別位於東部的花蓮、南部的墾丁、西部的七股及北部的五分山；屬於民航局桃園機場，波長為 5 公分的都卜勒氣象雷達；以及

空軍設置於綠島的都卜勒氣象雷達、清泉崗及馬公兩座的雙偏極化雷達（表 2-4）。

表 2-4 台灣氣象雷達一覽表

雷達站名稱	所屬單位	海拔高度 (m)	雷達類型	波長 (cm)
五分山	中央氣象局	766	雙偏極化雷達	10
花蓮	中央氣象局	63	都卜勒雷達	10
七股	中央氣象局	38	都卜勒雷達	10
墾丁	中央氣象局	42	都卜勒雷達	10
中正	民用航空局	10	都卜勒雷達	5
綠島	空軍氣象聯隊	284	都卜勒雷達	5
清泉崗	空軍氣象聯隊	203	雙偏極化雷達	5
馬公	空軍氣象聯隊	48	雙偏極化雷達	5

（資料來源：科學研習月刊 50-6、中央氣象局）

本計畫研究區域內採用之雷達回波資料產品（QPESUMS, Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors），為中央氣象局從 2002 年結合經濟部水利署、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室共同投入研發之天氣現象即時掌握系統，藉由全台雷達測站五分山、花蓮、七股、墾丁、中正、綠島、清泉崗、馬公，合計 8 個雷達測站之雷達迴波，進行氣象水文整合，提供即時性劇烈天氣監測資訊、過去 72 小時內高解析度之定量降水估計即 0~3 小時定量降水預報等內容。

雷達回波資料為接近地面且不受地形及地面影響之仰角觀測的最低仰角合成回波（Mosaic Hybrid Scan Reflectively, Hybrid）（Zhang et al. 2005），再利用 $Z=32.5R^{1.65}$ （Xin et al. 1997），取得降雨估計量，此估計量再經過雨量站校驗後，產製台灣地區各縣市、鄉鎮、村里等行政分區之降雨估計整合產品，網格大小約 1.3km×1.3km，其對應的資料形式有 1 小時、3 小時、6 小時、12 小時、24 小時、72 小時等經雨量站校正之降雨量，藉以提供後續分析探討使用。

第三節 歷年土石流發生事件及警戒事件之資訊彙整

陳有蘭溪流域為濁水溪的重要支流，主流發源於玉山北峰八通關之金門峒大斷崖，主流全長 42.4 公里，流域面積約 4 萬 5 千公頃，平均坡降約 6.82%，為濁水溪主流之 3.83 倍，屬於相對陡峭之山區，該集水區土石流潛勢溪流眾多。同時，陳有蘭溪流域之特色為沖積扇發達及崩塌地多，以致於河川沖刷量大，而崩塌地可分為「向源侵蝕型」及「河岸侵蝕型」兩種類型。爰此，上述地質的頻繁變動，容易導致坡面不穩定，提高土石流事件發生的可能性。

在這樣的環境條件背景下，本計畫擇定陳有蘭溪流域作為研究範圍，透過區域內實際發生的土石流事件以及曾發布紅黃色警戒的資訊，配合前述所蒐集之各單位雨量站及雷達觀測推估雨量資料，檢核過往曾發生土石流警戒與災害事件之雨情概況，並將各事件時段之雨量資料，作為後續模式建立時參數率定驗證之基礎。爰此，本節彙整陳有蘭溪流域四處土石流觀測站位置及其基本資料，觀測站分別為神木、豐丘、上安、郡坑站，如圖 2-4~圖 2-6，對於四處土石流觀測站現有設備及其對應警戒基準值說明，彙整如表 2-5 所示。其中，觀測站之土石流警戒基準值為 250~300mm，鄰近土石流觀測站之土石流潛勢溪流共有六條。而各觀測站設有觀測溪流現場動態情況之監測設備，包含掌握現場即時影像資訊的攝影機、觀測當地降雨量且為土石流警戒發布依據之雨量計、利用土石流沖擊力撞斷鋼索進而發出土石流警界警報之鋼索檢知器、量測土石流運動所引發之地表震動及震動頻率並可發佈警戒通知的地聲檢知器、以及可即時量測土壤中之水量的土壤含水量計等設備。

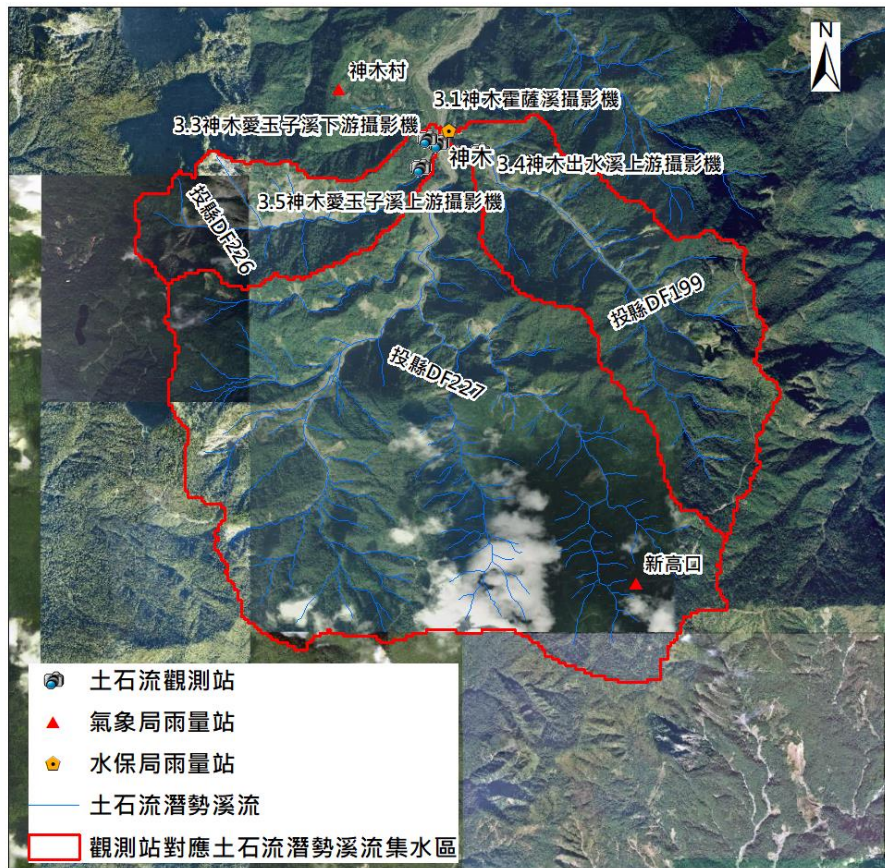


圖 2-4 神木土石流觀測站位置圖



圖 2-5 豐丘土石流觀測站位置圖

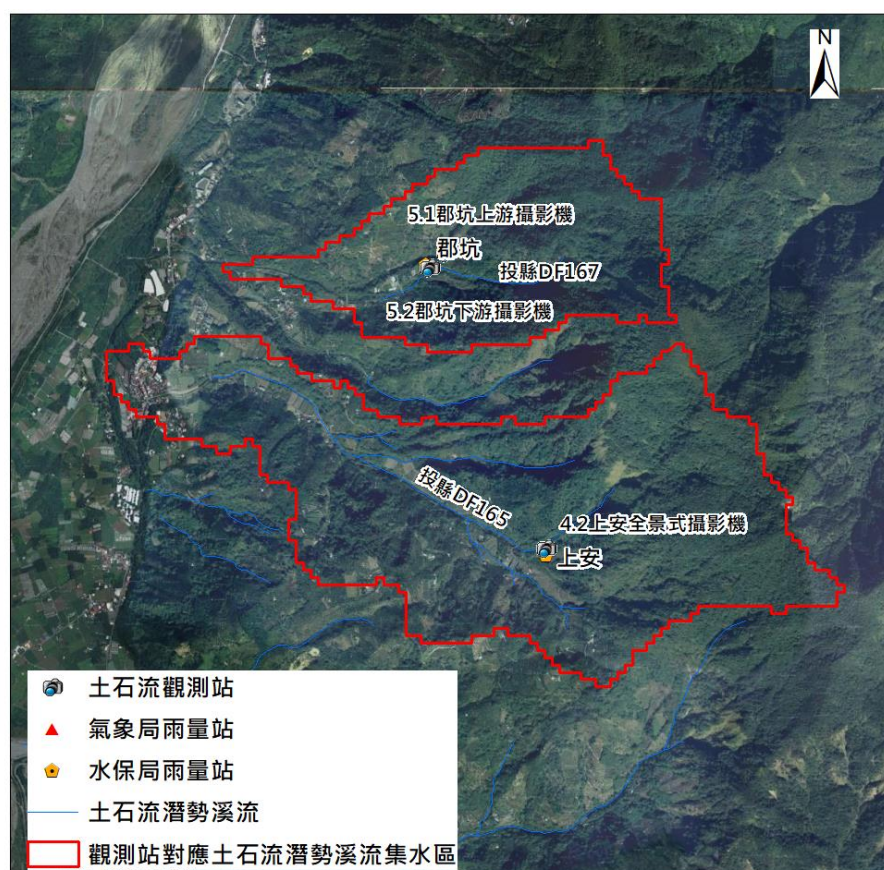


圖 2-6 上安及郡坑土石流觀測站位置圖

表 2-5 土石流觀測站現有設備及其土石流警戒基準值表

站名	神木	豐丘	上安	郡坑
攝影機	4	2	1	2
雨量計	2	2	1	2
鋼索檢知器	3	2	1	2
地聲檢知器	2	1	0	0
土壤含水量計	2	1	0	0
土石流潛勢溪流	投縣 DF199 投縣 DF226 投縣 DF227	投縣 DF190	投縣 DF165	投縣 DF167
警戒基準值(mm)	250	250	300	300
參考雨量站	神木 ^s	豐丘 ^s	上安 ^s	郡坑 ^s
	神木村	豐丘	郡坑 ^s	上安 ^s

參考雨量站加註代號表非氣象局雨量站

(s:水保局、w:水利署、tp:臺北市府、sr:石門水庫管理局、fr:翡翠水庫管理局)

資料來源：本計畫彙整自土石流防災資訊網。管理單位：農委會水土保持局土石流防災中心

綜合上述，為提高土石流災害預警發佈機制的準確性，本節藉由彙整研究區域內各雨量站點之歷年降雨資料、雷達觀測推估雨量資料及歷年土石流發生事件或警戒發布之時間，作為雨量預警分析之探討依據，如表 2-6 及表 2-7 所示。由目前彙整資料可知，災害大多發生於豐水期 5~9 月的豪雨事件與颱風事件，因大量之降雨導致土石流災害，造成嚴重的災害損失。其中，過往較為嚴重的事件分別為卡玫基颱風、辛樂克颱風、莫拉克颱風、尼莎暨海棠颱風等事件及其他豪雨事件，尤其以 2009 年 8 月之莫拉克颱風造成之災損最為嚴重，共造成 69 棟房舍受損，其次為 2008 年 9 月之辛樂克颱風，造成人員傷亡及道路掩埋、房屋受損等災損。然而，透過實際發生事件及發布警戒的次數與頻率相互比對，也發現警戒誤報的次數，仍有偏多的現象。雖以現行機制而言，係以較為保守的判斷進行土石流警戒的發布，但透過前述的探討亦可得知，現今參考的代表性雨量站點，在空間分布上仍有不足的現象。因此，透過更完整的降雨估計方法，是否能有效的提升土石流預警的準確性，是本研究努力之目標。

表 2-6 區域內土石流災害事件資訊彙整表

事件名稱	災害類型	發生時間	發生位置	災損描述與統計
0609 豪雨	土石流	2006/06/09	水里鄉上安村	人命損失: 0 人 房舍受損: 0 棟 道路毀損: 約 80 公尺
	沖蝕	2006/06/09	信義鄉人和村	人命損失: 0 人 房舍受損: 2 棟 道路毀損: 約 100 公尺
卡玫基颱風	崩塌	2008/07/18	水里鄉民和村	護岸毀損: 約 200 公尺。 道路毀損: 約 600 公尺。
	土石流	2008/07/18	信義鄉潭南村	人命損失: 0 人 房舍受損: 2 棟
辛樂克颱風	土石流/侵蝕	2008/09/15	信義鄉豐丘村	6 輛小客車、2 輛機車及 2 台工程車遭土石掩埋。 人員傷亡: 7 死 7 傷。
	洪水	2008/09/14	水里鄉玉峰村	未造成任何人員傷亡及財產損失。
	沖蝕	2008/09/14	水里鄉郡坑村	未造成任何人員傷亡及財產損失。
	崩塌	2008/09/14	信義鄉明德村	房屋受損: 1 棟。 道路掩埋: 約 80 公尺。
莫拉克颱風	土石流	2009/08/18	水里鄉玉峰村	
	洪水	2009/08/09	信義鄉神木村	房舍受損: 10 棟
	土石流/洪水	2009/08/09	信義鄉同富村	房舍受損: 10 棟
	沖蝕	2009/08/09	水里鄉玉峰村	
	洪水	2009/08/09	水里鄉新山村	房舍受損: 35 棟
	土石流	2009/08/09	信義鄉望美村	房舍受損: 4 棟
	沖蝕	2009/08/08	信義鄉神木村	
	土石流	2009/08/08	信義鄉神木村	房舍受損: 3 棟
	土石流	2009/08/08	信義鄉神木村	房舍受損: 5 棟
	沖蝕	2009/08/08	信義鄉神木村	房舍受損: 1 棟
	土石流	2009/08/08	信義鄉神木村	房舍受損: 1 棟
0719 豪雨	土石流	2011/07/19	信義鄉神木村	房舍受損: 4 棟
0504 豪雨	土石流	2012/05/03	信義鄉豐丘村	豐丘橋涵遭土石堵塞。
0610 豪雨	土石流/洪水	2012/06/12	信義鄉神木村	房屋受損: 3 棟。
0517 豪雨	沖蝕	2013/05/20	信義鄉明德村	房屋受損: 1 棟。
0520 豪雨	土石流	2014/05/20	信義鄉神木村	未造成任何人員傷亡
0601 豪雨	崩塌	2017/06/04	信義鄉明德村	人命損失: 0 人 房舍受損: 0 棟 道路阻塞: 約 100 公尺
	洪水	2017/06/03	信義鄉神木村	0601 豪雨期間, 和社溪上游暴漲, 大量土石沖刷至下游, 造成 8 戶民宅、隆華橋及路基被沖毀。
	崩塌	2017/06/03	水里鄉新山村	道路阻塞約 10 公尺。
尼莎暨海棠颱風	崩塌	2017/07/30	信義鄉同富村	道路遭土石阻塞部分約 10 公尺。

資料來源: 本計畫彙整自土石流防災資訊網。管理單位: 農委會水土保持局土石流防災中心

表 2-7 區域內警戒事件之資訊彙整

事件名稱	鄉鎮	村里	紅色警戒	黃色警戒	起始時間	結束時間
97 年卡玫基颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/17 19:30	7/18 03:00
	信義鄉	神木村	5	-	7/18 03:00	7/18 18:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/17 19:30	7/18 03:00
	信義鄉	豐丘村	4	-	7/18 03:00	7/18 18:00
	水里鄉	上安村	-	3	7/17 19:30	7/18 03:00
	水里鄉	上安村	1	-	7/18 03:00	7/18 18:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/17 19:30	7/18 03:00
	水里鄉	郡坑村	3	-	7/18 03:00	7/18 18:00
97 年辛樂克颱風	信義鄉	神木村	-	3	9/13 19:30	9/14 03:30
	信義鄉	神木村	3	-	9/14 03:30	9/16 14:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	9/13 19:30	9/14 08:00
	信義鄉	豐丘村	4	-	9/14 08:00	9/16 14:00
	水里鄉	上安村	-	3	9/13 19:30	9/14 13:00
	水里鄉	上安村	1	2	9/14 13:00	9/19 18:32
	水里鄉	郡坑村	-	3	9/13 19:30	9/14 13:00
	水里鄉	郡坑村	3	-	9/14 13:00	9/19 18:32
97 年薔蜜颱風	信義鄉	神木村	-	5	9/28 09:00	9/29 01:30
	信義鄉	神木村	3	2	9/29 01:30	9/29 09:30
	信義鄉	神木村	-	5	9/29 09:30	10/13 22:30
	信義鄉	豐丘村	-	3	9/28 09:00	9/29 07:00
	信義鄉	豐丘村	3	-	9/29 07:00	9/30 09:30
	水里鄉	上安村	-	3	9/28 15:30	9/29 07:00
	水里鄉	上安村	3	-	9/29 07:00	9/29 22:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	9/28 15:30	9/29 07:00
	水里鄉	郡坑村	3	-	9/29 07:00	9/29 22:00
98 年莫拉克颱風	信義鄉	神木村	-	11	8/7 11:00	8/8 05:00
	信義鄉	神木村	11	-	8/8 05:00	8/11 11:00
	信義鄉	神木村	-	11	8/11 11:00	8/11 17:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	8/7 11:00	8/7 17:00
	信義鄉	豐丘村	4	-	8/7 17:00	8/10 17:00
	水里鄉	上安村	-	3	8/7 11:00	8/8 16:00
	水里鄉	上安村	3	-	8/8 16:00	8/10 17:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	8/7 11:00	8/8 16:00

事件名稱	鄉鎮	村里	紅色警戒	黃色警戒	起始時間	結束時間
	水里鄉	郡坑村	3	-	8/8 16:00	8/10 17:00
99 年凡那比颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/19 08:00	7/19 20:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/19 08:00	7/19 20:00
	水里鄉	上安村	-	3	7/19 08:00	7/19 20:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/19 08:00	7/19 20:00
100 年 0719 豪雨	信義鄉	神木村	-	11	7/19 09:00	7/20 11:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/19 09:00	7/20 11:00
	水里鄉	上安村	-	3	7/19 11:00	7/20 11:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/19 11:00	7/20 11:00
101 年泰利颱風	信義鄉	神木村	-	11	6/19 17:00	6/21 11:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	6/19 17:00	6/21 11:00
	水里鄉	上安村	-	3	6/19 23:00	6/21 11:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/19 23:00	6/21 11:00
102 蘇力颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/12 14:00	7/13 03:00
	信義鄉	神木村	6	5	7/13 03:00	7/13 07:00
	信義鄉	神木村	11	-	7/13 07:00	7/13 20:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/12 14:00	7/12 23:00
	信義鄉	豐丘村	4	-	7/12 23:00	7/13 20:00
	水里鄉	上安村	-	3	7/12 14:00	7/13 17:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/12 14:00	7/13 11:00
	水里鄉	郡坑村	3	-	7/13 11:00	7/13 17:00
102 年康芮颱風	信義鄉	神木村	-	11	8/28 17:00	8/29 23:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	8/28 17:00	8/29 23:00
	水里鄉	上安村	-	3	8/28 17:00	8/29 23:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	8/28 17:00	8/29 23:00
103 年 0520 豪雨	信義鄉	神木村	-	6	5/20 23:00	5/22 05:00
103 年 0606 豪雨	水里鄉	上安村	-	3	6/6 21:00	6/7 07:00
	信義鄉	神木村	-	11	6/6 21:00	6/7 07:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/6 21:00	6/7 07:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	6/6 21:00	6/7 07:00
103 年麥德姆颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/22 23:00	7/23 11:00
	信義鄉	神木村	6	5	7/23 11:00	7/24 05:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/22 23:00	7/23 20:00
	水里鄉	上安村	-	3	7/22 23:00	7/23 20:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/22 23:00	7/23 23:00
104 年蘇迪勒颱風	信義鄉	神木村	-	11	8/7 17:00	8/8 17:00
	信義鄉	神木村	6	5	8/8 17:00	8/8 23:00
	信義鄉	神木村	-	11	8/8 23:00	8/9 11:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	8/7 17:00	8/8 23:00
	水里鄉	上安村	-	3	8/7 20:00	8/8 23:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	8/7 20:00	8/8 23:00
104 年杜鵑颱風	信義鄉	神木村	-	11	9/28 11:00	9/29 02:00
	信義鄉	神木村	6	5	9/29 02:00	9/29 11:00

事件名稱	鄉鎮	村里	紅色警戒	黃色警戒	起始時間	結束時間
	信義鄉	神木村	-	11	9/29 11:00	9/29 17:00
	信義鄉	豐丘村	-	4	9/28 11:00	9/29 11:00
	水里鄉	上安村	-	3	9/28 11:00	9/29 11:00
	水里鄉	郡坑村	-	3	9/28 11:00	9/29 14:00
105 年 0611 豪雨	信義鄉	神木村	-	3	6/11 18:30	6/13 09:30
	信義鄉	神木村	3	-	6/13 09:30	6/14 06:30
	信義鄉	神木村	-	3	6/14 06:30	6/14 12:30
	水里鄉	上安村	-	3	6/13 09:30	6/14 06:30
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/13 09:30	6/14 06:30
105 年尼伯特颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/7 13:30	7/8 18:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/7 13:30	7/8 18:30
	水里鄉	上安村	-	3	7/7 18:30	7/8 18:30
	水里鄉	郡坑村	-	3	7/7 18:30	7/8 18:30
105 年莫蘭蒂颱風	信義鄉	神木村	-	11	9/14 10:30	9/15 06:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	9/14 10:30	9/15 06:30
105 年馬勒卡颱風	信義鄉	神木村	3	8	9/17 12:30	9/17 18:30
	信義鄉	神木村	-	11	9/17 18:30	9/17 21:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	9/17 12:30	9/17 18:30
105 年梅姬颱風	信義鄉	神木村	-	11	9/27 12:30	9/28 23:30
	信義鄉	神木村	3	8	9/27 23:30	9/28 00:30
	信義鄉	神木村	6	5	9/28 00:30	9/28 06:30
	信義鄉	神木村	-	11	9/28 06:30	9/28 15:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	9/27 12:30	9/28 12:30
106 年 0601 豪雨	信義鄉	神木村	-	11	6/2 12:30	6/2 15:30
	信義鄉	神木村	3	8	6/2 15:30	6/2 18:30
	信義鄉	神木村	8	3	6/2 18:30	6/2 21:30
	信義鄉	神木村	11	-	6/2 21:30	6/4 18:30
	信義鄉	神木村	-	11	6/4 18:30	6/4 21:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	6/2 12:30	6/3 09:30
	信義鄉	豐丘村	4	-	6/3 09:30	6/4 18:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	6/4 18:30	6/4 21:30
	水里鄉	上安村	-	4	6/2 18:30	6/3 10:30
	水里鄉	上安村	4	-	6/3 10:30	6/4 15:30
	水里鄉	上安村	-	4	6/4 15:30	6/4 21:30
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/2 18:30	6/3 10:30
	水里鄉	郡坑村	3	-	6/3 10:30	6/4 15:30
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/4 15:30	6/4 21:30
106 年 0613 豪雨	信義鄉	神木村	-	11	6/16 15:30	6/17 18:30
	信義鄉	神木村	3	8	6/17 18:30	6/18 06:30
	信義鄉	神木村	-	11	6/18 06:30	6/18 12:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	6/16 15:30	6/18 12:30
106 年尼莎暨海棠颱風	信義鄉	神木村	-	11	7/29 12:30	7/31 00:30
	信義鄉	神木村	3	8	7/31 00:30	7/31 18:30
	信義鄉	神木村	-	11	7/31 18:30	7/31 20:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	7/29 12:30	7/31 16:30

事件名稱	鄉鎮	村里	紅色警戒	黃色警戒	起始時間	結束時間
107 年 0619 豪雨	信義鄉	神木村	-	3	6/19 14:00	6/21 06:30
108 年 0520 豪雨	信義鄉	神木村	-	6	5/18 12:30	5/18 14:30
	信義鄉	神木村	3	3	5/18 14:30	5/18 15:30
	信義鄉	神木村	6	5	5/18 15:30	5/19 12:30
	信義鄉	神木村	-	6	5/19 12:30	5/20 15:30
108 年 0611 豪雨	信義鄉	神木村	-	3	6/12 06:30	6/12 18:30
	信義鄉	神木村	3	8	6/12 18:30	6/14 04:30
	信義鄉	神木村	6	5	6/14 04:30	6/14 06:30
	信義鄉	神木村	11	-	6/14 06:30	6/14 15:30
	信義鄉	神木村	3	8	6/14 15:30	6/14 21:30
	水里鄉	上安村	-	4	6/12 15:30	6/14 21:30
	水里鄉	郡坑村	-	3	6/12 12:30	6/14 21:30
108 年利奇馬颱風	信義鄉	神木村	6	5	8/10 05:30	8/10 12:30
	信義鄉	神木村	-	11	8/10 12:30	8/11 06:30
	信義鄉	神木村	-	6	8/11 06:30	8/12 15:30
108 年白鹿颱風	信義鄉	神木村	-	11	8/24 15:30	8/25 06:30
	信義鄉	豐丘村	-	4	8/24 15:30	8/25 06:30

第三章 整合性降雨推估模式之發展

第一節 降雨推估技術與方式之相關文獻回顧

為針對整合性降雨推估模式之發展進行探討，本章節針對雷達降雨資料、降雨推估技術、以及本研究使用之貝氏最大熵法(BME)進行相關文獻回顧，藉以了解降雨推估模式發展之歷程及不同分析方式之優缺點，作為後續推估模式之修正參考依據，相關文獻說明如下：

一、雷達降雨資料相關應用文獻回顧

雷達降雨資料經常應用於災害預警，如國內常應用於土石流預警及洪水預警方面，相關文獻整理如表 3-1。

相關應用雷達回波資料評估降雨研究，已累積許多成果，應用層面包含土石流災害預警、洪水預警、淹水預警、河川洪水演算、雨量推估準確性之參考，並利用不同演算法，例如克利金法、微基因演算法、類神經網路(適應性類神經模糊推論系統 ANFIS、倒傳遞類神經網路 BPNN)、應用支撐向量機及隨機森林兩種機器學習法進行降雨逕流分析、建立雨量-水位模式、雨量預報、水庫入流量推估、土石流預警之相關應用。

表 3-1 雷達降雨資料相關文獻彙整表

張智昌(2006)	應用 QPESUMS 系統之雷達估計雨量進行雨量特性分析，整合地面雨量站觀測，再透過數值與統計方法，求得具有代表性的定量降雨估計(QPE)資料，提供各類依賴雨量進行預測災害預警訂定之參考。
游保杉、謝章廷 (2007)	應用雷達降雨資料於分佈型水文模式，考慮降雨在空間分佈上不均勻之特性，並探討傳統地面雨量站與雷達降雨之雨量空間分佈，利用微基因演算法針對基隆河五堵上游集水區 2005 年發生之六場颱風事件進行模式率定，並採取交叉驗證方式進行比較，發現以雷達降雨資料作為輸入雨量的模擬結果皆優於地面雨量資料的模擬結果。
許銘熙、黃鵬豪 (2008)	利用類神經網路建立雨量-水位模式，探討加入未來 1 小時、1~2 小時及 1~3 小時雨量資訊後之水位差異；並將定量降水估計(Quantitative Precipitation Estimation; QPE)進行位移處理，假設其為 QPF，以估算雷達平均雨量隨時間之遞減率，進而推測地面雨量站之未來雨量資訊，而後進一步探討推測雨量對於雨量-水位模式、及河川洪水演算模式之初始值修正及整合類神經網路模式，於預報未來 1~3 小時水位之精度改良成效。
李天浩、林忠義 (2009)	針對普通及通用兩類聯合克利金法，包括普通聯合克利金法(OCK)、修正聯合克利金法(MOCK)、通用聯合克利金法(UCK)、空間趨勢通用聯合克利金法(UCKT)等 4 種方法，探討 5 種雷達觀測誤差情形下，正確推估雨量空間的能力，研究發現 4 種方法再各種雷達觀測誤差情形下表現各有優異。
林淑惠(2010)	將 QPESUMS 降雨資料應用於洪水或淹水預測方面，於淡水河流域利用類神經網路建立出地面雨量站未來 1~3 小時預報模式，以三個颱風事件作模擬，其預報水位 RMSE 指標改善百分比維持於 12% 以上。
許銘熙、蔡孟原 (2011)	使用類神經網路建立洪水預報模式，並利用雷達降雨資料得到颱風期間流域內中小尺度的降雨時間與空間變化，於水位觀測或洪水預報之模擬準度皆具有相當程度之提升。
張斐章(2012)	應用 QPESUMS 即時雨量推估資訊，以適應性類神經模糊推論系統 ANFIS 及倒傳遞類神經網路 BPNN 二種類神經網路，建立德基水庫及曾文水庫集水區未來 1~5 小時水庫入流量預報模式。
游保杉、陳思尹 (2015)	應用支撐向量機及隨機森林兩種機器學習法於中央氣象局 QPESUMS 劇烈天氣系統所提供之雷達估計降雨資料，建立雨量預報模式以提供一即時預報系統。
詹錢登、曾奕超、 林睦容(2018)	以 10 個土石流潛勢溪流集水區作為研究對象，針對 2008~2016 年間 15 場颱風豪雨事件，比較參考雨量站及雷達估計降雨等兩種不同方法所得之雨量資料的差異性，分析降雨強度及累積雨量等影響土石流發生重要參數之雨量差異百分比及最大時雨量發生時間差，並探討集水區採用不同雨量資料對土石流警戒結果之差異。

二、降雨資料空間分布推估技術文獻回顧

透過前述各項工作之進行，統整研究區域內所蒐集雨量站歷年降雨資料及雷達回波資料，即可進行該研究區域之降雨推估。然而，考量到雨量觀測網整體空間精度上仍有所不足，故在推估前，亦針對各類常用空間分布推估方法如徐昇氏法、趨勢面法、距離反比法、克利金法及 PRISM 模式、貝氏最大熵法等方法進行比較與評估，相關空間分布方法的優缺點整理，說明如表 3-2 所示。

表 3-2 空間分布推估方法之評析

推估方法	徐昇氏法	趨勢面法	距離反比法	克利金法	PRISM 模式	貝氏最大熵法
特性	定性資料推估	說明全域之分布規律與勢態	屬移動平法，推估值必小於已有值	1. 距離越近相關性越大、變異數越小 2. 具有最佳估計	可考量高程、地形、坡度等因子對氣象要素的影響進行內插。	除考量高程、地形、坡度等因子影響外，並同時考量時間及空間的相關性
結果形式	多邊形	網格	網格	網格	網格	網格
適用於	適用於地形較平坦處	推估全體之趨勢	可快速繪等值線	1. 對於雨量站網之設置有良好的效果 2. 需詳細推估變異數時。	適用於與高程、地形、坡度等因子有高相關的複雜地形區之因子內插	適用於高程、地形、坡度、時間、空間等因子有高相關的複雜地形區因子內插
缺點	1. 無法繪製等雨量線。 2. 測站之面積權重會隨測站增減而改變。	忽略區域變異性	1. 觀測點距離非常近時，會產生錯誤訊息。 2. 表面並非均質時不宜使用。	計算過程複雜，耗時較久。	各因子權重之訂定並無一定之參考依據。較多使用者之主觀經驗	考量因子較多，資料蒐集較耗時

其中，以克利金法的基礎理論而言，為針對區域化變數所具有之特性所發展出推估系統方程組。利用隨機變域中已知之區域化變數 $Z(x_i)(i=1,2,\dots,n)$ ，推估此空間中任一位置，只要已知相對距離 h 即可利用此法推估求得該位置之推估值 $Z^*(x_0)$ 。其推估方式是透過將測站觀測值(點資料)隨距離變化之函數以半變異圖模式配套來表示後，由半變異圖模式與不偏估及最佳化之條件下，決定此測站之權重係數 (λ_{0i}) ，最後再由權重係數與觀測值之線性組合，對空間中任意點進行推估，此法具有最佳線性不偏推估(Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)的特性，意即假設估計值為區域內所有觀測值之線性組合、估計值期望值等於區域化變數期望值、估計值與觀測值其差之變異數為最小等。然而，在使用上，若實際資料不符合常態分布時，便有許多的限制(Goveaerts, 1997)。此外，克利金法在時間上，無法推求未知點雨量之時間序列，亦無法針對已知點有資料缺漏的年份進行估計。

首先，在半變異元模式之選取方面，係對區域內雨量站計算兩兩測站間之半變異元值即距離。半變異元值可由式(3-1)計算求得。其中， $z(x_i)$ 為站 i 之雨量值， k 為 x_i 與 x_j 之配對個數， $h = x_i - x_j$ ，為 x_i 與 x_j 間之相對距離。

$$\gamma(x_i - x_j) = \frac{\sum_1^k [z(x_i) - z(x_j)]^2}{2k} \quad (3-1)$$

再依照 Journel 與 Huijbregts (1978)所訂下的標準：

(一)各間距所使用的數據對數應超過 30 對以上

(二)分段間距需小於兩兩測站間距離的最大值

以符合此標準的最小分段間距進行分段。以各區間內所有點的半變異元值與距離之平均作為該區間之代表值，將各區間代表點相連即

為試驗半變異元模式，示意圖如圖 3-1。

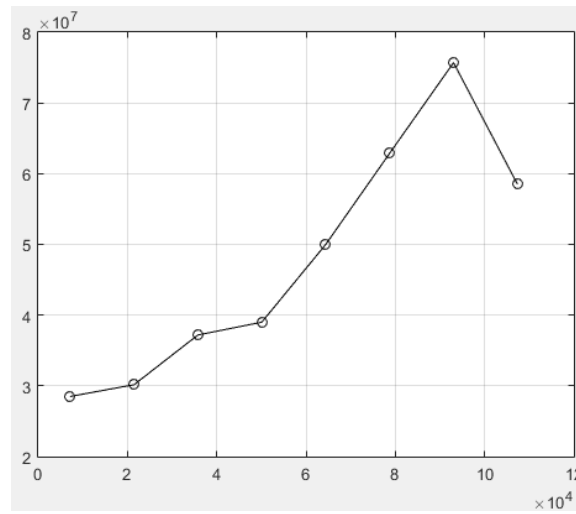


圖 3-1 試驗半變異元示意圖

其後，使用線性、冪級數、指數、球形、圓形、高斯這 6 種過去曾運用於降雨空間分析上之理論半變異元模式進行套疊。模式之函數形式如表 3-3 所示。

表 3-3 理論半變異元模式

模式	函數形式	影響範圍 (IR)	臨界變異值 (Sill)
線性模式	$\gamma(h) = bh$ ， b 為斜率		
冪級數模式	$\gamma(h) = ph^r$		
圓形模式	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{h}{a} + \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right]$ $0 \leq h \leq a$	a	$c_0 + c_1$
球體模式	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h < a \\ c_0 + c_1, & h > a \end{cases}$	a	$c_0 + c_1$
指數模式	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$	$3a$	$c_0 + c_1$
高斯模式	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]$	$\sqrt{3}a$	$c_0 + c_1$

依據分析資料之特性，為得到最適合的理論半變異元模式。首先給予模式係數之初始解，再使用 Matlab 中的 fmincon 函數進行最佳

化分析，即將各區間代表點的距離代入理論半變異元模式以得到推估理論半變異元值，計算其與代表點的半變異元值之差異，再移動模式之係數值，使半變異元值之差異變小，直到係數值之移步量趨近於 0 或是迭代次數大於 1,000,000 時，此時的係數值即為此理論半變異元模式之係數。同時，為避免模式係數落入區域最佳解之境況，係在不同解空間的區域內給定多組的初始解。藉以找尋模式係數之最佳解。

在得到了各個理論半變異元模式之函數後，係透過交叉驗證法來判定何種理論半變異元模式最為適合。首先從所有 n 個測站中取出某一站 Z_1 ，再由其餘 $n-1$ 個測站對 Z_1 進行克利金推估，即可求得此點的推估值，並計算 Z_1 的推估誤差；接著將該測站 Z_1 置回，選取另一個控制測站 Z_2 ，重覆上述步驟，直到所有 n 個測站均完成推估。最後，即可得到各個理論模式所有測站實際值與推估值之差，計算其均方根誤差(如式 3-2)，均方根誤差最小的即為最適合理論半變異元模式。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i, \text{推估值}} - Z_{i, \text{實際值}})^2}{n}} \quad (3-2)$$

緣上述，克利金法進行與雨量站之空間分布推估已有不錯的結果，但從最適用半變異元模式的交叉驗證結果，在推估準確度上仍有改善之空間。因此，本計畫在降雨空間分布推估的部分，將採用貝氏最大熵法 (Bayesian Maximum Entropy)，其最大之特點係為能納入時間和空間的相關性，並將不確定性資料納入，來強化推估資訊。同時，亦能處理非線性問題，不需事先假設資料分布的型態。且近年應用在許多研究如土壤有效深度推估、降雨沖蝕指數推估、空氣懸浮粒子推估等應用，相較於常用之空間分布推估方法，誤差範圍較小。其方法理論將於下一章節進行說明。

三、貝氏最大熵法 (Bayesian Maximum Entropy)

在傳統上處理地理資料的方式需假設資料為常態分佈，且其於二階的定常性之隨機場下，期望值需符合 best linear unbiased estimator (BLUE) 的假設 (Journel and Huijbregts, 1978)。因此，在使用上若實際資料不符合常態分布時，便有許多的限制 (Goovaerts, 1997)，同時亦需透過其他統計方法以找出符合資料的機率分布。然而，貝氏最大熵法可處理非線性的問題亦不需事先針對資料的分佈做假設。「熵 (Entropy)」用以描述事物的無序性和亂度，當熵值愈大，則不確定性愈大。於一封閉系統中，熵會從原始狀態自然趨向混沌動態至最大亂度，得到一極大值。

熵使用機率來表示其值，於地理統計推估中以 H 來表示[式(2)]，而最大熵的採取原則是「盡可能保留推估過程中全部的不確定性，估熵趨近於最大值」，因此，其可將所有的不確定性予以保留，避免因主觀意識使推估的結果有所偏頗。也因此最大熵法對非高斯常態分布資料做非線性的空間推估，可將錯誤的風險最小化。其推估時須符合一階動差不偏的限制式條件[式(3)、(4)]，再應用 Lagrangian formalism (Gourdin, 1969) 得到最大熵及其機率分佈。

$$H_{0,\dots,n} = - \sum_{i_0,\dots,i_n} p_{0,\dots,n(i_0,\dots,i_n)} \ln p_{0,\dots,n(i_0,\dots,i_n)} \quad (2)$$

$$p_{\alpha,\beta(i_\alpha,i_\beta)} = \pi_{\alpha,\beta(i_\alpha,i_\beta)} \quad \forall \alpha \neq \beta; \quad \forall i_\alpha, i_\beta \quad (3)$$

$$p_{\alpha,\beta(i_\alpha,i_\beta)} = \sum_{(i_j, j \neq \alpha, \beta)} p_{0,\dots,n(i_0,\dots,i_n)} \quad (4)$$

其中，

p = 欲推估的機率分佈

π = 已知觀測資料的機率。

貝氏最大熵法 (BME)，是以貝氏條件機率概念結合其他不確定性資料 (soft data) 加強推估資料，同時亦能對序率 (stochastic) 資料與空間 (spatial) 資料進行時空之間相關性的推估 (Christakos, 1990; Christaios and Serre, 2000)。在機率場模式的機率密度函數 (probability density function, PDF)， f_{KB} 可表示如下：

$$P_{KB}[\chi_1 \leq X_{p_1} \leq \chi_1 + d\chi_1, \chi_2 \leq X_{p_2} \leq \chi_2 + d\chi_2, \dots] = f_{KB}(X_{p_1}, X_{p_2}, \dots) d\chi_1 d\chi_2 \dots \quad (5)$$

其中，

向量 $P = (s, t)$ ，是一個時空的點 (s 為空間中地理座標位置， t 為時間) 下標 KB 是指使用知識庫 (knowledge base, KB) 去構成機率密度函數。

貝氏最大熵法將知識根據分為兩類，一為 $G-KB$ ，指全面性的知識根據 (General KB)，包含物理、生物的定律與時間空間相關的時空理論模式 (如平均值、共變異數、半變異數、高階動差等)，適用於整個觀察區域。另一則為 $S-KB$ ，指特定點的知識根據 (Site-specific, KB)，包含確定性資料 (Hard data) 與不確定性資料 (Soft data) 這兩種資料型態。確定性資料是觀測點的值為一確切的值，不確定性資料則是使用機率密度函數來描述觀測點的值。而將全面性與特定點的知識根據結合，則為總知識根據 $K-KB$ (Total KB)，可表示為 $K = G \cup S$ 。

本計畫將運用已知站點的雨量資料作為確定性資料 (Hard data) 以及使用雷達資料進行降水估計推估雨量之結果，作為不確定性資料 (Soft data)，進行未知網格點的雨量推估。

第二節 確定性與不確定性資料之應用

首先，在有關確定性資料的部分，本計畫運用研究區域內所對應之已知雨量站點位的雨量作為確定性資料（Hard data），分別將中央氣象局、水利署、水土保持局所提供之雨量資料比較其有效資料年限，並選取分析應用之時間尺度，如日雨量、時雨量、分雨量等。其後，再使用 Matlab 套裝軟體協助前期資料處理較為繁複的相關作業。在篩選有效之雨量資料後，並統一輸出資料格式，作為 BME 模式的輸入資料，以利進行後續的時空分布分析。

其次，在有關不確定性資料的部分，採用過去廣泛運用於雷達觀測變數作定量降水估計（Quantitative Precipitation Estimation, QPE）。近幾十年來許多的研究證實，雙偏極化雷達參數可提升降雨估計的準確度，因此許多國家陸續將單都卜勒雷達升級為雙偏極化雷達，以加強對降雨的監控與預報。然而，臺灣地區的雙偏極化雷達，約在 2010 年左右開始陸續裝設，其至今資料收集之年份較短，故其能反算之降水量的時間長度亦有限。再者，目前中央氣象局於降雨量的預報，亦採用建立時間較長且觀測值較穩定之雷達回波參數 Z 進行估計；此外，目前中央氣象局採用劇烈天氣監測系統 QPESUMS，將接近地面且不受地形及地面影響之仰角觀測的最低仰角合成回波（Mosaic Hybrid Scan Reflectivity, Hybrid）（Zhang et al. 2005），再利用 $Z = 32.5R^{1.65}$ （Xin et al. 1997）取得降雨估計量，此估計量再經過雨量站校驗後，產生降雨估計整合產品，並依不同單位的使用需求，分別將台灣地區區分為縣市、鄉鎮、村里等行政分區，台灣流域、淡水河、土石流潛勢等分區之 1 小時、3 小時、6 小時、12 小時、24 小時、72 小時之經雨量站校正之雨量。

緣此，根據本研究於第二章之陳有蘭溪內各單位雨量資料之蒐集

成果以及上述之雷達迴波降雨估計值等，定義後續確定性資料（Hard data）及不確定性資料（Soft data）之資料類別，並說明如下：

- 一、確定性資料（Hard data）：區內 26 個雨量站，包括 4 個水保局土石流觀測站、15 個中央氣象局自動測站與同屬測站、7 個水利署雨量站，2000 年至 2020 年之雨量資料。
- 二、不確定資料（Soft data）：為能補足確定性資料之站網分佈不均之缺口，本計畫使用經校正後之雷達回波推估降雨資料，採用格式與確定性資料格式相同之 1 小時 QPESUMS 產製降水估計產品，納入不確定性資料之應用。

第三節 整合性降雨推估模式之建置、測試與驗證

一、操作流程

本計畫運用貝氏最大熵法於降雨量之空間分布推估的操作流程如圖 3-2 所示。首先，將利用建置完成之雷達參數與降雨量關係式，並經過雨量站校驗之 QPESUMS 推估降雨量(Soft data)及實測降雨紀錄(Hard data)作為資料輸入，而後進行趨勢分析，將資料分為低頻(趨勢)及高頻(殘差)，而高頻(殘差)進行共變異數模式建立，進行貝氏最大熵法(BME)計算區域推估點之資料分布特性分析，再將各估計點殘差分析後加上低頻(趨勢)，即可求得推估點之雨量資料，最後再將推估點逐一進行交叉驗證，藉以評估模式之分析成果。

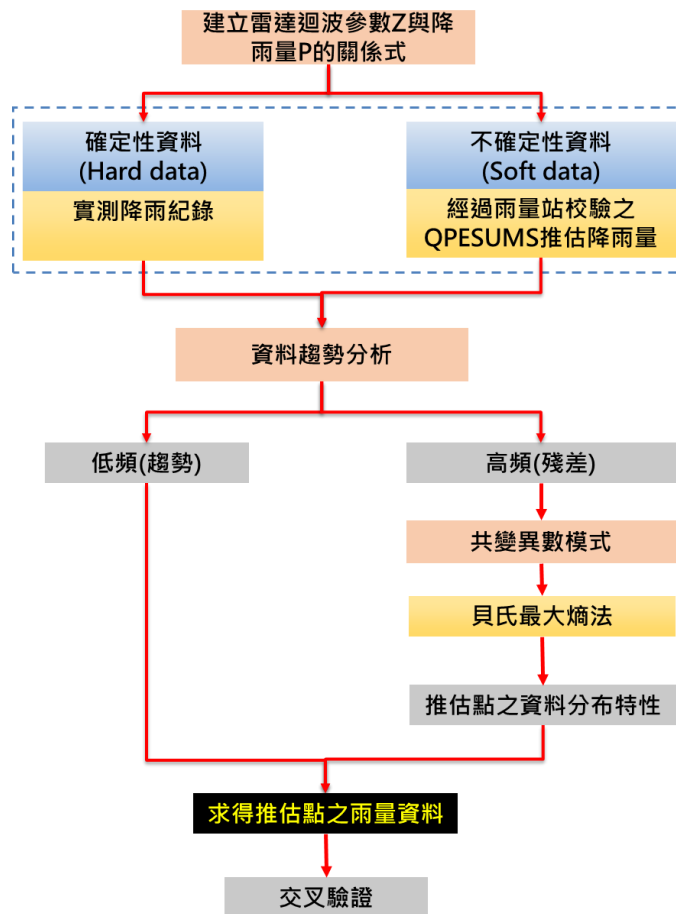


圖 3-2 運用貝氏最大熵法於降雨空間分布推估之操作流程

二、模式建置

本計畫採用貝氏最大熵法進行降雨量在空間分布的推估，其輸入資料分為確定性資料（Hard data）及不確定性資料（Soft data）等兩種。其中，確定性資料是依據探討區域中雨量站蒐集之實測降雨紀錄而得；而在不確定性資料（Soft data）方面，係於中央氣象局利用雷達回波計算降雨量後，再經雨量站校驗後所得之推估雨量，即為降水推估產品 QPESUMS 推估之雨量值。將確定性及不確定資料納入後，使用資料趨勢分析模式，將兩種資料類型的降雨量分離出低頻（資料趨勢）及高頻（資料殘差）。接著由兩資料的殘差分布建立之共變異數模式由貝氏最大熵法進行未知點的降雨量殘差推估，並且結合原先求得之資料趨勢得到最終降雨量在空間上的分布。

而關於上述提及之資料趨勢處理方面，本計畫蒐集相關文獻，歸納如核心平滑法、LSSVM 及 SVR 等方法處理資料，以求得時空分布的趨勢與殘差，接著據此建立巢狀時空共變異數模式，最後再由已知站點資料殘差分布特性，以貝氏最大熵法推求降雨量的時間與空間的分布情形。其中，核心平滑法、LSSVM、SVR 及巢狀時空共變異數模式的推估說明彙整如下：

（一）核心平滑法（Kernel smoothing method）

核心平滑法是在統計中無母數的推估方法，將欲推估點的觀測值視為與近鄰近點資料的距離權重平均。令欲推估點為 P_0 、第 i 筆資料為 P_i 、資料總數為 N 、觀測值與欲推估點的觀測值（趨勢）分別為 Z 與 $\hat{m}$ ，其公式可表示為：

$$\hat{m}(P_0) = \frac{\sum_{i=1}^N K(P_0, P_i) Z(P_i)}{\sum_{i=1}^N K(P_0, P_i)} \quad (6)$$

其中， K 為核心函數，在空間與時間的核心函數可表示為：

$$K(P_0, P_i) = f_s \left(\frac{Dis_s(P_0, P_i)}{B_s} \right) f_t \left(\frac{Dis_t(P_0, P_i)}{B_t} \right) \quad (7)$$

f_s 、 f_t 為一權重型函數，數有以下特性：

1. 其函數值皆為非負實數
2. 通常為對稱圖形
3. 由函數對稱中心為最大值，往兩旁遞減至 0

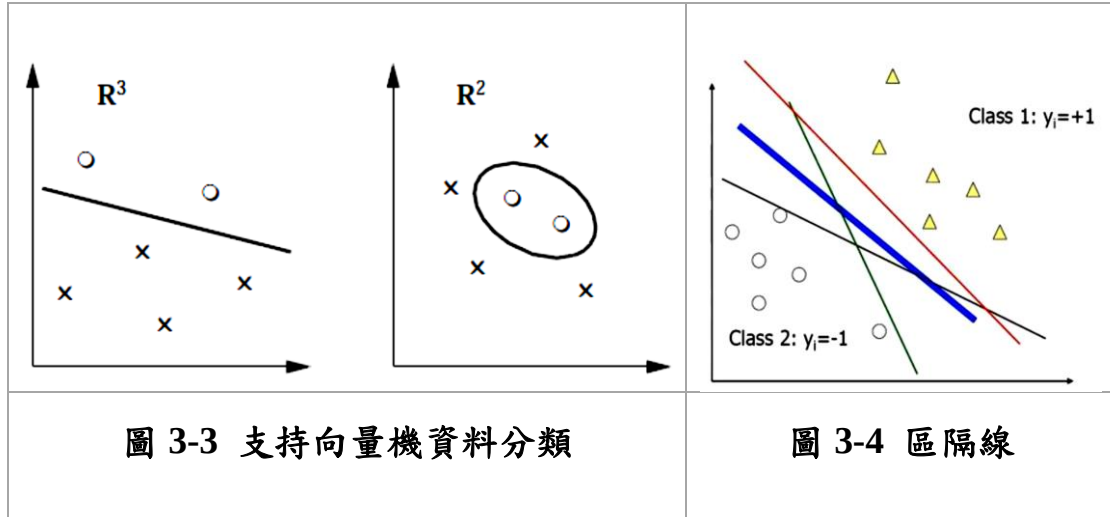
$Dis_s(P_0, P_i)$ 、 $Dis_t(P_0, P_i)$ 分別代表 P_0 與 P_i 的空間與時間的幾何距離； B_s 與 B_t 為空間與時間的核心頻寬，通常用來決定核心函數在該維度往兩旁遞減至 0 的距離。

核心函數有許多種數，如均勻型 (Uniform)、三角型 (Triangular)、高斯型 (Gaussian)、二次方型 (Quadratic)、四次方型 (Quartic) 等，可依資料的特性做選擇。

(二) 最小平方支持向量機 (Least Square-Support Vector Machine, LS-SVM)

支持向量機 (Support Vector Machine, SVM) 是一種可用來執行分類或迴歸的方法。即給予一群已經分類好的資料，經由訓練 (Training) 獲得一組模型，爾後若有尚未分類的資料，支持向量機可以利用先前訓練好的模型去預測 (Predict) 這筆資料所屬的類別。其

概念為：在原 R^2 空間裡，若無法簡單的用「線性」直線將兩種類別的資料分開，那麼便轉換到高維度的 R^3 空間裡做線性的區隔(如圖 3-3)。 R^2 的資料點（通常是向量）將透過一個核函數（kernel function）映射到 R^3 空間，然後在高維度空間裡找出一個超平面（Hyper plane）（圖 3-4）將資料點分離，最後再轉回原空間，完成分類。



由於 SVM 的限制式為不等式，在解決最佳化的問題上一般以二次規劃（Quadratic Programming, QP）解決上述的最佳化問題，計算方面較為複雜。而最小平方支持向量機（Least Square-Support Vector Machine, LS-SVM）係為針對 SVM 之改良方法，其優點為較為簡易快速。在 2001 年時，Suykens 等人為了解決上述的問題，對 SVM 導入最小平方失函數（Least Squares Loss Function）的概念：

$$\begin{aligned} \min Q(w) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \\ \text{s.t. } y(w \cdot \Phi(x_i) + b) &= 1 - \xi_i \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

其中 γ 為調整間距最大化與錯誤最小化的參數，又稱為規則化參數（regularization parameter），此參數的變化及代表 LSSVM 模型對於錯誤的敏感度，而 ξ 為錯誤變數，其總合越大則會須對資料做越大的調整才能使所有資料合乎資料分離的情況，因此通常錯誤變數越小越

好。因此 LSSVM 的最佳解並不同於 SVM 一般為稀疏解，而是可運用 Lagrange method 來最佳化問題進而趨近到最佳解，其式如下：

$$L(x, w, b) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n a_i (w \cdot \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i) \quad (9)$$

對 L 函數一次偏微分可得下式：

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n a_i \Phi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n a_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow a_i = \xi_i \gamma \\ \frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \rightarrow w \cdot \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

因此，原本的最佳化問題被轉換為解線性方程式組的問題，進而降低了計算複雜度，LSSVM 與 SVM 不同處為 LSSVM 將所有的資料點均當成支持向量 (Support Vector)，而 SVM 則是藉由部分的資料點作為支持向量。

(三) 支持向量迴歸 (Support Vector Regression, SVR)

支持向量迴歸 (Support Vector Regression, SVR) 為非線性迴歸的模式，和 SVM 不同的是，SVM 找的是能將資料一分為二的平面，而 SVR 所找的則是能準確預測資料分佈的平面。其主要概念為給於一容錯上限，讓在執行迴歸分析時，對於每一個資料點的誤差值給於一定程度的容錯範圍，如圖 3-5 所示，對於每一個資料超過所定義的誤差範圍才算誤差值，藉由這樣容錯的機制，對於所歸納出的迴歸模型將避免有過適 (over-fitting) 現象。其數學模型與 SVM 類似，表示式為：

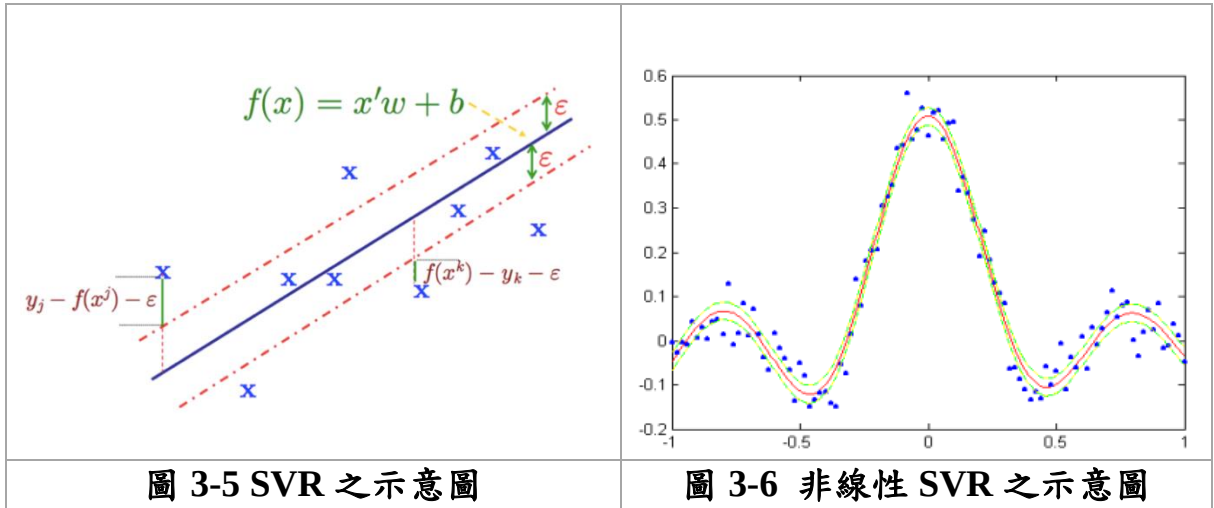
$$\begin{aligned}
 & \min_{(w,b,\xi,\xi^*) \in R^{n+1+2m}} \frac{1}{2} w^T w + C \mathbf{1}^T (\xi + \xi^*) \\
 & \text{s.t.} \quad A w + \mathbf{1} b - y \leq \mathbf{1} \epsilon + \xi \\
 & \quad \quad -A w - \mathbf{1} b + y \leq \mathbf{1} \epsilon + \xi^* \\
 & \quad \quad \xi, \xi^* \geq 0.
 \end{aligned} \tag{12}$$

其中 ϵ 為容忍錯誤之上限。而如同迴歸分析一樣，求得模型之後，將可利用預測函數進行遺失值之插補動作。

另外，也可以透過 kernel trick 的技巧將 SVR 由線性模型轉換成非線性模型，表示為下：

$$\begin{aligned}
 & \min_{(w,b) \in R^{n+1}} \Phi_{\epsilon,\alpha}(w,b) := \\
 & \min_{(w,b) \in R^{n+1}} \frac{1}{2} (w'w + b^2) + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^m p_{\epsilon}^2(A_i w + b - y_{i,\alpha})
 \end{aligned} \tag{13}$$

透過非線性的 SVR 模型，可以處理更複雜資料，以達到更好的預測效果，如圖 3-6 所示。



(四) 巢狀時空共變異數模式 (Nested spatiotemporal covariance model)

由前述，利用核心平滑、LSSVM 或 SVR 的方式將資料分為低頻與高頻，高頻部分的自相關性函數則是使用巢狀時空共變異數模式

(Nested spatiotemporal covariance model) 進行推估，該模式是由數個純時間與純空間的共變異數模式相乘，再將其相加組合而成，表示如下式：

$$C_{st}(h, \tau) = \sum_{i=1}^N b_l C_{sl}(h; A_{sl}) C_{tl}(\tau; A_{tl}) \quad (14)$$

其中，

下標 s 指空間、 t 指時間， h 為空間距離、 τ 為時間距離、 l 為第 l 個時空共變異數模式； N 為巢狀個數、 b_l 為門檻值、 $C_{sl}(h; A_{sl})$ 與 $C_{tl}(\tau; A_{tl})$ 分別表示純空間與純時間的共變異數模式，常用的型式有高斯型(Gaussian)、指數型(Exponential)等。 A_{sl} 與 A_{tl} 則是 C_{sl} 與 C_{tl} 所需的參數，一般稱為此共變異數的範圍，由(14)式可以發現，巢狀共變異數模式 $C_{st}(h, \tau)$ 是由多個純空間共變異數模式與純時間共變異數模式相乘後，相加而成，共變異數由下標 $l = 1$ 計算至 $l = N$ 。

建立巢狀共變異數模式後，利用赤池信息量準則(Akaike information criterion, AIC)判斷模式擬合資料的優良性。赤池信息量準則是由日本統計學家赤池弘次在 1974 年提出，並建立在信息熵的概念上。AIC 可表示如式(15)：

$$AIC = 2k + n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (15)$$

其中， k 為使用的參數數量， n 為觀察的資料筆數， RSS 則為殘差平方和(Residual sum of squares)。進行資料模式模擬時，增加參數可提高擬合的優良性，但卻容易出現過度擬合(overfitting)的狀況。因此 AIC 的設計即是希望尋找在參數最少的情況下，能最好地解釋數據的模式，當 AIC 值越小時，就代表越接近這個目標。

三、模式測試與驗證

本計畫所採用之貝氏最大熵法 BME 模式，係利用 Quantum GIS 中，由國立臺灣大學 STEMLAB 開發之 QtBME 插件進行推估。將利用趨勢移除方法移除資料點在時間空間上的趨勢後，於模式輸入殘差值，測試不同共變異模式參數，包含推估時所納入的最大資料筆數、最大搜索半徑、以及資料在空間及時間上間隔數目進行共變異數圖形繪製，並設定共變異數在空間與空間想要觀察之遲滯範圍，其計算成果如圖 3-7 所示。

本研究對陳有蘭溪地區已知雨量站確定性資料（Hard data）作為推估點，進行已知站點的降雨時空分布推估。其後，透過交叉驗證，擇定推估值與實際值方均根誤差（RMSE）最小所對應之共變異數參數，進而推估全區網格點降雨量之時空分布，其成果將於下一章節說明。

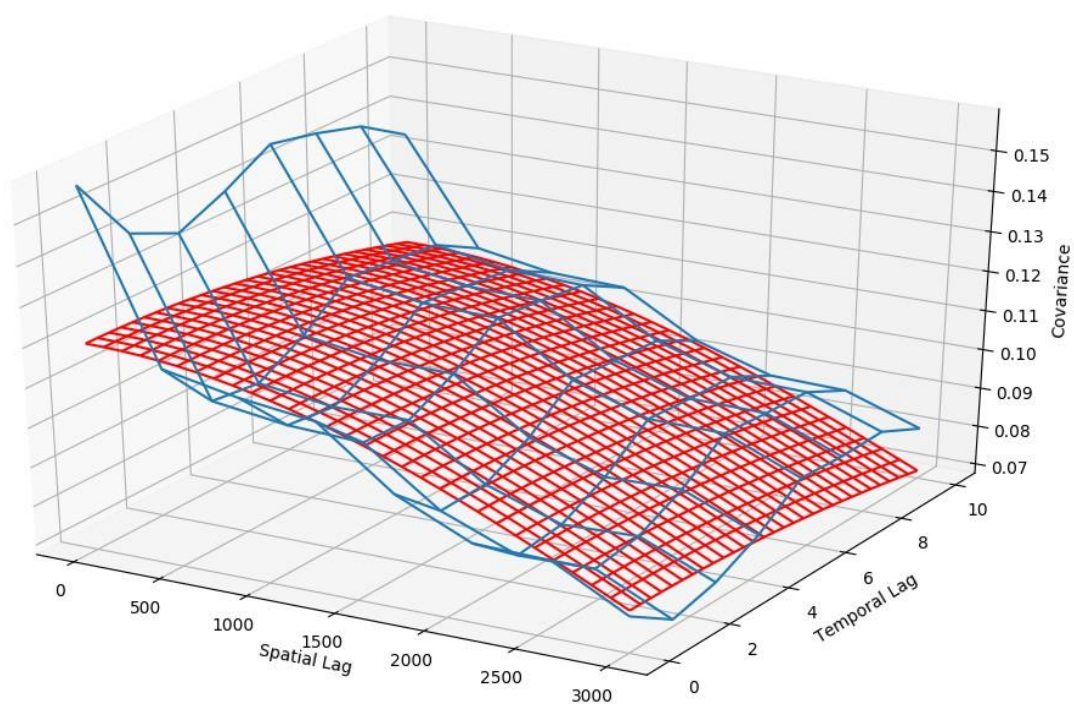


圖 3-7 共變異數圖形成果展示

第四章 網格化降雨推估與降雨特性分區

第一節 計畫區域的網格化降雨推估

本計畫探討之區域為陳有蘭溪集水區，其前述利用 BME 模式計算採用的已知雨量站及雷達推估降雨點位所對應之雨量資料，其點位分布如圖 4-1 所示。而在利用核心平滑法、LSSVM、SVR 等方法移除時間空間上趨勢後，輸入殘差值，進行研究區域降雨推估，並依前節所述之交叉驗證方式，分別對 26 個已知雨量站點視為推估點進行驗證，當推估完成時，可以選擇性地輸入採樣數(Random Sample Number)，即為交叉驗證所取的資料筆數，進行後續的交叉驗證，其交叉驗證成果示意圖如圖 4-2。此處使用之驗證方式為留一驗證(Leave-one-out)，即將需驗證的資料取出一個當作未知點，再由其他資料點推估該未知點，以驗證資料模型的準確性。

圖 4-2 交叉驗證的資料特性，有均方根誤差(RMSE)、平均值(Mean)、標準差(Standard Deviation)、25 百分位數、中位數、75 百分位數、最大值及最小值，可作為模式準確與否的參考依據。



圖 4-1 實測雨量站及雷達推估降雨點位分佈圖

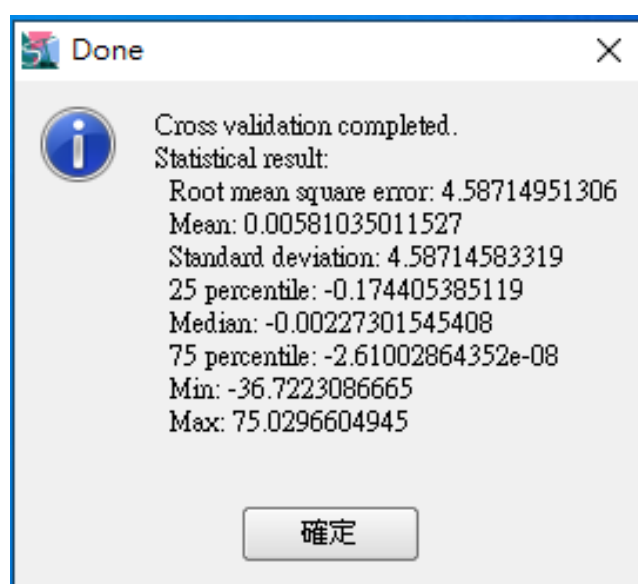


圖 4-2 BME 模式交叉驗證示意圖

在 BME 模式的輸入參數中，兩兩測站計算共變異數模式的最遠距離設定為 15 公里，lag 數為 8 個，並最多由各點鄰近 20 個點來進行評估。

其後，再利用 BME 模式對目標區域建立網格間距為 1.25 公里之網格點（如圖中土石流潛勢溪流影響範圍內的黃色點，合計 118 點）進行降雨時空分布的推估，網格點分佈如圖 4-3 所示，而本計畫利用 BME 模式進行時空分布推估之結果示意圖如圖 4-4。此外，彙整民國 97 年至 108 年曾發佈土石流警戒之降雨事件，如表 4-1，做為雨量站確定性資料及定量降水預報之不確性資料進行模式推估降雨量的率定驗證之用，藉以建立適用於陳有蘭溪流域之共變異數模式。經多組參數測試後，其成果如表 4-2 所示，擇定誤差(RMSE 值)最小的一組參數作為後續推估的共變異數模式輸入條件。其中，LSSVM 資料去趨勢推估結果之 RMSE 值在整體表現上，普遍低於核心平滑法及 SVR 對應之 RMSE 值，顯示其推估成果較佳，故後續降雨推估將採用 LSSVM 資料去趨勢方法進行雨量推估，並針對各土石流潛勢溪流範圍內之推估點降雨量，與實測雨量觀測值進行分區比較與探討，提升山區降雨觀測之代表性，期能藉以達成強化土石流警戒發佈可靠性之目標。

表 4-1 曾發佈土石流預警之降雨事件

	土石流警戒發佈時間
97 年卡玫基颱風	7/17 19:30~7/18 18:00
97 年辛樂克颱風	9/13 19:30~9/19 18:32
97 年薔蜜颱風	9/28 09:00~10/13 22:30
98 年莫拉克颱風	8/7 11:00~8/11 17:00
99 年凡那比颱風	7/19 08:00~7/19 20:00
100 年 0719 豪雨	7/19 09:00~7/20 11:00
101 年泰利颱風	6/19 17:00~6/21 11:00
102 蘇力颱風	7/12 14:00~7/13 20:00
102 年康芮颱風	8/28 17:00~8/29 23:00
103 年 0520 豪雨	5/20 23:00~5/22 05:00
103 年 0606 豪雨	6/6 21:00~6/7 07:00
103 年麥德姆颱風	7/22 23:00~7/24 05:00
104 年蘇迪勒颱風	8/7 17:00~8/9 11:00
104 年杜鵑颱風	9/28 11:00~9/29 17:00
105 年 0611 豪雨	6/11 18:30~6/14 12:30
105 年尼伯特颱風	7/7 13:30~7/8 18:30
105 年莫蘭蒂颱風	9/14 10:30~9/15 06:30
105 年馬勒卡颱風	9/17 12:30~9/17 21:30
105 年梅姬颱風	9/27 12:30~9/28 23:30
106 年 0601 豪雨	6/2 12:30~6/4 21:30
106 年 0613 豪雨	6/16 15:30~6/18 12:30
106 年尼莎暨海棠颱風	7/29 12:30~7/31 20:30
107 年 0619 豪雨	6/19 14:00~6/21 06:30
108 年 0520 豪雨	5/18 12:30~5/20 15:30
108 年 0611 豪雨	6/12 06:30~6/14 21:30
108 年利奇馬颱風	8/10 05:30~8/12 15:30
108 年白鹿颱風	8/24 15:30~8/25 06:30

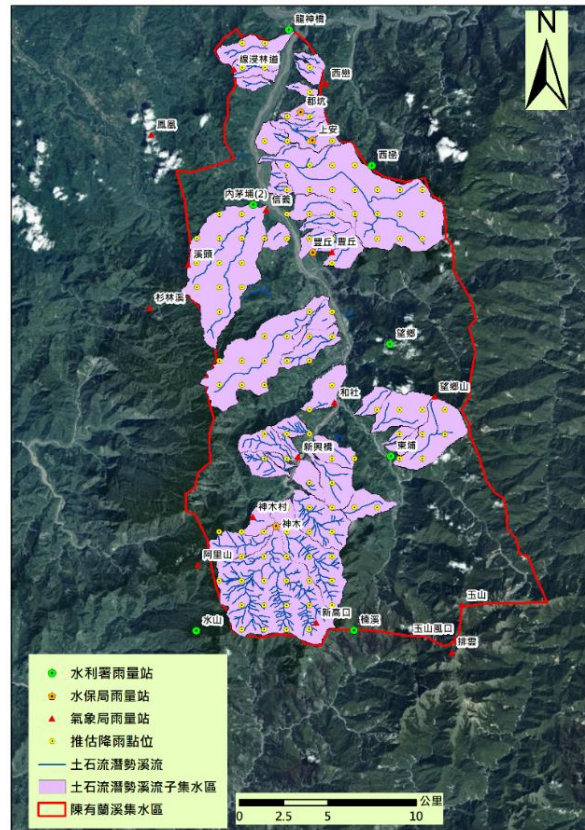


圖 4-3 陳有蘭溪集水區網格化降雨推估點位圖

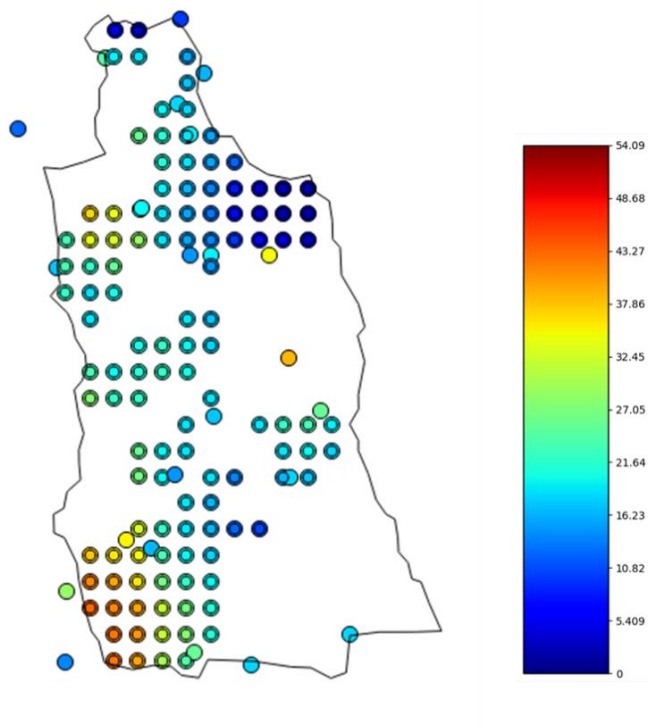


圖 4-4 降雨量時空分布推估之結果展示

表 4-2 共變異數模式參數率定之 RMSE 值

趨勢處理方法 降雨事件	核心平滑	LSSVM	SVR
97 年卡玫基颱風	3.36	5.02	5.07
97 年辛樂克颱風	2.91	6.30	9.86
97 年薔蜜颱風	6.03	5.44	8.82
98 年莫拉克颱風	18.80	18.44	17.98
99 年凡那比颱風	5.01	4.32	7.98
100 年 0719 豪雨	8.05	7.85	8.11
101 年泰利颱風	9.60	7.58	6.78
102 蘇力颱風	3.06	4.33	9.28
102 年康芮颱風	8.61	9.78	7.94
103 年 0520 豪雨	9.40	5.93	3.72
103 年 0606 豪雨	6.66	4.81	9.60
103 年麥德姆颱風	2.26	5.25	8.62
104 年蘇迪勒颱風	7.03	5.31	7.31
104 年杜鵑颱風	6.63	3.25	4.09
105 年 0611 豪雨	9.92	2.30	6.33
105 年尼伯特颱風	3.99	4.03	4.23
105 年莫蘭蒂颱風	4.29	5.78	7.14
105 年馬勒卡颱風	3.68	8.88	7.99
105 年梅姬颱風	7.57	4.68	7.76
106 年 0601 豪雨	17.73	14.03	15.70
106 年 0613 豪雨	7.52	6.23	7.78
106 年尼莎暨海棠颱風	4.92	9.82	3.85
107 年 0619 豪雨	4.72	2.69	3.87
108 年 0520 豪雨	9.53	6.63	8.70
108 年 0611 豪雨	8.85	5.67	6.38
108 年利奇馬颱風	5.43	8.05	7.48
108 年白鹿颱風	9.07	6.83	5.01

第二節 降雨特性解析與分區探討

水文模式對降雨量進行推估時，若該模式將時間及空間的相關性納入考量後，同時將不確定資料納入分析，可強化其推估資訊。本計畫採用之 BME 模式亦能同時處理線性及非線性問題，並不需事先對資料的分布型態進行假設，故對研究區域內 4 個土石流觀測站對應之土石流潛勢溪流影響範圍進行研究探討，陳有蘭溪集水區主要的土石流觀測站分別為神木、郡坑、上安及豐丘站，各觀測站對應之土石流潛勢溪流、參

考雨量站，如表 4-3 所示，對此針對上述六條潛勢溪流範圍內之估計點進行降雨特性解析，其對應估計點位置如圖 4-5 至圖 4-7。

表 4-3 觀測站對應土石流潛勢溪流及參考雨量站

站名	神木	郡坑	上安	豐丘
土石流潛勢溪流	投縣 DF199 投縣 DF226 投縣 DF227	投縣 DF167	投縣 DF165	投縣 DF190
參考雨量站	神木 ^s	郡坑 ^s	上安 ^s	豐丘 ^s
	神木村	上安 ^s	郡坑 ^s	豐丘

參考雨量站加註代號表非氣象局雨量站

(s:水保局、w:水利署、tp:臺北市府、sr:石門水庫管理局、fr:翡翠水庫管理局)



圖 4-5 神木土石流觀測站對應雨量估計點



圖 4-6 郡坑及上安土石流觀測站對應雨量估計點

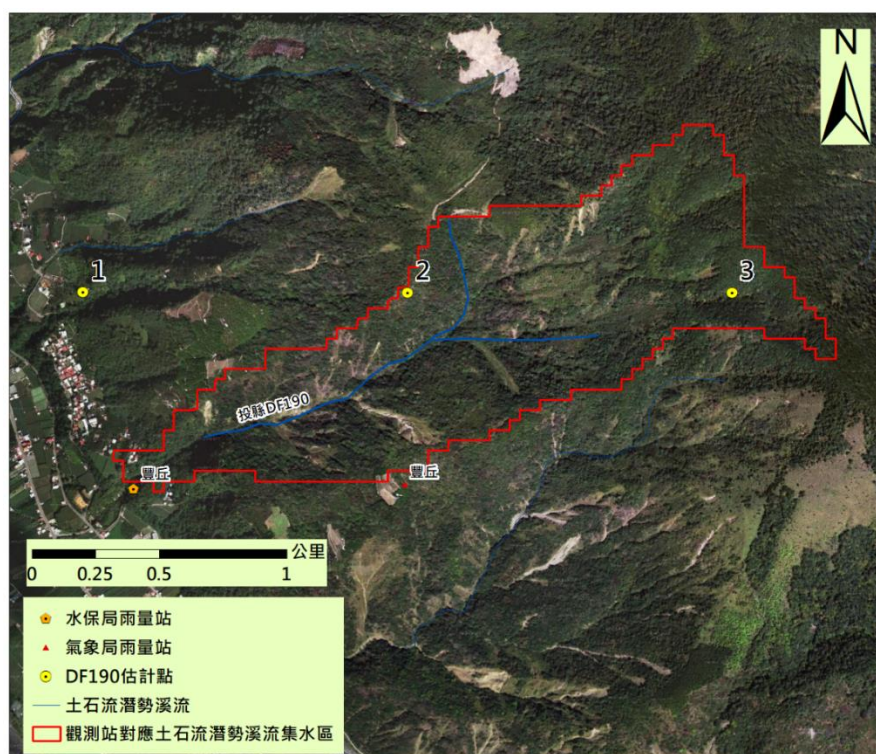


圖 4-7 豐丘土石流觀測站對應雨量估計點

為了解區域降雨特性，本研究將民國 97~108 年來曾發布土石流預警之降雨事件彙整，並以 BME 模式進行降雨推估，為了解其推估成效，對

於上述曾發佈土石流警戒之歷史降雨事件發生時段，進行網格化降雨推估，將土石流觀測站點位當作未知點，再由其他資料(Softa data 與 Hard data)推估該未知點，對於歷年事件，將模式推估事件總降雨量及神木、郡坑、上安、豐丘四處土石流觀測站觀測總降雨量進行迴歸分析，作為模式推估成果的相關性探討，扣除無實測雨量資料降雨事件後，模式分析成果展示，如圖 4-8，詳細分析成果如表 4-4， R^2 值為 0.7797，顯示其推估雨量與實測雨量具有高度正相關。再者，從圖上可發現，仍是有部分幾場降雨事件之推估降雨量與實測雨量間有較大的差距。經細部資料檢視結果發現，應為該場事件的雷達回波定量降水資料與其鄰近雨量站點觀測值，原本即有相當程度的差異，導致模式估計的誤差。究其原因，推測為雷達迴波的觀測，仍是受限於地形或遮蔽等之影響，在部分地區的估計有較大的誤差。因此，除雷達迴波技術的精進外，亦建議可優先在推估誤差較大之處增設雨量觀測站，藉以補足及完善全區域的降雨估計。

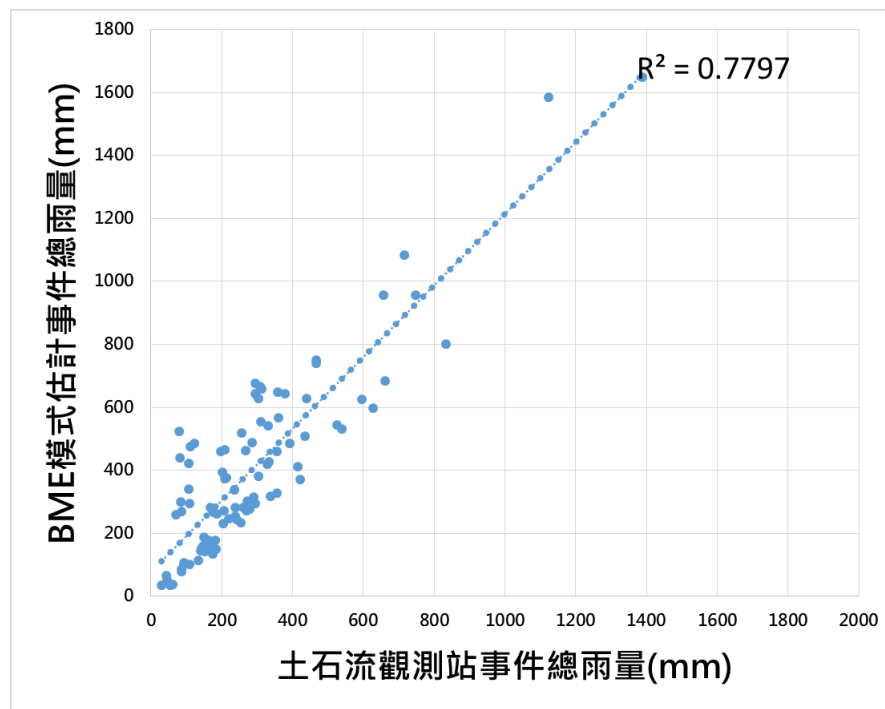


圖 4-8 土石流觀測站降雨量與 BME 模式推估降雨量迴歸關係圖

表 4-4 土石流觀測站觀測雨量與推估雨量比較

站別	神木站		郡坑站		上安站		豐丘站	
單位：毫米(mm)	觀測雨量	推估雨量	觀測雨量	推估雨量	觀測雨量	推估雨量	觀測雨量	推估雨量
98 年莫拉克颱風	1389	-	467	-	467	-	835	-
100 年 0719 豪雨	149	187	270	272	278	278	242	244
101 年泰利颱風	無資料	1396	106.5	422	110.5	475	124	485
102 蘇力颱風	526	545	414	412	330	419	422	371
102 年康芮颱風	661	685	596	626	629	598	539	533
103 年 0520 豪雨	238	255	238	282	185	261	144	152
103 年 0606 豪雨	163	172	338	318	355	328	254	233
103 年麥德姆颱風	357	650	296	643	332	541	305	629
104 年蘇迪勒颱風	296	296	93	107	109	102	133	115
104 年杜鵑颱風	290	316	141	146	160	160	165	165
105 年尼伯特颱風	87	87	62	38	55	36	31	35
105 年莫蘭蒂颱風	262	283	175	136	183	149	220	247
105 年馬勒卡颱風	236	339	152	141	167	158	205	232
105 年梅姬颱風	334	428	147	161	163	179	181	179
106 年 0601 豪雨	1124	1586	747	956	716	1084	657	1240
106 年 0613 豪雨	392	485	285	488	255	520	209	669
106 年尼莎暨海棠颱風	361	568	202	395	267	464	312	610
107 年 0619 豪雨	273	303	206	273	177	268	167	282
108 年 0520 豪雨	379	643	81	440	80	524	83	513
108 年 0611 豪雨	440	628	313	658	307	667	296	883
108 年利奇馬颱風	434	508	209	373	213	377	197	461
108 年白鹿颱風	110	296	70	258	87	269	107	340
R²	0.7797							

為釐清該集水區之降雨特性，針對上述四處土石流觀測站對應六條潛勢溪流範圍內之估計點進行降雨特性解析，將歷史降雨事件時段之推估點雨量資料與觀測資料進行比較。其中，神木站對應之投縣 DF226 土石流潛勢溪流範圍內共 6 處估計點，其降雨推估成果如表 4-5 所示，神木站位於高程約 1179m 處，約落於 DF226 土石流潛勢溪流下游處，由模式推估成果顯示，高程較高之兩處估計點(點 1 及點 2)雨量明顯比下游高許多，約是神木站的 1.71~1.77 倍，而靠近神木站之估計點(點 6)，高程約 1398m，約為神木站的 1.34 倍；神木站對應之投縣 DF227 土石流潛勢溪流範圍內共 16 處估計點，其降雨推估成果如表 4-6、表 4-7，約為神木站的 0.98~1.21 倍；神木站對應之投縣 DF199 土石流潛勢溪流範圍內共 8 處估計點，其降雨推估成果如表 4-8 所示，此範圍內之高程介於 2164~2517m 之點 1、點 2、點 3、點 6，約為神木站的 1.38~1.59 倍，高程介於 1663~1725m 之點 4、點 5、點 8，約為神木站的 1.32~1.40 倍，而接近神木站之估計點(點 7)，約是神木站的 1.31 倍；郡坑站對應之投縣 DF167 土石流潛勢溪流範圍內共 2 處估計點，其降雨推估成果如表 4-9 所示，高程 510m 之點 1，約為郡坑站的 1.75 倍，高程 875m 之點 2，約為郡坑站的 1.95 倍；上安站對應之投縣 DF165 土石流潛勢溪流範圍內共 3 處估計點，其降雨推估成果如表 4-9 所示，高程分別為 820m、792m、1426m，約為上安站的 1.85~1.90 倍；豐丘站對應之投縣 DF190 土石流潛勢溪流範圍內共 3 處估計點，其降雨推估成果如表 4-10 所示高程分別為 685m、1404m、1945m，約為豐丘站的 1.83~1.85 倍。

由上述影響範圍內之降雨特性探討可知，位於高程較高處之虛擬雨量站之雨量值普遍高於高程較低之虛擬雨量站。由此可見，在空間上確實顯現不同的降雨特性分布。因此，後續在應用面上，為提升土

石流警戒發佈的準確性。建議以整合性降雨模式的推估結果為基礎，針對土石流潛勢溪流集水區的空間降雨特性進行探討與分區，並針對利用何種警戒雨量的參考分區，更能代表且準確的預測土石流事件的發生，藉以提供未來土石流防災應變相關機制的參考依據。

表 4-5 投縣 DF226 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性

站點	神木站	1	2	3	4	5	6
高程(m)	1179	2360	1830	1355	2377	1835	1398
事件總雨量(mm)							
97 年卡玫基颱風	356	651	535	455	579	442	461
97 年辛樂克颱風	無資料	385	262	114	354	96	146
97 年薔蜜颱風	無資料	856	783	698	801	668	740
98 年莫拉克颱風	1389	-	-	-	-	-	-
99 年凡那比颱風	46.5	-	-	-	-	-	-
100 年 0719 豪雨	149	545	366	159	509	150	197
101 年泰利颱風	無資料	1944	1845	1737	1878	1560	1727
102 蘇力颱風	526	590	569	539	585	526	560
102 年康芮颱風	661	721	689	663	719	661	690
103 年 0520 豪雨	238	274	263	247	266	238	255
103 年 0606 豪雨	163	173	168	163	174	170	172
103 年麥德姆颱風	357	745	735	717	747	718	733
104 年蘇迪勒颱風	296	348	335	324	317	296	296
104 年杜鵑颱風	290	499	402	296	477	291	316
105 年 0611 豪雨	無資料	529	449	413	482	372	383
105 年尼伯特颱風	87	120	109	109	113	89	87
105 年莫蘭蒂颱風	262	327	261	274	324	274	283
105 年馬勒卡颱風	236	398	349	281	407	292	339
105 年梅姬颱風	334	556	544	508	502	419	465
106 年 0601 豪雨	1124	1611	1599	1550	1610	1569	1595
106 年 0613 豪雨	392	806	770	745	797	742	757
106 年尼莎暨海棠颱風	361	940	958	917	953	895	966
107 年 0619 豪雨	273	309	303	278	310	277	303
108 年 0520 豪雨	379	746	730	701	738	683	735
108 年 0611 豪雨	440	747	750	757	750	748	748
108 年利奇馬颱風	434	509	497	484	523	488	508
108 年白鹿颱風	110	314	294	277	311	272	296
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	1.77	1.58	1.38	1.71	1.34	1.43
雨量比排序	-	1	3	5	2	6	4

表 4-6 投縣 DF227 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性(1/2)

站點	神木站	1	2	3	4	5	6	7	8
高程(m)	1179	2337	2256	2489	2489	2735	2390	1966	2229
事件總雨量(mm)	356	410	394	421	447	457	454	398	390
97 年卡玫基颱風	無資料	299	321	315	309	321	351	321	312
97 年辛樂克颱風	無資料	901	819	702	675	687	879	1021	835
97 年薔蜜颱風	1389	-	-	-	-	-	-	-	-
98 年莫拉克颱風	46.5	-	-	-	-	-	-	-	-
99 年凡那比颱風	149	174	161	156	153	157	196	182	157
100 年 0719 豪雨	無資料	561	544	528	513	514	499	518	498
101 年泰利颱風	526	603	573	519	480	499	585	585	562
102 蘇力颱風	661	755	743	706	677	691	692	699	695
102 年康芮颱風	238	273	270	252	235	244	251	254	252
103 年 0520 豪雨	163	186	181	170	160	165	172	172	171
103 年 0606 豪雨	357	615	671	683	689	686	491	520	566
103 年麥德姆颱風	296	377	346	278	244	261	357	372	346
104 年蘇迪勒颱風	290	254	255	63	0	31	462	349	353
104 年杜鵑颱風	無資料	709	674	598	560	579	613	631	598
105 年 0611 豪雨	87	103	93	93	102	97	88	93	91
105 年尼伯特颱風	262	245	271	324	342	333	218	206	233
105 年莫蘭蒂颱風	236	257	237	234	264	249	284	261	221
105 年馬勒卡颱風	334	359	355	329	317	323	363	360	358
105 年梅姬颱風	1124	1176	1127	1089	1062	1075	1198	1187	1114
106 年 0601 豪雨	392	431	410	404	393	398	409	411	395
106 年 0613 豪雨	361	315	326	348	374	361	360	352	351
106 年尼莎暨海棠颱風	273	290	286	289	283	286	280	279	272
107 年 0619 豪雨	379	407	389	377	364	371	399	402	380
108 年 0520 豪雨	440	441	441	444	439	441	436	435	440
108 年 0611 豪雨	434	443	439	432	429	431	447	437	425
108 年利奇馬颱風	110	120	113	109	102	106	118	114	110
108 年白鹿颱風	-	1.11	1.17	1.11	1.08	1.10	1.19	1.19	1.14
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	7	4	8	10	9	2	3	5
雨量比排序	-	7	4	8	10	9	2	3	5

表 4-7 投縣 DF227 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性(2/2)

站點	神木站	9	10	11	12	13	14	15	16
高程(m) 事件總雨量(mm)	1179	2068	2015	2189	1645	1849	1663	2167	1362
97 年卡玫基颱風	356	414	434	513	439	366	389	397	359
97 年辛樂克颱風	無資料	314	312	382	358	192	241	297	116
97 年薔蜜颱風	無資料	703	674	864	802	933	788	721	782
98 年莫拉克颱風	1389	-	-	-	-	-	-	-	-
99 年凡那比颱風	46.5	-	-	-	-	-	-	-	-
100 年 0719 豪雨	149	155	154	211	202	112	118	147	62
101 年泰利颱風	無資料	491	472	479	448	431	425	401	385
102 蘇力颱風	526	528	473	585	536	519	505	461	472
102 年康芮颱風	661	684	649	684	619	614	623	608	542
103 年 0520 豪雨	238	246	229	248	230	225	225	217	197
103 年 0606 豪雨	163	168	157	172	154	153	155	153	140
103 年麥德姆颱風	357	609	640	462	443	459	499	558	391
104 年蘇迪勒颱風	296	299	241	343	325	305	282	239	199
104 年杜鵑颱風	290	277	13	579	560	394	349	320	355
105 年 0611 豪雨	無資料	538	541	595	535	498	455	474	413
105 年尼伯特颱風	87	91	100	83	78	79	77	90	61
105 年莫蘭蒂颱風	262	303	333	230	184	204	264	331	192
105 年馬勒卡颱風	236	193	226	307	267	214	178	205	225
105 年梅姬颱風	334	325	308	366	361	353	307	279	333
106 年 0601 豪雨	1124	1078	1045	1210	1187	1114	1102	1073	1143
106 年 0613 豪雨	392	386	376	407	394	378	371	366	370
106 年尼莎暨海棠颱風	361	365	389	368	389	368	369	380	371
107 年 0619 豪雨	273	277	268	281	278	256	256	253	252
108 年 0520 豪雨	379	373	362	396	389	373	369	360	367
108 年 0611 豪雨	440	437	436	437	436	440	445	443	441
108 年利奇馬颱風	434	421	421	458	445	432	430	418	439
108 年白鹿颱風	110	107	104	123	113	106	104	103	105
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	1.04	1.05	1.21	1.14	1.07	1.05	1.04	0.98
雨量比排序	-	14	13	1	6	11	12	15	16

表 4-8 投縣 DF199 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性

站點	神木站	1	2	3	4	5	6	7	8
高程(m) 事件總雨量(mm)	1179	2517	2164	2303	1663	1711	2245	1262	1725
97 年卡玫基颱風	356	534	502	493	446	447	449	435	440
97 年辛樂克颱風	無資料	268	297	287	99	113	174	44	45
97 年薔蜜颱風	無資料	649	630	618	590	590	580	497	490
98 年莫拉克颱風	1389	-	-	-	-	-	-	-	-
99 年凡那比颱風	46.5	-	-	-	-	-	-	-	-
100 年 0719 豪雨	149	341	378	363	151	165	238	149	150
101 年泰利颱風	無資料	1973	1808	1629	1622	1454	1265	1396	1227
102 蘇力颱風	526	515	527	486	521	469	399	498	424
102 年康芮颱風	661	761	743	694	668	651	568	650	604
103 年 0520 豪雨	238	276	273	255	241	239	216	226	217
103 年 0606 豪雨	163	176	178	170	166	174	162	168	167
103 年麥德姆颱風	357	1133	1022	989	735	818	772	718	762
104 年蘇迪勒颱風	296	361	390	338	341	364	303	311	316
104 年杜鵑颱風	290	0	266	33	290	290	282	290	290
105 年 0611 豪雨	無資料	626	474	595	398	418	504	378	370
105 年尼伯特颱風	87	204	160	197	110	144	170	96	105
105 年莫蘭蒂颱風	262	475	471	473	327	438	433	293	331
105 年馬勒卡颱風	236	382	255	343	236	253	307	266	257
105 年梅姬颱風	334	457	426	406	418	373	363	334	317
106 年 0601 豪雨	1124	1385	1456	1375	1519	1514	1428	1537	1546
106 年 0613 豪雨	392	722	737	717	732	741	725	733	744
106 年尼莎暨海棠颱風	361	945	938	899	864	890	829	857	855
107 年 0619 豪雨	273	273	279	260	272	268	250	274	264
108 年 0520 豪雨	379	634	687	631	694	680	634	682	685
108 年 0611 豪雨	440	722	760	739	766	759	753	756	763
108 年利奇馬颱風	434	443	460	449	475	472	451	481	494
108 年白鹿颱風	110	270	273	267	276	279	276	270	275
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	1.54	1.59	1.52	1.35	1.40	1.38	1.31	1.32
雨量比排序	-	2	1	3	6	4	5	8	7

表 4-9 投縣 DF167 及投縣 DF165 內估計點降雨特性

站點	郡坑站	1	2	上安站	1	2	3
高程(m)	421	510	875	459	820	792	1426
事件總雨量(mm)	421	510	875	459	820	792	1426
97 年卡玫基颱風	無資料	436	452	無資料	421	429	431
97 年辛樂克颱風	無資料	109	108	無資料	71	105	109
97 年薔蜜颱風	無資料	414	418	無資料	402	410	410
98 年莫拉克颱風	467	-	-	-	-	-	-
99 年凡那比颱風	94	-	-	-	-	-	-
100 年 0719 豪雨	270	268	272	278	278	278	280
101 年泰利颱風	106.5	585	589	110.5	562	563	592
102 蘇力颱風	414	382	412	330	366	419	407
102 年康芮颱風	596	604	626	629	576	598	589
103 年 0520 豪雨	238	277	282	185	259	261	247
103 年 0606 豪雨	338	331	318	355	327	328	313
103 年麥德姆颱風	296	757	841	332	663	758	740
104 年蘇迪勒颱風	93	129	107	109	114	102	74
104 年杜鵑颱風	141	140	146	160	154	160	164
105 年 0611 豪雨	無資料	300	281	無資料	283	255	237
105 年尼伯特颱風	62	45	38	55	48	36	29
105 年莫蘭蒂颱風	175	154	136	183	169	149	140
105 年馬勒卡颱風	152	156	141	167	169	158	157
105 年梅姬颱風	147	182	161	163	208	179	156
106 年 0601 豪雨	747	1152	1145	716	1169	1176	1136
106 年 0613 豪雨	285	690	643	255	687	639	600
106 年尼莎暨海棠颱風	202	443	437	267	469	464	487
107 年 0619 豪雨	206	280	273	177	282	268	253
108 年 0520 豪雨	81	542	531	80	531	524	521
108 年 0611 豪雨	313	797	802	307	801	813	812
108 年利奇馬颱風	209	389	373	213	383	377	347
108 年白鹿颱風	70	264	258	87	267	269	276
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	1.75	1.95	-	1.90	1.88	1.85
雨量比排序	-	2	1	-	1	2	3

表 4-10 投縣 DF190 土石流潛勢溪流內估計點降雨特性

站點	豐丘站	1	2	3
高程(m)	613	685	1404	1945
事件總雨量(mm)	613	685	1404	1945
97 年卡玫基颱風	304	381	403	409
97 年辛樂克颱風	44	66	75	84
97 年薔蜜颱風	無資料	-	-	-
98 年莫拉克颱風	835	-	-	-
99 年凡那比颱風	86	79	66	72
100 年 0719 豪雨	242	244	254	285
101 年泰利颱風	124	685	696	692
102 蘇力颱風	422	371	365	354
102 年康芮颱風	539	533	525	518
103 年 0520 豪雨	144	152	142	134
103 年 0606 豪雨	254	233	225	217
103 年麥德姆颱風	305	629	616	612
104 年蘇迪勒颱風	133	115	90	88
104 年杜鵑颱風	165	165	171	234
105 年 0611 豪雨	無資料	270	245	226
105 年尼伯特颱風	31	35	27	29
105 年莫蘭蒂颱風	220	247	217	173
105 年馬勒卡颱風	205	232	249	244
105 年梅姬颱風	181	179	182	172
106 年 0601 豪雨	657	1240	1247	1253
106 年 0613 豪雨	209	669	631	618
106 年尼莎暨海棠颱風	312	610	634	634
107 年 0619 豪雨	167	282	247	232
108 年 0520 豪雨	83	513	497	493
108 年 0611 豪雨	296	883	896	882
108 年利奇馬颱風	197	461	454	447
108 年白鹿颱風	107	340	336	330
平均事件雨量比 (推估站點/雨量站點)	-	1.83	1.85	1.85
雨量比排序	-	3	2	1

第五章 警戒分區設定與警戒發佈機制

第一節 警戒模式

目前以觀測站雨量值為基礎發展出之土石流警戒基準值，可藉由社區地方民眾自主雨量觀測、自動雨量觀測站觀測、與避難機制需要所訂定之參考指標；臺灣以降雨驅動指標(Rainfall Triggering Index, RTI)模式，訂定出各鄉鎮的土石流警戒基準值。其計算方式如下：

$$RTI = I \times R_t$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i$$

其中， I 為 60 分鐘累積雨量(60-min accumulated rainfall)； R_t 稱為有效累積雨量(Effective accumulated rainfall)， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量，即 R_0 為目前時間之前的 24 小時累積雨量)， α^i 為前 i 日的折減係數，其中 α 目前採用 0.7。

鄉鎮區警戒指標訂定時，蒐集該鄉鎮內代表雨量站之歷年降雨資料，配合災例發生時間，以人工方式訂出發生機率 70% 之 RTI 值，再將此值除以雨場平均強度，並取 50mm 為級距，便訂定出各鄉鎮之土石流警戒基準值(R_c)。

警戒分析採用中央氣象局每 10 分鐘定時更新的全台 524 個自動雨量站即時資料(張保亮，2011)，並依集水區、村里界、自動雨量站及土石流潛勢溪流所在位置綜合考量，將各鄉鎮區分為數個警戒區的範圍，各區域有不同的主要參考雨量站及備用參考雨量站，其土石流警戒基準值及參考雨量站範例如表 5-1 所示。

表 5-1 109 年土石流警戒基準值明細表範例

縣市	鄉鎮	警戒區範圍		土石流警戒 基準值(mm)	參考雨量站	
		警戒區座落村里 (土石流潛勢溪流總數)	土石流潛勢溪流(條)		代表站 1	代表站 2
南投縣	集集鎮	廣明里(1)	1	500	集集	水里
	信義鄉	同富村(投縣 DF201)	1	250	東埔 ^s	和社
		同富村(投縣 DF229、投縣 DF235)	2		和社	新興橋
		明德村(5)、自強村(2)	7		信義	內茅埔(2) ^w
		神木村(投縣 DF199、投縣 DF226、投縣 DF227)	3		新高口	神木村
		神木村(投縣 DF200、投縣 DF224、投縣 DF225)	3		神木 ^s	神木村
		神木村(5)、同富村(3)	8		新興橋	神木村
		望美村(2)、羅娜村(3)、 自強村(投縣 DF234)	6		羅娜國小 ^s	豐丘 ^s
		人和村(2)、地利村(1)、 雙龍村(3)	6		青雲	人和國小 ^s
		潭南村(4)	4		青雲	德化國小 ^s
		東埔村(5)	5		東埔 ^w	和社
		豐丘村(4)	4		豐丘 ^s	豐丘

.參考雨量站加註下列代號者表非氣象局雨量站

(s:水保局、w:水利署、tp:臺北市政府、sr:石門水庫管理局、fr:翡翠水庫管理局)

第二節 警戒發佈機制

目前土石流警戒由水土保持局統一發布，發布時間為海上陸上颱風警報發布後每日 5、11、17、20、23 定時發布，必要時則不定時加報；警戒等級分為「黃色警戒」及「紅色警戒」二級，發布流程如圖 5-1 所示，依據已發佈的土石流黃色及紅色警戒範圍及土石流基準值，隨著每三小時氣象局風雨預報資料及氣象局自動雨量站資料分別計算預測雨量及有效累積雨量，逐時進行警戒分析計算，若預測雨量大於警戒雨量，且實際雨量已達警戒雨量 30%(警戒雨量 $\leq 350\text{mm}$)或 40%(警戒雨量 $> 350\text{mm}$)，則發佈「黃色警戒」；當有效累積雨量大於警戒雨量、近 3 小時雨量大於 30mm 且降雨無減緩趨勢，則發佈「紅色警戒」，藉由上述警戒發布機制供相關權責單位於災前進行警戒作為。

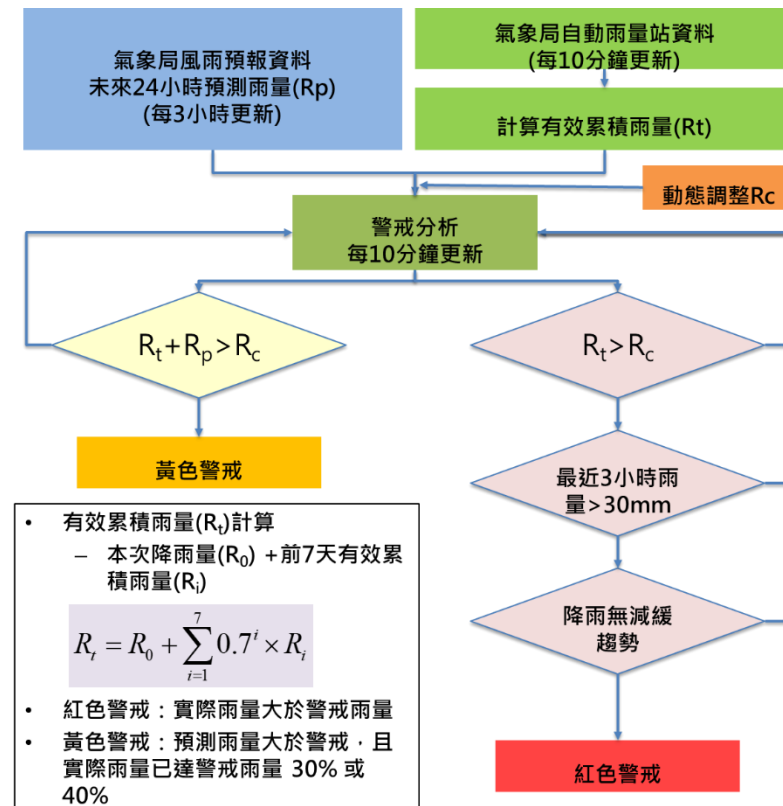


圖 5-1 警戒發布機制流程圖

第三節 警戒分區設定

本計畫利用時空分析技術貝氏最大熵法 (Bayesian Maximum Entropy Method, BME)，結合降雨觀測的確定性資料以及雷達回波的不確定性推估資料，推估整個土石流潛勢溪流集水區的降雨，藉以獲取上、中、下游完整的降雨分布資訊，以土石流特性分區可分為上游(發生部)、中游(流動部)、下游(堆積部)，示意圖如圖 5-2 所示，其土石流潛勢溪流之特性劃設基準如下：

- 一、發生部(上游)：溪床坡度較陡，約 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，其地形特徵上常位於陡峻山嶺凹谷或向源侵蝕之前緣，河川較窄，常侵蝕成深溝或峽谷，呈 V 字形，常有崩塌碎屑堆積。
- 二、流動部(中游)：溪床坡度稍緩，約 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，河道相較上游稍寬，河岸大多因土石流淘刷而呈現 U 字形，常有岩盤或土層露出情形。由於地形受到侵蝕及搬運的影響，常有曲流及深潭之地形。
- 三、堆積部(下游)：溪床坡度約約 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ，下游段大多為平坦寬廣的河川地貌，坡度平緩，底質多為巨石與土砂混合堆積，土砂受搬運及沉積作用後，常呈現扇形地形。

藉由上述之土石流特性分區，本計畫將 BME 模式推估之網格點雨量，利用溪床坡度定義劃分為發生部、流動部、堆積部範圍內之對應網格點，其網格點分區如圖 5-3 所示，再利用不同網格點之選取方式作為參考雨量，依土石流潛勢溪流分區特性可分為以下三種：(1)範圍內估計點平均雨量、(2)發生部估計點平均雨量、(3)發生部及流動部估計點平均雨量，作為警戒發布機制之雨量參考。

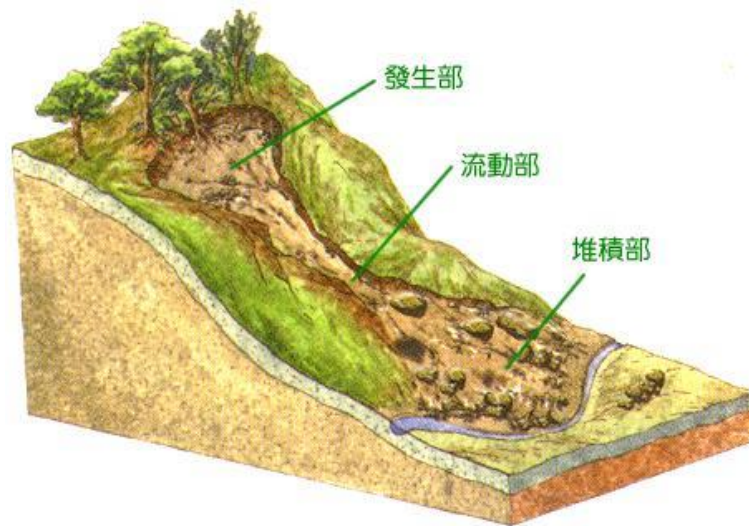


圖 5-2 土石流特性分區



圖 5-3 陳有蘭河流域土石流特性分區

為了解 BME 技術發展之整合性降雨推估模式，對於土石流警戒發布是否有所助益，本研究針對過往降雨事件進行探討。同時，為確保測試結果之合理性，需先去除資料異常之事件。而經原始資料檢視發現，民國 100 年以前之雷達降雨資料常有異常狀況，導致資料不符使用，故後續土石流預警成效評估，將採用民國 100 年後之降雨事件進行探討。再者，模式之測試與分析，係以兩種降雨事件進行，一為實際發生土石流的降雨事件；二則為發佈紅色警戒，但未實際發生土石流的降雨事件。其後，依據不同土石流潛勢溪流集水區來劃設降與警戒分區，探討各分區估計點所得之參考雨量，並計算為有效累積雨量進行土石流預警之分析，茲將成果說明如下：

(一) 實際發生土石流的降雨事件

為了解土石流預警之成效，針對區域內曾經發生土石流事件之土石流潛勢溪流，進行雨量警戒分析。其中，研究區域內，投縣 DF226 發生土石流事件最為頻繁，100 年至 109 年中發生三場土石流事件皆位於此，其中 2011 年 7 月 18 日晚間，愛玉子溪(投縣 DF226)的土石流事件，造成大量土石撞擊並淤埋當地建築，如表 5-2 所示，災前採用下游處之神木雨量站計算之有效累積雨量未達紅色警戒標準，若利用貝氏最大熵法分析土石流潛勢溪流內不同雨量估計點分區進行探討，採用範圍內或發生部加流動部估計點之平均雨量，在該降雨事件中無法達到警戒值，但若採用發生部估計點平均雨量，則在 7 月 15 日 15:00 即達到警戒值，發佈紅色警戒，藉此利於災前之因應措施。

2014 年 5 月 20 日之投縣 DF226 土石流事件，如表 5-3 所示，鋼索檢知器於 13:00 時斷裂，但依神木站的實際觀測雨量而言，檢知器斷裂前並無下雨的情況，而以整場降雨事件計算，亦未達土石流警戒值 (250mm)。然而，透過 BME 技術，利用周遭雨量測站及雷達回波

資料進行集水區平均雨量的推估，採用範圍內估計點之平均雨量，在該降雨事件中無法達到警戒值，但若採用發生部或發生部加流動部之估計點平均雨量，在 5 月 20 日 08:00 有效累積雨量已達到警戒值。

2017 年 6 月 3 日之投縣 DF226 土石流事件，由於和社溪上游暴漲，大量土石沖刷至下游，造成民宅、橋梁、路基被沖毀，如表 5-4 所示，依神木站的實際觀測雨量而言，以整場降雨事件計算有效累積雨量，在 6 月 2 日 15:00 已達紅色警戒（250mm），而透過 BME 技術，採用發生部或發生部與流動部之平均雨量，其紅色警戒時間分別為 6 月 2 日 22:00 及 6 月 3 日 00:00，皆可在 6 月 3 日上午發生土石流前，即發佈紅色警戒，可在事件發生前進行疏散避難等相關作為，以降低災害的影響與衝擊。

（二）發佈紅色警戒，但未實際發生土石流的降雨事件

為了解過往發佈紅色警戒之準確性，本研究彙整已發佈紅色警戒但未真實發生土石流之事件，合計共 12 場，如表 5-5。其中，若使用 BME 模式推估之結果，則有 6 場降雨未達紅色警戒(104 年蘇迪勒颱風、105 年馬勒卡颱風、106 年 0613 豪雨、108 年 0520 豪雨、108 年 0611 豪雨、108 年利奇馬颱風)，分析成果如表 5-6。由分析結果可知，若採用土石流集水區範圍內估計點的平均雨量，其紅色警戒平均誤報率約為 15%；若採用發生部估計點平均雨量，其紅色警戒誤報率約 36.6%；若採用發生部及流動部估計點平均雨量，其紅色警戒誤報率約為 13.4%。

綜合上述，透過兩種降雨事件的分析與比對可知，採用本研究所發展的整合性降雨推估模式，並，利用發生部加流動部範圍內之估計點平均雨量作為參考雨量，一方面可較為準確且提前的在土石流發生前提出預警；另一方面，亦可降低土石流紅色警戒的誤報機率。因此，

建議可在警戒雨量基準值不改變的前提下，利用 BME 推估的結果，進行有效累積雨量的計算，藉以輔助土石流警戒發布的判斷。

表 5-2 歷史土石流事件雨量警戒評估-100 年 0719 豪雨

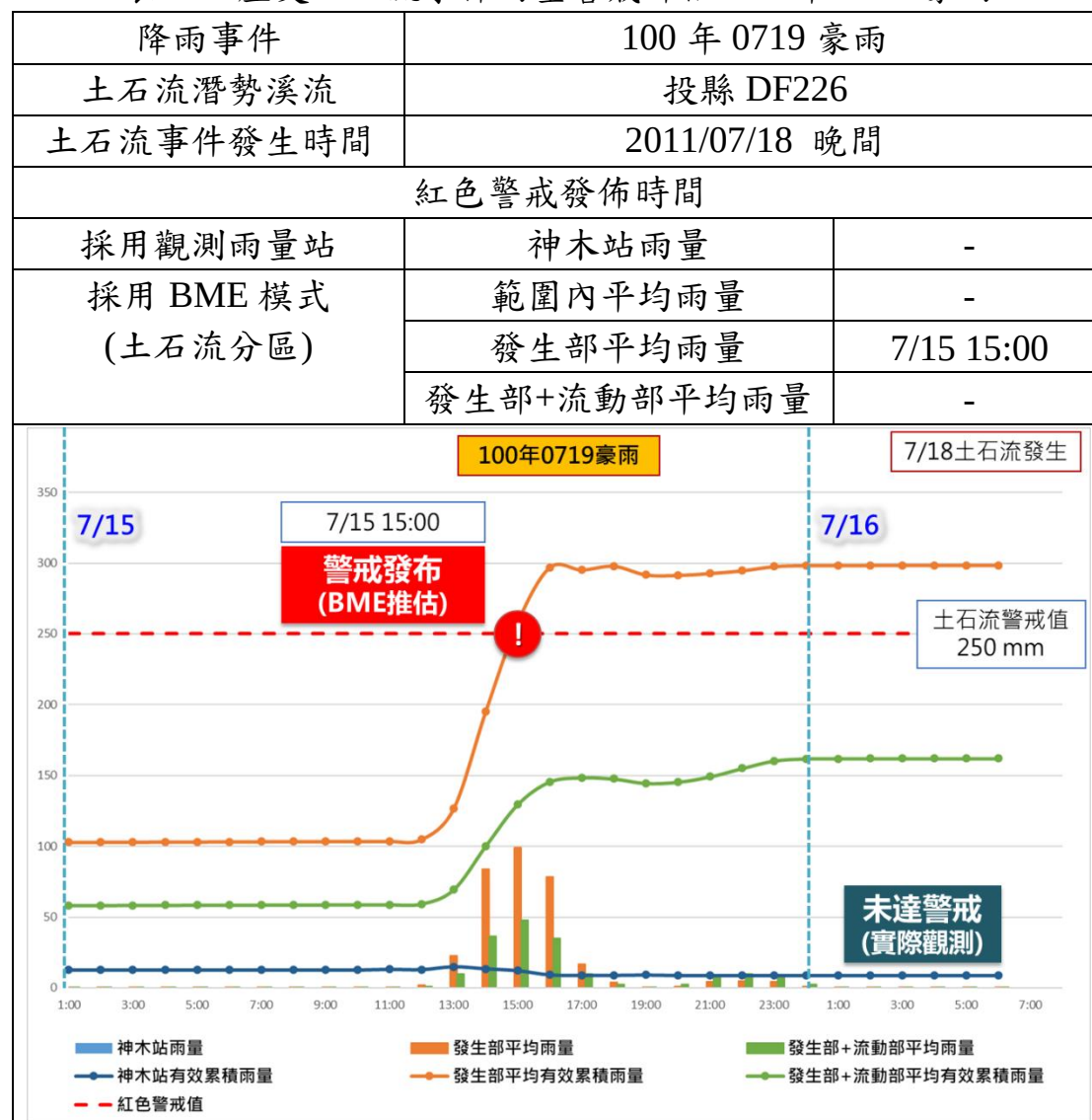


表 5-3 歷史土石流事件雨量警戒評估-103 年 0520 豪雨

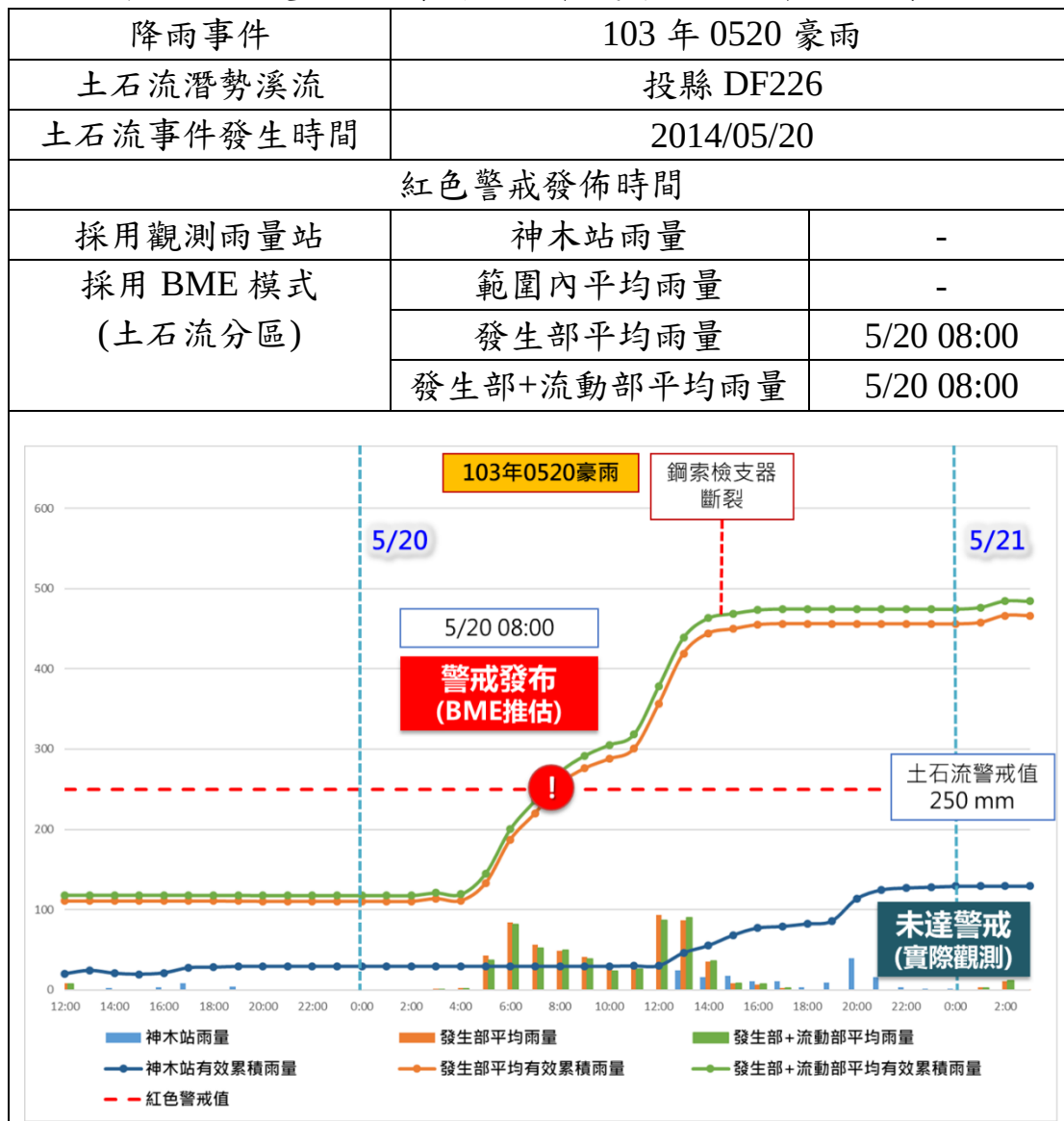


表 5-4 歷史土石流事件雨量警戒評估-106 年 0601 豪雨

降雨事件	106 年 0601 豪雨	
土石流潛勢溪流	投縣 DF226	
土石流事件發生時間	2017/06/03 上午	
紅色警戒發佈時間		
採用觀測雨量站	神木站雨量	6/2 15:30
採用 BME 模式 (土石流分區)	範圍內平均雨量	-
	發生部平均雨量	6/2 22:00
	發生部+流動部平均雨量	6/3 00:00

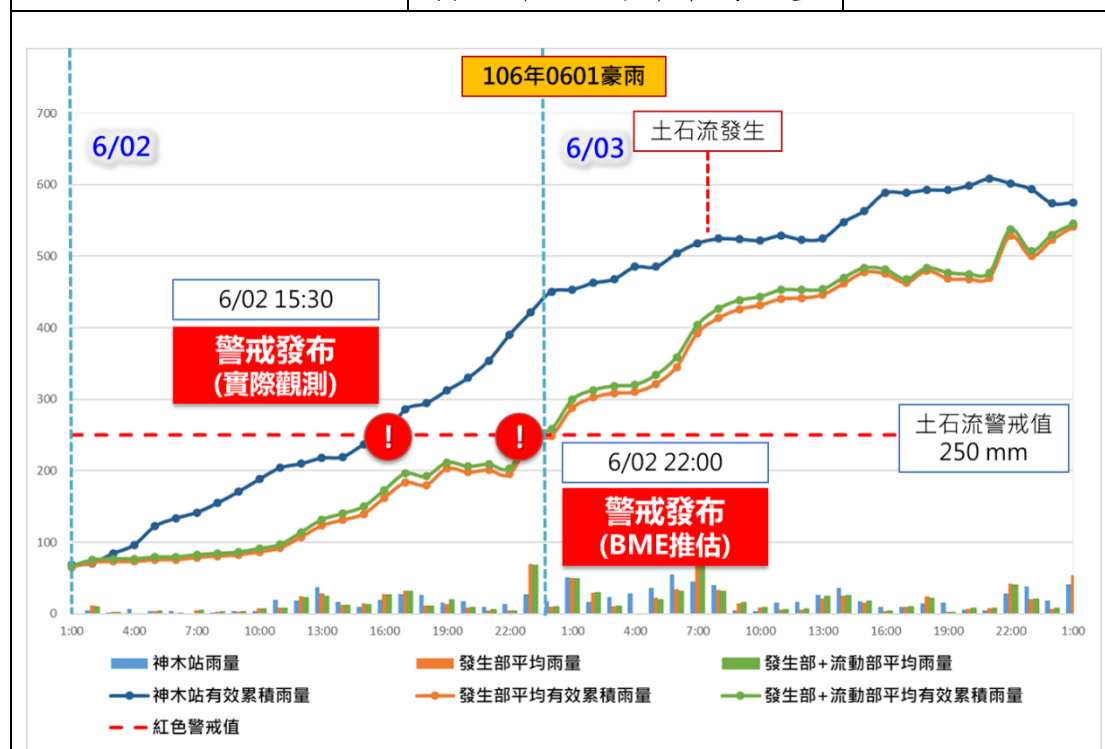


表 5-5 紅色警戒發佈時間比較

降雨事件	土石流潛勢溪流	發佈時間	土石流分區雨量發佈時間(BME 推估)		
			範圍內平均雨量	發生部平均雨量	發生部+流動部平均雨量
102 蘇力颱風	投縣 DF226	7/13 03:00	7/13 01:00	7/13 01:00	7/13 01:00
	投縣 DF199	7/13 03:00	7/13 01:00	7/13 01:00	7/13 01:00
	投縣 DF227	7/13 03:00	7/13 05:00	7/13 05:00	7/13 05:00
	投縣 DF167	7/13 11:00	-	-	-
	投縣 DF190	7/12 23:00	-	7/13 04:00	-
103 年麥德姆颱風	投縣 DF226	7/23 11:00	-	-	-
	投縣 DF199	7/23 11:00	-	-	-
	投縣 DF227	7/23 11:00	7/23 08:00	7/23 05:00	7/23 08:00
104 年蘇迪勒颱風	投縣 DF226	8/8 17:00	-	-	-
	投縣 DF199	8/8 17:00	-	-	-
	投縣 DF227	8/8 17:00	-	-	-
104 年杜鵑颱風	投縣 DF226	9/29 02:00	-	-	-
	投縣 DF199	9/29 02:00	-	-	-
	投縣 DF227	9/29 02:00	-	-	-
105 年 0611 豪雨	投縣 DF226	6/13 09:30	6/11 01:00	6/11 00:00	6/11 01:00
	投縣 DF199	6/13 09:30	6/10 23:00	6/10 20:00	6/10 23:00
	投縣 DF227	6/13 09:30	6/13 03:00	6/13 02:00	6/13 03:00
105 年馬勒卡颱風	投縣 DF226	9/17 12:30	-	-	-
	投縣 DF199	9/17 12:30	-	-	-
	投縣 DF227	9/17 12:30	-	-	-
105 年梅姬颱風	投縣 DF226	9/27 23:30	9/28 07:00	9/28 05:00	-

	投縣 DF199	9/27 23:30	-	9/28 08:00	-
	投縣 DF227	9/27 23:30	-	-	-
106 年 0613 豪雨	投縣 DF226	6/17 18:30	-	-	-
	投縣 DF199	6/17 18:30	-	-	-
	投縣 DF227	6/17 18:30	-	-	-
106 年尼莎暨海棠 颱風	投縣 DF226	7/31 00:30	-	-	-
	投縣 DF199	7/31 00:30	7/31 12:00	7/31 13:00	7/31 12:00
	投縣 DF227	7/31 00:30	-	-	-
108 年 0520 豪雨	投縣 DF226	5/18 14:30	-	-	-
	投縣 DF199	5/18 14:30	-	-	-
	投縣 DF227	5/18 14:30	-	-	-
108 年 0611 豪雨	投縣 DF226	6/12 18:30	-	-	-
	投縣 DF199	6/12 18:30	-	-	-
	投縣 DF227	6/12 18:30	-	-	-
108 年利奇馬颱風	投縣 DF226	8/10 05:30	-	-	-
	投縣 DF199	8/10 05:30	-	-	-
	投縣 DF227	8/10 05:30	-	-	-

表 5-6 採用不同土石流分區之紅色警戒誤報率

土石流潛勢溪流	土石流分區紅色警戒誤報率(%)		
	範圍內平均雨量	發生部平均雨量	發生部+流動部平均雨量
投縣 DF226	25	25	17
投縣 DF199	25	33	25
投縣 DF227	25	25	25
投縣 DF167	0	0	0
投縣 DF190	0	100	0
平均誤報率(%)	15	36.6	13.4

第六章 降雨觀測網調整或新增區位建議

第一節 土石流雨量站網說明

本研究利用陳有蘭溪地區氣象局、水利署、水保局所屬之 22 個雨量站觀測資料及 QPESUMS 降水估計產品進行 BME 雨量站網空間統計分析。而由於降雨特性常受限於區域環境影響而有所差異，故本研究擇定不同之參數後，選定雨量測站中，時雨量大於 60 mm/hr 之強降雨且同時間內所選雨量站必須超過三分之一站數之時雨量大於 10mm/hr 之降雨事件進行統計分析，自民國 100 年至 109 年共計有 27 場強降雨事件。

為提高雨量站觀測的可信度，本研究選擇以 QPESUMS 網格間距 (0.0125° ，約 1.25 公里)作為格網大小，在陳有蘭溪集水區內共計可分為 302 個網格。由於本研究新設雨量站網規劃為以土石流防災預警作為目標。因此，新設雨量站網的規劃應優先找出網格中具有土石流潛勢溪流的網格位置，藉由土石流潛勢溪流位置及 1.25 公里網格分佈圖之套疊，可挑選出 48 處網格作為後續考量土石流防災預警需求的新設雨量站建議網格，如圖 6-1 中灰色的網格。

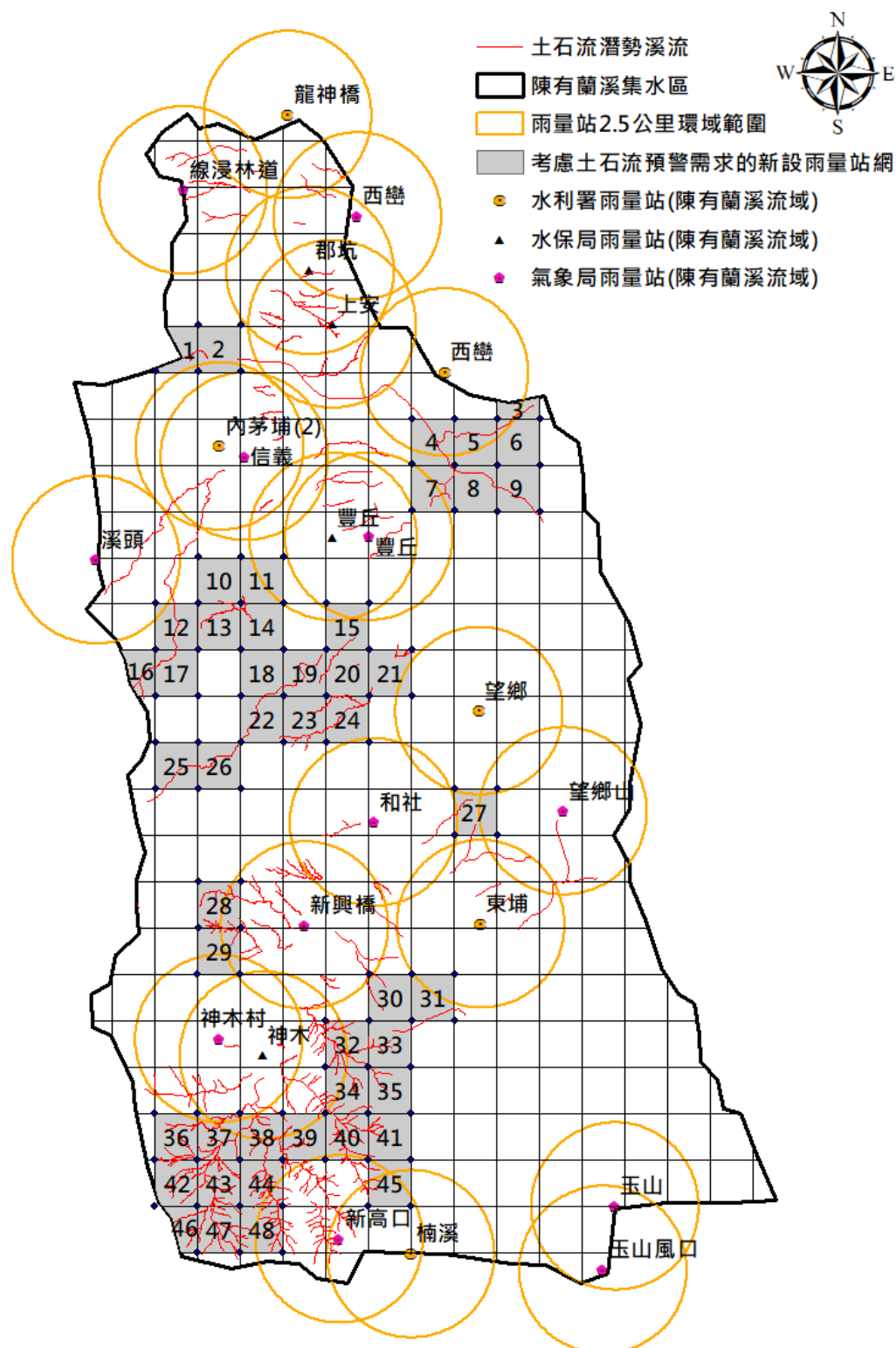


圖 6-1 考慮土石流預警需求新設雨量站建議網格

第二節 雨量站調整效益評估

為了解雨量站網之調整效益，首先以整合性降雨模式推估之結果為基礎，結合既有雨量觀測站網之分佈，評估各雨量站點位之特性，即可提供降雨觀測網調整之建議。降雨觀測網之調整，常涉及是否符合經濟效益或雨量資料品質問題，為了滿足站網調整之合理性，需滿足上述之原則。針對此一部分，回顧國內利用地理統計法評估雨量站網之相關文獻，包含衛強、魏聰輝、葉惠中等人(2011)使用地理統計及離散資訊熵進行雨量站觀測網設計之研究；連琮勛、連政佳、吳宜珍、鄭克聲等人(2013、2014)使用地理統計應用於臺北市山坡地雨量站網評估與調整；洪勝雄、李心平、葉惠中等人(2015)利用空間統計及權重法進行土石流潛勢溪流雨量站網規劃，綜合上述，本研究為考量土石流預警之適用性，故採用洪勝雄、李心平、葉惠中等人(2015)文中提出與土石流預警相關之增站式循序演算法進行後續探討。

本研究利用最大貝氏熵法(BME)模式推估雨量計算變異數作為雨量站網分析的評估依據，藉以探討雨量站點位配置之合理性。其中，以降雨觀測站網調整或新增的評估機制而言，模式推估變異數越大之網格，顯示此處推估的雨量誤差越大，意即應優先設置雨量觀測站點。反之，若推估變異數越小之雨量測站，即表示此處可利用周遭降雨資料進行推估，就可獲得較為可靠的降雨資料，故設站的需求性較低。

為評估研究區域內既有站網，針對上一節說明之格網劃設方法(1.25 公里 x 1.25 公里)，篩選出之 48 處具有土石流潛勢溪流且位於實測雨量站 2.5 公里範圍外之網格點，透過變異數大小排序方法，依序增加觀測站之數目，直到滿足需求為止，計算各網格點之變異數，再求其平均值作為該網格之代表變異數，上述演算方法之流程說明如下：

- 一、由 n 個已知觀測站中任選一站，以第 i 站表之，並將該站設為待推測站，利用其餘 $(n-1)$ 個觀測站計算求得該待推測站之估計變異數。
- 二、將步驟一所選取之推測站置回，並選取一新待推測站，以第 j 站表之，利用其餘 $(n-1)$ 個觀測站推估第 j 站之變異數。
- 三、重複步驟一及步驟二，直到 n 個觀測站均曾被選用為待推測站為止，比較各站變異數大小，變異數最大者，為 n 個觀測站中推估結果誤差最大者，建議應優先考量設站。
- 四、以推估誤差最大的雨量站點去除，將剩餘站點重複步驟一至三，先被去除之站點，其增站順序越後面。

針對上述設站評估網格排序成果，同時納入土石流潛勢溪流分佈及雨量站分佈情況進行後續權重分析，其評析方法說明如下：

- (一) 藉由增站循序演算法所得之排序，其排序越前面，其變異數越大，推估誤差越大，越需要設置雨量站，因此給予較高的分數，排序 1 至 48 之網格，分別給予 48~1 分。
- (二) 網格內所涵蓋的土石流潛勢溪流數量越多，該網格就越具備雨量站設置之必要性，故於此將網格內的土石流潛勢溪流數量納入評估。
- (三) 將現有之雨量站進行 2.5 公里環域分析，並計算各網格未被雨量站環域範圍包含之面積，若面積越大，表示該網格目前尚無鄰近雨量站對雨量變化能有準確之推估，有較大的雨量增設必要性。

透過前述之三種評析方法，評估篩選之網格，其對應之權重正規化成果如圖 6-2 及表 6-1~表 6-3，依據分析成果，陳有蘭溪集水區建

議新增區位合計三處，分別為權重評分 1.89~2.29 之區域一(網格 36、37、42、43、44、46、47)、權重評分 2.02~2.23 之區域二(網格 33、34、35、40、41)、以及權重評分 1.87~2.62 之區域三(網格 19、20、21、22、23、24)，此三處範圍內之網格若考量到雨量站 2.5 公里環域範圍因素後，建議分別在網格 43、網格 35、網格 20 中新設雨量站，即可服務各區域中剩餘網格，且可有效解決雨量資料變異較大的問題。

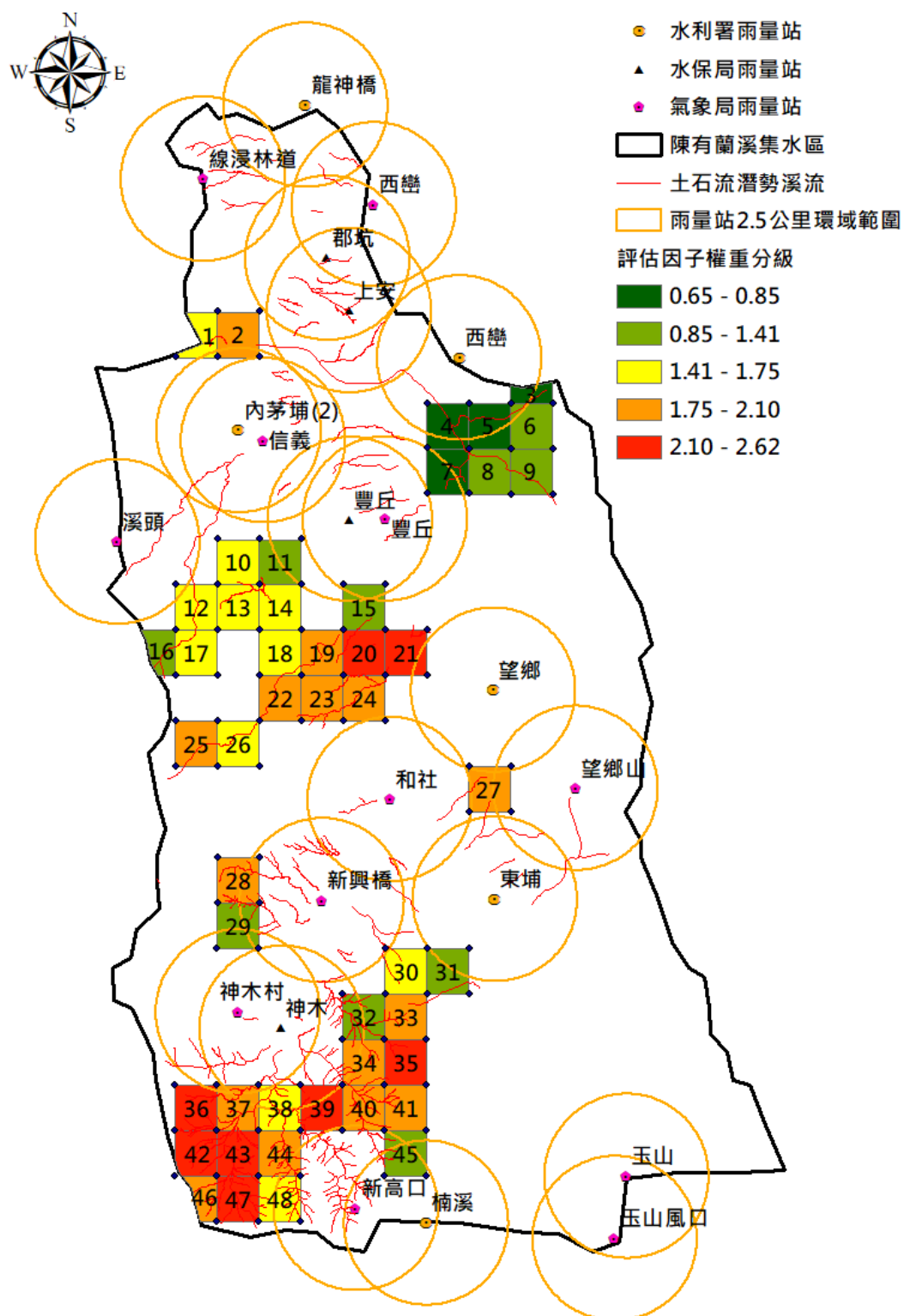


圖 6-2 雨量站調整效益評估分布圖

表 6-1 設站評估網格權重正規化成果分析(1/3)

編號	變異數	設站排序	序數給分	序數權重正規化	溪流數	溪流數權重正規化	面積	面積權重正規化	權重加總
1	238	21	28	0.58	1	0.33	1.01	0.57	1.49
2	222	24	25	0.52	2	0.67	1.43	0.81	2.00
3	154	43	6	0.13	1	0.33	0.34	0.19	0.65
4	158	42	7	0.15	1	0.33	0.41	0.23	0.71
5	152	44	5	0.10	1	0.33	0.60	0.34	0.78
6	148	46	3	0.06	1	0.33	1.59	0.90	1.29
7	149	45	4	0.08	1	0.33	0.76	0.43	0.85
8	143	47	2	0.04	1	0.33	1.77	1.00	1.37
9	141	48	1	0.02	1	0.33	1.77	1.00	1.35
10	203	29	20	0.42	1	0.33	1.77	1.00	1.75
11	193	35	14	0.29	1	0.33	0.97	0.55	1.17
12	198	30	19	0.40	1	0.33	1.67	0.94	1.67
13	180	39	10	0.21	1	0.33	1.77	1.00	1.54
14	178	40	9	0.19	1	0.33	1.77	1.00	1.52
15	197	33	16	0.33	1	0.33	1.16	0.65	1.32
16	209	27	22	0.46	1	0.33	1.09	0.62	1.41
17	194	34	15	0.31	1	0.33	1.77	1.00	1.64
18	177	41	8	0.17	1	0.33	1.77	1.00	1.50

表 6-2 設站評估網格權重正規化成果分析(2/3)

編號	變異數	設站排序	序數給分	序數權重正規化	溪流數	溪流數權重正規化	面積	面積權重正規化	權重加總
19	208	28	21	0.44	2	0.67	1.77	1.00	2.10
20	243	19	30	0.63	3	1.00	1.77	1.00	2.62
21	269	16	33	0.69	2	0.67	1.50	0.85	2.20
22	187	37	12	0.25	2	0.67	1.77	1.00	1.91
23	226	23	26	0.54	1	0.33	1.77	1.00	1.87
24	287	14	35	0.73	1	0.33	1.72	0.97	2.03
25	211	26	23	0.48	1	0.33	1.77	1.00	1.81
26	198	31	18	0.38	1	0.33	1.77	1.00	1.71
27	275	15	34	0.71	2	0.67	0.91	0.51	1.89
28	239	20	29	0.60	2	0.67	1.12	0.63	1.90
29	263	17	32	0.67	1	0.33	0.62	0.35	1.35
30	191	36	13	0.27	1	0.33	1.76	0.99	1.60
31	182	38	11	0.23	1	0.33	1.16	0.66	1.22
32	218	25	24	0.50	1	0.33	0.94	0.53	1.36
33	198	32	17	0.35	2	0.67	1.77	1.00	2.02
34	250	18	31	0.65	2	0.67	1.25	0.70	2.02
35	233	22	27	0.56	2	0.67	1.77	1.00	2.23
36	440	6	43	0.90	1	0.33	1.72	0.97	2.20

表 6-3 設站評估網格權重正規化成果分析(3/3)

編號	變異數	設站排序	序數給分	序數權重正規化	溪流數	溪流數權重正規化	面積	面積權重正規化	權重加總
37	386	8	41	0.85	1	0.33	1.28	0.72	1.91
38	353	10	39	0.81	1	0.33	0.84	0.48	1.62
39	333	11	38	0.79	2	0.67	1.23	0.70	2.15
40	307	12	37	0.77	1	0.33	1.63	0.92	2.02
41	293	13	36	0.75	1	0.33	1.77	1.00	2.08
42	534	2	47	0.98	1	0.33	1.72	0.97	2.28
43	460	5	44	0.92	1	0.33	1.77	1.00	2.25
44	426	7	42	0.88	1	0.33	1.45	0.82	2.03
45	359	9	40	0.83	1	0.33	0.31	0.18	1.34
46	572	1	48	1.00	1	0.33	0.99	0.56	1.89
47	516	3	46	0.96	1	0.33	1.77	1.00	2.29
48	476	4	45	0.94	1	0.33	0.70	0.40	1.67

第七章 結論與建議

第一節 結論

依據工作期程要求，於 109 年 11 月 13 日提送期末報告書至行政院農業委員會水土保持局審核。依據採購契約內容，已完成所有工作項目內容，包括(1)計畫區域背景資料蒐集與分析、(2)整合性降雨推估模式之發展、(3)網格化降雨推估與降雨特性分區、(4)警戒分區設定與警戒發布機制、(5)降雨觀測網調整或新增區位建議，其結論說明如下：

一、計畫區域背景資料蒐集與分析

計畫執行期間，蒐集研究區域範圍內之各單位雨量站觀測資料以及雷達回波降雨估計資料，並說明降雨推估模式所需之歷年降雨資料的資料形式及取得方法；此外，彙整研究區域內 4 個土石流觀測站的基礎資訊與監測設備，同時藉由歷年土石流發生事件及警戒事件等相關資訊，以作為土石流警戒發布機制探討之基礎。

二、整合性降雨推估模式之發展

彙整國內外降雨推估技術相關研究報告與文獻，並探討各類常用空間分布推估方法，比較本計畫採用誤差範圍較小之貝氏最大熵法，納入確定性與不確性資料強化推估資訊，同時考量時間與空間的相關性，進行本計畫降雨時空分布之推估；再者，依據上述方法，完成整合性降雨推估模建置、測試與驗證之流程及其理論方法，將確定性資料與不確定性資料經過處理後，透過趨勢移除分離出高頻與低頻資料，再透過共變異數模式的建置，利用貝氏最大熵法進行時空分布的推估，藉由留一驗證(Leave-one-out)方式進行交叉驗證，以率定全區網格化降雨推估之共變異數參數。

三、網格化降雨推估與降雨特性分區

藉由本研究發展的整合性降雨推估模式，進行研究區域內網格點的降雨時空分布推估，透過降雨特性解析，發現在空間上確實顯現不同的降雨特性分布。同時，也藉由歷史降雨事件的降雨量推估比對驗證，證實本研究所發展的模式，可準確的推估研究區域內之降雨分布情形。

四、警戒分區設定與警戒發佈機制

透過歷史災害案件探討集水區代表雨量及雨量站實際觀測值對於土石流警戒發布之影響與精進方法，發現 BME 推估成果能大幅改善警戒發佈時機之準確性，例如研究區域內 3 場未發佈紅色警戒卻發生土石流之事件，若採用 BME 模式推估之雨量進行有效累積雨量分析，使降雨事件在發生土石流前，即能發佈紅色預警；而發佈紅色警戒，但未真實發生土石流之事件，合計 12 場。而以 BME 模式推估之結果而言，共有 6 場降雨事件，並無達到紅色警戒的標準，顯然有降低誤報機率的成果。因此，建議在警戒雨量基準值不改變的前提下，可利用 BME 推估的結果，輔助土石流警戒發布的判斷。

五、降雨觀測網調整或新增區位建議

本研究採用增站式循序演算法，針對研究區域內劃設網格，同時考量土石流潛勢溪流位置、各單位雨量站影響範圍外之評估因素，篩選出 48 處具有土石流潛勢溪流且位於雨量站範圍外之網格點，藉由 BME 模式推估各網格之變異數，並透過變異數大小排序方法、範圍內土石流潛勢溪流數目、雨量站影響範圍外之面積等評估因子進行權重分析，提出三處建議增設雨量站之位置。

第二節 建議

透過本計畫之執行成果，採用貝氏最大熵法之整合性降雨推估模式能有效提升土石流警戒之成效。因此，為能實際應用於土石流警戒，建議未來能以此計畫為基礎，將分析方法應用於其他區域，建立 BME 模式參數之率定驗證，提供更準確或更能代表土石流潛勢溪流集水區的降雨資訊，藉以使警戒的發布能更有依據。

參考文獻

1. 中央氣象局，“應用克利金法建立高解析度網格點氣象數據之研究”，2009。
2. 中央氣象局，“氣象遙測觀測-氣象衛星與氣象雷達”，2015。
3. 水利署電子報，“劇烈天氣監測系統（QPESUMS）”，2015。
4. 水利署，“氣候變遷水文情境評估研究（1/2）”，2012。
5. 水利署，“融合多重雨量資訊於水庫集水區即時雨量推估及入庫流量預報技術之研究(1/2)”，2012。
6. 蔡玉琴，“淡水河流域降雨時空分析及推估地理資訊系統的應用”，1997。
7. 紀博庭，碩士論文，利用中央大學雙偏極化雷達資料反求雨滴粒徑分佈及降雨率方法的研究，國立中央大學大氣物理研究所，桃園，2005。
8. 簡巧菱、林沛練，“台灣北部地區不同季節以及不同降水型態的雨滴粒徑分布”，2006。
9. 張智昌、孫志鴻、賴進貴，整合氣象雷達與即時降雨資料於颱風降雨推估之研究，國立高雄師範大學地理學系，2006。
10. 林昀靜，碩士論文，地理統計應用於雨量站網設計之研究，2006。
11. 謝章廷，碩士論文，應用雷達降雨於分佈型水文模式與不確定性分析，2007。
12. 黃鵬豪，碩士論文，應用 QPESUMS 高解析降雨資料改良洪水預報模式之研究，2008。
13. 顧尚真，碩士論文，貝氏最大熵法於 Quantum GIS 上之建構—應用於台灣地區對空氣懸浮粒子長期暴露之研究，國立臺灣大學生農學院生物環境系統工程學系暨研究所，臺北，2010。

14. 王誌鑫，碩士論文，自動化時空過程推估方法之發展及應用，並以台北都會區空氣懸浮粒子時空分佈之研究為例，國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程研究所，臺北，2010。
15. 衛強、魏聰輝、葉惠中、陳彥璋、江介倫，利用地理統計及離散資訊熵進行雨量站觀測網設計之研究-以臺大實驗林轄區為例，研究報告，2011。
16. 連琮勛、連政佳、吳宜珍、鄭克聲、潘宗毅、黃立遠，地理統計應用於臺北市山坡地雨量站網評估與調整，“中華水土保持學報”，2013。
17. 連琮勛、連政佳、吳宜珍、鄭克聲、潘宗毅、黃立遠、李正利、潘彥華，“中華水土保持學報”，2014。
18. 行政院農業委員會水土保持局，“水土保持手冊”，2015。
19. 吳孟庭，碩士論文，應用貝氏最大熵法於臺北盆地水文地質推估，國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所，臺北，2015。
20. 洪勝雄、李心平、葉惠中、蘇意筑、李威霖，利用空間統計及權重法進行土石流潛勢溪流雨量站網規劃，“水土保持學報”，2015。
21. 陳思尹，碩士論文，應用機器學習法於 QPESUMS 即時雨量預報，2016。
22. 林睦容，碩士論文，雷達估計降雨資訊應用於土石流警戒之研究，2018。
23. 許銘熙、蔡孟原、傅金城、林李耀、李安翔，雷達定量降水估計在河川洪水預報模式之應用，2011。
24. A.H. Thiessen., “Precipitation averages for large areas,” Monthly Weather Review, 39 (7) : 1082-1084, 1911.
25. Bringi, V. N., V. Chandrasekar, J. Hubbert, E. Gorgucci, W. L. Randeu,

- and M. Schoenhuber, “Raindrop size distribution in different climatic regime from disdrometer and dual-polarized radar analysis,” J. Atmos. Sic., 60,354-365, 2003.
26. Christian Salles, Jean Poesen and Daniel Sempere-Torres, “Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity,” 2002.
27. G. N. Sumner, “Seasonal changes in the distribution of rainfall over the Great Dividing Range general trends,” 1983.
28. Yu, H. L., Chiang, C. T., Lin, S. D., & Chang, T. K. Spatiotemporal analysis and mapping of oral cancer risk in Changhua County (Taiwan): an application of generalized Bayesian maximum entropy method. *Annals of epidemiology*, 20(2), 99-107, 2010.
29. Yu, H. L., Wang, C. H., Liu, M. C., & Kuo, Y. M. Estimation of fine particulate matter in Taipei using landuse regression and Bayesian maximum entropy methods. *International journal of environmental research and public health*, 8(6), 2153-2169, 2011.
30. Yu, H. L., & Wang, C. H. Quantile-based Bayesian maximum entropy approach for spatiotemporal modeling of ambient air quality levels. *Environmental science & technology*, 47(3), 1416-1424, 2013.

附錄

附錄一、期初審查意見及回覆表(本計畫)

綜合意見		回覆
一、不同降雨型態與地區之雨滴粒徑資料蒐集		
1.	相關應用雷達回波資料評估降雨的研究，已累積許多的成果，建議充實文獻之收集及強化本研究之特色的論述。	感謝委員意見，已增補雷達回波資料評估降雨研究之相關文獻，相關內容再請參閱。
2.	本研究的範圍，基本上屬於同一環境空間，該區域的研究成果是否可以應用在其他的地區？	感謝委員意見，本計畫先嘗試以陳有蘭溪流域做為示範區進行探討。未來可將此方法應用於其他地區，以達到土石流預警機制強化之目標。
3.	建議雷達回波分析除現有 S-band 為主的氣象雷達外，再考慮最新 C-band 降雨雷達資料，以強化新雷達的防災應用特性。	感謝委員意見，由於最新 C-band 降雨雷達資料目前資料年限較少，實際應用上尚有疑慮，未來可考慮將其納入分析研究之基礎資料。
4.	P3-2，提到克利金法進行雨量站之空間分布已有不錯的結果，但是從最適用半變異模式的交叉驗證結果觀之…。請補充說明最適用半變異模式？	感謝委員意見，關於克利金法最適用變異模式的交叉驗證方法說明已補充至本文中。
5.	建議如果可以分析整體集水區的空間降雨資訊，在警戒分區及警戒發布機制上，應該有別於單一雨量站的累積雨量警戒模式。例如集水區的逕流量等。	感謝委員意見，未來降雨推估結果可將其分區特性應用於降雨逕流模式，以達警戒發佈機制之要求。
6.	本計畫擬利用貝氏最大熵法(BME)獲取土石流潛勢溪流集水區內降雨的分布值得嘗試與鼓勵，然而，獲得降雨分布資訊之後又如何與土石流警戒雨量值相連結卻未明確說明工作執行方式，應予以補充。	感謝委員意見，關於與土石流警戒雨量值連結已補充說明至本文，將持續補充相關論述及其工作執行方式。
7.	利用貝氏最大熵法獲得集水區內的降雨分布之可靠性是否受集水區內雨量站密度(亦即雨量網密度)及站間高程落差之影響，建議於計畫執行期間列入該技術之評估項目。	感謝委員意見，BME 模式進行集水區網格化降雨推估需納入實測雨量資料及雷達推估雨量資料，BME 模式產製成果與集水區原先之雨量站密度具有高度正相關，而雷達回波定量降水資料已將高程因子納入考量，將兩者之資料屬性結合，期能改善雨量資訊正確性。
8.	本計畫提及已有十年的校內監測資	感謝委員意見，本文採用之資料為不

綜合意見		回覆
	料，宜有摘要整理相關成果作為背景資料。	同單位站別逐時雨量及雷達回波推估雨量，故相關文獻回顧主要以相關應用進行蒐集。
	9. 建議現地資料蒐集之頻率及事件前後資料蒐集應加以說明清楚，避免影響分析成果。	感謝委員意見，已蒐集歷年土石流發生事件及其警戒事件之資訊，包含降雨事件警戒發佈時間、結束時間、發佈機制(黃色警戒、黃色警戒)，已補充至第二章第三節，作為後續研究探討之基礎。
	10.請補充本計畫工作進度表。	感謝委員意見，本計畫工作進度表已補充至第一章第三節。
依契約書規定於 109 年 7 月 31 日前提出期中報告書。		

附錄二、期中審查意見及回覆表(本計畫)

綜合意見		回覆
一、不同降雨型態與地區之雨滴粒徑資料蒐集		
1.	P4-9, 圖 4-8, BME 模式推估的降雨普遍大於觀測站的雨量, 有無相關文獻有同樣的趨勢?	感謝委員意見, 本研究之推估模式採用之不確定資料為 QPESUMS 雨量資料, 由過往文獻資料, 歷史資料有高估的情況, 但藉由逐年雨量推估值校正方法的調整, 近年之推估雨量資料較無明顯高估情況。
2.	表 4-4, 低雨量時(例如: 觀測站 300mm)BME 模式高達 2 倍以上, 例如: 觀測站 100mm, BME 模式的估計甚至達 500mm 以上, 如何在低警戒值的土石流預警應用?	感謝委員意見, 以實際降雨事件進行推估驗證之結果顯示, 決定係數約為 0.8。然而, 確如委員所述, 有部分降雨事件的推估結果仍有較大的差異。此一部分, 係受限於不確定性資料, 意即 QPESUMS 的數值在地形較為複雜的地方, 仍有其限制存在。未來建議可針對不確定性資料的部分進行更深入的探討, 藉以提升整合性降雨模式的可靠性。
3.	由於上述的趨勢造成表 4-5~表 4-8, 所有推估站/雨量站的雨量比較 >1.3~1.9 是否高估雨量? 或是如何評估這個趨勢。	感謝委員意見, 於表 4-5~4-8 的分析結果中, 係比較不同高程估計點與降雨觀測站點的雨量多寡, 目的在於針對不同地形影響下, 是否影響降雨的分布情形。而透過分析結果顯示, 確實高程較高的估計點, 雨量推估值有越大的趨勢。
4.	第五章探討警戒發佈機制, 以 2014 年 5 月 20 日的事件為例, BME 推估的雨量遠高於觀測雨量且時間提早 8-9 小時, 如何利用此方法? 是不是都容易提高預警?	感謝委員意見, 後續已藉由不同之土石流分區選取雨量值, 可真實反映實際土石流事件, 改善提早預警之情況。
5.	建議多以不同事件來測試警戒的評估。	感謝委員意見, 本研究已增列歷年所蒐集之降雨事件進行警戒評估。
6.	本計畫採貝氏最大熵法, 其缺點為考量因子較多, 蒐集資料耗時, 未來若此法可行, 如何克服此缺點?	感謝委員意見, 未來若採用貝氏最大熵法分析雨量, 可利用雨量資料介接及資料前處理分析程式來克服蒐集資料耗時的問題, 滿足土石流預警之迫切性。
7.	P4-5 圖 4-4 降雨量時空分布推估結果展示, 其圖例各顏色數值所代表意義為何? 請說明	感謝委員意見, 圖 4-4 為展示 BME 模式推估土石流潛勢溪流範圍內之估計點, 依不同雨量值大小(區間), 用不同顏色區隔。
依契約書規定於 109 年 11 月 13 日前提出期末報告書。		

附錄三、期末審查意見及回覆表(本計畫)

綜合意見		回覆
	1. 誤報率如何計算？	感謝委員意見，誤報率以過往未發生紅色警戒卻實際發生土石流事件及已發布紅色警戒卻未真實發生土石流事件兩種情況評估，前者以模式推估發布紅色警戒時間是否落於土石流事件真實發生時間之前作為誤報率計算基礎；後者以模式推估發布紅色警戒時間是否符合真實情況作為誤報率計算基礎。
	2. 若能以降雨觀測網取代雨量站，是否可應用降雨觀測網方法來建構新的土石流警戒值？	感謝委員意見，本計畫所發展的整合性降雨推估模式，透過驗證結果可知，應可相當程度的反映無雨量站區域的真實降雨。因此，未來若以此成果為基礎，重新以實際發生的土石流事件及對應雨量進行統計，應可針對土石流警戒值是否需要調整的議題進行檢討。
	3. 利用雨量站和雷達回波之資料，透過貝氏最大熵法，相當有效且準確的評估出雨量站附近的降雨量。	感謝委員意見。
	4. 利用上述方法推估土石流發生部，流動部及整個集水區之降雨，使土石流防災之監測及警戒更為有效。	感謝委員意見。
	5. 提供三個新增雨量站有參考價值。	感謝委員意見。
	6. 本案目前以貝氏最大熵法分析結果尚佳，建議採用多個模式分析較為宜。	感謝委員意見，有關貝氏最大熵法與其他空間分布技術比較，團隊曾於水保局(2018)臺灣地區年降雨沖蝕指數之更新與查詢平台建置計畫內進行比較，其結果顯示在降雨的空間分布推估上，貝氏最大熵法相較於克利金法而言，確實有較佳的結果。
依契約書規定於 109 年 12 月 31 日前提出成果報告書。		