



國立臺灣大學理學院

氣候變遷與永續發展國際碩士學位學程

碩士論文

International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

極端降雨事件下利用時間序列模擬大規模崩塌潛勢區之地下

水位變化輔助決策者發布警戒值

Using Time-Series Analysis to Simulate Underground Water Level

to Issue a Warming Alert in Large-Scale Landslide Areas under

Extreme Weather

薛聖儒

Sheng-Ju Shueh

指導教授：童慶斌 博士

Advisor：Ching-Pin Tung, Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July 2022

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

National Taiwan University Master Thesis
Oral Examination Committee Approval

極端降雨事件下利用時間序列模擬大規模崩塌潛勢區之地下
水位變化輔助決策者發布警戒值

Using Time-Series Analysis to Simulate Underground Water Level to
Issue a Warning Alert in Large-Scale Landslide Areas under Extreme
Weather

本論文係 薛聖儒(名字)R08247019 (學號) 在國立臺灣大學氣候變遷
與永續發展國際學位學程完成之碩士學位論文，於民國_111_年_7_月
_18_日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

This master thesis is finished by _ShengJu Shueh_ (name)_R08247019_ (student ID) at
International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development on _18_ (date) _7_
(month), _2022_ (year) of the Republic of China, passed the oral examination by the following
examination committees.

口試委員 Oral examination committee :

(指導教授 Advisor)

李明旭

謝宜桓

許少瑜

(共同指導 co-Advisor)

謝辭



自從 2020 年開始決定在職就讀氣候變遷與永續環境國際學程，即決定要讓水土保持局的業務更貼近實際理論面，讓業務與所學可以有效結合，讓所學發揮於平時工作中，因為擔任土石流防災主辦工作，常覺得因氣候與降雨型態轉變對土砂災害影響相當大，故決定選擇較為多元領域的科系就讀，除了在學期間從各科系教授課程中大開眼界，也結識來自金融、氣象、土木、環工等不同領域同學，更有幸加入 SDL 研究室，與大家的相處過程讓我感到非常榮幸及滿足。

在童老師的指導下，讓我學習到更實務面的知識，包含與國際接軌的各種專業知識，如 ESG 指標、AR6 報告的內容，甚至是氣候變遷對於社會、人文的影響，這讓我在未來協助行政院農業委員會水土保持局規劃靜零碳排路徑上能夠想得更為全面，也因老師與研究室學長姐的堅持，讓更多人重視氣候變遷對於經濟、環境、生態等影響之嚴重性。可以說就讀碩士的這兩年是我人生中，知識最為豐富的時光，每週的會議分享除了讓我感到壓力重重外，也格外期待聽到其他研究室夥伴的研究分享。

最後，我要對水土保持局臺中分局分局長、課長們的支持深深誌謝，沒有單位的全力支持及課長與同事們的體諒與協助，我沒有辦法順利完成兩年的碩士學位，希望未來能將校內所學及研究用在業務上，讓業務效率提升，並協助水土保持局訂定更符合未來氣候情境下的政策，保障人民生命財產安全。

中文摘要



近年來臺灣受氣受變遷影響導致降雨型態改變，降水強度增加及延時縮短造成極端降雨事件頻傳，臺灣山區災害類型從以往單一型災害，演變成複合型災害，2009 年莫拉克颱風導致山區多處嚴重土砂災害即為明顯案例，造成中南部山區同時發生地滑、土石流和堰塞湖造成嚴重的人員傷亡和破壞。為應對複雜的災害型態，2010 年起行政院農業委員會水土保持局依地質型態及空載光達資料，劃定 227 個大規模崩塌潛勢區域，並於各崩塌潛勢區域進行調查規畫及裝設相關地表、地中監測儀器，作為未來發布警戒基準值參考依據。

為有效掌握大規模崩塌及地滑災害，地下水位扮演重要的因子，但國內外對於地下水位作為防災預警相關研究卻不多，本研究採用自回歸移動平均整合模式 (Autoregressive Integrated Moving Model, ARIMA)，選擇臺中市和平區 3 處大規模崩塌(D038、D050 及 T003)內自動化監測站作為研究測站，各站均超過 13 年監測且位處於保全住戶周邊，利用各站 2009 年莫拉克颱風作為訓練，及選用其它 2 場極端降雨事件之時雨量及時地下水位變化資料作為模式驗證，以建立各站之 ARIMA 模型參數、轉換函數，為模擬地下水位變化輔助將水保局情資研判中心發布警戒基準之依據。

由各測站之極端降雨事件 ARIMA 模擬成果可知，S1 和 A1 測站實際觀測與模擬地下水位變化趨勢相近，峰值及到達延時均可成功模擬，有助於大規模崩塌區 D038 及 D050 後續地下水位警戒值發布參考；但大規模崩塌區 T003 之 J1 測站之模擬成果與觀測值具有明顯落差，且峰值及延時明顯落後，則不適用於警界發布參考，研判係人為工程構造物影響地下水位變化導致；可知 ARIMA 模型係可以助於

決策者發布警戒值之參考，仍建議應持續蒐集未來極端降雨事件資料，滾動檢討 ARIMA 模型參數，並選擇周邊較無人為影響之測站作為代表測站。



關鍵字： 大規模崩塌地、地下水水位、自回歸移動平均整合模式、崩塌地預

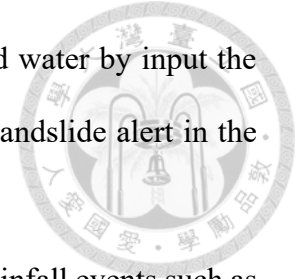
警、輔助決策判斷

ABSTRACT

In recent years, the rainfall pattern has been changed since precipitation intensity has increased and the duration has shortened in Taiwan. Traditionally, the Taiwanese government focused on the sediment-related disasters only, but typhoon Morakot caused severe casualties and damages in the central Taiwan because of landslides, debris flows and barrier lakes. In order to tackle complicated compound disasters, the Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) has identified 227 large-scale landslide areas which are classified by the size and geological formation. Since then the SWCB has installed real-time monitoring equipment and released warning systems which are based on the past rainfall-induced disasters.

Although billions of dollars have been invested in large-scale landslide areas, the SWCB is still unable to effectively release a warning alert of underground water level, and there is a lack of relevant research and application related to monitoring data. Therefore, the study adopts time-series analysis, the Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) model, to simulate the change of underground water which is affected by the rainfall. Under the study, the selected S1, A1 and J1 stations are located in 3 large-scale landslide areas D038, D050 and T003 respectively, in the Lishan area, Taichung City. These stations have observed more than 13 years, and are located in major villages. The study establishes 3 different models for each station and applies the data from the typhoon Morakot which has the biggest accumulated rainfall to train these models. Then, each model has input the rainfall and underground water data from other 2 representative rainfall events with the highest record of underground water level and slope-land movement to verify the results of simulation. The main outputs are (1) the parameters of

3 models and (2) the models to simulate the change of underground water by input the rainfall data, and the study aim to help decision-makers to issue a landslide alert in the SWCB.



The results of the simulation show that the data from extreme rainfall events such as Typhoon Dujuan, Megi, Soudelor and 15-days series rainfall in 2016 verifies the parameters of the models effectively. The models of S1 and A1 stations demonstrate positive correlations between the simulated and observed peak and change of underground water, which helps decision-makers to pre-release warning issue in large-scale landslide D038 and D050. However, the result from the model of J1 station in large-scale landslide T003 shows negative correlation in the peak of underground water. It is assumed that the ARIMA models are specific to simulate one station only, and the results could provide the SWCB to issue a warning alert.

Keywords: Potentially Large-scale Landslide Area, Autoregressive Integrated Moving Model, Underground Water Level, Warning Threshold, Assistant model

總目錄



口試委員審定書.....	I
誌謝.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	V
總目錄.....	VII
圖目錄.....	XI
表目錄.....	XIII
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 氣候變遷造成降雨型態改變.....	4
2.2 降雨與地下水對崩塌地影響.....	6
2.3 大地工程中常見的地下水模擬.....	9
2.4 崩塌地警戒基準值之研究.....	11
第三章 研究區域.....	21

3.1 梨山地區區域介紹.....	21
3.1.1 梨山精華區(臺中市-和平區-D050).....	26
3.1.2 松茂地區(臺中市-和平區-D038).....	27
3.1.3 新佳陽地區(臺中市-和平區-T003).....	29
3.2 梨山地區區域介紹.....	30
3.2.1 區域地形.....	30
3.2.2 區域地質.....	31
3.2.3 地形分析.....	32
3.2.3 地表地質.....	33
第四章 研究方法.....	34
4.1 監測資料處理.....	34
4.1.1 時間序列理論	34
4.1.2 平穩型時間序列.....	36
4.1.2.1 自回歸過程(Autoregressive Process)	36
4.1.2.2 移動平均過程(Moving Average Process)	37
4.1.2.3 無定向型時間序列(Nonstationary Time Series).....	38
4.2 模式建立方法.....	39
4.2.1 模式鑑定.....	39

4.2.2 延伸自我相關函數(Extended Autocorrelation Function).....	40
4.2.3 模式檢定方法.....	42
4.2.4 模式之選用準則.....	43
4.2.5 轉換函數模式.....	44
4.2.5.1 二元交叉相關函數分析.....	44
4.2.5.2 轉換函數之基本概念.....	46
4.2.5.3 轉換函數模式鑑定法.....	48
4.2.5.4 角落方法(Corner Method)	49
4.3 建立 ARIMA 模型輔助警戒管理運作.....	49
4.3.1 ARIMA 與轉換函數之建立.....	49
4.3.2 大規模崩塌潛勢區管理基準值.....	51
4.3.3 ARIMA 模型輔助地下水位警戒發布.....	52
第五章 結果與討論.....	55
5.1 建立 ARIMA 模型輔助警戒管理運作.....	55
5.1.1 梨山精華區 A1 自動監測站(臺中市-和平區-D050).....	55
5.1.2 松茂地區 S1 自動監測站(臺中市-和平區-D038).....	59
5.1.3 新佳陽聚落 J1 自動監測站(臺中市-和平區-T003).....	62
5.2 綜合警戒值輔助發布警戒管理值.....	65

第六章 結論與建議.....	68
6.1 結論.....	68
6.2 建議.....	69
第七章 參考文獻.....	71



圖目錄



圖 2-1 水箱理論(Water Tank)示意圖.....	8
圖 2-2 應變管理值常態更新流程圖.....	14
圖 2-3 應變管理值立即更新流程圖.....	15
圖 2-4 大規模崩塌潛勢區情資研判作業流程圖.....	17
圖 2-5 大規模崩塌警界發布作業流程圖.....	19
圖 2-6 大規模崩塌警界解除作業流程圖.....	20
圖 3-1 本研究區域(大梨山地區)介紹.....	22
圖 3-2 臺中市-和平區-D050 監測儀器分布圖.....	26
圖 3-3 臺中市-和平區-D038 監測儀器分布圖.....	28
圖 3-4 臺中市-和平區-T003 監測儀器分布圖.....	29
圖 3-5 研究區域(大梨山地區)地形環境.....	31
圖 3-6 大梨山地區區域地質圖.....	32
圖 4-1 轉換函數模式概略圖.....	46
圖 4-2 角落檢定法判別方式.....	49
圖 4-3 ARIMA 模型建置流程.....	51
圖 4-4 本研究 ARIMA 資料選用及建置流程.....	54
圖 5-1 A1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖.....	57
圖 5-2 A1 監測站 ARIMA 模型(2,1,1)，轉換函數(5,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及杜鵑颱風實際與模擬之地下水位變化值.....	58

圖 5-3 A1 監測站 ARIMA 模型(2,1,1)，轉換函數(5,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及 2017 年 6 月連續豪雨實際與模擬之地下水位變化值.....	58
圖 5-4 S1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖.....	60
圖 5-5 S1 監測站 ARIMA 模型(1,2,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及梅 姬颱風實際與模擬之地下水位變化值.....	61
圖 5-6 S1 監測站 ARIMA 模型(1,2,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及 2017 年 6 月連續豪雨實際與模擬之地下水位變化值.....	61
圖 5-7 J1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖.....	63
圖 5-8 J1 監測站 ARIMA 模型(1,1,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及蘇 迪勒颱風實際與模擬之地下水位變化值.....	64
圖 5-9 J1 監測站 ARIMA 模型(1,1,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及梅 姬颱風實際與模擬之地下水位變化值.....	64
圖 5-10 大規模崩塌區(D050、D038 及 T003)地下水警戒值發布及防災應變流程圖.	67

表目錄



表 2-1 日本各單位針對崩塌地與地滑地警戒基準值標準.....	12
表 3-1 大梨山地區歷史天然災害統計表.....	23
表 3-2 臺中市-和平區-D050 自動監測站資料.....	27
表 3-3 臺中市-和平區-D038 自動監測站資料.....	28
表 3-4 臺中市-和平區-T003 自動監測站資料.....	30
表 4-1 時間統計序列之參數選取準則.....	39
表 4-2 延伸自我相關函數表格.....	41
表 5-1 自動監測站地下水水位基準值.....	65
表 5-2 大梨山地區大規模潛勢崩塌地自動監測站之雨量基準值.....	66

第一章 前言



1.1 研究動機

臺灣位處於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，劇烈板塊運動導致地質構造非常複雜，歷史上亦發生許多嚴重的土砂災害，同時臺灣受北回歸線劃分為兩個氣候區，雨季時往往遭受颱風與季風影響，豐沛雨量伴隨嚴重坡地災害，尤其近年受氣候變遷導致全球暖化影響，降雨型態演變成降雨延時短及強度增加的型態，自 921 大地震及 2009 年莫拉克颱風後，臺灣山區的土砂災害由以往單一型土砂災害演變成複合型災害，對山區村落與保全對象生命財產造成莫大威脅。因此，自民國 106 年行政院農業委員會水土保持局(以下簡稱水保局)起已公告 227 處大規模潛勢崩塌地，辦理更深入的基本資料調查、設置邊坡監測儀器及短中長期之工程規劃，藉長期監測數據分析，進一步提出各大規模崩塌潛勢區域之疏散避難警戒基準值與預警系統，期降低災害發生時所造成居民之損失。

臺中市和平區梨山里於民國 79 年因嚴重山坡地地滑造成嚴重人員傷亡與經濟損失，水保局至今已投入超過新台幣 20 億元預算於梨山地區，包含山坡地邊坡監測系統、整體性治山防災工程與近年辦理的大規模崩塌疏散避難演練等，倘累積超過 20 年的監測資料，目前較少進行加值運用，若未來將於大規模崩塌潛勢區域發布疏散避難警戒，長期之監測資料分析與加值運用將扮演重要一環，且實際監測資料為最可直接反應的依據，目前水保局現場監測資料包含降雨量、地下水水位、地表雙軸傾斜計與地中邊坡變化監測等，監測資料雖能反映邊坡破壞現象，但目前較少研究針對災害預警進一步討論，主要係山坡地地質條件複雜且分布不均，要了解

地下水位分布更為困難，目前國內針對山區警戒基準值訂定多參考日本道路協會(1998)建議之地滑地管理基準值，但各崩塌地地質條件差異相當大，管理基準值之訂定應個別討論。

本研究採用時間序列分析方式，建置適合的自回歸移動平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average model, ARIMA)，以了各大規模崩塌潛勢區域降雨與地下水水位變化之關係，藉由其大規模崩塌區域莫拉克颱風及其歷年極端降雨事件或代表性雨量事件模擬及建置 ARIMA 模型，配合坡地分析結果訂定其地下水水位之管理基準值，期作為水保局發布大規模崩塌區域，地下水警戒基準值之參考依據之一。

1.2 研究目的

山區土砂災害或邊坡災害影響因子有許多，但大多研究均提及主要因子是地下水水位變化，若能藉由即時降雨量模擬地下水水位變化，將有助於山坡地地區災害管理及防災預警執行，臺中市和平區梨山地區共計 11 處大規模崩塌地區，部分測站至今已累積超過 10 多年的監測資料，自 2009 年莫拉克颱風後歷經多次嚴重颱風與豪雨事件，造成嚴重土砂災害及經濟損失，本研究選擇此區域為研究範圍，並加值應用其自動化監測站歷年蒐集之監測資料，利用 Box and Jenkins (1994)提出之時間序列分析方法，套用歷史降雨事件資料，建立合適的地下水水位預測模型，藉以模擬颱風或豪雨等極端事件來臨時地下水水位變化，供決策者發布疏散避難警戒時地下水因子之參考依據。

過去，進行山坡地區降雨量與地下水水位相關分析時，大多仰賴含水層之模擬或理論預測法進行分析與討論，本研究則以統計學概念，採用時間序列分析方法之



自回歸移動平均模型(ARIMA)建立大規模潛勢崩塌區域自動觀測站之合適ARIMA模型，在其歷年降雨事件中選擇代表事件進行模型訓練，並藉由不同代表性極端降雨事件進行驗證，得出合適之模型參數與轉換函數，作為模型之建構依據；此外本研究亦蒐集研究測站之歷年地下水水位資料，及水保局透過邊坡穩定分析軟體，得知各大規模崩塌潛勢區域之地下水水位臨界值，作為未來發布警戒依據之參考。

現今水保局臺中分局已於和平區各大規模崩塌潛勢區域設置多種自動化觀測監測儀器，掌握即時降雨量、地下水位及相關邊坡變動量，未來可透過輸入各崩塌區域即時雨量數據，預測未來可能的地下水水位變化，配合本研究提出之地下水水位管理基準值，作為機關發布疏散避難之參考依據。

1.3 論文架構

本論文架構分為七個章節依序說明如下：第一章闡明研究動機與目的及體現本研究的價值；第二章為文獻回顧，針對各個主題進行文獻蒐集與整理，其中包括氣候變遷造成降雨型態改變、降雨與地下水對崩塌地影響、常見的地下水模擬方式及山坡地崩塌區域管理基準值相關研究；第三章為研究區域介紹與背景說明；第四章研究方法分成兩個部分，第一部分為監測儀器設置位置及種類，第二部分為監測資料應用與分析方法；第五章為結果與討論，說明自回歸移動平均模型(ARIMA)訓練、驗證及測試過程與結果，並結合邊坡穩定分析，提出合適該崩塌區域的地下水水位管理基準值，說明研究結果的後續應用與侷限性；最後一章則是本研究的總結，說明此方法的限制以及未來可能的研究方向建議。

第二章 文獻回顧



2.1 氣候變遷造成降雨型態改變

臺灣的地理位置處於西太平洋之熱帶氣旋區，地理條件係屬於地勢陡峭的高山島嶼國家，山坡地佔了 75%的總面積，颱風豪雨的侵襲使台灣飽受崩塌災害之摧殘。受全球暖化導致氣候變遷之影響，根據聯合國氣候變遷小組提出之氣候變遷第六次評估報告，臺灣在本世紀中、末之極端降雨事件非常可能會有更高降雨強度，伴隨之最大風速與降雨也可能增加；當乾季日數增加，濕季日數縮短情況下，極端降雨事件對臺灣山區可能造成之災害又更為嚴重，近年來莫拉克、賀伯、納莉等颱風事件均造成中南部山區嚴重傷亡。范正成等人(2013)指出臺灣過往 40 多年來降雨時數漸減，平均時雨量強度增強，如 2009 年發生莫拉克等颱風之極端降雨事件，在 2000 年以前平均 3 至 4 年才發生一次，2000 年後則平均每年發生一次，受氣候變遷影響，導致臺灣極端降雨事件發生頻率增加，山區隨颱風、豪雨發生所觸發之土砂災害發生頻率也隨之提高。

在聯合國氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)氣候變遷第六次評估報告中明確提到，無論在哪種情境下，全球地表將持續增溫至少到本世紀中。除非在幾十年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放，否則全球暖化幅度將在 21 世紀超過 1.5°C 及 2.0°C，全球暖化也直接對氣候系統產生諸多影響，包含：水循環變異度、全球季風降雨、乾溼事件嚴重程度等，且災害將會從傳統的單點災害，演變成複合型災害，也使得災害較過往難以掌控，且規模將超出以往可預期，也使得防災上面臨更大的挑戰；科技部及中央研究院環境變遷中



心(2022)指出，臺灣氣候未來推估會持續上升，全球暖化最劣情境模擬(SSP5-8.5)下，21 世紀中、末之年平均氣溫可能上升超過 1.8 °C、3.4 °C；理想減緩情境(SSP1-2.6)下，可能增加 1.3°C、1.4°C。未來的極端高溫事件，也隨之明顯增加，推估臺灣夏季長度約從 130 天增長為 155-210 天，冬季長度從目前約 70 天減少為 0-50 天；推估臺灣年總降雨量有逐年增加的趨勢，在最劣情境模擬(SSP5-8.5)下，21 世紀中、末臺灣平均年總降雨量增加幅度約為 15%、31%，且年最大 1 日暴雨強度也呈現增加趨勢，在最劣情境模擬 (SSP5-8.5)下，世紀中、末平均年最大 1 日暴雨強度增加幅度約為 20%、41.3%。同時，年最大不降雨日數也呈現增加趨勢，在最劣情境模擬(SSP5-8.5)下，世紀中、末平均增加幅度約為 5.5%、12.4%。而影響臺灣的颱風個數將因大氣環流的改變，世紀中、末減少約 15、55%，強颱比例增加 100%、50%，由此可知臺灣將面臨明顯的氣候與降雨型態的改變，對防災任務執行上更增加了挑戰性。

當降雨型態受氣候變遷改變後，有關崩塌發生潛勢相關研究中，Jakob and Lambert (2009) 指出加拿大地區在降雨型態逐漸變成強降雨強度、短降雨延時，推測 2071 至 2100 間誘發崩塌之豪、大雨事件將提升 28%之多，該研究使用氣象資料採統計方式將時間尺度從月轉化為日的尺度，其建立月雨量與日雨量之回歸式僅達 0.56，顯然此種時間尺度的偏差將使氣候變遷導致豪雨事件之不確定性大幅增加。國內 Chiang and Chang (2009) 評估新竹縣尖石鄉白石溪集水區，因氣候變遷對土砂災害或崩塌潛勢區的影響，作者於文中指出 2010~2099 年相較 1960~2008 年，白石溪集水區內土砂災害潛勢面積增加 12.8%，此研究亦使用 Jakob and Lambert 相同的研究方法，將研究範圍內歷年的氣象與氣候資料降尺度進行比較，其中月雨

量與日雨量迴歸係數約為 0.71，由研究成果可知全球暖化導致之極端降雨型態改變外，對於崩塌潛勢區之不安定性也明顯增加。



2.2 降雨與地下水對崩塌地影響

造成土砂災害或崩塌的影響因子有相當多種，目前最常見的莫非為降雨及地下水，後者因在山區往往因地層複雜，若無完整鑽探資料或基本調查，根本無從得知地下水之分布，Th. W.J Van Asch (1999)在加拿大南部山區，針對造成土體破壞的各種影響因子進行試驗研究，其中在各試驗結果中明確指出，地下水對於土體達到臨界飽和值扮演重要的角色，特別是地表下深度 5 至 20 公尺之深層土壤破壞中，隨著地下水位上升會使得正向土壓力增加，也使得土體更趨於脆弱。Mikko I. Jyrkama and Jon F. Sykes (2007) 研究指出儘管地下水位在山區難以預測，但透過了解地下水補注及管理可以有效減少山坡地崩塌潛勢，透過建立水文模式模擬地下水位變化，將可以有效掌握因地下水上升而誘發的土砂災害，而此模式可以模擬地下水受降水補助而變動的幅度，但研究也指出此類方法將仰賴於完整的地質資料及當地的監測數據輔助，且水文模式將因地文及水文條件不同而無法有效複製模式參數或成果套用於其它監測站；此外，研究指出就其研究區域內，地下水位也因雨量增加而逐年增多，可知地下水的變化將受雨量所影響，而降雨強度、入滲率、土壤種類等也會直接影響地下水位的變化，但就水文模擬僅考量現地監測數據的變化，故可忽略地質條件不同的變數，而因降雨型態改變降雨強度與延時，確實也造成地下水位模擬上的困難，和許多過去地下水相關研究類似，指出地下水位上升將造成山區淺層與深層崩塌的直接影響。承上，本研究亦選用大梨山地區之大規模

崩塌潛勢區域作為研究區域內，分別建立其監測站合適之地下水水位變化模擬模式，來掌握地下水位變化與崩塌發生的關係，回饋水保局決策者發布地下水為警界管理值之參考依據。



國內針對降雨與地下水對崩塌影響相關研究，以中華水土保持協會(2000)在梨山地區管理基準值之研究中利用水箱(Water Tank)理論作為說明，倘若崩塌地與地滑地上每一處監測站之地文及水文等條件可用水箱表示(如圖 2-1)，水箱右側入口為地層地下水之滲流補助，上方入口為降雨之入滲補助，左方則為地層滲出損失部分。降雨經由入滲補助與地表逕流分配後，進入地層下方補注地下水層，在未飽和層經由滲漏進入地下含水層，補助量直接影響地下水水位變化，滲漏水量的大小則直接影響滲漏水到達地下水層之時間，此條件則視不同崩塌地與地滑地地質條件不同而異；此外，不同的降雨型態同扮演重要角色，強降雨之降雨事件，將會導致地表逕流增加，流速增快，間接造成入滲量減少，故無法僅由單一降雨事件得知地下水水位之變化，要掌握地下水位之變化仰賴長時間地下水位監測結果之分析，當然降雨延時也影響了入滲容量大小，滲流補助代表著降雨在集水區上游逕流量、入滲總量，經由河床入滲，在地下流動進入崩塌地與地滑地而成了地下水補注來源，其時間與補助量大小的關係，視集水區大小及地質條件而異，在流出部分可直接認為坡面地表逕流或流至地下水下游出水口，地下水持續流動代表地層中有著某一特定出口，出口大小決定地下水流動速度及出流量與容量。

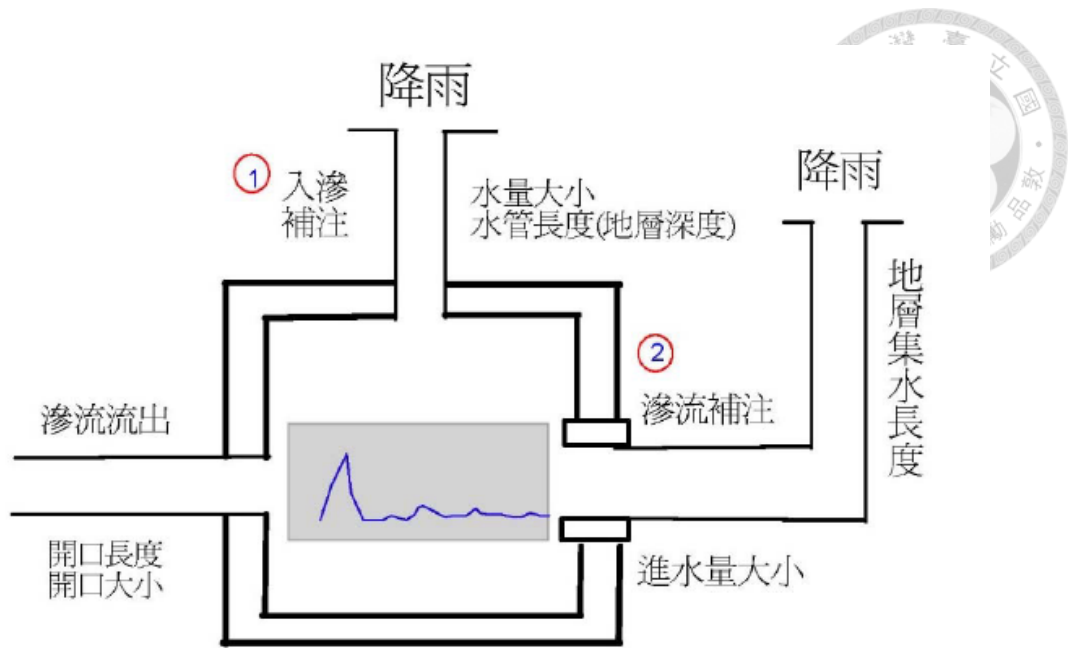


圖 2-1 水箱理論(Water Tank)示意圖（中華水土保持協會，2000）

崩塌地與地滑地常見的地下水水位計觀測能直接反應觀測站的地下水位變化，透過監測得知地下水位與降雨之變化，能使用水文分析與模擬之方法加以研究，一般使用迴歸分析法建立之降雨與地下水水位關係式，無法成功模擬出地下水位與降雨延時之變化關係。而統計分析常使用的時間序列分析理論，採用單變數模式、介入模式與轉換函數模式，則可解決變動資料數列因變數改變而無法成功模擬的困難；Maidment 及 Miaou(1995)將氣溫與雨量設為自變數，應用轉換函數理論為基礎，於美國德州奧斯丁市日用水作為轉換模型。此外，類神經網路 (Artificial Neural Network)是一種基於人體神經系統為基礎所提出的資料序列處理模式，透過多筆資料序列 (即輸出系統與輸入系統所組成)進行人工智慧學習，建立該資料序列之系統模型，此模型可作為推估、預測與診斷等用途。陳志忠 (2009)運用時間序列介入研究臺中市梨山地區崩塌地與地滑區域水土保持整治工程對地下水位變化的影響成效評估，可了解工程構造物對於地下水位變化有直接影響。張恭誠

(2011)參考暴雨事件之回歸週期，建立自動化監測站之雨量與地下水位變化分析模式，並利用類神經網路之預測成果，建立大梨山地區崩塌地之警戒管理基準值。



2.3 大地工程中常見的地下水模擬

現今常見之預測或模擬模型常見於金融、氣象、天然災害等領域，面對地形複雜之山區則較少相關研究，大規模崩塌區域之土砂災害預測與模擬，困難在於不確定因子太多，導致需要假設過多參數或利用經驗公式解決外在與不定因子，不確定因子包含不同研究區域之地質條件、土地利用及人為工程導入影響等；在統計學上，常藉由過去發生事件之紀錄資料推估未來變化，此法較於其它預測方式或許較於簡單也捨去不定因子之參數影響，但作為山區或崩塌區災害預警使用之參考卻相對合適。楊智堯(1999)採用類神經網路於中部山區的崩塌地分析，研究地下水位上升對崩塌潛勢土體坡趾破壞潛能，及其可能造成土砂災害發生之時間；柳雅濤(2008)採用邊坡位移模擬非線性動態系統，嘗試使用時間序列方式分析邊坡破壞量，採用統計方式，研究結果發現時間序列模擬模型能夠成功模擬出趨勢相近的整體變化。

其中有關統計學中時間序列的研究最早起源於十七世紀，牛頓透過太陽光的觀測，分解光線成光譜，利用傅立葉(Fourier Transform)分析一組觀測訊號，就是光譜分析(Spectrum Analysis)的由來。1920 年代，Yule 及 Slutsky 提出共變數分析(Covariance Analysis)時間序列研究方法進行回歸分析。1970 年代，Box 及 Jenkins 提出自回歸移動整合平均模式(Auto-Regressive Integrated Moving Average Model, ARIMA)，正式將時間序列研究證實為一種有效的科學分析方法，相較牛頓所提出的光譜分析而言，又更為清楚理解。近年來，國內外因科技日新月異，常見的統計

分析軟體如 SPSS、SCA、SAS 與 R 等分析軟體成長快速，使得 ARIMA 模式普遍應用於自然、社會科學等各領域中。

水文時間序列(Hydrological Time Series)大致分為兩種，序率式(Stochastic)與定率式(Deterministic)，定律式序列分析係指，資料序列處理完全依照物理之確定定律(Law of Certainty)及數理模式，不考慮歷程中發生變數機率之水文模式。而序率式則將歷程中發生的機率或變數納入考慮，依照不確定定律(Law of Uncertainty)，將過去發生事件或觀測的監測資料序列，透過歸納、分析其序列資料的特性，藉由統計方法尋求適合之水文模式與參數。鑒於本研究，將著重於山區大規模崩塌潛勢區域，地下水水位變化及降雨量之關係，並應用於大規模崩塌疏散避難預警之參考依據，因此若著重於歷程發生的變化，序率式的統計水文模式較為合適。

統計學中的水文時間序列在國內外已經廣泛被使用於各領域中，Maidment 及 Miaou(1995)研究中，設定降雨量及氣溫資料序列為自變數，以轉換函數為基礎，將德州奧斯丁市的日用水作為轉換函數模型基礎，並用以模擬每日用水量變化量。國內，陳弈弦(1996)使用水文時間序列模擬地層地盤沉陷量，儘管在地質構造複雜且缺少鑽探資料的情況下，研究成果仍有不錯成效。張耀華(1997)採用單變數之自回歸移動平均模型(ARMA)，透過轉換變數與介入模式的資料處理方式，於臺灣中部地區進行臭氧濃度變化模擬，模擬結果與觀測結果之整體變化趨勢，仍有相當高的關聯性。

水文時間序列有關地下水與降雨的自回歸移動平均模型(ARIMA)相關研究，Adamowski(1993)利用水文序率模式探討地下水水位變化情形，採用轉換函數擬合以模擬地下水水位變化。陳弈棠(1997)利用時間序列構築台北市郊區地下水與降雨

之轉換函數，並得到不錯結果。許友豪(1998)以台中市梨山地區為研究區域，使用時間序列方式構築降水與地下水水位變化關係。陳志忠(2009)則透過水文序列模式作為地滑地排水設施成效之檢定工具。



2.4 崩塌地警戒基準值之研究

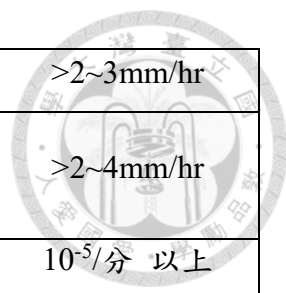
2.4.1 崩塌地警戒基準值

臺灣山區之崩塌地治理除了投入經費建立工程抑止災害發生，更應強化軟性手段，如在崩塌潛勢區域設置適當自動監測設備，掌控崩塌地的即時變化情形，隨著監測階段的不同，為了解監測數據中所代表的數字，必須要有其判定標準，此標準稱為警戒基準值，一般而言大多透過歷史監測數據擬定該崩塌地之警戒基準值，但基準值的訂定方法眾說紛紜，且國內外也有相當多的參考資料。臺灣目前常見的基準值判定標準，大多來自相關研究起步較早且監測儀器較為完整的日本災防協會，因此對於各災害類型(如崩塌地、地滑地等)均有其定義，及相關監測值之研究。日本高速調查會提出的地滑地警戒基準值主要係針對崩塌地之地表傾斜量、地表位移量與地層孔內傾斜量之監測值觀察依據，但往往一般山區要設置上述監測儀器所需經費較大，且無法大量布設；為掌握崩塌地地表淺層變化，常見的監測儀器為地表伸縮計，因安裝快速且成本較低，應用於山區崩塌地或地滑潛勢地區較為普遍。而其他的相關警戒基準值研究，如 Shimizu(1999)利用 R-T 圖將位於日本松江市崩塌地的監測資料，進行降雨型態分類，並利用水箱理論模式(Tank model)概念，繪畫出一條可用於模擬因降雨增加、地下水位上升，而導致崩塌地土體破壞之臨界線，作為該崩塌地區土砂災害發生模擬及預防之用。

在國內，台灣工業技術研究院能資所於 1996 年在臺中市梨山地區地滑整治規畫調查報告書中提及，參考日本各研究報告所提出之監測儀器觀測值及擬定之警戒基準值，進行崩塌地與地滑地警戒基準值訂定之參考依據，如表 2-1 為日本各研究單位發表之警戒基準值彙整，直至 2010 年水保局於大規模崩塌潛勢區域調查規劃中，投入大量自動化觀測儀器，經過歷年災害事件及極端降雨事件之資料蒐集分析後，才陸續提出正式的基準值擬定方法，並隨著極端事件發生，而定期與不定期滾動式檢討，以符合現今氣候型態與災害類型的變化。2022 年，水保局也因應國家災害防救辦法將大規模崩塌潛勢區之防救災納入法源，為避免災害導致大規模崩塌潛勢區域內發生嚴重損失與傷亡，正式提出大規模崩塌潛勢區警戒管理值操作手冊，並據以執行及發布警戒值，倘因大部分崩塌區的自動化監測站累積監測資料不足以完成詳盡分析，目前仍需仰賴多向致災因子共同監測儀器之評估，作為發布警戒值之參考。

表 2-1 日本各單位針對崩塌地與地滑地警戒基準值標準

單位名稱	警戒基準值		
	注意	警戒	危險
日本高速公路調查協會	0.5~10mm/day	10~50mm/day	>50mm/day
日本道路協會	1~25mm/day	15~100mm/day	50~500mm/day
日本土木研究試驗所	1~10mm/day	10mm/day 以上	>4mm/hr 連續兩小時以上
綜合土砂災害對策檢討協會	1~10mm/day	5~10mm/day 以上	>4mm/hr 連續兩小時以上



西鶴(2011)	-----	5~10mm/day 以上	>2~3mm/hr
渡(1995)	-----	1mm/day 以上，5~10 日 持續 50mm	>2~4mm/hr
齋藤(1998)	10^{-7} /分 以上	10^{-6} /分 以上	10^{-5} /分 以上

(資料來源：行政院農業委員會水土保持局，2022)

自 2010 年以來行政院農業委員會水土保持局劃定大規模崩塌潛勢區域後，亦針對各大規模崩塌潛勢區域訂定應變警戒、管理基準值及其更新原則，訂定原則主要包含雨量警戒值訂定及現地監測應變管理值訂定，前者係以各區域之大規模崩塌發生或嚴重土砂災害發生案例，所建立之臨界雨量值，並考量疏散避難所需時間訂定；後者應變管理值訂定依據現地調查資料、歷史監測資料、數值模擬分析成果及參考國內外相關文獻評估訂定之。又因國內大多已被劃分為大規模崩塌潛勢區域均尚未發生過崩塌事件，故其警戒值仍需定期與不定期滾動式檢討，以提升大規模崩塌警戒發布準確性，應變管理值更新概分為以下兩種，分別為常態更新及立即性更新。

1. 常態性更新時程:雨量警戒值與現地監測管理基準值，原則每年原則更新一次，如圖 2-2 更新流程圖所示。
2. 立即性更新時機：如圖 2-3 流程圖所示
 - (1) 現地應變管理值偏低，導致異常警戒。
 - (2) 現地應變管理值偏高，同一崩塌或滑動區設置數種不同類型監測儀器，部分儀器應變管理值已達崩坍警訊，部分儀器應變管理值過高，無法適時反應警訊。

- (3) 發生震度 5 強以上地震事件，地震事件後針對大規模崩塌潛勢區域震度 5 強以上影響範圍，評估調整雨量警戒值及現地監測應變管理值。

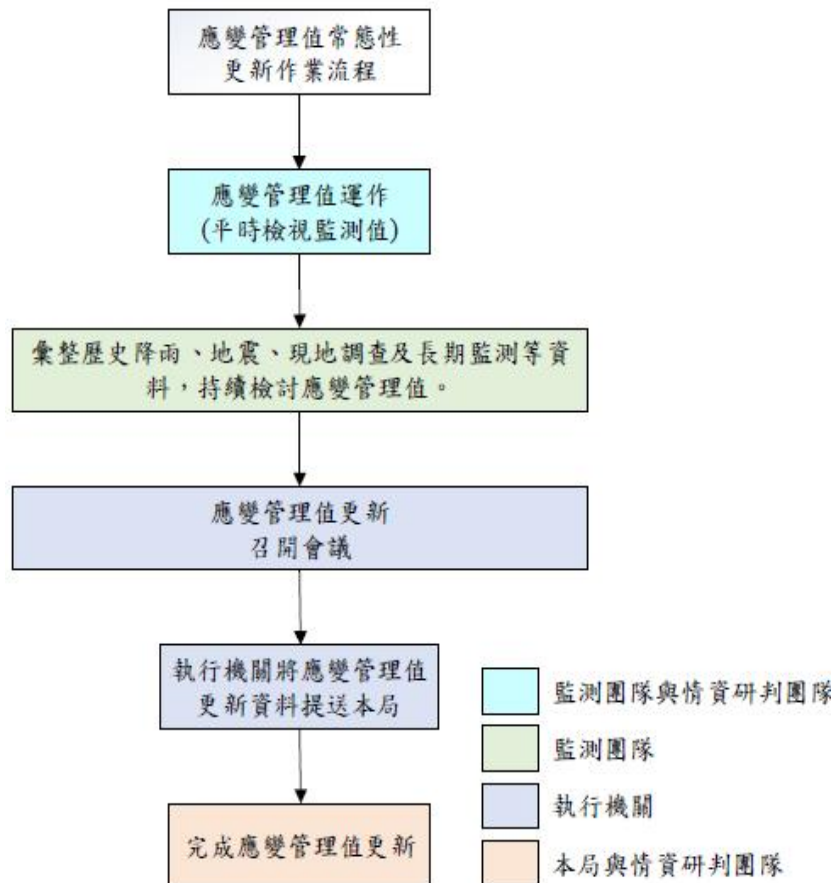


圖 2-2 應變管理值常態更新流程圖

(行政院農業委員會水土保持局，2022)

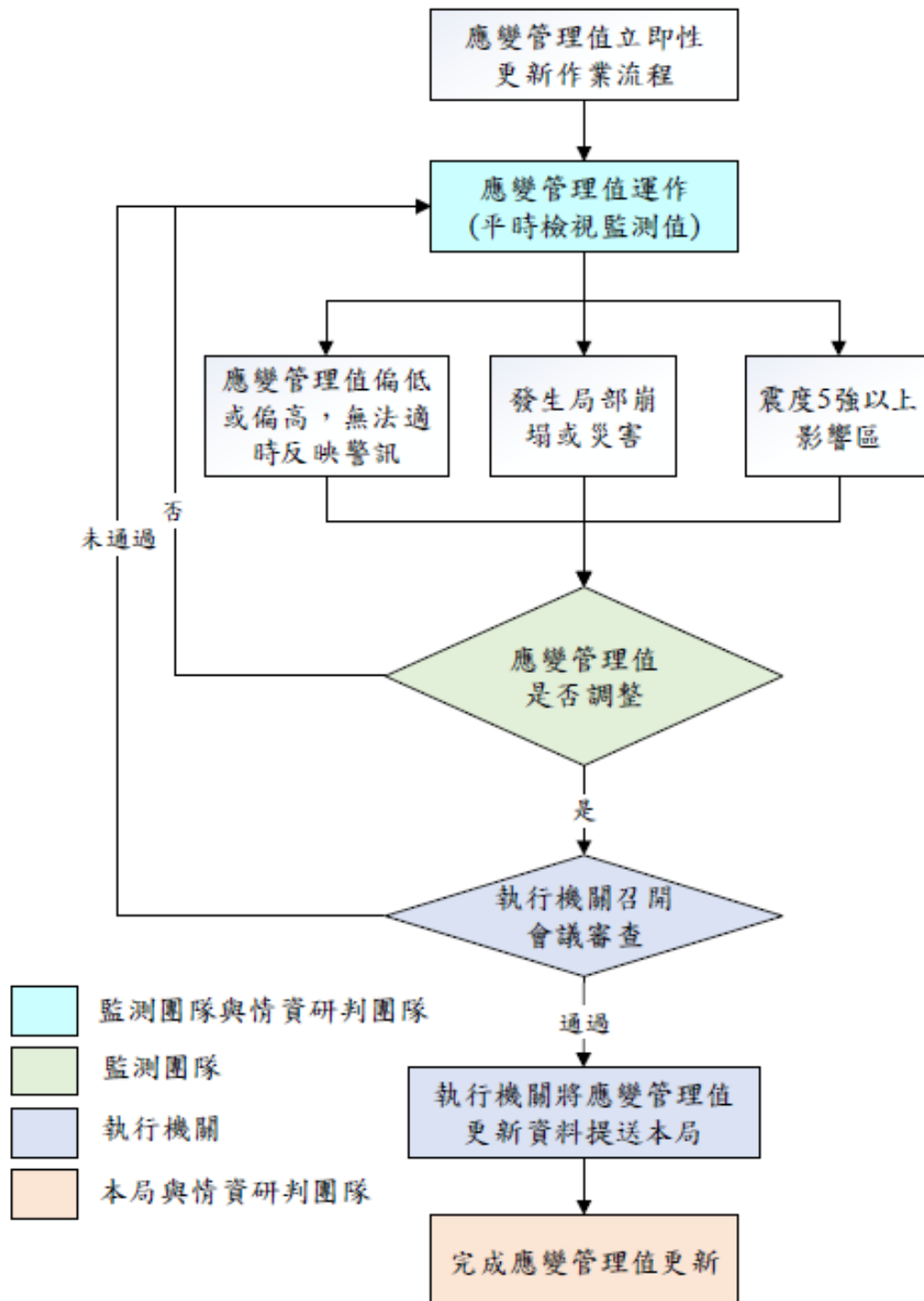


圖 2-3 應變管理值立即更新流程圖

(行政院農業委員會水土保持局，2022)

2.4.2 大規模崩塌警戒基準值輔助決策分析

一般常見大地工程領域的決策分析輔助工具，大多根據決策分析系統(Decision Support System, DSS)之範疇，專家分析策略之決策分析工具通常係指一建議系統，倘土木工程領域不定因子眾多，故大部分專家系統處理的資訊通常也因地利宜且不是絕對的。透過給予不同的參數、資訊等資料數列進入專家決策系統，作為系統處理判斷依據，係為了增加系統之信任因素，多種資料序列的信任因素和規則組合起來的信任因素即為該系統所產生之結論，專家系統中包括人工智慧運作領域，以資料與知識庫為基礎，包含建立資料數列之決策樹、資料挖掘法(Data Mining)、層級分析法(Analytic Hierarchical Process, AHP)、遺傳演算法、類神經網路、模糊邏輯及模糊理論等，模糊邏輯又為另一種不確定的資料序列運算方法，透過模仿人類處理的過去習慣為基礎，並列分為許多不同領域之專家分析系統(林鳳寧，2003)。

國內目前主要發布山區疏散避難警戒值的單位為行政院農業委員會水土保持局，又分為土石流警戒與大規模崩塌潛勢區警戒兩種作業流程，本研究參考水保局針對大規模崩塌區警戒管理發布流程進行探討，其標準作業與運作流程又分為颱風豪雨期間與非颱風豪雨期間，如圖 2-4 作業流程圖所示。

颱風豪雨期間依據水保局作業小組規定，如該大規模崩塌潛勢警戒區之監測值達應變小組開設門檻，同時啟動大規模崩塌情資研判作業，監測團隊根據各潛勢區域現地監測儀器進行監測，當監測值達警戒值時即啟動情資研判作業。

一、有效累積雨量已達雨量警戒值

情資研判團隊依據雨量分析結果，提出警戒雨量警戒發布標準明

細，提送行政院農業委員會水土保持局發布警戒。



二、現地監測值已達警戒管理值

1. 當現地監測值達注意值時，情資研判團隊通知加強守勢警戒。
2. 當現地監測值達警戒值時，情資研判團隊分析監測資料、評估崩塌風險，經行政院農業委員會水土保持局召開綜合情資研判會議。
3. 當現地監測值達警戒值且地表變位速率持續增加，經行政院農業委員會水土保持局與情資研判團隊綜合評估。

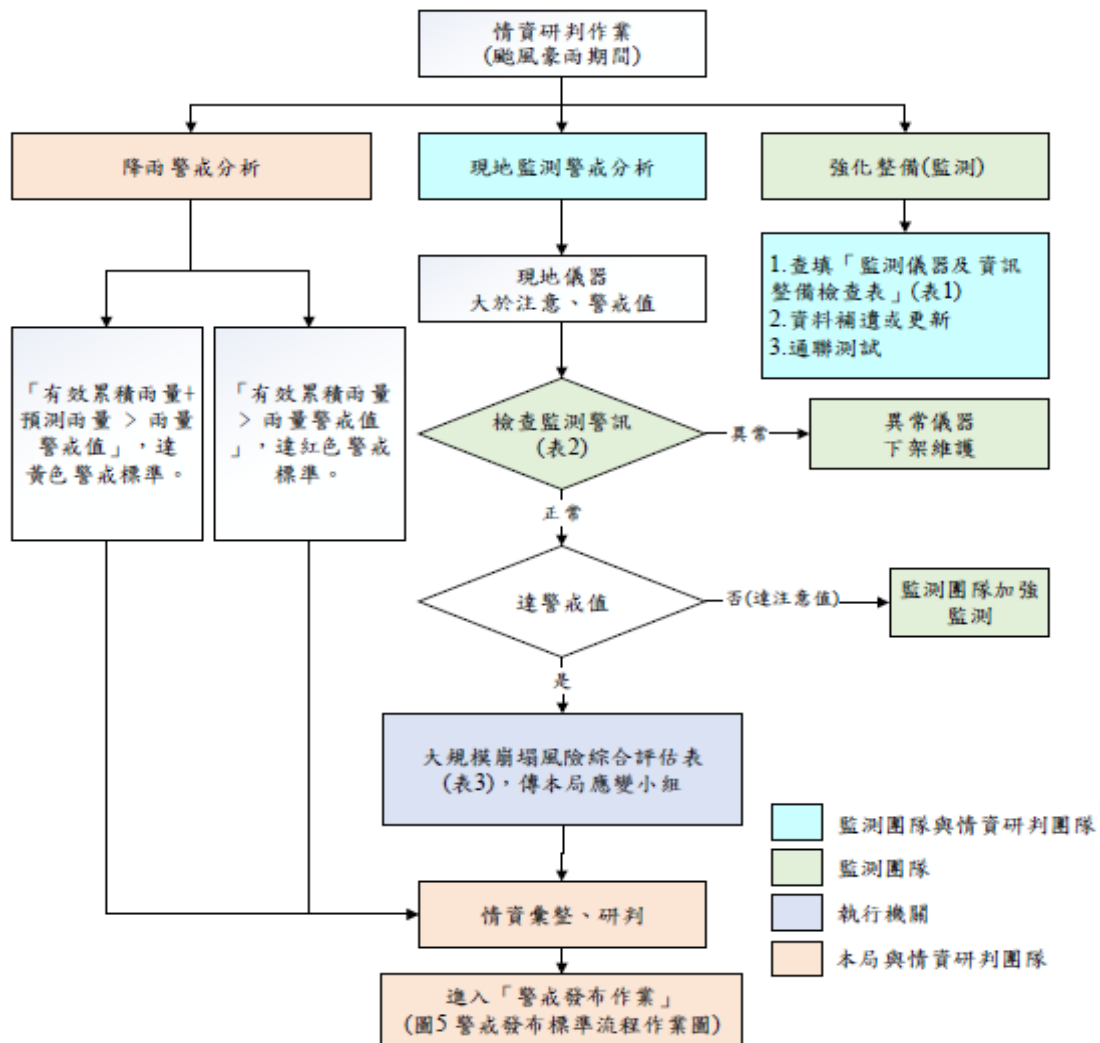


圖 2-4 大規模崩塌潛勢區情資研判流程圖

(行政院農業委員會水土保持局，2022)



經綜合情資研判作業判定需發布警戒時，將於定期或不定期由水保局統一發布之，其發布內容分為紅色及黃色警戒，發布作業流程詳圖 2-5。

一、黃色警戒發布標準

1. 依據氣象局定量降雨預報，當「有效累積雨量+預測雨量>雨量警戒值時」發布大規模崩塌潛勢區黃色警戒。
2. 現地監測值達警戒值時，依據歷史調查及現地監測資訊，經風險評估及情資研判作業後，發布黃色警戒。
3. 現地監測達警戒值時可由行政院農業委員會水土保持局與其情資研判團隊經綜合情資研判作業輔助發布黃色警戒。

二、紅色警戒發布標準

1. 依有效累積雨量及中央氣象局之定量降水預報進行分析，有效累積雨量達警戒標準，且該潛勢崩塌區無減緩趨勢時，行政院農業委員會水土保持局(情資研判團隊)提出預定發布警戒潛勢區明細，並產製其警戒發布單。
2. 依現地監測儀器警訊進行風險評估後，建議發布警戒時，將建亦發布警戒潛勢區域研析資料，交由行政院農業委員會水土保持局應變小組召開綜合情資研判會議，討論通過後發布之。

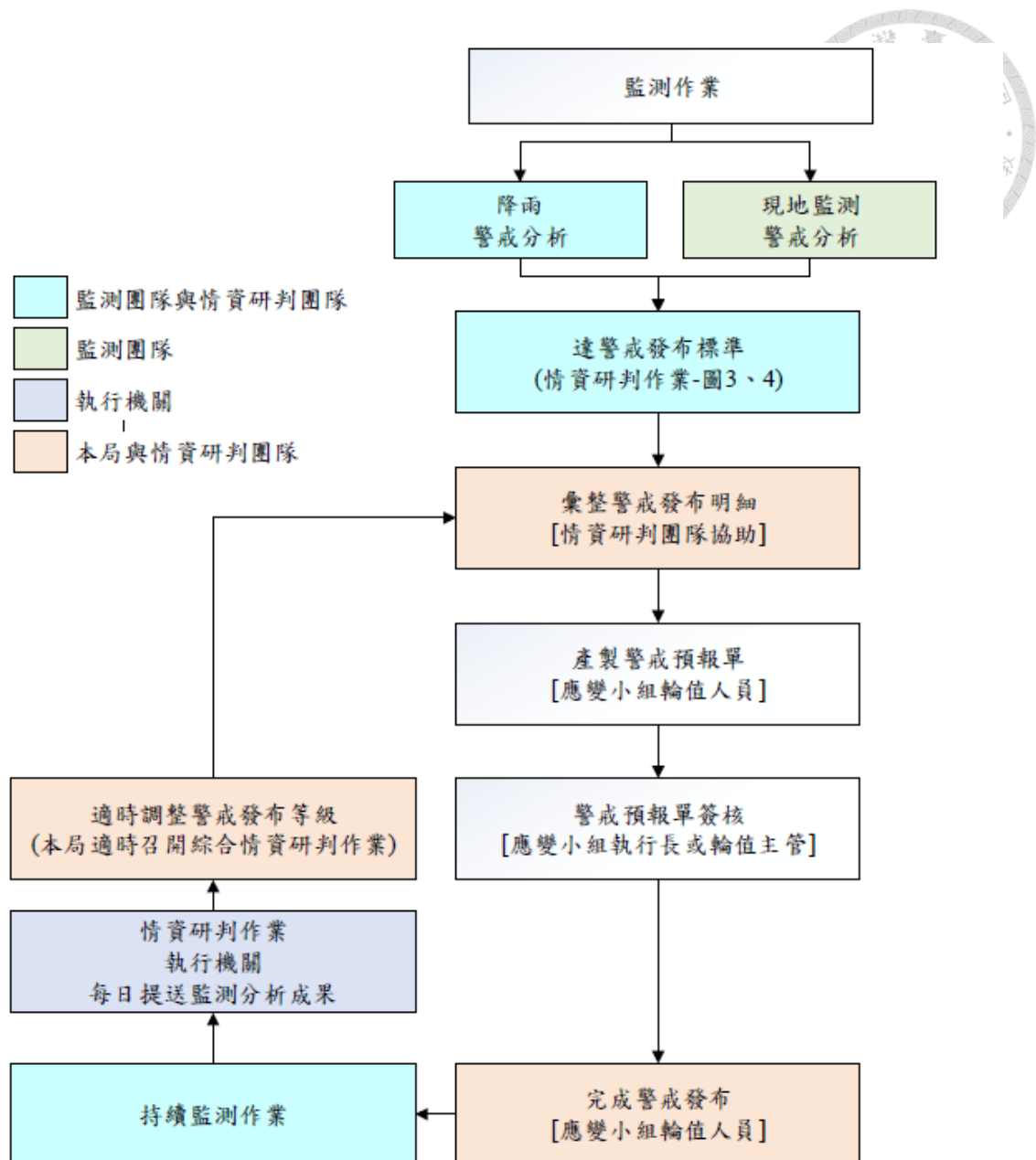
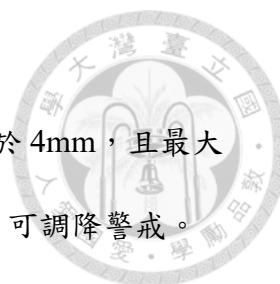


圖 2-5 大規模崩塌警戒發布作業流程圖

(行政院農業委員會水土保持局，2022)

大規模崩塌警戒解除作業標準，又依現地雨量及監測儀器觀測值不同區分為以下三種，雨量曾達警戒值但現地監測均未達警戒值、雨量曾達警戒值且現地監測達警戒值及雨量未達警戒值但現地監測達警戒值，解除作業標準流程如圖 2-6 所示。



- 一、紅色警戒調降為黃色警戒:連續 6 小時平均降雨強度小於 4mm，且最大時雨量不超過 10mm，並研判未來無持續降雨之趨勢，可調降警戒。
- 二、解除黃色警戒:連續 6 小時平均降雨強度小於 4mm，且最大時雨量不超過 10mm，並研判未來無持續降雨之趨勢時，可解除該警戒。
- 三、解除紅色警戒:連續 12 小時平均降雨強度小於 10mm，且無持續降雨趨勢時，可解除該警戒。

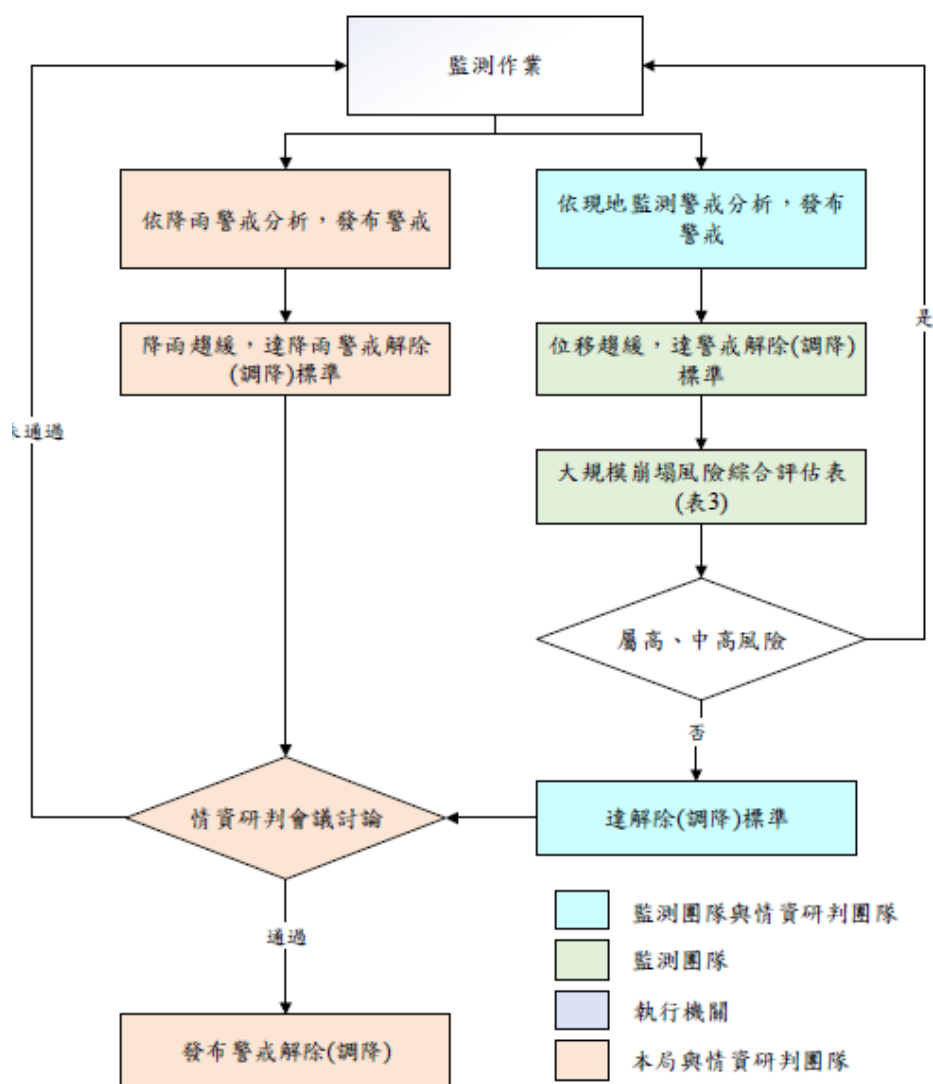


圖 2-6 大規模崩塌警戒解除作業流程圖 (行政院農業委員會水土保持局，2022)

第三章 研究區域



3.1 梨山地區區域介紹

梨山地滑區位於臺中市和平區梨山里，人口約 2,200 人，位處臺灣中部臺中市北偏東 100 公里中央山脈中，標高約 1,950 公尺，為中部縱貫公路及其宜蘭支線交會，梨山地滑區涵蓋範圍廣大，主要包含中橫公路台 8 線與台 7 甲線交會處區域，民國 79 年 4 月期間因大規模地層滑動，導致沿線路基嚴重滑動且交通長時間中斷，此外此區域長年來發生多次嚴重地滑、地基下陷及土砂災害，造成多處重要公共設施受損，如供應中部地區主要水庫-德基水庫正坐落於此區域，因此有效抑制災害發生，完善整體集水區水源涵養成為政府機關重要課題。水保局自民國 84 年起為梨山地滑區規劃一系列「坡地災害整治」調查規畫報告，至今已投入超過新台幣 20 億元之整治預算，除了依現場條件擬定梨山地滑區整治規劃外，也以集水區為單元佈設完善監測系統，規劃此區域的警戒管理基準值，配合土石流警戒發布多次疏散避難通報，至今也配合經濟部中央地質調查所將此區域劃分為 11 個大規模崩塌潛勢區，持續進行小單元之管理與監測。

梨山地區於民國 88 年經歷 921 地震與接續多場颱風、豪雨事件影響，造成當地居民嚴重人員傷亡與經濟損失，民國 98 年莫拉克颱風後，新增多處崩塌、地滑災害區位，為保障此區域保全住戶安全及德基水庫集水區上游水源涵養之重要性，水保局將調查範圍區域擴大，涵蓋和平區松茂部落、松柏地區、新佳陽部落、老部落及梨山精華區等地區，統稱此區域為「大梨山地區」，並逐年佈設地表地中監測設備及導入軟性抑制工法與硬性抑止工程，辦理土石流防災教育訓練及宣導，強化

地方居民對於居住環境之認知，圖 3-1 為大梨山地區及其大規模崩塌區位置分布。

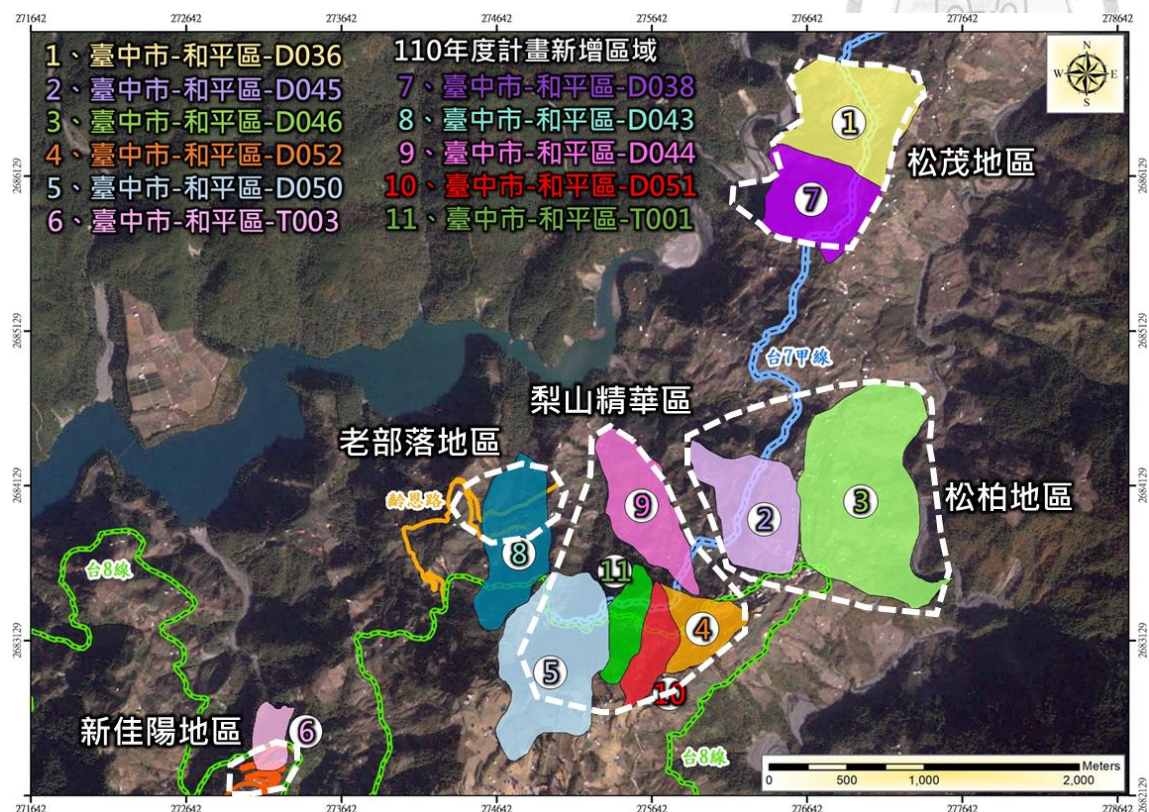


圖 3-1 本研究區域(大梨山地區)介紹

本研究為建置梨山地區大規模崩塌區雨量與地下水水位預測模型，從 11 處大規模崩塌潛勢區域挑選其保全住戶最密集、監測資料最完善(超過 10 年)及水保局規劃將針對其區域發布疏散避難警戒值區域，故選用位處於松茂地區「臺中市-和平區-D038」、梨山精華區「臺中市-和平區-D050」及新佳陽地區「臺中市-和平區-T003」共三處大規模崩塌區域作為研究區，並從大梨山地區歷年災害事件中挑選各區域之代表性極端降雨事件，作為本研究建置 ARIMA 模型之依據，表 3-1 為大梨山地區歷年天然災害統計。

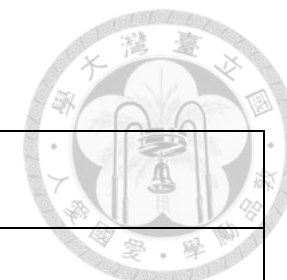


表 3-1 大梨山地區歷史天然災害統計表

年份	颱風豪雨	災害發生時間	災害事件	備註
79	連續降雨	4 月 15 日	梨山地區因連續降雨發生大規模地層滑動，造成梨山賓館、國民旅舍、公路局車站等重要建物嚴重受損，並導致橫貫公路宜蘭支線路基坍塌，交通中斷。	地滑發生後，台灣省政府立即進行交通、排水、防砂及聚落整治等緊急處理計畫，並委託工研院能資所進行地層滑動調查與整治方案規劃。
88~93	921 地震	9 月 21 日	台 7 甲線及台 8 線道路沿線災害，松茂、老部落、新佳陽地區災害擴大。	其災因主要是敏督利颱風的累積雨量，及九二一地震後，將地震鬆動土壤沿坡面及坑溝沖刷而下，造成沿線嚴重災害，成為大甲溪上游土砂災害嚴重之主因。
	敏督利颱風 (七二水災)	6 月 30 日~7 月 6 日		
98	莫拉克颱風	8 月 6 日~8 月 10 日	通往梨山地區之台 7 甲線及台 8 線道路因路基流失、邊坡崩坍等因素，造成道路數度中斷。	莫拉克颱風挾帶強風豪雨，由東部登陸侵襲，造成梨山地區對外聯絡道路紛傳坍方，造成交通中斷形成孤島，其中梨山地區包含臺中縣和平鄉梨山村、平等村約 1000 戶居民受困山中。
	南投名間 6.0 地震	11 月 5 日		
101	0610 豪雨	6 月 10 日~6 月 14 日	通往梨山地區之台 7 甲線及台 8 線道路中斷；台 8 線 68k+500 路段舊佳陽聚落上邊坡，在無預警情況下發生嚴重崩塌災害。	1、林務局東勢林管處梨山工作站的佳陽分站遭土石流掩埋 2、0610 豪雨與蘇拉颱風造成地下水水位進入注意參考階段，部分地區有發生地層滑動現象。
	蘇拉颱風	7 月 30 日~8 月 3 日		
102	520 豪雨	5 月 20 日	大梨山數處地區明顯位移之影響	臺 8 線梨山至大禹嶺路段封閉、臺 7 甲線勝光、松茂路段管制；臺中梨山取水口阻塞無法出水，造成梨山地區停水 430 戶。
	蘇力颱風	7 月 11 日~7 月 15 日		

		月 13 日		
103	麥德姆颱風	7 月 21 日~7 月 23 日	台 8 線道路因路基流失、邊坡崩塌等因素，造成道路數度中斷。	麥德姆颱風帶來風雨，和平區梨山雨量站 72 小時累積雨量已達 256mm，預防性疏散撤離累計人數計有和平區松茂、新佳陽、舊佳陽聚落等共 75 人，台 8 線 87.2k 巨木倒塌且壓住電纜線造成交通阻斷。
	鳳凰颱風	9 月 19 日~9 月 22 日		
104	蘇迪勒颱風	8 月 6 日~8 月 9 日	蘇迪勒颱風全台供電系統受損，造成梨山地區長時間停電。	蘇迪勒颱風挾帶強風豪雨，重創多處公路，包括臺中和平梨山對外三條道路，沿途路樹、電線桿倒塌、土石坍塌到處可見，造成梨山地區長時間停電。
	杜鵑颱風	9 月 27 日~9 月 29 日		
105	尼伯特颱風	7 月 6 日~7 月 9 日	梨山地區道路及電力中斷。	颱風的強風肆虐，梨山地區許多台電輸電線路被風雨吹落地面，樹木壓毀主幹線，造成梨山全區停電；台八線道路（中橫公路）多處坍方，梨山地區聯外交通中斷。
105	莫蘭蒂颱風	9 月 12 日~9 月 15 日		
105	梅姬颱風	9 月 25 日~9 月 28 日		
106	0601、0613 豪雨		梨山精華區西區坑溝土石漫流至台 8 線路面，造成電路及道路暫時中斷。	0601、0613 豪雨以及尼莎暨海棠颱風等強降雨事件，造成最大地表變位地區分別為松茂北區、梨山東北區滑動土體 23.5、15.1 公分變位量；松茂地區地層持續發生變位現象，台 7 甲道路亦發生破壞情形。
106	尼莎暨海棠颱風	7 月 28 日~7 月 31 日		
107	瑪莉亞颱風	7 月 9 日~7 月 11 日	無發生較大的災害情形。	
107	山竹颱風	9 月 14 日~9 月 15 日		

		月 15 日		
108	0520、0611 豪雨		無發生較大的災害情形。	
108	白鹿颱風	8 月 23 日~8 月 25 日		
109	0521 豪雨		台 8 線 79K 新佳陽路段上邊坡，在無預警情況下發生坍塌	梨山台 8 線 79k 路段再度坍方，落石順著雨勢不斷滑落，造成雙向阻斷，無人員受傷及車輛受困，此路段為通往新佳陽聚落的唯一聯絡道路。



3.1.1 梨山精華區(臺中市-和平區-D050)

梨山精華區為處於大梨山地區正中心區域，最為著名為昔日蔣公行館之一，梨山賓館及梨山主要行政區域，也因此歷年來飽受天然災害影響，如民國 88 年 921 地震後，因中橫連貫公路通往臺中市谷關段道路路基下陷，中斷通路而成孤島區域，至今因政府相關單位協助，已逐漸恢復旺盛的觀光、旅遊及農產業，成為大梨山人口最為密集的区域。

梨山精華區監測範圍共 180 公頃，民國 110 年水保局依據地形，將此區域劃分為 5 個大規模崩塌區域，其中各區域地質條件、人文交通及土地利用與疏散避難路線相近，本研究挑選測站資料最為豐富的大規模崩塌區-D050 作為研究測站，詳細地理條件分布位置及各監測儀器佈設位置如圖 3-2 及表 3-2 所示。

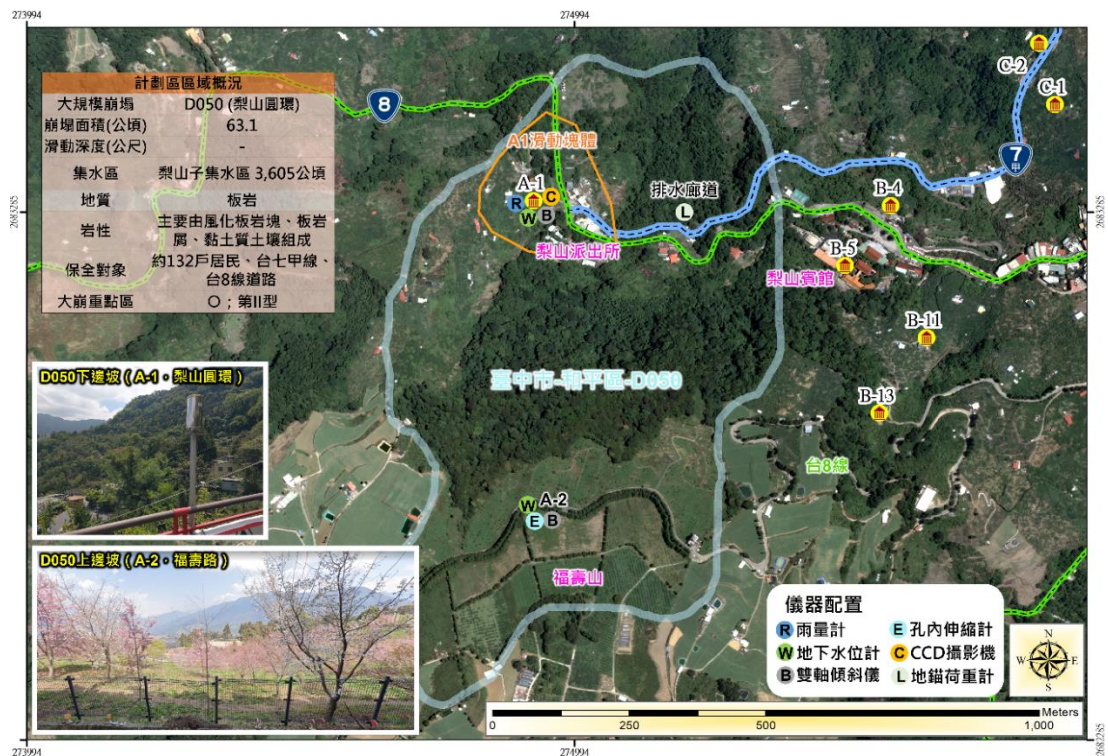


圖 3-2 臺中市-和平區-D050 監測儀器分布圖

(行政院農業委員會水土保持局，2021)

表 3-2 臺中市-和平區-D050 自動監測站資料

大規模 崩塌編 號	潛勢 區 地名	面積 (公頃)	位置(TWD97)		設站時間	主要滑動 面最大深 度(公尺)	主要岩層 分布
臺中市- 和平區- D050	梨山 圓環	63.1	275004	2682999	2006~2022 (17 年)	4.7	板岩

3.1.2 松茂地區(臺中市-和平區-D038)

松茂地區位於台 7 甲線 68~70K 公里，標高約 1,690 公尺，主要聯外道路為中橫公路台 7 甲線，往南接梨山精華區，往北可通往宜蘭縣。因松茂地區地形上位於太保久稜線坡面，下邊坡為大甲溪，滑動體特性推測由一個圓弧形滑動面之滑動體所形成，屬風化岩或崩積土層之地滑。滑動區監測範圍約 90 公頃，每逢地震、颱風及豪大雨期間，常引發地滑、路基崩壞等災害，造成當地居民生命財產之危害，為一處已久存的地滑區。

松茂地區自動監測站總計設有 3 站，分別設置於台 7 甲上之松茂南區(上松茂)、松茂北區(SW1 集水井)與松茂聚落，本研究選用監測資料最為豐富之 S1 測站作為研究，其自動監測站設置分布資訊如圖 3-3 與表 3-3 所示。

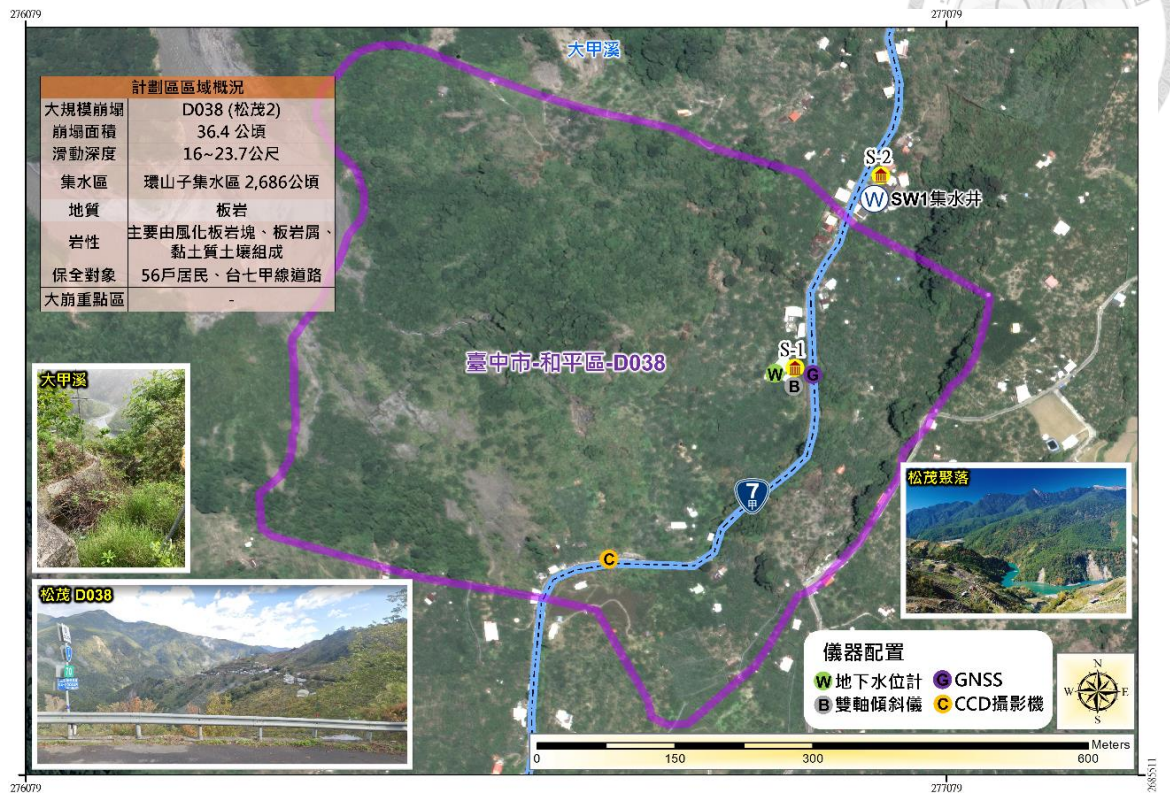


圖 3-3 臺中市-和平區-D038 監測儀器分布圖

(行政院農業委員會水土保持局，2021)

表 3-3 臺中市-和平區-D038 自動監測站資料

大規模崩塌編號	潛勢區地名	面積(公頃)	位置(TWD97)		設站時間	主要滑動面最大深度(公尺)	主要岩層分布
臺中市-和平區-D038	松茂	48.8	276935	2686528	2008~2022 (15 年)	48.1	板岩

3.1.3 新佳陽聚落(臺中市-和平區-T003)

新佳陽地區位於台 8 線 76K~79K 之公路上邊坡，原舊佳陽聚落位於德基水庫對岸的台地上，因興建德基水庫致使舊佳陽聚落被淹沒，於民國 57 年遷村到現址的新佳陽聚落，高程介於 1,750~1,900 公尺，位於一個呈西南—東北走向之山脊的坡腹，地勢由西南向東北遞降，終而沒入大甲溪。

新佳陽地滑區監測範圍約 30 公頃，自動監測站僅有 1 站，設置於聚落上方邊坡，滑動面深度依目前監測結果，最深達地下 13.9 公尺，本研究選用此區域 J-1 測站作為研究，其自動監測站設置分布資訊如圖 3-4 與表 3-4 所示。



圖 3-4 臺中市-和平區-T003 監測儀器分布圖

(行政院農業委員會水土保持局，2021)

表 3-4 臺中市-和平區-T003 自動監測站資料



大規模 崩塌編 號	潛勢 區 地名	面積 (公頃)	位置(TWD97)		設站時間	主要滑動 面最大深 度(公尺)	主要岩層 分布
臺中市- 和平區- T003	新佳 陽	9.1	273188	2682508	2009~2022 (14 年)	13.9	板岩

3.2 梨山地區地質條件介紹

3.2.1 區域地形

大梨山地區大致落於大甲溪上方，因大甲溪沿線由東北往西南，呈現曲流河谷流經梨山坡趾地區，再流進下游德基水庫內，可知梨山地區為德基水庫上游主要水源涵養與保育區域；地形上，此區域位處臺灣中央山脈中心，屬山高、水深之嚴峻山區，自福壽山農場經梨山、松茂至環山一帶，在大甲溪和合歡溪、南湖溪之間，主要岩層為東北-西南向，大致平行大甲溪之平緩山脊區，與周遭山脊成對比。

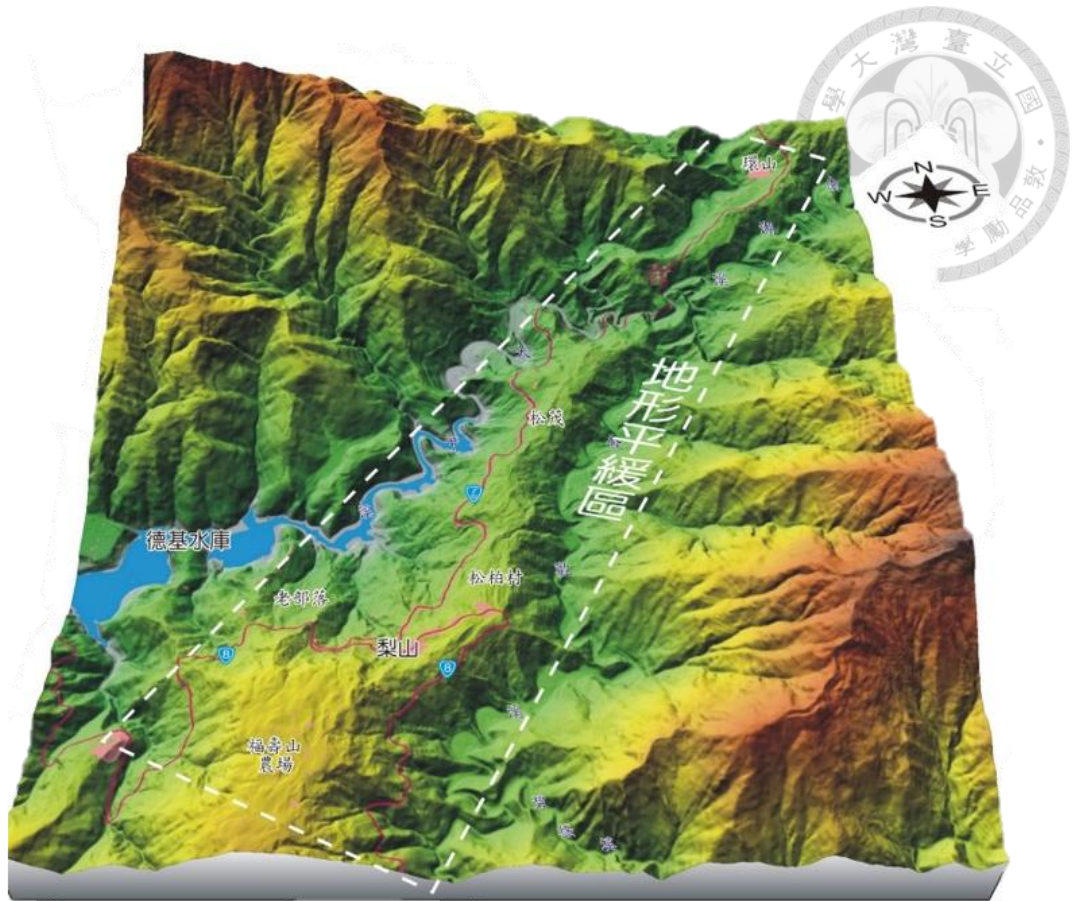


圖 3-5 研究區域(大梨山地區)地形環境

(行政院農業委員會水土保持局，2021)

3.2.2 區域地質

本地區位於中央山脈西翼地質區雪山山脈地質分區及脊樑山脈帶地質分區之交界帶附近，此二地質分區主要以「梨山斷層」構造線為界線。根據中央地質調查所五萬分之一地質圖幅，本地區出露之地層主要包含始新世至漸新世的佳陽層、漸新世至中新世的眉溪砂岩及中新世的廬山層等。主要出露的地質構造為梨山斷層。近年來中央地質調查所出版的地質圖幅中，梨山斷層 有時又稱為眉溪斷層。在本地區的環山至梨山之間，主要沿著大甲溪河谷附近延伸，往西南方向於老部落西側

切過山脊後，離開大甲溪流域進入北港溪上游一帶。

大梨山地區之邊坡坡面目前多屬人為開發，主要涵蓋公路、房舍及果園，地表又多為崩積層覆蓋，地層主要為廬山層組成，岩性以黑灰色板岩及塊狀粉砂質板岩為主，夾泥質粉砂岩、混濁砂岩、薄層細砂岩，大梨山地區區域地質圖如圖 3-6 所示。

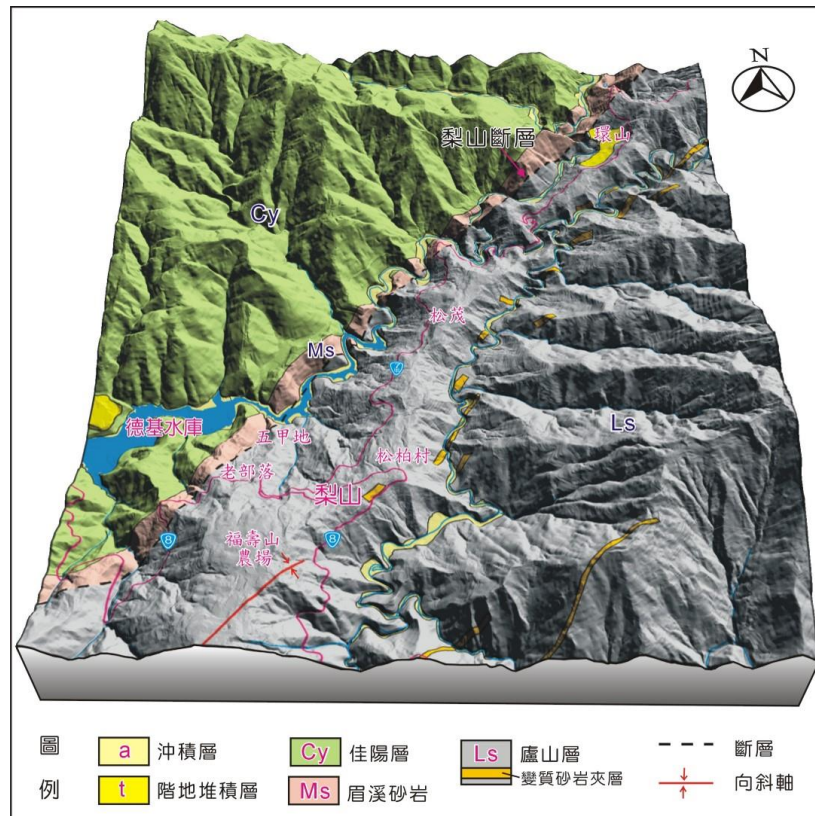


圖 3-6 大梨山地區區域地質圖

(行政院農業委員會水土保持局，2021)

3.2.3 地形分析

台灣工業研究院能資所(1993)在大梨山地區調查地質露頭時，依據其地滑地之地形、地質及滑動現象，以集水區界線劃分為西區、東南區及東北區等三個地滑區域。中華工程顧問工程司(1999)在此區域依據地形條件又額外新增 17 個滑動體，綜觀先前之研究，多以地形界線、地表裂縫、滑動土體範圍等作為地形或地滑地分

區依據，本分析主要由既有崩塌、崩崖地形之發育情形，作為地表及地形演化觀點來探討其可能發生崩塌之趨勢。

前次調查所劃分之崩塌與潛在滑動體，多位於台 8 線附近人口密集聚落，就大梨山地區之古崩崖地形而言，大多位處於福壽山農場崩崖區下方，橫跨梨山崩崖上下區域，比較歷年劃分之地滑區及地質結構組成，可見滑動體表層多為福壽山農場崩崖區的堆積地質結構。

梨山地區古崩崖主要分布於階梯狀之二層地形面之邊緣，上層地形為目前福壽山農場所在之平坦區塊，下層地形則為台 8 線公路附近梨山聚落所在的平坦區。由過去研究資料及地質鑽探之調查報告中可見，大甲溪曾發生回春作用，根據地形分析結果，大甲溪發生回春作用次數不只一次，至少可辨識出兩次明顯之下切現象。

由地形演化角度，大甲溪第一次回春作用後作形成之平坦區，堆積了大量來自邊坡上方之崩塌土體，形成明顯之堆積層，然而大梨山地區已進入新的侵蝕循環；又以地質地形角度而言，大甲溪將持續向源侵蝕尋求平衡，故梨山地區坡趾受大甲溪曲流段流經，受溪水冲刷之自然作用在所難免。

3.2.4 地表地質

大梨山地區出露之岩性地層包含沖積層、崩積層及廬山層板岩等幾種性質，並無明顯地質構造出露，地質特性主要為參考中央地質調查所公布之成果，本區域主要係為板岩覆蓋，底下為新鮮的板岩岩盤，部分山脊突出地表也有新鮮的板岩初露，崩積層主要堆積於台 8 線附近平坦區域，並隨滑動體範圍向下延伸至大甲溪現有河床附近。

第四章 資料與研究方法



4.1 監測資料處理

統計學上最常使用的分析工具為迴歸分析法，其數學式如下表示：

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \varepsilon \dots \dots \dots (4-1)$$

上式中 Y 為觀測值， β_0 與 β_i 為估計之參數， X_i 為任何可能影響 Y 之變數， ε 為實測值與預測值之殘差值，但如果分析的資料本身包含時間因子時，傳統之迴歸方程式 (如 4-1 式)將隱含下列問題 (Pankratz, 1991)：

1. 在時間序列資料中， X_t 變數可能受到過去觀測值 Y_t 的回饋影響。
2. 觀測值 Y_t 不僅受到同一時段之變數 X_t 影響，亦可能與前幾個時段之變數 $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots$ 有關。
3. 其殘差值 ε 可能為自我相關變數，也就是該資料數列中該時段之殘值與前一時段之殘值有關。

4.1.1 時間序列理論

時間序列 (Time series)是指一連串觀測值數列隨時間變動而改變，簡單而言係指某動態系統 (Dynamic System) 隨時間變化，連續觀測所產生所有順序之觀測值集合，以此作為預測變數未來的可能變化之依據。自 1920 年代 Yule 與 Slutsky 兩位學者提出時間序列分析法理論之概念，直到 1970 年代 George E.P.Box 與 Gwilym M.Jenkins 兩位學者提出目前普遍常見的時間序列公式，普遍稱為自迴歸移動平均整合模式 (ARIMA 模式)，目前時間此序列分析法已普遍地應用於自然科學、金融股市分析、公共工程、環境科學及社會科學等領域。

若沿著時間而變化的統計現象或觀測資料係依某一機率結構而改變，則稱此統計現象為隨機過程(Stochastic Process)。時間序列由於考量時間的變動，因此在分析時間序列時，一般均呈隨機過程，即數列對未來無法以一個固然的模型來精確地計算將來所要發生的結果，必須用機率分配之方法來呈現或描述。然而，於大地或土木科學中常見的監測資料常因時間推移而演變，其演變的方式又因地質條件、人為應用等因素不同而呈現出類似結構性變化，本研究選用每小時之降雨量與地下水水位變化即稱之為統計方法中之隨機過程，大多監測站之降雨量與地下水水位之關係又與時間成高度相關，因此適合以時間序列法進行預測。

若時間序列的觀測資料呈現以一固定水準上下振動，序列資料未隨時間呈現增減趨勢，統計學上稱此序列資料為平穩型時間序列 (Stationary Time Series)。對於一平穩型時間序列統計特性之平均值 μ 與變異數 σ^2 將不隨時間而改變。

$$\mu = E(Z_t) \dots\dots\dots(4-2)$$

$$\sigma^2 = E(Z_t - \mu)^2 \dots\dots\dots(4-3)$$

在此條件下，資料序列中任兩個隨機變數 Z_t 與 Z_{t+k} ，時隔 k 個時序之線性關係可用自我互變異數 (Autocovariance)來說明，其數學式如下所示：

$$\gamma_k = Cov(Z_t, Z_{t+k}) = E[(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu)] \dots\dots\dots(4-4)$$

由於自我互變異數為所測度兩隨機變數 Z_t 與 Z_{t+k} 之單位之平方，此法不容易解釋數字大小或序列關聯性，因此定義此一標準測度為自我相關係數 (Autocovariance) 做為標準測度準則檢驗，其數學式如下所示：

$$\rho_k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)}\sqrt{Var(Z_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\sqrt{\gamma_0^2}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \dots\dots\dots(4-5)$$



若使用 ρ_k 對相隔 k 間隔之資料數列，尋找資料序列關聯之圖形，稱此過程為自我相關函數(Autocorrelation Function)，簡稱為 ACF。

一般資料序列中 $Cov(Z_t, Z_{t+k}) = Cov(Z_{t+k}, Z_t) = Cov(Z_t, Z_{t-k})$ ，故所有整數值 k 之 $\rho_k = \rho_{-k}$ ，解釋了時間序列分析時只要繪製 $k > 0$ 之 ρ_k ，即可顯現相隔 k 個間格隨機變數間之線性相依性。

4.1.2 平穩型時間序列

4.1.2.1 自回歸過程(Autoregressive Process)

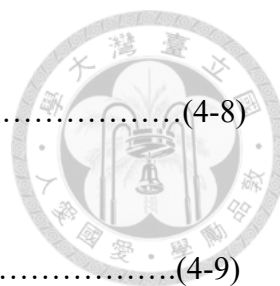
假設資料序列分析之隨機過程中各觀測值 Z_t 可以表示成許多互相獨立且具有相同機率分配之線性組合。

$$\begin{aligned} Z_t &= \mu + \Psi_0 a_t + \Psi_1 a_{t-1} + \dots \\ &= \mu + \sum_{j=0}^{\infty} \Psi_j a_{t-j} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

上式(4-6)中 μ 為平均水準， Ψ_i 為固定之參數值， a_i 為干擾項，其期望值為 0，變異數為 σ^2 之常態分配之隨機變數，此隨機變數稱為白色干擾過程(White Noise Process)。由(4-6) 式中，可知觀測值可作為其干擾項與過去之干擾項來表示。利用一連串公式運算可導出以下數學式：

$$Z_t = C + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + a_t \quad \dots\dots\dots(4-7)$$

上式可解釋成觀測值 Z_t 於該序列之干擾項及過去所有觀測值所表示之結果，因此式(4-7) 稱為自我迴歸過程(Autoregressive Process)。若當 $i > p$ 時，令 $\phi_i = 0$ ，則稱此為 p 階自我迴歸過程，記為 $AR(p)$ 。今加入一後移運算子 B 定義為：



$$B^i a_t = a_{t-i} \dots\dots\dots (4-8)$$

則(4-7) 式可簡寫為：

$$\phi_p(B)Z_t = C + a_t \dots\dots\dots (4-9)$$

$$\text{其中 } \phi_p(B) = 1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$$

4.1.2.2 移動平均過程(Moving Average Process)

任何資料序列之線性過程均可用(4-6) 式表示，但理論上在(4-6) 式中之干擾項應有無限多項，然而事實上，越往後面，其資料數列之權重比越接近零。因此在實務使用層面，多僅討論針對前 q 個非零之參數。如此當 $j > q$ 時，若 $\Psi_j = 0$ ，則(4-6) 式將變為：

$$Z_t = \mu + a_t + \Psi_1 a_{t-1} + \Psi_2 a_{t-2} + \dots + \Psi_q a_{t-q} \dots\dots\dots (4-10)$$

為區別移動平均值與 (4-6)式之不同，將 (4-10)式之係數以 $-\theta$ 代之

$$Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \dots\dots\dots (4-11)$$

(4-11)式稱為資料序列 q 階之移動平均過程(Moving Average Process of Order q)，稱為 MA(q)，表示其干擾項會持續影響 $t+1, t+2, \dots, t+q$ 等時間間隔後才消失，運用後移運算概念因子，其(4-11) 式可簡化為：

$$Z_t = \mu + \theta_q(B) + a_t \dots\dots\dots (4-12)$$

$$\text{其中 } \theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)$$

對一筆監測資料之真實性時間序列，常無法簡單地劃定該數列是屬於 AR 項或是屬於 MA 項，所以同時包含兩者將更能貼近實際觀測情形，故稱此模式為(p,q) 階混合自我迴歸與移動平均過程(Mixed Autoregressive-Moving Average Process of



Order (p,q))，簡稱 ARMA 模式，其數學式為：

$$Z_t = C + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \dots \dots \dots (4-13)$$

$$\text{或 } \phi_p(B)Z_t = C + \theta_q(B)a_t$$

假設 AR(p)過程可以由 p 個非零的自我相關函數來解釋，其中 ϕ_{kj} 為 k 階自我迴歸過程之第 j 個係數，故知 ϕ_{kk} 為最後一個係數，其定義表示方式如下：

$$\phi_{kk} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-2} & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{k-3} & \rho_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots & \rho_1 & \rho_k \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots & 1 \end{vmatrix}} \dots \dots \dots (4-14)$$

若將 ϕ_{kk} 當作時間間隔 k 之函數，則稱為偏自我相關函數 (Partial Autocorrelation Function)。在白噪音干擾過程 (White Noise Assessment) 的預定假設條件下， ϕ_{kk} 之變異數 $\text{Var}(\phi_{kk})$ ，漸進 $\frac{1}{n}$ 。故在 95% 的信賴區間下，若 ϕ_{kk} 介於 $\pm 2/\sqrt{n}$ 之間，則其值不顯著，意即接受 $\phi_{kk} = 0$ 之假設。

4.1.3 無定向型時間序列 (Nonstationary Time Series)

ARMA 模式對穩定型時間資料序列有很好的解釋能力，但實務應用上，仍存在非常多的資料序列之不穩定趨勢，常具有向上遞增或向下遞減的趨勢。此時，這些時間序列的走勢，明顯不符合穩定型序列分析過程的條件。因此對於具趨勢型時



間數列，差分(difference)是使其期望值穩定之基本方法，也是資料處理第一個步驟。

差分運算子(Difference Operator) 數學式定義為以下所示：

$$\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1} = (1-B)Z_t \dots\dots\dots(4-15)$$

對一無定向型時間序列模式，假設原始數列採第 d 次差分(d>0)後可變為平穩型數列，則可以 ARMA 模式來表示之，如此之模式稱之為(p,d,q)階整合之自我迴歸移動平均模式 (Autoregressive Integrated Moving Average Model of Order (p,d,q))，或簡稱為 ARIMA(p,d,q)，其中 p 表示自我迴歸過程之階數，d 為差分次數，q 表示為移動平均過程之階數，ARIMA(p,d,q)模式可用以下數學式(4-16)表示：

$$\phi_p(B)\nabla^d(Z_t - \mu) = \theta_q(B)a_t \dots\dots\dots(4-16)$$

4.2 模式建立方法

4.2.1 模式鑑定

本節所提係說明如何判定 ARIMA 模式中 p,d,q 三個非負整數，其判定可採用自我相關函數(Autocorrelation Function，簡稱 ACF)及偏自我相關函數(Partial Autocorrelation Function，簡稱 PACF)為依據，參數選取準則詳如下表。

表 4-1 時間統計序列之參數選取準則

ACF 與 PACF 之圖形	選擇模式
ACF 與 PACF 皆無突起發生	解釋為無合適之參數
ACF 呈漸漸消失，而 PACF 在 lag1, 2, ..., p 時有突起，隨後消失	AR 型 $\phi_p(B)=1-\phi_1B-\dots-\phi_pB^p$



PACF 呈漸漸消失，而 ACF 在 lag1, 2, ..., p 時有突起，隨後消失	MA 型 $\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$
ACF 在 lag1, 2, ..., p 時有突起，隨後消失； PACF 在 lag1, 2, ..., q 時有突起，隨後消失	$\phi_p(B)$ 或 $\theta_q(B)$ 。 若 PACF 比 ACF 早消失，則選 $\phi_p(B)$ ，反之則選擇 $\theta_q(B)$ ；若同時消失，則可任選 $\phi_p(B)$ 或 $\theta_q(B)$ 放入式內，再檢定何者較合適
ACF 與 PACF 兩者皆呈指數下降	同時包括 $\phi_p(B)$ 與 $\theta_q(B)$

(資料來源, Bowerman, 1994)

4.2.2 延伸自我相關函數(Extended Autocorrelation Function)

從時間數列之資料數據分析時，參數選取準則可清楚知道自我相關函數(ACF)對建立模式之移動平均過程(MA)的階次有顯著影響，而偏自我相關函數(PACF)對建立模式自我回歸過程(AR)的階次亦是如此；現今於金融、股市領域上常見的 ARIMA 模型都已有固定型式及分析流程，常用來分析的 AR(p)與 MA(q)的階次不超過 2；但是對於大地或土木科學領域而言，監測資料序列常隨時間遞移而呈現趨勢性變化，而本研究中地下水的變動趨勢亦屬於混合型 ARMA，其 ACF 與 PACF 均出現了逐漸交錯的型態，因此 p 與 q 的階次很難認定；Tsay 與 Tiao (1984) 提出了一種建立混合平穩型與無定向型 ARMA 模式建立的簡單方法，此方法利用重複的自我迴歸來產生混合 ARMA 模式自我迴歸係數的多次估計，於每次自我迴歸適合度計算殘差數列的自我相關參數，其自我相關函數的一部分稱為延伸自我相關函數(Extended Autocorrelation Function，簡稱 EACF)，此方法用來對混合的



ARMA(p,q)模式中最大的 p,q 次數提供有用的訊息。其定義如下 (蔡屹彥, 2004) :

$$Y_t^{(j)} = X_t - \sum_{i=1}^m \widehat{\varphi}_i^{(j)} X_{t-i} \dots \dots \dots (4-17)$$

其中, $\{X_t\}$ 表示為一 ARMA(p,q) 資料序列, $\widehat{\varphi}_i^{(j)}$ 表示 AR(m) 經過第 j 次遞迴歸後, 期差 i 的回歸係數估計總值。而 $\widehat{\rho}_j^{(m)}$ 被定義為 $\{Y_t^{(j)}\}$ 樣本自我相關函數值。在資料數列中, 其真實階次為 p 和 q 的情況下, 當 $j=q, q+1, q+2, \dots$, $\{Y_t^{(j)}\}$ 會是一個 MA(q) 的模式, 同時 Tsay 與 Tiao(1984) 也證明了 $\widehat{\rho}_j^{(m)}$ 會滿足下列函數性質:

$$\text{在 } p \text{ 已知情況下 } \begin{cases} \rho_{q(p)} \neq 0 \\ \rho_{j(p)} = 0, j = q + 1, q + 2 \dots \dots \end{cases}$$

$$\text{在 } p \text{ 未知的情況下 } \begin{cases} \rho_{j(m)} \xrightarrow{p} 0, 0 \leq m - p < j - q \\ \rho_{j(m)} \xrightarrow{p} c(m - p, j - q), 0 \leq j - q \leq m - p \end{cases}$$

而資料數列中, 延伸自我相關函數所產生的舉陣列, 是將所求得 $\widehat{\rho}_j^{(m)}$ 函數, 放入表格中的 $(m+1, j)$ 的矩陣列位置, 其中 $m=0, 1, 2, \dots$, $j=1, 2, \dots$ 。此方法常為利用交會點矩陣列之位置選擇模式參數- ARMA(p,q), 且矩陣表格具下列特性:

表 4-2 延伸自我相關函數表格

$m \backslash j$	.....	q	q+1	q+2	q+3	.....
.		.	.	.	.	
.		.	.	.	.	
p-1	.....	X	X	X	X	.....
p	.....	X	0	0	0	.....
p+1	.....	X	X	0	0	.....
p+2	.....	X	X	X	0	.....
.		.	.	.	.	

為幫助資料數列使用延伸樣本自我相關函數特徵之 ARMA(p, q)模式的選擇，常常會需使用到 $\widehat{p_j^{(m)}}$ 之遞進分配。為延伸資料之自我相關函數表格共 $(m \times j)$ 中，從元素矩陣中選擇代表參數，常用遞迴迴歸方式求得迴歸參數、殘差及樣本自我相關係數，最後再將殘差值導入時間序列模式中反覆求得合適的 AR 參數估計值，此法也較其他的序列或圖形特徵辨識法較為複雜，延伸自我相關函數法的序列處理過程需複雜的計算及參數之擇定。但此應用方法有二特點：(1)時間序列模型 ARMA(p, q) 模式的遞進延伸自我相關函數矩陣表，其中若包含 0 的區域位置，應落在 (p, q) 點上。(2)表格中的參數 0，係表示該參數落在二個標準差內，X 則表示落在二倍標準差外。

4.2.3 模式檢定方法

當蒐集之資料數列擇定模式的 p, d, q 參數值後，一般常以最大涵蓋函數 (Maxima Likelihood Function) 推估各資料序列之參數最佳概估值。對此稱為暫定模式，再來須利用各種檢定或輔助辨別方法來協助判斷，此暫定或模擬之數據是否適合此模式，其中最可靠且常見之方法係模擬計算資料數列殘差，及其樣本自我相關函數或參數，常見的檢驗方法包含以下兩種：

1. $\gamma_k(\hat{a}_t)$ 之變異係數

若 ARIMA 模式之估計函數值為合適，則殘差項之 a_t 自我相關係數及 γ_k 應

為不相關且近似為序列之常態分配，平均值應為 0，且標準差應為 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ，由此可

逐一檢視 $\gamma_k(\hat{a})$ 是否超過 $\frac{2}{\sqrt{n}}$ 值，並輔以判定 $\gamma_k(\hat{a})$ 是否通過白噪音數列檢定。



2. 整體 X^2 準則(Q 統計量)

當資料序列有大量的觀察值，且其數列之假設殘差項 a_t 為獨立的常態分佈時，則可定義該序列 Q 之統計量為以下：

$$Q = n \sum_{i=1}^k \gamma^2(\hat{a}_t) \dots \dots \dots (4-18)$$

上式中 Q 之統計量近似於序列自由度為 $k-p-q$ 的 χ^2 分配，其中 n 為實際 $\{\hat{a}_t\}$ 個數， k 則該序列之計算自我相關函數值之總數。若統計量 Q 值小於 $\chi^2(k-p-q)$ ，則表示該序列所選的模式為合適且恰當；反之，則該模式則須重新修正，擇定適合之參數值。

4.2.4 模式之選用準則

對一資料序列擇定 ARIMA 模式來說，若同時有多個模式及其參數符合上述之檢定，則必須注意到模式之過度配適(overfitting) 風險。若模式之過度配適情形發生於：(1) 資料序列模式為 $Y_t = b + ct + a_t$ ，所產生之十筆資料配以一階次為 9 之多項式，則此序列多項式配適情形非常好，倘若應用此 9 階多項式去模擬未來變化時，有可能會發生方向完全相反或極大誤差之結果。在考量模式精簡同時，應利用 Akaike 於 1973 年介紹的一種模式檢定與判定準則，此準則則是現今常用的 AIC (Akaike's Information Criterion)，其定義概述如下：

$$AIC = n(\ln \sigma^2) + 2M \dots \dots \dots (4-19)$$

上式(4-19)中，其 n 值表示該模式所含有效觀測總數， M 則為模式中參數的影響因子，當此當模式最適階次被選取，則 M 為 q 與 p 函數，使得 $AIC(M)$ 為最小。



4.2.5 轉換函數模式

上述提及之單變數 ARIMA 檢定模式，僅針對資料序列中的變數本身觀察，極其序列資料的走勢作為推測。本節利用動態模式(Dynamic Model) 來說明，當資料序列投入(input) 變數 X 與產出(output) 變數 Y 間之相關性。當使用動態模式說明變數 X 發生變化時，其常會將有多少傳送到 Y 的情形，稱為 X 與 Y 間之間的轉換函數(Transfer Function)。

4.2.5.1 二元交叉相關函數分析

當兩筆資料序列或觀測數據的時間數列關係，可使用二元交叉相關函數(Cross correlation function，簡稱 CCF) 判定之。倘若 $\{X_t\}$ 與 $\{Y_t\}$ 為二筆資料數列之時間

軸，其平均值為 μ_x 、 μ_y ，變異數為 σ_x^2 、 σ_y^2 ，則其可解釋為：

1.當序列中， $\{X_t\}$ 與 $\{Y_t\}$ 相隔固定為 k 個時差時，其序列之自變異數為：

$$\gamma_{xx}(k) = E[(X_t - \mu_x)(X_{t+k} - \mu_x)] = E[(X_t - \mu_x)(X_{t-k} - \mu_x)] \dots\dots\dots(4-20)$$

$$\gamma_{yy}(k) = E[(Y_t - \mu_y)(Y_{t+k} - \mu_y)] = E[(Y_t - \mu_y)(Y_{t-k} - \mu_y)] \dots\dots\dots(4-21)$$

2.當序列中， $\{X_t\}$ 與 $\{Y_t\}$ 相隔固定 k 個時差時，其序列之交叉互變異數為：

$$\gamma_{xy}(k) = E[(X_t - \mu_x)(Y_{t+k} - \mu_y)]，k=0,1,2, \dots\dots\dots(4-22)$$

3.當序列中， $\{Y_t\}$ 與 $\{X_t\}$ 相隔固定 k 個時差時，其序列之交叉互變異數為：

$$\gamma_{yx}(k) = E[(Y_t - \mu_y)(X_{t+k} - \mu_x)]，k=0,1,2, \dots\dots\dots(4-23)$$

一般序列中，其間格 $\gamma_{xy}(k) \neq \gamma_{yx}(k)$ ，乃歸因於：

$$\gamma_{xy}(k) = E[(X_{t-k} - \mu_x)(Y_t - \mu_y)] = E[(Y_t - \mu_y)(X_{t-k} - \mu_x)] = \gamma_{yx}(-k)$$



故僅需定義為 $\gamma_{xy}(k)$ ， $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 即可，而 $\{\gamma_{xy}(k), k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ，

又簡稱為該序列之二元隨機過程的序列交叉互變異函數。

4. 當序列中， $\{X_t\}$ 與 $\{Y_t\}$ 相隔固定 k 個時差時，其序列之交叉相關係數定義為：

$$\rho_{xy}(k) = \gamma_{xy}(k) / \sigma_x \sigma_y, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4-24)$$

上式 $\{\rho_{xy}(k), k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ，可簡稱為該序列之二元隨機過程之交叉相關函數。

若 $\{X_t\}$ 與 $\{Y_t\}$ 數列中， $t = 1, 2, \dots, n$ 兩組時間數列軸，其固定相隔時差為 k ，則該資

料續料之樣本的交叉相關係數定義，可簡述以下：

$$S\gamma_{xy}(k) = C_{xy}(k) / [C_{xx}(0)C_{yy}(0)]^{1/2}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4-25)$$

$$\text{式中 } C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(Y_{t+k} - \bar{Y}), k = 0, 1, 2, \dots \quad (4-26)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n+k} (Y_t - \bar{Y})(X_{t-k} - \bar{X}), k = 0, -1, -2, \dots \quad (4-27)$$

且 $\bar{X}, \bar{Y}$ 為數列 X, Y 之平均值，又 $S_x = [C_{xx}(0)]^{1/2}$ 、 $S_y = [C_{yy}(0)]^{1/2}$ ，故可得下

$$\text{式 } S\gamma_{xy}(k) = C_{xy}(k) / S_x S_y, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4-28)$$

若兩組資料數列中，間隔相互獨立，且其交叉相關函數 $\{S\gamma_{xy}(k), k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$

期望值為零，標準誤差又為 $1/\sqrt{n}$ 。若 $|S\gamma_{xy}(k)| > 2/\sqrt{n}$ (2 倍的標準誤差)，則 $\{Y_t\}$

影響 $\{X_t\}$ 之間隔為 k ，即 $\{Y_t\}$ 影響 $\{X_t\}$ 之稽延時差稱為 k 。本研究，視各監測站之觀測降雨量視為 $\{X_t\}$ 、地下水位變化視為 $\{Y_t\}$ ，其交叉相關係數於時差 k 時大於 2 倍標準誤差，則表示降雨量數列需稽延 k 個固定間隔後，才會影響到地下水位之變化。

4.2.5.2 轉換函數之基本概念

轉換函數模式可將資料序列之 Y_t 分為兩個部份討論，由 X_t 解釋的部分 U_t 及干擾項部分 N_t ，目前常用的數學式概述如下。

$$Y_t = U_t + N_t \dots\dots\dots(4-29)$$

若 $U_t = \nu(B)X_t$ 代入(4-29) 式

$$Y_t = \nu(B)X_t + N_t \dots\dots\dots(3-30)$$

上述中的權數 $\nu(B)$ ，可視為各時期 X_t 對資料序列的衝擊反應 (Impulse Response)。

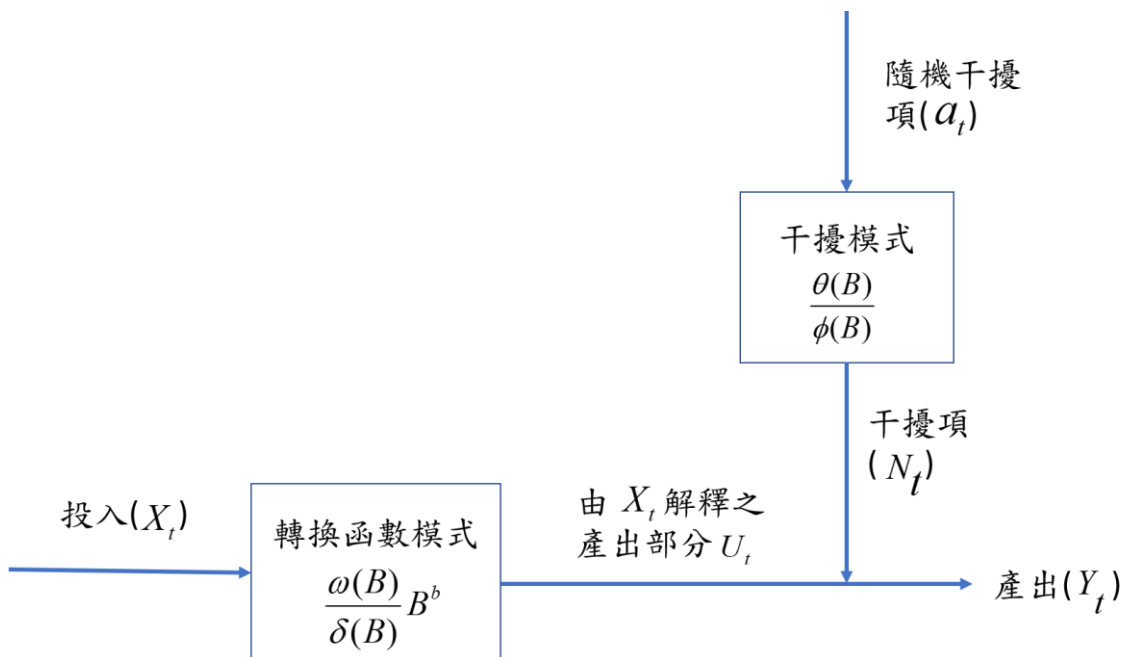


圖 4-1 轉換函數模式概略圖(林茂文，2003)



一般而言，轉換函數及模式分析概念可由圖 4-1 解釋之，隨著投入變數 X_t 及隨機干擾項 a_t 互相影響，又經過轉換函數 $\frac{\omega(B)}{\delta(B)} B^b$ 與干擾模式 $\frac{\theta(B)}{\phi(B)}$ ，後形成的 X_t 對資料數列產出部分 U_t 及干擾項 N_t ，共同影響而得。

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_{t-b} + \frac{\theta(B)}{\phi(B)} a_t \dots\dots\dots(4-31)$$

令 $v(B) = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} B^b$ 稱為模式參數(r,s,b)階之轉換函數，其包括：

- (1) $\delta(B)$ 為資料序列 r 階地自迴歸運算因子。
- (2) $\omega(B)$ 為資料序列 s 階地移動平均運算因子。
- (3) b 則為資料續料之落後時差。

比較(4-30)及(4-31)式後可得：

$$\begin{aligned} & (v_0 + v_1 B^1 + \dots)(1 - \delta_1 B^1 - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r) \\ & = (\omega_0 - \omega_1 B^1 - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s) \dots\dots\dots(4-32) \end{aligned}$$

展開上(4-32)式，並比較其參數與函數後可知：

$$\begin{aligned} v_j &= 0 & j < b \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \dots + \delta_r v_{j-r} + \omega_0 & j = b \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \dots + \delta_r v_{j-r} + \omega_{s-b} & j = b+1, b+2, \dots, b+s \\ v_j &= \delta_1 v_{j-1} + \dots + \delta_r v_{j-r} & j > b+s \dots\dots\dots(4-33) \end{aligned}$$



4.2.5.3 轉換函數之模式鑑定方法

如資料續料之單變數中時間序列模式以 ACF 作為模式參數鑑定，其資料數列之轉換函數又應用交叉相關函數(Cross Correlation Function，簡稱 CCF) 作為決定其變數與觀察值間是否有互有領先、延遲現象或遲滯情形發生，檢定流程概述如下：

1. 將 X_t 與 Y_t 預先白噪音化 (Pre-Whitened Noise Assessment)，消除資料數列中各變數間的干擾值及非相關性。

$$\alpha_t = \frac{\phi_x(B)}{\theta_x(B)} X_t, \beta_t = \frac{\phi_y(B)}{\theta_y(B)} Y_t \dots\dots\dots(4-34)$$

2. 計算資料序列 α 與 β 的交叉函數，用以估計其衝擊反應函數

$$\hat{v}_k = \frac{\hat{\sigma}_\beta}{\hat{\sigma}_\alpha} \hat{\sigma}_\alpha \beta(k) \dots\dots\dots(4-35)$$

3. 利用 $\hat{v}_k$ 和理論 v_k 圖形相互比較，決定模型中較為合適之 $\omega(B)/\delta(B)$ 之落後差 b 值、s 及 r 值。

4. 檢驗資料序列中的殘差項是否符合白噪音檢定，若否則將殘差項取 ARIMA 模型之干擾項。

$$N_t = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} a_t \dots\dots\dots(4-36)$$

4. 重新認定資料序列並估計其最終參數，以建立合適之 ARIMA 模式。



4.2.5.4 角落檢定方法(Corner Assessment Methodology)

過往各領域使用時間序列分析時，用來判別轉換函數與模式參數落後數時，僅僅仰賴交叉相關函數圖型是否有誤；現今進行資料序列分析時，大多是使用 Liue 與 Hanssens 在 1982 年提出之角落分析方法，來判定模式中轉換函數之(r,s,b)階級參數是否合適該模式及其資料序列，其判別方式如圖 4-2 概述之。

(i, j)	1	2	...	$r-1$	r	$r+1$	$r+2$	...
0	0	0	...	0	0	0	0	...
1	0	0	...	0	0	0	0	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...
$b-1$	0	0	...	0	0	0	0	...
b	X	X	...	X	X	X	X	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...
$s+b$	X	X	...	X	X	X	X	...
$s+b+1$	*	*	...	*	X	0	0	...
$s+b+2$	*	*	...	*	X	0	0	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...

圖 4-2 角落檢定法判別方式

4.3 建立 ARIMA 模型輔助警戒管理運作

4.3.1 ARIMA 與轉換函數之建立

為提供行政院農業委員會水土保持局臺中分局作為大規模崩塌潛勢區地下水位預警輔助工具，本研究考量當地人口數目、監測資料年限等，擇定臺中市和平區三處大規模崩塌潛勢區之代表測站(D038-S1 站、D050-B1 站及 T003-J1 站)，模式投入(input)水文資料係以 3 處監測站一小時降雨量及一小時地下水位資料為基



礎。事件資料選用近年來之代表性降雨事件，三處測站模型均用 2009 年莫拉克颱風作為訓練，並針對不同測站選定其代表性降雨事件作為模型驗證，共計挑選 2015 年杜鵑颱風、蘇迪勒颱風、2016 年梅姬颱風及 2017 六月連續豪雨等雨量事件作為訓練，由於各測站除 2009 年莫拉克颱風之外，對於其它降雨事件之降雨及地下水位相關性不同，故本研究根據歷史水文數據中，地下水水位最高或 24 小時累積最大雨量之事件，分別建立三個 ARIMA 模型。其建構 ARIMA 模型可分成以下 7 個步驟，詳細建置流程如圖 4-3 所示：

1. 取得 3 處監測站之原始降雨量及地下水位觀測資料。
2. 使用原始地下水位資料，繪製地下水位與時間之自我相關函數(ACF)圖形及偏自我相關函數(PACF)圖形。
3. 依據白噪音檢定與單根檢定，確認時間序列是否為平穩型，若仍為無定型時間數列，以差分之方式使其時間序列成為平穩型。
4. 由延伸自我相關函數(EACF)找出 3 處測站模型中地下水位合理的(p,d,q)參數，再藉由模型檢驗找出最適合之(p,d,q)參數，如表 4-1 所示。
5. 以轉換函數的建構方法，求得降雨及地下水位間之合理(r,s,b)階轉換函數。
6. 將模型建構完成，分別使用挑選之代表性降雨事件作為驗證，並採用平均絕對百分比誤差(MAPE)以及均分跟誤差(RMSE)評估預測模型之良窳，若不吻合則繼續找尋其餘合適之(r,s,b)階轉換函數，如表 4-2 所示。
7. 確認各站 ARIMA 模型完成後，結合邊坡分析軟體(Galena)得知的地下水位臨界值作為輔助行政院農業委員會水土保持局發布該大規模崩塌地地

下水水位警戒依據。

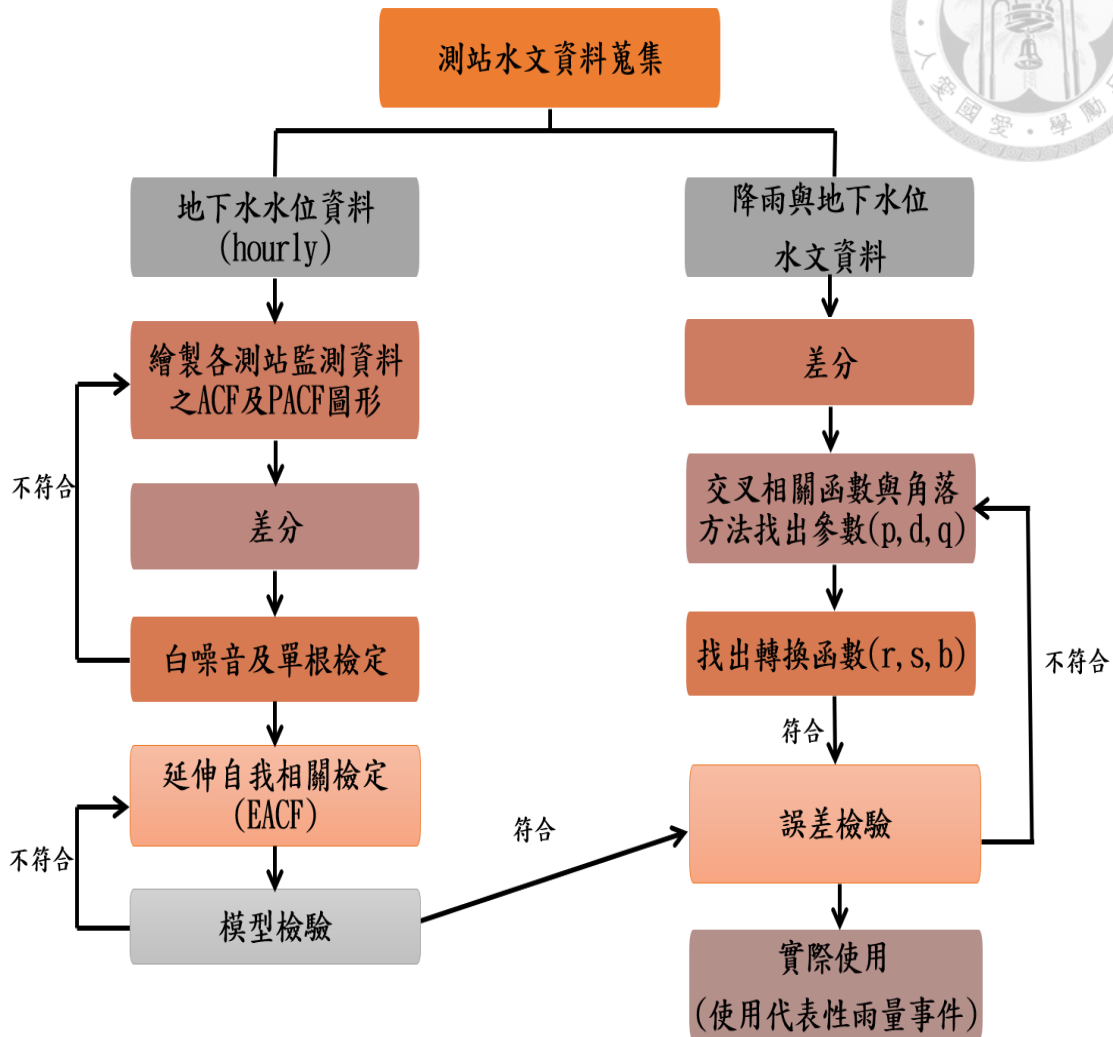


圖 4-3 ARIMA 模型建置流程

4.3.2 大規模崩塌潛勢區管理基準值

在傳統崩塌地管理基準值評估上，首要考量的課題為使用何種物理量來定義警戒值之標準，常見的因子包含降雨強度、降雨量分布或有效累積降雨量作為警戒之依據，又因各崩塌地之地文、水文及地質組成等條件不同，其崩塌機制也有所不同，因此崩塌管理基準值應針對該研究區域之崩塌機制不同而調整。藉由長時間觀測之成果，或歷經颱風或豪大雨事件之後，搭配邊坡穩定分析軟體檢討警戒管理值

之合宜性，並將 ARIMA 模型的模擬結果與實際監測資料之變化趨勢進行比對，作為各測站 ARIMA 模型修正參考依據，進而得到更貼近實地且合理的崩塌管理基準值。

依據各崩塌地調查及觀測成果，應用適當理論或模式初步建置崩塌地之管理基準值，供後續應變機制修正參考，本研究使用行政院農業委員會水土保持局根據現地鑽探資料與研究區域內自動觀測站之歷史資料，所提出之地下水水位警戒基準值為基準，其警戒值係透過崩塌地綜合邊坡穩定分析軟體(Galena)建立之基準值，包含該崩塌地的雨量與地下水位臨界值，倘本研究選擇大梨山地區三處監測站歷年均無發生大規模災害，其地下水位基準值之訂定，主要仰賴監測站地下水位的歷史高點進行之邊坡分析而得之臨界值，安全係數亦最為保守；因無觀測到崩塌地之破壞滑動面，故考量崩塌地本身之地形與地層弱面進行繪製，擇其安全係數最低與滑動面深度最深之破壞面作為假設滑動面，將歷史觀測之地下水位最高點設為安全係數 0.99，再反推模擬各階段(正常、待命、注意與警界)對應之地下水位。

4.3.3 ARIMA 模型輔助地下水位警戒發布

一般而言，使用時間序列 ARIMA 模型作為地下水水位研究係以統計分析之相對簡單方法，使用研究測站過去代表性降雨事件訓練模型，再將選擇其它代表性降雨事件，驗證該測站 ARIMA 模型所預測之地下水位變化是否與監測結果相近；然而，臺灣山區地下水位變化往往涉及地形、地質、土地利用或工程介入等因子影響，且監測孔位是否能有效掌握地下水層及其變化更是眾說紛紜，本研究係為協助水土保持局發布大規模崩塌潛勢區域內地下水位警界發布，著重於預測模型是否能



模擬地下水位接近警戒臨界值，為使模擬成果可以更貼近實際變化趨勢，本研究針對擇定之三處監測站建置各別之 ARIMA 模型並擇定其各別之參數，減少不同監測站之間不同外在影響因子之干擾，首先利用 2009 年莫拉克颱風每小時之雨量及地下水位資料序列進行三處監測站訓練，選用各監測站歷年來代表性的極端降雨事件，將其每小時的雨量及地下水位資料序列投入模型，求得合適之模型轉換參數與函數，再配合各個研究區域水保局透過鑽探資料及邊坡穩定分析所求得之崩塌臨界值，輔助決策者發布地下水位警戒值之參考依據，詳細流程如圖 4-4 所示。

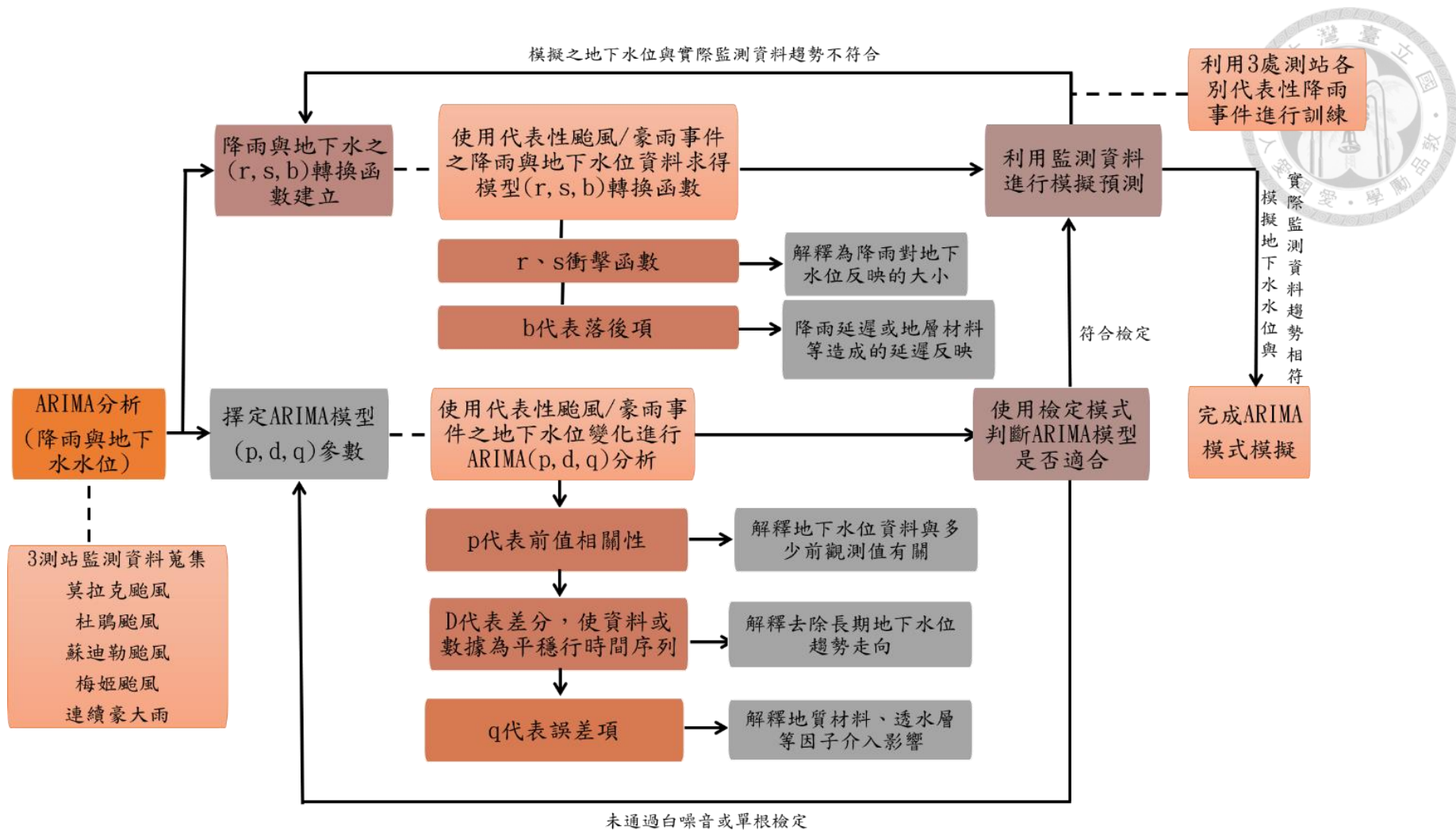


圖 4-4 本研究 ARIMA 資料選用及建置流程

第五章 結果與討論



依據 4.3 節研究方法，擇定大梨山地區三個重要聚落之大規模崩塌潛勢區域之三個監測站作為研究區域，分別將其測站 2009 年莫拉克颱風每小時降雨量及地下水位資料作為 ARIMA 模型訓練依據，再利用各別測站歷年監測資料中之極端降雨事件資料作為模型函數與參數驗證，以建立三個大規模崩塌區之 ARIMA 模型與其轉換函數，作為水保局發布該區域地下水位警戒基準值之參考依據與輔助工具；由於 ARIMA 模型係屬於統計分析方法一環，無法同時考量資料序列之外的其它影響因子，如地質結構、土地利用、工程干擾或其他人為因子，因此為了評估模型是否適用於現地水文、地文條件，本研究針對各監測站之地下水水位資料序列建立驗證圖，確立各 ARIMA 模型之轉換函數與參數適用於該站未來防災預警工作之參考，故模擬結果須同時滿足(1)與實際觀測值變化趨勢相近。(2) 能有效模擬地下水位到達峰值的時間與高度。(3) 不受降雨型態不同，而導致模擬結果無法滿足以上兩個條件，其研究結果與討論如下各節分別敘述之。

5.1 建立 ARIMA 模型輔助警戒管理運作

5.1.1 梨山精華區 A1 自動監測站(臺中市-和平區-D050)

梨山精華區 A1 自動監測站模型轉換函數與 ARIMA 模型訓練樣本係利用該測站歷年當日最大累積降雨量事件莫拉克颱風(2009 年)之每小時降雨量與地下水位變化之歷史監測資料序列。另選用另外兩場極端降雨事件之每小時雨量及地下水位變化資料作為轉換函數之驗證，分別為帶來次高之日累積雨

量(213.5mm)之梅姬颱風(2016 年)及造成該測站最高地下水水位(-11.4m)之 2017 年六月豪雨事件，其莫拉克颱風與其極端降雨事件之 ARIMA 合適的模式參數(p,d,q)為(1,2,3)、轉換函數(r,s,b)為(3,2,1)，其監測站歷年極端降雨事件及其 ARIMA 模擬地下水位變化結果與觀測值結果呈現如圖 5-4、5-5 及 5-6 所示。

由 S1 自動監測站 ARIMA 模擬結果可見其模擬之地下水位與實際觀測值變化趨勢相近，利用梅姬颱風進行模擬驗證時，可以發現實際觀測值與模擬地下水位有些微差距，但整體變化趨勢及地下水位到達高峰值時間及水位高度非常接近，於颱風時期對於輔助決策有正面幫助；利用 2017 年 6 月連續豪雨事件驗證時，可見得模擬地下水位值與實際觀測值之整體變化趨勢相較梅姬颱風較不接近，特別是當觀測地下水位下降時，模擬值無明顯變化，反而隨著降雨量累積，模擬地下水位相較觀測值高出許多，研判可能是因為降雨型態不同導致模擬失真之情形，但地下水位到達第一波之高峰值時間仍有辦法成功模擬，同樣有助於警界發布決策管理單位預先執行情資研判工作，且選用之極端降雨事件間無新設集水井或其他可能影響地下水位變化工程構造物，因此人為影響因子對此站地下水位影響甚低，模擬成果也更適用於防災應變需求，故此模型研判係可作為大規模崩塌區崩塌預警之參考依據。

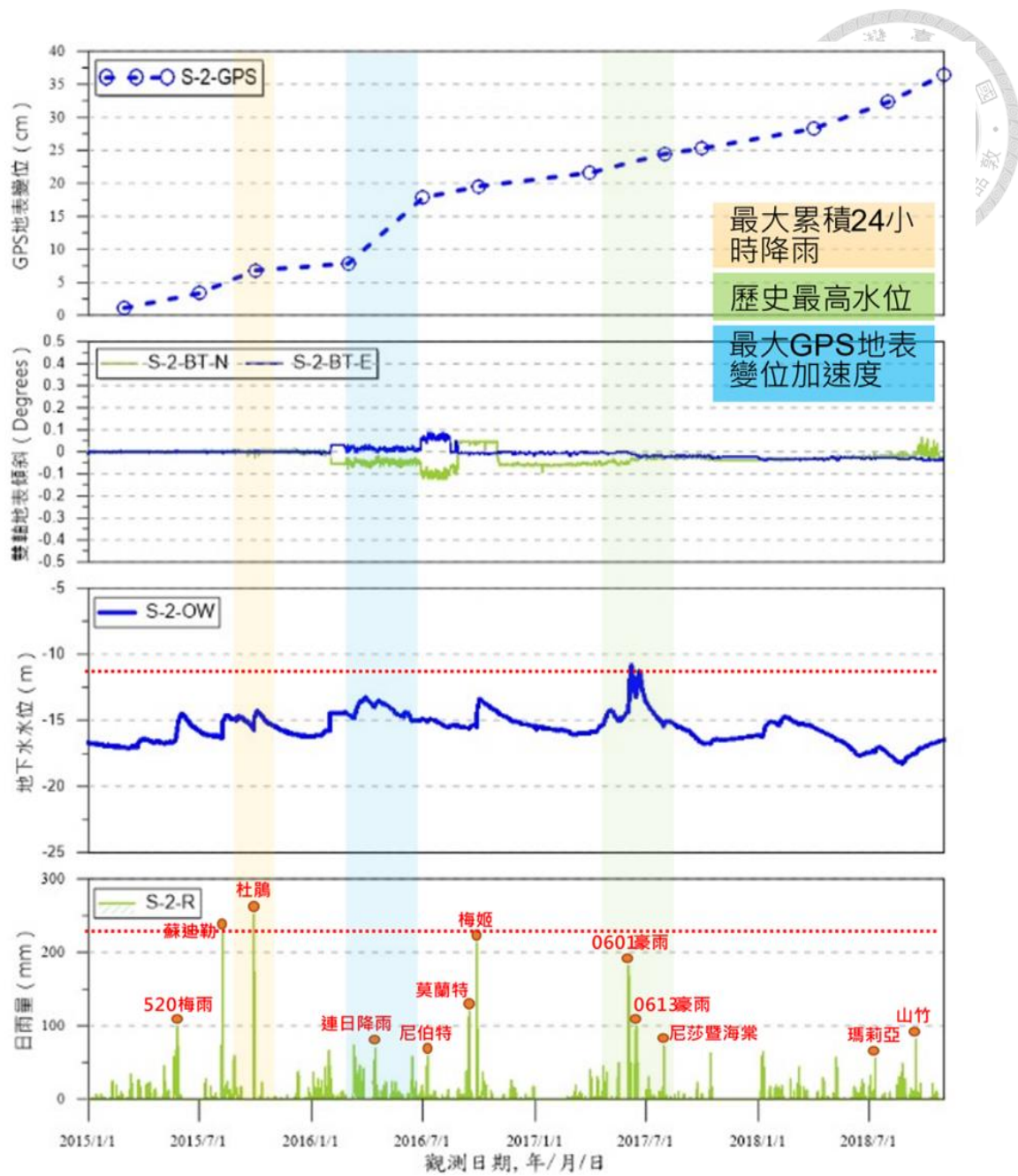


圖 5-1 A1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖

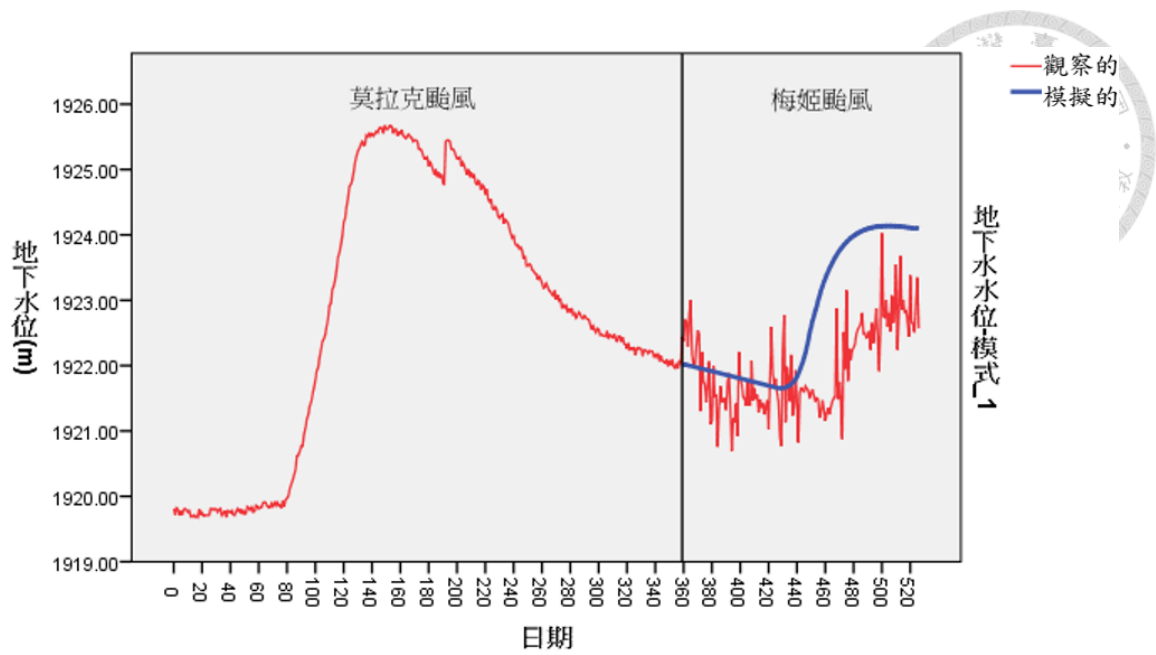


圖 5-2 A1 監測站 ARIMA 模型(1,2,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風

地下水位圖及梅姬颱風實際與模擬之地下水位變化值

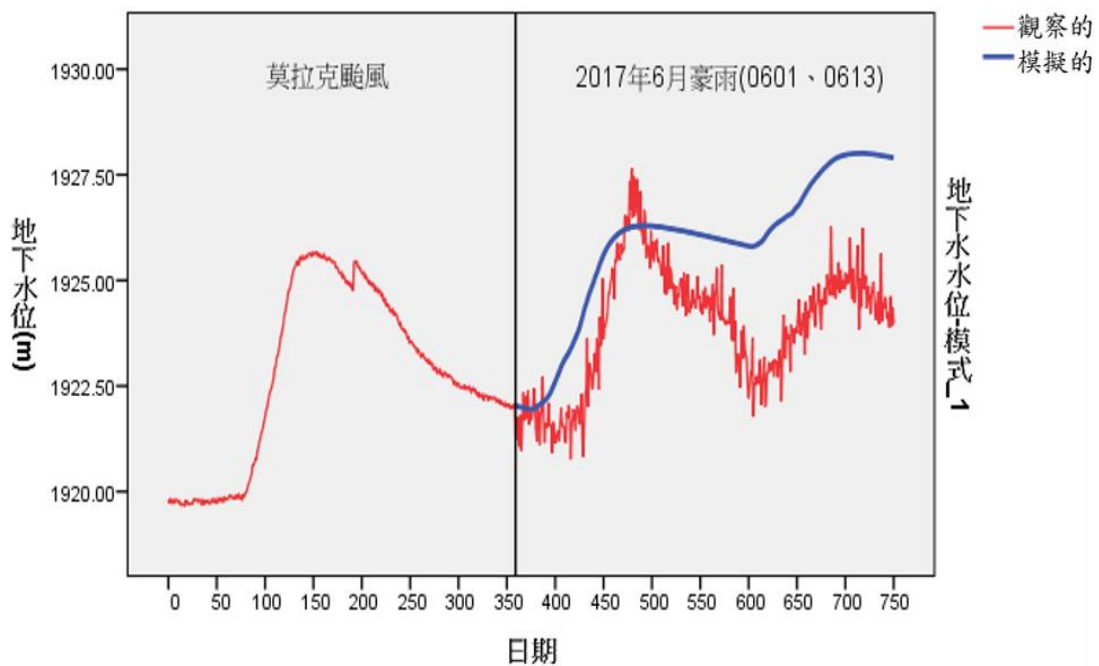


圖 5-3 A1 監測站 ARIMA 模型(1,2,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖

及 2017 年 6 月連續豪雨實際與模擬之地下水位變化值

5.1.2 松茂地區 S1 自動監測站(臺中市-和平區-D038)



松茂地區 S1 自動監測站的轉換函數與 ARIMA 模型訓練樣本係利用該測站歷年當日最大累積雨量事件莫拉克颱風(2009 年)之每小時雨量與地下水位變化之資料序列。另選用另外兩場代表性雨量事件之每小時雨量及地小水位變化資料作為 ARIMA 模型之轉換函數驗證，分別為帶來日累積雨量達 254.5mm 之杜鵑颱風及造成該測站最高地下水水位(-10.8m)之 2017 年六月豪雨事件；由莫拉克颱風及該地區代表極端降雨事件驗證結果可知，A1 監測站的 ARIMA 模型合適模式參數(p,d,q)為(2,1,1)、轉換函數(r,s,b)為(5,2,1)。其監測站歷年極端降雨事件及 ARIMA 模擬地下水位變化結果與觀測值結果呈現如圖 5-1、5-2 及 5-3 所示。

由 A1 自動監測站之 ARIMA 模擬結果可見其模擬之地下水位與實際觀測值變化趨勢相近，利用杜鵑颱風進行模擬驗證時，可以發現實際觀測值與模擬地下水位有些微差距，但整體變化趨勢及地下水位到達高峰值時間非常接近；利用 2017 年 6 月連續豪雨事件驗證時，可見得模擬之地下水位與實際觀測值之整體變化趨勢相較杜鵑颱風較不接近，但兩值之間差異不大，研判可能是因為降雨型態不同導致模擬失真之情形，但地下水位到達高峰值時間仍有辦法成功模擬，將有助於警界發布決策管理單位預先執行情資研判工作，且選用之極端降雨事件間，無新設集水井或其他可能影響地下水位變化工程構造物，因此人為影響因子對此站地下水位影響甚低，模擬成果也更適用於防災應變需求，故此模型研判係可作為大規模崩塌區崩塌預警之參考依據。

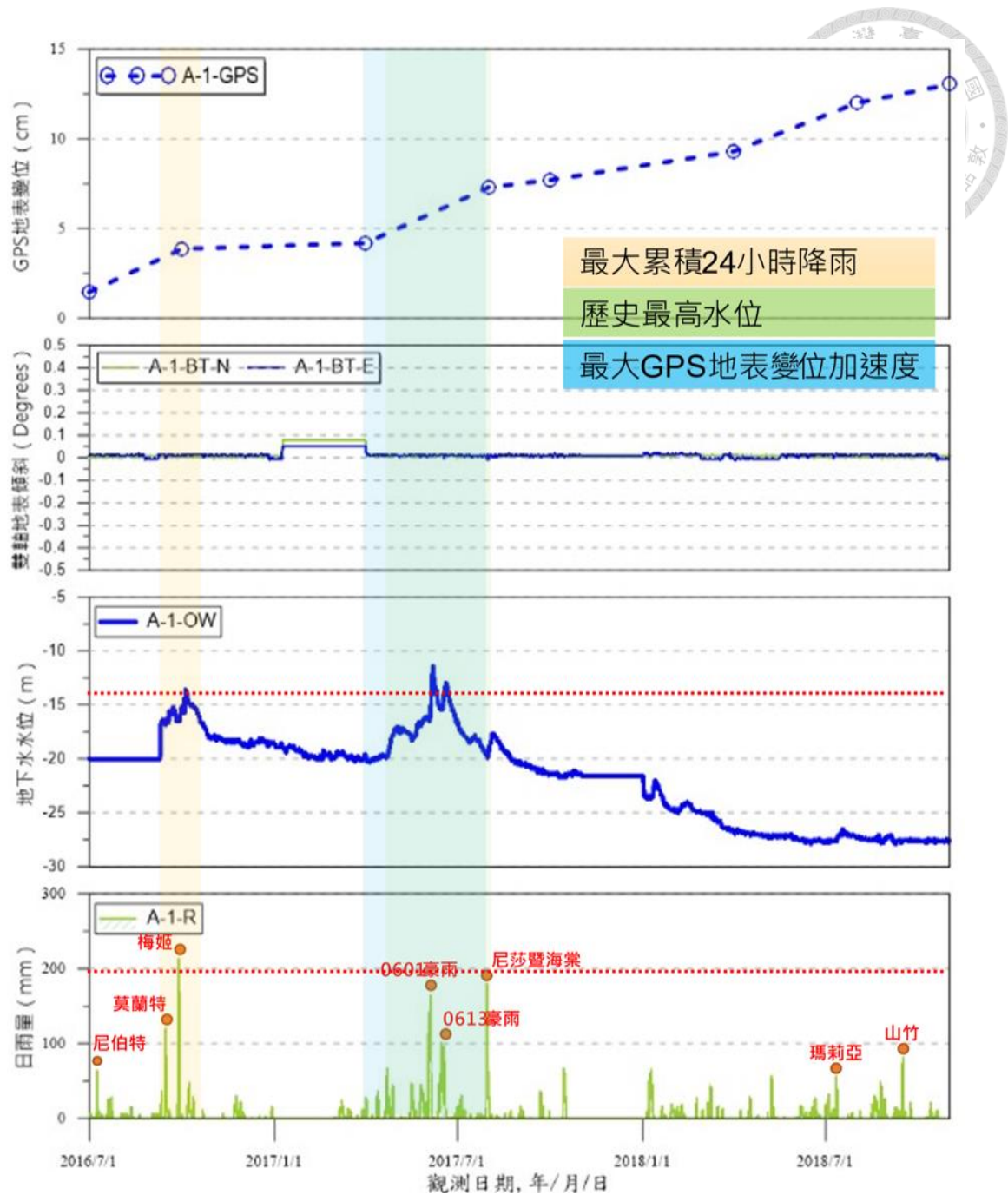


圖 5-4 S1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖

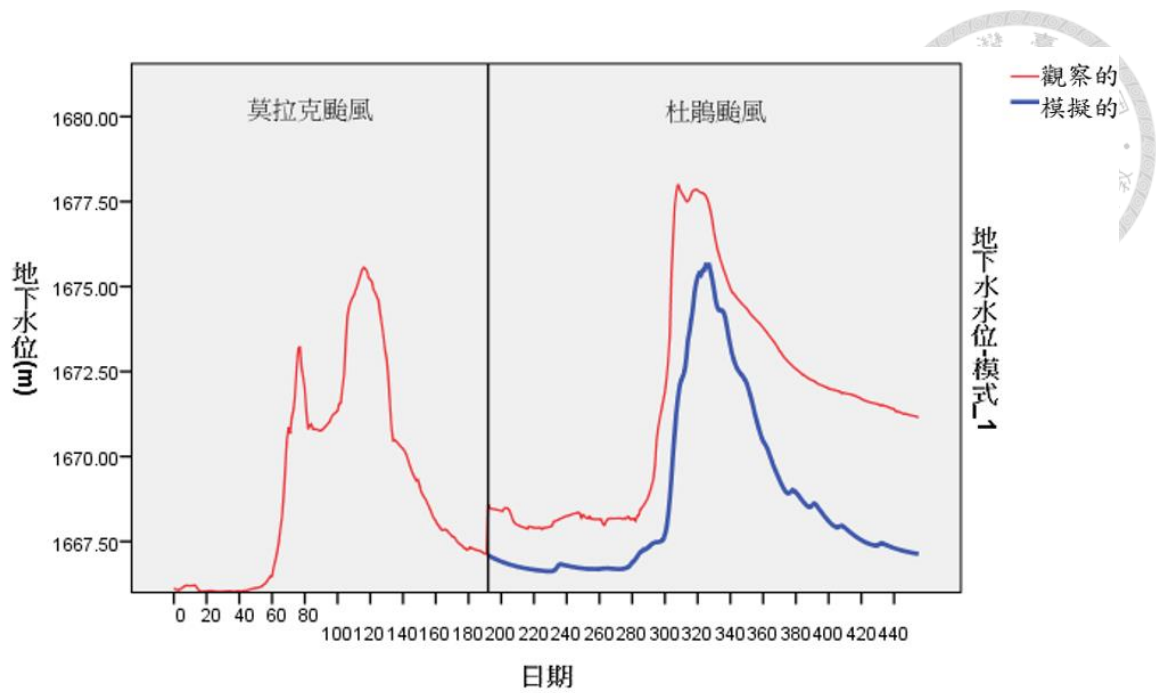


圖 5-5 S1 監測站 ARIMA 模型(2,1,1)，轉換函數(5,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及杜鵑颱風實際與模擬之地下水位變化值

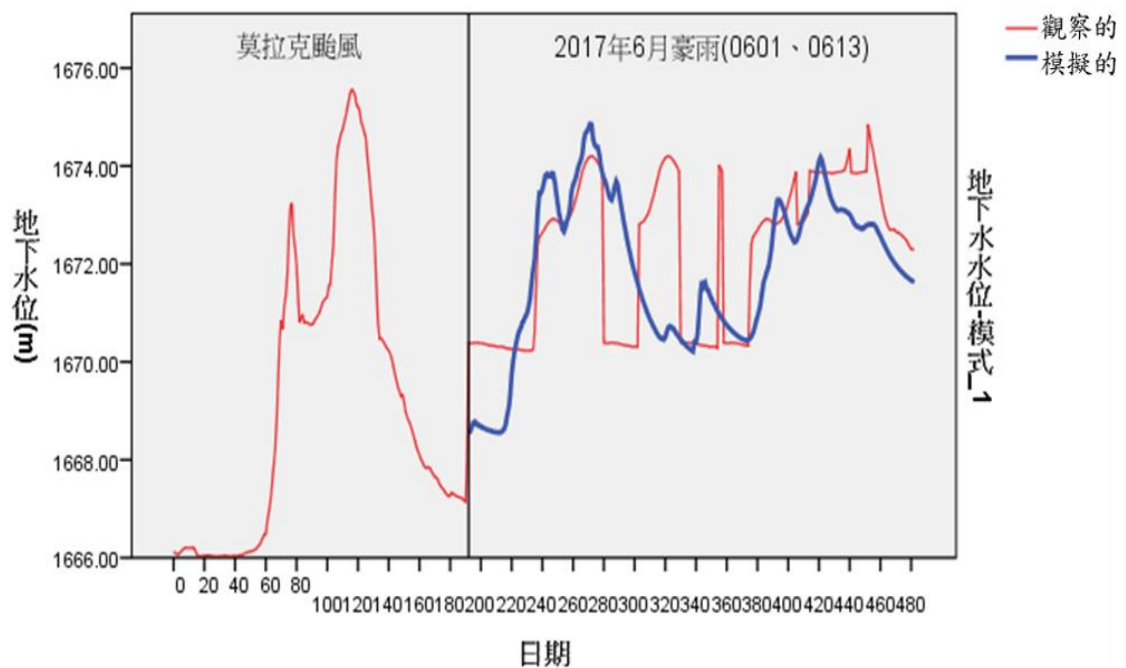


圖 5-6 S1 監測站 ARIMA 模型(2,1,1)，轉換函數(5,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及 2017 年 6 月連續豪雨實際與模擬之地下水位變化值

5.1.3 新佳陽聚落 J1 自動監測站(臺中市-和平區-T003)



新佳陽聚落 J1 自動監測站轉換函數與 ARIMA 模型訓練樣本係利用該測站歷年當日最大累積雨量事件莫拉克颱風(2009 年)之每小時雨量與地下水位變化之資料序列。另選用另外兩場極端降雨事件之每小時雨量及地小水位變化資料作為轉換函數之驗證，分別為帶來次高之日累積雨量(253.8mm)之蘇迪勒颱風(2015 年)及造成該測站最高地下水水位(-35.1m)之梅姬颱風(2016 年)。其莫拉克颱風與其極端降雨事件之 ARIMA 模型的合適模式參數(p,d,q)為(1,1,3)、轉換函數(r,s,b)為(3,2,1)，其監測站歷年極端降雨事件及其 ARIMA 模擬地下水位變化結果與觀測值結果呈現如圖 5-4、5-5 及 5-6 所示。

由 J1 自動監測站 ARIMA 模型之模擬結果可見，模擬之地下水位值與實際觀測值變化趨勢有顯著差距，不論是地下水位峰值到達延時、峰值或整體趨勢都有顯著落差。利用梅姬颱風進行模擬驗證時，可由模擬結果發現實際觀測值與模擬地下水位值有顯著差距，模擬之地下水位到達峰值時間落後實際觀測值，因此評斷此模型模擬結果不適用於後續防災、疏散避難地下水警戒基準值發布之參考依據；再利用另一極端降雨事件(梅姬颱風)進行二次驗證，雖本次模擬之地下水位值與實際觀測值的整體變化趨勢相較蘇迪勒颱風接近，但其地下水位之峰值仍有顯著落差，若將此成果用於地下水為警界發布之決策管理單位參考，將過度預警且造成當地民眾不必要的恐慌，估推斷本測站 ARIMA 模型將不適用於極端降雨事件下，地下水位防災作為之參考。本研究研判造成此結果，係因 J1 監測站周邊設有集水井工程構造物，導致地下水位變化幅度較小，利用 ARIMA 模型進行模擬時無法掌握變化趨勢也無法有效模

擬地下水位到達峰值的時間點，故不適用於防災應變需求，本研究建議此測站應持續蒐集代表性雨量事件資料，或改選用此區域其他周邊沒有人為構造物影響之自動化監測站替代之。

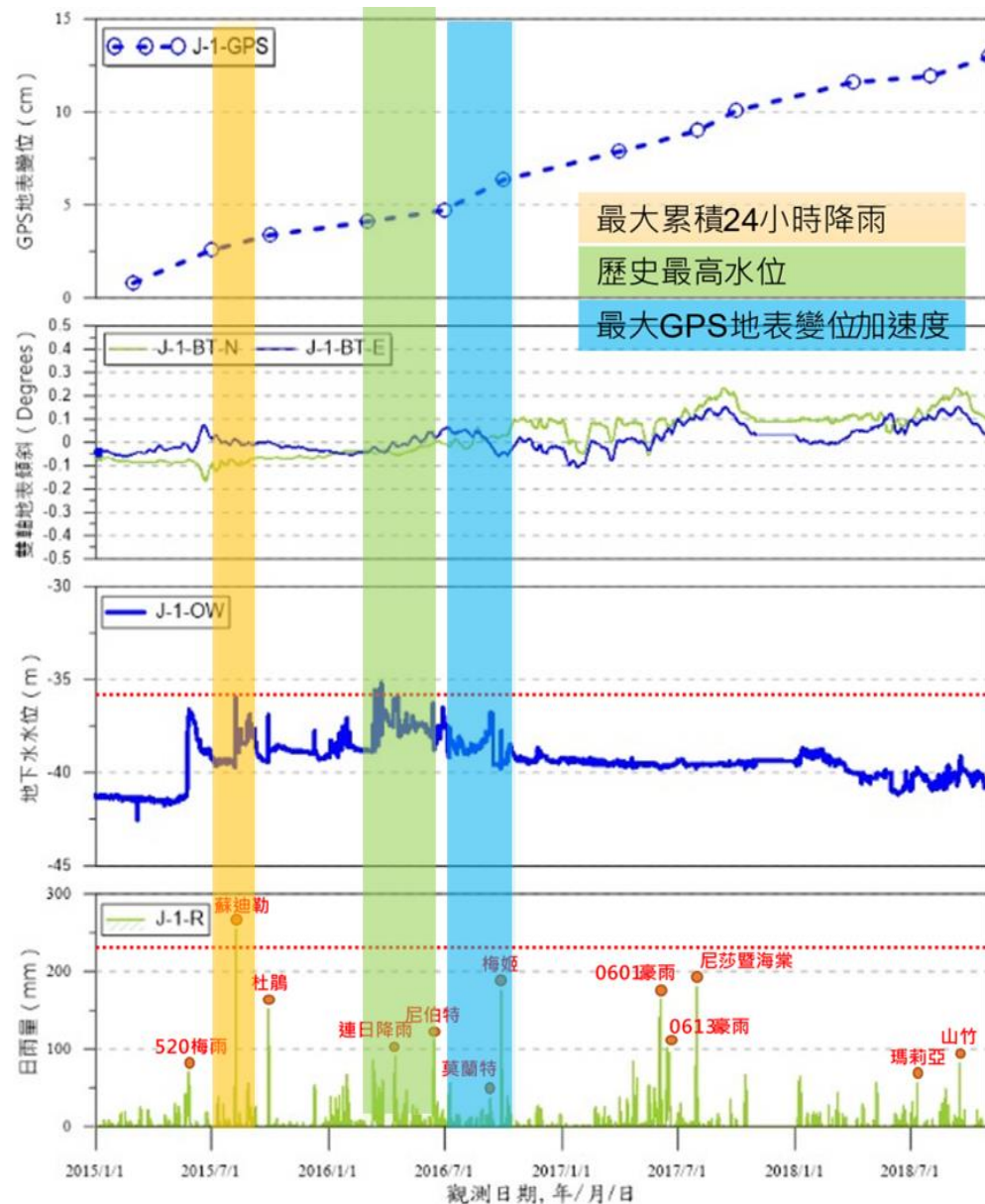


圖 5-7 J1 自動監測站歷年代表性雨量監測資料統計圖

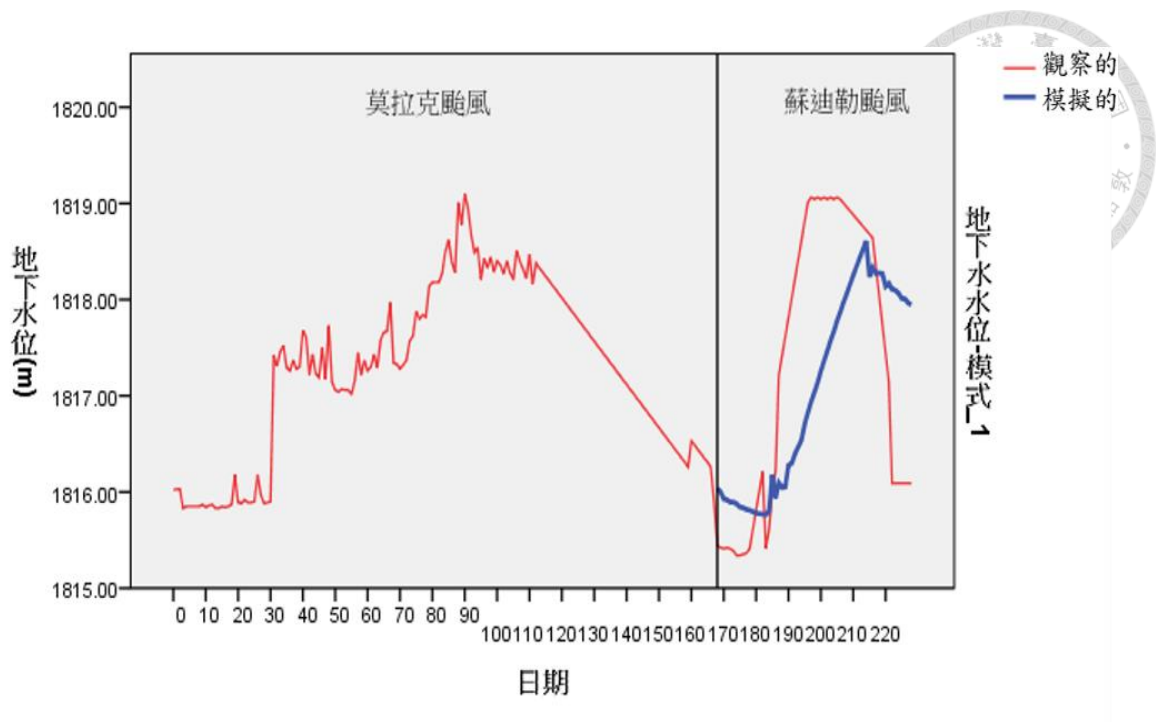


圖 5-8 J1 監測站 ARIMA 模型(1,1,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及
蘇迪勒颱風實際與模擬之地下水位變化值

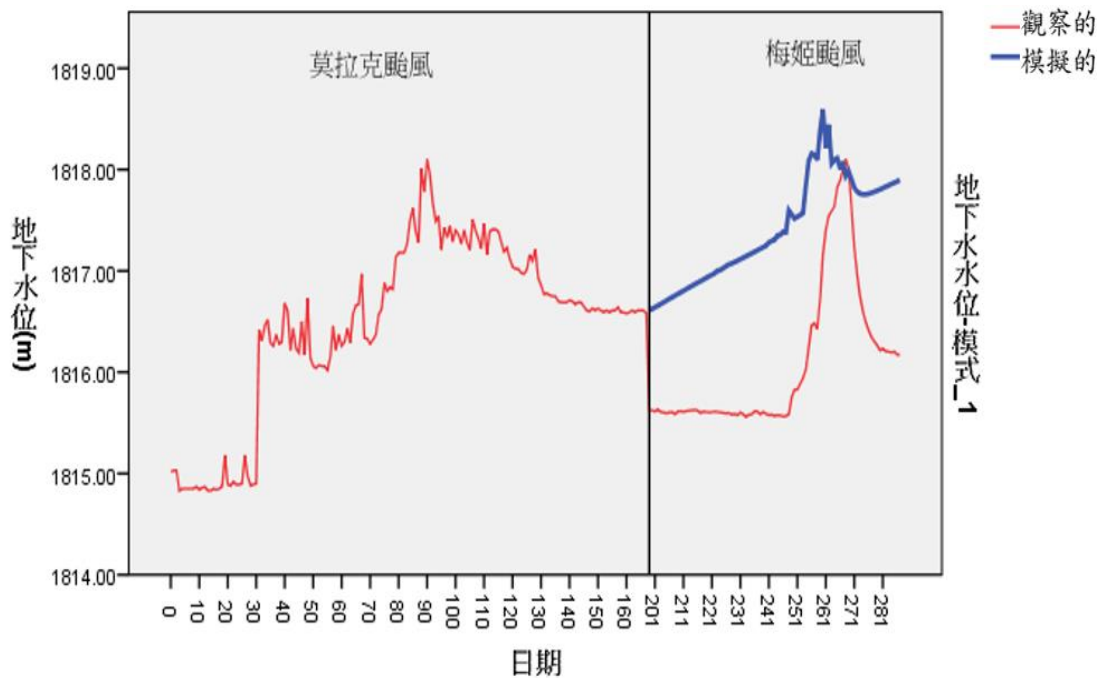


圖 5-9 J1 監測站 ARIMA 模型(1,1,3)，轉換函數(3,2,1)莫拉克颱風地下水位圖及
梅姬颱風實際與模擬之地下水位變化值



5.2 綜合警戒值輔助發布警戒管理值

行政院農業委員會水土保持局臺中分局於臺中市和平區大規模崩塌區(大梨山地區)進行多年調查結果(水文、地質)、模式分析(Galena)、及比對國內外研究成果，完成部分崩塌地管理基準值訂定，其中地下水水位亦為警界管理基準值中的重要因子之一，基準值訂定主要是以各監測站地下水水位之歷史最高點作為基準，搭配邊坡穩定分析結果，訂定各基準值(正常、注意及警戒值)，本研究區域警戒值大致如表 5-1 及表 5-2 所示。為易於決策者判別各危險等級，管理基準值可用燈號表示分為以下三階段：

1. 正常階段(綠色燈號)：監測系統維持正常運作。
2. 注意階段(黃色燈號)：地下水水位達注意基準值(確認監測系統運作正常)。
3. 警戒階段(紅色燈號)：地下水水位達警戒基準值，且地表傾斜加速度產生，均成立(確認監測系統運作正常)。

表 5-1 自動監測站地下水水位基準值

地下水水位監測 (單位:公尺)	基準值危險分級 (相對應安全係數與歷史水位高點綜合評估)			
	平時 (底表下)	注意(1.05) (底表下)	警戒(1.00) (底表下)	孔口高 程(公尺)
梨山精華區 A-1	34.2	15.3	1903	1937.7
松茂部落 S-1	14.7	7.5	4.5	1678
新佳陽 J-1	34.9	28.5	21.5	1855

(資料來源：行政院農業委員會水土保持局臺中分局，2021)

表 5-2 大梨山地區大規模潛勢崩塌地自動監測站之雨量基準值

	注意(mm)	警戒(mm)
累積 24 小時降雨量	490 mm	700 mm

(資料來源：行政院農業委員會水土保持局臺中分局，2021)

本研究係使用自動化監測設備蒐集之資料數列，於三處大規模崩塌區域內，產製 ARIMA 模型以了解各崩塌地於極端降雨事件時之降雨量與地下水位變化趨勢，藉由模擬地下水位變化輔助水保局的決策者於颱風豪雨及防災應變時，發布地下水位警戒管理值及作為疏散避難之依據，其作業流程如圖 5-9 所示。於颱風豪雨期間，持續監測研究區域內各大規模崩塌潛勢區之自動監測站(A1、S1 及 J1)，並將各監測站即時的每小時降雨量、地下水位變化值及中央氣象局預估未來三小時雨量資料套入各監測站 ARIMA 模型中，將模擬成果與各崩塌地地下水為警戒基準值進行比對，藉由模擬各測站未來三小時地下水水位變化是否會達到注意值或警戒值，協助水保局情資研判小組提前掌握大規模潛勢崩塌區地下水位變化，作為輔助發布大規模崩塌區地下水位警戒基準值之參考依據。未來，各監測站之 ARIMA 模型亦可協助決策單位針對各崩塌區警戒基準值調整及修正之參考，並持續蒐集各測站之豪大雨或颱風事件資料，確認訂定之警戒基準值在極端降雨事件下的適用性，如不適用則應滾動式調整及檢討，使得大梨山地區大規模崩塌潛勢區防災體系更加完整，亦減少極端降雨事件造成之損失。

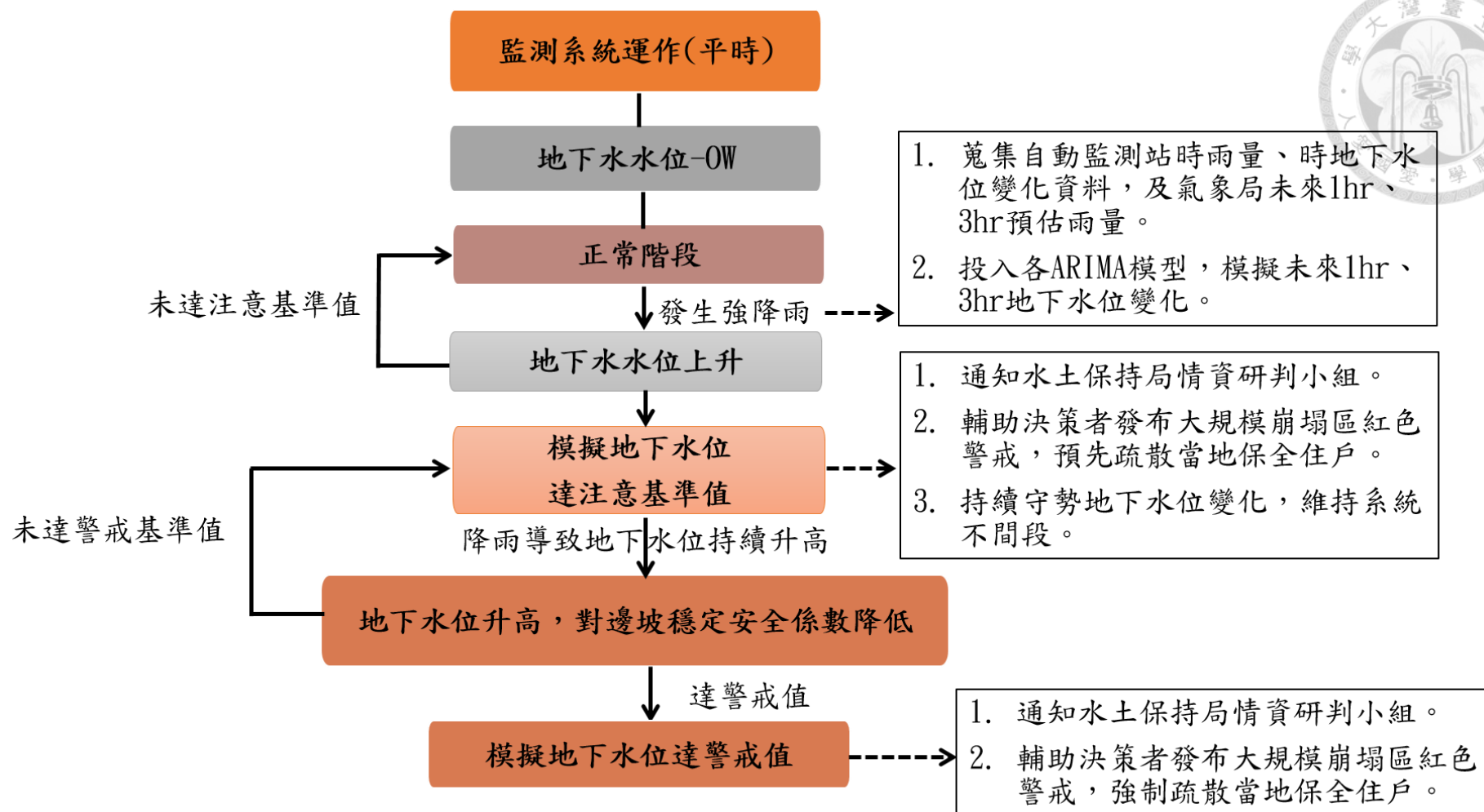


圖 5-10 大規模崩塌區(D050、D038 及 T003)地下水警戒值發布及防災應變流程圖

第六章 結論與建議



本研究擇定臺中市和平區(大梨山地區)三處大規模崩塌潛勢區之三個建
站超過 10 年以上且鄰近保全對象之自動化監測站為研究測站，利用 2009 年
莫拉克颱風及各測站之歷年極端降雨事件之每小時雨量值及地下水位變化資
料序列，求得三處監測站之 ARIMA 模型及其轉換函數值，作為後續模擬該測
站地下水位變化使用，本研究同時結合水保局提出之各崩塌地警戒基準值，可
用於颱風豪雨時期，輔助水保局發布地下水位警戒值及疏散避難訊號等防災
應變作業參考依據之一。

6.1 結論

1. 本研究利用時間序列 ARIMA 模式選取大梨山地區三處大規模崩塌潛勢區 (D038、D050 及 T003)之代表監測站為研究區域，利用各測站歷年極端降雨事件每小時雨量及地下水位資料，求得各測站之 ARIMA 模型及其轉換函數，得知各測站之降雨及地下水之關係，又將模擬成果與實際觀測值比對，同時納入各崩塌地之水文、地質及工程施工資料作為驗證，證實 ARIMA 模型可以良好體現降雨量對於地下水位變化趨勢有直接影響。
2. 時間序列 ARIMA 分析屬於眾統計分析之一，模型參數及轉換函數僅考量投入之資料序列，簡化山坡地之地值條件及人為影響等複雜性，但用於具有長時間監測資料之自動化監測站而言，能夠透過多組資料序列進行訓練、驗證以得到更好的模擬成果。

- 
3. 從 A1 及 S1 自動化監測站之 ARIMA 模型模擬成果可知，不論於颱風事件或長降雨延時之極端降雨型態，實際觀測值及模擬之地下水位變化趨勢大致相近，且地下水位到達高峰值及其降雨延時也有良好的模擬成果，作為後續輔助水保局決策者及作為發布大規模崩塌區地下水位警戒管理值，有顯著的參考價值。
 4. 由 J1 自動化監測站之 ARIMA 模型模擬結果發現，地下水位實際觀測值與模擬地下水位之整體變化趨勢有明顯差異，且地下水位的高峰值無法成功模擬，高峰值到達之延時也相差甚遠，故評斷此模型無法作為該測站地下水位警戒值及其防災應變輔助參考工具，本研究研判此成果係因 J1 測站周邊設有集水井工程構造物，導致降雨補助地下水之直接關聯性降低，也同時影響模型之模擬成果。
 5. 從本研究三處自動化監測站 ARIMA 模型模擬成果可知，要有效模擬降雨對於地下水位變化關聯，除需蒐集該測站長期豪大雨數據資料外，測站周邊之人為影響亦對模擬成果有著顯著影響，但卻可克服山區地質條件複雜的因素。

6.2 建議

1. 時間序列 ARIMA 模型用於大規模崩塌區自動化監測站，仰賴長時間的觀測資料，對於極端降雨事件資料蒐集更為重要，隨著資料庫越來越豐富，模擬地下水位與實際觀測趨勢將更貼近。
2. 目前中央氣象局提供行政院農業委員會水土保持局之短期預測降雨量為未來 1 小時及未來 3 小時預測雨量，未來氣象局若開放 24 小時定量降水資料，ARIMA 模型將可模擬未來一日之地下水位變化，讓主管機關更能提前了解崩塌地之地下水位變化，並作為提前預警之參考依據。

- 
3. 本研究結果認為各類工程構造物對於模擬成果均會造成直接影響，未來選擇研究區域之監測站位置時，應避免選擇測站周邊設有集水井或其他人工導入工程之測站，避免地下水位變化會因工程構造物影響而變化趨勢不明顯，間接造成模擬成果無法作為後續防災應變使用。
 4. 目前三處監測站之 ARIMA 模型均使用近年的極端降雨事件(莫拉克颱風等)為訓練依據，若未來有規模更大之極端降雨事件，也可作為訓練依據，再以莫拉克颱風作為模式驗證，讓模型更符合不同時期降雨型態之模擬。
 5. 目前水保局進行大規模崩塌潛勢區警戒基準值修訂時，僅仰賴過去已發生之極端降雨事件監測資料及崩塌事件，忽略該監測站資料序列加值應用或程式分析的重要性，本研究所提之 ARIMA 時間序列模型分析，可作為一成功案例，未來應繼續朝程式分析輔助決策者判斷，繼續努力。

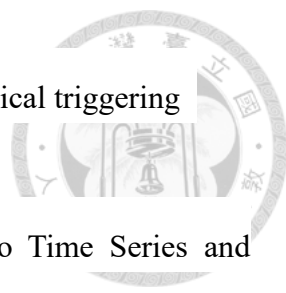
第七章 參考文獻



1. 林茂文，(1993)，「時間數列分析與預測」，華泰書局。
2. 陳奕弦，(1997)，「以時間序列模擬複層地盤沉陷量化關係之建立」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
3. 柳雅瀨，(1997)，「邊坡位移預測之非線性系統動態分析」，國立成功大學資源工程研究所博士論文。
4. 楊智堯，(1998)，「類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
5. 陳志忠，(2009)，「地滑地排水設施成效減訂方法研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
6. 楊奕農，(2009)，時間序列分析：「經濟與財務上之應用 第二版」，雙葉書廊有限公司。
7. 彭柏豪、劉達生，(2009)，「國君主要用由預算編列價訂定之研究」，2009 第十七屆國防管理學術暨實務研討會論文。
8. 曹榮軒(2019). 氣候變遷調適演算法之法展與應用.臺灣大學生物環境工程學研究所 學位論文
9. 行政院農業委員會水土保持局台中分局，(2021)，「110 度大梨山地區地滑地與臺中市和平區潛在大規模崩塌監測計畫」。
10. 科技部(2021)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告。檢自：

https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20210810134743

- 
11. 科技部(2022)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20220301094534
 12. 科技部(2021)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20210810134743
 13. 科技部(2022)。IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。檢自：
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_abstract_one.aspx?kid=20220301094534
 14. 行政院農業委員會水土保持局，(2022)，水土保持局大規模崩塌警戒發布與解除作業指引(2022)
 15. Adamowski,(1983),Stochastic Systems Model of Groundwater Level Fluctuations, Journal of Hydrology,No.62,pp129-141.
 16. Maidment, D. R. and S. P. Miaou (1985),Transfer Function Models of Daily Urban Water Use, Water Resources Res., Vol.21, No.4, pp.425-432.
 17. J.P.T. Caris, Van Asch. (1991). Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. Engineering Geology 31 249-276.
 18. 13. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, 179-186.
 19. Box and Jenkins(1994),Time Series Analysis Forecasting and Control,Prentice-hall inc.

- 
20. Van Asch, J. Buma, Van Beek (1999). A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30 23-32.
 21. Peter J. Brockwell and Richard A. Davis, (2002), *Introduction to Time Series and Forecasting*, Second Edition, Springer, Berlin, Germany.
 22. Mohammed H.I. Dore. (2005) Climate change and changes in global precipitation patterns. *Environment International* 31 1167-1181
 23. Mikko I. Jyrkama, Jon F. Sykes. (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *Journal of Hydrology* 338, 237-250.
 24. Mahmudur Rahman, A.H.M. Saiful Islam, Shah Yaser Maqnoon Nadvi, Rashedur M Rahman. (2008). *Comparative Study of ANFIS and ARIMA Model for Weather Forecasting in Dhaka*. Department of Electrical Engineering and Computer Science, North South University.
 25. Kevin E. Trenberth. (2011). *Changes in precipitation with climate change*. National Center for Atmospheric Research, Box 3000, Boulder, Colorado 80307
 26. Ching-Weei Lin, Chih-Ming Tseng. (2013) Recognition of large scale deep-seated landslides in forest areas of Taiwan using high resolution topography. *Journal of Asia Earth Science* 62 389-400.
 27. Ruey S. Tsay, (2014), *Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications*, John Wiley & Sons, New York, USA.
 28. 21. WBCSD. (2018). *CEO Guide to Water*. Retrieved from <https://www.wbcd.org/Programs/Food-and-Nature/Water/Resources/CEO-Guide-to-Water-building-resilient-business>

29. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Sixth Assessment Report.

<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

