

國立臺灣大學理學院地質科學系暨研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

2000年 M_L 6.7地震引發坪頂觀測井之地下水位異常變化

Groundwater Level Changes of Pingding Well due to the

2000 M_L 6.7 Earthquake in Taiwan



劉慶怡

Ching-Yi Liu

指導教授：賈儀平博士

Advisor: Yeeping Chia, Ph.D.

中華民國 九十七 年 六 月

June, 2008

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

2000年 M_L 6.7地震引發坪頂觀測井之地下水位異常變化
Groundwater Level Changes of Pingding Well due to the
2000 M_L 6.7 Earthquake in Taiwan

本論文係劉慶怡君 (R95224109) 在國立臺灣大學地質科學系暨研究所完成之碩士學位論文，於民國九十七年六月廿六日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

賈義平

(簽名)

(指導教授)

劉聰桂

汪中和

誌謝

在百萬年為尺度的地質時間中，兩年如同瞬間，然而能夠在短短兩年間完成碩士學位，受到了來自各方的幫助，在此致上我深深的謝意。

首先感謝指導教授賈儀平博士於研究方面的指導及啟發，邱絹琇師母在平日生活上的照顧；同時感謝口試委員劉聰桂教授及汪中和研究員，對論文提出值得深入思考的觀點及建議、指正缺漏不足之處，使內容更加完整充實；此外感謝水利署林燕初學長提供的水位資料，讓研究可以順利進行。

進入水文地質研究室兩年，感謝助理江小姐對各種細節的提醒及完芸過來人的經驗分享，處理水位資料時雪蘋學姐的幫忙，不時提供新知及笑點的在平，一起修課同甘共苦的伯禹、雅嵐，幫忙校稿的柏瑞和對圖表美工給予建議的珮玲，以及已畢業但不定時回研究室關心大家的學長姐們，謝謝大家的勉勵及幫助。

研究所期間，謝謝平時在系上走動碰到的師長、同學、學弟妹、行政人員等見面的微笑、問候或閒聊，簡短的打氣具有提振研究士氣的功效；豬頭、大歐、賢元、韶箴的真誠鼓勵及現況分析，讓我的研究之路不孤單。水上服務隊、泳隊練咖們及高中時期體操隊美女們的關心，提醒我研究之餘要記得注意身體健康，使我感受到勤訓精練以外的溫馨。此外在撰寫論文時，總圖館藏及豐富的網路資源對我助益良多，跟著我東奔西走的筆電更是最佳戰友。

最後要感謝一直在背後支持我的爸爸、媽媽、姊姊、崑辰，對我的包容、關心及照顧，讓我在安定的環境中順利完成學業。

謹以此篇論文獻給所有關心我的人，願大家平安順利。

摘要

台灣位於環太平洋地震帶上，由於地震發生頻繁，各種地震監測設施密布，而且裝設了 600 多口的觀測井，記錄地震相關的地下水位反應，因此適合進行地震水文相關的研究。同震地下水位的變化在空間上的分布可以反映地震發生時大地應力的重新分布，本研究針對 2000 年 6 月 11 日發生芮氏規模 6.7 地震，探討地震相關之地下水位變化。全球衛星定位系統記錄顯示此次地震造成了地表變形，至於水位記錄分析結果指出，地震發生時，全台共有 410 口觀測井在記錄水位，其中 112 口記錄到同震水位上升變化，僅有 14 口出現同震水位下降變化，變化幅度從下降 11 公分到上升 71 公分。空間分布上西南平原出現反應的觀測井以上升變化為主，但其中濁水溪沖積扇接近丘陵的井位，以及嘉南平原之部分井位出現下降反應。位於濁水溪沖積扇上、臨近震央的觀測井反應比例最高，共有 98 口出現同震變化，其中坪頂一號井除了同震上升 22 公分外，並於震前一小時出現了 5 公分異常下降的水位變化。井深 204 公尺的坪頂一號井位於斗六丘陵的北端，井篩開設於半固結的礫石含水層中，比對 1997 年至 2005 年之間發生芮氏規模大於 5.5 的地震，曾出現 13 次同震水位反應，大多為水位上升的變化，而且這 13 次地震的震央幾乎都在台灣中部及其外海。在所有同震反應中，2000 年芮氏規模 6.7 地震前的水位下降及同震水位上升變化皆具其獨特性，可能反映了地震引發的現地應力改變及地震發生前地殼的應變狀況，而且符合地震發生時應變出現彈性回跳的理論。

關鍵詞：地震、地下水、同震、震前

Abstract

Taiwan is located in the Circum-Pacific seismic belt. As earthquakes occurred frequently, various earthquakes monitoring devices have been placed all over this island. More than 600 wells have been installed to monitor earthquake-related groundwater level changes. Co-seismic groundwater level changes may reflect tectonic stress redistribution and crustal strain. This study focuses on the responses of groundwater level recorded by monitoring wells to the 2000 $M_L6.7$ earthquake. When this earthquake occurred, ground deformation was recorded by Global Positioning System data. From the analysis results of water-level record, 410 wells were operational while co-seismic rises were observed in 112 wells and only 14 wells observed co-seismic falls, where the amplitude of co-seismic changes range from 71cm rise to 11cm fall. In spatial distribution, wells located in Southwest plain of Taiwan react as rises, but wells that are near hills and some in Chianan plain react as falls. Monitoring wells located in Choushui river alluvial fan are near to the epicenter and have a high reacting ratio, which 98 wells observed co-seismic water-level changes. One of the well named Pingding No.1 well (PD1) not only reflect 22cm co-seismic water-level change, but also show an abnormal 5cm water-level change one hour before the co-seismic water-level change. The 204m deep well is located at the northern tip of the Douliu Hill, and was installed in an aquifer consisting of semi-consolidated deposits. Further analysis indicated that 13 co-seismic water-level changes were observed in response to earthquakes of magnitude greater than 5.5 during the 1997 to 2005 period; most of the changes are rises. The epicenter of these 13 earthquakes mostly locates around central Taiwan and its outer sea area. Among all the co-seismic responses, the phenomenon due to the 2000 $M_L6.7$ earthquake shows its uniqueness, which might imply the change of tectonic stress induced by earthquake and crustal deformation caused by strain. This phenomenon consists with the poroelastic rebound theory.

Key words: earthquake, groundwater, co-seismic, pre-seismic

目錄

口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
英文摘要	iv
目錄	v
圖目	vii
表目	xi
第一章 緒論	1
1-1 研究動機及目的	1
1-2 研究資料來源	3
1-3 研究方法	6
第二章 文獻回顧	7
第三章 2000年6月11日仁愛地震分析	11
3-1 仁愛地震	11
3-2 觀測井之同震水位反應及區域分布	16
3-3 地下水位同震反應型態	19
3-4 同震地下水位變化與震源距離之關係	22
3-5 濁水溪沖積扇三條剖面同震反應量的比較	24
3-6 複井水位分析	30
第四章 坪頂一號井地震相關的水位變化	32
4-1. 仁愛地震相關之異常水位	32
4-2. 2000年地下水位變化分析	33
4-3. 坪頂一號井的建構及水文地質背景	36
4-4. 地下水位對1997年至2005年芮氏規模5.5地震之反應	38

4-5.	同震水位變化與地震震央距、深度及地震規模之關係.....	45
4-6.	坪頂一號井分水位試測資料.....	45
第五章	討論.....	50
5.1	仁愛地震震源機制對同震水位升降分布的影響.....	50
5.2	坪頂一號井水位對地震之反應.....	52
5.3	坪頂一號井震前水位異常變化現象.....	54
第六章	結論.....	55
	參考文獻.....	56
附錄 A	2000 年 6 月 11 日仁愛地震複井觀測站同震水位反應圖.....	59
附錄 B	坪頂一號觀測井試測資料水位歷線圖.....	75



圖目

圖 1.1	地下水觀測井及中央氣象局氣象站分布圖	4
圖 1.2	台灣地區 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 5.5 之地震分布圖	5
圖 1.3	研究方法流程圖	6
圖 2.1	伊豆半島上 EDY 監測井水位記錄之原始記錄、濾除地潮、濾除大氣壓力、 水位趨勢及雜訊 (Igarashi <i>et al.</i> , 1992)	8
圖 2.2	遠野礦區 SN-3 號井 (a) 具有震前異常之同震水位記錄 (b) 同震水位記 錄 (King <i>et al.</i> , 1999)	8
圖 2.3	平移斷層錯移 11 公分所造成的體積應變場 (Ge and Stover, 2000)	10
圖 3.1	中央氣象局發布之 2000 年 6 月 11 日地震報告	11
圖 3.2	震源距與加速度之關係圖	12
圖 3.3	玉山 GPS 測站 2000 年記錄資料	13
圖 3.4	日月潭 GPS 測站 2000 年記錄資料	14
圖 3.5	嘉義 GPS 測站 2000 年記錄資料	15
圖 3.6	仁愛地震全台觀測站同震水位反應分布圖	18
圖 3.7	石榴一號井同震水位變化	20
圖 3.8	新市一號井同震水位變化	20
圖 3.9	員林四號井同震水位變化	21
圖 3.10	荊桐站同震水位變化	21
圖 3.11	港尾站同震水位變化 (a) 港尾一號井 (b) 港尾三號井	22
圖 3.12	同震地下水位變化與震源距離關係圖	23
圖 3.13	震源距與觀測井區域對照圖	23
圖 3.14	濁水溪沖積扇同震水位剖面圖	26
圖 3.15	沿剖面 A-A' 觀測站之同震水位變化分布	27
圖 3.16	沿剖面 B-B' 觀測站之同震水位變化分布	27

圖 3.17	沿剖面 C-C' 觀測站之同震水位變化分布	27
圖 3.18	仁愛地震出現同震水位變化之複井站分布圖	31
圖 4.1	坪頂一號井於仁愛地震之同震水位反應	32
圖 4.2	2000 年之 (a) 芮氏規模大於 5.0 之地震 (b) 日月潭站雨量記錄 (c) 日月潭站大氣壓力記錄 (d) 坪頂一號井水位記錄 (e) 坪頂一號井一小時水位變化比較圖	34
圖 4.3	強颱碧利斯帶來雨量、氣壓及對水位造成的變化	36
圖 4.4	坪頂一號井地層柱 (中央地質調查所, 1996)	37
圖 4.5	坪頂一號井附近區域地質圖 (中央地質調查所, 2004)	38
圖 4.6	坪頂一號井對芮氏規模大於 5.5 之同震反應分布圖	40
圖 4.7	坪頂一號井水位對 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 5.5 地震之反應在縱剖面上的分布	42
圖 4.8	1997 年至 2005 年坪頂一號井同震水位變化	44
圖 4.9	坪頂一號井同震水位變化與地震震央距、深度及地震規模與之關係	45
圖 4.10	坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日起測試一個月之二分鐘水位歷線圖	46
圖 4.11	2007 年 12 月 5 日 9 時 41 分 42.9 秒芮氏規模 5.3 同震水位變化	47
圖 4.12	坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日至 2008 年 1 月 3 日每二分鐘水位變化隨時間的變動	47
圖 4.13	坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日起測試五個月之二分鐘及五分鐘水位歷線圖	48
圖 4.14	2008 年 1 月 4 日至 3 月 4 日測試水位五分鐘水位變化與日月潭站日雨量比較	49
圖 5.1	仁愛地震同震水位變化分布與震源機制比較	51
圖 5.2	坪頂一號井出現同震反應地震之震央及斷層面解	53
圖 A.1	仁愛地震出現同震水位變化之複井站分布圖	59

圖 A.2	新光站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	60
圖 A.3	觸口站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	60
圖 A.4	員林站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	61
圖 A.5	石榴站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	61
圖 A.6	田尾站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	62
圖 A.7	東和站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	62
圖 A.8	溪州站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	63
圖 A.9	東芳站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	63
圖 A.10	虎溪站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	64
圖 A.11	荊桐站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	64
圖 A.12	溪湖站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	65
圖 A.13	合興站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	65
圖 A.14	好修站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	66
圖 A.15	竹塘站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	66
圖 A.16	線西站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	67
圖 A.17	洛津站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	67
圖 A.18	文昌站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	68
圖 A.19	趙甲站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	68
圖 A.20	港後站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	69
圖 A.21	潭墘站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	69
圖 A.22	芳苑站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	70
圖 A.23	豐榮站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	70
圖 A.24	興化站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	71
圖 A.25	東光站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	71
圖 A.26	安南站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	72

圖 A.27	明德站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	72
圖 A.28	平溪站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	73
圖 A.29	錦湖站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	73
圖 A.30	港尾站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖	74
圖 B.1	2007 年 12 月 4 日至 2008 年 5 月 5 日試測資料水位歷線圖	75
圖 B.2	2007 年 12 月 4 日至 2008 年 1 月 4 日二分鐘試測資料水位歷線圖	76
圖 B.3	2008 年 1 月 4 日至 2008 年 2 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖	77
圖 B.4	2008 年 2 月 5 日至 2008 年 3 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖	78
圖 B.5	2008 年 3 月 4 日至 2008 年 4 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖	79
圖 B.6	2008 年 4 月 5 日至 2008 年 5 月 5 日五分鐘試測資料水位歷線圖	80



表目

表 1.1 台灣地區 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 6.0 之地震(整理自中央氣象局)	2
表 3.1 觀測井同震水位反應統計表	17
表 3.2 觀測站同震水位反應統計表	17
表 3.3 剖面 A 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量	28
表 3.4 剖面 B 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量	28
表 3.5 剖面 C 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量	29
表 3.6 濁水溪沖積扇及嘉南平原出現同震水位變化之複井站	30
表 4.1 1997 年至 2005 年坪頂一號井同震水位變化	39
表 4.2 1997 年至 2005 年引發坪頂一號井同震水位變化之地震震源距離統計表	41
表 4.3 1997 年至 2005 年引發坪頂一號井同震水位變化之地震深度統計表	41
表 4.4 坪頂一號井水位測試期間用以比對同震水位變化之地震	48

第一章 緒論

1-1 研究動機及目的

台灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之交界，菲律賓海板塊每年以約 8 公分之速率向西北方向移動，擠壓歐亞大陸，導致地震活動頻繁。氣象局於 1997 年至 2005 年之間的記錄顯示芮氏規模大於 5.5 的地震發生了 78 次，而規模大於 6.0 之地震發生了 34 次（表 1.1），其中最大的地震是 1999 年 9 月 21 日規模 7.3 之集集地震，造成 1935 年新竹地震以來最嚴重的傷亡及財產損失。因此地震發生之後，政府積極推動地震及活斷層研究，探討地震發生之成因、機制與前兆，由於地震前後地下水位異常變化可能反映大地應力變化與應變狀況，因此被視為探索地震前兆及監測地震與斷層活動之重要指標。

前人研究顯示地震會對水文系統產生影響，例如觀察到地表水出現河川流量增加的變化（Muir-Wood and King, 1993），或是在地下水觀測井出現地下水位的同震、震前或震後的水位變化等（Igarashi *et al.*, 1992）。我國於 1992 年起分三期共十七年推動新一代台灣地區地下水觀測網的建置計畫，以瞭解各地區水文地質狀況，並掌握地下水文資訊。這些地下水觀測井主要分布於台灣本島及外島的平原地區，少數分布於麓山帶。至 2005 年共設置了 617 口地下水觀測井，分布在 260 個觀測站，各觀測站之間距約五公里，井深從十幾公尺至三百多公尺，觀測站視當地水文地質架構設置一到五口分層觀測井每小時記錄一筆地下水位。

2000 年 6 月 11 日 2 時 23 分發生芮氏規模 6.7 的地震，震央位於台灣本島的中心，造成本島由南到北均感受到不同級數的震度，本研究的目的之一是藉由分析全台觀測井的同震地下水位變化，以瞭解 2000 年 6 月 11 日地震活動對地下水位變化的影響。由於坪頂一號觀測井的記錄出現了震前的異常水位變化，因此本研究的另一個目的是分析坪頂一號觀測井對於 1997 年至 2005 年地震事件相關的水位變化，統計分析其同震水位變化型態及震前異常出現頻率，並對其可能造成這些現象的成因進行解釋。

表 1.1 台灣地區 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 6.0 之地震(整理自中央氣象局)

編號	台灣時間	規模	震央位置
1	1997 年 7 月 15 日 19 時 05 分	6.1	宜蘭蘇澳地震站東方 67.5 公里
2	1997 年 10 月 12 日 02 時 24 分	6.1	基隆市地震站東偏南方 83.8 公里
3	1998 年 7 月 17 日 12 時 51 分	6.2	嘉義阿里山地震站西方 14.6 公里
4	1999 年 6 月 04 日 00 時 11 分	6.2	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 68.6 公里
5	1999 年 9 月 21 日 01 時 47 分	7.3	南投魚池地震站西南方 7.0 公里
6	1999 年 9 月 21 日 01 時 57 分	6.4	南投日月潭地震站東方 15.1 公里
7	1999 年 9 月 21 日 02 時 03 分	6.6	南投日月潭地震站南偏西方 10.4 公里
8	1999 年 9 月 21 日 02 時 16 分	6.7	南投日月潭地震站東方 14.6 公里
9	1999 年 9 月 21 日 05 時 46 分	6.6	嘉義阿里山地震站東北方 9.8 公里
10	1999 年 9 月 22 日 08 時 14 分	6.8	南投日月潭地震站東偏南方 16.2 公里
11	1999 年 9 月 22 日 08 時 49 分	6.2	南投日月潭地震站東南方 18.8 公里
12	1999 年 9 月 22 日 20 時 17 分	6.0	南投日月潭地震站南偏東方 18.0 公里
13	1999 年 10 月 22 日 10 時 18 分	6.4	嘉義市地震站北方 2.2 公里
14	1999 年 10 月 22 日 11 時 10 分	6.0	嘉義市地震站北方 4.0 公里
15	1999 年 11 月 02 日 01 時 53 分	6.9	花蓮玉里地震站東方 43.9 公里
16	2000 年 6 月 11 日 02 時 23 分	6.7	南投日月潭地震站東方 21.4 公里
17	2000 年 7 月 29 日 04 時 28 分	6.1	嘉義阿里山地震站東南方 17.1 公里
18	2001 年 6 月 13 日 21 時 17 分	6.3	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 80.8 公里
19	2001 年 6 月 14 日 10 時 35 分	6.3	宜蘭南澳地震站東方 19.0 公里
20	2001 年 12 月 18 日 12 時 03 分	6.7	花蓮市地震站東方 107.3 公里
21	2002 年 2 月 12 日 11 時 27 分	6.2	花蓮市地震站南偏東方 28.8 公里
22	2002 年 3 月 31 日 14 時 52 分	6.8	宜蘭南澳地震站東偏南方 55.8 公里
23	2002 年 5 月 15 日 11 時 46 分	6.2	宜蘭蘇澳地震站北偏東方 5.2 公里
24	2002 年 5 月 29 日 00 時 45 分	6.2	花蓮市地震站東方 80.9 公里
25	2002 年 8 月 29 日 01 時 05 分	6.0	台東蘭嶼地震站西北方 30.8 公里
26	2002 年 9 月 16 日 08 時 03 分	6.8	基隆市地震站東方 62.9 公里
27	2003 年 6 月 10 日 16 時 40 分	6.5	花蓮紅葉地震站東方 38.5 公里
28	2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分	6.4	台東成功地震站東南方 4.9 公里
29	2004 年 5 月 19 日 15 時 04 分	6.0	台東市地震站東方 23.4 公里
30	2004 年 10 月 15 日 12 時 08 分	7.1	宜蘭蘇澳地震站東方 102.9 公里
31	2004 年 11 月 08 日 23 時 54 分	6.6	花蓮市地震站東方 119.4 公里
32	2004 年 11 月 11 日 10 時 16 分	6.1	宜蘭南澳地震站東偏南方 44.3 公里
33	2005 年 6 月 02 日 00 時 20 分	6.0	宜蘭蘇澳地震站東方 22.2 公里
34	2005 年 9 月 06 日 09 時 16 分	6.0	花蓮市地震站東方 69.1 公里

1-2 研究資料來源

本研究使用的地下水位資料來自「台灣地區地下水觀測網計畫」中設置的觀測井水位記錄，2000年時具有水位記錄的區域為蘭陽平原、台北盆地、桃園中壢台地、台中地區、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原七個區域（圖 1.1）。井水位觀測主要採用水壓感測式水位計，將感測到之水壓轉換為電子信號，進而儲存於記錄器，井水位每一小時記錄一筆資料，精度為 1 公分

用以比對同震水位反應的地震資料來自中央氣象局的地震記錄，以及中央研究院 Broadband Array in Taiwan for Seismology (BATS) 系統提供的資訊。除了研究 2000 年 6 月 11 日芮氏規模 6.7 之地震外，另外篩選出 1997 年至 2005 年之間芮氏規模 5.5 以上、範圍在東經 $119^{\circ}10'$ 至 $122^{\circ}10'$ 和北緯 $21^{\circ}10'$ 至 $25^{\circ}10'$ 之間，深度在 300 公里內之地震（圖 1.2），作為分析使用的參考資料。本島陸地上的地震以 1999 年及 2000 年發生的較多，而其他年份發生的地震則多位在東部外海，呈南北條帶狀分布。

關於用以比對地下水位變化的雨量及氣壓資料，係來自中央氣象局氣象站逐時記錄，包括台北站、梧棲站、台中站、日月潭站、阿里山站、嘉義站、台南站、高雄站、大武站及宜蘭站等（圖 1.1），資料記錄的頻率和水位資料相同。另外還採用了玉山站、日月潭站、嘉義站的全球衛星定位系統（GPS）資料進行地表變形的比對。



圖 1.1 地下水觀測井及中央氣象局氣象站分布圖

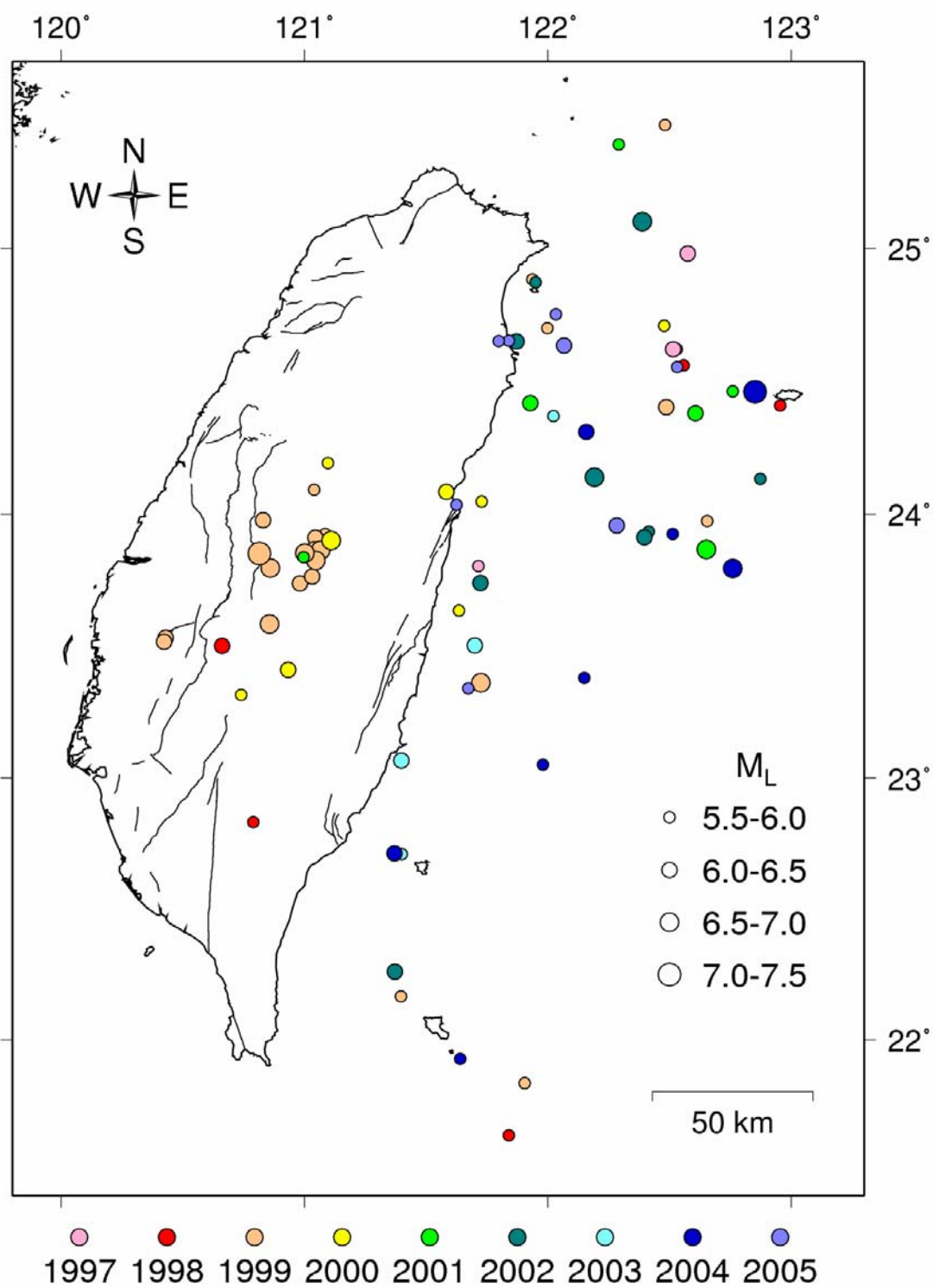


圖 1.2 台灣地區 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 5.5 之地震分布圖

1-3 研究方法

本研究首先蒐集 2000 年芮氏規模 6.7 地震相關之水文資訊，然後進行全台觀測井的同震水位反應分析，確認具同震水位反應觀測井位之分布情形，以及反應幅度與震源距之關係，以瞭解同震應變區域分布狀況。其次對同震水位反應較為敏感之濁水溪沖積扇，分析沿三條剖面不同深度的同震水位升降變化，以及此地震對於垂直方向單站多井之複井水位造成的影響，並對具同震反應的井位進行有無異常變化的分析。此外針對出現震前異常變化的坪頂一號井，分析井水位對 1997 年至 2005 年芮氏規模 5.5 以上地震之反應，以瞭解該井對於不同地震之反應是否具一致性或出現各種型態的水位變化。最後比對三個 GPS 測站於 2000 年的記錄，以檢視地震導致之地殼應變狀況。研究方法流程見圖 1.3。

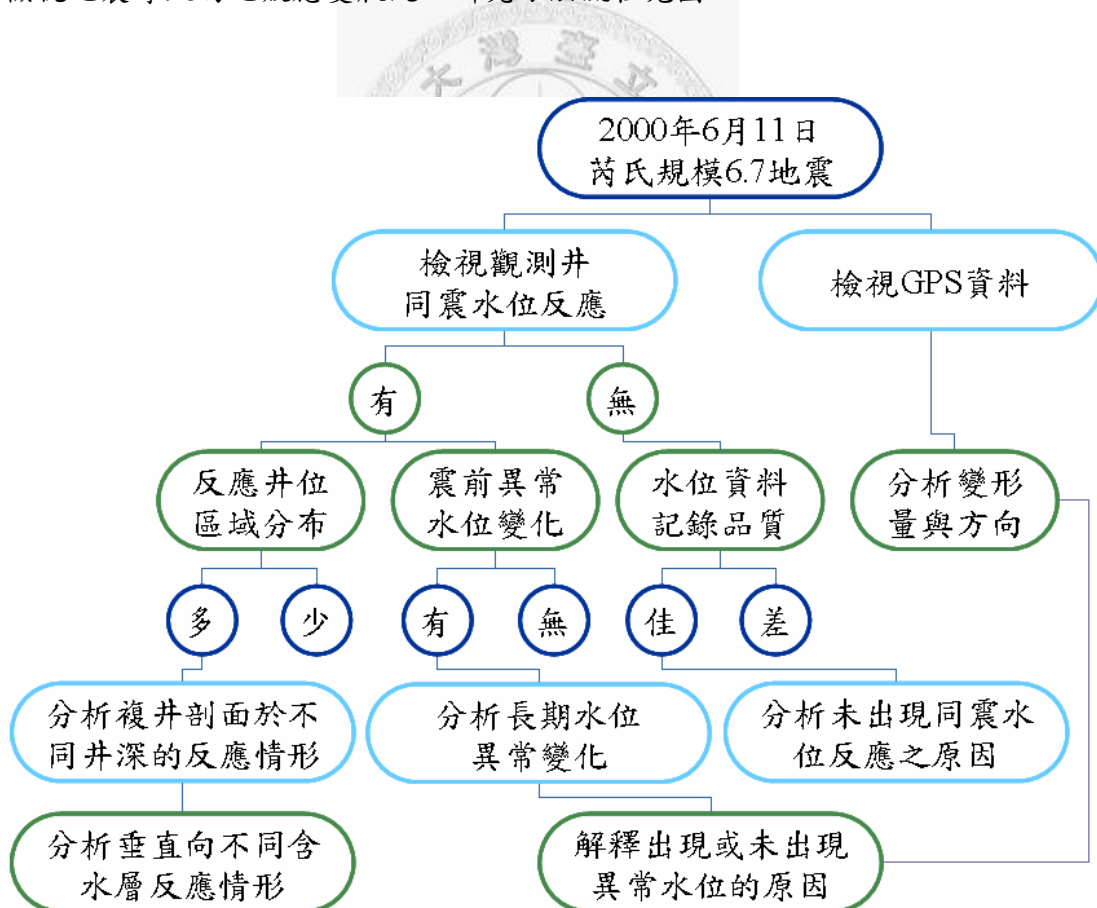


圖 1.3 研究方法流程圖

第二章 文獻回顧

美國於 1980 年代中期於加州 Parkfield 地區進行對地震的監測，包括地下水、大地測量、地球化學分析等儀器，以期獲得通過此區—推估活動週期為 22 年—斷層造成的地震前兆相關資訊，雖然未獲得任何規模 6.0 以上地震之前兆，但是累積了相關的監測資料及技術 (Roeloffs and Langbein, 1994)。日本地區的例子如：1974 年於 Izu-Hanto-oki 發生的地震，造成日本地區觀測井的同震水位變化，出現大致符合四象限之壓縮及伸張區的分布 (Wakita, 1975)；又如為期五年的長期地下水位監測中，偵測到 1992 年 2 月 2 日凌晨 4 時 4 分，於東京灣口深度 85 公里處發生規模 5.9 的地震，除了使地下水監測井出現同震水位反應外，經由 BAYTAP-G (Bayesian Tidal Analysis Program in a Grouping Method) 電腦程式進行數值運算濾除雜訊(地潮、大氣壓力、水位趨勢)後，顯現同震，及疑似震前的水位變化 (Igarashi *et al.*, 1992) (圖 2.1)。另一個日本的例子為日本遠野礦區 (Tono Mine) 附近的 16 口觀測井，此區被東西向 Tsukiyoshi 斷層橫越，長時間的水位記錄顯示，其中 SN-3 號觀測井具有敏感性 (圖 2.2)，但是此觀測井的敏感性並非一直顯著，而是具有變異性的，在 1997 年 3 月 16 日地震發生後，此口井對同震的反應次數減少了 (King *et al.*, 1999)。又如印度西部 Koyna-Warna 地震活動區域的地下水觀測井網，於 1997 至 2000 年間記錄了 40 次同震水位變化，此研究將地震規模及震源距為做為兩項記錄異常變化的參數 (Chadha and Pandey, 2003)。台灣地區也有進行地下水觀測井網與地震的研究，1999 年芮氏規模 7.3 的集集地震的案例顯示 (Chia *et al.*, 2008)，地震造成地表破裂處附近的觀測井，記錄的同震水位反應幅度較地表未破裂處大，因此可由這些觀測井的反應分析地表淺處應力場在空間上的分布；同站不同深度的井位出現不一樣的水位變化型態，其反應量的幅度取決於含水層的特性而非井位的深度。

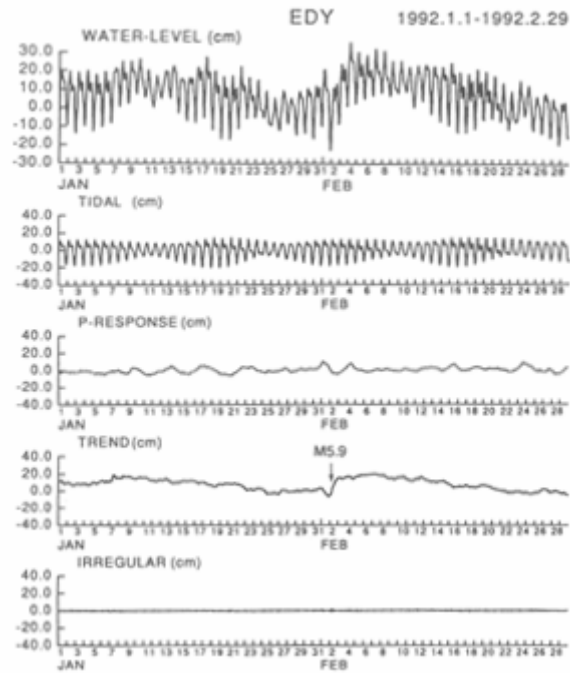


圖 2.1 伊豆半島上 EDY 監測井水位記錄之原始記錄、濾除地潮、濾除大氣壓力、水位趨勢及雜訊 (Igarashi *et al.*, 1992)

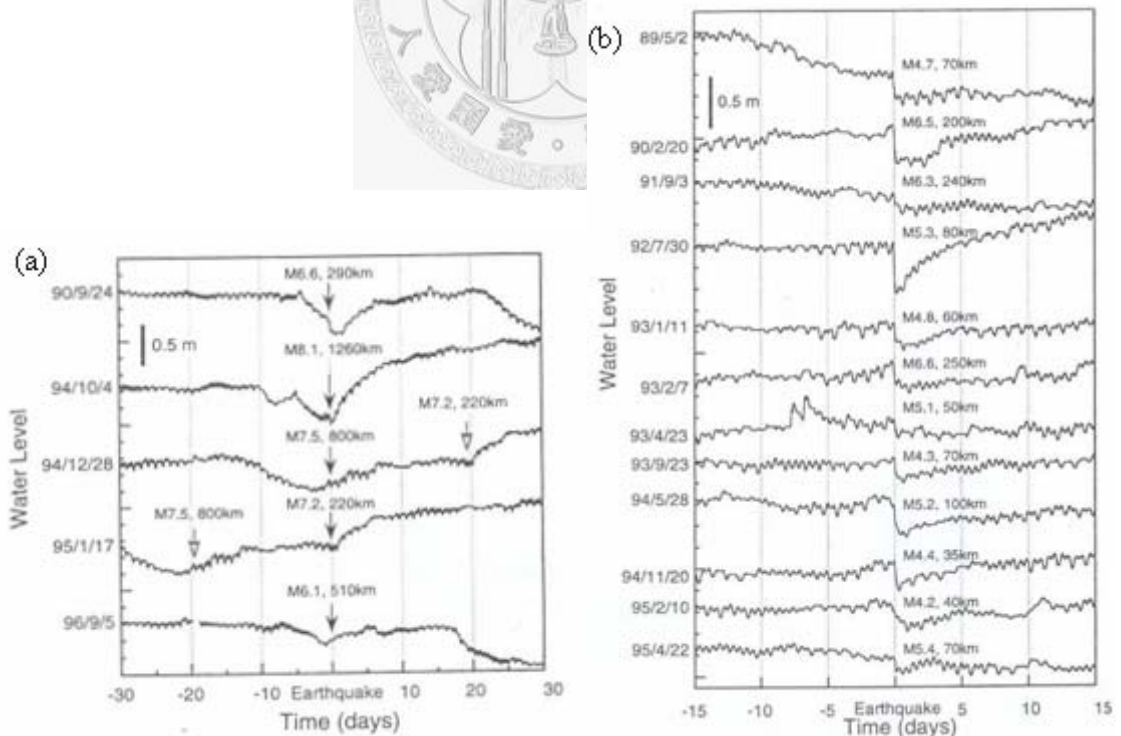


圖 2.2 遠野礦區 SN-3 號井 (a) 具有震前異常之同震水位記錄 (b) 同震水位記錄 (King *et al.*, 1999)

Roeloffs 於 1988 年的文章中提到，異常水位以下降較上升常出現，發生異常觀測井的位置多半集中在斷層帶附近；除了構造相關的因素會造成水文異常，其他如大氣壓力、降雨、地下水或石油噴發，也可能造成異常，需納入造成異常的考量因素中；另外雖然監測地下水位可以知道地震產生過程，但是需要基於良好的資料才行。因此對於異常水位，可以利用不同的資料交叉比對，盡量將可排除的因素濾除，包括自然現象的大氣壓力、降雨，或是如抽水、洗井、水質採樣等可以濾除的人為因素。

地震導致地下水位改變的理論有不同觀點的解釋，像是利用震波通過沉積物時造成顆粒重新排列使孔隙率產生的變化，影響到孔隙中水體的量而形成水位變化 (Montgomery, 2003)；或是探討當應力改變時，在不同邊界條件及參數設定下，對土壤壓密及孔隙水壓造成的變化 (Biot, 1941)；又如由地層中的裂隙在地震發生時張開或閉合，造成孔隙率的率增加或減少，使地下水產生水位的變化 (King *et al.*, 1999)。除此之外，斷層位移造成的應力或應變場重新分布，使位於近場的測站產生同震水位反應；也有使用簡單三維模型推導有限斷層面錯動造成應力—應變場變化，用來計算震後三維孔隙壓力的產生及消散 (Ge and Stover, 2000) (圖 2.3)。除了同震地下水位變化及其影響外，對於震前的異常變化也是相關研究關切的方向，King *et al.* (2000) 建議，地下水位的變化具潛力用來尋找震前斷層的移動或地殼變形。

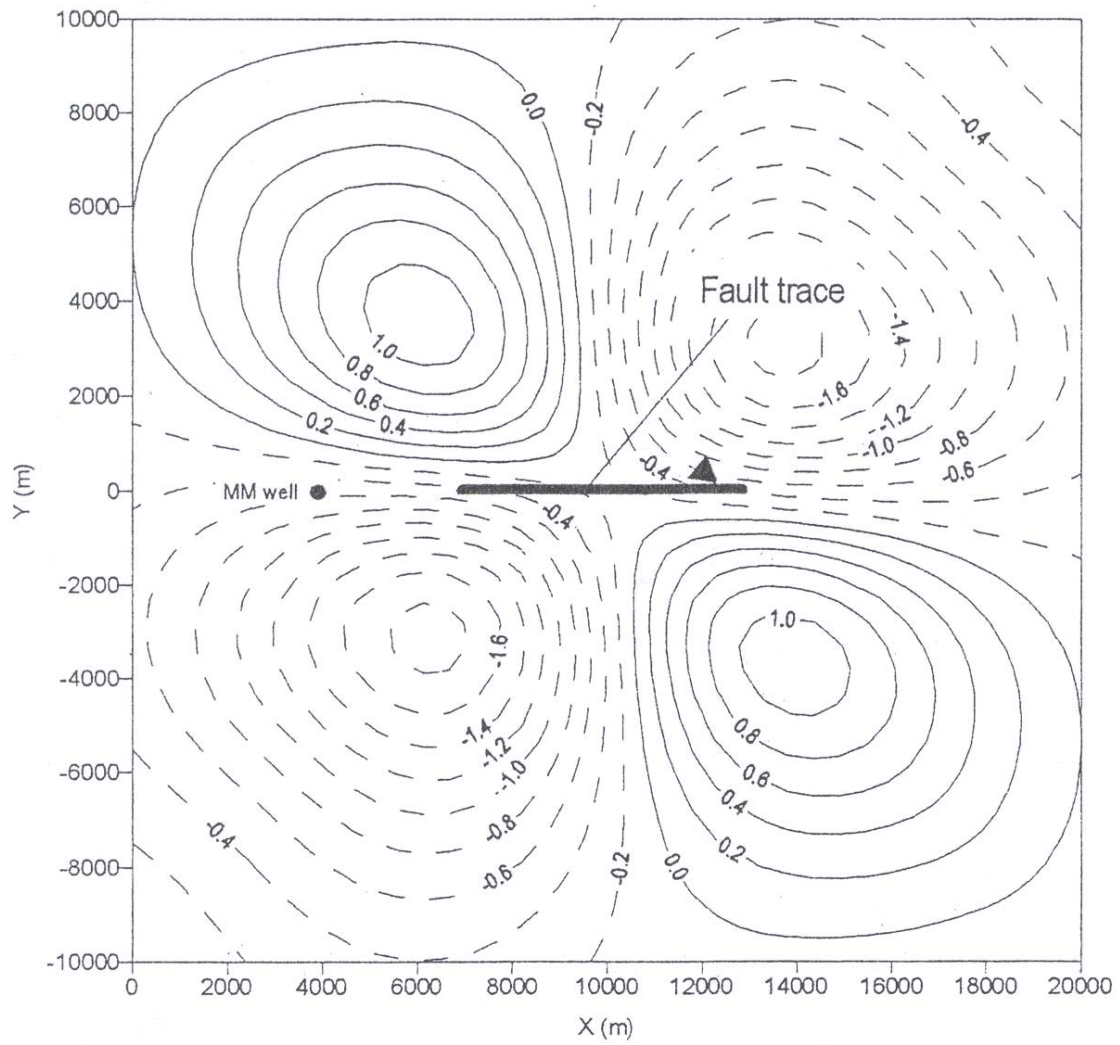


圖 2.3 平移斷層錯移 11 公分所造成的體積應變場 (Ge and Stover, 2000)

第三章 2000 年 6 月 11 日仁愛地震分析

3-1 仁愛地震

依據中央氣象局發布的地震報告，2000 年 6 月 11 日凌晨 2 時 23 分，發生了芮氏規模 6.7 的地震（圖 3.1）。震央位於北緯 23.90 度、東經 121.11 度，深度約 16.20 公里，位於台灣本島中心區域的南投縣仁愛鄉，大約在日月潭地震站東方 21.4 公里處，造成接近震央的中橫公路、埔霧公路產生落石坍方的災害。全台均感受到或強或弱的搖動，震度由靠近震央之南投縣名間鄉的 6 級、至南北兩端之台北市和高雄市的 3 級不等。由於此地震之震央位於南投縣仁愛鄉，所以在本研究中，稱呼此 2000 年 6 月 11 日芮氏規模 6.7 之地震為「仁愛地震」。參考 Broadband Array in Taiwan for Seismology (BATS) 系統的資訊，此地震斷層面解之一為走向 296.37、傾角 24.33，之二為走向 33.44、傾角 86.82，得到的解為略帶側向分量的逆斷層。

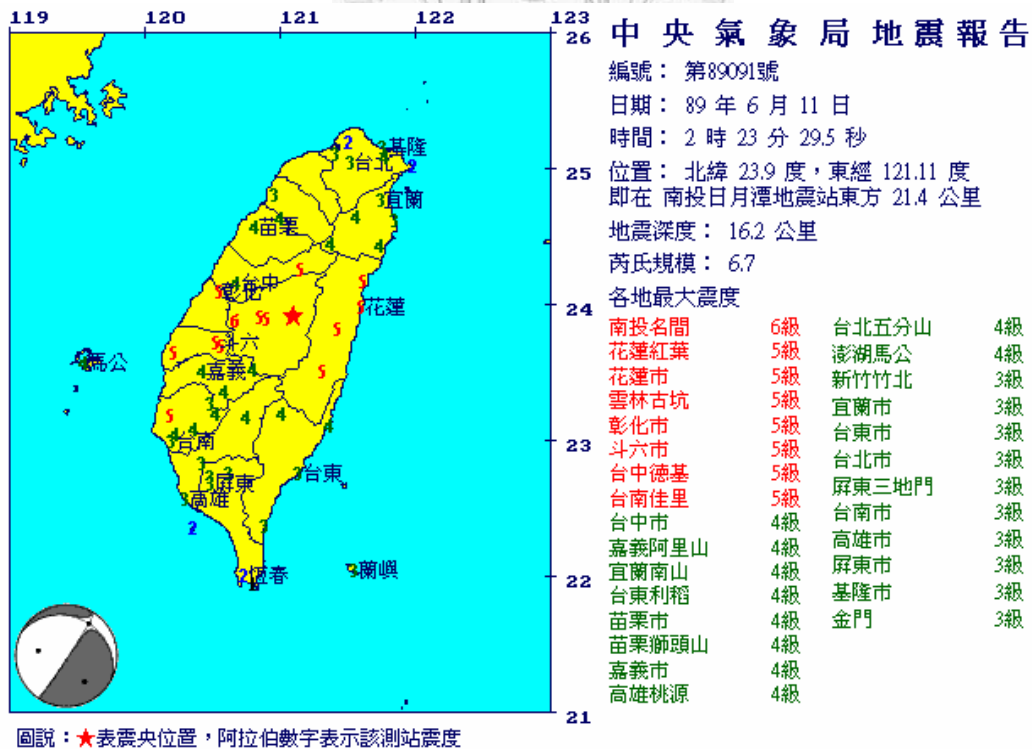


圖 3.1 中央氣象局發布之 2000 年 6 月 11 日地震報告

由震源距離對加速度作圖（圖 3.2），最大加速度出現在南投縣名間鄉，最遠的加速度記錄在屏東恆春，形成兩個明顯的端點，而散布於其中其他測站的資料，加速度呈現隨震源距增加而下降的趨勢。

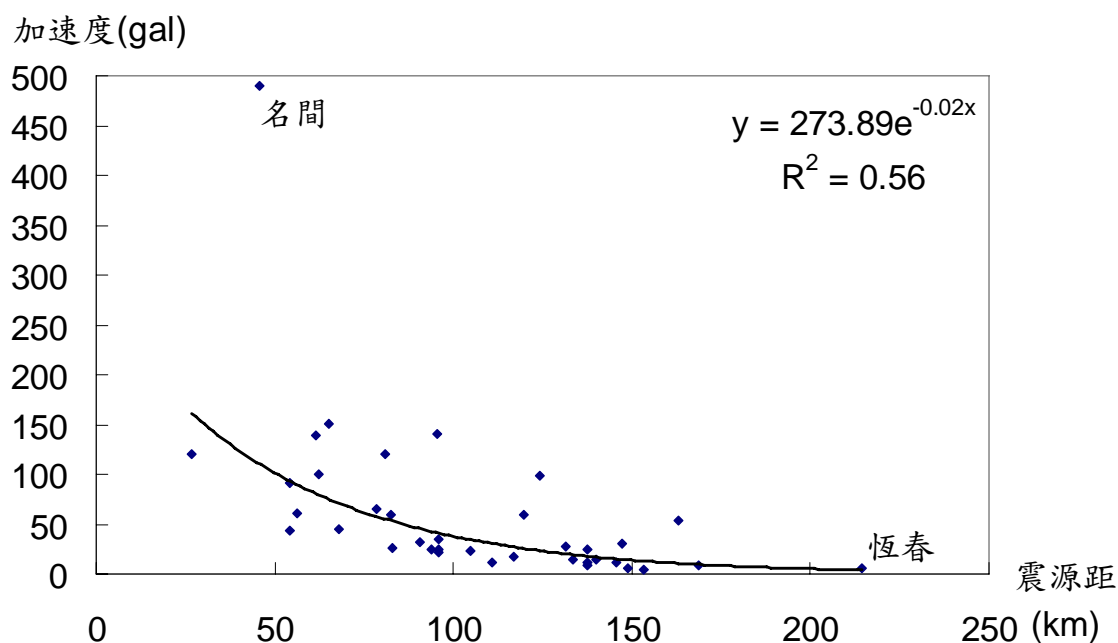


圖 3.2 震源距與加速度之關係圖

由中央氣象局位於中部地區玉山（圖 3.3）、日月潭（圖 3.4）、嘉義（圖 3.5）測站記錄到的全球衛星定位系統（GPS）資料進行分析，玉山站與震源距 50.1 公里，記錄南北及上下方向變化的資料於地震時無明顯的位移，記錄東西方向變化的資料則顯現了向東約 8 公釐的位移。日月潭站與震源距 26.9 公里，是三測站中離震源最近的，記錄南北方向變化的資料未出現位移情形，但是記錄東西方向變化的資料顯現向西約 20 公釐的位移，而上下方向變化的資料雖然在地震發生時無明顯位移，但比較地震前後的趨勢，則可知震後地表似略受到抬升。嘉義站與震源距 84.5 公里，記錄南北及上下方向變化的資料於地震時無明顯的位移，記錄東西方向變化的資料則顯現了向東約 7 公釐的位移。可知在南北向及地表垂直方向的變化較不明顯，而東西向的變化在日月潭站最明顯，為向西移動了約 20 公釐，玉山及嘉義站的位移較不明顯，但是具有略為向東位移的跡象。

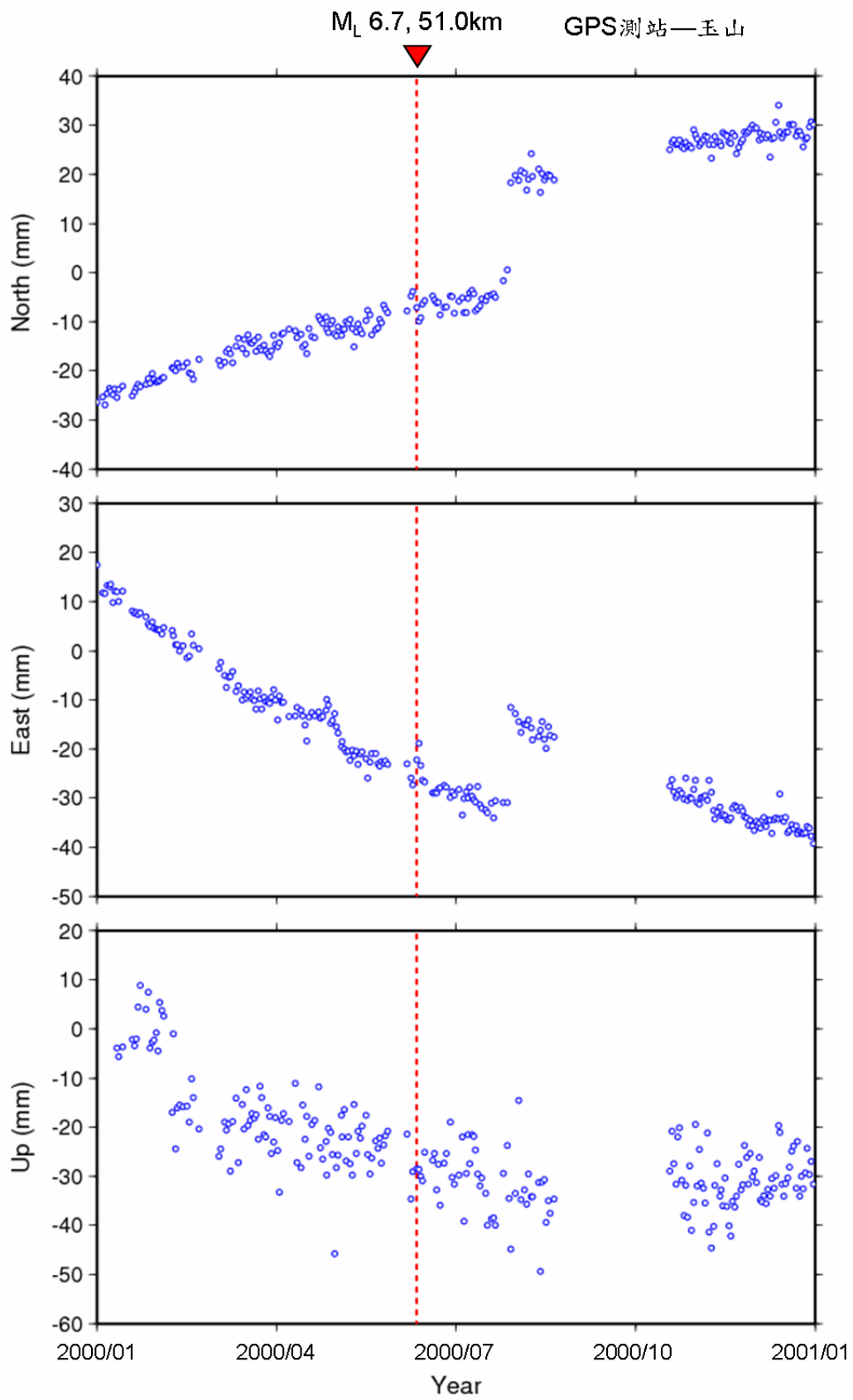


圖 3.3 玉山 GPS 測站 2000 年記錄資料

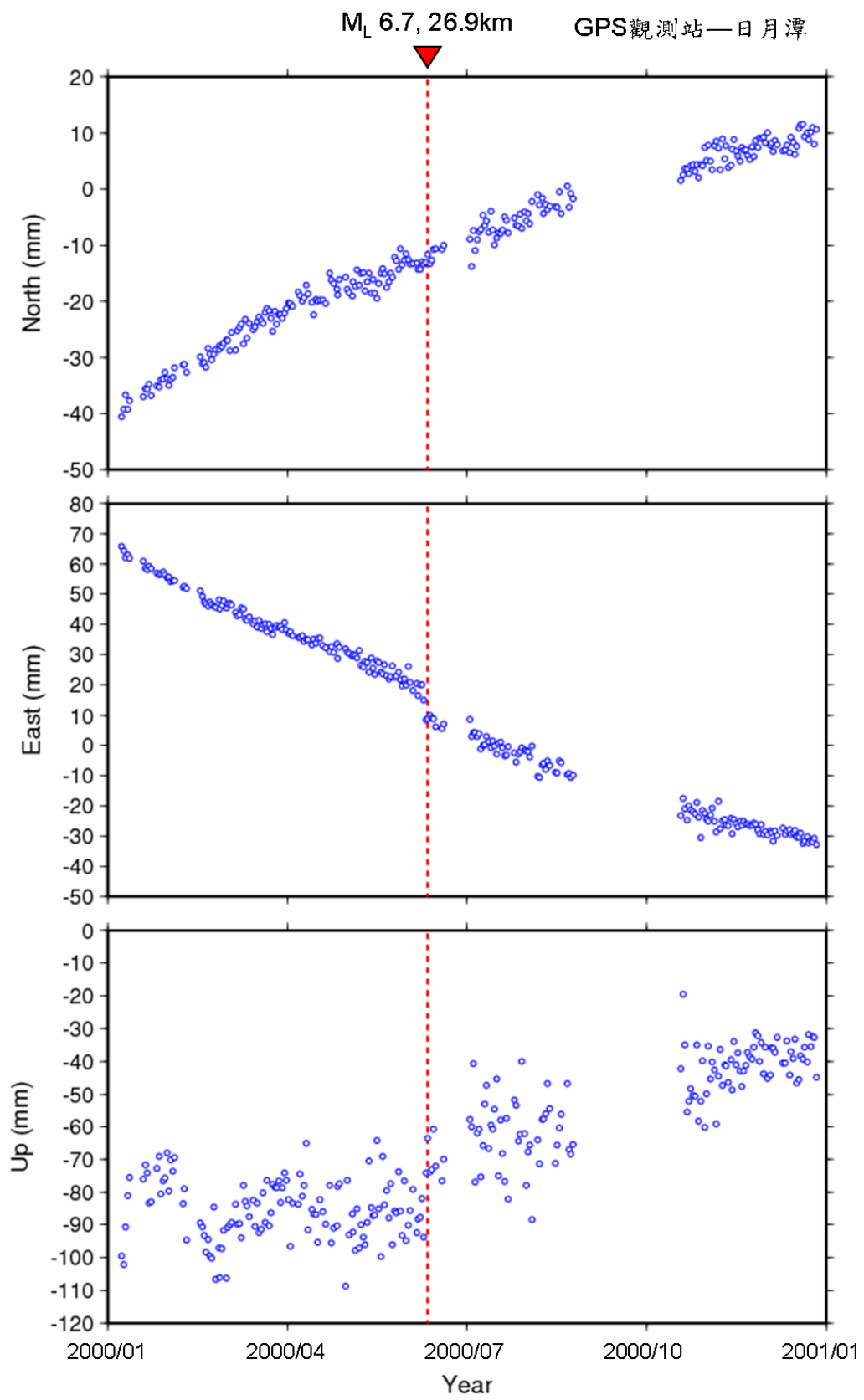


圖 3.4 日月潭 GPS 測站 2000 年記錄資料

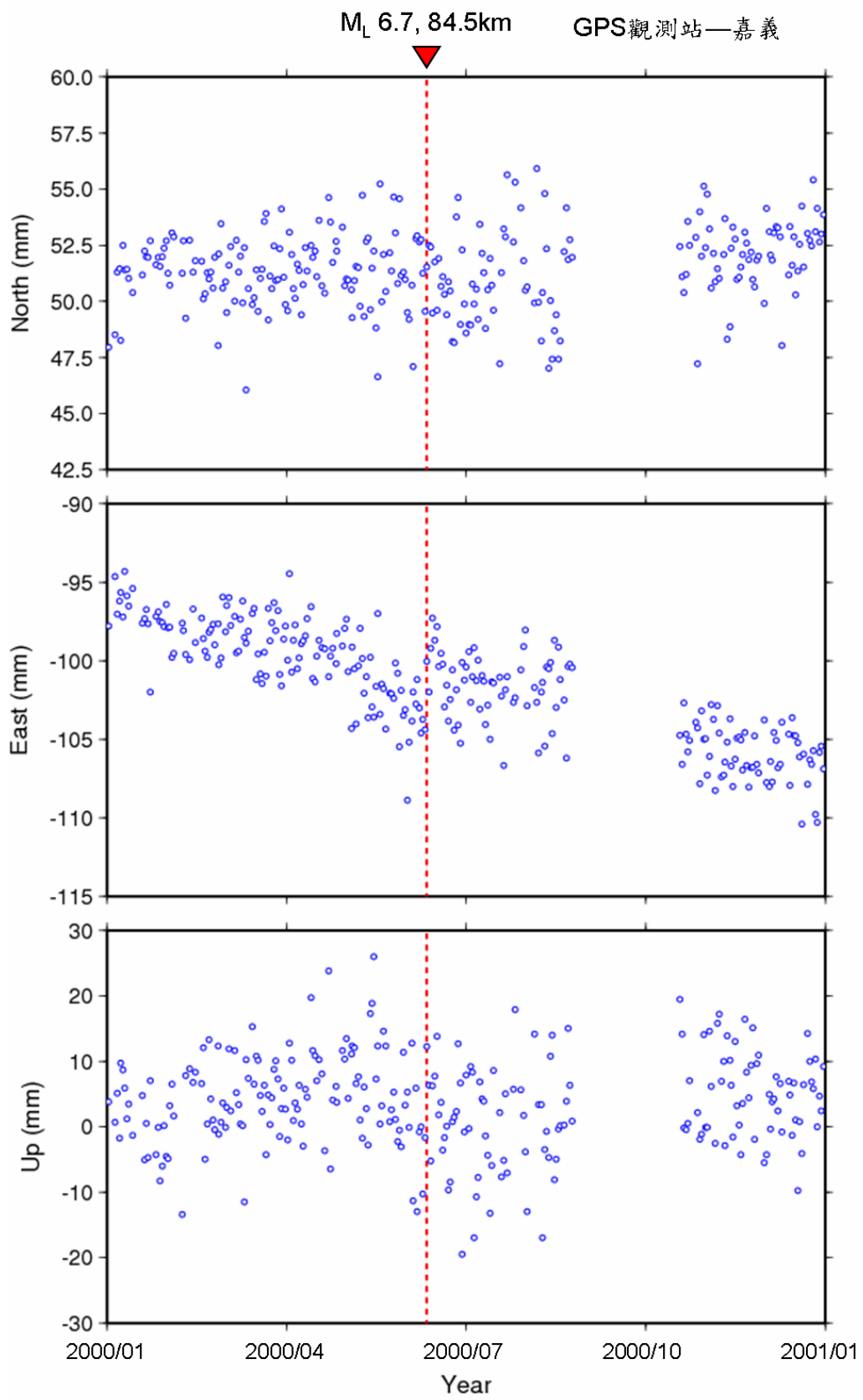


圖 3.5 嘉義 GPS 測站 2000 記年錄資料

3-2 觀測井之同震水位反應及區域分布

仁愛地震發生時，全台建置的觀測井共有 514 口，其中 410 口井當時正常收錄水位資料，這些井分布在 178 個觀測站中。其中 126 口深度不等的觀測井、82 個觀測站出現同震水位反應，未出現同震水位反應的井位為 284 口。

具水位記錄之觀測井區域分別台北盆地、桃園中壢台地、台中地區、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原及蘭陽平原。其中台北盆地、桃園中壢台地、台中地區、蘭陽平原四區使用中的觀測井數目不多，各為 7 口(5 站)、2 口(2 站)、2 口(2 站)及 8 口(6 站)，遠不及西南三區濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原之 189 口(76 站)、64 口(27 站)及 138 口(60 站)，觀測井口數均超過 60 口的情形(表 3.1)。濁水溪沖積扇是所有區域之中觀測井站數目最多的區域，同震水位反應井數也是最多；嘉南平原觀測井同震水位反應觀測井數量居次；桃園中壢台地則是唯一沒有任何同震反應的區域。

記錄到同震水位反應的 126 口觀測井中，112 口出現水位上升變化、14 口出現水位下降變化；出現反應的 82 站(126 口)中，29 站為複井反應，24 站為單站所有井位均上升、1 站為單站所有井位均下降、4 站為單站不同井位的反應包含了升和降(表 3.2)。仁愛地震造成的同震水位反應幾乎都是上升，以濁水溪沖積扇最明顯，下降出現最多的是在嘉南平原，屏東平原反應同震水位變化的井位雖不多，但具反應的井位均上升，宜蘭平原、台北盆地、台中地區各只有一口井出現反應(圖 3.6)。

表 3.1 觀測井同震水位反應統計表

區域	總井數	反應井數	同震上升	同震下降	反應百分比
蘭陽平原	8	1	0	1	12.50
台北盆地	7	1	0	1	14.29
桃園中壢台地	2	0	0	0	0.00
台中地區	2	1	0	1	50.00
濁水溪沖積扇	189	98	94	4	51.85
嘉南平原	64	16	9	7	25.00
屏東平原	138	9	9	0	6.52
總計	410	126	112	14	30.73

表 3.2 觀測站同震水位反應統計表

區域	總站數	反應 站數	複井反 應站數	複井 上升	複井 下降	複井有 升有降	反應 百分比
蘭陽平原	6	1	0	0	0	0	16.67
台北盆地	5	1	0	0	0	0	20.00
桃園中壢台地	2	0	0	0	0	0	0.00
台中地區	2	1	0	0	0	0	50.00
濁水溪沖積扇	76	57	26	24	0	2	75.00
嘉南平原	27	13	3	0	1	2	48.15
屏東平原	60	9	0	0	0	0	15.00
總計	178	82	29	24	1	4	46.07

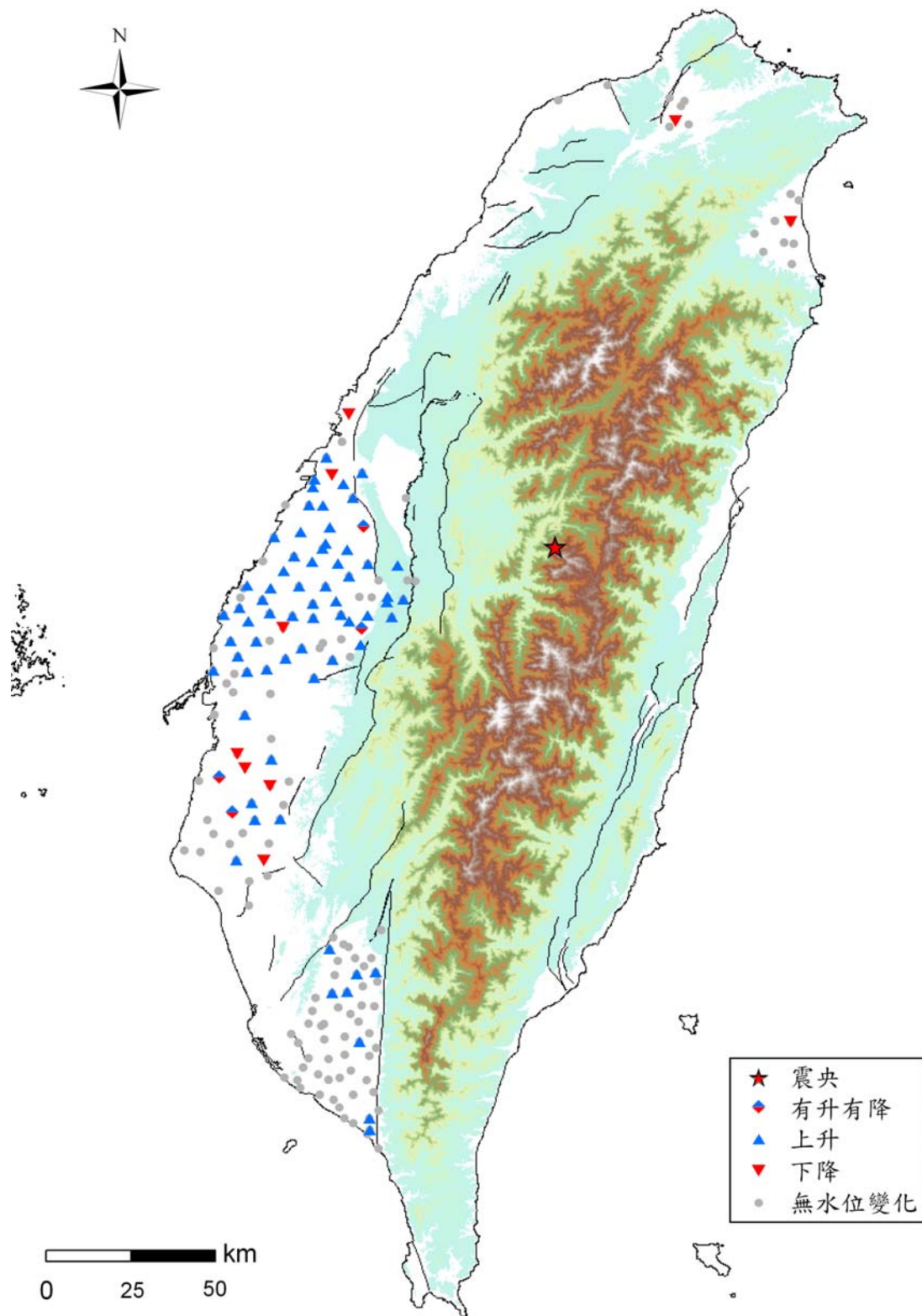


圖 3.6 仁愛地震全台觀測站同震水位反應分布圖

3-3 地下水位同震反應型態

地下水位的同震水位反應係指，在地震發生時觀測井的水位出現異於常態之變化。在時水位記錄中所認定的同震水位變化，包含了震前整點至地震發生時的震前水位記錄、震後至下個整點的震後水位記錄以及同震發生時的水位反應。由此可知，2000年6月11日2時23分仁愛地震的同震水位變化，係指當日凌晨2時至3時之間的水位差異，包括了2時至2時23分的震前水位以及2時23分至3時的震後水位。本研究進行同震水位變化分析時，將觀測井站附近雨量站的降雨一併納入考量，比對雨量是否對水位造成影響。

同震反應型態可以分為同震水位上升及同震水位下降的變化。仁愛地震發生時，最大的同震上升變化發生在濁水溪沖積扇的石榴一號井，上升幅度達71公分（圖3.7）；最大的同震下降變化發生在嘉南平原的新市一號井，下降幅度為11公分（圖3.8）。然而有些含水層的透水性較低，震後水位所需要的反應時間比較長，造成震後幾小時內觀測井的水位逐漸上升或下降，形成時水位記錄中的同震水位反應時間超過一小時才完成之現象（圖3.9）。

部分出現反應的井位在同一站中，形成單站多井的複井反應，因此可以比較位在同一位置但不同深度的井，不同的同震水位反應型態。在不同含水層中，同震及震後的水位反應不同，自由含水層中同震造成的水位變化量，如圖3.10中濁水溪沖積扇中荊桐站一號井和二號井的水位變化十分類似，同震水位均為向上變化，以二號井的變化量較大，而震後水位大約過半天之後會回復到原本趨勢。受壓含水層的震後水位回復需要比較長的時間才能回到原本水位趨勢，如圖3.11中位在嘉南平原的港尾站一號井和三號井，較淺的一號井出現同震水位上升17公分、較深的三號井出現同震水位下降8公分的現象。

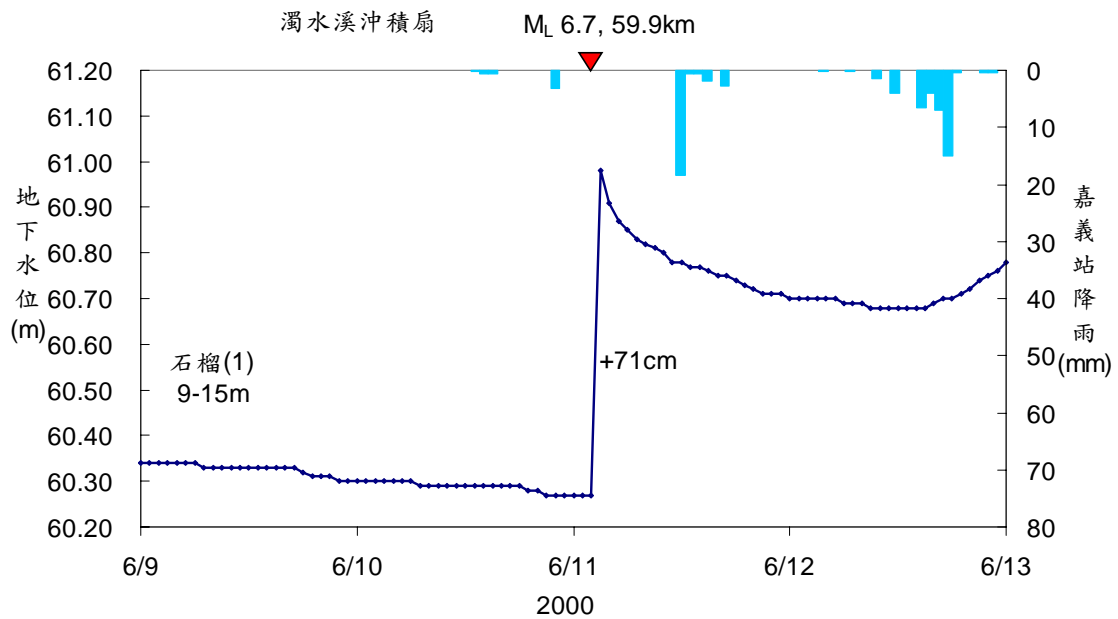


圖 3.7 石榴一號井同震水位變化

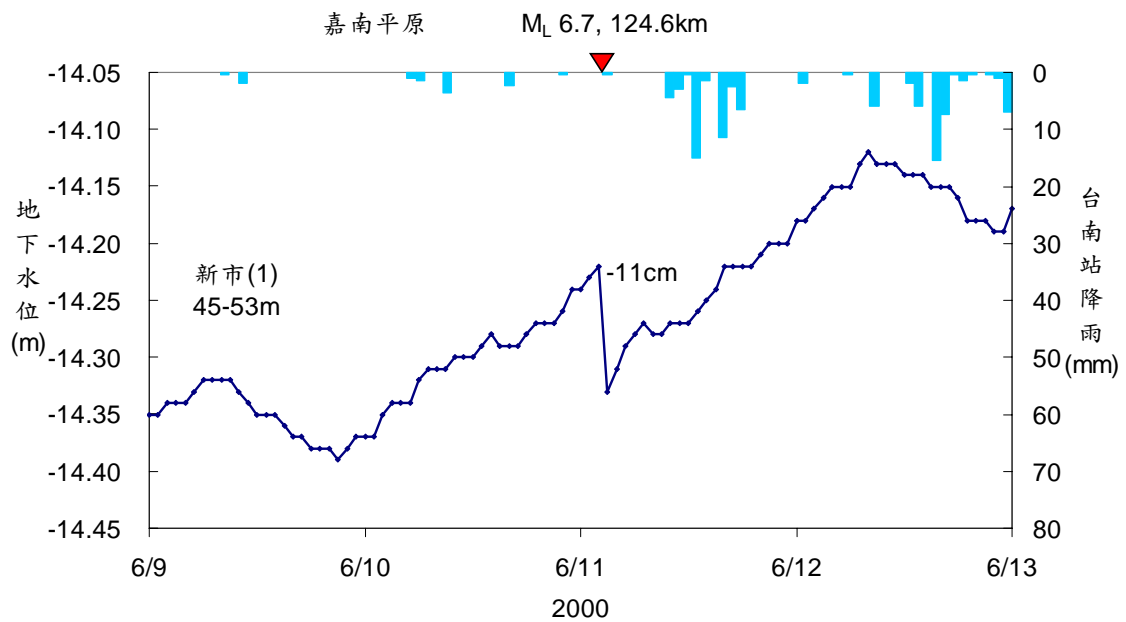


圖 3.8 新市一號井同震水位變化

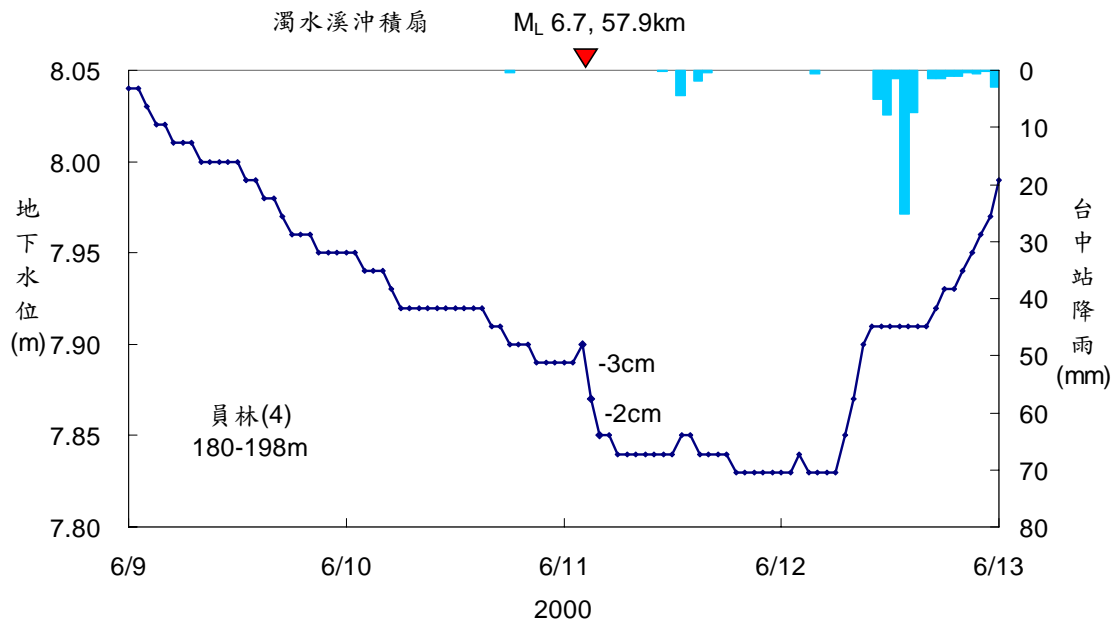


圖 3.9 員林四號井同震水位變化

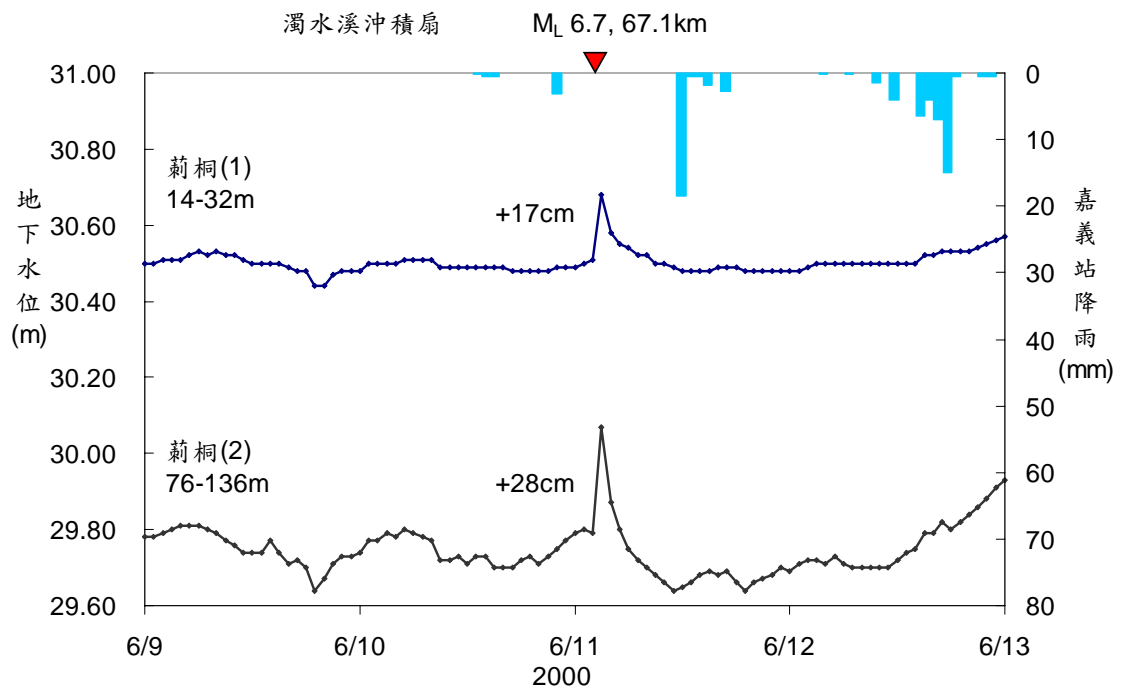


圖 3.10 荊桐站同震水位變化

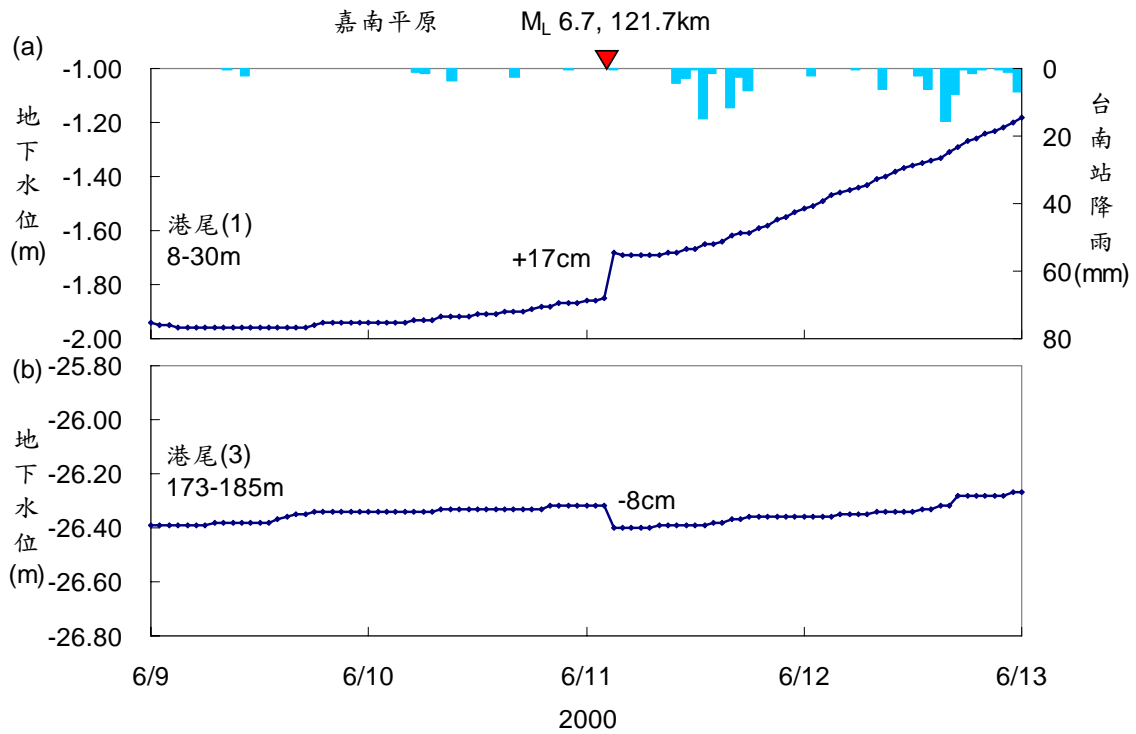


圖 3.11 港尾站同震水位變化 (a) 港尾一號井 (b) 港尾三號井

3-4 同震地下水位變化與震源距離之關係

於仁愛地震出現同震水位變化的觀測井，與震源的距離大約在 40 至 180 公里間（圖 3.12）。同震水位上升的井位中，可以觀察到隨著震源距增加，同震變化減小的趨勢，80 公里內的反應井位較多，而且反應量也較大；但是在同震水位向下降的井位中，並沒有觀察到這個趨勢，反而是在 110 公里至 130 公里區間中出現反應量較大的同震下降變化井位。

將同震水位出現變化的觀測井對比至區域分布（圖 3.13），可知濁水溪沖積扇、嘉南平原及屏東平原之觀測井位分布範圍較廣，其餘區域共僅有零星三口觀測井出現反應。濁水溪沖積扇觀測井在同震上升及下降變化，均具有與震源愈近反應幅度愈大的情形，同震上升部分尤為明顯；嘉南平原及屏東平原的觀測井則不然，同震反應的方向及幅度大小與震源距關係無明顯遞減趨勢，震源距 100 至 180 公里內出現同震反應的觀測井，水位變化幅度以 10 公分內較多。

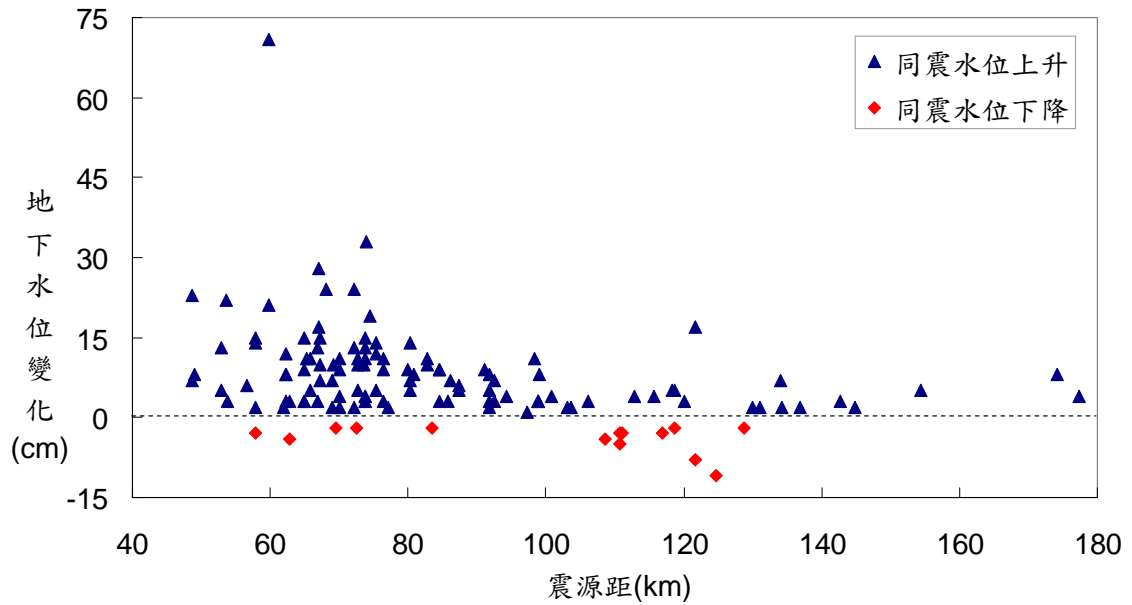


圖 3.12 同震地下水水位變化與震源距離關係圖

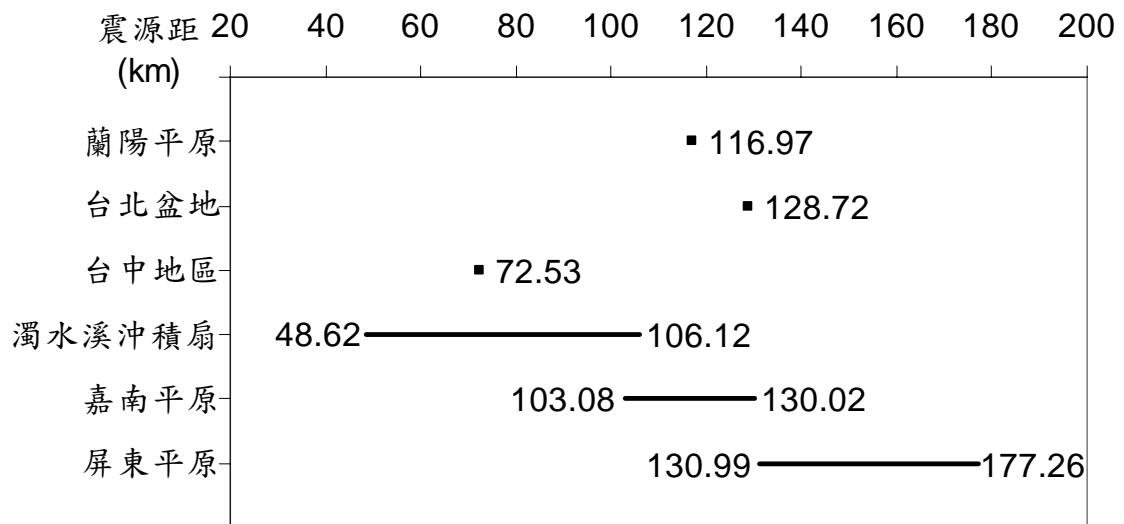


圖 3.13 震源距與觀測井區域對照圖

3-5 濁水溪沖積扇三條剖面同震反應量的比較

參考台灣地區地下水觀測網第一期計畫—濁水溪濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告（中央地質調查所，1999）中的水文地質剖面，可將濁水溪沖積扇中出現同震水位變化的複井觀測站連出三條剖面，以深入瞭解同震地下水位變化在垂向及側向上的分布及其變化趨勢。這三條剖面分別是 A-A'、B-B'及 C-C'，A-A'、B-B'剖面位在濁水溪以北，C-C'剖面位在濁水溪以南（圖 3.14）。觀測站的高程基本上東高西低，高程差可超過 200 公尺，震源距介於 45 公里至 100 公里，同震水位變化幅度由上升 71 公分至下降 4 公分不等。

沿著剖面 A-A'的觀測井由東向分別為：員林四口、溪湖三口、好修四口、文昌四口、趙甲三口、芳苑三口，總共六站廿一口。同震反應情況基本上是淺處的變化量較大，井篩在深度 120 公尺之內的井位具最佳的反應，均為同震水位上升且反應量明顯，但是較深的井位，同震反應量較少。建置在含水層一的文昌一號井，同震反應量明顯。各觀測井在含水層二之一和二之二都建置了觀測井，相對而言，含水層二之一的同震反應略大於含水層二之二。含水層三的觀測井同震反應具多樣化，除了上升變化外，也出現無反應及同震下降的情況，而且反應量均小於含水層二。含水層四只有一口好修四號井，其同震變化量比含水層三的反​​應更小（圖 3.15）。沿剖面 A-A'的觀測站及其震央距、井篩深度及同震變化量見表 3.3。

沿著剖面 B-B'的觀測井由東向西分別為：新光二口、田尾二口、溪州三口、合興三口、竹塘二口、潭墘二口，總共六站十四口。同震反應情況基本上是井篩位於深度 50 至 120 公尺之間的井位具最佳的反應，均為同震水位上升且反應量明顯，但是淺處及較深處的井位，同震反應量較少。建置在含水層一的井位，除了合興一號井沒有反應，其餘井位均具同震反應但是反應量不大。溪州、竹塘、潭墘三站分別於含水層二之一及二之二建置一至二口不等的井篩，含水層二為同震反應最明顯的一層。於含水層三建置井篩的站為田尾、合興，同震變化量

較含水層一明顯（圖 3.16）。沿剖面 B-B' 的觀測站及其震央距、井篩深度及同震變化量見表 3.4。

沿剖面 C-C' 的觀測井由東向西分別為：觸口二口、石榴二口、東和三口、虎溪四口、荊同二口、港後四口、豐榮三口、興化三口、安南二口、明德四口，總共十站廿九口。剖面 C-C' 未出現整體上一致之同震趨勢，以港後站和荊桐站做為畫分點，港後站以西五站的同震反應和剖面 A-A' 類似，同震反應量與深度呈反比；至於荊桐站以東五站的同震反應基本上較類似剖面 B-B' 的情形，即次淺的井位同震反應最佳，但是石榴站及東和站例外。石榴站具有仁愛地震最大的同震水位反應：同震水位上升 71 公分，此反應發生在深度不超過 25 公尺深的石榴一號井；東和站則為此剖面唯一具有同震水位反應下降的站，下降發生在東和一號井。剖面 C-C' 為具有最多井位（六口）之井篩穿過二層或二層以上含水層的剖面（圖 3.17）。沿剖面 C-C' 的觀測站及其震央距、井篩深度及同震變化量見表 3.5。

綜合 A-A'、B-B' 及 C-C' 三條剖面的結果，深度位在 50 至 150 公尺之間的井位通常具有最佳反應，而離震源較近的觀測站會比距離較遠的同震反應量明顯。此深度正好是濁水溪沖積扇上較厚且透水性較佳的一層含水層，其組成物以沖積扇上由山麓地帶區來的沉積物為主。

圖 3.15、圖 3.16 及圖 3.17 中之圖例，三角形表示同震水位上升、菱形表示同震水位下降、短橫標示出井篩範圍之頂部及底部，同震水位變化標示於井篩範圍之中點處，其圖形大小示意同震反應量的變化幅度大小。

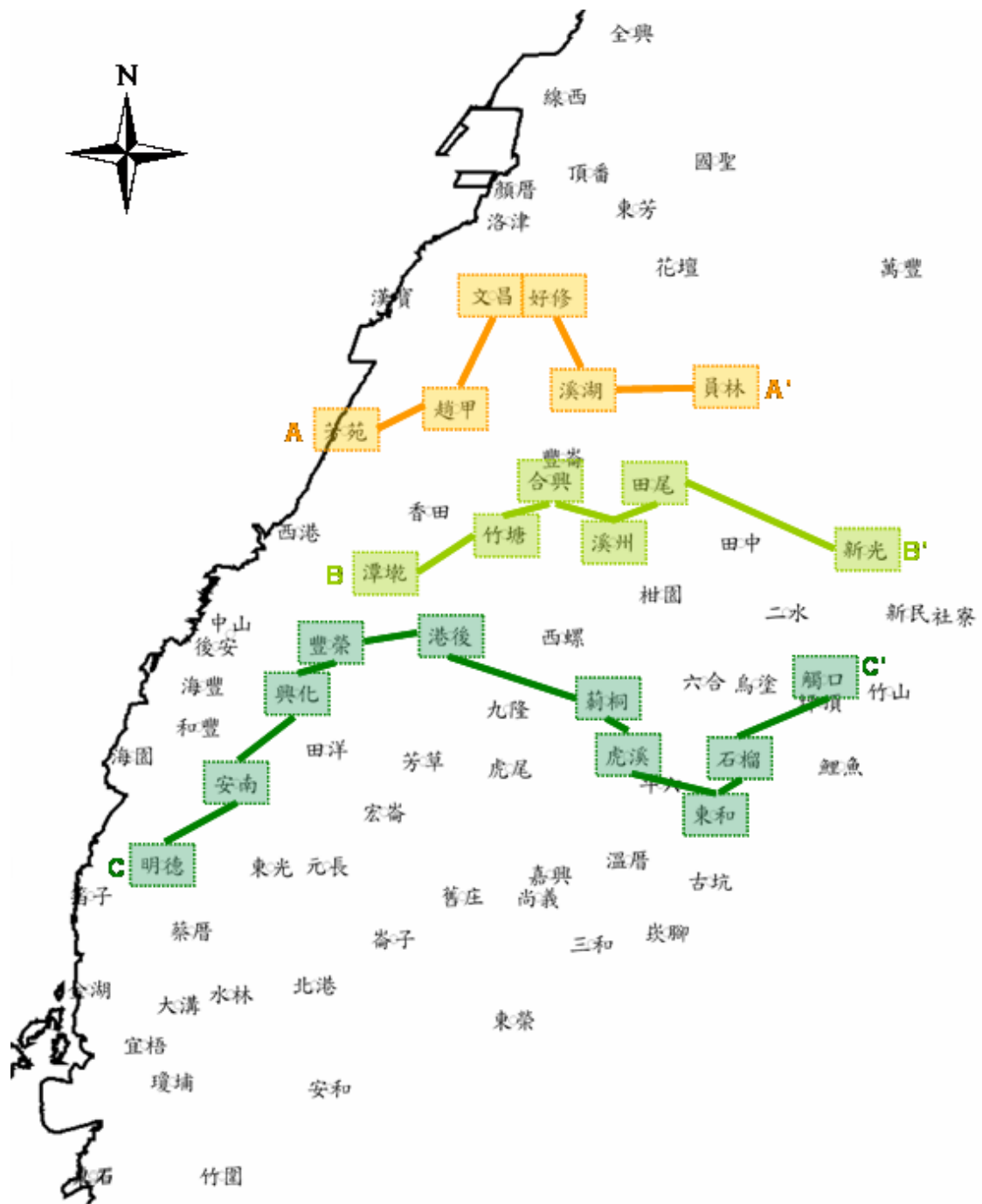


圖 3.14 濁水溪沖積扇同震水位剖面圖

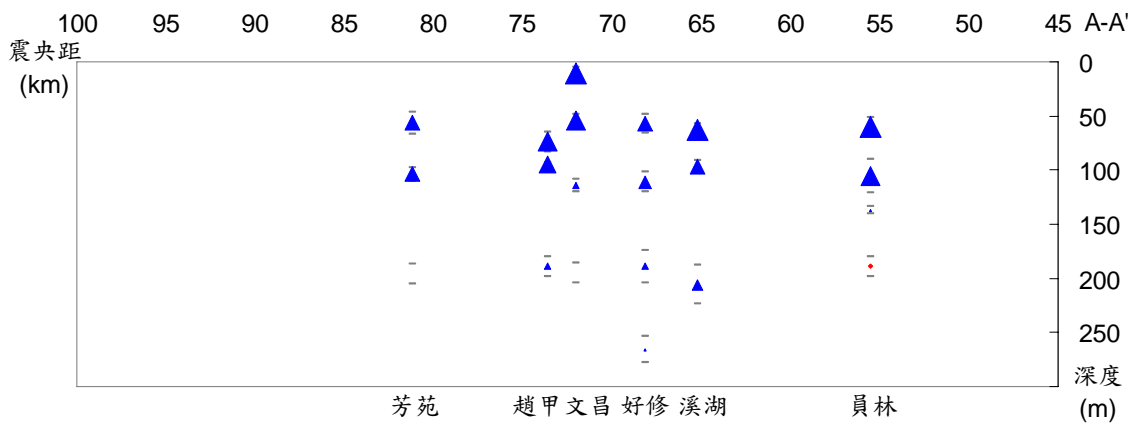


圖 3.15 沿剖面 A-A' 觀測站之同震水位變化分布

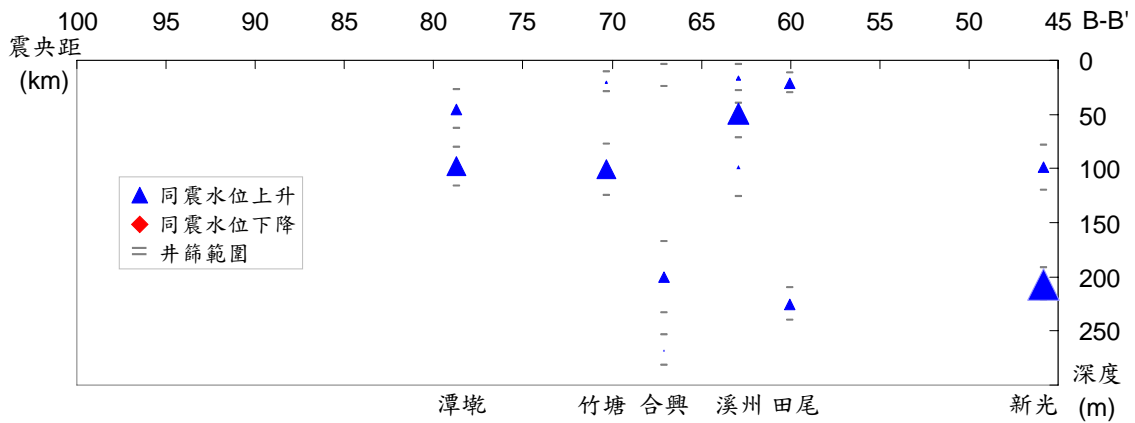


圖 3.16 沿剖面 B-B' 觀測站之同震水位變化分布

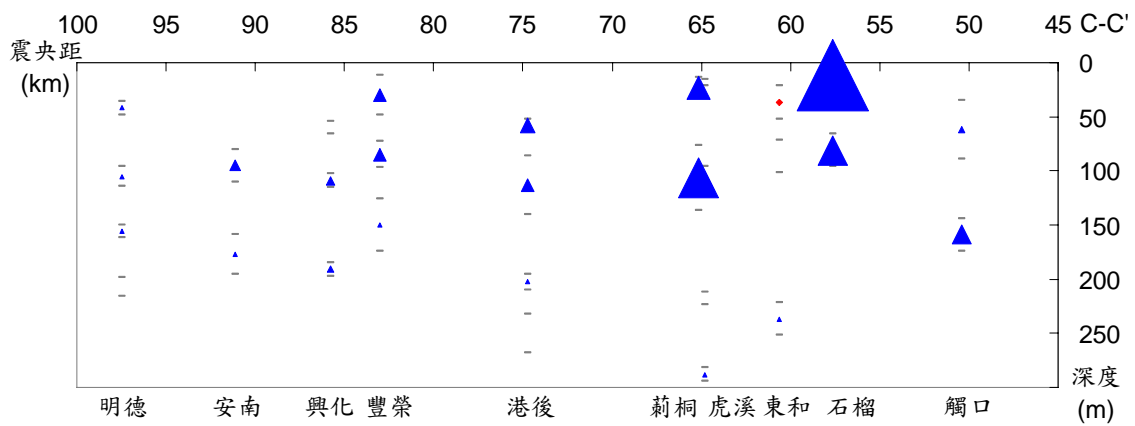


圖 3.17 沿剖面 C-C' 觀測站之同震水位變化分布

表 3.3 剖面 A 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量

觀測站	芳苑		趙甲		文昌		好修		溪湖		員林	
震央距 (km)	81.18		73.62		72.03		68.13		65.23		55.54	
高程(m)	4.11		12.3		7.48		10.31		18.78		26.25	
井號	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)
1	46~58 61~67	10	65~74 77~83	14	5~17	0	48~54 60~66	11	57~69	15	51~69	15
2	98~110	11	97~115	12	18~60	15	102~108 114~120	9	91~103	10	90~96 102~121	14
3	187~205	0	180~198	5	108~120	11	174~186 192~204	4	188~224	7	134~140	2
4					186~204	4	254~278	2			180~198	-3

表 3.4 剖面 B 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量

觀測站	潭墘		竹塘		合興		溪州		田尾		新光	
震央距 (km)	78.71		70.3		67.12		62.93		60.07		45.84	
高程(m)	13.3		21.1		21.58		33.63		32.56		222.02	
井號	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)
1	27~63	7	11~29	2	4~24	0	4~28	3	12~30	8	78~120	23
2	80~116	14	77~125	13	167~233	7	40~58	15	210~240	8	192~198 204~210 216~222	7
3					254~282	2	72~90 102~126	3				

表 3.5 剖面 C 的觀測站、震央距、井篩深度及同震變化量

觀測站	明德		安南		興化		豐榮		港後	
震央距 (km)	97.46		91.1		85.78		83.01		74.75	
高程(m)	5.86		6.26		8.22		8.72		18.09	
井號	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)
1	36~48	3	80~110	7	54~66	0	12~48	9	52~64	11
2	96~114	3	159~195	3	103~115	6	73~97	9	86~98 104~116 122~140	9
3	150~162	3			185~197	5	126~174	3	195~210	3
4	198~216	0							232~244 250~268	0
觀測站	荊桐		虎溪		東和		石榴		觸口	
震央距 (km)	65.15		64.8		60.63		57.65		50.39	
高程(m)	37.5		36.01		75.47		66.66		113.2	
井號	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)	井篩 深度 (m)	同震 變化 (cm)
1	14~32	17	15~21	0	21~33 39~52	-4	9~15	71	35~53 71~89	5
2	76~88 94~106 112~124 130~136	28	96~123	13	72~102	0	66~84 90~96	21	144~174	13
3			212~224	0	222~252	3				
4			282~294	3						

3-6 複井水位分析

仁愛地震發生時，具有單站多口反應之複井站都出現在西南平原，其中濁水溪沖積扇有 26 站、嘉南平原 3 站（表 3.6）。最接近震央的複井站為新光站，震源距約為 49 公里，而最遠的港尾站之震源距達 122 公里。

表 3.6 濁水溪沖積扇及嘉南平原出現同震水位變化之複井站

濁水溪沖積扇		嘉南平原	
站名 (井位)	震源距 (km)	站名 (井位)	震源距 (km)
新光 (1)(2)	48.6	竹塘 (1)(2)	72.1
觸口 (1)(2)	52.9	線西 (2)(3)(4)	72.8
員林 (1)(2)(3)(4)	57.9	洛津 (1)(2)(3)	73.8
石榴 (1)(2)	59.9	文昌 (2)(3)(4)	73.8
田尾 (1)(2)	62.2	趙甲 (1)(2)(3)	75.4
東和 (1)(3)	62.8	港後 (1)(2)(3)	76.5
溪州 (1)(2)(3)	65.0	潭墘 (1)(2)	80.4
東芳 (1)(2)	65.8	芳苑 (1)(2)	82.8
虎溪 (2)(4)	66.8	豐榮 (1)(2)(3)	84.6
荊桐 (1)(2)	67.1	興化 (2)(3)	87.3
溪湖 (1)(2)(3)	67.2	東光 (2)(3)(4)	91.8
合興 (2)(3)	69.1	安南 (1)(2)	92.5
好修 (1)(2)(3)(4)	70.0	明德 (1)(2)(3)	98.8

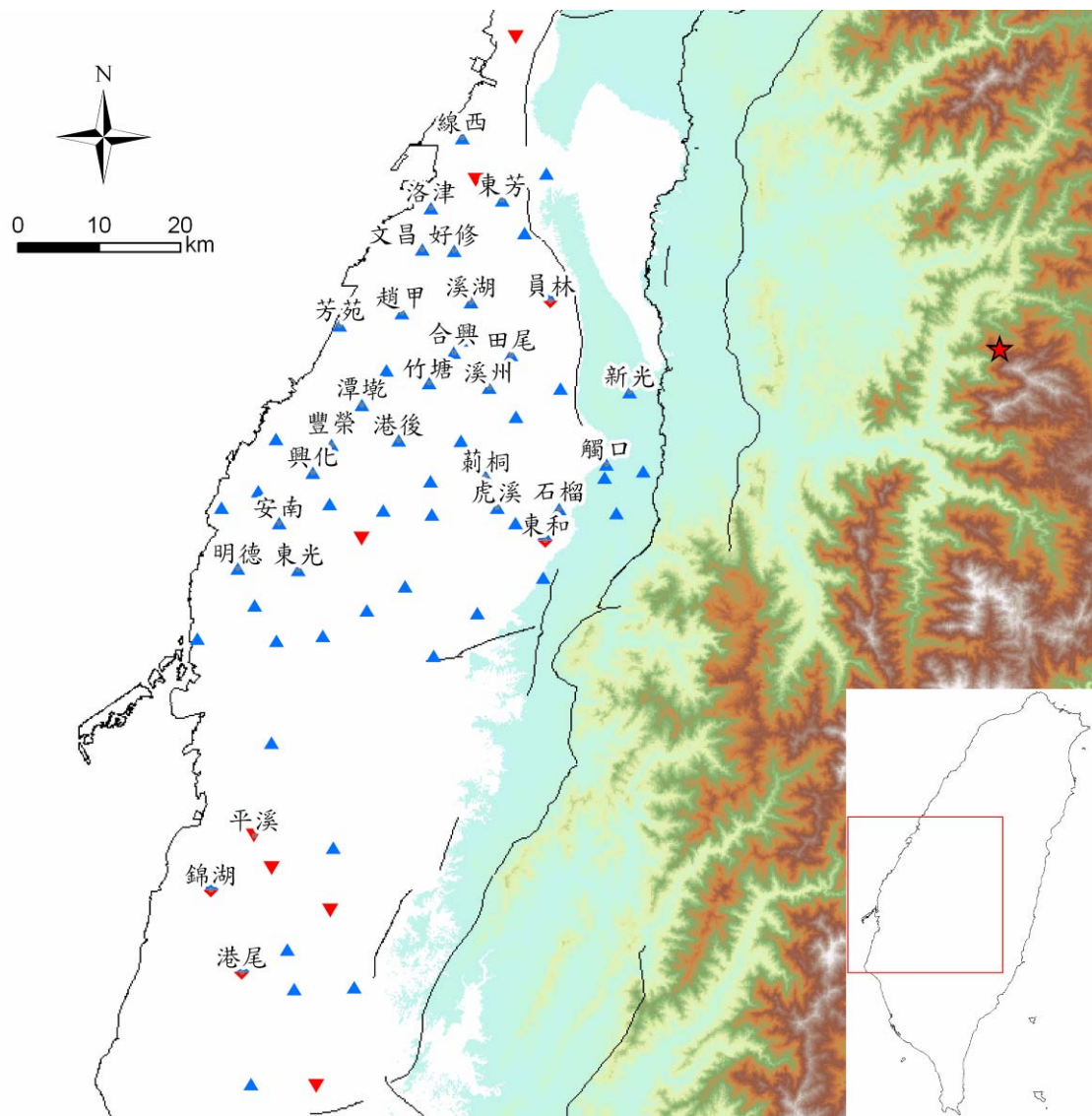


圖 3.18 仁愛地震出現同震水位變化之複井站分布圖

圖 3.18 中觀測站分布情形，標示名稱之站位為具同震反應之複井觀測站，於沿海及八卦山以西平原區域分布較多，東和站、港後站、東光站連線以南至平溪站以北區域，僅出現具有同震反應之單井觀測站，並未出現具同震反應之複井觀測站。

複井的同震水位型態具同震上升、下降和有升有降的變化，同震上升、下降變化遠較有升有降變化多。出現有升有降水位變化的觀測站有東和站、員林站、港尾站和錦湖站；而出現同向變化的觀測站多為同震上升的反應，僅平溪站為同震下降。詳細複井站水位變化型態見附錄 A。

第四章 坪頂一號井地震相關的水位變化

4-1. 仁愛地震相關之異常水位

坪頂一號井於 2000 年 6 月 11 日仁愛地震發生前後曾出現異常獨特的水位變化。從逐時水位歷線圖（圖 4.1）可以看出同震水位變化為 22 公分之階梯式上升反應，震前水位約維持在 200.34 公尺，震後水位則上升至 200.48 公尺左右；而除了清楚地呈現同震水位反應外，我們也觀察震前一小時出現了異常的水位下降變化。

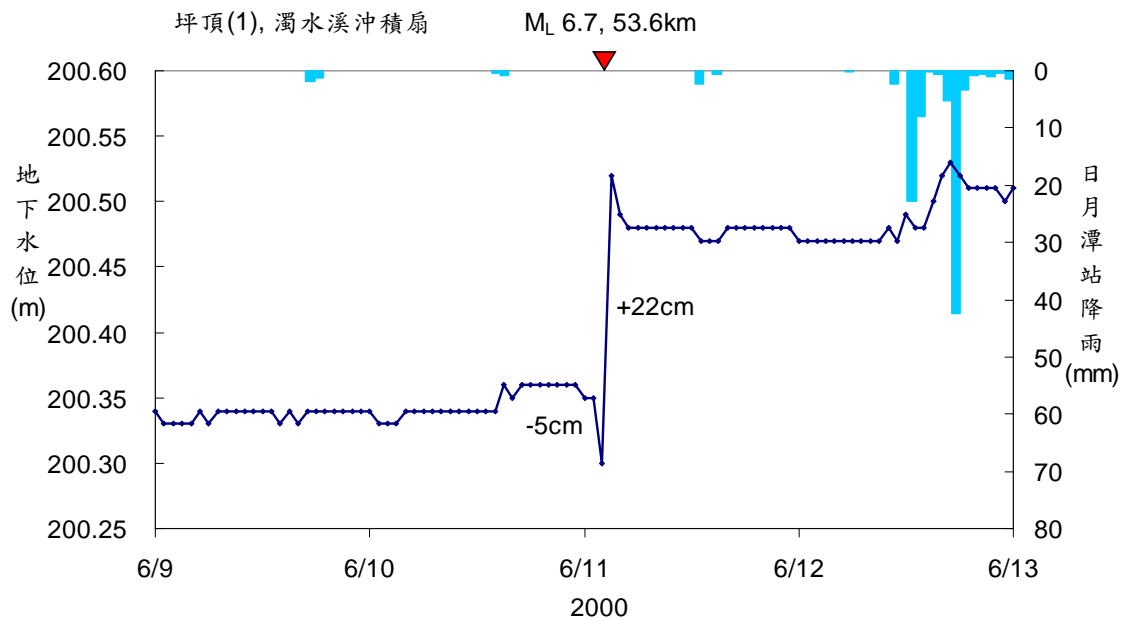


圖 4.1 坪頂一號井於仁愛地震之同震水位反應

本研究發現了仁愛地震發生前後三小時的坪頂一號井水位變化頗為異常，震前一小時井水位由 200.35 公尺下降 5 公分至 200.30 公尺，於同震發生記錄顯示一小時之內上升 22 公分至 200.52 公尺，震後一小時則下降 3 公分至 200.49 公尺。這三小時之間的水位變化均大於平時坪頂一號井之背景水位的 1 公分波動，同震變化量明顯反映井篩所在的含水層受到的孔隙水壓受到大地應力重新分布的影響；震後二小時內的水位變化應是含水層內超額水壓消退所造成，水位消退並持平於 200.48 公尺左右；然而震前一小時的 5 公分下降十分特殊，與平時 1 公分波動的背景水位相差甚大，值得深入探究其中原因。

分析震前地下水位變化的可能性必須考慮地震、降雨、氣壓等因素。回顧仁愛地震發生前，並沒有規模大於 4 的地震，發生時間最接近 6 月 11 日且規模大於 4 的地震為 6 月 6 日 9 時 49 分在宜蘭蘇澳地震站南方 13.6 公里規模 4.8 的地震；震央最接近且規模大於 4 的地震，則是發生在 5 月 30 日 8 時 58 分在南投名間地震站北偏東方 4.0 公里規模 4.1 的地震，因此我們可以排除為仁愛地震前一小時的異常水位變化是前震造成的。

日月潭雨量站的降雨記錄顯示震前兩天僅有零星的降雨量，6 月 9 日 17 時至 18 時兩小時內分別累積 1.9 及 1.3 公釐雨量、6 月 10 日 14 時至 15 時兩小時內分別累積 0.4 及 0.8 公釐雨量，比對雨量與水位記錄，我們發現震前零星降雨並無明顯的水位變化；反而是震後 6 月 12 日 13 時、18 時兩次分別達 22.7 公釐、42.5 公釐的降雨，造成水位於三小時內逐漸緩慢上升了 5 公分的變化，可知較大量的雨量會影響水位，出現緩慢上升的變化型態。

4-2. 2000 年地下水位變化分析

2000 年 6 月 9 日至 13 日坪頂一號井的水位變化，震前異常水位變化的原因初步排除是由前震、降雨等因素造成，然而在未檢視長時間水位歷線圖之前，並無法確認此一現象是否在水位記錄中重複出現過。檢視仁愛地震發生當年的全年地下水位記錄，與 BATS 系統中芮氏規模大於 5.0 的地震、日月潭站之雨量及大氣壓力記錄以及水位記錄之一小時水位變化進行比較分析（圖 4.2），釐清是否有任何與仁愛地震類似的震前水位變化記錄。

坪頂一號井 2000 年的水位記錄品質良好，連續性頗佳（圖 4.2(d)），除了 6 月 11 日仁愛地震的同震水位變化外，仍有一些較為異常之水位變化。水位記錄於二月、三月、八月、十月各出現了一次水位突然上升或下降，這些現象發生的時間具有一致性，均為各月一日凌晨零時，經查證乃是每月人為調整水位誤差之故。

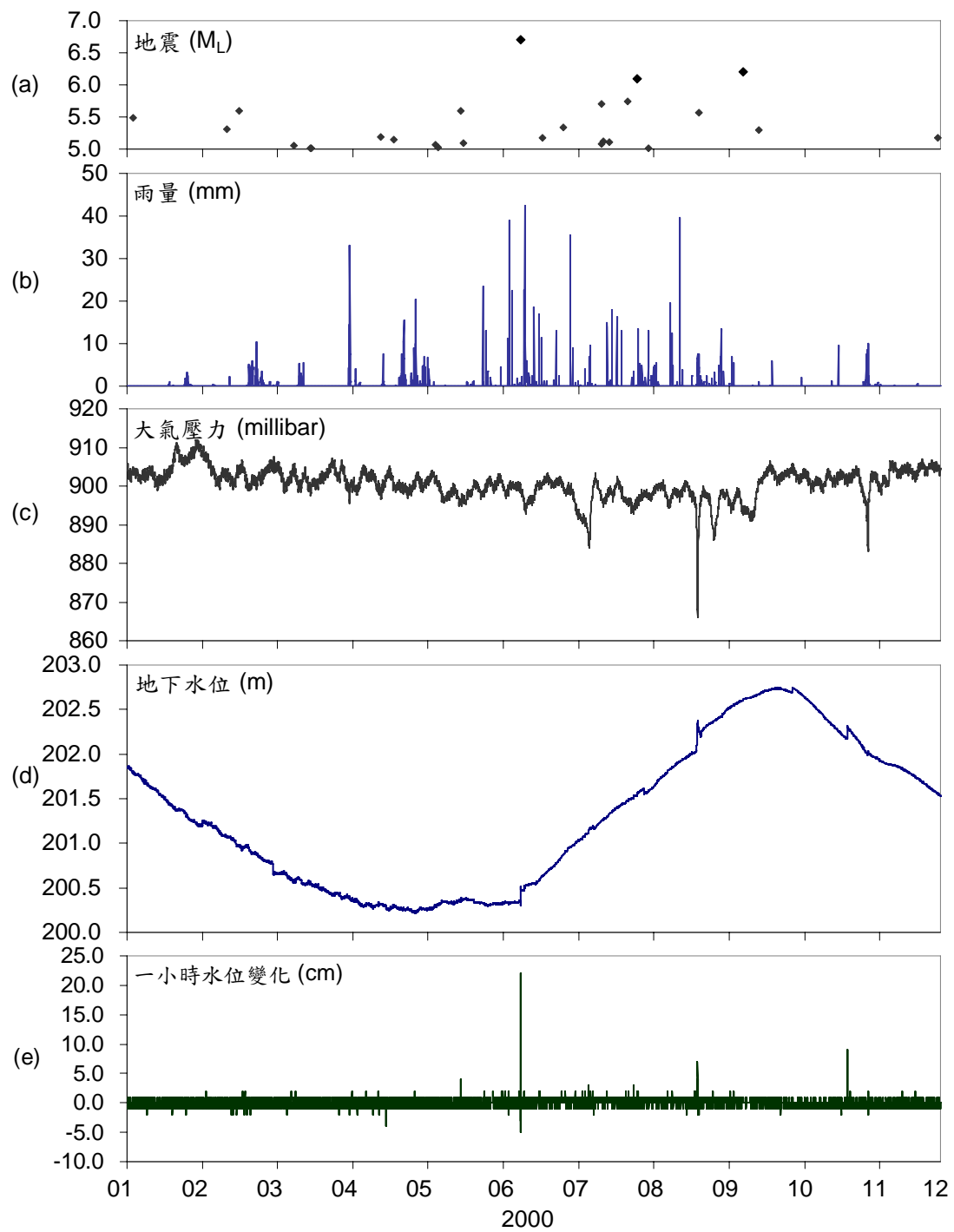


圖 4.2 2000 年之 (a) 芮氏規模大於 5.0 之地震 (b) 日月潭站雨量記錄 (c) 日月潭站大氣壓力記錄 (d) 坪頂一號井水位記錄 (e) 坪頂一號井一小時水位變化比較圖

2000 年的芮氏規模大於 5.0 的地震如圖 4.2(a)，平均每月至少發生一次。規模大於 6.0 的地震共發生了三次，其中仁愛地震規模 6.7 為所有地震中最大的一個，造成同震水位上升 22 公分的變化，其他兩次地震分為是 2000 年 7 月 29 日 4 時 28 分規模 6.1 之地震，造成同震水位上升 2 公分的變化，以及 2000 年 9 月 10 日規模 6.2 之地震，此地震並未造成同震水位變化。

日月潭雨量站的記錄顯示，全年的降雨量在三月底至四月的梅雨季及夏季六至八月較多，其餘月份的降雨零星（圖 4.2(b)）。與地下水位變化比較，短期豪雨不會立刻對地下水位造成明顯的影響，而是以每小時 1 至 2 公分（圖 4.1）漸近式的上升變化型態為主。季節性的累積雨量則會造成地下水位隨乾溼季出現趨勢性之波動，夏季降雨較多時地下水位呈上升變化趨勢，而冬季降雨較少時，水位呈現下降變化，可能是因為含水層較深，降雨經由地層進入井管的過程緩慢，因此延遲了地下水位變化時間。

檢視 2000 年日月潭氣壓站的小時記錄，除了幾次颱風伴隨的低氣壓外，全年氣壓值大約維持在 900 至 910 毫巴的範圍內（圖 4.2(c)）。八月的強颱碧利斯在水位記錄上留下影響痕跡，圖 4.3 顯示碧利斯颱風經過台灣前後所帶來的雨量、氣壓及水位記錄，颱風帶來低氣壓時尚未下雨，因此可知 8 月 22 日之水位緩慢上升為氣壓降低所致，當颱風離開、氣壓回升後水位開始下降，然而卻高於原本水位變化趨勢，這是由於颱風所帶來之降雨逐漸下滲所造成的。

將地下水位記錄中濾除人為調整的變化後，我們發現在一小時水位變化的分析上，全年背景值的變動幅度為 1 公分，因此能突顯其他一小時內水位變化大於 3 公分的數值；其中最大的水位上升變化即為仁愛地震的同震 22 公分變化，颱風伴隨低氣壓引發的水位上升與下降的變化相對而言較小，最大值約為 7 公分，而仁愛地震震前 5 公分下降也十分突出。

坪頂一號井對於大氣壓力的反應較雨量敏感，低氣壓可以立即造成較大幅度的水位上升變化；降雨則需於短時間累積較多雨量，才能逐漸造成水位小幅上升的變化。將氣壓、降雨與同震上升前的異常下降相比，在水位變化方向與幅度上並不符合，且持續的時間較氣壓及降雨造成的變化短，因此可以排除此兩項因素是造成震前水位異常的原因。

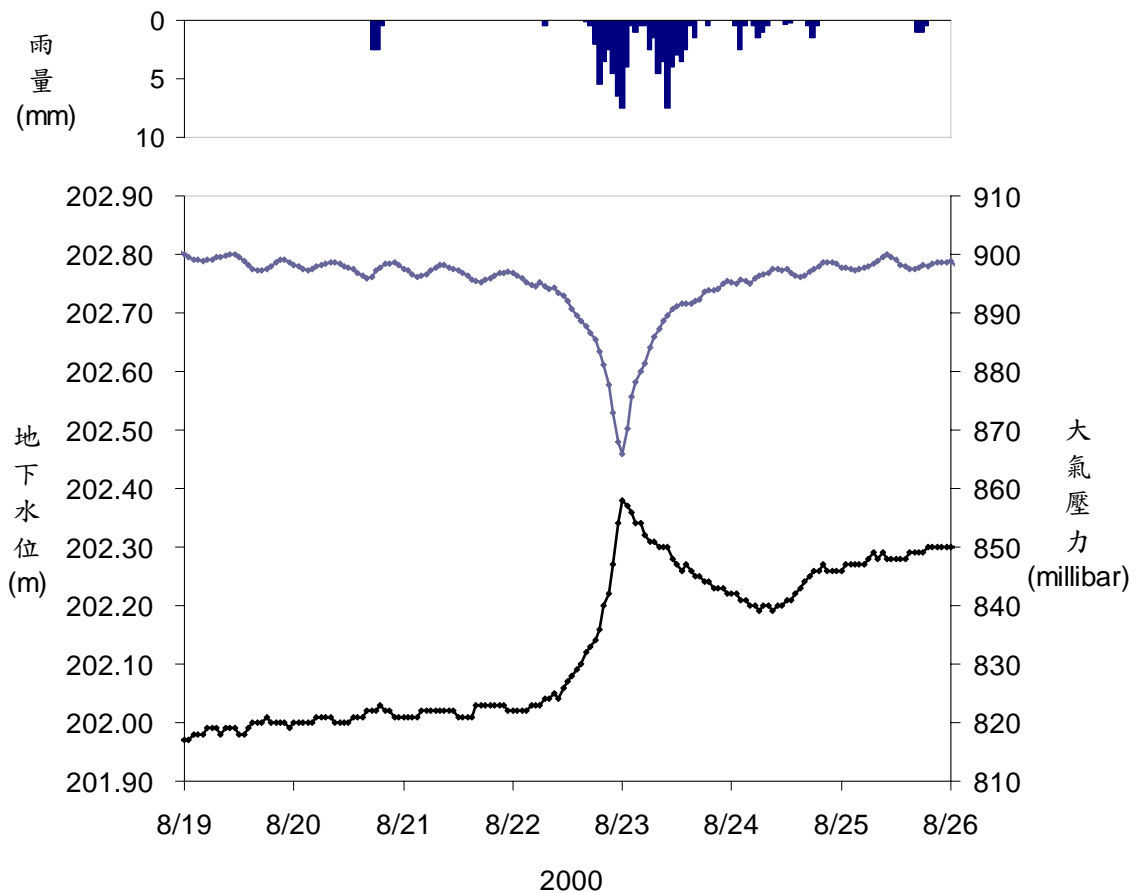


圖 4.3 強颱碧利斯帶來雨量、氣壓及對水位造成的變化

4-3. 坪頂一號井的建構及水文地質背景

坪頂一號井為 1996 年台灣地區地下水觀測網第一期計畫在濁水溪沖積扇建置的觀測井，井站位於扇頂的斗六丘陵北端坪頂台地處，地址是雲林縣林內鄉坪頂村 1 號的成功國小，約在東經 $120^{\circ}37'58''$ 、北緯 $23^{\circ}45'28''$ 。坪頂一號井深為 174 公尺，高程為 297.723 公尺，井管為直徑 6 吋之不鏽鋼管，井篩為孔縫 2.0 公釐繞線式的不鏽鋼管，分別設於地面下 144-150 公尺、156-162 公尺、168-174 公尺、180-186 公尺及 192-198 公尺處，總長為 30 公尺。觀測井之水位記錄起始時間為 1997 年 1 月 1 日，每一小時記錄一筆水位，解析度為 1 公分。

當地的地層上部為台地堆積層，下部為頭嵛山層，大都為含泥量相當高之中細礫。根據坪頂一號井的岩心記錄判斷，全口以粗礫至極粗礫沉積物為主，地表為 1.5 公尺紅土，地下 1.5-42 公尺為灰-黃色泥-細砂層，含水層可分為三段，上段在地下 42-128 公尺，沉積物為灰-暗灰色粗礫及中細礫，間隔 128-144 公尺為淡灰

-黃色泥及細砂互層，可視為隔水層，中段含水層在地下 144-205 公尺，沉積物為黃-灰黃色粗礫，間隔 205-260 公尺為淡灰-黃色泥礫及細砂互層，亦可視為隔水層，下段含水層在地下 237-260 公尺，沉積物為灰-暗灰色粗砂。雖然鑽鑿至 260 公尺深，但由於第三層含水層尚未鑿穿，因此觀測井僅設至 204 公尺處。綜合地層岩心、井測記錄可建立當地之地層柱狀圖（圖 4.4）。且由沉積物分析得知，各含水層含泥量頗高。水力試驗的結果顯示，坪頂一號井的靜水位深度為 95.77 公尺，單位洩降出水量（Q/s）為每公尺每小時 0.154 立方公尺（cmh/m），由於水位對大氣壓力反應敏感，推測係屬受壓之礫石含水層（水利局，1996）。

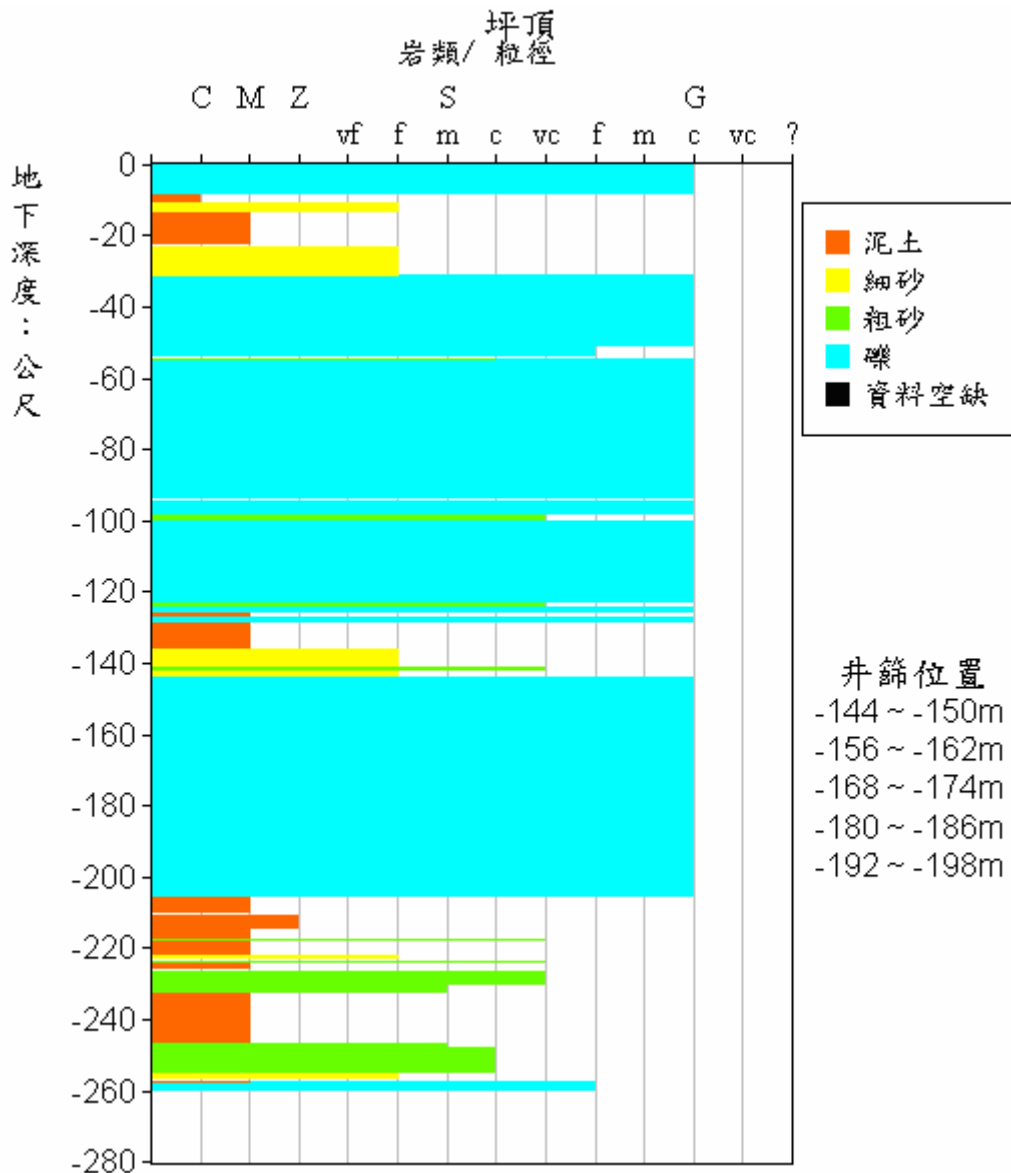


圖 4.4 坪頂一號井地層柱（中央地質調查所，1996）

坪頂一號井位於為斗六丘陵北端，濁水溪沿其北側從東向西流入沖積扇、清水溪則於其東側由南向北流入濁水溪，所在之處正好劃分了西部沖積平原及東側山麓地區。斗六丘陵以頭嵛山層為主，西側平原為現生沖積層，東側山麓地區出露的地層包括卓蘭層、錦水頁岩、桂竹林層及階地堆積。觀測井位在的斗六丘陵的林內背斜軸部，鄰近的南北向斷層包括彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔—雙冬斷層（圖 4.5）。

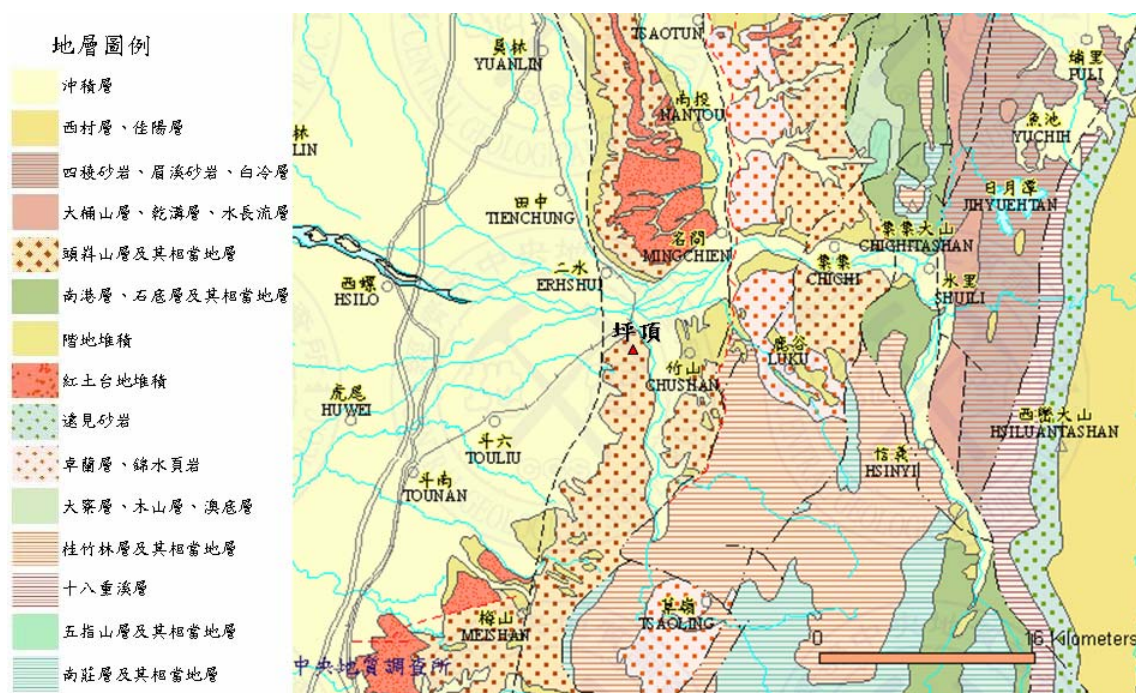


圖 4.5 坪頂一號井附近區域地質圖（中央地質調查所，2004）

4-4. 地下水位對 1997 年至 2005 年芮氏規模 5.5 地震之反應

為瞭解坪頂一號井對於其他地震的同震水位反應，本研究蒐集 1997 年至 2005 年在東經 119°10′至 122°10′、北緯 21°10′至 25°10′之間、深度小於 300 公里內發生芮氏規模大於 5.5 的地震，分析井水位對這些地震的反應，結果指出在坪頂一號井引發同震水位變化的地震規模多大於 6.0，僅有兩次地震規模小於 6.0（表 4.1）。從水平方向分析，引發坪頂一號井出現同震反應的多為中部地區、震央距離在 100 公里以內的地震，引發同震反應的比例大於 50%（表 4.2，圖 4.6）；從

垂直向分析，得知坪頂一號井的水位對於深度在 20 公里以內的地震較有反應（圖 4.7），而對深度超過 20 公里的地震未曾出現同震反應（表 4.3）。

在這 78 次地震中，規模大於 6.0 的地震較易造成坪頂一號井出現同震反應；由震央距離及深度進行區分，可以看出震央距小於 100 公里、深度小於 20 公里發生的地震較易引發同震反應。造成同震反應的地震震央多位在台灣中部地區的陸地上，外海發生的地震則不易對井水位產生影響。

表 4.1 1997 年至 2005 年坪頂一號井同震水位變化

日期	時間	芮氏 規模	同震 反應	水位變化 (cm)	震源距 (km)	地震深度 (km)
1998/07/17	12:51	6.2	上升	3	28.5	2.8
1999/09/21	01:47	7.3	下降	-87	22.8	8.0
1999/09/21	02:03	6.6	下降	-217	25.6	9.8
1999/09/22	09:04	6.8	上升	3	45.6	15.6
1999/09/26	07:52	6.8	下降	-14	41.0	12.1
1999/10/22	10:19	6.4	上升	6	38.0	16.6
2000/05/17	11:25	5.6	上升	4	68.3	9.7
2000/06/11	02:23	6.7	上升	22	53.6	16.2
2000/07/29	04:28	6.1	上升	2	49.7	7.4
2001/03/02	12:37	5.8	上升	5	39.7	10.9
2001/12/18	12:03	6.7	上升	2	206.5	12.0
2002/03/31	14:52	6.8	上升	10	164.8	13.8
2003/12/10	12:38	6.4	上升	3	110.9	17.7

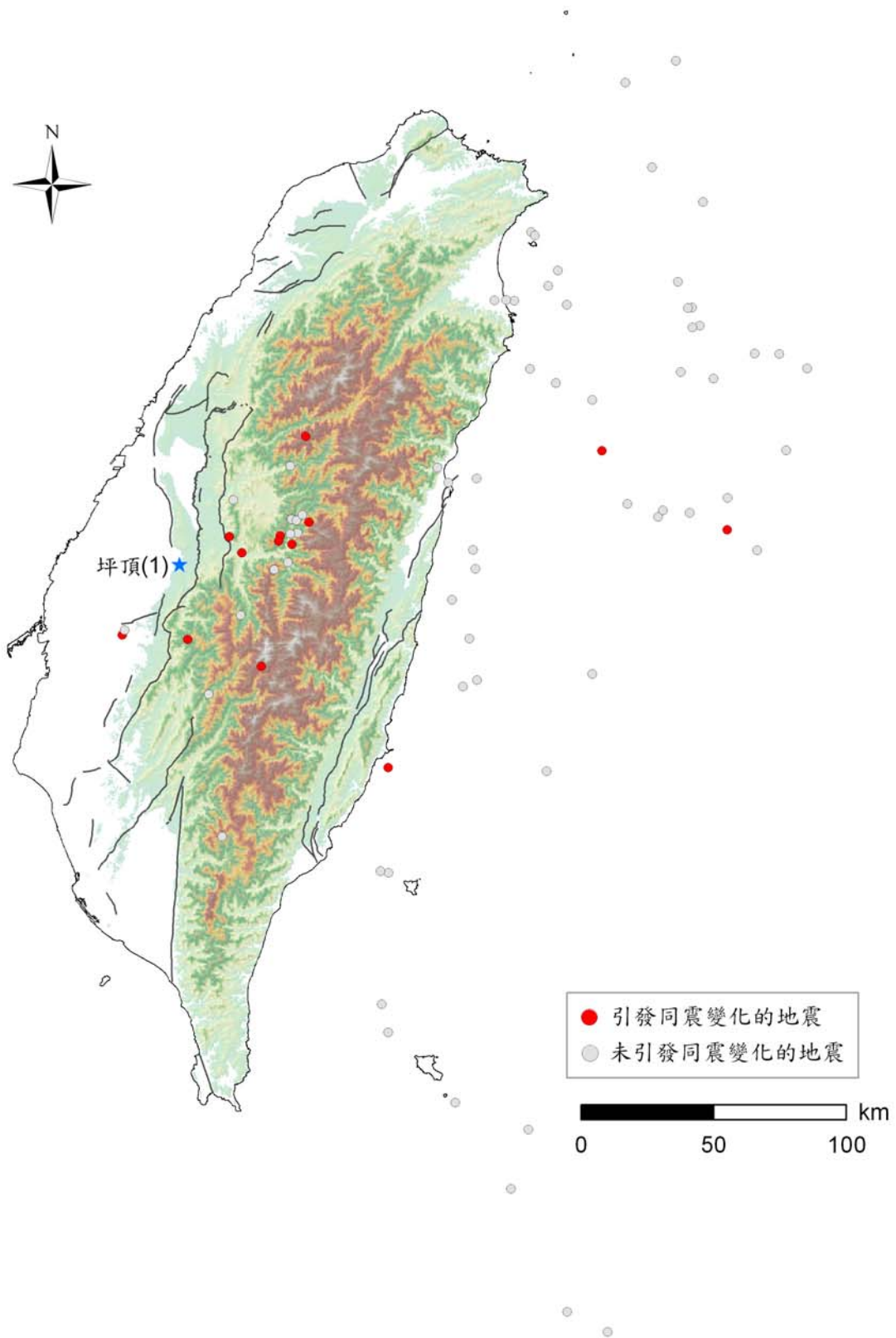


圖 4.6 坪頂一號井對芮氏規模大於 5.5 之同震反應分布圖

表 4.2 1997 年至 2005 年引發坪頂一號井同震水位變化之地震震源距離統計表

震源距(km)	地震次數	反應次數	百分比(%)
0-50	12	8	66.67
50-100	4	2	50.00
100-200	29	2	6.90
200-300	21	1	4.76
>300	5	0	0.00

表 4.3 1997 年至 2005 年引發坪頂一號井同震水位變化之地震深度統計表

深度(km)	地震次數	反應次數	百分比(%)
0-10	15	5	33.33
10-20	24	8	33.33
20-30	6	0	0.00
30-70	9	0	0.00
>700	17	0	0.00

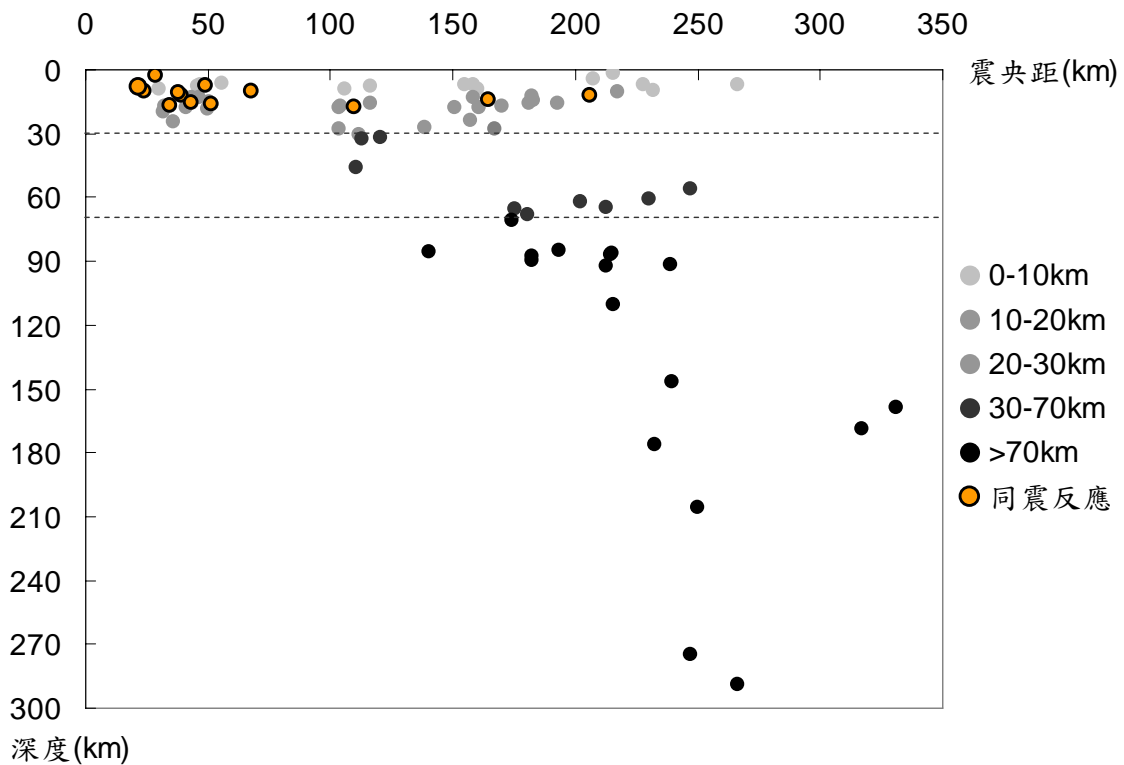


圖 4.7 坪頂一號井水位對 1997 年至 2005 年芮氏規模大於 5.5 地震之反應在縱剖面上的分布

圖 4.8 為坪頂一號井對 1997 年至 2005 年之間出現同震反應前後 48 小時的水位歷線圖，地震造成的同震水位反應定義為發生在 0 至 1 小時之間的變化；縱座標為地下水位的相對變化，除了 1999 年 9 月 21 日的同震水位變化單位為 100 公分，其餘地震事件的水位變化單位為 20 公分。圖中右側標示了地震事件發生的日期，同震水位變化處則標示了同震反應的地下水位變化量。

1998 年 7 月 17 日的同震水位反應為上升，於兩小時內分別上升 3 公分及 5 公分，震後水位維持高於震前水位。1999 年 9 月 21 日的同震水位反應為下降，於兩小時內分別下降 87 公分及 217 公分，水位降至低點後再逐漸回升，穩定後的水位略高於震前水位；同月 26 日的同震變化也是下降，於一小時內下降 14 公分，震後與震前水位變化趨勢並無明顯差異；同年 10 月 22 日的同震變化為上升 6 公分，震後一天左右，水位就回復至原本變化趨勢。2000 年 5 月 17 日的同震水位反應為上升 4 公分，震後水位同樣僅維持半天略高於震前水位，之後就回復原本變化趨勢；同年 6 月 11 日的反應為同震上升 22 公分，震前一小時下降 5 公分，

而震後水位明顯高於震前水位；同年 7 月 29 日的同震反應為上升 2 公分。2001 年 3 月 2 日的同震水位反應為上升 5 公分；同年 12 月 18 日的同震反應仍是上升。2002 年 3 月 31 日的同震水位反應也是上升，於兩小時內分別上升 4 公分及 10 公分，而震後水位略高於震前水位。2003 年 12 月 10 日的同震水位反應為上升 3 公分。

綜觀所有同震水位反應，除了 1999 年集集地震及其餘震時出現同震水位下降之反應外，其他的地震皆引發同震水位上升。集集地震引發的同震水位變化幅度最大，於兩小時內下降約 3 公尺，其餘地震造成的同震水位反應皆在數公分至數十公分之間；2000 年 6 月 11 日仁愛地震的同震水位變化幅度是第二大的。坪頂一號井的水位反應有時需要超過一小時才會完成，反映出其含水層之透水性較低的特性。



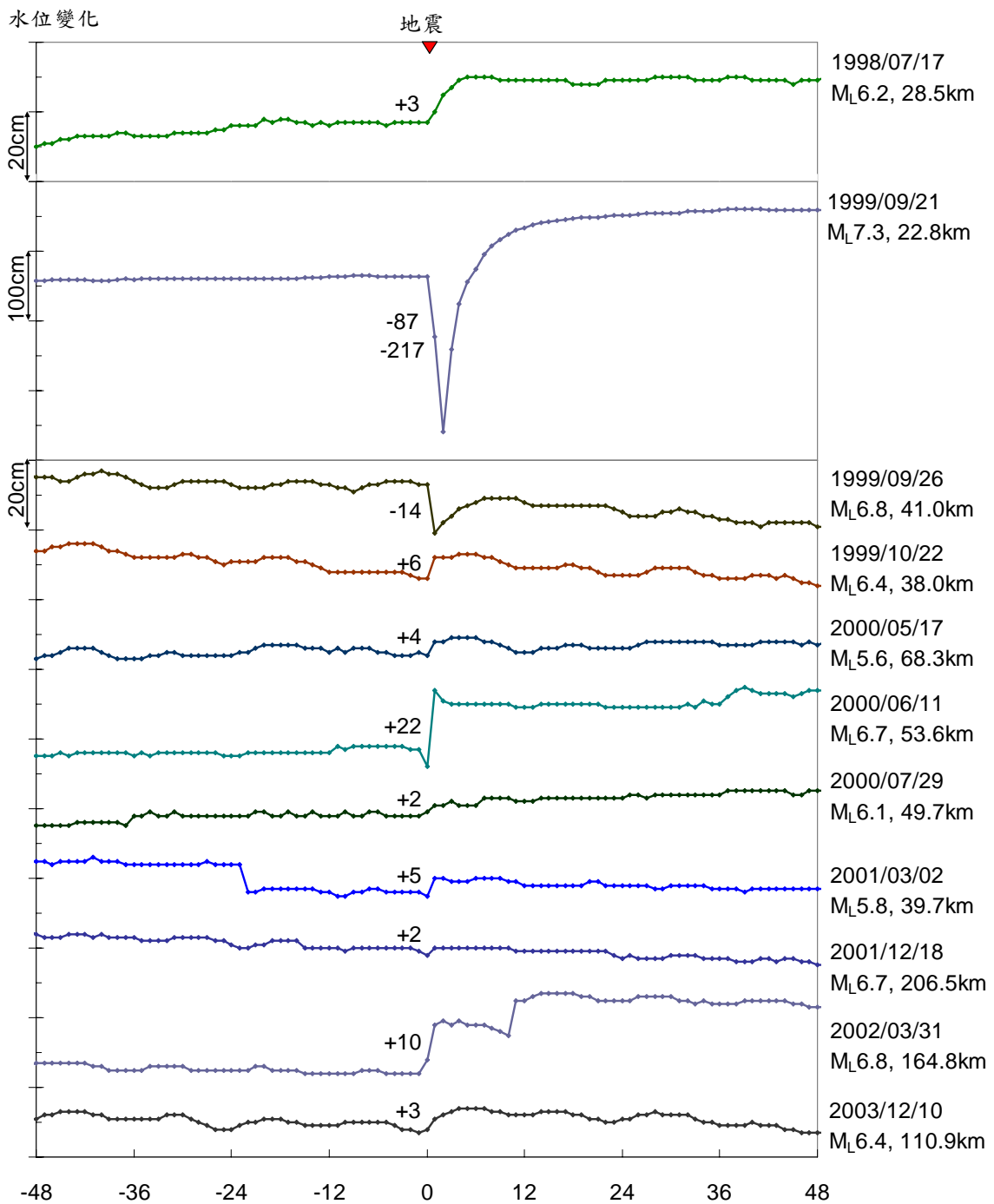


圖 4.8 1997 年至 2005 年坪頂一號井同震水位變化

4-5. 同震水位變化與地震震央距、深度及地震規模之關係

圖 4.9 顯示同震水位變化量與震央距離、深度及地震規模之關係，其橫座標為震央距離，縱座標為深度；圖中黑色圈為未引發同震水位變化的地震，大小表示規模大小，藍色圈及紅色圈的位置表示造成同震水位上升及下降的地震位置，而大小表示同震水位反應量的變化幅度大小。一般而言，震央與坪頂一號井相距不到 100 公里，且能引發同震水位變化者，其地震規模大小差異較大（芮氏規模 5.6 至 7.3），所引發的水位變化幅度也大小不一；而震央距坪頂一號井遠於 100 公里者，地震規模均大於 6.4，而且水位變化幅度皆在 10 公分以內。

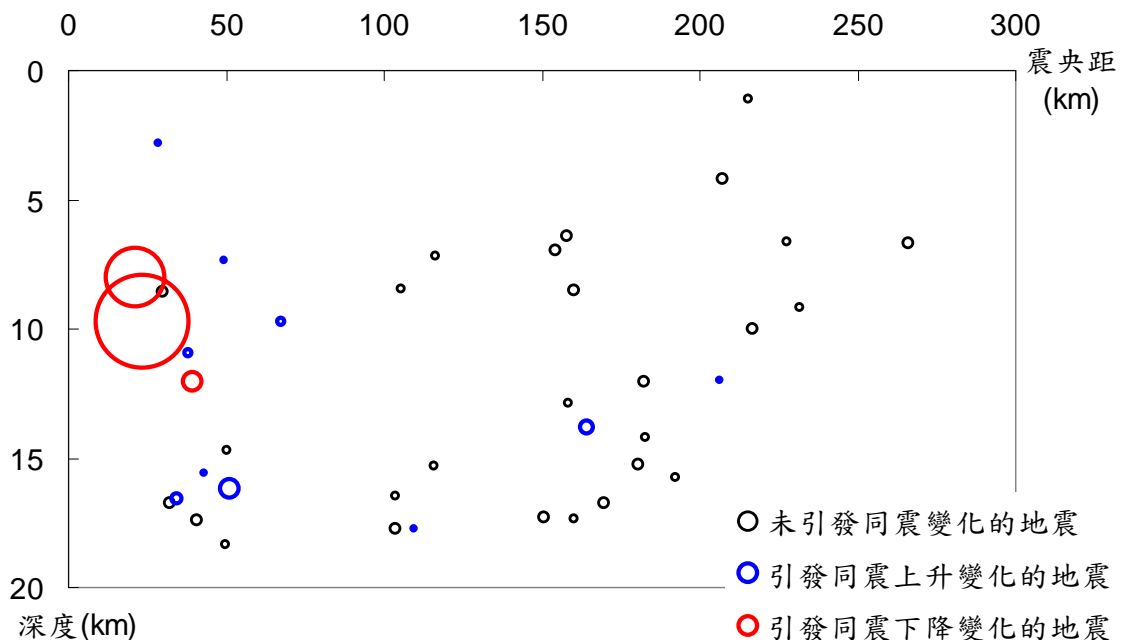


圖 4.9 坪頂一號井同震水位變化與地震震央距、深度及地震規模與之關係

4-6. 坪頂一號井分水位試測資料

坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日開始進行高頻記錄測試，每二分鐘記錄一筆水位資料，資料解析度為 1 公釐，共測試了一個月。圖 4.10 顯示為期一個月的二分鐘井水位歷線圖，我們可以觀察到水位呈現下降趨勢，一個月期間大約降低了 1.2 公尺，與坪頂一號井於其他年份 12 月期間的水位趨勢相同。二分鐘水位記錄到的潮汐現象比時水位資料精細，可以明顯看出半日潮及日潮的起伏變化。在試

測期間，坪頂一號井對於 2007 年 12 月 5 日 9 時 41 分 42.9 秒芮氏規模 5.3 之地震，記錄到同震振盪水位反應（圖 4.11），同震變化幅度為 0.4 公分，從 09 時 40 分記錄的 196.679 公尺上升至 09 時 42 分記錄到的 196.683 公尺，繼而於 09 時 44 分回復至原本水位下降變化趨勢。由二分鐘水位變化也可明顯得知此一同震現象（圖 4.12）。

接續為期一個月每二分鐘一筆水位的測試記錄，是每五分鐘一筆水位資料的測試記錄，這項測試資料由 2008 年 1 月 4 日記錄至 5 月 5 日，水位歷線圖於 3 月 4 日因為收取資料而受到人為干擾，造成 21.7 公分的水位變化（圖 4.13）。每五分鐘一筆的水位記錄中，仍可觀察到明顯的地潮波動，然而比對芮氏規模大於 5.0 或區域性深度 20 公里內地震，並未發現同震水位變化（表 4.4）。

將 2008 年 1 月 4 日至 3 月 4 日 5 分鐘測試記錄與日月潭站日雨量進行比較，在五分鐘水位差的分析中，發現每當出現降雨記錄時，可以對應到水位上下變化幅度增大處（圖 4.14）。詳細的坪頂一號井測試記錄見附錄 B。

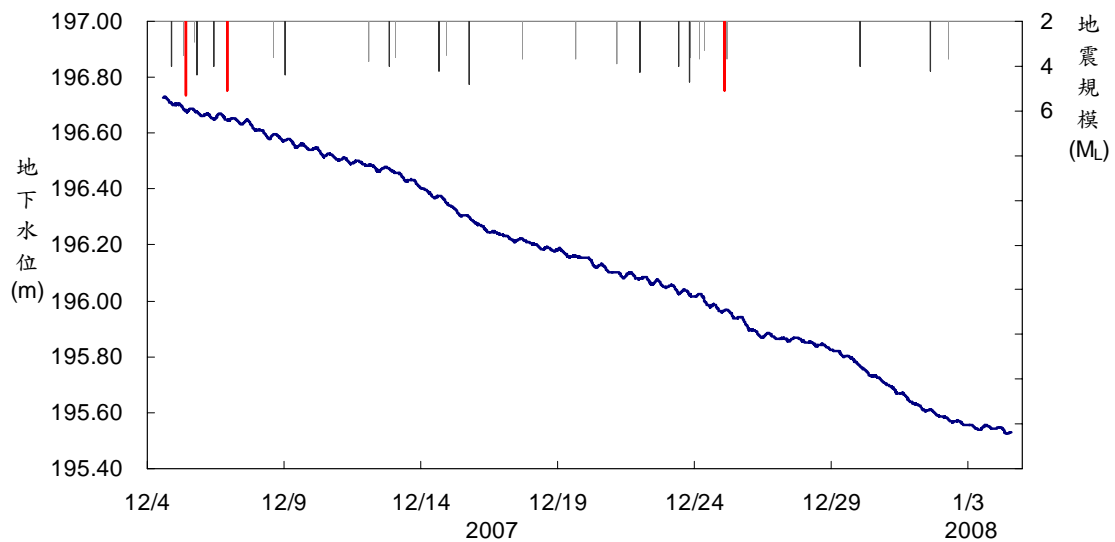


圖 4.10 坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日起測試一個月之二分鐘水位歷線圖

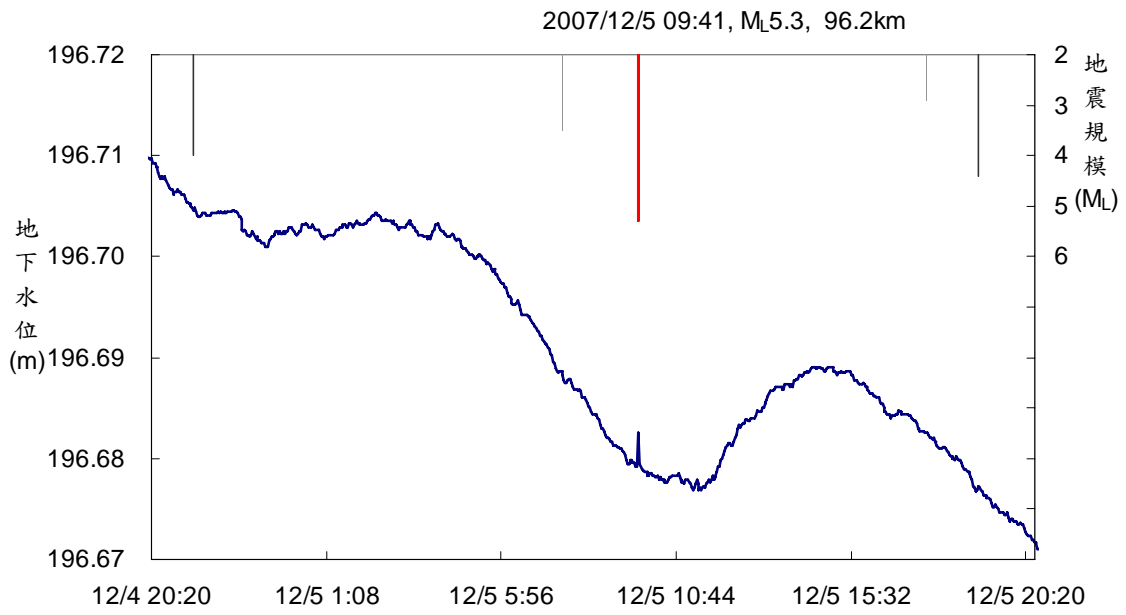


圖 4.11 2007 年 12 月 5 日 9 時 41 分 42.9 秒芮氏規模 5.3 同震水位變化

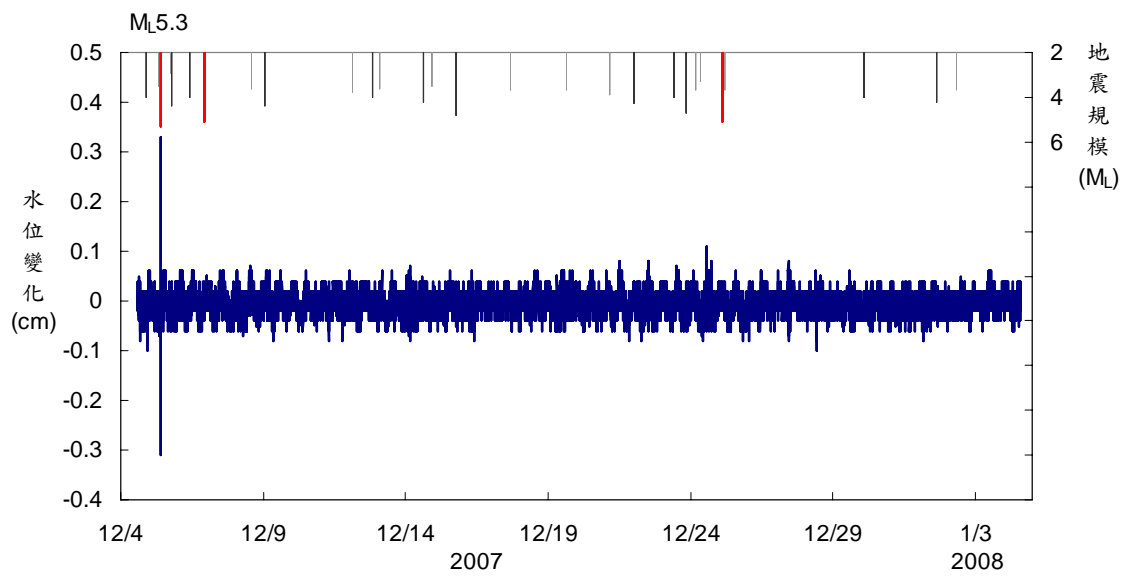


圖 4.12 坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日至 2008 年 1 月 3 日每二分鐘水位變化隨時間的變動

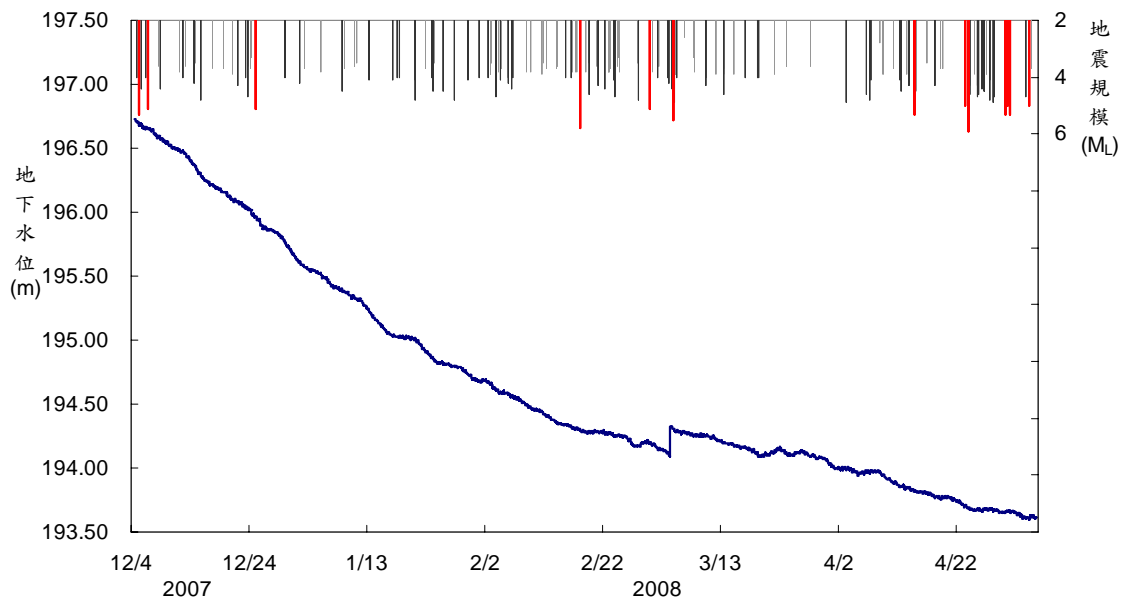


圖 4.13 坪頂一號井於 2007 年 12 月 4 日起測試五個月之二分鐘及五分鐘水位歷

表 4.4 坪頂一號井水位測試期間用以比對同震水位變化之地震

台灣時間	規模	震央	深度	備註
2007 年 12 月 05 日 09 時 41 分	5.3	台東利稻地震站東南方 20.9 公里	8.3	
2008 年 2 月 18 日 04 時 33 分	5.8	花蓮玉里地震站東偏南方 17.8 公里	19.4	
2008 年 3 月 01 日 00 時 58 分	5.1	宜蘭南澳地震站東偏南方 55.8 公里	2.5	外海
2008 年 3 月 05 日 01 時 13 分	4.2	高雄桃源地震站西北方 5.6 公里	12.3	
2008 年 3 月 05 日 01 時 31 分	5.5	高雄桃源地震站西北方 7.2 公里	3.6	
2008 年 3 月 05 日 06 時 42 分	4.9	高雄桃源地震站西北方 6.1 公里	6.8	
2008 年 3 月 10 日 14 時 01 分	4.0	斗六市地震站東南方 19.7 公里	4.7	
2008 年 4 月 14 日 23 時 39 分	5.3	台東市地震站東方 28.9 公里	18.5	外海
2008 年 4 月 23 日 14 時 24 分	5.0	宜蘭南澳地震站南偏東方 22.7 公里	12.0	外海
2008 年 4 月 24 日 02 時 28 分	5.9	台東成功地震站東南方 37.7 公里	10.1	外海
2008 年 4 月 24 日 06 時 04 分	5.4	台東成功地震站東南方 37.6 公里	6.8	外海
2008 年 4 月 24 日 06 時 09 分	5.2	台東成功地震站東南方 43.0 公里	12.4	外海

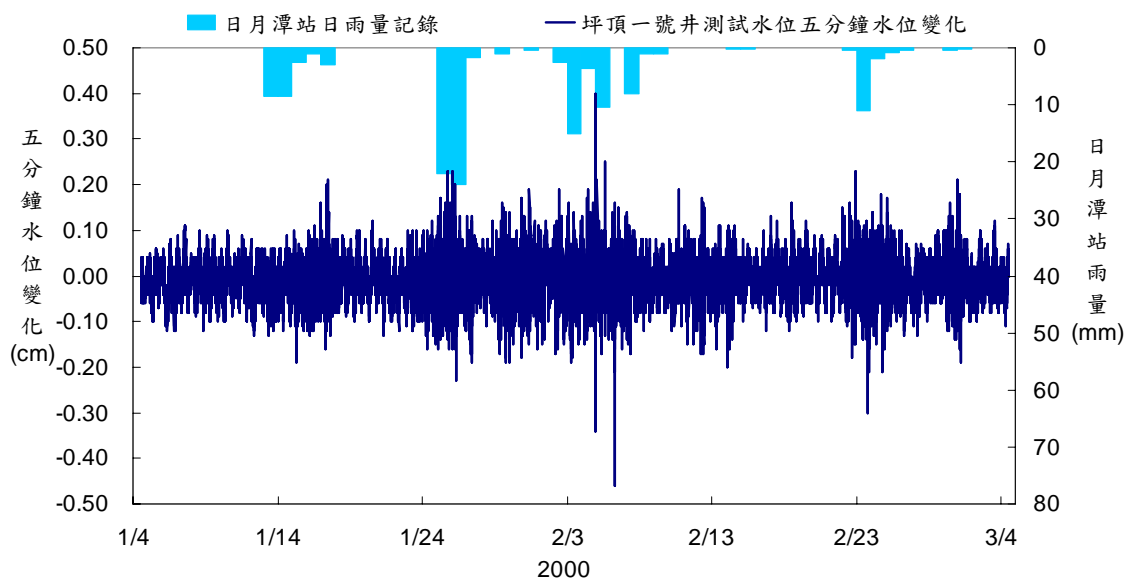


圖 4.14 2008 年 1 月 4 日至 3 月 4 日測試水位五分鐘水位變化與日月潭站日雨量



第五章 討論

5.1 仁愛地震震源機制對同震水位升降分布的影響

仁愛地震引發全台觀測井站之同震水位上升明顯多於下降，比例高達 8：1。在同震升降的分布方面，屏東平原具反應的觀測井均為同震上升，濁水溪沖積扇在平原區的反應也多為同震上升，嘉南平原為主要下降區，另外濁水溪沖積扇東邊近山側出現幾口同震下降反應的井位，此外宜蘭平原、台北盆地、台中地區各有一口觀測井出現下降反應。同震水位變化的分布可能與震源機制相關(圖 5.1)，仁愛地震為略帶平移分量的逆斷層，可能使位於壓縮區的濁水溪沖積扇含水層受到擠壓造成水位上升，而位在東北—西南方向的宜蘭平原、台北盆地及嘉南平原，可能因為位處四象限中的伸張區，故水位出現下降變化。但是宜蘭平原及台北盆地各只有一口井出現同震反應，其代表性顯得不夠充分，是否能夠代表此二區之所有受力狀態有待商榷；至於嘉南平原北側預期出現較多同震水位下降變化，但是實際結果是以同震水位上升居多，而八卦山脈附近也出現了與預期相反的水位反應，可能是因為局部地區的應力分布受到不規則的地形及地層岩性影響，使得四象限的壓縮與伸張區出現同震反應方向與預期有所出入的情形。

由震源距進行分析，則距離震較近之井位，除了反應井位較多之外、反應幅度也較大。但是此一趨勢僅限震源距約 100 公里內，震源距在 100 公里至 180 公里內井位的反應幅度並無明顯遞減趨勢。

濁水溪沖積扇上複井站同震反應剖面顯示，依據時水位記錄，深度位於 50 至 150 公尺深、透水性佳之含水層具有最明顯的同震水位變化，而較深之井位及遠離震源之站位反應量較小。由 29 個具同震水位反應之複井站分析結果，可知有些同站不同深度觀測井的水位歷線出現相似的水位變化趨勢，然而有些變化可以完全沒有關聯，這種現象可能與含水層之垂直連通性相關。

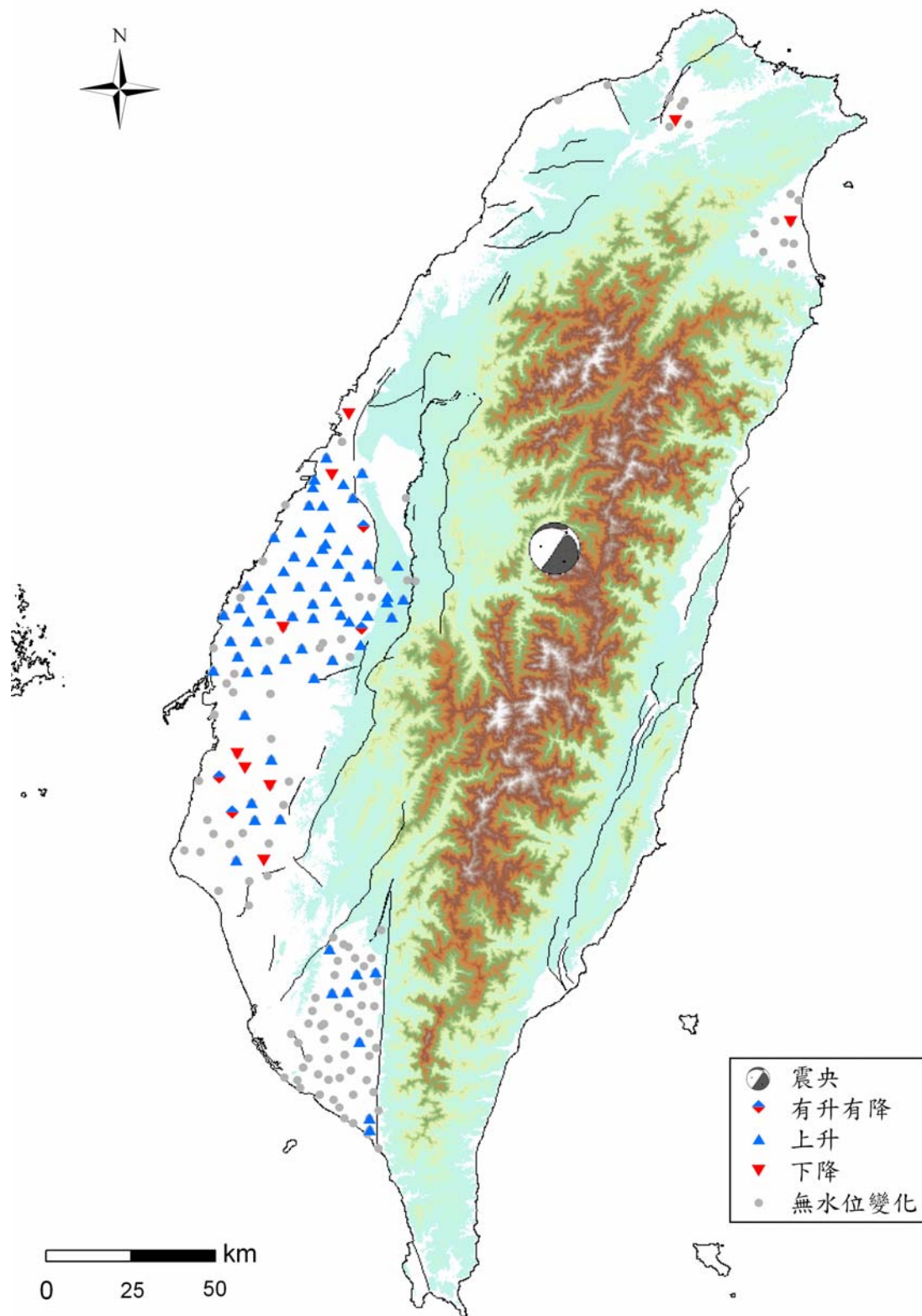


圖 5.1 仁愛地震同震水位變化分布與震源機制比較

5.2 坪頂一號井水位對地震之反應

本研究蒐集 1997 年至 2005 年引發坪頂一號井出現同震水位變化的地震，分析斷層面解與造成的水位反應（圖 5.2），得知逆斷層活動造成的同震上升或下降的水位變化均較為明顯，上升幅度由 3 公分至 22 公分、下降幅度由 14 公分至 217 公分不等；二次平移斷層活動造成的同震水位變化幅度均僅有 2 公分；而正斷層活動的地震未能引發任何井水位反應。然而同震反應較小也可能肇因於時水位記錄的關係，若同震階梯式水位反應幅度較小或變化持續時間過短，則可能使同震水位變化消失在背景水位中。在所有同震水位變化中，僅集集地震及其餘震造成同震水位下降，主要原因可能是主震達到芮氏規模 7.3，造成 22.8 公里震源距範圍內為伸張環境，異於其他地震的壓縮環境；而 26 日芮氏規模 6.8 之餘震延續了伸張環境的情形，使得同震水位變化與主震相同，為下降變化。

坪頂一號井歷年之時水位記錄品質良好，很少發生資料缺失及人為干擾的情形。由 1997 年至 2005 年之間 78 次芮氏規模大於 5.5 的地震分析，具同震反應之水位變化型態以上升為主，有時水位的反應會超過一小時。78 次地震中共有 13 次地震引發同震水位反應，地震規模界於芮氏規模 5.6 至 7.3 之間，其中 11 次大於規模 6.0。地震發生的深度在 2.8 公里至 17.7 公里間，超過此深度的地震皆未引發坪頂一號井同震水位反應；分析震源距範圍，則落在 22.8 公里至 206.5 公里之間，其中震源距大於 100 公里的地震僅有三次造成同震水位反應。可知坪頂一號井對規模 6.0 以上、震源距 100 公里、深度 20 公里以內發生的地震，同震水位反應較為靈敏。

利用上述坪頂一號井同震反應具區域性的限制，在比對 2007 年 12 月 4 日開始進行的試測資料時，僅針對芮氏規模大於 5.0 或深度 20 公里內且規模大於 4.0 之地震進行同震水位分析（表 4.4），總共比對了 12 次地震，然而僅記錄到一次振盪式水位變化的波動。同震反應不佳可能是因為地震規模較小，且其中 6 次位於外海。

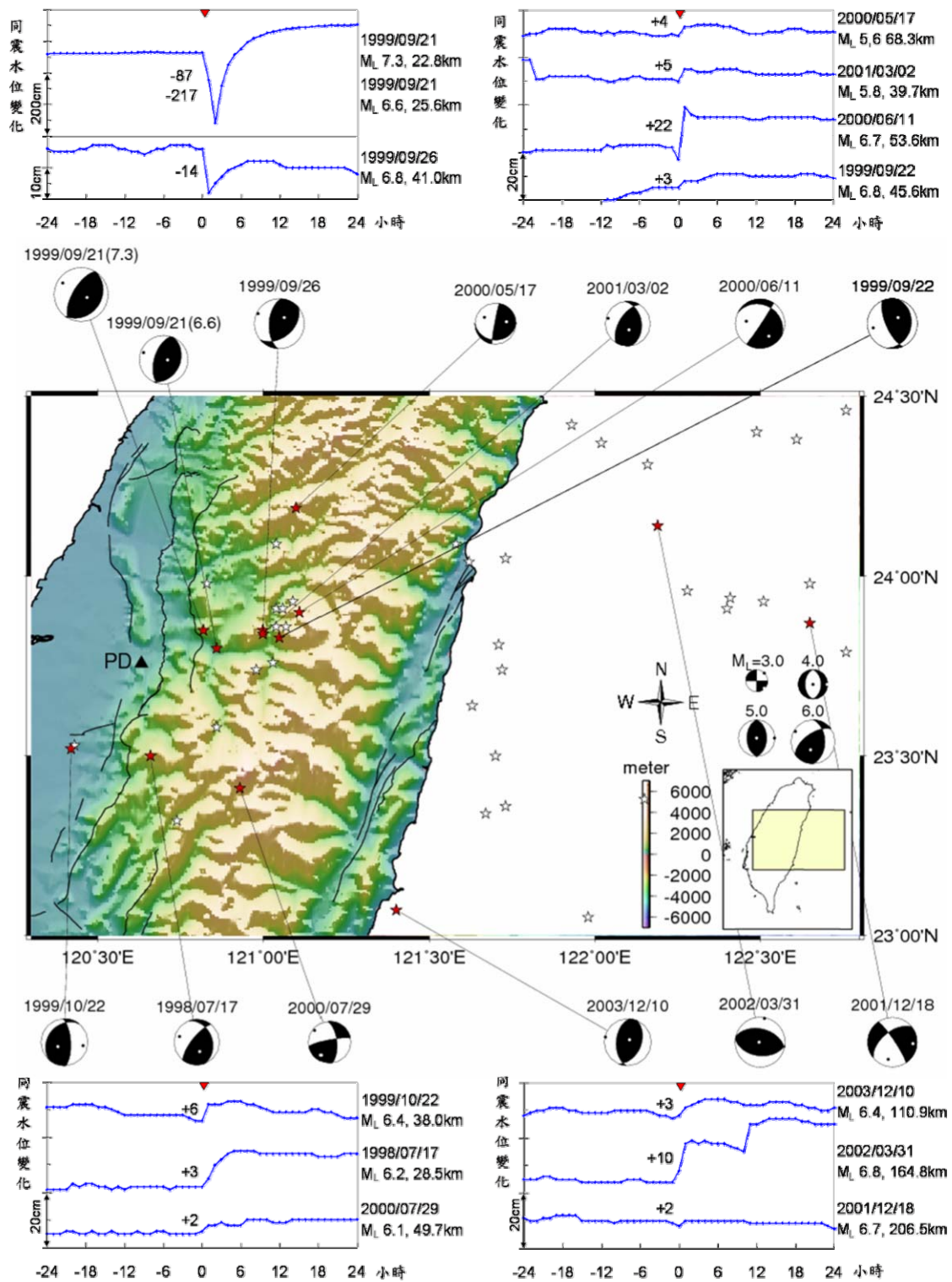


圖 5.2 坪頂一號井出現同震反應地震之震央及斷層面解

5.3 坪頂一號井震前水位異常變化現象

2000 年 6 月 11 日仁愛地震僅造成一口觀測井的井水位出現震前異常變化，其原因可能與此井的所在位置相關。坪頂一號井位於斗六丘陵北端背背斜軸部，應力可能較容易集中，因此井水位可能對周圍應力變化較為敏感。坪頂一號井位於仁愛地震斷層面解畫分的壓縮區中，同震上升為預期出現的結果，而井水位實際上的觀測值也顯現出上升反應，震前異常下降可能是井位所在的背斜軸部於地震之前受到拉張，使得井水位下降，再於地震發生時受到擠壓，產生同震水位上升的現象。GPS 測站資料記錄到地表出現應變，也印證大地應力於仁愛地震發生過後重新分配的現象，因此井水位記錄到的異常下降，可能是震前快速伸張應變所造成。

坪頂一號井在仁愛地震引發的同震水位變化前出現水位異常變化，然而 1997 年至 2005 年其他芮氏規模大於 5.5 引發同震水位反應的地震，並未出現震前異常的現象，其中緣由仍有待長期的監測與研究。本研究推測每一次強震之前，大地應變在空間上分布不一，坪頂一號井可能只有在極少數地震之前，會出現快速的應變及水壓變化；另外也可能是震前異常水位變化太小或資料的精度不足，使得前兆的現象在背景水位中無法判別。

第六章 結論

1. 地下水觀測井的同震水位變化，與地震規模、震源距及含水層性質都有關係，由同震水位變化在空間上的分布，可以協助瞭解斷層活動對地殼應變的影響。
2. 濁水溪沖積扇的複井水位對 2000 年 6 月 11 日仁愛地震反應的同震反應較有規律性，變化幅度多隨震源距及深度增加而遞減，但是鄰近丘陵及山區之井位反應較不規則。
3. 坪頂一號井記錄到 2000 年 6 月 11 日仁愛地震之震前明顯異常變化，其餘井位則以同震水位變化為主，可能是因為坪頂一號井位於背斜軸部，故反映了地震發生前地殼的變形過程。
4. 引發坪頂一號井出現同震水位反應之芮氏規模 5.5 以上地震，多發生在深度 20 公里以內，而且震央距離坪頂一號井 210 公里以內。在震源機制方面，以逆斷層及略帶分量的逆斷層活動較能引發同震水位反應，平移斷層活動造成的同震水位反應不僅次數少而且反應量也較小，正斷層型態的斷層活動則未造成任何同震水位變化。
5. 坪頂一號井之測試資料品質良好，可以觀測到地潮的變化，降雨會造成比平時略大的水位波動。測試期間記錄到一次芮氏規模 5.3 地震引發同震水位變化，顯示坪頂一號井對地震具有一定的敏感性。
6. 仁愛地震出現異常水位變化的坪頂一號井，並未在其他地震之前出現異常，因此震前異常地下水位變化的偵測與機制，仍有待長期的監測與研究。

參考文獻

- Biot, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.
- Chadha, R. K., Pandey, A. P., & Kuempel, H. K. (2003). Search for earthquake precursors in well water levels in a localized seismically active area of Reservoir Triggered Earthquakes in India. *Geophysical Research Letters*, 30, 69-1-69-4.
- Chia, Y., Chiu, J. J., Chiang, Y.-H., Lee, T.-P., Wu, Y.-M., & Horng., M.-J. (2008). Implications of coseismic groundwater level changes observed at multiple-well monitoring stations. *Geophysical Journal International*, 172, 293-301.
- Ge, S., & Stovers, S. C. (2000). Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space. *Journal of Geophysical Research*, 105, 513-525, 524.
- Igarashi, G., Wakita, H., & Sato, T. (1992). Precursory and Coseismic Anomalies in Well Water Levels Observed for the February 2, 1992 Tokyo Bay Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 19, 1583-1586.
- King, C.-Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, M., Saito, H., & Wakita, H. (1999). Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 104, 13,073-13,082.
- King, C.-Y., Azuma, S., Ohno, M., Y., A., P., H., Y., K., et al. (2000). In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 143, 469-477.
- Lin, K.-C., Ching, K.-E., J.-C., H., Yu, T.-T., & Rau, R.-J. (2006). Current Crustal Deformation and Strain Rate in Taiwan Deduced From Continuous GPS Measurements., *European Geosciences Union General Assembly 2006. Vienna, Austria.*

- Manga, M. (2001). Origin of postseismic streamflow changes inferred from baseflow recession and magnitude-distance relations. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2133-2136.
- Montgomery, D. R., Greenberg, H. M., & Smith, D. T. (2003). Streamflow response to the Nisqually earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 209, 19-28.
- Montgomery, D. R., & Manga, M. (2003). Streamflow and Water Well Responses to Earthquakes. *Science*, 300(27), 2047-2049.
- Muir-Wood, R., & King, G. C. P. (1993). Hydrological signatures of earthquake strain. *Journal of Geophysical Research*, 98(B12), 22,035-022,068
- Roeloffs, E., & Langbein, J. (1994). The Earthquake Prediction Experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32, 315-336.
- Roeloffs, E., & Quilty, E. (1997). Water Level and Strain Changes Preceding and Following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California, Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 149, 21-60.
- Roeloffs, E. A. (1988). Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure and Applied Geophysics*, 126, 177-209.
- Roeloffs, E. A. (1998). Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. *Journal of Applied Physics*, 103, 869-889.
- Wakita, H. (1975). Water Wells as Possible Indicators of Tectonic Strain. *Science*, 189, 553-555.
- 休茲. (2004). 地震與斷層力學. 盧佳遇譯, 地球科學文教基金會.
- 江崇榮、賴典章、賴慈華、黃智昭、費立沅、侯進雄、陳瑞娥、陳利貞、呂學諭、周素卿、鄂忠信、黃明昌、陸挽中、張閔翔、劉幸樺、李耀文. (1999). 台灣地區地下水觀測網第一期計畫—濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告, 經濟部

- 部中央地質調查所.
- 李昭順、吳景濂、陳耀德、陳文福、塗石金、陳水松、黃鯤鵬、楊澄夫、黃拔聚、楊東霖、蔡仁德、李柏、蔡宏昇.(1996). 台灣地區地下水觀測網第一期計畫—地下水觀測網之建立及運作管理八十五年報告, 經濟部水利局.
- 李貞儀、李嘉梅.(2002). 我們的濁水溪—集集共同引水工程紀念文集, 經濟部水利署.
- 陳華玟、陳勉銘、石同生.(2004). 南投(五萬分之一臺灣地質圖及說明書), 經濟部中央地質調查所.
- 黃智昭、江崇榮、賴慈華.(1996). 濁水溪沖積扇之地下水地質研究, 經濟部中央地質調查所.
- 經濟部水利署.(2007). 地震與地下水文異常變化分析研究(2/4) Analysis and Research of Earthquake-induced Anomalous Groundwater Hydrologic Changes(2/4), MOEAWAR0960016.
- 經濟部水資源局.(1999). 台灣地區地下水觀測網整體計畫第一期(81-87年度)成果彙編.
- 廖日昇.(2000). 岩土力學與地震, 科技圖書出版/成陽發行.
- 劉桓吉、李錦發、紀宗吉.(2004). 雲林(五萬分之一臺灣地質圖及說明書), 經濟部中央地質調查所.
- Broadband Array in Taiwan for Seismology(BATS) : <http://bats.earth.sinica.edu.tw/>
- 交通部中央氣象局 : <http://www.cwb.gov.tw/>
- 經濟部中央地質調查所 : <http://www.moeacgs.gov.tw/>

附錄 A 2000 年 6 月 11 日仁愛地震複井觀測站同震水位反應圖

附錄 A 為仁愛地震發生時出現同震反應之複井站水位反應圖，共計 29 站，為地震前後兩天的水位記錄，比較水位趨勢及同震水位反應型態，可對含水層垂向的連通，及空間上井位之間的連通性有進一步的瞭解。

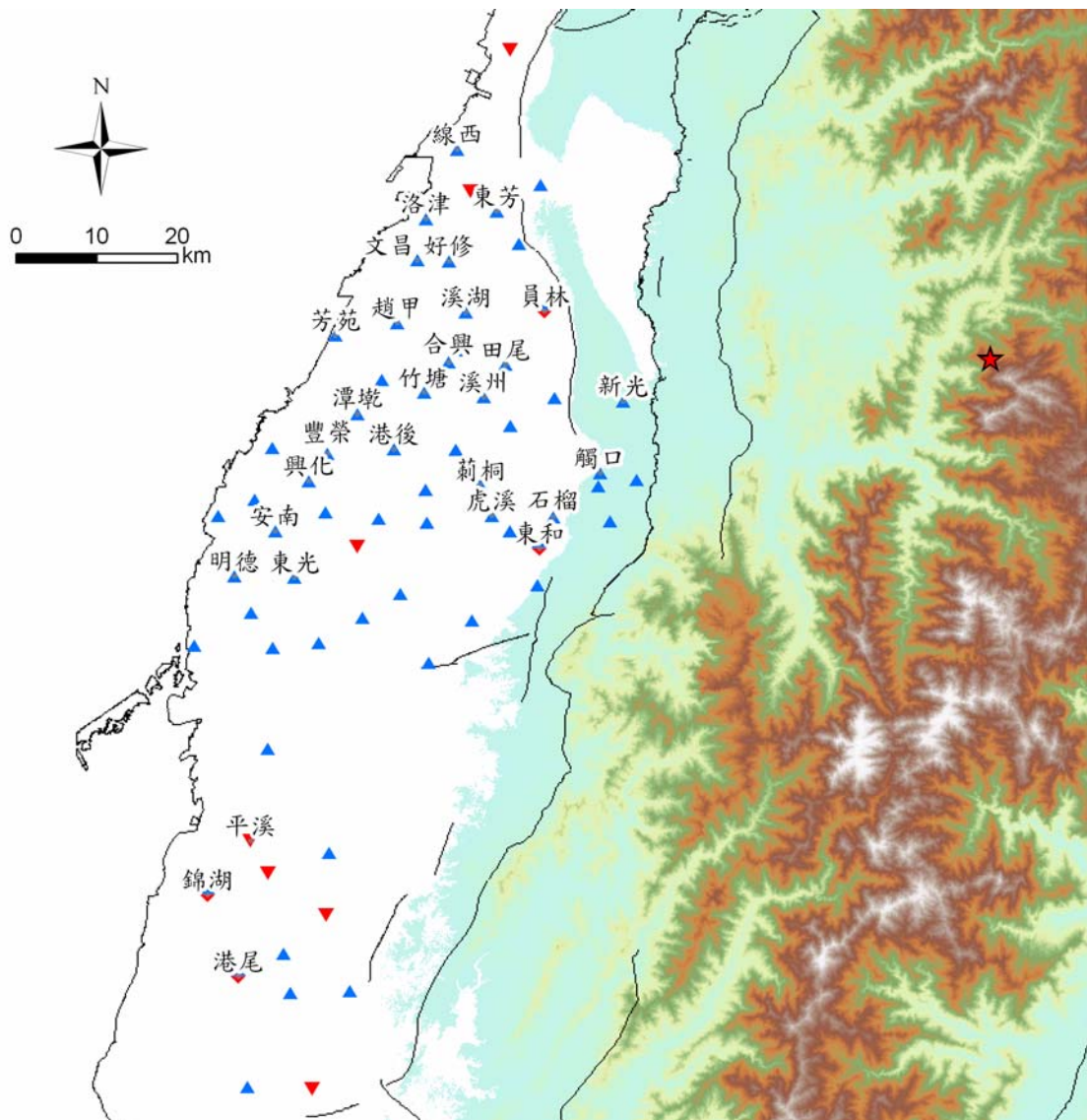


圖 A.1 仁愛地震出現同震水位變化之複井站分布圖

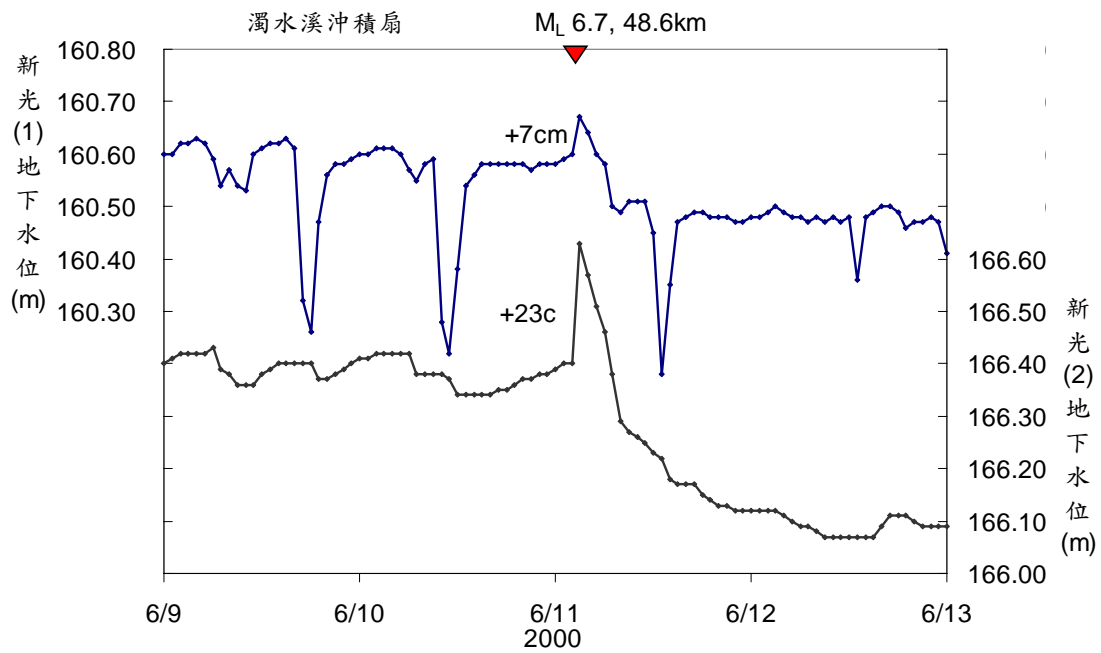


圖 A.2 新光站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

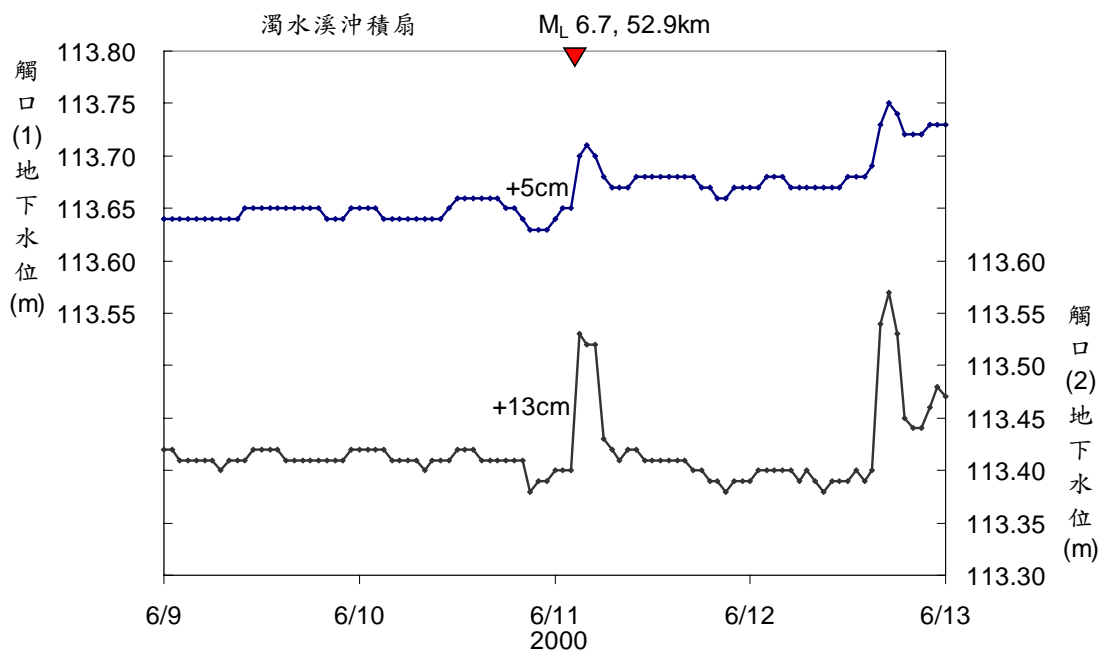


圖 A.3 觸口站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

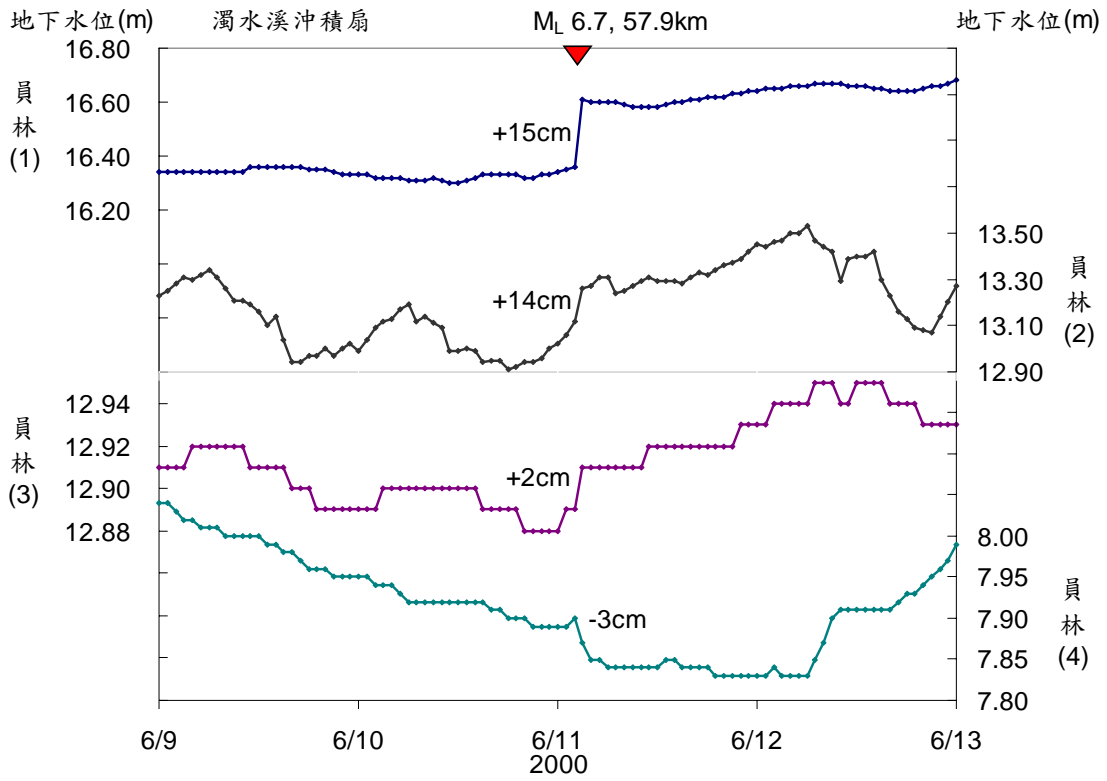


圖 A.4 員林站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

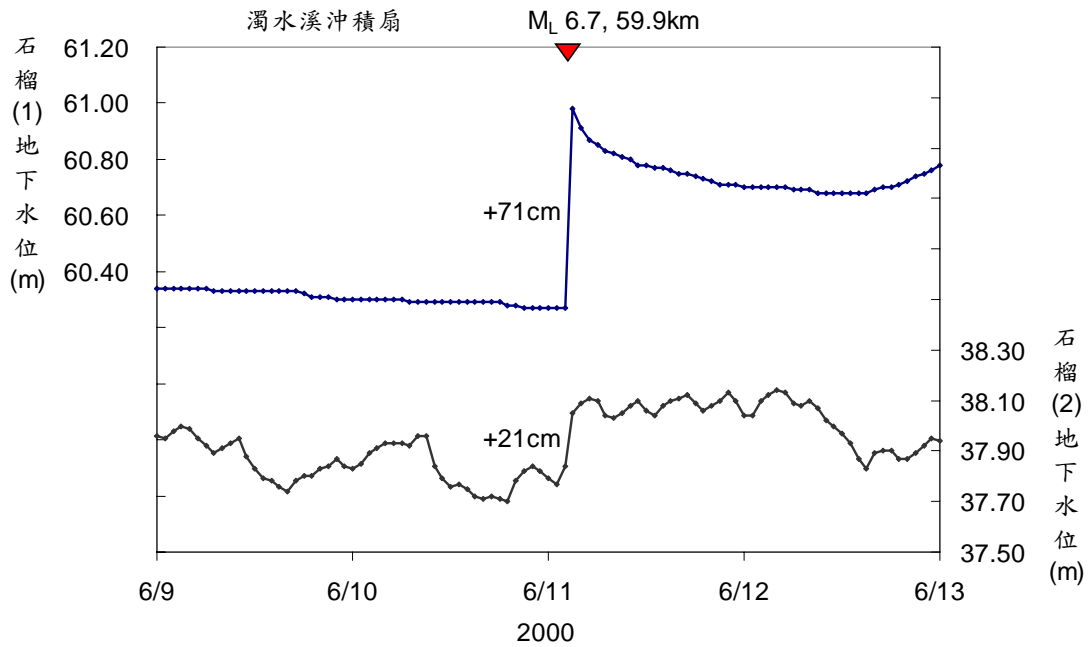


圖 A.5 石榴站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

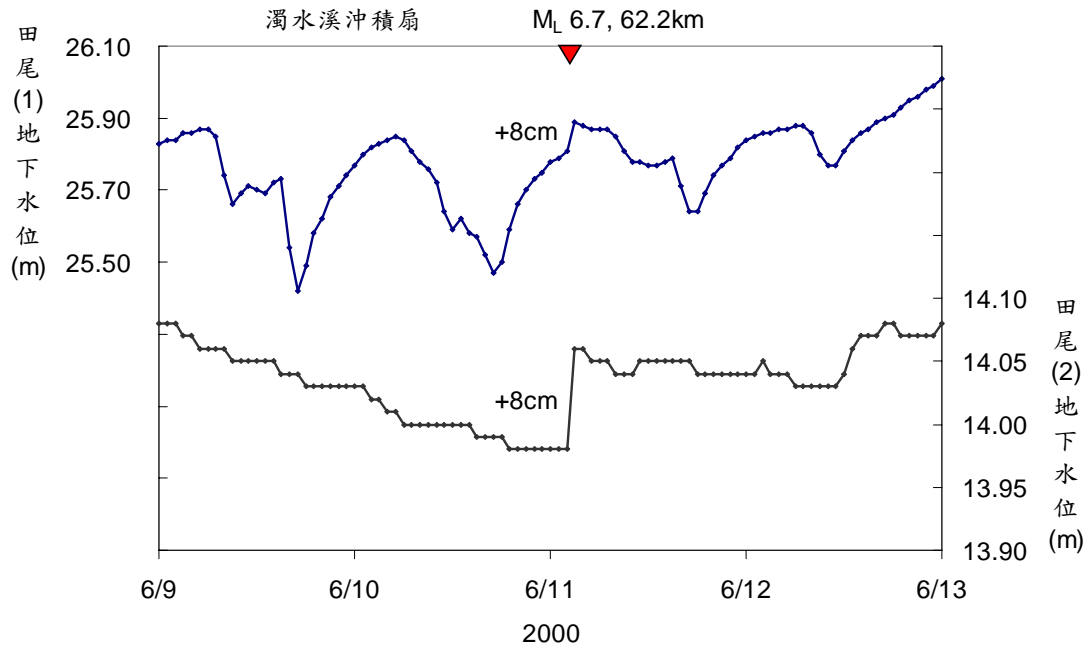


圖 A.6 田尾站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

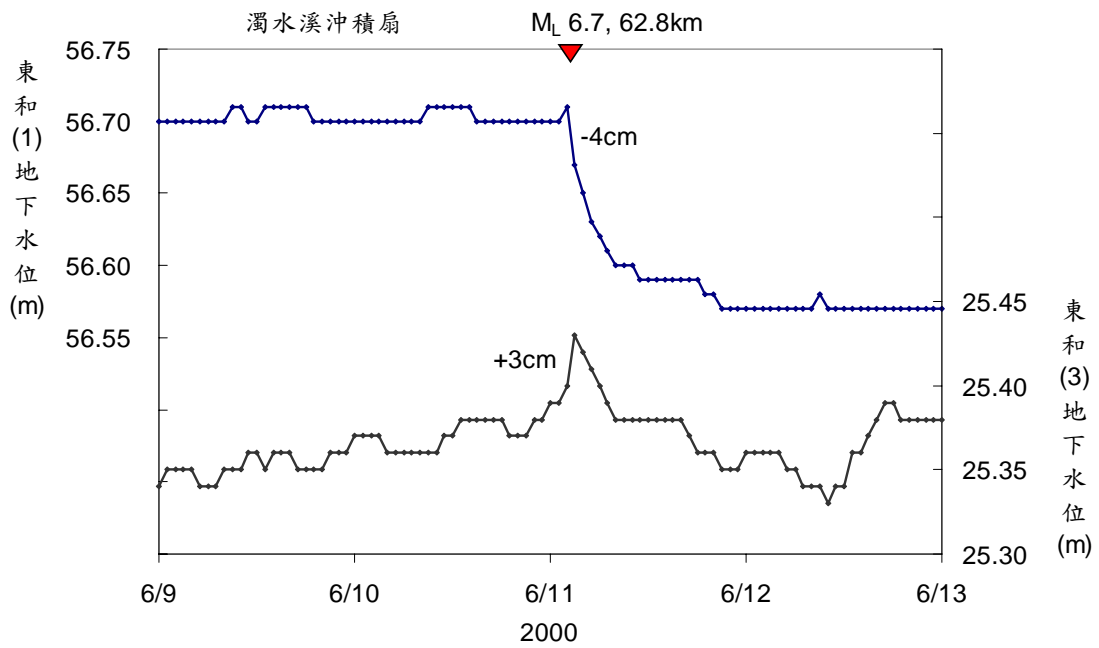


圖 A.7 東和站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

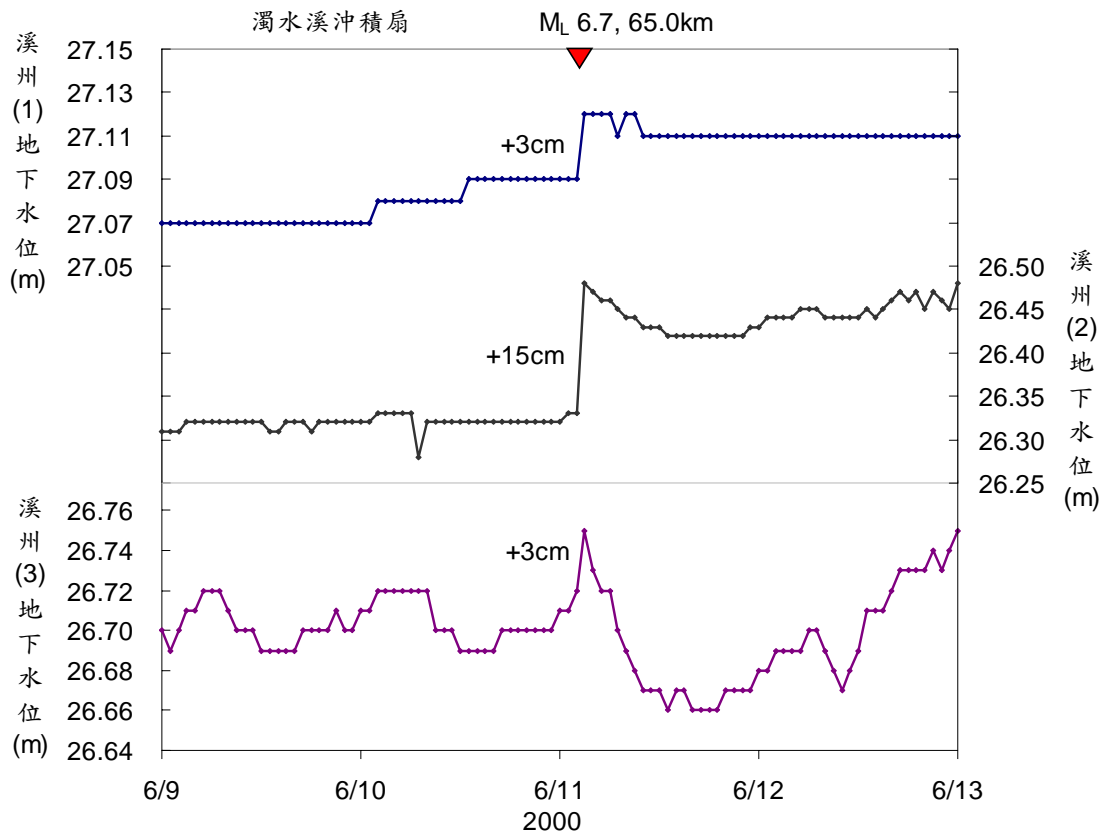


圖 A.8 溪州站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

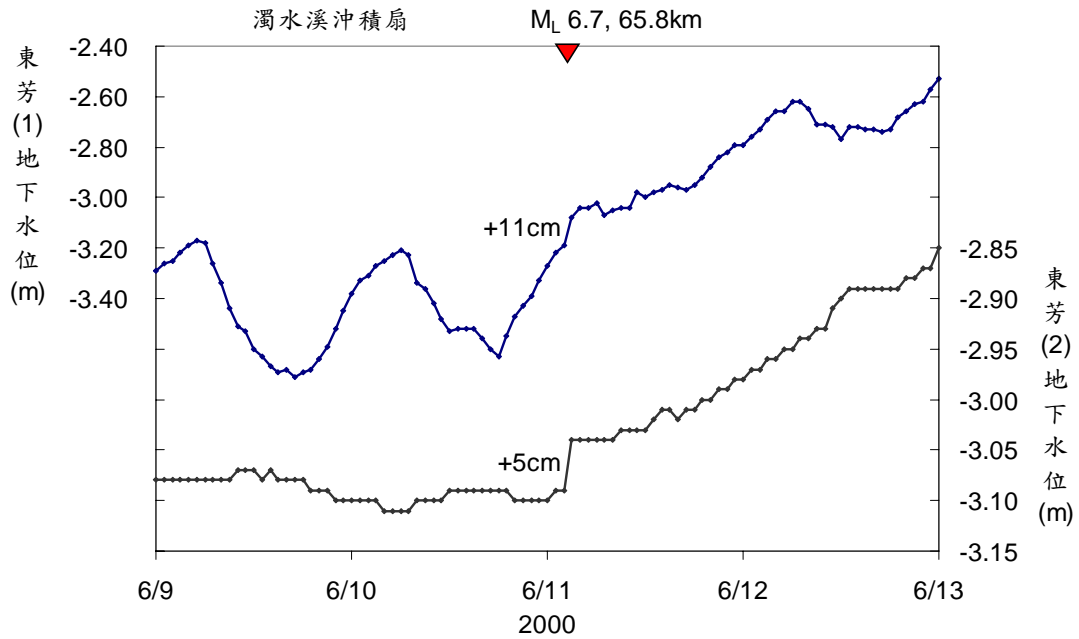


圖 A.9 東芳站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

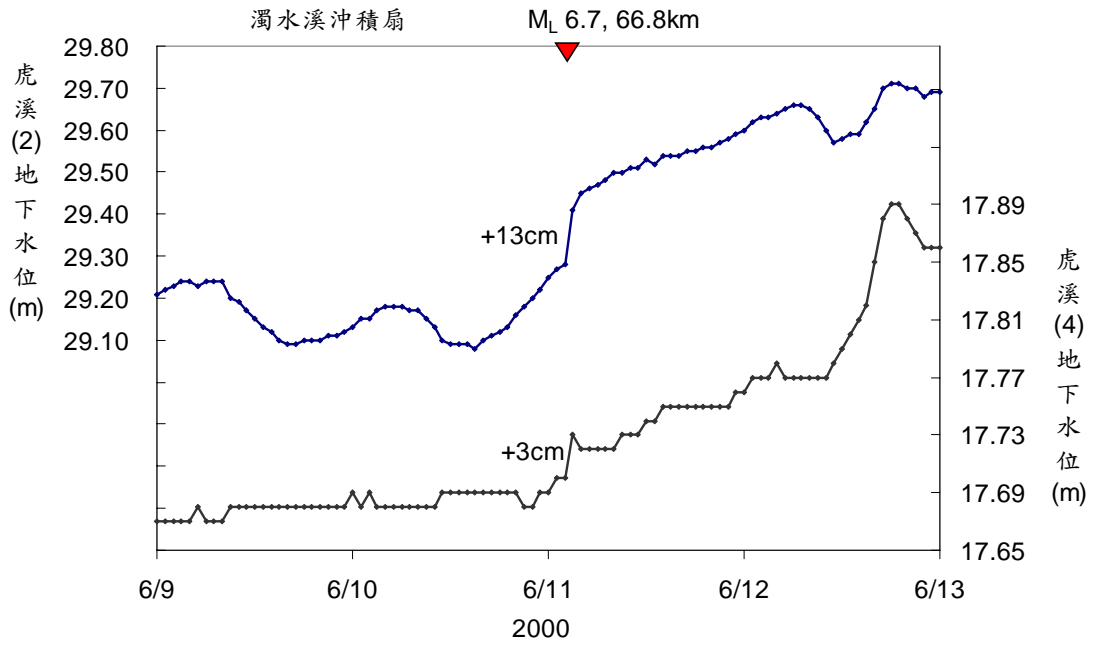


圖 A.10 虎溪站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

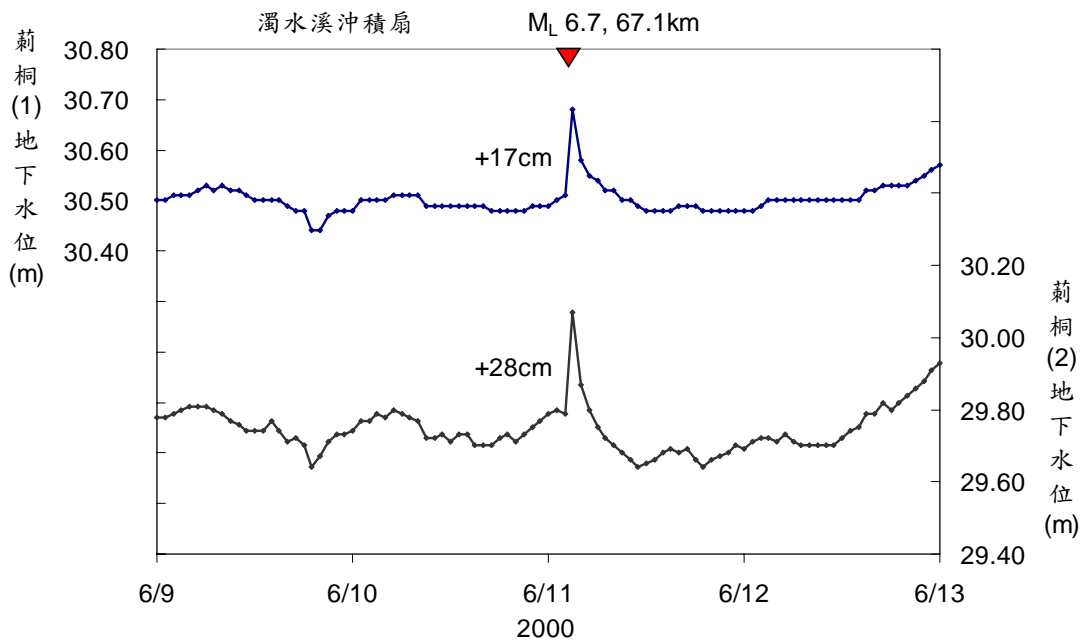


圖 A.11 荊桐站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

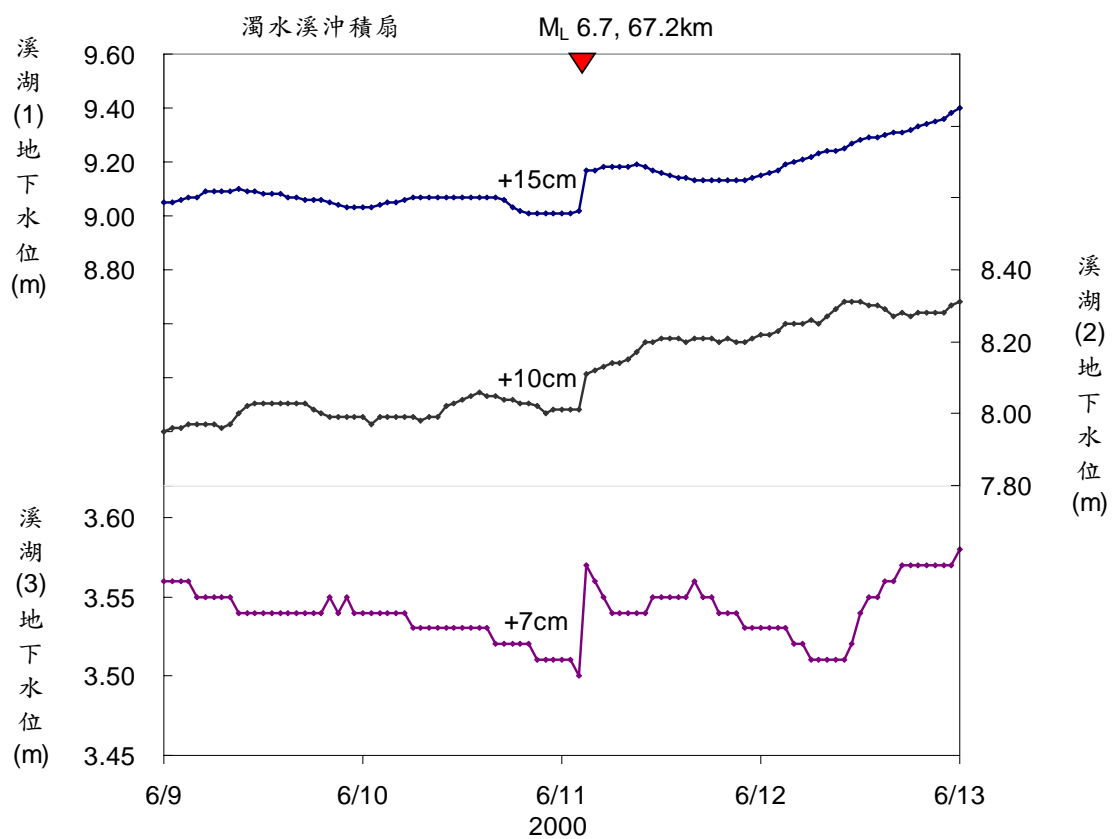


圖 A.12 溪湖站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

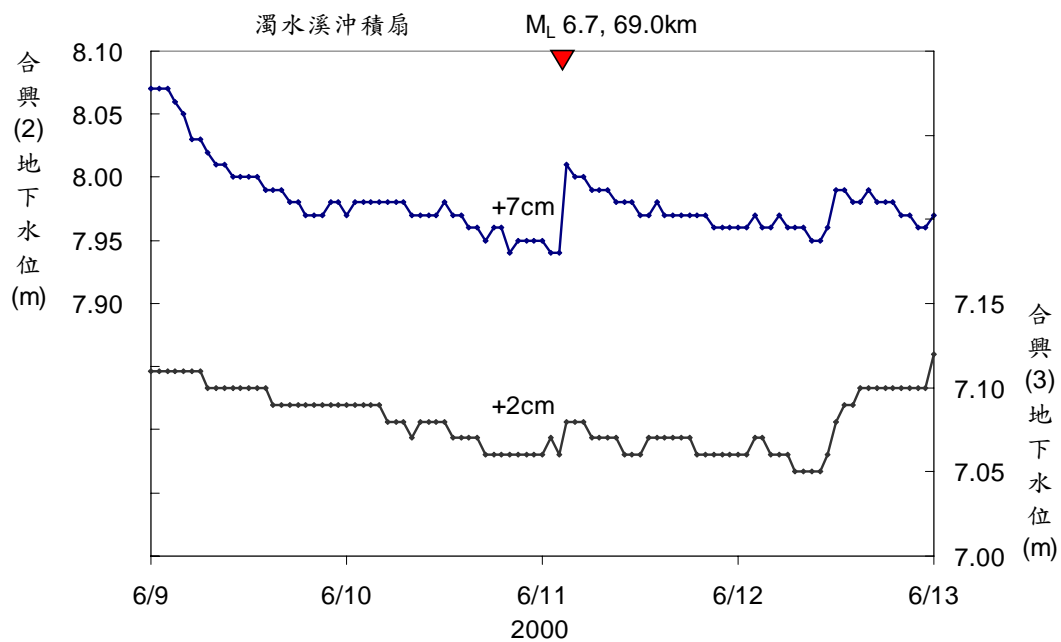


圖 A.13 合興站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

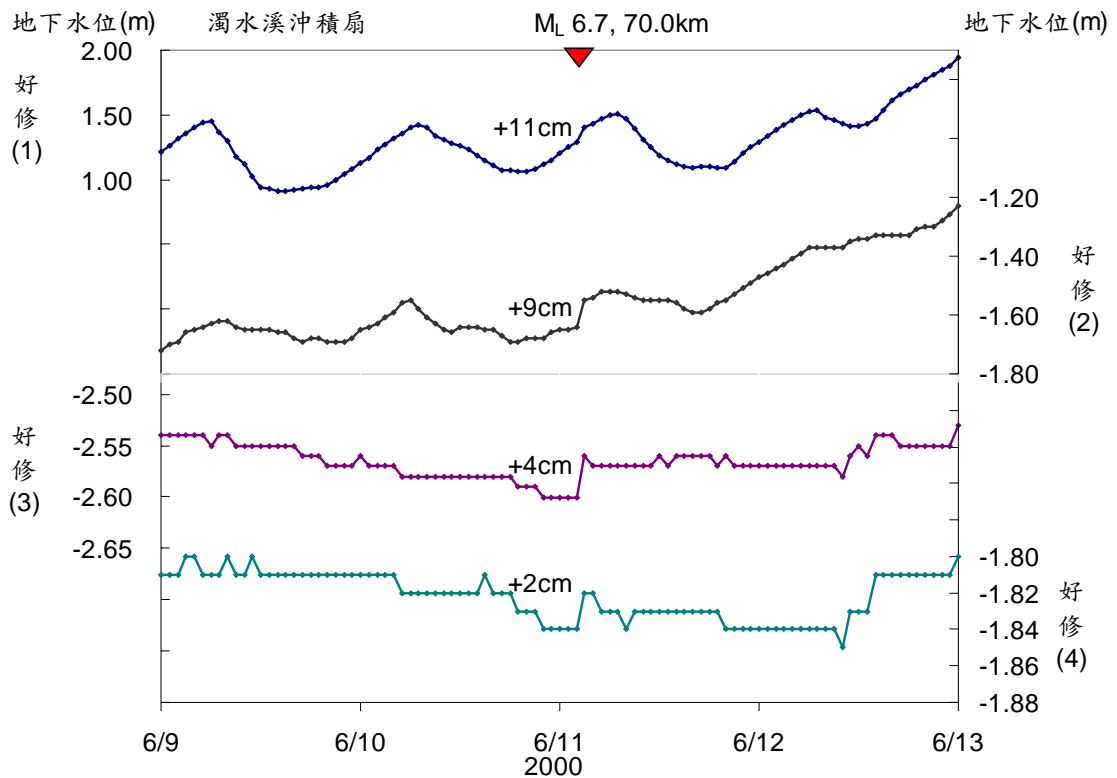


圖 A.14 好修站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

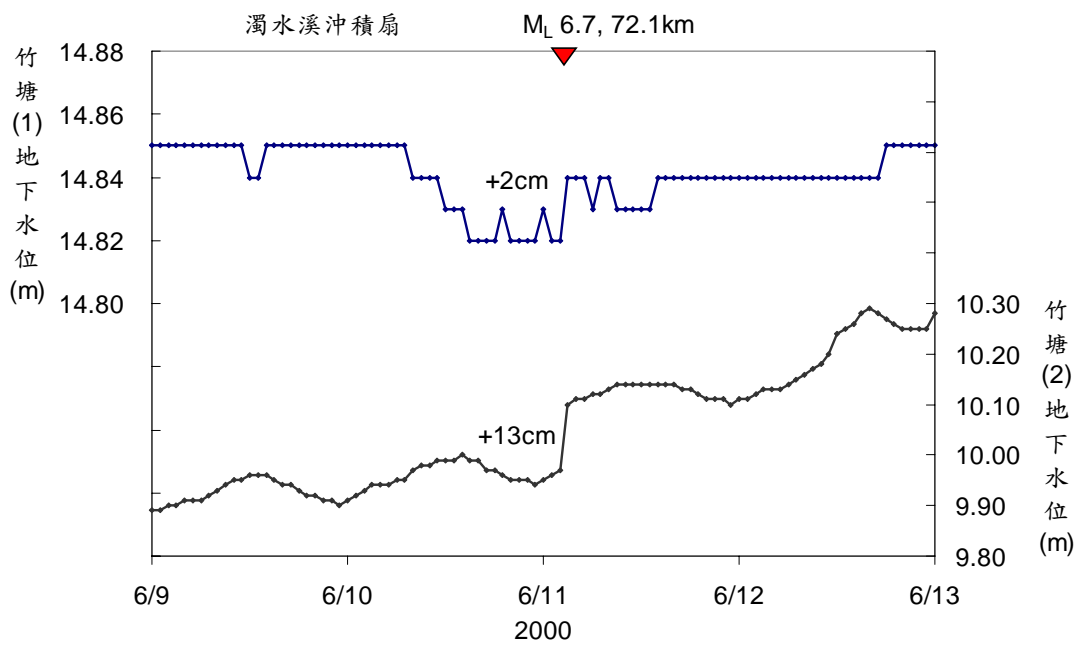


圖 A.15 竹塘站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

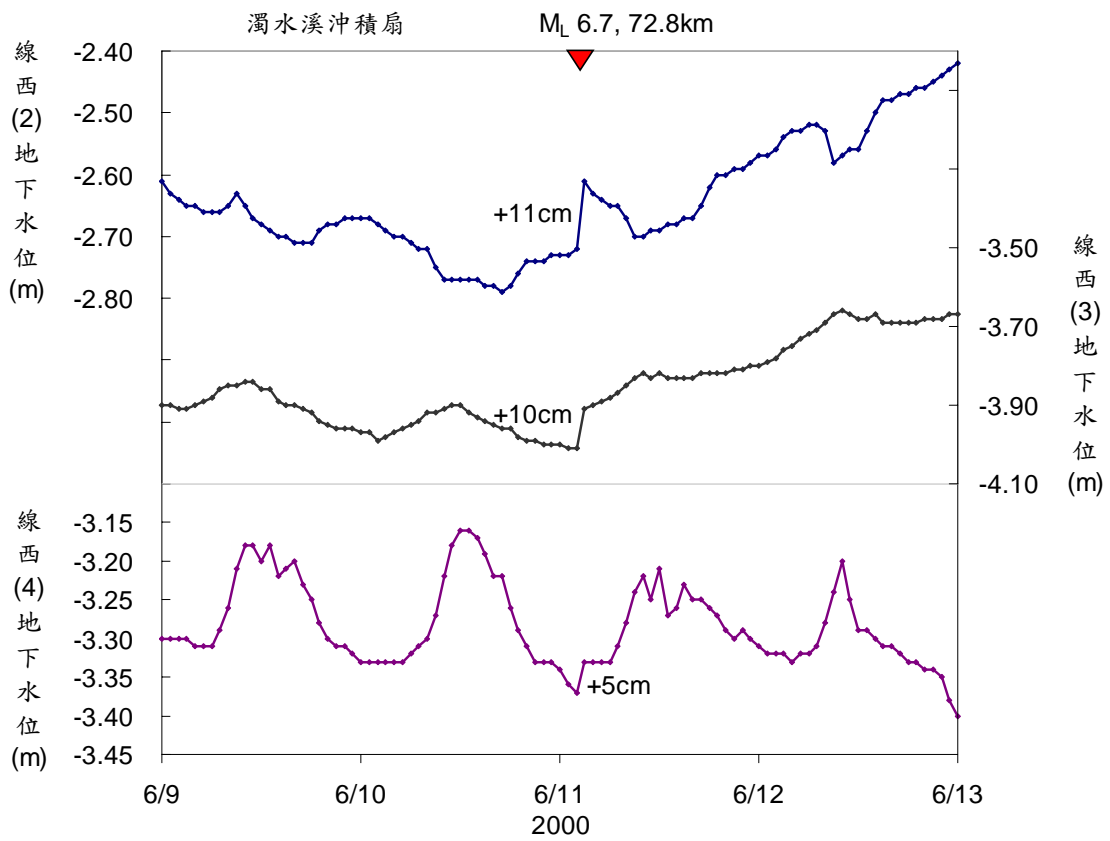


圖 A.16 線西站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

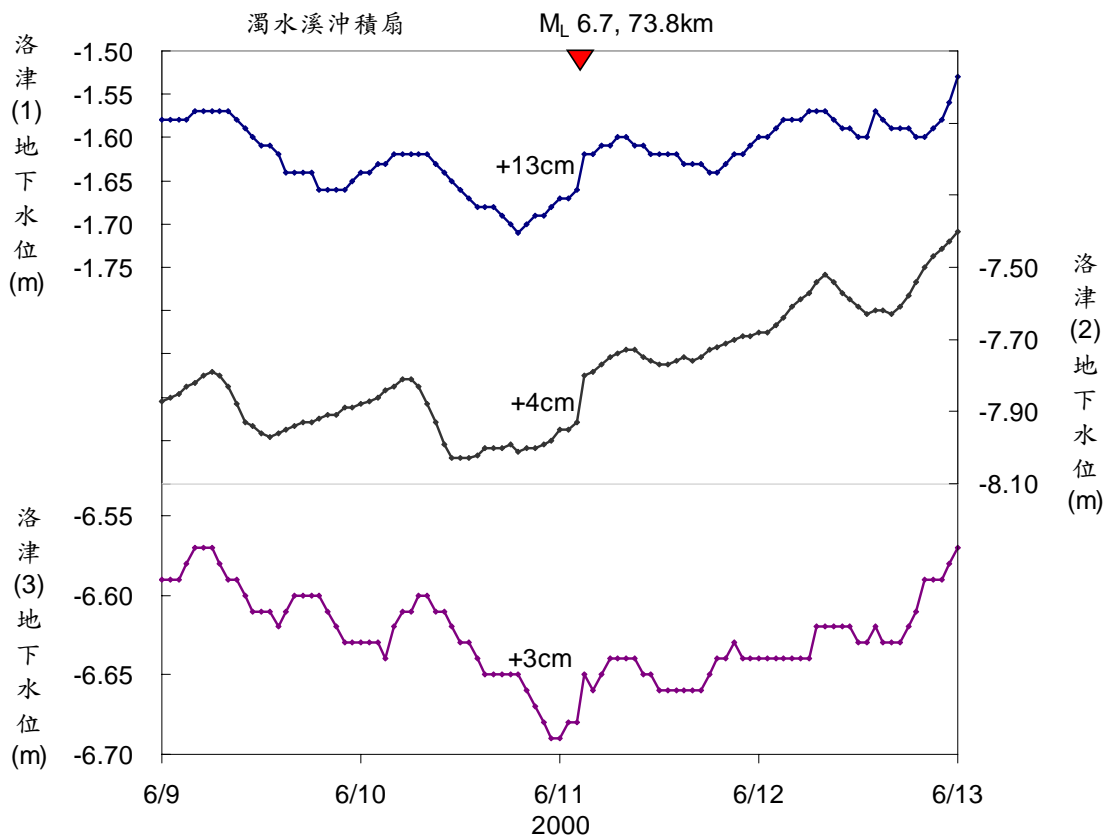


圖 A.17 洛津站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

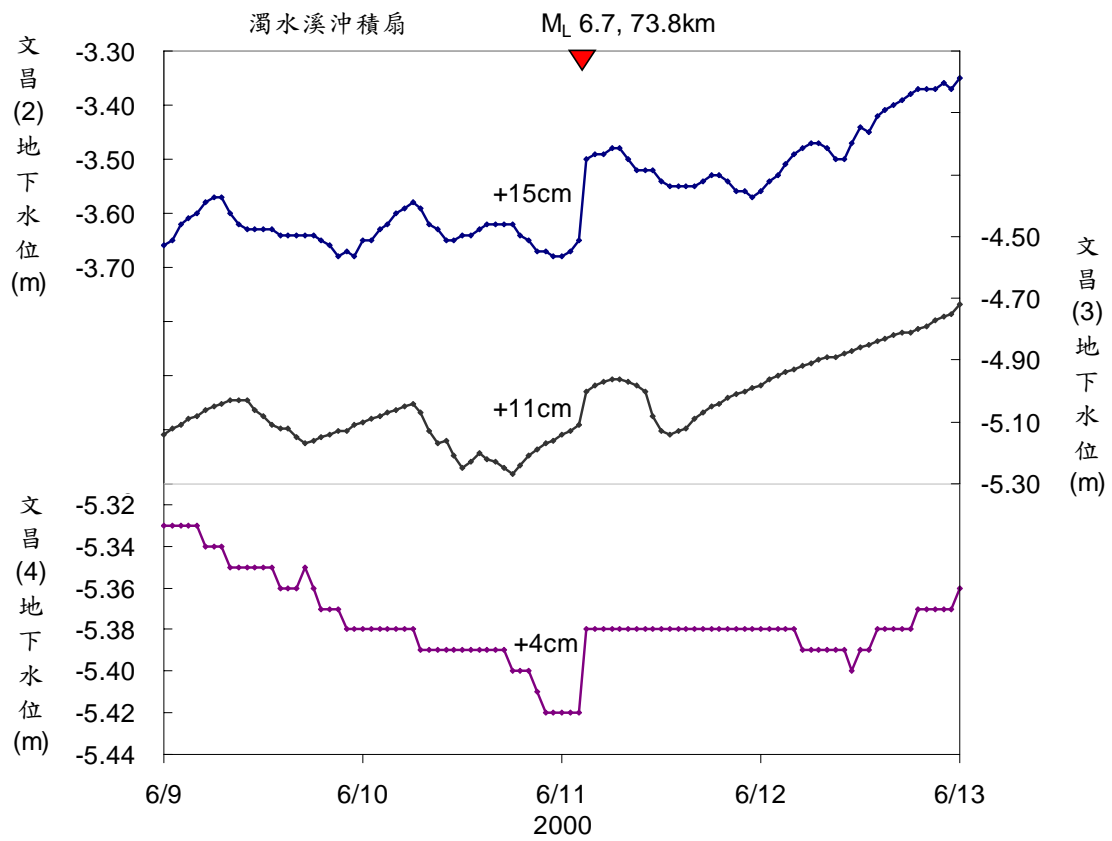


圖 A.18 文昌站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

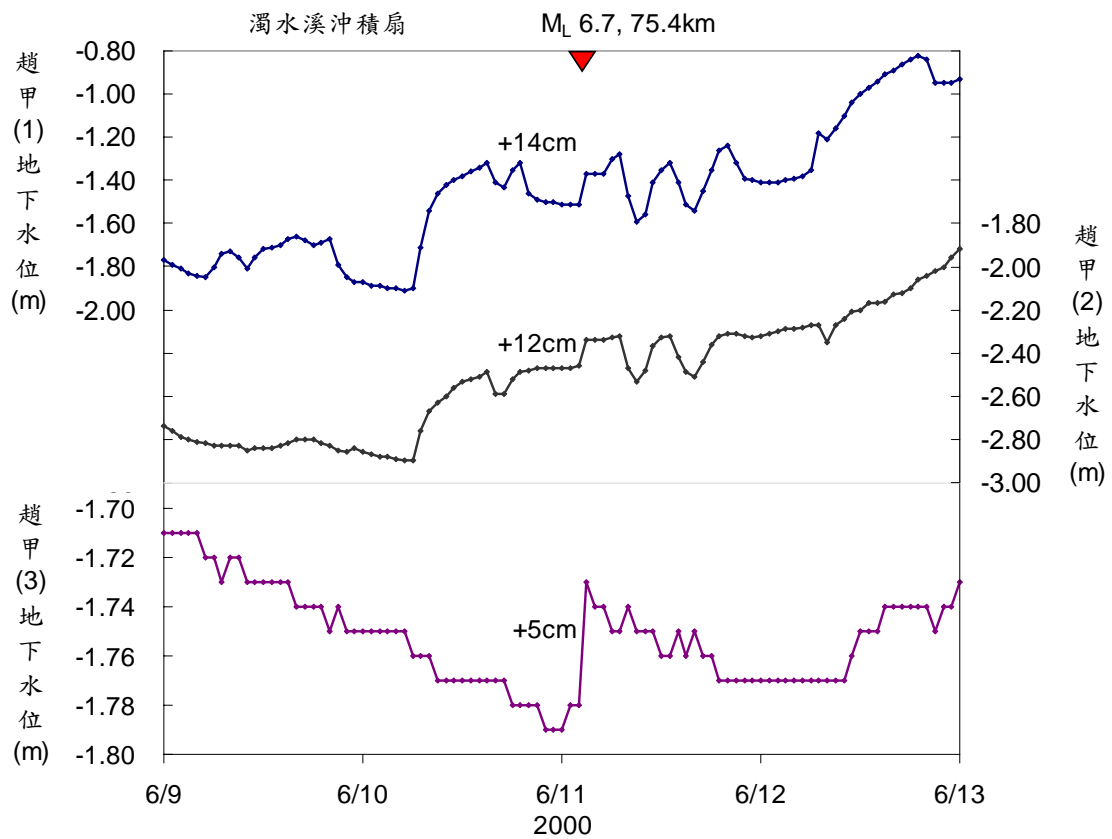


圖 A.19 趙甲站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

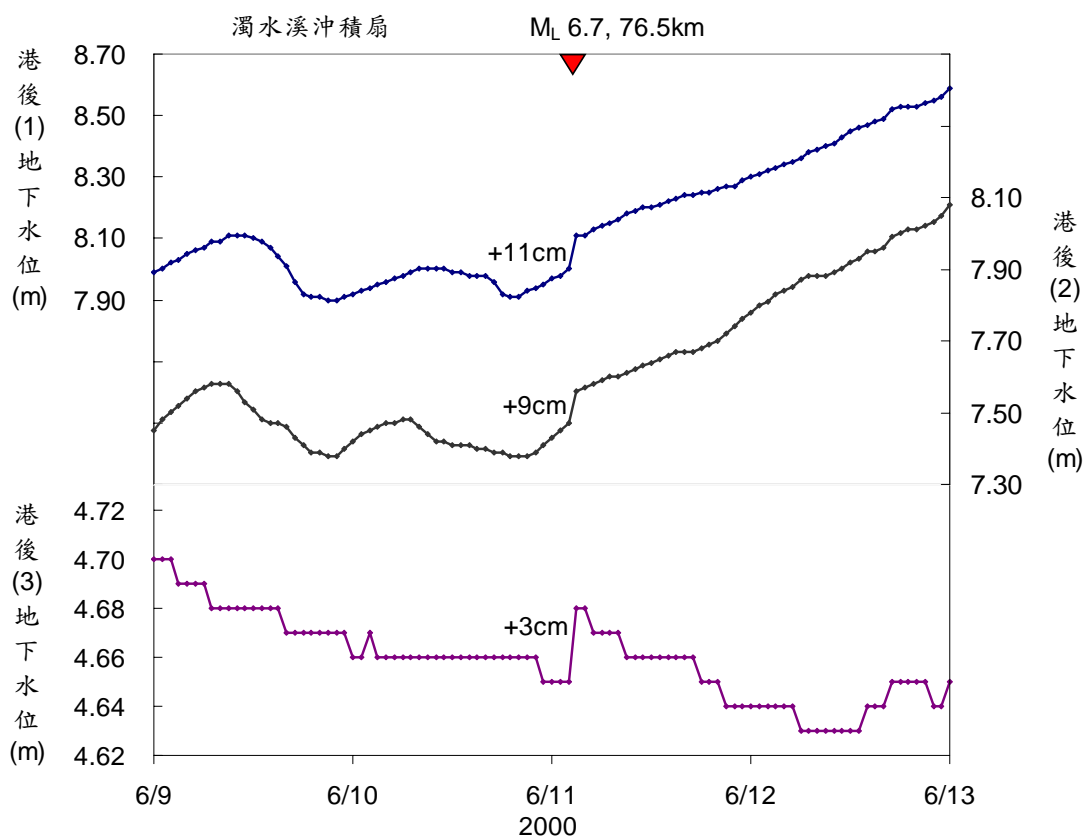


圖 A.20 港後站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

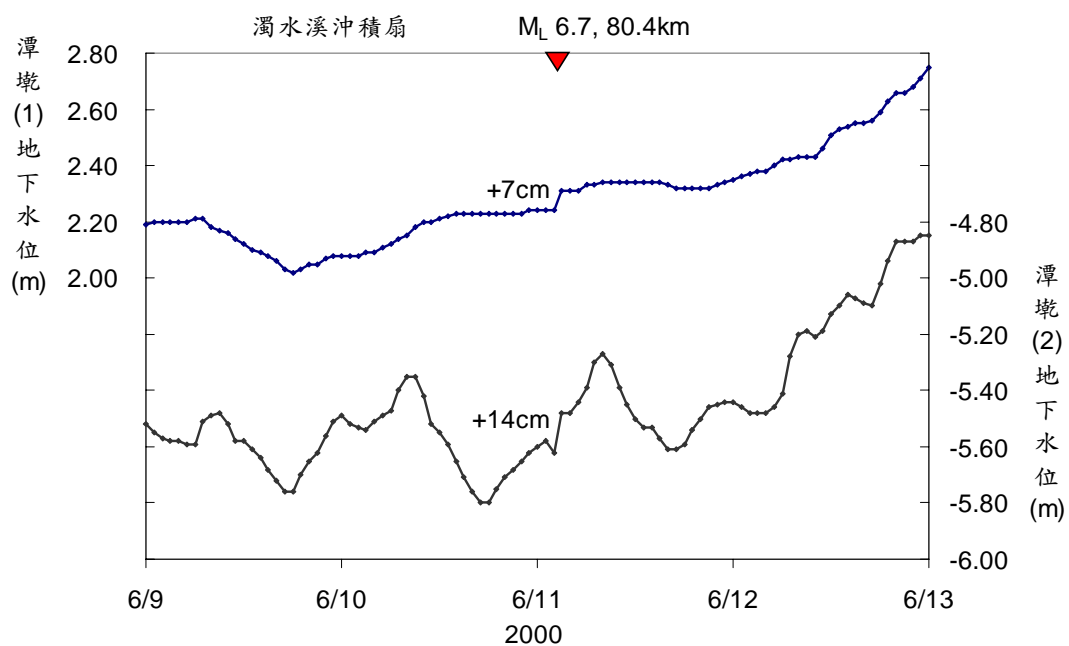


圖 A.21 潭墘站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

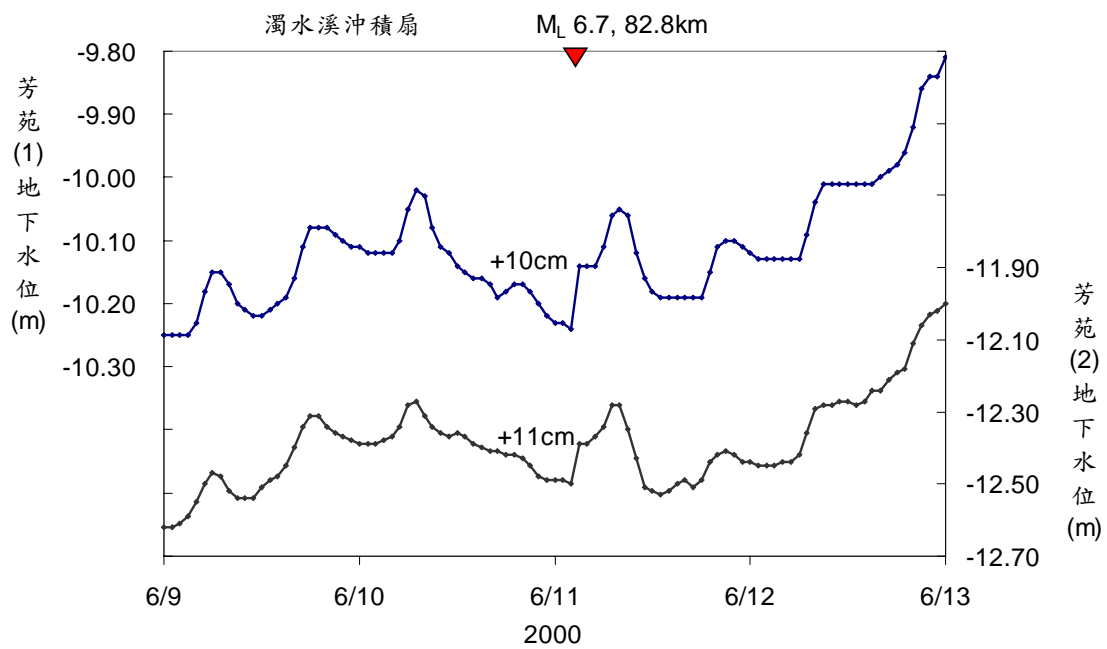


圖 A.22 芳苑站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

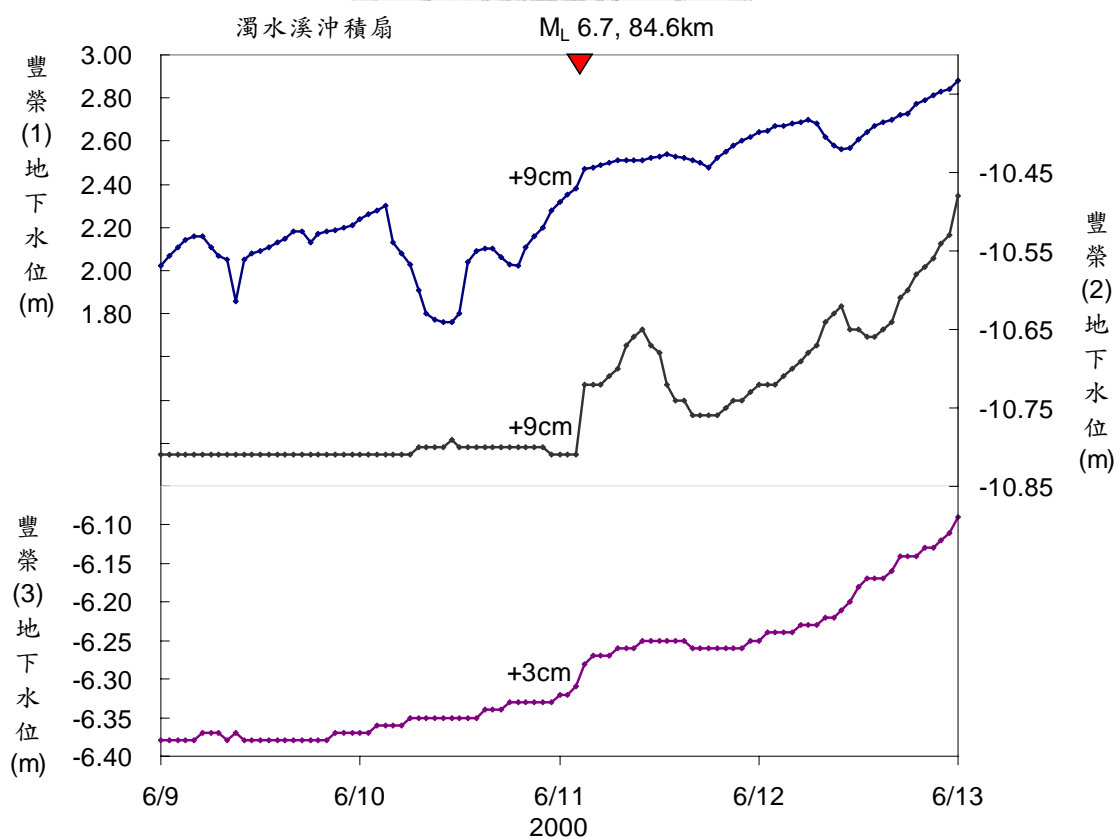


圖 A.23 豐榮站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

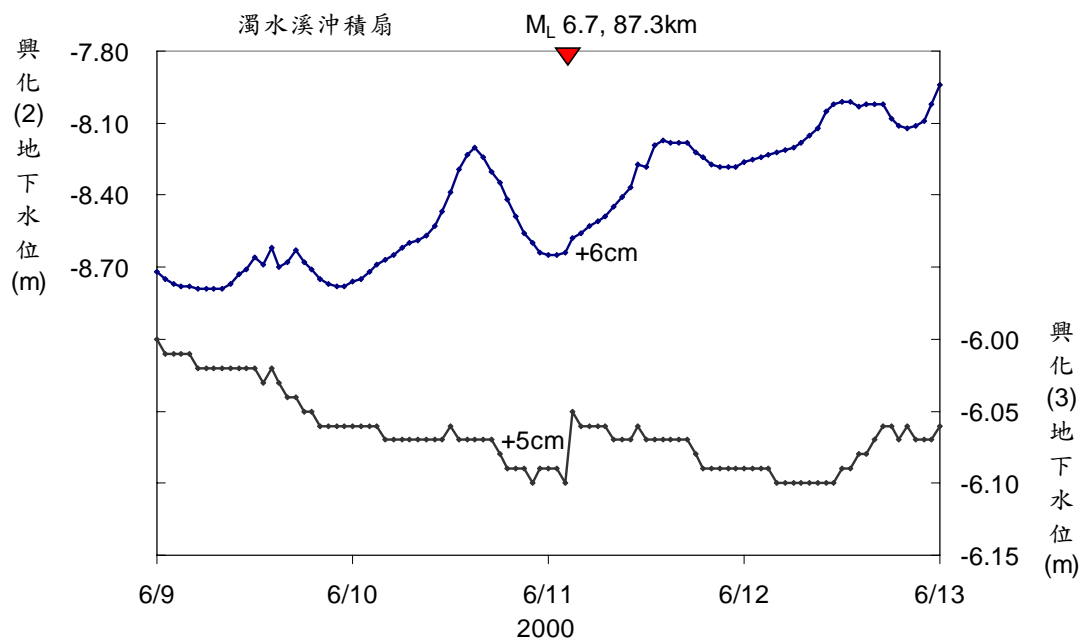


圖 A.24 興化站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

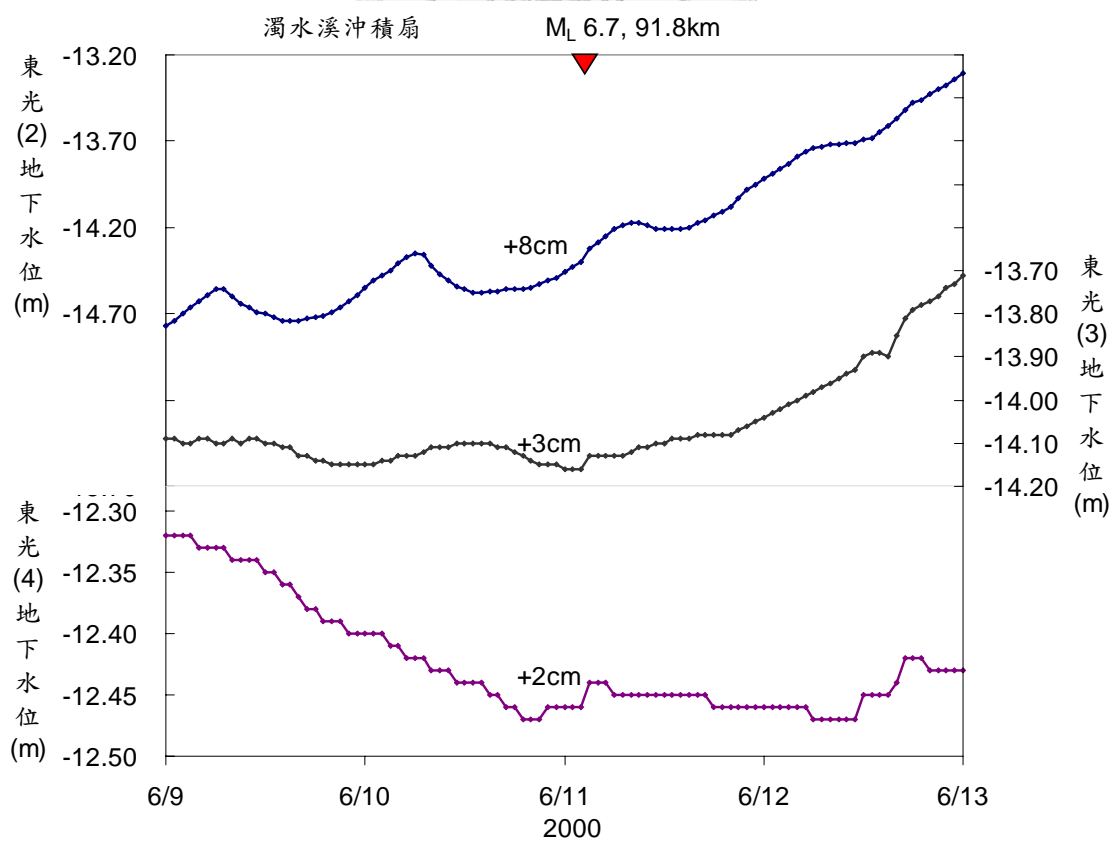


圖 A.25 東光站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

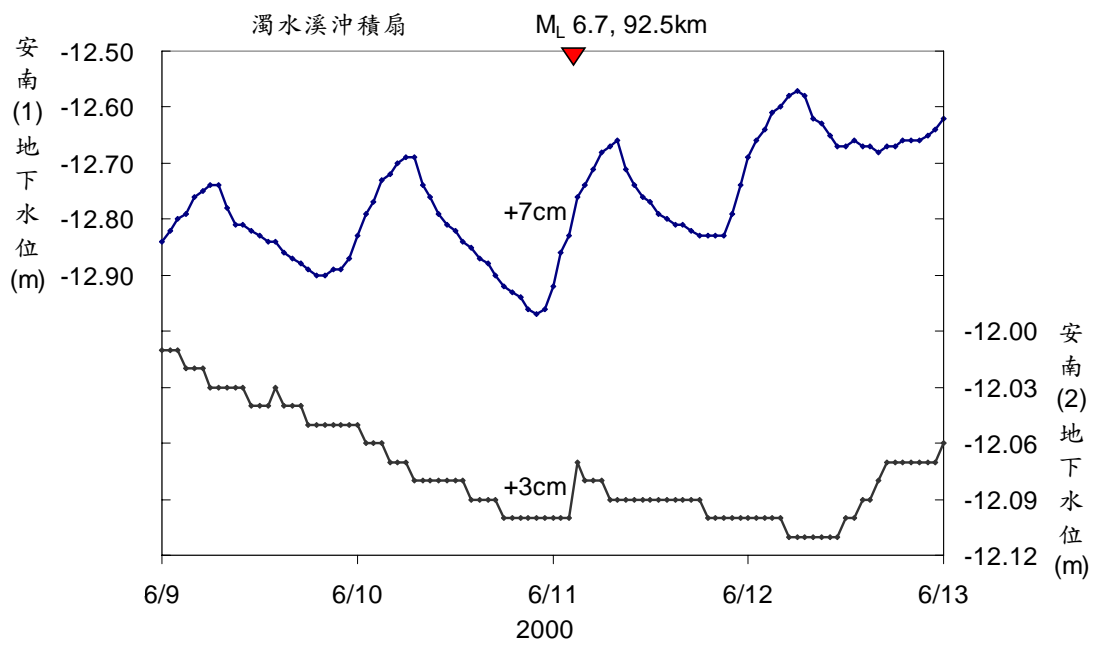


圖 A.26 安南站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

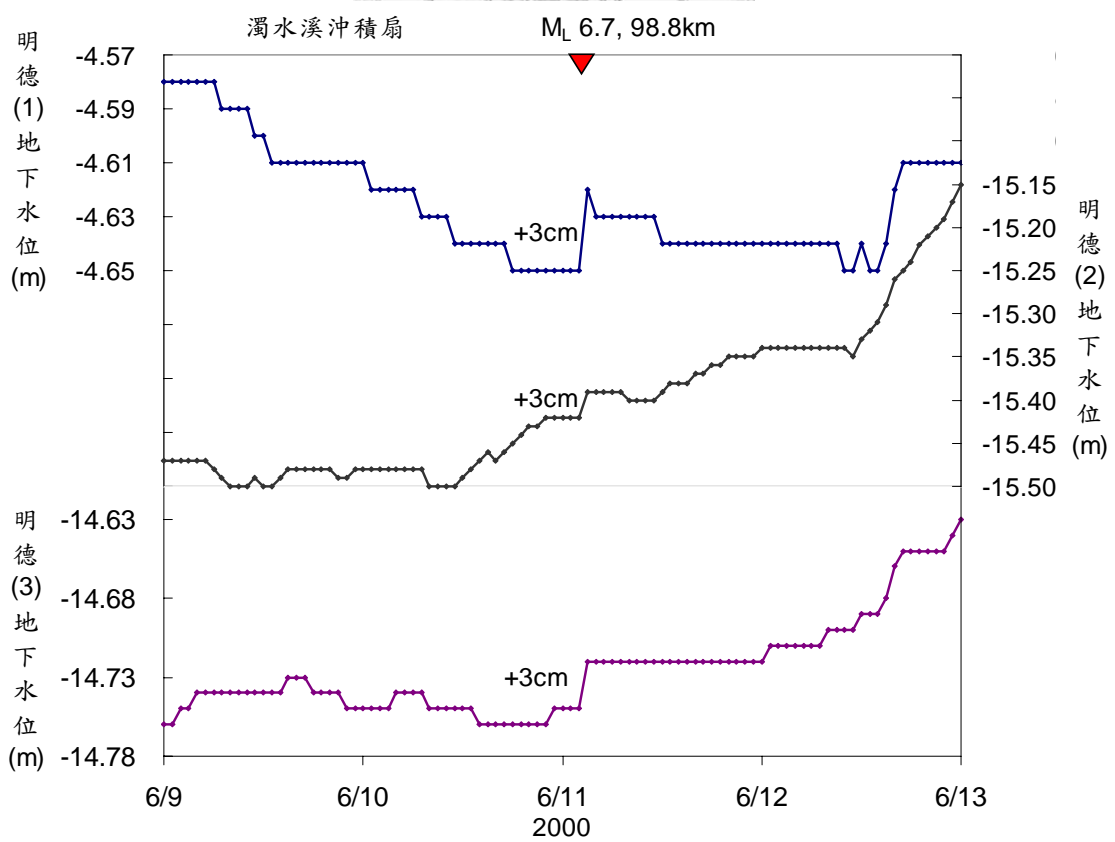


圖 A.27 明德站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

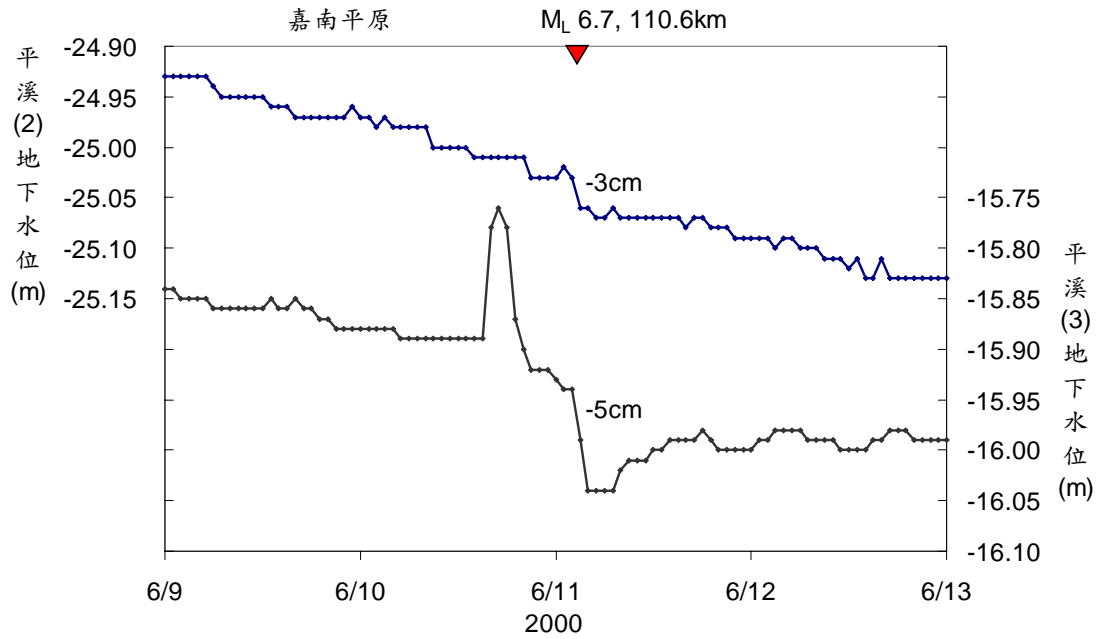


圖 A.28 平溪站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

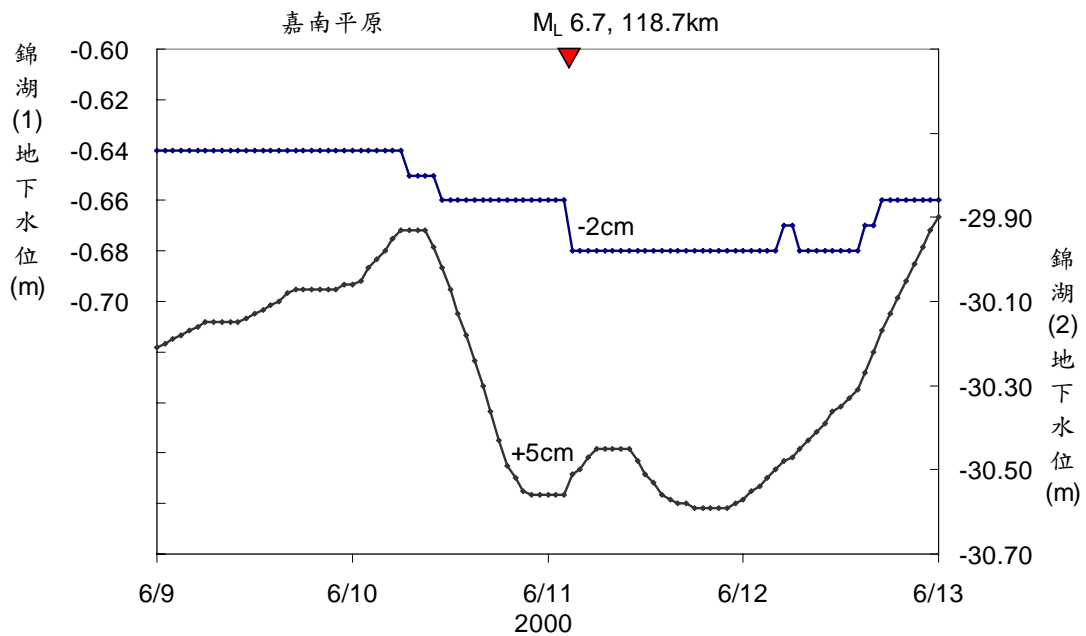


圖 A.29 錦湖站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖

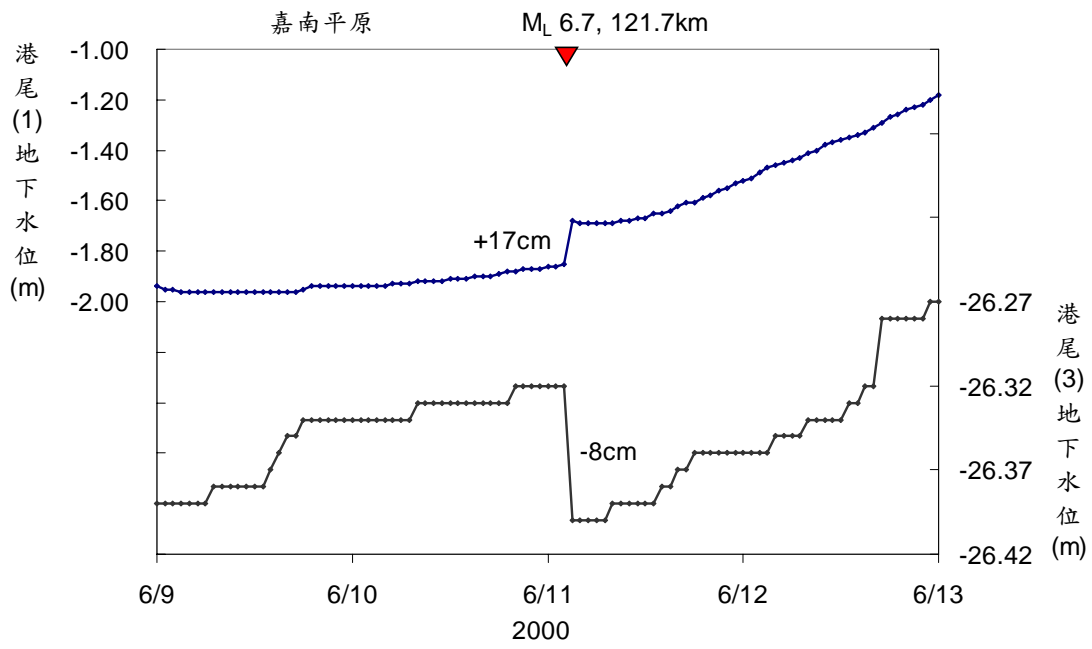


圖 A.30 港尾站於仁愛地震前後兩天水位歷線圖



附錄 B 坪頂一號觀測井試測資料水位歷線圖

附錄 B 為坪頂一號觀測井於 2007 年 12 月 4 日開始進行高頻記錄測試之水位歷線圖，記錄期間為 2007 年 12 月 4 日至 2008 年 5 月 5 日，共進行五個月的測試，其中第一個月為二分鐘一筆的資料，其餘四個月為五分鐘一筆的資料，每月之水位將與地震及雨量進行比較。

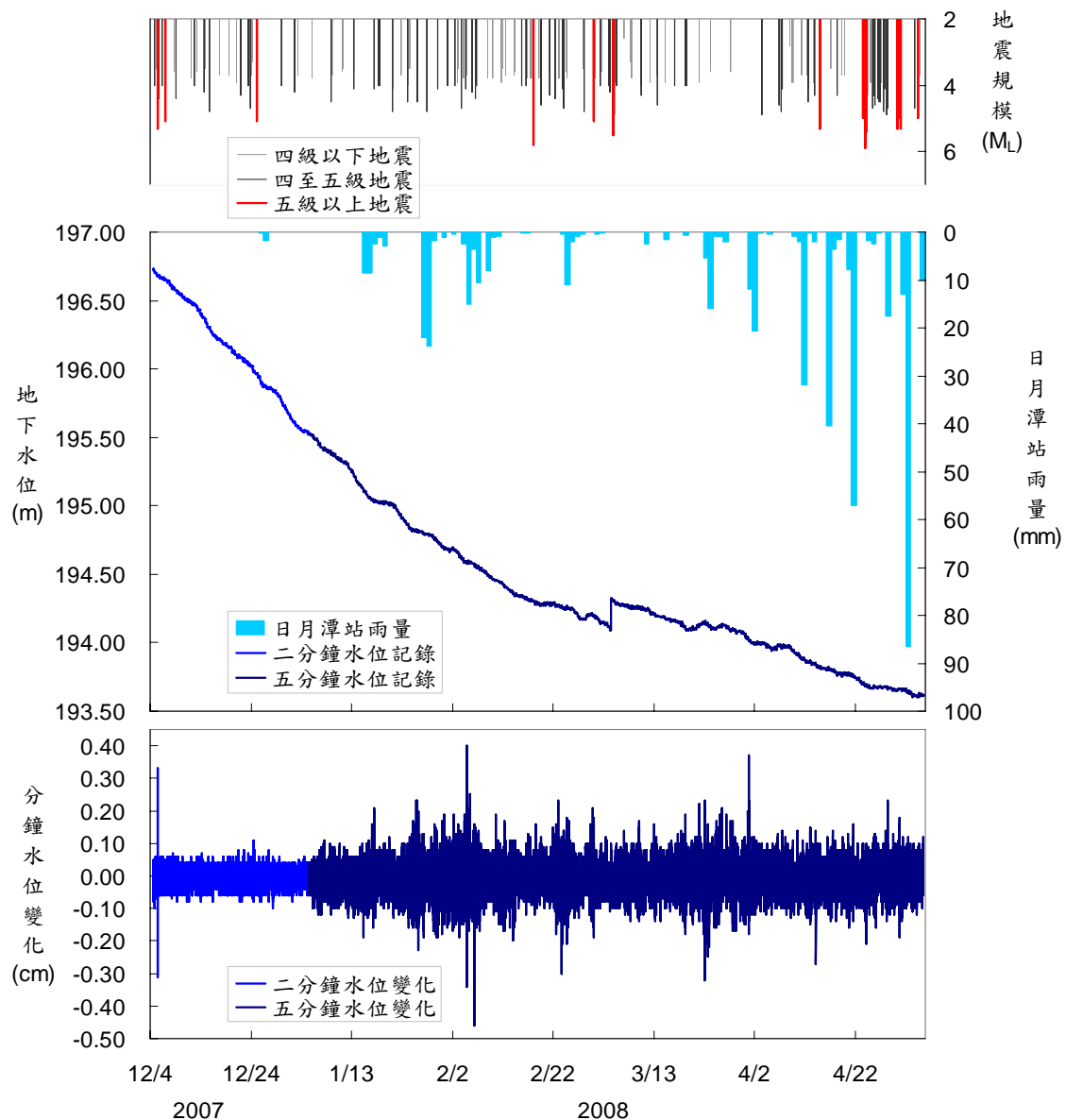


圖 B.1 2007 年 12 月 4 日至 2008 年 5 月 5 日試測資料水位歷線圖

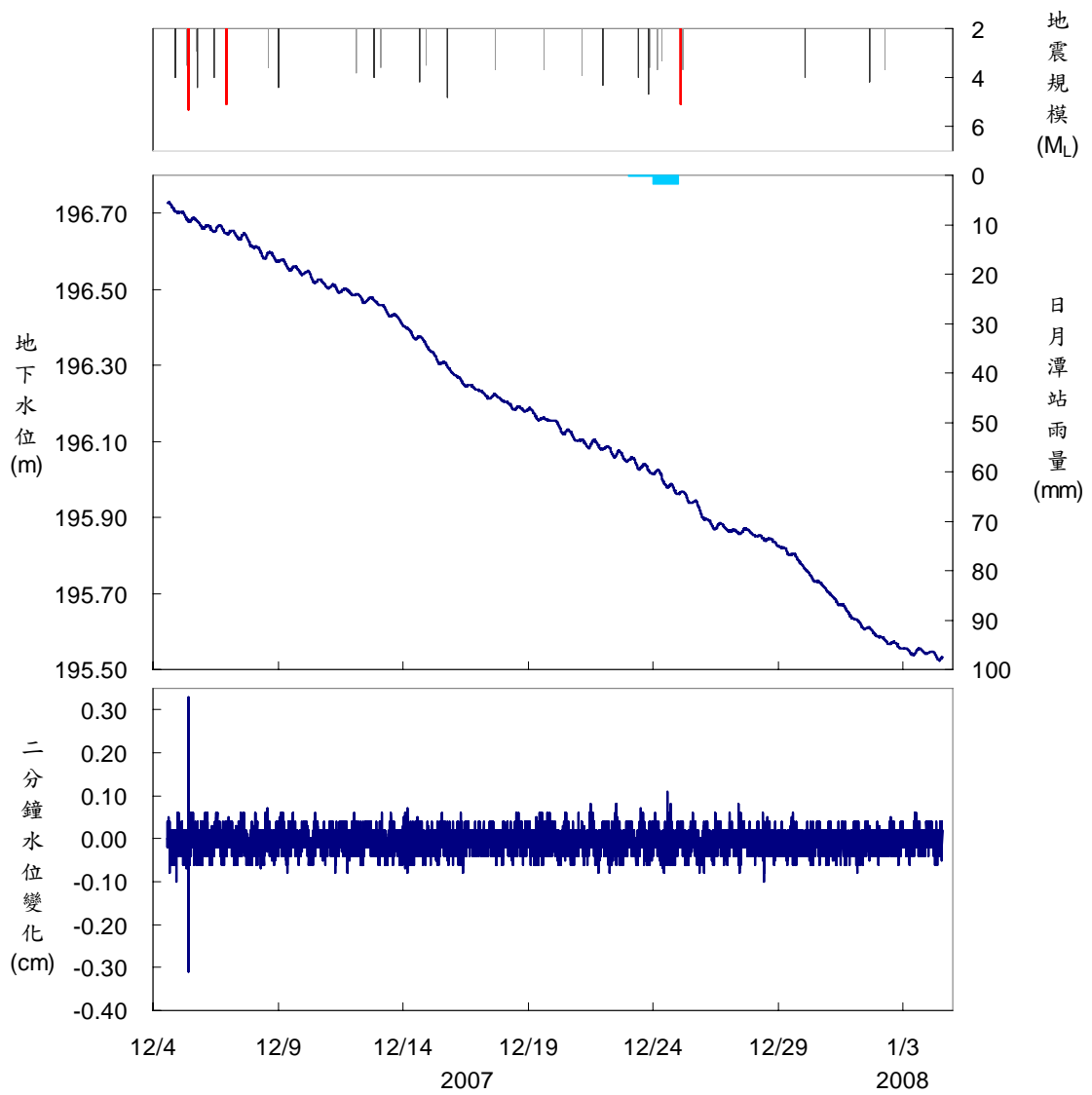


圖 B.2 2007 年 12 月 4 日至 2008 年 1 月 4 日二分鐘試測資料水位歷線圖

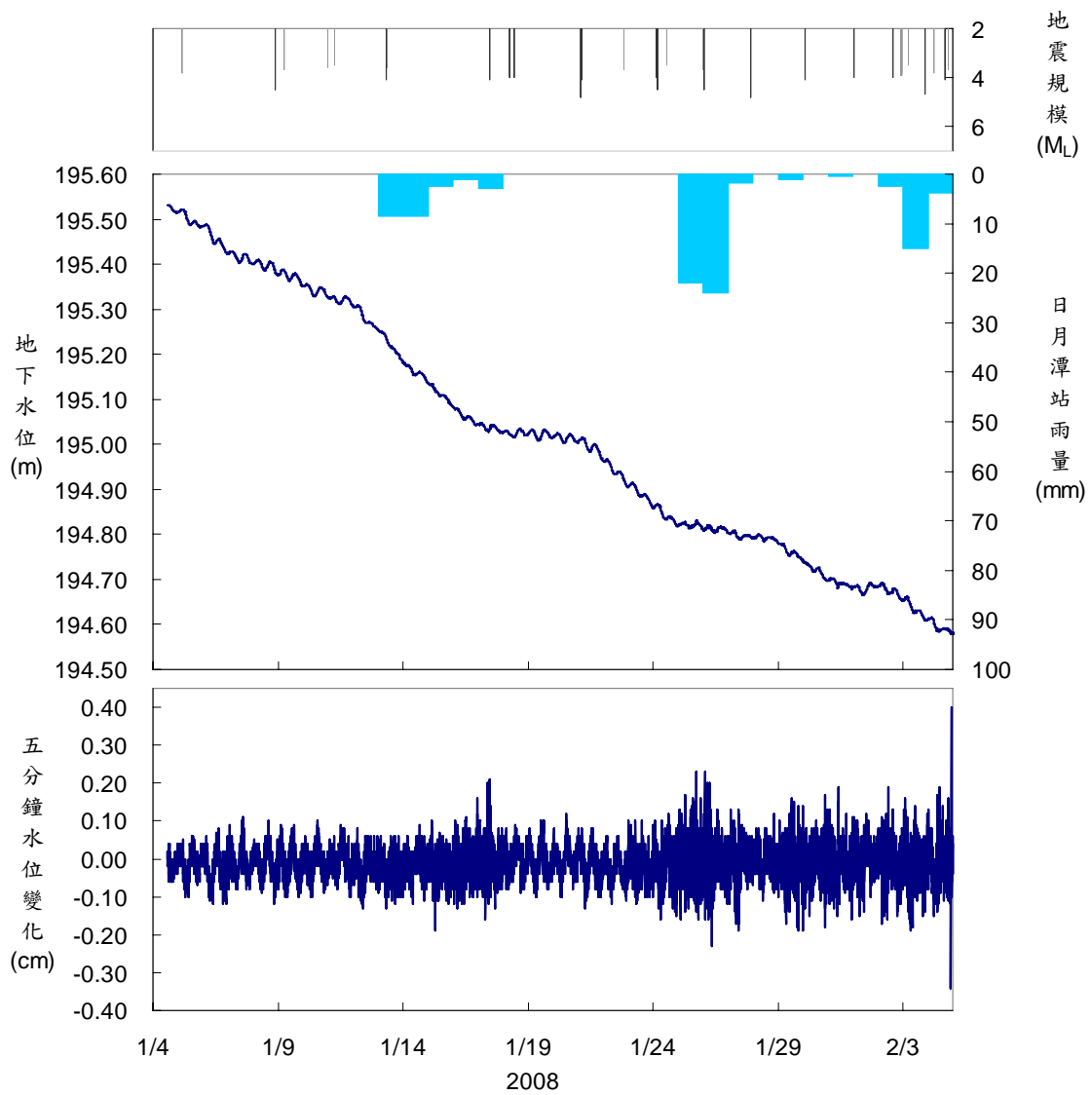


圖 B.3 2008 年 1 月 4 日至 2008 年 2 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖

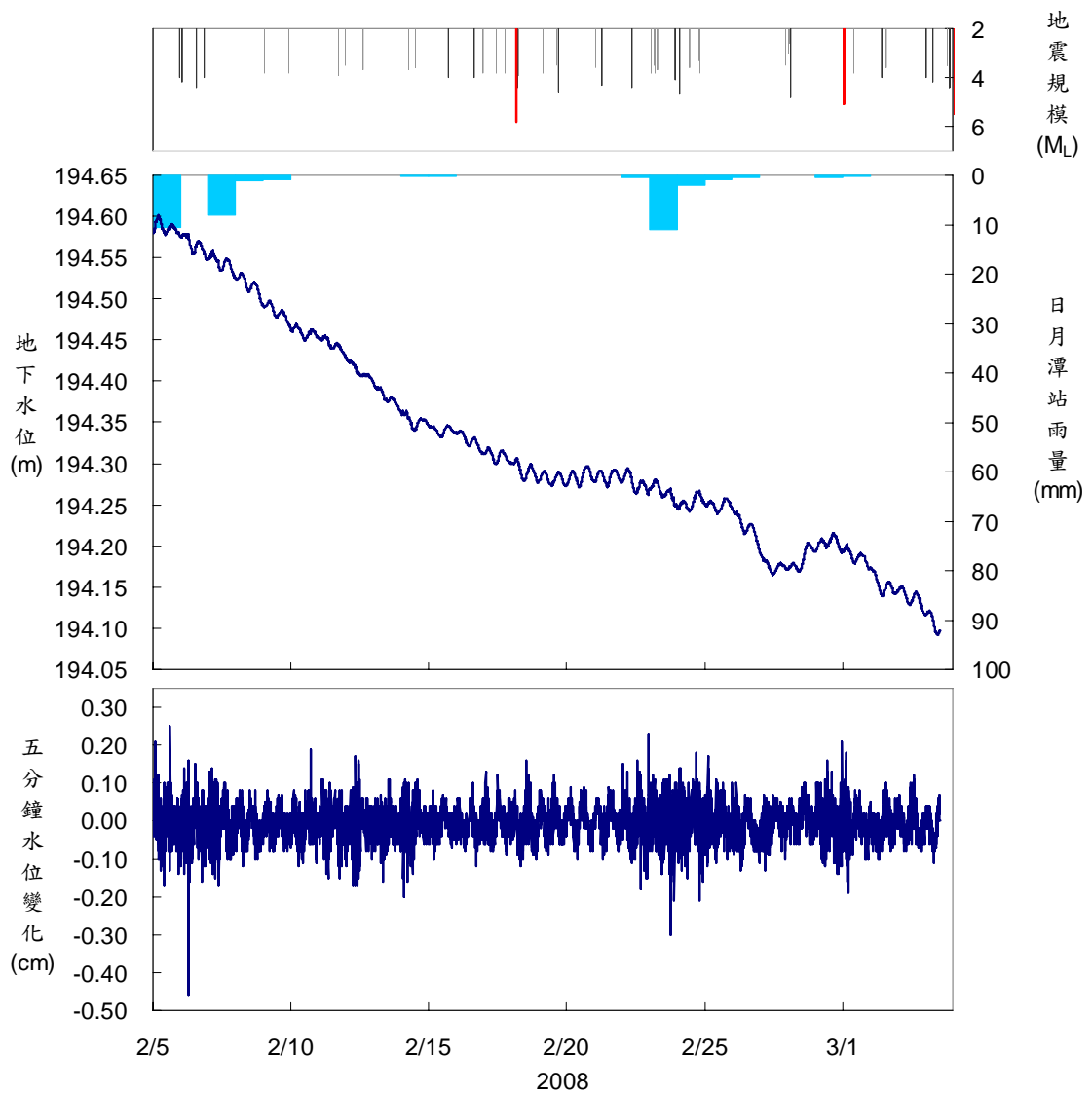


圖 B.4 2008 年 2 月 5 日至 2008 年 3 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖

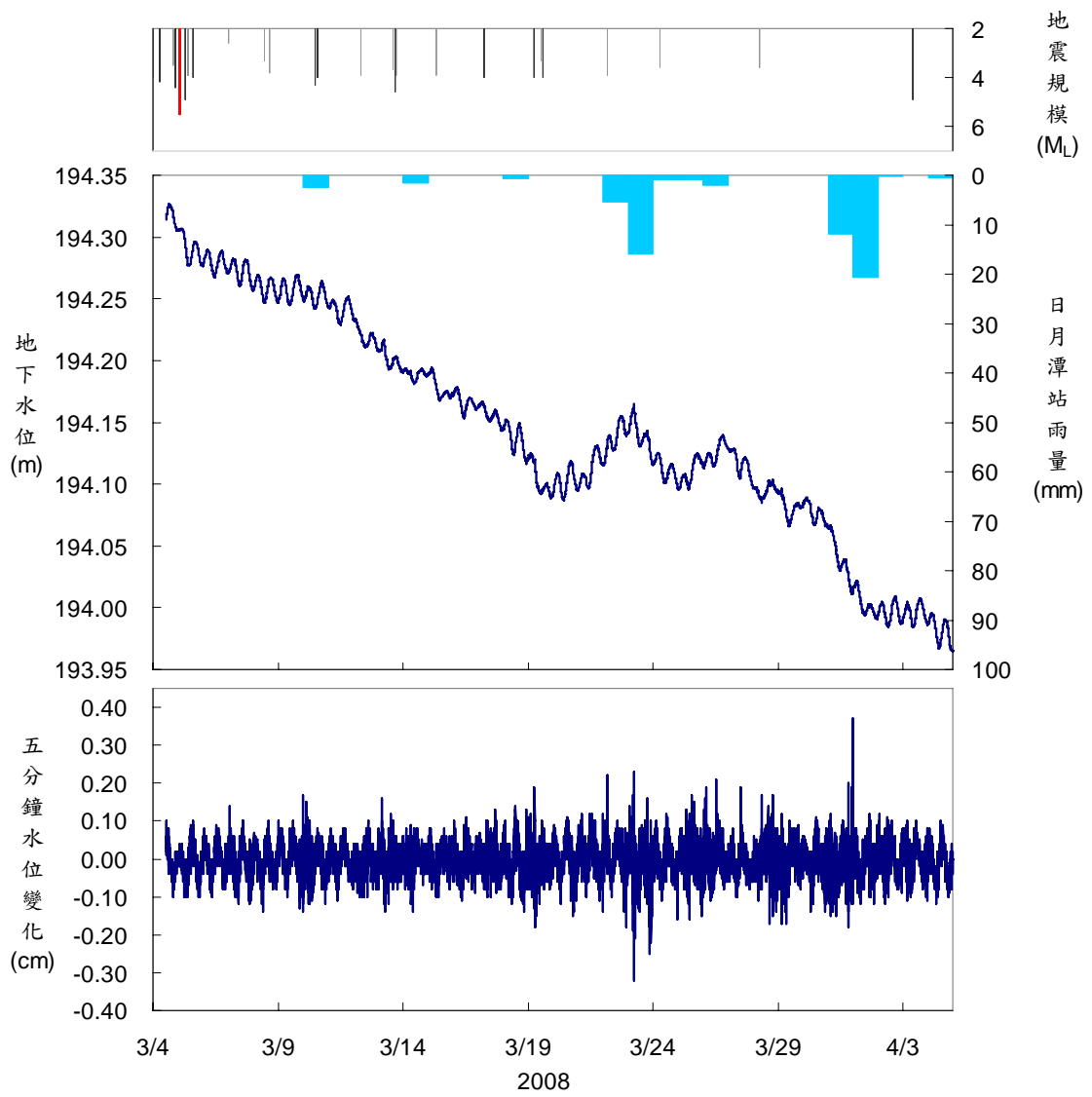


圖 B.5 2008 年 3 月 4 日至 2008 年 4 月 4 日五分鐘試測資料水位歷線圖

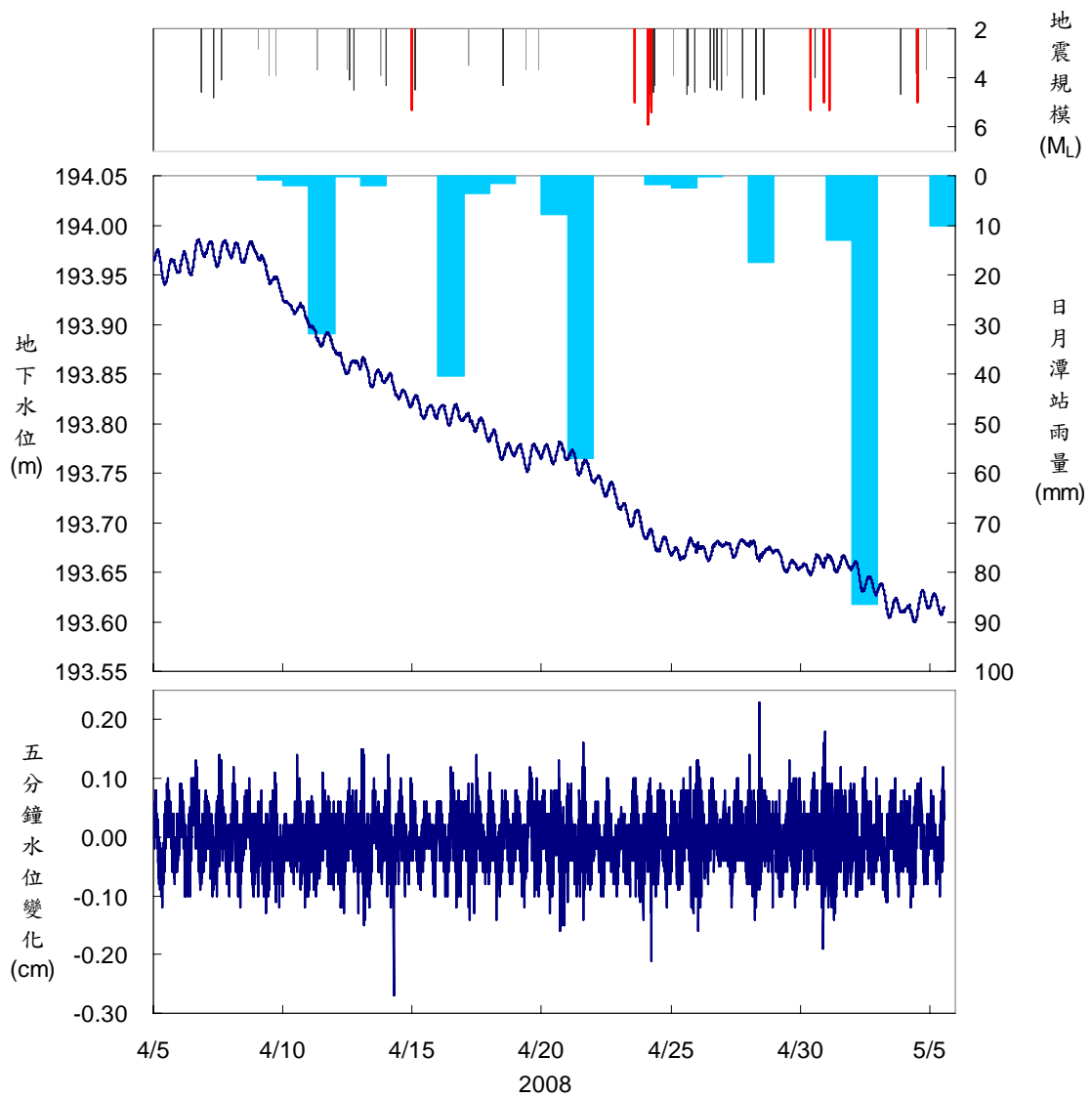


圖 B.6 2008 年 4 月 5 日至 2008 年 5 月 5 日五分鐘試測資料水位歷線圖