

(封面)

交通部中央氣象局
委託研究計畫(期末)成果報告

地下水水位變化與地震的關連性研究(Ⅲ)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-101-E-13-

執行期間：101年01月01日至101年12月31日

計畫主持人：張健財

執行機構：萬能科技大學營建科技系

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告1份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告1份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各1份

中華民國 101 年 11 月 23 日

政府研究計畫(期中/期末)報告摘要資料表

| | | | |
|-----------------|--|--------|---------------------|
| 計畫中文名稱 | 地下水水位變化與地震的關連性研究(III) | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB-101-E-13 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 萬能科技大學 | | |
| 年度 | 101 | 執行期間 | 101.01.01-101.12.31 |
| 本期經費 (單位：千元) | 1,000 | | |
| 執行進度 | 預定(%) | 實際(%) | 比較(%) |
| | 100 | 100 | 100 |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率(%) |
| | 1,000 | 1,000 | 100 |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 張健財 | 余貴坤 | 陳硯歆 |
| 報告頁數 | 20 | 使用語言 | 中文 |
| 中英文關鍵詞 | 關鍵詞：地下水水位變化，迴旋運算，降雨響應，卡爾曼濾波。 Key word：Groundwater level fluctuation, Convolution modeling, Rainfall response, Kalman filter. | | |
| 研究目的 | 本計畫將分析中央氣象局在台灣地區觀測的地下水水位變化與地震資料，探討地下水水位在地震發生前後的異常變化特徵，經由歸類整合後，期能建立可視為地震前兆現象或地震活動潛勢的規律性變化與地下水水位異常之關連性，提供中央氣象局未來推動地震預報業務時參考。 | | |
| 研究成果 | 本研究初步分析發現取 11 小時作為為雨量效應延時長度，並以卡爾曼濾波(kalman filter)以動態模擬方式模擬地下水水位受降雨之影響是相當可行的。從研究中發現，取 11 小時延時長度的維納係數，較能合理的模擬降雨對地下水位的變化，並可有效的去除雨量對地下水位的效應。從 2010 六甲站的水位變動研究中發現，以有效的濾波方法可去除地下水水位 | | |

| | |
|-----------------------|--|
| | 變化之非構造因素(雨量效應)。此外亦發現地震前兆，在針對臨近地下水井附近 66 公里內規模大於 6.2 的地震，在地震來臨前二星期內，地下水位有鮮明之上升趨勢，並有鮮明的變化，此點值得藉由更多資料分析來強化統計可靠性。 |
| 具體落實應用情形 | <p>1. 本研究過程中發展出可將水位資料做適當之轉換後，可直接應用在各種地震資料的分析軟體處理，此外亦完成視窗型濾波程式撰寫，包含常用之訊號處理工具，可對地下水位資料做非構造因素之去除，獲得地殼應變，做為地震前兆分析與探討之參考，提供學術界及地球科學界研究參考之工具。</p> <p>2. 本研究的結果可提供學術界對地下水位的動變機制作更深入的探討。</p> |
| 計畫變更說明 | 無 |
| 落後原因 | 無 |
| 檢討與建議 (變更或落後之因應對策) | 無 |

(以下接全文報告)

地下水水位變化與地震的關連性研究(III) A Study of Groundwater Level Fluctuations as related to Earthquakes (III)

張健財 余貴坤
萬能科技大學營建科技系

Guey-Kuen Yu and Jiann-Tsair Chang
Department of Civil Engineering, Vanung University, Chungli, Taiwan 320

摘要

本研究旨在探討降雨對地下水水位變化的影響模式，研究分為二階段進行，第一階段為探討針對短時強降雨對地下水位需要多少項維納係數以及分析短暫強降雨需要多少項維納係數來模擬地下水位的變化；第二階段利用卡爾曼濾波(kalman filter)以動態方式模擬地下水位受自然降雨之影響，其中狀態函數將取維納係數項作為分析的參數。本文分別取 2006, 2010 年六甲(Liujar)之地下水位與雨量資料，應用迴旋運算模擬短暫強降雨形成的地表雨水荷重對地下水位變化的響應，經測試多種不同的響應函數長度後，發現模擬的水位變化與實際監測的記錄相差不大，但有一些局部的快速水位變化仍無法完全吻合，大部分的分析發現地下水位對於短時強降雨的地表荷重響應是即時且非線性的。對於處理長時間的水位變數紀錄中的降雨效應將利用 kalman filter，因此本研究測試多種不同維納係數長度，經繪圖比較並擷取較可靠的響應係數長度。本研究發現取 11 小時作為為雨量效應延時長度，並以卡爾曼濾波(kalman filter)以動態模擬方式模擬地下水位受降雨之影響。從研究中發現取 11 小時延時長度的維納係數較能合理的模擬降雨對地下水位的變化，可有效的去除雨量對地下水位的效應。此外亦發現地震前兆，在針對臨近地下水井附近 66 公里內規模大於 6.2 的地震，在地震來臨前二星期內，地下水位有鮮明之上升趨勢，並有鮮明的變化，此點值得藉由更多資料分析來強化統計可靠性。

關鍵詞： 地下水水位變化，迴旋運算，降雨響應，卡爾曼濾波。

Abstract

This study investigates the relationships between groundwater level fluctuations and rainfall and figures out the deformations of crust that could be represented by the water

level fluctuations. There are two stages in the analysis, first the short time rainfall effects on water level changes rate will be eliminated by proceeding with convolution concept on ground water level and rainfall by using Wiener Filter method. The second stage for the simulation of long time effects of rainfall, the Kalman's filter method will be adopted to simulate the time dependent variation of the groundwater level fluctuations with respect to rainfall based on the coefficients of Wiener Filter coefficients those were obtained at first stage analysis. Once the rainfall effects were efficiently eliminated the trend implied in the water level changes as indication the strain of crust can be shown obviously. The changes of the deformation of the crust of earth under forces that might trigger the earthquake occurring potential are presented. The adjustable terms were used to eliminate the rainfall effects for the optimization of coefficients of Wiener Filter of the ground water fluctuations are presented in this study. The results show there was a co-seismic obviously occurred on March 4, 2010 when the non-tectonic effects were eliminated in the water level changes. The phenomenon gives us a precursor of seismic when the water level changes rise to 0.06m above over average vale 0.04 m in whole year 2010 at well of Jujar station. More works would be done in the next stage of this research, for considering other water level data provided by stations of wells those are for the intention of seismology research's purposes.

Key word : Groundwater level fluctuation, Convolution modeling, Rainfall response, Kalman filter.

前言

地震預測就是希望在地震孕育過程中，可能呈現在各類監測系統（如地震活動異常、斷層活動調查、大地電流變化、大氣電離層離子濃度變化、重磁場異常變化、地下水水位及水中離子或氣體濃度變化等等）中之相關規律變化，其中地下水水位及中離子或氣體濃度變化的異常觀測與分析，仍是科學家認為有必要繼續進行地震孕育過程監測的項目之一，尤其在地震活動的潛勢評估方面更可提供重要訊息。有關地下水水位變化的分析研究，在 1960 年帶後期就有許多科學家開始進行，分析結果顯示地下水水位變化確實能反映大地應力的變動(Bredehoeft, 1967; Bodvarsson, 1970; Robinson and Bell, 1971; Johnson et al., 1973, 1974; Kovach et al., 1975; Oike, 1978; Oki and Hiraga, 1979; Narasimhan et al., 1984; Wakita, 1984; Wang et al., 1984; Yu and Mitchell, 1988; Liu et al., 1989; Igarashi and Wakita, 1991; Matsumoto, 1992; Kitagawa and Matsumoto, 1996; Quilty and Roeloffs, 1997; Roeloffs, 1998; King et al., 1999; Matsumoto et al., 2003)，中國的科學家也經由地下水水位變化和其他監測的資料，綜合分析研判後，成功預測了 1975 年 2 月 4 日發生在遼寧省境內的海城大地震 (Rayleigh et al., 1977)。一般而言，經由適當的井位選擇與管理，可避免人為抽取或注入的影響，而地球的潮汐作用、水溫與週期性大氣壓力變化（日夜轉換）的影響也可應用學理推估後予以濾除，至於非週期性（aperiodic）大氣壓力變化（如颱風入侵）與非穩定（non-stationary）降雨對地下水位的變化影響，不僅相當複雜且影響程度甚大，有必要進一步研究去除的方法。由前人的成果可知，大氣壓力變化對地下水位的影響是負相關的，且也因地區或地下水層狀況而有程度上的差異。對台灣地區的深井而言，水溫及大氣壓力的週期性變化對地下水位的影響並不明顯，以往也有多位學者曾探討它的影響效應（鄒泉生等, 1983; 余貴坤, 1986; 汪成民等, 1988; 張昭棟等, 1989, 1993; 林進國, 2003; Jan et al., 2007)，但大都只是個案或不在台灣地區。因此本計畫擬利用中央氣象局在臺灣地區建置的地下水監測網（井位分布見圖一，井況資料見表一）紀錄，配合降雨資料，探討降雨對地下水水位變化的響應，研究針對 2010 六甲(Liujar)觀測井在 2010 年 8 月 8 日到 9 日的地下水水位變化與降雨資料（圖二），應用迴旋運算模擬降雨的地表水荷重對地下水水位變化產生的響應，以線性回歸的方法求得累積降雨量的響應函數係數。經由多次調整響應函數組合的測試後，發現模擬的水位變化較實際觀測紀錄平滑，對局部變化快速的水位紀錄仍未能擬合，不過也發現降雨的地表水荷重對地下水水位變化的響應不僅是即時的而且也是非線性的（余貴坤等, 2009b），此現象驗證 Matsumoto et al. (2003)敘述。

本研究仍繼續應用迴旋模擬運算，更能擬合觀測水位紀錄的降雨響應函數型態外，第二階段以應用卡爾曼濾波（Kalman filter），進行模擬不同長度水位紀錄的降雨影響效應。有關卡爾曼濾波運算，Yu and Mitchell (1988)也曾經採用過，但當時是以 24 小時的累積降雨量與平均水位變化值模擬且降雨量的紀錄也不完整，因而此方法仍有重新測試的必要。本研究將改用 1 小時（以 60 分鐘累計雨量為單位）的降雨量與水位變化資料重新應用卡爾曼濾波進行模擬。在進行卡爾曼濾波模擬

$$\frac{\partial}{\partial a_{-\tau}(t)} \left(\sum_{t=0}^n \left[\Delta w(t) - \sum_{\tau=0}^m a_{-\tau}(t) r(t-\tau) \right]^2 \right) = 0, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

由此可得

$$-2 \sum_{t=0}^n \left[\Delta w(t) - \sum_{\tau=0}^m a_{-\tau}(t) r(t-\tau) \right] r(t-\tau) = 0, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^n \Delta w(t) r(t-\tau) = \sum_{t=0}^n \sum_{\tau=0}^m a_{-\tau}(t) r(t-\tau) r(t-\tau) \quad (7)$$

(7) 式左邊為降雨量與水位之交對比 $\psi_{r\Delta w}(-\tau)$ ，右邊為降雨響應函數 $a_{-\tau}(t)$ 與降雨量的自對比 $\psi_{rr}(-\tau)$ 的乘積，於是響應函數可寫成

$$\sum_{\tau=0}^m a_{-\tau}(t) = \frac{\psi_{r\Delta w}(-\tau)}{\psi_{rr}(-\tau)} \quad (8)$$

因水位的降雨響應是時變的過程 (Time-variant process)，故須進一步應用卡爾曼濾波模擬。卡爾曼濾波包括兩個運算「預測」與「更新」來描述系統的狀態：

a 狀態方程式 (state equation)

$$a_{-\tau}(t+1) = \phi(t+1|t) a_{-\tau}(t) + u(t) \quad (9)$$

b 輸出方程式 (output equation)

$$\Delta w(t+1) = a_{-\tau}(t+1) r(t+1) + v(t+1) \quad (10)$$

其中 $a_{-\tau}(t)$ 為 t 時刻之狀態向量 (降雨響應函數)， $a_{-\tau}(t+1)$ 為 $t+1$ 時刻之狀態向量， $\phi(t+1|t)$ 為狀態轉移矩陣 (state transition matrix)， $r(t+1)$ 為 $t+1$ 時刻之降雨量， $\Delta w(t+1)$ 為 $t+1$ 時刻之水位變化觀測值， $u(t)$ 與 $v(t+1)$ 分別為狀態擾動與觀測誤差向量。在運算時，對每一時刻的狀態擾動與觀測誤差都設為獨立的等幅分佈 (white noise)，亦即 $u(t)$ 與 $v(t+1)$ 的期望值為零，利用維納濾波運算所得降雨響應函數 ((8) 式) 作為狀態向量的初始值 $a_{-\tau}(0)$ ，並將初始之狀態轉移矩陣 $\phi(0|0)$ 設為單位矩陣，先計算由 t 時刻轉移至 $t+1$ 時刻之狀態向量 ((9) 式)，再據以推算 $t+1$ 時刻的水位輸出值 ((10) 式)，並計算實際觀測的水位變化 $\Delta w_0(t+1)$ 與計算輸出值 $\Delta w(t+1)$ 之差值

$$\varepsilon(t+1) = \Delta w_0(t+1) - \Delta w(t+1) \quad (11)$$

及其協變矩陣

$$S(t+1) = [a_{-\tau}(t+1)]P(t+1|t)[a_{-\tau}(t+1)]^T + \varepsilon(t+1) \quad (12)$$

其中 $P(t+1|t) = [\varphi(t+1|t)]P(t|t)[\varphi(t+1|t)]^T$ 稱為狀態向量之協變矩陣 (state covariance matrix)。其初始值 $P(0|0)$ 必須包含資料的狀態向量特性，通常取幾組 Wiener filter 分析的結果作平均，各時刻相對於此平均值之差為矩陣之各元素。以取 5 組 Wiener filter 分析的結果為例，若假設每組的降雨響應函數長度為 11(小時)個資料點，則可表示如下：

$$\begin{aligned} A_1 &= [a_{1,0} \quad a_{1,-1} \quad \cdots \quad a_{1,-11}] \\ A_2 &= [a_{2,0} \quad a_{2,-1} \quad \cdots \quad a_{2,-11}] \\ &\cdots \quad \quad \quad \cdots \quad \quad \quad \cdots \\ A_5 &= [a_{5,0} \quad a_{5,-1} \quad \cdots \quad a_{5,-11}] \end{aligned} \quad (13)$$

其平均值為

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{5} = [\bar{a}_0 \quad \bar{a}_{-1} \quad \cdots \quad \bar{a}_{-11}] \quad (14)$$

且狀態向量之協變矩陣初始值可設為 $P(0|0) = [p_{ij}]$ ，其中

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^5 \frac{(a_{ki} - \bar{a}_i)(a_{kj} - \bar{a}_j)}{5} \quad \begin{array}{l} i = 0, 1, 2, \dots, 11 \\ j = 0, 1, 2, \dots, 11 \end{array} \quad (15)$$

同時，(12)式之 $\varepsilon(1) = E[v(1)v^T(1)]$ 可取修正後之水位實測值與維納濾波計算結果差。利用 (12) 式先計算卡爾曼增益 (Kalman gain)

$$K(t+1) = P(t+1|t)r^T(t+1)S^{-1}(t+1) \quad (16)$$

再由卡爾曼增益更新狀態向量 $a_{-\tau}(t+1)$ 及其協變矩陣 $P(t+1|t)$ ，即

$$\begin{aligned} a_{-\tau}(t+1) &= a_{-\tau}(t) + K(t+1)\varepsilon(t+1) \\ P(t+1|t+1) &= (\mathbf{I} - K(t+1)a_{-\tau}(t+1))P(t+1|t) \end{aligned} \quad (17)$$

重覆 (9) 至 (12) 及 (16) 至 (17) 式之運算逐步更新狀態向量 $a_{-\tau}(t)$ ，求得最佳水位擬合之卡爾曼濾波係數值。

資料選取與分析

目前中央氣象局在本島建置有六口觀測井如表一所示，做為地震研究用，因目前最新的雨量記錄為以小時為單位不同於已往以十分鐘為單位之記錄，本研究為確保採用降雨響應函數長度，經多次分別調整降雨響應函數的型態，分別考慮以十分鐘之記錄及與每小時之記錄再與降雨量作迴旋運算，結果發現採用每小時降雨量的模擬結果擬合度大致可接受。但對於長時少量降雨對地下水位的效應不明顯。在 2010 的原始資料中僅有 2010 六甲(Liujar)站的雨量資料較為齊備，其他測站地下水位與雨量資料，尚需做進一步的驗證，故本研究目前僅選取 2006 年 6 月 9 日與 2010 六甲(Liujar)站在 2010 年 8 月 8 日降雨較長時間的水位與降雨量觀測紀錄（圖二），分別採用 10 分鐘與採用一小時累計降雨量用以探討維納降雨響應函數。結果顯示，如圖 5,6,7,8。圖 9 及圖 10 為 2010 六甲(Liujar)站維納降雨響應函數，從中發現採用 11 小時維納降雨響應函數，模擬雨量對地下水位變化結果較佳。基此點在第二階段中將採取 11 小時維納降雨響應函數做為線性化分析之依據。

結果討論

一般而言，迴旋運算模式只適合模擬短暫的降雨立即響應，卻不能有效處理長時間水位變化紀錄中的降雨響應，因此本研究在第二階段應用卡爾曼濾波（Kalman filter）的運算，進行估算不同時間長度水位紀錄中的降雨響應。在進行卡爾曼濾波模擬前，須先利用維納濾波（Wiener filter）的推估求得降雨影響地下水位變化的時間長度，本研究以 2010 年 8 月 8 日 2010 六甲(Liujar)站的水位記錄與降雨資料（取樣率為 60 分鐘）為例如圖 9 進行分析，結果見圖 10，其中藍色變化曲線表示時間在 $t = -12$ 小時至 $t = 0$ 間每 60 分鐘之累積降雨量對 $t = 0$ 之水位變化的響應係數（藍線），圖中顯示降雨對水位變化的影響時間長度明顯，但降雨影響時間長度有可能會因降雨的型態的差異而有不同。

若瞬間降雨強度甚大使 1 小時之累積降雨量特別大時，也可能造成降雨響應係數偏低，因部分降雨已逕流散失，為造成地表荷重影響地下水位的變化。

圖 11、是全年水位雨量效應去除後之結果，圖 11 可發現以本文所採用之方法可有效的去除雨量效應。如圖 11 中 8 月 8 日之短時強降雨可有效去除。

若欲探討地下水位變化異常與地震之間的關連性，圖 12，13 顯示出一旦除去長時間地下水位變化紀錄中的降雨影響效應 可顯現出地殼之變形，從圖 14 中可發現在三月四日前二個星期內，地下水位有鮮明之上升趨示，該地下水位變動趨示之斜率，迥異於其他時段，因為地下水位的變化異常，扣除了人為因素外，它較能顯現地殼長時間的緩慢變動特性，也就是有助於對地震活動的長期潛勢分析，有較大的應用價值。

本研究應用卡爾曼濾波法進行降雨對水位變化響應狀態的逐步調整，提升模擬水位變化與觀測紀錄的擬合度，亦可有效除去長時間地下水位變化紀錄中的降雨影響效應。從 2010 六甲站的水位變動研究中發現 地震前兆在針對臨近地下水

井附近 66 公里內規模大於 6.4 的地震有鮮明的變化，值得做更進一步的研究。

結論

經由上述分析方法分別測試 2010 六甲(Liujar)觀測井的水位變化與降雨資料後，本研究大致獲得下列幾點結論與建議：

(1) 對於短時強降雨若採用一小時降雨量與降雨響應函數進行迴旋運算模擬水位變化結果，模擬結果還算良好，前半段尚稱吻合，後半段還可接受，不過與實測紀錄中水位快速變化的部分仍有差異。

(2) 應用維納濾波初步分析於 1 天內短時強降雨對水位變化的影響時間長度約達 11 小時，但對於長時少量降雨型態對地下水位影響不大。

(3) 由於地下水位的變化受降雨的影響變成不穩定的時變系統 (time variant system)，應用卡爾曼濾波法隨時逐步調整降雨對水位的響應狀態，可求得較佳的降雨響應函數，提高模擬結果與水位之觀測紀錄的擬合度，有助於凸顯地下水位變化異常與地震之關連性分析比對。

(4) 地潮的效應，在地下水位的觀測中，針對半日潮的效應並不明顯。地潮效應的有效濾除，對於分析結果的可靠性的提升，亦為分析成功予否的重要關鍵，實不可輕忽。

致謝

本研究的經費是由中央氣象局委託計畫支助，計畫編號為 MOTC-CWB-101-E-13，對於地震測報中心相關同仁快速提供各項資料並大力協助，作者特別感謝。

參考文獻

1. Akaike, H. (1984) A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-19, 716-723.
2. Bodvarsson, G. (1970) Confined fluids as strain meter, *J. Geophys. Res.*, 75, 2711-2718.
3. Bredehoeft, J. D. (1967) Response of well-aquifer system to earth tides, *J. Geophys. Res.*, 72, 3075-3087.
4. Igarashi, G. and H. Wakita (1991) Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells, *J. Geophys. Res.*, 96, 4269-4278.
5. Kalman, R. E. (1960) A new approach to linear filtering and prediction problem, *Trans. ASME J. Basic Eng. D*, 82,35-45.
6. Kavach, R. L., A. Nur, R. L. Wessen, and R. Robinson (1975) Water level fluctuations and earthquakes on the San Andreas fault zone, *Geology*, 3, 437-440.
7. King, C.-Y., S. Azuma, G. Igarashi, M. Ohno, H. Saito, and H. Wakita (1999) Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central

- Japan, *J. Geophys. Res.*, 104, 13073-13082.
8. Kitagawa, G. and N. Matsumoto (1996) Detection of coseismic changes of underground water level, *J. Am. Stat. Assoc.*, 91, 521-528.
 9. Liu, C., M.-W. Huang, and Y.-B. Tsai (2006) Water level fluctuations induced by ground motions of local and teleseismic earthquakes at two wells in Hualien, eastern Taiwan, *TAO*, 17, 371-389.
 10. Liu, L. B., E. A. Roeloffs, and X. -Y. Zheng (1989) Seismically induced water-level fluctuation in the Wali well, Beijing, China, *J. Geophys. Res.*, 94, 9453-9462.
 11. Matsumoto, N. (1992) Regression analysis for anomalous changes of ground water level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1193-1196.
 12. Matsumoto, N., G. Kitagawa, and E. A. Roeloffs (2003) Hydrologic response to earthquakes in the Haibara well, central Japan : I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses, *Geophys. J. Int.*, 155, 885-898.
 13. Narasimhan, T. N., B. Y. Kanehiro, and P. A. Witherspoon (1984) Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers, *J. Geophys. Res.*, 89, 1913-1924.
 14. Oike, K. (1978) Precursory phenomena and prediction of recent large earthquake in China, *Chinese Geophysics 1 (AGU)*, 179-199.
 15. Oki, Y., and S. Hiraga, (1979) Water level anomalies prior to the Izu-Oshima earthquake, January 14, 1978, *Bull. Hot Spring Res. Inst.*, 9, 2-49.
 16. Quilty, E., and E. A. Roeloffs (1997) Water level changes in response to the December 20, 1994 M4.7 earthquake near Parkfield, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 310-317.
 17. Robinson, E. S. and Bell, R. T. (1971) Tides in confined well-aquifer system, *J. Geophys. Res.*, 76, 1857-1869.
 18. Roeloffs, E. A., (1998) Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 103, 869-889.
 19. Wakita, H. (1984) Ground water observations for earthquake prediction, *Conf. Earthquake Prediction*, 494-500.
 20. Wang, C., Y. Wang, Y. Guo (1984) Some results of ground water level observation in earthquake areas in China during the past 15 years, *Conf. Earthquake Prediction*, 501-513.
 21. Yu, G. K. and B. J. Mitchell (1988) A study of the non-tectonic influences on groundwater level fluctuations, *Proc. Geol. Soc. China*, 31, 111-124.
 22. Jan, C. D., T. H. Chen, W. C. Lo (2007) Effect of rainfall intensity and distribution on groundwater level fluctuations, *J. Hydrology*, 332, 348-360.
 23. 余貴坤、羅應標 (1988) 水位變動紀錄呈現的一些地震訊息，第二屆台灣地區地球物理研討會，220-229。
 24. 張昭棟、耿杰、高玉斌、張鑄鋼 (1993) 井水位降雨影響的定量改正，*地震學*

- 報，第 15 卷第 2 期 202-207 頁。
25. 余貴坤 (1986) 降雨量與深井水位變動的關係研究，*台灣地區地球物理研討會*，165-174。
 26. 余貴坤、簡顯光、陳遠斌、趙曉玲、呂佩玲 (2009a) 地下水的潮汐效應與固體地潮和海潮之相關性研究，*氣象學報*，第 47 卷第 4 期，1-13。
 27. 余貴坤、簡顯光、呂佩玲、趙曉玲 (2009b) 降雨對地下水水位變化的影響模式研究 (一)，*中央氣象局地震技術報告彙編*，第 51 卷，389-401。
 28. 林進國 (2003) 降雨與地下水位變化之關聯性分析，*國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文*。
 29. 鄒泉生、陳正品、靖繼才 (1983) 降雨對水井水位的效應，*地震研究*，第 6 卷第 1 期 65-69 頁。
 30. 汪成民、車用太、萬迪堃、董守玉 (1988) 地下水微動態研究，*地震出版社*，271 頁，中國北京。

圖表

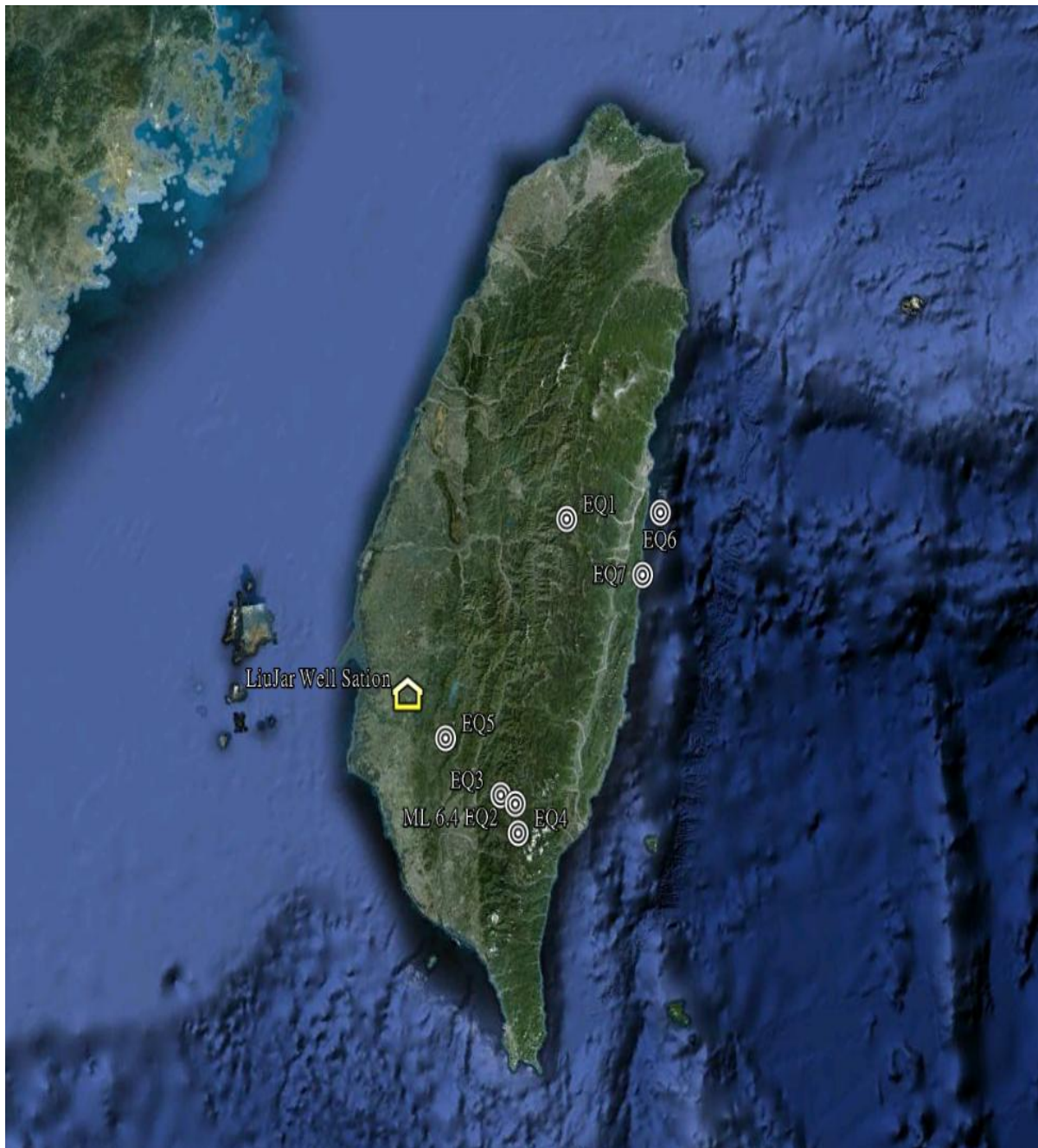


圖 1. 本研究選用的 7 個地震震央與中央氣象局建置的六甲地下水觀測井位置分布圖，白色圓圈為地震震央位置，黃色小屋為水井位置。

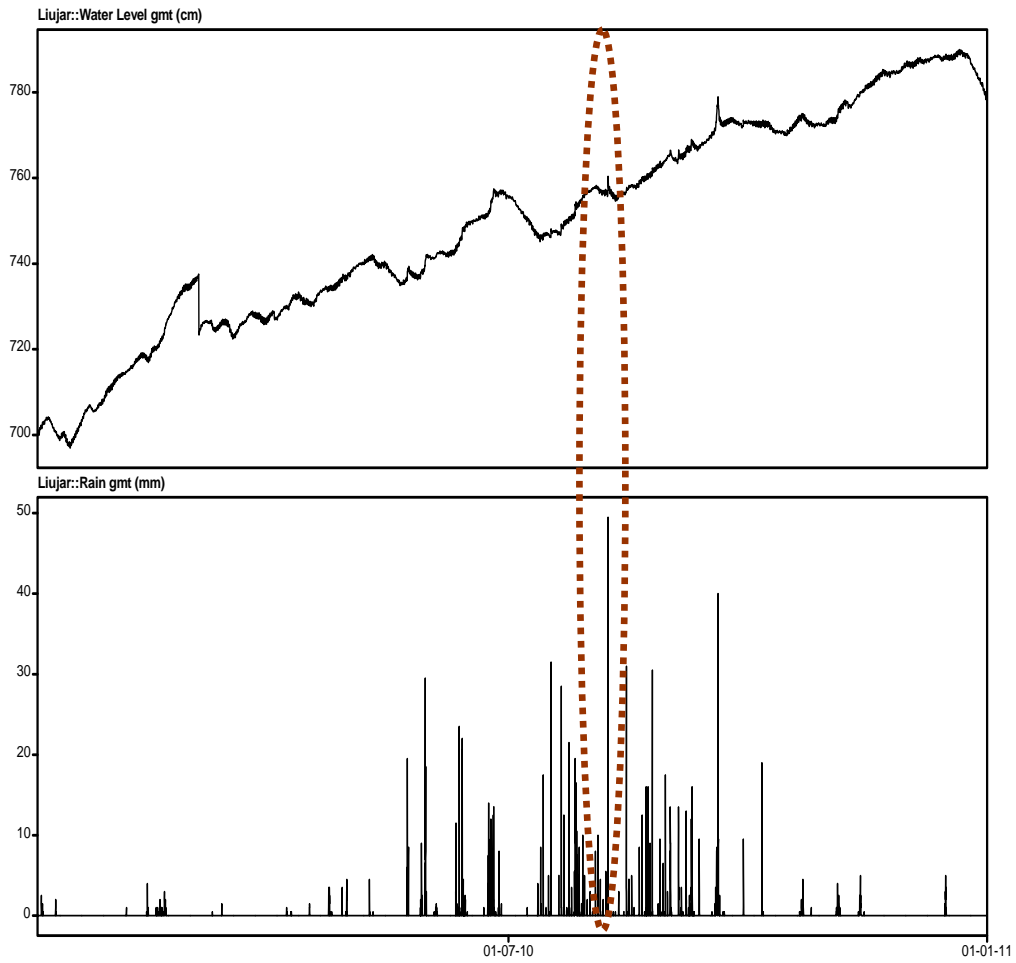


圖 2. 2010 六甲(Liujar)監測井2010年地下水位變化與降雨量分布圖及本研究選取其中 2010 年 8 月 8 日的一段短暫降雨與水位變化紀錄做維納係數長度分析。

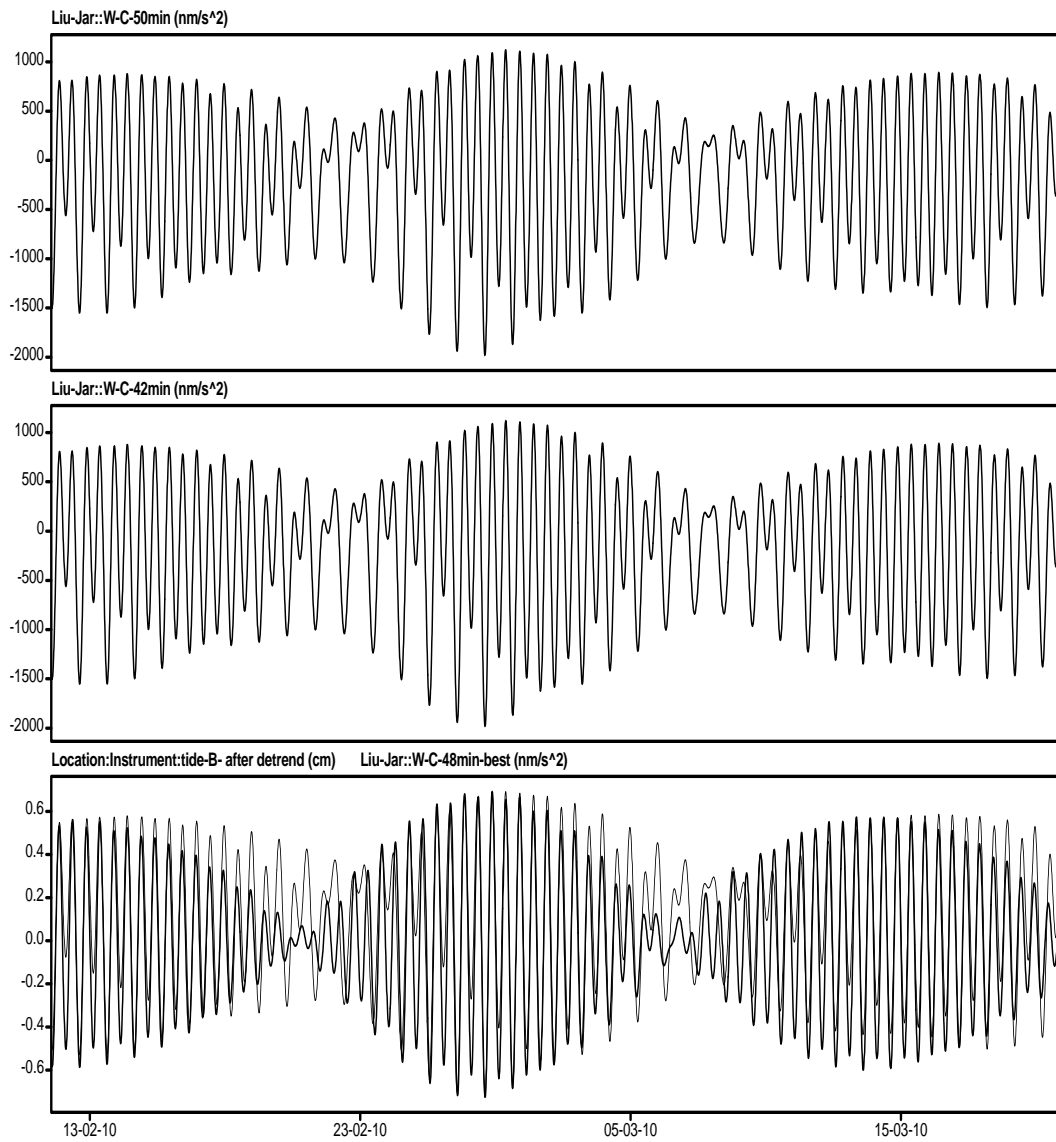


圖 3. 六甲(Liujar)監測井 2010 年地下水位變化觀測地潮與理論地潮對照圖分別延時為 50 分鐘，42 分鐘，48 分鐘對照圖。

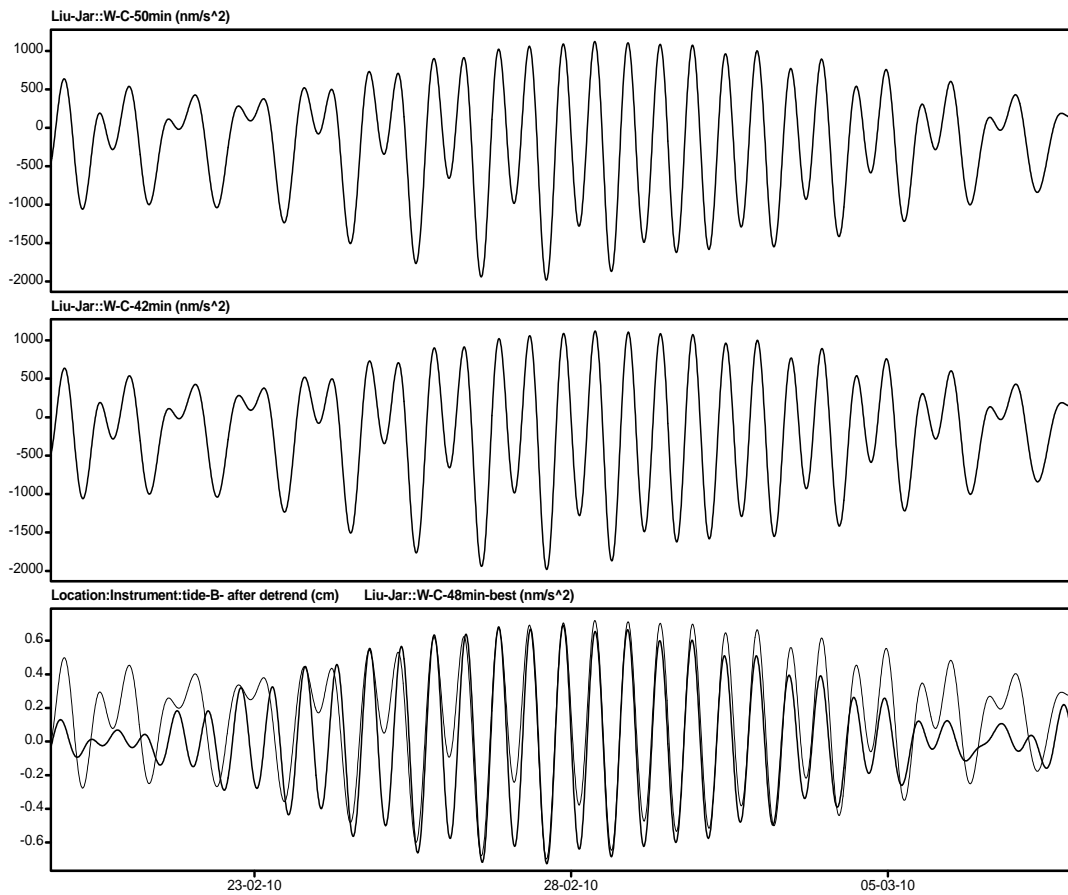


圖 4. 六甲(Liujar)監測井 2010 年地下水位變化觀測地潮與理論地潮對照圖，分別延時為 50 分鐘，42 分鐘，48 分鐘。將其細部放大後，發現以 48 分鐘之延時對應觀測地潮較佳。

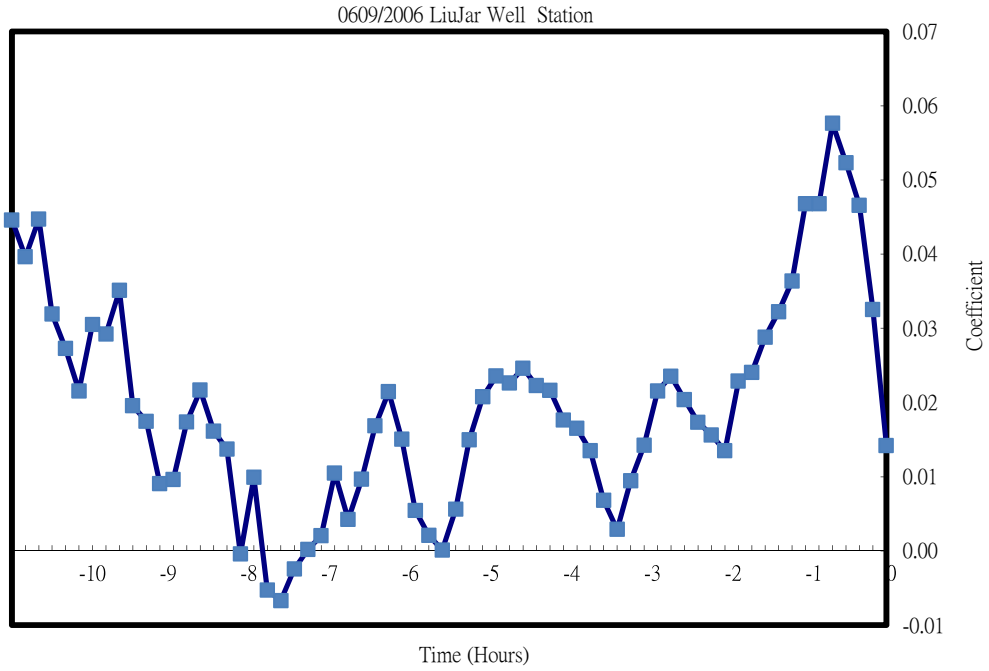


圖 5. 六甲(LiuJar)監測井 0609/2006 年地下水位變化與降雨量利用維納濾波分析法測試時間在 $T=11$ 小時至 $t=0$ 間每 10 分鐘之分時降雨量的短時強降雨對 $t=0$ 之水位變化響應係數（藍線）

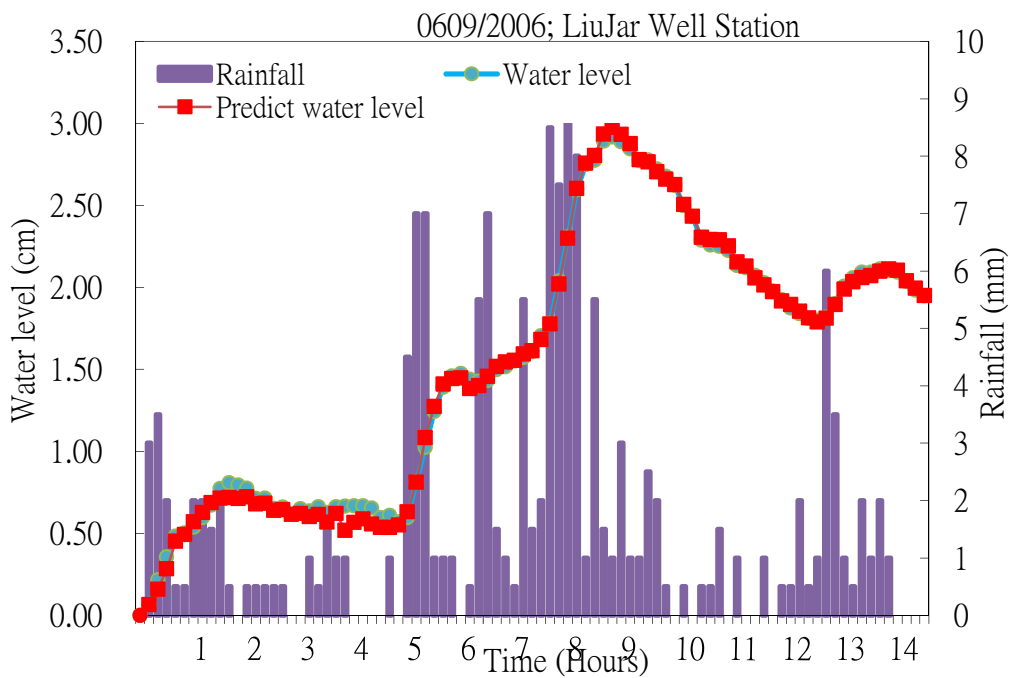


圖 6. 六甲(LiuJar)監測井 0609/2006 年地下水位變化與降雨量，利用 Wiener

Filter 之響應函數，以水位與(每 10 分鐘)分時降雨量的短時強降雨 14hr，分別作迴旋模擬結果與觀測紀錄之比較圖：原始水位變化(藍)、模擬水位(紅)、分時降雨量(紫)。

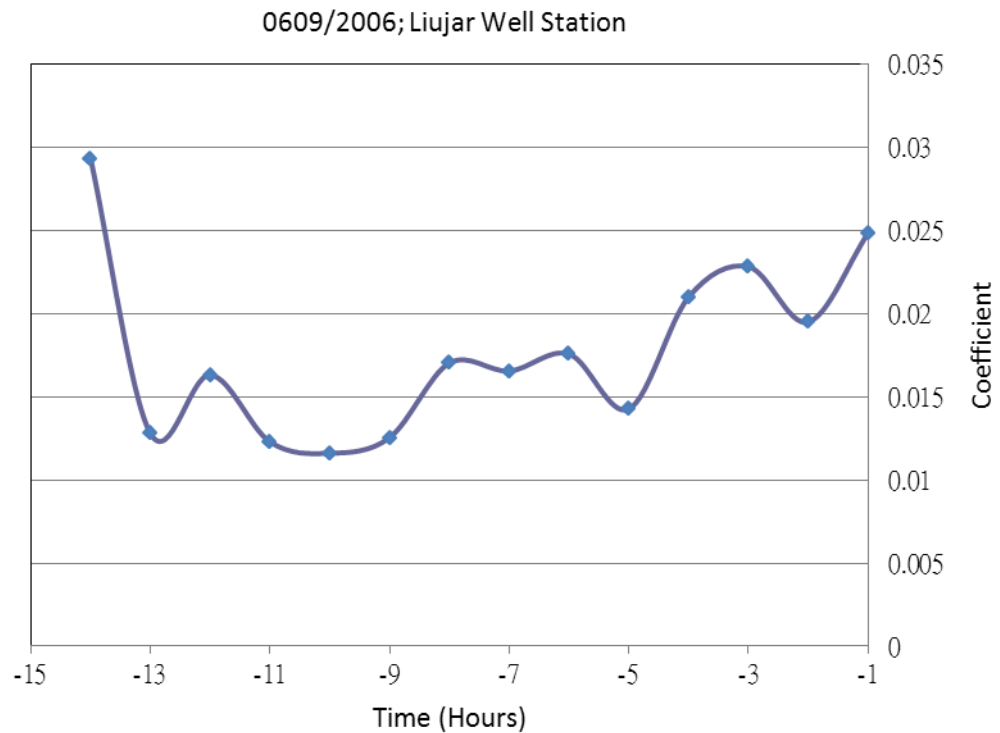


圖 7. 六甲(Liujar)監測井 0609/2006 年地下水位變化與降雨量，利用維納濾波分析法測試時間在 $T=13$ 小時至 $t=0$ 間，每 60 分鐘之分時降雨量的短時強降雨對 $t=0$ 之水位變化響應係數（藍線）

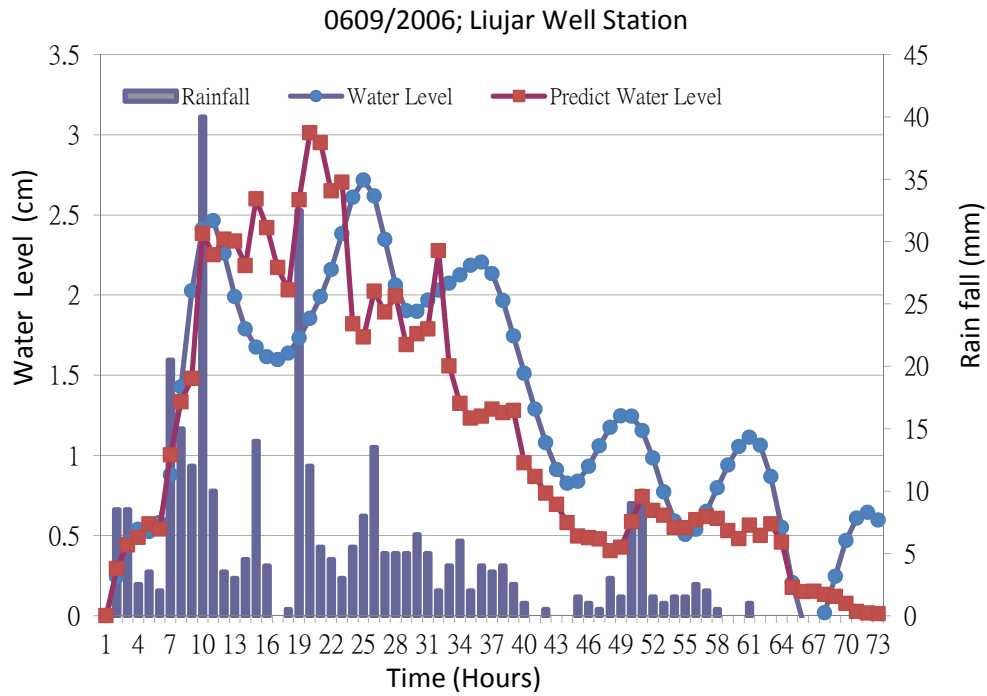


圖 8. 六甲(Liujar)監測井 0609/2006 年地下水位變化與降雨量，利用維納濾波分析法測試時間在 $T=73$ 小時至 $t=0$ 間，每 60 分鐘之分時降雨量的短時強降雨對 $t=0$ 之水位變化，利用 Wiener Filter 之響應函數，以水位與分時降雨量的短時強降雨 14hr，分別作迴旋模擬結果與觀測紀錄之比較圖：原始水位變化(藍)、模擬水位(紅)、分時降雨量(紫)。

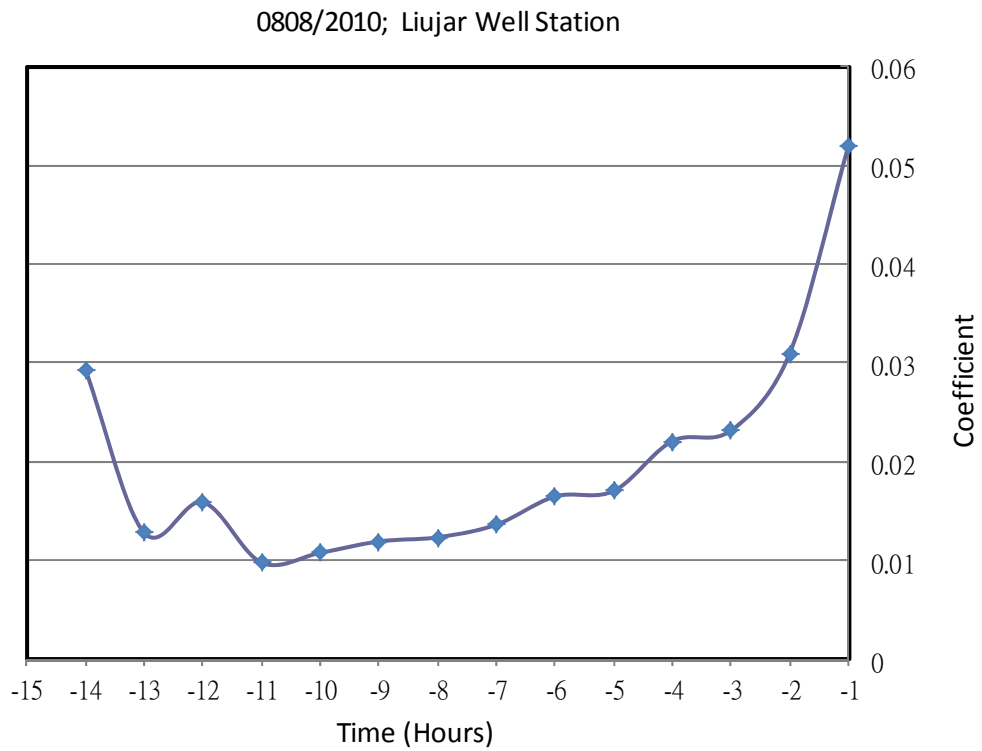


圖 9. 六甲(Liujar)監測井 0808/2010 年地下水位變化與降雨量，利用維納濾波分析法測試時間在 $T=14$ 小時至 $t=0$ 間，每 60 分鐘之分時降雨量的短時強降雨對 $t=0$ 之水位變化響應係數（藍線）

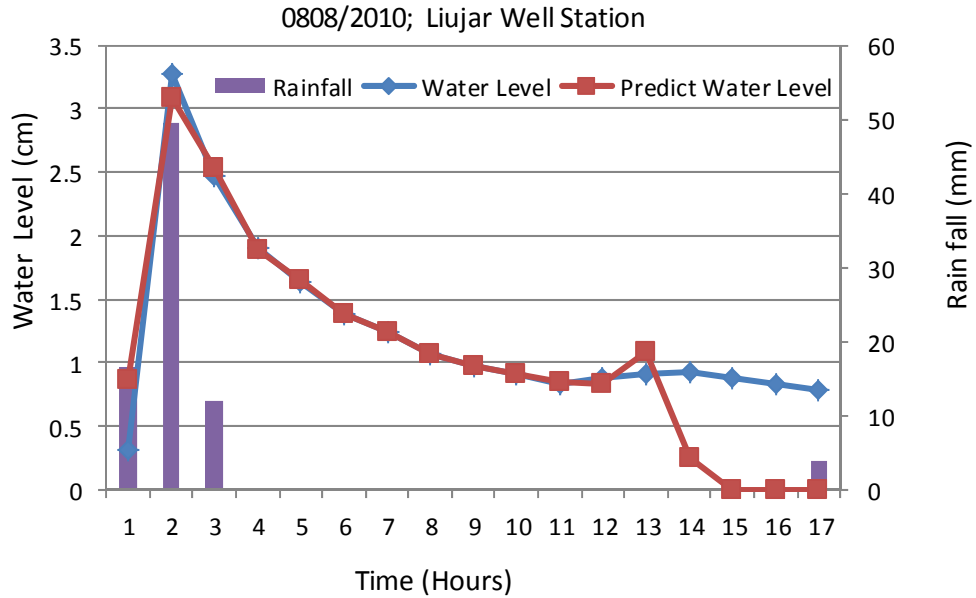


圖 10. 六甲(Liujar)監測井 0808/2010 年地下水位變化與降雨量，利用維納濾波分析法測試時間在 $T=17$ 小時至 $t=0$ 間，每 60 分鐘之分時降雨量的短時強降雨對 $t=0$ 之水位變化，利用 Wiener Filter 之響應函數，以水位與分時降雨量的短時強降雨 14hr，分別作迴旋模擬結果與觀測紀錄之比較圖：原始水位變化(藍)、模擬水位(紅)、分時降雨量(紫)。

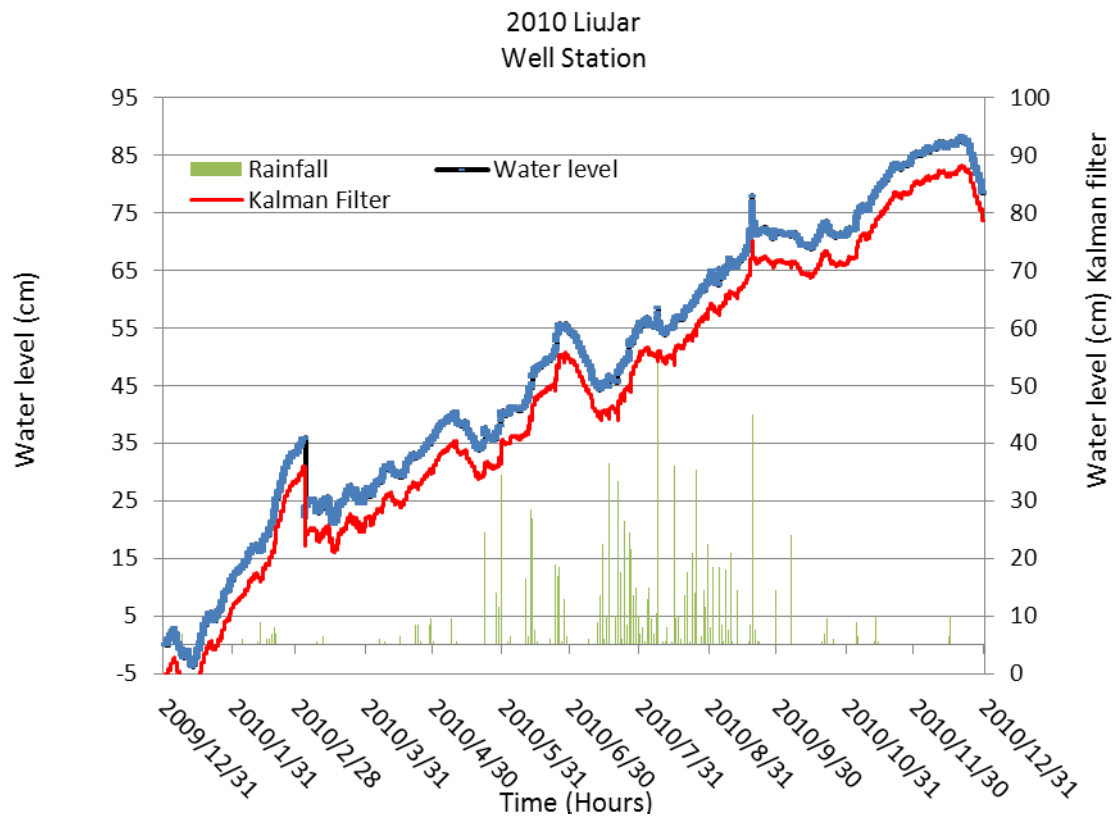


圖 11. 2010 六甲(LiuJar)監測井 2010 年全年地下水位變化與去除降雨效應後之地下水位變化之對應圖。

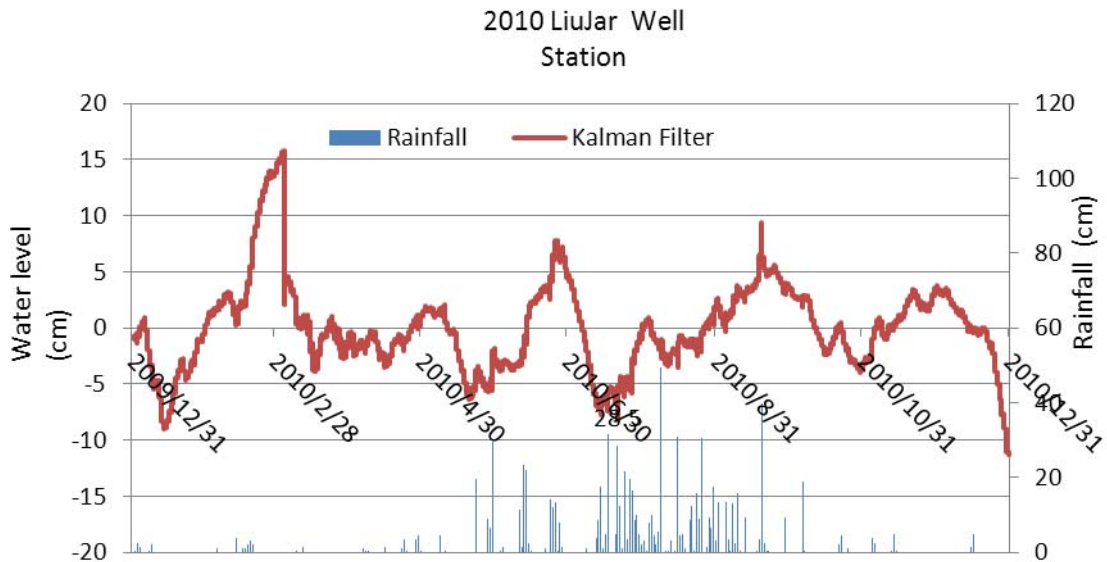


圖 12. 2010 六甲(LiuJar)監測井 2010 年全年地下水位去除長期水位趨勢後與降雨之對應圖。

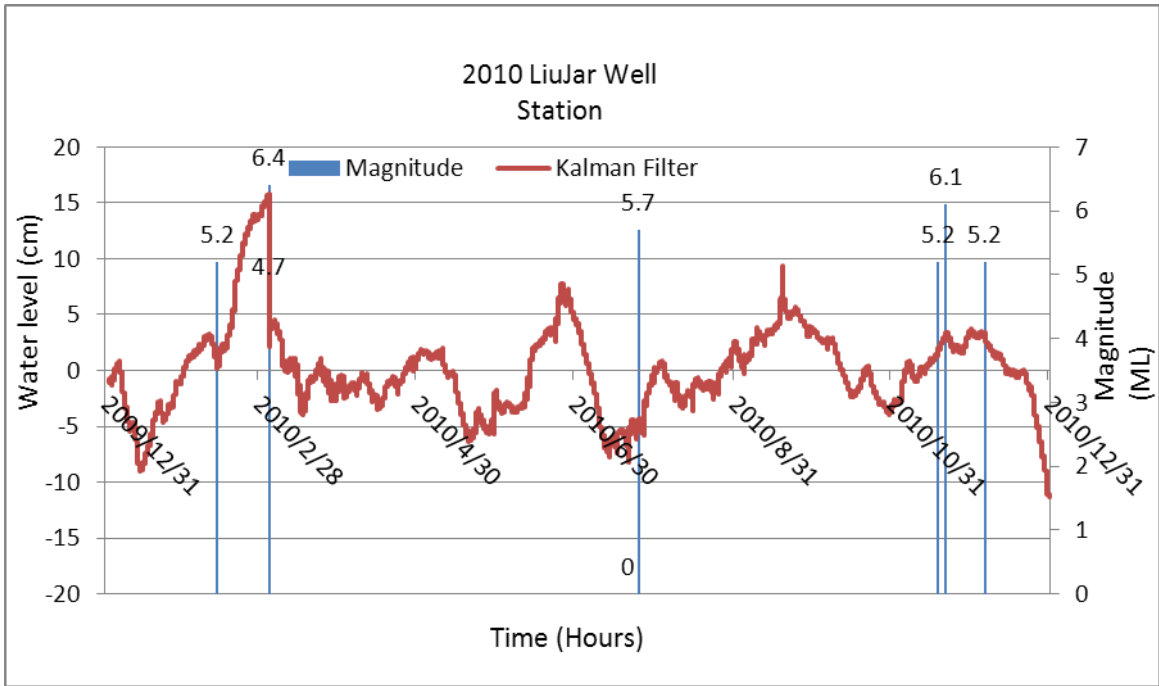


圖 13. 2010 六甲(LiuJar)監測井 2010 年全年地下水位變化與臨近發生地震規模之對應圖。

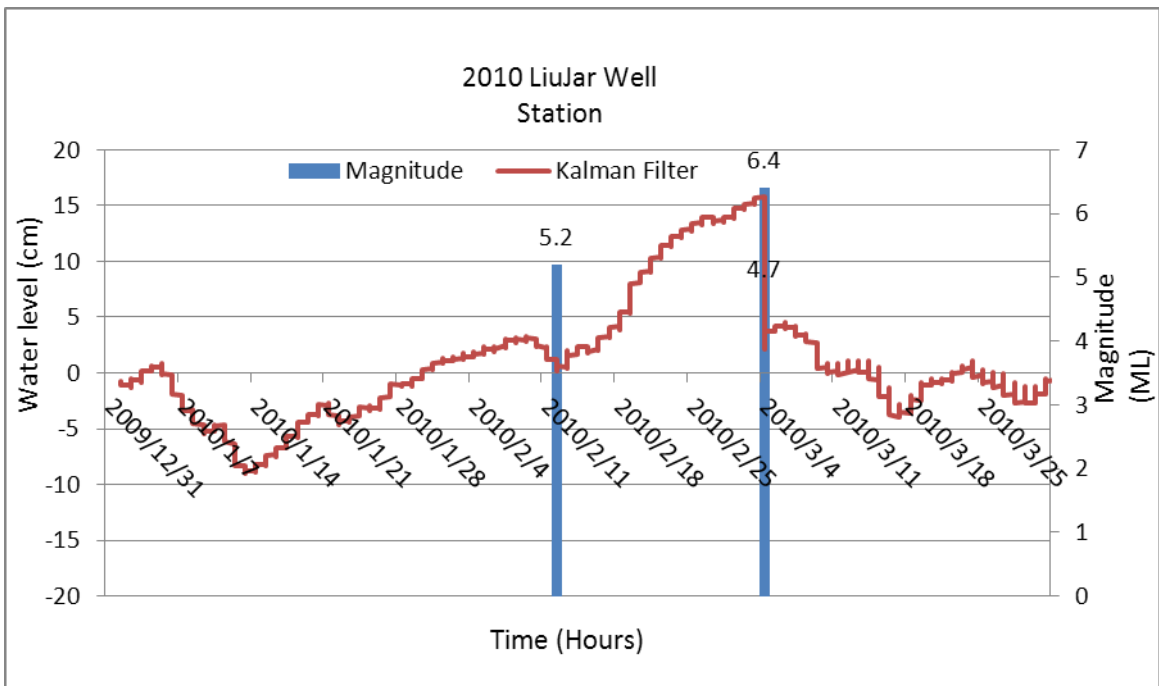


圖 14. 2010 六甲(LiuJar)監測井 2010 年 1 至 3 月地下水位變化去除地潮與去除降雨效應後及水位趨勢之地下水位變化與地震序列及規模之對應圖。

表一、中央氣象局建置之六口地下水觀測井相關資料表。

| 觀測井名稱 | 位置 (經度°E，緯度°N) | 含水層深度 (公尺) | 所採用水位紀錄時間(西元年) | 說明 |
|------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 六甲 (Liu Jar) | 120.342，23.227 | 204-222 | 2006-2010 | 台南縣 六甲國小 |
| 那菝 (Na Ba) | 120.340，23.071 | 135-147 | 2006-2010 | 台南縣 那菝國小 |
| 東和 (Don Her) | 120.561，23.668 | 222-252 | 2006-2010 | 雲林縣 東和國小 |
| 赤山 (Chi Shan) | 120.608，22.593 | 158-170 182-197 | 2006-2010 | 屏東縣 赤山國小 |
| 花蓮 (HuaLien) | 121.605，23.977 | 140-160 | 2006-2010 | 中央氣象局 花蓮氣象站 |
| 壯圍 (TunWei) | 121.781，24.746 | 130-150 | 2006-2010 | 宜蘭縣 壯圍國小 |

表二 2010 年 台灣地區規模大於 5.2 地震序列

| Earthquake No. | Time GMT | | Latitude | Longitude | D _h (km) | ML |
|----------------|------------|----------|----------|-----------|---------------------|-----|
| EQ1 | 2010/2/12 | 02:42:39 | 23.845 | 121.194 | 21.2 | 5.2 |
| EQ2 | 2010/3/4 | 00:18:51 | 22.918 | 120.795 | 21.0 | 6.4 |
| EQ3 | 2010/3/4 | 08:16:17 | 22.901 | 120.769 | 23.9 | 4.7 |
| EQ4 | 2010/7/25 | 03:52:12 | 22.759 | 120.84 | 32.0 | 5.7 |
| EQ5 | 2010/11/8 | 13:01:22 | 23.125 | 120.52 | 27.0 | 5.2 |
| EQ6 | 2010/11/21 | 12:31:45 | 23.827 | 121.658 | 47.0 | 6.1 |
| EQ7 | 2010/12/6 | 02:14:11 | 23.615 | 121.546 | 22.2 | 5.2 |