

地下水的潮汐效應與固體地潮和海潮之相關性研究

余貴坤¹ 簡顯光¹ 陳遠斌¹ 趙曉玲² 呂佩玲²

¹萬能科技大學營建科技系

²中央氣象局地震測報中心

摘 要

本研究分析 2006 年花蓮觀測井的地下水位變化及驗潮紀錄，探討地下水的潮汐效應及其與固體地潮和海潮之相關性，結果確認地下水潮與固體地潮和海潮都是正相關，且其相關係數甚高，但地下水潮與固體地潮的平均相位差約落後 42 分鐘、與海潮的相位差也約落後 12 分鐘，相位落後時間的長短與地下水層之孔隙大小有關。若比較它們的大、小潮時段之相關性，則可發現在大潮時段的相關性頗佳，在小潮時段的相關性稍差，且小潮時段的相位差也比大潮時段的相位差落後甚多，此差異與全日潮的波形在大潮時段不太明顯，在小潮時段卻很完整的現象應有密切關聯。又地下水潮與固體地潮的全日潮起伏型態差異甚大，但與海潮的變化卻相當類似，其中的關鍵為何？須再深入研究後也許才可能找到合理的解釋。月球運行的位置變動對相關係數及相位差都呈現相當規律性的變化，且變化幅度也隨著季節有明顯的差異。

關鍵詞：地下水潮，固體地潮，海潮，相關係數，相位差。

一、前言

深井水位變化可明顯反應太陽與月球引力作用在地球上的潮汐現象，早在 1970 年代前後就陸續有科學家經由理論推演或實際觀測中發現（如 Bredehoeft, 1967; Bodvarsson, 1970; Robinson and Bell, 1971; Johnson et al., 1974; Wakita, 1975; Narasimhan et al., 1984; 張昭棟等, 1991），更有一些學者進一步探討深井水位變化與地震活動的相關性（如 Kovach et al., 1975; Oki and Hiraga, 1979; Wakita, 1984; Wang et al., 1984），期能發現可視為地震前兆的水位異常，供地震預報參考。台灣地區之深井（地

下水層深度 500 公尺）水位變化觀測始於 1980 年，觀測紀錄也呈現明顯的潮汐效應（余貴坤和羅應標, 1988），但因觀測井位於宜蘭清水溪河畔，受夏日洪水氾濫使河床淤積，造成井口掩埋而放棄。1999 年 9 月 21 日集集大地震後經濟部水利署才陸續在台灣西部建置數口取樣點為 2 分鐘的深井水位變化紀錄。由於觀測的目的都在探討地下水位變化與地震活動的關係，在資料處理時，對地下水的潮汐效應就直接利用現有軟體計算後給予除去。Yu and Mitchell (1988) 及余貴坤等 (2005) 雖曾探討水位的潮汐效應並與固體地潮的理論值作比較，但也未深入探討地下水的潮汐效應與固體

地潮的相關性。本研究擬利用中央氣象局在 2006 年收錄的花蓮觀測井(含水層深度 140-160 公尺)地下水水位變化與鄰近的海潮起伏資料,進一步研究地下水水位變化產生的潮汐效應與海潮及固體地潮之間的相關程度與相位差,同時也觀察當太陽、月球及地球之相對位置變動時,地下水的潮汐效應與海潮和固體地潮之相關係數與相位差是否也有相對應的規則變化。

二、資料整理與分析方法

本研究先將中央氣象局花蓮觀測井(含水層深度 140-160 公尺)收錄的 2006 年地下水水位變化紀錄(取樣率每秒一點,誤差在 1 公分以內),配合鄰近驗潮資料(取樣率每 6 分鐘一點)整理成每 6 分鐘一點的時間系列資料庫,並採用余貴坤等(2008)提出之趨勢去除法濾除水位的長期變化趨勢,先取 25 點(每點的時間間隔為 1 小時)原始水位紀錄平均後做為中間點(即第 13 點)的水位變化平均值組成修正的水位變化時間系列,再由此修正的水位變化時間系列中取 24 點作移動平均組成新的時間系列,此新的時間系列就是水位變化的長期趨勢(季節性變化),依此方法推估趨勢變化結果與應用 Longman (1960) 的修正公式計算結果不僅有高度的吻合,且更趨平滑,同時此法的取樣方式與運算也較具明確的物理意義(余貴坤等,2008)。因此,本研究使用此新方法除去地下水水位面與海水面的長期變化趨勢後再利用 Dehant et al. (1999) 發展的地球潮汐分析軟體 tsoft 分別計算地下水潮、海潮及固體地潮的效應。

三、研究步驟與結果

由於前人對地下水的潮汐效應與固體地潮的相關性研究很少,初步瞭解僅張昭棟在 1988 年主編之「地下水潮汐分析」一書中提到地下水的潮汐相位和固體地潮的相位相反(即負相

關),他們認為當太陽和月球的引力小時含水層被壓縮,水從含水層流入井內,使水井的水位上升,反之亦然。但此推論似乎不正確,因為他們忽略了一個事實,就是水比岩石更容易壓縮或膨脹,當含水層的孔隙變小時,孔隙中水的體積縮得比岩層更小,水井的水位應下降,反之當孔隙變大時,孔隙中水的體積脹得比岩層更大,水井的水位應上升。因此,地下水的潮汐相位和固體地潮的相位應是一致(即正相關)。為了探討此推論的正確性,本研究第一步先選取一段降雨較少的 3 月份(2006 年 3 月 2 日至 30 日)水位變化資料(見圖 1),先去除趨勢變化後,將殘餘的水位變化繪成潮汐變化圖(見圖 2),其中包含兩個大潮(3 月 16 至 18 日及 28 至 30 日,農曆 2 月 17 至 19 日(望日)及 29 日至 3 月 2 日(朔日))及兩個小潮(3 月 8 至 10 日及 3 月 21 至 23 日,農曆 2 月 9 至 11 日(上弦月)及 22 至 24 日(下弦月)),再分別以負相關及正相關兩種方式求得各時段的地下水潮汐與固體地潮之相關係數與相位差。結果顯示,以正相關分析時,各時段的相關係數都很高(0.95 以上)且相位差僅在小潮時段落後稍多些,但以負相關分析時,大潮與小潮時段之相關係數和相位差卻有很大差異,尤其在小潮時段之相關性不高且大、小潮之相位差均落後甚多,此結果與常理不合(見表 1)。因此,本研究確信地下水的潮汐效應與固體地潮是屬於正相關的特性,而地下水的潮位差落後固體地潮平均約 42 分鐘推測是因水在孔隙中流動較為緩慢所導致。又為了探討太陽、月球與地球之相對位置改變時,地下水潮與海潮及固體地潮之相關性是否也有規律的關聯變化,本研究進一步選取春夏秋冬四季中各 30 天(以跨越春分、夏至、秋分、及冬至四個代表性節氣的農曆初五至次月初四或初五),以陽曆而言,即 2006 年 3 月 4 日至 4 月 2 日、5 月 31 日至 6 月 29 日、8 月 28 日至 9 月 26 日、及 11 月 25 日至 12 月 24 日的地下水水位變化紀錄與海

潮觀測資料進行分析，除比較各時段的地下水潮與海潮及固體地潮之平均相關係數與相位差的變化（見表 2）外，也探討地下水潮與海潮及固體地潮在此四個時段的大、小潮之相關係數及相位差變化（見表 3 至 6）。

四、討論與結論

由圖 3 的結果可看出，對農曆望日及朔日時段的大潮而言，地下水潮的波形與固體地潮相當類似，僅相位落後約 36 分鐘，此外全日潮的波形也不明顯且朔日時段的潮汐變化幅度也比在望日時段的稍微大些，此應與太陽與月球都在地球的另一方位上有關。然而在小潮時段的情況就迥然不同，不僅全日潮的波形非常明顯，且地下水潮的相位落後固體地潮的相位達 54 至 60 分鐘，同時兩者的潮汐起伏變化也大不相同，此差異是否只是因為太陽、月球與地球的相對位置形成直角三角形的緣故或是由其他因素造成？則仍需進一步研究才可能獲得較正確的解釋。若將海潮的變化也一併疊合比較，則可發現海潮的變化波形與地下水潮的吻合度更高，海潮的平均相位差比地下水潮的提早約 12 分鐘，雖然在小潮時段也有少許的不同，但這些差異可能來自海面的波浪（見圖 4 至 6）。

在探討太陽、月球與地球之相對位置改變時，地下水潮與海潮及固體地潮之相關性變化方面，本研究發現在夏季時段（6 月份），地下水潮與固體地潮之相關係數稍低，夏季的平均相位差也比春秋兩季的平均相位差落後約 6 分鐘，但冬季的相關性卻不錯僅相位差提早約 6 分鐘。在與海潮的比較方面，四季的相關係數大致相近僅夏季的平均相位差落後約 12 分鐘（見表 2）。若再仔細比對這四組時段的大、小潮的相關性變化（表 3 至表 6），也可發現夏季的大、小潮時段，地下水潮與固體地潮之相關係數都較其他季節偏低，而地下水潮與海潮則相當接近，推測其相關係數偏低的原因可能是

因夏季雨量較多所導致，此外冬季的小潮時段，地下水潮與海潮之相關係數也較其他季節為低，其相位差也落後相當多，此應是受東北季風增強造成不規則的海浪所影響。另外也發現在秋季有兩個相關係數特別低的時段，其中 9 月中旬的低點可能與中度颱風（珊珊）在台灣東部外海通過（15 至 16 日最靠近花蓮，最大風速每秒 48 公尺）有關，颱風的低氣壓使地下水潮與海潮（適逢小潮時段）的效應大幅上升（見圖 7），也導致地下水潮與海潮及固體地潮的相關係數大幅下降，相位差也同樣大幅落後（表 6），至於 8 月底的低點，推測可能是附近有人為抽取地下水，導致地下水位持續下降且起伏變化很小，全日潮也不明顯（基本上在小潮時全日潮應較明顯）（見圖 8），應與大氣壓力、降雨、及地震無關（見圖 9）。本研究也應用逐日移動的方式比對地下水潮與海潮、固體地潮的三日平均相關係數及相位差，觀察太陽與月球運行位置變動對地下水的潮汐效應影響，結果顯示在大潮時段的相關性最大，相位差也較小；相對地，在小潮時段的相關性最小，相位差也較大，兩者都呈現相當規律性的變化，但變化幅度卻隨著季節有明顯的差異，在春、冬兩季大致相近且起伏不大，而在夏、秋兩季卻變化很大（見圖 10 至 13），此現象應與地下水位的快速上升或下降有相當程度的關聯。

本研究經由前面的分析與討論，可歸納下列幾點結論：

(1) 地下水的潮汐效應與固體地潮呈現正相關，若無其他因素干擾，兩者的相關性甚高（相關係數在 90% 以上），地下水潮的相位落後固體地潮平均約 42 分鐘，夏季（遠日點）落後多 6 分鐘（48 分鐘），冬季（近日點）則落後少 6 分鐘（36 分鐘）。相位落後的時間應與含水層的孔隙大小有關。

(2) 地下水潮與海潮的相關性更高（相關係數在 94% 以上），其平均相位差約 12 分鐘，海

潮較早。比較兩者在大、小潮時段的相關性後，發現在大潮時段的相關性較佳，在小潮時段的相關性稍差，且兩者的相位差也比大潮時段落後甚多，此差異與全日潮的波形在大潮時段不太明顯，而在小潮時段卻很完整的現象應有密切關聯。

(3)在小潮時段，地下水潮與固體地潮的全日潮起伏型態有很大的差異，但與海潮的變化卻相當類似，其中的關鍵為何？尚須再深入研究後或許可能找到合理的解釋。

(4)月球運行的位置變動對相關係數及相位差都呈現相當規律性的變化，且變化幅度也隨著季節有明顯的差異。

(5)連續大雨、氣壓劇烈變化、或人為抽取地下水都會降低地下水潮與海潮、固體地潮之相關性。

(6)本研究僅利用花蓮觀測站的紀錄作分析，故此結論只可供花蓮附近地區之應用參考，其他地區的相關狀況仍需個別分析探討。

五、誌謝

本研究得以順利完成，作者們要感謝中央氣象局地震測報中心同仁提供花蓮觀測站的地下水水位面及海水面的變化紀錄與必要協助。

六、參考文獻

Bodvarsson, G. (1970) Confined fluids as strain meter, *J. Geophys. Res.*, 75, 2711-2718.

Bredehoeft, J. D. (1967) Response of well-aquifer system to earth tides, *J. Geophys. Res.*, 72, 3075-3087.

Dehant, V., P. Defraigne and J. M. Wahr (1999) Tides for a convective Earth, *J. Geophys. Res.*, 104(B1), 1035- 1058.

Kovach, 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.

Longman, I. M. (1960) The interpolation of earth-tide records, *J. Geophys. Res.*, 65, 3801-3803.

Narasimhan, T. N., B. Y. Kanehiro and P. A. Witherspoon. (1984) Interpretation of earth tide reponse of three deep, confined aquifers, *J. Geophys. Res.*, 89, 1913-1924.

Oki, Y. and S. Hiraga (1979) Water level anomalies prior to the Izu-Oshima earthquake, January 14, 1978, *Bull. Hot Springs Res. Inst.*, 9, 2-49.

Robinson. E. S. and R. T. Bell (1971) Tides in confined well-aquifer system, *J. Geophys. Res.*, 76, 1857-1869.

Wakita, H. (1975) Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, 189, 553-555.

Wakita, H. (1984) Ground water observations for earthquake prediction, *Conf. Earthq. Pred.*, 494-500.

Wang, C., Y. Wang and Y. Guo (1984) Some results of groundwater level observation in earthquake areas in China during the past 15 years, *Conf. Earthq. Pred.*, 501-513.

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.

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論文集，220-229。

余貴坤，黃瑞德，辛在勤，林柏佑，郭陳濤（2005）中央氣象局地震技術報告彙編，第39卷，267-276。

余貴坤，簡顯光，陳遠斌，趙曉玲，呂佩玲（2008）中央氣象局地震技術報告彙編，第48卷，

張昭棟等 (1988) 地下水潮汐分析，山東大學出版社，第 6 頁。

66-75 頁。

張昭棟，鄭金涵，馮初剛 (1991) 深井水位的

圖表及說明

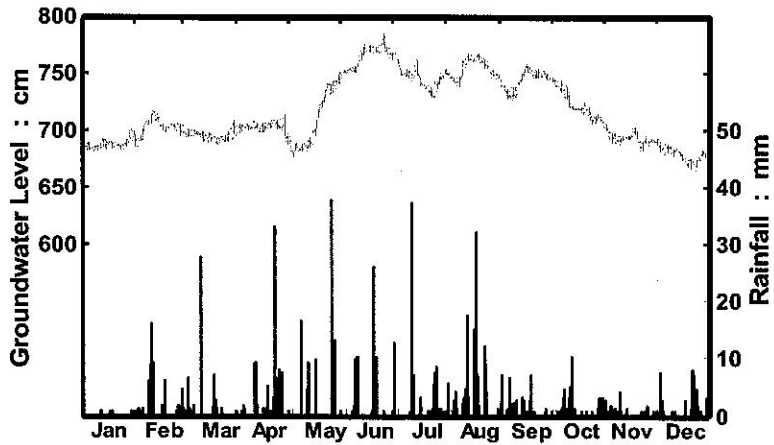


圖 1 2006 年花蓮觀測站日累積降雨量 (綠) 分布與地下水位 (藍) 變化紀錄。

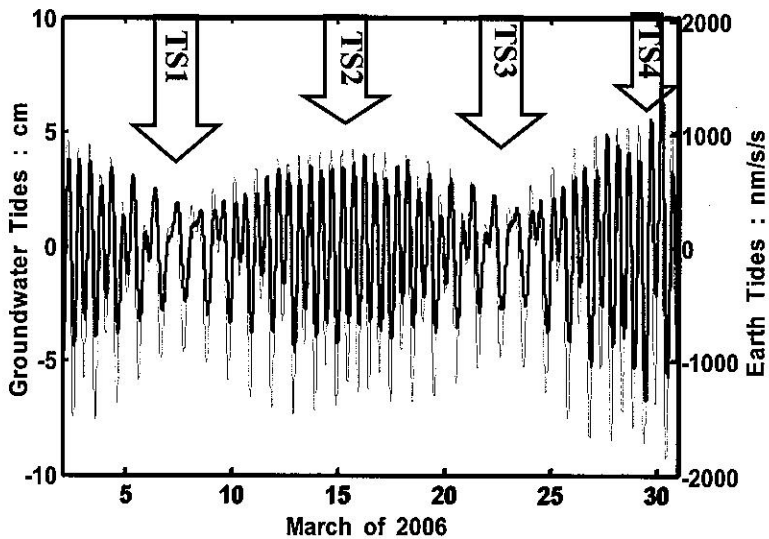
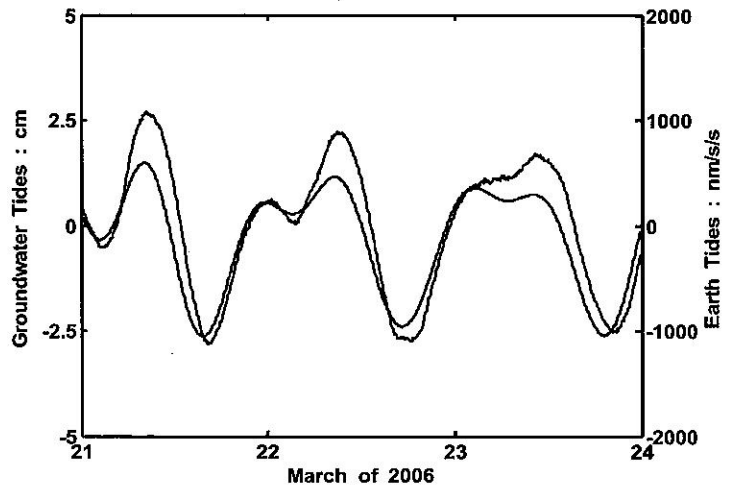
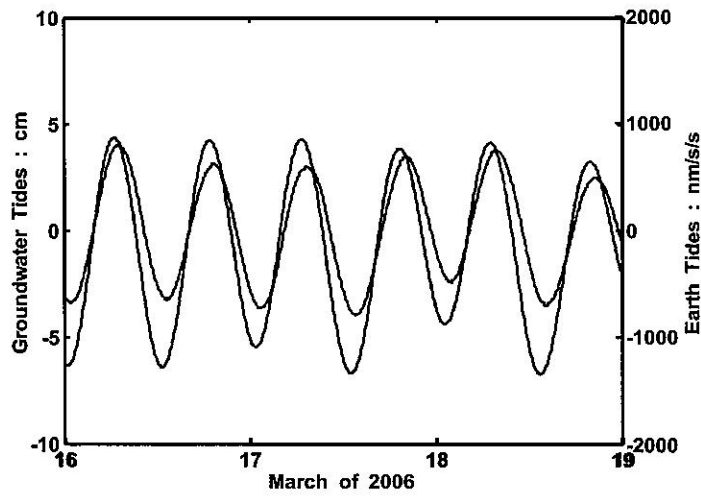
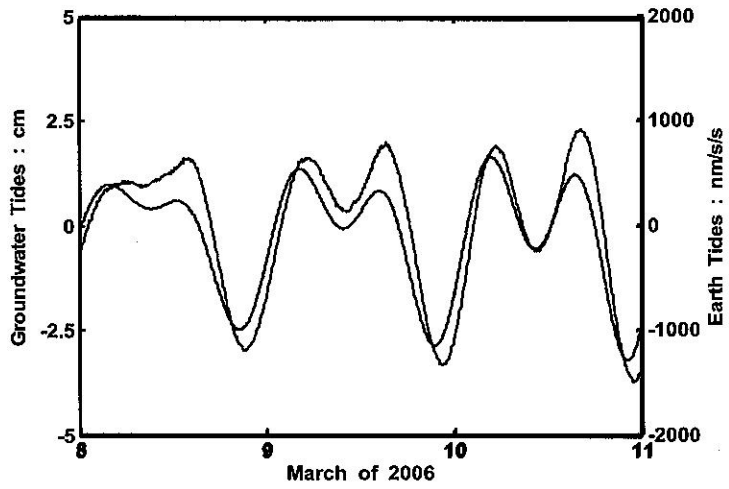


圖 2 2006 年 3 月份的地下水潮 (紅) 與固體地潮 (藍) 變化之疊合比較圖。



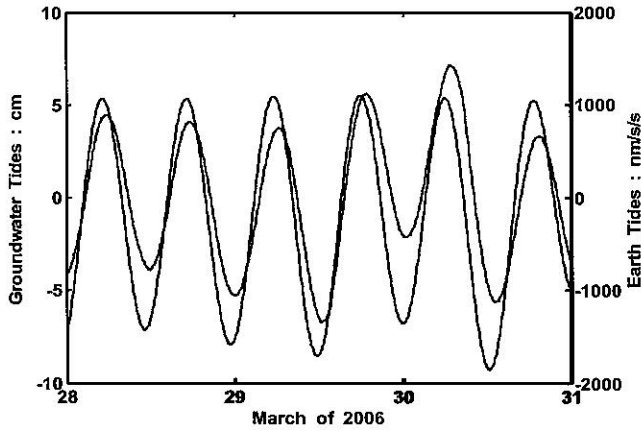


圖 3 2006 年 3 月份地下水潮（紅）與固體地潮（藍）之大、小潮時段變化疊合比較圖。

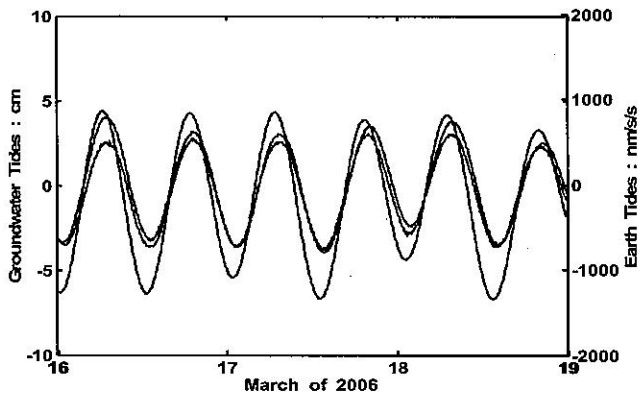


圖 4 2006 年 3 月望日時段 (TS2, 大潮) 之地下水潮 (紅)、固體潮 (藍) 與海潮 (綠) 之疊合比較圖, 其中海潮的變化幅度僅代表示意, 並非真正的起伏值。

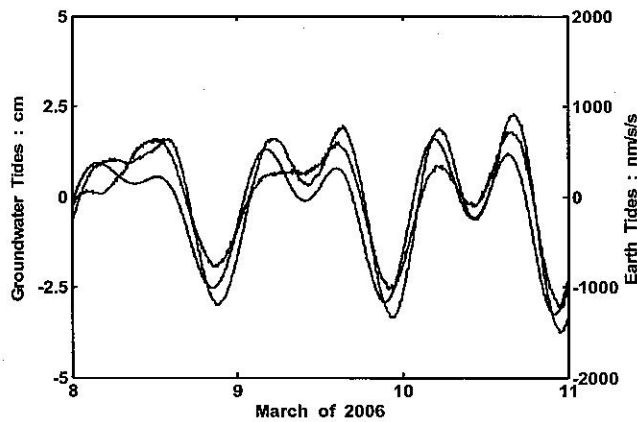


圖 5 2006 年 3 月上弦月時段 (TS1, 小潮) 之地下水潮 (紅)、固體潮 (藍) 與海潮 (綠) 之疊合比較圖, 其中海潮的變化幅度僅代表示意, 並非真正的起伏值。

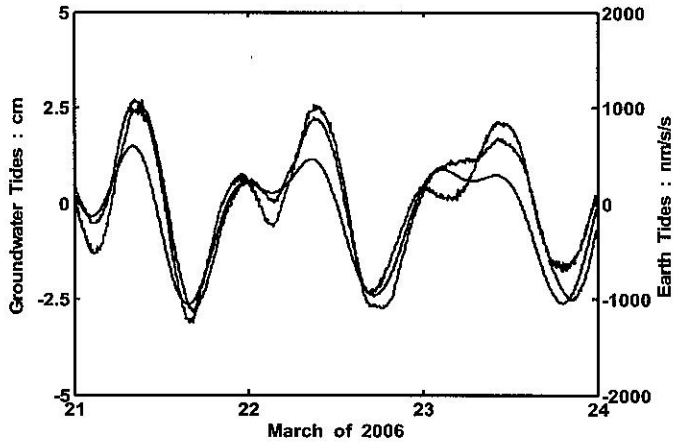


圖 6 2006 年 3 月下弦月時段 (TS3, 小潮) 之地下水潮 (紅)、固體潮 (藍) 與海潮 (綠) 之疊合比較圖, 其中海潮的變化幅度只是相對示意, 並非真正的起伏值。

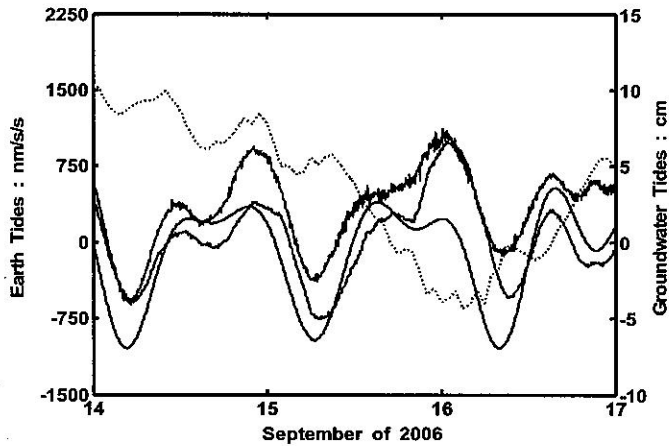


圖 7 2006 年 9 月 14 至 17 日中度颱風珊珊接近台灣東部海上時, 地下水潮 (紅)、固體潮 (藍)、海潮 (綠) 及大氣壓力 (橙點) 變化之疊合比較圖。

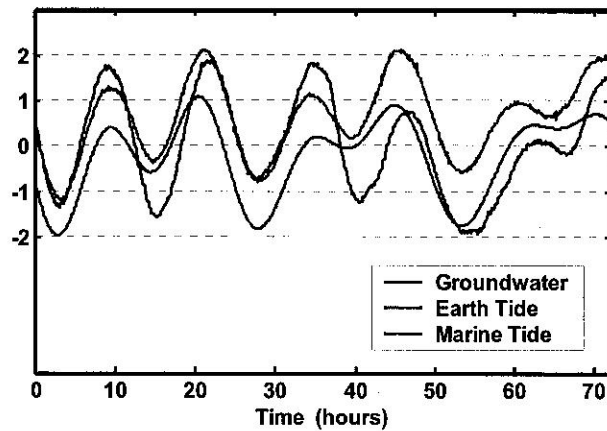


圖 8 2006/08/30~09/02 地下水潮與地潮、海潮比較圖

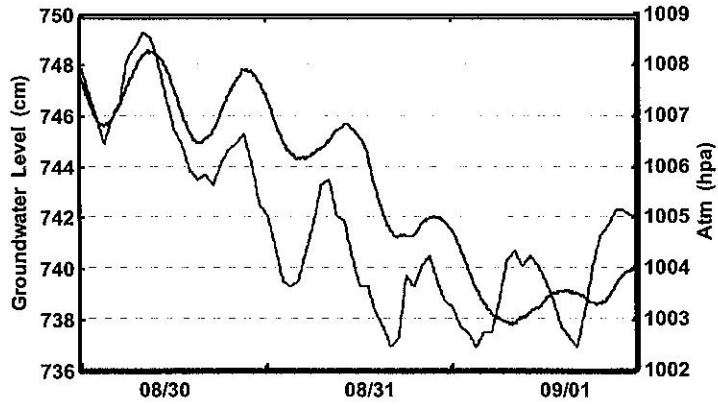


圖 9 2006/08/30~09/02 地下水位(藍)與大氣壓力(綠)比較圖

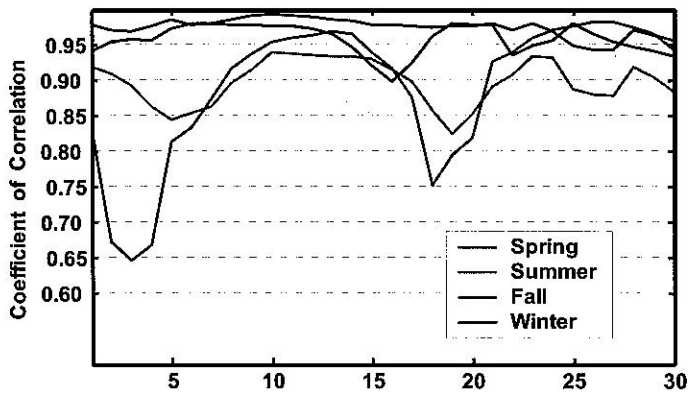


圖 10 2006 年春(藍)夏(綠)秋(紅)冬(黑)四季之花蓮井地下水潮與固體地潮之相關係數變化比較圖(以農曆初五為起始日)。

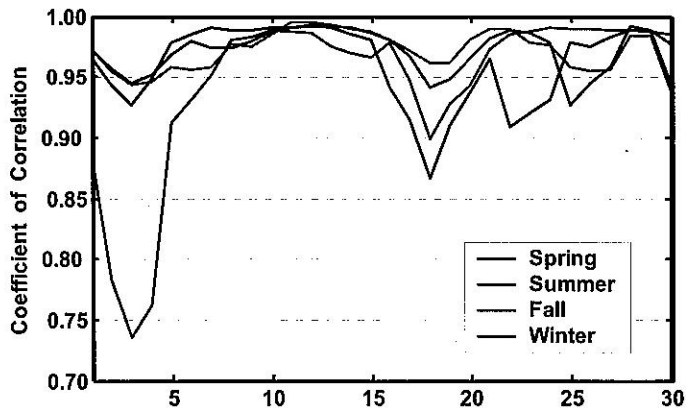


圖 11 2006 年春(藍)夏(綠)秋(紅)冬(黑)四季之花蓮井地下水潮與海潮之相關係數變化比較圖(以農曆初五為起始日)。

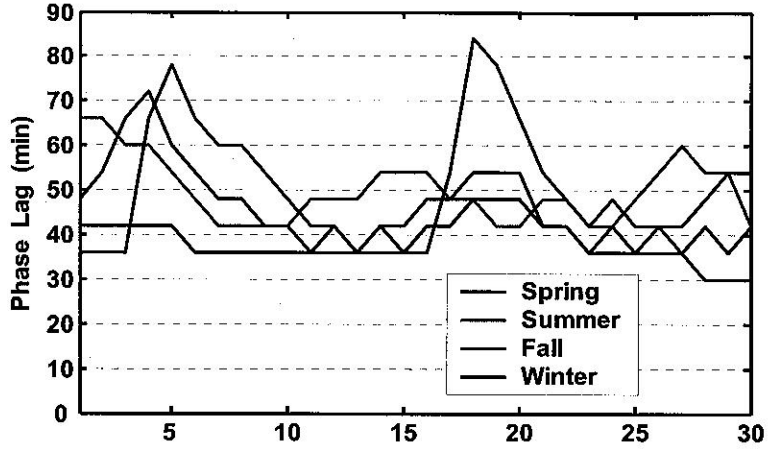


圖 12 2006 年春（藍）夏（綠）秋（紅）冬（黑）四季之花蓮井地下水潮與固體地潮之相位差變化比較圖(以農曆初五為起始日)。

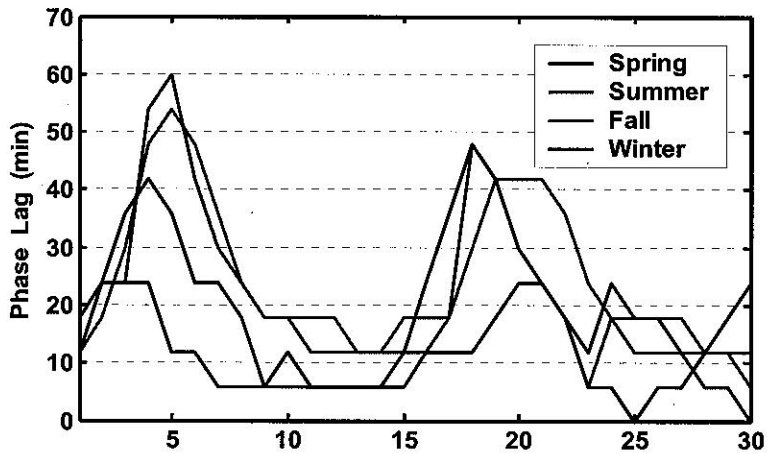


圖 13 2006 年春（藍）夏（綠）秋（紅）冬（黑）四季之花蓮井地下水潮與海潮之相位差變化比較圖(以農曆初五為起始日)。

表 1 2006 年 3 月花蓮觀測井地下水潮與固體地潮之相關性比較。

時間分段	相關係數		相位差	
	負相關	正相關	負相關	正相關
全時段	-0.8524	0.9721	398 分鐘	42 分鐘
上弦月小潮時段 (TS1)	-0.6547	0.9886	362 分鐘	60 分鐘
望日大潮時段 (TS2)	-0.9652	0.9882	410 分鐘	36 分鐘
下弦月小潮時段 (TS3)	-0.6961	0.9761	236 分鐘	54 分鐘
朔日大潮時段 (TS4)	-0.9402	0.9500	404 分鐘	36 分鐘

表 2 2006 年花蓮觀測井在春夏秋冬四季的地下水潮汐效應與海潮及固體潮之平均相關性比較。

季節	地下水潮與固體地潮比較		地下水潮與海潮比較	
	相關係數	相位差	相關係數	相位差
春 (3 月)	0.9721	42 分鐘	0.9602	12 分鐘
夏 (6 月)	0.9044	48 分鐘	0.9660	24 分鐘
秋 (9 月)	0.9290	42 分鐘	0.9632	12 分鐘
冬 (12 月)	0.9565	36 分鐘	0.9483	12 分鐘

表 3 2006 年花蓮觀測井在春夏秋冬四季在望日大潮時段的地下水潮汐效應與海潮及固體潮之相關性比較。

季節	地下水潮與固體地潮比較		地下水潮與海潮比較	
	相關係數	相位差	相關係數	相位差
春 (3 月)	0.9882	36 分鐘	0.9913	6 分鐘
夏 (6 月)	0.9359	48 分鐘	0.9929	12 分鐘
秋 (9 月)	0.9665	42 分鐘	0.9860	12 分鐘
冬 (12 月)	0.9782	36 分鐘	0.9902	12 分鐘

表 4 2006 年花蓮觀測井在春夏秋冬四季在朔日大潮時段的地下水潮汐效應與海潮及固體潮之相關性比較。

季節	地下水潮與固體地潮比較		地下水潮與海潮比較	
	相關係數	相位差	相關係數	相位差
春 (3 月)	0.9500	36 分鐘	0.9266	18 分鐘
夏 (6 月)	0.8814	54 分鐘	0.9549	18 分鐘
秋 (9 月)	0.9848	42 分鐘	0.9891	12 分鐘
冬 (12 月)	0.9818	36 分鐘	0.9784	0 分鐘

表 5 2006 年花蓮觀測井在春夏秋冬四季在上弦月小潮時段的地下水潮汐效應與海潮及固體潮之相關性比較。

季節	地下水潮與固體地潮比較		地下水潮與海潮比較	
	相關係數	相位差	相關係數	相位差
春 (3 月)	0.9886	60 分鐘	0.9684	12 分鐘
夏 (6 月)	0.8955	60 分鐘	0.9433	30 分鐘
秋 (9 月)	0.9199	30 分鐘	0.9765	0 分鐘
冬 (12 月)	0.9594	42 分鐘	0.9271	36 分鐘

表 6 2006 年花蓮觀測井在春夏秋冬四季在下弦月小潮時段的地下水潮汐效應與海潮及固體潮之相關性比較。

季節	地下水潮與固體地潮比較		地下水潮與海潮比較	
	相關係數	相位差	相關係數	相位差
春 (3 月)	0.9761	54 分鐘	0.9417	12 分鐘
夏 (6 月)	0.8547	42 分鐘	0.9809	42 分鐘
秋 (9 月)	0.7534	84 分鐘	0.8982	48 分鐘
冬 (12 月)	0.9638	48 分鐘	0.8660	48 分鐘

Study of the Groundwater Tide as Related to the Solid Earth and Marine Tides

Guey-Kuen Yu ¹, Hsien-Kuang Chien ¹, Yuan-Bin Chen ¹, Shiao-Lin Chao ², and Pei-Lin Lu ²

¹Department of Civil Engineering, Vanung University, Chungli, Taiwan, ROC

² Seismological Center, Central Weather Bureau, Taiwan, ROC

ABSTRACT

The 2006 groundwater level fluctuation data of Haulien well and the nearby marine tide observations are used to study the groundwater tide as related to the solid Earth and marine tides. Results show that the groundwater tide is both highly positive related to the solid Earth and marine tides. The average phase of groundwater tide is about 42 minutes lag to the solid Earth tide and 12 minutes lag to the marine tide. The phase lag depends on the size of porosity in aquifer layer. The comparisons of their full- and neap-tide periods indicate that their correlations are quite good in the full-tide periods and somewhat worse in the neap-tide periods. The worse correlation in the neap-tide period may be caused by the variation shape and phase lag in diurnal components of the groundwater tide are quite different from those of the Earth tide. However, diurnal variations of the marine tide are very similar to those of the groundwater tide. Reasonable explanation for this difference needs further study. Moreover, the correlation coefficients and phase lags vary regularly with the lunar oscillations, and larger variations in the summer and fall period as compared to the spring and winter time may be caused by continuous increasing or decreasing of the groundwater levels in the period.

Key words: groundwater tide, solid Earth tide, marine tide, correlation coefficient, phase lag