

以海嘯源強度分析法分析1604年泉州地震及探討其對臺灣西部沿海之影響

吳祚任¹、吳函¹、蕭文啟²、林柏佑²、蔡育霖¹
國立中央大學水文與海洋科學研究所¹ 中央氣象局地震測報中心²

摘要

1604發生泉州史上規模最大之地震，「泉州府誌」於該年提及疑似海嘯之敘述，此外新竹也紀錄到海水位之異常變化。雖然該事件並未造成重大災害，但此海嘯訊號卻代表台灣西岸面臨由台灣海峽海底地震所產生之潛在海嘯威脅。本研究以COMCOT模式(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)，利用巢狀網格與數值移動邊界法，還原1604年泉州地震之數值模擬結果。並使用海嘯源逆向追蹤法(Tsunami Reverse Tracing Method，TRTM)分析有潛在海嘯威脅之潛力區域。更進一步並利用海嘯源強度分析法(Impact Intensity Analysis，IIA法)，針對台灣西部沿海重點城市進行分析。其主要目的為以沿海城市為主體，探討泉州沿海以及臺灣海峽一帶之海嘯源對於分析區域之海嘯強度敏感性。並且觀察到若發生震央位於台灣海峽之地震或泉州地震之情境重現，濁水溪以北之台灣西部沿岸會受到顯著之影響。在台灣西部沿海主要重點城市與港口部分，雲林以北之海嘯源主要來自台灣海峽。而臺南、高雄與屏東則須注意台灣西南方至馬尼拉海溝北側之海嘯源。

關鍵字：海嘯、1604年泉州地震、IIA、TRTM、COMCOT

一、前言

1604泉州地震曾引發海嘯，並抵達台灣西岸之新竹地區，表示海嘯之能量能夠投射至新竹，亦即若該震央位置往外海偏移，或海嘯源強度增強，則新竹之波高亦會隨之增大。而下一次海嘯源之位置若有不同，則需另行詳細評估台灣西岸所受之影響。本研究以1604年之福建省泉州地震引發之海嘯作為基礎事件，以下為詳細之事件文獻回顧。

鄭世楠等人(2011)重新蒐集並整理台灣地區大規模歷史災害地震資料，將大規模歷史災害地震資料建置於相對應的行政區圖，繪製等震度圖，採用Wells and Coppersmith (1994) 斷層長度與規模的經驗式與鄭世楠等(2009) 近震規模與震矩規模的經驗式，推估所對應的近震規模與震矩規模，進而推估對應的地震斷層面解。當中提到：「泉州地震於1604年12月29日22:00 (明萬曆 32年11月9日酉時)福建泉州東方海域發生，是台灣海峽有史以來最大的地震，大陸10個省的124個縣均有記載。」

晉江縣誌提及「萬曆三十二年十一月初九日(1604年12月29日)夜，自東北向西南。是夜連震十餘次，山石海水皆動，地裂數處，郡城尤甚。開元寺東鎮國塔第一層尖石墜，第二層、第三層扶欄並碎。城

內外廬舍傾圮，覆舟甚多」。此地震為泉州史上規模最大的地震。由於文提到「山石海水皆動」以及「覆舟甚多」，因此該事件中有可能有海嘯生成。

陳泗東(1977)自西元1067年至1713年的646年間泉州一帶的地震資料中。泉州處在中國東南沿海地震帶的長樂、詔安斷裂帶中段，歷史上經常發生地震。據乾隆泉州府誌卷七十三的記載，就大約發生有30次地震。

馬國鳳(2006)提到台灣新竹(Hsinchu)於1604年記錄到異常之海水變化，但其浪高僅20至30公分，未造成任何災害。

重修洛陽橋記：「上萬曆帝禦極之三十五(1607)年丁未，地大震，城垣坊剝，胥就頽。橋圮尤甚。而橋北石橋塌低於南四尺奇，潮至輒沒，人不能行，淵趾剝落，十僅存三、四耳。」在這次的地震事件中，造成多處房屋倒塌，且有疑似海嘯溢淹情形，“潮至輒沒”表示潮水約能淹沒車輪子。而關於這次1607年的地震歷史文獻相當多，大多關於房屋倒塌以及建築物之損壞，但近期的文章卻相對於1604年的泉州地震少了許多，本研究也沒有能找到相關地震參數資料，或許未來可以朝這個方向多去研究以釐清此重要地震事件。

泉州府誌卷七十三“祥異”：「萬曆三十五年(1607)正月，泉州地震。」、「(萬曆)三十二年十一月初八日泉州地震。初九夜連震十餘次，山石海水皆動，地裂數次，郡城尤甚。開元鎮國塔尖石墜，損扶欄。城內外廬舍傾圮，覆舟甚多」。

由以上之文獻以及觀測結果可知，1604泉州地震雖主要災害發生於內陸，然而其仍有潛在疑慮引發海嘯，並導致台灣西部沿海之海嘯災害。辛局長在勤亦指出，自泉州大地震後，東南沿海已超過四百年未發生大地震，若再有類似規模的強震，地震可能會重創福建以及金門，而其所引發之潛在海嘯對台灣西部影響則需謹慎研究。

研究潛在海嘯災害，在過去主要以「Scenario Analysis，情境分析」為手段。然而情境分析法不僅耗時，且有掛一漏萬之慮。本研究將使用「衝擊強度分析法」(Impact Intensity Analysis, IIA)(Wu and Lee, 2014; Lee et al., 2013; Lee, 2014)，針對台灣西部沿海重點城市進行分析，推求泉州沿海以及臺灣海峽一帶之海嘯源對於分析區域之海嘯強度敏感性，以充分了解並掌握臺灣西部沿海之海嘯潛在威脅。

在過去的學術研究中，針對1604泉州地震海嘯之文獻相當稀少，僅Huang et al.(2006)以數值方法重現該事件。然而地震相關文獻不少，特別是針對該地震之震源係數之討論。值得一提的是，1607年泉州也有規模不小的地震出現並且有提到疑似海嘯的事件，重修洛陽橋記提到「潮至輒沒」代表有潮水有淹到一個輪子那麼高，或許與1604年之泉州地震有點關係，如果未來能多入手一些資料，這是可以去研究的目標。

綜上所述，1604泉州地震，文獻推估其規模大約介於 7.7~8.0 之間。該事件雖然震央位置位於沿海，但由於對地表之擾動位於陸岸，因此並沒有嚴重之海嘯災情。然而由於該震央位置與臺灣人口稠密之西部沿海僅一水之隔，因此仍須謹慎面對。本研究將以海嘯強度回推法(IIA)，針對臺灣沿海重點城市進行分析，推求泉州沿海以及臺灣海峽一帶之海嘯源對於分析區域之海嘯強度敏感性，以充分了解並掌握臺灣西部沿海之海嘯潛在威脅。

二、研究方法及步驟

(一) 1604 年泉州地震之還原

根據泉州地震之歷史資料得知，台灣海峽周圍有潛在海嘯之風險，而台灣西部沿岸分布許多重要城市及港口。亦即，台灣主要經濟活動及工業農業重鎮多位於台灣西部沿岸，故本研究以分析台灣海峽潛在之海嘯威脅為重點研究目標。

本研究使用 COMCOT 模式(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model，以下簡稱 COMCOT)進行模擬。COMCOT 已廣泛運用於海嘯事件之模擬與驗證(Wang and Liu, 2011; Mei et al., 2011; Wu, 2012)，本研究利用巢狀網格與數值移動邊界法，精確計算海嘯之到時與波高計算沿海之時變海嘯淹溢範圍以及最大波高。

COMCOT 特點在於結合線性與非線性淺水波方程式。海嘯波為標準之淺水波，因此適以淺水波方程式加以描述。其中深海地區適用線性淺水波方程式，而近海或上岸後之海嘯波則適用非線性淺水波方程式。本研究在遠距海嘯模擬部分將採線性淺水波方程式加以模擬，而近岸地區則以非線性淺水波方程式加以計算。

另外 COMCOT 具有移動邊界之功能，可處理海嘯波上溯時之乾濕邊界之問題。一般海嘯模式僅可計算線性淺水波方程式，對於邊界上則僅可處理固定邊界。換言之，一般海嘯波模式無法模擬海嘯淹溢範圍。而本模式具備移動邊界功能，可準確計算海嘯波上溯後，於內陸所造成之淹溢範圍。為忠實模擬該自然現象，必須採用穩定之移動邊界計算法。

根據鄭世楠(2011)整理的 1604 年泉州地震參數，本研究目前所採用之震源參數為：Latitude=25.0°N、Longitude=119.5°E；Depth= 25km；Mw=7.9；Strike=38°、Dip=SE54°。

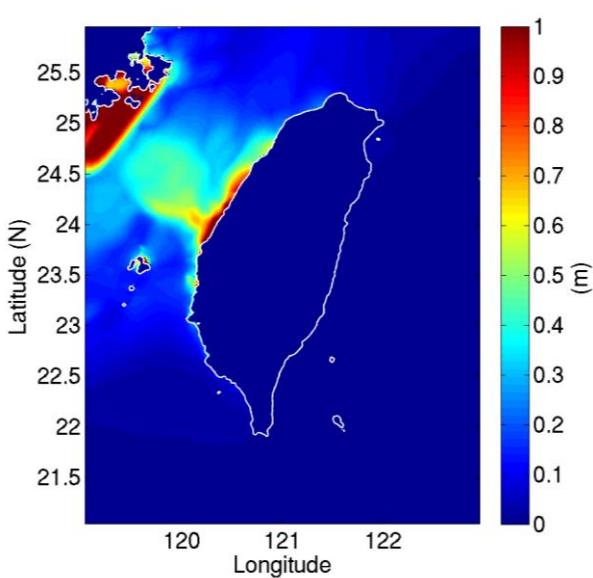


圖 1：以 COMCOT 模擬之最大波高圖

由圖 1 中可觀察到，在新竹部分之最大波高約為 0.3m，與馬國鳳(2006)中所述，新竹在 1604 年泉州地震曾被記錄有 30 公分左右的海水異常，兩者變化高度互相吻合，因此可以更進一步印證泉州地震與新竹海水異常變化之關聯性。

在傳統情境分析法中，必須先產生潛在之海嘯源，再探討各重點城市所面臨之海嘯威脅。例如 Huang et al.(2006)對 1604 年泉州海外大地震及其海嘯影響進行傳統之情境分析，發現海嘯波對泉州灣沿岸的增減水效應不足以造成災難性的影響。然而此研究結果僅可以數值方法重現已知之結果，無法說明未來在海嘯源位置與強度改變之情況下，沿海地區所可能出現之災情。

有鑑於此，本研究採用之海嘯源強度分析法 (Impact Intensity Analysis, IIA 法)由各重點城市出發，探討可能威脅該城市之海嘯源，以及各海嘯源之衝擊強度。因此 IIA 法可讓臺灣西岸充分重點城市掌握對於來自於泉州沿海以及臺灣海峽之潛在海嘯源之影響與衝擊，其研究成果亦可應用於臺灣西部沿海城市對於海嘯災防策略之擬定。由於 IIA 法不受特定案例之限制，因此對於未來海嘯災害之掌握有相當之助益。

另外 IIA 法計算耗時較長、計算範圍較小、距離較短，故本研究另搭配海嘯源逆向追蹤法 (Tsunami

Reverse Tracing Method, 以下簡稱 TRTM)。李俊叡 (2014)提及 TRTM 的方法及原理，TRTM 方法可以過濾不可能之海嘯源，本方法受 Ray Tracing 方法所啟發，Ray Tracing 法基於能量通量守恆之 Green's Law 上，計算海嘯波傳遞之振幅、方向以及到時(Choi et al., 2003)，然而此方法卻無法計算海嘯波之繞射現象和邊緣波效應。此外由 2010 年智利海嘯事件和 2011 年日本海嘯事件之最大波高圖中，觀察到海嘯波傳遞具有雙向性。TRTM 法能夠大範圍地計算海嘯潛在威脅地點，但缺點為近岸處圖表呈現飽和模糊，故另使用 IIA 法來做更進一步的分析，IIA 法可量化各潛在海嘯源對研究區域之威脅強度外，並針對海嘯源逆向追蹤法於近岸處呈現模糊處進行補足。

(二)海嘯源逆向追蹤法(TRTM)

海嘯源逆向追蹤法之追蹤單元必須符合線性波之疊加理論(superposition principle)(Kramers, 1957)，即在相同條件之下，由多個追蹤單元所產生之合成反應相當於各追蹤單元單獨產生之反應之代數和。本研究之追蹤單元為點源，而點源之疊加理論可藉由惠更斯－菲涅耳原理 (Huygens-Fresnel principle) 加以說明 (Fresnel and Chim, 1816)。惠更斯首先提出「波前之每一點可視為是產生球面次波之點波源，而後任何時刻之波前則可看作是這些次波之包絡」(Born & Wolf, 2011)。此原理可解釋波之直線傳播與球面傳播，並推導出反射定律與折射定律，然而此原理卻無法解釋波之繞射效應；菲涅耳以惠更斯原理為基礎，並假設波彼此之間會發生干涉現象，故惠更斯－菲涅耳原理綜合了惠更斯原理與干涉原理，可解釋波之繞射效應並完整描述波之傳播行為。以下五步驟為執行海嘯源逆向追蹤法(TRTM)之執行程序：

1. 在研究區域近岸處設置逆向追蹤單元 (tsunami reverse tracing unit)，逆向追蹤單元為在研究區域近岸外海抬升之水體，代表涵義為假設其為一場虛構之海嘯事件，其逆向追蹤單元尺寸依網格解析度和沿岸地形特徵而定。
2. 因理論建立在線性假設下，因此以 COMCOT 海嘯模式求解線性淺水波方程式，作為 TRTM 模擬追蹤單元情境海嘯波傳遞情形之工具

3. 因海嘯波傳遞具有方向性，因此藉由繪製 COMCOT 產生之最大通量圖，觀察海嘯波傳遞時之能量通道分布，其色階將顯示出海嘯能量通道。
4. 檢查是否有特殊地質特徵位於能量通道上，例如：海溝、火山或是等高線分布密集之可能海底山崩區域。若無能量通道通過，則可將其處排除為不可能之海嘯源。
5. 在初步篩選，排除不可能之海嘯源後，可針對所剩之海嘯源設計更細緻之情境案例，進行分析。若可能海嘯源為海溝型地震，可依其長度分布來估算地震規模，藉由不同地震規模之海嘯，找尋最符合地質證據或是文獻描述之情境。若為海底山崩，則可假設其為一塊體於海底斜坡滑動，參考該處水深、塊體長度、塊體厚度、斜坡角度等參數來進行初始波高估計(Watts et al., 2005)。

根據上述方法，我們選定數個台灣重要港口及河口作為 TRTM 之分析目標，本研究選定新竹-頭前溪、台中-台中港、高雄-高雄港、台北-淡水河、台南-曾文溪、雲林-濁水溪、嘉義-東石港。TRTM 設置逆向追蹤單元抬升量高度為 1m、半徑為 12 弧分，如表 1 及圖 2 所示。

表 3：設置點之座標

編號	地點	經度	緯度
a	台北-淡水河	121.3557	25.21148
b	新竹-頭前溪	120.8979	24.87958
c	台中-台中港	120.4196	24.28044
d	雲林-濁水溪	120.2110	23.86118
e	嘉義-東石港	120.1091	23.44094
f	台南-曾文溪	120.0489	23.03786
g	高雄-高雄港	120.1753	22.59694

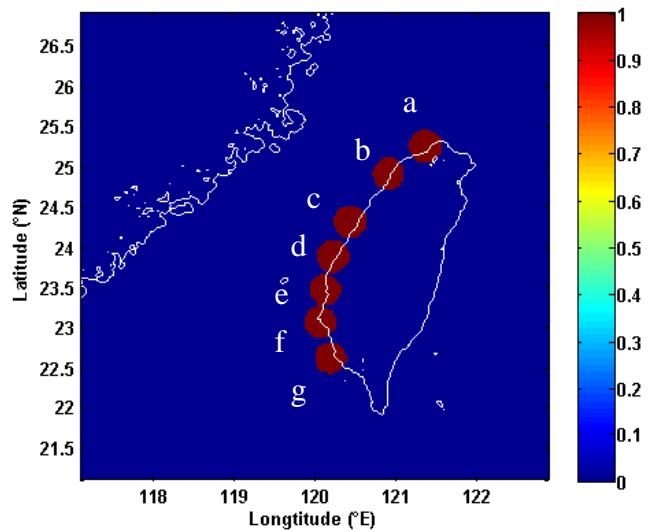


圖 2：設置點之位置與 TRTM 逆向追蹤單元之大小

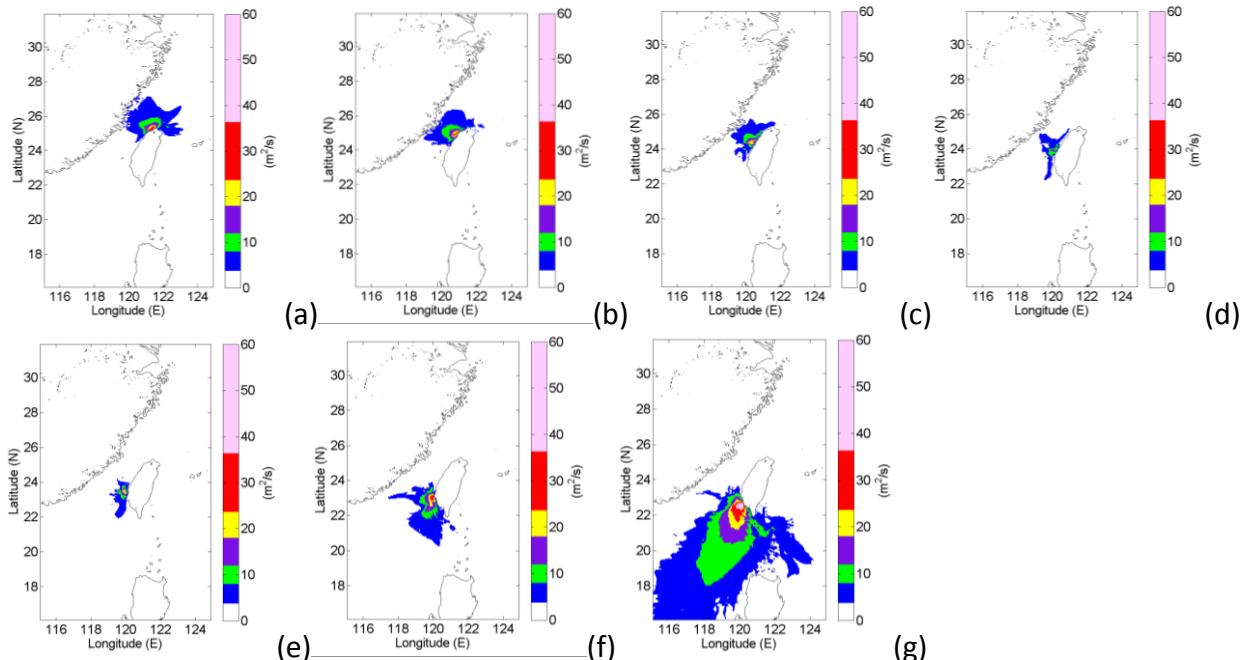


圖 3：TRTM 設置逆向追蹤單元之大小及位置依次為 (a)台北-淡水河；(b)新竹-頭前溪；(c)台中-台中港；(d)雲林-濁水溪；(e)嘉義-東石港；(f)臺南-曾文溪；(g)高雄-高雄港

以圖 3 為例之 TRTM 之分析結果，可得知由於能量散佈之關係，TRTM 較容易判識遠距海嘯源，而近源區則由於能量通道過於集中而不易分辨。不過可以觀察到濁水溪以南之縣市，包括嘉義、高雄，其 TRTM 之結果顯示地震之震央若位於台灣海峽海域，則其影響程度相對較小。

(三) 海嘯源強度分析法(IIA)

使用 TRTM 法雖可快速排除較不可能之海嘯源，但其於近岸處有模糊不清之情況，因此本研究更進一步使用海嘯源強度分析法(Impact Intensity Analysis，以下簡稱 IIA 法)，對台灣鄰近海域之可能潛在海嘯威脅程度進行量化分析，影響強度分析法的理論與海嘯源逆向追蹤法相同，建立在線性假設下，海嘯波的傳遞僅與水深有關，且傳遞具有雙向性，影響強度分析法將計算範圍離散成數個微小之海嘯源，並使用 COMCOT 求解線性淺水波方程式，透過繪製最大波高圖，可量化出對台灣具衝擊性之海嘯源之大小亦可補足海嘯源逆向追蹤法於近岸不清楚處。IIA 法其執行步驟如下：

1. 將數值計算域離散為數個均一尺寸之微小海嘯源，每個海嘯源稱作單元海嘯，其單元海嘯尺寸

依網格解析度和計算域範圍而定。

2. 透過撰寫 Linux Shell Script 進行自動化運算，計算個每一個單元海嘯之傳遞情形，並儲存其最大波高、最大通量等運算資料，建立資料庫。其計算時間需使每一單元海嘯皆能於計算域中完整傳播。
3. 選擇一研究區域，給定座標經緯度，紀錄每個單元海嘯傳遞到此研究區域之最大波高值。
4. 將研究區域所記錄到之最大波高值，對應回其單元海嘯位置，並以最大波高值大小著色，以色階代表其威脅程度。

然而 IIA 法需處理計算域中所有之單元海嘯源，並對探討地區進行最大波高製圖，往往一次分析會需要數千次海嘯計算，相當耗時。為此，在中研院網格中心協助下，已將 IIA 法進行優化與批次化，以縮短計算時間。

馬國鳳(2006)中提及，新竹在 1604 年泉州地震曾記錄到 30 公分左右之海水異常變化高度，故本研究選定新竹頭前溪做為 IIA 之分析目標點。計算解析度與地形解析度皆為 2 弧分，單元海嘯之半徑為 12 弧分。

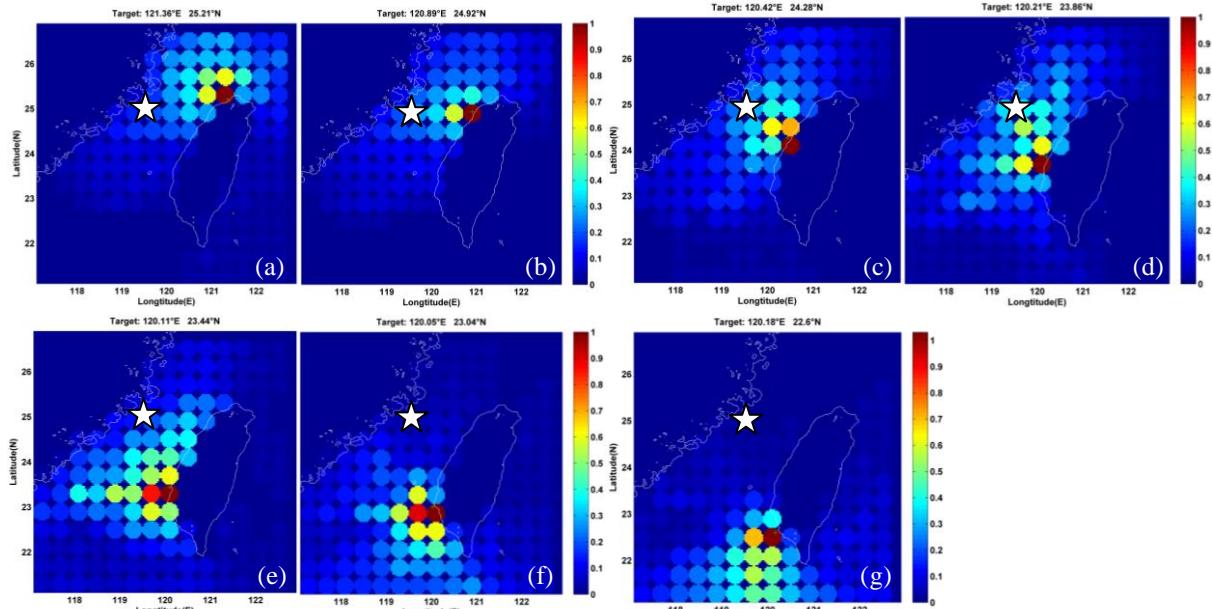


圖 4：IIA 法套疊 1604 年泉州地震之震央，白星符號為泉州地震之震央，目標地區依次為：(a)台北-淡水河；(b)新竹-頭前溪；(c)台中-台中港；(d)雲林-濁水溪；(e)嘉義-東石港台南-曾文溪；(f)高雄-高雄港

經由 IIA 法可觀察到，以新竹為例，新竹前頭溪口之能量通道方向確實沿著台灣海峽通往福建沿岸，接著將泉州地震震央(25.0°N , 119.5°E)套疊至 IIA 結果，如圖 4。

由圖 4 得知 1604 年泉州地震之震央確實位於新竹頭前溪口之能量通道延伸範圍。因此可證實馬國鳳(2006)提及之該年分之異常海水變化高度，極可能來自於 1604 年之泉州地震。

三、 結果與討論

本研究首先以TRTM法根據圖2選定之重要港口及河口進行TRTM及IIA法，分析若台灣海峽海域發生海嘯，會對港口及河川有何影響？並與泉州地震之震央做疊合，以觀察IIA與1604年泉州地震之關係。

未來若發生震央位於台灣海峽之上之地震進而導致海嘯，由圖3可得知，雲林濁水溪、台中台中港、新竹頭前溪等區域為影響較為顯著之區域。換言之，濁水溪以北之地區受到之影響較顯著。接著以IIA法套疊1604年之泉州地震之震央，根據圖4，可觀察到若該年泉州地震之情境重現，可對台灣海岸造成一定影響，且影響範圍也是主要分布於濁水溪以北。

另外由TRTM(圖3)與IIA(圖4)之結果都可觀察到在台灣西部沿海主要重點城市與港口部分，雲林以北之海嘯源主要來自台灣海峽。而台南、高雄與屏東等較南端之地區之海嘯威脅則以台灣西南方至馬尼拉海溝北側較為顯著。

本研究使用之IIA法能針對某特定河口或港口進行強度分析以觀察該點之海嘯潛在威脅，但目前無法針對一範圍之海岸進行分析。預期未來將開發可根據一海岸區域進行分析方法，可避免人為選點之主觀因素進行以進行西海岸更為全面的海嘯威脅分析。

四、 參考文獻

1. 李俊叡, 2014, “台灣海嘯速算系統建置暨1867年基隆海嘯事件之還原與分析”，國立中央大學碩士論文。
2. 周學曾, 1830, 晉江縣誌, 卷之七十四。
3. 姜志禮, 1427, 重修洛陽橋記刊石。

4. 馬國鳳, 2006, “從南亞海嘯談起”，科學發展 2006年1月第397 期, 41-45。
5. 陳泗東, 2003, “1604年與1607年泉州兩次強地震考述”，幸園筆耕錄，108-128。
6. 黃昭, 2006, “1604年泉州海外大地震及其海嘯影響分析”，地震，第4期。
7. 程卓, 1224, 泉州府誌，卷七十三。
8. 鄭世楠, 2011, “台灣地區歷史地震資料的建置”，中央氣象局地震技術報告彙編，60卷，432-433。
9. Born, M., and Wolf, E. , 2011: ‘Principles of Optics 7th (expanded)”, Cambridge University Press, ISBN 9780521642224.
10. Choi, B.-H., Pelinovsky, E., Kim, K.-O. and Lee, J.-S., 2003: “Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption”, Natural Hazard and Earth System Sciences, Vol. 3, pp. 321–332.
11. Fresnel and Chim, A., Chim, A., 1816 :”Oeuvres”, Phys (2), Vol. 1, pp. 89-129.
12. Kramers. H. A., 1957: “Quantum Mechanics”, publisher Dover, 1957, pp. 62 ISBN 978-0-486-66772-0.
13. Liu, P.L.-F., Wu, T.-R., Raichlen, F., Synolakis, C., and Borrero, J.,2005: “Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses”, Journal of Fluid Mechanics, 536, pp. 107-144.
14. Mei, C.-C., Chan, I-C., and Liu, Philip L.-F. et al., 2011 : “Long waves through emergent coastal vegetation”, Journal of Fluid Mech., Vol. 687, pp. 461–491.
15. Tso-Ren Wu, 2012 : “Deterministic Study on the Potential Large Tsunami Hazard in Taiwan” , Journal of Earthquake and Tsunami,6,3, (SCIE).