

運用多時期衛星影像探討外傘頂洲變遷

彭新雅¹、曾國欣^{2*}、錢樺³、陳彥欽⁴

論文收件日期：107.06.11

論文修改日期：107.06.20

論文接受日期：107.06.28

摘 要

外傘頂洲位於雲林、嘉義外海約 10 多公里處，主要組成來自濁水溪注入海中的泥沙，由於受到波浪、沿岸流及東北季風等影響，導致沙洲逐年往陸側移動。外傘頂洲因潮汐的變化會產生不同樣貌，具有豐富的生態環境，此外也是雲林、嘉義沿岸的自然防護屏障。但隨著濁水溪注入海中的泥沙減少以及其他自然與人為因素，導致面積逐年縮減。本研究結合Landsat、SPOT系列與Sentinel-2 等光學影像以及海潮模式，重建過去近 30 年的海岸地形模型，並用以監測外傘頂洲的變化。透過自 1990 年起的多光譜衛星影像計算水體指數以辨別水體出現機率，並使用DTU10 的潮汐模型做為高度參考，將淹水機率轉換為實際高程資訊。經與現地單音束測深成果比較後獲得差值均方根(root-mean-square of the difference, RMSD)為 36 公分。經分析可獲得體積變化量從 18.8 百萬立方公尺減少為 10.3 百萬立方公尺，沙洲中於不同剖面求得移動速率為 78.7 – 221.3 m yr⁻¹，其中沙洲南端移動速度大於北端，且預計 2048 年前後沙洲本體會向鰲鼓濕地淤積。

關鍵詞：海岸地形、沙洲變化、衛星遙測、潮汐模型

¹ 博士生，國立中央大學土木工程學系。

² 副教授，國立中央大學太空及遙測研究中心。

³ 副教授，國立中央大學水文與海洋科學研究所。

⁴ 科員，中華民國內政部地政司方域科。

* 通訊作者，TEL: (03)4227151 轉 57690，E-mail: khteng@csrsr.ncu.edu.tw。

Utilizing Multitemporal Satellite Images to Investigate Topographical Changes of Waisanding Sandbar

Hsin-Ya Peng¹, Kuo-Hsin Tseng^{2*}, Hwa Chien³, Yan-Di Chen⁴

Abstract

The Waisanding sandbar is a major tidal flat in Taiwan that extends about 10 km from Chiayi coastline and its sediment source is mainly from Zhuoshui River. The ebb and flow of this place produce high ecological value and form a natural breakwater to protect mainland coastline. However, the sediment source had been decreased owing to human and natural factors, causing the area of sandbar to become smaller year by year. Therefore, this area is necessary to be monitored for environmental sustainability. In this study, we utilize multiple optical remote sensing satellites in the last three decades, including Landsat/SPOT series and Sentinel-2 imageries, to track the decadal variation of the intertidal zone. We first collect historical cloud-free images since the 1990s and calculate the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) to identify water pixels. After computing water appearance probability of each pixel, the map is linearly translated into actual elevation by introducing the DTU10 tide model for high tide and low tide boundaries. To validate, we use the ground truth data collected by the single-beam echo sounder and obtain an accuracy of coastal elevation model at 36 cm. In addition, we analyze different variability of Waisanding sandbar. During 1994-2017, the volume decreased from 1.88×10^7 to 1.03×10^7 m³ and the rate of moving across the sandbar is 78.7–221.3 m yr⁻¹. Among all the rates of movement, the south tip is faster than the north tip. Finally, the sandbar is projected to touch Aogu wetland around 2048.

Keywords: Coastal Terrain, Sandbar Changes, Satellite Remote Sensing, Tide Model

¹ Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, National Central University.

² Associate Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University.

³ Associate Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University.

⁴ Officer, Territorial Administration, Dept. of Land Administration, Ministry of the Interior.

* Corresponding Author, Tel: +886-3-4227151 ext. 57690, E-mail: khteng@csrsr.ncu.edu.tw.

一、前言

外傘頂洲位於雲林、嘉義外海約 10 多公里處 (23.49°N , 120.08°E) (圖 1)，又稱外傘頂沙洲、外傘頂汕，是臺灣沿海最大的堰洲島 (barrier island)。外傘頂洲主要由濁水溪注入海中的泥沙經由波浪推移與海風牽引往南堆積而成，據經濟部水利署水文年報統計，1949 – 1996 年間平均濁水溪輸沙量為 63.9 Mt yr^{-1} (Hong et al., 2010)，透過自然營力往南形成統汕洲、箔子寮汕與外傘頂洲 (林宗儀等，2007)。外傘頂洲面積隨著海水的漲退潮而改變，退潮時露出水面的面積可達數千公頃，漲潮時則縮為數百公頃。此區一系列的沙洲與沙脊為雲嘉海岸之天然屏障，可禦擋波浪對海岸直接衝擊，減少災害發生。因受其屏障保護阻擋波浪傳遞，此一區域素有豐富的生態環境，形成為數眾多的濕地散佈於嘉義縣海岸地區供野鳥及潮間帶生物棲息，也造就東石潟湖內牡蠣養殖等水產漁業的興盛。一般情況下，沙洲海側的沈積物會因沿岸流與季風驅動波浪越洗作用，在陸側形成越洗扇 (overwash fan) (林宗儀等，2007)，然而數十年來因河川整治讓河川輸沙量減少近 40% (Milliman & Kao, 2005)，加上其他複合因素，導致沙洲不斷向內陸靠近。同時，雲林海埔地及離島工業區於 1973 年以後陸續開發興建，種種人為因素阻擋濁水溪南向之輸沙，助長外傘頂洲呈現往陸側侵蝕萎縮的樣態 (林宏仁等，2003)。

一般常見的海岸帶地形研究包含利用航空攝影測量製作水上的地表模型，以及運用聲納施測水底地形，然而對於淺水或沙洲地帶的作業難度極高，除了測線密度提升、船隻航行不易、變遷迅速且更新曠日費時。因此過去研究中有為數眾多的學者利用遙測技術與數值模擬等方式探討外傘頂洲變遷，如蕭國鑫等(2007)結合多時遙測衛星影像與三個時期的空載光達 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 資料，分析 2004 年至 2006 年面積與體積逐漸減少趨勢。Chen and Chang (2009)利用時序 SPOT 與福衛二號(Formosat-2)光學衛星影像獲得灘線位置，與全球定位系統 GPS 驗證後灘線精度約在 43 – 194 公尺區間，後續利用 1999 – 2007 年間的變化計算其海側退縮速率由北至南約每年 19 至 81 公尺，陸側退縮速率由北至南約每年 27 至 76 公尺，另面積退縮速率為每年 0.378 平方公里。Hong 等人(2010)同樣利用 SPOT 影像為資料源，探討因人為作用所造成外傘頂洲變遷的加乘影響。此外根據張憲國等人(2017)之研究，運用衛星影像的水線及平移至灘線的方法估計外傘頂洲的空間變化，並預測於 2060 年將完全低於平均潮位而淪為潛沒沙洲，可能導致此區段海岸線產生嚴重侵蝕以及對生態的衝擊。除此之外，郭禮安等人(2003)針對外傘頂洲逐年潛沒和後退之現象，研擬出具體可行之外傘頂洲保護措施，來減低外傘頂洲的侵蝕速度並試著減少對生態的破壞。

透過歷史影像不難發現外傘頂洲過去數十年來一系列的變遷，圖 1 中底圖為利用美國地質調查局大地衛星 Landsat-8 之紅、綠、藍波段所組成的自然色影像，可獲得外傘頂洲於近期的地理位置，圖中的紅線及藍線分別利用「中央研究院人社中心地理資訊科學研究專題中心」網站中公開的「1904 年日治時期十萬分之一臺灣圖」以及「1944 年美軍五萬分之一地形圖」所描繪的輪廓線。從圖中可以看出沙洲在

1905 到 1944 年由北向南偏移，1944 年至今則緩慢往東南方靠向陸側。然而過去研究較常著墨於分析跨年段的沙洲面積與灘線變化、趨勢，或是少數年份的沙洲量體估計，對於較長期、連續性的變遷討論稍嫌不足，主要原因為過去衛星影像取得不易、價格昂貴、拍攝頻率不足等先天限制。拜近年衛星資料開放的趨勢所賜，有越來越多的中高解析度歷史影像可供利用，其中以 2008 年 Landsat 系列開放一般下載為主要轉捩點，可用以探討地表過去 30 年以上的時序變化。此外自 2015 年起在科技部的支持下，國立中央大學太空及遙測中心發布學術用途的 SPOT 衛星影像資料開放平台，對於國土監測與變遷等研究提供了相當多的資源，因此本研究擬利用長時期(1990-2018 年)、多種類的衛星影像來增加空間解析度以及時間解析度，並結合潮汐模式計算外傘頂洲的高程、土方量(體積)、水線輪廓以及沙洲移動方向等歷年分析。

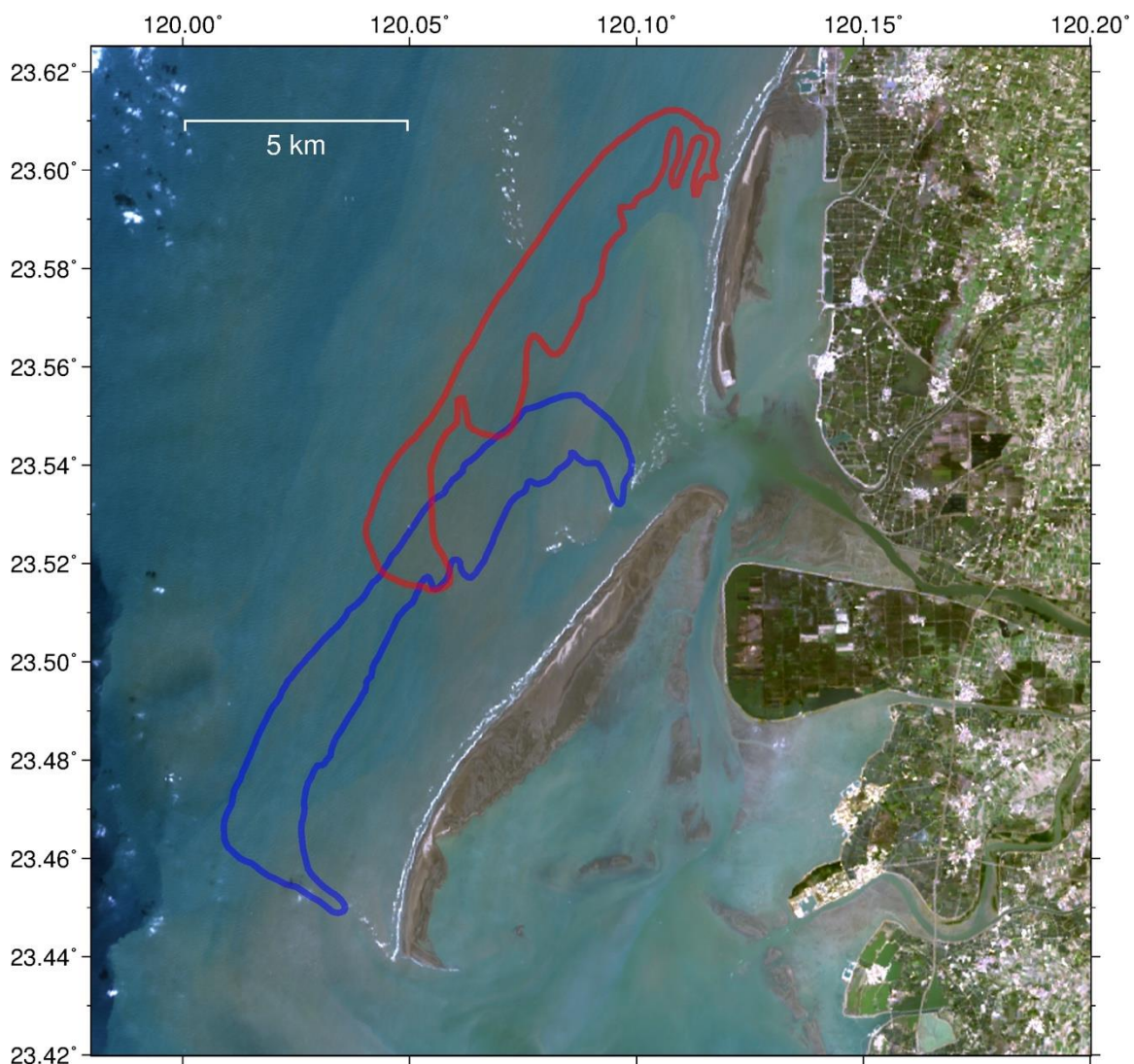


圖 1 外傘頂洲於臺灣西部沿岸之地理位置，由 2018 年 Landsat-8 衛星影像之 4、3、2 波段組成自然色影像。圖中紅線和藍線分別為數化 1904 年日治時期十萬分之一臺灣圖和 1944 年美軍五萬分之一地形圖中外傘頂洲的灘線輪廓(資料來源:中央研究院人社中心地理資訊科學研究專題中心)。

二、研究方法與衛星資料

(一) 研究流程

本研究施作流程如圖 2 所示，包含資料收集、水體判釋、淹水機率計算、建置多時期地形模型以及利用現地實測資料進行驗證（曾國欣等，2018）。首先收集美國地質調查局的 Landsat、法國 Airbus Defence and Space 公司的 SPOT 以及歐洲太空總署 Sentinel-2 系列光學影像，判釋水體出現像元。接著從長時期的影像網格中計算水體出現次數，將出現次數除以總資料數，以得到網格狀淹水機率圖，此機率圖間接代表海岸地區的相對高程差異。接著選用 DTU10 潮汐模型（Cheng and Anderson, 2010）做為高度參考，將淹水機率轉換為實際高程資訊。後續模型驗證利用 2015 年內政部地政司海域基本圖所測得的現地高程進行驗證，以作為後續變遷的誤差判斷基礎。以下章節介紹各步驟之技術細節。

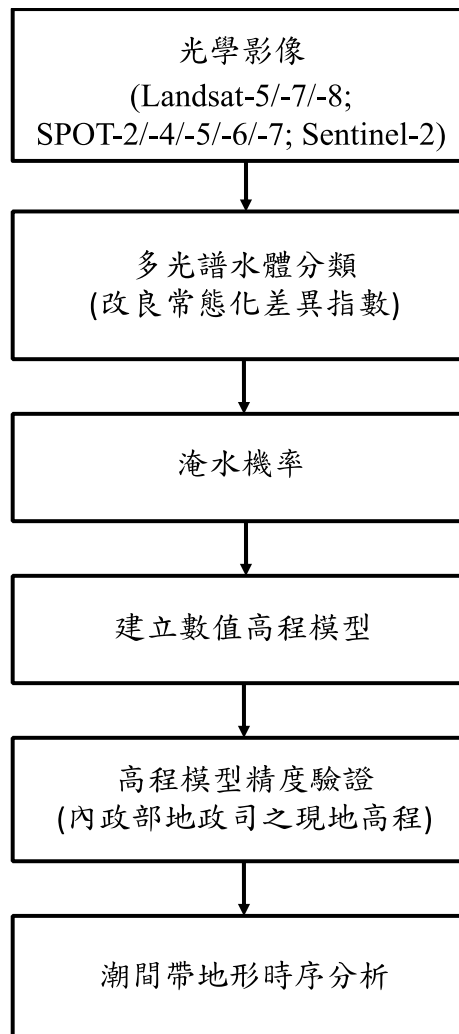


圖 2 本研究之流程圖

(二) 光學影像收集

本研究使用 Landsat-5/-7/-8、SPOT-2/-4/-5/-6/-7 以及 Sentinel-2 所拍攝的衛星影像進行水體分析。Landsat 系列衛星為美國太空總署 (NASA) 與地質調查局 (USGS) 聯合營運之地球觀測衛星，多光譜解析度為 30 公尺，全色態達 15 公尺，可提供長時間未間斷的地表觀測資料以利多時序分析。本系列自 1972 年起陸續發射至今仍有 Landsat-7/-8 兩顆衛星持續提供全球影像，覆蓋可見光至熱紅外波段。目前可由地質調查局(USGS)網站免費下載影像，其 2016 年釋出之再處理版本(Landsat Collection 1) 支援 Level-1 大氣層頂反射率及 Level-2 地表反射率兩種產品，本研究選用 Level-2 經由大氣校正後的地表反射率進行分析，內部對於大氣改正模式分別針對 Landsat-5/-7 採用 6S 輻射傳輸與國家環境預報中心 (NCEP) 大氣網格產品，另外跟針對 Landsat-8 使用內部輻射模式與中解析度成像分光輻射計 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 觀測資料。此外，產品中帶有雲影分析的品質評估波段 (Quality Assessment, QA)，可運用於遮蔽受到一般雲層及捲雲影響的像元，減少水體誤判的可能。

此外，SPOT 系列於 1986 年 2 月法國成功的發射第一顆 SPOT 衛星，至今仍有 SPOT-6/-7 兩顆衛星持續收集資料，於可見光至近紅外光波段空間解析度達 6 公尺。SPOT-6/-7 分別於 2012 年與 2014 年發射，除將全色態地面解析度自以往的 2.5 公尺提升至 1.5 公尺，也能透過本體旋轉進行不同視角拍攝，以利製作空中影像立體對。此外，SPOT-6/-7 補足了以往缺少的藍光波段，使其能組成自然色影像供更多的視覺化應用。Sentinel-2(亦稱為哨兵二號)為太陽同步軌道的地球資源衛星，分為 Sentinel-2A 以及 Sentinel-2B，由歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 分別在 2015 和 2017 發射。由於 Sentinel-2B 於本研究期間仍屬試營運階段(commissioning phase)，故僅採用 2A 影像。Sentinel-2 系列為目前全球開放資料中解析度最高之產品，提供自可見光至紅外光(VNIR)間的 13 波段影像，單顆衛星的再訪週期為 10 天，故在相同視角 A/B 兩顆搭配後可提供最高 5 日的重複拍攝，且像幅寬達 290 公里，比 Landsat 系列的 185 公里更廣，能夠有效率的提供地面取像。針對 2018 年後的影像，可運用 ESA 提供之無償軟體 The Sentinel Application Platform (SNAP)內建大氣校正模組 Sen2cor(Sentinel-2 Level-2A Atmospheric Correction Processor)，進行大氣校正後再進行分析。

本研究選用三種不同系列的衛星影像增加影像張數以提高時間解析度(temporal resolution)，收集年段為 1990 至 2018 年，總共利用 352 張 Landsat 系列、108 張 SPOT 系列及 62 張 Sentinel-2A 等 522 張影像進行後續計算，並運用不同年段進行多時序的分析。各衛星所使用的影像時間段與解析度詳見表 1。

表 1 本研究使用衛星影像之時空特性

	任務時間	資料使用時間	多光譜解析度(公尺)	使用張數
Landsat-5	1984-2011	1990-2011	30	157
Landsat-7	1999-至今	1999-2018	30	124
Landsat-8	2013-至今	2013-2018	30	71
SPOT-2	1993-2009	1993-2009	20	19
SPOT-4	1998-2013	1998-2013	20	31
SPOT-5	2002-2015	2002-2015	10	26
SPOT-6	2012-至今	2013-2018	6	21
SPOT-7	2014-至今	2016-2018	6	11
Sentinel-2	2015-至今	2015-2018	10	62

(三) 多光譜水體分類

針對多光譜衛星影像，前人研究多利用改良常態化差異水指數 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) (Xu, 2006)，以及常態化差異水指數 NDWI(McFeeters, 1996)作為水體判釋方法，兩者的公式組成雷同，分別為 $(Green - NIR)/(Green + NIR)$ (NDWI) 以及 $(Green - SWIR)/(Green + SWIR)$ (MNDWI)，值域為 -1 至 1。由於水表面在綠光波段會有較強的反射，而在近紅外光波段至中紅外光有較強的吸收，因此兩波段影像計算之(M)NDWI 會呈現大於 0 的數值，在多數海岸地區地物種類較單調的範圍內可形成強烈對比，利用單一門檻值可將水體由其他地表類型中提取出來。對 Landsat 及 Sentinel-2 影像而言，Green 為影像的綠光波段，IR 為中紅外波段(SWIR)，由於 SPOT 系列的影像並未包含中紅外波段，因此 SPOT 系列則利用 NDWI 求得水體指數，式中的 NIR 為 SPOT 影像中的近紅外波段。

水體判釋過程中因受雲霧干擾，在影像中可能造成誤判像元，針對此一問題對於 Landsat 選用 Level-2 的影像資料來進行分析，利用自帶的 QA 波段所紀錄的雲霧像素將非清晰像元移除。針對 SPOT 與 Sentinel-2 影像，吾人利用人工篩選的方式將海岸線受到雲遮影響的資料濾除。最後將上述多元影像重新取樣至自訂的 10 公尺最小網格，綜合應用於後續淹水機率計算與地形建置。

(四) 建置數值高程模型

經由上述水體分類後，可將所有影像集合起來計算每一個像元之淹水機率並且搭配潮汐模型求得實際高程，其計算方法如下 (Tseng et al., 2017):

$$DEM_{Sat}(i,j) = [(1 - \frac{\sum_{k=1}^n S_k(i,j)}{n}) \times (H_h - H_l) + H_l] \quad (1)$$

其中 $DEM_{Sat}(i,j)$ 為利用上述介紹的三種衛星影像計算第 i 列與第 j 行之地表高程，首先 $S_k(i,j)$ 為第 k 張影像經(M)NDWI 判釋後之水體分類，水體設為 1 而非水體設為 0，並將所有判釋後影像加總並除上總影像數量 n 求得值域為 0 - 1 的水體機率特徵。再利用潮汐模型(DTU10)求得影像時間中所能得到的最高潮位高度 H_h 以及影

像時間中所能得到的最低潮位高度 H_l ，最終將相對淹水機率轉換至實際高程。

(五) 高程模型精度驗證

內政部地政司於各年間逐步更新臺灣沿海地區的海域基本圖，測量深度 300 公尺等深線內的水下地形，以作為電子海圖(Electronic Navigational Charts, ENC)前置資料。外傘頂洲周遭水域近期更新時間為 2015 年，辦理彰、雲、嘉近岸海域(崙尾水道至布袋港)以及澎湖群島部分海域的測量作業，以小船載單音束測深技術繪製海域地形，利用聲波在水中傳播速度，及傳播時間差測定水深。典型單音束聲納主要的構造包含音鼓(transducer)、紀錄器(recorder)、發射及接收主機(transmitter/receiver)等構造(Jong et al., 2002)，僅能沿著測線獲取海床的地形剖面，在剖面上測深點的間距，與測深儀之資料更新率以及測深時的船速有關(Hell, 2009)，且於淺水中之水深測量精度可達公寸以下等級。

三、外傘頂洲多時期地形及面積變化討論

(一) 潮間帶地形模型精度分析

本研究利用內政部地政司所提供 2015 年外傘頂洲海域基本圖($DEM_{In-situ}$)進行驗證。由於外傘頂洲每一年的形狀及面積持續變化，在此以多年衛星影像求得平均高程，例如選擇 2014 年至 2016 年間收集到的影像代表 2015 年的平均高程(DEM_{SAT})進行驗證，並將 $DEM_{In-situ}$ 內與 DEM_{SAT} 重疊之範圍框選裁切以便對位比較。其比較結果如圖 3 所示，其中圖 3(a)為衛星影像繪製地形 DEM_{SAT} ，圖 3(b)為 2015 年測得之海域基本圖 $DEM_{In-situ}$ ，兩圖色碼皆以 DTU10 平均海水面為零基準之公尺高程，圖 3(c)為 Landsat-8 於 2015/05/15 攝得自然色影像，依據 DTU10 潮汐模型可獲得當時潮位為 0.59 公尺。從自然色可得知南北兩端的高程較高，與本研究建置的高程特徵相符，且具有較細微的細節。此外圖 3(d)為現地高程與影像高程模型之等值圖，X 軸為現地高程值，Y 軸為影像建模高程值，兩軸皆以公尺為單位，色碼為點密度。由於現地資料的基準面為大地水準面，影像高程模型基準面為 DTU10 平均海水面，兩者差異呈現整體偏差，在此為求計算簡便且避免其他系統誤差影響，故將兩高程模型之平均值移除後進行比較。兩者於比較範圍內所有像元之差值均方根 (root-mean-square of the difference, RMSD)為 0.36 公尺。

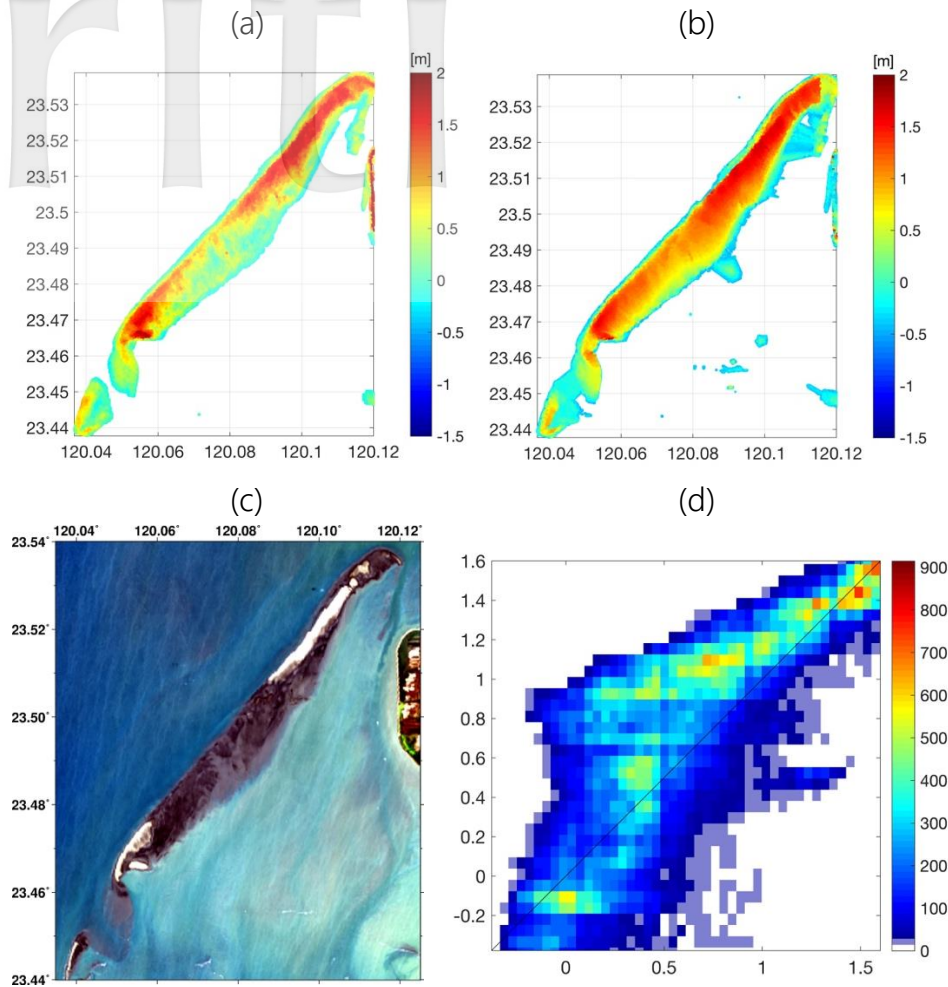


圖 3 比較現地資料與衛星影像製作之地表高程模型。(a)利用多種衛星影像製作之 10 公尺解析度高程模型 (b)利用實測資料製作之高程模型 (c)Landsat-8 影像(2015 年 5 月 15 日拍攝) (d)現地資料(縱軸)與影像高程模型(橫軸)比較之等值散佈圖(scatter plot)，色碼為點密度。

(二) 七年組成之多時期比較

從收集的影像中以每 7 年製作一組高程模型，分別為 1990-1996、1997-2003、2004-2010、2011-2018，共四個不同時期的高程結果進行討論。從圖 4 中可獲得外傘頂洲的面積在這四個時期間逐漸遞減，且沙洲南端也逐漸向陸側靠近。前兩個時期的沙洲外觀已有些許的變化，如沙洲南端及西側的高程已開始降低，再從沙洲的紋理來說，有些許西北－東南向的紋路漸漸消失。於後兩個時期，沙洲南端已明顯消失後往東北方向退縮，低潮位以上的主體面積也明顯縮小。此外，由於外傘頂洲逐年向臺灣沿岸移動，因此當在週期 7 年內有加速移動時，圖中的高程輪廓就容易出現移動軌跡，如下方 1994－2010 年至 2011－2018 年兩區段的南端明顯有高程降低的趨勢，符合相關研究中對於外傘頂洲將成為潛沒沙洲的推論。

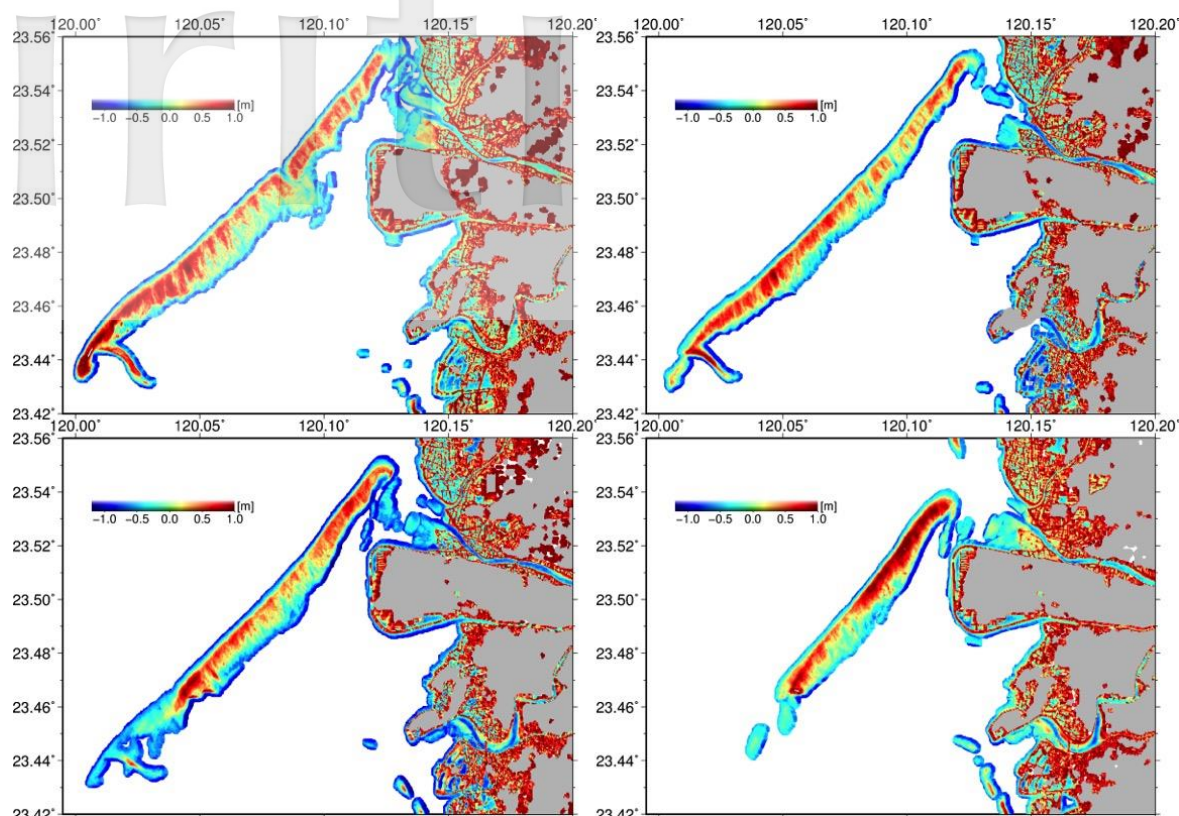


圖 4 以七年為影像收集週期將外傘頂洲分割為四個變化期程，分別為 1990-1996 (左上)、1997-2003 (右上)、2004-2010 (左下) 以及 2011-2018 (右下)。

(三) 三年組成之多時期比較

此外本研究再將這四個時期切割成更多個時間段，來觀察及計算出每一年間的細微變化。利用每 3 年的衛星影像求得中間年的高程資料，如表 2 所示每年間所使用的影像資料，例如選用 1995 - 1997 的影像可計算出代表 1996 年外傘頂洲的高程模型，以此類推的方式可得到 1994 年至 2017 年共 24 年的高程及面積變化，以及外傘頂洲的移動方向和速度。首先從高程及面積變化來討論，由於海流以及季風的影像，從圖 5 可得知沙洲的移動方向以逆時針方向慢慢地靠近臺灣嘉南沿岸，沙洲面積也逐年再縮減，高程則是以海側值高於陸側值，此外，於北港溪出海口的開南島(23.52° N, 120.15° E)也有所變化，從圖中可得知開南島的沙洲有些微地從北漂向南方。

表 2 不同時期所使用影像資料與對應潮位

年份	最高潮位 (m)	最低潮位 (m)	使用影像種類			總張數
			Landsat	SPOT	Sentinel-2	
1994	1.1292	-1.1557	V			28
1995	1.1292	-1.1557	V			29
1996	0.9244	-1.0358	V			30
1997	0.9569	-1.0856	V			27
1998	0.9569	-1.0856	V			23
1999	1.0531	-1.2280	V			27
2000	1.0623	-1.2279	V			35
2001	1.1240	-1.2272	V			42
2002	1.1278	-1.1517	V			47
2003	1.1264	-1.1809	V			53
2004	1.1253	-1.1809	V			50
2005	1.1493	-1.1806	V	V		63
2006	1.1535	-1.0973	V	V		66
2007	1.1762	-1.3028	V	V		65
2008	1.1762	-1.3028	V	V		72
2009	1.1762	-1.3028	V	V		58
2010	1.1146	-1.2269	V	V		48
2011	1.2525	-1.1686	V	V		33
2012	1.2690	-1.1684	V	V		48
2013	1.2690	-1.1684	V	V		64
2014	1.2798	-0.9555	V	V		82
2015	1.3049	-1.1246	V	V		82
2016	1.3049	-1.1246	V	V		85
2017	1.3049	-1.1246	V	V	V	137

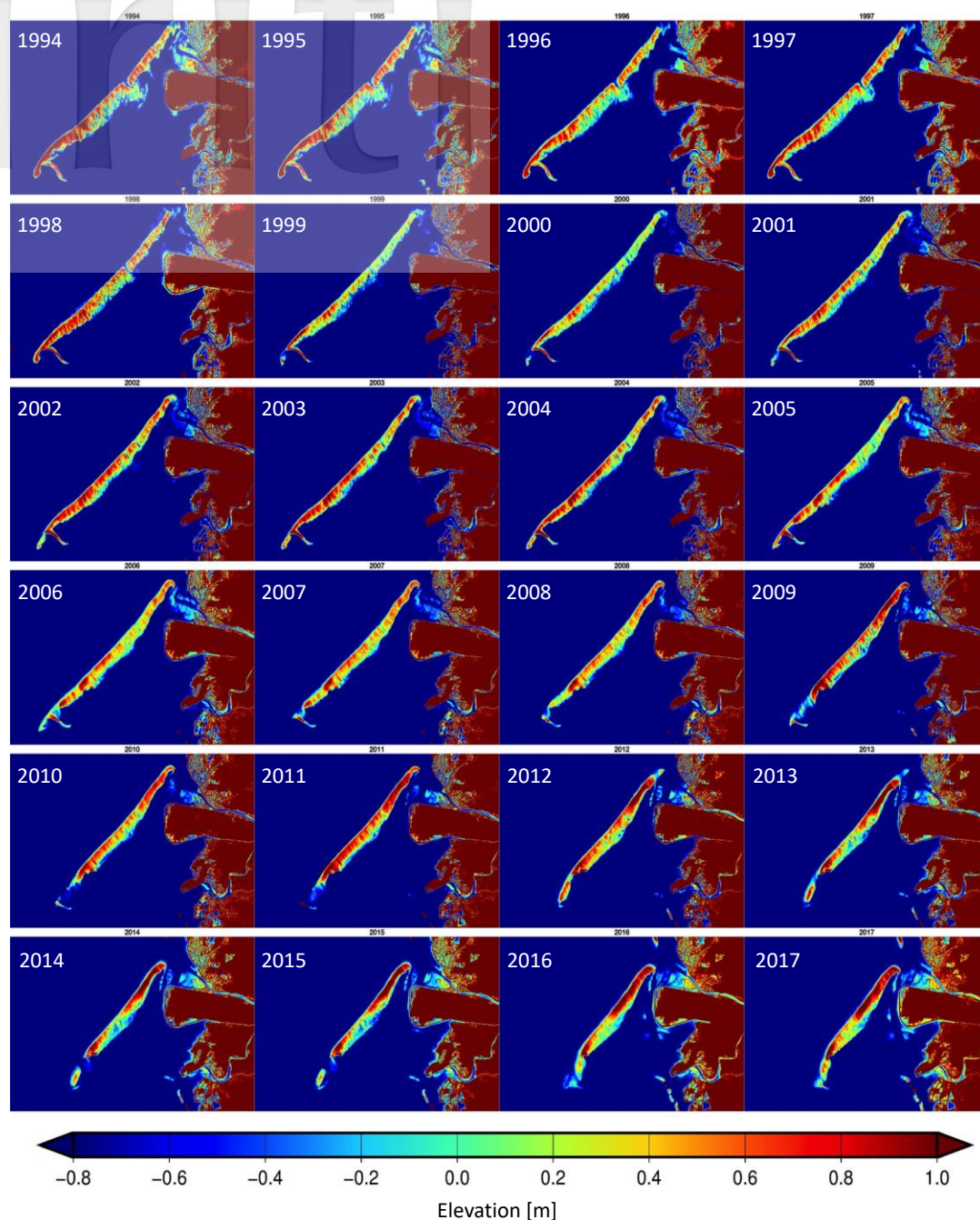


圖 5 三年組成高程模型跨時期比較(1994-2017)。圖中年份由左上的 1994 開始由左至右再由上到下可以得到 1994-2017 年的變化。

(四) 歷年土方量的變化及沙洲移動方向

利用上述方法計算每一年及前後一年組成的模型後，可利用年際高程及面積變化推估外傘頂洲的歷年土方量(體積)變化，其計算方法如下：

$$V = \sum_{i,j=1}^n DEM_{sat}(i,j) \times A_{unit} \quad (2)$$

式中將 DEM_{sat} 中每一個像素高程值乘上像素單位面積 A_{unit} 後予以加總，即可得到每一組高程模型的體積。值得強調的是，本方法計算之高程模型僅介於高低潮的高程區間，未包含潮上帶或潮下帶的體積。透過比較不同年段製作的模型，可計算如圖 6 之時序變化，此圖為外傘頂洲地區高程為-0.4 公尺以上之面積與潮間帶體積變化量，其中藍線為沙洲體積的變化趨勢，紅線為面積變化趨勢。首先體積變化量從 1994 年前後約 18.8 百萬立方公尺減少為 10.3 百萬立方公尺，面積則從 25.4 百萬平方公尺縮減到 15.0 百萬平方公尺，因此從圖中可獲得面積和體積於 24 年來整體呈現線性下降，其中又以 2006-2009 年間體積和面積都有較大的變化量。

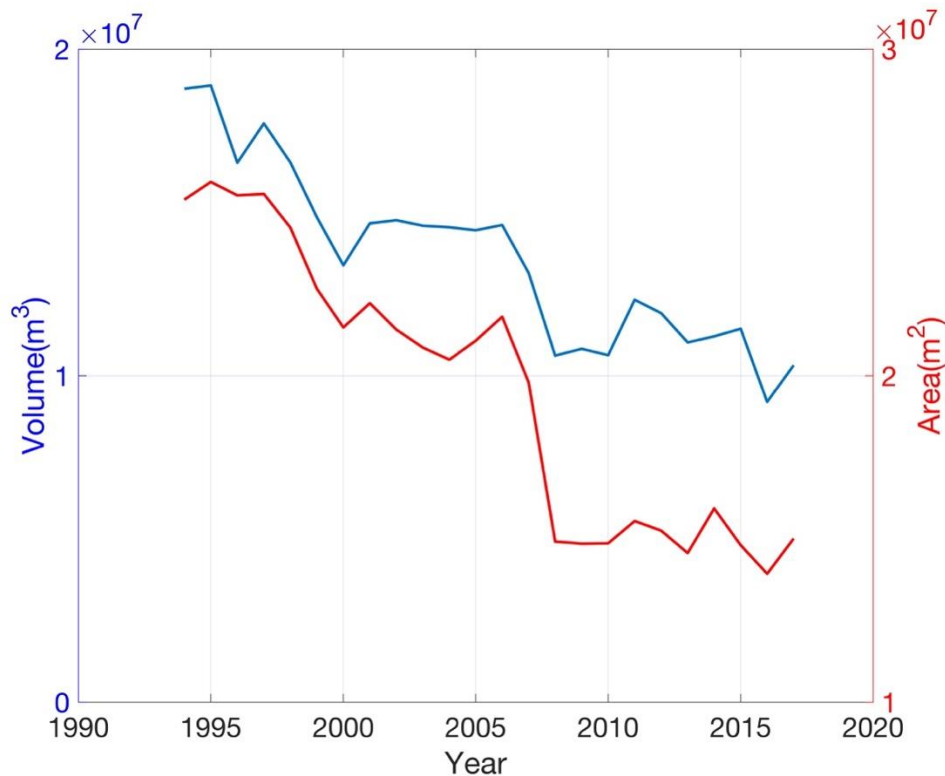


圖 6 歷年面積與體積變化量。藍線為體積變化量，紅線為面積變化量。

此外，為了計算沙洲的移動量需設定一個基準剖面來觀察沙洲海側與陸側的移動距離。本研究將緯度 23.48° 作為一個連接到臺灣沿岸的橫斷面，如圖 7。圖中以 2018 年 Landsat 自然色影像作為底圖，A 點為海側坐標點，B 點為陸側坐標點，C 點則為沿岸坐標點，由此三個坐標位置可以分別算出每年海側與陸側距沿岸的長度 (dA 和 dB)，並監測沙洲兩側近 24 年來距離沿岸的變化量，如圖 7 中縮圖的紅線與藍線分別為海側與陸側測得距離變化量，從圖中可以得知海側距離沿岸的變化量大於陸側，其中海側大約移動 1.81 公里，陸側大約為 1.13 公里。

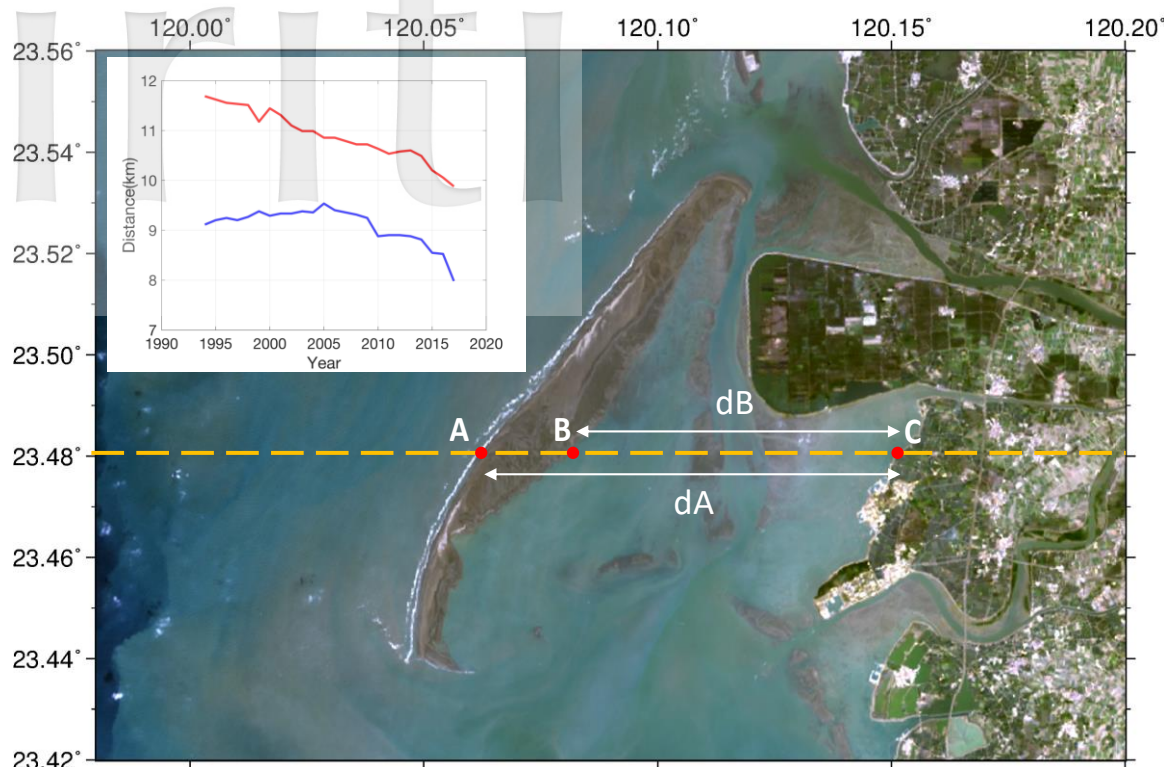


圖 7 海側(點 A)與陸側(點 B)往陸地參考位置(點 C)移動示意圖，計算各年製作之高程地形與 C 點的距離(dA 及 dB)變化。背景為 2018 年 Landsat 自然色影像。左上角縮圖為 dA(紅線)與 dB(藍線)之距離時間序列。

此外為瞭解沙洲端點的空間移動，我們從每一年計算出的高程中，找出最北端及最南端高程約 1 公尺處的兩點坐標，標記出沙洲骨幹位置(圖 8)，在此稱為中心線，其中兩條紅色線段分別為 1904 年日治時期十萬分之一臺灣圖(上)和 1944 年美軍五萬分之一地形圖(下)所繪製，其餘的藍色線段為 1994-2017 年的位置，逐步從西北偏向東南。從圖中可以看出外傘頂洲的移動方向如文獻中描述的逆時鐘方式向臺灣內陸移動，並在近兩年(最右側的兩條線段)有較大的移動趨勢，因此本研究利用下列公式(3)計算出線性移動速率，式中 (x_1, y_1) 為端點起算年坐標， (x_2, y_2) 為端點終年坐標，計算直線移動距離後除上總移動年份 yr 以求得平均移動速率。從速率而言可分為幾個部分，首先 1904 至 1944 間沙洲中心位置移動速率為 178.76m yr^{-1} ，其中南端速率為 183.32m yr^{-1} ，北端為 175.08m yr^{-1} ，後期 1994-2017 年沙洲的南、北端移動速率差異加大，南端移動較北端更為顯著，以直線距離計算可得到南端的速率為 221.3m yr^{-1} ，北端則為 93.48m yr^{-1} ，最後以沙洲的中間點(23.51°N)計算出移動速率為 78.7m yr^{-1} 。因此從斜率、方向及速率推斷約在 2048 年，外傘頂洲會接觸到鰲鼓濕地。

$$\text{Change rate} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\text{yr}} \quad (3)$$



圖 8 1904、1944 以及 1994-2017 年沙洲移動趨勢。其中紅線為 1904 和 1944 的沙洲位置，其餘藍線為 1994-2017 年間的中心線變化。

四、結論

外傘頂洲隨著海流、潮汐等因素逐年往臺灣本島移動，沙洲面積也可從多年期同潮位影像中看出清楚的輪廓變化。本研究利用歷史衛星影像及潮汐模型等演算方式求得外傘頂洲在過去不同時期的變化量及移動趨勢。從此研究方法可獲得外傘頂洲自 1990 年代起沙洲南北端的移動速度略有不同，移動速率為每年 78.7 - 221.3 公尺，其中南端移動速度比北端快。經與單音束現地測深成果驗證後，各年段所建置之高程模型精度為 36 公分。後續運用高程模型間的差異探討沙洲在時序上的面積及體積變化，其中體積及面積在 24 年間(1994-2017)的變化量分別為 8.5 百萬立方公尺及 10.4 百萬平方公尺。從此研究各項分析中可獲得外傘頂洲於低潮位以上的量體逐年縮減，以目前移動速度推斷沙洲南北中心線在 28 年後恐接觸到嘉義沿岸的鰲鼓濕地。雖然這套研究方法中的衛星影像的空間解析度有限，但對於監測長時期且大範圍的區域可滿足實質上的需求，後續亦將加入更多影像源，如福衛系列與微衛星等光學影像，提供更細緻的沙洲結構與時序變遷。

參考文獻

- 林宗儀、羅毓芳、洪敬媛，2007，台灣西南部海岸沙洲島的地形變遷，《第 29 屆海洋工程研討會論文集》，頁 433-438。
- 林宏仁、許泰文、曾以帆，2003，外傘頂洲海岸變遷機制之研究，《第 25 屆海洋工程研討會論文集》，頁 735-742。
- 曾國欣、彭新雅、廖文弘、陳繼藩、郭重言，2018，利用衛星影像劃設金門海岸潮間帶與監測時序變化，《國土測繪與空間資訊》，6(1)，頁 31-48。
- 蕭國鑫、劉進金、陳大科、徐偉城、何心瑜，2007，多時影像與空載光達資料應用於地形變遷研究~以外傘頂沙洲為例，《航測及遙測學刊》，12(4)，頁 419-429。
- 張憲國、賴羿齊、陳蔚璋，2017，應用衛星影像的水線辨識於外傘頂洲的灘線變遷，《航測及遙測學刊》，22(4)，頁 243-262。
- 郭禮安、楊瑞源、劉景毅、張裕弦，2003，外傘頂洲保護措施進行數值分析與水工模型試驗之研究，《第 25 屆海洋工程研討會論文集》，頁 857-864。
- 中央研究院人社中心地理資訊科學研究專題中心，2018，[online] 臺灣百年歷史地圖. Available at: <http://gissrv4.sinica.edu.tw/gis/twhgis>.
- Chen, W. W. and H. K. Chang, 2009, Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation, *Coastal and Shelf Science*, 84(1), pp.54-60.
- Cheng, Y. and O. B. Andersen, 2010, Improvement in global ocean tide model in shallow water regions, *Poster, SV*, pp.1-68.
- Hong, E., W. B. Dade, Y. C. Chang and S. Y. Chan, 2010, Geomorphic evolution of a barrier island reflects the history of natural sediment supply and human intervention in Taiwan, *Journal of Coastal Research*, 26(1), pp.53-58.
- Milliman, J. D., and S. J. Kao, 2005, Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean: impact of super-typhoon Herb (1996) on Taiwanese rivers. *The Journal of geology*, 113(5), pp.503-516.
- Hell, B., 2009, *Towards the Compilation of a New Digital Bathymetric Model of the North Atlantic Ocean*, Stockholm University Licentiate Thesis.
- Jong, C.D. de, G. Lachapelle, S. Skone, and I.A. Elema, 2002, *Sounding Methods, Hydrography*, 1st Edition, Delft University Press, pp.363.
- McFeeters, S. K., 1996, The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp.1425-1432.
- Tseng, K. H., C. Y. Kuo, T. H. Lin, Z. C. Huang, Y. C. Lin, W. H. Liao and C. F. Chen, 2017, Reconstruction of time-varying tidal flat topography using optical remote sensing imageries, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, pp.92-103.

Xu, H., 2006, Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), pp.3025-3033.