

海岸裂流成因與影像分析

A Study on the Cause of Rip Current and Image Analyzsis

王敘民¹ 蔡政翰² 董東璟¹ 林芳如³ 滕春慈³

¹國立成功大學 水利及海洋工程學系 ²國立臺灣海洋大學 海洋環境資訊系 ³交通部中央氣象局 海象測報中心

摘 要

裂流(Rip current)不易察覺，常出現在海岸邊(尤其是海灘型態)，流速強，垂直海岸線向海外流去，時常將遊客牽引流向外海，造成傷亡。由於不易觀察得到，過去被記錄下來的裂流案例非常少，使得裂流的發生機制仍未完全掌握，本研究旨在發展一套裂流影像自動辨識技術，以小波轉換的技術從裂流引起的海表面的特徵進行辨識，藉由上述案例分析裂流發生當下的海氣象特性，以了解裂流發生的成因。目前已完成一套半自動裂流影像辨識技術，可從衛星影像中判釋出是否有裂流，準確率可達80.5%，分析近五年SPOT 6/7共432監測到裂流的衛星影像，根據鄰近現場測站資料，顯示80%裂流案例發生時，波高介於0.5-1.5公尺間，風速約小於4m/s(約3級)，且波向和風向差約有五成的案例多於140度，而本研究認為上述條件是有利於裂流發展的情形。

關鍵字：影像處理、裂流

一、前言

臺灣四面環海擁有豐富的海洋資源，近年來隨著海岸地區的高度利用與蓬勃發展，雖然受到季節的影響，台灣可從事海域休閒活動的區域仍有多項選擇，相關的遊憩活動協會相繼成立，顯示民眾從事海域休閒活動日漸興盛。

所有海域活動均潛藏一定風險，有鑑於國內海域意外事件頻傳，本計畫統計民國103年至107年內消防署溺水案件，於近岸發生的意外事件共計946起，傷亡人數達1212人，且有逐年增加的趨勢。在眾多的海洋災害意外中，離岸流所造成的案例數不勝數，根據美國國家大氣海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)統計結果顯示，美國每年平均有100人因裂流而溺亡；而我國海域亦是裂流好發的區域，如福隆沙灘於2003至2006年間有6起案例，甚至於2005年白沙灣海灘就有45起，迄今台灣每年夏季仍有疑似遭裂流捲走的意外事件，另，外澳海域、台南安平海域、內埤沙灘和淡水沙崙海域近十年來均有裂流發生的記錄(林等，2009；郭等，2011)。

「裂流(rip current)」是一種發生海岸邊，流動方向向外海而去的強烈水流，也稱為離岸流，如圖1。據實驗指出而裂流的速度一般為0.5-1.5m/s，已超過成人的平均泳速，甚至有時候能超過2m/s (Short et al., 1994)，民眾一旦陷入裂流中便會被水流沖向外海，

想強行向岸逆游常導致筋疲力盡而溺亡。綜整上述，裂流具有持續時間短、流速快、尺度小等特點，故有非常高的危害性。為維護海灘上遊客的安全，研究裂流發生的機制以及預報裂流是有其必要性的。



圖1 裂流影像紀錄

裂流不像波浪高低和潮汐變化都目視可辨別，文獻多認為裂流的發生主要是因為地形不均所引致的淺化和折射效應，亦或是為平衡波浪造成輻射應力的外力所導致的(Longuest-Higgins and Stewart, 1964)，隨著不同時間和營力產生變化，其裂流位置和強度也會產生不同的變化。而影響裂流發生與否除了上述所提及之地形因素外，與入射波浪、潮汐高低甚至氣象條件等均有所關係。

面臨如此的海洋災害，台灣迄今仍未有裂流預測模式或預警系統，若要掌握裂流發生之特徵裂流監測是極其必要的，為此本研究目標係在於透過影像分析研發裂流監測技術，藉由蒐集航空衛星影像以及監測系統的資料，經由影像辨識技術開發與執行，建置完

善的裂流案例資料庫，並與中央氣象局目前已在台灣建置的波浪站和潮流站交叉比對，分析裂流發生時之海氣象特性，探討適合裂流發生之情形，以作為預警系統之基礎，提供潛在裂流發生區域之預警訊息。

二、分析資料

為瞭解裂流發生之成因，本研究藉由透過裂流事件鄰近之現場觀測站，統計事件發生時之風速、風向、波高、週期和波向等參數，藉此分析裂流發生當下之海氣象條件。然目前我國裂流發生案例，僅能由報章媒體報導的意外事件所獲取，然無意外事件發生並不代表沒有裂流的現象，且造成這些意外事件的因素過於複雜，並非全然由裂流所引起的，因此若要盤點裂流發生之成因，本計畫認為這些資料可能有部分存疑，且不夠充足，若能從衛星和航空載具等影像資料判釋裂流案例，便可以建立完善的裂流資料庫，作為後續裂流案例分析之依據以及建置裂流監測站和數值模式選址的參考。為達到此目的，本計畫以台灣東北角海域和西南部海域作為研究範圍，從過去統計，該新北市和屏東縣是台灣意外事件發生頻率最高的地點(如圖3)。此外本研究已蒐集台灣附近周圍可使用之衛星等航空影像，包含中央大學太空及遙測中心提供的衛星影像以及Google Earth衛星航空影像(如表1)。以下將針對上述兩影像資料進行說明。

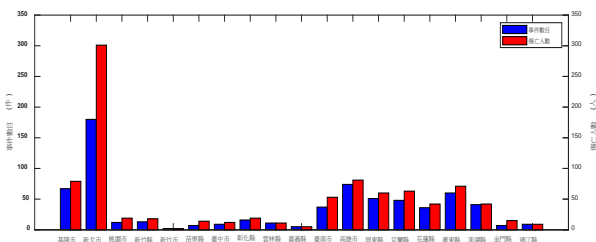


圖2 全台海域意外事件統計表(2010-2019年)

2.1 中央大學太遙中心衛星影像

該衛星影像是由目前可直接接收之衛星資料有SPOT和Pléiades兩種地球觀測衛星，其接收範圍以中壢為中心，半徑達三千公里的範圍。由於裂流空間尺度較小約幾十公尺至幾百公尺 (Castelle et al., 2016)，本計畫僅使用光學衛星中SPOT6、SPOT7和Pléiades的高解析度衛星影像，其解析度均達到1.5公尺，且拍攝時間自2013起共計約6000多筆影像資料。

該資料提供相當詳述的影像資訊包含影像編號、觀測儀器、解析度和時間等，此外該影像拍攝的範圍較大，同一時間內可能同時包含台灣海岸等多個縣市，可分析同一時間上不同地區裂流發生之情形，目前該影像資料庫會是本計畫主要蒐集的對象。

2.2 Google Earth衛星航拍影像

Google Earth是一套以三維方式呈現地貌之地圖軟體，影像內容主要分為衛星影像和數值航空照片兩類。當中航照影像、QuickBird衛星影像、SPOT5衛星影像以及IKONOS衛星影像有較精細的影像解析度，均在3公尺以下，台灣周圍影像拍攝時間從1984年至今。該資料提供之影像資訊包含圖像時間、影像各點經緯度和視角海拔高度。然該資料所提供之拍攝時間與Google Earth相同僅提供至日，故其後續進行海氣象統計分析時僅以當日海氣象數值平均作為依據。

綜整上述影像資料，本研究優先使用中央大學太遙中心的影像進行裂流特性與海氣象特性分析，若發現某區域海灘影像資料及裂流案例較少，則會再以Google Earth衛星影像和農林航空測量所航拍影像進行檢視及補充。各影像資料庫中有裂流發生結果如下圖3-1所示，包含外澳海域影像中含有裂流發生之案例，影像資料分別為民國103年12月30日(太遙中心SPOT7衛星影像)和103年1月3日(Google Earth影像)，以及福隆海域105年10月25日(太遙中心SPOT7衛星影像)和106年11月29日(Google Earth影像)。

表1 衛星、航拍影像資料表

影像來源	觀測系統	影像解析度	觀測時間
太遙中心	SPOT6 衛星	1.5m	2013-至今
	SPOT7 衛星	1.5m	2014-至今
	Pléiades 衛星	0.5m	2014-至今
Google Earth	SPOT5 衛星	2.5m	1984-至今
	IKONOS 衛星	1.0m	
	QuickBird 衛星 航拍照片	0.6m 0.1-0.2m	

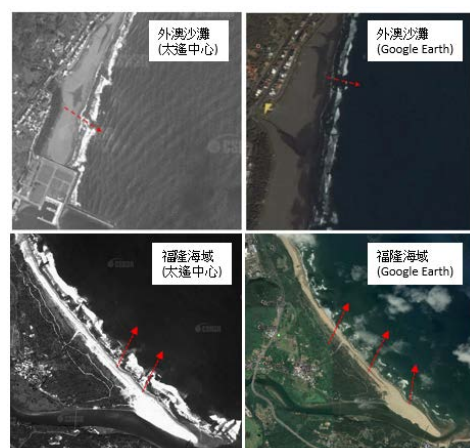


圖3 衛星與航空影像裂流案例示意圖(色虛線表示裂流產生位置)

三、研究方法

前文所提及之現有衛星航空以及裂流監測站所拍攝之影像資料量過於龐大，若全部以人工方式進行分析則需耗費大量人力和時間，且在辨識過程中可能參雜過多個人主觀意識，為此本研究建置一套人工半自動化系統進行判讀判讀，概略挑選出疑似裂流之影像案例，爾後可再經由人為檢視。目前影像處理技術已經廣泛應用於海洋觀測領域。衛星影像可監看碎波帶與海灘交互作用情形。因此本研究參考林(2009)之研究，通過觀察碎波帶斷裂處進而判定裂流是否發生。

本研究根據前述蒐集之相關文獻與本團隊過去研究成果，藉由衛星航拍系統所擷取的圖像，經過數位處理，量化維可用的資訊，辨識出碎波帶於海岸邊的分布情形，該系統以「影像邊緣偵測法」作為核心方法，再搭配多種影像處理方式，包含影像灰階、影像強化、中質濾波等技術，增加其程式的速率及準確率。

本研究為了增加裂流影像辨識的可信度，除了依據碎波帶斷裂處進行判斷外，亦參考Maryan(2013)所提出之原則，且根據裂流發生的成因(Wright and Short, 1984)另外提出兩項條件，分別為

1. 裂流發生位置彼此間須大於40公尺
2. 若無顯著的氣象災害(颱風,海嘯)造成嚴重的地形變遷，短時間內裂流應有復發之情形

在系統流程上先進行影像處理，接著在依據碎波帶特徵以裂流遮罩對邊緣化影像進行濾定，藉以辨識出裂流發生位置。以下將針對影像邊緣化偵測、碎波帶特徵和裂流遮罩律定進行詳述。

3.1 影像邊緣畫偵測

由於二維小波轉換是一個有效的帶通 (bandpass) 濾波器，可被利用來分離大尺度下的相位和位置資訊，同時小波轉換在計算速率上有良好的表現，因此本研究透過小波轉換的理論進行碎波帶範圍辨識，作為後續計算碎波帶特徵以及辨識裂流律定的基礎。小波轉換邊緣化技術是將灰階影像視為一個二維訊號矩陣 $f(x, y)$ ，利用快速傅立葉轉換 (FFT) 和逆二維快速傅立葉轉換演算法計算其 $F(\alpha, \beta)$ 的傅立葉轉換和小波轉換 $Wf(\bar{\zeta}, s)$ 。二維影像函數 $f(x, y)$ 均有其灰度值，其二維小波轉換定義為

$$Wf(\bar{\zeta}, s) = \left\langle f(x), \psi_{\bar{\zeta}, s}^*(x) \right\rangle$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{\bar{\zeta}, s}^*(x) dx dy \quad (1)$$

$$= Wf(\bar{\zeta}, \eta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{s} \psi^*\left(\frac{x-\bar{\zeta}}{s}\right) dx dy$$

根據尺度擴張及平移的特性 $F_x F_y [\psi(\frac{x-\bar{\zeta}}{s})]$ ，

$$= s^2 \Psi(s\bar{\alpha}) \exp[-i(\alpha\bar{\zeta} + \beta\eta)]$$

可將小波函數 $F_x F_y [\psi(\frac{x-\bar{\zeta}}{s})]$ 的二維傅立葉轉換表示為

$$\Psi_{\bar{\zeta}, s}(\alpha, \beta)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x-\bar{\zeta}}{s}\right) \exp(-i\alpha x) \exp(-i\beta y) dx dy \quad (2)$$

$$= s \Psi(s\bar{\alpha}) \exp[-i(\alpha\bar{\zeta} + \beta\eta)]$$

利用二維迴旋定理 $F_x F_y \{f(x) * g(x)\} = F(\bar{\alpha}) G(\bar{\alpha})$ 可將影像 $f(x, y)$ 的二維小波轉換表示為 $f(x, y)$ 與 $\psi_s(\bar{\zeta})$ 的二維迴旋積分，並由共軛複數特性可得到 $F_x F_y [Wf(\bar{\zeta}, s)] = F(\bar{\alpha}) s \Psi^*(s\bar{\alpha})$ ，並從中取出 $F_x F_y [Wf(\bar{\zeta}, s)]$ 的逆二維傅立葉轉換，將去除係數等於0之結果便可獲得邊緣偵測之結果， $Wf(\bar{\zeta}, s)$ 表示為

$$\Psi_{\bar{\zeta}, s}(\alpha, \beta)$$

$$= F_{\alpha}^{-1} F_{\beta}^{-1} \{F_x F_y [Wf(\bar{\zeta}, s)]\} \quad (3)$$

$$= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\bar{\alpha}) s \Psi^*(s\bar{\alpha}) \exp(i\alpha\bar{\zeta}) \exp(i\beta\eta) d\alpha d\beta$$

利用上述所提及之理論，針對衛星航拍影像進行五次影像邊緣畫偵測，於第二次疊代結果可準確的辨識出碎波帶的範圍 (如圖4)，同時可以初步辨識出碎波帶是否有斷裂。

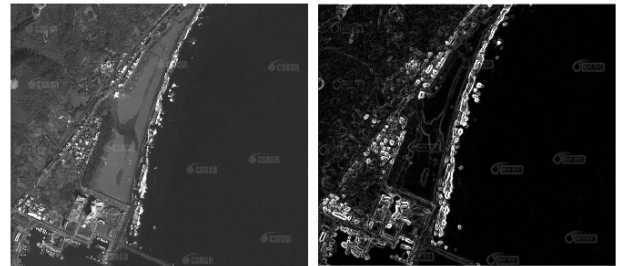


圖4 小波轉換影像邊緣化計算結果(左.原始、右.小波轉化結果)

3.2 碎波帶特徵計算

若經程式判定其碎波帶呈現不連續之情形，本研究則利用上述第五次疊代結果，藉由固定x和y方向計算其碎波帶走向的距離，可以推估碎波帶的平均寬度 (W_{break}) 和影像平均傾斜方向 (θ_{break})，如下式

$$W_{break} = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,1} - x_{i,2})\right]^2 + \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_{j,1} - y_{j,2})\right]^2} \quad (4)$$

$$\theta_{break} = \arctan\left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,1} - x_{i,2})}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_{j,1} - y_{j,2})}\right) \quad (5)$$

3.3 裂流影像位置判釋

依據前述所提出之方法，可根據不同的疊代次數分析得知碎波帶的平均寬度和走向，以及精細的影像邊緣偵測結果。本研究挑選30筆以人工辨識之裂流影像資料，將裂流出現位置附近影像的像素數值依照碎波帶寬度進行分群，並將各類型之影像色值進行平均，若平均後該像素內數值大於0.5則將其色值設置為1，反之則設置為0，藉以建置三種「裂流影像遮罩視窗」，該視窗大小為30×30、40×40和50×50 (如圖5)。在應用上，如碎波帶寬度為42像素大小，則選用40×40的裂流遮罩，以此類推，選定裂流影像遮罩後，根據前文中計算之碎波帶在影像中傾斜方向將該遮罩進行旋轉，同時以該遮罩於整個影像上進行律定比對，若該比對結果相似程度大於0.8時，則將該位置記錄且視為裂流發生之區域，本研究所建立之半自動化裂流影像辨識系統過程如圖6。

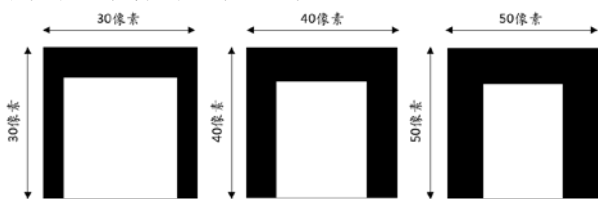


圖5 裂流影像遮罩運算視窗

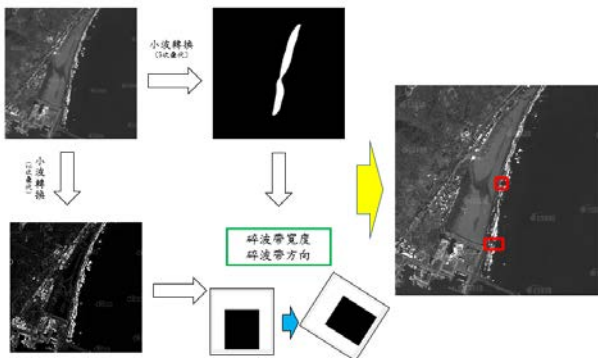


圖6 半自動化裂流影像判釋流程圖

四、結果驗證

由前章節之分析流程，可以半自動化地從衛星航拍影像中辨識出裂流位置，然在不同時刻或不同天氣條件下，碎波帶和沙灘顏色並不同，為了確保此分析流程可以準確的辨識出近岸的碎波帶分布情形，本研究採用中央大學太空遙測中心所提供之影像資料庫，從中以人工方式判釋100張疑似有裂流發生之影像，以及100張無明顯碎波帶斷裂處影像。經本計畫統計後，裂流影像案例發生區域主要位於宜蘭縣外澳沙灘、新北市福隆沙灘以及高雄市西子灣海灘等34處，該些區域與過去十年內曾發生裂流區域相似，判定該些資料有一定可信度。

為檢視該系統是否能精準的判別是否有疑似裂流影像，本計畫將從準確率和精確率進行探討，採用的驗證資料為100張疑似裂流發生之影像以及100張平時影像(即無明顯碎波帶斷裂之影像)，結果如表2所示，由人工判釋100筆疑似裂流影像中，系統判釋有裂流的影像有91筆，無裂流影像有9筆；而人工判釋為平時影像，經系統判釋後有22筆是有裂流的影像，而78筆是沒有裂流的影像，本計畫將根據以下式(6)和式(7)分別計算該系統的準確率和精確率

準確率(Accuracy)

$$= \frac{\text{裂流影像判定有} + \text{平時影像判定無}}{\text{所有影像}} \quad (6)$$

$$\text{精確率(Precision)} = \frac{\text{裂流影像判定有}}{\text{判定有裂流影像}} \quad (7)$$

式中所有影像為100筆疑似裂流影像和100筆平時影像，判定有裂流影像為系統判釋該200筆資料中認定有疑似裂流出現之影像。根據上述公式計算結果，該系統之準確率為84.5%，精確率則為80.5%。

表2 半自動化裂流影像辨識結果

	疑似裂流影像 (人工判識)	平時影像 (人工判識)
裂流影像 (系統判識)	91筆/100筆	9筆/100筆
一般影像 (系統判識)	22/100筆	78/100筆

從結果顯示該系統可大致將裂流影像擷取出來，然而精確率有較低的情形，顯示該系統在判定裂流上有高估之情況，較容易將平時影像誤判為有裂流的案例。除對系統判釋裂流存在與否進行驗證外，本計畫亦針對位置判釋之精準度進行分析，本研究挑選20個裂流影像判釋案例進行分析，從圖7結果顯示，由於該系統根據碎波帶特徵進而挑選裂流影像視窗，故僅能針對較明顯之碎波帶斷裂處進行判定，然

週期則位於4.5秒至7.5秒間，尖峰周期則位於6秒至10秒(如圖11)。

除了分析示性波高和週期資料外，本研究進一步統計裂流發生時鄰近浮標風速以及風向波向差(如圖12)，風速小於4m/s的案例有85筆，佔有約73%，整體平均為3.2m/s；而從風向和波向差的結果可以發現，裂流發生時波向風向並非維持同一方向，兩方向差達140度以上的按理有51筆，佔有約43.9%，該現象本研究認為是由於風浪關係和風趨流成長關係有所抵觸所造成的，根據前人文獻可知，當波高越大時裂流現象愈明顯，而當風速越大且風向與波向相同時，所產生的風浪則會越大，然風能卻能產生風驅流，故本計畫根據上述結果初步認為，若風向以垂直方向遠離海岸時，可增加水體向外流動之動力，而統計發現風速在小於4m/s時，佔所有案例7成，該原因可能為當風速過大且波、風不同向時，不易使波浪堆積於近岸，因而降低輻射應力的影響，導致裂流的現象較不明顯。

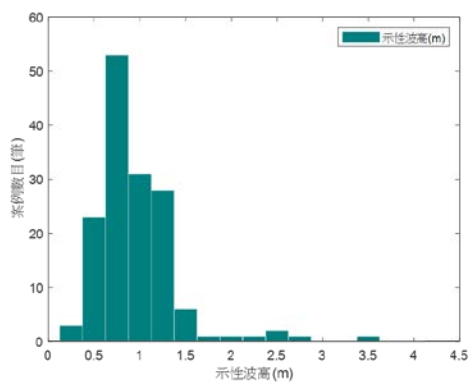


圖10 裂流發生時之波高分布圖

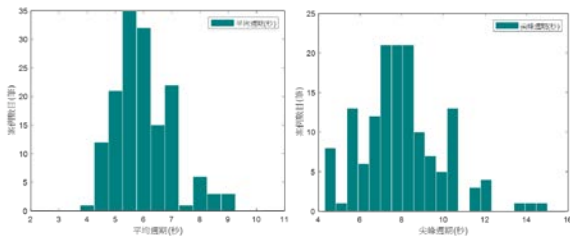


圖11 裂流發生時週期分布圖(左圖為平均週期、右圖為尖峰週期)

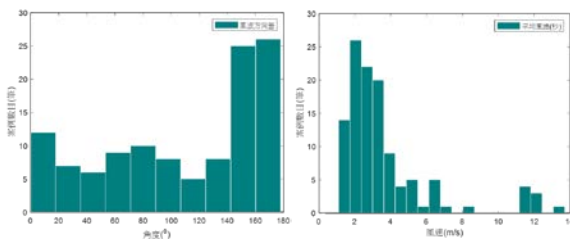


圖12 裂流發生時風速和波向風向差分布圖(左圖為波向風向差、右圖為平均風速)

六、結論

本研究以建置了一套半自動化裂流影像辨識系統，藉此獲得大量的裂流案例，該系統辨識準確率已達84.5%，已可快速且蓋略的完成裂流影像之辨識，後續可在經由人工的方式再次檢視，使辨識結果更加完善。目前本研究以分析東北角海域和西南部海域之衛星航拍影像，共分析432筆案例，合計34處海灘。透過與鄰近浮標站比對，本研究認為在有裂流潛勢的地形下，波高和週期是主要造成裂流發生的原因，當波高介於0.5m-1.5m和週期介於4.5秒-7.5秒間是最容易發生裂流的條件，而風雖然亦會影響到裂流的強度，但主要仍是因為風浪同向，波浪增強使得輻射應力增強；反之亦然。此外，若風速過大海流則會是風趨流所主導，因而使得裂流的現象消失。

謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「海岸裂流監測與預警技術研究(1/3)」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- [1] 林雪美、黃翊翔、沈淑敏，2009，台灣東北部福隆海灘類型和裂流分布之長期變動研究，第十期地理研究，第47-65頁。
- [2] 郭平巧、許弘莒、張裕弦、劉景毅，2011，臺南市海灘類型與離岸流分布之變動探討，第33屆海洋工程研討會論文集，第453-457頁。
- [3] Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. 1964. Radiation Stresses in Water Waves; A Physical Discussion, with Applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 11(4): 529-562.
- [4] Lushine, B.J. 1991. A study of rip current drownings and related weather factors. Nation Weather Service Forecast Office, 13-19.
- [5] Maryan, C.C. 2018. Detecting Rip Currents from Image. University of New Orleans.
- [6] Short, A.D., and Hogan, C.L. 1994. Rip currents and Beach Hazards: Their Impact on Public Safety and Implications for Coastal Management. Coastal Res, 12: 197-209.
- [7] Wright, L.D., and A.D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surfzone and beaches : a synthesis. Marine Geology, 56, 93-118.