



# 臺灣海峽 離岸風場 地質災害風險 概述 與 地質資訊平台 介紹

林亮甫\* / 國立臺灣大學海洋中心 博士後研究員

劉家瑄 / 國立臺灣大學海洋中心 研究員兼執行長

許鶴瀚 / 國立臺灣大學海洋研究所 副教授、國立臺灣大學海洋中心 副研究員

陳憶萍 / 國立臺灣大學海洋中心 研究專員

陳松春 / 經濟部地質調查與礦業管理中心 科長

陳家生 / 捷聯科技有限公司 副總經理

過去數年間臺灣海峽的離岸風電蓬勃發展，累積了大量的地質、地球物理、工程地質調查資料與分析成果，使我國在臺灣海峽離岸風場有更豐富的地質資訊，也認知到更多臺灣與鄰近區域的地質災害風險特徵。本文探討臺灣海峽地質災害風險，從區域地質的角度出發，說明臺灣海峽的構造背景、沉積作用、氣候、海洋流場等自然條件，並列舉「地質構造發育」、「快速沉積物供應」、「動態海床地貌」、「流體活動」、「堅硬地層」等五項地質災害風險特徵來進一步說明臺灣海峽的地質作用如何對風場開發造成影響。對臺灣海峽地質特性有基本的認識後，文末介紹地質調查與礦業管理中心所建置的線上平台「地質與環境感知系統」，地質中心透過該平台分享各種公開的地質資訊供各界查詢，其具備2維、3維展示功能，並有各種圖層資料可供套疊，可同時展示管制區、各種經濟活動、環境保護管制區、地質調查資料分布以及地質影響潛勢分布，除了有助於各界了解臺灣海峽的風場地質知識，也方便廠商將地質資訊應用於風場規劃、評估等工作。

關鍵詞：海域地質災害、台灣海峽、離岸風場、地質與環境感知系統服務平台

## ABSTRACT

Due to the development of offshore wind farms in Taiwan Strait, abundant geological, geophysical, geotechnical data have been collected and analyzed. Our knowledge for the geology in this area has well been improved. In the same time, more geohazard issues are also noticed. This paper aims to introduce potential geohazard issues in the Taiwan Strait based on the knowledges gained in the past years. To discuss the potential geohazards, we start from the regional geology, explaining the tectonic settings, sedimentary processes, and metocean conditions of Taiwan Strait. The geological background is followed by further discussions focusing on geohazard issues regarding “structural develop-

ments”, “rapid sediment inputs”, “dynamic bedforms”, “fluid features”, and “hard rocks” across the offshore windfarm area. In the later part of this paper, the “wind power geological information system” established by Geological Survey and Mining Management Agency is introduced. The online WebGIS system is a platform for publishing the open-sourced geological data and analytical results. It displays georeferencing layers provided in 2D and 3D ways, including the windfarm areas, controlled zones for military, ecology, and environmental protection, the data distributions and geohazard risk levels across the windfarm areas. That helps to share the geological information about Taiwan Strait and can be a useful tool for developers to assess the windfarm sites they concerned.

Keywords: marine geohazard, Taiwan Strait, offshore windfarm, WebGis system

\* 通訊作者，linlf@ntu.edu.tw

## 前言

離岸風力發電是我國極力推動的能源發展項目，國際工程顧問公司曾評估<sup>[1]</sup> 全球風況最好的前二十處觀測地，便有十六處位於我國海域、均位於臺灣海峽，發電潛力受到世界各國能源公司的矚目。經濟部於 2012 年公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」後，便陸續有國內、外廠商相繼投入調查、開發工作，在 2016 年底完成了首座離岸風電示範機組，首座商轉離岸風場「海洋風電」更在 2019 年 10 月風機組裝完成開始運轉。目前第一、第二階段風場仍持續發展中，目標於 2025 年離岸風電的發電量達到 3GW，截至 2023 年 11 月初，臺灣海域的離岸風機已完成 270 座（經濟部公布資料）。

離岸風電場址的規畫、設計，需藉由場址（包含海纜路徑）的環境條件來考慮施工方式、成本、效率，更重要的是安全性。利用地球物理方法來探測地表、地下地質的特性以及利用工程地質調查技術來了解場址中沉積物、地層的物理特性，是風場開發前期非常重要的工作。經過過去十年的離岸風電發展，不論是由政府機關（如：能源署、地質調查與礦業管理中心）主導的跨風場海域基礎地質調查，或是各開發商針對有意開發的離岸風電場址進行精密的調查，都使得臺灣海峽的海域環境資料量大幅提升。而我們在擁有更豐富的地質資訊的同時，也認知到更多臺灣與鄰近海域地質條件所造成的地質災害風險。

海域地質災害為自然的地質條件或人為因素所引發的地質作用（圖 1），對於環境、生態、人類社會、經濟發展等領域所造成的危害，例如 2011 年日本東北大地震海嘯所造成的福島核電廠災難<sup>[2]</sup>，或是 2009 年莫拉克

颱風侵台時海底土石流所造成的海底電纜斷裂與隨後的電訊問題<sup>[3,4]</sup>。這個議題也因為離岸工程需求提高而越來越受到國際社會的重視，如歐洲海洋委員會（European Marine Board）海洋地質災害工作團隊的研究便將海域地質災害分為、地震（Earthquakes）、火山（Volcanoes）、海嘯（Tsunamis）、塊體崩移（Submarine mass movements）、流體活動（Fluid activity and its manifestations）、海床地貌變遷（Migrating bedforms）、人為與科技災害（Human induced and technological hazards）、連鎖事件（Cascading and/or cumulative events）等八類<sup>[5]</sup>。該文件中也提到因各種地質作用的背景條件是經過千百萬年形成（地質時間尺度）而災害（地質作用）可能是短時間且不頻繁地發生，導致難以預測。因此，要探討風場當地（local）的地質作用應先從區域（regional）地質的角度出發，從各項背景條件來探討近代、淺層的地質作用與機制。臺灣大學海洋中心的研究團隊參與、執行臺灣海峽離岸風電的海域調查、資料分析等眾多相關計畫，撰寫本文分享過去數年間累積的知識與經驗，期望能幫助讀者對於臺灣海峽的地質條件與海域地質災害有更進一步的認識。

## 臺灣海峽地質條件

以地質歷史的角度來看，臺灣海峽介於歐亞大陸與臺灣島之間，屬南海東北部大陸邊緣的陸棚區域。這個陸棚在始新世時（約六千萬年前至三千萬年前之間）經歷華南古陸張裂活動，有一系列的正斷層與張裂盆地發育（如台西盆地、澎湖盆地）<sup>[7,8]</sup>。在張裂活動停止之後至晚中新世（約三千萬年前至六百萬年前之間）形成後張裂時期、被動大陸邊緣的陸棚環境；晚

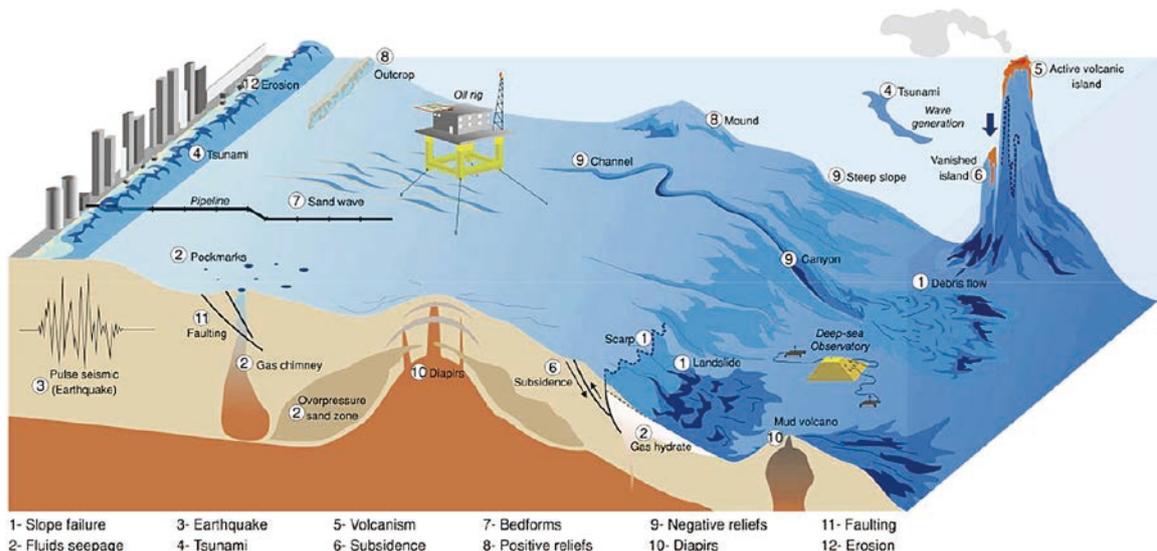


圖 1 各種可能成為災害的地質特徵與作用<sup>[6]</sup>

中新世（約六百萬年前）之後因歐亞大陸與呂宋島弧在此碰撞，陸棚東緣隆，起形成了臺灣造山帶，逐漸隆昇的臺灣島與歐亞大陸間所夾的水域便是現今看到的臺灣海峽。在臺灣造山帶形成的過程中，海峽東側因為造山帶的荷重，陸棚發生撓曲向東下凹，在海峽的東側形成了臺灣西部前陸盆地 [9-12]。藉由上述地史得以了解位在海峽中線以東的風場海域的地層架構，地層由深到淺依序出現張裂地塊與同張裂盆地沉積物，後張裂大陸邊緣的陸棚沉積物覆蓋於其上，最淺則是向東變厚的同造山的前陸盆地沉積物（圖 2） [8,10,12]。

以現代的角度來看，臺灣島仍是相當年輕、活躍的造山帶，大地的擠壓造成地震活動頻繁，屬環太平洋地震帶的一部分，容易造成山崩，也會破壞人造建築並造成生命危害。臺灣位處於亞熱帶季風區，容易出現災害性天氣，有梅雨季、春秋季鋒面及夏季對流性降雨，都可能造成豪大雨，加速地表的侵蝕以及造成大量沉積物輸出，又是熱帶氣旋的主要路徑，平均一年有 3 到 4 個颱風侵襲臺灣，造成強風、豪雨、山崩、土石流等災害。地震與颱風，再加上活躍的造山抬升，使得臺灣陸上的山脈以極高的侵蝕速率生產了大量的沉積物，供應至周圍的海域 [13,14]。臺灣海峽東側的海床沉積物大部分是由臺灣西部的河系供應，其中濁水溪提供了最大的沉積物供應量，每年供給 30 ~ 60 百萬噸的沉積物至臺灣海峽（圖 3） [13,15,16]。

臺灣海峽平均深度僅約 60 公尺深，海水流場主要受到季風推動：夏、秋時分，西南季風造成南海海流向北注入臺灣海峽，與向北流的黑潮支流共同形成北向的強勁流場；秋末到初春時分，東北季風造成海峽西側向南流的中國沿岸流與海峽東側向北的黑潮支流混合，形成複雜的流場（圖 4） [17]。另外，臺灣海峽淺水域的狹長水體亦深受潮汐影響：臺灣海峽東半部南北向的水體運動（圖 4） [18]，漲潮會推動南邊水體向北、北邊水體

向南聚集於中臺灣外海，退潮時則反過來由海峽中部向南、向北兩側退去，因此在中臺灣（如台中港）有較大的潮差。整體來看，臺灣海峽的海流是季節流場、潮汐流場、以及即時氣象混合的結果，相當複雜。

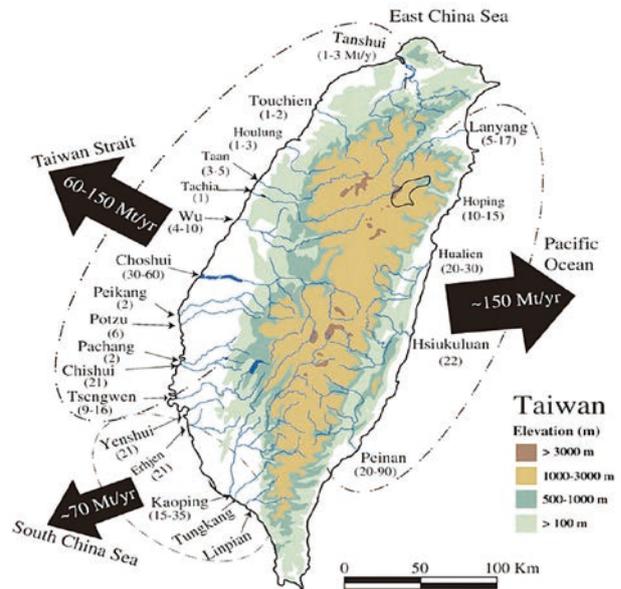


圖 3 臺灣的河系分布與主要河系每年沉積物供應量 [16]

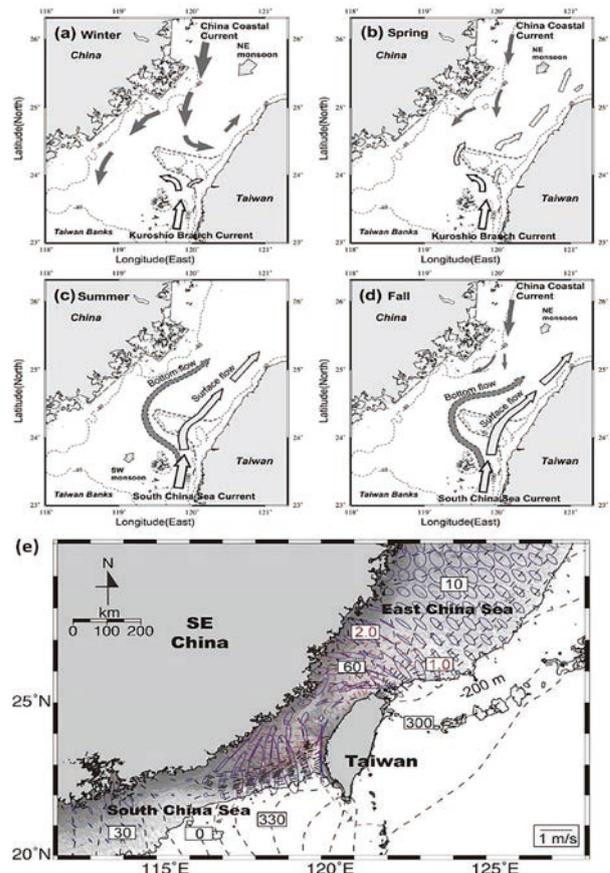


圖 4 臺灣海峽流場：(a)~(d) 個季節流場特性 [17]。(e) 臺灣海峽與鄰近海域潮流分布 [19]。紫色線為潮流橢圓，其長軸為潮流走向，紅色線與黑色虛線分別為等相位線與等潮線。

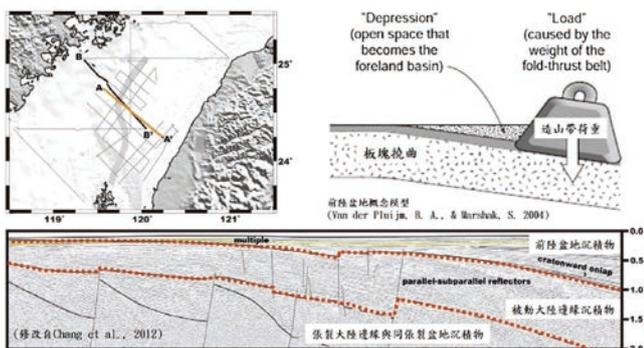


圖 2 臺灣海峽震測剖面與主要地層架構（修改自 Chang et al. [12]）

## 臺灣海峽的地質災害風險

臺灣海峽離岸風場的主要分布範圍位於海峽中線以東，南起澎湖、雲林，北至桃園觀音外海（圖 5），少數風場分別位於淡水、台南、高雄、屏東外海，因距離較遠、地質條件不盡相同，暫不在本文討論範圍。對於開發離岸風場來說，工程所及的深度多是海床底下一百米以內的地層，因此在這個深度範圍內的沉積物特性與地質作用在工程設計上特別受到關注。但地質作用不是僅發生在這個範圍內，斷層一般是從更深處的構造發育出來，流體向上移棲的現象也可能起因於更深處的過壓地層，這些造成沉積層變形或是物性改變的作用都是影響風場安全的要素。本文將風場範圍中各種地質作用分項，並說明其災害風險：



圖 5 臺灣海峽離岸風場分布範圍。咖啡色區塊為第二階段潛力場址，桃紅色區塊為第三階段開發潛能場址。（圖片截自地質與環境感知系統）

### 地質構造發育

臺灣西部有一構造前緣稱為「變形前緣」（圖 6），該構造線標示出造山帶擠壓應力環境的邊界，其東側為歐亞板塊與菲律賓海板塊聚合所造成的擠壓應力環境，地層多經過擠壓發育出逆衝斷層以及褶皺構造。臺灣西部的變形前緣大部分在陸上的山麓前緣，該構造線在新竹苗栗一帶向海域延伸<sup>[20-23]</sup>，使得部分苗栗、新竹外海的離岸風場處於擠壓應力環境，透過地球物理資料，可在這些地方辨識出逆衝斷層構造與褶皺構造（圖 6c）。斷層為地層錯動後的破碎帶，斷層活動為地震的主因、也會造成地表變形，而褶皺被為地層受擠壓而彎曲變形、力學性質改變，常向上抬升改變地勢，抬升的褶皺經過侵蝕會使較老的地層出露，風場中構造活動性以及地層的力學性質須經過精密的地質資料來評估。

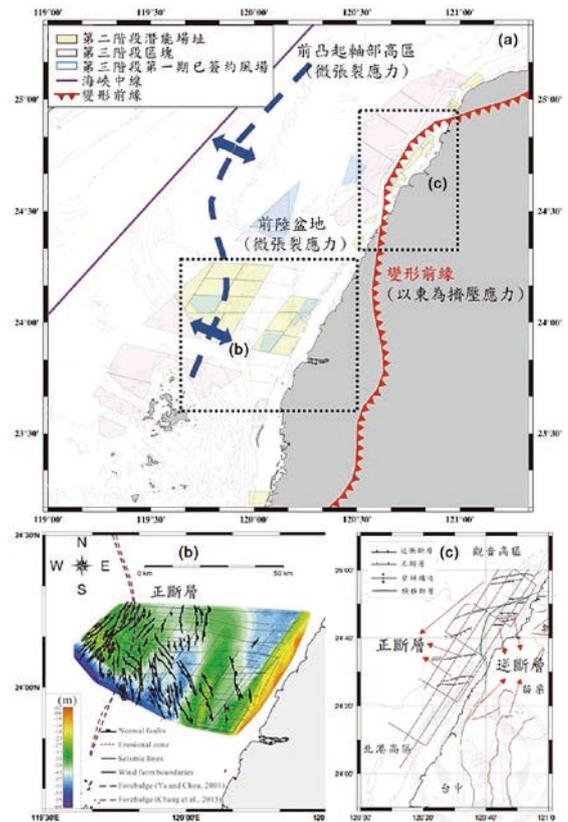


圖 6 (a) 台灣西部大地構造架構，紅色鋸齒線為變形前緣，劃分東側褶皺帶的擠壓應力環境與西側的前陸盆地微張裂應力環境；(b) 彰濱外海風場區域辨識出的正斷層特徵<sup>[25]</sup>；(c) 新竹、苗栗外海風場區域辨識出的構造有變形前緣以西的正斷層與變形前緣以東的逆斷層與褶皺發育<sup>[22]</sup>。

另一方面，變形前緣以西的地區大致上處於非擠壓應力環境，而是進到前陸盆地的討論範疇。臺灣造山帶重壓在歐亞大陸邊緣東側，因板塊撓曲而拱起的區域稱前凸起（forebulge）（圖 6），前凸起以東向造山帶下凹的空間便是前陸盆地主要的沉積空間<sup>[10,12]</sup>，填充了來自造山帶的沉積物。前陸的應力環境，是板塊或淺部沉積層撓曲的輕微拉張環境，容易伴隨正斷層發育。透過風場場址中的構造分布研究<sup>[24]</sup>（圖 6b），便能仔細繪製構造分布，若能搭配地層年代，更能討論這些斷層構造的活動性。一般來說，構造發育除了使地層受到破壞，產生地層、地表變形之外，斷層活動被視為天然地震的來源，但實際上在淺部發育的正斷層，年輕、鬆散的沉積層並沒有太高的強度與彈性在錯動時形成地震，因此臺灣海峽地地震分布圖（圖 7）中幾乎不見近地表淺層地震。

### 快速沉積物供應

臺灣海峽東邊鄰接活躍的臺灣造山帶，山脈抬升會使得地層不穩定，坡度改變加強河流的搬運力、侵蝕力，再加上地震、颱風及各種天氣條件引發山崩、

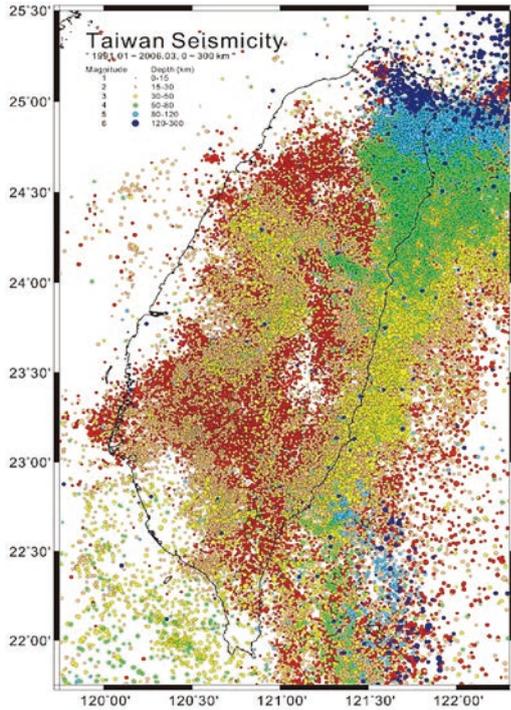


圖 7 台灣與鄰近地區的地震分布圖 (地震資料來源為台灣地震科學中心)

土石流、加劇了臺灣的侵蝕作用。河流系統匯集水流、具有搬運力、為陸域最重要的沉積物運輸通道，能將山區的砂石帶往平原。在颱風、暴雨後水流量大、搬運力強的時候，短時間將大量沉積物沖入海域，特別是近年極端事件 (extreme event) 頻繁發生，例如濁水溪在敏督利颱風後排入 72 百萬噸的沉積物，短時間內造成部分地區兩米的地形變化 (圖 8) [15]，而莫拉克颱風沖入深海的濁流對海底電纜造成破壞 [3,4] 等事件，未來離岸風場的海纜若需經過河口，將具有同樣的風險。

短時間大量的沉積物堆積於海床上，同樣可能使海域中充滿水的沉積物瞬間荷重而造成地層孔隙壓力過高 (過壓, overpressure)，而導致沉積物顆粒間失去有效應力，出現液化 (liquefaction)、流體化 (fluidization) 等行為 [26]，迫使沉積物變形洩壓，出現如液化構造、排水構造 (dewatering structure) 等特徵 [26,27] (圖 9)，此類型的沉積構造也稱為軟沉積物變形構造 (soft-sediment deformation structure)。由於這類型的沉積構造多為下伏沉積物向上攪入上覆沉積物中，常破壞沉積層的結構、造成沉積物物性在水平方向上的不連續或不規則分布。觀察到這些地質特徵的形成，代表沉積物已經過液化、洩壓，可能讓沉積物重新排列後變的更緊密，但也可能反映出該段地層相對容易發生液化作用，未來值得進一步探討。鄰近臺灣西海岸的風場有部分靠近河

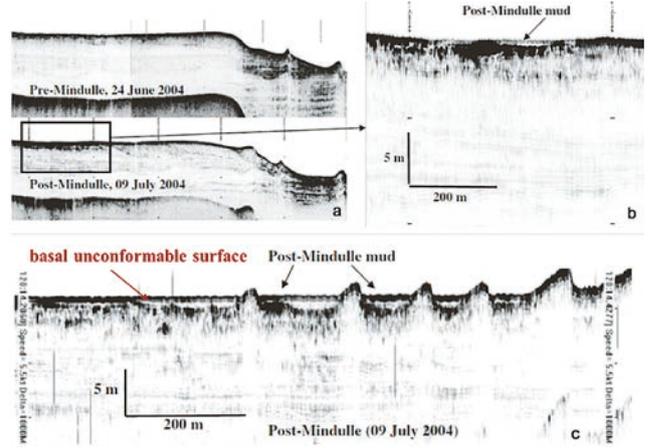
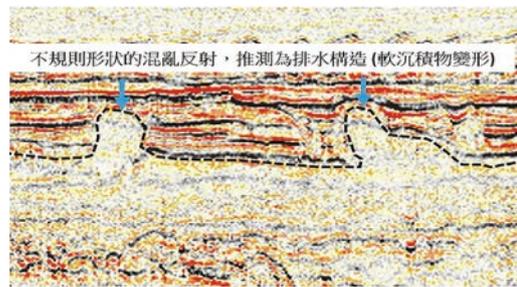


圖 8 敏督利颱風前後臺灣海峽沉積物及地形變化比較 (修改自 Milliman *et al.* [15])。由此底質剖面可觀察到颱風過後沉積物改變海峽原本的海底地形：(a) 為敏督利颱風前後同測線之淺部底質剖面資料；(b) 為放大 A 圖中敏督利颱風過後堆積的泥質沉積物；(c) 為敏督利颱風後大量沉積物堆積在颱風前的海床上。



Soft-sediment deformation structures	Driving force system	Trigger mechanism
<p>D</p> <p>Large-scale load-structures</p> <p>0.5 m</p>	Gravitationally unstable density gradient	Earthquake
<p>E</p> <p>Large-scale water escape structures</p> <p>1 m</p>	Vertical shear stress	Earthquake

圖 9 台灣海峽電火花震測剖面中觀察到向上突起的不規則形狀混亂反射特徵截斷上方水平連續反射地層 (上圖)，可能對比至下方表中的荷重構造 (load structure) 或排水構造 (water-escape structure) [28]。

口，當洪氾時沖入較大量的沉積物，地形便可能快速改變，也容易造成沉積物過壓或軟沉積物變形，過壓的沉積物同樣也可能在人為擾動時被觸發，例如風場施工時的敲擊或穿入，進而導致沉積物液化、洩壓、喪失強度，須謹慎評估。

### 動態海床地貌

除了上述的構造活動、沉積物注入會影響到海床的形貌之外，海床表面的沉積物受到海流不停的侵蝕、搬運、堆積，更容易形成極為動態的底形

(bedform) 變化。臺灣海峽的地形變化反映著海流流場的特性。大尺度來看，澎湖水道與烏坵凹陷的下凹地形是向北海流流場造成的侵蝕環境，而到雲林、彰化外海開始由於濁水溪供應的沉積物大量堆積，經過海流作用塑形成彰雲沙脊，彰雲沙脊具有南北向條帶狀沙體的特徵則反映南北向的潮流作用 [16,29-32]。

然而，較小尺度的觀察可見在彰雲沙脊頂部有大量沙波沉積構造發育 [29,33-36]，隨著臺灣海峽高流速的潮流，這些沙波變動性極高，常常在一天內就觀察到公尺級的變化量。研究這些沙波的動態需仰賴多次採集的高解析度地形資料。廖音瑄 [35] 針對濁水溪外海多次收集的高解析度水深資料進行沙波特徵與沙波移動的數值分析 (圖 10)，發現沙波的尺寸、波型、變化形式、移動速度與方向皆隨空間分布有所差異，70% 以上的沙波在兩年半內有超過 5 公尺的移動，最大移動量可達 95 公尺，最大高程變化達 6.7 公尺，這些都是風場工程無法忽視變動量，不論是基樁深度或是海纜路徑的規劃，需要謹慎評估；而針對單一沙波觀察，同一沙波可在兩個月後達到 10 公尺的移動量，但在兩

年半後總位移量公尺卻僅有 1 公尺，顯然臺灣海峽的流場複雜，沙波動態難以預測，各風場除了可能有各自沙波的形式與動態，頻率不足的地形觀測可能導致對沙波動態的誤判，唯有透過多次的高解析度地形觀測以及連續的流場資料進行分析、模擬才可能對於臺灣海峽的沙波動態有正確的掌握。

## 流體活動

海域地層中，沉積物間的孔隙本充滿水，然而地層的孔隙不僅會被水充填，自然界的各種化學、生物反應也會產生各種流體，例如火山氣體、熱液系統或石油天然氣系統等，臺灣西南海域的天然氣水合物賦集區域以及泥貫入體區域皆有出現大量的天然氣特徵 [37]，又或是臺灣東北外海沖繩海槽出現熱液及火山氣體的特徵，都是能產出流體的地質條件，世界各地相關研究也非常多。流體的活動是因密度差或壓力差造成，氣體、油密度低於水，在孔隙中遇到水自然會向淺處移棲；而聚集於緻密、低滲透性地層下方地層中的流體，由於不易向上滲漏，孔隙壓力逐漸累積，當地層開始過壓，壓力可能造成上覆地層被破壞，發生流體沿著破裂面或斷層向上移棲的現象，有時甚至形成深部流體向上移棲時固定的通道，如常見的氣煙囪、管狀特徵等。向上移棲的流體可能再次聚集於上方另一個緻密的地層下，也可能直接穿越海床進到海水層中。若這些流體、沉積物移動至海床，會在海床表面留下孔洞 (如麻坑) 或是沉積物堆 (如海底泥火山) 等地質特徵，甚至在水層中可觀察到氣泡柱或是被沖起的懸浮沉積物。

我們在臺灣海峽也有觀察到流體活動特徵，包括有淺層氣、垂直方向的流體通道、麻坑、氣柱等地質特徵 (圖 11)。臺灣海峽的流體可能的來自深部的盆地產出熱成熟油氣、火成活動 (如澎湖)、淺部的臺灣造山帶沉積物產出生物氣等等。聲學對於氣體的反應極為敏感，所以對於流體活動的掌握可以藉由大量的聲學資料來分析，例如透過震測剖面、海床底質剖面來了解地底流體的分布與移棲路徑，透過海床聲納調查以了解水層中是否出現流體滲漏，或是藉由精密的海床地形資料來判斷是否有流體洩漏的地形特徵 (圖 11)。曾湧翔 [38] 將濁水溪口震測剖面中觀察到的地層中流體特徵進行分類、解釋，其中有垂直向的流體通道、淺層的游離氣體富集帶等，藉由這些分析來了解淺部地層中的流體來源、移棲管道以及流體富集地層分布。對於風場工程來說，淺層氣雖然不會累積太大的壓力，不會導

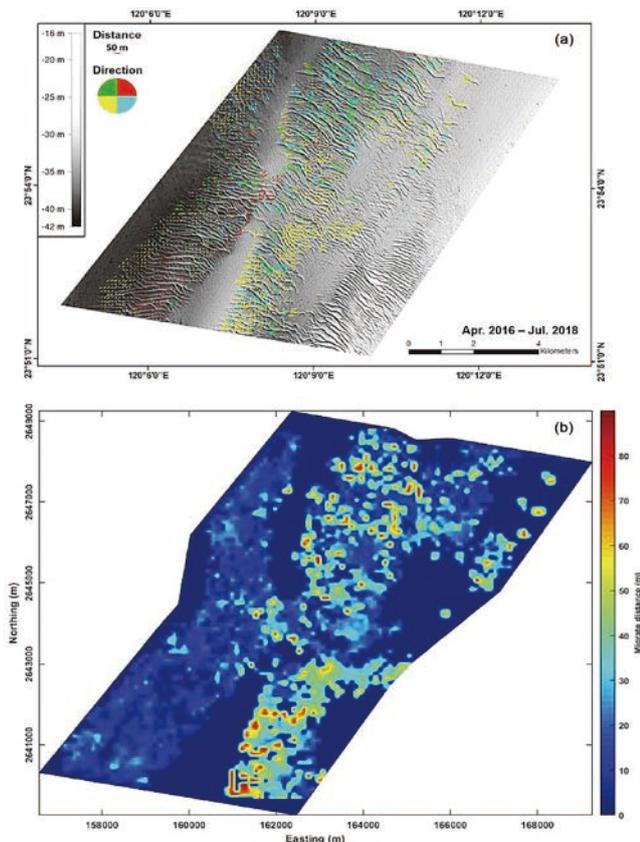


圖 10 三維海床地形數值分析結果 [34]：(a) 沙波三維移動圖，向量之長度可顯示其兩年半間之移動距離，而顏色則顯示其移動方向之差別；(b) 2016 年 4 月至 2018 年 7 月彰化外海沙波移動距離數值分析結果。

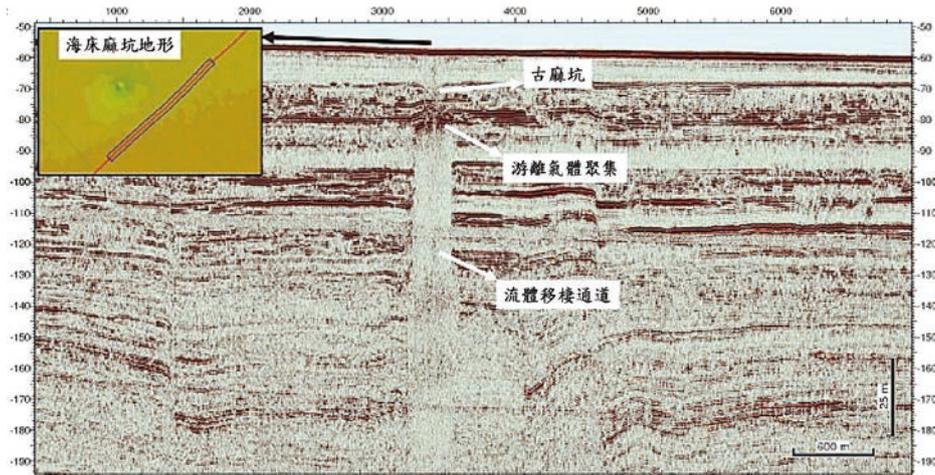


圖 11 台灣海峽電火花震測剖面中的流體特徵。左上角地形圖顯示該測線旁邊的海床上有麻坑特徵。

致如油氣田噴井的災難性危害，但富含流體的沉積層恐在人為觸發後洩壓而失去支撐力；而流體移棲管道大多是沿著地層中的裂隙發展，也可能持續有流體在這些通道間移棲，造成地層的擾動。而有流體活動特徵的地層是否可能指示其更深處的地層中有流體富集地層？短時間的大量沉積物堆疊是否可能再觸發這些流體活動？這些疑問應在風場規劃前詳細調查。

### 堅硬地層

臺灣海峽風場大多分布於前陸盆地的範圍，淺層多為年輕沉積物。然而，在風場範圍西側接近前陸盆地前凸起的區域，因前陸撓區而導致老的沉積岩基盤較淺。臺灣海峽南部的澎湖群島多為玄武岩質的火山島，因澎湖群島及鄰近區域位於前陸盆地前凸起的位置，並沒有在前陸盆地形成之後被深埋，在接近澎湖一帶的海床底下百公尺內，即發現有玄武岩體分布<sup>[39]</sup>。這些海床下的玄武岩與澎湖玄武岩是同一火成事件形成，在前陸盆地形成之前便存在，在臺灣海峽中可能有廣大的分布範圍（未發表資料）。這些在海床下淺部地層出現的玄武岩體雖然不會造成地質災害，但火成岩堅硬的質地可能會造成離岸風電工程作業上的困擾，在風場場址調查中需要能明確掌握其分布，但也因為玄武岩與周圍的沉積岩物理性質差異較大，透過震測資料便能將其三維空間分布辨識出來（圖 12）<sup>[40]</sup>。

### 離岸風電地質與環境感知系統服務平台

針對我國離岸風電發展所需的地質資訊，經濟部地質調查與礦業管理中心（原中央地質調查所，以下簡稱地礦中心）推動大型計畫，成立研究團隊在臺灣海峽離岸風場規劃區進行跨風場的全區域基礎地質調

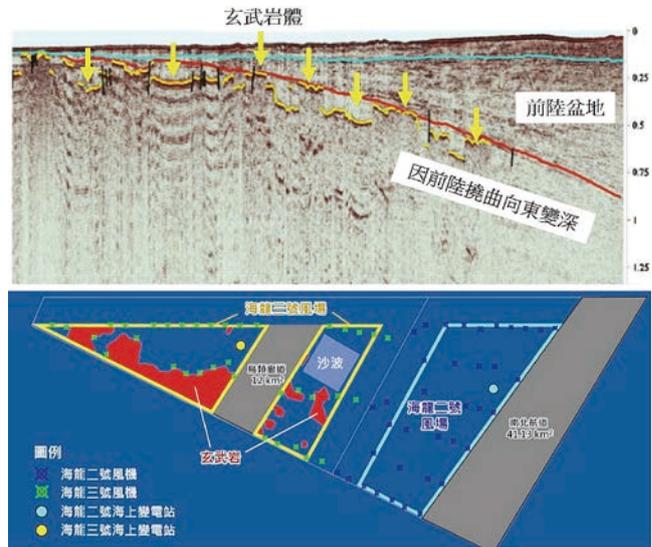


圖 12 澎湖北部的震測剖面以及風場範圍出現玄武岩分布。上圖顯示震測剖面中可辨識出的玄武岩分布，因前陸撓曲而向東有越來越深的趨勢。下圖顯示海龍風場中海床下 100 公尺以內遇到的玄武岩分布圖（節錄自環境資訊中心新聞稿 <https://e-info.org.tw/node/233912>）。

查，也同時建置「離岸風電地質與環境感知系統服務平台」（<https://windpower.geologycloud.tw/map>），整合各種尺度的地質及環境資料，並上網供各界查詢，除了有助於社會大眾了解臺灣海峽的風場地質知識，還可供廠商獲得政府公開的地質資訊，幫助風場規劃、提高開發效率與投資意願。

離岸風電地質與環境感知服務平台納入的地質資料包含沉積物岩心採樣資料、電火花震測資料、底拖聲納資料、多頻道反射震測資料，以及海床攝影等調查資料，除能了解資料分布之外，已公開的資料及分析成果可以直接在線上平台以 2 維或 3 維的方式展示（圖 13、圖 14）。做為地質資訊整合平台，系統中納



圖 13 地質與環境感知服務平台之 2 維資料展示，可快數將所需資訊套疊整合展示。圖中為風場區域疊上沙波分布與堅硬岩體分布後地展示。

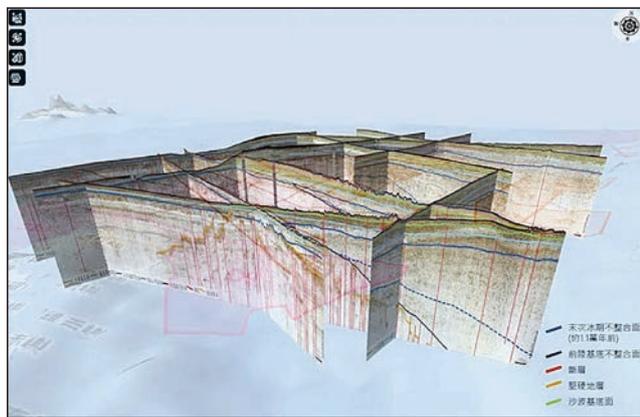


圖 14 地質與環境感知服務平台之 3 維資料展示，可以最直觀的方式呈現地質架構，並可展示各類型地質特徵在地下的分布情況。

入許多相關資訊圖層，可套疊展示出各項資訊相對的地理關係，圖層資訊包含管制區（如領海、演習區、縣市管轄範圍等）、經濟活動（如風場區塊、風場開發進度、海底電纜及管線分布、航道等）、環境保育（如保護區、重要棲地、魚礁區、汙染管制區、活動斷層、地質敏感區等）、地質調查資料（如地質與地球物理資料分布、海床影像、沙波、堅硬地層、水深等分析成果分布）、地質影響潛勢圖層則包括了地礦中心評估的沙波、堅硬地層、流體、斷層等地質特徵對於離岸風場的危險潛勢分布情況。使用者能藉此快速掌握各項公開資料與特定風場的地理位置關係、資料情況、地質特徵分布等，更能直觀的了解不同風場的地質特性與災害潛勢，操作時能將圖資直接下載使用，做為調查、研究、分析、規劃之參考，若想更進一步研究原始資料，也能向地礦中心提出申請（詳細辦法見「經濟部中央地質調查所離岸風電地質與環境感知系統服務平臺資料提供及使用作業要點」）<sup>[41]</sup>。

## 結論與展望

了解地質環境條件是發展離岸工程的基礎，本文從區域地質的角度切入，根據地質、地球物理資料的分析結果，提出臺灣海峽風場區域的地質作用以及潛在的災害風險。在離岸風場規劃區域主要可能發生的地質災害因子有正、逆斷層等構造發育，有快速沉積物供應能在短時間改變地形與造成液化活動，有強烈的海洋流場能造成動態的海床地貌變化，有地層中的流體活動會影響沉積層穩定性，另外還有可能影響工程規劃的淺部堅硬地層。每一項地質災害風險都有更多細節必須討論，本文僅統整過去觀測、分析結果，對臺灣海峽在風場場址可能潛在的地質災害進行簡要說明，盼有助於各界對臺灣海峽的地質作用有基本的認識。

如同文中提及，各別風場的關鍵地質問題須仰賴更多的觀察資料與更詳細的分析工作，研究結果能使我們對臺灣海峽的地質作用有更多的掌握，對地質風險有更進一步的潛勢評估。然而，各開發商擁有豐富的高解析度的地球物理資料以及工程地質資料、擁有各自的工程顧問，但這些資料大部分仍屬於商業機密，研究成果也未能公諸於世。為此，經濟部地礦中心或能扮演資訊統整的角色，除了做為政府提供地質資訊的窗口，也鼓勵各界與政府共享資料，明訂各界向政府申請原始資料的同時應提出回饋地礦中心的資料或成果，目標是能藉由更多的資料使臺灣海峽的地質資訊更加完善。正如同油氣探勘工業，離岸風電產業的發展勢必對於地質學的進展有所貢獻，開發商不妨在風場建置的同時，將資料提供給政府單位或學界來更進一步研究，或許能共同提升地質知識，也獲的未來風場運維時可參考的資訊。

## 參考資料

1. 4C Offshore (2014). "Global 23-Year Average Wind Speed Observation" report.
2. Goto, T. and Shibata, H. (2015). Changes in abundance and composition of anthropogenic marine debris on the continental slope off the Pacific coast of northern Japan, after the March 2011 Tohoku earthquake. *Marine pollution bulletin*, 95(1), 234-241.
3. Hsu, S.-K., J. Kuo, C.-L. Lo, C.-H. Tsai, W.-B. Doo, C.-Y. Ku, and J.-C. Sibuet, (2008). Turbidity currents, subma-rine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 767-772, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.767(PT).
4. Su, C.C., Tseng, J.Y., Hsu, H.H., Chiang, C.S., Yu, H.S., Lin, S., and Liu, J.T. (2012). Records of submarine natural hazards off SW Taiwan. *Geological Society, London, Special Publications*, 361(1), 41-60.
5. Kopp, H., Latino Chiocci, F., Berndt, C., Namik Ça atay, M., Ferreira,

- T., Juana Fortes, C., Gràcia, E., González Vega, A., Kopf, A., Sørensen, M.B. and Sultan, N. (2021). Marine geohazards: Safeguarding society and the Blue Economy from a hidden threat.
6. Camargo, J.M., Silva, M.V., Ferreira Júnior, A.V., and Araújo, T.C. (2019). Marine geohazards: A bibliometric-based review. *Geosciences*, **9**(2), 100.
  7. Teng, L., S., Wang, Y., Tang, C. H., Huang, C. Y., Huang, T. C., and Ke, A. (1991). Tectonic aspects of the Paleogene depositional basin of northern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, **34**(4), 313-336.
  8. Lin, A.T., Watts, A.B., and Hesselbo, S.P. (2003). Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Research*, **15**(4), 453-478.
  9. Covey, M. (1986). The Evolution of Foreland Basins to Steady State. Evidence from the Western Taiwan Foreland Basin, *Foreland Basins*, 77-90.
  10. Chou, Y.W. and Yu, H.S. (2002). Structural expressions of flexural extension in the arc-continent collisional foredeep of western Taiwan. *Geological Society of America Special Papers*, **358**, 1-12.
  11. Lin, A. and Watts, A. (2002). Origin of the West Taiwan basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, **107**, B9, ETG 2-1-ETG 2-19.
  12. Chang, J.H., Yu, H.S., Hsu, H.H., and Liu, C.S. (2012). Forebulge migration in late Cenozoic Western Taiwan foreland basin. *Tectonophysics*, **578**, 117-125.
  13. Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.-L., Willett, S. D., Hu, J.-C., Horng, M.-J., Chen, M.-C., and Stark, C.P. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, **426**(6967), 648-651.
  14. Huh, C.-A., H.-L. Lin, S. Lin, and Y.-W. Huang, (2009). Modern accumulation rates and a budget of sediment off the Gaoping (Kaoping) River, SW Taiwan: A tidal and flood dominated depositional environment around a submarine canyon. *J. Mar. Syst.*, **76**, 405-416, doi: 10.1016/j.jmarsys.2007.07.009.
  15. Milliman, J.D., Lin, S.W., Kao, S.J., Liu, J.P., Liu, C.S., Chiu, J.K., and Lin, Y.C. (2007). Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge. *Typhoon Mindulle, Taiwan, July 2004. Geology*, **35**(9), 779-782.
  16. Liu, J.P., Liu, C.S., Xu, K.H., Milliman, J.D., Chiu, J.K., Kao, S.J., and Lin, S.W. (2008). Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait. *Marine Geology*, **256**(1-4), 65-76.
  17. Jan, S., Wang, J., Chern, C.S., and Chao, S.Y. (2002). Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Systems*, **35**(3-4), 249-268.
  18. Wang, Y.H., Jan, S., and Wang, D.P., (2003). Transport through Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999-2001). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**, 195-201.
  19. Chang, J.H., Hsu, H.H., Su, C.C., Liu, C.S., Hung, H.T., and Chiu, S.D. (2015). Tectono-sedimentary control on modern sand deposition on the forebulge of the Western Taiwan Foreland Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **66**, 970-977.
  20. Huang, S.T., Chen, R.C., and Chi, W.R. (1993). Inversion tectonics and evolution of the northern Tainan Basin, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, **28**, 15-46.
  21. Yang, K.M., Huang, S.T., Wu, J.C., Ting, H.H., and Mei, W.W. (2006). Review and new insights on foreland tectonics in western Taiwan. *International Geology Review*, **48**(10), 910-941.
  22. 沈玟劭 (2008), 新竹外海構造研究, 國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文, 共 46 頁。
  23. 吳宜欣 (2017), 臺灣新竹外海淺層構造初探, 國立臺灣大學海洋研究所碩士論文, 共 83 頁。
  24. 謝欣崧、許鶴瀚、楊懿丞、盧翊維、陳姿婷、張日新、林哲銓、邱協棟、劉家瑄 (2018), 海洋地質及球物理調查於離岸風電場址評估之應用, 海洋及水下科技季刊, 第 42-47 頁。
  25. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2017), 離岸風場區塊開發海域環境建構計畫 (1/4), 經濟部能源科技研究發展計畫 106 年度執行報告。
  26. Owen, G., (1987). Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones, M.E., Preston, R.M.F. (Eds.), *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks. Geological Society Spec. Publ.*, **29**, 11-24.
  27. Lowe, D.R. (1975). Water escape structures in coarse grained sediments. *Sedimentology*, **22**(2), 157-204.
  28. Moretti, M., and Sabato, L. (2007). Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology*, **196**(1-4), 31-45.
  29. 廖宏儒 (2006), 彰雲潮流沙脊之形貌、沈積作用及演化模式, 國立臺灣大學理學院海洋研究所學位論文, 共 107 頁。
  30. Liao, H.R., Yu, H.S., and Su, C.C. (2008). Morphology and sedimentation of sand bodies in the tidal shelf sea of eastern Taiwan Strait. *Marine Geology*, **248**(3), 161-178.
  31. 邱瑞焜 (2009), 以海床回聲特徵探討台灣海峽及台灣西南海域之淺層沉積作用, 國立臺灣大學理學院海洋研究所博士論文, 共 136 頁。
  32. 邱瑞焜 (2000), 烏坵嶼附近海域的 3.5 千赫回聲型態及沈積作用, 國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文, 共 61 頁。
  33. Boggs Jr, S. (1974). Sand-wave fields in Taiwan Strait. *Geology*, **2**(5), 251-253.
  34. Liao, H.R. and Yu, H.S. (2005). Morphology, hydrodynamics and sediment characteristics of the Changyun sand ridge offshore western Taiwan. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **16**(3), 621.
  35. 廖音瑄 (2020), 中臺灣海峽近岸區沙波的遷移及演化, 國立臺灣大學理學院海洋研究所, 碩士論文, 共 138 頁。
  36. 楊懿丞、許鶴瀚、吳俊鼎、溫修敏、陳姿婷、連啟佳、洪瑋廷、劉家瑄 (2020), 地形與震測地層剖面分析於離岸風電場址調查之應用, 臺灣能源期刊, 第七卷, 第三期, 第 253-268 頁。
  37. Lin, L.-F., Liu, C.-S., Berndt, C., Hsu, H.-H., Wang, Y., and Chen, S.-C. (2022). Gas hydrate and fluid-related seismic indicators across the passive and active margins off SW Taiwan. *World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins*. Springer.
  38. 曾湧翔 (2021), 彰濱外海高解析度震測地層及流體特徵分析, 國立臺灣大學理學院海洋研究所, 碩士論文, 共 106 頁。
  39. 張頌平、林亮甫、Arif Mirza、劉家瑄、謝獻祥、許鶴瀚 (2021), 臺灣海峽玄武岩之震測特性初探。2021 地質地物年會暨學術研討會, 臺北, 11 月 22 ~ 24 日。
  40. 張頌平、許鶴瀚、張日新、劉家瑄、陳姿婷 (2023), 海域反射震測影像於鑽探場址調查之應用, 土木水利期刊, 第五十卷, 第二期, 第 42-44 頁。
  41. 經濟部中央地質調查所離岸風電地質與環境感知系統服務平臺資料提供及使用作業要點。 