

聆聽海洋聲景多樣性

林子皓

談到海洋聲音，很多人可能只對岸上的浪濤聲有印象，或是認為海底是一片寂靜的世界。這種誤解很大一部分源自於1956年Jacques Cousteau與Louis Malle合作的紀錄片—《寂靜的世界》（The Silent World）。在黑白影像為主流的時代，此紀錄片以炫目色彩讓世人看到潛水員的海底冒險。片中除了配樂外，水下的畫面僅有氣泡與機具的聲響，似乎在顯示寂靜就是海底世界的象徵。但隨著人們對海洋探索的熱情與研究驟增，那片深沉且寂靜的假象也逐漸被打破。

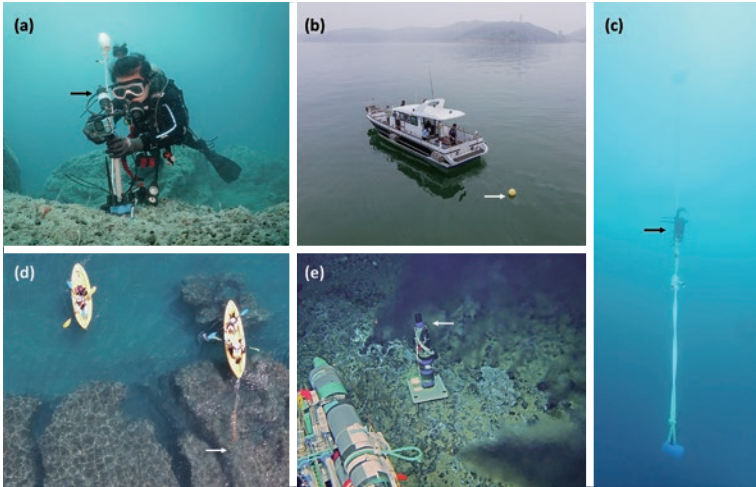
聲景：海洋的交響樂

若是有機會潛入海中仔細聆聽，就會發現海洋彷彿交響樂團一般，有許多動物都會發出聲響。例如：槍蝦在攻擊獵物或是抵禦掠食者時，會迅速開合大螯產生氣穴，製造高強度且寬頻的啪聲；鸚哥魚在啃食附生於珊瑚礁上的藻類時，齒板會刮磨硬基質而發出喀嚓聲；雀鯛在領地進行求偶展示時，則會振動魚鰾發出一連串低頻的咕嚕聲；繁殖季的雄性石首魚能夠快速震動魚鰾發出多脈衝且具有

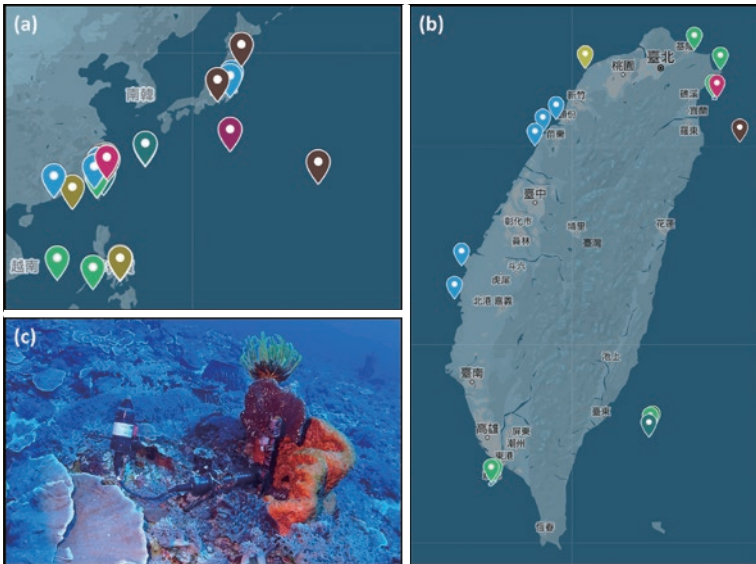
節奏的鼓聲，牠們在河口聚集形成魚群合唱。除此之外，海洋哺乳動物，像是在低緯度育幼區頻繁吟唱的雄性大翅鯨，也是知名的水下歌手。這些動物的聲音，和各種源自地殼活動、風浪、與降雨的自然聲音，以及人為活動（船隻聲納、引擎、海洋工程）所產生的噪音，在不同海域交織而成各式各樣的聲音景觀（Soundscape）。

海洋聲景多樣性

為了瞭解海洋聲景的變化特性並深入探索其背後的生態意義，世界各國的研究人員運用多種調查方式（圖一），像是在浮潛或潛水時攜帶水下攝錄影系統觀察海洋動物的發聲行為，用獨木舟、船隻、或是海洋浮標拖曳水下麥克風調查聲景在不同棲地之間的變化（Lin et al., 2023），甚至操控水下探測載具到深海佈置自動排程錄音機來觀測聲景的日夜與季節性趨勢（Chen et al., 2021）。在台灣，我們也與眾多國內外大學及研究機構合作，開展了《海洋生物多樣性聆聽計畫》，期望透過監測各種海洋生態系的聲景，協助海域生物多樣性調查工作，並探討氣候變遷和不斷增長的人為開發對海洋生態造成的潛在影響。直至2023年夏天，我們已在亞太地區建立多處長期監測站，從珊瑚礁、藻礁、河口、海底熱泉、大陸棚、及深海平原等海洋生態系蒐集了寶貴的錄音資料（圖二）。

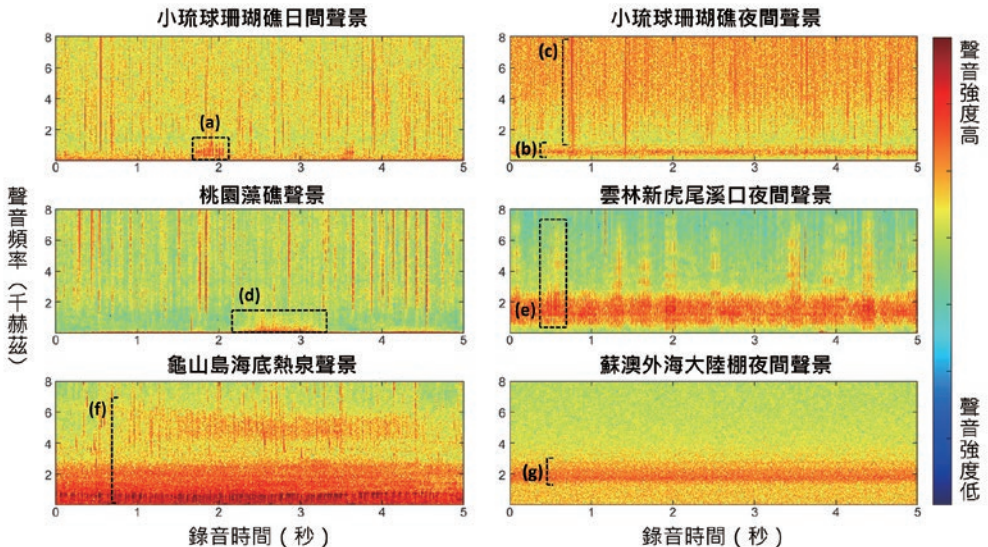


圖一、各種觀測海洋聲景的方法。(a) 潛水調查並佈置攝錄影器材於海床上、(b) 搭乘船隻至外海調查、(c) 裝載錄音機的浮標系統、(d) 以獨木舟拖曳水下麥克風進行調查、(e) 利用水下探測載具佈置深海錄音機。箭頭所指處為錄音機或是水下麥克風的位置。



圖二、《海洋生物多樣性聆聽計畫》的錄音地點。(a) 亞太地區主要包含日本、台灣、香港、與菲律賓等地。(b) 台灣周遭海域的長期監測點涵蓋了藻礁（黃色）、河口（藍色）、珊瑚礁（綠色）、海底熱泉（紅色）、與大陸棚（咖啡色）等海洋生態系統。(c) 綠島珊瑚礁海域的長期聲景監測站。

透過分析這些錄音資料，我們發現每一片海域都有它獨特的音律特性（圖三）。以台灣周遭海域為例，小琉球的珊瑚礁仿若一個熱鬧的音樂廳，聲景被大量的槍蝦啪聲佔據，但偶爾也會聽到一些雀鯛的咕嚕聲。隨著夜幕的降臨，槍蝦與珊瑚礁魚類的發聲更加活絡，直至清晨曙光才逐漸落幕。桃園的藻礁聲景與小琉球的珊瑚礁聲景相似，有數不清的槍蝦啪聲，但每當潮起潮落，浪濤聲就會盛大



圖三、從時頻譜圖觀察聲景的多樣性。時頻譜圖是一種視覺化呈現聲音強度（顏色）隨時間（橫軸）與頻率（縱軸）變化的分析方法，它被廣泛應用於聲音訊號分析，也可以協助研究人員了解各種海洋聲音的特性。框選的範圍表示各種不同的聲音：(a)珊瑚礁魚類聲音；(b)珊瑚礁魚類合唱；(c)槍蝦寬頻啪聲；(d)波浪聲；(e)石首魚聲音；(f)熱泉噴發聲；(g)深海魚類合唱。聲音可在下列網址聆聽：<https://sites.google.com/biodiv.sinica.edu.tw/oceansound>

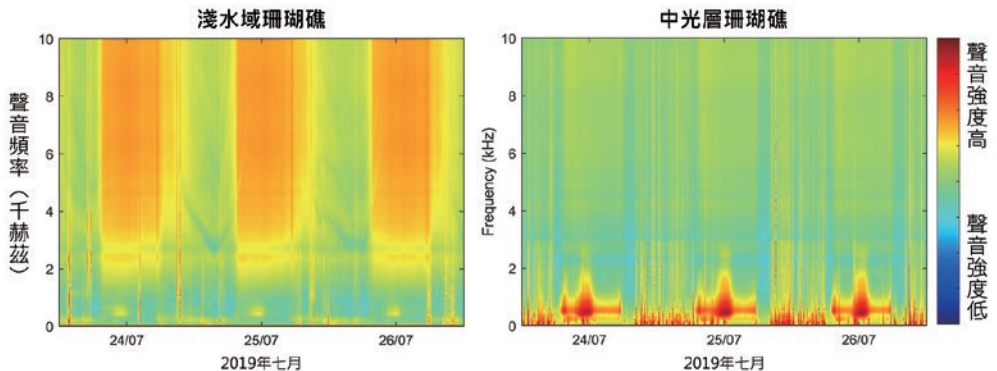
登場，反映了藻礁主要分布在淺水且易受到潮汐影響的環境特色。雲林新虎尾溪口則與珊瑚礁及藻礁差異甚大，白天時偶爾可以聽見三三兩兩的白海豚哨音，以及來往船隻發出的噪音。但是到了夜晚，石首魚開始集體合唱，並和不斷透過超音波回聲搜尋獵物的白海豚，演出一幕幕的聲音捉迷藏。在龜山島的海底熱泉，雖然沒有頻繁出現的動物聲音，但聲景卻充斥著一波又一波的熱液噴發和持續不斷的氣泡逸散聲，聽起來如同沸騰鍋爐一般。來到蘇澳外海的大陸棚，這裡的聲景相對安靜，鮮少聽到蝦槍啪聲，然而，每當春夏時節太陽落下之際，燈籠魚等深海魚類便發出低沉的聲響，搭配多種鯨豚的超音波回聲和哨叫聲，構築出一幅獨特的聲景。這些不同的聲景樣貌，就如同台灣周遭海域豐富的生態一樣，實實在在地展現海洋生態系的多樣性。

聆聽海洋生態系健康

隨著越來越多的聲景研究計畫在世界各地開展，聲景監測也逐漸被認為是一種遙測海洋生物多樣性的新興工具（Mooney et al., 2020）。傳統的海洋生態調查方法，如潛水目視觀查或生物採樣，容易受到能見度與海況限制。聲景可以彌補傳統調查方法的不足，透過排程錄音機進行自動監測，便能在夜間、颱風、及東北季風等難以進行海上作業的時間收集資料。此外，錄音設備一旦架設完成，就

可以在深海或離島等難以頻繁到達的海域進行長期監測，降低海域工作所需的人力。

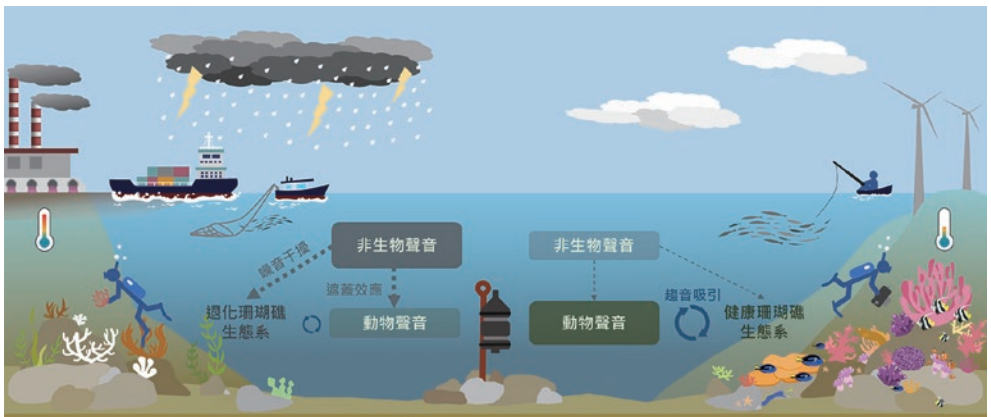
一般來說，一處海域如果充斥多種動物的聲音，往往意味著那裡有豐富的發聲動物群聚（Desiderà et al., 2019）。聲音變化的複雜度也與動物之間的行為互動有關，特別是在光線不易穿透的水下環境，許多海洋動物仰賴聲音進行溝通及繁殖，聲音甚至是覓食或躲避掠食者的訊息媒介。因此，分析動物聲音的豐富度與多樣性，可以協助研究人員了解生物群聚組成在棲地之間的差異，或是季節性的物候變化。以沖繩瀨底島的珊瑚礁為例（圖四），我們發現淺水水域的聲音以槍蝦啪聲為主，且一年四季相當穩定。而在更深的中光層水域，珊瑚礁聲景則以夜



圖四、沖繩瀨底島的珊瑚礁聲景。將三天的錄音資料轉成時頻譜圖之後，可以從圖上的周期性觀察到聲景的日夜變化趨勢，並從聲音能量分布看出淺水域和中光層珊瑚礁之間的差異。

間的魚類合唱為主，特別是在四至十月的溫暖季節（Lin et al., 2023）。雖然到目前為止我們還無法有效運用聲音來判別甲殼類與魚類的物種，但持續累積海洋聲景基礎資料，能夠讓我們在未來面對劇烈氣候與人為干擾時，運用大量聲學數據推測海洋生態的變化趨勢（Parsons et al., 2022）。

除了協助了解海洋生態變動，聲景也是維持健康海洋生態系的關鍵因子之一（圖五）。以珊瑚礁生態系為例，近期研究發現聲景在不同狀態的珊瑚礁之間有明顯差異。遭受到大規模珊瑚白化而劣化的珊瑚礁，其聲景較為安靜且單調。但健康的珊瑚礁則充滿豐富的動物聲音，就像喧嘩的城市吸引著遊客一般，這種吵雜的聲景會吸引周

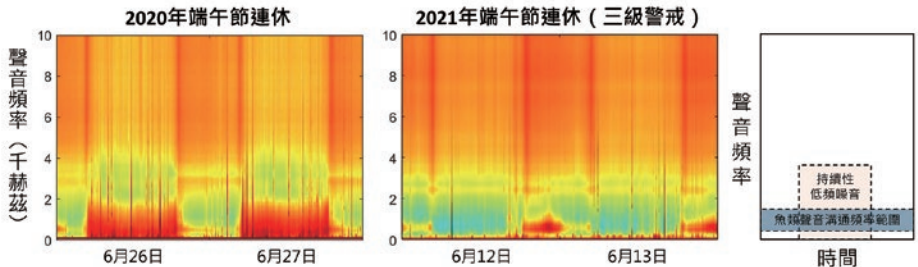


圖五、聆聽聲景瞭解珊瑚礁生態變化。健康珊瑚礁的聲景中有許多動物聲音，會正向吸引海洋生物，但在退化且受到人為干擾的珊瑚礁，動物聲音減少且噪音增加，這種劣化的聲景可能會降低珊瑚礁的生態韌性。

邊的海洋生物，包括造礁珊瑚、珊瑚礁魚類、與甲殼類的幼生，形成一種支持生物多樣性的正回饋機制，也是珊瑚礁生態系在面對環境擾動後能恢復活力的重要過程。令人擔憂的是，日益增加的人類活動，如觀光和海岸開發都可能產生高強度的水下噪音，而珊瑚礁的聲景也因此被頻繁遮蓋。這種噪音干擾可能會影響許多海洋動物的生理與行為，也可能會降低動物幼生透過聲景尋找健康棲地的機會，對生態韌性造成預料之外的衝擊。因此，調查各地海域的水下噪音現況，並了解噪音對於海洋生態系統的潛在干擾，這無疑是未來亟需關注的議題，也是完善海洋生態保育的關鍵工作之一。

從聲景了解海洋社會生態系統的變化

為了達到有效的海洋生態保育，深入探討與管理海洋社會生態系統是必須的。海洋聲景作為一個水下資訊平台，能幫助我們觀察與了解社會生態系統在時間軸的變化趨勢。以2020年為例，新冠疫情限制了國際旅行，國內許多地區的海域遊憩活動皆大幅增長。根據我們在基隆潮境海灣資源保育區的監測數據，大量休閒潛水活動造成保育區內的水下噪音明顯增高。但在2021年，台灣為了防範疫情擴大而進入三級警戒，在各項非必要的海域活動被限制下，不只水下噪音大幅減少，而且在保育區內竟然偵測到更豐富的魚類聲音（圖六）。這個案例顯示，聲景監測獲



圖六、潮境海灣資源保育區的聲景變化。雖然同樣都是端午節連休期間，但聲景在2020年與2021年之間有明顯改變，主要的原因是受到2020年大量的水域遊憩活動影響，特別是水肺潛水產生的氣泡噪音，導致頻率在2千赫茲以下的範圍在白天被大量噪音遮蓋，這種噪音汙染可能會降低魚類利用聲音溝通的效率。同樣的噪音干擾並未在2021年期間發生，相反地，豐富的魚類聲音在此時出現，這種反差的現象可能是三級警戒人為活動大幅下降的結果。

得的高解析度時序資料能夠幫助我們了解海洋動物應對人為干擾與環境變化的活動模式，並提供保育主管機關和權益關係人一個新的管理方向。

隨著人類活動的日與俱增，水下噪音已成為全球海洋生物的一大威脅。噪音不僅會影響海洋生物，也可能抹消我們在生態保育工作上的努力。因此，研究全球性與區域性人類社會發展對海洋聲景的影響，以及如何擬定策略保護聲景及其多樣性，對於海洋資源的永續發展非常重要。未來若是能夠建立一個更全面的聲景監測網路，這不僅可以促進海洋聲景的研究，也能提供社會大眾一個新的渠道了解台灣周遭的海洋環境與生態，更能以全面性的視角制定合適且即時的生態保育策略。我們堅信，當我們深入聆聽，永續海洋國家的目標便能更快速的達成。

參考文獻

1. Chen, C., Lin, T.-H., Watanabe, H. K., Akamatsu, T., & Kawagucci, S. (2021). Baseline soundscapes of deep-sea habitats reveal heterogeneity among ecosystems and sensitivity to anthropogenic impacts. *Limnology and Oceanography*, 66(10), 3714–3727.
2. Desiderà, E., Guidetti, P., Panzalis, P., Navone, A., Valentini-Poirrier, C., Boissery, P., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2019). Acoustic fish communities: Sound diversity of rocky habitats reflects fish species diversity. *Marine Ecology Progress Series*, 608, 183–197. <https://doi.org/10.3354/meps12812>
3. Lin, T.-H., Sinniger, F., Harii, S., & Akamatsu, T. (2023). Using soundscapes to assess changes in coral reef social-ecological systems. *Oceanography*, 36(Supplement 1), 20–27.
4. Mooney, T. A., Di Iorio, L., Lammers, M., Lin, T.-H., Nedelec, S. L., Parsons, M., Radford, C., Urban, E., & Stanley, J. (2020). Listening forward: Approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. *Royal Society Open Science*, 7(8), 201287.
5. Parsons, M. J. G., Lin, T.-H., Mooney, T. A., Erbe, C., Juanes, F., Lammers, M., Li, S., Linke, S., Looby, A.,

Nedelec, S. L., Van Opzeeland, I., Radford, C., Rice, A. N., Sayigh, L., Stanley, J., Urban, E., & Di Iorio, L. (2022). Sounding the call for a global library of underwater biological sounds. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 810156.

後記

豐富且多變的動物聲音，是大海想要傳遞給我們的訊息。聆聽聲音多樣性，保護海洋生態，我們才能在未來有機會聽到更豐富的海洋聲景。

作者簡介



林子皓

中央研究院生物多樣性研究中心助研究員，國立臺灣大學博士，專長為海洋生態、聲景生態學與生態資訊。調查範圍從台灣周遭的潮間帶到太平洋的深海平原，喜歡躺在獨木舟上靜靜聆聽海洋的聲音。