

# 2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180013  
參展科別 地球與環境科學  
作品名稱 基隆潮境海灣槍蝦聲響變化與環境關聯性分析  
得獎獎項 二等獎  
墨西哥-國際科學博覽會(ESI)代表

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學  
指導教師 林子皓、林郁梅  
作者姓名 葉欣綠

關鍵詞 槍蝦、海洋聲景、環境變因

## 作者簡介



我是葉欣綠，現為北一女科學班高三學生。我的興趣廣泛，最愛的是跳舞、彈鋼琴、跟找一家舒服的咖啡廳待上一個下午。我也熱愛學習新事物，喜歡探索自己不熟悉的領域——於是進行了一份海洋聲學研究。特別感謝林子皓老師、黃千分教授、林郁梅老師過去一年多以來的用心指導，我也期望能在這次的國際科展，讓大家更加認識海洋聲學領域，並與大家分享研究成果！

## 摘要

槍蝦閉合大螯所發出聲響為海洋珊瑚礁生態系中最主要的聲源，其聲音受多項環境因子影響，具有分析珊瑚礁生態系健康程度的可行性。本研究利用基隆潮境海域蒐集到的高時間密度採樣資料，嘗試分析槍蝦聲響在不同時間尺度下的變化與水溫、光度之關聯性，比較不同觀測期間與深度之資料，了解槍蝦聲響之特性。

研究結果顯示槍蝦聲響在長時間尺度下與水溫呈現高度正相關，且相同觀測期間、不同深度的兩筆資料變化趨勢相似；但相同深度、不同觀測期間的紀錄不僅變化趨勢與季節差異相關，整體數值也不同。槍蝦聲響每日亦具有規律的晝夜週期性變化，在清晨、黃昏出現高峰，白天期間與光度呈現負相關，夜晚期間與水溫高度正相關。最後，聲響峰值出現時間與日出日落時間最為相關，不同季節下之晝夜長短差異更造成顯著影響，不過仍會受水中實際接受到的光度影響。

## Abstract

Snapping shrimp is one of the most critical sound sources in the underwater coral reef soundscape. Its sound is affected by many environmental factors, and it is feasible to become one of the health metrics of the coral reef ecosystem. This study uses the high temporal density sampling data collected in Wan Hai Xiang Bay, Keelung, and tries to analyze the correlation between snapping shrimp sounds at different time scales and water temperature and irradiance. It also aims to compare the data recorded at different observation periods and depths to understand the snapping shrimp sound characteristics.

The results show that the snapping shrimp sound positively correlates with water temperature on a long-term scale. The changing trends of the two data collected at different depths are similar, whereas data from different observation periods display seasonal differences, and the overall value varies. The sound of snapping shrimp also exhibits a diurnal pattern with peaks in the early morning and evening, negatively correlates with irradiance during the day, and positively correlates with water temperature during the night. Lastly, the snapping shrimp sound peak that appears every dusk and dawn correlates the most with sunrise and sunset times, but it is still affected by the light received in the water.

# 壹、前言

## 一、研究動機

談及海洋中豐富的生物聲音，槍蝦便是海洋珊瑚礁生態系中最響亮的主角，日夜以一隻大螯不間斷地發出「喀噠喀噠」聲，在淺海中活躍生存著。槍蝦發聲具日夜週期性，發聲率會受到多項環境因子影響。有幸能夠取得基隆潮境淺海環境之採樣資料，不禁讓我好奇台灣東北海域的槍蝦聲音又會呈現出哪些性質？槍蝦聲音是否會受現場水溫、光度資料之細微變化影響？不同深度、觀測時長、觀測季節的槍蝦聲響與環境變因，又會有何差異？

聲景與生物聲音提供了另一個能夠認識海洋的面向，若能夠深入了解槍蝦聲響與環境之關聯性，未來也可能藉槍蝦聲響推測海洋生態環境之變化趨勢。

## 二、研究目的

- (一) 分析與比較基隆望海巷海灣槍蝦 SPL 值強度之**季節性變化**與環境變因之關係
- (二) 分析與比較槍蝦 SPL 值強度之**每日週期性變化**與環境變因之關係
- (三) 分析與比較槍蝦 SPL 峰值**出現時間**與環境變因之關係

# 貳、研究設備及器材

## 一、分析工具

- (一) Google Colaboratory
- (二) MATLAB R2021a
- (三) Microsoft Excel
- (四) Soundscape Viewer

此資訊工具組內含三種模組：長期時頻譜圖生成器、聲源分離、分析音檔聚類結構。生態研究人員能夠利用此聲景訊息擷取 (soundscape information retrieval) 的資訊工具協助，透過大量聲景資料了解生態系與棲地環境的動態變化。本研究使用此工具組，擷取槍蝦 SPL、光度、水溫、槍蝦發聲率等資料。

## (五) 觀測資料

### 1. 基隆潮境望海巷海灣錄音資料

此資料集為海洋保育署 110 年度臺灣海域重要生態系及海洋保護區調查與生態服務價值評估—自動偵測系統調查計畫，在基隆潮境海域所收集之海洋聲景資料。資料集中包含槍蝦 SPL、水溫、光度資料。



圖 1：基隆潮境海域自動錄音測站與陸地之相對位置。

### 2. 日出日落時間資料

「日出日落時間查詢」網站，位置取用基隆市中正區潮境公園，時間為 2021 年 7 月 30 日至 2021 年 8 月 18 日、2021 年 11 月 26 日至 2022 年 3 月 4 日。該網站利用日出方程式 (Sunrise Equation)，計算出各個經緯度的日出日落時間。

## 二、選用資料

研究將針對以下資料進行分析與比較：槍蝦 SPL 之中位數 (Median SPL)、槍蝦發聲率 (Snap rate)、水溫、光度，以下將說明這四種資料之定義與特性。

### (一) 槍蝦 SPL (Sound Pressure Level)

#### 1. 音壓位準 Sound Pressure Level (SPL)

定義：以對數衡量有效聲壓大小，單位為分貝 (dB)。

公式： $L_p (dB) = 20 \log \left( \frac{P}{P_0} \right)$ , dB re 1  $\mu$ Pa

$L_p$ : SPL 值、 $P$ : 方均根聲壓 ( $P_{rms}$ )、 $P_0$ : 1  $\mu$ Pa，聲壓參考值

## 2. 槍蝦 SPL 之統計表示

- (1) 數據處理形式：針對各類研究問題，選用不同統計量值表示槍蝦 SPL 的分佈。中位數 (median-based)：聲強出現機率為 50% 所對應之 SPL 值；呈現連續性聲強隨時間變化趨勢、資料具代表性；平均數 (mean-based)：將所有聲音能量平均；不連續性或間歇性資料、資料較混雜。
- (2) 資料呈現：圖 2 (A)、(B) 為分別取用 SPL 的 Median, Mean 統計值以分析二十天內的槍蝦 SPL 變化。由於槍蝦聲音為錄音資料中的主要聲源，更是一持續性聲音訊號，因此使用 Median-based SPL 資料相較於其他統計量值，更能清楚呈現其日夜週期性與趨勢。

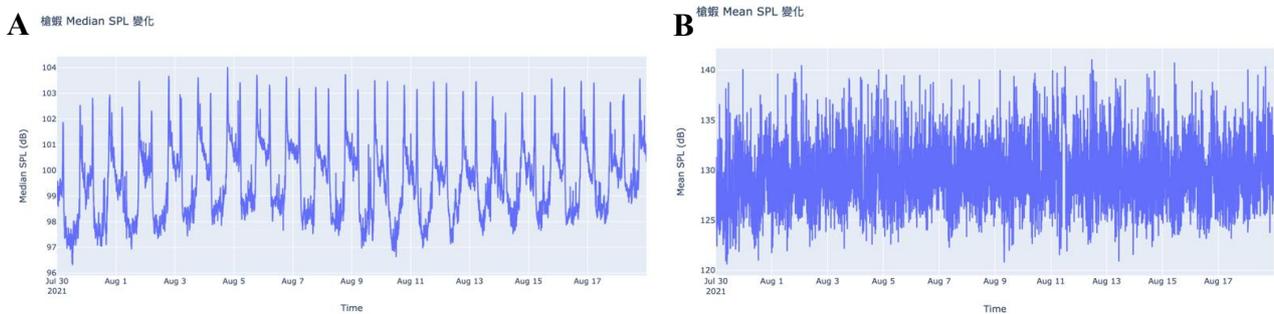


圖 2：不同統計值之 SPL 變化 (A) Median (B) Mean。

- (3) 資料性質：以下分析皆取用槍蝦的 Median SPL 表示槍蝦 SPL，進行數據處理，內文中將以「SPL」稱之。每五分鐘即有一筆數據，單位為 dB。

### (二) 槍蝦發聲率 (Snap rate)

程式中設定的 SPL 偵測閾值為 6 (prominence = 6)，即比前後高 6 dB 的聲波才是有效脈衝波。每一筆槍蝦發聲率即呈現五分鐘內有效的脈衝波數量，單位為 peaks。

### (三) 水溫、光度資料

每一分鐘即有一筆數據，水溫以 $^{\circ}\text{C}$ 為單位，光度以 lux 為單位。

### (四) 資料性質

在兩次觀測期間內 (2021/7/30 – 2021/8/18、2021/11/26 – 2022/3/4) 並非每一次都有完整資料，表 1 是基隆潮境測站的採樣資料概況。2021/11/26 – 2022/3/4 觀測期間，10 公尺深處並沒有下放光度、溫度計，而 27 公尺處水聽器故障，故沒有收集到 SPL 資料。

採樣深度	10 公尺		27 公尺	
項目	槍蝦 SPL	光度、水溫	槍蝦 SPL	光度、水溫
觀測期間				
2021/7/30 – 2021/8/18	✓	✓	✓ (記錄到 9/10)	✓
2021/11/26 – 2022/3/4	✓			✓

表 1：基隆潮境測站採樣資料概況。

## 參、 研究過程及方法

### 一、 文獻探討

槍蝦科，俗稱槍蝦、鼓蝦，是位在節肢動物門、軟甲綱底下的一科生物。槍蝦居於潮間帶至 20 公尺深的淺海岩石縫隙、石頭下砂礫中，棲地包括珊瑚礁、牡蠣礁、海綿腔 (Williams, 1984)。槍蝦身長不過數公分，但其螯的大小可以到達整個身長的一半。槍蝦的左右側各有一螯，兩螯大小相異，較大的螯能夠發出如槍聲般的巨大聲響。當槍蝦的大螯以每秒 20 公尺的速度瞬間闔上時，其兩片螯指間的水團被以每秒 30 公尺，如子彈一般快的速度射出去，釋放出一道空蝕氣泡 (Versluis et al., 2000)。如此快速的流體移動，在大螯前方形成了空蝕現象 (cavitation)。當氣泡遭受壓力高於臨界壓力，氣泡即崩解，而崩解時的聲響就是槍蝦所發出的「喀噠」聲。由於瞬間塌縮所產生的音波能量強大，它能震暈或殺死獵物，同時也是種內相互溝通的重要方式。槍蝦科一共 45 屬當中，槍蝦屬 (Alpheus) 和合鼓蝦屬 (Synalpheus) 會產生最強烈的空蝕聲音 (Johnson et al., 1947)。槍蝦產生的爆裂聲為寬頻，主要介於 2 kHz–20 kHz，若以 SPL (Sound Pressure Level) 度量聲音強度，大小可高達 190 dB re 1  $\mu$ Pa，是海洋中高強度之聲音。

槍蝦發聲率 (Snap rate) 與環境變因高度相關，包括海水溫度、光照時長等因子 (圖 4)。槍蝦發聲率具有強烈晝夜週期性，且在清晨、黃昏期間顯著增加。除了清晨、黃昏時間槍蝦聲音會出現明顯高峰值以外，其餘日、夜間的槍蝦聲響強度，在不同研究中出現相異結果。如 Lillis and Mooney (2018) 測量到日間的槍蝦發聲率高於夜間；Radford (2008a, 2014) 則得出夜間高於日間的結果。由於槍蝦與珊瑚礁環境緊密相關，槍蝦聲音更具有分析珊瑚礁生態系健康程度的可行性 (Bohnenstiehl et al., 2016; Lillis and Mooney, 2018)。

左右兩側的螯大小不對稱

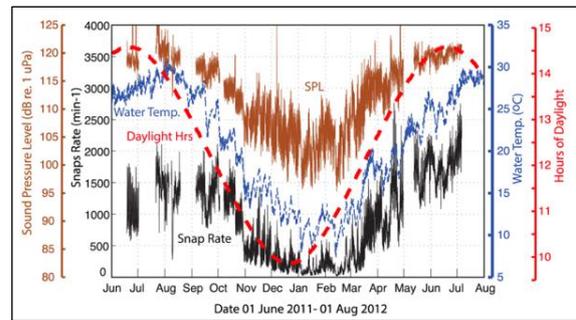
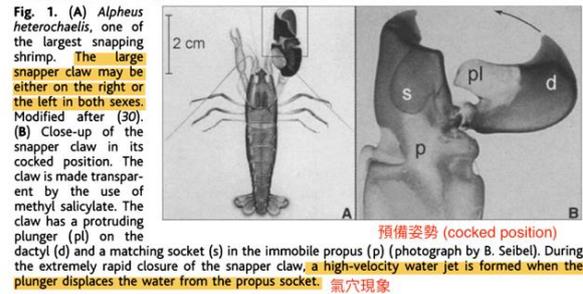


圖 3：槍蝦螯的結構與發聲原理 (Versluis et al., 2000)。

圖 4：槍蝦發聲率與水溫、日照時長、SPL 之關係 (Bohnenstiehl et al., 2016)。

## 二、分析流程

本研究有四項流程（如圖 3），針對每一項流程又有細部分析項目。

### （一）潮境測站所有資料

基隆潮境測站一共有四筆資料，分別在兩個觀測期間內取得：2021/7/30 – 2021/8/18、2021/11/26 – 2022/3/4。同一時段內分成 10 公尺、27 公尺兩深度，採集資料概況如表 1。

### （二）單次資料之統計性描述

首先利用槍蝦 SPL、槍蝦發聲率、光度、水溫的所有資料，得出二十天內的整體變化趨勢（以 7 – 8 月 10 公尺深處的資料為例）。接著進一步觀察：具日夜週期性資料的 24 小時平均變化趨勢；各項目資料的每日平均，並利用當地日出日落時間劃分白天與夜晚時間，計算出日間與夜間平均，分別觀察其變化趨勢；日落日出時間、槍蝦聲音高峯值出現時間、光度計出現與最後有數據的時間，欲探討三個項目間是否存在關聯性。

### （三）資料相關性分析

透過前述第一階段分析後，掌握各項資料之變化趨勢，接著探討光度、水溫、出現時間與槍蝦 SPL 的關聯性。

### （四）不同採樣期間、深度比較

探討槍蝦 SPL 與光度、水溫等環境變因，在不同採樣期間、深度之關聯性。

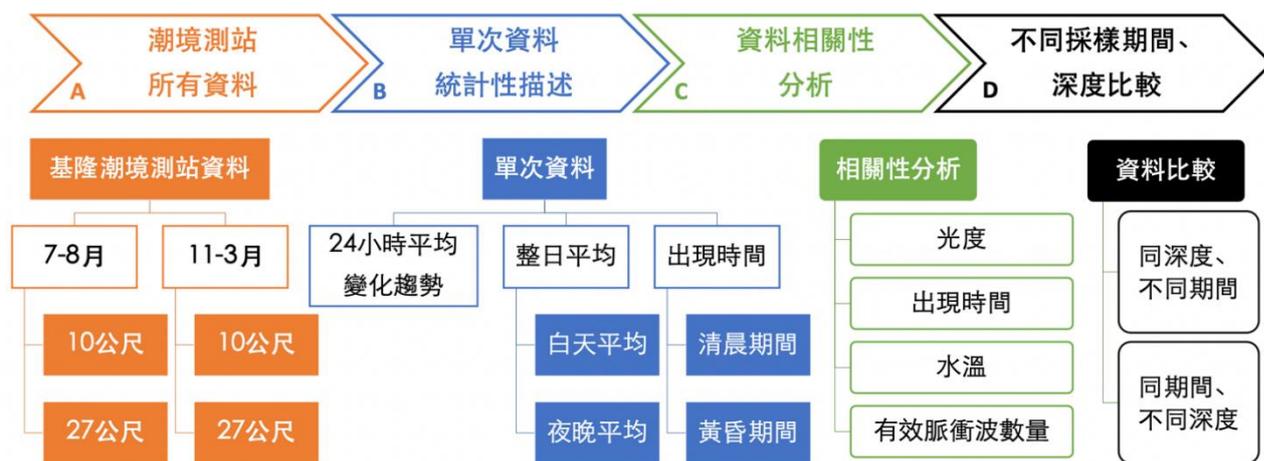


圖 5：研究流程。

## 肆、 研究結果

### 一、 槍蝦聲音資料概述

由於槍蝦產生的爆裂聲主要介於 2 kHz – 20 kHz 之間，因此前人研究中 (Bohnenstiehl et al., 2016; Lillis et al., 2018; Lee et al., 2021) 多從水聽器記錄到的高頻 SPL 聲音 (2 kHz – 20 kHz)，分析每分鐘槍蝦發出的脈衝波數，即槍蝦發聲率 (snap rate, number of snaps/min)，並以槍蝦發聲率代表槍蝦聲音資料，分析其與環境因子的相關性。本研究也嘗試計算基隆潮境望海巷海灣高頻 SPL 中的槍蝦發聲率，並分析兩者間的關聯性。

#### (一) 基隆潮境望海巷海灣之高頻 SPL 與槍蝦發聲率

由圖 6 可見，本研究的高頻 SPL 具有明顯的日夜週期性，每日在清晨與黃昏期間各出現一次高峰值，數值在 102 – 104 dB 之間。夜晚期間槍蝦 SPL 大部分在 99 – 101 dB 間，從日落至日出呈現遞減的趨勢。減少幅度最多高達約 2.5 dB，最少則是在 0.5 dB 之間搖擺不定。白天期間 SPL 大部分在 97 – 99 dB 間，從日出至日落呈現遞增的趨勢，但多數觀測日相較夜晚期間變化趨勢弱，變化幅度同樣介於 0.5 – 2.5 dB 間。

由於高頻 SPL 具有日夜週期性，因此將每個觀測日中同一時段的數據平均起來，繪製成 24 小時平均變化圖 (圖 5)，能夠更了解 SPL 在一天內的變化規律。由圖 7 可見，SPL 在清晨與黃昏期間出現兩高峰，黃昏高峰值比清晨高峰值高 0.5 dB，但皆與前後數據相差 2 – 3 dB。從開始急遽上升、下降回平均值約需 2 小時。白天期間緩慢遞增，數值落在 98 – 99 dB 間；夜晚期間逐漸遞減，約在 100 – 101 dB 之間。

而由圖 8 可見，本研究的槍蝦發聲率週期性不如高頻 SPL 明顯，且數值變化較大，在清晨與黃昏期間突然驟降，出現極小值。白天期間槍蝦發聲率約落在 7000–8000 peaks，且在每日 12:00–13:00 達到最高峰。夜晚期間槍蝦發聲率約落在 5000–7000 peaks，變動幅度相較白天期間大，有時會降到 4000 peaks 以下。

槍蝦發聲率的 24 小時平均變化（圖 9）則顯示其在清晨與黃昏期間會出現兩低峰，清晨低峰值較黃昏低峰值少約 150 個 peaks。從開始急遽下降、上升回平均值約需 2 小時。白天期間落在 6500–7300 個 peaks，12:00–13:00 的數值最高；夜晚期間落在 5800–6500 個 peaks。

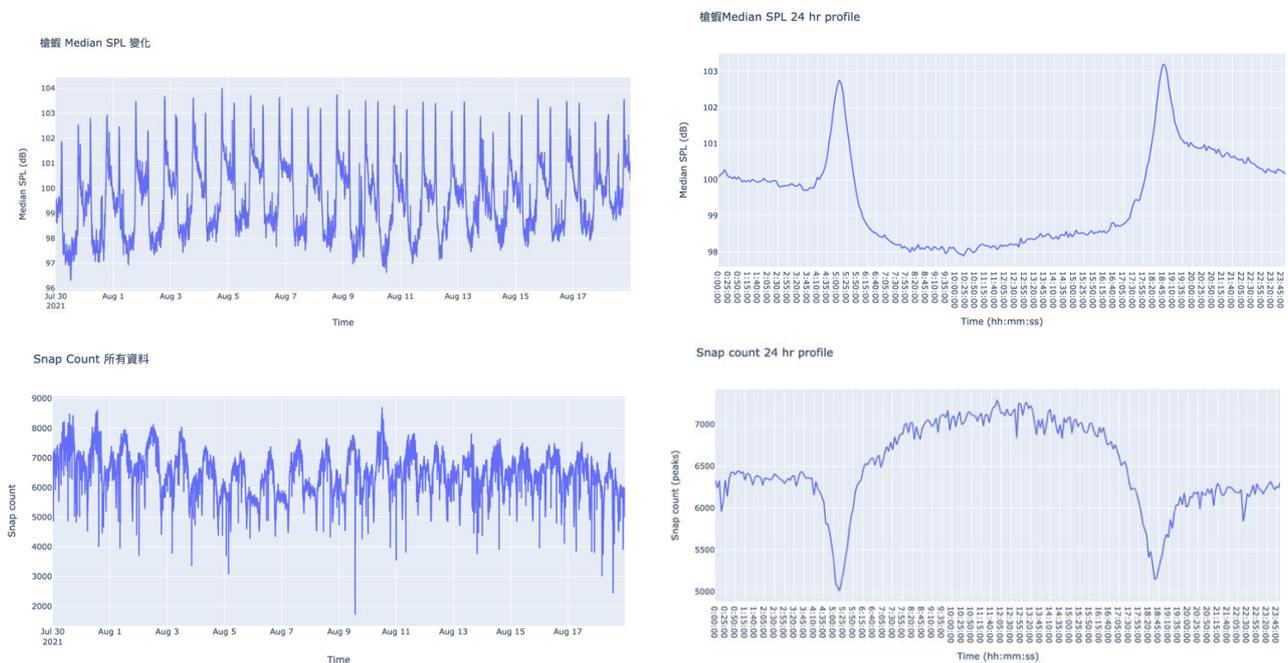


圖 6（左上）：SPL 整體變化。

圖 7（右上）：SPL 之 24 小時平均變化。

圖 8（左下）：槍蝦發聲率整體變化。

圖 9（右下）：槍蝦發聲率之 24 小時平均變化。

## （二）高頻 SPL 與槍蝦發聲率之關係

本研究的高頻 SPL 與槍蝦發聲率整體的相關係數  $r = -0.8066$ （5760 筆資料），呈現高度負相關（圖 10）；兩者的 24 小時平均變化趨勢相關係數  $r = -0.9379$ （288 筆資料），負相關性更高（圖 11）。由於本研究定義一個「有效」脈衝波需要比前後聲波強度高出 6 dB，因此當 SPL 整體強度增加、整體背景聲音強度較大的時候，可能產生掩蔽效應 (masking effect)，難以辨別單一脈衝波，造成總數減少。

依據本研究所定義的有效脈衝波，計算出來的槍蝦發聲率反應出整體聲音的稀疏性，而非發出聲響的槍蝦數量。因此在接續的分析中，仍以高頻 SPL 代表槍蝦聲音資料。

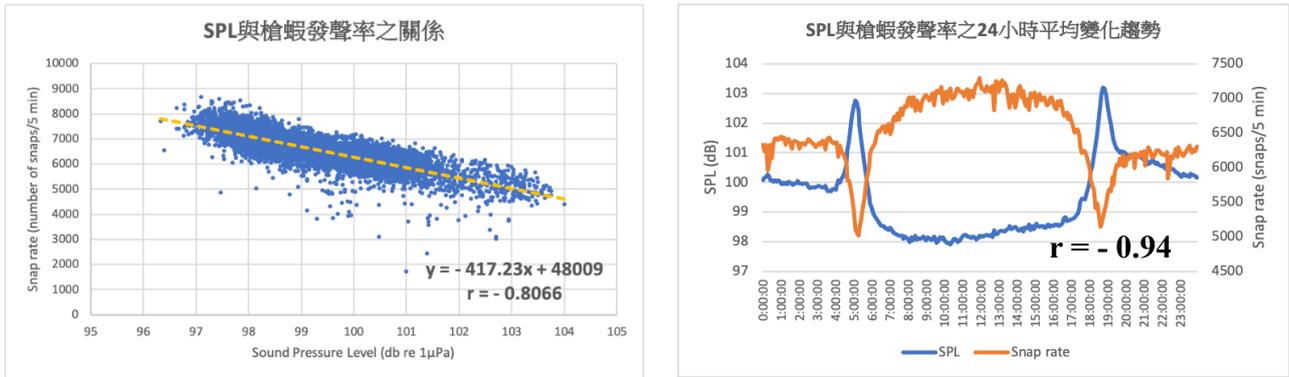


圖 10：SPL 與槍蝦發聲率整體資料散佈圖。圖 11：SPL 與槍蝦發聲率 24 小時平均變化疊圖。

## 二、槍蝦 SPL 值季節性變化

本研究一共有三筆基隆潮境望海巷海灣的觀測資料，分別為 2021/7/30 – 2021/8/18 10 公尺處（圖 12）、2021/7/30 – 2021/9/10 27 公尺處（圖 13）、2021/11/26 – 2022/3/4 10 公尺處（圖 14）。圖 12 – 14 A 以折線圖方式呈現所有 SPL 值資料，能夠觀察到 SPL 值不僅每天具有週期性起伏變化，且整體 SPL 值具有一個大尺度的變化趨勢。7 – 8 月份 10 公尺 SPL 值整體起伏像是正弦函數的一個週期，自 7/30 不斷增加，在 8/7 達到最大值後漸減，8/11 達到最小值後，數值又逐漸攀升（圖 12 A）。7 – 9 月份 27 公尺 SPL 值前 20 天的變化與圖 12 A 相似，而 8/20 以後，SPL 值仍具有一些起伏，但整體 SPL 值逐漸下降（圖 13 A）。11 – 3 月份 10 公尺共有長達 97 天的觀測資料，整體 SPL 值自 11 月底開始不斷下降，直到 1/23 降到最小值後又回升；不過若以每 15 天為一時間段落觀察，可以發現 SPL 值除了具有最大尺度下的變化趨勢，還是會有區域性漸增、漸減的變化情形（圖 14 A）。

若將 SPL 值資料轉化成矩陣色塊圖（圖 12 – 14 B），即使用不同顏色標示 SPL 數值大小，並將每日 288 筆 SPL 值資料，依時間順序由下到上排成一行，再依照日期順序將每行資料由左到右排列而成。另外，圖 12 – 14 B 的變化範圍統一設定為 14 dB，使得每張圖的顏色深淺變化所代表的數值差異皆相同。

圖 12-14 B 皆出現兩條黃色細長帶狀，即為 SPL 值在每天清晨、黃昏的峰值，且白天期間 SPL 值大多呈現藍色、夜晚期間則是淺綠色為主，意即夜晚槍蝦聲響大於白天槍蝦聲響。7-8 月份 10 公尺 SPL 值在二十天內每日變化情形相似，且清晨、黃昏峰值出現時間固定（圖 12 B）。7-9 月份 27 公尺 SPL 值（圖 13 B）隨著日期增加，每天黃昏到達峰值的時間也逐漸提早，推測應該是與日落時間提早相關。11-3 月份 10 公尺 SPL 值變化（圖 14 B），11-12 月期間峰值較明顯，1-2 月整體 SPL 值下降，仍可看到每天峰值出現，但較不明顯。2 月底至 3 月初，大約 14 天，每日出現峰值時間呈現階梯形遞減，而非固定在清晨、黃昏期間出現，槍蝦作息像是被打亂。推測應是因為當時水聽器自動排程出現狀況，無法進行正常聲音錄製，才會每日造成每日規律遞減的情形。整體來看，11-3 月份清晨、黃昏兩峰值的線條開口逐漸增大，反映出晝長增加的現象。

經由矩陣色塊的方式圖像化後，不僅能更清楚看見每日峰值出現時間在不同時間尺度下的變化，透過顏色差異，更容易判斷 SPL 數值大小變化。

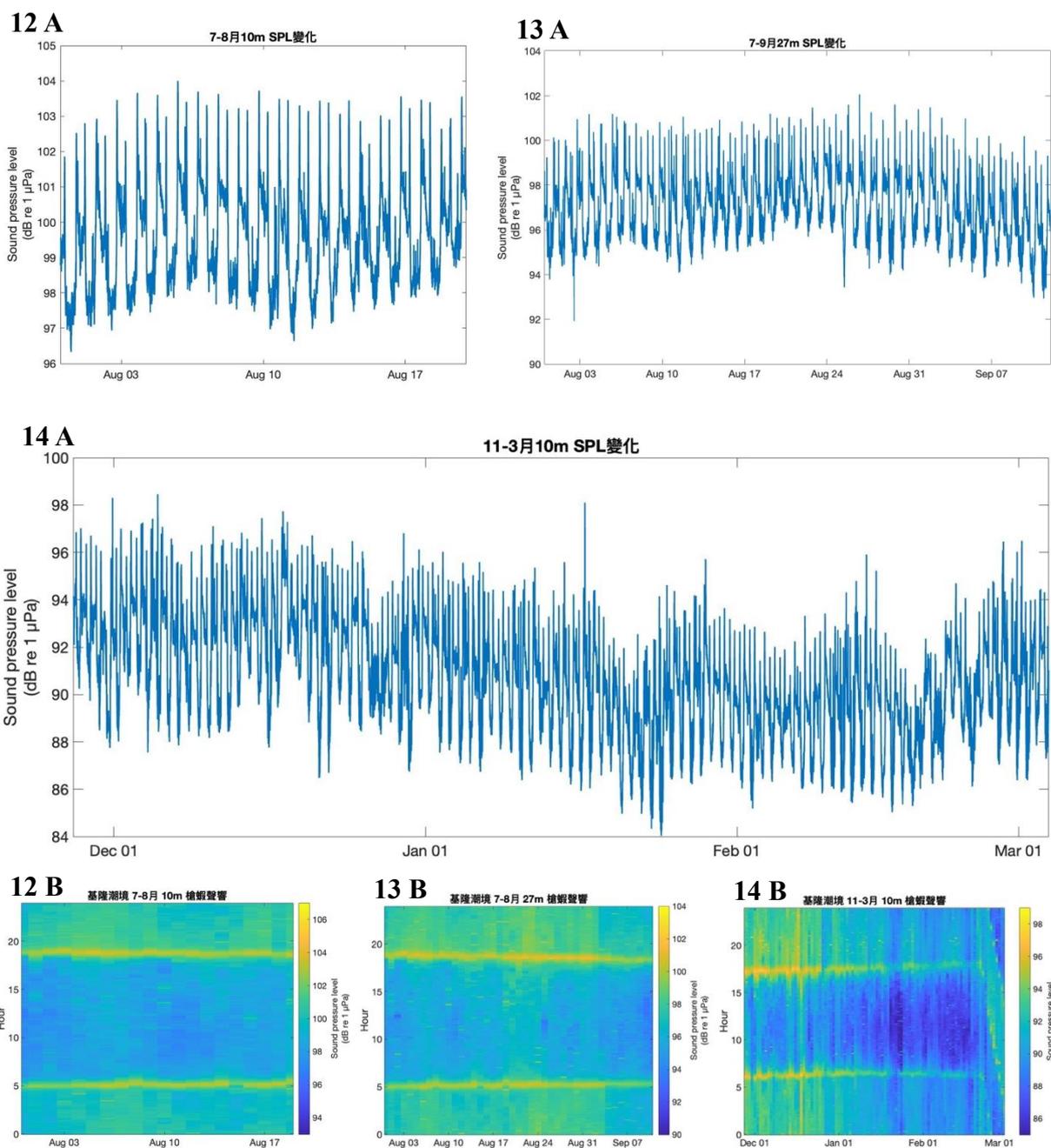


圖 12：2021/07/30 – 2021/08/18 (20 天) 10 公尺處 SPL 變化 (A) 折線圖 (B) 矩陣色塊圖。

圖 13：2021/07/30 – 2021/09/10 (42 天) 27 公尺處 SPL 變化 (A) 折線圖 (B) 矩陣色塊圖。

圖 14：2021/11/26 – 2022/03/04 (97 天) 10 公尺處 SPL 變化 (A) 折線圖 (B) 矩陣色塊圖。

(一) 相同觀測期間、不同深度之 SPL 數值差異

在本研究三筆基隆潮境望海巷海灣的觀測資料中，2021/07/30 – 2021/08/18 期間具有 10 公尺、27 公尺兩種深度的資料，因此便能夠進行在相同觀測期間內、不同深度之 SPL 數值差異分析。

繪製並疊合 10 公尺、27 公尺處的 24 小時平均變化趨勢（圖 15 A），可以發現兩筆資料的變化趨勢幾乎重疊，288 筆資料間的相關係數更高達 0.9968。分析未經平均處理的原始資料，20 天共 5760 筆資料的相關係數仍高達 0.9781，反映出 10 公尺、27 公尺資料的高度正相關性。使用同一座標軸時，27 公尺資料整體較 10 公尺資料低 2 分貝，且在加入資料的誤差線（error bar）之後，10 公尺與 27 公尺的資料仍舊幾乎沒有重疊之處（圖 15 B）。

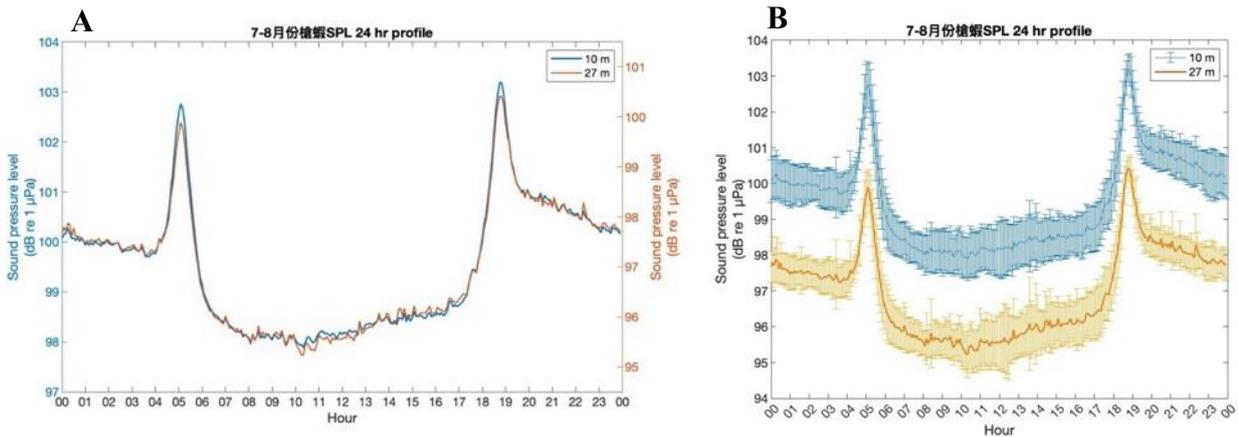


圖 15：7-8 月 10 m 與 27 m SPL 24 小時平均變化 (A) 雙座標軸 (B) 含誤差線。

## (二) 不同觀測期間、相同深度之 SPL 數值差異

在本研究三筆基隆潮境望海巷海灣的觀測資料中，2021/07/30 – 2021/08/18、2021/11/26 – 2022/03/04 皆具有 10 公尺 SPL 資料，尤其觀測期間落在不同季節，因此能夠分析在不同觀測期間內、相同深度之 SPL 數值差異。

繪製並疊合 7-8、11-3 月份的 24 小時平均變化趨勢（圖 16 A），可以發現兩資料清晨、黃昏峰值之間「谷」的大小明顯不同，反映出相異季節、晝夜長短不同的現象：在 7-8 月間觀測，晝長夜短；11-3 月間觀測，晝縮短夜加長。11-3 月資料白天與夜晚之間的 SPL 落差也大於 7-8 月資料，11-3 月的兩峰值與夜晚差距變小、與白天差距加大。使用相同縱座標軸並新增誤差線（圖 16 B），可以發現 11-3 月資料整體較 7-8 月資料低 10 分貝，且兩筆資料誤差線寬度相差甚大。推測由於 7-8 月 10 公尺資料只有觀察 20 天，11-3 月資料則是涵蓋 97 天，造成 11-3 月的標準差平均值為 1.8443，高於 7-8 月資料的標準差平均值 0.5954 超過三倍。觀察期間較長、標準差較大的現象也

反映出槍蝦聲響 SPL 的確隨著長時間逐漸變化，整體數值在 11 – 1 月遞減，2 月開始逐漸攀升，同圖 14 A 的結果。

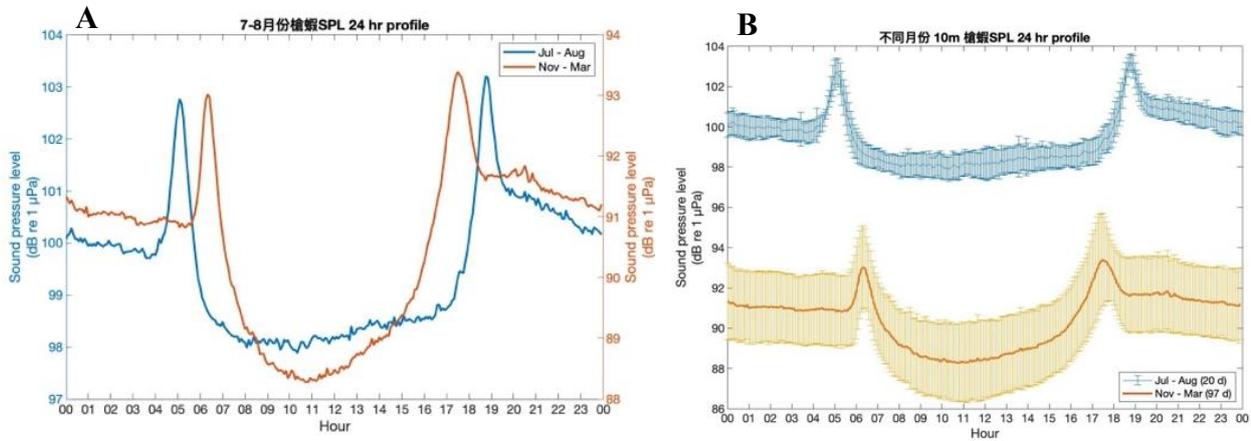


圖 16：7 – 8 與 11 – 3 月 10 m 槍蝦 SPL 24 小時平均變化 (A) 雙座標軸 (B) 含誤差線。

### (三) SPL 值與環境變因之關係

SPL 值不僅每天具有週期性起伏變化，且整體 SPL 值具有一個大尺度的變化趨勢，於是接續分析大尺度下 SPL 值與水溫、光度之關聯性。綜合 11 – 3 月 SPL、水溫、光度資料於同一圖表中，能夠清楚看見三項資料之間的相關性。圖 17 是由所有資料繪製而成，一天由 288 筆資料組成，一共有 97 天，資料相當密集；圖 18 則是將每天資料平均成一筆數據繪製而成。由下圖可見 SPL 與水溫整體變化幅度相似，在整日平均當中更能夠看見兩線條的相似性。相對而言，SPL 與光度線條看似較沒有關聯性，槍蝦聲響在二月底時突然漸增，但三月初又下降，不過光度則是在三月初才漸強。

計算 SPL 分別與水溫、光度在整體資料以及每日平均的相關係數後，將結果紀錄於表 2 當中。故可知，SPL 與水溫呈現正相關，又以整日平均資料的正相關性最高；光度的相關係數則是極低。

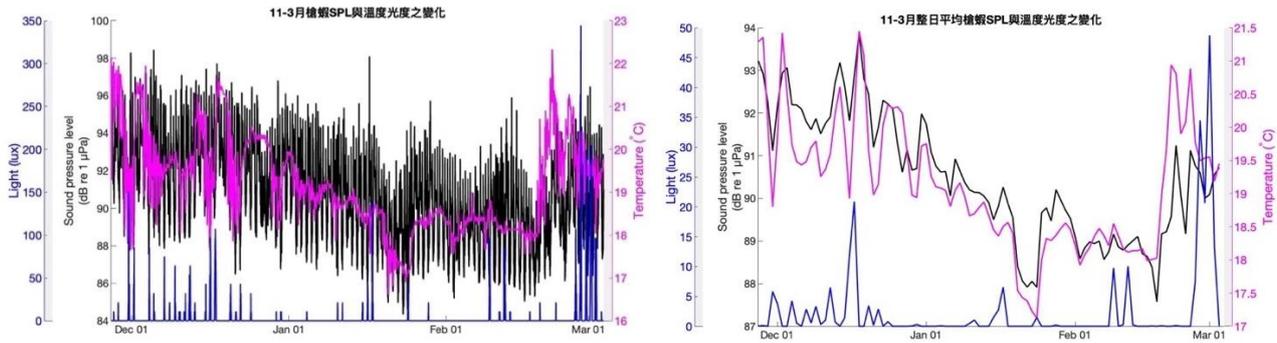


圖 17 (左上)：11-3 月 SPL 與水溫光度之整體變化。

圖 18 (右上)：11-3 月 SPL 與水溫光度之每日平均。

表 2 (左下)：11-3 月 SPL 與水溫光度相關係數。

	整體變化	每日平均
水溫	0.5306	0.8348
光度	0.0020	0.0580

由表 2 可見，11-3 月份的 SPL 與水溫呈現正相關，不過以所有資料 (27936 筆) 進行相關性分析，相關係數為 0.53；以每日平均 (97 筆) 進行相關性分析，相關係數為 0.84。因此，接著要分析在不同移動平均範圍下的槍蝦 SPL 值與水溫相關性，了解在哪個尺度下，SPL 值變化趨勢與水溫最高度相關。

由於槍蝦資料每五分鐘即有一筆，一天共 288 筆，因此「一天移動平均」即為該筆資料的前後 144 筆資料，共 289 筆資料的平均值。將原本 SPL 值全數取完移動平均值後，再計算與水溫的相關係數。

結果顯示，經不同移動平均範圍處理後的 SPL 值與水溫之相關係數落在 0.68 - 0.79 此範圍內，呈現高度正相關。最高點的數值為「一天移動平均」，即每筆資料與前後 144 筆資料平均的情況，其相關係數高達 0.7802 (圖 19)。圖 20 便呈現經一天移動平均處理的 SPL 值與水溫變化的折線圖。SPL 值經由移動平均處理後，其每天日夜週期變化便淡化，更能清楚看見 SPL 值在較大時間尺度下的變化趨勢，也與水溫線條變化相似。

將原 SPL 值減去一天移動平均 SPL 值便能夠得到相較之下「不受水溫變化影響」的 SPL 值。分別取相減後的 SPL 值、原 SPL 值的 24 小時平均變化，繪製成圖 21，發現兩線條大部分重疊，尤其是在清晨、黃昏峰值變化的部分。不過其餘在白天、夜晚期間，減去後的 SPL 值，也就是較不受水溫變化影響的 SPL 值皆比原 SPL 值高。故可知槍蝦 SPL 值的峰值變化較不受水溫影響，水溫主要影響白天、夜晚期間較弱的 SPL 值。

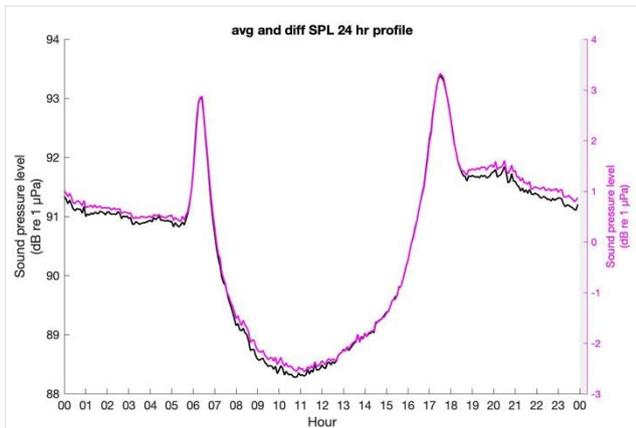
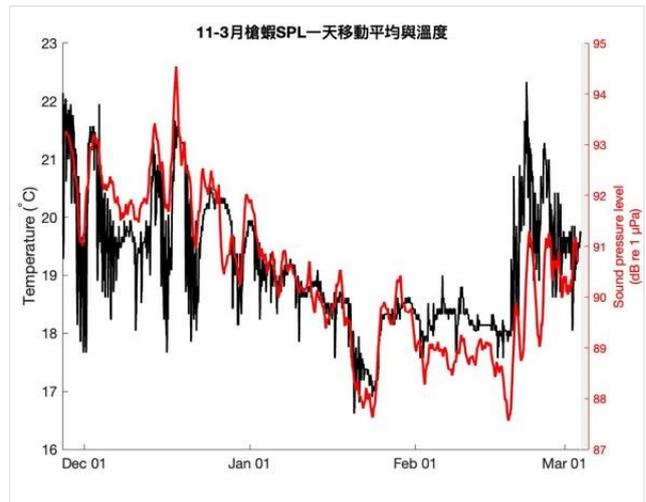
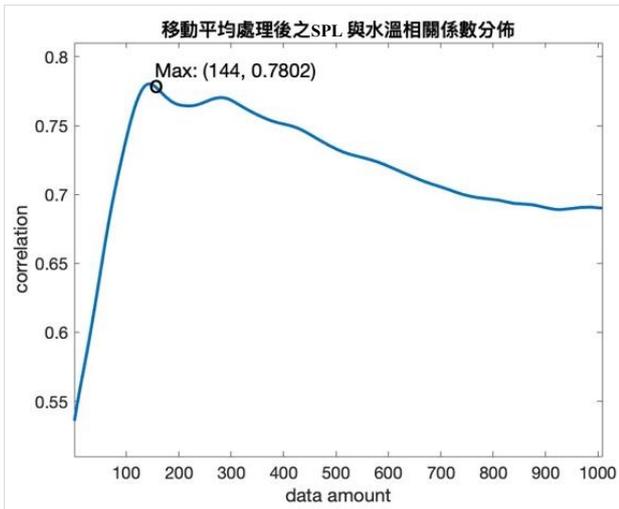


圖 19 (左上)：

不同移動平均範圍 SPL 與水溫的相關係數。

圖 20 (右上)：

一天移動平均之槍蝦 SPL 與水溫變化。

圖 21 (左下)：

不同資料型態 SPL 值 24 小時平均變化。

### 三、槍蝦 SPL 值每日週期性變化

討論完槍蝦 SPL 值之大尺度變化趨勢，接著探討基隆潮境望海巷海灣的槍蝦 SPL 值每日晝夜週期性的變化，以及每日週期性變化會與哪些環境變因相關，此部分皆使用 2021/07/30–2021/08/18 二十天期間的資料進行分析。

圖 22 呈現本研究槍蝦 SPL 值的 24 小時的平均變化，其中有兩項特徵值得注意：(1) 清晨、黃昏會出現峰值，且黃昏峰值高於清晨峰值 (2) 峰值時段以外，夜晚期間 SPL 強度高於白天期間，其餘 SPL 數值詳細變化情形已於圖 5 處說明。



圖 22：槍蝦 SPL 24 小時平均變化趨勢。

### (一) SPL 值與水溫之關係

分析 SPL 值與水溫的關聯性之前，先單獨探討水溫資料性質。2021/07/30 – 2021/08/18 的水溫資料沒有呈現出日夜週期性（圖 23），經統計後，每日最高溫與最低溫出現時間多半不是特定一個時刻，一天當中各個時間點都可能出現，甚至可能重複出現多次最高溫、最低溫（表 3）。由圖 24 可見，每日最高溫與最低溫具有相似變化趨勢，兩者之間的相關係數為 0.8079。此外，除了 7/30 當天出現高達 3.2 度的溫差之外，7/31 – 8/8 期間的溫差大約都介於 0.8 到 1 度之間，8/9 過後溫差增加至 2 度上下。推測由於 8/7 – 8/8 有盧碧颱風經過，水溫可能是受到颱風造成的天氣變化而起伏。

Time (Date)	Max	Max Time	Min	Min Time	Temp diff
2021/7/30	27.665	13:30-13:44	24.448	12:36-12:42	3.217
2021/7/31	27.7836	12:34-12:36	26.6634	0:13-0:17	1.1202
2021/8/1	27.961	8:12-11:43, 15:57-17:24, 19:50-19:52, 20:15-21:37	27.075	12:44-12:54	0.886
2021/8/2	28.555	17:54-19:18	26.9182	5:25-5:27	1.6368
2021/8/3	28.575	17:55-17:59, 18:10-18:14	27.764	3:05-3:34, 5:42-5:51, 12:39-13:19, 15:01-15:14	0.811
2021/8/4	28.853	12:29-12:51	28.0204	3:48-3:50	0.8326
2021/8/5	28.575	8:36	27.6848	7:43-7:44	0.8902
2021/8/6	28.754	10:06-13:46	27.862	16:28-17:14	0.892
2021/8/7	28.258	0:32-2:03, 7:01-12:30, 22:06-23:48	27.272	12:57-12:59	0.986
2021/8/8	28.357	16:56-17:12, 22:09-22:12, 22:18-22:20	27.468	18:34-18:37	0.889
2021/8/9	28.2976	1:04-1:05	26.0778	8:03	2.2198
2021/8/10	27.862	0:00-1:35	25.9804	11:34	1.8816
2021/8/11	27.665	16:17-16:21	25.6296	20:05-20:-06	2.0354
2021/8/12	27.567	13:35-14:03, 14:31-14:35	24.931	10:00-10:02, 10:08-10:22	2.636
2021/8/13	27.468	2:14-4:28	25.0086	10:24, 22:52-22:54	2.4594
2021/8/14	27.37	16:00-16:04, 16:42-16:47	25.1444	11:32-11:33	2.2256
2021/8/15	28.555	12:55, 14:01-14:16	26.488	10:57-11:09	2.067
2021/8/16	29.152	16:11-16:28	27.075	7:47-7:49	2.077
2021/8/17	29.252	16:50-17:19	27.468	6:25-6:28	1.784



表 3（上）：每日最高溫與最低溫數值、出現時間、溫差。

圖 23（左下）：水溫整體變化。圖 24（右下）：每日最高溫與最低溫。

前一部分分析 SPL 值季節性變化中，使用 11 – 3 月份、長達 97 天的觀測資料，得知 SPL 大尺度下的變化趨勢與水溫具有高度正相關性（表 2），且 SPL 值經一天移動平均範圍處理後，與水溫具有最高的相關係數（圖 19）。7 – 8 月份、20 天的觀測資料同樣也反映出 SPL 與水溫整體變化幅度之間的正相關性（圖 25），因此，接下來欲分析一天

當中不同時段平均的 SPL 值與水溫間的正相關性高低，而選擇取用平均值是因水溫性質較沒有規律性可言（表 3）。

分別分析與水溫之間整日平均、白天平均、夜晚平均的相關性，得出圖 26 B 白天平均值的相關係數只有 0.3464，相關性低；圖 26 C 夜晚平均值的相關係數高達 0.7997，非常有關聯性；圖 26 A 每日平均值的相關係數為 0.5968，介在白天與夜晚之間。推論可能是由於夜晚光度極微弱，相較於白天期間，少了一項環境變因的影響，使得槍蝦 SPL 呈現與水溫更高的關聯性。

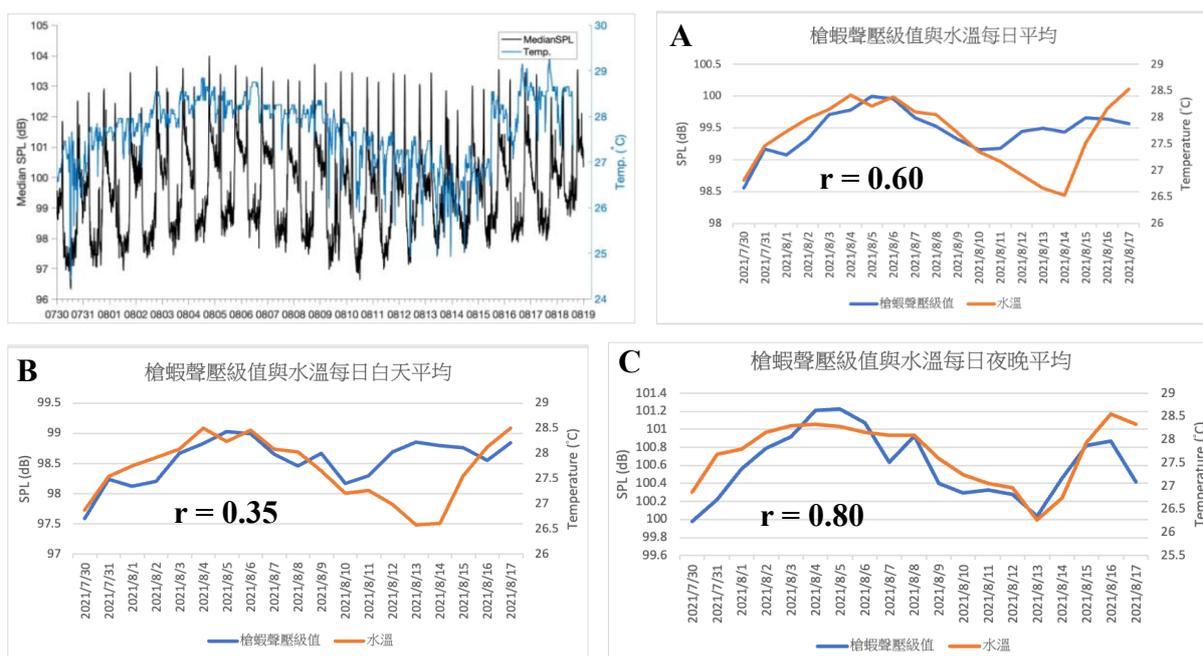


圖 25：槍蝦 SPL 與水溫整體數值變化（左上）。

圖 26：SPL 與水溫平均值之關係 (A) 整日平均 (B) 白天平均 (C) 夜晚平均。

## (二) SPL 值與光度之關係

儘管在 SPL 值季節性變化分析當中，光度與 SPL 值相關性低落，但光度每日細部變化亦有可能影響 SPL 值起伏。圖 27 呈現 SPL 與光度整體變化，可見兩者皆存在明顯日夜週期性。除了清晨與黃昏兩高峰，槍蝦聲音在每日中午、光度達到最高峰時，SPL 最低；夜晚沒有光度時，SPL 較高。

由於槍蝦 SPL 與光度皆具有日夜週期性變化，製作 24 小時平均變化圖以便了解一天當中之變化規律。由圖 28 可見，槍蝦 SPL 在每日清晨、黃昏期間會出現高峰，待太

陽升起、光度計開始記錄到數值後便驟減；太陽下山後，槍蝦再次短期活躍。計算槍蝦 SPL 與光度所有資料的相關係數  $r = -0.76$ ，兩者呈現負相關。SPL 對於光度從有到無、無到有的變化特別敏感，儘管兩者為負相關，但 SPL 達到最大值並非在深夜期間。

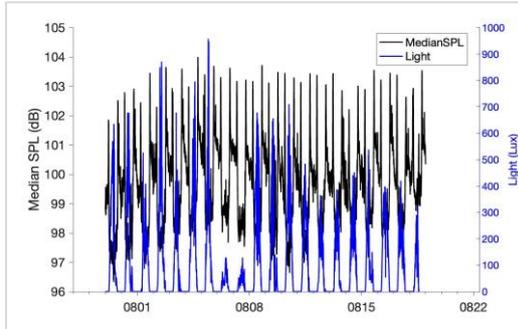


圖 27：SPL 與光度整體數值變化。

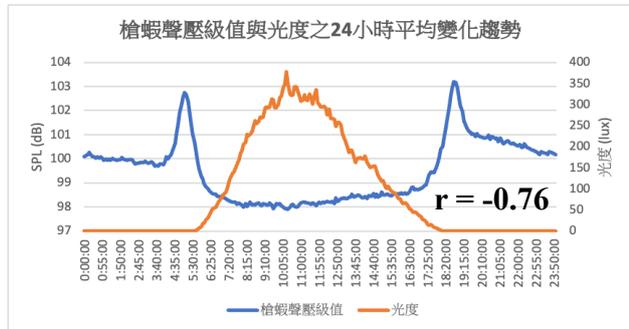


圖 28：SPL 與光度 24 小時平均變化。

#### 四、槍蝦 SPL 峰值出現時間與環境變因之關係

自 SPL 值每日週期性變化的討論中，可知每日在清晨、黃昏期間，SPL 皆會出現高峯值。因此「SPL 峰值每日出現時間究竟在太陽升起、落下前後？」、「SPL 峰值出現時間受到日出日落還是光度影響較大？」便是接續所要進行的分析。

從資料庫中擷取每日光度計最初最末有資料時間、日出時間、槍蝦聲音峰值出現時間，彙整資料如表 4、表 5（以 7 - 8 月份 10 公尺處資料為例），其中綠色表該列（二十天）中最小的數據，紅色表該列最大的數據。由於光度資料只有記錄到 2021 年 8 月 18 日 14 時 37 分，因此 8 月 18 日沒有計算光度與日落時間差、槍蝦聲音與光度時間差。

日期	7月30日	7月31日	8月1日	8月2日	8月3日
a. 光度計開始有資料的時間	5:39:00 AM	5:42:00 AM	6:02:00 AM	5:58:00 AM	5:51:00 AM
b. 日出時間	5:19:17 AM	5:19:45 AM	5:20:14 AM	5:20:42 AM	5:21:10 AM
c. 槍蝦聲音極大值出現時間	4:50:00 AM	4:55:59 AM	5:00:59 AM	4:55:59 AM	5:00:59 AM
光度與日出時間差(=a-b)	0:19:43	0:22:15	0:41:46	0:37:18	0:29:50
槍蝦聲音與光度時間差(=a-c)	0:49:00	0:46:01	1:01:01	1:02:01	0:50:01
槍蝦聲音與日出時間差(=b-c)	0:29:17	0:23:46	0:19:15	0:24:43	0:20:11

日期	8月4日	8月5日	8月6日	8月7日	8月8日
a. 光度計開始有資料的時間	5:43:00 AM	5:42:00 AM	6:00:00 AM	6:38:00 AM	6:24:00 AM
b. 日出時間	5:21:38 AM	5:22:07 AM	5:22:34 AM	5:23:02 AM	5:23:30 AM
c. 槍蝦聲音極大值出現時間	5:05:00 AM	5:00:59 AM	5:00:59 AM	5:15:00 AM	5:05:00 AM
光度與日出時間差(=a-b)	0:21:22	0:19:53	0:37:26	1:14:58	1:00:30
槍蝦聲音與光度時間差(=a-c)	0:38:00	0:41:01	0:59:01	1:23:00	1:19:00
槍蝦聲音與日出時間差(=b-c)	0:16:38	0:21:08	0:21:35	0:08:02	0:18:30

日期	8月9日	8月10日	8月11日	8月12日	8月13日
a. 光度計開始有資料的時間	5:50:00 AM	5:48:00 AM	5:57:00 AM	6:12:00 AM	6:05:00 AM
b. 日出時間	5:23:57 AM	5:24:24 AM	5:24:51 AM	5:25:18 AM	5:25:45 AM
c. 槍蝦聲音極大值出現時間	5:05:00 AM	5:05:00 AM	5:10:00 AM	5:05:00 AM	5:15:00 AM
光度與日出時間差(=a-b)	0:26:03	0:23:36	0:32:09	0:46:42	0:39:15
槍蝦聲音與光度時間差(=a-c)	0:45:00	0:43:00	0:47:00	1:07:00	0:50:00
槍蝦聲音與日出時間差(=b-c)	0:18:57	0:19:24	0:14:51	0:20:18	0:10:45

日期	8月14日	8月15日	8月16日	8月17日	8月18日
a. 光度計開始有資料的時間	5:53:00 AM	5:52:00 AM	5:51:00 AM	5:59:00 AM	6:28:00 AM
b. 日出時間	5:26:11 AM	5:26:38 AM	5:27:04 AM	5:27:29 AM	5:27:55 AM
c. 槍蝦聲音極大值出現時間	5:15:00 AM	5:05:00 AM	5:10:00 AM	5:10:00 AM	5:35:00 AM
光度與日出時間差(=a-b)	0:26:49	0:25:22	0:23:56	0:31:31	1:00:05
槍蝦聲音與光度時間差(=a-c)	0:38:00	0:47:00	0:41:00	0:49:00	0:53:00
槍蝦聲音與日出時間差(=b-c)	0:11:11	0:21:38	0:17:04	0:17:29	-

表 4：每日首次數據出現時間與時間差。

日期	7月30日	7月31日	8月1日	8月2日	8月3日
d. 光度計最後有資料的時間	6:01:00 PM	5:01:00 PM	6:13:00 PM	6:11:00 PM	5:22:00 PM
e. 日落時間	6:39:13 PM	6:38:38 PM	6:38:02 PM	6:37:26 PM	6:36:48 PM
f. 槍蝦聲音極大值出現時間	6:50:59 PM	6:55:59 PM	6:55:59 PM	6:55:59 PM	6:50:59 PM
光度與日落時間差(=e-d)	0:38:13	1:37:38	0:25:02	0:26:26	1:14:48
槍蝦聲音與光度時間差(=f-d)	0:49:59	1:54:59	0:42:59	0:44:59	1:28:59
槍蝦聲音與日落時間差(=f-e)	0:11:46	0:17:21	0:17:57	0:18:33	0:14:11

日期	8月4日	8月5日	8月6日	8月7日	8月8日
d. 光度計最後有資料的時間	5:58:00 PM	5:37:00 PM	5:21:00 PM	5:24:00 PM	6:09:00 PM
e. 日落時間	6:36:09 PM	6:35:29 PM	6:34:48 PM	6:34:06 PM	6:33:23 PM
f. 槍蝦聲音極大值出現時間	6:50:59 PM	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:55:59 PM
光度與日落時間差(=e-d)	0:38:09	0:58:29	1:13:48	1:10:06	0:24:23
槍蝦聲音與光度時間差(=f-d)	0:52:59	1:08:00	1:24:00	1:21:00	0:46:59
槍蝦聲音與日落時間差(=f-e)	0:14:50	0:09:31	0:10:12	0:10:54	0:22:36

日期	8月9日	8月10日	8月11日	8月12日	8月13日
d. 光度計最後有資料的時間	6:03:00 PM	5:46:00 PM	5:39:00 PM	5:52:00 PM	5:47:00 PM
e. 日落時間	6:32:39 PM	6:31:54 PM	6:31:08 PM	6:30:21 PM	6:29:33 PM
f. 槍蝦聲音極大值出現時間	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:40:00 PM	6:45:00 PM
光度與日落時間差(=e-d)	0:29:39	0:45:54	0:52:08	0:38:21	0:42:33
槍蝦聲音與光度時間差(=f-d)	0:42:00	0:59:00	1:06:00	0:48:00	0:58:00
槍蝦聲音與日落時間差(=f-e)	0:12:21	0:13:06	0:13:52	0:09:39	0:15:27

日期	8月14日	8月15日	8月16日	8月17日	8月18日
d. 光度計最後有資料的時間	5:18:00 PM	5:57:00 PM	6:02:00 PM	5:24:00 PM	2:37:00 PM
e. 日落時間	6:28:44 PM	6:27:54 PM	6:27:04 PM	6:26:13 PM	6:25:20 PM
f. 槍蝦聲音極大值出現時間	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:45:00 PM	6:40:00 PM
光度與日落時間差(=e-d)	1:10:44	0:30:54	0:25:04	1:02:13	-
槍蝦聲音與光度時間差(=f-d)	1:27:00	0:48:00	0:43:00	1:21:00	-
槍蝦聲音與日落時間差(=f-e)	0:16:16	0:17:06	0:17:56	0:18:47	0:14:40

表 5：每日末次數據出現時間與時間差。

為呈現出每日出現時間的變化，便將表 4、表 5 數據繪製成圖 29、圖 30，不僅呈現每日峰值出現時間、日出日落時間、光度計首末數據出現時間的起伏，更能了解三者之間的關聯性。由圖 29 可見，SPL 值在日出前達到高峰，光度計則是在日出後大約 20 – 75 分鐘內才會開始記錄到數值；由圖 30 可見，光度計在日落前 24 – 98 分鐘不等便會結束紀錄數值，SPL 值則在日落後才達到高峰。

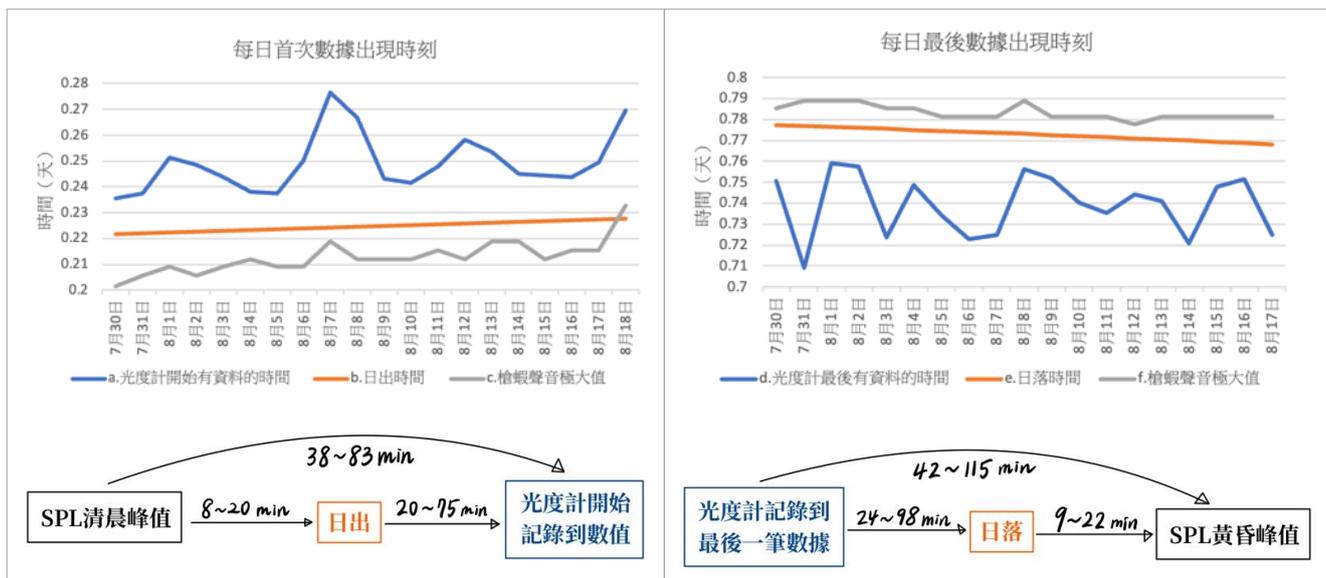


圖 29：每日首次數據出現時間。

圖 30：每日末次數據出現時間。

實際計算 SPL 峰值出現時間與日出日落時間、光度計紀錄時間的相關係數，結果可分為兩情形進行討論，而相關係數數值呈現於表 6 當中。

(一) 相同觀測期間、不同深度

取相同的觀測期間 (7/30 – 8/18)，10 公尺、27 公尺兩種深度的資料來比較，發現兩者的日出日落時間與槍蝦聲響的相關係數較光度計開始、結束紀錄時間的相關性高。27 公尺整體的槍蝦聲響與光度計、日出時間的相關係數又比 10 公尺的相關係數低，推測因為深度較深，因此受到日出日落、光度的影響較小。

(二) 不同觀測期間、相同深度

取同樣深度 (27 公尺)，較長 (7/30 – 9/10) 與較短 (7/30 – 8/18) 的觀測期間來比較，發現較長的觀測期間之相關係數較高，代表槍蝦聲響在較大的時間尺度下來看，與日出日落時間變化趨勢呈現高度正相關。由於光度計資料只有記錄到 8/18，因此無法計算較長的觀測期間的相關係數。

SPL 峰值出現時間與 環境因子相關係數	10 m 7/30 – 8/18	27 m	
		7/30 – 8/18	7/30 – 9/10
光度計開始紀錄時間	0.6154	0.4593	
日出時間	0.7681	0.6871	0.7172
光度計結束紀錄時間	0.3996	0.2532	
日落時間	0.7385	0.5976	0.9286

表 6：SPL 峰值出現時間與環境因子之相關係數。

## 伍、 討論

### 一、 研究資料概述

下表列出兩篇前人研究之採樣資料性質與本研究資料之比較，顯現出槍蝦聲音分析研究中資料採樣、資料處理之差異性。本研究分析基隆潮境望海巷海灣的聲景資料，採樣資料不僅包含 10 公尺、27 公尺兩種深度，資料密集度更較前人研究高，並且在測站處下放光溫度計，以紀錄現場資料。

	本研究		Lillis and Mooney 2018		Bohnenstiehl et al. 2016
測站地點	基隆潮境望海巷海灣		Tektite, St. John, USA	Yawzi, St. John, USA	Pamlico Sound, North Carolina, USA
測站環境	珊瑚礁生態系		珊瑚礁生態系	珊瑚礁生態系	牡蠣礁生態系 (oyster reef)
測站深度	10 m	27 m	12 m	10 m	10 m
水聽器 Duty cycle	每 5 min 錄製 3 min		每 20 min 錄製 1 min		每 15 min 錄製 1 min 每 30 min 錄製 30 s
資料筆數	7 – 8 10 m : 5760 (20 天) 7 – 8 27 m : 12096 (42 天) 11 – 3 10 m : 27936 (97 天)		每個測站各 5650 筆資料 84 天		共 27565 筆資料 321 天
光溫度資料	每 1 min 一筆資料		每 10 min 一筆資料		自 NOAA 資料庫
Snap detection 設定	比前後高 6 dB re 1 $\mu$ Pa (prominence = 6)		高於 125 dB re 1 $\mu$ Pa (peak-to-peak)		高於 120 dB re 1 $\mu$ Pa (peak-to-peak)

表 7：本研究與前人研究採樣資料比較。

前人研究中，多半擷取高頻 SPL 的槍蝦發聲率進行槍蝦聲響分析，因為高頻 SPL 中除了主要包含槍蝦的聲音，還會具有像是海膽攝食、螃蟹與底層基質間作用的聲音 (Radford et al.

2008b; Freeman et al. 2014), 較無法真實反映出槍蝦發聲率的變化規律。Lillis and Mooney (2018) 發現短期劇烈天氣變化會影響槍蝦發聲率, 而相同時段的高頻 SPL 則沒有顯著變化; 且槍蝦發聲率相對於高頻 SPL, 較能反映出氣象和月相變化等細部變化。儘管高頻 SPL 與槍蝦發聲率具有許多性質上的差異, 整體來說, 兩者仍呈現高度正相關,  $r = 0.71 - 0.92$  (Bohnenstiehl et al., 2016), 而且當槍蝦發聲率增為兩倍, SPL 也幾乎變為兩倍 (Lillis and Mooney, 2018)。

本研究原先亦擷取基隆潮境望海巷海灣高頻 SPL 資料中的槍蝦發聲率以進行後續分析, 不過得出高頻 SPL 與槍蝦發聲率呈現負相關, 推測是因資料性質與處理方式的差異所導致。目前槍蝦發聲率的定義仍有待修正與測試, 因此, 本研究使用高頻 SPL, 即原始所記錄到的聲景資料進行分析。

淺海環境中, 高頻 SPL 與槍蝦發聲率產生差異的原因複雜, 可能是由不同地點聲音傳遞、反射的差異性所造成。故在理想情況下, 應該同時使用高頻 SPL 與槍蝦發聲率進行分析, 兩資料互補, 更能清楚看見槍蝦聲音與環境間的關聯性。

## 二、槍蝦 SPL 值季節性變化

分析 SPL 值在大時間尺度下的變化趨勢時, 發現基隆潮境望海巷海灣的 SPL 值在不同觀測期間、不同深度下的性質皆會出現差異。此外, 本研究透過繪製矩陣色塊圖, 能清楚看見基隆潮境望海巷海灣各個觀測期間內槍蝦 SPL 峰值出現時間的變化, 經過圖像化後, SPL 數值的變化更容易藉由顏色深淺判斷。

Bohnenstiehl et al. (2016) 指出, 牡蠣礁生態系的高頻 SPL 值具有季節性變化, 夏季時整體 SPL 平均值比冬季高 15 分貝; 冬季時一天當中的 SPL 變化可達 5–6 分貝, 夏季則沒有顯著差異 (表 8)。本研究分析在 7–8 月份與 11–3 月份相同深度之資料, 亦得到相似的結果, 不過冬夏季整體 SPL 平均值之差只有 10 分貝; 冬季時一天中的 SPL 變化也稍少。推測可能是本研究地點緯度較低, 冬夏季之間溫度差較少, 使得 SPL 值變化差異也相對較小。

本研究除了探討不同季節下的 SPL 值變化, 更探討相同觀測期間, 不同深度之 SPL 值差異。研究結果發現, 10 公尺與 27 公尺 SPL 值變化趨勢高度正相關 ( $r = 0.9781$ ), 但整體 SPL 值相差約 2 分貝。此結果可能代表著這兩處不同深度的聲音資料, 實際上記錄著同一群槍蝦

的發聲行為，而 SPL 值強弱的差異即是由聲源與水聽器的距離不同所產生。不過由於水聽器只有收錄聲音資料，並無從得知現場實際狀況，因此以上僅為本研究的推測。

	夏季 (mid-summer)	冬季 (mid-winter)
整體 SPL 平均值	較高	較低 (與夏季差 15 dB)
一天中的 SPL 值變化	沒有顯著差異	可達 5 – 6 dB
白天與夜晚 Snap 數量	夜晚比白天多 5-10%	白天比夜晚多 25%

表 8：Bohnenstiehl et al. (2016) 發現 SPL 值之季節性差異。

分析 SPL 值大尺度下變化趨勢與水溫、光度之間的關係，選用 2021/11/26 – 2022/03/04 長達 97 天的觀測資料，不過 SPL 值為 10 公尺資料，光溫度資料則位於 27 公尺（表 1），兩者並非位於同一深度。但先前分析不同深度的 SPL 值差異時，同時也探討了 10 公尺與 27 公尺的水溫資料，更發現 27 公尺資料每天水溫最高溫與最低溫之差較 10 公尺資料大，而兩者呈現高度正相關性，28238 筆資料的相關係數  $r = 0.7417$ （圖 31），故推測 11 – 3 月份 27 公尺處的水溫變化應與 10 公尺處相似。

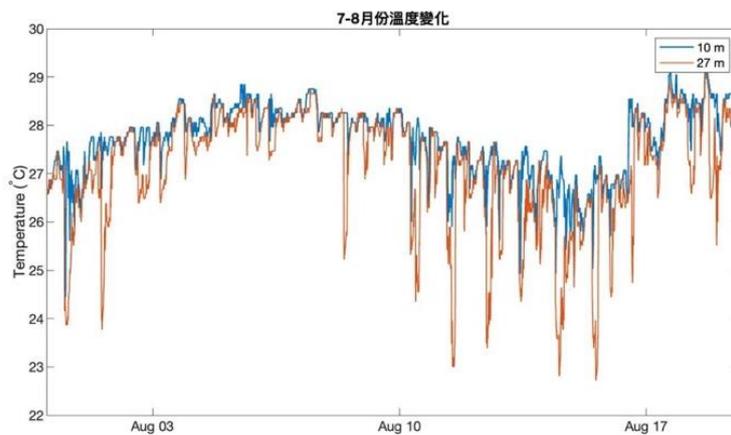


圖 31：7 – 8 月份 10 公尺與 27 公尺水溫變化。

對於水溫與 SPL 值抑或是槍蝦發聲率之關係，先前的研究結果不盡相同。Johnson et al. (1947); Everest (1948); Knowlton and Moulton (1963) 分析熱帶地區的高頻 SPL，稱水溫並沒有明顯相關或是影響，且缺乏季節性變化；Jung et al. (2012) 發現在低風的環境下，當水溫變化範圍介於 9.9 – 18.4°C，高頻 SPL 也出現高達 7 dB 的變化；Lillis (2018) 發現兩者呈現

顯著相關，即使水溫微小變化 ( $<2^{\circ}\text{C}$ )，也會影響槍蝦發聲率。本研究分析得出水溫與 SPL 值在長時間尺度下具有高度正相關性，與 Jung et al. (2012) 與 Lillis and Mooney (2018) 研究結果相同。由於本研究發現 10 公尺 SPL 值資料與 27 公尺水溫資料即具有高度正相關性，因此推測，同在 10 公尺處的 SPL 值與水溫資料應該有更高的關聯性。這兩資料間的正相關性，也能夠解釋夏季整體 SPL 值高於冬季的現象。

此外，透過分析不同移動平均範圍之下的 SPL 值與水溫相關係數高低，得出一天移動平均範圍的 SPL 值與水溫正相關性最高。此研究結果可應用在未來分析更多其他環境變因時：將 SPL 值減去一天移動平均範圍的 SPL 值，進而除去水溫對於 SPL 值所造成的影響。

### 三、槍蝦 SPL 值每日週期性變化

Bohnenstiehl et al., 2016; Lillis and Mooney (2018); Jeong et al. (2022) 皆指出槍蝦聲音具有強烈日夜週期性 (diurnal pattern)，本研究分析基隆潮境望海巷海灣的槍蝦聲音資料亦發現相同結果，具有黃昏峰值大於清晨峰值、夜晚平均聲響大於白天平均聲響的性質。前人研究中，SPL 值的變化在不同採樣地點與深度相異，Lammers et al. (2008); Jung et al. (2012); Lillis and Mooney (2016); Lillis and Mooney (2018) 發現白天平均 SPL 強度大於夜晚；Johnson et al. (1947); Everest (1948); Knowlton and Moulton (1963); Radford et al. (2008a, 2014); Pieretti et al. (2017) 則發現夜晚平均 SPL 大於白天。Lillis and Mooney (2018) 分析在相同觀測期間、兩個不同位置的測站，發現其中一個測站的黃昏峰值大於清晨峰值，而另一測站則是相反。因此可知，SPL 值變化雖然具有每日週期性，且都會在清晨、黃昏期間出現高峰值，但不同時段的 SPL 值強度大小則依採樣地點或深度而有所差異。

本研究進一步分析不同地點每日週期性變化與水溫、光度之間的關聯性，發現水溫不僅在長時間尺度下與 SPL 值正相關，每日夜晚時段的正相關性又比白天時段更高。白天期間，SPL 值還會受到光度變化影響，兩者呈現負相關。不過，光度在白天的變化值可高達 900 lux，尤其以中午時段變化最劇烈，而白天的 SPL 值變化最多不超過一分貝，因此，光度與 SPL 值之關聯性並不緊密。

#### 四、槍蝦 SPL 峰值出現時間與環境變因之關係

分析基隆潮境望海巷海灣的槍蝦 SPL 峰值出現時間與環境變因之關係，發現 SPL 峰值與日出日落時間高度正相關，與光度計開始、結束紀錄數值的時間呈現中度正相關性。由於光度計偵測到數據的時間變動大，圖 30 中光度計最後出現數據的時間分佈更能夠清楚看見其不穩定性，而槍蝦峰值出現時間較為固定，因此與日出日落時間正相關性較大。此結果代表 SPL 峰值出現時間主要受日出日落時間影響，但也會受到水中實際接受到光度的時間而改變。圖 29 中 8/18 所記錄到的情形便明顯反應此結果：SPL 峰值若只與日出日落正相關，則當天清晨峰值出現時間應該只會比前一天晚大約 5 分鐘，但實際上記錄到的數值卻晚了 25 分鐘。當天光度計比前一天晚約 30 分鐘才開始記錄到數值，或許是因當天雲層較厚、海水表層濁度較高所導致，而此延遲紀錄的時間也反映在 SPL 峰值出現時間上。

藉由本研究結果可推論，槍蝦每日出現兩峰值的時間隨著季節而產生規律性的變化，透過 SPL 值在不同季節下的 24 小時平均變化趨勢，可反映出冬夏季晝夜長短的差異性。若以一句話總結本段落分析，即為：槍蝦聲響每日固定時間的規律變化，像是其內建了「生理時鐘」，但當外在環境產生顯著變化時（光度計紀錄數值時間明顯提早或延遲時），槍蝦聲響也會受到影響。

#### 五、未來展望與應用

本研究探討了基隆潮境望海巷海灣的槍蝦聲響變化，以及其與環境間的關聯性，期望了解台灣淺海珊瑚礁生態系之聲景特色與性質。聲景的分析與當地環境緊密相關，因此各個地區的聲景研究皆有具有一定重要性，更有助於了解現階段環境變化，以及未來之變化趨勢。

近年來，部分研究嘗試使用水下聲學的多樣性 (acoustic diversity indices) 作為珊瑚礁生態系生物多樣性指標或健康程度，儘管目前的研究結果顯示與槍蝦聲響之間的影響沒有一定比例關係，難以正確地反映出珊瑚礁生態系結構 (McWilliam and Hawkins 2013; Kaplan et al. 2015; Pieretti et al. 2017)，但也開闢了另一個可行研究方向。有些研究 (Rossi et al. 2016; Butler et al. 2017) 發現較強的槍蝦發聲率意味著更高的環境品質；也有些研究 (Nedelec et al. 2015; Kaplan et al. 2015; Freeman and Freeman 2016) 發現槍蝦發聲率與環境品質（如：珊瑚礁覆蓋程度、魚類密度）呈現負相關或是沒有相關性。若能在同一地點進行更長時間的觀

測，並且分析其他環境變因與槍蝦聲響之關聯性，如潮汐週期、海平面氣壓、風向、海水 pH 值、溶氧量等，未來有機會可將槍蝦聲響轉型成一項評估環境狀態的指標，用以預測珊瑚礁生態系水溫升高或是其他情況下之環境變化與影響。

## 陸、 結論

- 一、 於本研究高密度採樣的資料分析中，SPL 與槍蝦發聲率呈現負相關，此與前人研究不同，推測與難以辨別單一脈衝波的高 SPL 環境有關，故應兩者皆進行分析比較後，才有助於看見聲響與環境間的關聯性。
- 二、 在不同深度下，SPL 的變化趨勢幾乎相同，推測可能來自同一聲源；在不同季節時，夏季整體 SPL 值高於冬季，而冬季日夜間 SPL 值的數值差較大。綜合以上，可看出在不同情境下槍蝦聲音與環境間的不同關聯性。經由分析，在一天移動平均範圍之下的 SPL 值與水溫具有最高度的正相關性，可解釋夏季整體 SPL 值較冬季高的現象。
- 三、 SPL 值除了長時間尺度下的變化，也具有每日週期性，在清晨、黃昏皆規律出現高峰值，且除了高峰期之外的夜晚平均強度大於白天。白天期間，SPL 值與光度呈負相關、與白天平均水溫呈微弱的正相關；夜晚期間，槍蝦 SPL 值不受光度影響，而與夜晚水溫平均高度呈正相關。
- 四、 最後，槍蝦每日 SPL 峰值出現時間主要與日出日落時間相關，發生於日出時間之前與日落時間之後，且黃昏峰值高於清晨。10 公尺處資料分析顯示與日出日落、光度的相關性皆比 27 公尺高；觀測時長由 20 天增長到 40 天，峰值出現時間與日出日落時間的相關性也顯著增加。可推知基隆潮境望海巷海灣之槍蝦聲響強度與水溫、光度相關；峰值出現時間則是受日出日落時間、光度影響。

## 柒、參考資料

大眼家族的海洋部落 (2011)。槍蝦的聲響與氣穴現象。檢自

<https://bigeyesliu.tumblr.com/post/62335938456/%E6%A7%8D%E8%9D%A6%E7%9A%84%E8%81%B2%E9%9F%BF%E8%88%87%E6%B0%A3%E7%A9%B4%E7%8F%BE%E8%B1%A1>。

林子皓 (2018)。從自然聲景訊息中擷取生物多樣性變化。檢自

<https://www.scimonth.com.tw/archives/1900>。

Bohnenstiehl, D. W. R., Lillis, A., & Eggleston, D. B. (2016). The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: Temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal Oyster Reef Habitat. *PLOS ONE*, *11*(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143691>

Butler, J., Butler, M. J., & Gaff, H. (2017). Snap, Crackle, and pop: Acoustic-based model estimation of snapping shrimp populations in healthy and degraded hard-bottom habitats. *Ecological Indicators*, *77*, 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.041>

Everest, F. A., Young, R. W., & Johnson, M. W. (1948). Acoustical characteristics of noise produced by snapping shrimp. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *20*(2), 137–142. <https://doi.org/10.1121/1.1906355>

Freeman, L. A., & Freeman, S. E. (2016). Rapidly obtained ecosystem indicators from Coral Reef Soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, *561*, 69–82. <https://doi.org/10.3354/meps11938>

Jeong, I., & Paeng, D.-G. (2022). Circadian and tidal changes in snapping shrimp (*Alpheus brevicristatus*) sound observed by a moored hydrophone in the Coastal Sea of western jeju. *Applied Sciences*, *12*(13), 6493. <https://doi.org/10.3390/app12136493>

Johnson, M. W., Everest, F., & Young, R. W. (1947). The role of snapping shrimp (*Crangon* and *Synalpheus*) in the production of underwater noise in the sea. *The Biological Bulletin*, *93*(2), 122–138. <https://doi.org/10.2307/1538284>

Jung, S.-K., Choi, B. K., Kim, B.-C., Kim, B.-N., Kim, S. H., Park, Y., & Lee, Y.-K. (2012). Seawater temperature and wind speed dependences and diurnal variation of ambient noise at the snapping shrimp colony in shallow water of Southern Sea of Korea. *Japanese Journal of Applied Physics*, *51*(7S). <https://doi.org/10.7567/jjap.51.07gg09>

- Kaplan, M. B., Mooney, T. A., Partan, J., & Solow, A. R. (2015). Coral reef species assemblages are associated with ambient soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, 533, 93–107.  
<https://doi.org/10.3354/meps11382>
- Knowlton, R. E., & Moulton, J. M. (1963). Sound production in the snapping shrimps *Alpheus* (Crangon) and *synalpheus*. *The Biological Bulletin*, 125(2), 311–331.  
<https://doi.org/10.2307/1539406>
- Lammers, M. O., Brainard, R. E., Au, W. W., Mooney, T. A., & Wong, K. B. (2008). An ecological acoustic recorder (ear) for long-term monitoring of biological and anthropogenic sounds on coral reefs and other marine habitats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3), 1720–1728. <https://doi.org/10.1121/1.2836780>
- Lee, D. H., Choi, J. W., Shin, S., & Song, H. C. (2021). Temporal variability in acoustic behavior of snapping shrimp in the East China Sea and its correlation with Ocean Environments. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.779283>
- Lillis, A., & Mooney, T. A. (2016). Loudly heard, little seen, and rarely understood: Spatiotemporal variation and environmental drivers of sound production by snapping shrimp. *Proceedings of Meetings on Acoustics*. <https://doi.org/10.1121/2.0000270>
- Lillis, A., & Mooney, T. A. (2018). Snapping shrimp sound production patterns on Caribbean coral reefs: Relationships with celestial cycles and environmental variables. *Coral Reefs*, 37(2), 597–607. <https://doi.org/10.1007/s00338-018-1684-z>
- Lillis, A., & Mooney, T. A. (2022). Sounds of a changing sea: Temperature drives acoustic output by dominant biological sound-producers in shallow water habitats. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.960881>
- McConaughy, J. R. (1985). Shrimp, lobsters, and crabs shrimps, lobsters, and crabs of the Atlantic coast of the Eastern United States, Maine to Florida Austin Williams. *BioScience*, 35(4), 253–253. <https://doi.org/10.2307/1310137>
- McWilliam, J. N., & Hawkins, A. D. (2013). A comparison of inshore marine soundscapes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 446, 166–176.  
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.05.012>

- Nedelec, S. L., Simpson, S. D., Holderied, M., Radford, A. N., Lecellier, G., Radford, C., & Lecchini, D. (2015). Soundscapes and living communities in coral reefs: Temporal and spatial variation. *Marine Ecology Progress Series*, 524, 125–135.  
<https://doi.org/10.3354/meps11175>
- Pieretti, N., Lo Martire, M., Farina, A., & Danovaro, R. (2017). Marine Soundscape as an additional biodiversity monitoring tool: A case study from the Adriatic Sea (Mediterranean Sea). *Ecological Indicators*, 83, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.011>
- Radford, C. A., Jeffs, A. G., Tindle, C. T., & Montgomery, J. C. (2008). Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef. *Oecologia*, 156(4), 921–929. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1041-y>
- Radford, C. A., Stanley, J. A., & Jeffs, A. G. (2014). Adjacent coral reef habitats produce different underwater sound signatures. *Marine Ecology Progress Series*, 505, 19–28.  
<https://doi.org/10.3354/meps10782>
- Rossi, T., Connell, S. D., & Nagelkerken, I. (2016). Silent Oceans: Ocean acidification impoverishes natural soundscapes by altering sound production of the world's noisiest Marine Invertebrate. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1826), 20153046. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.3046>
- Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., & Lohse, D. (2000). How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles. *Science*, 289(5487), 2114–2117.  
<https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2114>

## 【評語】 180013

分析槍蝦聲響的季節變化與日變化與水溫光度之關聯性。研究結果顯示在長時間尺度下，槍蝦聲響與水溫呈現高度正相關，且不同深度的變化趨勢相似。槍蝦每日具有非常規律的晝夜週期變化，白天期間與光度成負相關，夜晚則與水溫的變化高度正相關。槍蝦每日清晨與黃昏的聲響峰值與日出日落時間最為相關，不同季節之晝夜長短也有顯著影響。內容相當有趣，研究分析也很完整，可以深入分析探討各種不同時間尺度聲響變化之原因。對問題有充分的了解，觀察結果的解釋也有證據支持且合理。