



國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

以自動錄音裝置與人工智慧辨識探討棉花嶼大水薙鳥發聲活動

Autonomous Recording Units and Artificial Intelligence Recognition

for Dicussing the Vocal Activity of Streaked Shearwater (*Calonectris*

leucomelas) in Mienhua Islet

周安

An Chou

指導教授：袁孝維 博士

Advisor: Hsiao-Wei Yuan, Ph.D.

中華民國 113 年 8 月

August, 2024

謝誌



至今想起仍覺得不可思議能走到今天，能夠完成學業首先感謝袁孝維老師願意接納我這個一開始狂寄信件的冒失小夥，開啟了海鳥這塊我從未想到能有分的研究領域。中間在進行研究時也給予我很多發揮的空間，也提供許多機會不管是支持我參加 PSG 與進行國際學術交流、或是日常生活上給予實用的建議與原則都讓我受益良多。謝謝林瑞興組長、蔡若詩老師、謝寶森老師願意在凱米颱風籠罩下擔任口試委員，為我的研究各面包含架構、統計與文字進行實用的建議。

研究室的大家也為日復一日的生活中增添許多色彩。感謝大師兄崇航學長在我剛進來時手把手帶我摸索研究方向以及尋找許多可利用的資源，後面初稿的修改點出可以修正的地方；轟轟群的瀚柏大大跟昀萱學姊在擔任預口試口委時鞭策我的語速與內容，在出差時一起拌嘴看鳥在我往往遇到瓶頸時是最佳的紓壓解藥，小弟感激不盡；謝謝偉大的欣澄學姊針對內文的語句邏輯提出建設性意見；感謝好夥伴兼器材火藥庫維哲一起經歷寫論文中的上沖下洗，可以好好找時間去做想做的事啦；謝謝惠如處理各種千變萬化的報帳跟明細；感謝欣翰、昶詠、趙萱、Raj、燕子、陳陽、毅揚你們各種生活上的幫忙讓 308 充滿了快活的氣氛。

Shout-out to 明芄 aka 芄神在聲學上的知識給予很多討論與支持；感謝達智開發 Go Go Owl Ranger 這個如此便捷的辨識工具；謝謝研海團隊讓我有難得的機會上島，跟你們一起出海真的讓我學到很多；感謝老媽從始至終都完全支持我做想做的，謝謝妳在忙碌之餘仍然時不時關心我的情形，這些年我們一起走過最艱難的情況真的不容易，辛苦妳了；也感謝恩人在我們家遇到最為難的時候給予足夠的支持讓我能繼續完成學業。最後感謝神讓我能夠完成學業並遇到這些美好的人事物，只能說 God did。

摘要



海鳥面臨多種威脅面臨族群下降，但其繁殖地位於偏遠島嶼且多在夜間活動並選擇洞穴為巢，因此研究者及管理單位缺乏其資訊與監測。為解決此困境，本研究嘗試以被動式聲學監測中的自動錄音裝置作為工具，並結合以深度學習為基礎的人工智慧辨識模型探討大水薙鳥 (*Calonectris leucomelas*) 於棉花嶼的發聲情形。本研究架設 6 台自動錄音裝置自 2023 年 2 月至 11 月間收錄日落到日出的連續錄音資料，並採用以卷積循環式神經網路為基礎的自動辨識工具 Go Go Owl Ranger 進行模型訓練。在閾值分數為 0.2362 時精確度、召回率皆為 0.9058，儘管有誤判成其他物種但仍顯示出極佳的辨識表現。結果顯示在 71076 筆偵測大水薙鳥鳴聲中發聲活動率最高為 MI3 的 5.19 次/小時，另外大水薙鳥每月發聲活動率與錄音機周圍有無巢穴並無明顯差異，推測可能有潛在的繁殖巢穴或未成鳥活動。另外，本研究發現大水薙鳥有兩個鳴叫高峰時段，分別為 3-5 月以及 8-9 月，這可能是跟其繁殖間的關鍵期與月相週期間的變化有關。本研究旨在借助聲學監測工具和人工智慧辨識進行聲學監測，若能針對未知區域進行無人載具探勘並持續優化模型，並利用 GPS 紀錄器配合自動錄音裝置推進大水薙鳥的聲音個體辨識及其保育應用價值。

關鍵字：大水薙鳥、自動錄音裝置、自動辨識模型、繁殖行為、被動式聲學監測

Abstract



Seabirds face multiple threats and population declines, but they breed on remote islands, are nocturnal, and choose burrows for nesting, so researchers and management organizations need more information and monitoring. In order to solve this dilemma, this study attempted to investigate the vocalizations of Streaked Shearwater (*Calonectris leucomelas*) on Mienhua Islet by using autonomous recording units for passive acoustic monitoring and a deep learning-based artificial intelligence recognition model. In this study, six autonomous recording units were set up to record continuous audio data from sunset to sunrise from February to November 2023, and the Go Go Owl Ranger, a convolutional recurrent neural network-based automatic recognition tool, was used for model training. The threshold score is 0.2362, and the precision and recall are both 0.9058, which shows decent recognition performance even though there is a misclassification to other species. Among 71,076 detections, the highest vocal activity rate was 5.19 times per hour in MI3, and there was no significant difference between the monthly vocal activity rate and the presence or absence of nests in the vicinity of the recorder, suggesting that there may be potential breeding nests or immature bird activity. In addition, we found two peak calling periods in March-May and August-September, which may be related to the critical period between breeding and changes in the lunar cycle. This study aims to use acoustic monitoring tools and artificial intelligence for acoustic monitoring to continuously optimize the model for uncharted areas by unmanned vehicle exploration and to promote the sound ID by individuals of the Streaked Shearwater and its conservation value by using GPS loggers and autonomous recording units.

Key words: Streaked shearwater, Autonomous recording units, Autonomous detection model, Breeding behavior, Passive acoustic monitoring

目次



謝誌	I
摘要	II
Abstract.....	III
前言	1
一、全球海鳥的威脅	1
二、調查技術的演進.....	1
三、自動錄音裝置的優勢與限制	2
四、聲學資料分析：從人工辨識到深度學習	3
五、自動錄音裝置於海鳥研究之應用	5
研究方法	7
一、研究物種.....	7
二、研究地點.....	7
三、錄音資料.....	8
四、自動辨識聲音模型.....	8
五、統計分析	10
結果	12
一、自動聲音辨識模型表現.....	12
二、大水薙鳥夜間鳴叫活動	12
討論	14
一、自動錄音裝置與辨識模型表現.....	14
二、大水薙鳥夜間鳴叫分布差異	16
結論	21
參考文獻	22
圖	31
表	44

圖次

圖一、大水薙鳥公鳥叫聲頻譜圖。.....	31
圖二、大水薙鳥母鳥叫聲頻譜圖。.....	32
圖三、棉花嶼地理位置與地形圖。.....	33
圖四、利用 ArcGIS Pro 製作棉花嶼 75 公尺範圍分析圖。.....	34
圖五、Go Go Owl Ranger 檢驗模型表現流程圖。.....	35
圖六、物種聲音標記人工驗證的錯誤類型比例圓餅圖。.....	36
圖七、大水薙鳥於不同信賴分數閾值下的精確率，召回率與 F1 分數圖。.....	37
圖八、各錄音機樣點隨日期錄音工作時數圖。.....	38
圖九、大水薙鳥於各樣點間發聲活動率長條圖。.....	39
圖十、大水薙鳥於各月間發聲活動率長條圖。.....	40
圖十一、各自動錄音裝置經 Go Go Owl Ranger 辨識後大水薙鳥鳴叫時序圖。.	41
圖十二、遊隼叫聲頻譜圖。.....	43

表次

表一、錄音機安裝位置與與工作時間表	44
表二、以 GLMM 分析每月發聲活動率與有無確定繁殖巢穴之關聯。	45

前言



一、全球海鳥的威脅

近半數的海鳥被世界自然保護聯盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）評為瀕危或接近瀕危物種。在 362 種海鳥中，31 % 被列入全球受脅、56 % 的族群數量呈現下降，包括被列為無危（least concern, LC）的 80 個物種。在 205 種被評為無危的海鳥中，約有 39% 的物種族群數量正在減少，可見海鳥是鳥類裡面受到威脅最嚴重的類群之一（Birdlife International, 2021）。造成前述現象的原因包含海鳥混獲、外來入侵種、氣候變遷、漁業過度捕撈（Croxall et al., 2012；Dias et al., 2019；Phillips et al., 2016；Rodríguez et al., 2019）。因此需要有效的保育行動與調查理解這些海鳥的繁殖生物學、族群趨勢、棲地利用等議題。然而，Rodríguez et al.（2019）提到若要對多數鵲科（Procellariidae）、海燕類（Hydrobatidae & Oceanitidae）等海鳥對其進行研究仍有挑戰。首先，某些物種會對特定干擾非常敏感，如在雛鳥孵化期如孵化期執行繫放會導致親鳥棄巢（Carey, 2011b）。其次，僅 15% 會在白天於繁殖地活動。另外牠們多數築巢於洞穴中，且這些洞穴特性多為深且因通道並非一直線而難以勘查（Bolton et al., 2008；Brooke, 2013）。最後，牠們在偏遠、交通不易抵達的島嶼上繁殖。以上挑戰不僅造成研究者或管理單位缺乏對這些物種的繁殖生物學與其發生物候有準確的瞭解，同時也無法進行大量、長期的監測計畫（Jones & Kress, 2012；Rayner et al., 2007）。

二、調查技術的演進

由於上述原因致使在偏遠島嶼上進行海鳥監測充滿挑戰。傳統的監測方法如定點記數法（point count）儘管可在短時間調查大範圍的區域，但易受諸多因素影響，包括觀察者之間不同的感官辨識程度，例如聲學調查主要依靠人類觀察者利用耳朵聆聽並記錄鳥類的叫聲（Keitt, 2005）。這種方法不需使用特別的儀器即可進行，但結果可能因調查人員的聲音辨識技能差異而存在變異，也可能忽略掉非調查



時間發生的鳥鳴聲。鳥類行為的變化，以及氣候條件的不穩定，這些因素都可能出現較大的誤差。在這些困難情況下，被動式聲學監測（passive acoustic monitoring, PAM）技術的快速發展解決了特定研究難題。被動聲學監測透過使用麥克風進行波形和頻譜的量化分析，用以監控發出聲音的物體或現象。這種方法能夠改善，甚至有潛力取代依靠視覺和聽覺線索的傳統監測方案。能夠提供創新而有價值的數據。為了解決這些局限，研究人員逐漸開始採用手持錄音機和可以部署於特定區域的錄音設備來記錄聲音（Cody & Brown, 1969）。這種轉變允許更廣泛且精確地收集鳥類的聲音數據，無論是在人類無法駐足的區域或是在長時間範圍內都能持續監測。被動聲學監測已在陸地和海洋生態系廣泛應用，尤其是對於叫聲活躍的隱蔽物種如鯨豚類（Mellinger et al., 2007；Van Parijs et al., 2009；Borker et al., 2014）。在海洋環境中，由於水下聲波傳播距離較遠，PAM 成為衡量發聲物種棲息地使用和假設棲息地質量的有效工具（Pirrotta et al., 2014）。由於 PAM 能長時間連續記錄動物的叫聲，因此尤其適於深入了解物種季節性變化以及夜間的活動模式。

三、自動錄音裝置的優勢與限制

在使用被動式聲學監測的眾多工具中自動錄音裝置（autonomous recording units, ARUs）的應用可提供詳盡、標準化和可驗證的資料收集，可長時間紀錄整個聲學環境的變化，並在長期時空尺度上提供更好的紀錄。此外與傳統的鳥類監測方法像定點記數、穿越線法相比，自動錄音裝置是一種合適的替代方法，可用於偵測物種是否出現，以及估算物種豐富度或族群密度（Darras et al., 2018）。與傳統野外調查相比，ARU 的優點如下。其低成本、對物種干擾小的特性可有效減少觀測誤差，幫助實現資料標準化（Shonfield & Bayne, 2017）。這種裝置可以隨時安裝和回收，使野外工作更加有彈性，同時避免了人類在調查中對發聲活動的干擾（Venier et al., 2012）。另外研究人員可以以相對較低的成本同時覆蓋較大的空間和時間範圍，消除各樣本間時間上的差異（Alquezar & Machado, 2015）。當記錄時間增加時，ARU 比人類觀察員更有效，這表明較長的錄音時間可彌補較低的物種偵測率。例

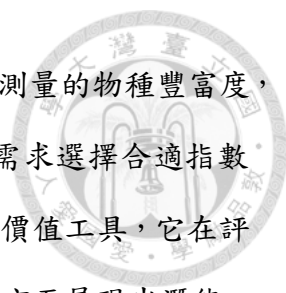


如 Kulaga & Budaka (2019) 的研究指出，當錄音時間增加一倍時，錄音機在單次調查中收集的資料比調查員更有效且穩定。自動錄音裝置進行的四次重複調查之間的平均 Sorensen 指標介於 0.58 到 0.67 之間，這指明各趟次調查的物種組成跟調查員觀察相比具有中等到高等程度的相似性，並且在同一地點進行的不同調查中檢測到的物種數量沒有明顯差異，這表明隨著時間的推移偵測率是一致的。此外，自動錄音裝置可以在偏遠地區或能見度有限的區域自動運行同時也能監測隱蔽物種 (cryptic species)，不受天氣影響 (Perez-Granados et al., 2018a)。

雖然自動錄音裝置有上述優點，但仍有其特定缺陷。鳴叫較少甚至不發聲的鳥種便無法被自動錄音裝置偵測到，且不同鳥種的檢測範圍也各不相同。聲音越大，檢測距離越遠；聲音越小，檢測距離相對縮短。聲音較小的物種容易被聲音較大的物種所掩蓋，這種現象在鳥類活動高峰期的晨昏時分尤其明顯 (Hutto & Stutzman, 2009)。另外若自動錄音裝置因故障而無法紀錄，其資料缺失會在長時間內不易察覺進而影響到後續分析，因此需要在裝設前先檢查裝置。最後儘管自動錄音裝置可作為低成本的調查方法，但若要實現近似於定點計數的空間覆蓋則需要投放大量的自動錄音裝置，這可能讓調查的成本效益大幅降低 (Shonfield & Bayne, 2017)。總結來看自動錄音裝置對鳥類生態學研究有許多好處，包括易於在不同的空間和時間範圍內重複取樣，減少觀測員的偏差，減少在野外的時間，並有永久性的調查記錄。儘管要考量偵測物種是否有高頻率發聲與設備老化或故障而出現的錄音問題，若能在研究設計中仔細考慮便能將這些限制降至最低。

四、聲學資料分析：從人工辨識到深度學習

收集聲學資料後，判定目標物種聲音的方式有幾種。一種方法是直接人工觀看頻譜圖或用人耳辨識辨認物種的叫聲 (Digby et al., 2013)，但這對於長期大量的聲音資料集而言，第一種顯然是不可行的。另一種方法是利用聲景指數 (acoustic index) 進行評估 (Borker et al., 2020)。聲景指數是評估聲學環境的重要工具，可以作為生態健康、城市規劃效果和整體環境品質的重要指標。然而，Ross et al. (2021) 的研



究發現，在不同聲學條件下，僅有少數指數能夠一致地反映出所測量的物種豐富度，這突出了大部分聲景指數對於聲學條件的敏感性以及根據研究需求選擇合適指數的重要性。總的來說，聲景指數已證明是評估各類生態系統的有價值工具，它在評估海洋和陸地生物多樣性、長期生態變化監測以及人為干擾偵測方面展現出潛能。然而，選擇適當的指數和設計合適的監測計畫仍然關鍵，因為性能可能會受到聲景條件的影響。

隨著資訊科學的進步，機器學習在被動式聲學監測的應用也逐漸發展起來。聲景分析工具 `soundscape_IR` (Lin & Sun, 2022; Sun et al., 2022) 可事先將聲景元素分類後以非負矩陣分解法 (nonnegative matrix factorization, NMF) 進行監督式學習 (supervised learning)，也可在不分類的情形下直接以週期性編碼非負矩陣分解法 (periodicity-coded nonnegative matrix factorization, pc-NMF) 執行非監督式學習。經由上述訓練階段後再依據聲學特徵採取自適應聲源分離 (adaptive source separation) 或半監督式 (semi-supervised) 聲源分離以應對聲景高度變化的環境。

以深度學習為基礎的人工智慧已然開發迅速，且其提供的辨識技術可直接從錄音資料中直接擷取物種資訊，其目標物種偵測率與精確度也相對較高。康乃爾大學鳥類學實驗室的團隊運用了公民科學資料庫 eBird、Macaulay Library (<https://www.macaulaylibrary.org/>)，以及 Xeno-canto (<https://xeno-canto.org/>) 網站上的錄音，開發了一種以深度神經網路 (deep neural network, DNN) 為基礎的物種識別工具 BirdNET (Kahl et al., 2021)。該工具的最新版本 (v 2.4) 可識別全球超過 6000 種鳥類物種，使用者可以通過網頁或應用程式便能進行鳥類聲音的即時識別。藉由 PAM、ARU 與自動辨識工具的整合可進一步增強在各種研究和保護應用中的實用性。Lavner et al. (2024) 利用 BirdNET-Analyzer 深度學習模型配合架設三台自動錄音裝置於以色列胡拉谷 (Hula Valley) 監測鳥類的發聲活動變化。結果顯示在 2020 年 11 月至 2023 年 2 月間偵測到的 17 種鳥類中有 10 種鳥類在兩年間的發聲活動有明顯下降的趨勢。研究者認為這種下降的趨勢與禽流感爆發有關。該案例不僅突顯了 ARU 在瞭解環境變化對鳥類族群產生影響時的

重要作用，同時也顯示了深度學習模型這類自動辨識工具在實施 PAM 時的潛在價值。



五、自動錄音裝置於海鳥研究之應用

夜間活動並在洞穴中築巢的海鳥由於通常會在繁殖地具有高度發聲現象；這些行為多用於繁殖展示、選擇配偶、導航以及領地宣示和防禦 (Bretagnolle, 1996)。與雀形目鳥類的鳴唱 (song) 與鳴叫 (call) 相對應，除了信天翁科 (Diomedeidae) 以外的管鼻目鳥類叫聲可分為主要叫聲 (major calls) 與次要叫聲 (minor calls) (Bretagnolle, 1996)。主要叫聲是用於配對的叫聲，包含性別與爭鬥叫聲；而次要叫聲則是所有其他叫聲包含乞食叫聲 (food-begging calls)、壓迫叫聲 (distress calls) 等。多數自動錄音裝置是監測海鳥的有力工具，能夠提供與調查員能力相當的資料，同時在效率、標準化和在野外環境中的監測能力方面具有優勢。這些設備便於收集詳細的聲學資料，可用於研究鳥類行為、物種豐富度和生態關係。

目前，自動錄音裝置主要應用於海鳥研究可分為以下兩點，首先為罕見物種偵測。Mcknown et al. (2016) 依據先前雷達調查結果，偵測到飛行特徵與圓尾鵲相似的目標後，在多明尼加和多明尼克根據這些位置分別設置了 14 台和 3 台自動錄音裝置，以偵測潛在的瀕危海鳥黑頂圓尾鵲 (*Pterodroma hasitata*) 繁殖地。研究結果在多明尼加的 4 個調查點發現了黑頂圓尾鵲的鳴叫，從而佐證了雷達目標可能正是黑頂圓尾鵲。這些位置也很有可能是這一瀕危海鳥的小規模繁殖地。因此，自動錄音裝置大大提高了發現真正稀有事件的機率。其二，族群趨勢評估在自動錄音裝置中也佔有一席之地 (Borker et al., 2014; Oppel et al., 2014; Cragg et al., 2015; Orben et al., 2019; Linares et al., 2022)。Oppel et al. (2014) 在大西洋亞速爾群島 (Azores) 的 9 個克氏猛鵲 (*Calonectris diomedea*) 繁殖地架設自動錄音裝置，並將平均每分鐘鳴叫次數與在自動錄音裝置周圍半徑 50 公尺內調查到的克氏猛鵲巢穴數進行線性回歸分析。結果顯示當發聲頻率上升時，自動錄音裝置附近的克氏猛鵲巢穴數也隨之增加，顯示出明顯的正相關。研究人員利用此結果預測位於群



島中科爾武島 (Corvo Island) 克氏猛鴉的巢穴密度。藉此我們了解自動錄音裝置可以量化並記錄海鳥族群內隨時間變化的高度發聲行為。可見從自動錄音裝置獲得海鳥發聲活動記錄可能是探測偏遠島嶼上隱秘物種的出現或估計其族群數量的有效工具，若配合人工智慧加以驗證便可評估作為豐度衡量的標準價值。

上述本文探究了海鳥的現存情形與不易監測的先天原因，並探討以自動錄音裝置為主的被動式聲學監測方案，及其應用於兩種穴居型海鳥的成功案例。大水薙鳥 (*Calonectris leucomelas*) 常於離岸島嶼繁殖，沈振中 (2010) 在棉花嶼、花瓶嶼野生動物保護區的夜間調查中發現大水薙鳥的繁殖地，而後也確認棉花嶼為全台唯一的大水薙鳥繁殖地，同時也是分布最西南的繁殖地 (Oka, 2004)。歷年的調查已知有族群在棉花嶼的南側邊坡繁殖，但過去的監測皆無探討除了南側以外其他地點是否有巢穴繁殖，但由於棉花嶼島上多為峭壁地形，無法以人力進行巢穴調查，又需考慮天氣、海象等因素無法時常登島，以致目前建議僅針對南側繁殖洞穴的大水薙鳥進行自動相機追蹤而缺乏其活動模式以及分布範圍的相關資訊 (黃彥婷, 2022)。因此，本研究嘗試使用自動錄音裝置作為被動式聲學監測之工具錄得大水薙鳥的叫聲，並利用人工智慧辨識建立一個可靠的大水薙鳥發聲偵測模型，瞭解大水薙鳥的叫聲在棉花嶼上 (1) 各自動錄音裝置設置地點錄製大水薙鳥的鳴叫次數差異；(2) 繁殖季各月份間的變化；以及 (3) 嘗試探討大水薙鳥叫聲與偵測範圍內有無巢穴是否有差異。

研究方法



一、研究物種

大水薙鳥物種分類為鷲科麗鷲屬 (*Calonectris* sp.) (Clements et al., 2023; 丁宗蘇等, 2023), 主要繁殖於日本、南韓的離岸島嶼, 並於冬天向南遷徙至越南、菲律賓、新幾內亞沿岸 (Yamamoto et al., 2008)。目前已知最大族群為日本御藏島 (Mikura Island) 的 1750000-3500000 隻 (Oka, 2004)。大水薙鳥為台灣海域常見的海洋性鳥類, 是唯一確認於我國繁殖的管鼻目鳥類。終年覓食於大洋上, 常尾隨漁船撿拾魚雜後於海面休息 (蕭木吉, 2015)。Sugawa et al. (2014) 在日本冠島 (Kamurijima Island) 上的研究指出大水薙鳥有高度的棲地忠實性 (site fidelity) 與出生地戀地性 (natal philopatry)。國際自然保護聯盟瀕危物種紅色名錄 (IUCN Red List) 指出引進的哺乳動物如家貓 (*Felis catus*) 和褐家鼠 (*Rattus norvegicus*) 對該物種構成了最大威脅 (IUCN, 2018), 並在 2015 年將其瀕危等級從無危提升至近危 (near threatened, NT) (Birdlife International, 2024), 而臺灣鳥類紅皮書名錄也分類為國家近危 (national near threatened, NNT) 物種 (林瑞興等, 2016)。在群落中會發出聲音, 於地面和飛行時都會頻繁的鳴叫。前人研究表明雄鳥體型較大, 叫聲音節短促, 音調高亢; 而雌鳥體型較小, 叫聲音節通常較長且音調低沉 (Shirai et al., 2013; Arima et al., 2014) (圖一、圖二)。

二、研究地點

棉花嶼位於基隆市中正區 (座標: $25^{\circ} 29' 6''$ N, $122^{\circ} 6' 23''$ E), 距離基隆東北方約 42 公里, 是一個面積約為 12 公頃的島嶼, 由火山作用形成, 與彭佳嶼、花瓶嶼合稱為北方三島 (圖三)。棉花嶼的名字源於 19 世紀時海鳥數量多, 當船隻靠近岸邊時, 紛飛的海鳥彷彿棉絮在空中飛揚。民國 83 年基隆市政府規劃將棉花嶼等島嶼開發成風景區。基隆市野鳥學會擔憂該計畫將對島嶼的火山地質及其他生物造成重大損害。於是, 自同年 5 月至 9 月, 進行多次生物資源調查後提出將花瓶嶼

和棉花嶼劃為自然保留區的建議。農委會（農業部）於民國 85 年 2 月 6 日召開的野生動物諮詢委員會會議通過「棉花嶼、花瓶嶼野生動物保護區」案，同年 3 月 18 日正式公告棉花嶼、花瓶嶼為野生動物保護區。島上植被以蘆荻（*Crossostephium chinense* Makino）為主。根據 2023 的陸域生態調查共調查到 29 科 61 種鳥類（黃彥婷，2023）。

三、錄音資料

本研究採用了 Wildlife Acoustics Inc. 公司製造的 4 台 Song Meter SM4 與 2 台 Song Meter Mini 自動排程錄音裝置。為防止裝置間設置過於接近而重複錄音，同時參考前人研究各台自動錄音裝置之間適當的距離（Buxton et al., 2013；Oppel et al., 2014），並使用由 ESRI Inc. 公司開發的地理資訊系統軟體 ArcGIS Pro（v 3.2.2）進行錄音機安裝於棉花嶼的 75 公尺範圍環域分析（buffer analysis）以決定安裝位置，編號分別為南側的 MI1、MI2，北側的 MI3、MI4，西側的 MI5 與東側的 MI6（圖四），其中 MI1、MI2 錄音機覆蓋範圍有涵蓋到已知的大水薙鳥繁殖巢穴（黃彥婷，2023），其他則覆蓋未知有大水薙鳥的繁殖巢穴。為避免架設高度太高受到風切聲影響，錄音設備於離地面約 50 公分處安裝於角鋼固定。由於自動錄音排程設定為從 2023 年 2 月至 10 月每天的日落到日出，並將內建麥克風訊噪比（signal-to-noise ratio, SNR）設定為 18 分貝，取樣率（sample rate）設為 24000 Hz，麥克風均選擇自動排程錄音裝置內建（build-in）麥克風且以 wav 格式儲存檔案。由於登島作業易受天氣、海象影響，錄音期間視海況盡可能以 45 天一次登島更換電池與記憶卡。

四、自動辨識聲音模型

本研究採用 Go Go Owl Ranger（<https://github.com/Chendada-8474/gogo-owl-ranger.git>）作為擷取大水薙鳥聲音的自動聲音辨識工具。Go Go Owl Ranger 本於 python 3.9.10 開發，是以卷積遞迴神經網路（convolutional recurrent neural network,



CRNN) 為基礎建成，先透過卷積神經網路 (convolutional neural network, CNN) 的四個卷積層 (convolutional layer) 進行訓練，每個卷積層裡面會接一個 2×1 的最大池 (max pooling) 以減少可訓練的參數數量，並使用 50 % 的 dropout 來最小化過度擬合 (overfitting)。從第四個卷積層出來的輸出會被扁平化 (flattened) 後交給基於遞迴神經網路 (recurrent neural network, RNN) 的 GRU 層進行兩次訓練後通過全連接層 (fully connected layer) 和 sigmoid 激活函數以獲得最終預測。由於本研究僅針對大水薙鳥進行聲音目標偵測，加上 Go Go Owl Ranger 為一開源工具供使用者進行模型建立，故選用做為辨識工具。

目標聲音使用 Audacity 音訊編輯軟體 (v 3.4.2) 人工標記後交給 Go Go Owl Ranger 進行訓練後便進行目標聲音偵測。經回收後錄音檔案後因公鳥叫聲有足夠樣本，因此以下標記均對公鳥執行。本研究對一個重複的音節定義為一次叫聲。Go Go Owl Ranger 的訓練使用了 Adam 優化器 (Kingma & Ba, 2014)，學習率 (learning rate) 設定為 0.0001。Go Go Owl Ranger 使用二元交叉熵 (binary cross-entropy) 作為損失函數 (loss function)。在訓練過程中為了防止訓練集過度擬合，僅在驗證損失減少的情形下才保存模型權重。將這些資料劃分為訓練集 1200 筆及驗證集 272 筆，以 50 個訓練週期 (epoch)、1 個批次量 (batch size) 進行訓練。

經過訓練後，我們將驗證資料集用於模型評估，設置 Go Go Owl Ranger 的閾值 (threshold) 為 0.1，最小時長 (min duration) 1 秒進行測試集聲音的自動偵測。Go Go Owl Ranger 將音檔讀取後進行快速傅立葉轉換 (fast Fourier transform, FFT) 轉為頻譜圖，轉換參數為音框點數 (window size) 512 取樣點，跳距 (hop size) 256 取樣點、80 個梅爾頻格 (Mel frequency bin)。將偵測結果產生一個聲音標記檔，其中包括檔案名稱、標記開始時間、標記結束時間及信賴分數 (confidence score) 等資訊。從閾值 0.1 到最高信賴分數，以每 0.01 分數為一區間進行，並在每個區間內做隨機分層取樣 (stratified random sampling) 5 個樣本，接著再次使用 Audacity 音訊編輯軟體進行人工複核，確認該偵測結果是否為大水薙鳥的叫聲 (圖五)。

藉此，我們得到特定信賴分數閾值下真陽性 (true positive, TP)、偽陽性 (false positive, FP)、真陰性 (true negative, TN) 及偽陰性 (false negative, FN) 標記數量，其中 TP 指正確預測的大水薙鳥叫聲，FP 指錯誤預測的大水薙鳥叫聲，TN 指正確預測的非大水薙鳥叫聲，FN 則為錯誤預測的非大水薙鳥叫聲。根據前述結果形成混淆矩陣 (confusion matrix) 後以 R 語言 (R Core Team, 2022) 的 PRROC 套件 (Grau et al., 2015) 計算該辨識模型於不同信賴分數閾值下的精確率 (precision) 與召回率 (recall)，兩者公式如下：

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

以上述兩指標計算 F1 分數 (Goutte & Gaussier, 2005) 作為模型評估的參考指標。F1 分數為精確率與召回率的調和平均數，公式如下：

$$F1 = \frac{2 \times precision \times recall}{precision + recall}$$

本研究視最高 F1 分數為最佳的綜合模型表現，將大水薙鳥信賴分數超過此閾值時的標記彙整進行分析。

五、統計分析

(1) 發聲活動率 (vocal activity rate, VAR)

本研究將以發聲活動率作為大水薙鳥的鳴叫表現。發聲活動率為單位時間內觀察到的發聲事件數量，這個時間段取決於研究目的可以是幾秒、幾分鐘甚至更長時間 (Pérez-Granados et al., 2019)。本研究將發聲活動率定義為每小時的鳴叫次數。

(2) 廣義線性混合模型 (general linear mixed model, GLMM)

本研究經 Go Go Owl Ranger 辨識的資料經 R 4.2.2 進行整理後使用 lme4

套件中的 glmer 廣義線性混合模型功能比較各因子之間的關聯，以每月的發聲活動率（次/小時）為自變數，半徑 75 公尺內有確定繁殖巢穴設為應變數，錄音裝置地點作為隨機因子。半徑 75 公尺內有確定繁殖巢穴為二元資料，故使用 binomial 分布。

結果



一、自動聲音辨識模型表現

經由人工聆聽後總共標記 1472 個大水薙鳥的叫聲後交由 Go Go Owl Ranger 訓練，在第三十個訓練週期達到最高 F1 分數 0.7487。經測試集辨識後共有 98926 筆標記。人工驗證共抽驗 445 筆標記，正確與錯誤標記分別為 382 與 63 筆。錯誤標記中非目標原生鳥類佔了 56 筆 (88.9%)，以遊隼 (*Falco peregrinus*) 與磯鶉 (*Actitis hypoleucos*) 為主；其次是昆蟲共 4 筆 (6.3%)，以及未知聲源的 3 筆 (4.8%) (圖六)。

利用 R 套件 PRROC 進行的分析顯示，當設定閾值為 0.2362 時，F1 分數、精確率和召回率均為 0.9058，顯示該閾值下模型的綜合性能最佳 (圖七)。

二、大水薙鳥夜間鳴叫活動

錄音期間為 2023 年 2 月 7 日至 2023 年 11 月 30 日 (表一)，總計錄製 12,392 小時，共 3.45 TB 的錄音數據。在這期間 MI4、MI3 兩台 Song Meter Mini 分別於 7 月 27 日與 9 月 18 日分別因故障停止運作 (圖八)，檢查後發現設備的電路板受潮發霉，推測可能為 2023 年 7 月杜蘇瑞颱風外圍環流攜帶的強降雨所影響。在設定特定閾值後，從六個樣點共記錄到 71,076 筆大水薙鳥的鳴叫聲。所有的錄音機點位皆有偵測到大水薙鳥的叫聲，大水薙鳥在錄音時段內鳴叫次數最少為 0 次，最多為 338 次。表呈現了各錄音機樣點錄製大水薙鳥的發聲活動率。這些樣點的鳴叫次數分布介於每小時 2.25 到 5.19 次 (圖九)，鳴叫頻率最高的地點是 MI6 與 MI3；而每月的發聲活動率分布則在每小時 0.43 到 10.87 次之間 (圖十)。其中六月因海象不佳無法上島更換電池故無錄音資料。

大水薙鳥於不同月份間的鳴叫次數，發現有兩個鳴叫高峰期，第一個較小的高峰期出現在 3-5 月，發聲活動率而第二個高峰期出現在 8-9 月，而且比第一個高峰期高出許多 (圖十一)。以 GLMM 分析後發現每月發聲活動率對有無確定繁殖

巢穴沒有顯著影響（表二）。



討論



一、自動錄音裝置與辨識模型表現

從 Go Go Owl Ranger 辨識大水薙鳥的模型表現而言，在較低閾值下有超過百分之 90 的精確率、召回率與 F1 分數，可歸因於下列兩點，第一為合適的標示方法。由於本研究將一個重複的音節定義為一次叫聲致使有相對足夠的標記資料進行訓練。第二是較少有與大水薙鳥有近似時長或頻率的聲音出現在棉花嶼上。儘管有少數物種在棉花嶼上的發聲頻率與大水薙鳥略為接近，但這些物種在島上的發聲時間與次數不如大水薙鳥來的長又多，故對 Go Go Owl Ranger 辨識表現影響有限。

本研究進行人工驗證時發現 Go Go Owl Ranger 在標記錯誤中尤以非目標原生鳥種造成的干擾最大。主要以遊隼與磯鶇為主。其中遊隼頻譜圖的聲紋與大水薙鳥非常相似（圖十二），造成 Go Go Owl Ranger 在辨識時給予較高的閾值分數；第二大的干擾源為昆蟲，這些昆蟲多半屬於直翅目（Orthoptera），其鳴聲頻率介於 4500 - 6000 Hz 之間，部分與大水薙鳥的鳴叫頻率重疊，由於其音量較大、頻譜變化多樣且發聲頻繁，其細碎的聲音特性與大水薙鳥相近，故 Go Go Owl Ranger 易將蟲鳴聲誤判成大水薙鳥的機率較高。

近年許多聲學自動辨識軟體被應用於鳥類研究和大量錄音資料分析。除了本研究使用的 Go Go Owl Ranger 和前面提到的 BirdNET 外，國外有 Wildlife Acoustics 發行的 Kaleidoscope Pro Analysis Software，國內則有農業部生物多樣性研究所推出的生物智慧音辨識與標記系統（Sound Identification and Labeling Intelligence for Creatures, SILIC）（Wu et al., 2022）等。然而，這些軟體並非完全自動化，在辨識過程中仍會存在一些誤判問題。例如，陳明芄（2023）指出 SILIC 在偵測白鵪鶉、東方黃鵪鶉時會與發聲特色相似的灰鵪鶉產生誤判，頻譜特徵對 SILIC 而言難以區分；另一種則是環境音（geophony）（Pijanowski et al., 2011），像是打雷聲或落雨時的聲音，當這些聲音與目標物種發聲頻率與聲紋接近時也有機



會造成誤判。因此需要人工識別，結合音色和觀察經驗才能準確判斷。以本研究而言，由於棉花嶼上無人居住，加上被劃設為保護區導致幾乎無人為活動，因此無人聲致使模型產生誤判的情形；而在環境音部分島上主要是下雨時的雨聲以及拍打岩石的海浪聲，但由於自動錄音裝置架設地點高度大多離海平面達 30 公尺使錄音檔案內海浪聲的影響較小。

本研究認為以針對單一物種特定叫聲的辨識模型而言，儘管有特定物種音節特徵與大水薙鳥相似造成部分誤判，Go Go Owl Ranger 在偵測棉花嶼大水薙鳥鳴叫方面已然表現良好，尤其對於音節特徵明顯、與其相似種類少的目標物種具有較高的辨識率，又在島上繁殖巢穴數相對其他繁殖地不高，進而減少因發聲活動率多而密集導致在進行辨識時有高度偽陽性與偽陰性發生（Buxton & Jones, 2012）。與 Go Go Owl Ranger 性質、功能相似的辨識工具相比，Duarte et al. (2024) 利用基於卷積神經網路的自動聲音辨識工具 PNW-Cnet 應用於美國西北太平洋地區的斑海雀（*Brachyramphus marmoratus*）叫聲監測其分布的時空模式。結果顯示 PNW-Cnet 有足夠高的預測準確度，精確率與召回率皆大於 0.9，進一步看該研究在 2022 年的測試集裡作者使用較低的閾值（ ≥ 0.50 ）最大化斑海雀叫聲的可偵測性，整體的精確率落在 0.788，在最大化目標物種叫聲的可偵測性而言 Go Go Owl Ranger 有足夠的表現。未來若欲進一步提升 Go Go Owl Ranger 的辨識表現，需優先提升人工驗證資料的數量，並將驗證資料用以訓練該模型，特別是昆蟲鳴聲與非目標原生鳥類的聲音部分會與大水薙鳥混淆，透過加強模型訓練和對干擾源聲音分類的改善將促進辨識效能的進一步提升。

與目前其他陸域監測方法相比，自動錄音裝置於本研究中展現了多項優勢。首先，利用自動錄音裝置收集聲學資料對物種的干擾遠低於傳統的繫放、發報器標記等方法。其次，本研究所採用的監測方法在勞動密集度方面低於透過遙測技術搜索巢穴或傳統地面巢穴搜索的方法。雖然難以精確量化成本，但自動錄音裝置允許研究人員在不顯著增加工作量的前提下，對更大範圍的區域進行以更高的時間解析度的監測。第三，因自動錄音裝置可以連續記錄聲音，相較於通常只能持續幾小時



的人工視聽調查，本研究的聲學方法可能提升可探測性。最後，由於聲學錄音可以無限期存儲，這些資料可供重複檢視或重新分析，以回答其他相關研究問題。在進行自動排程錄音時，我們也遇到了一些挑戰。首先，兩台設置在棉花嶼的 Song Meter Mini 錄音裝置遭遇了雨水進入內部的問題，導致電路板受潮。即使每次上島更換記憶卡與電池時，我們都詳細檢查並確保卡榫已確實扣緊，並將裝置的卡蓋朝上以盡量降低雨水從縫隙進入的風險，但這類事件仍然發生。另一個問題是涉及記憶卡的格式化。在回收 MI6 Song Meter SM4 於 7 月 20 日至 8 月 20 日的錄音資料時，將記憶卡插入電腦讀取資料時立即跳出建議格式化的視窗。雖然我們使用了資料救援軟體找回了缺失資料，但這些文件的詳細資訊如日期和時間等已經遺失，無法進行時間序列的分析。儘管在更換記憶卡時，我們均確認自動錄音裝置是否能正確讀取並格式化記憶卡，但仍無法完全避免此問題的發生。

總結來說，本研究顯示自動錄音裝置在監測大水薙鳥中成功將其優勢發揮出來，包括降低對物種的干擾、減少勞動密集度、擴大監測範圍和提升時間解析度。此外，自動錄音可以連續記錄聲學資料，並且這些資料可無限期儲存，為重複檢視和重新分析提供了便利。然而，我們也面臨一些技術挑戰，如裝置受潮和記憶卡格式化問題，這些問題影響了數據的完整性和分析的精確性。儘管如此，自動錄音裝置仍展現了顯著的潛力，未來需進一步改進技術以克服這些挑戰。

二、大水薙鳥夜間鳴叫分布差異

在棉花嶼的 6 個聲音紀錄樣點的發聲活動率來看大水薙鳥在 MI3 的發聲活動率最高，達到每小時 5.19 次，其次為 MI6 的每小時 3.97 次，比在自動錄音裝置半徑 75 公尺範圍內有發現巢穴的 MI1 (2.38 次/小時) 與 MI2 (3.09 次/小時) 高。錄音裝置周圍半徑 75 公尺內有無巢穴與大水薙鳥發聲活動率並無顯著的差異 (表二)，本結果不同於其他幾種海鳥的相關研究，在這些研究中發現鳴叫頻率與繁殖巢穴密度有顯著的線性關係，除了先前的克氏猛鴿 (Oppel et al., 2014) 外包含了加拿大燕鷗 (*Sterna forsteri*) (Borker et al., 2014)、短尾水薙鳥 (*Ardeenna*



tenuirostris) (Brownli et al., 2020) 等。為何這些在自動錄音裝置固定範圍內無發現巢穴的鳴叫次數比有巢穴高出許多，目前潛在的原因有二：第一個是有未知的大水薙鳥巢穴於附近。由於 MI6 與 MI3 的設置位置位於棉花嶼的東側與東北側，而這兩台錄音機設置週圍地形以斷崖與崩壁為主，故無法以人力探勘確認大水薙鳥是否使用崩壁上的洞穴進行繁殖。Hart et al. (2021) 於韓國的 Sasu 島與 Chibal 島上架設自動錄音裝置並利用廣義線性模型得到在 Sasu 島上的大水薙鳥發聲活動率（次/分鐘）與繁殖巢穴數成高度正相關（ $r^2 = 0.96$ ）。跟本研究進行比較後發現儘管兩者面積大小略同但發聲活動率與繁殖巢穴數之間的相關性不同可能是因為棉花嶼上的目前人力可立即發現的巢穴數量極少（ $n=7$ ），與 Sasu 島（ $n=1231$ ）有極大差距而導致無法有相似的結果。另外 Chibal 島環境與棉花嶼相似，但由於不易抵達該島，該研究並無針對島上的大水薙鳥發聲活動率（次/分鐘）與繁殖巢穴數進行線性回歸而無法得知其關係有無顯著差異；另外 Sasu 島為依據大水薙鳥繁殖巢穴密度設置自動錄音裝置（ $n=4$ ），而本研究是為了盡可能將自動錄音裝置錄製範圍涵蓋全棉花嶼而設置（ $n=6$ ），導致架設的自動錄音裝置密度會比 Sasu 島高。

第二個可能的原因是有非繁殖個體在島上活動。非繁殖鳥在鳥群中特別愛發聲，往往比繁殖鳥更頻繁。它們增加鳴叫的主要原因在於建立自己的地位並尋找未來潛在的繁殖地。這些未成鳥也被稱作探路者（prospector），其頻繁的鳴叫行為是探索環境的組成部分。它們正在評估鳥群的環境、潛在配偶以及合適的築巢地點。這種行為導致聲音活動頻繁，有時會被誤認為繁殖對的密度高於實際情況。繁殖鳥通常在交配和領地防禦的特定時期發聲，而非繁殖鳥的叫聲模式則較難預測。這種不可預測性會影響被動聲學監測的準確性。如果未能正確考慮非繁殖鳥的叫聲，可能會導致高估繁殖密度。因此，非繁殖鳥的存在使得估計繁殖對數變得更加複雜。被動聲學監測依賴於檢測發聲來推斷種群數量和密度。然而，由於非繁殖鳥對發聲活動的貢獻很大，區分繁殖鳥和非繁殖鳥的叫聲變得尤為具有挑戰性。如果不考慮非繁殖鳥的發聲貢獻，估計結果就可能出現偏差。另外非繁殖鳥在鳥群內部也會進



行大量的飛行活動。牠們遵循既定的飛行路線，經常尾隨繁殖鳥，以了解鳥群的佈局和資源分佈。這些活動不僅對它們未來的繁殖成功有重要關係，還會影響鳥群的整體聲學環境。飛行路線會形成集中的活動區域，並可通過聲學方法探測到。Arneill et al. (2020) 針對普通鵲 (*Puffinus puffinus*) 的研究發現發聲活動與鳥群中繁殖鳥的實際密度之間往往沒有直接關聯。相反的，記錄到的發聲活動更多地受到非繁殖個體及其在鳥群中活動的影響。此外，利用 GPS 跟蹤進行的遙測結果表明，非繁殖鳥經常在鳥群中廣泛活動，並以反映這些活動模式的方式對聲景做出貢獻。這些研究結果指出若要正確解讀聲學數據，當前的挑戰為如何區分繁殖鳥與非繁殖鳥的發聲，以及了解非繁殖鳥的比例在不同季節與年份的變化。

以月分來看大水薙鳥於棉花嶼主要有兩段鳴叫高峰，在春季（3-5 月）期間，進入首次鳴叫高峰，這段時間內發聲活動率分別為每小時 2.01、3.20、2.70 次，此時段的發聲行為可能與繁殖期開始及巢穴建造活動有關。而在晚夏至初秋（8-9 月）期間，鳴叫次數急遽增加，分別達到每小時 6.92、9.55 次的高峰，這可能與育雛期即將結束，成鳥開始準備遷徙前的最後繁殖活動相關。Yoshida (1962) 於日本冠島的研究對大水薙鳥的繁殖行為進行了詳盡考察，研究表明大水薙鳥繁殖季節從 2 月中旬開始，直至 11 月下旬幼鳥離巢結束。透過此研究的紀錄與棉花嶼上大水薙鳥的鳴叫高峰進行比對發現首階段的鳴叫高峰期與佔據繁殖巢穴及產卵準備期相吻合，第二階段鳴叫高峰則對應於幼鳥孵化和親鳥育雛期。這些發現指出，鳴叫行為很可能是大水薙鳥在交配、建立領域或進行其他繁殖行為時的重要行為表現。

自動錄音裝置 MI1、MI2、MI5、MI6 於 8 月底時幾乎沒有偵測到大水薙鳥的叫聲，此項結果可能與月相週期 (lunar cycle) 有關。月相週期在多個不同層面上影響生物的行為，以管鼻目海鳥而言有兩種假說以解釋海鳥於繁殖地活動時避開月光的行為，且多於繁殖後期進行。第一種為避免捕食 (predation avoidance) 假說，該假說認為在滿月時，海鳥在夜晚更容易被捕食者發現。為了降低風險，海鳥在夜間無月光的環境下進入群落內為避開如大型鷗科 (Laridae) 或賊鷗 (skua sp.)



的捕食 (Mougeot & Bretagnolle, 2000 ; Riou & Hamer, 2008) 。Rubolini et al. (2014) 在義大利的利諾薩島 (Linosa Island) 的研究揭示了克氏猛鴯的月光相關行為模式。研究發現在孵蛋期 (incubation) 與育雛期 (chick-rearing) , 滿月前後的覓食時間顯著長於新月期。此外, 夜間覓食潛水的頻率與月光強度呈正相關, 在無月光或月光微弱時達到最低, 這一現象與覓食效率假說相悖。值得注意的是, 雲層變化並不影響月光對巢穴進入時間、停泊時間或海上覓食行為的作用。研究者提出, 克氏猛鴯避免在月光下活動的行為可能是為了規避捕食風險, 特別是考慮到島上繁殖的遊隼可能構成潛在威脅。相比之下 Van Tatenhove et al. (2018) 對日本大水薙鳥的研究呈現了不同結果。他們在 2017 年 8 月 5 日至 20 日於粟島 (Awashima Island) 觀察大水薙鳥進出樣區的情形, 結果表明月相對大水薙鳥繁殖地的活動並無顯著影響。作者認為儘管粟島上仍有會利用月光覓食的掠食者如巨嘴鵲 (*Corvus macrorhynchos*) 以及灰背鷗 (*Larus schistisagus*), 但根據作者在島上的觀察並無發現這些物種獵食大水薙鳥的紀錄, 並且認為屬於大型鷗類的一員, 因此研究者推測大水薙鳥被這些掠食者捕食的壓力較低。然而作者並未對繁殖季或未成熟的大水薙鳥對繁殖地月光變化的反應做進一步探討。

另一種為覓食效率 (foraging efficiency) 假說 (Imber, 1975 ; Klomp & Furness, 1992 ; Mougeot & Bretagnolle, 2000) , 該假說基於晝夜垂直遷移 (diel vertical migration, DVM) , 即許多獵物受不同亮度影響在夜間向海面垂直遷移, 在白天則向深海移動。覓食效率假說認為在滿月期間由於月光增加了夜間的亮度會對魚類、鳥賊和甲殼類動物的夜間垂直上升產生負面影響, 因此在月光下海鳥的覓食效率會降低進而減少覓食後返回群落的次數。但仍有研究指出月光對海鳥夜間活動影響的情況可能與前段論述相反。Yamamoto et al. (2008) 在 2007 年 8 至 9 月於日本三貫島 (Sangan Island) 上的 38 隻大水薙鳥安裝了全球定位傳感器 (global location sensor) 記錄大水薙鳥在非繁殖季期間於海上的活動情形。結果表明大水薙鳥在滿月的飛行時間比新月長, 同時降落在水面上的頻率更高。以本研究而言 8 月 31 日適逢超級月亮 (supermoon) , 期間大水薙鳥可能都不在洞穴內反而都在海



面上飛行覓食。另外本研究過去在棉花嶼時皆有觀察到遊隼活動，也有見到幼鳥與親鳥一同飛行的紀錄，又在聽取錄音檔案進行人工複核時可聆聽到遊隼也會於 04:00-06:00 間鳴叫，另外棉花嶼上其他的天敵如褐家鼠多以嗅覺為主捕食鳥蛋或雛鳥，因此若要進一步探討棉花嶼上的大水薙鳥於繁殖後期滿月前後的發聲活動是否與上述兩個假說相符則需要在大水薙鳥上安裝 GPS 紀錄器取得飛行軌跡後探討月光對棉花嶼大水薙鳥行為的影響。

結論



本研究首次在棉花嶼這種因地形不便而無法於全島採用傳統調查方法的島嶼上利用自動錄音裝置進行被動聲學監測分析一種夜間穴居海鳥——大水薙鳥的鳴叫情形，運用人工智慧辨識工具 Go Go Owl Ranger 作為自動識別模型，並透過篩選過程嘗試觀測大水薙鳥在棉花嶼的發聲分布。Go Go Owl Ranger 在識別鳴叫時不論在準確率、召回率皆有良好表現，唯有部分受到昆蟲鳴聲和非目標鳥種鳴叫的干擾。若能增加訓練資料和驗證數據的數量則有望進一步提高 Go Go Owl Ranger 的識別準確性。

儘管自動錄音裝置或許無法精確估計島上繁殖的族群數量，但它提供了一種長期、可重複的方法，用於量化物種數量隨時間推移而發生的相對變化，以應對引入物種的清除或其他因素。考慮到棉花嶼其地質環境與周遭海象的不確定性，本研究認為這些自動錄音裝置和相關識別軟體可以作為一種低成本、使用者友善的調查技術。這些工具的使用將填補這些偏遠島嶼大水薙鳥的空白資訊。

多年的研究主要集中於棉花嶼南側的大水薙鳥巢區，但本研究結果顯示除了南側巢區外，島的東側雖未發現巢穴卻較高的發聲活動率。若未來能使用無人機在東側峭壁地段收集影像資料，可能會發現新的潛在巢穴。相比地面調查，此方法不僅能避開危險地形 (Edney & Wood, 2021)，還能結合機器學習技術標記潛在巢穴，減少人工查驗的時間。鳴叫高峰期的變化可能與繁殖行為和月相週期有關。未來若能利用資料紀錄器進行深入研究，將有助於證實此假說，並配合自動錄音裝置推進大水薙鳥的聲音個體辨識與保育應用價值。

參考文獻

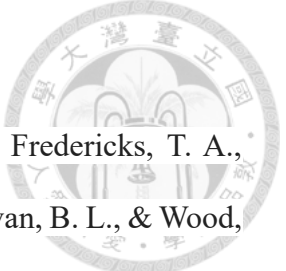


- 丁宗蘇、吳森雄、吳建龍、阮錦松、林瑞興、楊玉祥、蔡乙榮。(2023)。2023 年臺灣鳥類名錄。中華民國野鳥學會。臺北，臺灣。
- 沈振中。(2010)。北方三島鳥類生態調查。內政部營建署海洋國家公園。
- 林瑞興、呂亞融、楊正雄、曾子榮、柯智仁、陳宛均。(2016)。2016 臺灣鳥類紅皮書名錄。行政院農業委員會特有生物研究保育中心、行政院農業委員會林務局。南投縣。
- 陳明芄。(2023)。以人工智慧物種辨識工具探索大安森林公園的鳥類聲景。(碩士)。國立臺灣大學，台北市。
- 黃彥婷。(2022)。111 年度棉花嶼、花瓶嶼野生動物保護區巡護暨生態調查委託案。基隆市動物保護防疫所。
- 黃彥婷。(2023)。112 年度棉花嶼、花瓶嶼野生動物保護區巡護暨生態調查委託案。基隆市動物保護防疫所。
- 蕭木吉、李政霖。(2015)。台灣野鳥手繪圖鑑。台北市野鳥學會。
- Alquezar, R. D., & Machado, R. B. (2015). Comparisons between autonomous acoustic recordings and avian point counts in open woodland savanna. *The Wilson Journal of Ornithology*, 127(4), 712-723.
- Arima, H., Oka, N., Baba, Y., Sugawa, H., & Ota, T. (2014). Gender identification by calls and body size of the Streaked Shearwater examined by CHD genes. *Ornithological Science*, 13(1), 9-17.
- Arneill, G. E., Critchley, E. J., Wischniewski, S., Jessopp, M. J., & Quinn, J. L. (2020). Acoustic activity across a seabird colony reflects patterns of within-colony flight rather than nest density. *Ibis*, 162(2), 416-428.
- BirdLife International (2021). IUCN Red List for birds. <http://www.birdlife.org>.
- BirdLife International (2024). Species factsheet: *Calonectris leucomelas*. Downloaded

from <https://datazone.birdlife.org/species/factsheet/streaked-shearwater-calonectris-leucomelas> on 14/05/2024.



- Bolton, M., Smith, A. L., GÓMEZ-DÍAZ, E. L. E. N. A., Friesen, V. L., Medeiros, R., Bried, J., ... & Furness, R. W. (2008). Monteiro's Storm-petrel *Oceanodroma monteiroi*: a new species from the Azores. *Ibis*, 150(4), 717-727.
- Borker, A. L., Buxton, R. T., Jones, I. L., Major, H. L., Williams, J. C., Tershy, B. R., & Croll, D. A. (2020). Do soundscape indices predict landscape-scale restoration outcomes? A comparative study of restored seabird island soundscapes. *Restoration Ecology*, 28(1), 252-260.
- Borker, A. L., McKown, M. W., Ackerman, J. T., EAGLES-SMITH, C. A., Tershy, B. R., & Croll, D. A. (2014). Vocal activity as a low cost and scalable index of seabird colony size. *Conservation biology*, 28(4), 1100-1108.
- Bretagnolle, V. (1996). Acoustic communication in a group of nonpasserine birds, the petrels. *Ecology and evolution of acoustic communication in birds*, 160, 177.
- Brooke, M. (2013). *The manx shearwater*. A&C Black.
- Brownlie, K. C., Monash, R., Geeson, J. J., Fort, J., Bustamante, P., & Arnould, J. P. (2020). Developing a passive acoustic monitoring technique for Australia's most numerous seabird, the Short-tailed Shearwater (*Ardenna tenuirostris*). *Emu-Austral Ornithology*, 120(2), 123-134.
- Buxton, R. T., & Jones, I. L. (2012). Measuring nocturnal seabird activity and status using acoustic recording devices: applications for island restoration. *Journal of Field Ornithology*, 83(1), 47-60.
- Buxton, R. T., Major, H. L., Jones, I. L., & Williams, J. C. (2013). Examining patterns in nocturnal seabird activity and recovery across the Western Aleutian Islands, Alaska, using automated acoustic recording. *The Auk*, 130(2), 331-341.
- Carey, M. J. (2011). Investigator disturbance reduces reproductive success in Short-tailed

- 
- Shearwaters *Puffinus tenuirostris*. *Ibis*, 153(2), 363-372.
- Clements, J. F., Rasmussen, P. C., Schulenberg, T. S., Iliff, M. J., Fredericks, T. A., Gerbracht, J. A., Lepage, D., Spencer, A., Billerman, S. M., Sullivan, B. L., & Wood, C. L. (2023). The eBird/Clements checklist of Birds of the World: v2023. Downloaded from <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>
- Cody, M. L., & Brown, J. H. (1969). Song asynchrony in neighbouring bird species. *Nature*, 222(5195), 778-780.
- Cragg, J. L., Burger, A. E., & Piatt, J. F. (2015). Testing the effectiveness of automated acoustic sensors for monitoring vocal activity of marbled murrelets *Brachyramphus marmoratus*. *Marine Ornithology*, 43, 151-160.
- Croxall, J. P., Butchart, S. H., Lascelles, B. E. N., Stattersfield, A. J., Sullivan, B. E. N., Symes, A., & Taylor, P. H. I. L. (2012). Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. *Bird Conservation International*, 22(1), 1-34.
- Darras, K., Batáry, P., Furnas, B., Celis-Murillo, A., Van Wilgenburg, S. L., Mulyani, Y. A., & Tschardtke, T. (2018). Comparing the sampling performance of sound recorders versus point counts in bird surveys: A meta-analysis. *Journal of applied ecology*, 55(6), 2575-2586.
- Dias, M. P., Martin, R., Pearmain, E. J., Burfield, I. J., Small, C., Phillips, R. A., ... & Croxall, J. P. (2019). Threats to seabirds: a global assessment. *Biological Conservation*, 237, 525-537.
- Digby, A., Towsey, M., Bell, B. D., & Teal, P. D. (2013). A practical comparison of manual and autonomous methods for acoustic monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(7), 675-683.
- Duarte, A., Weldy, M. J., Lesmeister, D. B., Ruff, Z. J., Jenkins, J. M., Valente, J. J., & Betts, M. G. (2024). Passive acoustic monitoring and convolutional neural networks facilitate high-resolution and broadscale monitoring of a threatened species.

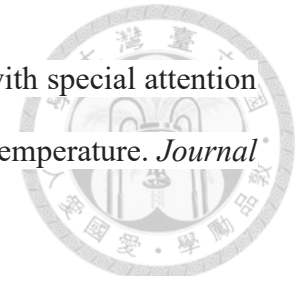


- Ecological Indicators*, 162, 112016.
- Edney, A. J., & Wood, M. J. (2021). Applications of digital imaging and analysis in seabird monitoring and research. *Ibis*, 163(2), 317-337.
- Farina, A., Pieretti, N., & Piccioli, L. (2011). The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics*, 6(6), 354-363.
- Goutte, C., & Gaussier, E. (2005, March). A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. In *European conference on information retrieval* (pp. 345-359). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Grau, J., Grosse, I., & Keilwagen, J. (2015). PRROC: computing and visualizing precision-recall and receiver operating characteristic curves in R. *Bioinformatics*, 31(15), 2595-2597.
- Hart, K. A., Oppel, S., Humphries, G. R., Blackburn, A., & Nam, K. B. (2021). Estimating Streaked Shearwater *Calonectris leucomelas* abundance in the Republic of Korea using automated acoustic recorders. *Marine Ornithology*, 49, 109-117.
- Hutto, R. L., & Stutzman, R. J. (2009). Humans versus autonomous recording units: A comparison of point-count results. *Journal of Field Ornithology*, 80(4), 387-398.
- Imber, M. J. (1975). Behaviour of Petrels in Relation to The Moon and Artificial Lights. *Journal of the Ornithological Society of New Zealand*, 302.
- IUCN. 2018. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2018-2. Available at: www.iucnredlist.org.
- Jones, H. P., & Kress, S. W. (2012). A review of the world's active seabird restoration projects. *The Journal of wildlife management*, 76(1), 2-9.
- Kahl, S., Wood, C. M., Eibl, M., & Klinck, H. (2021). BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. *Ecological Informatics*, 61, 101236.
- Keitt, B. S. (2005). Status of Xantus's Murrelet and its nesting habitat in Baja California,



- Mexico. *Marine Ornithology*, 33, 105-114.
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- Klomp, N. I., & Furness, R. W. (1992). Patterns of chick feeding in Cory's shearwaters and the associations with ambient light. *Colonial Waterbirds*, 95-102.
- Kulaga, K., & Budka, M. (2019). Bird species detection by an observer and an autonomous sound recorder in two different environments: Forest and farmland. *PLoS One*, 14(2), e0211970.
- Lavner, Y., Melamed, R., Bashan, M., & Vortman, Y. (2024). The bioacoustic soundscape of a pandemic: Continuous annual monitoring using a deep learning system in Agmon Hula Lake Park. *Ecological Informatics*, 102528.
- Libois, E., Gimenez, O., Oro, D., Mínguez, E., Pradel, R., & Sanz-Aguilar, A. (2012). Nest boxes: A successful management tool for the conservation of an endangered seabird. *Biological Conservation*, 155, 39-43.
- Lin, T. H., & Sun, Y. J. (2022). meil-brcas-org/soundscape_IR: Release v1.1 (v1.1). Zenodo.
- Linares, C. G., Phillips, R. A., & Buxton, R. T. (2022). Monitoring vocal activity and temporal patterns in attendance of White-chinned Petrels using bioacoustics. *Emu-Austral Ornithology*, 122(1), 27-38.
- McKown, M., Fleishman, A. B., & Earl, A. D. (2016). Acoustic surveys for Black-capped Petrel on Hispaniola and Dominica–2016.
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S. E., Dziak, R. P., & Matsumoto, H. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.
- Mougeot, F., & Bretagnolle, V. (2000). Predation risk and moonlight avoidance in nocturnal seabirds. *Journal of Avian Biology*, 31(3), 376-386.

Oka, N. (2004). The distribution of Streaked Shearwater colonies, with special attention to population size, area of sea where located and surface water temperature. *Journal of the Yamashina Institute for Ornithology*, 35(2), 164-188.



Oppel, S., Hervías-Parejo, S., Oliveira, N., Pipa, T., Silva, C., Geraldés, P., ... & McKown, M. (2014). Estimating population size of a nocturnal burrow-nesting seabird using acoustic monitoring and habitat mapping. *Nature Conservation* 7: 1-13.

Orben, R. A., Fleishman, A. B., Borker, A. L., Bridgeland, W., Gladics, A. J., Porquez, J., ... & Suryan, R. M. (2019). Comparing imaging, acoustics, and radar to monitor Leach's storm-petrel colonies. *PeerJ*, 7, e6721.

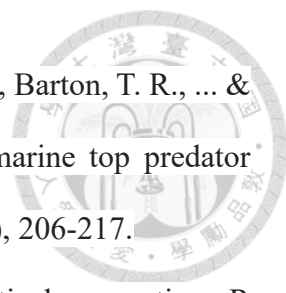
Pérez-Granados, C., Bustillo-De La Rosa, D., Gómez-Catasús, J., Barrero, A., Abril-Colón, I., & Traba, J. (2018). Autonomous recording units as effective tool for monitoring of the rare and patchily distributed Dupont's Lark *Chersophilus duponti*. *Ardea*, 106(2), 139-146.

Pérez-Granados, C., Gómez-Catasús, J., Bustillo-de la Rosa, D., Barrero, A., Reverter, M., & Traba, J. (2019). Effort needed to accurately estimate Vocal Activity Rate index using acoustic monitoring: A case study with a dawn-time singing passerine. *Ecological Indicators*, 107, 105608.

Phillips, R. A., Gales, R., Baker, G. B., Double, M. C., Favero, M., Quintana, F., ... & Wolfaardt, A. (2016). The conservation status and priorities for albatrosses and large petrels. *Biological Conservation*, 201, 169-183.

Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological indicators*, 11(3), 868-873.

Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.

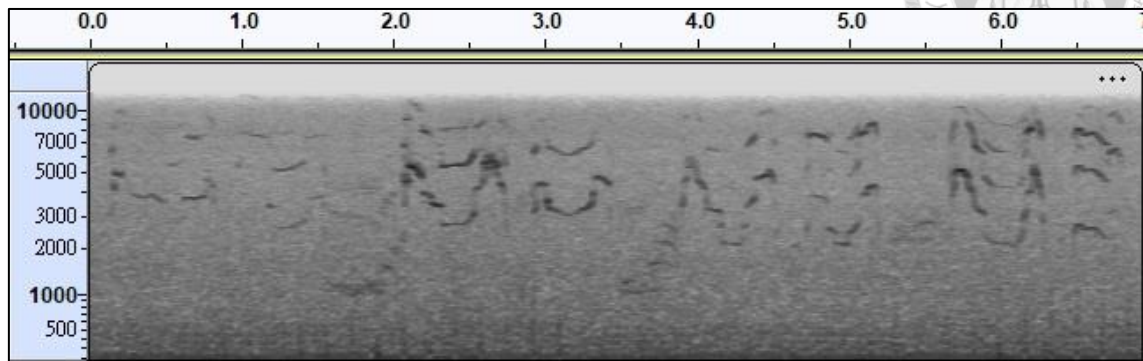
- 
- Pirotta, E., Thompson, P. M., Miller, P. I., Brookes, K. L., Cheney, B., Barton, T. R., ... & Lusseau, D. (2014). Scale-dependent foraging ecology of a marine top predator modelled using passive acoustic data. *Functional ecology*, 28(1), 206-217.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rayner, M. J., Hauber, M. E., Imber, M. J., Stamp, R. K., & Clout, M. N. (2007). Spatial heterogeneity of mesopredator release within an oceanic island system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20862-20865.
- Riou, S., & Hamer, K. C. (2008). Predation risk and reproductive effort: impacts of moonlight on food provisioning and chick growth in Manx shearwaters. *Animal Behaviour*, 76(5), 1743-1748.
- Rodriguez, A., Arcos, J. M., Bretagnolle, V., Dias, M. P., Holmes, N. D., Louzao, M., ... & Chiaradia, A. (2019). Future directions in conservation research on petrels and shearwaters. *Frontiers in Marine Science*, 6, 94.
- Ross, S. R. J., Friedman, N. R., Yoshimura, M., Yoshida, T., Donohue, I., & Economo, E. P. (2021). Utility of acoustic indices for ecological monitoring in complex sonic environments. *Ecological Indicators*, 121, 107114.
- Rubolini, D., Maggini, I., Ambrosini, R., Imperio, S., Paiva, V. H., Gaibani, G., ... & Cecere, J. G. (2014). The effect of moonlight on Scopoli's shearwater *Calonectris diomedea* colony attendance patterns and nocturnal foraging: A test of the foraging efficiency hypothesis. *Ethology*, 121(3), 284-299.
- Shirai, M., Niizuma, Y., Tsuchiya, K., Yamamoto, M., & Oka, N. (2013). Sexual size dimorphism in Streaked Shearwaters *Calonectris leucomelas*. *Ornithological Science*, 12(1), 57-62.
- Shonfield, J., & Bayne, E. M. (2017). Autonomous recording units in avian ecological

- 
- research: current use and future applications. *Avian Conservation & Ecology*, 12(1).
- Sugawa, H., Karino, K., Ohshiro, A., & Hirai, M. (2014). Long-term trends in breeding site fidelity of streaked shearwater *Calonectris Leucomelas*. *Marine Ornithology*, 42, 11-15.
- Sun, Y. J., Yen, S. C., & Lin, T. H. (2022). soundscape_IR: A source separation toolbox for exploring acoustic diversity in soundscapes. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(11), 2347-2355.
- Van Parijs, S. M., Clark, C. W., Sousa-Lima, R. S., Parks, S. E., Rankin, S., Risch, D., & Van Opzeeland, I. C. (2009). Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 21-36.
- Van Tatenhove, A., Fayet, A., Watanuki, Y., Yoda, K. E. N., & Shoji, A. (2018). Streaked Shearwater *Calonectris leucomelas* moonlight avoidance in response to low aerial predation pressure, and effects of wind speed and direction on colony attendance. *Marine Ornithology*, 46, 177-185.
- Venier, L. A., Holmes, S. B., Holborn, G. W., Mcilwrick, K. A., & Brown, G. (2012). Evaluation of an automated recording device for monitoring forest birds. *Wildlife Society Bulletin*, 36(1), 30-39.
- Wu, S. H., Chang, H. W., Lin, R. S., & Tuanmu, M. N. (2022). SILIC: A cross database framework for automatically extracting robust biodiversity information from soundscape recordings based on object detection and a tiny training dataset. *Ecological Informatics*, 68, 101534.
- Yamamoto, T., Takahashi, A., Yoda, K., Katsumata, N., Watanabe, S., Sato, K., & Trathan, P. N. (2008). The lunar cycle affects at-sea behaviour in a pelagic seabird, the streaked shearwater, *Calonectris leucomelas*. *Animal Behaviour*, 76(5), 1647-1652.
- Yoshida, N. (1962). Breeding ecology of the Streaked Shearwater at Kamurijima I.

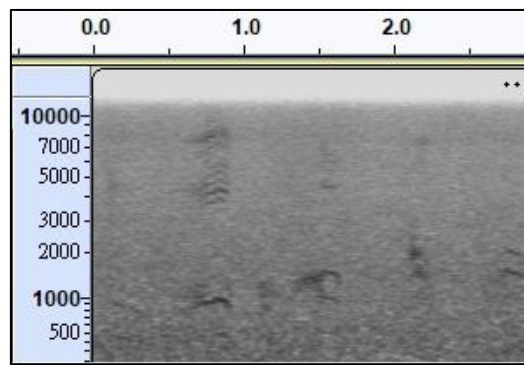
Japanese Journal of Ornithology, 17(79-80), 83-108.



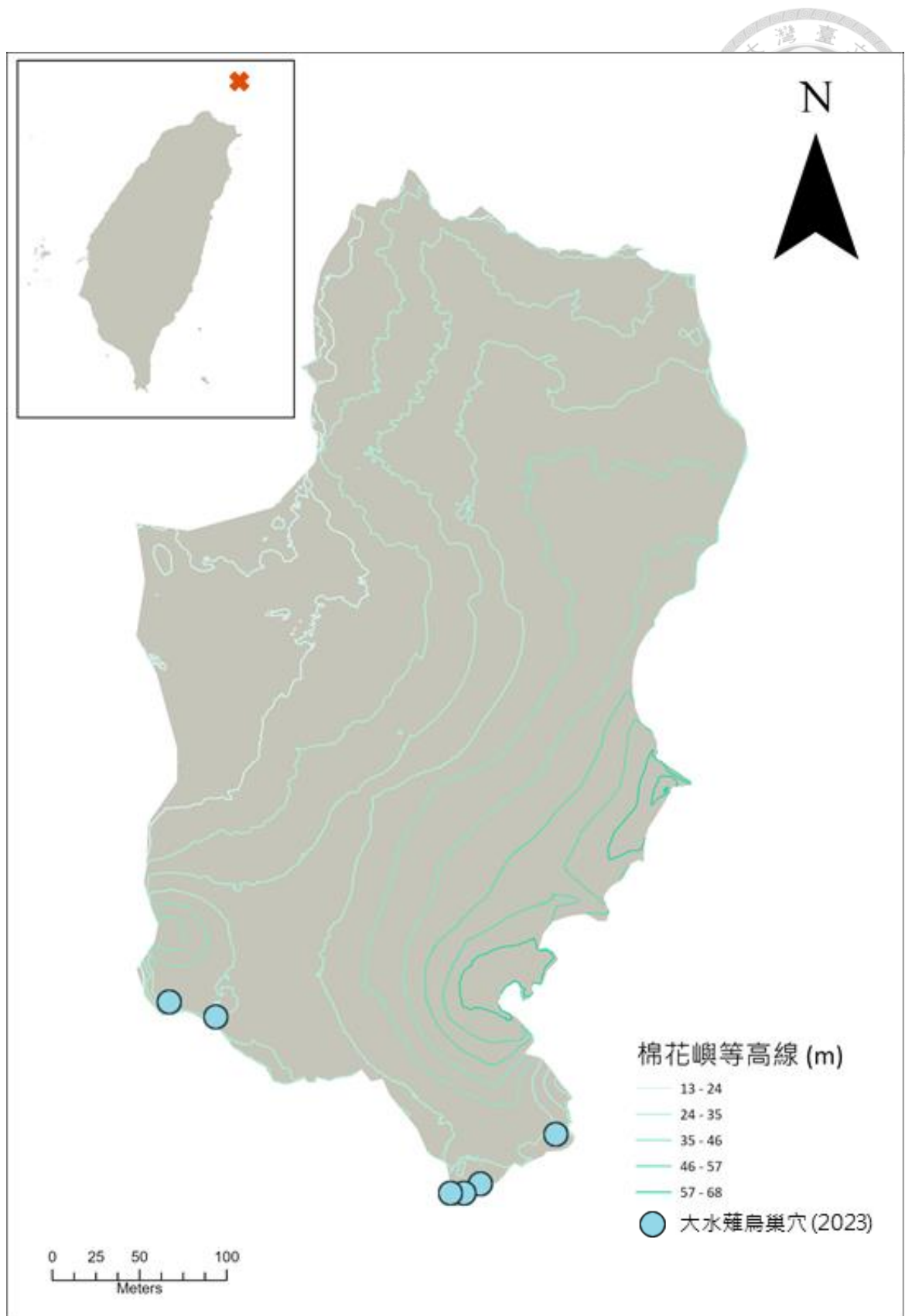
圖



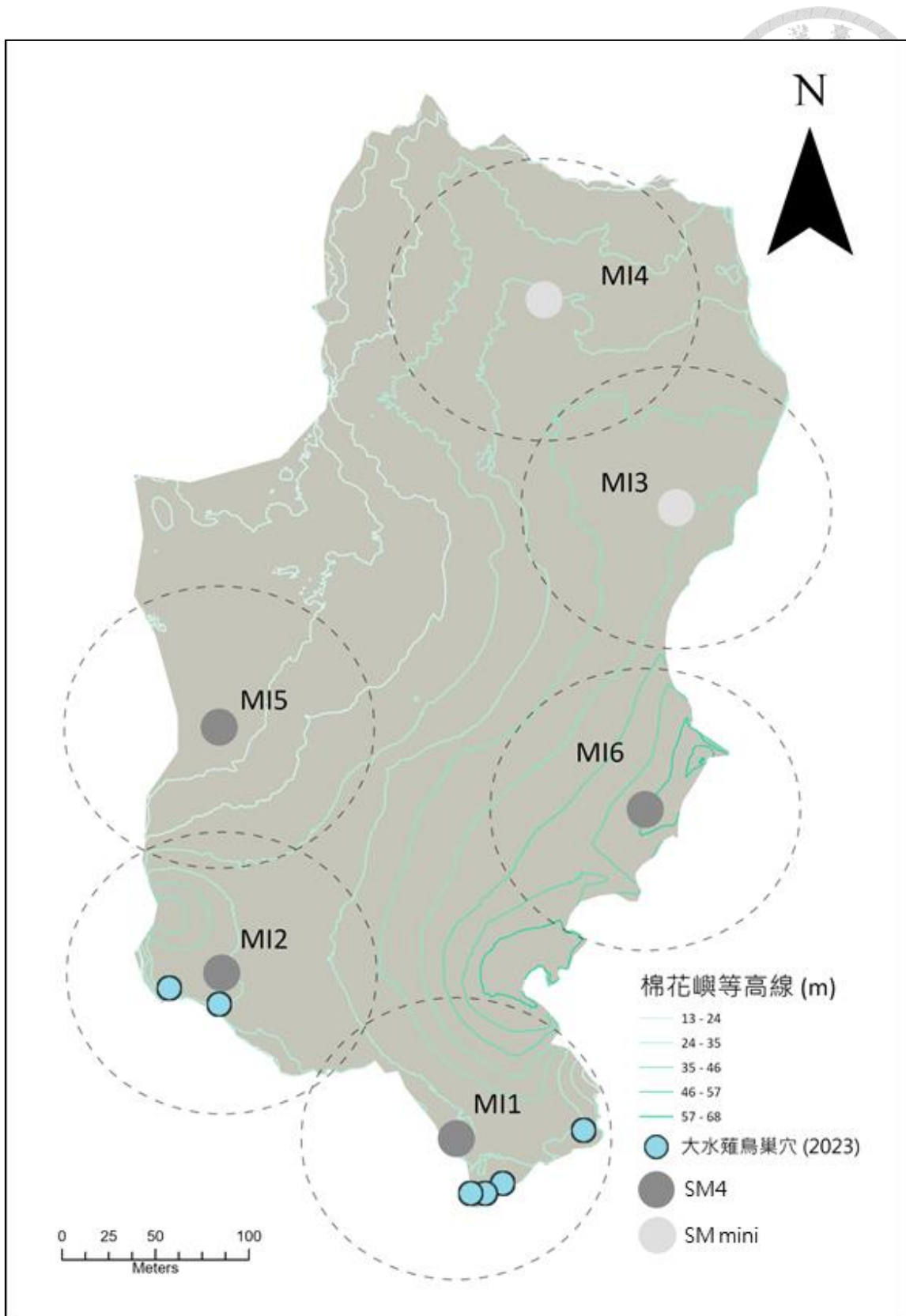
圖一、大水薙鳥公鳥叫聲頻譜圖，橫軸為時間（秒），縱軸為頻率（赫茲）。



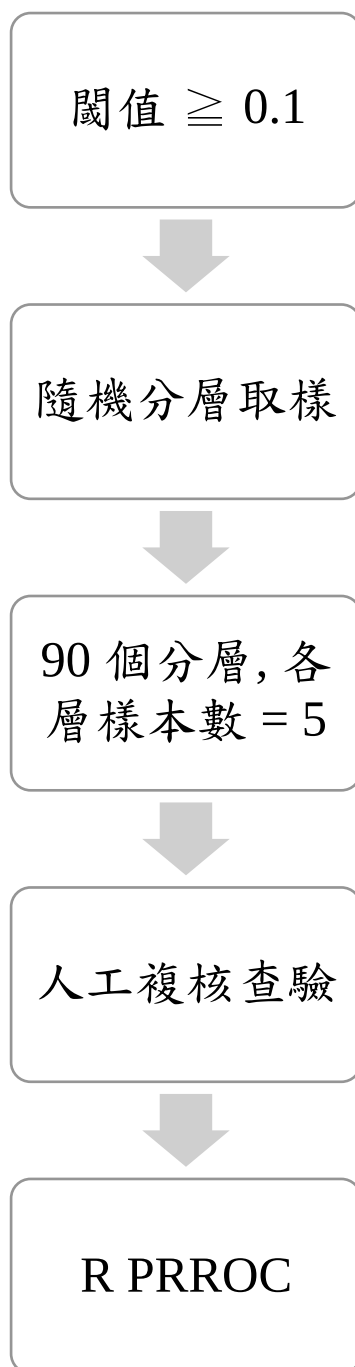
圖二、大水薙鳥母鳥叫聲頻譜圖，橫軸為時間（秒），縱軸為頻率（赫茲）。



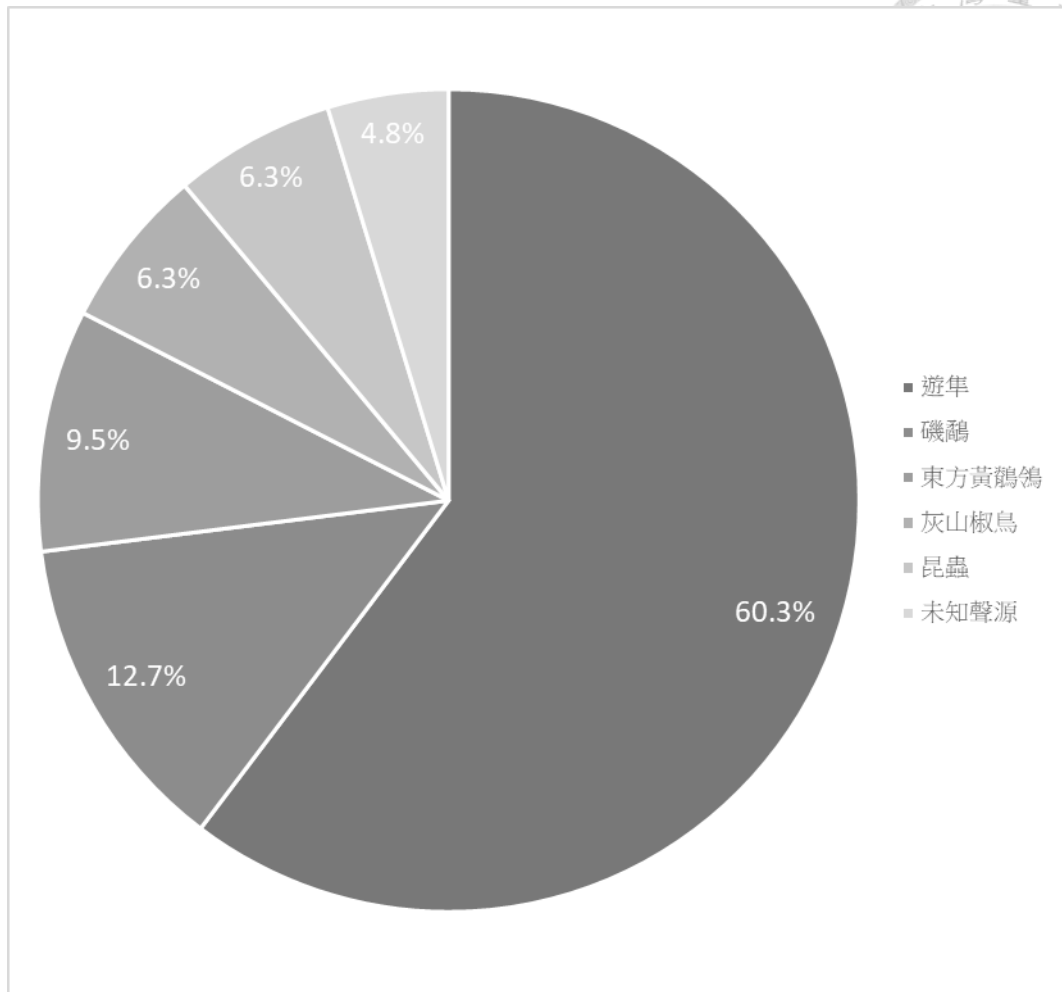
圖三、棉花嶼地理位置與地形圖。小圖紅色打叉處為棉花嶼相對位置。



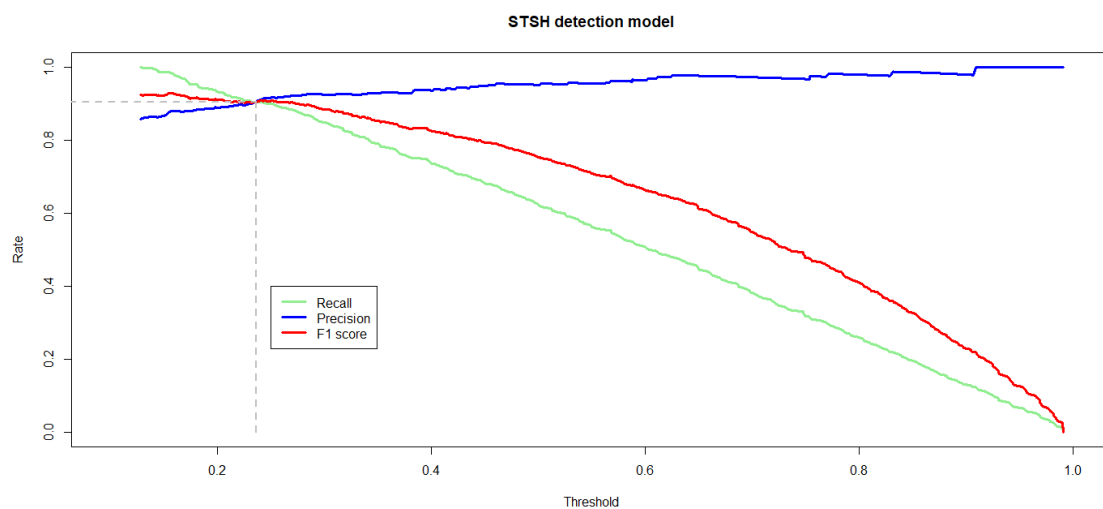
圖四、利用 ArcGIS Pro 製作棉花嶼 75 公尺範環域分析圖。其中 MI1、MI2、MI5、MI6 為 SM4，MI3、MI4 為 SM mini。



圖五、Go Go Owl Ranger 檢驗模型表現流程圖。



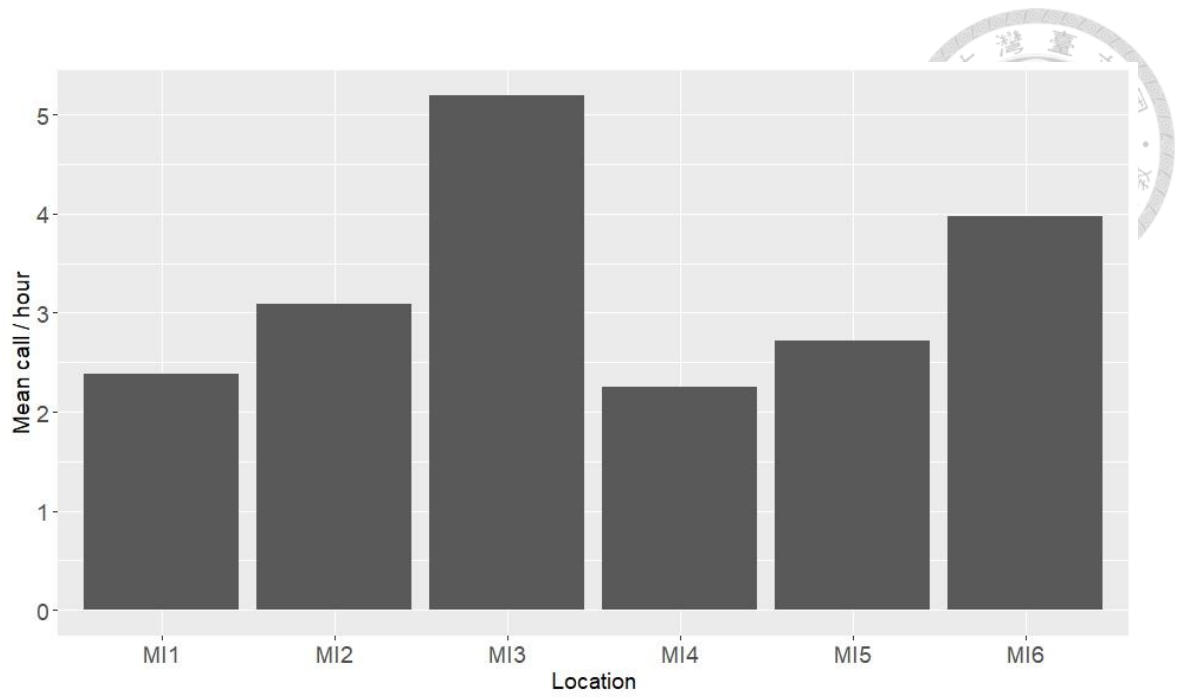
圖六、物種聲音標記人工驗證的錯誤類型比例。依比例由高到低分別為遊隼（60.3%）、磯鶇（12.7%）、東方黃鸝（9.5%）、灰山椒鳥（6.3%）、昆蟲（6.3%），與未知聲源（4.8%）。



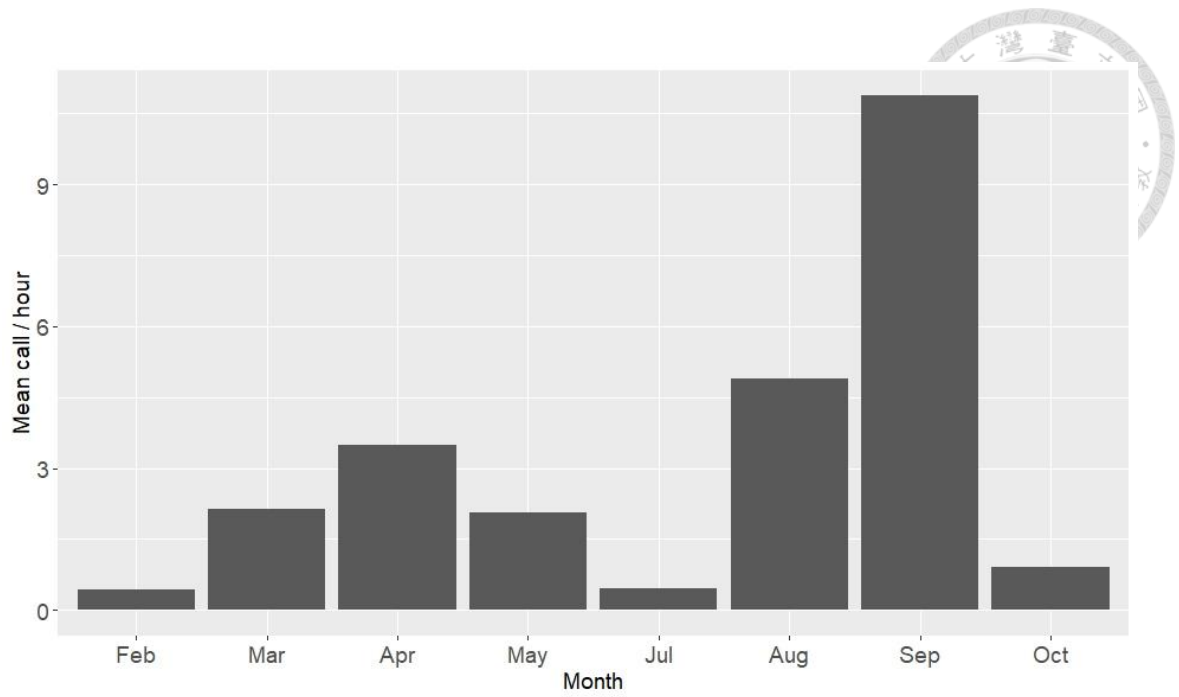
圖七、大水雞鳥於不同信賴分數閾值下的精確率（藍線），召回率（綠線）與 F1 分數（紅色虛線）。圖中橫軸為信賴分數閾值，縱軸對應到在該閾值下精確率、召回率與 F1 分數之數值。



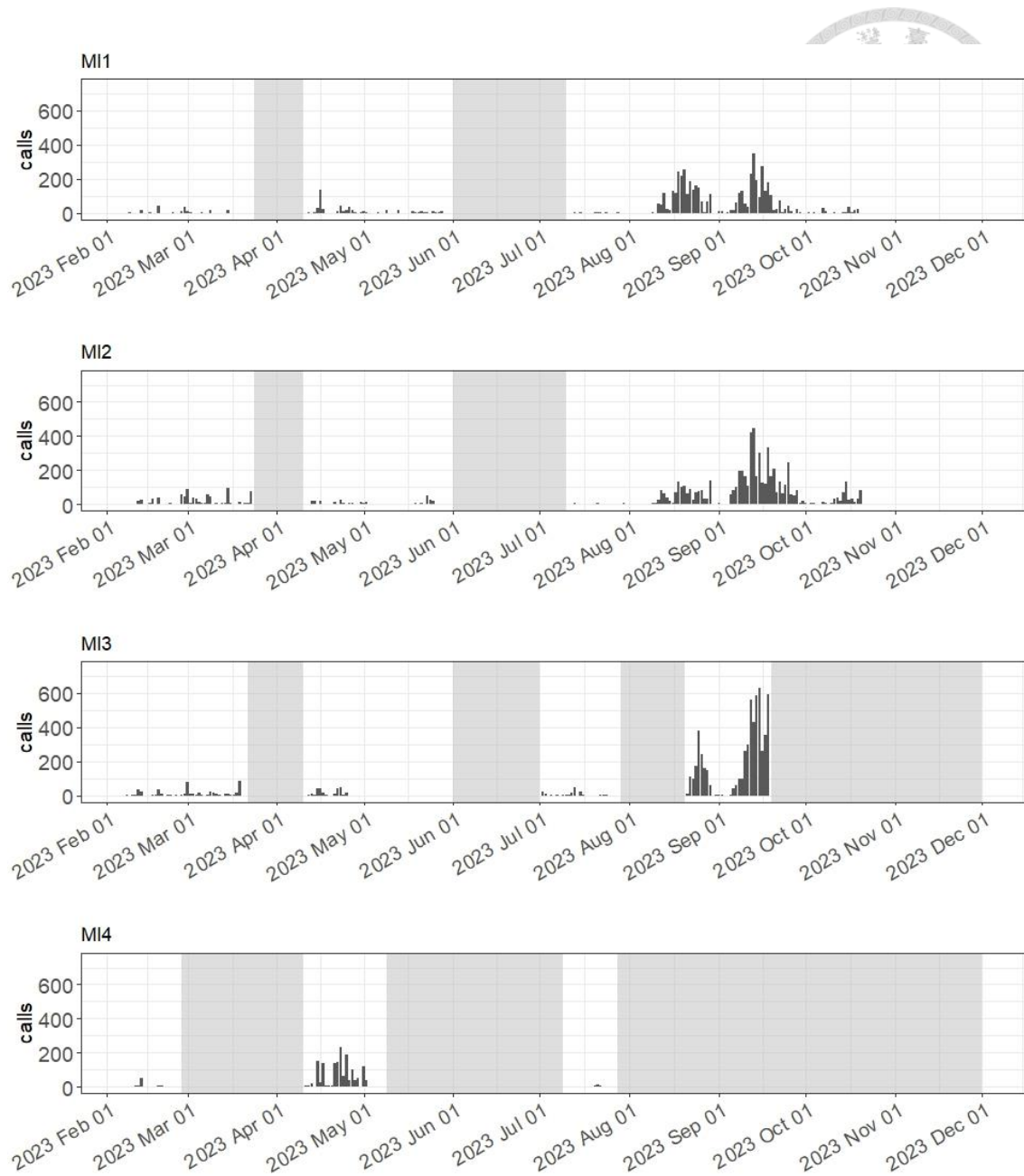
圖八、各錄音機樣點隨日期錄音工作時數圖。其中底色灰色為錄音裝置無運作的時間。



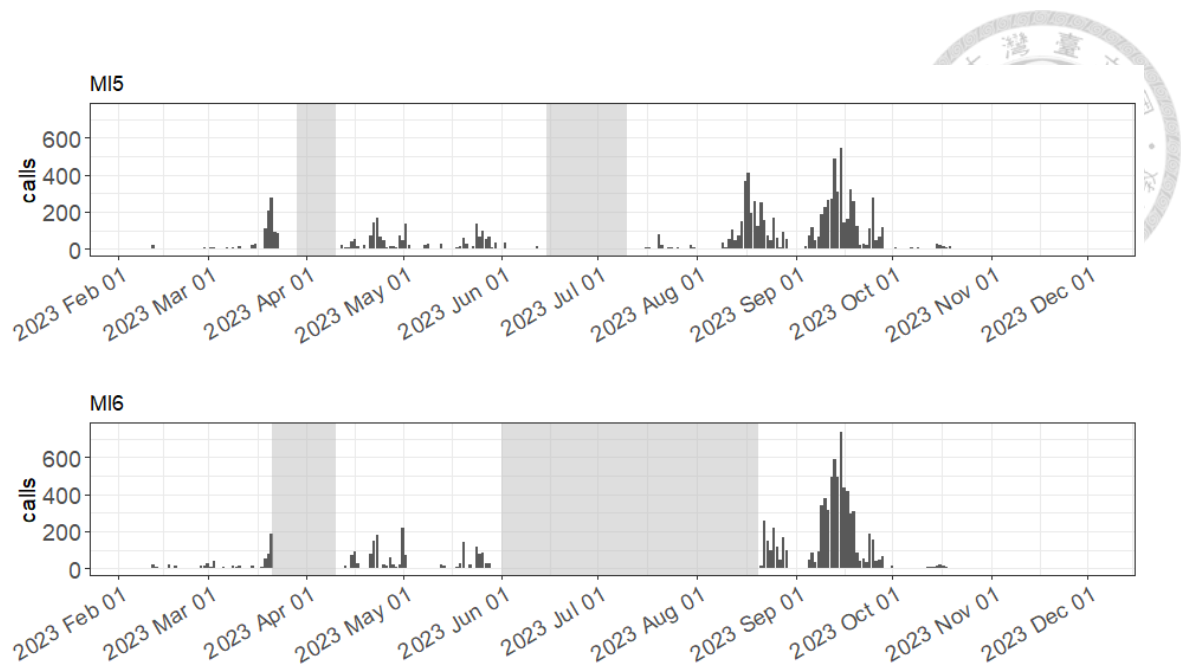
圖九、大水薙鳥於各樣點間每小時鳴叫次數。橫軸為樣點編號，縱軸為每小時發聲活動率（次/小時）。



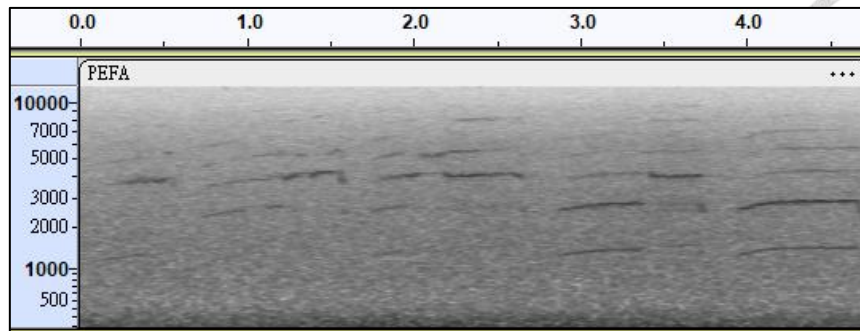
圖十、大水雞鳥於各月間每小時鳴叫次數。橫軸為月份，縱軸為每小時發聲活動率（次/小時）。其中六月因海象不佳無法上島更換電池故無錄音資料。



圖十一、各自動錄音裝置經由 Go Go Owl Ranger 辨識後的大水薙鳥鳴叫次數圖。橫軸為日期，縱軸為總鳴叫次數。其中底色白色為錄音裝置運作時間，灰色為錄音裝置無運作的時間。



圖十一(續)、各自動錄音裝置經由 Go Go Owl Ranger 辨識後的大水薙鳥鳴叫次數熱區圖。橫軸為日期，縱軸為時間。其中底色白色為錄音裝置運作時間，灰色為錄音裝置無運作的時間。



圖十二、遊隼叫聲頻譜圖，橫軸為時間（秒），縱軸為頻率（赫茲）。

表



表一、錄音機安裝位置與與工作時間表

錄音機代號	經度	緯度	起始錄音時間	最後錄音時間
MI1	122.10535	25.48252	2023/02/07 17:40	2023/11/30 22:36
MI2	122.10423	25.48331	2023/02/07 17:40	2023/11/29 03:01
MI3	122.10641	25.48555	2023/02/07 17:40	2023/09/18 04:55
MI4	122.10578	25.48655	2023/02/07 17:40	2023/07/27 19:35
MI5	122.10421	25.48449	2023/02/07 17:40	2023/11/29 23:01
MI6	122.10626	25.4841	2023/02/07 17:40	2023/11/28 01:01

表二、以 GLMM 分析每月發聲活動率與半徑 75 公尺有無確定繁殖巢穴的關聯，結果無顯著關係。

隨機因子		變異數		標準差
錄音裝置地點		4767		69.04
固定因子	估計值	標準差	<i>z</i>	<i>P</i>
(截距)	-13.692	7.167	-1.910	0.056
發聲活動率	-0.053	0.831	-0.064	0.949