

# 臺灣海域鳥類船隻穿越線調查之密度估算 方法探討

## Estimating density of birds at sea with vessel line- transect in Taiwan waters

白梅玲、連裕益

Mei-Ling Bai and Yu-Yi Lien

福爾摩莎自然史資訊有限公司，新北市新店區寶橋路 140 巷 13 號 2 樓

Formosa Natural History Information Ltd.

2F., No. 13, Ln. 140, Baoqiao Rd., Xindian Dist., New Taipei City,

TAIWAN

通訊作者：[fnhi@fnhi.com.tw](mailto:fnhi@fnhi.com.tw)

Corresponding author：[fnhi@fnhi.com.tw](mailto:fnhi@fnhi.com.tw)

### 摘要

要評估離岸風場對鳥類的影響，標準化而定量的調查海上鳥類是基本的一步。以船隻行駛穿越線進行目視偵測是海上鳥類調查最常用的方法之一；不過分析穿越線調查的資料有兩項挑戰，一是鳥類被偵測的機率隨其至穿越線的距離而異，二是海上有許多鳥類持續在飛行中，且速度相對於船隻快許多。為了因應這兩個問題，歐洲海鳥調查準則採用固定寬度的帶狀穿越線，假設飛行中的鳥類在此距離內（通常採 300m）可以完全被偵測，並對飛行中的鳥類採用快照式記錄法以避免速度的效應。而由於臺灣海域的海鳥密度較低，國內學者在「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」中指出，在臺灣海域宜採用不定寬度、連續記錄的穿越線調查法，以得到較完整的資料。對於不定寬度穿越線的資料，鳥類偵測率隨距離的變化可用距離採樣法分析有效帶寬 (effective strip width, ESW) 來處理；不過連續記錄將無法避免速度效應，會導致鳥類密度估值偏高。本研究分析在臺

灣海峽進行不定寬度、連續記錄之船隻穿越線調查的結果，發現若只以 300m 進行固定寬度穿越線時，會漏失約 22% 的資料，因此支持使用不定寬度穿越線法；我們並依距離採樣法導出主要鳥種或類群的偵測函數與 ESW 值，發現在 300m 內各類群被偵測到的比例介於 25% - 75% 間，顯示假設 300m 內偵測率為 100% 並不合適；另以模擬的方式，顯示鳥類相對於船隻的飛行速度可導致密度估值偏高 2 - 5 倍，並據此推估校正係數，作為計算海上鳥類密度的參考。

Vessel line-transect survey is a common method for estimating the abundance of birds at sea. In the European Seabirds at Sea (ESAS) guideline, flying birds are recorded with a snapshot method within a fixed-width strip, usually up to a distance of 300 m. However, bird density in the Taiwan Strait is much lower compared to European seas, such a method may result in considerable loss of data. Previous researchers have thus suggested that a conventional line-transect method with continuous observation would be more suitable for Taiwan. The decreasing detectability of birds with distance can be corrected by distance sampling. The continuous observation is not without disadvantage as the movement of birds can cause substantial bias. In this study, with data collected using conventional line-transect, we showed that a 300 m strip-transect would collect 22% fewer data compared to a line-transect. We analyzed the detection function of major bird species or species groups. Within a distance of 300 m, the overall detection probability was between 25% and 75%, indicating that assuming a complete detection within 300 m would underestimate the bird density. We also used simulation to quantify the bias caused by the movement of birds, and suggested correction factors for estimating bird density.

關鍵詞：離岸風電、海鳥密度、穿越線調查、距離採樣法、有效帶寬

Key words: Offshore wind farm; seabird density; transect survey; distance sampling; effective strip width

## 引言

為了減少碳排、緩和氣候暖化，利用風電已是全球的趨勢 (GWEC 2021)；臺灣政府對於風電的推動亦是不遺餘力，預定在 2025 年達到 4.2 GW 的目標裝置容量，其中 3 GW 將來自離岸風電 (經濟部能源局 2017)。在政策的鼓勵下，風機在臺灣西部海域如雨後春筍般增長，還有許多開發案正在評估規劃中。然而，離岸風電的開發可能會對鳥類生態帶來負面影響，主要的衝擊包括撞擊死亡 (collision)、棲地損失 (displacement)、屏蔽效應 (barrier effect) 等 (Drewitt & Langston 2006, Furness et al. 2013)。要釐清這些衝擊，經由標準化的調查方法了解開發海域的鳥類組成是最基本而關鍵的一步。

為了因應離岸風電環境影響評估之需求，近年臺灣海峽的海域鳥類調查大幅增加，但一直缺乏詳細而標準化的方法規範。環境影響評估的海域鳥類調查主要依據「動物生態評估技術規範」(行政院環境保護署 2011) 與「海洋生態評估技術規範」(行政院環境保護署 2007)，不過前者著重於陸域環境，並未考量海域調查的特殊性；後者則僅提及須記錄出現鳥

類之物種、數量、時間、地點等，並未規範方法。因此過去離岸風場的生態調查與監測雖已累積了許多海域鳥類資料，卻因方法不一而難以比較整合。2020 年國家海洋研究院推動「我國海洋生態調查監測網與監測規範建立之整體規劃」(林幸助等 2020)，對海洋整體不同棲地、不同生物類群架構了宏觀的監測系統；在對應於離岸風場 (大陸棚生態系) 海域鳥類調查的部分，建議使用不定寬度穿越線法或不定半徑定點計數法，以及應記錄鳥類之種類、數量、距穿越線或調查人員之距離、行為、出現點位座標等。而 2021 年海洋委員會海洋保育署推動之「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」(袁孝維與丁宗蘇 2021)，更進一步在回顧國外的海域鳥類調查準則後，提出包括樣區選擇、期程與頻度規劃、準備工作、調查執行方式、記錄表格與資料分析方法等建議，可做為海域鳥類調查的詳實指引。

「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」中建議留棲性鳥類的調查採用不定寬度、連續記錄之船隻穿越線調查，亦即調查人員並不預設穿越線寬度，持續在視野所及範圍內偵測並記錄鳥

類。在歐洲海鳥 (European Seabirds at Sea, ESAS; Tasker et al. (1984)、Camphuysen et al. (2004)) 與東加拿大海鳥 (Eastern Canada Seabirds at Sea, ECSAS; Gjerdrum et al. (2012)) 的調查準則中，則是採用有預設寬度的帶狀穿越線 (strip transect)。帶狀穿越線原則上涵括船隻行駛路線左右各 300m，調查者對範圍內停棲在海面的鳥採連續記錄，並註記每一隻鳥至穿越線中央的距離區間；對飛行中的鳥則採「快照式 (snapshot)」記錄，每隔一定時間間隔記錄 300 × 300m 方框內該瞬間的飛行鳥種與數量。穿越線帶寬與快照式記錄的範圍可依能見度調整；調查範圍可為船隻單側或兩側，視人力調整；快照式記錄的時間間隔視船速與調查空間尺度而定，可於 1-10 分鐘之間，以記錄方框的範圍不得重疊為原則。

今日歐洲與北美的海域鳥類調查方法經過長時間的修正與改進。早期在還沒有明確的海域鳥類調查準則時，調查者就是將航程沿線所見的海鳥全部記錄下來，類似不預設寬度的穿越線調查法，並以單位距離或單位時間目擊的隻數做為鳥類豐度的指標 (如 Brown et al. (1975))；不過，

由於鳥類被偵測的機率隨其體型與至調查者的距離而異，這樣的方法沒有明確的調查區域面積，也就無法導出單位面積的鳥類密度，在不同鳥種、不同調查計畫間難以比較整合。因此，自 1970 年代起逐漸形成以穿越線兩側 300m 為調查帶寬的共識，認定在這個範圍內的所有鳥類都可以完全被偵測 (如 Lensink et al. (1978))。不過，很快就有研究者注意到，對於比較小型且停棲在海面的鳥類，300m 內的偵測率無法達到 100%，會導致其密度被低估 (Briggs & Hunt Jr 1981)；其後距離採樣法 (distance sampling) 的演算分析逐漸成熟 (Buckland et al. 1993)，對停棲在海面的鳥類記錄其至穿越線的距離、推導偵測函數、估算 300m 內的實際偵測率以修正密度計算，就成為標準的做法。而對於飛行中的鳥類，在 ESAS 中假設飛行中的鳥在 300m 內可以完全被偵測，故不記錄距離；但此假設仍受到相當質疑 (Barbraud & Thiebot 2009, Bolduc & Fifield 2017)，故依據 ESAS 修訂的 ECSAS 對於飛行中的鳥類也要求記錄距離 (Gjerdrum et al. 2012)。

計算飛行中的鳥類密度還有另一項

挑戰，即海上有許多鳥類持續在飛行中，且速度相對於船隻快許多，因此會不斷有鳥類進入偵測範圍內而增加記錄到的數量，導致密度被高估。對此 Tasker et al. (1984) 提出了以快照法取代連續觀察，只記錄某個瞬間時特定空間上方的飛行鳥類隻數，排除鳥類移動的影響；這個方法計算簡便，也成為 ESAS 與 ECSAS 的標準。除了快照法外，Spear et al. (1992) 以幾何法解析在帶狀穿越線調查中鳥類速度與方向的效應，並推導出可用於修正密度估值的校正係數；Glennie et al. (2015) 則分析在距離採樣法的調查方式下鳥類飛行速度對密度的影響；使用這些數值方法進行估值修正，調查者就不需要同時以兩種方法分別調查飛行中與停棲海面的鳥，或是不需要兩組調查者分別執行不同項目的調查，在執行調查時較為容易且有效率。

「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」建議採用不定寬度穿越線，主要的考量是若限定穿越線帶寬會遺漏許多鳥種及個體 (袁孝維與丁宗蘇 2021)，尤其可能是較稀有、密度低的種類，因而損失寶貴的資訊 (Spear et al. 2004)。事實上，在有了距離採樣法之後，300m 的

帶寬設定已經完全沒有必要；ESAS 與 ECSAS 沿用 300m 帶寬，一方面有其歷史因素，另一方面也因為大西洋溫帶淺海的鳥類密度相當高，集中注意力於小區域是比較可行的調查方式，而在鳥類密度低的臺灣海峽並沒有這樣的問題。

距離採樣法需要記錄各鳥類被偵測時至穿越線的垂直距離，並累積足夠的資料量推估偵測函數。雖然不設定穿越線帶寬，分析偵測函數可以導出稱作「有效帶寬 (effective strip width, ESW)」的距離值，符合此距離內鳥類未被偵測到的機率和在此距離外鳥類被偵測到的機率相同之條件。得知 ESW 後，即可將穿越線的長度乘以 ESW 的 2 倍 (穿越線左右兩側) 做為有效調查面積，而將所記錄的鳥類數量除以此面積即可估算鳥類密度，因此 ESW 為穿越線調查法計算鳥類密度的重要參數。臺灣海峽鳥類密度低，資料累積不易，故「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」率先依據鳥類體型並參酌體色、飛行高度、速度、行為等資訊，基於專家經驗為各鳥種提出一距離參考值，稱為「有效察覺距離 (effective detection distance, EDD)」，代替 ESW 供國內調查

團隊分析密度使用；不過其亦指出 EDD 是使用鳥類到調查者的直線距離，以其代替 ESW 計算密度會有所偏誤 (Buckland et al. 2010)。另外，「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」建議採用連續記錄法而不用快照法，不過對於鳥類飛行速度造成的影響並未多作討論。

福爾摩莎自然史資訊有限公司自 2014 年起在臺灣海峽進行海域鳥類調查，使用不定寬度、連續記錄之船隻穿越線調查法，並依距離採樣法的原則記錄鳥類至穿越線的垂直距離。本研究的目的為 (1) 取資料量較多的鳥種或類群進行偵測函數的分析，導出 ESW 值與「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」中的 EDD 做比較討論；(2) 參考 Glennie et al. (2015) 的模擬，分析不定寬度、連續記錄的方法中，鳥類速度為船隻 2 - 4 倍時對密度估值的影響；與 (3) 參考 Spear et al. (1992) 的概念並結合以上結果，推估各鳥種可校正偵測率與速度影響的參數值 ( $ESW_{cor}$ )，作為計算鳥類密度的參考。

## 研究方法

### 鳥類船隻穿越線調查

鳥類船隻穿越線調查於 2014 年 8 月 - 2021 年 12 月間進行，範圍涵蓋臺灣海峽臺灣領海 12 浬外界線以內、新北市至台南市之間的範圍 (22.81 - 25.39°N, 119.53 - 121.83°E)。調查選擇在能見度 1km 以上、蒲氏海況 4 級以下 (風速 16 節以下、浪高 1m 以下) 的天氣進行，使用甲板高度 1 - 3m 的船隻，以 8 - 10 節的船速行駛於預先規劃的路線。每艘船有經過訓練的調查員 2 名以上，配備 GPS、具數位羅盤之手錶、具雷射測距功能之雙筒望遠鏡以及具 400 mm 以上望遠鏡頭之單眼數位相機，全程對不同方向進行觀察。如發現鳥類活動時，即記錄時間、鳥類的物種、數量、行為、飛行方向、飛行高度、與調查員的距離以及相對於調查員的方位等，並以 GPS 標定調查員座標。鳥類飛行方向以及相對於調查員的方位以數位羅盤測量。鳥類與調查員的距離在距離較近或鳥類體型較大時可使用測距望遠鏡測量，較遠時則根據調查員經驗估計；調查員在海上遇到船隻或如浮標等其他物體時，會時時使用測距望遠鏡測量距離，以訓練自身對距離的判準。由於海鳥通常距離遙遠且飛行迅速，不容易在海上即時

判別物種，因此儘可能以長鏡頭對所有出現的鳥類做拍照記錄，以便進一步做鳥種鑑定。

### 資料分析與 ESW 計算

首先將夜間、能見度低於 1km、船隻定錨與進出港口、或因其他事務可能未能專注於海鳥調查（例如遇見鯨豚而著重觀察鯨豚行為時）等時段的資料自分析中排除。針對每一筆目擊紀錄，使用調查員座標 ( $X_{obs}$ 、 $Y_{obs}$ )、鳥類與調查員的距離 ( $D_{obs}$ ) 以及鳥類相對於調查員的方位 ( $\theta$ )，可依下式計算出鳥類的絕對位置 ( $X_{bird}$ 、 $Y_{bird}$ )：

$$X_{bird} = X_{obs} + D_{obs} \times \cos((\pi/2) - \theta)$$

$$Y_{bird} = Y_{obs} + D_{obs} \times \sin((\pi/2) - \theta)$$

使用鳥類的絕對位置搭配 GPS 自動紀錄的船隻航跡，即可利用 R 之 rgeos 模組 (Bivand & Rundel 2019) 計算出鳥類至穿越線的垂直距離。

篩選目擊紀錄筆數大於 100 筆的鳥種或類群，依照距離採樣法之準則 (Buckland et al. 2001) 以 R 之 Rdistance 模組 (McDonald et al. 2019) 進行偵測函數 (detection function) 的分析。各類群資料截去超過分布 95% 的極值，分別以均

勻分布 (uniform distribution)、半常態分布 (half-normal distribution)、風險率分布 (hazard rate distribution) 與負指數分布 (negative exponential distribution) 做為模擬偵測函數的主函數 (key function)，並搭配餘弦級數 (cosine series)、簡單多項式級數 (simple polynomial series) 或赫米特多項式 (Hermite polynomial series) 做為可能之修正項。模式之適合度以卡方檢定 (chi-square goodness-of-fit test) 檢驗，使用赤池訊息準則 (Akaike's information criterion, AIC) 進行模式比較，並以自我重抽法 (bootstrapping) 估算 ESW 之 95% 信賴區間 (Buckland et al. 2001, Buckland et al. 2015)。

### 飛行速度效應模擬

鳥類飛行速度對距離採樣法密度估算的影響依據 Glennie et al. (2015) 以模擬的方式進行，並將各項參數（如船速、鳥類密度、調查者目視涵蓋的範圍等）依本研究之調查情境設定，且將目標物與調查者的速度比設在 2 - 4 間，以涵蓋一般調查條件下鳥類與船隻的關係。

模擬設定為船隻以 5m/秒（相當於每小時 18km 或 9.7 節； $V_s$ ）的速度行駛

20km 之穿越線，空間中鳥類密度為  $10^{-5}$  隻 /  $m^2$  ( $D_0$ )，鳥類起始位置與方向均隨機，以  $V_b$  的速度直線飛行。船隻行駛期間其上的調查者進行全方位連續觀察，其對每一隻鳥的偵測機率符合分布  $M$ 。當一隻鳥被判斷為「偵測到」時，即記錄當時其與穿越線的垂直距離。所探討的變項為鳥類飛行速度  $V_b$  與偵測機率分布  $M$ ： $V_b$  分別設定為 10、15 與 20 m/秒，涵括大部分鳥類的飛行速度範圍 (Alerstam et al. 2007)； $M$  為調查者發現不同距離的鳥類之機率，此分布會隨距離呈單調遞減 (monotonically decreasing)，此處使用的是鳥類至調查者的直線距離，即察覺距離，和距離採樣法之偵測函數使用鳥類至穿越線的垂直距離不同。為了瞭解不同的  $M$  是否會影響  $V_b$  與密度估值間的關係，分別測試參數不同的三種半常態分布 ( $\sigma = 100、200、300$ ) 與三種風險率分布 ( $\sigma = 200, \beta = 1、2、3$ )，並對所有  $V_b$  與  $M$  的組合分別進行 500 次模擬；其中參數  $\sigma$  與  $\beta$  的設定，是經由初步測試，使模擬樣本之 ESW 值範圍可以涵括前一節實際資料之 ESW 值，以求接近現實情況 (Glennie et al. 2015)。模擬程式以 python 建立。

每進行完一次模擬，即可得到一組「調查結果」，包含所有被偵測的個體在偵測到的當下與穿越線之垂直距離。將每一組模擬結果使用與上節所述相同的步驟，以 Rdistance 進行偵測函數分析與模式比較，並計算鳥類密度估值 ( $D'$ )。集合所有計算結果，即可分析 ( $D'/D_0$ ) 與 ( $V_b/V_s$ ) 的關係：

$$(D'/D_0) = f(V_b/V_s)$$

Spear et al. (1992) 將等式右側的數值定義為  $K$ ，並將  $K^{-1}$  稱作校正係數 (correction factor)。Spear et al. (1992) 所探討的是預設寬度的帶狀穿越線調查法，在算出  $D'$  後，將  $D'$  乘以  $K^{-1}$ ，即可修正速度效應估算出實際的密度。相同的觀念也可以應用在不等寬度之穿越線調查上；穿越線距離採樣法密度估算的公式為：

$$D' = N / (2 \times L \times ESW)$$

其中  $N$  為目擊的鳥類數量， $L$  為穿越線長度， $ESW$  為有效帶寬。則修正速度效應後的密度可表示為：

$$D_0 = D' \times K^{-1} = N / (2 \times L \times ESW \times K) \\ = N / (2 \times L \times ESW_{cor})$$

$ESW$  和  $K$  都是隨鳥種與調查方法而異的參數，將兩者相乘以  $ESW_{cor}$  表示，作為

同時校正偵測率隨距離遞減效應與速度效應的參數，即可使用原本的公式得到修正後的密度值。

## 結果

### 資料概述

8年中總計調查316趟次、513日次，經過篩選後可得有效鳥類資料筆數8,109筆。其中有1,762筆的鳥類位置落在距離穿越線300m以外，亦即若以300m為固定寬度進行調查時，會漏失約22%的資料。目擊當下鳥類停棲在海面上的紀錄筆數為693筆，約占9%，其餘91%目擊的鳥類皆在飛行中。

距離取樣法的分析以有效資料筆數大於100筆的物種、或是合併後有效資料筆數大於100筆的類群為分析對象，共分析大水薙鳥 (*Calonectris leucomelas*)、穴鳥 (*Bulweria bulwerii*)、黃頭鷺 (*Bubulcus ibis*)、黑尾鷗 (*Larus crassirostris*)、鳳頭燕鷗 (*Thalasseus bergii*)、白眉燕鷗 (*Onychoprion anaethetus*)、燕鷗 (*Sterna hirundo*)、小燕鷗 (*Sternula albifrons*)、紅領瓣足鷸 (*Phalaropus lobatus*) 與家燕 (*Hirundo rustica*) 10個物種與海燕科、鰹

鳥科、大型鷗類、小型鷸類 (瓣足鷸屬除外) 與中大型鷸類等5個類群。類群的合併以分類、體型以及在海上的判釋情況綜合界定：海燕科的目擊在海上大約有四分之三的紀錄無法判定至種，而在能判定的紀錄中有黑叉尾海燕 (*Hydrobates monorhis*) 與煙黑叉尾海燕 (*Hydrobates matsudairae*) 2種，體型、羽色與飛行行為近似，故將所有海燕科紀錄合併分析；鰹鳥科有藍臉鰹鳥 (*Sula dactylatra*)、白腹鰹鳥 (*Sula leucogaster*) 與紅腳鰹鳥 (*Sula sula*) 3種，體型與行為近似，合併以達到足夠的資料量。大型鷗類包括銀鷗 (*Larus argentatus*)、小黑背鷗 (*Larus fuscus*)、灰背鷗 (*Larus schistisagus*) 3種，即使有拍照紀錄也難以分別，其體型、羽色與飛行行為近似，故將其合併分析；鷸類之中，瓣足鷸屬容易辨識且行為特殊，經常停棲海面，且紅領瓣足鷸紀錄筆數多，故獨立分析；其餘的鷸類即使有拍照紀錄，無法判定物種的比例仍相當高，且有混群的現象；調查員在海上一般以「小型鷸類」、「中大型鷸類」記錄，兩類約以體長22公分為界，而調查結束後依據照片判釋，小型鷸類曾判釋出的

物種包括長趾濱鷸 (*Calidris subminuta*)、紅胸濱鷸 (*Calidris ruficollis*)、小環頸鷸 (*Charadrius dubius*)、東方環頸鷸 (*Charadrius alexandrinus*)、寬嘴鷸 (*Calidris falcinellus*)、環頸鷸 (*Charadrius hiaticula*)、黑腹濱鷸 (*Calidris alpina*)、磯鷸 (*Actitis hypoleucos*)、彎嘴濱鷸 (*Calidris ferruginea*)、三趾濱鷸 (*Calidris alba*)、灰瓣足鷸 (*Phalaropus fulicarius*) 與鷹斑鷸 (*Tringa glareola*) 等，中大型鷸類曾判釋出的物種包括鐵嘴鷸 (*Charadrius leschenaultii*)、翻石鷸 (*Arenaria interpres*)、反嘴鷸 (*Xenus cinereus*)、燕鷸 (*Glareola maldivarum*)、紅腹濱鷸 (*Calidris canutus*)、小青足鷸 (*Tringa stagnatilis*)、太平洋金斑鷸 (*Pluvialis fulva*)、黃足鷸 (*Tringa brevipes*)、大濱鷸 (*Calidris tenuirostris*)、赤足鷸 (*Tringa totanus*)、灰斑鷸 (*Pluvialis squatarola*)、青足鷸 (*Tringa nebularia*)、高蹺鷸 (*Himantopus himantopus*)、黑尾鷸 (*Limosa limosa*)、中杓鷸 (*Numenius phaeopus*)、大杓鷸 (*Numenius arquata*) 及靛鷸 (*Numenius madagascariensis*) 等。

### 距離採樣法分析

使用距離採樣法分析各鳥種 / 類群偵

測距離分布之結果如表 1，偵測函數如圖 1。對各鳥種 / 類群皆可找到合適的偵測函數 ( $p > 0.05$ )，各鳥種 / 類群的 ESW 值介於 73.7m (家燕) 至 353.7m (黃頭鷺) 之間，不過黃頭鷺的模擬結果較不理想，ESW 的標準誤差相當大。

若以 300m 作為截斷距離 (truncation distance)，則各鳥種在此區域內被偵測到的比例介於 25% - 75% 間 (表 1)；因此若使用 300m 帶狀穿越線調查法，並認定此範圍內所有的鳥類都被偵測到而以固定面積計算密度，會得出偏低的密度值。

### 飛行速度模擬

整理鳥類飛行速度模擬的結果 (圖 2)，顯示若使用距離採樣法分析飛行中的鳥類，會導致密度估值偏高，鳥類相對於船隻的移動速度愈快，密度估值偏高的程度就愈大。由於不同偵測機率分布時鳥類速度對密度估值的影響相近，因此合併不同偵測機率分布的模擬結果，將密度估值 ( $D'$ ) 與實際值 ( $D_0$ ) 的比值對鳥類速度 ( $V_b$ ) 與船速 ( $V_s$ ) 的比值作回歸：

$$(D'/D_0) = 1.136 \times (V_b/V_s) + 0.032$$

等式右側的計算值即為 K。

在臺灣，每秒 5m 是小型船隻進行海

域鳥類調查時常用的船速；以此代入上式中的  $V_s$ ，並自文獻中蒐集所討論的 15 種鳥種 / 類群之飛行速度，可計算各鳥種 / 類群的  $K$  值以及校正後之 ESW 值 ( $ESW_{cor}$ )，結果如表 2，其與袁孝維與丁宗蘇 (2021) 建議之有效察覺距離參考值 (EDD) 之比較如圖 3。

## 討論

### 影響 ESW 的因子

本研究根據多年的海域鳥類調查資料，分析了 15 種鳥種 / 類群在連續穿越線調查法中之 ESW 值。ESW 導自偵測函數，而偵測函數來自對目擊鳥類的距離紀錄，可能受到以下數種鳥類行為或調查方式的因子影響：

海上的鳥類可能單飛或結群，而愈大的群體愈容易在遠處就被偵測，因此在推導偵測函數時可加入群體隻數做為共變數分析 (Marques et al. 2007)。目前的資料中，各鳥種 / 類群加入群體隻數的模式並未較理想，且含共變數的偵測函數應用較複雜，無法直接以 ESW 值估算密度；加以鷺科、鸕鶿類等常有混群現象，應以混群的隻數進行偵測函數的分析為宜，但目

前部份資料無法明確得知混群的大小，故僅呈現未含隻數效應的結果，未來再對此課題做進一步探討。

許多海鳥有跟隨漁船以覓食的行為；若鳥類受到調查船隻的吸引，會導致所導出的 ESW 較小、密度估值偏高。根據調查團隊的經驗，主要是在進出港時或許由於特定的螺旋槳速度，特別容易打起小魚，此時常有燕鷗類尾隨覓食，不過港區的資料並未納入分析；觀察其他船隻，漁船在起網時常有燕鷗在上方盤旋；此外，已知澎湖在丁香魚季捕捉丁香魚時，會吸引大量的燕鷗類跟隨。海鳥可能在相當距離外就能辨別船隻是否在捕魚甚至所使用的漁法 (Ouled-Cheikh et al. 2022)，因此調查船隻吸引海鳥的情況相對輕微。ESAS 的準則也強調不應使用慣常進行漁業活動的船隻做為調查船，以減少吸引海鳥的效應 (Camphuysen et al. 2004)。

所使用的海上調查資料中，有約十分之一的調查趟次僅有 2 名調查員。當僅有兩名調查員時，調查員會時時側身轉頭以涵蓋至少 180 度的視域；這樣的操作可改善視野限制，但可能會使部分鳥類個體不是在第一時間被觀察到，因而記錄到較

近的偵測距離，導致 ESW 估值偏低。以調查員人數做為共變數進行偵測函數的分析，結果並沒有顯著的效應；不過資料量可能限制了此分析的結果，有 3 名以上的調查員同時調查仍是較理想的方式。

### 使用距離採樣法的必要性

由於歐洲的調查多根據 ESAS 準則，僅對停棲海面的鳥類進行距離採樣法的分析，故難以在歐洲的海域鳥類調查文獻中找到飛行中鳥類的偵測函數做比較；Bolduc & Fifield (2017) 根據 ECSAS 的準則進行加拿大東岸的海鳥調查，並將飛行中的海鳥分成空中群（包括北方塘鵝 *Morus bassanus* 和鷗科）與貼近海面的海雀科兩類，前者 ESW 約 230m，後者 ESW 約 170m，和本研究的分析結果大致相當。

以 300m 作為截斷距離，所分析的各鳥種 / 類群被偵測到的比例介於 25% - 75% 間；因此若假設 300m 以內的鳥類偵測率為 100% 而直接計算密度，即使對鯉鳥與大型鷗類等體形較大的類群也會有三分之一到四分之一的低估，對小型鸕鶿類或燕雀目更會低估 50% 以上。根據 Barbraud & Thiebot (2009) 在亞南極

地區進行的研究，即使如信天翁類翼展達 2m 以上的海鳥，300m 範圍內的偵測機率為 87%；Bolduc & Fifield (2017) 則指出飛行中的北方塘鵝和鷗科在 300m 內的偵測機率約 52%，海雀科約為 43%。這些資訊都顯示不宜認定 300m 內的偵測率為 100%。如果要以 300m 為帶寬進行帶狀穿越線調查，仍應記錄鳥類至穿越線的垂直距離，以進行偵測機率的分析；若已進行 300m 之帶狀穿越線調查但未記錄距離，則表 1 的「300m 內偵測率」可作為參考，將所記錄的隻數除以對應鳥種 / 類群的偵測率，以修正密度低估的問題。

### 飛行速度對密度估值的影響

以船隻進行連續記錄的穿越線調查時，由於海鳥的飛行會導致所估算出的密度偏高。這是由於同一隻海鳥和調查者的相對位置不斷在改變，而其有較大的機會在較接近調查者時被偵測到。因此相較於靜止的目標物，移動中目標物的被偵測位置會有較向穿越線中央集中的現象，對偵測函數產生類似壓縮的效應，因而導致算出較低的 ESW 值與較高的密度估值 (Glennie et al. 2015, Glennie et al. 2020)。

密度高估的程度和鳥類飛行速度與

船隻速度的比值有關，也會受到調查方法和實際偵測函數形狀的影響。本研究設定為不定寬度、連續記錄之穿越線調查；Spear et al. (1992) 曾分析 300m 帶狀穿越線調查下目標物移動速度的影響，Glennie et al. (2015) 則模擬過距離採樣法、調查者向兩側不限距離、但往前方僅搜尋一定距離的情況下移動速度的影響。由於調查方法設定不同，分析結果自然不同，不過密度高估程度和速度比值的關係，各分析結果的差異並不大：在鳥類飛行速度為船隻速度 2 倍時，密度會高估大約 2 倍左右 (Spear et al. 1992, Glennie et al. 2015)；在鳥類飛行速度為船隻速度 4 倍時，密度會高估約 4 倍左右 (Spear et al. 1992)。

本研究假設鳥類方向為隨機，而 Spear et al. (1992) 則另探討了當鳥類飛行方向與船隻行進方向成特定角度時的結果。當船隻與鳥類行進方向相同時，相當於鳥類的相對移動速度較低，造成的密度高估程度也較低；當船隻與鳥類反向行進時，相當於鳥類的相對移動速度變高了，造成的密度高估程度也會變高。在 Spear et al. (1992) 的分析中，鳥類與船隻同向與逆向移動時，K 值分別會有減 1 至加 1

的變化。

### 考量飛行速度校正的密度估算

使用船速每秒 5m、進行不定寬度、連續記錄之穿越線調查，並假設鳥類的飛行方向隨機，則常見的 15 種鳥種 / 類群因飛行速度導致的密度高估約在 2.46 - 3.76 倍之間。

比較調查結果分析所得的 ESW、加入速度效應修正的  $ESW_{cor}$  與「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」建議之有效察覺距離參考值 EDD，在各鳥種 / 類群都呈現  $ESW_{cor}$  大於 EDD 大於 ESW 的關係。EDD 依據的是鳥類與調查者間的直線距離，而距離採樣法的 ESW 是依據鳥類至穿越線的垂直距離，為前者乘以鳥類方位與穿越線方向夾角的餘弦，故 EDD 必然會大於 ESW。此外，較大型的鳥類如大水薙鳥、鰹鳥科、黑尾鷗、大型鷗類與鳳頭燕鷗等，EDD 大於 ESW 的程度似有偏高的現象；體型兩倍的鳥在兩倍距離外雖然與做為基準的鳥視角相等，但實際在海上，即使天氣良好，能見度依然會隨距離遞減，因此前者的被偵測機率會小於後者，故 ESW 並不會隨著體型的比例呈等比例增加，由 Barbraud & Thiebot

(2009)的結果也可得到同樣的推論。

若加上對鳥類飛行速度的修正，應使用於密度計算的值是  $ESW_{cor}$ ，而 EDD 皆小於  $ESW_{cor}$ ，亦即使用 EDD 做計算時會得出偏高的密度。鳥類飛行速度的效應對調查者而言並不直覺，但其對密度估值的影響相當大。目前海域鳥類調查的資料多是應用於離岸風場之環境影響評估；用於鳥類撞擊風險分析時，調查者若使用 EDD 計算密度，可將評估結果視為較保守的估值看待；若用於風場施工前、中、後的鳥類密度比較時，則需注意各時期使用的調查方法與密度計算方法的適切搭配，以得到正確的比較結果。

### 結論

我們認同「臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫」的建議，認為在臺灣海域進行海鳥調查時，適合採用不定寬度、連續記錄的穿越線調查法，並提供在此方法下 15 種常見鳥種 / 類群的  $ESW_{cor}$  作為密度計算的參數，可校正偵測率隨距離下降以及鳥類速度影響密度估值的效應。對於使用 300m 帶狀穿越線的調查資料，可參考所提供的 300m 內偵測率以修正密度；對於不同的調查船隻速度與鳥類

飛行速度，也可使用模擬結果之關係式計算合適的修正係數。不過須注意若所探討的鳥種為候鳥、且穿越線的方向平行其主要飛行方向時，修正係數會有較大的誤差。

### 致謝

感謝丁宗蘇老師對整個議題提供廣泛的討論與深入的見解，感謝 S. T. Buckland、E. Rexstad、L. Thomas 與 R. Glennie 對統計分析與模擬的指點與建議。資料累積自 8 年來調查團隊辛勤的海上調查，調查員黃嘉祥、池文傑、邱于祐、馬英普、謝宜蓉、毛藝臻、黃盈修、陳彥甫、鄧謙等，謹向每一位在風吹日曬中執著地立在甲板上的調查員致敬。

### 參考文獻

- 行政院環境保護署。2007。海洋生態評估技術規範。行政院環境保護署。
- 行政院環境保護署。2011。動物生態評估技術規範。行政院環境保護署。
- 林幸助、邵廣昭、黃守忠。2020。我國海洋生態調查監測網與監測規範建立之整體規劃。國家海洋研究院委託研

- 究報告。
- 袁孝維、丁宗蘇。2021。110 年度臺灣保育類海鳥開發衝擊因應措施評估計畫。海洋委員會海洋保育署研究報告。
- 經濟部能源局。2017。風力發電四年推動計畫。行政院經濟部能源局。
- Alerstam, T., M. Rosén, J. Bäckman, P. G. P. Ericson, and O. Hellgren. 2007. Flight speeds among bird species: Allometric and phylogenetic effects. *PLoS Biology* 5: e197.
- Barbraud, C. and J. B. Thiebot. 2009. On the importance of estimating detection probabilities from at-sea surveys of flying seabirds. *Journal of Avian Biology* 40: 584-590.
- Bivand, R. and C. Rundel. 2019. Rgeos: Interface to geometry engine - open source ('geos'). R package version 0.5-1. <https://cran.R-project.org/package=rgeos>.
- Bolduc, F. and D. A. Fifield. 2017. Seabirds at-sea surveys: The line-transect method outperforms the point-transect alternative. *The Open Ornithology Journal* 10: 42-52.
- Briggs, K. and G. Hunt Jr. 1981. Seabirds: Details of strip censusing techniques. pp. 257-276. In: Summary report 1975-1978: Marine mammal and seabird survey of the southern California bight area. Department of the Interior, Bureau of Land Management, California.
- Brown, R. G. B., D. N. Nettleship, P. Germain, C. E. Tull, and T. Davis. 1975. Atlas of eastern canadian seabirds. Canadian Wildlife Service, Ottawa.
- Buckland, S. T., D. R. Anderson, K. P. Burnham, J. Laake, D. Borchers, and L. Thomas. 2001. Introduction to distance sampling: Estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, USA.
- Buckland, S. T., D. R. Anderson, K. P. Burnham, and J. L. Laake. 1993. Distance sampling: Estimating abundance of biological populations. Chapman and Hall, London.
- Buckland, S. T., A. J. Plumptre, L. Thom-

- as, and E. A. Rexstad. 2010. Line transect sampling of primates: Can animal-to-observer distance methods work? *International Journal of Primatology* 31: 485-499.
- Buckland, S. T., E. A. Rexstad, T. A. Marques, and C. S. Oedekoven. 2015. *Distance sampling: Methods and applications*. Springer, New York.
- Camphuysen, C., A. Fox, M. Leopold, and I. K. Petersen. 2004. Towards standardised seabirds at sea census techniques in connection with environmental impact assessments for offshore wind farms in the UK. COWRIE, Texel.
- Drewitt, A. L. and R. H. W. Langston. 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148: 29-42.
- Furness, R. W., H. M. Wade, and E. A. Masden. 2013. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of Environmental Management* 119: 56-66.
- Gjerdrum, C., D. A. Fifield, and S. I. Wilhelm. 2012. Eastern Canada seabirds at sea (ECSAS): Standardized protocol for pelagic seabird surveys from moving and stationary platforms. Canadian Wildlife Service, Atlantic Region.
- Glennie, R., S. T. Buckland, R. Langrock, T. Gerrodette, L. T. Ballance, S. J. Chivers, and M. D. Scott. 2020. Incorporating animal movement into distance sampling. *Journal of the American Statistical Association* 116: 107-115.
- Glennie, R., S. T. Buckland, and L. Thomas. 2015. The effect of animal movement on line transect estimates of abundance. *PLOS ONE* 10: e0121333.
- GWEC. 2021. Global wind report 2021. Global Wind Energy Council. Retrieved from <http://www.gwec.net/> on 2021/9/21.
- Lensink, C. J., P. J. Gould, C. S. Harrison, and D. J. Forsell. 1978. Distribution and abundance of marine birds: South and east Kodiak island waters. US Fish and Wildlife Service, Coastal Ecosystems, Anchorage.

- Marques, T. A., L. Thomas, S. G. Fancy, and S. T. Buckland. 2007. Improving estimates of bird density using multiple-covariate distance sampling. *The Auk* 124: 1229-1243.
- McDonald, T., J. Carlisle, and A. McDonald. 2019. Rdistance: Distance-sampling analyses for density and abundance estimation. R package version 2.1.3. <https://cran.R-project.org/package=Rdistance>.
- Ouled-Cheikh, J., F. Ramírez, M. Sánchez-Fortún, A. Cortejana, C. Sanpera, and J. L. Carrasco. 2022. Fishing activities shape the flight behaviour of an opportunistic predator species. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 278: 108089.
- Spear, L., N. Nur, and D. G. Ainley. 1992. Estimating absolute densities of flying seabirds using analyses of relative movement. *The Auk* 109: 385-389.
- Spear, L. B., D. Ainley, B. Hardesty, S. N. G. Howell, and S. W. Webb. 2004. Reducing biases affecting at-sea surveys of seabirds: Use of multiple observer teams. *Marine Ornithology* 32: 147-157.
- Tasker, M. L., P. H. Jones, T. Dixon, and B. F. Blake. 1984. Counting seabirds at sea from ships: A review of methods employed and a suggestion for a standardized approach. *The Auk* 101: 567-577.

表 1 距離採樣法分析結果：各鳥種 / 類群之偵測函數、ESW 估值以及 300 公尺內之偵測率。  
 Table 1 Test statistics of detection function, the effective strip width (ESW), and the detection rate within 300 m of each taxon.

物種	偵測函數	適合度檢定			AIC	ESW (m)	ESW se	300 m 內偵測率
		Chis q	df	p				
大水薙鳥	hazard-rate	1.84	4	0.76	2422.0	233.1	17.3	0.59
	half-normal +							
穴鳥	cosine	2.67	3	0.44	859.5	198.9	14.7	0.54
	half-normal +							
海燕科	cosine	1.71	3	0.63	395.4	195.4	17.5	0.58
	half-normal +							
鯉鳥科	cosine	7.70	6	0.26	321.1	306.8	25.8	0.75
黃頭鷺	hazard-rate	3.06	6	0.80	402.0	353.7	131.8	0.62
	half-normal +							
黑尾鷗	cosine	5.82	4	0.21	397.3	199.3	18.0	0.57
	hazard-rate +							
	simple	6.97	4	0.14	1225.4	260.5	23.0	0.67
大型鷗類	polynomial							
	half-normal +							
鳳頭燕鷗	cosine	4.38	5	0.50	3355.8	216.2	5.3	0.61
	hazard-rate +							
白眉燕鷗	Hermite	3.28	5	0.66	2204.9	183.0	28.5	0.47
	half-normal +							
燕鷗	cosine	0.60	3	0.90	1203.2	177.7	10.5	0.50
小燕鷗	hazard-rate	4.65	3	0.20	681.2	168.8	13.9	0.52
	half-normal +	10.6						
紅領瓣足鵞	cosine	2	5	0.06	1110.2	130.2	4.8	0.41
小型鵞鵝類	hazard-rate	2.12	4	0.71	359.7	138.2	22.9	0.42
中大型鵞鵝類	half-normal +							
	cosine	3.70	6	0.72	302.3	239.2	25.5	0.64
家燕	hazard-rate	7.33	3	0.06	2705.0	73.7	2.5	0.25

表 2 各鳥種 / 類群之飛行速度、校正係數 (K)、ESW 計算值 (ESW)、經過飛行速度校正後的 ESW 值 (ESW<sub>cor</sub>) 與 ESW 建議值 (EDD)。

Table 2 Flight speed, correction coefficient (K), ESW derived from the conventional distance sampling method (ESW), the ESW after flight speed correction (ESW<sub>cor</sub>), and the effective detection distance (EDD) suggested in Yuan and Ding (2021) for each taxon.

物種	飛行速度 <sup>1</sup> (m/s)	K	ESW (m)	ESW <sub>cor</sub> (m)	EDD (m)
大水雜鳥	14.1	3.24	233.1	754.2	500
穴鳥	11.9	2.74	198.9	544.1	300
海燕科	11.1	2.55	195.4	499.0	200
鯉鳥科	16.4	3.76	306.8	1153.0	800-900
黃頭鷺	14.0	3.21	353.7	1136.4	600
黑尾鷗	14.7	3.37	199.3	672.0	500
大型鷗類	12.6	2.89	260.5	754.1	600
鳳頭燕鷗	13.7	3.14	216.2	679.9	500
白眉燕鷗	12.1	2.78	183	508.9	300
燕鷗	12.1	2.78	177.7	494.2	300
小燕鷗	10.9	2.51	168.8	423.4	200
紅領瓣足鵲	13.1	3.01	130.2	391.7	200
小型鵲鴿類	10.9	2.51	138.2	346.7	100-200
中大型鵲鴿類	13.1	3.01	239.2	719.6	200-600
家燕	10.7	2.46	73.7	181.5	100

<sup>1</sup> 飛行速度參考 Alerstam et al. (2007)：對於名列其附錄中的鳥種，直接採用其飛行速度數值；對於未名列其附錄中的鳥種，根據其中之回歸式以體重估算；對於多種合併之類群則以其組成鳥種分別估算速度後求其平均值。

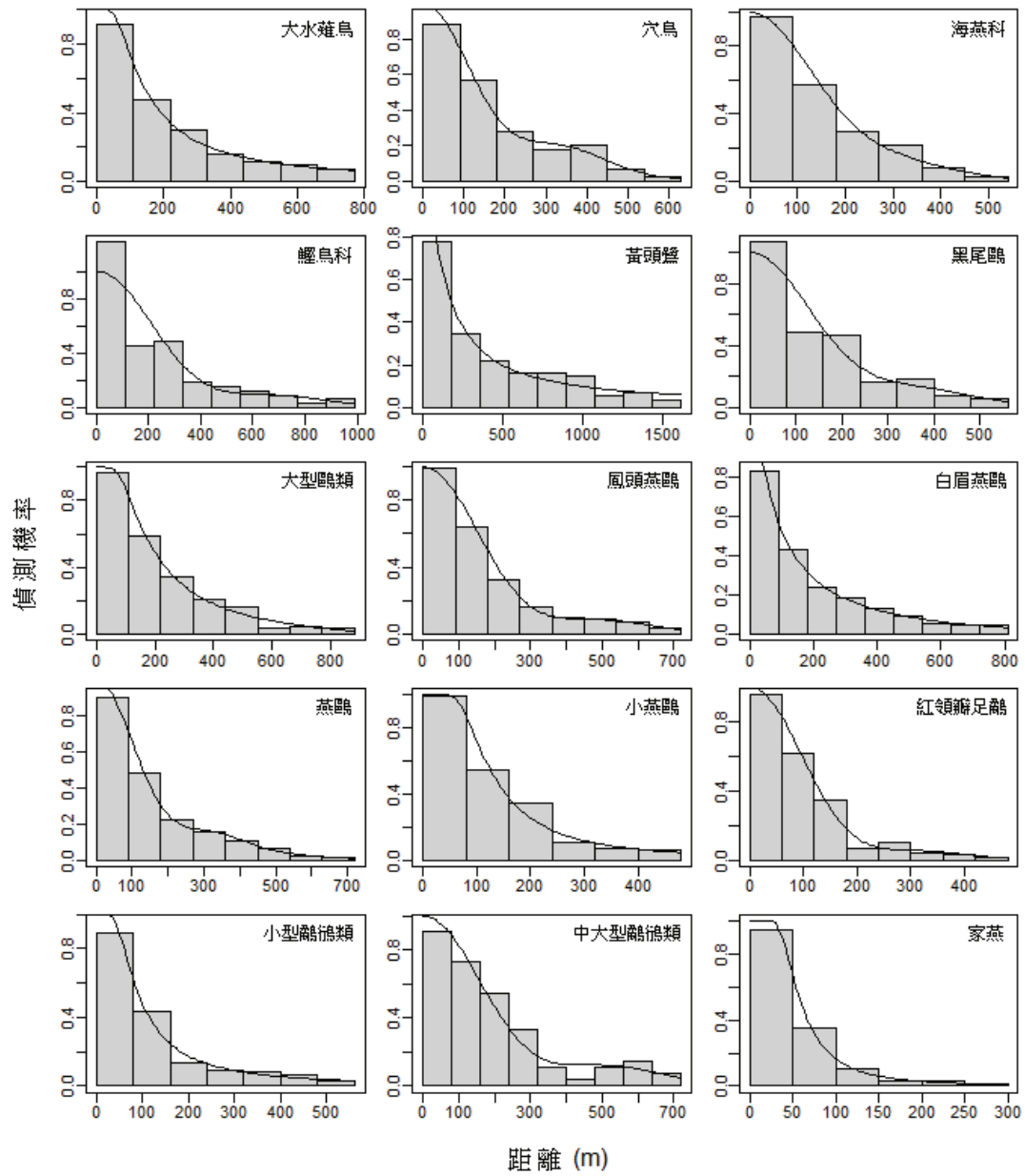


圖 1. 各鳥種 / 類群之最適切偵測函數。  
 Figure 1 The detection function of each taxon.

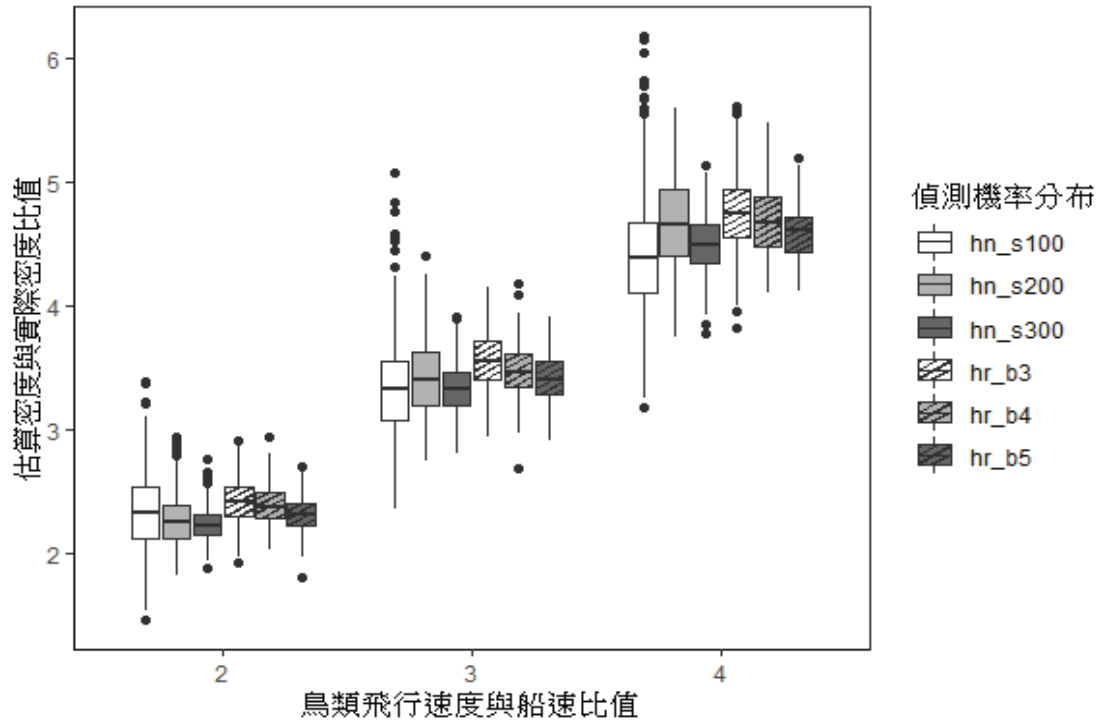


圖 2. 不同偵測函數下，鳥類相對於船隻的飛行速度對密度估值的影響。hn 與 hr 分別表示半常態分布與風險率分布，s 為半常態分布之參數  $\sigma$ ，b 為風險率分布之參數  $\beta$ 。

Figure 2 The relationship between the ratio of estimated bird density to actual bird density and the ratio of bird flight speed to vessel speed. hn and hr denote the half-normal distribution and the hazard rate distribution, respectively. s denotes the parameter  $\sigma$  in the half-normal distribution. b denotes the parameter  $\beta$  in the hazard rate distribution.

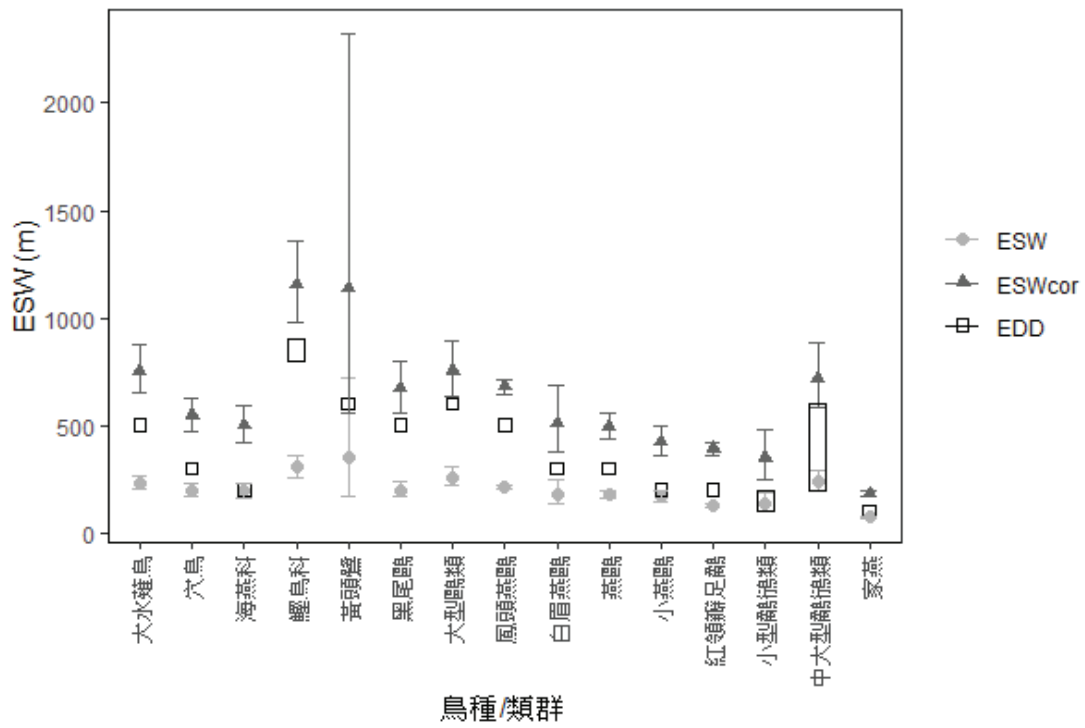


圖 3. 各鳥種 / 類群 ESW 計算值 (ESW)、經過飛行速度校正後的 ESW 值 (ESW<sub>cor</sub>)、與 ESW 建議值 (EDD) 比較；ESW 與 ESW<sub>cor</sub> 顯示之誤差線為 95% 信賴區間。

Figure 3 The ESW derived from the conventional distance sampling method (ESW), the ESW after flight speed correction (ESW<sub>cor</sub>), and the effective detection distance (EDD) suggested in Yuan and Ding (2021).