



海洋魚類追蹤的方法、限制與未來展望

周爰瑱

水產試驗所東部漁業生物研究中心

海洋魚類追蹤之重要性

於 1968 年，Harden Jones 首次提出了海洋魚類生命周期中的洄游運動模式。隨後，Cushing 在 1975 年和 1982 年將這一模式與海洋環境因子相結合，形成了著名的海洋魚類生命周期三角洄游模式（圖 1）。根據這一模式，卵和仔稚魚經過浮游期，離開產卵場，前往育幼場，在此期間與成年魚群在覓食地相遇。最終，魚群將再次洄游回產卵場進行繁殖。其中，仔稚魚階段被視為生命周期中的關鍵時期，被廣泛認為是影響物種分布範圍和豐度的主要因素（DiFranco et al., 2015）。科學家們透過瞭解魚卵和仔稚魚的時空分布，能夠有效地進行漁業管理和物種保護的工作（Hining, 2000; Sakamoto et al., 2019）。

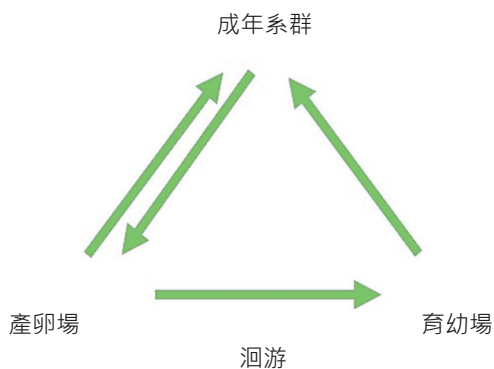


圖 1 生活史的三角形洄游模式 (Harden, 1968)

近年來，隨著氣候變遷和海洋暖化等現象的加劇，這些變化可能會進一步影響魚類的洄游行為和棲地選擇。因此，了解魚類個體和種群的分布情況及其所處的溫度和位置，一直以來都是漁業科學中的重要議題（Block et al., 2005; Brennan et al., 2015; Tsukamoto & Nakai, 1998）。

傳統的魚類追蹤技術

傳統的海洋魚類運動的研究方法主要是通過觀察不同體型大小的魚類分布和豐度，進而推估其運動路徑（Dorf & Powell, 1997）。然而，由於分布、豐度、大小等可能受到樣本採集的方式的影響而產生誤差，不能反映魚類的真實移動情形（Elsdon & Gillanders, 2003），因此，難以完全準確的重建洄游模式。

為了追蹤海洋魚類的洄游運動，外部標識（圖 2）也應用於追蹤海洋魚類的洄游運動（Morton et al., 1993）。這類研究可以提供關於種群運動距離及移動時間的假設，但標識器回收困難造成無法達到預期的研究效益，這是目前最大的挑戰之一。專門雇用船隻和人力進行標識器回收的成本也限制了重新捕獲的樣本量，即便鼓勵商業漁船協助交回標識器是一種相對符合成本效益的方法，



圖 2 外部標識器

但重新捕獲的機率可能會受經濟性魚種高捕獲率—如只捕高經濟價值的鮪類、禁漁區而出現偏差。它可能只反映出更多商業船隊的活動，而非魚類遷移的真實範圍 (Bolle et al., 2005)，這使得許多標識實驗成本高、回報低或結果有偏差。此外，重新捕獲的時間尺度從幾個月到幾年不等，從釋放到重新捕獲的期間無法收集到魚的資料，這意味著這些方法不允許對運動模式進行完整重建。

電子標識器的發展及限制

隨著儲存式電子標識器技術的發展，包括數據儲存標識器 (data storage tag, DST)、無線電和聲學發射器以及彈脫式衛星標識器 (Pop-up satellite archival tags, PSAT)，增加了記錄環境因子及地理位置的能力，目前已廣泛地應用於魚類遙測研究，成功建立許多完整、準確的洄游模式。以下對各種標識器進行介紹：

一、數據儲存標識器 (DST)

數據儲存標識器是帶有傳感器的標識器，可以以每 1—15 分鐘的頻率紀錄海洋魚類所處的環境、位置和生理等數據 (Thorstad et al., 2013)。儲存式電子標識器解決了一個問題：即使被標記的魚不需要重新捕獲，仍然能夠準確記錄魚的運動，而且也不會受限於漁業活動，可以更真實的反應魚類之洄游行為。

二、無線電遙測

典型的系統包括一個具有獨特聲音信號的發射器和一個接收器，當標識之魚體長時間處於近距離範圍內時，可以透過接收信號以達到辨別個體及定位的功能。這兩種型式的遙測可以提供被標記的動物所經歷的環境數據，如深度和溫度，這些數據並可通過即時衛星或是接收器下載。現代標識器的直徑可以小到 5 mm，並已成功應用於不同生活階段的海洋動物 (Arnold & Dewar, 2001)。然而，這種技術不能用於魚類的所有生命階



段；當需要大範圍或長時間的追蹤時，仍然受到傳感器尺寸和電池容量的限制，儘管對具有商業重要性的魚種產生可靠的資訊數據，但在種群識別、種群評估的應用仍然相當有限，受限於該方法僅能提供已有線的棲地特徵 (Thorsteinsson, 2002; Hobday et al., 2009; Trolliet et al., 2014; Brownscombe et al., 2022)。最後，發射器和接收器相對昂貴，許多研究的資金限制往往導致樣本量較小。一家公司製造的發射器往往不能兼容於別家公司製造的接收器，這導致可被能收集到被標記的魚的運動數據的機會更少 (DeCelles & Zemeckis, 2014)。

三、彈脫式衛星標識器 (PSAT)

該標識器通過衛星網絡，進行上傳和壓縮數據。當標識器監測深度達預先設定的釋放時間或深度時，它將彈出並開始向 ARGOS 衛星傳輸數據的摘要。接著，這些衛星將數據傳輸到地球上的基地站。因此它能收集魚

的環境資訊，如光照、壓力、溫度和魚彈出時的位置，儲存的光照、溫度和深度數據可被用於計算魚在被標識和彈出位置之間的運動 (Thorstad, 2013)。使用彈脫式衛星標識 (圖 3) 已被證明對識別和重現大型魚類如大西洋黑鮪的遷移歷史很有價值 (Block et al., 2005)。但是需要以外部標識的方式，限制了可標記的魚的大小和種類。幼魚的長度大多小於 10 mm。然而，最小的標籤超過 100 mm，所以幼魚不適合使用外部標識器，但即使標識器足夠小，無論將標識器插入身體或使用外部附著的方式都可能影響魚類的生長、健康和生存 (Ross & McCormick, 1981)，並且有更高的糾纏風險，侵蝕鱗片或肌肉和細菌感染。亦可能造成增加阻力進而影響魚的行為和游泳能力。此外，在仔稚魚階段的高死亡率 (61.3%) 將限制可用的樣本量 (Garrido et al., 2015)。因此，目前使用人工標識追蹤仔稚魚仍有相當的困難。



圖 3 彈脫式衛星標識器

每種方法都有其優缺點 (表 1)。傳統的外部標籤方法需要在放流後再次捕獲樣本，這種方法適用於大量樣本，能夠提供廣泛的地理和季節分布資料，但不適用於小魚，且精確度受樣本回收率的影響。數據儲存標識器是另一種方法，它們配備了傳感器，可以收集和儲存環境數據，如溫度和深度，有些甚至可以監測生理數據，如心率和體內溫度。然而，這種方法在位置準確性方面可能存在問題，因為光強度變化可能受到雲層、水的透明度和魚游動深度的影響。無線電和聲學發射器方法不需要再次捕獲樣本，可以固定在海洋動物身上，提供周圍水域特徵資

料，並可以透過衛星或接收器下載。然而，這種方法不適用於整個魚類生活史階段，且標識器尺寸和電池體積受到限制，使得數據處理和操作變得困難。彈脫式衛星標識器方法不需要再次捕獲樣本，可以提供周圍水域特徵資料，並可透過衛星或接收器下載數據。然而，這種方法的成本較高，可能導致樣本量較小，且標識器可能對生物生長、健康和生存產生影響，主要適用於成體。

總之，不同的標識方法各有優勢和限制，研究人員需要根據研究目標和海洋生物的特點來選擇最適合的方法，以獲得更準確、全面的研究結果。

表 1 各種標示器的優缺點

標示器種類	是否需要再捕獲	優點	缺點	價格(元)
傳統的外部標籤	需要	- 可適用樣本數大的情況 - 提供廣泛地理及季節分布 - 不適用於小魚 - 標識可長時間保留	資料的精準度受到樣本回收 - 再捕獲率的影響	5-30
數據儲存標識器	需要	有傳感器來收集和儲存溫度和深度等環境數據。有些類型甚至可以被監測和儲存生理數據，如心率和體內溫度	以光強度判定的位置準確性可能存在問題，因為偏差可能來自雲層、水的不透明度差異以及魚可能游動的深度	20,000-50,000
無線電和聲學發射器	不需要	- 可以固定於幼年和成年海洋動物身上 - 提供標記動物所經歷的周圍水域特徵 - 可透過衛星或接收器下載 - 可以與近距離範圍內的標識器通信並記錄其詳細資訊	- 不適用於魚類整個生活史階段 - 標識器尺寸和電池體積仍然受到範圍或長時間傳輸的限制 - 大量數據會使數據的儲存、處理和操作變得非常困難 - 幾乎沒有採用標準化的分析方法 - 發射器和接收器價格昂貴，無法被其他公司製造的接收器檢測到，這通常會導致樣本量較小	3,000-6,000
彈脫式衛星標識器	不需要	- 提供標識動物所經歷的周圍水域特徵 - 可透過衛星或接收器下載 - 可以與近距離範圍內的標識器通信並記錄其詳細資訊	- 標識器很貴 - 標識器可能會影響生物成長、健康和生存 - 受到尺寸限制，主要仍適用於成體	15,000-200,000



天然標識方法的發展與限制

因為上述這些人工標識研究技術在海洋魚類追蹤所遇到的一些問題及限制，天然的標識方法受到了更多的關注 (Elsdon & Gillanders, 2003)，這些天然標識方法包括氨基酸同位素分析 (Steffan et al., 2013)、寄生生物追蹤技術、遺傳基因追蹤技術、形態特徵以及硬組織的化學成分和同位素追蹤 (Campana, 1999)。其中耳石化學法是一種有效的標識方法，可用來區分魚類種群。耳石為魚內耳中的碳酸鈣結構，它具有很多優點，例如可以提供環境化學因子的時間紀錄，因此可用於重建遷移模式。此外，耳石元素不會再被吸收使用，可以用來記錄整個魚類生命歷程，並廣泛應用於魚類年齡和生長研究。但更重要的是，耳石可廣泛應用於魚類年齡和生長研究，使得樣本容易取得，並同時可以獲得耳石結構、生長和環境化學等大量所需研究資訊。與大多數生物性結構相比如骨骼鱗片等，耳石礦物性質相對單純。高達 95% 的耳石為碳酸鈣 (CaCO_3) 組成。在耳石中共可檢測出 50 種元素和 Th、Ra 等放射性元素。耳石還包括微量元素 Na、Sr、K、S、N、Cl 和 P，隨著分析技術及檢測能力的快速提高現在已經可以檢測到更多低於 1 ppm 的元素 (Bulska & Ruszczyńska, 2017; Campana, 1999)。雖然考慮到耳石的環境異質性和檢測水平時，只有少數元素，包括 Li、Mg、Mn、Cu、Zn、Sr 和 Ba，可以被用於追蹤魚類的棲息地 (Sturrock et al., 2012)。目前微量元素濃度已被證明可以做為了解魚類出生起源地 (Fowler et al., 2020)、

區分種群結構和種群 (Turan, 2006; Wang et al., 2018)、重建族群洄游模式的寶貴工具 (Secor et al., 2018)。

然而，最近的許多研究已經注意到，飲食、個體發育和遺傳學可能會混淆對耳石化學成分的解釋，從而扭曲所得出的推論。過去認為微量元素的來源主要來自於周圍的水，所以飲食的影響一直可以忽略不計。最近有一些實驗研究指出，水或飲食來源對耳石的相對貢獻存在相當大的差異 (Jansen et al., 2015; Sturrock et al., 2012a; Walther & Thorrold, 2006)。這意味著即使魚類生活在相同的棲息地，飲食也可能導致產生不同的耳石化學成分。食物鏈造成的生物累積會加劇飲食造成的影響。因此，飲食會對重建遷徙歷史產生干擾。另一方面，關於個體發育，魚類在整個生命過程中都表現出耳石化學的一致變化。元素結合至耳石是一個複雜的多階段過程，涉及離子在四個主要界面上的移動：環境-血液、血液-血液結合蛋白、血液-內淋巴和內淋巴-耳石。來自環境中的鐵通過鰓或腸攝取穿過鰓膜或腸壁進入血漿，接著穿過內耳膜進入內淋巴液，最後進入耳石的生長表面 (Campana, 1999; Jansen et al., 2015; Kalish, 1989; Payan et al., 2004; Payan et al., 1999; Sturrock et al., 2012; Izzo et al., 2015; Grammer et al., 2017; Reis-Santos & Gillanders, 2018)。雖然具體過程未知，但已有一些證據顯示年齡相關的生理變化可能會影響元素的攝取和結合 (Sturrock, 2012)。另外，隨生長速率和魚類生命階段不同影響耳石沉澱率，最終可能導致耳石元素組成的變化 (Miller & Hurst, 2020)。遺傳對耳石元素

比例在耳石化學物質中也相當重要。所以，耳石元素結合是內在因素和外在因素之間複雜相互作用的結果，造成很難預測標識的變異性。因此微量元素方法目前僅限制於測試不同種群之間個體或魚類種群間最可能的匹配，而不是重建遷徙歷史的絕佳工具。另外由於耳石化學分析中常用元素（例如 Mg、Ca、Sr）分布相對均勻，技術上的困難也限制了在海洋環境中的應用。並無法檢測到小尺度之間的差異 (Sturrock, 2012)。

總結來說，原則上，魚類耳石中微量元素的年齡分析可以反映出從孵化前到死亡期間周圍水域的化學成分，從而提供魚類所處環境和時間尺度的詳細記錄。然而，在實踐中，這種化學記錄的分析和解釋仍然未知，主要是因為水和耳石之間的生理反應及技術層面的困難。

未來展望

本所東部漁業生物研究中心多年來長期耕耘東部大洋魚類之標識放流研究，成果斐然，為臺灣太平洋區重要的海洋研究站。更與日本學界業界及美國學界保持密切合作，共同合作研究，並參與國際組織為全球漁業管理作出貢獻。為了可以進一步研究魚類的洄游及棲地遷移行為，結合人工標識及天然標識以得到更高解析度極更精確的資料是相當重要的，一般來說，天然標識提供生態時間框架（即個體壽命），而人工標識器則可以提供確切及高解析的環境資訊及地理位置，與耳石化學成分的結合可以改善庫存結構估計並生成與管理工作最相關的資訊（例

如 Miller 等人，2010a）。事實上，這些標識的結合使用已經證實了耳石化學的大範圍地理定位能力 (Darnaude et al., 2014)。除了人工標識提供的重要個體資訊外，它們還是有價值的資產，可以在野外驗證環境變量（例如溫度和鹽度）對耳石化學成分的影響，並作為等值景觀驗證的關鍵組成部分。隨著技術的進步，可以合理預期數據儲存標籤和衛星檔案標籤將變得更加普遍且尺寸更小，再次擴大應用範圍和檢索資訊及它們與自然標記的潛在整合 (Block, 2005; Brown et al., 2011)。在過去幾十年中耳石化學成分的分析技術在採樣及分析技術的進步，已經成功的提高樣本分析之準確性和精確度，在樣品採集空間分辨率同樣有重大的進步 (Pécheyran et al., 2014)。

但耳石化學仍然是一個發展中的研究領域，目前主要應用於魚類種群的劃定。然而，沒有一個單一的標記可以明確地解決所有的問題。結合不同和可能互補的技術的整體方法，持續發展相關的追蹤技術，耳石化學可能是可以將個體追蹤擴展到將管理和生物學觀點整合到種群定義中的關鍵工具，因為它可以識別產卵群、出生起源和遷徙模式，因此可以提供有關複雜種群結構和具有生物學意義的關鍵細節 (Zemeckis et al., 2014)。最終，種群劃定應考慮種群的時空動態及其與物理和生物成分的可變相互作用，並與基於生態系統的漁業管理方法的管理要求同時發展，以達到以科學建構的數據及模型，提供漁業管理單位關於種群結構及資源評估的目標。