



FROM SPACE OBSERVATION TO SPECIES
DISTRIBUTION: REMOTE SENSING OPENS
NEW FRONTIERS IN ECOLOGY

從太空觀測到物種分布： 遙測開啟生態學新視野

呂明倫 Ming-Lun Lu |

農業部生物多樣性研究所副研究員 | alan@tbri.gov.tw

黃靜宜 Jing-Yi Huang |

農業部生物多樣性研究所副研究員



前言

簡單來說，遙測(remote sensing)是一種透過衛星、無人機或飛機等設備，在空中做遠距離觀測的技術。這項技術讓研究人員無需親自深入野地，就能快速且有效地獲取從全球尺度到局部區域的環境數據，例如植被狀態、地形、地表溫度和降水量等。得益於近年衛星觀測系統的快速發展(如歐盟哥白尼計畫的Sentinel系列與NASA的Landsat系列)，全球陸地表面已可實現高頻、重複且多尺度解析度的影像覆蓋。這些持續累積的數據在生態學研究、資源管理及環境決策等領域具有廣泛應用，特別是在物種分布模型(species distribution model, SDM)的建構上發揮關鍵作用。隨著遙測技術的進步，科學家能夠更精確地預測物種的潛在棲地，進而應用於生物多樣性保育、棲地管理及氣候變遷研究等領域。

◀ 遙測是一種在空中做遠距離觀測的技術。(呂明倫 攝)

什麼是物種分布模型？

傳統的物種分布的調查方式主要仰賴人力實地觀察。這樣的做法雖然精確，但有幾個限制，例如調查範圍局限或很多偏遠地區難以進入，甚至可能錯過隱藏在森林深處的物種；此外，通常需要耗費大量的人力與資源。SDM是一種基於已知物種出現紀錄與環境變數之間的統計或機器學習關係，推估其潛在地理分布範圍的建模方法，建構SDM的基本步驟包括「記錄生物的蹤跡」、「蒐集環境變數」、「建立數學模型」和「預測物種分布」。舉例

來說，假設科學家在某座山區發現黑熊，並確實記錄出沒的座標位置，另一方面，透過網路上公開的環境資料，研究者可以蒐集到該山區的氣候、植被及地形等環境條件。當所有的物種紀錄與環境資料都備好後，研究人員便能透過機器學習或統計方法，找出影響黑熊分布的關鍵因子，從而預測其他可能適合牠們棲息的區域。

由於環境資料是構建SDM的關鍵要素，以往常用來建模的環境變數包括氣候、土壤、水文、土地利用等，這些數據通常來自政府機



構或研究單位的長期監測數據；然而，事實上其應用上仍存在諸多限制。首先，許多環境變數的空間解析力較低，無法精確反映小尺度的環境異質性特徵，例如，氣候資料通常是根據氣象站的觀測值內插而來，在地形複雜的山區，實際的微氣候條件可能與內插模型的估計值存在顯著差異。其次，這些資料的更新頻率慢，氣候變數常基於多年平均值，無法即時反映短期或突發性的環境變化。此外，許多與生物分布密切相關的因子具有明顯的物候特性，現有的靜態或低時效性資料難以充分呈現其動態變化。

物種調查紀錄

環境因子數據

模型演算法

棲地適宜性

▲ 構建物種分布模型概念圖。(呂明倫 繪)

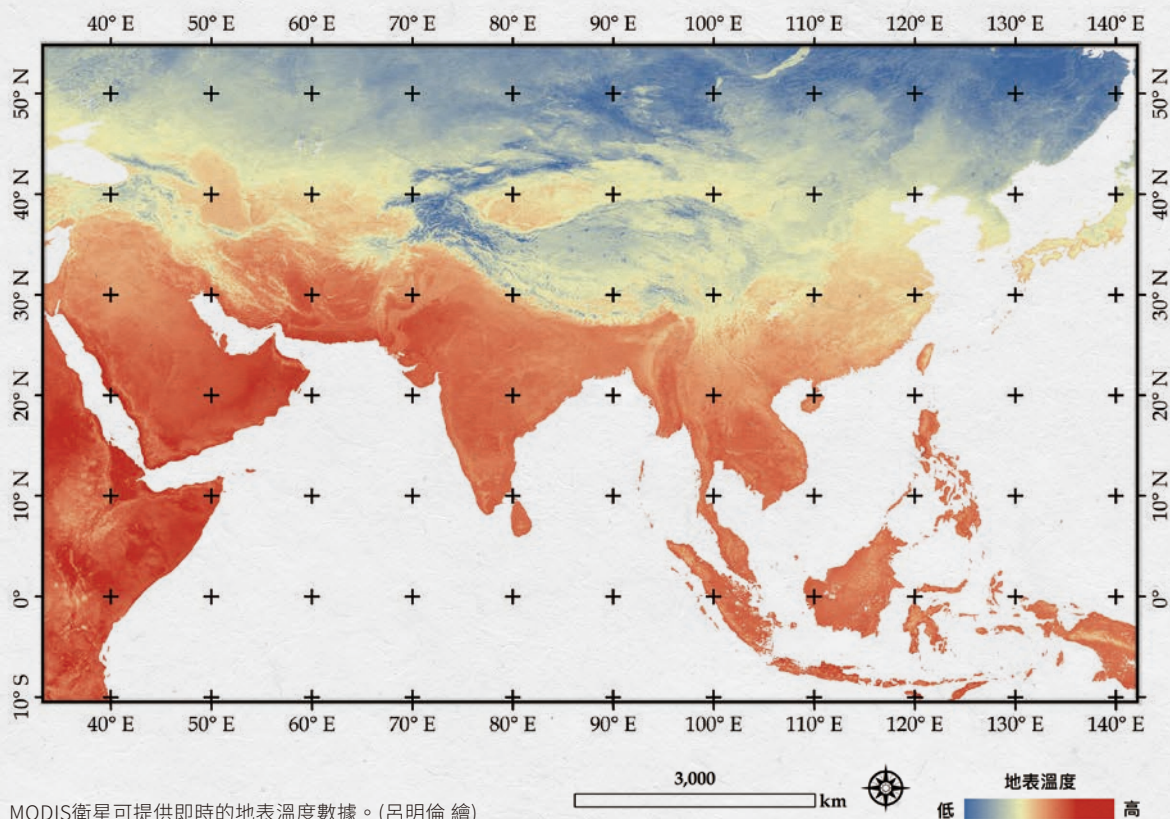
◀ 現地調查資料常因山區交通不便而存在空白區。
(呂明倫 攝)

遙測如何幫助SDM？

遙測技術具有大範圍、快速且週期性監測的優勢，能夠有效彌補傳統環境資料在空間解析度與時效性上的不足，進而提供更精準且即時的环境資訊，有助於提升SDM的建置品質與應用效能(Ahmed *et al.* 2020)。像是MODIS 感測器搭載於 Terra/Aqua 衛星，每1-2天觀測一次全球地表；Landsat及Sentinel等系列的資源衛星，空間解析力最佳可達10 m，可生產高品質的植被指數，用來反映生態系的綠色覆蓋率，幫助研究人員判

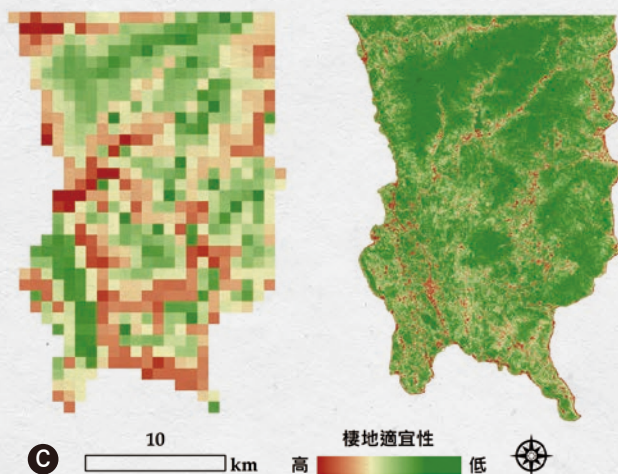
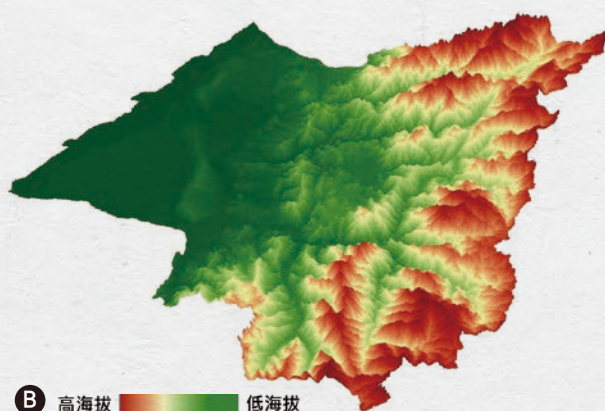
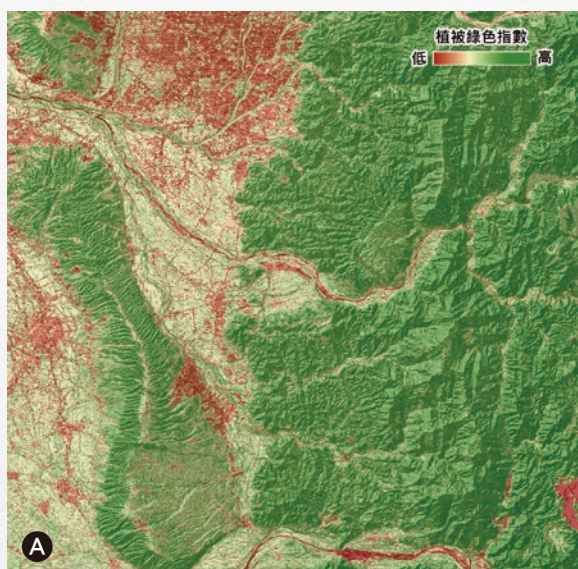
斷哪些地方適合動物棲息或植物生長；ASTER衛星與LiDAR技術(如GEDI衛星)都可生產高精細的地形數據，提供海拔及垂直高度等資訊，可以分析高山和低地生態系的差異，以及海拔梯度變化對物種分布的影響。這些產品相輔相成，能夠提供多維度的環境數據，幫助我們深入分析和預測物種分布。

以上的數據屬於靜態的環境特徵，即它們描述的是相對穩定的地形、長期平均氣候條件或植被覆蓋狀態。然而，物種的分布和生態系的變化是高度動態的，往往會受到時



間、季節、氣候變遷，以及人類活動等多重因素的影響。因此，具即時性的遙測數據可量化這些動態的特徵，進而提升SDM的預測精度和實用性。上述MODIS衛星的地表溫度和Sentinel衛星的植被指數，都可隨時間序列進行合成與統計分析，如針對動物的生長季，計算棲地環境的平均溫、最高溫及最低溫等，或者配合植物的物候週期，提取植被指數的變化特徵與統計量，作為環境驅動因子納入模型分析中(Randin *et al.* 2020)。

總而言之，多樣且豐富的遙測數據不僅彌補了傳統環境資料在空間解析力與時效性上的不足，更有助於更精確地推估物種的潛在棲地範圍，進而提升SDM的預測準確性與應用價值；同時，也使研究者能在不同時空尺度上深入探討環境變遷對SDM所產生的影響，強化模型的動態解析能力與生態解釋力。



- A. Sentinel衛星可提供高解析力的植被綠色指數。(呂明倫 繪)
- B. 海拔梯度變化是形塑物種分布格局的重要因素之一。(呂明倫 繪)
- C. 遙測技術所產製的棲地適宜性圖可明顯提升解析力，左為基於氣候資料，右為遙測技術。(呂明倫 繪)

應用與挑戰

遙測數據來源廣泛，不同的感測器皆具有不同的空間、輻射、時間及光譜等特性，像是MODIS衛星提供的數據的空間解析力雖不如資源衛星，但測量範圍廣、光譜資訊豐富且接收訊號時間頻度高，適合做廣泛種在大尺度的分布預測或長期趨勢分析；Landsat與Sentinel衛星則具有較高的空間解析力，利於捕捉物種棲地的微觀環境，適合應用於稀有種或具特殊功能的物種。

蜜蜂和蝴蝶不僅是花叢間美麗的身影，更是生態系中重要的「授粉高手」，像是在臺灣常見的東方蜜蜂(*Apis cerana*)，不但適應環境的能力很強，還能有效為許多作物授粉；而偏愛在植被豐富及淺山環境的玉帶鳳蝶(*Papilio polytes*)，同樣都是維持生物多

樣性與農業生產不可或缺的生態系服務供應者。因此，本文作者曾以這些授粉昆蟲為研究對象(呂明倫 2025)，針對雲林至嘉義一帶的廣大農業區，蒐集物種的「出現點位」資料，這些資料可來自學術調查、公民科學資料庫(如iNaturalist)或標本館紀錄，精確記錄其經緯度。接著，從遙測數據中擷取與其生態習性相關的環境變數，例如利用Sentinel衛星的光學影像，推導反映植物季節性動態的植被指數；並整合ASTER或LiDAR技術產製的數值地形模型，擷取海拔、坡度與坡向等因子。所有出現點位與對應的遙測環境變數準備完畢後，即可透過機器學習演算法建構SDM，模型會學習到哪些環境組合最適合授粉昆蟲生存。最終，再生成一張連續的棲地適宜性分布圖，預測全區各個位置(特別是尚未調查的區域)適合授粉昆蟲棲息的可能性。

東方蜜蜂對環境適應能力強，能夠在多樣的氣候條件下生存。(呂明倫 攝)





玉帶鳳蝶喜歡在溫暖且植被豐富的城市花園、果園及森林邊緣帶。(呂明倫 攝)

這些由SDM產製的物種分布圖可以和作物種植區相疊，瞭解授粉昆蟲如何影響農業生產，透過這種方法，研究人員能夠評估哪些農作物可能面臨授粉不足的風險。假設SDM預測某些果園地與授粉昆蟲的潛在棲地不重疊，這可能表示該區域的授粉效率較低，農民可引入人工授粉或改變農業管理方式，諸如在農地邊緣種植能吸引授粉昆蟲的蜜源植物，或維護周邊的自然棲地來維持授粉昆蟲的族群。

雖然遙測數據在SDM應用上帶來許多優勢，但仍然面臨一些技術上的挑戰。誠如前文所述，遙測數據多樣又豐富，故具有龐大的數據量，特別是高解析力影像，處理這些

資料需要高效能的運算資源與專門的處理技術。此外，遙測數據可能受到感測器誤差、影像遮擋(如雲層)、大氣及地形效應等干擾，導致數據存在一定的不確定性。為了讓SDM模型能有效學習環境與物種分布的關聯，研究人員需進行大量的資料前處理工作，如降低雲與陰影干擾、影像拼接、像元重新取樣、填補遺漏值及輻射校正等，這些步驟往往耗時且需要有相當的學理基礎，操作技術門檻也較高。

未來發展

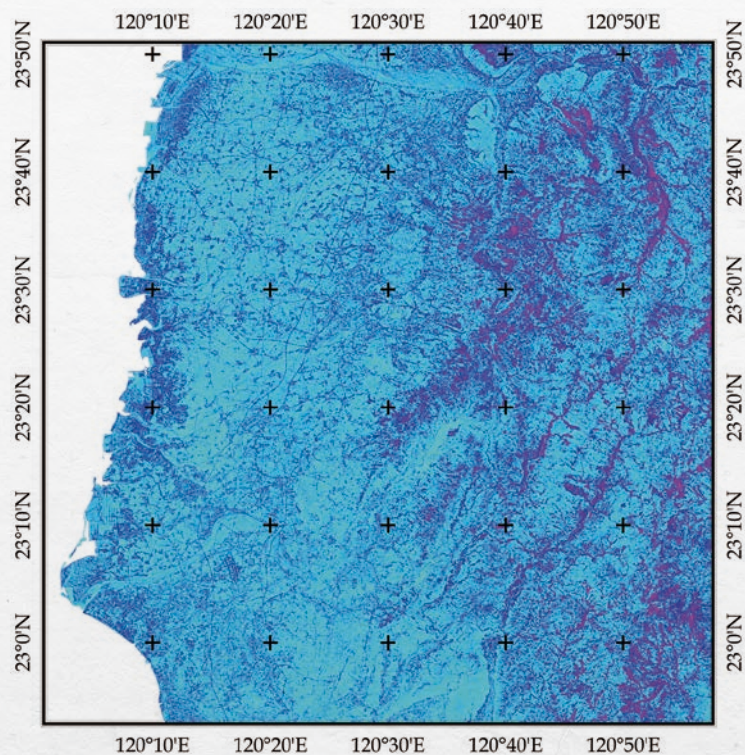
隨著遙測技術的進步與數據累積的增加，SDM的建構方式正在從傳統機器學習邁



25 km

棲地適宜性
低 高

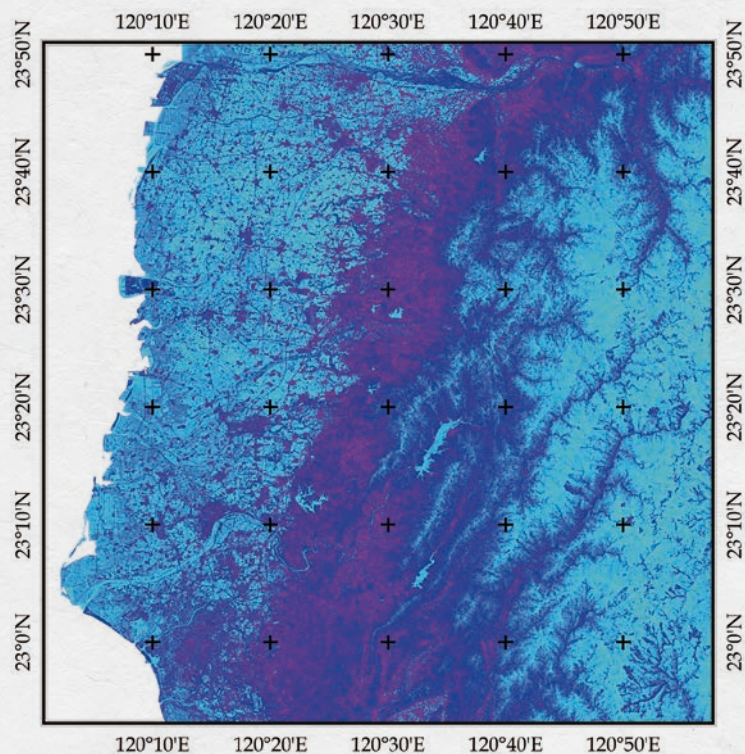
使用高解析遙測預測東方蜜蜂的微棲地。(呂明倫 繪)

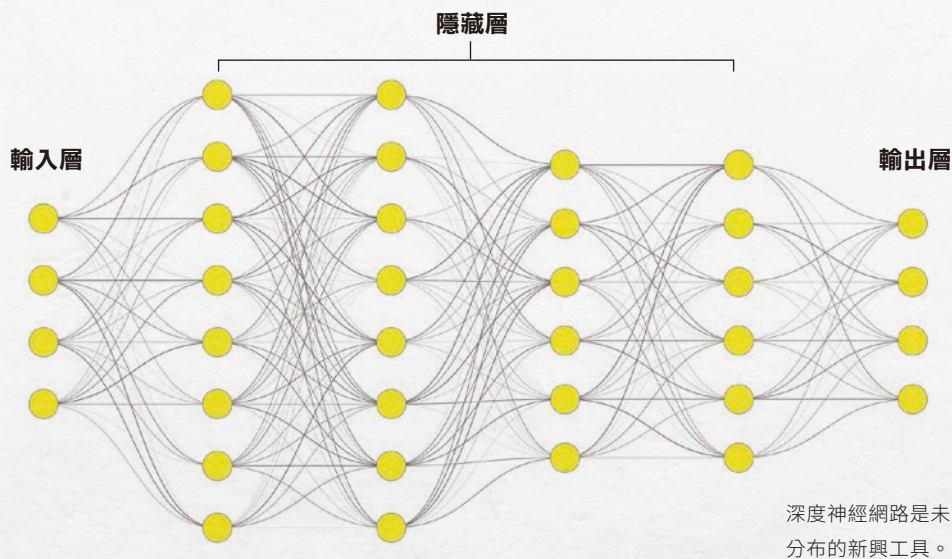


25 km

棲地適宜性
低 高

玉帶鳳蝶的微棲地趨向淺山帶。(呂明倫 繪)





深度神經網路是未來預測物種分布的新興工具。(呂明倫 繪)

向深度學習。過去，研究人員常使用的最大熵、隨機森林或支援向量機等演算法，來分析物種與環境變數之間的關聯，但這些方法在面對高維度、非線性且複雜的環境數據時，可能存在特徵選取受限、參數調整繁瑣及對非線性關係表現不佳等問題，影響預測的精確度。隨著人工智慧的發展，許多SDM研究開始嘗試應用深度學習來處理遙測數據(Gillespie *et al.* 2024；Barthel *et al.* 2025)，其優勢在於能夠從龐大的資料集中，透過輸入層、多層隱藏層與輸出層之間的複雜交互關係，自動建構深度神經網路以提取關鍵特徵。這種特性特別適合用來處理具有高維度、非線性及時序特性的環境變數，有效提升模型的預測能力與泛化表現。目前關於深度學習在SDM的應用仍屬起步階段，隨著技術的不斷進步與研究的逐步深入，未來將有望成為生物多樣性保育與生態系經營管理的重要利器，為物種分布預測與保育策略制定提供更加可靠的科學依據。

結語

遙測技術的快速發展為SDM的演進帶來新的契機，使我們能夠獲取更細緻的微棲地特徵，進而提升物種分布預測的準確性與適用性。透過整合遙測數據，SDM不僅能克服傳統環境數據在空間解析力與時間動態上的限制，還能應對全球環境變遷與生物多樣性保育的挑戰。然而，遙測數據的處理仍面臨技術門檻高、數據量龐大及前處理繁瑣等挑戰，因此，未來的發展方向可聚焦於提升數據處理技術及強化深度學習在SDM中的應用。隨著人工智慧與遙測技術的不斷進步，SDM將在生物多樣性保育、農業管理與環境決策等領域發揮更關鍵的作用，為生態系的永續發展提供強而有力的科學依據。總之，從遙測數據到物種分布地圖的轉化，讓我們能夠更精確地「從太空看地球」，進一步理解與守護地球的生物多樣性。

