

聆聽自然蘊藏的訊息

李佳紘、端木茂甯

大自然的聲音一直受到人們所喜愛，不少文人雅士曾以環境中的蟲鳴鳥叫作為創作的素材。十八世紀義大利作曲家韋瓦第創作的《四季》協奏曲，更堪稱音樂史上最經典的作品之一。樂曲中描繪了各種鳥獸的鳴叫聲（圖一）、樹梢搖曳的聲響和潺潺的溪流聲，更呈現暴風雨下氣勢滂沱的雷鳴，和雨過天晴後動物再次恢復生機的鳴唱等，清晰地描繪了環境與生物之間的互動與變動關係。在自然界中，環境的變動會直接或間接地影響動植物，而我們是否可以像《四季》這部樂曲一樣，透過聆聽聲音來探索生物對環境變化所產生的反應？讓自然界的美妙樂章不僅僅是人們陶冶性情的媒介，更可以是人、環境和其他生物之間的溝通橋梁，提供人文發展、環境守護及生物多樣性保育的重要資訊。

想像來到一片未受干擾的濕地，映入我們眼簾的是水天一色的池塘，各種動物悠遊其中，蛙鳴與鳥叫在水面及草叢間此起彼落；若將場景換成繁忙的都會區，眼前則是熙來攘往的人群、車水馬龍的街道，以及從各方傳來的引擎與喇叭聲不絕於耳。聲音就像是信號，標示出環境

(a)



(b)



資料來源：古典音樂欣賞筆記（樂品越樂）

圖一、(a) 韋瓦第《四季》協奏曲中的《夏》，第一樂章第58至70小節的樂譜。此曲子描繪夏天的情景，並以小提琴模仿斑鳩（La Tortorella）的叫聲。(b) 韋瓦第《四季》協奏曲中的《冬》，第一樂章獨奏小提琴第12至13小節的樂譜。此曲子描寫冬天的情景，並以小提琴模仿凜冽寒風的聲音，註記為恐怖的風（Orrido Vento）。

中各類發聲物體的狀態，像是有溪流的地方就會有潺潺流水聲，正在施工的地方就會傳出機械運轉的聲音。若我們仔細探尋聲音的來源，並觀察聲音出現的時刻及頻率，就能發掘出隱藏在環境裡的秘密，例如：鳥類的合唱主要集中在早晨及黃昏，白天和夜晚的主角則是昆蟲及蛙類；鳥類在春夏季求偶的叫聲豐富且多變，而秋冬則較為單調，昆蟲與青蛙的鳴叫亦在秋冬時減少，取而代之的是呼嘯而過的風吹聲。因此，環境中的景與物決定了聲音的大致樣貌，且兩者間的緊密關係，提示著我們從聲音的組成與變化，來窺探環境的改變與生物的反應。

聲景生態學的興起與應用

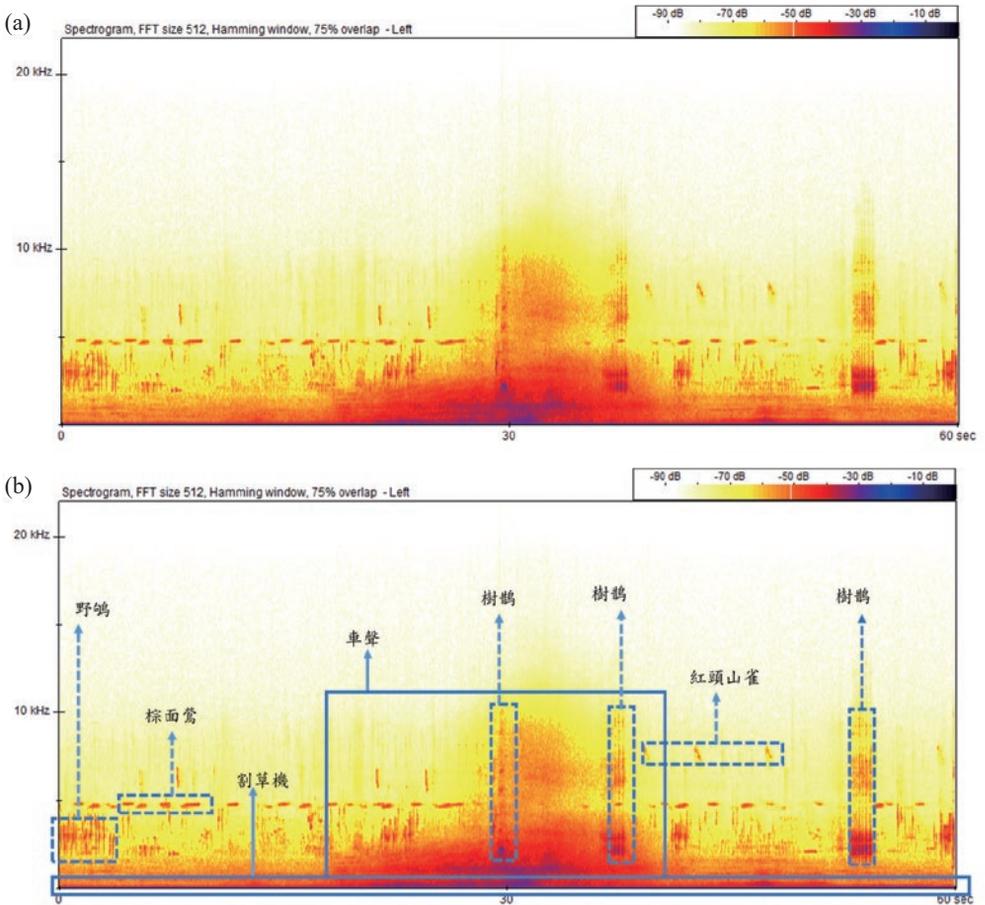
聲景的概念最早在1969年由Michael Southworth所提出，當時在麻省理工學院攻讀都市規劃博士學位的Michael Southworth，他以自己的碩士論文為題材，發表一篇名為〈都市的聲音環境〉的科學文章，裡面記錄了都市中的各種聲響，並使用聲景（Soundscape）一詞代表都市中所有可以聽見的聲音，並呼籲大眾關注人類行為可能產生的聲音與對環境的影響，但此呼籲在當時並未獲得廣大的迴響。十年後，加拿大的作曲家R. Murray Schafer認為聲音是土地的資產，他將各類聲音的特色融入音樂創作，積極推動「世界聲景計畫」（World Soundscape Project），並且號召志同道合的夥伴在世界各地蒐集聲音，這才使聲景的概念逐漸從北美擴展到世界各地。值得一提的是，當年提出聲景一詞的Michael Southworth，現在已是美國加州大學柏克萊分校都市及區域規劃系的名譽教授，在學術領域佔有一席之地。

簡單來說，「聲景」就是一片區域在一段時間內所有聲音的集合，就像一張照片裡所拍進的各種東西，環境中所有的聲音都能統稱為聲景。按照聲景研究者Bernard L. Krause的分類方法[1]，聲音的內容主要可分成三大類，分別是地理環境所產生的聲音、人為的聲音、以及其他生物發出的聲音（圖二）。地理聲音反映了環境的氣象，例如颶風、下雨及打雷；人為的聲音則是伴隨著人類的活動



圖二、聲景。環境中的聲音可以粗分為：環境音、人為活動的聲音、與其他生物發出的聲音。環境音如風吹及下雨的聲音等；人為活動的聲音如汽車行駛時的引擎聲及工地施工的聲音等；其他生物的聲音如鳥鳴、昆蟲叫聲及蝙蝠叫聲等。

而產生，例如談笑聲、步行聲及機械運轉聲；其他生物的聲音則可能是動物為了求偶、警戒及傳遞訊息所發出的聲音，亦包括海豚和蝙蝠為探測周遭環境及覓食所使用的回聲定位。這些不同類型的聲音，除了代表各自的意義、頻率及週期等聲學特徵外，彼此也可能相互影響（圖三）。

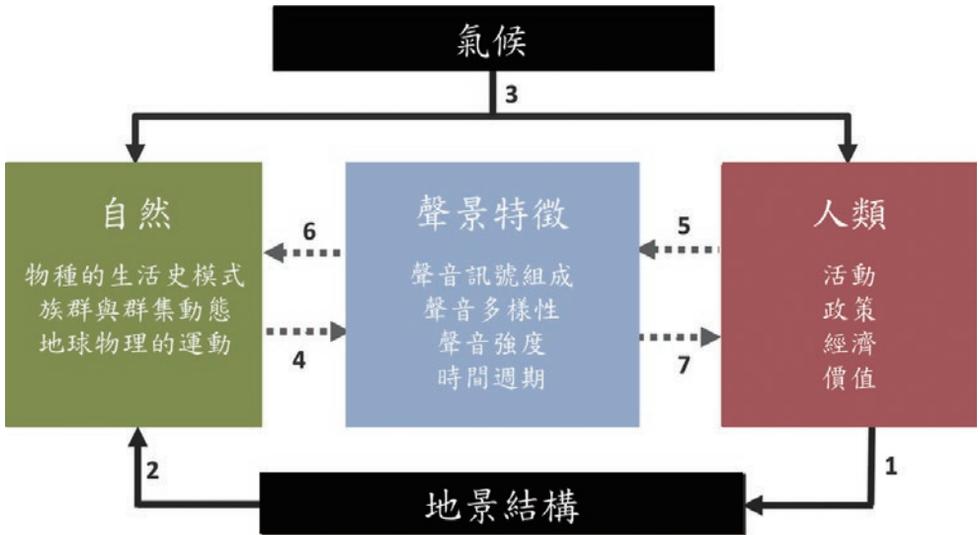


圖三、茶園聲景的頻譜圖（錄音時間2022/2/9上午8點）。(a) 在茶園裡收錄到的1分鐘聲景錄音。橫軸是時間；縱軸是頻率；右上的色相尺度代表聲音強度，越靠右的顏色表示能量越強。猜猜看裡面有什麼聲音？(b) 至少有6種可辨識的聲音出現在早晨的茶園。棕面鶯的叫聲規律且持續地出現，但在車聲較大的時候則無法從頻譜圖中辨別出牠發出鳴叫的訊號（第30秒之後）；野鴿、樹鴿及紅頭山雀的鳴叫聲則是不定時地出現；除了車聲外，割草機的聲音貫穿了整個錄音檔案，因其頻率較低所以不會與鳥音及車聲的頻率重疊。

例如：土地開發導致人為的聲音增加，卻可能使其他生物的聲音減少；有些動物在颳風下雨時會減少活動，有些會

避開人為噪音多的區域或時段鳴叫，甚至為了降低噪音的干擾而調整叫聲的強度或頻率。這些行為的變化都被記錄在聲景當中。因此，我們可藉由聆聽聲景與其聲源的變化，來了解環境變動對於生物行為的影響，並探討彼此的互動關係，也可以透過生物活動量來評估環境的品質。

2011年時美國普渡大學森林與自然資源學系的Bryan C. Pijanowski教授把聲景的概念帶入生態學研究領域，並提出聲景生態學這門新興的學科[2]。聲景的特性有利於擴大生態調查的時間與空間尺度，我們也能透過其變化探討環境、人類及其他生物活動所產生的影響與互動。舉例來說，人們若將森林的一部分開墾為道路或建築物，勢必會破壞當地的地景結構（圖四箭頭1），並限縮了森林調節溫度與保存水分的功能（箭頭2），而原先棲息於森林的鳥類、兩生類、爬蟲類、昆蟲與哺乳動物等，都可能因為棲地縮小或喪失而受到衝擊（箭頭2），森林裡的蟲鳴鳥叫也會被人類活動所產生的聲音而取代（箭頭4和5）。這些環境中的人為噪音除了會影響周遭其他動物的行為，如改變鳥類鳴唱的頻率、時間或音量等（箭頭6），也會影響人們在這片土地上的活動方式或造訪的意願（箭頭7）。此外，氣候變遷的衝擊，除了造成海平面上升、洪災與乾旱等地景結構的改變，也導致生物多樣性與人類宜居地的流失（箭頭3），這一連串直接及間接的變化，也可能反映在聲景特徵當中。我們透過聲景監測可以評估環境受衝擊的程度與範圍，並提出因應及減緩的措施。



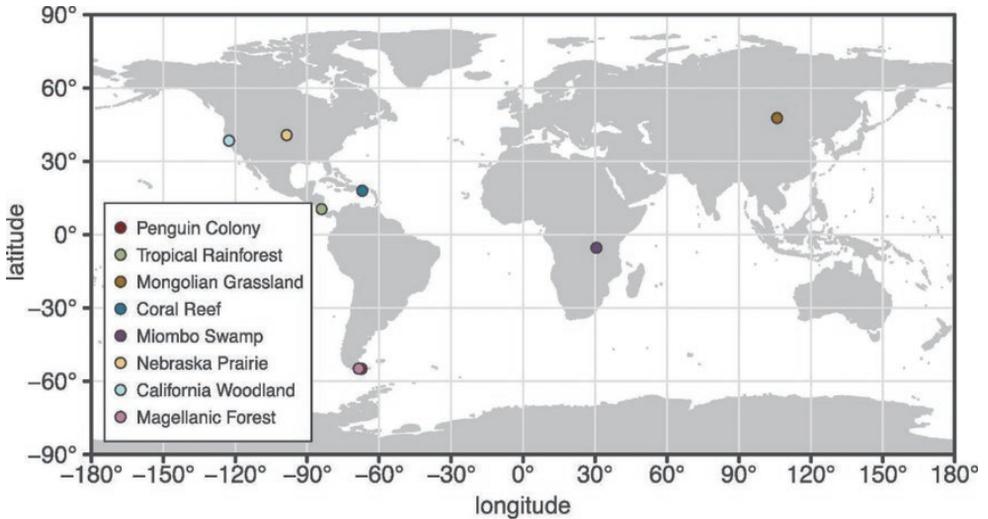
圖四、聲景生態學的概念圖。翻譯自：Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. BioScience

聲景監測網絡

在氣候變遷的威脅下，我們需要了解生物與環境的交互關係，並利用長期的觀測資料，監控並預測生物活動與環境變化的短、中及長期的趨勢與波動，達成生物保育與維護生物多樣性。聲景監測不易受到天氣、時間、空間與人力等因素的限制，容許以低成本的方式進行長期且高頻度的調查。我們的研究團隊為了解在高度開發的山林中，動物活動會受到哪些因子所影響，在阿里山架設數台錄音機並進行長期聲景監測。我們也與農業部生物多樣性研究所吳世鴻副研究員合作開發出自動化鳥音辨識工具[3] (Sound Identification and Labeling Intelligence for Creatures,

SILIC），利用人工智慧辨識聲景錄音中的動物叫聲。在與鳥類目視調查的結果比較後，我們發現聲景監測無法涵蓋所有目視調查記錄到的鳥種，但卻能發現目視調查時忽略的鳥種，整體而言從聲音可以發現更多種類的鳥，證明聲景監測作為長期生態調查工具的可能性。聲景監測除了記錄物種出沒的訊息，也可利用公式將聲音的頻率或強度換算成各種具特定意義的聲景指標，讓我們評估生物活動量及生物多樣性的起伏。以本團隊在綠島的聲景監測研究為例（四個錄音樣點），我們發現當氣溫降低或是颱風過境時，生物聲音指數（Bioacoustic Index）與聲音多樣性指數（Acoustic Diversity Index）都有下降的趨勢，表示生物降低活動及減少發聲，且生物聲音的組成也變得單調。未來若能持續累積更多的錄音資料，將有機會發掘出影響生物活動的因子，也可透過聲音指數反映的環境變化，協助主管機關即時因應極端氣候所帶來的影響，擬訂管理策略以減輕生物或環境受到的衝擊。

資訊科技的發展已使得長期且大範圍的聲景監測不再困難，蒐集到的錄音資料也可以進行系統性的自動化分析，因此，聲景監測逐漸成為長期生態保育及研究環境變遷的重要工具之一。美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）與國家公園管理局（National Park Service）等單位，於2014年起陸續在美國專屬經濟海域裡建立水下錄音樣點，進行噪音監測，試圖了解保育區內動物活動受人為干擾的程度。前面

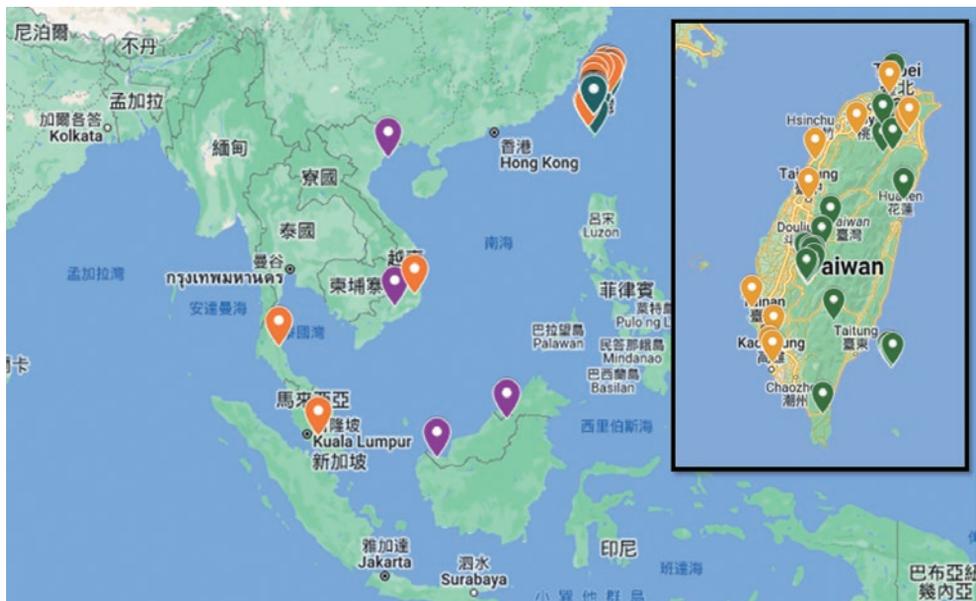


資料來源：Biogeographical and analytical implications of temporal variability in geographically diverse soundscapes. *Ecological Indicators*

圖五、美國普渡大學的7個陸域及水域長期錄音樣點分布位置圖。

提到的Pijanowski教授，也在世界各地不同生態系環境設立長期的監測樣點（圖五），針對全球生物多樣性的變化進行資料蒐集與分析[4]。

我國的農業部林業試驗所、中央研究院所屬之資訊科技創新研究中心、高能物理與科學計算中心、以及生物多樣性研究中心，於2014年開始共同建構亞洲聲景平台[5]，以作為多國研究人員合作蒐集之錄音資料分享平台。此平台目前已在台灣、越南、寮國、泰國、與馬來西亞等地，包含森林、草地、埤塘、沼澤、與都市綠地等不同的棲地，設立超過40個樣點（圖六），蒐集了共計百萬分鐘以上的聲音檔案。亞洲聲景平台不僅提供大眾探索生態系中隨季節更迭的自然樂章，更是研究人員分享與取得研究資



資料來源：中央研究院生物多樣性研究中心生態聲學與空間生態研究室

圖六、亞洲聲景平台的長期監測樣點設立圖。圖中橘色、紫色、與綠色標記依序表示該樣點僅有可聽音監測、僅有超音波監測、以及具有可聽音與超音波兩項聲景監測的樣點位置。

料的管道，此平台正在進行系統改版中，未來將納入生物聲音辨識與指標計算等功能，協助研究人員快速評估各地聲景變動與生物多樣性，支援如氣候變遷與極端天氣事件對生物多樣性衝擊等相關研究分析。我們希望透過聲景資料的保存、分享及研究，進而降低人為活動所產生的環境干擾，並研擬保育策略以提高生態系面對環境變動的適應能力，使花草鳥獸生生不息，讓蟲鳴鳥叫持續精彩地傳唱下去。

參考文獻

1. Krause, B. (2008). Anatomy of the soundscape: evolving perspectives. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(1/2), 73-80.
2. Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H. & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216, <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>
3. 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.
4. Francomano, D., Gottesman, B. L., & Pijanowski, B. C. (2020). Biogeographical and analytical implications of temporal variability in geographically diverse soundscapes. *Ecological Indicators*, 112, 105845.
5. Lin, T. H., Tsao, Y., Wang, Y. H., Yen, H. W., & Lu, S. S. (2017). Computing biodiversity change via a soundscape monitoring network. In 2017 Pacific Neighborhood Consortium Annual Conference and Joint Meetings (PNC) (pp. 128-133). IEEE.

後記

聲音如同時間的印記，記載著每個當下獨一無二的環境與事物組成，一旦過去就不會再出現也很難重新復刻，聲景的紀錄彷彿是一部環境的歷史，保留著土地曾經的記憶，期許透過聆聽提高人們對於環境的重視與關注，也感謝每位協助建立平台與蒐集錄音資料的夥伴。

作者簡介



李佳紘

中央研究院生物多樣性研究中心生態聲學與空間生態研究室研究助理，透過聲音的採集、聆聽與資料分析來發現環境的改變與對於生物的影響，研究的同時也以欣賞的角度關注自然與生物多樣性，平時喜愛踏青、賞鳥、音樂、美食等，喜歡嘗試各種事物，腦中充滿新奇點子。



端木茂甯

中央研究院生物多樣性研究中心副研究員，代理系統分類與生物多樣性資訊專題中心執行長，專注於生物多樣性的時空動態與影響機制的研究。他是一位外表和善寡言但內在卻洋溢研究熱情的科學家。每天以一身橫條polo衫靜坐在電腦前的姿態，徜徉於資料的海洋，搜尋著隱藏的知識寶藏，沒有任何其它嗜好能夠分散他對科學的執著與追求。這份熱愛持續引領他探索未知的領域並綻放出獨特的光芒。