

水下噪音對水生生物的影響簡介

莊傑元、林峰右、吳育甄、許晉榮
水產試驗所海水養殖研究中心

前言

人為活動在水域環境中會產生各種各樣的噪音，近年來，水下噪音對水生生物影響的議題逐漸受到重視。水下噪音會對生物的生長、生理反應和行為等造成影響，當水生生物受到長期連續或急促瞬間的噪音影響時，可能會對牠們造成緊迫，進而導致成長緩慢、繁殖能力下降，更容易感染疾病甚至死亡率增加的情形 (Di Franco et al., 2020; Solé et al., 2023)。許多研究都集中探討在自然環境中由海上能源平台工程、航運和科學探索活動所產生的水下聲景噪音影響 (Carroll et al., 2017; Peng et al., 2015)，不過，除了天然水域的生物可能面臨著日益惡化的水下聲擾環境外，水產養殖生物也同樣面臨著水下噪音的危害，尤其是在集約化水產養殖系統中，由於集約化養殖系統的運行需要水泵、增氧機、微濾機、投料機、殺菌裝置等設備，因此，系統運行所產生的水下噪音是不可避免的。

在養殖池有限的空間內，持續性的水下噪音對於生物的影響會比自然水域更加嚴重 (Radford and Slater, 2019)。隨著動物福利日益受到關注，本文簡要介紹水下噪音對水生生物的影響。

水生生物與水下聲音

聽覺為許多水生脊椎與無脊椎動物感受環境的主要方式，聲音在水中的傳播速度 (約 1,500 m/s) 比在空氣中的傳播速度 (約 340 m/s) 快約 5 倍 (Verfuß et al., 2015)。水生生物可以藉由聽覺感知距離 (Fay, 2009)，透過聲音的傳遞也能夠使牠們進行與同物種間的交流、尋找獵物和躲避掠食者或是找到合適的棲息地；另外，洄游魚類和無脊椎動物也可使用自然物理聲源提供的位置線索進行導航 (Hawkins and Popper, 2017)。

瞭解聲音的特性對於瞭解其對海洋生物的影響至關重要。聲音為一種縱波，當聲音產生後，介質粒子經由圍繞原點震盪進行粒子運動，使局部壓縮和膨脹產生聲壓，從而將聲能傳遞給相鄰粒子 (Gray, 2016; ISO 18405: 2017)。頻率、波長和強度是用來描述聲音特性的主要指標。測量水中的聲音時，其強度以 1 微帕斯卡 (dB re 1 μ Pa) 為參考依據，並以分貝 (dB) 表示，頻率則是以赫茲 (Hz) 為單位，表示每秒震盪的次數 (ICES, 2005)。

魚類發出的聲音頻率大多小於 1,000 Hz (Amorim, 2006; Ladich, 2015)，聽覺能力會因魚種而異 (Ladich, 2000, 2013)。魚類可分為聽覺頻率範圍廣但聽覺閾值低或聽覺頻率範



圍窄但聽覺閾值高 (Slabbekoom et al., 2010)。Ladich (2013) 指出，一般魚類在聲壓靈敏度和頻率範圍方面，通常具有 78–150 dB 之間的最適閾值，以及 100–1,000 Hz 的最適頻率。所有已知的聲壓感應特化魚種具有較低的聲壓閾值 (55–83 dB)，但是對更高的頻率 (最適頻率為 200–3,000 Hz) 敏感。例如，胖頭鰱 (*Pimephales promelas*) 的最敏感聽覺範圍是 800–2,000 Hz，相比之下，腋孔蟾魚 (*Halobatrachus didactylus*) 在 50–200 Hz 之間的聲音頻率下表現出最佳聽覺靈敏度 (Lagardère, 1982; Løkkeborg and Soldal, 1993)。無脊椎動物方面，雙枚貝腹部感覺器官對 20–1,500 Hz 範圍內的水聲振動高度敏感 (Zhadan and Semen'kov, 1984; Zhadan et al., 2004)。甲殼類動物對低頻聲的刺激很敏感 (Roberts et al., 2016; Solan et al., 2016)。例如：美國龍蝦 (*Homarus americanus*) 對於聲音的感知範圍為 20–300 Hz (Derby, 1982)，普通長臂蝦 (*Palaemon serratus*) 對頻率在 100–3,000 Hz 之間的声音很敏感 (Lovell et al., 2006)。

水下噪音污染種類

水下環境包括生物聲和非生物聲 (Slabbekoom et al., 2010)。其中，非生物聲源可分為兩類：自然背景音和人為噪音。自然背景音包括海浪拍打海岸、洋流的流動、潮汐、海底地震及其他自然因素所產生的聲音 (Popper et al., 2003; Urick, 1983)。人為噪音指的是人類行為所產生的各種不舒服的聲響，通常，人為噪音污染的範圍、強度和頻率可

能遠大於自然音對於生物的刺激，因此，這種類型的噪音污染已被證明對水生生物造成不利影響 (Kight and Swaddle, 2011)。人為噪音根據頻率和強度特徵可分為兩大類：高強度脈衝噪音和低頻連續噪音。打樁、水下爆破、地震探勘和聲納應用等都會產生高強度噪音。各種船舶則會產生低頻連續噪音 (Codarin et al., 2009)。

脈衝聲通常與海洋土木工程、建築和各種基礎設施項目有關。地震氣槍為常使用的脈衝聲源，聲源級別在 1 m 處高達 260 dB re 1 μ Pa (Hildebrand, 2009)。聲納常用於探索和繪製海洋地圖，繪製海底剖面圖時使用中頻聲納，於 3–5,000 Hz 的頻率範圍內在 1 m 處發出 204 dB re 1 μ Pa 的信號 (ICES, 2005)。海上平台建設相關的打樁也會產生低頻範圍 (100–1,000 Hz) 的脈衝噪音，重複脈衝在 1 m 處具有 237 μ Pa 的聲源級別 (Hildebrand, 2009)。

連續水下噪音主要來自風電場 (Madsen et al., 2006)。其渦輪噪音在 1m 處的聲源級別為 100–120 dB re 1 μ Pa，且頻率低於 1,000 Hz (ITAP, 2005)。海上鑽探其噪音範圍介於低頻至中頻間，在 1 m 處的最大聲源級別為 184 μ Pa (Prideaux, 2016)。航運產生的噪音主要與螺旋槳產生的空穴效應和水流擾動有關，其頻率峰值介於 50–150 Hz 間，最高可達到 10,000 Hz (Ross, 1976)。McKenna et al. (2012) 根據不同船舶類型對運輸聲音進行了詳細描述，在 20–1,000 Hz 的頻率範圍內，聲源級別在 1 m 處為 178–188 dB re 1 μ Pa。

在陸上水產養殖設施中，水泵、曝氣機、

自動投餵機械以及設施管理的各種聲音都會產生大量噪音 (Bart et al., 2001)。根據文獻指出，養殖設施相關的環境噪聲頻率主要在 2,000 Hz 以下，產生的聲壓位準 (sound pressure level) 主要在 100–150 dB re 1 μ Pa 之間，與天然水域環境音 (5–50 dB) 相比高於 100–110 dB。當平均聲壓位準遠高於背景聲級時，可能會引起魚類對水下聲音的敏感反應 (Bart et al., 2001; Martins et al., 2010; Sigray and Andersson, 2011)。

人為噪音對水生生物的影響

人為噪音是一種環境壓力源，有可能造成水生生物生長、生理和行為變化等緊迫反應。以下簡要舉例各項研究對水下噪音影響的探討。

一、生長

許多研究調查了水下噪音對水生生物生長的影響。Hang et al. (2021) 發現，經過 60 天的密集養殖噪音 (聲壓位準：115 dB re 1 μ Pa) 干擾的大口黑鱸 (*Micropterus salmoides*) 幼魚表現出比對照組更低的生長速度，其平均增重率與對照組相差達 2.2 倍。Kusku et al. (2020) 發現，將尼羅吳郭魚 (*Oreochromis niloticus*) 飼養於工程噪音，分別為鑽孔與打樁噪音，鑽孔噪音的平均聲壓位準為 76.42 dB re 1 μ Pa，打樁噪音的平均聲壓位準為 80.26 dB re 1 μ Pa，於兩種水下噪音都掩蓋並重疊了環境噪音下，經過 120 天後對其生長產生負面影響，表現出較低的平均生物量、特殊成長率及較高的飼料轉化率；但若只觀察 45–120 天的噪音暴露，工程噪

音組其特殊成長率反而顯著高於對照組，由此可見有些魚類在一定時間內能夠適應水下噪音的重複曝露，但過久仍會產生損害。將白蝦 (*Litopenaeus vannamei*) 幼苗和大西洋鮭 (*Salmo salar*) 幼魚分別曝露在不同的養殖系統 (循環水養殖系統的聲壓位準為 128 dB re 1 μ Pa，箱網系統的聲壓位準為 127 dB re 1 μ Pa) 的聲景中 8 週，發現兩種動物的成長表現和活存率在其對照組與實驗組間並沒有顯著差異 (Slater et al., 2020)。上述實驗結果顯示，人為噪音對水生生物的影響，可能會因為生物的種類、成長階段或水下噪音的聲壓位準、頻率和曝露時間而有所不同。

二、行為改變

水下噪音會導致生物行為異常，研究指出，烏蛤 (*Cardium edule*)、貽貝 (*Mytilus edulis*) 太平洋牡蠣 (*Magallana gigas*) 等軟體動物會因聲音振動而有閉殼的反應 (Charifi et al., 2017; Kastelein, 2008; Roberts et al., 2015)。研究表明，頭足類動物的進食和覓食行為會因不同的噪音刺激而發生改變 (Jones et al., 2021)。由於聲學信息受到噪音干擾，魚群之間的通信很容易受到不利影響，導致群游的凝聚力降低，受密集養殖噪音 (聲壓位準 115 dB re 1 μ Pa) 干擾的大口黑鱸幼魚，噪音組在缸中游動相較於控制組更加隨機且魚體之間的距離更遠 (Hang et al., 2021)。Kusku et al. (2020) 也發現，長期重複和持續的工程噪音會使吳郭魚鰓蓋的開闔和胸鰭擺動頻率顯著增加。此外，長期接觸噪音也會使生物持續處於驚嚇中，例如船舶噪音會影響岸蟹 (*Carcinus maenas*) 通過改變體色來偽裝自己的能力 (Carter et al., 2020)。



棘刺龍蝦 (*Palinurus elephas*) 和普通長臂蝦在曝露於船舶噪音時會改變牠們的活動，例如：移動距離、速度、與同種間距離的接近程度等 (Filiciotto et al., 2014; Filiciotto et al., 2016)。噪音亦會影響水生生物的繁殖行為，連續曝露於噪音中會降低小眼長臂鰕虎 (*Pomatoschistus microps*) 產卵的機率 (Blom et al., 2019)。

三、生理變化

一般而言，噪音通常會引起水生生物的生理緊迫反應，例如影響能量的累積、降低免疫力和新陳代謝等。研究指出，大西洋牡蠣 (*Crassostrea virginica*) 曝露於打樁噪音 (聲壓位準 164.2 ± 1.0 dB re 1 μ Pa；噪音曝露位準 142.0 ± 0.8 dB re 1 μ Pa) 下 12 小時，其內收肌中的肝醣含量顯著降低，代表噪音所造成的生理壓力會消耗能量儲備 (Ledoux et al., 2023)。將大口黑鱸幼魚飼養於循環養殖系統 (聲壓位準 115 dB re 1 μ Pa) 中為期 60 天，其血清中免疫球蛋白含量及酚氧化酵素活性、肝臟中過氧化氫酶活性、丙二醛含量和腸道的溶菌酶活性皆顯著降低 (Hang et al., 2021)，此外，Filiciotto et al. (2017) 進行的一項研究顯示，金頭鯛 (*Sparus aurata*) 幼魚暴露於近海水產養殖噪音條件下 (包含海水背景音和船舶噪音) 40 天後，相較於控制組，其總氧化狀態、溶菌酶活性、抗蛋白酶活性和白細胞水平顯著提升，且白蛋白/球蛋白比率降低。這些都表明噪音對魚類的抗氧化和免疫系統產生不利影響。當生物受到緊迫時，會影響其血液中的皮質醇及蛋白含量，Vazzana et al. (2017) 發現，將光鰓雀鯛 (*Chromis chromis*) 曝露於 200 和 300 Hz 的噪

音後，結果顯示，與對照組相比，曝露於噪音的魚的血液中如葡萄糖、乳酸和總蛋白以及熱休克蛋白 70 (heat shock protein, HSP70) 等緊迫生物指標都顯著增加。當大西洋鱈 (*Gadus morhua*) 受到頻率範圍 100–1,000 Hz 內產生的噪音影響時，血漿中的皮質醇水平顯著提高 (Sierra-Flores et al., 2015)。此外，噪音也會影響寄生蟲感染的可能性。與沒有噪音處理的對照組相比，經歷急性噪音的孔雀魚 (*Gyrodactylus turnbulli*) 容易遭受更多的寄生蟲感染 (Masud et al., 2020)。在甲殼類動物中，船舶噪音也會引起血淋巴指標的顯著變化。Celi et al. (2015) 發現，歐洲大龍蝦 (*Palinurus elephas*) 在接觸船舶噪音後，其總血球計數及酚氧化酵素活性顯著降低，而被認為是緊迫反應的生物指標—熱休克蛋白 27 (HSP27) 表達則顯著增加。

結語

隨著社會的發展，人類活動的增加使海洋及沿海地區養殖場域的人為噪音顯著上升。臺灣近年來為配合再生能源議題，導入漁電共生的科學化養殖模式，隨著光電工程的施作，時而接獲鄰近養殖戶投訴工程噪音對其養殖生物造成負面影響。目前仍然未有足夠多的研究證實為聲音的哪種性質 (例如：強度與頻率) 導致養殖生物行為和生理反應的發生，並且多以室內循環水養殖噪音影響為討論的對象，工程方面也多是研究海上工程作業產生的噪音污染為主，因此養殖池周邊陸上工程所產生的噪音對池中生物的影響，有待進一步的研究來釐清。