

知識天地

海水酸化魚兒失聰

嚴宏洋研究員 (細胞與個體生物研究所臨海研究站)

2007 年的諾貝爾和平獎得主是曾經擔任過兩任美國副總統的高爾和一個國際性組織「政府間氣候變遷問題小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)」。和平獎的給予，是在表彰他們對地球暖化這議題所作的努力。根據 IPCC 的估算：人們不停的釋放二氧化碳到大氣中，會造成很嚴重的溫室效應。冰河會因此而融解，造成海平面的上升，從而導致許多沿岸國家國土的喪失，而居民們會因此而流離失所。高爾在他寫的書和導演的影片「不願面對的真相 (An Inconvenient Truth)」中，對許多因暖化所造成災害的事實，和預測的可能災害，給了很詳細的敘述。從工業革命以來已有 1420 億公噸的二氧化碳被排入大氣中。從化學平衡的觀點而言，大氣中過多的二氧化碳一定會與覆蓋地球表面多達百分之七十的海洋作用，而溶入海水中，從而造成海水逐漸的酸化。澳大利亞的 O. Hoegh-Guldberg 團隊的研究，則顯示隨著海水的酸化，水中的碳酸離子量也會隨著減少。會使得以碳酸鈣為主成份的珊瑚礁，無法持續的造礁，這將會是未來海洋生態的大浩劫。

魚類的內耳之所以能聽到水下的聲音，是因為水下聲音的波長寬，很容易穿透過截面較小的魚體。魚的內耳裡頭有一群感覺毛細胞，在感覺毛細胞上方則有一顆成份為碳酸鈣的耳石與感覺毛細胞有密切的接觸。當聲音激動內耳時，由於質量及密度的差異，耳石不會被移動，而連接在耳石下面的感覺毛細胞上的纖毛，則會因音波而彎曲，從而產生動作電位。這些電位的後續傳入解析聲音訊號的腦區，而有了聽覺的感受。我在美國肯塔基大學任教時指導過的兩位學生 Steve Simpson 和 Mathew Writtenrich 與我討論到，既然耳石的主成份是碳酸鈣，那麼酸化的海水是否也會妨礙耳石的形成，從而造成聽力的損害。而 IPCC 的預測，則認為在各種不同二氧化碳濃度排放狀況下，地球在 2100 年海水中二氧化碳濃度可能高達 730-1020 ppm。因而我們孵化出海葵小丑魚 (*Amphiprion percula*)，然後將牠們飼育在四種不同酸鹼值的海水中 17 天後 (圖 1)，再測試牠們的聽覺行為是否改變，以驗證海水酸化 (1) 是否會影響耳石的成長進而 (2) 影響聽覺的這兩個假說。

四種不同酸鹼值海水的選定，是依照 IPCC 的估算：(1) 現今海水中二氧化碳的分壓為 391 ppm (相等於 pH 8.15); 這一組就是實驗時的對照組；(2) IPCC-B2 低標狀況。這是意味低量排碳狀況。而預估海水中二氧化碳的分壓為 600 ppm (相等於 pH 7.99); (3) IPCC-A1B 中標狀況。這是意味中量排碳狀況。因而預估海水中二氧化碳的分壓為 700 ppm (相等於 pH 7.93);(4) IPCC-A1FI 高標狀況。這是意味大量使用石化能源所造成的大量排碳。預估海水中二氧化碳的分壓為 900 ppm (相等於 pH 7.86)。在海葵小丑魚仔魚的發育過程中，我們以我任職在美國肯塔基大學時的實驗室，開發出來的「聲音激發腦波測量法 (auditory brainstem response, ABR)」，量取在第 17~20 天時聽覺靈敏曲線。我們發覺到孵化後 17~20 天的幼魚的聽覺能力，已經和成魚的聽覺音頻和音壓很相似。而在野外這一時期的幼魚，也必須結束漂游期，找到一個珊瑚礁定居下來。Steve Simpson 和 Mathew Writtenrich 與我在 2005 年發表的報告，就證明海葵小丑魚仔魚是靠著珊瑚礁上棲息的生物，如魚類和槍蝦所發出的聲音，在夜間作為定位的依據。海葵小丑魚仔魚在白天時，則會避免有掠食者發出聲音的珊瑚礁。

我們構築了一個長 120cm、寬 60cm、高 30cm 的水族箱，在長端的兩側各置放一個水下擴音器。水族箱中央，則放置一個長 45cm、直徑 8cm 上方露空的塑膠管的行為觀察室。我們將飼育在不同酸度的海水的幼魚放入觀察室後，再隨機的從左邊或右邊的擴音器播放在白天時，從珊瑚礁所錄製的噪音。我們將音壓調整到當超過觀察室中線時，音壓會低於牠們聽覺的最低靈敏度。因而當噪音播放時，受測試的魚仍停留在觀察室面對擴音機的前一半的空間時，就意味著牠們不能聽到所播放的噪音；否則牠們會因聽的到掠食者的聲音而離開。對照組的結果顯示，當海葵小丑魚聽到噪音時，只有 24% 的機會留在中線之前，這意味著 76% 的機會，魚會

聽的到所播放的噪音。但是飼育在 600, 700, 900 ppm 的魚，牠們停留在中線之前的時間比率分別為 60%, 62%, 61%(圖 2)。這些數值與對照組相比較，有很顯著的差異；而這三組之間則沒有差異。換句話說，牠們的聽力很顯著的受到酸化海水的影響而退化了。這個發現符合第二個假說的預測。也就是說 IPCC 所預測到 2100 年時的三種排碳情況，都會造成海葵小丑魚聽力的受損。

但是分析了內耳的耳石形態後，我們卻發現四組魚之間耳石的大小，卻沒有任何差異。這意味著我們原先的假說有所錯誤。也就是說，海水的酸化不會影響耳石的形成。內耳的耳石是浸泡在含有內淋巴液的耳囊內，不會與海水直接接觸。這也可解讀為海水酸化會影響珊瑚礁造礁的機制，與耳石形成的機制應該是不同的。飼育在 600, 700, 900 ppm 二氧化碳分壓的海葵小丑魚聽力衰退的事實，顯然與耳石無關。這可以解釋為雖然耳囊內的內淋巴液或許會因海水酸化而酸化，但耳石形成不會因淋巴液的酸化而有所影響。但另一個可能，則是酸化的內淋巴液影響了與耳石密切接觸感覺毛細胞的電生理作用，而導致聽力的衰退。要進一步測試這兩個新的假說，我們準備：(1) 以微電極直接插入耳囊內，量取內淋巴液的 pH 值，以瞭解酸化的海水是否會影響內淋巴液的酸鹼值；(2) 分離出感覺毛細胞，以膜片鉗制 (patch clamp) 的方法，研究感覺毛細胞膜上的離子通道的電生理功能，是否因內淋巴液的酸化而有所影響。

地球因人類大量排放二氧化碳入大氣而造成暖化，這已是大家所熟知的議題。但是因排碳而造成海水酸化，所可能造成的負面影響，卻很少被注意到。這一次中研院研究人員與英國、美國、澳大利亞的團隊的研究成果，則顯示若是不儘快減緩二氧化碳的排放，到了 2100 年海洋魚類可能會有聽障或失聰的問題。聽力受損的魚類是無法根據聲音來躲避掠食者、或定位要捕食的對象；對靠聲音訊號進行求偶行為的魚類(如：黃花魚、光蟾魚)而言，則會因聽力的喪失，而無法繁殖，從而導致族群的滅絕。海水中含有較高濃度的鹼性離子，再加以海水體積龐大，因而海水對酸的緩衝中和能力很強。但是淡水因鹼性離子少，相對的對酸的緩衝中和能力也弱，因而到 2100 年時淡水魚類聽力所受到的影響，很顯然的會比海水魚類更嚴重，這是我們該及早正視的嚴重議題。

參考文獻

Simpson, S., Munday, P., Wittenrich, M., Manassa, R., Dixon, D., Gagliano, M., Yan, H. Y. 2011. Ocean acidification erodes crucial auditory behaviour in a marine fish. *Biology Letters* (published on line June 1, 2011; DOI 10.1098/rsbl.2011.0293)

Simpson, S. D., Yan, H. Y., Wittenrich, M. L., Meekan, M. G. 2005. Response of embryonic coral reef fishes (Pomacentridae: Amphiprionspp.) to noise. *Marine Ecology Progress Series* 287:201-208.

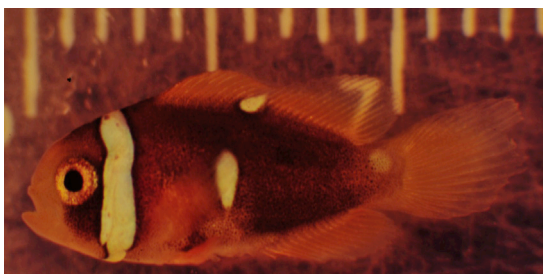


圖 1. 體長為 1.4cm 被用來做實驗的海葵小丑魚幼魚。

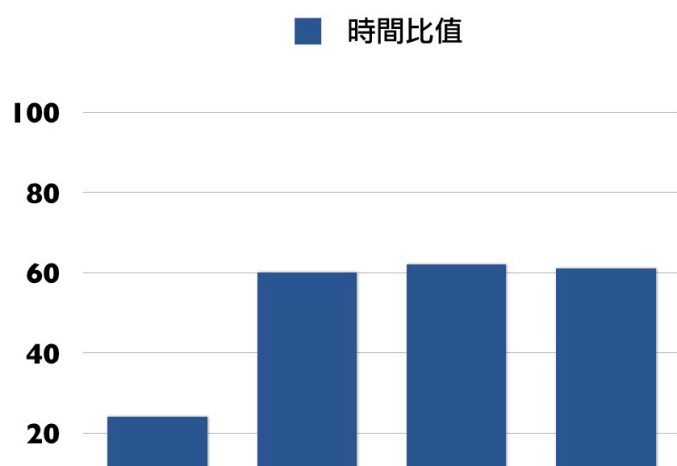


圖 2. 飼育在四種不同二氧化碳分壓的海水中的海葵小丑魚幼魚被噪音測試時，停留在觀察室前半段的時間百分比值。