

海水酸化的威脅與對策

丁楓峻、謝恆毅、蔡萬生

水產試驗所澎湖海洋生物研究中心

前言

台灣沿海的珊瑚礁生態系具有高經濟價值的觀光、休憩、漁撈等功能，但卻特別容易受逆境子（指生物、化學試劑或環境條件等外部的刺激，會對生物造成迫害）的影響，包括海水升溫與二氧化碳增加所產生的海水酸化等全球逆境子（global stressors）與優養化等地區逆境子（local stressors）的交互影響（Hoegh-Guldberg et al., 2007）。其中海洋酸化的議題尚未被徹底研究，面對未來海洋酸化的趨勢，珊瑚共生體和其他物種的反應，到底會是：(1)區域性滅絕（local extinction）；(2)調適（acclimatization）；(3)適應（adaptation）；或是(4)遷移（migration）到pH值較高的海域？目前尚有許多疑問值得探究。

海洋酸化事件回顧與趨勢預估

過去兩百年來，海洋大約吸收人類活動排放的二氧化碳的1/3，其中50%來自燃燒石化燃料和製造混凝土（Sabine et al., 2004），全球海域海水表層的平均pH值下降到8.1（Key et al., 2004），比工業革命開始時降低了0.1（Raven et al., 2005）。目前在澳洲

珊瑚礁實測的結果顯示，西澳的 Ningaloo Reef 海域的 pH 值範圍為 8.22—8.64，大堡礁海域則為 7.98—8.37（Gagliano et al., 2010）。估計目前大氣二氧化碳濃度在 388 ppm 左右（Foster et al., 2007），若溫室氣體排放增長率按每年 0.5%來估計，到了 2050 年大氣二氧化碳濃度將達到 500 ppm，2100 年更高達 800 ppm。全球表層海水的平均 pH 值在 2010 年已下降至 7.7（Caldeira and Wickett, 2005; Doney et al., 2009），到了 2300 年可能下降至 7.3（Caldeira and Wickett, 2003）。

海洋每天能吸收約 3,000 萬公噸的二氧化碳。根據地質學研究，地球過去曾發生數次生物大滅絕事件。大約在 2 億 5 千 1 百萬年前的二疊紀末期大滅絕（end-Permian mass extinction）和 2 億 5 百萬年前的三疊紀—侏羅紀大滅絕（Triassic-Jurassic mass extinction），都和大規模的火山噴發與甲烷釋出讓大氣中的二氧化碳增加有關（Knoll et al., 2007; Hautmann et al., 2008）。

以古為鏡，可以知興替。地球的歷史正警告我們，若不重視從工業革命以來日趨嚴重的海洋酸化問題，難保不會重演海洋生物大滅絕事件。國光石化是否續建仍未決定，若是續建，則台灣中西部沿海未來將面臨更多的酸化壓力，不僅僅溼地會消失，原本數

量就已經很少且分布地區集中在台灣海峽的中華白海豚，很可能會區域性滅絕，使得亞種消失，而其他經濟物種族群數量也會下降，這會對生態旅遊業、漁業和水產養殖業者產生很大的衝擊。

海洋酸化讓無脊椎動物的繁殖力降低

海水酸化會直接影響幼苗的存活率，而幼苗採集和繁殖技術是養殖業者降低經營成本和永續經營的關鍵技術之一。根據工業革命時期、現今的海洋和預測的 2110 年和 2300 海洋平均 pH 值條件進行的實驗結果發現，海洋動物的幼苗在受精階段和發育早期雖然比較不容易受到升溫和酸化的全球逆境子影響 (Byrne et al., 2010)，但在發育後期和著生期 (settlement stage) 則特別容易受到影響 (Ericson et al., 2010; Cigliano, et al., 2010)，所以即使生物能撐過發育早期，到了後期仍然會受酸化環境影響。許多海洋生物利用幼生時期進行遷移，持續酸化的海洋將會阻礙生物的遷入和遷出，且當生物還沒到達繁殖期就死亡，其結果則是會讓將來族群的成體數量下降，將直接影響人類對海洋資源的永續利用。

海洋環境政策

2009 年的摩納哥宣言 (Monaco Declaration)，已針對海洋酸化問題進行討論和提出警告。因應海水酸化的危機，我們應當參考歐美等先進國家的作法。目前全世界

較重要的海洋酸化研究團隊有歐洲的「歐盟海洋酸化計畫」(EPOCA，全名為 European Project on Ocean Acidification) 和美國的「美國海洋碳與生地化學計畫」(OCB-OA，全名為 Ocean Carbon and Biogeochemistry-Ocean Acidification)。

EPOCA 正進行的四大研究計畫：

一、海洋化學過程和生物分布在時空上的變化

採古代重建 (paleo-reconstruction) 的方法，針對有孔蟲、深水珊瑚來分析各種元素的循環在古代的變化情況，並和現代環境比較。

二、定量海洋酸化在個體和群落層級的影響

根據生態意義，生物地球化學特性和經濟價值，選擇與氣候直接相關的生物地球化學過程如：鈣化作用、固氮作用、固碳作用 (初級生產)，以及關鍵性物種 (keystone species)，進行涵蓋分生、生理、生態的整合研究。

三、模型建構

修正現有生物地球化學、沉積和海洋大氣耦合模型，包括碳、氮、硫、鐵等元素循環，納入酸化後的影響，以預測未來氣候變化。

四、提供決策參考

在局部區域和全球尺度下，分析二氧化碳排放渠道，檢測當前的排放量是否會對海洋環境和地球系統構成危險，並盡可能避免這種極限狀態的出現。

而 OCB-OA 目前正在進行的計畫方向，大致和 EPOCA 相同，包括：監測海洋化學

組成、探索海水酸化對於海洋生態系的影響、為海洋環境系統建模、陸地海洋-空氣海洋的交互作用以及深層海水的二氧化碳溶解模型。

台灣緊鄰中國、韓國和日本等工業重鎮，鄰國排放的二氧化碳也會對台灣造成影響，尤其近年中國的經濟發展快速，對於能源的需求極大，目前中國正在興建四座安全等級最高的 Generation III + 核電廠 (Clery, 2011)，但日本福島核電廠輻射外洩事件仍引起世人對核電廠的疑慮，且目前中國仍沒有任何燃煤發電廠被鈾核電廠取代，在尚未發展出發電效率高的綠色能源前，未來中國對於燃煤發電的能源需求仍舊非常大，大量排放的二氧化碳會直接影響台灣。

澎湖群島位於北迴歸線附近，有豐富的亞熱帶珊瑚礁生態。群島是由海底火山緩慢噴發而形成，周圍海水特別淺，大氣二氧化碳會持續和珊瑚礁生存的淺層海水混合，一旦大氣二氧化碳濃度升高到臨界值，將會對珊瑚礁生態系造成嚴重的影響，特別是澎湖群島地理位置介於台灣和中國之間，是面臨中國和台灣西岸石化工廠二氧化碳排放衝擊的交會點。我國政府應參考歐美團隊的研究計畫，考慮在澎湖設立環境監測點，作為台灣海水酸化監測的前哨站。經濟部當前的政策是以把澎湖打造為世界級低碳島為目標，預計在澎湖設置 96 百萬瓦大型風力發電機，並裝設智慧電錶。當局應將海水酸化監測納入配套政策，設置大氣二氧化碳濃度和海水 pH 值的監測點，以期達到更好的環境保護示範和即時評估低碳島政策的效益。如果海水酸化減緩速率並不如預期，更可進一

步釐清中國和其他鄰國的二氧化碳排放渠道的影響。

結語

目前由中研院陳昭倫老師帶領的研究團隊正在進行海洋逆境子對於珊瑚礁的影響研究，希望能究明海洋元素循環，幫助模型建構。另外，也深入探討面臨逆境子後，海洋生物可能的反應和所尋求的庇護所，以作為諸如石化工業是否續建、選定保護區域和推動相關補救措施等之參考，以達到海洋資源永續發展的目的。這幾項計畫只是為台灣海洋保育開啟一扇門，未來仍需更多研究團隊投注心力，也需要政府相關部門和人民的配合，台灣的海洋才有未來。



管蟲可以在 pH 值低於 7.0 的人工飼育環境下生長，但蕁珊瑚科的波形靈芝珊瑚 (*Lithophyllum undulatum*) 的珊瑚蟲在相同 pH 值條件下卻會死亡