

地球酸化的試驗

陳瑞谷、劉國強、吳繼倫 摘譯
水產試驗所海洋漁業組

科學家們急切地想知道，當海水急速地越變越酸時，海洋生物會有什麼反應...

前言

星期五晚上的啤酒使得 Sam Dupont 完全忘記了他的海膽.....

Dupont 這名年輕的生態生理學者將海膽幼生放入了高度酸化的海水中培養，以觀察海膽骨骼的後續變化。在過了數個小時仍沒有明顯變化後，Dupont 決定先去酒吧與朋友相聚，晚一點再回去確認實驗結果。但是直到星期天他才想起這件事，在那當下，他確信這些珍貴的海膽幼生應該都死了。

然而 Dupont 星期一回到實驗室工作時，卻發現這些海膽幼生仍舊在水缸中游來游去，儘管牠們的內骨骼已經被溶出，但不管怎麼說生命現象仍舊運作地相當完好。

大氣中二氧化碳濃度迅速上升造成了海洋酸化問題。在過去 150 年來，海水酸度已經上升了 30%，有些海域酸化情況甚至嚴重到足以抑制珊瑚和其他物種的生長；此情形

若未改善，像貝類和螺類等具有碳酸鈣殼體的生物，將會在未來數十年中立即遭受海洋酸化的威脅，而在本世紀結束時，海洋酸化情況將足以妨礙海洋浮游生物的生長，進而危害整個海洋生態系統。

儘管海膽實驗告訴我們，某些生物可以在高度酸化海水中短暫存活，其他研究結果卻顯示海水酸化所造成的問題出乎預期，甚至可能威脅魚類等生物。初步結果指出，不同生物面對海水酸化時，將會因為水溫、本身的演化史和食物的可及性與品質等因素出現高度變異的反應。

海洋的碳匯作用 (carbon sink)

大海每年吸收了約 9 億噸的二氧化碳氣體，幾乎佔全球每年釋放量 30 億噸的三分之一。因此倘若摒除了海洋吸收二氧化碳的巨大能力，地球暖化將遠比目前更為快速。

當二氧化碳進入海水中，會和水反應形成碳酸根，並釋放帶正電的氫離子，導致海水酸化。19 世紀中葉以來，表層海水的平均 pH 值已經下降了 0.1 (現值約為 8.1)。倘若各國政府不果斷地控制二氧化碳的排放，科學家們預期：約在本世紀後半，大氣中二氧化碳濃度將比工業革命前最少增加一倍，海水的 pH 值則會再下降大約 0.3—0.4。屆時海水的氫離子含量將比工業革命前多 1.5 倍，導致生物體難以吸收足夠的方解石 (calcite) 與霰石 (aragonite) 這兩種形式的碳酸鈣來建造殼體和骨骼。當海水中方解石與霰石長久維持不飽和的狀態，含碳酸鈣成分的硬組織就會開始溶解、釋出 (圖 1)。

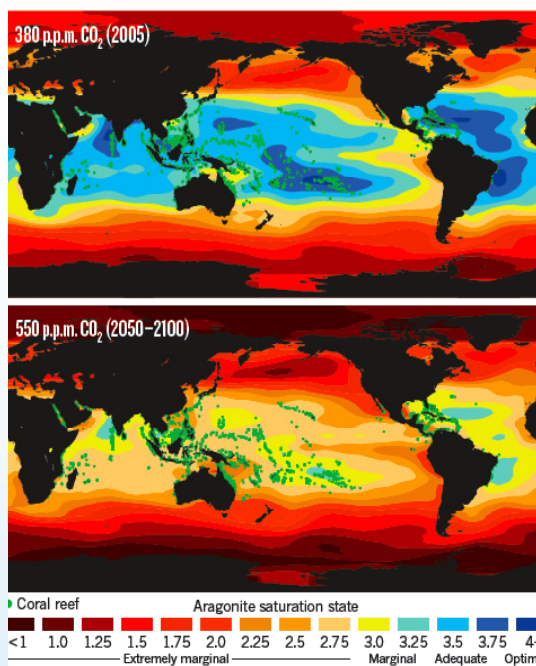


圖 1 海水中霰石的飽和狀態。圖中暖色系表海水中有較低飽和度，冷色系反之；綠點為珊瑚礁分布中心。大氣中不斷升高的二氧化碳濃度將會減低海水中霰石的飽和狀態，下圖預測 2050 年大部分海區飽和度都將 < 3.0，極不利鈣化反應

「當海洋酸化問題越來越嚴重，鈣化生物所進行的鈣化反應毫無疑問將越來越減少」，擔任歐盟海洋酸化研究計畫 (EPOCA) 的共同主持人 Jean-Pierre Gattuso 表示。鈣化反應減少的事件曾經確實發生過，大約五千五百萬年前，在大氣中二氧化碳陡然增加導致全球極度暖化時，海水的 pH 值被認為曾降至如前述 21 世紀末期的預測值。在那段時間裡，海洋沈積物中的碳酸根含量極低，也不見任何帶有碳酸鈣殼體的微生物化石，可知當時海水對有孔蟲 (foraminifera) 等鈣化生物的生存而言太過嚴苛，導致其大量滅絕。然而今天，海水酸化的速度比五千五百萬年前快了最少十倍。

研究者預期海水酸化問題會最先在極區海域顯現，因冷海水比溫海水吸收了更多的二氧化碳，同時海冰融化後也會稀釋海水使碳酸根濃度更降低。在 2008 年的量測結果顯示，極區的部分海域在一年當中已有部份時段呈現霰石不飽和的情況，科學家們預測，在 10 年內北極和南極會有更多海域發生這種狀況，倘若二氧化碳的上升速度維持不變，約在 2050 年北極海有霰石不飽和現象的海域面積將會過半。

即使在溫帶海域，海水 pH 改變也可能已經對海洋生物造成衝擊。從 2005 年開始，美國西岸奧瑞岡和華盛頓的貝類繁殖業者發現牡蠣在孵化時死亡率急遽上升，科學家們懷疑，這是不是表層海水變酸加上當地湧昇海流帶來的海水碳酸鈣濃度較低所造成的結果。

迄今科學家們對海水酸化的可能造成的後果所知甚少，像是對不同氣候區域海洋生

物的影響、如何改變生態系的組成以及末了會怎麼影響海洋食物網等等。部份科學家們認為，在面臨海水暖化、污染、漁獲壓力、海冰溶化、洋流位移等眾多變遷威脅挑戰後，海洋酸化將會是妨礙海洋生物是否得以存活的最後一根稻草。

海水酸化對海洋生物的影響

Dupont 的研究團隊試著找出海洋生物對海水酸化後的大致反應：他們規劃了 6 組溫度 (6–18°C) 與 2 組 pH 值 (8.1、7.7)，在 264 個培養缸中放入扇貝、大比目魚、陽遂足、海膽以及龍蝦，經過 4 個月的實驗後，量測各種生物的生長、呼吸效率、殼體與組織結構、體內 pH 值以及活存率。

如同先前海膽的實驗，科學家們發現至少在這短短的 4 個月內，某些物種可以應付如此低的 pH 值。但是，這些生物如果生活在酸化海水中更久或處在更高的溫度下也許就抵擋不了了。科學家們預期，海洋生物對複合性緊迫的適應力將會因不同物種在不同地點而大不相同。

另一項研究結果指出，不同族群的蜘蛛蟹對海水酸化的反應可能與牠們所處的氣候區有關：北海海域的蜘蛛蟹幼生其生長率及適應狀況在酸化海水中都顯著減弱，然而在更北方三千公里北極海海域的蜘蛛蟹幼生對海水暖化的敏感度卻更甚於酸化。

此外，同樣處在大氣二氧化碳濃度 740 ppm 環境下，北海海域的藍貽貝鈣化反應效率減少了 25%，但是來自波羅的海的藍貽貝族群卻生長正常。在德國主持波羅的海區域

研究的 Frank Melzner 推測，這可能是因為當地每年都會出現高二氧化碳濃度的海水，導致 pH 值常降至超低的 7.5，這些貽貝能在酸化海水中生長良好是因為牠們早已發展出調節細胞內 pH 濃度的生理機能，同時建構蛋白質與碳水化合物混成的保護膜來屏蔽牠們的殼體。Frank Melzner 認為，某些生物在面對緊迫時生理調適出乎意料地運作完美，然而毫無疑問地這需要消耗能量，因此只有營養良好的個體能自給這樣的防禦力。

當海水中營養缺乏時，生物族群數量似乎會隨著海水酸度增加而逐漸減少。以意大利那不勒斯海灣的 Ischia 島為例，當地的海底火山幾千年來持續噴發使大量二氧化碳溶入相對食物貧乏的 Tyrrhenian Sea，調查火山周遭的海底生物時發現，在低 pH 值的水域，一般常見的珊瑚和海膽等鈣化生物會絕跡，相反地，由數種海草和入侵藻類構成的生物群聚卻欣欣向榮，顯見這些生物不但對高濃度二氧化碳免疫，甚至還從中得利。

最後，並不是只有鈣化生物才會遭受海水酸化的威脅 (圖 2)，魚類也有可能受到影響。實驗已經證明，增高的二氧化碳會影響小丑魚仔魚的嗅覺敏感度，而使得小丑魚難以找到牠們喜歡的海葵。

結語

在過去數年中，各國政府已經投注資源進行海水酸化相關研究，包括美國、德國、英國、日本、中國、南韓以及澳洲針對海洋酸化都已開始各自的國家型研究計畫。此外，歐盟更在 2008 年展開了一個整合 10 個

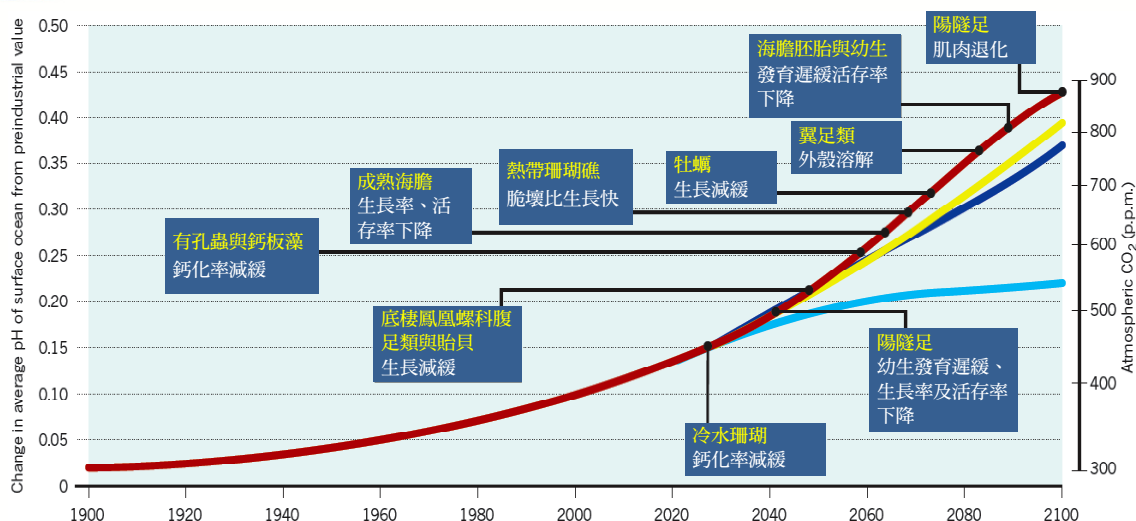


圖 2 海洋生物會因為生理機能與棲地而對海水酸化有不同的反應。海水酸化的速率以及發生影響的時間點將受到未來二氧化碳排放多寡(四種可能走勢以不同顏色表示)的影響

國家、31 個實驗室的 4 年期計畫 EPOCA 預算 (US\$22.9 million)，從各個尺度上觀察海水酸化對海洋生物的影響，由細胞到生態系，再延伸至全球，這個計畫的首要任務是確認在何種酸度增加幅度下，會驟然引發海洋生態的災難性變化。

目前海水酸化規模最大的野外研究誠屬 ECOPA 的外洋研究，包括藻類和細菌都被放置在戶外的巨大浮體容器中，接觸不同濃度的二氧化碳，這個研究是在 2010 年 5、6 月間開始先在北極海的 Spitsbergen 島外進行，計有 35 組的研究人員每天量測包括從營養鹽循環到鈣化藻類生產的微量氣體等 45 個相關參數。相同的實驗在 2011 年 4、5 月間在挪威的 Bergen 外海重複進行，研究團隊希望可以藉此觀察出海水酸化對鈣板藻 (coccolithophorid) 藻華的影響，鈣板藻可是

能製造足以助長雲生成的微量氣體—二甲基硫的重要藻類。主持這個研究的 UIF Riebesell 表示：「我們希望知道更多關於海水酸化對自然生態系真正影響，而不僅是實驗室中各個物種的劑量反應。」

雖然海水酸化的相關研究已經加速進行，然而要解決這個問題還是要從降低二氧化碳的排放著手。倘若各國政府仍然無法在短時間內有效遏止二氧化碳的排放，單是優先著手處理甲烷和其他溫室氣體的問題，而把難解決的二氧化碳議題留待後代去承擔，雖然或許可以減緩全球溫度的上升，卻還是無法阻止海水變得越來越酸、越來越具腐蝕性。

註：本文摘譯自

Schiermeier, Q. (2011) Earth's Acid Test. Nature, 471: 154-156.