

知識天地

深部洋流循環與全球氣候變遷

黃國芳助研究員 (地球科學研究所)

相信大家對電影《明天過後》 (The Day After Tomorrow) 中，因全球溫鹽循環的劇變造成地球北半球大範圍冰封的情節仍然記憶猶新。雖然這是一部科幻災難片，但是未來真的不可能發生嗎？在古海洋及古氣候學者的眼中，過去的地球歷史上確實發生過全球溫鹽循環突然變得緩慢，甚至幾近停止，造成全球溫度突然驟降的事件，只是在時間尺度上，不會像電影中的短暫，幾星期或幾天之內就發生。因此，國際上許多的科學團隊希望藉由研究過去海洋的洋流循環與氣候劇變的關係，來更加瞭解地球氣候系統的運作模式。

深部洋流循環

深部洋流循環 (又稱為溫鹽循環, Thermohaline Circulation)是指將大洋深部的冷水團經由溫鹽環流最終轉換成表層暖水團的過程。科學家們相信溫鹽循環可影響到全球各個海域熱含量、鹽度、營養鹽及碳的分佈，因此溫鹽循環也被視為影響地球氣候系統的主要控制因素之一。在現今的海洋中，只有北大西洋及南大洋海水的密度足夠形成深層水，即北大西洋深層水 (North Atlantic Deep Water, NADW) 和南極底層水 (Antarctic Bottom Water, AABW)。另外，在南極極地鋒區 (Polar Front Zone) 附近也形成另一重要的中層水-南極中層水 (Antarctic Intermediate Water, AAIW)。北大西洋深層水形成後會緩慢地沿大西洋西側往南極的方向流動，遇到環南極洋流之後，便往東流入印度洋及太平洋。由於在過程中不斷地與相對高溫低鹽的海水混合，水團的密度逐漸變小，因此流至太平洋時，已成為太平洋的表水，再經印尼與澳洲間的水道，流入印度洋，繞行非洲南邊後流回南大西洋，形成墨西哥灣流，再繼續往北流回北大西洋，形成一完整迴路。

“The Past is the Key to the Future”

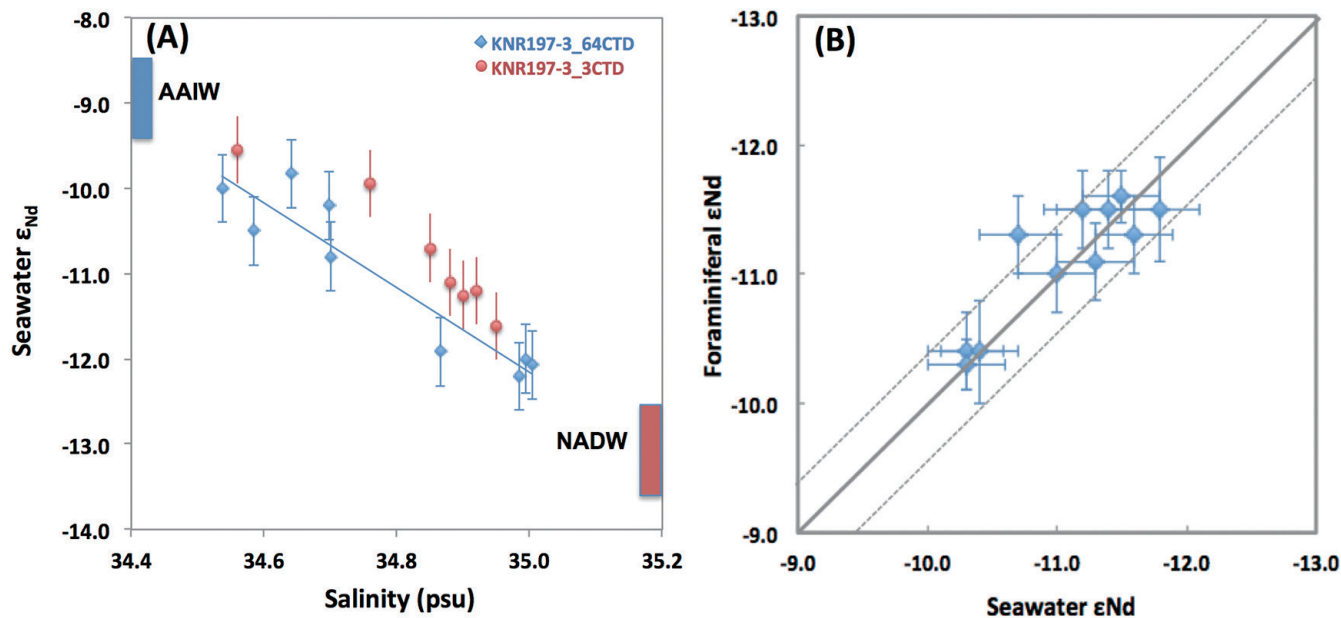
現今的海洋學研究已證實了深部洋流循環可直接或間接影響地球氣候及環境的變遷，因此古海洋學家們希望藉由重建過去洋流循環的變化，找出在沒有人為活動干擾下，洋流循環與劇烈氣候變化之間的關聯性，進而瞭解地球氣候系統的控制主因。此研究結果可成為氣候及海洋模擬學家重要的參考依據，進而預測未來地球氣候系統可能的變化趨勢。然而，我們要如何重建過去的深部洋流循環及氣候變遷呢？

海水釷同位素：水團混合的代用指標

雖然無法乘坐時光機回到過去，研究當時海洋的洋流循環，但我們可以找尋反映水團混合的地球化學代用指標 (Proxy)。在過去文獻及我們所參與的研究中發現，稀土元素中的釷 (Neodymium)，特別是其同位素比值 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ， ^{143}Nd 為 ^{147}Sm 的放射衰變產物，半衰期約為 1.06×10^{11} 年，一般也以 $\epsilon_{\text{Nd}} = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sample}}/^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} - 1) \times 10^4$ 表示，其中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$)，與海水鹽度 (可指示不同水團) 有相當好的關係 (圖一A) [1, 2]。海水釷同位素比值之所以可用來指示海洋中水團混合，主要是釷在海洋中的主要來源為經由侵蝕風化後所產生的陸源物質輸入[3]。由於不同區域岩石的Sm/Nd比值及年齡的不同，風化後會產生不同釷同位素比值的陸源物質，經由河流傳輸後進入海洋，之後再透過沈積物與海水的交換作用 (Boundary Exchange)，影響表層海水的釷同位素比值。舉例來說，在北大西洋形成的NADW (ϵ_{Nd} 約為-13.5)，與南大洋所形成的AABW及AAIW (ϵ_{Nd} 約為-8) 有著極大的差異，因此海水釷同位素比值可用來區別源自北大西洋及南大洋的水團 [3]。

有孔蟲殼體內之鐵錳氧化物：忠實紀錄海水釷同位素的地質材料

找到可反映水團混合的釷同位素代用指標後，接著我們需要從海洋沈積物中尋找可忠實紀錄海水釷同位素比值的地質材料。在現今的海洋沈積物中，有相當大的比例為生物性碳酸鈣，特別是在大西洋及印度洋。結合前人的工作以及我們在西赤道大西洋的研究結果，指示了生物性碳酸鈣中有孔蟲殼體釷同位素比值可忠實紀錄底層海水的釷同位素值（圖一B），且未受到陸源物質輸入影響[2]。



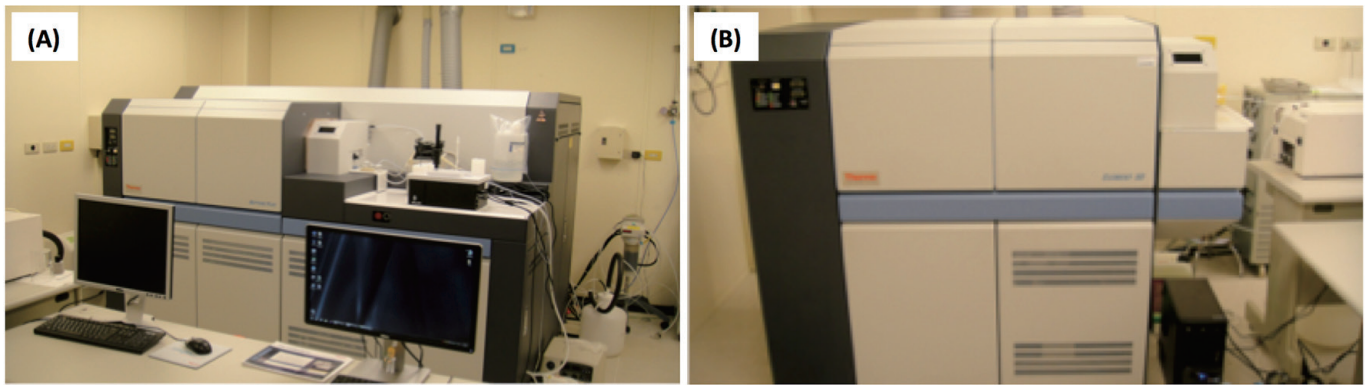
圖一(A) 海水釷同位素比值對鹽度作圖; (B) 海洋表層沈積物中有孔蟲殼體內鐵錳氧化物釷同位素比值與海水釷同位素的關係[2]。

深部洋流循環與劇烈氣候變遷的關係

基於上述的研究工作，我們就可以根據感興趣的科學題目，找到合適的海洋岩心來作進一步的洋流循環重建，並比對過去的氣候變遷。過去幾年我們利用數根大西洋深海岩心（橫跨北緯 40° 至南緯 30° ；水深600-2700 m），重建大西洋內部的中層水及底層水的洋流循環。利用位於西赤道大西洋區域Demerara Rise（ $7^{\circ}50.16' N$, $53^{\circ}39.80' W$ ，水深947m）的岩心，重建結果發現在過去兩萬年以來，兩個北半球劇烈變冷的時期- Heinrich Stadial 1 (HS1, ~ 17.5 - 14.7 kyr B.P.) 及Younger Dryas (YD, ~ 12.8 - 11.7 kyr B.P.)，AAIW往北流動的北界有南移的趨勢，我們認為此結果與全球溫鹽循環的大幅減弱有直接的關係。此外，與太平洋AAIW洋流重建的結果對比，也發現當大西洋區域AAIW減弱時，太平洋區域AAIW似乎有增強的趨勢，顯示AAIW在地球氣候系統發生劇烈變化時，在大洋之間有類似翹翹板消長的現象[2]。我們也同時發現在HS1的時期，AAIW往北流動的強度似乎有兩階段性的變化，此變化與利用冰岩心所重建的大氣二氧化碳變化極為相似，因此我們推論AAIW的強弱可能影響了末次冰期以來大氣二氧化碳濃度的變化[2]。不過我們仍需更多的重建資料，方能證實以上的這些論點。

地球所高精準同位素質譜分析技術的進展

除了建立高精準鋇、釷、鉛、鋁同位素質譜分析技術外，近幾年地球所也以新購置的高解析多接收器感應耦合電漿質譜儀（圖二A）發展非傳統穩定同位素，如：鋰、硼、鎂、鐵、鎳、銅、鋅及鎘同位素，並將這些技術應用於古海洋古氣候重建、海洋化學、岩石地球化學、宇宙地球化學以及環境變遷等相關研究。我們的團隊已完成上述同位素質譜技術的建立，目前正積極與國內外的大學及研究單位進行合作與交流，希望透過這些分析利器與技術，解決於地球化學、氣候與環境變遷等相關的問題。除此之外，地球所也配備有高解析感應耦合電漿質譜儀（圖二B），可精準量測各種地質樣本的濃度變化。



圖二(A) 地球所海洋及地球化學實驗室的新型高解析多接收器感應耦合電漿質譜儀; (B) 地球所海洋及地球化學實驗室的新型高解析感應耦合電漿質譜儀。

結論

全球氣候與環境變遷是目前大家相當關注的一項議題。如果能夠藉由基礎科學研究來瞭解過去地球氣候系統的運作模式及主要的控制因子，我們人類將更具能力去面對未來可能發生的氣候劇變或環境變遷。儘管未來地球氣候系統的變化仍有相當大的變數，但透過古海洋、古氣候的研究，並配合現今的觀測數據，或許能大幅降低未來氣候模擬的誤差。有了更加可靠的氣候預測，我們也能提早作準備，因應未來氣候及環境可能發生的劇變。

參考文獻

- [1] N. L. Roberts, A. M. Piotrowski, J. McManus, and L. D. Keigwin, *Science* **327**, 75 (2010).
- [2] K.-F. Huang, D. W. Oppo, and W. B. Curry, *Earth Planet. Sci. Lett.* **389**, 200 (2014).
- [3] S. L. Goldstein, S. R. Hemming, In: *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, New York. pp. 453-489 (2003).