# 全球暖化正影響著各種尺度的洋流系統
# ——黑潮、大西洋經向翻轉環流、與全球海流

文／鄭志文、葉庭光

## 前言

全球暖化正衝擊地球上的天氣與氣候、海洋、生態、地形與地貌，這些因子間環環相扣的交互作用，不但導致相當規模的物種滅絕、甚至對經濟、政治產生重大的影響(Letcher, 2021)。我們的海洋，也受到全球暖化的影響，逐漸發生改變，譬如，各種海洋環流正因應全球暖化產生過去我們未曾觀測到的現象。而且，這些新的現象很可能逐漸影響我們的日常生活。

在海洋學家的眼中，全球暖化對海洋環流產生的影響，是一個很有趣的議題。我們在地球上觀測到海流的流向與強度，至少受到地球的自轉、海陸邊界、風力作用、熱量平衡、以及海水溫鹽性質等因素影響。直觀上，我們可以感受到在全球氣溫逐漸暖化的過程中，地球的熱量將會重新分配，並逐漸達到平衡。除此之外，風場的分布也會隨著氣溫改變而進行調整。

上述的熱能重新分配伴隨著風場改變，會對海流的變化扮演著持續且滾動性的影響。除了直觀感受到的熱能變化，我們的地球系統還有著各種相當不簡單的機制，會隨著暖化而調整海洋的脈動。譬如，暖化將影響融冰以及淡水循環。這些因素將導致海水鹽度與密度的改變。在過去，人們或許很難想像，這樣些微的海水溫度、鹽度、與密度的改變，竟然會開啟大規模海水水體運動的變異。科學家從北極冰層融解，觀察到淡水釋出造成鹽度、密度的改變，且進一步影響海域環流的變化。目前已有相當多文獻，包括觀察證據與預測資料，不但直指這些現象確實存在，而且未來極端氣候將更趨劇烈(Ebi et al., 2021; Lee et al., 2020)。

由於洋流具有大尺度運動的特性，洋流所到之處，都可能因洋流本身特性的改變，而影響各地原本的季節變化、降雨或乾旱等天候。除此之外，各地區的天候變化，又經常會導致洋流進一步產生我們未曾預料的改變，這裡面有許多有趣的過程引起科學家的注意，值得我們嘗試去窺探其全貌。有鑑於各區域海流對應全球暖化產生的變化有所不同，本文根據暖化下幾種不同尺度與機制所構成之洋流變化，進行探討：

## 全球暖化之下，大西洋經向翻轉環流之減弱

大西洋經向翻轉環流(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC)可視為大西洋表層以及深層海流之緯向(東西向)總和，主要是由大西洋中溫暖、高鹽的表層北向流，與位於深層的低溫南向海流所構成。事實上，這一股南向低溫海流，跟眾所周知的「溫鹽環流」有相當密切的關聯，它是溫鹽環流源頭之部分主流。在南北向持續帶來暖水，並送走冷水的 AMOC，對地球氣候系統的維持扮演著相當重要之角色。這一股洋流主要的動力來源，是受到海面風力吹拂以及水底下溫鹽特性所驅動。

2021 年 Caesar 等人研究指出，最近的大西洋經向翻轉環流強度，竟然達到千年以來最弱的程度，並指出其中最有可能之原因即為氣候變遷(Caesar, McCarthy, Thornalley, Cahill, & Rahmstorf, 2021)。全球暖化導致 AMOC 減弱的原因，主要源自於暖化促使北極融冰加速，而融冰帶來大量淡水，稀釋了海洋鹽度，進一步降低了海水的密度，破壞了該海域洋流原本應該下沉、往南移動之規則。隨著暖化持續加劇，未來北極冰層可能在夏季期間完全消失，大量融化的淡水將衝擊大西洋經向翻轉環流之速度(Lique & Thomas, 2018)。科學家們預測，如果人類無法控制全球暖化的速度，AMOC 到本世紀末可能會減弱 34%～45%，後續對各區域氣候系統可能造成之衝擊將難以估計。

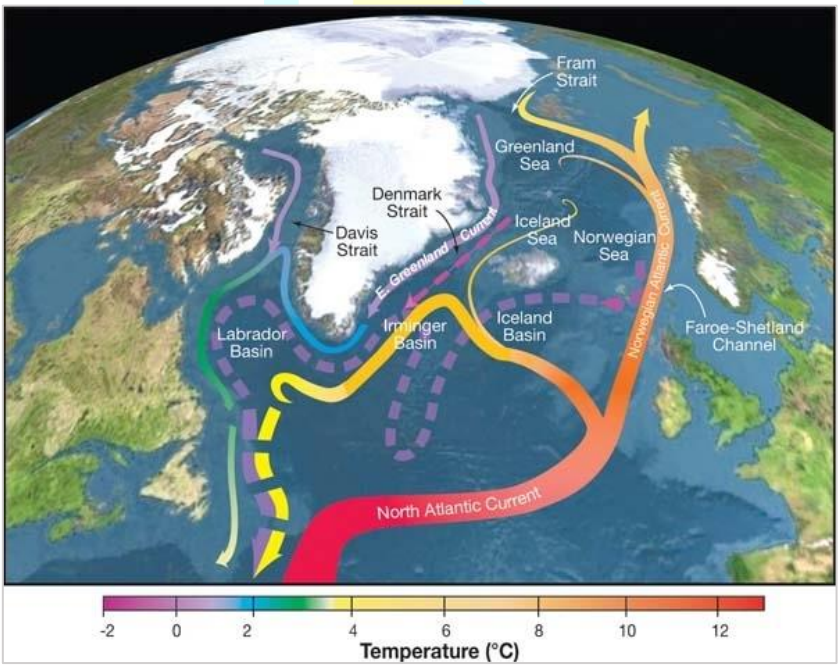


圖 1. AMOC 之示意圖，實線為近表層海流，虛線為深層海流，顏色表示該海流之溫度。

引自 https://editors.eol.org/eoearth/wiki/File:OCP07_Fig-6.jpg

## 全球暖化之下，全球性的海流增強

你沒有看錯，Peng 等科學家在 2022 年的最新研究中，嘗試運用全球海洋模型，將暖化氣候情境所對應的洋流變化進行全面性之模擬(Peng et al., 2022)。他們將暖化情境對地球環境之影響簡化為幾個主要的面向，分別為海表溫的變化，鹽度的變化，以及風力之變化。其研究結果指出，肇因於人為因素構成之海表升溫效應主導、並提升了全球各海域約 77%的海流流速。他們也分析了造成洋流加速之動力機制，發現到，主要的機制源自於暖化的表層水強化了垂直向的海水分層。越來越大的海水垂直向密度差異導致了副熱帶環流(subtropical gyres)以及赤道(Equatorial currents)流被侷限於更淺之區域。由於動量集中作用於有限之水深，加強了副熱帶環流以及赤道流之強度，進而帶動全球各海域近 77%之海流加速。

## 全球暖化下黑潮變化以及對區域氣候之影響

如同前述，在全球暖化的情境之下，全球性大部分海流呈現了流速增強的情形。身為臺灣的好鄰居-黑潮，在全球暖化情境下將如何改變呢，是我們這個段落要討論之議題。

黑潮是位於西太平洋一股強烈之西邊界流，黑潮本身具有高溫、高鹽、低營養鹽之特性。黑潮向西北太平洋持續傳遞熱量，對於維持東亞區域氣候扮演著重要的角色。劉曉薇等人曾在 2016 年，透過海洋環流模式的模擬，探討在暖化情境下，黑潮洋流可能產生之變化(劉曉薇, 余嘉裕, & 張瓊文, 2016)。其做法為，利用政府間氣候變化專門委員會第四次評估報告(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC AR4)中，未來溫室氣體排放情境特別報告(Special Report on Emissions Scenario，SRES)所訂定的 SRES A2 暖化情境下，海溫和鹽度結果之氣候平均值資料作為實驗之初始場。同時，利用暖化後風場、輻射和熱通量來驅動海洋模式，將之視為暖化情境下之黑潮。接著，透過與現行之黑潮實驗進行比對，結果顯示，在二十一世紀末北赤道洋流及黑潮流速整體增加約 10~20cm/s，同時此時西北太平洋海表面高度上升幅度達 15cm，對該情境下黑潮增強將帶動更多的熱量往中高緯度傳送，預期將與既有之暖化情境構成正循環，後續將進一步加劇中高緯度海域暖化之情形，可能造成氣候更為失衡不穩定。為不得不關注之議題。

## 結語

全球暖化正持續影響著地球，然而，我們對於全球暖化可能對地球系統、或人類生存的影響所知有限。主要是因為人類透過現代化的儀器探測海洋所獲得的資料，僅有幾

十年的數據。這也促使科學家正嘗試運用更多的地質學、古生物學、衛星遙測科技、水下科技、海洋新興科技、以及各種模擬程式，來預測全球暖化可能產生的影響。許多研究成果如雨後春筍般發表於各期刊之中。從這些成果中，我們可以窺見全球暖化對全球洋流系統的影響是多元且動態的。對不同的區域、不同深度的海流，可能就有不同的影響(Wang, Wu, & Chao, 2016)。以同為西邊界流的黑潮與墨西哥灣流為例，學者指出，這兩股海流應對暖化的趨勢就相當不同(Chen, Wang, Xie, & Liu, 2019)。雖然不同研究對此議題可能有相當多元的見解，但是，絕大多數研究都顯示出令人憂心的結果：隨著全球暖化持續，海洋的變動加劇，對環境與生態可能都會產生相當大的衝擊。海洋變動速度加快也同時凸顯出，我們對未來的海洋、天候、氣候系統的能量平衡將更難預測。除此之外，變動的海洋也意味著洋流本身熱量、鹽度、密度、流向與流速、與周邊區域養分的交換，都將隨之變動，對我們的漁業、生態環境，將產生相當大、難以準確預估的衝擊。

**鄭志文**
zwz@ntnu.edu.tw
**國立臺灣師範大學地球科學系**
**/海洋環境科技研究所教授**
**葉庭光**
**國立臺灣師範大學地球科學系**
**海洋環境科技研究所副教授**

# 參考文獻

[1] Caesar, L., McCarthy, G., Thornalley, D., Cahill, N., & Rahmstorf, S. (2021). Current Atlantic meridional overturning circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience, 14*(3), 118-120.

[2] Chen, C., Wang, G., Xie, S.-P., & Liu, W. (2019). Why does global warming weaken the Gulf Stream but intensify the Kuroshio? *Journal of Climate, 32*(21), 7437-7451.

[3] Ebi, K. L., Vanos, J., Baldwin, J. W., Bell, J. E., Hondula, D. M., Errett, N. A., . . . Spector, J. (2021). Extreme weather and climate change: Population health and health system implications. *Annual review of public health, 42*, 293-315.

[4] Lee, C.-H., Lin, S.-H., Kao, C.-L., Hong, M.-Y., Mr, P.-C. H., Shih, C.-L., & Chuang, C.-C. (2020). Impact of climate change on disaster events in metropolitan cities-trend of disasters reported by Taiwan national medical response and preparedness system. *Environmental research, 183*, 109186.

[5] Letcher, T. M. (2021). Climate change: observed impacts on planet Earth.

[6] Lique, C., & Thomas, M. D. (2018). Latitudinal shift of the Atlantic Meridional Overturning Circulation source regions under a warming climate. *Nature Climate Change, 8*(11), 1013-1020.

[7] Peng, Q., Xie, S.-P., Wang, D., Huang, R. X., Chen, G., Shu, Y., . . . Liu, W. (2022). Surface warming–induced global acceleration of upper ocean currents. *Science Advances, 8*(16), eabj8394. doi:doi:10.1126/sciadv.abj8394

[8] Wang, Y. L., Wu, C. R., & Chao, S. Y. (2016). Warming and weakening trends of the Kuroshio during 1993–2013. *Geophysical Research Letters, 43*(17), 9200-9207.

[9] 劉曉薇, 余嘉裕, & 張瓊文（2016）。全球暖化下黑潮變化及對區域氣候之影響。**大氣科學，44**(3), 197-214.