

2021 年夏季的全球性極端天氣

文／盧孟明

聯合國世界氣象組織(WMO)在今(2022)年五月發布的《2021 年全球氣候狀況》(State of the Global Climate 2021) [1] 指出：2021 年全球平均氣溫比十九世紀後半(1850-1900)的平均氣溫高出 $1.11 \pm 0.13^\circ\text{C}$ ，1850 年至今最暖七年都在 2015 年之後。除此之外，2021 年夏季相當特別，出現許多異常極端的天氣，包括 6 月 29 日加拿大測到前所未有的 49.6°C 高溫，7 月 9 日美國加州死谷(Death Valley)測到 54.4°C 高溫，7 月 14、15 日歐洲多處發生破紀錄連續大雨造成損失難以估計的水災，7 月 20 日中國鄭州一小時降下 201.9 毫米雨水，最大的 24 小時累積雨量有 645.6 毫米，比年雨量的氣候平均值 640.8 毫米還多。為何在短短的一個月之內有這麼多不尋常的極端事件在各地發生？《2021 年全球氣候狀況》刊出了一篇專欄[2]內容值得介紹，本文順專欄主軸以 2021 年夏季為例談談為何相距遙遠的各地幾乎同時遭遇極端天氣，或稱為「全球性」極端天氣。

行星尺度駐波與北極放大

專欄標題[2]點出了兩個關鍵詞：「行星尺度準駐波(quasi-stationary planetary waves)」和「北極增溫的放大效應(Arctic warming amplification)」。第一個關鍵詞包含「行星尺度波動」和「準駐波」兩個重點，前者顧名思義是具有地球尺度的大氣波動，後者指發生地點隨時間變化不大的波動。「尺度」(scale)是波動在東西和南北方向上的變化規模，以東西方向或緯度圈方向來說，若繞緯圈一週只有一個波峰(脊)和一個波谷(槽)則這是緯向波數 1 的波，如果這個波出現在赤道上它的波長大約為 4 萬公里，在緯度 60 度附近也有約 2 萬公里的波長。稱為大尺度行星波的波長規模必須在 3000 公里以上，換算成緯向波數須小於 10。行星尺度的波動因空間範圍大，變化慢，可維持的時間比較長。

「駐波」按定義是常駐空間某區域之波動[3]。大氣中類似駐波的波動激發作用多數來自山脈阻擋和大洋與大陸之間的溫度差異，地形和海陸差異都有『常駐空間某區域』的特質，在北半球比南半球明顯。又因影響大氣運動的因素甚多，自然界並沒有類似理論那樣波峰、波谷和節點恆常不動的駐波，而是波動環境場隨季節和氣候不斷變化，因此僅能以「準駐波」形容，表示波動性質和理論駐波類似但有變化。

第二個關鍵詞：「北極增溫的放大效應」乃指氣候暖化在極區的增溫幅度比低緯度區域更大，約為全球平均增溫幅度的 4 倍(圖 1)。「放大效應」主要與極區冰雪覆蓋面

積減小有關(圖 2)，冰雪的反照率較高，被冰雪覆蓋的地表或海表面僅能吸收百分之三十甚至更小的太陽輻射能，氣候暖化不但減小了冰雪面積還會增加地表或海表吸熱造成加強暖化的正回饋機制，放大北極氣候的暖化。放大效應除了冰雪反照正回饋機制以外，還受到比較溫暖的洋流侵入北極海以及極區邊界層的大氣對流效率偏弱等因素的影響 [4][5]，這些影響在以陸地為主的南極區域都不存在，因此極地放大作用在北極明顯高於南極(圖 1)。

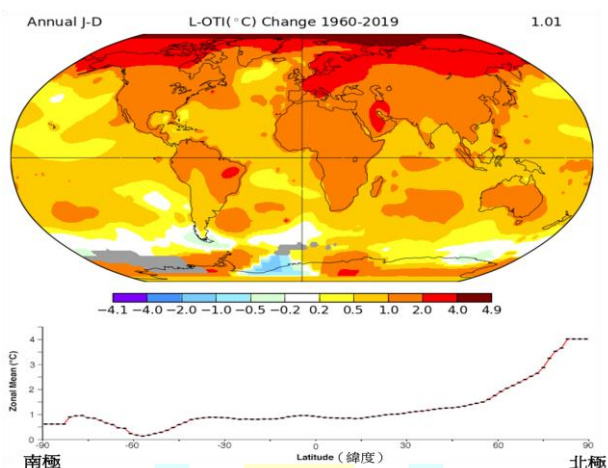


圖 1. 近地面氣溫每年平均氣溫的 60 年(1960-2019)的線性變化趨勢全球分佈(上圖)，及緯向平均值隨的緯度分佈(下圖)。北緯 80 度以北的極區氣溫 60 年間上升約 4°C，明顯高於其他區域。

圖片來源：美國國家冰雪與資料中心網頁

https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/climate_change.html

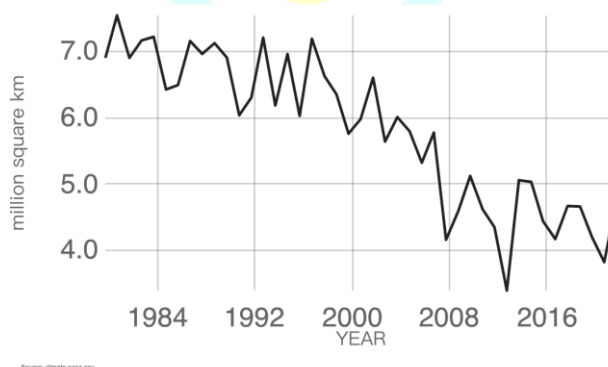


圖 2. 衛星觀測的 1979-2021 年每年北極海冰覆蓋最小面積，時間都在 9 月，最低紀錄發生在 2012 年。縱軸面積單位為百萬平方公里(million square km)，橫軸起點為 1979 年終點為 2021 年。

圖片來源 <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/>

準共振放大效應 (QRA)

「行星尺度準駐波」和「北極增溫的放大效應」(以下簡稱「北極放大」)與極端天氣有什麼關係呢?專欄[2]指出藉由「準共振放大效應 quasi-resonant amplification (QRA)」便可連接三者的關係。QRA 幫助我們了解為何許多相距甚遠的地方都在短短一個月期間內經驗極端天氣,並且隨著「北極放大」近年來 QRA 越來越容易發生。解釋 QRA 之前需要再介紹一個名詞:「羅士比波(Rossby wave)」,這是氣象界紀念瑞典裔美籍科學家羅士比(Carl-Gustaf Arvid Rossby)在 1939 年即奠定了地球大氣行星尺度波動理論基礎,將中高緯度區域的行星尺度波動以他命名。以下將用簡單好記的「羅士比波」以取代「行星尺度準駐波」。

QRA 是羅士比波理論的波動和基本流場的特殊關係。羅士比波理論建立在描述地球大氣流場變化的數理模型,模型包含了處於平衡穩定態的基本流場和當平衡態受到破壞時產生的波動。理論發現若羅士比波的基本流場緯向平均風在中高緯度($55^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)和副熱帶($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)區有西風的經向極大值(離開極大值往北或往南的緯度西風都較小),波動能量無法穿過極值區向南或向北傳遞只能限制在兩個極大值之間,此限制作用對於緯向波數 6-8 的羅士比波特別有效,平均流場有如巨大導管讓緯向波數 6-8 的羅士比波在其中傳遞或消長,當碰到在山脈與地形影響明顯的波動常駐區域可產生共振放大,是為 QRA 效應。

西風噴流

談到西風極大值或許會聯想到西風噴流(jet stream)(圖 3),大氣中緯度較高的極地噴流(polar jet stream)和緯度較低的副熱帶噴流(subtropical jet stream)確實是構成羅士比波的波導(waveguide)基本要素,有興趣的讀者可進一步研讀專欄[2]提供的參考文獻深入了解。在實際大氣,羅士比波基本流場通常用長時間(兩個月以上)平均態作為代表。

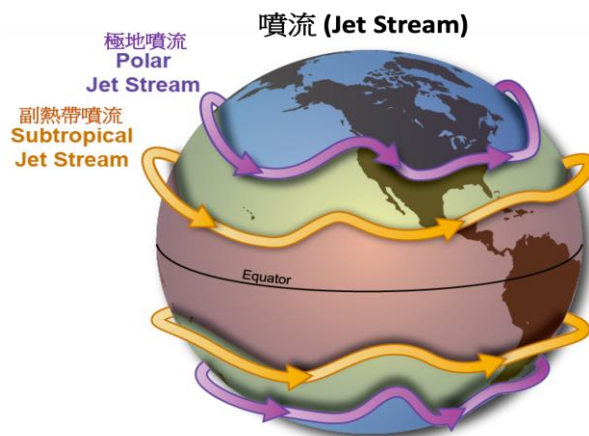


圖 3. 極地噴流與副熱帶噴流示意圖。行星尺度的南北溫度差異是形成噴流的主要原因。在南、北半球緯度 50-60 度附近形成的噴流稱為極地噴流，緯度 30 度附近的稱為副熱帶噴流。前者深受極地氣溫的影響，後者深受熱帶氣溫和對流活動的影響。

圖片來源：美國氣象局網頁

<https://www.weather.gov/jetstream/jet>

實際大氣的駐波與 QRA 效應

QRA 能在實際大氣看到嗎？答案是肯定的。遠離「粗糙」的地球表面，中高層大氣的溫度、氣壓和風場變化經常可觀察到行星尺度的波動變化。圖 4 是 300 hPa 經向風在沒有 QRA (1980 年 7 月) (左圖) 和有 QRA (2013 年 5 月) (右圖) 的案例對照。2013 年 5 月歐洲發生重大水災[7]，右圖看到格陵蘭東南方大西洋上以及歐亞大陸烏拉山脈上方同時出現滯留性阻塞高壓(blocking)，當時(圖略)水氣源源不斷從大西洋輸送至奧地利阿爾卑斯山區，地中海北部低壓滯留大雨不停，終至多瑙河和易北河河水暴漲潰堤，流域所經的七個國家都遭受洪水之災。圖 4 的左右兩圖紅、藍顏色的位置相當類似，表示山脈、海洋、陸地等地形是激發大氣波動的恆常原因，因此常駐空間某區域是駐波的固有特質。另一方面，看到右圖的顏色明顯比左圖更深，表示波動在 2013 年 5 月振幅較大，能量較高，伴隨的天氣更加劇烈。這類因平均西風強度和位置的變化產生的羅士比波和駐波的共振就是 QRA 效應。2000 年之後許多極端天氣事件，如：2003、2010、2018 年歐洲熱浪，2013 年歐洲水災，2010 年巴基斯坦水災，2011 年美洲乾旱以及 2015 年迄今頻頻發生的加州野火等等，都看到了 QRA 效應的影響。

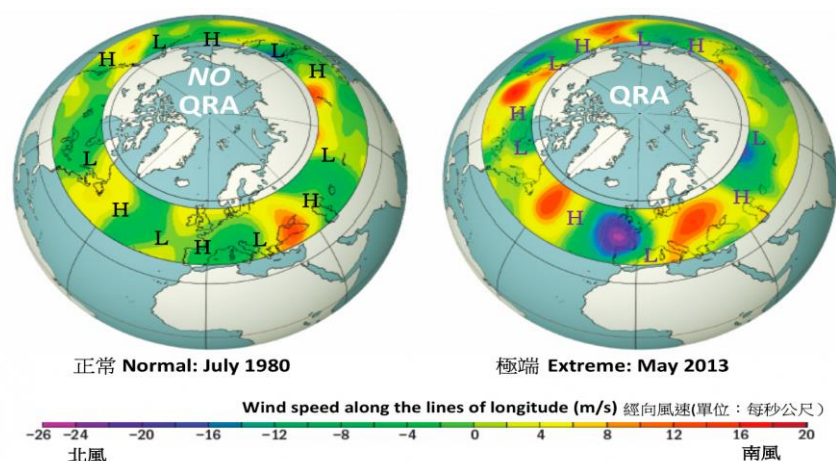


圖 4. 1980 年 7 月 (左圖) 與 2013 年 5 月 (右圖) 在北緯 50-60 度之間的 300 hPa 經向風(V) 分布圖。正值為南風($V > 0$)，負值為北風($V < 0$)。1980 年 7 月準共振放大(quasi-resonant amplification (QRA))不明顯，經向風可代表夏季駐波的波峰(H)和波谷(L)常駐位置，2013 年 5 月在歐洲發生極端降雨及大洪水，右圖可見從大西洋向歐洲延伸的波列，位置與左圖差異不大，強度明顯偏強，空間尺度較大，表示配合的時間尺度也較長。

圖片來源：<https://michaelmann.net/content/climate-change-and-extreme-summer-weather-events-%E2%80%93-future-still-our-hands>

北極放大影響極端天氣

「北極放大」同樣在 2000 年之後更加明顯 (圖 2)，使極區與中高緯度的氣溫差距減小，極地噴流減弱 (北移)。圖 3 所示的「極地噴流」不論是位置或強度都取決於極區平均氣溫與極區以外高緯度區域平均氣溫之間的差距，若北極暖化幅度大於極區外，等同減小中高緯區域的經向溫度梯度，使極地噴流向北極圈內退縮，QRA 效應更容易發生。

熟悉了極地噴流位置和駐波強度變化，我們從這個角度再看 2021 年夏季的全球性極端天氣或許更能有所領悟。圖 5 是 2021 年 7 月的 500 hPa 高度場，在月平均部分呈現明顯的 5 波特徵，主要槽區 (以紅虛線和數字標注在圖 5) 出現在西太平洋與東亞沿岸、東太平洋與美西、美國中西部及東岸、東大西洋與西歐、中亞等地。若聚焦在 50°-60°N 緯度帶，可見大致上在 55°N 以北以高壓距平為主，而低壓距平主要出現在 55°N 以南，表示駐波偏強。比較圖 4 和圖 5 可發現兩年的西歐洪水雖然發生在不同月份但駐波特徵極為相似，2021 年 (圖 5) 在 55°N 以北西歐區域有大片的高壓距平，和圖 4 看到的 2013 年風場特徵一致，變化緩慢的駐波伴隨著持續不斷的西風將大西洋水氣源源不斷輸入西歐，激發致災性的持續大雨。

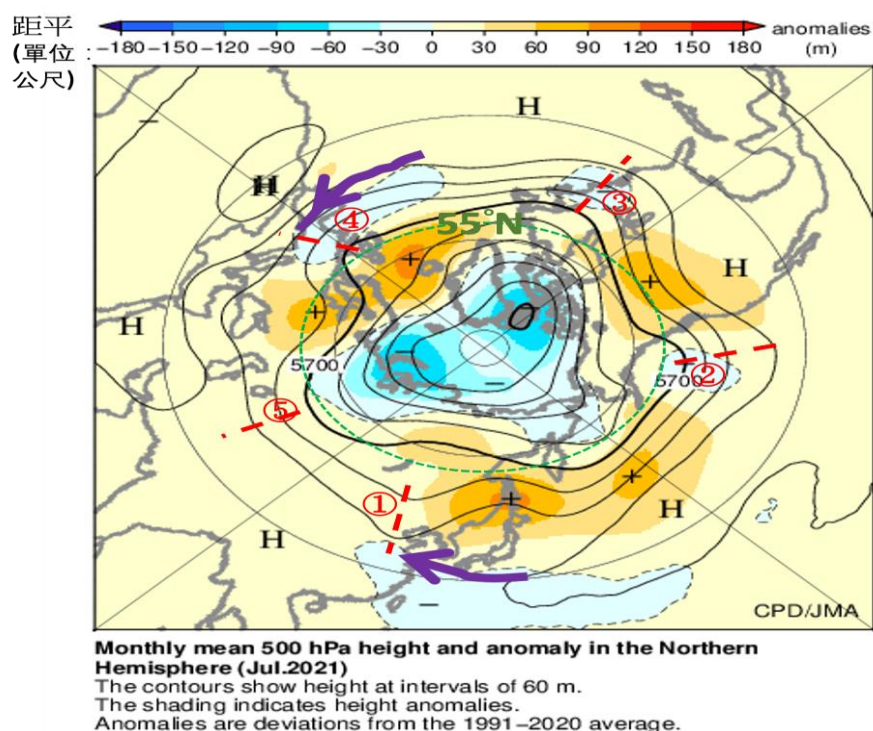


圖 5. 2021 年 7 月北半球 500 hPa 高度場月平均值 (線條) 與距平值 (色階) · 距平為與 30 年(1991-2020)氣候平均值的差值。月平均值清楚顯示 5 波特徵，波谷位置以紅色長虛線及數字標示，55°N 以綠色虛線標示以方便辨識。本月的異常天氣有歐洲和中國鄭州的異常大雨，大雨的水氣來源受高度距平場影響，紫色箭頭分別標示了從大西洋往歐洲和從西太平洋往華北的西風和東風距平。

圖片來源：日本氣象廳網頁

https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/figures/db_hist_mon_tcc.html

結語

《2021 年全球氣候狀況》專欄[2]強調，固然科學界目前尚不完全了解為何 2000 年之後北半球夏季極端天氣比以前更加頻繁和劇烈，近些年研究發現因中緯度環流變化和北極放大效應為 QRA 提供了更容易發生的機會，這是值得大家注意並繼續觀察研究的重要機制。對於在亞熱帶的臺灣居民來說，或許 QRA 效應對臺灣夏季極端天氣的影響不大，但在冬、春以及梅雨季節臺灣的確有機會受到自中緯度南下的鋒面活動影響。那麼臺灣極端天氣與 QRA 效應有什麼關係呢？答案等著你我去發現。

盧孟明

臺灣大學大氣科學系教授

參考資料

- [1] State of the Global Climate 2021 (WMO-No. 1290)
https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22080#.YpyFOBNByb1
- [2] Silva, José Álvaro, 2022: Northern hemisphere summer extremes: the role of the quasi-stationary planetary waves and the Arctic warming amplification. WMO-No. 1290. P40-41.
- [3] 科學 Online 編者，駐波，高瞻自然科學教學平臺，
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1358>
- [4] 維基百科編者，極地放大效應[G/OL]，維基百科, 2022(20220223)[2022-02-23].<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%9E%81%E5%9C%B0%E6%94%BE%E5%A4%A7%E6%95%88%E5%BA%94&oldid=70318351>.
- [5] 盧孟明：快速縮小的北極冰帽。科學發展，491 期（2013 年 11 月），66-73 頁。
- [6] 盧孟明：熱浪洶湧的夏天。臺灣網路科教管，生活科學補給站。<https://www.ntsec.edu.tw/LiveSupply-Content.aspx?cat=6841&a=6829&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&lsid=15642>
- [7] Wikipedia contributors, 2013 European floods, Wikipedia, The Free Encyclopedia.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2013_European_floods&oldid=1092732293