

搶救暖化 Let's Go 全球暖化與不時風雨

氣候變化自古以來從未停止，而全球暖化更是近年來備受關注的話題。如何科學而理性地面對氣候變遷，在在考驗人類的智慧。

郭鴻基、林李耀、陳珮雲

人類仰觀於天、俯察於地，天象氣象觀察源遠流長；老子有「飄風不終朝，驟雨不終日」之句，莊子有「問天地所以不墜不陷，風雨雷霆之故」之辭；中國古人更結合氣象變化與天體運行，定義二十四節氣，緊密結合氣象與農業。《史記》卷二十六談及曆書、四時及草木生長；卷二十七〈天官書〉言及天象星宿，都是最好的例子。經由觀測，人們發覺自然的運作規律，避免因未知而心生恐懼，荀子甚至提出「天行有常，不為堯存，不為桀亡」的樸素唯物觀念。

除了日夜寒暑等規律變化外，人們仍對「天有不測風雲」心懷恐懼。近數十年來因為全球暖化、世界人口財富大幅增加與天然災害頻傳，「不測風雲、旦夕禍福」更是被認為是氣候變遷的後果；當然《荀子》〈天論〉也提到「風雨之不時，……是無世而不常有之」。借用《易經》「變動不居」一詞，自然天氣與氣候的變動有周而復始的成分，但本身也有許多難以預測的變異。

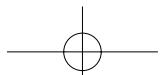
自古地球環境變動從不停止，因為環境變動，所以達爾文認為生物為了適應環境，發生演化。我們身處於一個變動的世代：經濟、社會結構、自然環境都在變動。因為變動，所以人們想要預測變動，以因應變動，氣象預報就是一例。所以「變」是「常」，

但「變」亦是「不常」，某些出現機率很微小的事件發生，便是「不常」。例如買樂透中了頭彩，或百貨公司週年慶，抽中了高級轎車一部，就是「不常」發生的事了。變動一直都在，所以何謂「常」？何謂「不常」？

近年來新聞媒體大幅度播送全球暖化新聞，加上《不願面對的真相》、《明天過後》等影片，社會大眾對氣候變化更加注意。近百年地球平均溫度最高的數年，皆發生在過去十來年，而二氧化碳濃度亦達歷史新高。伴隨這些氣候變動，許多人以「大災難」視之，認為是人類應最優先解決議題，減碳今日不做明日必定後悔。但由於事情涉及跨國政治運作，亦有相當程度困難，以備受重視的《京都議定書》而言，二氧化碳最大排放國的不肯加入，及協議中沒有對潛在最大排放國的規範，其減碳前景之不樂觀不言可喻。本文簡單討論激烈天氣與氣候變遷，希望能提出一些不同觀點，供讀者專家指正。

洗三溫暖的地球

透過冰芯、樹的年輪、沉積物、化石等之探討，古氣候學家重新建構出億萬年前至今的地球氣候溫度，地球的氣候史可視為一系列冰期與間冰期的組合。最大強度的氣候變遷是以億萬年的尺度變化，源自於板塊的



圖一：地球史上主要有四次大冰期。冰河期間，可能整個地球都被冰層所覆蓋。圖為北歐冰島的冰川。

運動及漂移，不同的海陸分布造成不同的氣候分布。地球最熱的時期是發生在 5000 萬年前，從海洋的¹⁸O 沉積物定年發現，那時候的深海溫度比現在海洋溫度高 20°C，那時地球表面是完全沒有冰的覆蓋的。極冰的第一次出現是在南極，發生時間約在 3000~1500 萬年前；北極的冰則出現在約 600~500 萬年前。

第二大強度的氣候變遷是以萬年的尺度變化。米蘭柯維奇提出，地球公轉軌道及自轉軸的變化（氣候學上稱為米蘭柯維奇循環，Milankovitch cycle），認為地球軌道的離心率、自轉軸傾斜角及歲差，造成太陽入射的輻射量有變化，而分別造成約 10 萬年、4 萬年及 2 萬 5000 年前的氣候變化。根據同位素重氫（D）的同位素定位，這樣的溫度變化在 10°C 左右，有足夠的影響力影響地球準冰期。

最後一次冰期極盛期大概在 2 萬年前，那時整個北歐到英國、北美洲到美國賓州都被厚冰層覆蓋（圖一），也因為在陸地上有厚雪覆蓋，海平面比現在下降 125 公尺。過去 1 萬年來，地球處於較溫暖的間冰期，而溫度仍有大約 5°C 的變化，溫度上升與下降並無固定週期或形態變化。

以上溫度都是由其他間接證據重建而

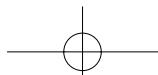
來，自 1860 年有較精確的溫度儀器後，大量氣象站設立，已可廣泛地測量溫度。但地球表面有 70% 為海洋所覆蓋，而海洋部分的資料仍非常稀少；1960 年代後，衛星遙測技術的進步，我們對海洋表面及地表溫度才有較精確的量度。在近百年增溫過程裡，1910~1940 年增溫相當快速，且目前尚未能完全解釋；1940~1980

年代則有明顯的降溫，甚至在 1960~1970 年代時，大部分科學家預測下一個小冰期的出現，人們陷入即將進入冰河期的恐慌。對於此時期的降溫現象，目前解釋為氣膠反射陽光的冷卻作用所致，科學上仍未有定論。1980 年以後，增溫持續且明顯，顯示全球暖化現象。許多科學家認為這是地球史上前所未有的快速增溫現象，但也有科學家持不同意見；部分原因是在建構古氣候歷史資料的同時，資料的歷史越久遠，資料的時間解析度就越粗略，因此很難比較不同時間解析度數據間的變化率。

美國遭 911 恐怖攻擊事件後，境內領空連續三天沒有飛機飛行，期間日夜溫差竟高出約 1°C，可見人類活動確實會影響氣候。



過去一、兩千年內，在區域性或全球性氣候的變遷，亦有許多不確定性。大約在西元 1000~1500 年的這段期間，歐洲氣候較溫暖，人類社會繁榮發展，氣候學家稱這段時間為「中世紀溫暖時期」（medieval warm



period 或 medieval climatic optimum），在歐洲和格陵蘭的同位素分析資料都獲得證實，這段時期的結束，是維京人在格陵蘭式微的主要原因。聯合國跨國氣候變遷小組（intergovernment panel on climate change, IPCC），則採用此段時間全球溫度並未增加的觀點。誠如IPCC的看法，若這段中世紀

溫暖時期全球溫度沒有升高，那麼最近百年來的暖化就會是最近 1000 年內唯一發生的暖化現象，也和IPCC特別重視的溫室氣體暖化推論吻合。比較今昔氣候，不同時間、空間解析度資料的詮釋與爭議，也再次說明了氣候科學的困難與不確定性。

影響氣候的重要變因

地球溫度在近150年快速上升，二氧化碳濃度也逐年增加，除了人為因素外，氣候系統自然變異是否也扮演一定角色？相較於十九世紀，二十世紀大氣科學的進展，使科學家較相信人類活動是足以改變氣候系統的；一個最近的例子為美國遭受恐怖攻擊 911 事件後，美洲大陸有三天沒有飛機飛行，也因此沒有飛機凝結尾的高空冰晶雲，科學家發現這三天日夜溫差，高出約1°C，顯示人類有意無意地在改變天氣氣候。

在這裡以一個簡單數學模式，說明影響氣候系統的重要因子：地球能量收支(CdT/dt)，為地球比熱C與溫度變化的乘積。地球能量收支可以簡化為太陽入射的短波輻射($S \downarrow$)和地球放出的紅外線長波輻射($IR \uparrow$)兩方面的收支，此二者影響溫度變化。

以圖二與圖三討論兩個簡單的平衡系統，設 $S \downarrow$ 不隨地球溫度改變，而 $IR \uparrow$ 隨溫度四次方變化，所以溫度越高 $IR \uparrow$ 輻射越大。假設情境 1 (圖二)， $S \downarrow$ 和 $IR \uparrow$ 兩條線可以相交於一點，即平衡溫度，因若地球溫度高於平衡，則 $IR \uparrow$ 大於 $S \downarrow$ ，地球會降溫，反之亦然，總之氣候系統最後都會回到平衡點的狀態。就好像賺錢和花錢一樣， $S \downarrow$ 線是賺錢速率， $IR \uparrow$ 線是花錢速率，當兩者相等時，收支平衡；而賺錢率大於花錢率，錢財就增加；相反的，賺錢率來

地球能量收支

此系統可寫為 $C \frac{dT}{dt} = S \downarrow - IR \uparrow$
C 包括陸地及海洋比熱 (specific heat)， $\frac{dT}{dt}$ 為溫度隨時間的變化。

太陽短波輻射

$S \downarrow$ 為地球收取的太陽短波輻射，除了太陽活躍度外，亦受其他天文因素(如地球轉軸傾斜)影響。

$$S \downarrow = \pi a^2 S_0 (1 - \alpha)$$

a 為地球半徑， S_0 為太陽常數， α 則為地球反照率 (albedo)。

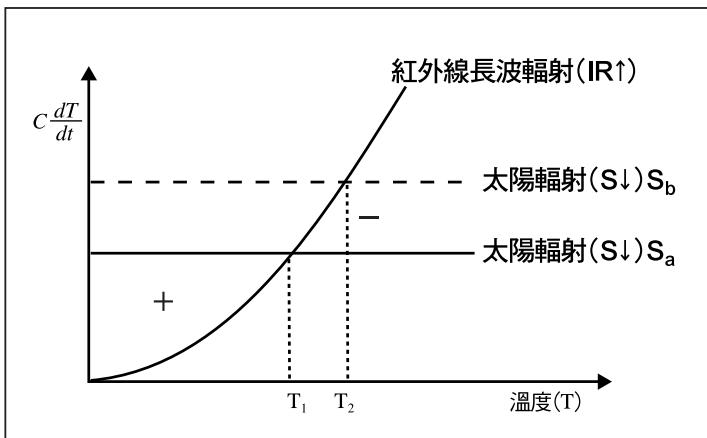
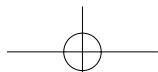
地球反照率受許多因素影響，如地表植被區反照率小，沙漠反照率大，而雲及冰雪反照率則非常大。晴天與陰天太陽光強度不同，就是因為白色雲會反射陽光 (反照率大)。

紅外線長波輻射

$IR \uparrow$ 為地球本身向外的長波輻射，和地表溫度的四次方呈正比，也和放射率 ϵ (emissivity) 成正比。

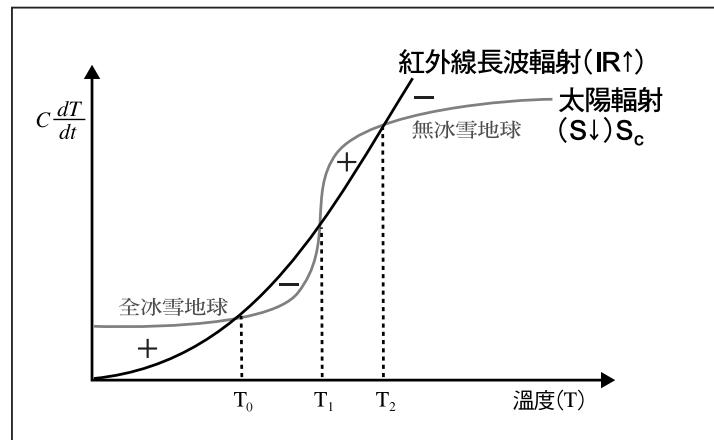
$$IR \uparrow = 4 \pi a \epsilon \sigma T^4$$

溫室氣體同時是很好的吸收體與放射體，故當地球溫度升高，也會使 $IR \uparrow$ 變大，產生散熱效果。



圖二：地表溫度變化，情境 1。地表溫度變化來自於進來的太陽短波輻射及出去的長波輻射之能量差。長波輻射和溫度四次方呈正比，設太陽輻射和地球溫度無關，不受地表反照率影響，則太陽短波輻射為定值(黑色實線， S_a)，若太陽輻射大於長波輻射，則地球獲得熱量而增溫(圖中「+」區)；反之，則地球失去熱而減溫(圖中「-」區)，而地球的溫度最後會趨向平衡點 T_1 。若地軸公轉 / 自轉的傾角發生變化，太陽輻射改變至 S_b (黑色虛線)，則地表溫度會趨向新的平衡 T_2 。

圖三：地表溫度變化，情境 2。考慮太陽短波輻射受到地表(如冰、雪、雲)反照率影響，使其分布不再是定值，而隨溫度變化。設此時短波輻射隨溫度的分布如黑色實線 S_c 。此時兩線會有三個交點，當太陽輻射大於長波輻射，則地球獲得熱量而增溫，地表溫度升高(圖中「+」區)；反之，則地球失去熱量而減溫，地表溫度降低(圖中「-」區)， T_0 和 T_2 為穩定的平衡點， T_1 則是不穩定的平衡點，氣候可平衡於 T_0 (冰雪世界，能量小進小出)，或 T_2 (無冰雪世界，能量大進大出)。



不及補上花錢率，錢財就會

減少。此外，若 $S \downarrow$ 增加，則圖二中平衡溫度也會增加。

情境 2 則考慮不同的狀況， $S \downarrow$ 和地球溫度有關。考慮一個全冰雪的低溫地球或無冰雪的高溫地球，由於入射太陽短波輻射受冰雪反射的影響，低溫冰雪地球比起高溫無冰雪地球接收較少 $S \downarrow$ ，造成 $S \downarrow$ 線分布如圖三，此時出現三個平衡點 T_0 、 T_1 、 T_2 ，由前述收支平衡討論， T_0 與 T_2 是穩定的平衡點， T_1 則是不穩定的平衡點，在 T_1 溫度附近會有混沌蝴蝶效應。這樣的氣候系統很可能因溫度影響冰雪量，由 T_0 平衡(能量小進小出)改變到 T_2 平衡(能量大進大出)，這樣的跳躍經過 T_1 ，也產生了氣候上大幅度的改變。

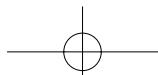
除了 $S \downarrow$ 和 $IR \uparrow$ 能量收支差異外，溫

度改變快慢也受到比熱的影響。毫無疑問地，海洋極大的熱容量，會影響地球系統的比熱，海洋的積極或消極參與氣候系統，有可能大幅加快或減慢溫度變化速率。

綜合以上討論，重要因子包括：溫室氣體放射率(如水氣、二氧化碳、甲烷等的濃度與分布)、海洋大氣的系統比熱、溫度、

熱帶氣旋——颱風與颶風，是自然界最劇烈的天氣，每每對人類生活有很大的衝擊；近年來全球暖化等氣候變遷，是造成大西洋熱帶氣旋發生頻率增加的元凶？



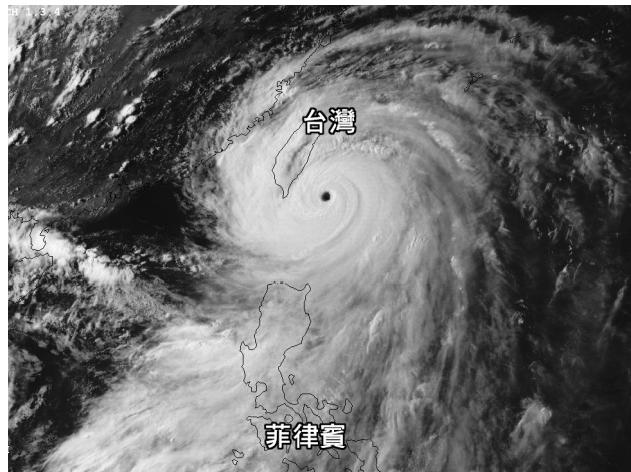


太陽常數、地軸公轉與自轉的傾斜角，以及受到溫度影響的反照率。我們關心冰雪的融化，除了和海平面高低有關外，亦影響地球反照率。除冰雪外，雲與火山爆發亦影響反照率。歷史上火山大規模爆發，都對地球產生明顯冷卻效果；雲的影響則有兩種方式：冰晶高雲擁有良好的溫室效果，高雲增加可使地表增溫；而低雲則擁有極高的反照率，足以減少太陽短波輻射，低雲增加可使地球冷卻。此外，雲亦影響海氣交互作用，一些新的海洋觀測發現在2003~2005年間，從海表至水下750公尺都有明顯冷卻現象，原因仍不明。海洋與雲，仍是目前氣候模式最不確定與最有挑戰的課題。

水循環與熱帶氣旋

全球暖化除了溫度的升高外，對水循環的影響亦是關注的焦點。如高山冰河是自然生態與人類活動的重要淡水來源；與1900年初期相比，大多數高山冰河現因全球暖化明顯退縮。非洲第一高峰吉力馬札羅山山頂的冰雪，近年更大幅減少，但並非因為升溫而融化，而是降雪減少的緣故。

另一議題，為平均海平面上升的問題。目前較精確的衛星觀測指出，海平面以每百年3公分的速度在上升，這和海水熱膨脹數值相近。海平面變化含有各種的時間尺度，因量測點不足，且觀測時間長度有限，加上地殼變動因素複雜，更受到區域潮汐、洋流、海水溫度等影響，一天之中，潮汐水位差就有顯著不同。以低緯度的西太平洋而言，聖嬰年的海水高度可比平常年低40~50公分。二次世界大戰末期，麥克阿瑟將軍對

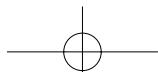


(圖片來源：維基百科)

圖四：2000年夏天，一個強烈的熱帶氣旋颱風碧利斯朝向台灣。

日本作戰的跳島戰術，因碰到聖嬰年，海水高度下降，使美軍登陸艇無法直接衝上岸，犧牲慘重。北極海冰在2007年出現極小值，且遠低於所有預測，加上南極冰棚崩解，亦讓大眾對暖化下極冰的前景擔憂。目前觀測顯示，南半球冰量並無減少，且2008年冬季北極海冰已增多。這些例子顯示我們對氣候系統的理解仍有不足，需更多研究以釐清氣候動力機制。

還有一個令人關心的問題：全球暖化會否造成「劇烈天氣」的增加？熱帶氣旋（颱風）是自然界最劇烈的天氣（圖四），最近有研究顯示，大西洋、南印度洋地區的熱帶氣旋有變強的趨勢，但西北太平洋地區則無此變化。大西洋熱帶氣旋（颶風）資料是目前較完整的熱帶氣旋資料，其颶風活動在近20年非常活躍，懷疑是全球暖化造成；亦有人指出，1960年前，登陸的颶風數目占大西洋全年颶風數目的75%，而1960年後只占60%。如此差異可能是由於觀測方法不同，在衛星資料被使用前，極可能有些海上颱風未被觀測到。此外，早期衛星精確度亦較差，有科學家將最近的衛星資料解析度調整為與過去相當，再做比較時就發現強度似未明顯增加，反而年際間變化相當大。



西北太平洋方面，中國東南沿海和台灣較容易受到颱風侵襲，且颱風強度明顯和聖嬰現象相關。聖嬰時期中太平洋海溫上升，因此颱風在生成後有較長時間在海上，故全年平均強度較強；反聖嬰時期，因颱風生成區域較接近亞洲大陸，在海上時間短，所以平均強度較弱。颱風對氣候與水文循環也扮演關鍵角色，現今對於颱風生成頻率、強度與生命期、降雨分布、生成區域與路徑的變異度等氣候模擬，仍有很大的改善空間，一些影響颱風強度的重要動力過程(如颱風雙眼牆)仍無法合理模擬。此外，深對流雲除了直接影響颱風強度外，亦為影響海氣交互作用的重要因子，氣候模式需要能更正確地處理雲以及海氣間的交互作用，才能深入探討颱風與全球暖化的議題。

結 語

氣候變化自古以來從未停止，最近150年來，地球平均溫度迅速上升了 0.6°C ，人類自工業革命以來排放的大量二氧化碳，影響了氣候變化，這對我們周圍的世界有重大影響。氣候變化不只是平均值的改變，亦可是變異程度的增加；但重建過去氣候有很大的不確定性，我們仍不清楚過去變化發生的確切時間、地點、變異大小以及天氣差異。

任何宣稱單一氣候因子導致變化的論點，都必須被嚴格檢驗，因氣候系統的高複雜度，不容許我們把單一事件歸究於氣候變遷與全球暖化。由遠古的生物大滅絕到近兩千年來的社經振盪，都可能歸因於氣候變化，但也可能同時受其他重要的因素影響。如珊瑚白化，未必是全球暖化、海水升溫所致，也可能與人類活動、海水汙染相關；地震、颱風、洪水及乾旱四大天然災害，過去

20年中造成全球超過150萬人傷亡；平均每日因天然災害傷亡超過184人。

全球暖化現象，也使人擔心更多傳染病的散播。氣候變遷外，公共衛生、健康飲水、教育，乃至貧窮、防災減災措施等，顯然也是人類面臨的大挑戰；資源有限，投入問題的優先次序，在在考驗人類的智慧。

由遠古的生物大滅絕到近兩千年來的社經振盪，都可能有氣候變化的因素。在過去20年裡，天然災害造成全球超過150萬人傷亡。



面對全球暖化，應實事求是，避免因無法預知而恐懼，避免因對科學不了解而盲動。氣候變遷有弊亦有利，我們須更完整了解氣候動力的全貌，及氣候變遷與生態的關係，科學而理性地面對氣候變遷。熱力學第一定律告訴我們：「能量守恆且能量可以作功」。近百年人類社會生活水準的大幅提升，都是建立在能源的使用。然而熱力學第二定律也說到：「能量只能往特定方向移動」。故能量使用後大多無法回收，能源有限，因此我們必須愛惜能源。縱然氣候系統充滿不確定性，愛護森林與保護綠地、發展合乎經濟效益的綠色能源、提升能源使用效率、尋求生活水準與節能減碳的平衡，是一定要做的。◎

郭鴻基：任教台灣大學大氣科學系

林李耀：任職國家災害防救科技中心

陳珮雯：就讀台灣大學大氣科學所博士班