

關鍵2°C

前言

進入二十一世紀至今不但全球平均溫度居高不下，大氣中二氧化碳濃度的增加速率也沒有出現任何減緩跡象(圖1)。人為排放的二氧化碳總量在二〇〇九年因受全球金融風暴的影響較前一年小幅減少，但在二〇一〇年再次飆至歷史新高，全球全年碳排放量達306億噸。

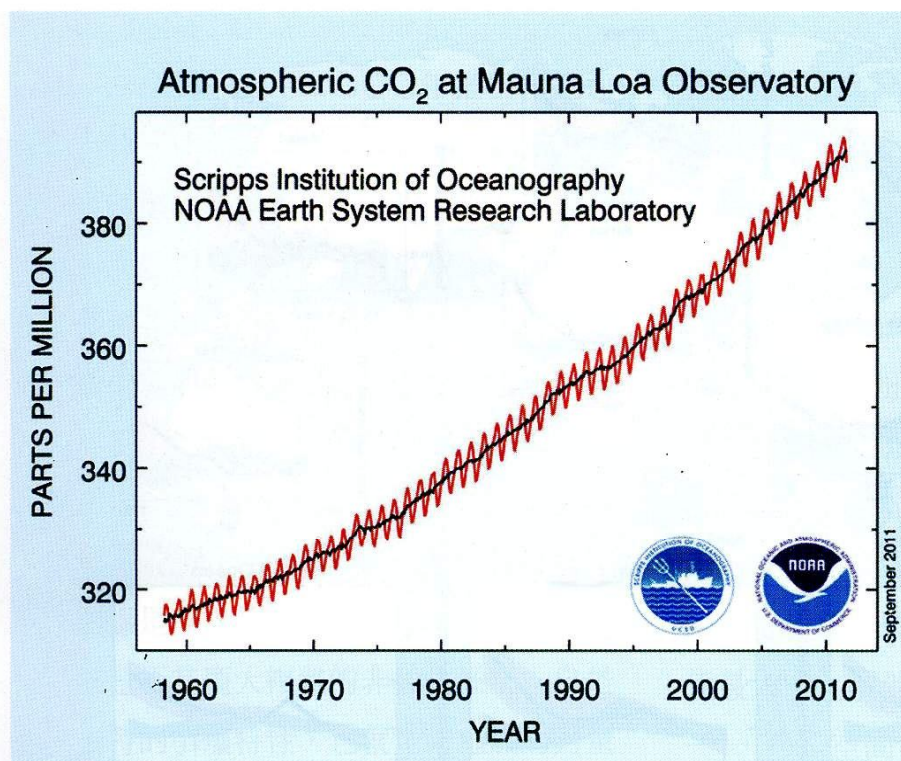
聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)的《京都議定書》(Kyoto Protocol)第一承諾期將在明年底結束，二〇〇五年設定的目標「控制全球碳排放量在二〇一二年比一九九〇年基準再減5.2%」注定無法達成。UNFCCC在二〇〇九年哥本哈根會議協議出接續計畫，以「保持全球平均溫度和工業化時代相比的升幅不超過2°C甚至要小於1.5°C」作為新目標，並在二〇一〇年於墨西哥坎昆第十六次締約國會議(COP-16)獲得193國代表的確認支持。

為何2°C如此重要？新目標與減碳有何關係呢？

大氣中的溫室效應

要了解2°C的意義必須從地球氣候系統溫室效應說起。地球的年齡約為46億歲，漫長歲月中經過多次巨大的氣候變化。五億年前的地球是個冰雪球，表面完全被冰雪封蓋，而五千萬年前的地球卻可能處於表面完全無冰無雪的酷熱狀態，這些極端又長期變化受許多因素影響，其中天文和大氣化學成分尤其是大氣中溫室氣體含量是相當關鍵的。

溫室氣體對於能量高波長短的太陽入射輻射能是透明的，也就是不具吸收能力；但能夠吸收地表受太陽加熱以後散發出去的長波(紅外線)輻射，吸收的能量再以輻射方式向地表和天空釋出。由於溫室氣體可以把地表向天空散發的熱量保存在大氣層內，類似溫室的保溫效果，因此獲得溫室氣體之名。水氣、二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、臭氧、氟氯碳化物等是大氣主要的溫室氣體，若以每一單位量氣體可吸收的紅外線輻射能量衡量溫室氣體的增溫能力，甲烷的增溫能力是二氧化碳的二十幾倍，氧化亞氮則是二氧化碳的兩百多倍，氟氯碳化



←圖1. 從 1958 年三月至 2011 年九月在美國夏威夷Mauna Loa測站量到的二氧化碳(CO₂) 濃度(單位:百萬分率 ppm)。紅線是每月的測量結果,黑線為減去二氧化碳氣候平均的季節變化之後的結果。圖片摘自 Earth System Research Laboratory/Global Monitoring Division: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>)。

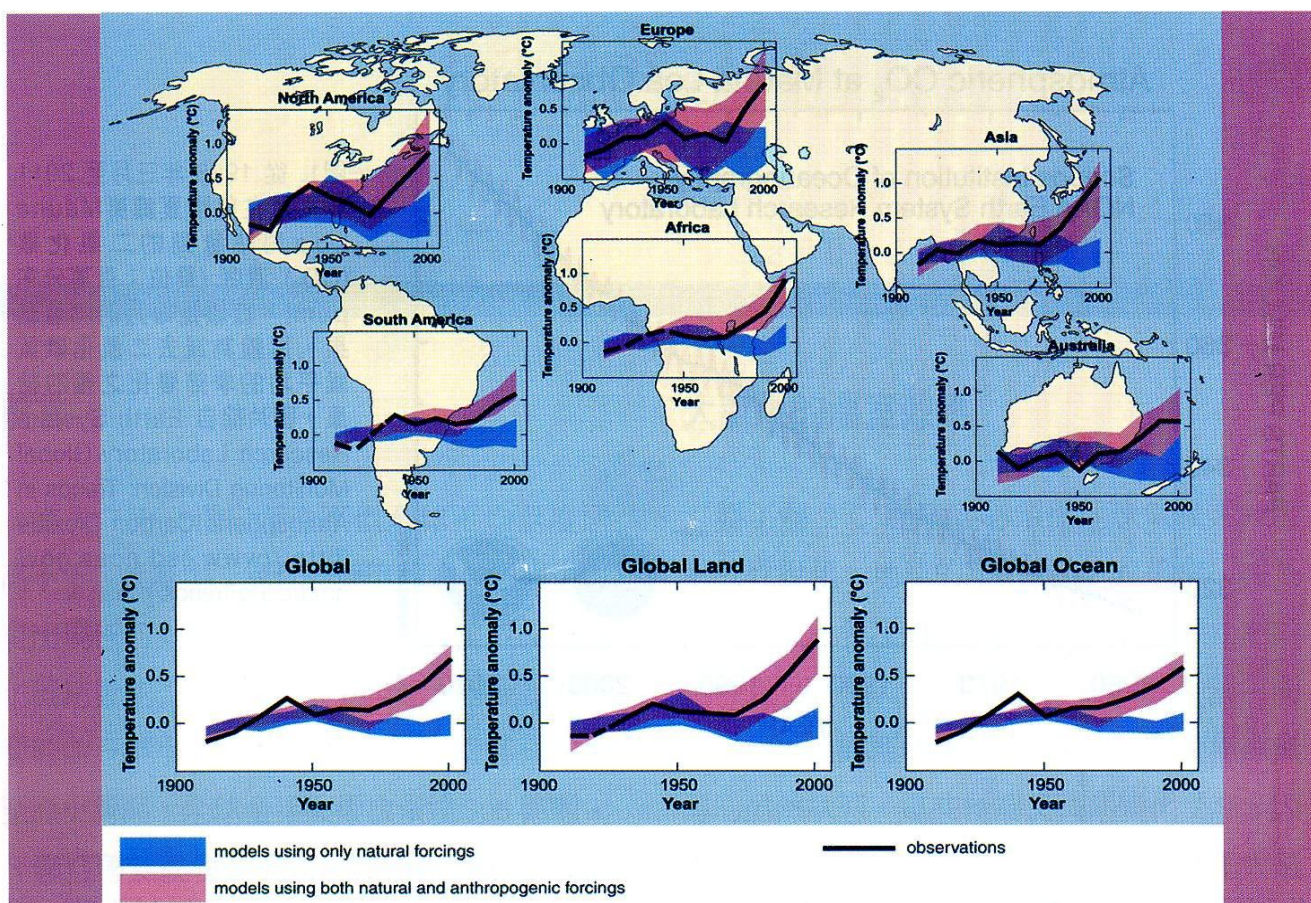
物更是二氧化碳的數千至一萬倍,但是由於空氣二氧化碳含量遠大於其他氣體,總體增溫效果最強。氣候學所稱的溫室效應就是大氣中溫室氣體對溫度的影響。現在地球表面全年平均氣溫為 14℃ 左右,如果大氣不含溫室氣體則平均氣溫會降到零下19℃。

人造溫室氣體的影響

大氣的溫室氣體濃度和氣溫的關係是非常確定的,溫室氣體愈多氣溫愈高,溫室效應愈強。十八世紀工業革命之後人類開始大量使用煤碳和石油等燃料,產生了大量的溫

室氣體釋放到大氣層,空氣中二氧化碳、甲烷、氧化亞氮含量明顯上升。許多科學研究發現,如果不考慮人為工業因素,地球平均溫度的上升幅度不會達到觀測資料顯示的急遽程度(圖2)。

人造溫室氣體以二氧化碳對氣候的影響最大,這是因為二氧化碳在大氣中停留的時間長達百年,不斷累積數百年之後的加溫效果相當可觀。科學家根據聯合國跨政府氣候變遷小組(IPCC)第四次評估報告的數據,估計從工業革命至今累積在大氣中的人造溫室氣體有2.4℃(1.4℃~4.3℃)的增溫能力,比已觀測到的實際暖化幅度(0.6℃)高出 1.5℃,



↑ 圖2. 觀測資料顯示的大陸與全球尺度地表溫度變化和有與沒有加入人為排放溫室氣體的氣候模式模擬結果的對比。圖中的溫度是相對於 1901 至 1950 年平均溫度的距平 (anomaly) 值，經過十年滑動平均後的 1906 至 2005 年觀測值以黑線表示，虛線部分表示觀測資料的空間覆蓋率低於 50%。藍色陰影表示僅使用太陽活動與火山自然強迫的 5 個氣候模式 19 個模擬結果的 5~95% 信賴區間。紅色陰影表示同時使用自然強迫和人為強迫，即加入人為排放溫室氣體的 14 個氣候模式 58 個模擬結果的 5~95% 信賴區間。圖片摘自 Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Figure SPM.4 (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spmssp-understanding-and.html).

氣候系統的引爆點

這表至今可能只有約百分之二十五的人造溫室氣體留在大氣中，其餘的排放氣體都被海洋和植物吸收了。這些暫存在海洋和生物圈的人造溫室氣體，估計在本世紀內有百分之九十會漸漸回到大氣，使暖化的氣候更加溫暖。

人類是否正在把氣候推向不可逆轉的「引爆點」？二〇〇七年 IPCC 氣候變遷報告發布之後這個問題受到更廣泛的重視。

美國《紐約客》雜誌作家葛拉威爾 (Malcolm Gladwell) 著作《引爆趨勢》(The

Tipping Point - How little things can make a big difference) 在二〇〇〇年推出後迅速暢銷全球，使「引爆點」(tipping point) 變成一個時髦的名詞。葛拉威爾的書並不是談氣候，而是對於社會風潮引爆現象的觀察分析，強調若環境已處於蓄勢待發的狀態，不必太費力就能引爆大流行。引爆點也可以稱為臨界點，揭示接下來發生一連串過程的不可逆。

氣候變化是否也存在著一些「引爆點」呢？引爆是非線性系統的一種現象，地球氣候系統是極其龐大複雜的非線性系統，自是有其獨特的引爆特性，也就是說施加的力量與產生的反應往往不是簡單的比例關係，大變化不必靠強大作用力才能啟動。在此要提醒的是，地球氣候系統的變化或不可逆過程的發生與演變所需時間通常比以三十年計算的一個世代的时间更長，和地球相比個人的生命極其微小短暫，看待氣候變化不能只用一代風雲的眼光，必須要有千秋萬世人類自然永續共存的遠景。

美國國家航空暨太空總署 (NASA) 科學家詹姆士·漢森 (James Hansen) 博士是主張氣候引爆點已近的重要學者之一，他指出引爆有兩個重點要注意，其一是引爆水準 (tipping level) 又稱臨界值，其二爆發點 (point of no return) 又稱不可逆轉點。達到臨界值表示在沒有外力作用的情況下變化仍

會持續，而達到不可逆轉點則表示不可逆過程已經開始；換言之，只要還未達到不可逆轉點，縱使變化已經發生還是有延緩達到那一點的機會，一旦過了引爆發點就沒有機會逆轉了。

美國《國家科學院學報》(PNAS) 在二〇〇八年二月份發表的一份評估報告《地球氣候系統的引爆點》(Tipping elements in the Earth's climate system) 對於人造溫室氣體對未來氣候變化影響的研究結果做了全面的分析整理，最後歸納了與氣候變遷政策關係最大的九項地球氣候系統未來引爆點 (表一)，都是空間尺度一千公里以上已有明顯變化的氣候現象。通過引爆點之後的不可逆過程與接續激發的變化都還無法預料，因此也可以將這些引爆點視為氣候系統中的潛在危險因素。最早發生的引爆現象可能是北極夏季海冰和格陵蘭冰原的融化，夏季海冰對於全球的影響還不至非常嚴重，但是如果格陵蘭冰原完全融化則全球海平面高度很可能比現在要高出七公尺，除了許多陸地將被淹沒以外，伴隨的劇烈天氣和毀滅性暴潮對社會和經濟的衝擊都將考驗人類的適應能力。

2°C

人類排放到大氣的溫室氣體加速了地球氣候系統的暖化過程。科學家推估不致使暖化

表一、地球氣候系統變化的危險因素

危險因素	控制參數	臨界值對應之全球增溫幅度	通過臨界值轉變期時間尺度	主要影響
北極夏季海冰面積減少	當地氣溫變化、海洋熱量傳輸	+ 0.5~2°C	~10年	全球暖化加劇，生態系變化
格陵蘭冰原融化	當地氣溫變化	+ 1~2°C	> 300年	海平面上升 2~7 公尺
南極西部冰原融化	當地氣溫變化、當地海溫變化	+ 3 ~5°C	> 300年	海平面上升 5 公尺
大西洋溫鹽環流翻轉	大西洋淡水輸入量	+ 3~5°C	~100年	部份區域變冷、海平面上升、熱帶對流區域改變
聖嬰現象加劇	海洋溫躍層厚度、赤道東太平洋溫躍層梯度大小	+ 3 ~6°C	~100年	東南亞與其他地區乾旱
印度夏季季風區降雨減少	南亞之行星反照率 (planetary albedo)	不確定	~1年	乾旱、環境承載力下降
撒哈拉／薩赫爾地區與西非季風區植被區塊改變	降水	+ 3 ~5°C	~10年	環境承載力上升
亞馬遜雨林破碎化	降水、旱季長度	+ 3~4°C	~50年	生物多樣性下降、降雨減少
北半球中高緯度針葉林區破碎化	當地氣溫	+ 3 ~5°C	~50年	生物群落改變

相對於 1980~1990 年全球平均溫度的變化。

註：1980~1990 年全球平均溫度大約比工業化 (1880-1890) 前溫暖 0.45°C。

參考文獻: Lenton, T. M. and Coauthors, "Tipping elements in the Earth's climate system", PNAS, vol.105, pp1786~1799, 2008. (<http://www.pnas.org/content/105/6/1786.full.pdf>)

失控的大氣二氧化碳安全濃度為 350 ppm (part per million, 百萬分率；即一百萬單位體積氣體中含有 350 單位體積的二氧化碳)。工業革命前大氣中二氧化碳含量一直在 300ppm 以下，但是二〇〇一年的全年平均值已飆至 389.78ppm，今年八月的平均值為 390.02 ppm，遠高於氣候安全值。如果想要避免格陵蘭冰原融解的不可逆過程提早到來，人類除了減少溫室氣體排放別無選擇。

《京都議定書》第一期目標設定以一九九〇年為基準再減排 5.2%，就是期望把大氣二氧化碳控制在安全濃度的要求。自工業革命以來人類排放的溫室氣體有 2.4°C (1.4°C~4.3°C) 的增溫能力，有 0.6°C 已經兌現，還有 1.5°C 的暖化潛力將逐漸展現。若要延緩如格陵蘭冰原融化氣候危險因素的引爆，必須要把人為暖化控制在哥本哈根會議協定的 2°C 安全範圍內。雖然減排與抗暖化意義相同，把控制目標從二氧化碳濃度轉變為全球平均氣溫，除了留下更多空間給世界各國決策者設計合適的環境與經濟政策，也顯出抗暖化是長期的過程並非一時的運動。

結語

地球氣候系統引爆點還不是

氣候學者普遍接受的論點。相對於氣候系統的複雜，引爆點的論述可能把問題過度簡化，以致於任何沒有考慮的氣候因素都有機會推翻引爆過程的推估結果。學者擔心如果未來十年的變化與地球氣候系統的引爆點所述不同，反而容易使公眾對科學失去信心，削弱了溫室氣體減量的推動力量，那才是大災難的開始。也有學者認為目前的科學能力還不足以推估臨界值的發生與轉變時間，過度強調有些引爆過程已迫在眉睫甚至已經開始，可能會讓人誤以為扭轉局面的時機已過，反而不願採取積極行動。

空氣中溫室氣體愈多氣溫愈高是非常確定的，即使從此刻起完全停止排放人造溫室氣體，已累積在空氣中人造溫室氣體還會發揮五十年的暖化作用，新的破記錄的氣象災害還是會出現。人類的生活與生存不能脫離氣候，如何在變遷的氣候中讓人與自然永續共存蓬勃發展，是本世紀的一大挑戰。

