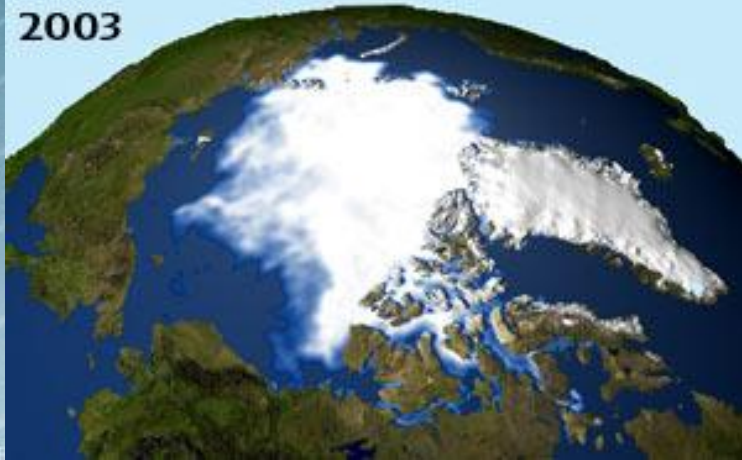




自然與人為氣候變遷

arctic ice caps melting



arctic ice caps melting

http://www.divediscover.who.edu/polar/images/ice_compare.jpg

<http://youtu.be/jhsa6x1fUaY>

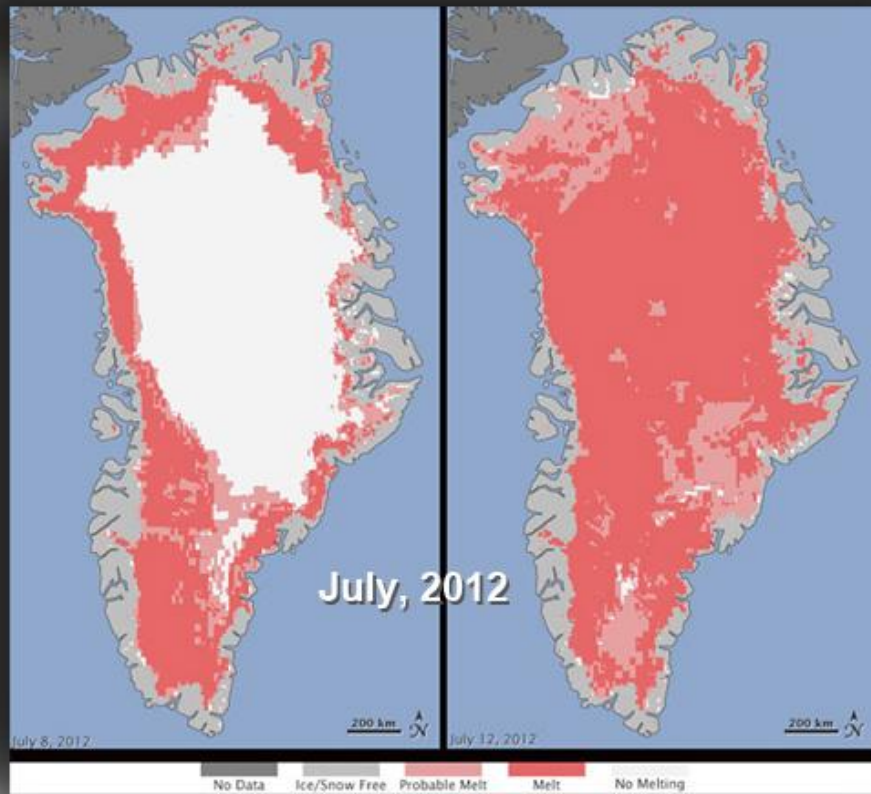
Greenland ice caps melting



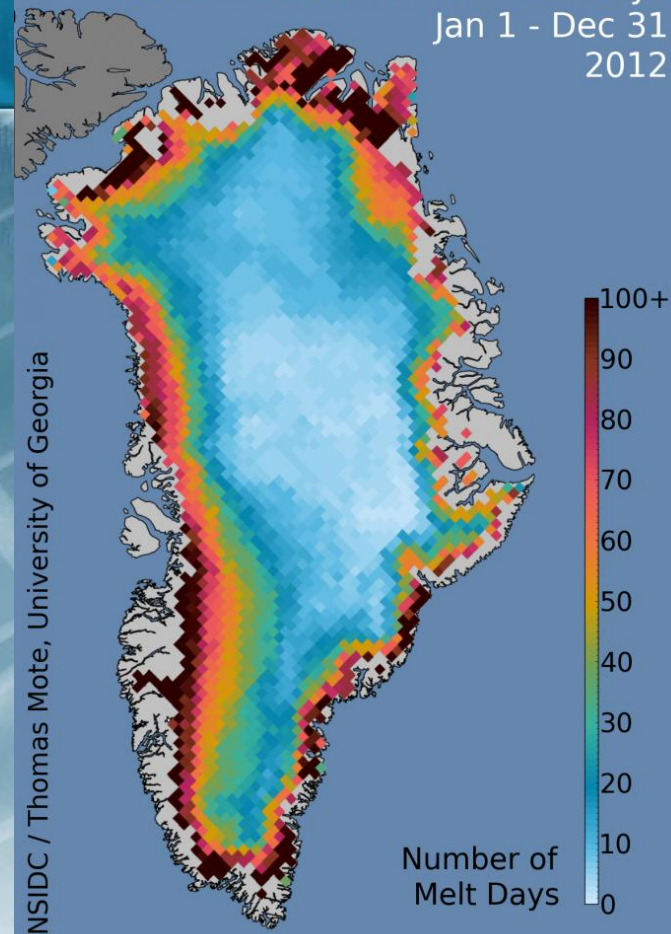
*Greenland Ice Sheet Icebergs
spilling out of Jakobshavn Fjord
from the Greenland Ice Sheet,
seen on the horizon. (Photo
Credit: Oregon State University.)*

multiple years. The summer net infrared and solar radiation for June, 2012. The melt accumulation area approached positive values during this period. Thus, it is reasonable to expect 100 % melt area over the ice sheet within another similar decade of warming.

June, 2012



**Greenland Cumulative Melt Days
Jan 1 - Dec 31
2012**



前言

- 自從有人類以來，為了求生存以及求更好的生存環境，人類不斷向大自然爭取生存空間，成為影響環境變遷的因素之一。人類居住越久、人口越多的地方，受到的影響也越大。
- 當人口稀少、科技不發達，人類焚燒森林擴張耕地，對大自然的影響是區域性而且緩慢的。隨著人口快速增加、科技不斷突飛猛進，人類的影響不斷加速而且擴大影響範圍，假以時日演化成森林縮小、土壤流失、水污染、空氣污染、降低生物的多樣性、沙漠化，甚至可能導致全球氣候變遷。

前言

- 工業革命以來，人類大量的製造二氧化碳、氧化亞氮、甲烷、氟氯碳化物等溫室氣體。人類對大自然的影響不再只是侷限於地表，而是擴張至大氣，而且藉由大氣的運動，將影響逐漸佈及全球，大幅提高了全球暖化的可能性。科學家也因此驚覺到氣候不只變幻莫測，更可能因人類的過度發展而發生更劇烈的變化。1980年代以來，全球平均氣溫迅速上升，不尋常的天氣與氣候現象頻頻發生頻率，更使得氣候變遷突然成為世人矚目的議題。



- 人類研究氣候變遷的時間，相對於地球形成以來的歷史，可說微不足道。但目前研究指出，氣候變遷兼具人為及自然因素，且已威脅到物種的存續。因此，對於氣候變遷，人類要求正確的解讀研究數據的意義，研擬適當的對策，才能求生命的永續發展。

地球歷史上的氣候變化

• 氣候變化的時空尺度

- 地球上各種自然現象維持的時間長短，影響的範圍大小各不相同。
- 如板塊運動在空間上涵蓋極大的範圍，殞石降落則只發生在一個小區域內；冬天的寒流，冷得讓人頭皮發麻，能持續數天。龍捲風的存續時間就短很多，可能數分鐘後就不見蹤跡。
- 若把大氣現象及氣候變化，依照發生時影響的空間範圍大小及作用時間長短來劃分，可得如[圖1]的時空分布。

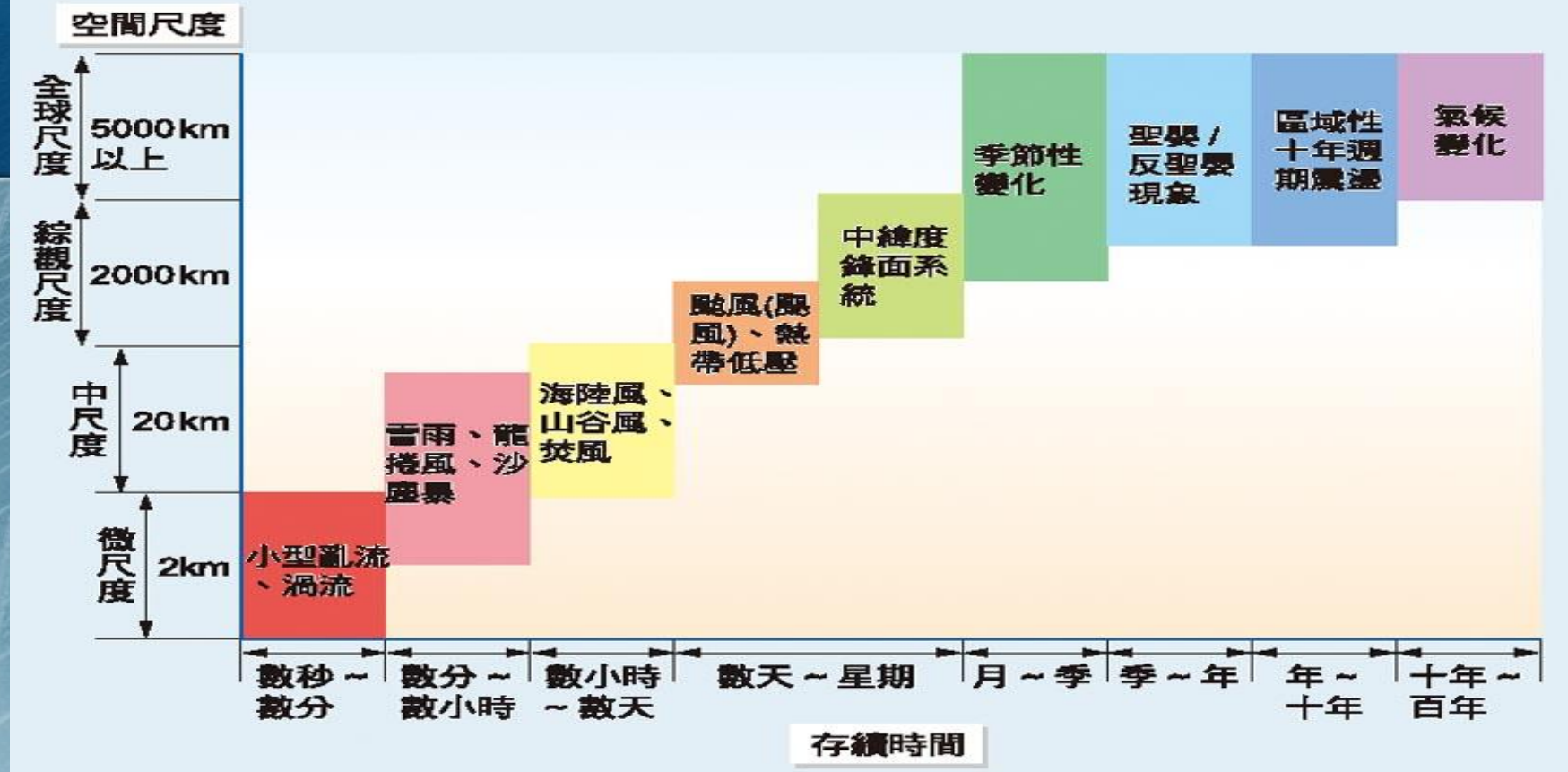


圖1 每一種大氣現象的時空影響範圍都不盡相同。例如颱風作用以數日計，影響範圍可高達上千公里；聖嬰現象的影響時間至少一季，影響範圍可遍及全球。

地球歷史上的氣候變化

- 地球氣候變化的歷史紀錄
- 想了解氣候未來的發展，可從探索古氣候著手。需要漫長時間才能深厚堆積的岩層或冰層中，掩埋許多遠古時期的資訊，是研究古氣候變化的材料。因此，研究人員鑽探極區冰芯，抽取其中的氣泡來分析遠古時期大氣的二氧化碳含量，也利用分析沉積岩岩層中的植物孢子化石，或完整、對比清晰的樹木年輪，企圖了解地球環境自古以來的氣候變化。
- 長期氣候變化的研究指出，地球在過去幾億年[圖3]曾經歷數次冷、暖變化，且冷期的歷時比暖期短，距今最近的冷期約開始於300萬年前。
- [圖4]顯示180萬年前以來的氣候變化，雖然歸類在最近一次的冷期中，期間仍有十數次週期較短的冰期、間冰期交替變化。

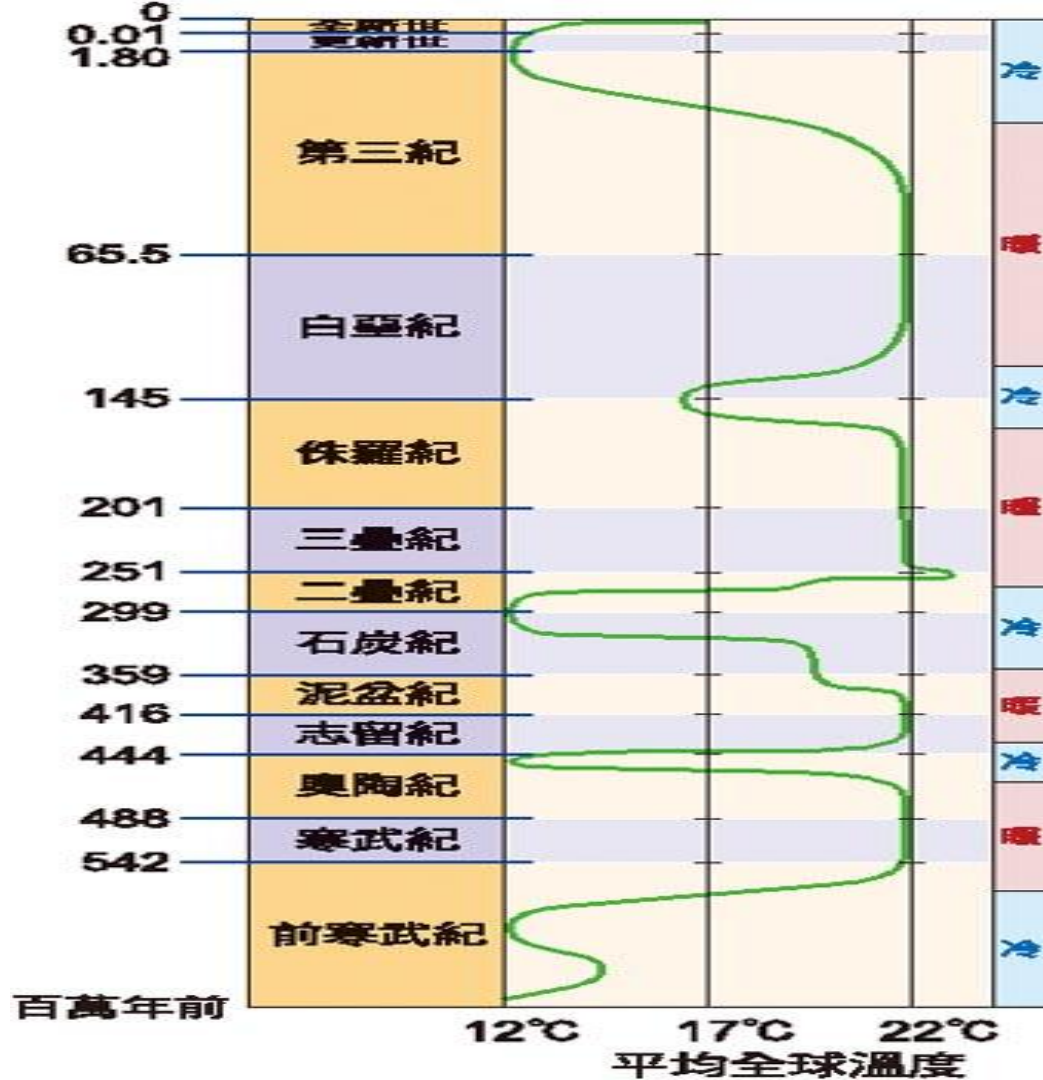
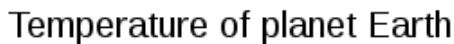


圖3 以地球平均氣溫12~22°C的變化中間值為標準，依前寒武紀以來的長時間尺度冷暖變化圖做出（時間軸未依比例繪製）。圖中，可看出前寒武紀與石炭紀是比較長久的冷期，持續近億年，進入白堊紀後，則有一段長久的暖期。

地球過去5.4億年的溫度變化



Author: Glen Fergus

5.4億年到6500萬年前:收集的宏觀海洋生物殼的穩定氧同位素測量值

6500萬年到530 萬年前:微觀海洋生物的氧同位素數據全球收集的解釋

530 萬到 100 萬年前:全球微觀海洋生物氧同位素數據堆棧

五次大冰期

1. 新太古代大冰期
2. 前寒武紀大冰期
3. 早古生代大冰期
4. 晚古生代大冰期
5. 第四紀大冰期(目前處於結束後的間冰期)

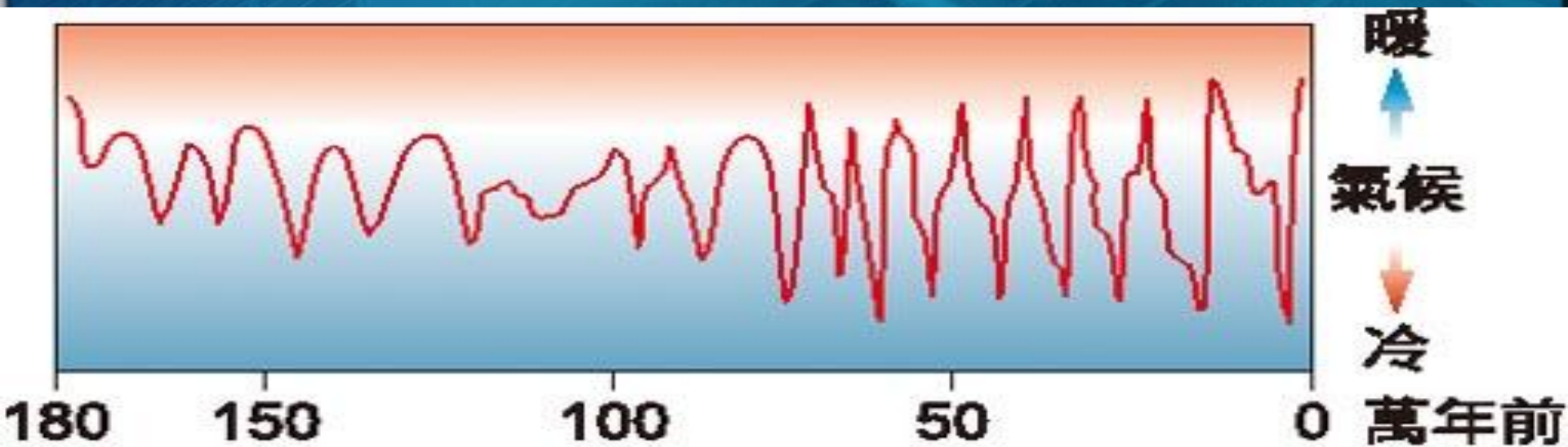


圖4 距今180萬年以來的冰期—間冰期冷暖交替更迭變化圖，可約略看出具有週期性，冰期的原因複雜：有太陽週期的變化，溫室氣體的濃度，地質板塊的運動，行星軌道的變化。

地球歷史上的氣候變化

- 地球氣候變化的歷史紀錄
- 冰期時，極區冰原擴大，全球海平面下降，陸地面積相對增加，影響局部地區的氣候與洋流。海面溫度降低，導致海水層狀結構不明顯，垂直方向的混合作用增強。寒帶植物則因氣候寒冷向低緯度、海拔較低的地方發展。
- 在臺灣，冰期曾使臺灣海峽海面下降120公尺，讓臺灣和東亞大陸相連，使內陸地區距海更遠，受海洋的調節更弱，因此當時的大陸性冷氣團和東北季風比現在強烈。

地球歷史上的氣候變化

- 地球氣候變化的歷史紀錄
- 把焦點拉到近12萬年以來的氣溫變化，距今最近的一次冰期稱為末次冰期，約在1萬8000年前達到極盛，之後氣候逐漸回暖。但約1萬2000年前，出現歷時約1000年的短暫冰期，稱為[新仙女木事件]。
- 而約在1000年前，曾有一段溫暖的[中世紀暖期]，維京人甚至能到格陵蘭發展農牧業。由於航海便利，易於栽植的馬鈴薯也從美洲傳到歐洲，解決當地糧食不足的問題，奠定歐洲發展的基礎。不過約500年前（15～19世紀），又邁入短暫[小冰期]，移居到格陵蘭的維京人被迫撤離。

新仙女木事件

在末次冰期後期，氣候開始回暖，使北美洲大陸上的冰融化，大量淡水流入北大西洋，海水鹽度遭稀釋，溫鹽環流調節高、低緯度熱量差異的能力遂減弱，因此約1萬2000年前起又變冷。仙女木是生長在寒冷環境的草本植物，原本已逐漸絕跡，在此時又大量出現，故稱為[新仙女木事件]。



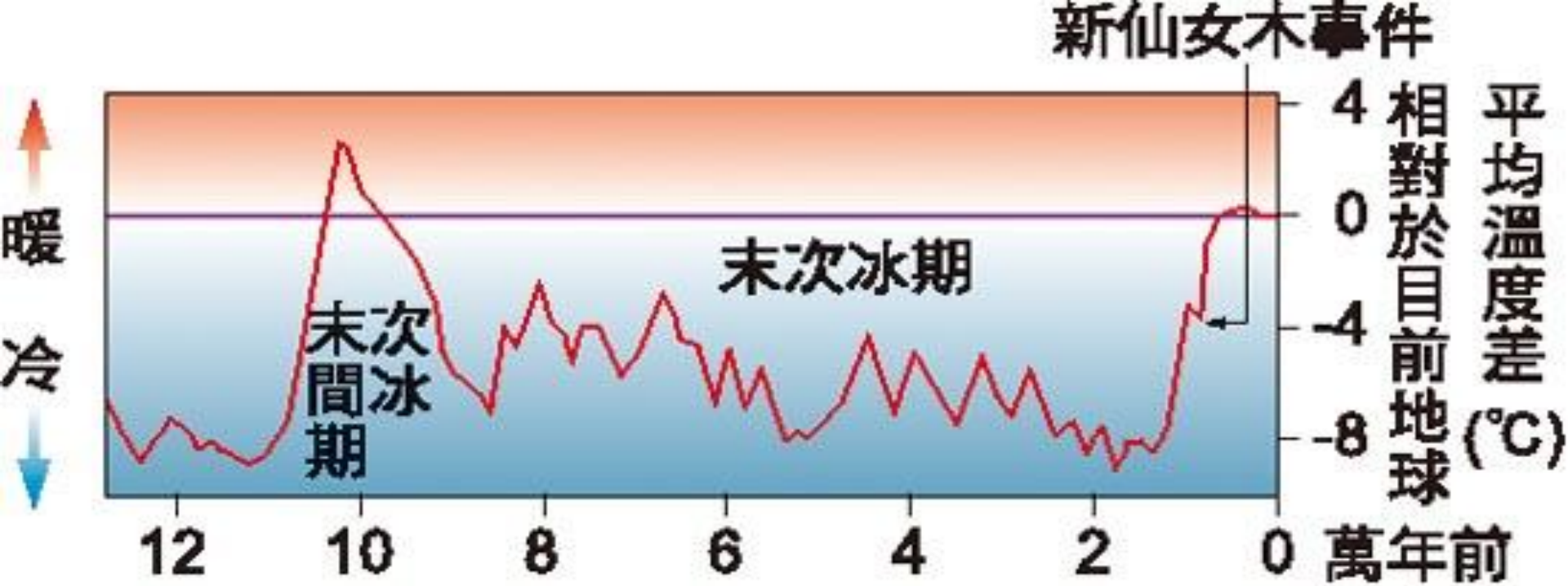


圖6a 距今12萬年的氣溫距平圖。「距平」指各年氣溫與目前地球平均溫度的差異。

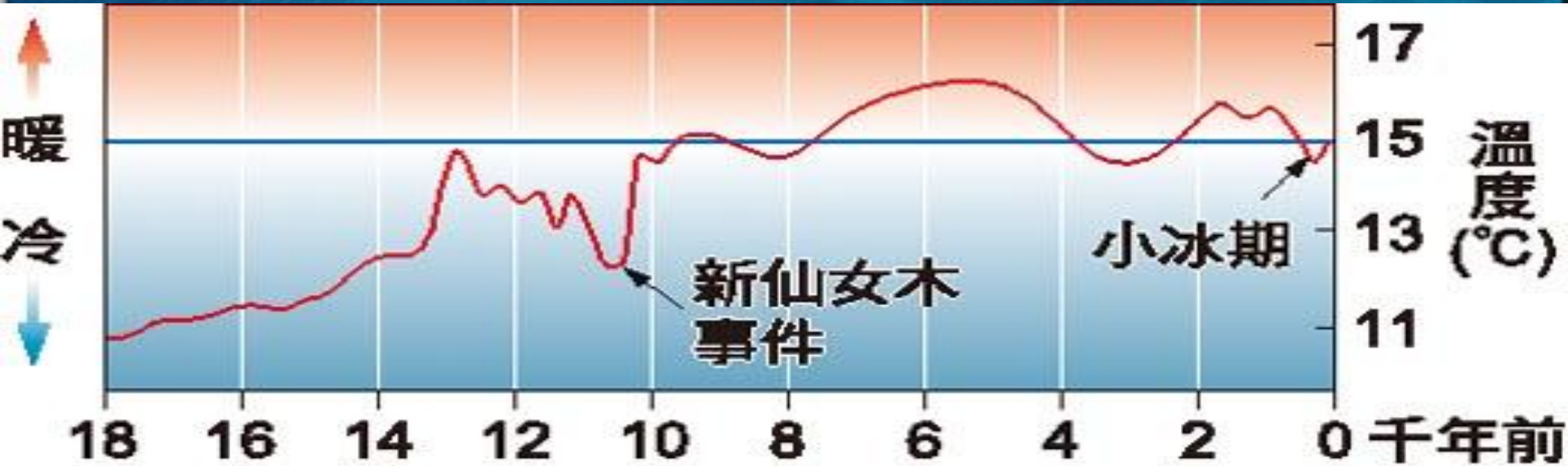


圖6b 距今1萬年以來溫度趨於穩定，約在15°C，但氣候也有冷暖的波動。距今約500年前，15~19世紀曾進入小冰期，氣候短暫變冷。

地球歷史上的氣候變化

- 氣候變化的自然因素

透過冰芯、樹木年輪、黃土、深海岩芯和珊瑚等資訊，較能探索數百萬年來的氣候變化現象，特別是氣溫與冰雪覆蓋面積的變化。更早之前的年代，完整且具代表性的樣本稀少，所以只能以均變說的定義來推敲。

- 億年以上的時間尺度變化因素

造成億年尺度的氣候變化原因與[板塊運動]有關。板塊運動過程中，陸塊面積大小、海洋陸地分布或板塊邊界地質作用引起的地形變化，都會影響氣候。

地球歷史上的氣候變化

- 氣候變化的自然因素
- [圖7a] 為3億2000萬年前石炭紀的陸塊分布，當時陸地主要分布在南半球且接近南極，由於高緯度陽光斜射加上陸地比熱小、放熱快，造成氣溫降低。加上降雪覆蓋在廣大陸塊上，增加陽光反照率，將入射到地面的太陽輻射大量反射回太空，減少地表吸收的熱量，氣溫更低、冰雪更難融化，導致冰雪覆蓋面積增大，造成石炭紀的冷期[圖3]。
- 到2億5000萬年前的二疊紀[圖7b]，全球陸塊集中成一大塊（盤古大陸），接近赤道區的陸地面積增加，氣溫隨之增高，逐漸進入暖期。
- 板塊運動的時空尺度極大，所以冷期維持的時間較久。陸塊在海洋上漂移，可能阻擋調節高低緯度間熱能差異的[溫鹽環流]，使氣候變得寒冷。

3億2000萬年前



2億5000萬年前



圖7

(a) 3億2000萬年前石炭紀的陸塊分布。當時陸地大多分布在南半球且接近高緯度地區。
(b) 2億5000萬年前二疊紀的陸塊分布，全球陸地集中成一塊，即盤古大陸。

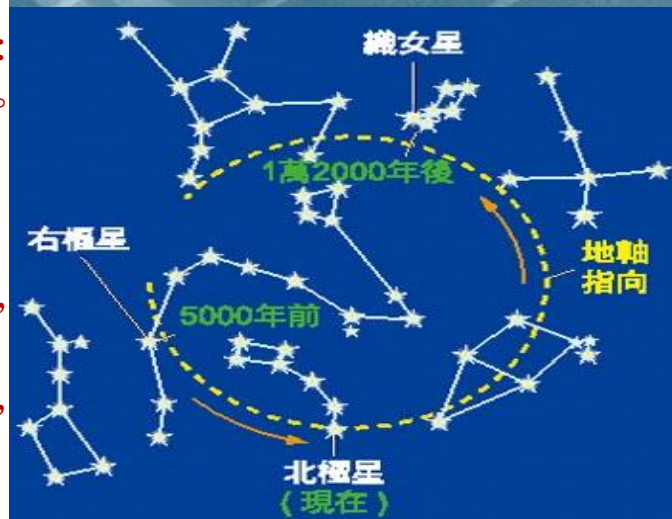
9-1 地球歷史上的氣候變化

- 氣候變化的自然因素
- 二、數萬年時間尺度的週期性變化因素
- 賽爾維亞數學家米蘭科維奇 (Milutin Milankovich, 1879~1958) 認為冰期、間冰期的出現，與太陽和地球關係中的歲差、黃赤交角變化以及地球公轉軌道的偏心率變化有關：
- 1. 歲差：歲差是地球自轉軸受太陽和月球引力影響，而緩慢搖晃。晃動一圈週期約2萬6000年，引起地球公轉軌道面（黃道面）和天球赤道面的交點改變。歲差導致地球近日點時間有變化。地球現在1月位於近日點，因此北半球冬季比南半球冬季稍暖；7月在遠日點，北半球夏季比南半球夏季溫度低。約1萬年後，如圖9-8 所示，1月分時陽光直射北半球，北半球變成夏天，且因地球位在近日點，北半球夏季氣溫會比南半球夏季高。

歲差

歲差在物理上是一種「進動」現象，而其在天文上的意義如下：

1. 極軸的週期性變化：地球自轉軸搖擺，使軸的指向產生變化。圖中虛線表示北天球的地軸指向變化軌跡；現在指向北極星，1萬2000年後，可能指向織女星。目前南天球的地軸指向並無亮星，未來當地軸指向出現亮星，便可說是南極星。
2. 對時間的影響：以大眾熟知的黃道十二宮來說，約3000年前，巴比倫人依地球、太陽及星座的位置制定3月22日至4月21日出生的人屬於白羊座，但現今因歲差的關係，前移一個黃道星座，變成雙魚座，由此可知黃道十二宮是反映太陽在天球上運行的軌跡。



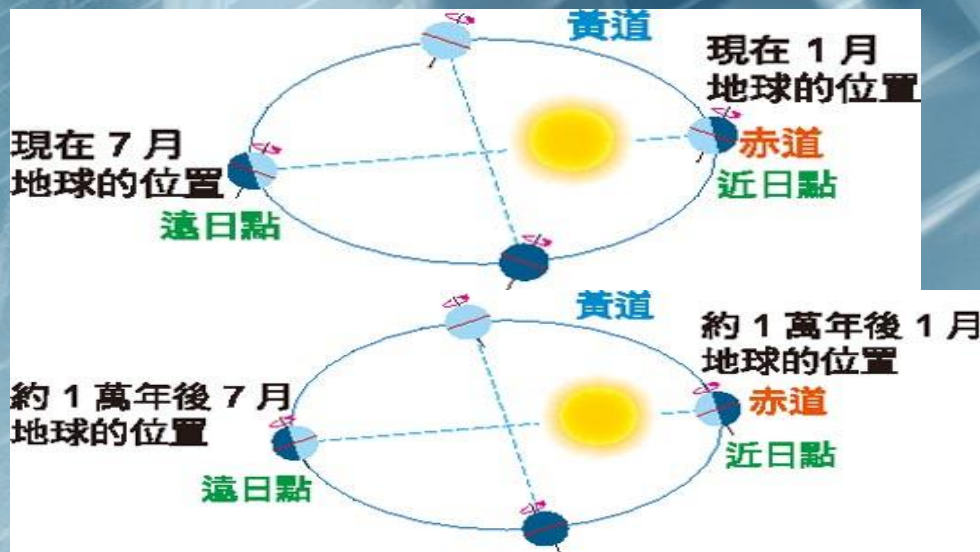
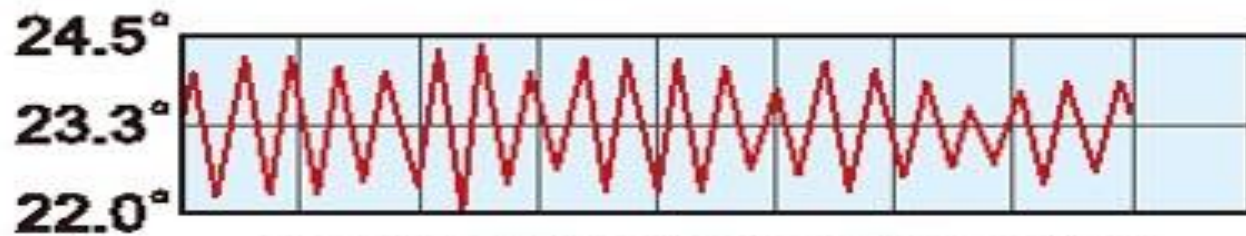


圖8 a.地球自轉軸歲差示意圖。圖中綠色虛線箭頭表示地球自轉軸週期性晃動的方向；b.自轉軸傾向太陽的月分，會隨地球自轉軸2萬6000年週期性的緩慢晃動，逐漸改變。

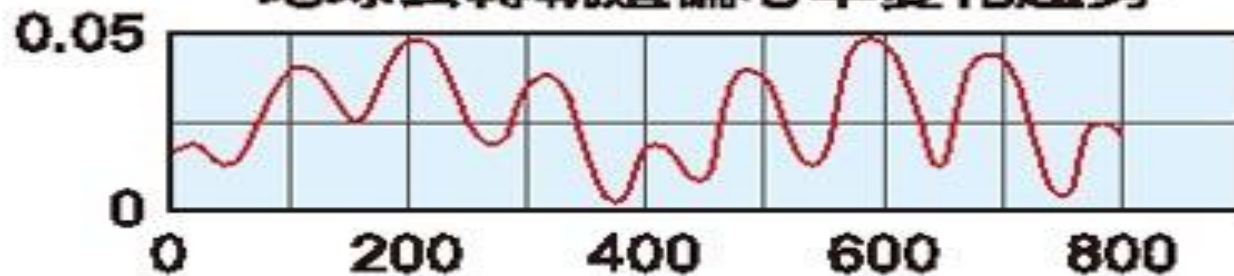
9-1 地球歷史上的氣候變化

- 氣候變化的自然因素
- 二、數萬年時間尺度的週期性變化因素
- 2. 黃赤交角變化：受到月球與太陽引力的影響，地球赤道面與黃道面之間的夾角，在 $22.0^{\circ} \sim 24.5^{\circ}$ 間呈週期性的變化，目前是 23.5° ，變化週期大約是4萬年 圖9-9。黃赤交角的角度愈大，將使南、北回歸線的位置朝更高的緯度移動 圖9-10，也就是地表能被陽光直射的熱帶範圍擴大，但相對的也使高緯度極圈範圍擴大，如此將使高低緯度間與冬、夏季的入射太陽輻射量差距增大。
- 3. 偏心率變化：地球繞行太陽運轉的公轉軌道並非正圓，而是近乎圓形的橢圓形。太陽位在橢圓的一個焦點上。地球公轉橢圓軌道偏離正圓的程度稱為偏心率，且以10萬年為週期在 $0.005 \sim 0.05$ 之間變化 圖9-9。偏心率愈大，表示地球在近日點與遠日點的日照量差距愈大

黃赤交角（地球自轉軸傾斜角度）變化趨勢



地球公轉軌道偏心率變化趨勢



距今年代（單位：千年）

圖9 黃赤交角與偏心率的變化趨勢圖。

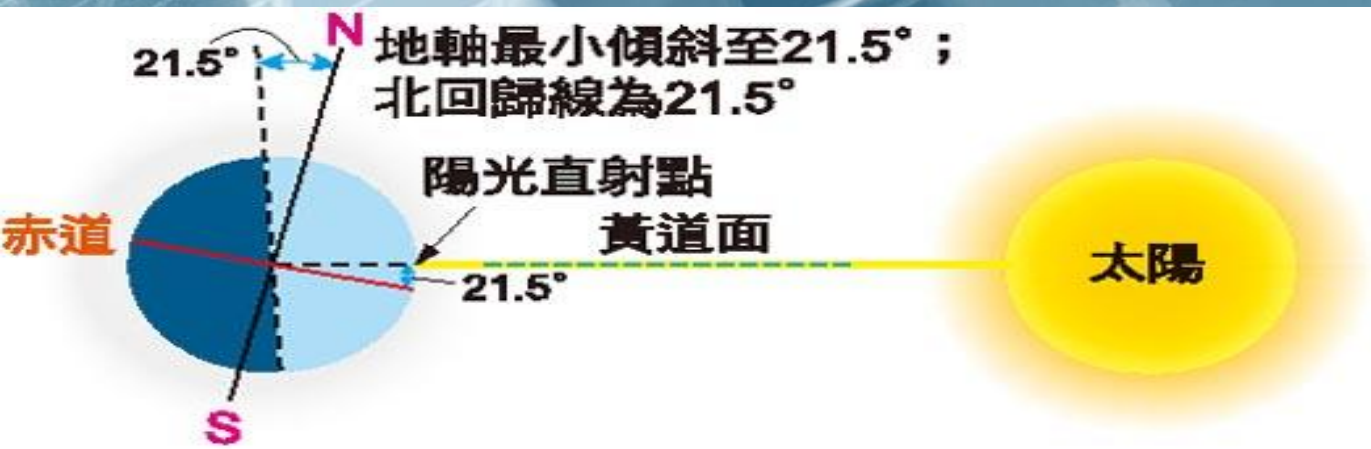
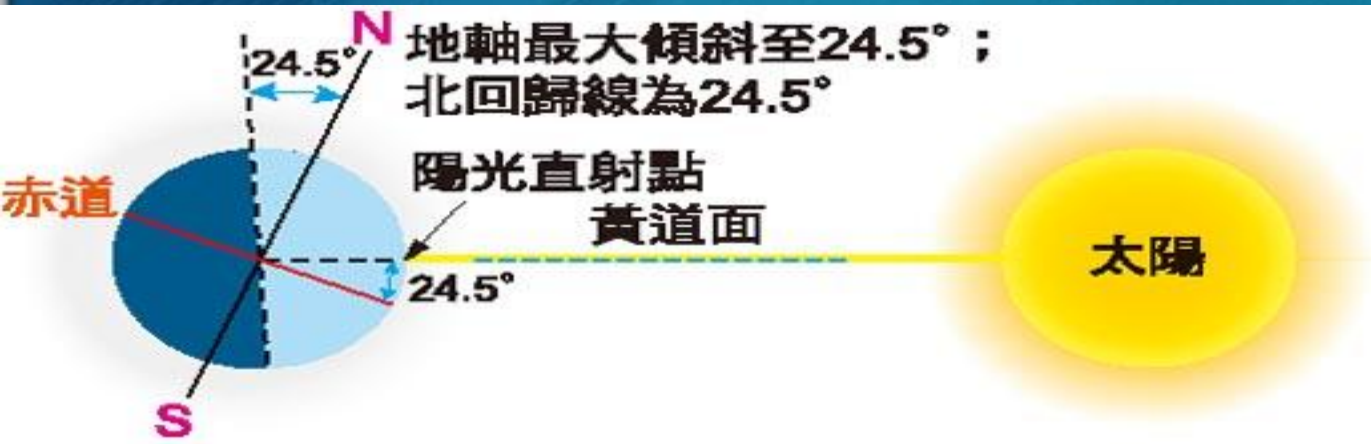


圖10 黃赤交角的變化，會使受太陽直射的區域，即南北回歸線間的熱帶範圍，有所變化。

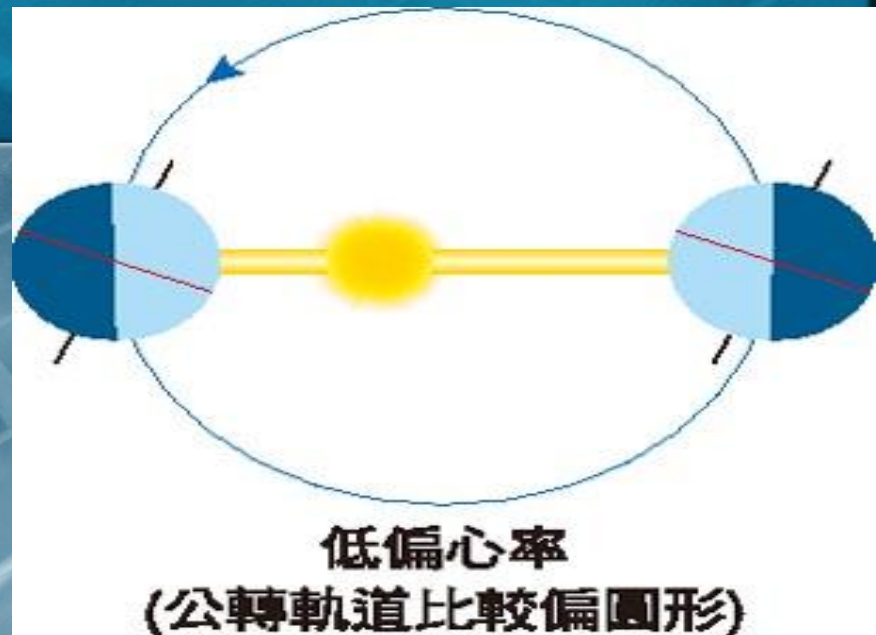
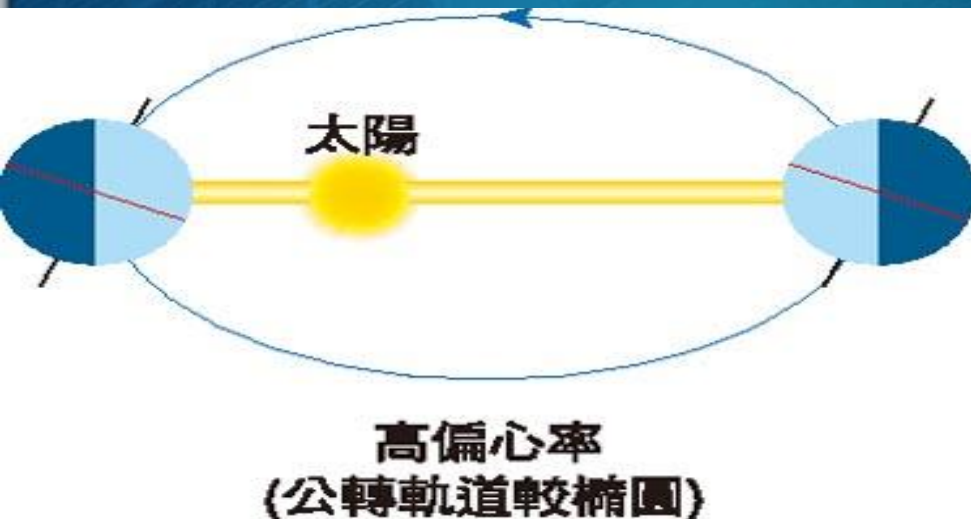


圖11 地球公轉軌道偏心率的變化。其會影響地球近日點與遠日點的距離，造成日照量有差距變化。

地球歷史上的氣候變化

- 氣候變化的自然因素
- 三、數年時間尺度的變化因素
- 火山爆發噴出固態的火山灰，對地表溫度有冷卻的作用；與火山作用一併噴出的二氧化硫進入平流層後，逐漸轉化成含硫的懸浮微粒，也有冷卻的功用
- 1815年，印尼 塔博羅火山噴發，噴出煙塵之多，讓往後兩年的陽光和星光亮度降低，並造成1816年美國新英格蘭出現異常寒冷的夏季，歐 美各國稱為無夏季的一年。同年，臺灣 竹、苗地區的冬季，地面結霜約3.5公分厚；中國則在1816、1817年時，因氣候惡劣導致作物歉收。1991年，菲律賓 皮納度波火山噴發後，全球氣溫降低 0.5°C ，到1994年才回升 [圖12] 。
- 單次火山噴發所生漂浮在平流層的懸浮微粒，差不多在2~3年內就受地球重力影響沉降到對流層，而後消散。因此，雖然一次強大火山噴發造成的大氣冷卻效果，大於工業革命以來溫室氣體累積數十年所造成的暖化作用，但對地球氣候的影響較為短暫。

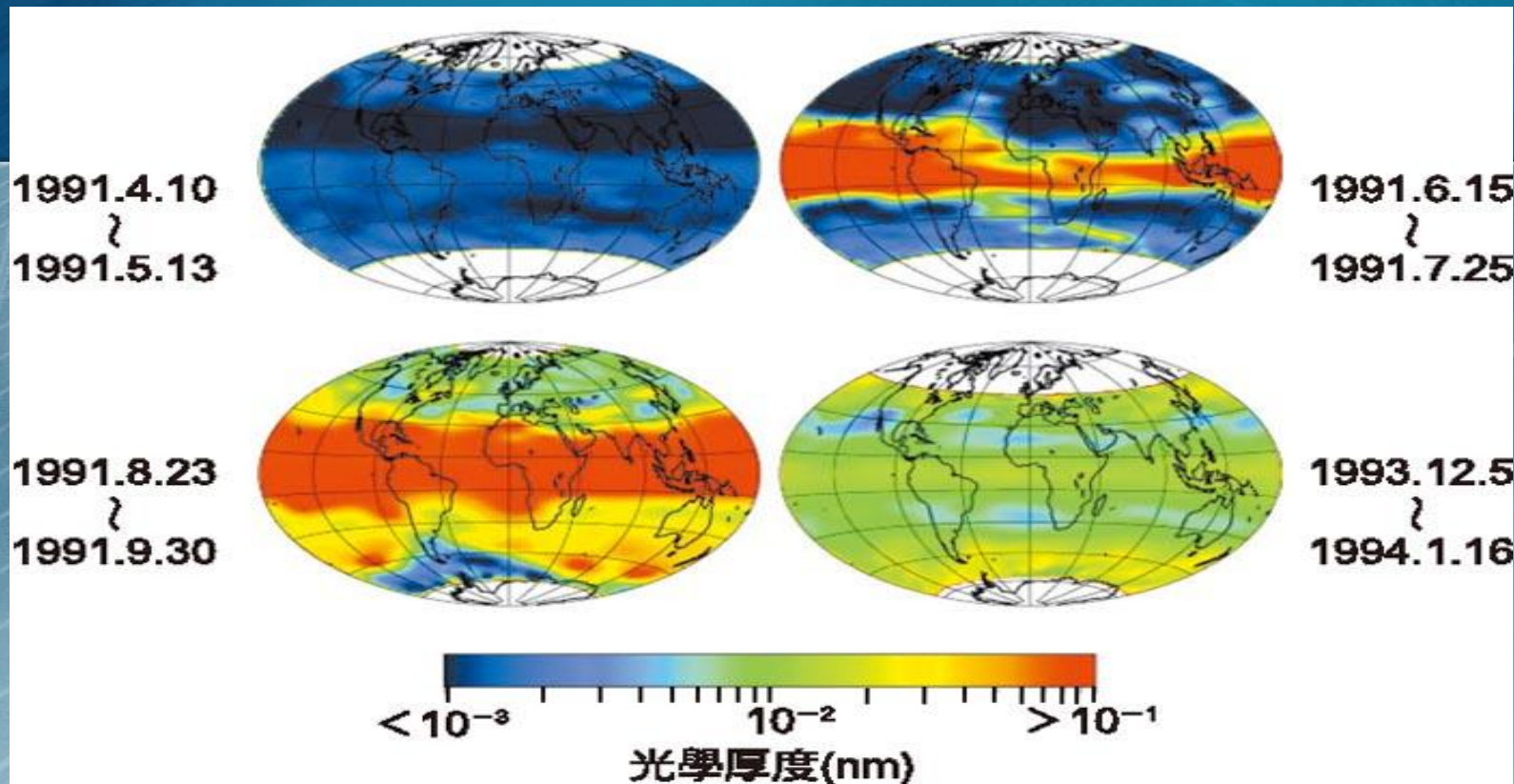


圖12 1991年菲律賓皮納度波火山噴發，美國 ERBS衛星以1020 nm波長紅外線遙測全球光學厚度（大氣遮蔽光線的程度）的變化。光學厚度值愈高（紅色區），代表火山灰含量愈高。

懸浮微粒

懸浮微粒的作用

火山噴發釋出的懸浮微粒大小，對地球溫度的影響有所差異。

1. 顆粒半徑小於1微米 (μm , 10^{-6} m)的，會反射太陽輻射，而有冷卻作用；
2. 大於1微米的顆粒則會吸收地球長波輻射，對大氣產生暖化的作用。不過顆粒大，沉降速度也較快，只能留在大氣中幾個月。所以相較之下，懸浮微粒的淨作用為冷卻大氣。

聖嬰現象

- 何謂聖嬰現象
- 赤道西太平洋，約在新幾內亞以東，為海水表面溫度偏高的海域；赤道東太平洋的海水表面溫度相對偏低。但也有相反的時候：南美洲祕魯外海的赤道東太平洋，常在12月發生海水表面溫度上升的情況，約維持一個月，因時值耶誕節，當地稱為聖嬰現象。
- 不過，每隔2~7年，赤道東太平洋海水表面溫度會發生更大幅度、持續時間更久的異常增溫情形，不只祕魯當地受影響，因為海面溫度對蒸發、降水、熱能交換、海面風場等造成影響，鄰近赤道太平洋的國家也受到波及，甚至使氣候異常 圖9-13b；這種狀況發生的年分，稱為聖嬰年。
- 聖嬰現象結束的次年，若赤道西太平洋海水表面溫度的回升程度比正常年高，赤道東太平洋的溫度比正常年低，則稱為反聖嬰現象 圖9-13c。

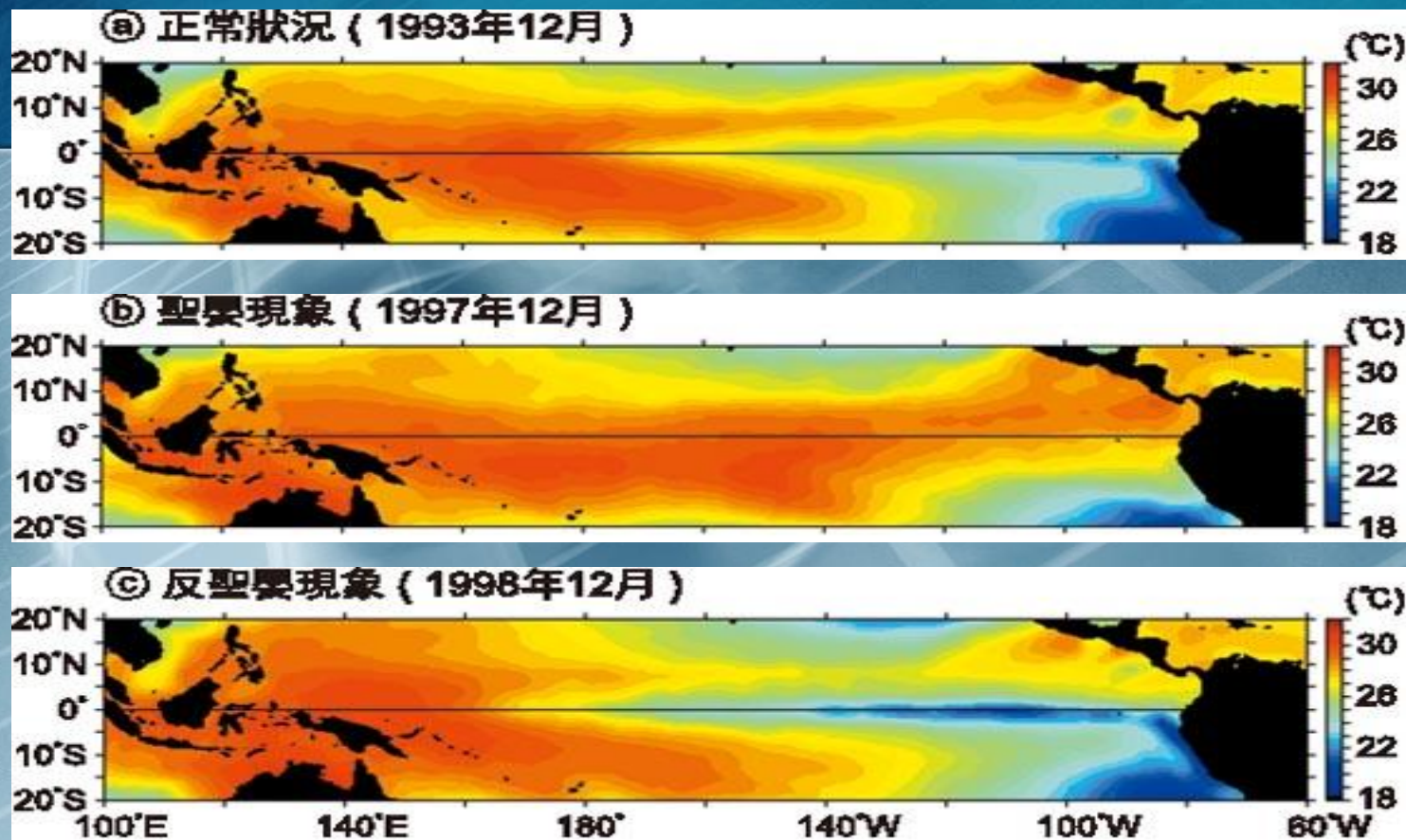


圖13 太平洋 12月之月平均海面溫度分布正常年；聖嬰年；反聖嬰年。

聖嬰現象

- 聖嬰年與正常年的海洋、大氣變化
- 正常年的海洋與大氣運動，以及它們對赤道太平洋東西岸氣候的影響，與聖嬰年有很大的不同。
- 在正常年，東風將表層溫暖海水向西推送，造成西太平洋溫暖海水積聚，增強海面上空氣垂直上升的熱對流，形成低氣壓與降水。東太平洋則相反，遞補表層海水的湧升流使海面溫度降低，並促使海面上空氣下沉，構成高壓盛行的晴朗天氣 圖9-14a。
- 在聖嬰年，東風減弱，西太平洋海面溫暖海水向東回流，湧升流衰減，造成東太平洋表層海水溫度上升。赤道東太平洋氣壓降低，發生豪雨、洪水的機率較高，連沙漠都長出草木；西太平洋區域氣壓上升，容易發生旱災 圖9-14b。

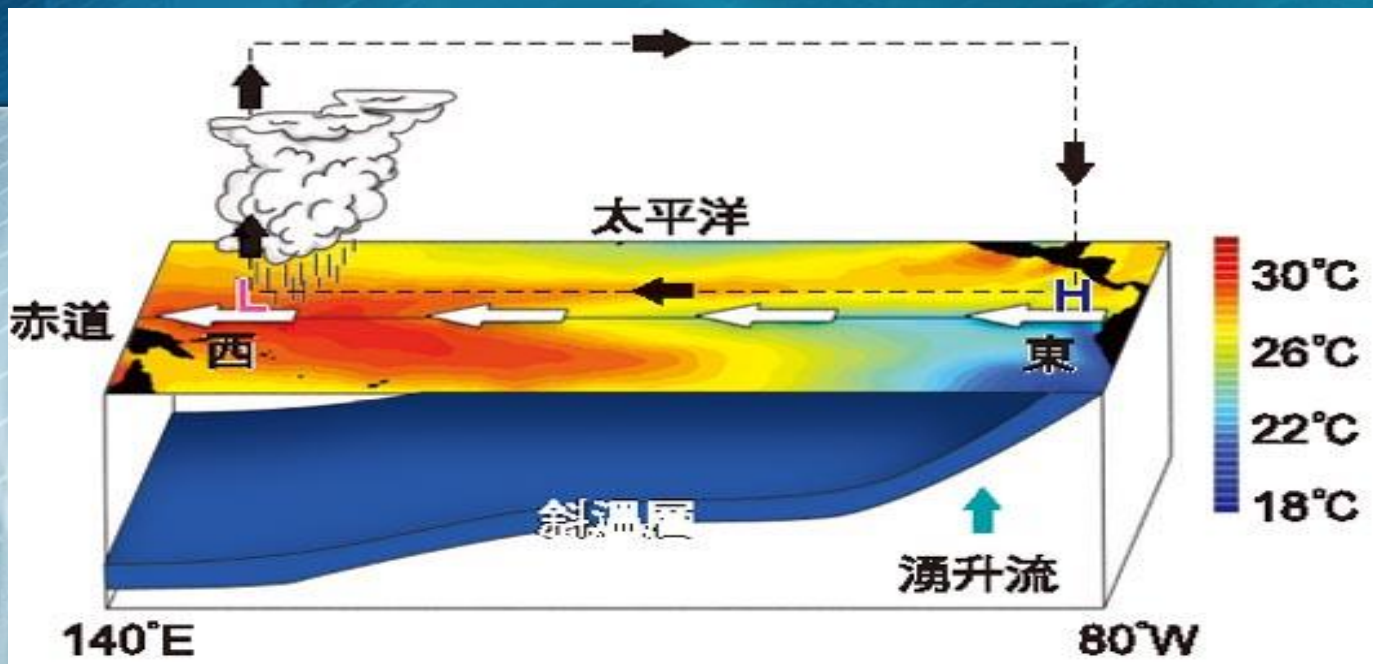
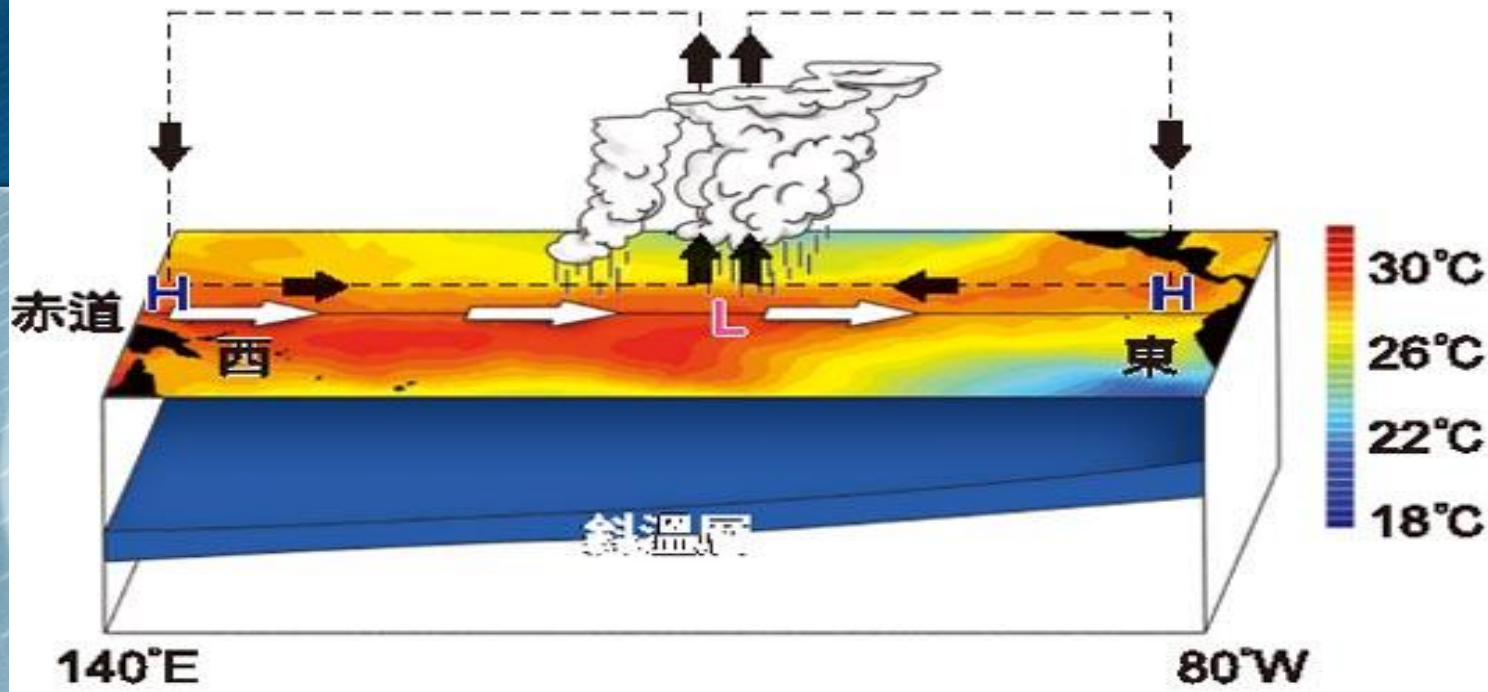


圖9a. 正常年時，赤道東太平洋為高壓籠罩，西太平洋為低壓籠罩，洋面上盛行東風；b. 聖嬰年時，赤道東太平洋氣壓降低，西太平洋氣壓上升，洋面上盛行東風減弱，甚至轉為西風。圖中白色箭頭代表海流方向，黑色箭頭代表環流方向。



南方震盪與恩索

英國科學家沃克（Gilbert Walker, 1868～1958）於1920年發現赤道太平洋東側氣壓上升時，西側氣壓通常降低，遂將這現象稱為「南方震盪」（Southern Oscillation）。1960年末，加州大學的教授畢雅尼（Jacob Bjerknes, 1897～1975）發現聖嬰現象與南方震盪有關，便將聖嬰現象與南方震盪合稱「恩索」（ENSO, El Niño Southern Oscillation）。

聖嬰現象

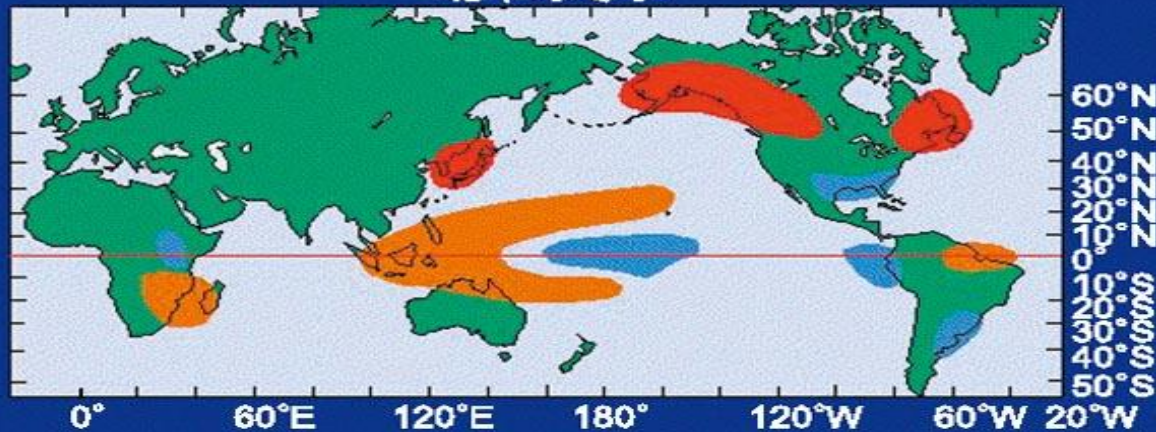
- 聖嬰現象的預測
- 聖嬰現象會影響全球氣候，更容易對赤道太平洋周邊國家的生計造成衝擊。聖嬰期間，熱帶東太平洋的高海溫約在六個月前就有預兆，且約需六個月才下降，所以可供觀測的時間不會太短。若能預測聖嬰的發生，就能預測全球相關地點近一年的氣候變化，提早研擬因應對策，因此預測聖嬰現象的發生，成為近二、三十年來許多國家與學者合作的重要工作。

聖嬰現象

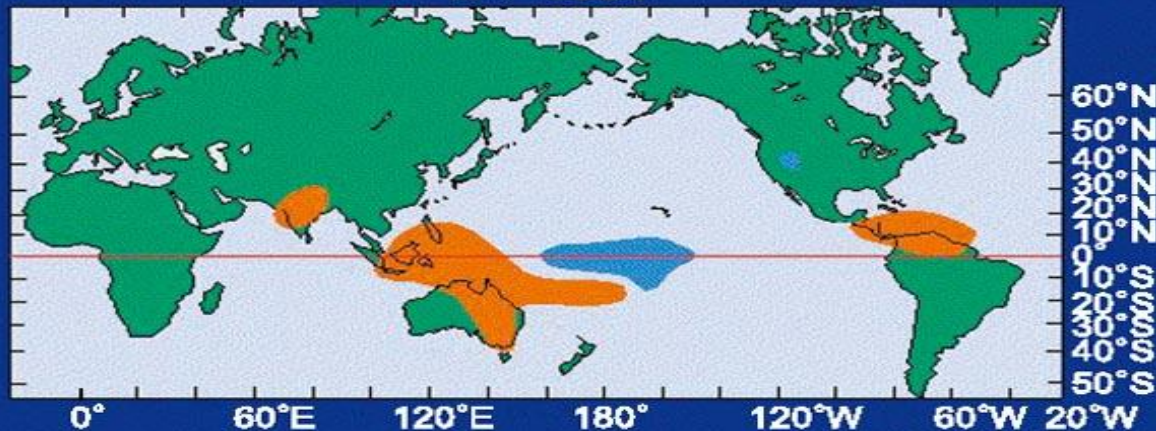
- 聖嬰現象的預測
- 相關學者利用數值預報模式預測聖嬰現象。數值預報模式是將數條關於大氣與海洋運動的物理方程式寫成電腦程式語言後，輸入大範圍觀測大氣與海洋的各種資料，如風速、海流、海面高度、整個赤道海域斜溫層深度等，經過超級電腦計算、求解方程組，得到的結果就是往後數個預報時段的大氣、海洋系統發展預測。
- 目前預測的準確度雖稱不上完美，但相較於過去只能憑藉預報員本身經驗的預測，更多了科學上的依據。此外，可藉著數值模式模擬過去的聖嬰事件，來和實際的觀測紀錄比較，檢驗模式預報的準確度。祕魯當局透過這個技術預測聖嬰現象，作為來年農漁業經營的參考，已減少許多損失，甚至因為做了正確的決策而獲利。

- 聖嬰年
- 若一年中，南、北緯5度間、西經120度到170度的太平洋區域，其5月到12月的平均海面溫度與過去同期的平均值差距大於 0.5°C ，且至少持續5個月，則為聖嬰年。

北半球冬季



北半球夏季



潮溼

乾燥

溫暖

圖11 根據統計資料
所得聖嬰現象造成全
球氣候異常的示意圖。
如原本多雨的東南亞，
氣候轉為乾燥。

溫室效應

乍聽溫室效應與全球暖化這兩個名詞，可能分不出它們的差異，甚至在日常生活中，人們會把氣候變遷帶來的負面影響，完全歸咎於溫室效應。

溫室效應是指來自太陽的短波輻射，部分被大氣或雲所吸收或反射，部分穿透大氣層照射到地表。地表吸收輻射能量後，轉而向外放射長波輻射。但長波輻射不能完全穿透地球大氣層，部分會被大氣吸收，或是被雲層再反射回地面，地球因此成為溫暖、適於生物生存的環境。

溫室效應

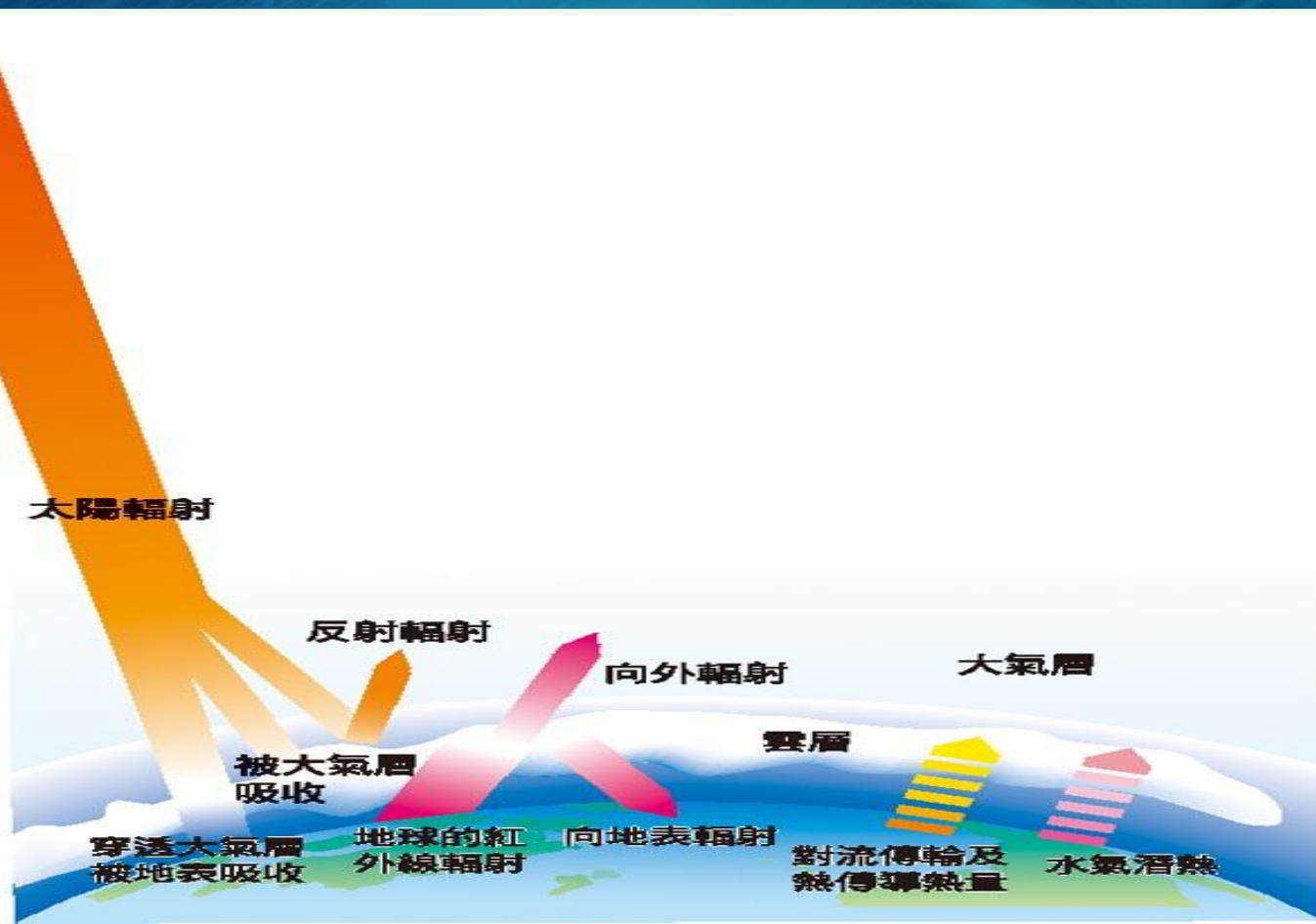


圖16 大氣輻射收支示意圖。當入射到地球的輻射量和自地球向外太空輻射出的量相同時，氣溫維持穩定不變。若入射量高於輻射出的量時，則大氣溫度將會上升。

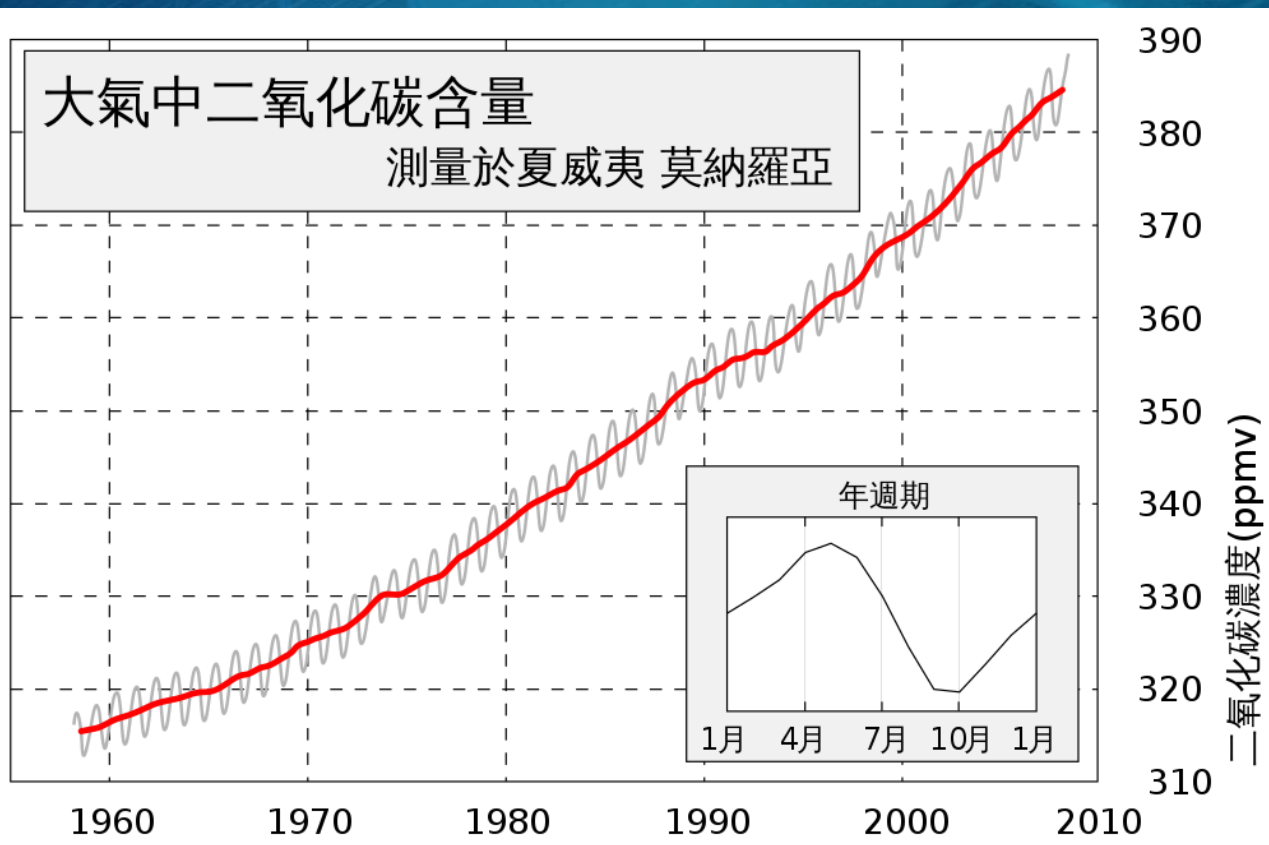
溫室效應

- 溫室效應是一自然現象，自盤古開天以來，就存在於地球。如果地球沒有大氣，在輻射平衡狀態下，地球表面的平均溫度約為 -18°C ，比目前地表的全球平均氣溫 15°C 低了許多。大氣的存在使地表氣溫上升了約 33°C ，溫室效應是造成此一溫度差距的主要原因。地球大氣中的許多氣體[幾乎不吸收可見光，但專門吸收地球放射出去的熱輻射]。這些氣體，允許約50%的太陽輻射穿越大氣為地表吸收，但卻攔截幾乎所有的地表及大氣輻射出的能量，減少能量的損失，並且再將之放射出來，使得地表及對流層溫度升高。大氣放射出的輻射不但暖化地表溫度，而且在夜晚繼續放射，使地表不致於因缺乏太陽輻射而變得太冷。這些氣體的影響類似農業用溫室的暖化作用，因此稱為溫室氣體，它們的影響則稱為溫室效應。溫室效應不只發生在地球，金星及火星的主要大氣成份為二氧化碳。金星大氣的溫室效應高達 523°C ，火星則因為大氣太單薄，溫室效應只有 10°C 。

溫室效應與全球暖化

- 全球暖化又是怎麼一回事？
- 地球大氣的溫室效應，創造了適合生物生存的環境。但是，如果大氣中的溫室氣體含量過高，將攔截過多的地球輻射使得地表氣溫逐漸上升。
- 在農工業的發展下，愈來愈多善於吸收地表長波輻射的二氧化碳、甲烷等溫室氣體被排出，加上大氣中原有的水氣，使得大氣溫度逐年增高。近百年來，全球氣溫約以每10年 $+0.07^{\circ}\text{C}$ 的速率上升。1998年夏季更達近千年最高溫。利用電腦數值模擬結果顯示，全球暖化與溫室氣體增加，兩者間有非常密切的關係。

大氣中二氧化碳濃度變化（1958～2008年）



1958年起美國賓州大學的科學家從開始在夏威夷大島茂納羅亞火山上海拔約3400公尺的毛納洛峰上設立4個採樣塔，每小時採樣4次，對二氧化碳混合比率展開了最漫長的連續的儀器測量。從此以後，人們發現每年的測量結果不斷攀升，如基林曲線

（Keeling Curve）顯示，數值由當初的315百萬分率上升至2006年超過了380百萬分率，升幅大約是21%。

圖17 夏威夷觀測的大氣中二氧化碳濃度變化（1958～2008年）。

溫室效應vs.工業革命

- 自從歐洲工業革命以來，人類的工業活動大量使用化石燃料(fossil fuel，如煤、石油)，製造了大量的二氧化碳，並將之排放至大氣之中。在工業革命之前的一千年，大氣中二氧化碳含量一直維持在約280 ppmv((part per billion by volume,十億分之一。亦即，一百萬單位體積氣體中含有280單位體積的二氧化碳)。工業革命之後，二氧化碳含量迅速增加，1950年代之後，增加速率更快，到1995年濃度已達358 ppmv。

人造溫室氣體

- 除了二氧化碳，甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物(CFC)等皆因人類人口的增加、經濟活動日趨活躍，而迅速增加。比如，從工業革命之前到1994年，甲烷含量由700 ppbv 增加到1721 ppbv; 氧化亞氮由275 ppbv增加到311 ppbv。氟氯碳化物為人造化學物質在1950年代才大量出現，而後迅速增加。最近由於蒙特婁公約禁用氟氯碳化物，其含量在1990年代已不再增加。

人造溫室氣體

- 如果與二氧化碳相比，甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物的溫室效應更高。比如，一個甲烷分子的溫室效應是一個二氧化碳分子的22-24倍，氧化亞氮為206倍，氟氯碳化物則為數千倍到一萬多倍。不過由於二氧化碳含量遠大於其他氣體含量，因此二氧化碳的溫室效應仍是最大的。從1980年到1990年，各種人造溫室氣體增加，大氣中的輻射量也跟著升高。其中，二氧化碳的效應佔了55%，甲烷 15%，氧化亞氮6%，氟氯碳化物則佔了24%。

溫室氣體-生命期

- 上述的溫室氣體的另一個特性是它們在大氣中停留的時間（亦即，生命期）相當的長。二氧化碳的生命期為50～200年，甲烷12～17年，氧化亞氮為120年，氟氯碳化物（CFC-12）為102年。這些氣體一旦進入大氣，幾乎無法回收，只有靠自然的過程讓它們逐漸消失。由於它們在大氣中的長生命期，溫室氣體的影響是長久的而且是全球性的。從地球任何一角落排放至大氣的二氧化碳分子，在它長達100年的生命期中，有機會遨遊世界各地，影響各地的氣候。即使，人類立刻停止所有的人造溫室氣體的排放，從工業革命之後，累積下來的溫室氣體仍將繼續發揮它們的溫室效應，影響地球的氣候。

溫室效應與全球暖化

- 目前國際上因應全球暖化可能造成災害的對策是「調適」與「緩減」。調適是對已發生（或預期可能發生）的災害採取因應措施；緩減則是一種預防手段。
- 以個人來說，最具體的做法是「緩減」，例如節約電力或燃料等能源的消耗，可減少溫室氣體二氧化碳的排放。如果等到氣候或環境達到無法回復的臨界點，花再多財力得到的效果也是有限。

溫室效應與全球暖化

- 全球人口數量與能源、資源的需求量以及人為溫室氣體的排放量成正比。因此，聯合國「政府間氣候變遷委員會（簡稱IPCC）」假想包含未來全球人口、能源消耗、環保政策與公約落實程度的幾種情境，且利用電腦分別模擬在這些情境下到2100年的全球氣溫變化，於2007年發布第四次報告。據氣候模擬模型估計，到2100年，全球平均氣溫將比1990年高出 $1.8\sim 4.0^{\circ}\text{C}$ [圖18]，可能嚴重影響人類的的生活。

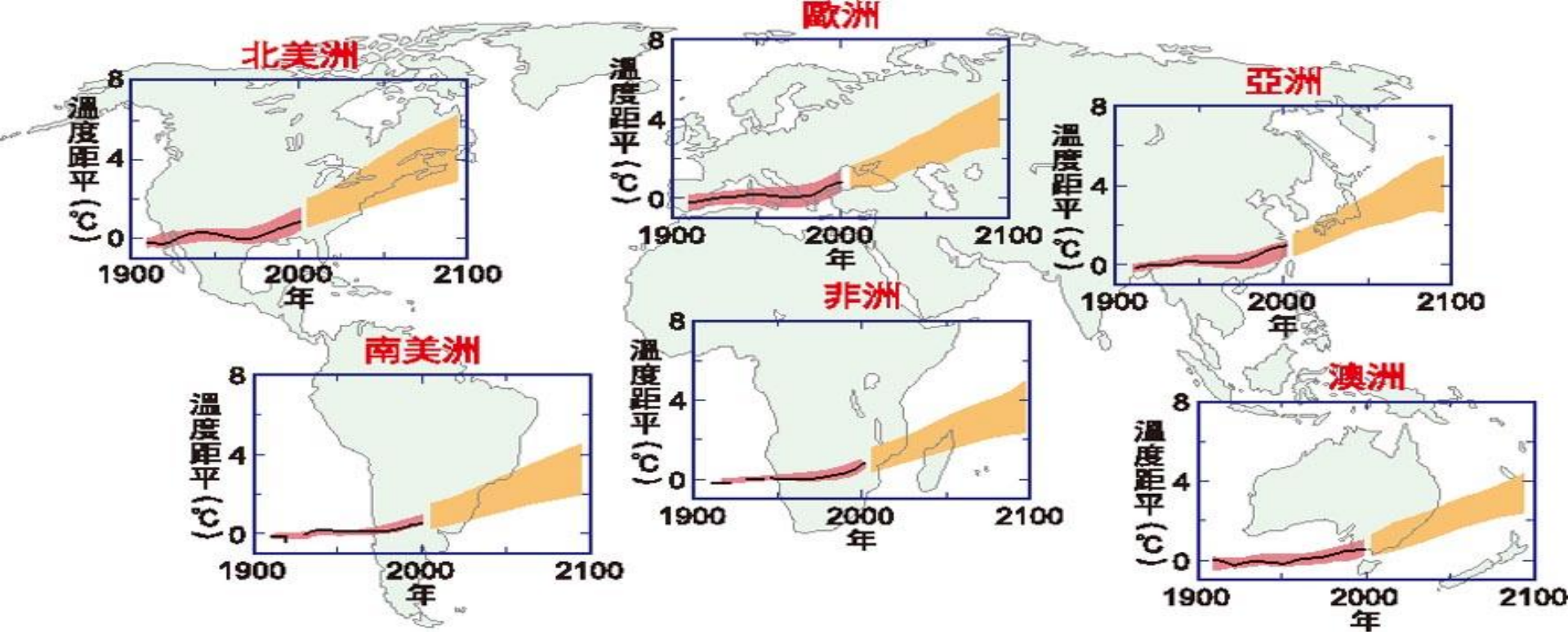


圖18 全球六個分區的氣溫變化圖。圖中的縱軸為氣溫距平值，取1901~2005年的平均氣溫作為基準畫出逐年相對於該平均值的差距。20世紀的氣溫曲線分為實際觀測值（黑線）與電腦氣候模式模擬值的氣溫變異曲線（紅線或紅色帶狀區域）。21世紀的氣候模擬是在A1B情境下進行，圖中以橘色帶狀區域表示。

註：A1B情境：經濟快速成長，人口高峰在21世紀中期出現，隨後開始減少，且新的高效技術出現，各類能源均衡使用，不過度依賴某種資源，是目前最有機會達到的情境。

溫室效應與全球暖化

- 人類開始預測天氣或探索氣候變化的時間，相對於地球歷史極為短暫，且影響氣候變遷的因素太多，因此，氣候變遷研究還有相當大的發展空間。但媒體報導常有讓人們覺得不論做什麼都會使環境惡化的錯覺。若質疑報導的正確性，可以多蒐集一些學術研究資料來驗證，千萬不能有「事不關己」的冷漠態度。總之，我們必須深入解讀氣候變遷資料，才能對氣候系統有更深一層的認識，進而了解氣候變遷的完整面向。

全球暖化可能帶來的負面影響

- 1.極區冰川融冰除了造成海平面上升之外；冰被覆蓋面積減少，也會影響極區生物的生存。<https://youtu.be/qfmAU9JeNHA>
- 2.高緯度的永凍土融化，內部甲烷釋出，使暖化效應增強。
- 3.劇烈天氣（如颱風）強度增加，發生頻率更高；熱浪、水災、旱災等極端天氣也更常發生。
- 4.人體健康受到威脅，如熱浪讓人中暑，霍亂、瘧疾、登革熱等傳染疾病也可能爆發。
- 5.氣候環境的變化對生物的生存可能造成威脅，影響其在生態系的分布。

氣候變化的影響 (Effects of climate change)

全球暖化效應

- 氣候變化的影響，圖片依次為：乾旱和熱浪引發的山火；海水酸化與暖化造成的珊瑚死亡；因沙漠化帶來的環境難民問題。
；因海平面上升引發的沿海地區水災。



氣候變異度(variability)及極端氣候

- 在氣候變異度(variability)及極端氣候方面, IPCC 科學家作了以下結論:
 1. 氣候平均或變異度的微小變化可能使極端氣候發生頻率產生相當大的變化。
 2. 普遍增溫將導致高溫情況的發生頻率升高, 但使低溫情況的發生頻率降低。
 3. 暴雨的發生頻率可能提高。雨量減少的地區, 乾旱的可能性升高。水循環可能加強, 其含意為某些地區的旱澇加劇, 某些地區則減緩。氣溫上升也為淡水資源和糧食安全帶來了威脅。氣候變化對人類健康的影響巨大, 直接影響表現為高溫壓力, 間接影響包括加劇傳染病的傳播。
 4. 自1970年以來, 海洋吸收了氣候變化產生的大約90%餘熱。即使全球表面氣溫維持穩定, 海平面也仍會因此而上漲, 在後續的幾個世紀裡, 海水仍會持續吸收大氣中的熱量。海水吸收的大氣二氧化碳造成了海洋酸化。
 5. 較暖的氣候使熱帶海洋較接近聖嬰現象的情況, 類似聖嬰現象的氣候型態可能較頻繁。

- 氣溫上升可能會導致降水的增加，預測每增加1%的年降雨量，就會使災害性風暴造成的損失擴大2.8%。
- 全球暖化增加了熱浪的發生頻率，熱浪是指至少連續5天內，每日最高氣溫高於往年最高均溫5 °C。過去30-40年裡，伴隨有高濕度的熱浪變得更加頻繁。夜間高溫頻率增加了一倍，觀察到夏天出現極端高溫的區域增加了50-100倍。高濕度熱浪會嚴重影響人類健康，而低濕度熱浪則有引發山火的風險。熱浪造成的死亡要多於颶風、雷電、龍捲風、洪水和地震的總和。

- 北冰洋的南部地區在過去的50年間溫度已經上升了1至3攝氏度。加拿大、阿拉斯加和俄羅斯的一些永久凍土帶已經開始融化，這有可能破壞該地區的生態系統，土壤中的細菌活性提高將導致該地區由碳元素的存儲地（carbon sink）變為碳元素的釋放源。
- 西西伯利亞正在處於它永久凍土層的初階段融解，這個過程正在創造新的湖泊，同時可能有大量的甲烷——一種額外的溫室氣體——被釋放入大氣。

全球暖化效應

- 21世紀的全球暖化可能由於碳循環的這種反饋而被加速。南美熱帶降水的顯著減少導致亞馬遜雨林的消失，從而引起的次級碳循環正反饋的可能。
- 現有一些預測和證據顯示，全球暖化可能導致地面生態系統釋放出碳，使得大氣中的CO₂含量進一步升高。全球溫度的升高可能導致更頻繁、更大範圍的森林火災的發生，它們將釋放出遠超過自然碳循環能夠吸收的碳貯備，同時也減少了地球上現有的森林覆蓋面積，形成了一個正反饋。

全球暖化效應

- 地球上的海洋吸收了許多生命活動所釋放的二氧化碳，這一過程以氣體溶解的方式進行，或者以海洋微生物的骨骼的形式沉入海底成為白堊或石灰石。目前，海洋的吸收量約為每人每年一噸的 CO_2 ，據估計自1800年以來海洋已經吸收了幾乎一半的人類活動所釋放的 CO_2 （即一千二百億噸的碳）。但是在水中，二氧化碳會變成碳酸，一種弱酸。
- 工業革命以來溫室氣體的排放已經使海水的平均pH值下降了0.1，達到了8.2。據預測，進一步的排放可於2100年前將其再下降0.5，這是數百萬年來從未達到的數值。

- 海平面上升，海水溫升高，熱鹽循環的終止
- 海水酸化：一些變暖的效應起因於來自加勒比海的洋流的局部波動，它也影響了魚類的儲備

氣候變遷預測的爭議

- 地球氣候變遷的成因極為複雜，同一影響因素可能出現正反兩種不同的結果，舉例說明如下：
 1. 火山爆發：火山爆發會釋出二氧化碳等溫室氣體，讓地球成為溫暖的環境。但火山爆發排出的懸浮微粒也會阻擋陽光，冷卻地球。
 2. 雲與水氣：水氣是溫室氣體，能使氣溫上升；但水氣形成的雲，也能遮蔽入射到地球的陽光，使氣溫降低。如果沒有雲，暖化會更嚴重。研究指出2001年，美國紐約爆發「911」事件後，連續三天禁止國內所有航空器的飛行。少了飛行時產生的凝結尾高空冰晶雲（見下圖），這三天的日夜溫差竟提高 1°C 。

飛機形成的凝結尾



氣候變遷預測的爭議

- IPCC利用氣候模式在超級電腦中推估未來的氣候，所用的知識與工具皆是最尖端的科技。然而，以目前人類對大自然的瞭解與知識，仍不足以用來準確的預測21世紀的氣候。在此僅討論幾個較具爭議性的議題：
- The 4th International Conference of Atmospheric Action Network East Asia, Taiepi, 1998/9/26-27 許晃雄(台灣大學大氣科學系教授), SciScape

氣候變遷預測

1. 空間尺度越小、變化越劇烈的天氣現象，準確度越低

一般而言，氣候模式的空間解析度甚差。在許多模式中，台灣甚至不存在。因此，不同模式預測的區域氣候，有時甚至南轅北轍。因此，要利用目前的氣候模式預測未來的台灣氣候幾乎是不可能的任務。

2. 許多影響氣候的物理機制仍未為人類所瞭解

最明顯的例子是懸浮微粒。人類燃燒化石燃料時，也同時產生硫酸鹽懸浮微粒，增加大氣混濁度，也造成空氣污染、酸雨。1950-60年代的科學家就曾警告說，人類造成的空氣污染增加大氣混濁度，將使氣候逐漸變冷。因此，如果考慮懸浮微粒的降溫作用，許多地區的增溫程度將減少，雨量變化甚至由減少變成增加（或由增加便減少）。IPCC科學家估計，從工業革命以來，人造溫室氣體造成的增溫作用約相當於每平方公尺2.5瓦。同一時期，懸浮微粒的冷卻作用則相當不確定，在每平方公尺0-3瓦之間

氣候變遷預測

3. 氣候模式仍不夠完善

目前的氣候模式仍有許多不完善之處，與用來預測天氣的模式大同小異。許多科學家爭辯，當我們仍無法用這些模式準確的預測10天以後的天氣，如何能預測21世紀的氣候。

4. 自然變遷與人為變遷

過去一百多年來的氣候變遷，有多少是氣候的自然變化？有多少是人類污染造成的？科學界針對此一問題仍議論紛紛，尚無定論。最明顯的例子是，IPCC評斷20世紀是否比其他世紀暖和時，所作的結論：

「全球平均溫度至少與西元1400年以來任何世紀一樣暖」(at least as warm as any century since at least about 1400)。而且，全球暖化的現象可能與長達數百年而在19世紀末結束的小冰河期有關。小冰河期的發生則與人類的活動無關。至於，小冰河期是否是因為人造溫室氣體造成的溫室效應才結束，則是另一個仍無答案的問題。如何釐清自然變遷與人為變遷是目前科學家面對的一大挑戰。

我們的態度

- 氣候學家Henderson-Sellers 曾經針對全球暖化防治問題進行問卷調查，詢問確定性要有多高，才必須採取防治行動。結果民眾要求只要50%即可。即使如此，科學家仍無法拍胸脯保證。然而，我們是否可以因此忽略全球暖化的問題？答案是否定的！理由有三：

理由(一) 全球暖化的可能性：

1. 雖然，我們仍無法確切知道溫室氣體的累積將如何改變地球的氣候，但是我們知道人為污染確實可能導致氣候變遷，其影響不容忽視。理由有三：
：(1)人類的活動造成大氣中溫室氣體含量的增加，(2)溫室氣體具有暖化地球大氣的特性，(3)溫室氣體的生命期從十年到數百年不等，能影響地球氣候數百年之久。

理由(二) 氣候系統的回饋作用：

2. 氣候系統的運作過程中有許多正回饋與負回饋作用。不論是前者或後者，都可能劇烈的改變地球的氣候。知名學者 Broecker，最近發表一篇論文警告說，全球暖化有可能改變大西洋的海洋環流，使得傳送至高緯度地區的熱量因而降低，反而使得歐洲甚至全球進入寒冷的氣候。他所提出來的機制，乍聽之下，似乎會緩和全球暖化，其實不然。因為，該機制的降溫作用，遠大於全球暖化的增溫作用，反而造成更劇烈的氣候變化。Broecker將此機制比喻為氣候系統的「阿基里斯的腳踵」(Achilles Heel)，亦即微小的變化可能導致氣候系統的大轉變，甚至瞬變（幾年的時間尺度）。

理由(三) 氣候變遷的風險太大：

- 一個颱風，不管在落後國家如孟加拉灣，或富裕國家如美國，都可能造成巨大的生命、財產的損失。雖然說氣候將如何變遷仍有相當高的不確定性，但是如果全球暖化造成更加劇烈的天氣、氣候變化，其衝擊面之大，將是人類所無法想像的。亦即是，我們所面臨的風險之大，是史無前例的。更何況，資料顯示古代大氣中溫室氣體含量高時，氣候偏暖；含量低時，氣候偏冷。過去一再發生的現象，未來發生的機率也極高。

認知與體認：風險的概念

- 首先，我們必須體認氣候變遷預測的不確定性，不能因為科學界無法提出百分之一百可信的結果，而全盤否定氣候變遷的可能性。人的一生中面對許多大大小小的風險。現代人因此投注相當多的時間、金錢與精力，維護自身的健康，購買壽險、健康保險，防患於未然。而在做這些維護自身利益的措施之前，我們從不需去確定不幸的事情一定會發生。同樣的，人類的未來面臨更多、更大的風險。更何況，過去一、二百年來，人類已經為自己的未來埋下更多不可預期的危機。與其面對茫茫的未來，毫無作為，不如起而行，盡心盡力維護地球的健康。人與自然的互動應是互相融合，而不是事後的適應與療傷。即使全球暖化發生的機率不高或者程度不嚴重，任何維護地球環境的投資(不論是有形或無形的)都是值得的，因為至少我們維護了一個健康的生存環境。更何況，如果發生了，人類所付出的代價將極其慘重。畢竟，維護地球的健康，就是延續人類的生存。

認知與體認：摒棄「得過且過」的觀念

- 京都的「氣候變化綱要公約」會議將全球暖化的議題提昇到最高點。人造溫室氣體可能造成的氣候變遷，由於不確定性較大，對各國的經濟影響大了許多，在國際政治舞臺上，各國也很難取得共識。台灣對此一議題的處理方式，仍處於得過且過的階段。政府總是談論「因應之道」，而不是「解決之道」，一廂情願的希望能適用較寬的二氧化碳排放標準。甚至，有人建議應靠外交談判來處理相關問題。然而，台灣有多少外交籌碼，人人心知肚明。核能政策的擁護者也趁機建議應發展核能發電。殘酷的事實是，台灣仍將繼續投資於高耗能的煉鋼廠，即使多蓋幾座核能發電廠，也緩不濟急，於事無補。更何況，核能發電廠有其另外的環境問題。鴛鴦心態不但解決不了問題，只會使情形惡化。

認知與體認：營造「環境善國」

- 20世紀末，高度的經濟發展對人類生存的地球已經形成重大壓力。台灣地小人稠，所承受的環境污染與生態破壞更是嚴重。我們應該採取的策略是，重新思考台灣經濟政策與科技政策，讓經濟發展、科技發展、與環境保護合而為一，而不是互相牽制。台灣應該採取的策略不是因應之道，而是規畫一個能兼顧「適度的經濟發展」與「環境保護」的永續發展策略，讓台灣成為「環境善國」，善盡地球村一員應盡的義務，徹底的解決地區性的與全球性的環境污染問題。

- **<氣候經濟與人類未來> Bill Gates How to avoid a Climate Disaster [26:45]**
- <https://youtu.be/WL1oldrTTdA?t=494>
- **比爾蓋茲的2021新預言：比新冠疫情可怕5倍的全球氣候變遷災難正在來襲 [Unsolved Mystery Stories | Xiaowu]**