

7.2 全球暖化的成因 是甚麼？

要了解全球暖化的成因，首先要認識影響地球溫度的因素，然後分辨出哪些因素是自然存在，哪些是人為造成。

影響地球溫度的因素有三個，包括抵達地球的太陽輻射、地球的反射率（也稱為反照率）、地球大氣中溫室氣體濃度。本章節會解釋這些因素的運作原理，以及科學家如何得出人為因素導致氣候變化的結論。

1 影響地球溫度的因素

2 全球暖化是自然變化還是人為引致？

甚麼是全球暖化？甚麼是氣候變化？

「全球暖化」與「氣候變化」有密切關係，而後者的含意較前者為廣。

「全球暖化」是指自工業革命以來，人類燃燒化石燃料，使整個地球自二十世紀初呈現升溫趨勢。世界氣象組織指出，2024 年全球平均溫度已較工業化前水平高出約 1.55°C。

「氣候變化」是指由於燃燒化石燃料，地球大氣中溫室氣體濃度上升，繼而引致一連串的全球現象，包括「全球暖化」、海平面上升、格陵蘭和南極洲的冰原質量流失、北極海冰的縮減、陸地冰川的萎縮、極端天氣事件增多及物候改變等等。

相關資料



1

影響地球溫度的因素

太陽是地球的主要能量來源。太陽能量以短波輻射形式（主要為可見光）抵達地球，經過多個不同的物理過程，包括反射、吸收、蒸發、傳導、對流和輻射等，最後部分能量直接被反射回太空，部分被分配到不同的地球系統，例如大氣、海洋、陸地和冰原等，部分以長波輻射形式（紅外線）被釋放回太空。（圖1）

假如抵達地球的能量多於離開地球的能量，即是地球的能量收支出現正的能量不平衡，地球便會升溫；假如抵達地球的能量少於離開地球的能量，即是地球的能量收支出現負的能量不平衡，地球便會降溫。



圖1 全球能量收支

影響地球溫度的因素有三個，包括抵達地球的太陽輻射、地球的反射率及地球大氣中溫室氣體的濃度。

影響地球溫度的因素		問題	闡釋
抵達地球的太陽輻射量	太陽活動	近年太陽活動增強還是減弱？	太陽活動的強弱改變會影響輸出的能量。
	地球軌跡	地球軌跡與抵達地球的太陽輻射有何關係？	地球公轉軌跡並非永恆不變，軌跡改變會影響太陽與地球間的距離，抵達地球的太陽能量強度因而改變。
反射率	地表覆蓋	海洋和陸地上的冰雪面，為甚麼重要？	冰雪面的反射率很高，因此冰雪面的變化在影響地球氣候方面扮演著重要的角色。
	大氣中的懸浮粒子	火山爆發為什麼會增加地球的反射率？	強烈的火山爆發會造成氣溶膠在平流層形成，這些微小粒子能反射太陽輻射，增加地球的反射率。
大氣中溫室氣體濃度	自然的碳循環	在自然的碳循環中，大氣的二氧化碳對地球生物有何重要？	溫室氣體自然存在於大氣中，大氣的二氧化碳製造自然溫室效應，使地球保持適中的溫度，萬物得以生存和繁衍。
	人類活動	人類活動與氣候變化有何關係？	人類活動使大氣中溫室氣體的濃度上升，加劇溫室效應，造成全球暖化。



1.1 太陽輻射

太陽輻射是指太陽不斷以電磁波發放出來的能量，亦稱為太陽能。太陽發出的電磁波覆蓋很寬的波長範圍，但其能量主要分佈在紫外線、可見光和紅外線，當中大部分的能量集中於可見光和紅外線，紫外線只佔極少部份。

1.1.1 太陽活動

太陽活動的波動屬自然變化。自 1970 年代後期以來，人造衛星上的儀器一直量度抵達大氣頂層的總太陽輻射（簡稱為 TSI—Total Solar Irradiance），平均數值約為 1,361 瓦 / 平方米。

太陽活動的週期約為 11 年，在過去數個太陽週期，總太陽輻射的平均變化只有約 0.1%。在沒有人造衛星的年代，科學家只能透過太陽黑子的數目、極地冰層和樹環的放射性同位素分析來估計總太陽輻射。

圖 2 顯示，二十世紀初期，總太陽輻射與全球平均溫度均有上升趨勢；然而，自二十世紀中葉以來，總太陽輻射顯示出下降趨勢，但全球平均氣溫則持續上升。



相關資料



氣候變化 - 陽光照射

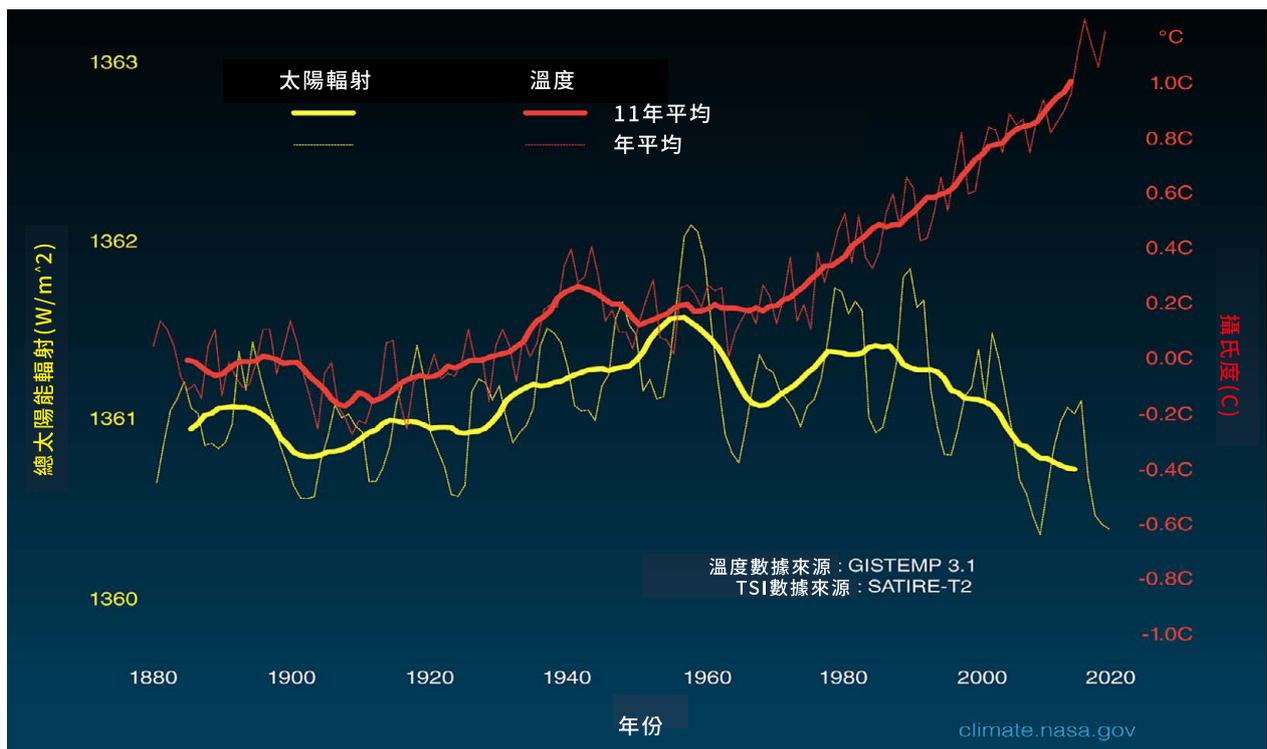


圖 2 總太陽輻射與全球平均溫度的變化
來源：美國國家航空暨太空總署

1.1.2 地球軌跡（米蘭科維奇循環）

地球環繞太陽公轉的軌跡並非永恆不變，而地球自轉的參數也存在自然變化。塞爾維亞天文學家米盧廷·米蘭科維奇在二十世紀初提出，地球圍繞太陽運行時的三個軌跡幾何參數會影響地球冰河時期的始末興衰。這三個參數的變化稱為米蘭科維奇循環（圖 3）。



相關資料



「氣象冷知識」：
米蘭科維奇循環

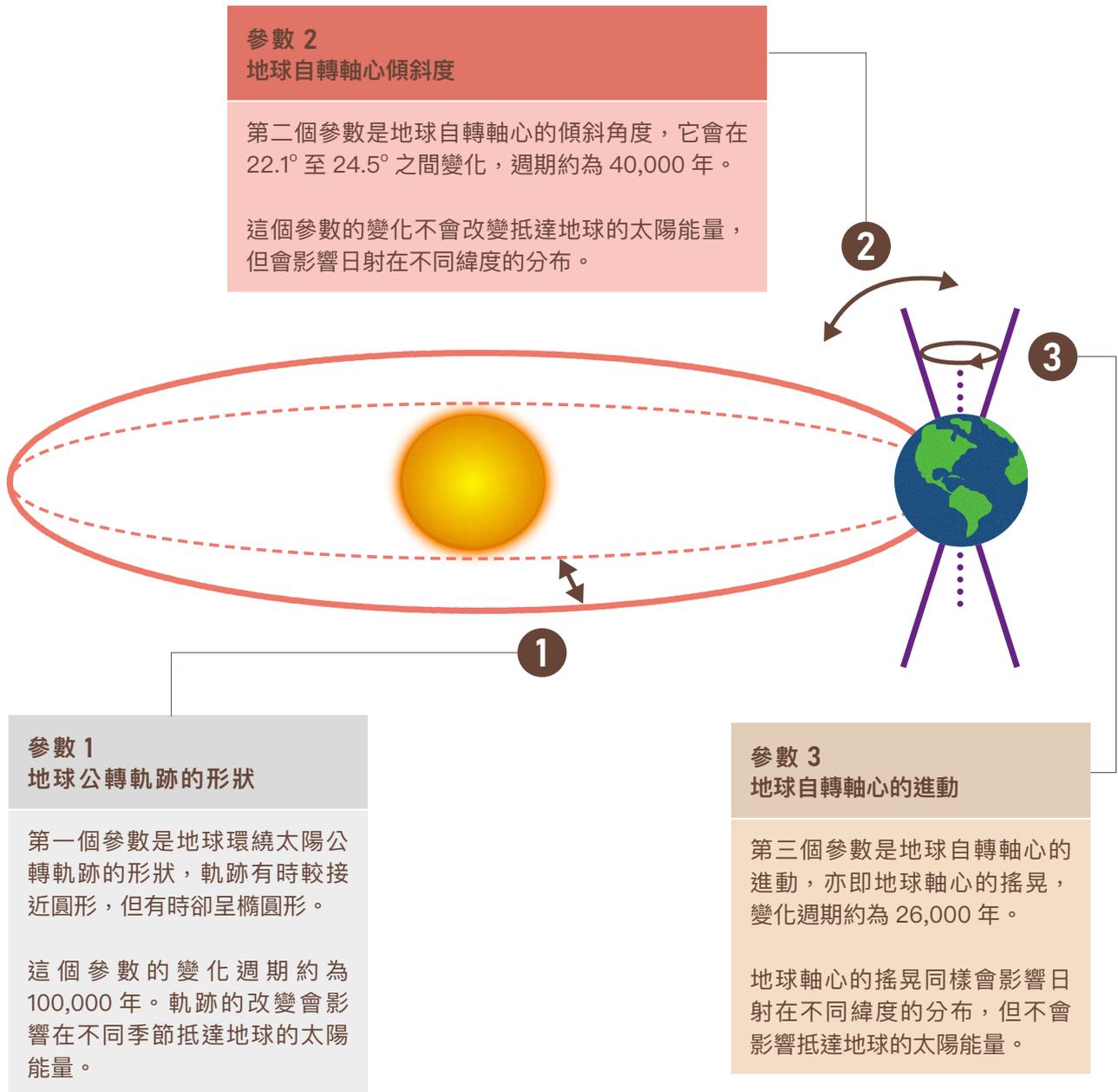


圖 3 米蘭科維奇循環

1.1.3 米蘭科維奇循環是近期氣候變化的原因嗎？

地米蘭科維奇循環屬自然變化，牽涉的時間尺度以萬年計，難以解釋地球近百年的急速升溫。此外，按照米蘭科維奇循環，地球現在應該處於緩慢降溫的情況，這個預期與古氣候學的研究結果一致，即是在工業革命前的五千年，地球正在緩慢降溫，但這個跨越五千年的緩慢降溫趨勢被近百年的急速升溫完全逆轉。



相關資料



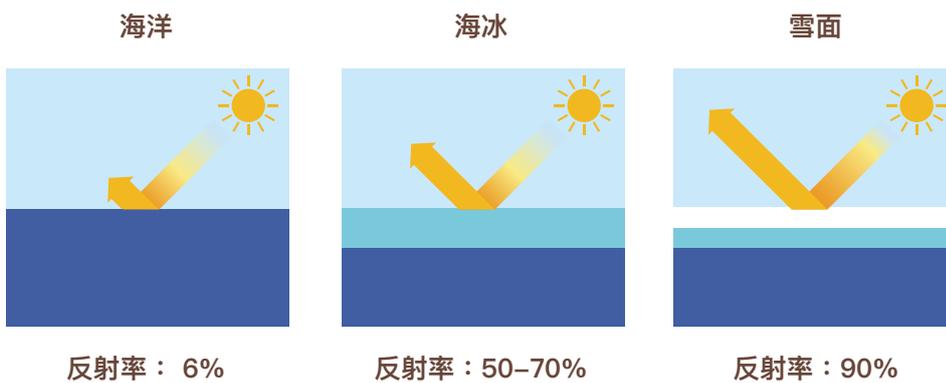
地球會再進入冰河期嗎？



1.2 反射率

1.2.1 地表覆蓋

淺色地表（如：沙漠和冰雪面）的反射率，比深色的地表（如：森林）高；而相對於陸地，海洋因不同的物理特性吸收並儲存大量太陽輻射。數據顯示，在極地的海洋，海冰對太陽輻射的反射率達 50–70%，被雪覆蓋的海冰的反射率更可以高達 90%，遠比海洋高。（圖 4）



反射率 0% = 地表吸收全部太陽輻射；100% = 地表反射全部太陽輻射

圖 4 不同地表的反射率

數據來源：美國國家冰雪數據中心

1.2.2 火山爆發

火山爆發是自然現象，過程中大量氣體、火山灰和微粒被釋放到大氣中。在小規模的火山爆發，氣體和微粒通常局限於對流層內，而且會在數週內被雨水沖洗並沉積至地表；強烈的火山爆發會把大量的火山灰、水蒸氣和二氧化硫等物質送到穩定的平流層，並轉化為硫酸鹽氣溶膠，讓它們在平流層逗留多年。這些微小粒子能有效地反射太陽輻射，增加地球的反射率，產生短期的冷卻作用。

1991年菲律賓皮納圖博火山爆發，是強烈火山爆發令全球平均溫度下降的一個例子。皮納圖博火山爆發後18個月內全球平均溫度降低了約 0.5°C ，但幾年後，溫度回升到火山爆發之前的水平。(圖5a、5b)



相關資料



究極火山探險：
全球氣候變化之元兇？

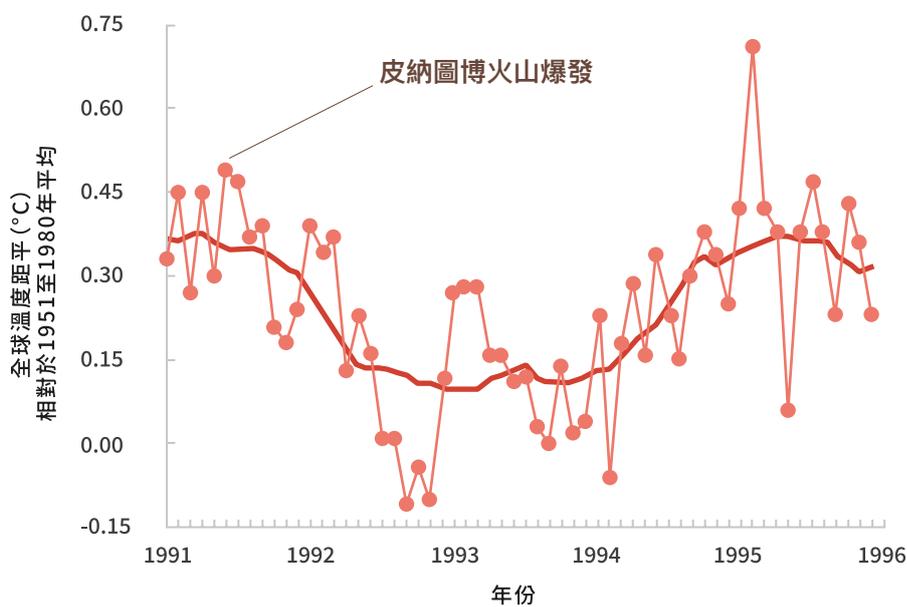


圖 5a 全球平均溫度變化 (1991 至 1996 年間)
來源：香港天文台



圖 5b 菲律賓皮納圖博火山爆發
來源：U. S. Geological Survey Photograph taken by Richard P. Hoblitt

火山比人類活動釋放更多二氧化碳嗎？

火山釋放二氧化碳到大氣中，是影響氣候的自然因素之一。然而，各項研究顯示在過去一個世紀，每年由人類活動排放的二氧化碳量遠遠超過由陸地和海底火山所釋放的總和。資料顯示，人類活動每年釋出的二氧化碳是火山釋出的六十倍或以上。

相關資料



1.2.3 「氣候 – 反射率」回饋

「氣候 – 反射率」回饋是指氣候變化引致的地球反射率改變，會進一步加劇氣候變化的過程。此過程形成一個正回饋循環：地球的暖化(或冷卻)會促使進一步的暖化(或冷卻)，從而形成一個惡性循環。

米蘭科維奇認為，地球圍繞太陽運行時的三個軌跡幾何參數，對抵達北半球高緯度地區的日照影響至為重要，因為地球大部份的冰雪面都集中在這些地區，而冰雪面的變化可以引致一些「正回饋」作用。

舉例，當北半球高緯度地區所接收的日照減少，夏季的升溫不足以融化上一個冬季的冰雪，全年整體的冰雪便會增長，把更多的陽光反射回太空，減少地球接收到的熱力，幫助冰雪進一步增加，造成惡性循環。年復一年的冰雪增長最終會把地球推進冰河時期。

根據 2023 和 2024 年的一些研究顯示，北極地區的升溫速度約為全球平均的三倍，「氣候 – 反射率」的正回饋作用是一個主要原因。

全球暖化使北極地區的冰雪融化，暴露出顏色較深、反射率較低的陸地和海洋，極地因此吸收更多的太陽能量和加劇暖化，繼而使更多冰雪融化，造成惡性循環。

相關資料





1.3 溫室氣體

全球氣候一直受到太陽活動、地球軌道改變、火山活動等因素的影響；但自工業革命以來，大氣中溫室氣體濃度不斷增加，對氣候的影響完全蓋過了這些自然因素。人類活動所引致的氣候變化，已經成為人類現時重大的挑戰。

1.3.1 溫室氣體種類

大氣層中主要的溫室氣體有二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 和一氧化二氮 (N₂O)。數據顯示，這些溫室氣體的大氣濃度正不斷上升中。大氣層中的水氣 (H₂O) 雖然是「天然溫室效應」的主要原因，但普遍認為它的大氣濃度並不直接受人類活動所影響。

1.3.2 溫室效應

溫室效應是指地球大氣層上的一種物理特性。假若沒有大氣層，地球表面的平均溫度不會是現在適合生物生存的 15°C，而是十分低的 -18°C。這溫度上的差別是由大氣中的溫室氣體所引致。

當太陽輻射抵達地球，地球表面和大氣將部份太陽能反射回太空，同時，地球表面吸收部份太陽輻射，使地表受熱增溫，然後釋放出紅外線。部份紅外線穿過大氣返回太空，但大部份會被大氣中的溫室氣體吸收，並沿所有方向散射，使大氣受熱，然後透過再輻射回到地面，為地球表面和低層大氣增暖，這就是溫室效應。因此，大氣的溫室氣體濃度，會直接影響地球整體的能量平衡。

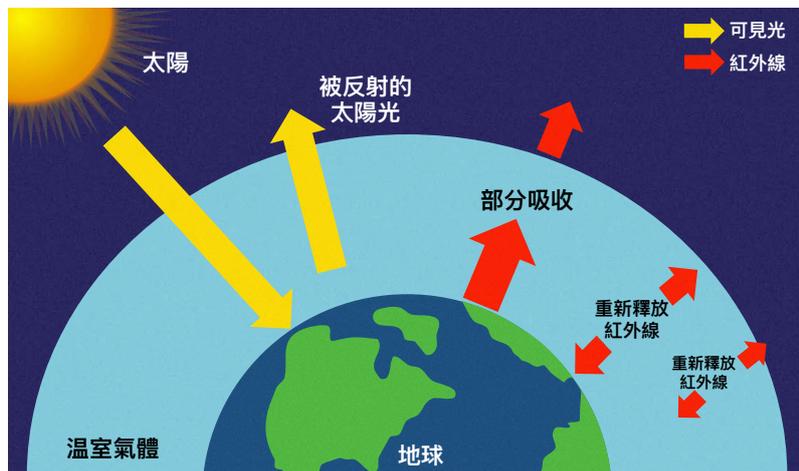


圖 6

溫室效應

來源：香港天文台

1.3.3 碳循環

碳循環是指碳元素在各個自然的儲存庫，包括大氣、海洋、生物圈、岩石和化石燃料等之間不斷交換和循環的生物 - 地質 - 化學循環。

在一個自然和不受干擾的碳循環裏，碳儲存庫之間的碳交換大致平衡，大氣中的二氧化碳濃度相對穩定。

在工業革命發生前的八十萬年裏，大氣中的二氧化碳濃度約在 180 至 280ppm (百萬分率) 之間上落變化。但人類活動擾亂了碳循環。2023 年，大氣中二氧化碳濃度已達 420ppm，是過去二百萬年來最高。(圖 7)



相關資料



氣象冷知識：溫室效應



溫室效應與全球變暖



甚麼是碳循環

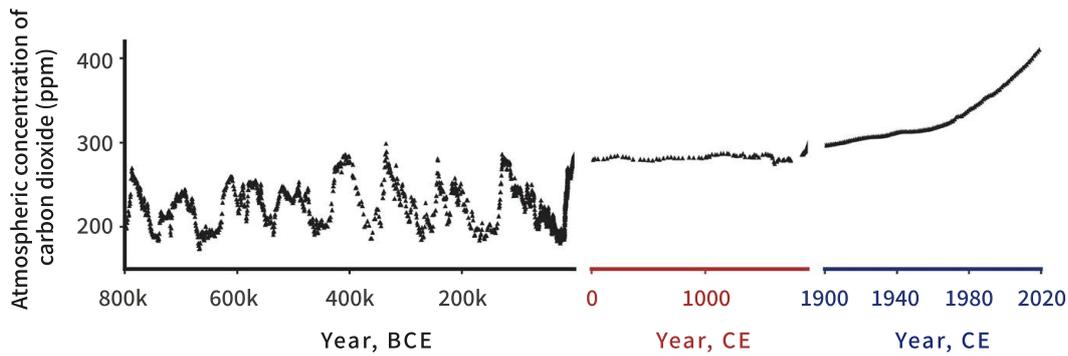


圖 7 The atmospheric concentration of carbon dioxide
來源：IPCC《第六次評估報告》

語文小助手 (圖 7)

原文：

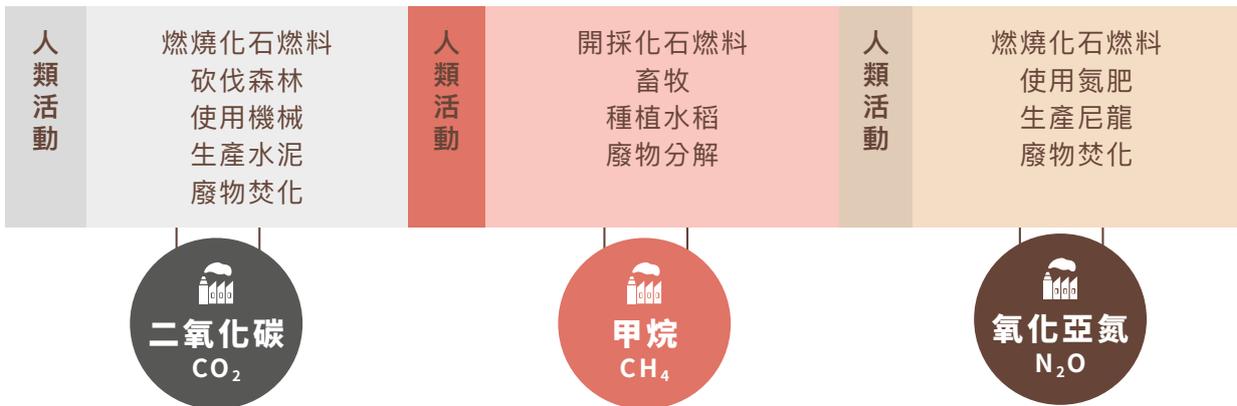
The atmospheric concentration of carbon dioxide
Year, BCE
Year, CE
Atmospheric concentration of carbon dioxide
ppm

中譯：

大氣中二氧化碳濃度
公元前
公元
大氣中二氧化碳的濃度
百萬分率

1.3.4 哪些人類活動增加溫室氣體？

人類活動排放了大量的溫室氣體，加劇溫室效應，把更多熱能困在地球，導致全球暖化。



1.3.4.1 燃燒化石燃料

化石燃料包括煤、石油及天然氣。自工業革命以來人類大量開採及燃燒化石燃料，用作發電、供暖和推動機器及汽車等，釋出大量二氧化碳、甲烷及氧化亞氮。

1.3.4.2 砍伐森林

為了開墾土地供農業及城市發展，人類大量砍伐森林，砍伐後焚燒林木，會把原本儲存在植物體內的碳，以二氧化碳形式釋放到大氣中。與此同時，吸收及儲存二氧化碳的植物量也同時減少，令大氣中二氧化碳濃度上升。數據顯示1990至2020年間，全球失去了約1億7,800萬公頃的森林。



相關資料



最新的全球
二氧化碳濃度



大氣中二氧化碳
濃度的歷史變化

1.3.4.3 農業活動

畜牧業中尤其養牛業，牛隻的反芻活動會排放出大量甲烷，種植水稻的環境亦有利甲烷的產生；而大量使用含有氮的化學肥料會釋出氧化亞氮。此外，隨著農業機械化，農業活動使用的機器多由化石燃料推動，使用過程會釋出二氧化碳。

1.3.4.4 工業活動

工業活動排放大量人為溫室氣體。例如：尼龍的生產過程會釋出氧化亞氮；水泥的生產過程會釋出二氧化碳。上世紀研發、曾用作製冷劑和噴霧罐推進劑的氯氟碳化物(CFCs)，也是人工合成的溫室氣體。

1.3.4.5 廢物處理

隨著生活水平上升及消費主義的興起，人類消耗資源之餘亦同時製造大量廢物。廢物處理以焚化及堆填為主，焚化過程會釋出二氧化碳、甲烷及氧化亞氮，堆填區的廢物分解時會釋出甲烷。

在 2023 年，大氣中二氧化碳、甲烷及氧化亞氮濃度較工業化前水平分別增加 51%、165% 及 25%。(圖 8)

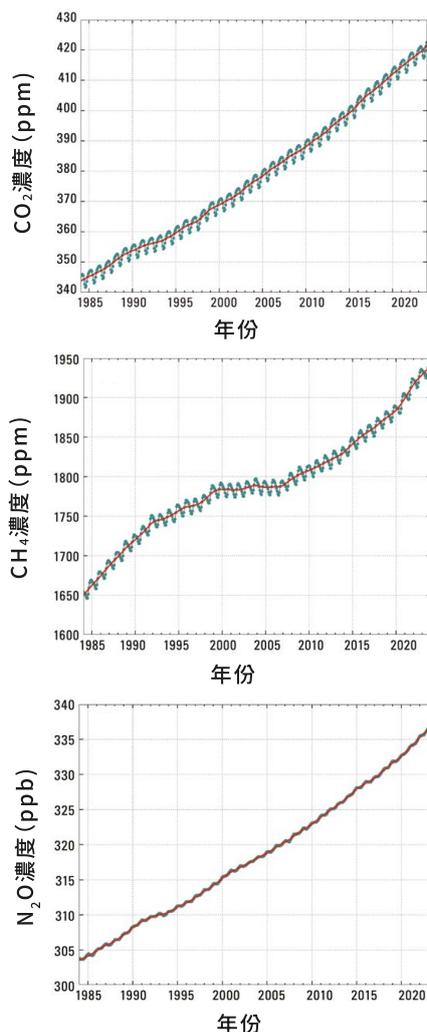


圖 8 大氣中二氧化碳、甲烷和氧化亞氮濃度趨勢
來源：《世界氣象組織溫室氣體公報》

相關資料



大氣圈二氧化碳的模擬影像



世界氣象組織溫室氣體公報



最新的全球甲烷濃度



最新的全球氧化亞氮濃度

相關資料



IPCC 第一工作組
《第六次評估報告》
第 2.3.1.2.2 節



太陽不是導致全球變暖的原因？

對流層與平流層不同的溫度變化

如果太陽活動是全球變暖的主因，太陽活動的變化會影響整個大氣的溫度。但如果溫室氣體是全球變暖的主因，溫室氣體增加會使對流層升溫，但平流層則降溫，這是溫室效應加劇的獨有特徵。數據顯示自二十世紀中期以來，對流層出現升溫、而平流層卻出現降溫的狀況。

2

全球暖化是自然變化還是人為引致？

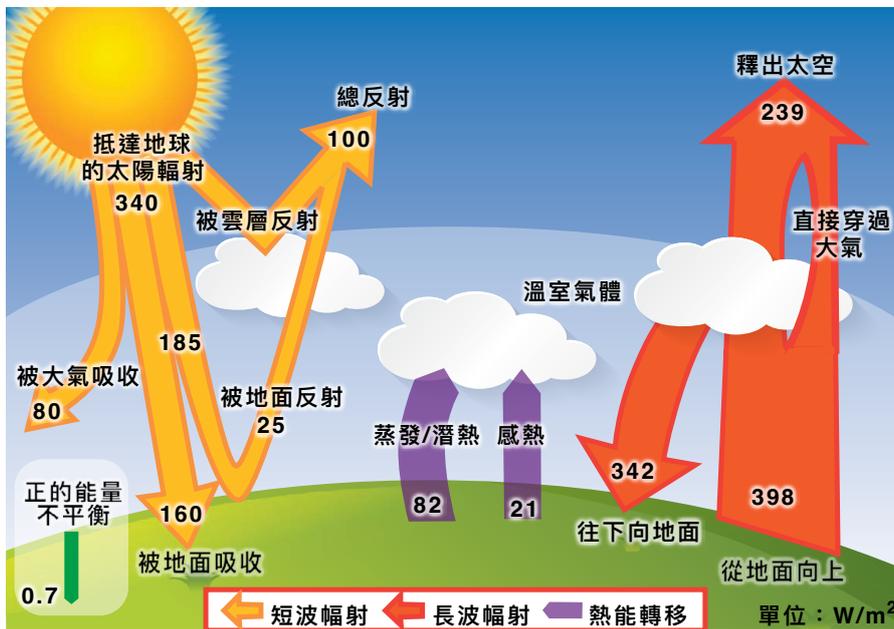


圖 9

現時全球能量收支情況

數據來源：IPCC《第六次評估報告》



相關資料



氣候變化的原因

科學家綜合了多個研究的結果和相關數據，結果顯示，現時地球的能量收支情況，有大約 0.7 W/m² 正的能量不平衡，引致地球暖化。（圖 9）

全球能量收支不平衡的成因是甚麼？科學家利用電腦氣候模式模擬地球表面溫度在過去 170 年的變化，圖 10 顯示在不同情況下的溫度距平模擬結果。數據顯示，假如把自然因素（太陽活動和火山爆發）和人為因素（包括加入大氣中溫室氣體濃度的變化、土地用途的改變、人為的污染等等）一併考慮，模擬結果便與觀測的地球溫度變化實況相吻合。因此，IPCC《第六次評估報告》清楚指出，人類影響使大氣、海洋和陸地變暖是無庸置疑的。

溫度距平 °C

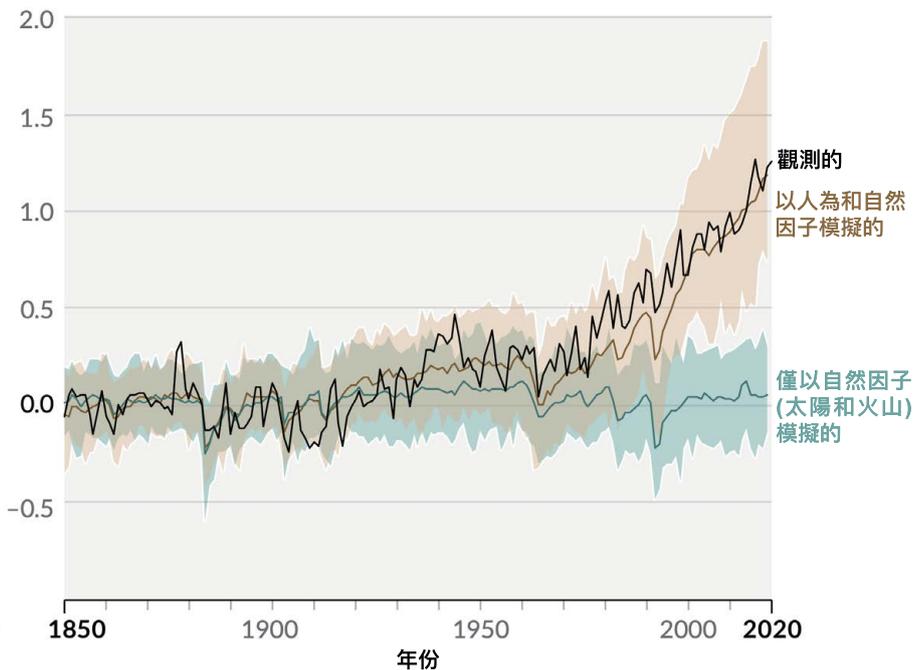


圖 10

相對於 1850-1900 年的全球表面溫度變化

來源：IPCC《第六次評估報告》



2.1 人為驅動因素



相關資料

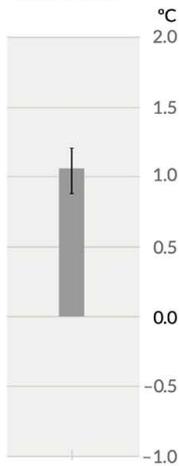


關於全球暖化的 97% 共識

IPCC 第六次評估報告總結了地球變暖的自然和人為驅動因素。圖 11(a) 顯示，2010–2019 年間，地球表面溫度已較 1850–1900 年的基準期上升超過 1°C。圖 11(b) 則展示了歸因研究對全球暖化貢獻的評估。結果顯示人類活動的貢獻最大，而自然因素(如內部氣候變率、太陽活動和火山活動)的貢獻則不明顯。圖 11(c) 闡述了輻射強迫研究對全球升溫貢獻的評估。研究顯示人類活動各個組成部分(包括溫室氣體、氣溶膠及其前驅物、土地利用改變，以及航空凝結尾跡)對全球變暖的影響，其中二氧化碳和甲烷的貢獻最為顯著。

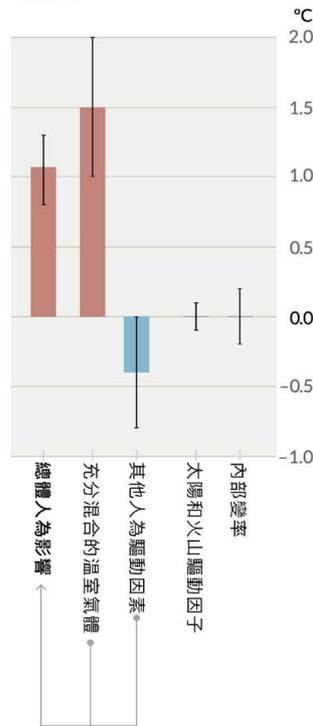
觀察到的變暖

(a) 相對於1850-1900年，觀測到的2010-2019年升溫



基於兩種互補方法的升溫貢獻

(b) 相對於1850-1900年，根據歸因研究評估的對2010-2019年升溫的綜合貢獻



(c) 相對於1850-1900年，根據輻射強迫研究評估的對2010-2019年升溫的貢獻

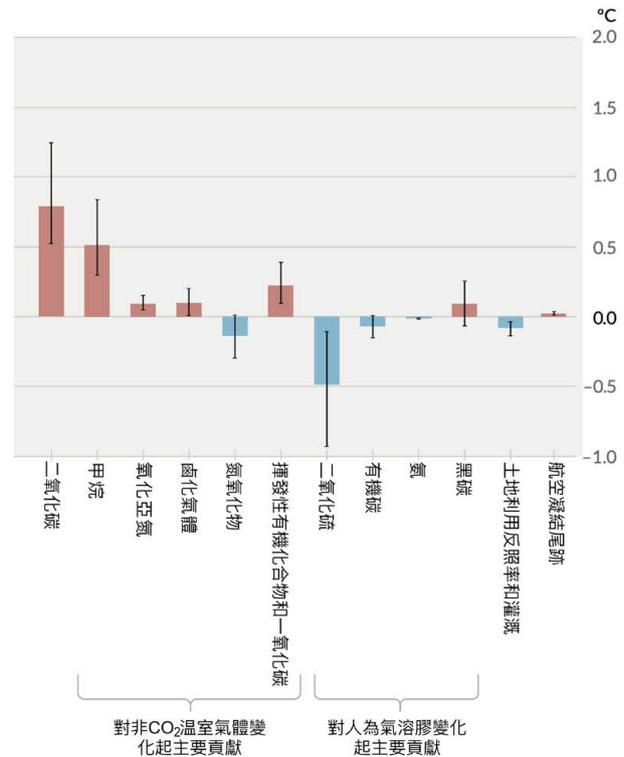


圖 11 各因子對觀測到的 2010–2019 年相對於 1850–1900 年增暖的貢獻的評估
來源：IPCC《第六次評估報告》



2.2 科學共識

在過去三十多年，有多項研究嘗試探討氣候學家對人為引致全球變暖這個議題的共識，結果發現氣候學家的共識超過 90%。

連納斯等(Lynas et al., 2021) 隨機抽取自 2012 年以來發表的氣候相關的同行評審論文進行分析，研究顯示人為造成氣候變化的科學共識超過 99%。(圖 12)



圖 12 氣候學家對人為引致全球變暖的共識
來源：Skeptical Science

政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 評估報告

IPCC 每隔數年會發表評估報告，總結世界各國氣候學家在氣候變化方面的研究結果，評估報告代表了氣候學家在氣候變化問題上的共識。IPCC 自 1990 年起發表了六次評估報告，其重要結論如下：

1990

《第一次評估報告》



- 全球平均表面溫度在過去 100 年上升了 0.3°C 至 0.6°C
- 這升溫幅度與氣候模式的預測大致吻合，但亦與氣候自然波動的幅度相約

1995

《第二次評估報告》



- 平衡各方的證據後可以看得出人類對全球氣候有影響

2001

《第三次評估報告》



- 過去 100 年的暖化很不可能 (1–10% 機會) 單是因為氣候自然波動所致
- 大部分過去 50 年的暖化可能是因為溫室氣體增加所致

2007

《第四次評估報告》



- 氣候系統的暖化是無庸置疑
- 大部分自二十世紀中期以來的全球升溫很有可能 (90% 以上機會) 是人為的溫室氣體增加所致

2013

《第五次評估報告》



- 氣候系統的暖化是無庸置疑，自 1950 年代以來，很多觀測到的改變是數十年至千年所未見
- 人類帶來的影響極有可能 (95–100% 機會) 是二十世紀中期以來觀測到的暖化的主要原因

2021

《第六次評估報告》



- 人類影響已導致大氣、海洋和陸地的溫度上升，這一點是無庸置疑。全球暖化的速度是過去最少 2,000 年以來最快。大氣、海洋、冰凍圈和生物圈都發生了廣泛而迅速的變化
- 人為造成的氣候變化已影響全球氣候及極端天氣事件的發生。自第五次評估報告以來，熱浪、大雨、乾旱和熱帶氣旋等極端事件的變化與人類影響之間的關聯，已獲得進一步證實

相關資料



全球變暖：迫在眉睫的危機 《一》

7.2 單元總結

全球暖化的成因是甚麼？

1 影響地球溫度的因素

☞ 太陽輻射

- 太陽是地球的主要能量來源。假如抵達地球的能量多於離開地球的能量，地球便會升溫。
- 地球軌道變化會影響抵達地球的太陽能量，但其牽涉的時間尺度以萬年計，難以解釋地球近百年的急速升溫。

☞ 反射率

- 地表覆蓋（如海洋、冰雪）影響太陽輻射的反射。氣候變化引致地球表面冰雪融化，降低地表反射率，這個改變進一步加劇氣候變化，形成惡性循環。
- 火山爆發導致大氣中懸浮粒子數量增多，反射更多太陽輻射回太空，減少地球吸收的熱能。

☞ 溫室氣體

- 二氧化碳、甲烷及氧化亞氮等溫室氣體自然存在於大氣中，天然溫室效應使地球保持適中的溫度。
- 燃燒化石燃料、砍伐森林、農業和工業等人類活動排放大量溫室氣體到大氣中，加劇了溫室效應，導致全球暖化。

2 全球暖化是人類活動引致的

- ☞ 自然因素無法解釋當前全球快速升溫。研究及模擬結果顯示人為因素是導致全球暖化的主因。
 - ☞ 超過 90% 的氣候學家認同人類活動引致全球變暖，顯示出強烈的科學共識。
-