

## 7.2 全球暖化的成因是甚麼？

### 7.2.1 影響地球溫度的因素

### 7.2.2 太陽輻射

### 7.2.3 反射率

### 7.2.4 溫室氣體

### 7.2.5 全球暖化是自然變化還是人為引致？

## 7.2 成因要看真 – 全球暖化的成因是甚麼？

### 章節撮要

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<sup>1</sup>、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。



### 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。按照世界氣象組織《2017年全球氣候狀況聲明》，2017年全球平均溫度已較工業化前水平高出約1.1°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<sup>2</sup>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。

<sup>1</sup> 又稱為反照率

<sup>2</sup> 政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 的官方翻譯為冰蓋 (Ice Sheet)

### 7.2.1 影響地球溫度的因素

太陽是地球的主要能量來源。

參閱圖2.1，太陽能量以**短波輻射**形式抵達地球，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。

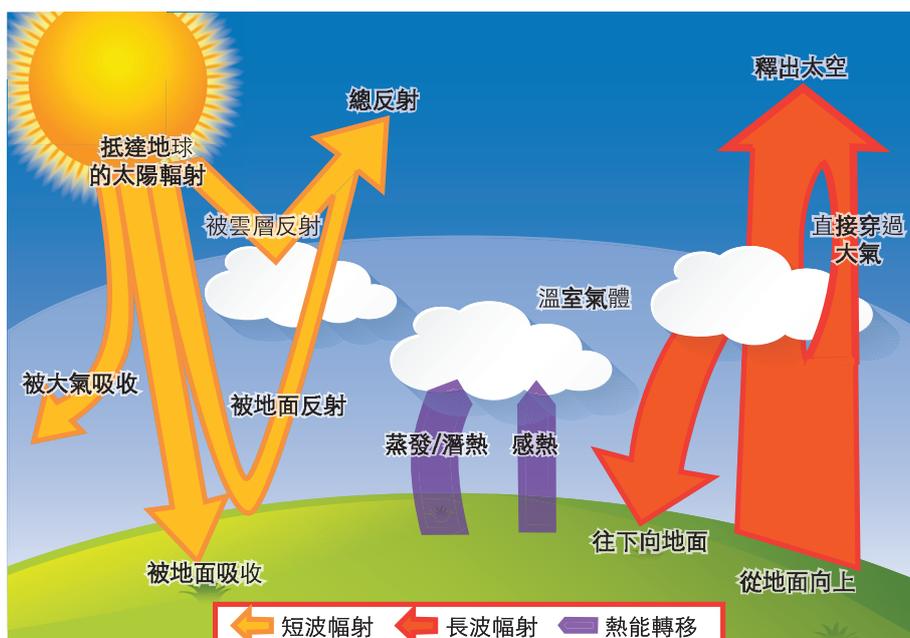


圖2.1 全球能量收支

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。

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。

		? 可於內文找到答案	
抵達地球的太陽輻射	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	這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之間的距離，即影響抵達地球的太陽能量強度。
反射率	地表覆蓋	海洋、海冰、雪地，哪個地表覆蓋反射最多太陽輻射？	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重要角色。
	大氣中的懸浮粒子	火山爆發會否增加反射率？	雲量或大氣中懸浮粒子的數量增多會反射更多的太陽輻射回太空，減少地球吸收的熱能。
大氣中溫室氣體濃度	自然的碳循環	假如自然的碳循環不受干擾，大氣中二氧化碳濃度是多少？	溫室氣體自然存在於大氣中，溫室效應使地球保持適中的溫度，萬物得以生存繁衍。
	人類活動	哪些人類活動會增加大氣中溫室氣體濃度？	假如地球沒有大氣，物理定律指出地球表面的平均溫度會降至-18°C左右。然而，溫室氣體濃度上升會加劇溫室效應，造成地球暖化。

圖2.2 影響地球溫度的因素

## 7.2.2 太陽輻射

 太陽活動是全球暖化的主要原因嗎？

太陽活動的波動是自然變化。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），平均數值約為 1,361 瓦/平方米 (W/m<sup>2</sup>)。

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是約 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數分析來估計總太陽輻射。

參閱圖 2.3，二十世紀初期，**總太陽輻射與全球平均溫度**均有上升趨勢。但自六十年代開始，**總太陽輻射**有**下降趨勢**，但**全球平均溫度**卻**持續上升**。

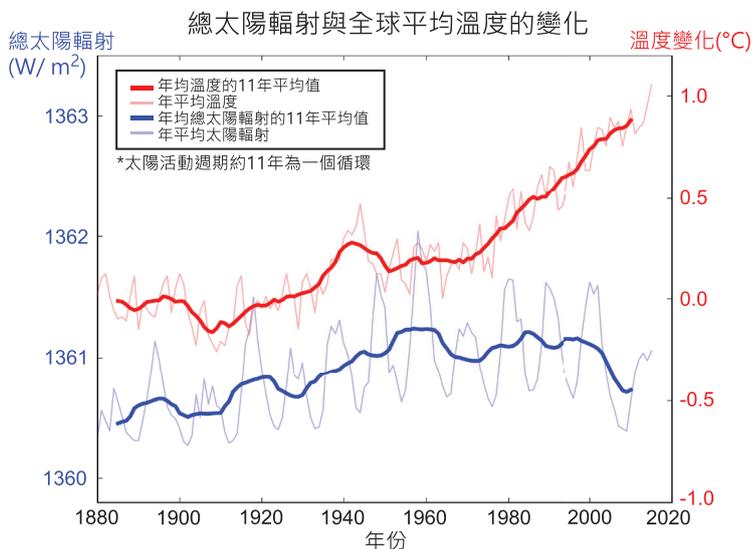


圖 2.3 總太陽輻射與全球平均溫度的變化<sup>i</sup>

來源：Skeptical Science

## 教師參考資料

## 對流層與平流層的不同溫度變化

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低層升溫，但平流層低層則降溫，這是溫室效應加劇的獨有特徵。觀測結果正好顯示自二十世紀六十年代以來，對流層低層有長期升溫趨勢，而平流層低層有長期降溫趨勢。

IPCC 第一工作組  
《第五次評估報告》  
第二章，圖 2.24

為何太陽與近年的  
氣候變化無關



## 7.2.3 反射率

 淺色表面的反射率比深色表面的高。參閱圖 2.4，海冰比海洋的反射率高；雪地比海冰的反射率更高，反射了約 90% 的太陽輻射；而城市中用作鋪設路面的瀝青反射率較低，吸收較多的太陽輻射。

## 不同地表的反射率

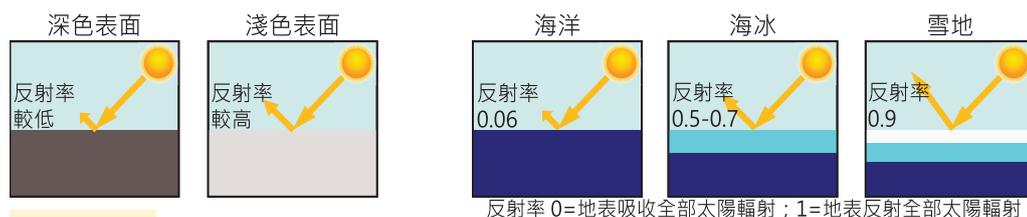


圖 2.4 不同地表的反射率<sup>ii</sup>

數據來源：美國國家冰雪數據中心 (NSIDC)

## 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氣體和微粒送到穩定的平流層，讓它們在平流層逗留多年。**這些額外的微粒會增加地球反射率，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 $0.5^{\circ}\text{C}$ ，但幾年後，溫度回升到火山爆發之前的水平。

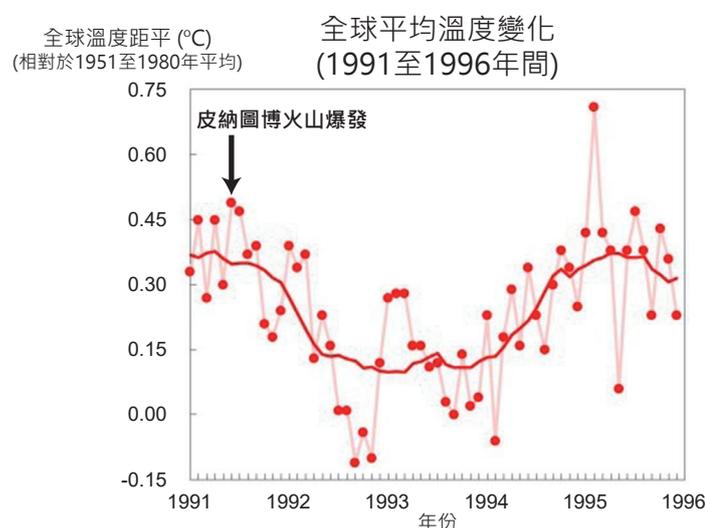


圖2.5a 全球平均溫度變化<sup>iv</sup>

來源：香港天文台 (HKO)



圖2.5b 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、天氣與氣候



相關資訊

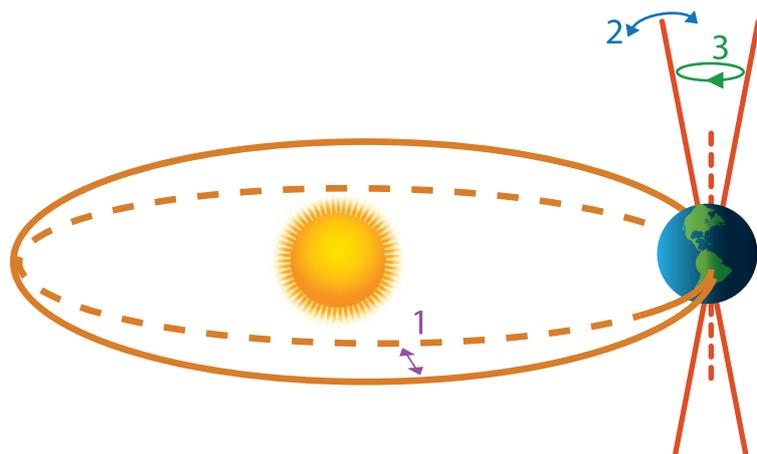
## 地球軌跡 ( 米蘭科維奇循環 )

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<sup>v</sup>，詳情可參考圖2.6。

「氣象冷知識」：  
米蘭科維奇循環



相關資訊



 **圖2.6 米蘭科維奇循環<sup>vi</sup>**

### 1. 地球公轉軌跡的形狀

第一個參數是地球環繞太陽公轉軌跡的形狀，軌跡有時較接近圓形，但有時卻呈橢圓形。

這個參數的變化週期約為100,000年。軌跡的改變會影響在不同季節抵達地球的太陽能量。

### 2. 地球自轉軸心傾斜度

第二個參數是地球自轉軸心的傾斜角度，它會在 $22.1^{\circ}$ 至 $24.5^{\circ}$ 之間變化，週期約為40,000年。

這個參數的變化不會改變抵達地球的太陽能量，但會影響日射在不同緯度的分布。

### 3. 地球自轉軸心的進動

第三個參數是地球自轉軸心的進動，亦即地球軸心的搖晃，變化週期約為26,000年。

地球軸心的搖晃同樣會影響日射在不同緯度的分布。

## 「氣候 — 反射率」回饋

「氣候 — 反射率」回饋是指氣候變化引致地球反射率改變，這改變進一步加劇氣候變化，形成惡性循環。

米蘭科維奇循環的三個參數對抵達北半球高緯度地區的日射影響至為重要，因為地球大部分的冰雪面都集中在這些地區，而冰雪面的變化可以引致「氣候 — 反射率」正回饋作用。

舉例當北半球高緯度地區所接收的日射減少，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。



現時北極暖化的速度是全球平均的兩倍，「氣候 — 反射率」的正回饋作用是一個主要原因。



全球暖化使北極的冰雪融化，暴露出顏色較深、反射率較低的海洋和陸地，北極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。

## 米蘭科維奇循環是近期氣候變化的原因嗎？

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。

不斷伸延的  
曲棍球球棍



相關資訊

### 7.2.4 溫室氣體

#### 溫室效應

溫室氣體如二氧化碳、甲烷和氧化亞氮等自然存在於大氣中。溫室氣體會吸收部分地球釋放的紅外線，然後再向四方八面釋放出來；部分紅外線會射出太空，但亦有部分會射回地球，為地球表面加熱，這就是溫室效應。

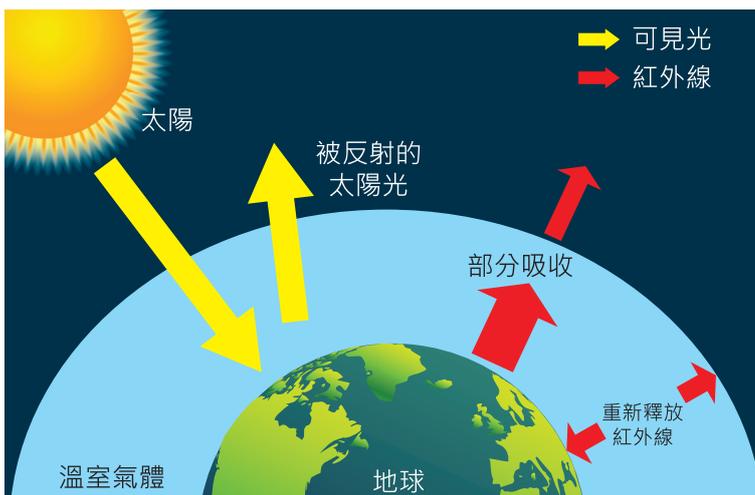


圖2.7 溫室效應

#### 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<sup>3</sup>之間上落變化，但人類活動擾亂了碳循環。今天，大氣中二氧化碳濃度已經超過400ppm，是過去八十萬年來最高，並且繼續上升。❓

碳循環



相關資訊

3 單位ppm為百萬分率

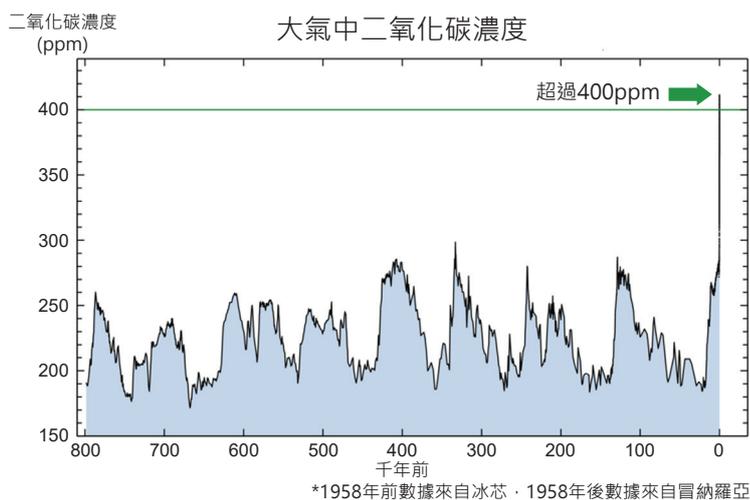


圖2.8 大氣中二氧化碳濃度<sup>vii</sup>

來源：Scripps Institution of Oceanography

全球二氧化碳濃度



相關資訊

大氣中二氧化碳濃度的歷史變化



相關資訊

### 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，把更多能量困在地球，導致全球暖化。

大氣圈二氧化碳的模擬影像



相關資訊

#### 人類活動排放的主要溫室氣體

溫室氣體	人類活動	溫室氣體	人類活動	溫室氣體	人類活動
二氧化碳	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 燃燒化石燃料</li> <li>- 砍伐森林</li> <li>- 使用機器</li> <li>- 生產水泥</li> <li>- 廢物焚化</li> </ul>	甲烷	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 燃燒化石燃料</li> <li>- 畜牧</li> <li>- 種植水稻</li> <li>- 廢物焚化</li> <li>- 廢物分解</li> </ul>	氧化亞氮	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 燃燒化石燃料</li> <li>- 使用氮肥</li> <li>- 生產尼龍</li> <li>- 廢物焚化</li> </ul>
CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	

表 2.1 人類活動排放的主要溫室氣體

#### (a) 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。

#### (b) 砍伐森林

為了開墾土地供農業及城市發展，人類大量砍伐林木或焚燒森林，除了在焚燒的過程釋出了二氧化碳，吸收及儲存二氧化碳的植物量也減少，令大氣中二氧化碳濃度上升。數據<sup>viii</sup>顯示1990至2015年間，全球失去了約1億4,000萬公頃的森林。

### (c) 農業活動

畜牧會排放大量甲烷，例如牛隻的反芻活動；種植水稻亦會排放甲烷；大量使用含有氮的化學肥料會釋出氧化亞氮。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。

### (d) 工業活動

工業活動排放大量溫室氣體。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) 也是溫室氣體。

氯氟碳化物  
(CFCs)



相關資訊

### (e) 廢物處理

隨着生活水平上升及消費主義的興起，人類消耗資源之外亦製造大量廢物。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。

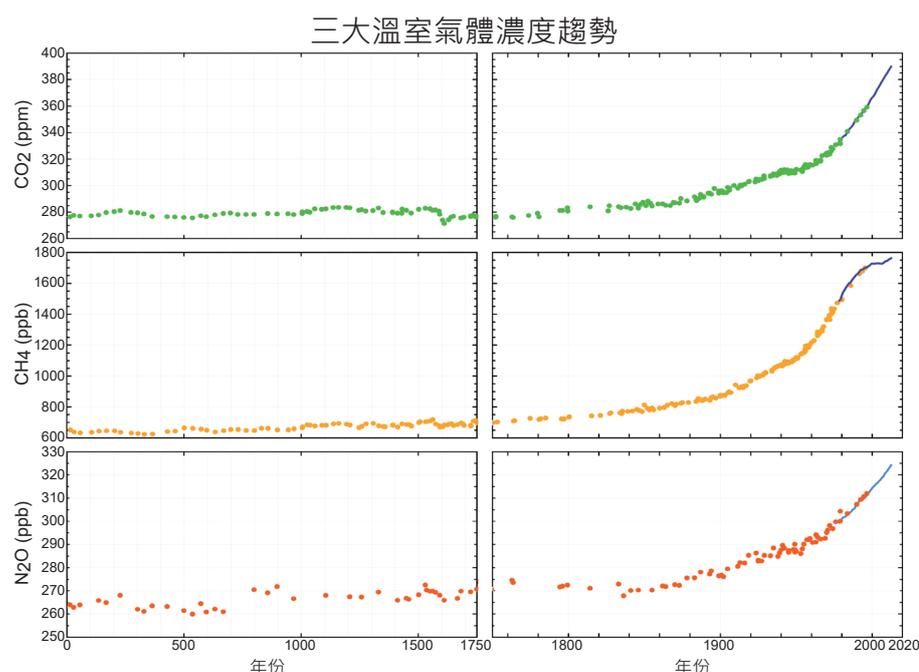
自1750年以來，大氣中二氧化碳濃度的增幅已超過40%，甲烷及氧化亞氮的增幅分別約為160%及20%。



#### 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。最新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。



最新的全球  
二氧化碳濃度



相關資訊

世界氣象組織  
《溫室氣體公報》



相關資訊

圖2.9 三大溫室氣體濃度趨勢<sup>ix</sup>

註：圖中的單位ppm為百萬分率，單位ppb為十億分率

來源：IPCC 《第五次評估報告》

## 7.2.5 全球暖化是自然變化還是人為引致？

綜合了多個研究的結果和相關數據後，圖2.10顯示現時地球的能量收支情況，有大約**0.6W/m<sup>2</sup>**正的能量不平衡，引致地球暖化。

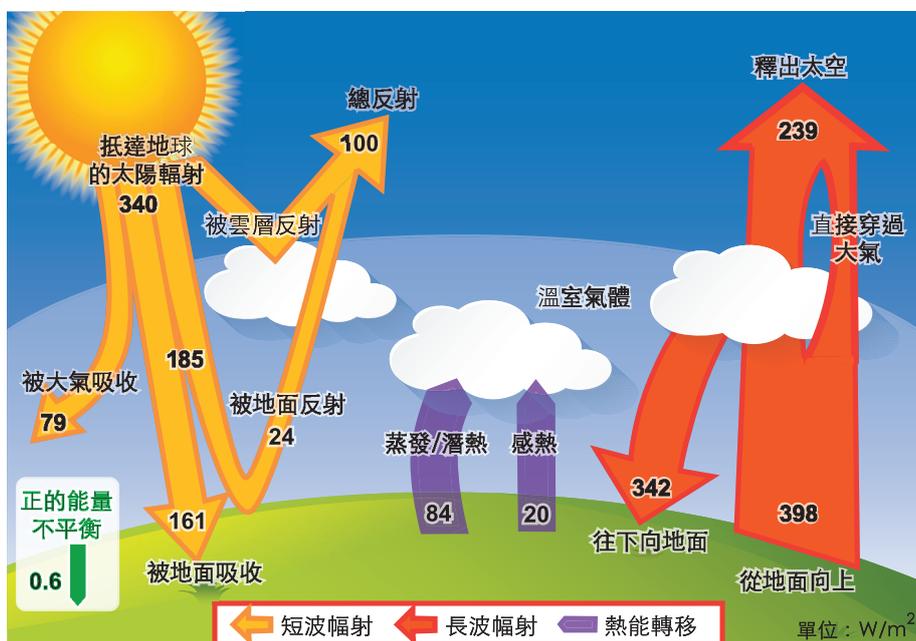


圖2.10 現時全球能量收支情況\*

數據來源：IPCC《第五次評估報告》

全球變暖的真正成因？



相關資訊

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百多年的變化，圖2.11顯示在不同情況下的溫度距平（相對於1880至1919年）模擬結果。

假如只考慮自然因素如地球軌跡、太陽活動、火山活動的變化，氣候模式的模擬結果與實況觀測有很大出入，氣候模式不能夠模擬出實際觀測到的升溫。假如把人為因素和自然因素一併考慮，包括加入溫室氣體濃度的變化、土地用途的改變、人為的污染等等，模擬結果便與實況觀測吻合。

IPCC《第五次評估報告》清楚指出，人類帶來的影響極有可能是二十世紀中期以來所觀測到變暖現象的主要成因。

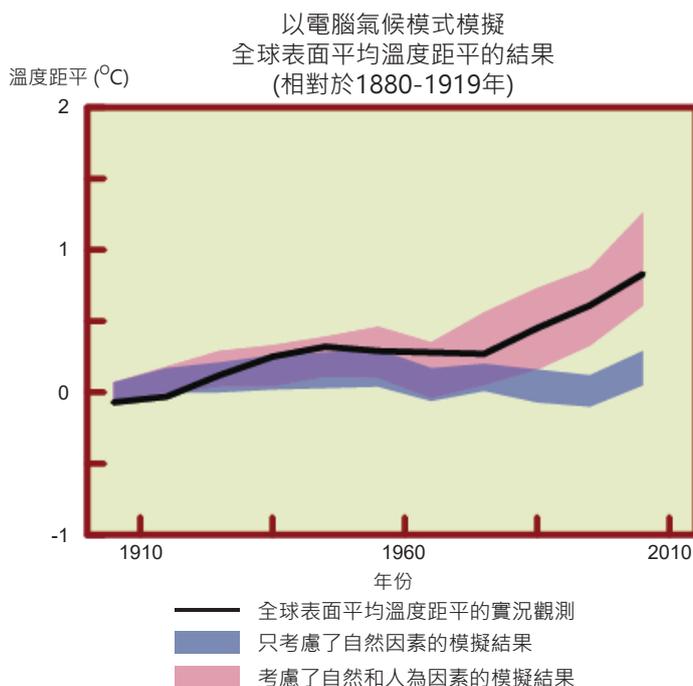


圖2.11 以電腦氣候模式模擬全球表面平均溫度距平的結果<sup>xi</sup>

來源：IPCC《第五次評估報告》

## 輻射強迫

科學家利用輻射強迫 (Radiative forcing) 這個參數來量化影響地球溫度因素的貢獻。**正輻射強迫**代表該因素會為地球能量收支帶來正的能量不平衡，使地球升溫；**負輻射強迫**代表該因素會為地球能量收支帶來負的能量不平衡，使地球降溫。

參閱圖2.12，**二氧化碳**造成的**正輻射強迫**最高，其次為甲烷；人類活動如土地利用改變及排放微粒到大氣中會增加地球反射率，帶來負輻射強迫。**人為因素的淨輻射強迫為正數，遠遠超越太陽活動的貢獻。**

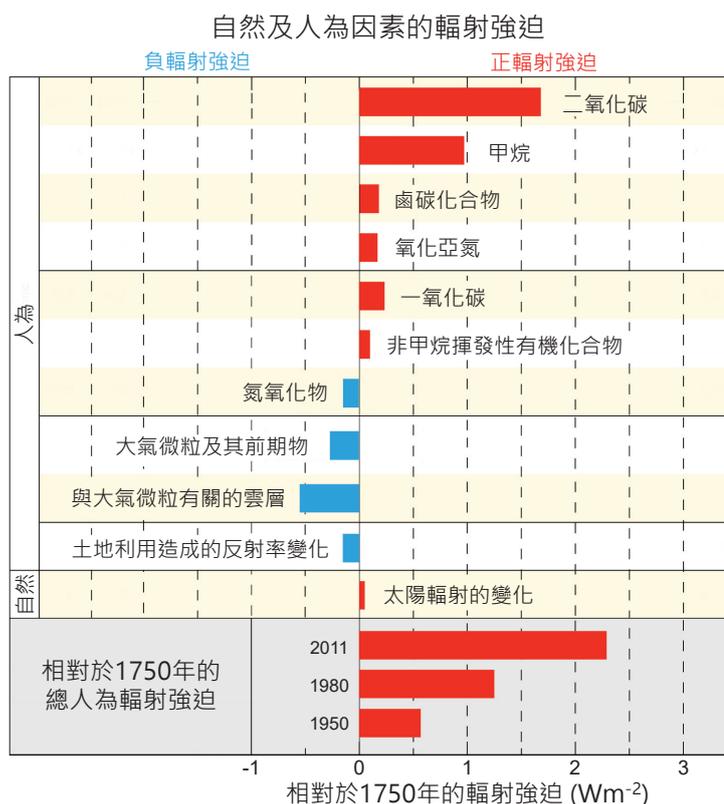


圖2.12 自然及人為因素的輻射強迫<sup>xii</sup>

來源：IPCC《第五次評估報告》

## 97%科學共識

在過去二十多年，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在90%至100%之間。

氣候學家對人為引致全球變暖的共識



圖2.13 氣候學家對人為引致全球變暖的共識<sup>xiii</sup>

來源：Skeptical Science

你是否知道全球變暖的科學共識？



相關資訊

在2013年發表的The Consensus Project<sup>xiv</sup>中，研究人員檢視了過去廿多年過萬篇有關全球暖化及氣候變化的科學論文摘要，這些文章都已通過同行評審。在人為引致全球暖化的問題上表明立場的文章當中，調查發現有97%認同這個觀點。



## 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年起發表了五次評估報告，其重要結論如下。（關於IPCC可參閱7.1部分「氣候變化的科學證據」）

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

全球變暖：迫在眉睫的危機(一)



相關資訊