

全球氣候變遷觀測

周佳^{1,2} 劉紹臣¹

¹ 中央研究院環境變遷研究中心

² 國立台灣大學大氣科學系

(中華民國一〇一年一月十六日收稿；中華民國一〇一年三月二日定稿)

摘 要

本研究主要是整理分析過去觀測資料中全球氣候變遷的相關研究，其中包括了 IPCC 第四次評估報告的部分重點、最新的研究報告和臺灣學者的研究，並且簡單地描述了 IPCC 第五次評估報告的原則和著重的地方。在平均氣候狀態的改變，地表氣溫的上升是最明顯且一致的氣候變遷，在過去百年中(1906~2005)地表溫度大約上升了 0.74°C。其他相關的變化如海平面的上升和海冰的融化也都被觀測到，其中海平面在 1961 年至 2003 年間大約上升了 77mm。至於降水和極端事件如颱風的改變，因為有著極高的不確定性，對於其變遷趨勢並無一致性的結論。在後 IPCC 第四次評估報告時期(2007 年以後)，對於全球水循環有了更多的研究，一般而言，全球總降水量在增加，但增加的速率仍有爭議。強降水的強度和頻率也有逐漸增加的趨勢，而且趨於兩極化，即雨季越濕、乾季越乾，但這些變化會隨著地區的改變而有所不同。至於颱風的變化，不確定性仍然非常高。IPCC 在第五次評估報告改為根據大氣輻射能量的改變來設定情境。另外，IPCC 在第五次評估報告中增加了強化不確定性的評估，區域氣候變遷的研究和近期氣候推估等重點。

關鍵字：全球暖化、氣候變遷

一、IPCC 第四次評估報告氣候變遷觀測結果重點彙整

(一) 溫度

1. 地面溫度

近一世紀來，全球氣候有非常顯著的變化。2007 年政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC) 第四次評估報告指出全球平均溫度最近一世紀 (1906~2005 年) 約增加 0.74°C (圖 1)，主要的變化可分為 3 大區段：(1) 1900~1940 年間溫度上升，(2) 1940~1977 年間溫度些微下降，(3) 1978~2005 年間溫度快速上升。1850~2006 年中最熱的前 12 名有 11 年發生於 1995 年至 2006 年，而最近的 50 年 (1956~2005) 的全球溫度增加速度幾乎是過去百年 (1906~2005) 增加速度的兩倍，有明顯與時俱增的趨勢，此一現象與氣候模式模擬結果一致。圖 1 也顯示陸地增溫比海洋增溫大，尤其是中、高緯度地帶特別明顯。這是因為海水的比熱較陸地大，增溫較為緩慢的緣故。對於日夜的差別，晚上增溫的速度比白天來的快。至於一年四季，溫度也都是增加的。最新的觀測資料 (1979~2004 年) 顯示，第三次報告提及日夜溫差逐漸減少的趨勢已停止，是因為白天和晚上的溫度都同時在增加。

「最近一世紀全球平均溫度增加 0.74°C 」聽起來似乎增加的幅度不是很大，但是與過去千年比較其實是相當顯著的。因為，歷史記載、樹輪、冰芯等資料推算出的地球溫度在過去千年中從沒有百年上升 0.74°C 那樣大的變化；加上二氧化碳含量自從工業革命至 2005 年上升約 35% (自 280ppm 上升至 379ppm)，幅度遠大於過去千年的變動幅度，因此不能排除人為因素的影響。經過一系列的氣候模式評估，IPCC 評估報告認為過

去半世紀的全球暖化是人為排放溫室氣體所造成的可能性極高。至於都市熱島效應和土地利用是否是造成全球溫度上升的原因，研究顯示這兩項因素的影響並不顯著。

2. 大氣溫度

全球暖化的現象不僅發生在地球表面，整個對流層 (10~15km 以下的大氣層) 的溫度都有上升的趨勢，自從 1979 年以後大約每 10 年增加 $0.12\sim 0.19^{\circ}\text{C}$ (圖 2)。除了地球生物賴以生存的對流層外，在對流層上方的平流層 (約 12~30km 之間) 溫度卻是減少的，大約每 10 年降低 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。平流層的溫度主要是受臭氧輻射吸收加熱和二氧化碳輻射冷卻的影響，所以平流層冷卻和臭氧的減少和二氧化碳增加有關。

(二) 降雨與水氣

1. 降雨

降雨的變化在空間上的分佈和溫度有明顯的不同。溫度的增加幾乎發生在全世界每個角落，但是降雨卻在有些地方增加、有些地方減少，估計全球平均降雨變化的趨勢相對困難，IPCC 第四次評估報告仍無法確定全球平均降雨是否有增加或減少的趨勢。至於區域降雨的長期變化，在北美東半部、南美洲、北歐、北亞和中亞都發現有明顯增加的趨勢，但在撒哈拉沙漠、地中海地區、南非和部分的南亞地區則發現有減少的趨勢 (圖 3)。

2. 水氣

對流層的水氣正在持續增加 (圖 4)。從 1976 年起，地表的比濕普遍增加，與陸地及海洋氣溫上升一致。從 1988 年到 2004 年，全球海洋上空每 10 年總水氣含量增加 $1.2 \pm 0.3\%$ (95% 的信心

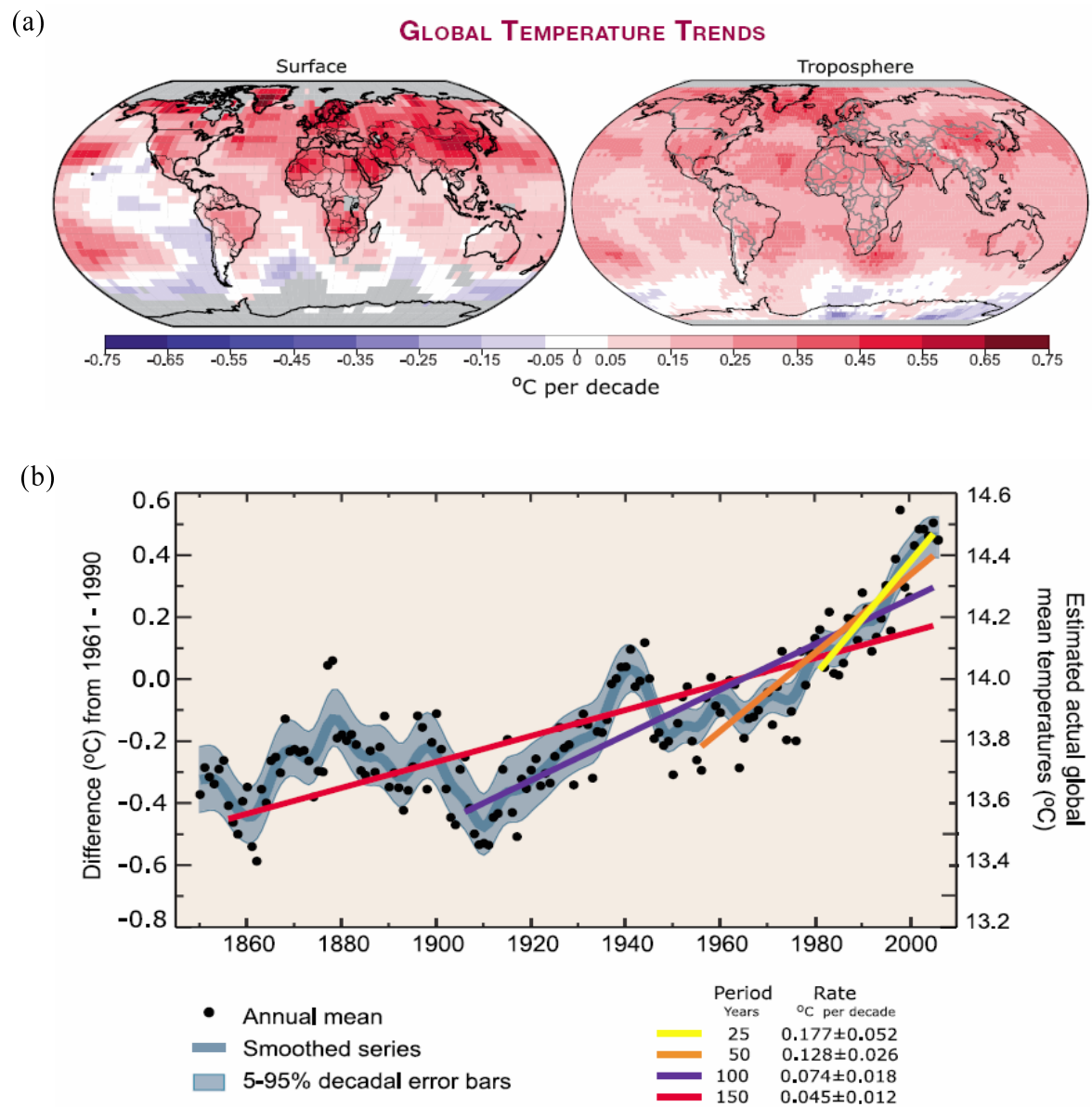


圖 1 全球平均溫度變化與趨勢圖。(a)全球地面（左）和對流層（右）溫度在 1979~2005 年間的變化趨勢。
(b)全球平均地面溫度相較於 1961~1990 年之平均面溫度的變化。
(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.6)

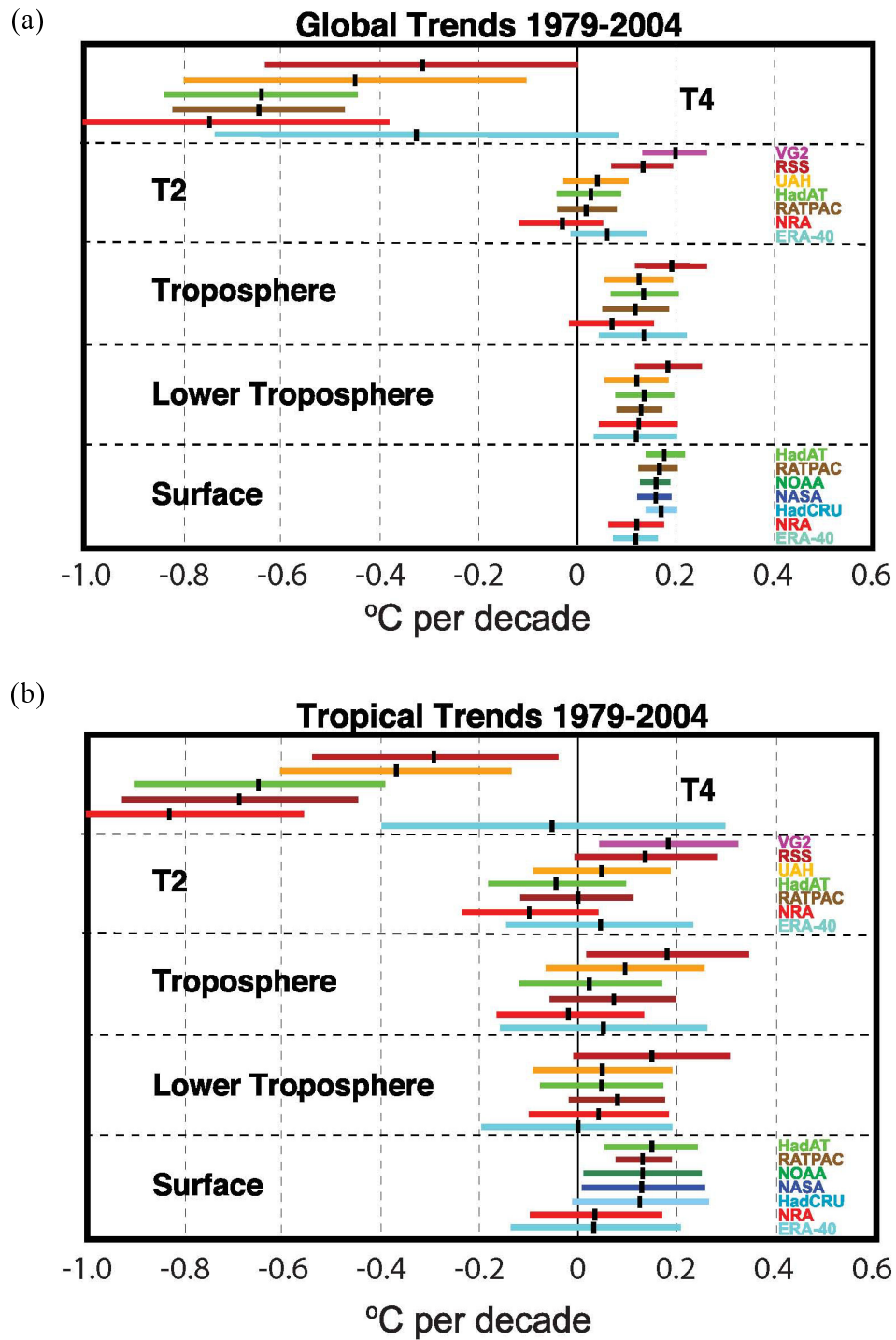


圖2 不同觀測資料中不同高度的溫度在 1979~2004 年期間的線性趨勢。(a)全球平均(b)熱帶平均。圖中 T2 和 T4 分別表示對流層和平流層溫度。(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 3.18)

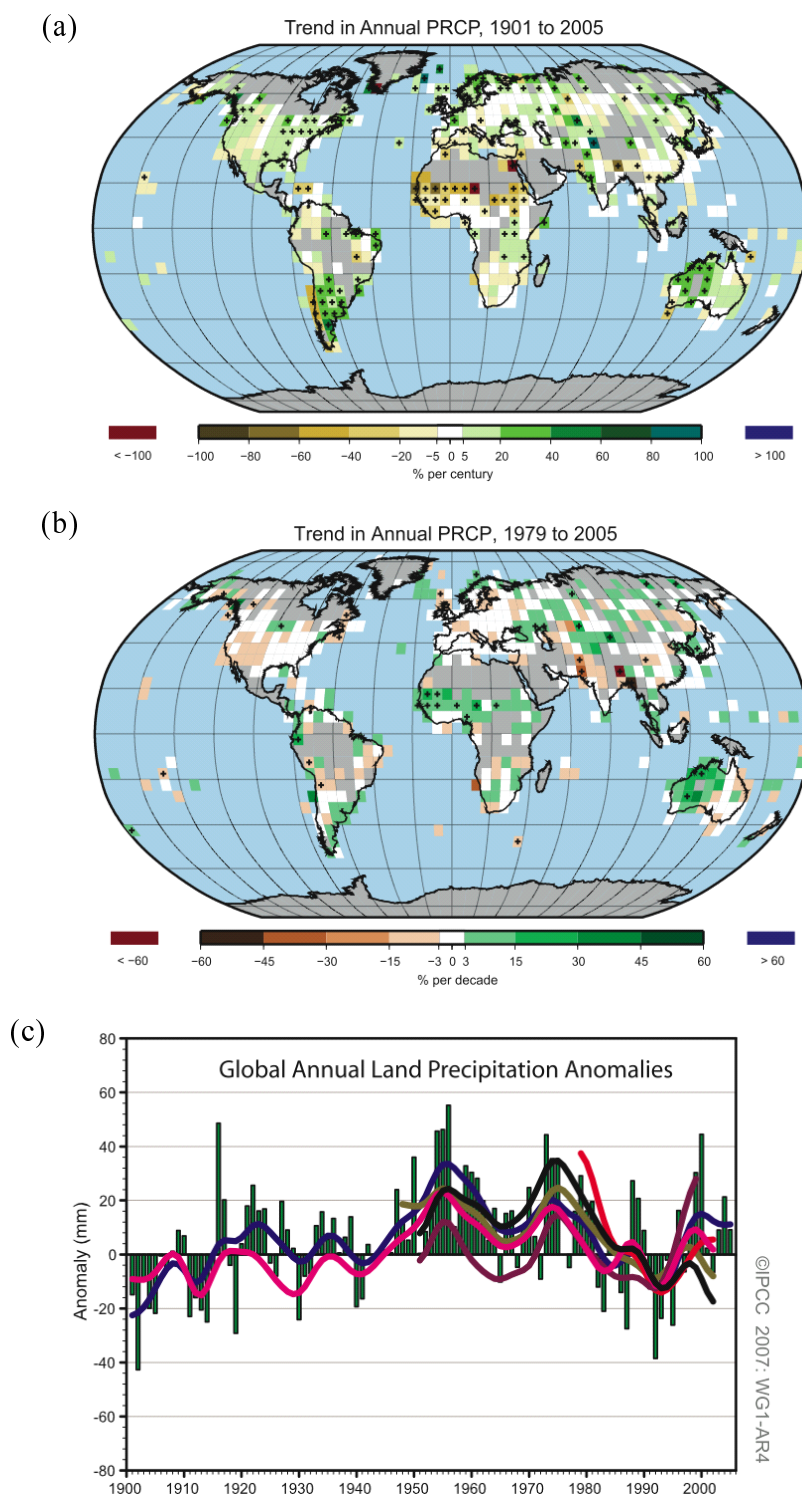


圖 3 (a)年平均降雨在 1901~2005 年期間的線性趨勢（單位： $\% (100\text{yrs})^{-1}$ ）；(b)年平均降雨在 1979~2005 年期間的線性趨勢（單位： $\% (10\text{yrs})^{-1}$ ）；(c)全球陸地平均降雨相較於 1961~1990 年之間平均值的變化。（摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.9）

ATMOSPHERIC WATER VAPOUR

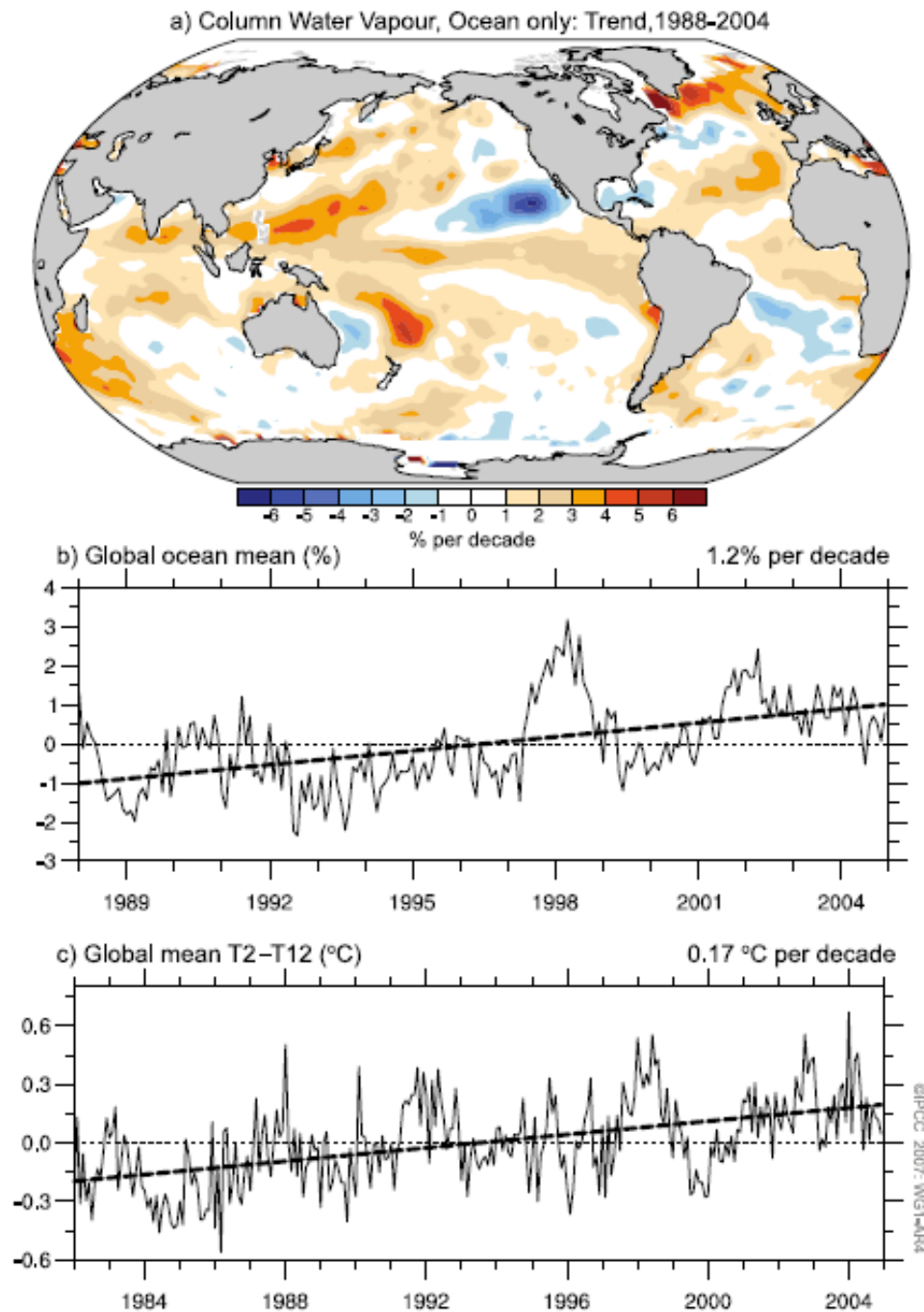


圖4 (a) 1988 年至 2004 年可降水量（總水氣含量）的線性趨勢($\% 10\text{yr}^{-1}$)，(b)相對於此段時期全球海洋可降水量的逐月變化及線性趨勢，(c)相對於 1982 年至 2004 年之全球平均（80°N 至 80°S）的高對流層輻射亮溫（可代表水氣含量）的逐月變化(°C)，虛線表示亮溫的線性趨勢，以每十年多少°C 表示。（摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.8）

度)，但是相對濕度幾乎沒有變化。根據 Clausius-Clapeyron 方程式，飽和蒸汽壓隨著溫度上升而增加。在相對濕度沒有明顯變化的情況下，比濕的增加應該是反映了溫度的上升。額外增加的大氣水氣也意味著降雨量或降雨強度可能增加。除此之外，如圖 4 所顯示，高對流層的水氣含量也有增加的趨勢。

(三) 極端事件

我們通常以機率分佈函數來描述天氣與氣候事件的發生機率，而極端事件是發生在此一函數最高與最低值範圍的罕見事件。統計理論指出，相對小的平均氣候變化，可以對極端天氣事件發生頻率造成相當大的改變。如圖 5 所示的溫度機率分佈函數，平均溫度只要增加一些，極端高溫發生的頻率就可能增加好幾倍。一種極端事件（例如炎熱天氣）發生頻率的增加也可能伴隨相對的極端事件（在這個例子為寒冷天氣）發生頻率的減少。

人們受到極端天氣事件的影響時，常常詢問是否由於人類影響了氣候產生的結果。即使氣候不改變在很多地區也會發生各種極端的天氣事件，因此很難將任何個別事件的發生歸咎於氣候的改變。在大部分的地區，儀器記錄到的變化通常只有一百多年，因此要定義極端罕見的氣候事件是如何發生的資訊是有限的。再者，通常需要經過許多變因結合才會造成極端事件，因此將個別極端事件歸因於某個特定因素的難度很高。

1. 暴雨

世界各地近幾年（即使在一些總降雨減少的地方）陸續注意到有大雨增加的現象。但如前所述，極端天氣隨氣候的變化很難推估，不確定性極高，尤其是區域性的變化更難推估。因此 IPCC

第四次評估報告對極端天氣發生頻率受氣候變遷影響的推估相當保守。

2. 颱風

颱風有著非常明顯的年際與年代際等自然的變化，所以估計颱風的變遷趨勢變得相當困難。Emanuel (2005) 和 Webster et al. (2005) 認為自從 1970 年代開始，全世界颱風的強度和強烈颱風的個數均有增加的趨勢。有一些人則提出不同的見解（如 Landsea et al. 2006, Chan 2006），認為較為精確的觀測資料並不長（如衛星觀測始於 1970 年代末期），而且颱風多發生在海上，颱風強度多依賴間接推估，準確度較差，而且可能因為前後推估方法不一致導致誤差，目前所觀察到的颱風變化趨勢無法代表長期變遷趨勢。2005 年的兩篇文章引起了颱風氣候變遷的廣泛討論與爭議，目前普遍認可的唯一結論是可信的觀測資料仍然不夠長到足以判斷颱風的氣候變遷。

3. 乾旱

帕爾曼乾旱嚴重度指標 (Palmer Drought Severity Index) 依據土壤含水量評估乾旱的嚴重程度。一般而言，中、低強度降雨是土壤含水量及地下水涵養的關鍵來源，持續地減少很可能招致乾旱的威脅。根據過去的觀測，降雨量、降雨強度和頻率以及降雨型態的改變，導致許多地區的地面逐漸變乾，並且增加了發生嚴重乾旱的可能性。圖 6 是乾旱指標的全球分布與趨勢。整體而言，乾旱有逐漸增強的趨勢，在熱帶及亞熱帶地區尤其明顯。

4. 極端溫度

圖 7 顯示自從 1950 年之後，寒冷的白天和夜晚發生的頻率逐漸減少，但在亞洲和北美洲北部較為明顯。炎熱的白天和夜晚則有增加的趨勢，

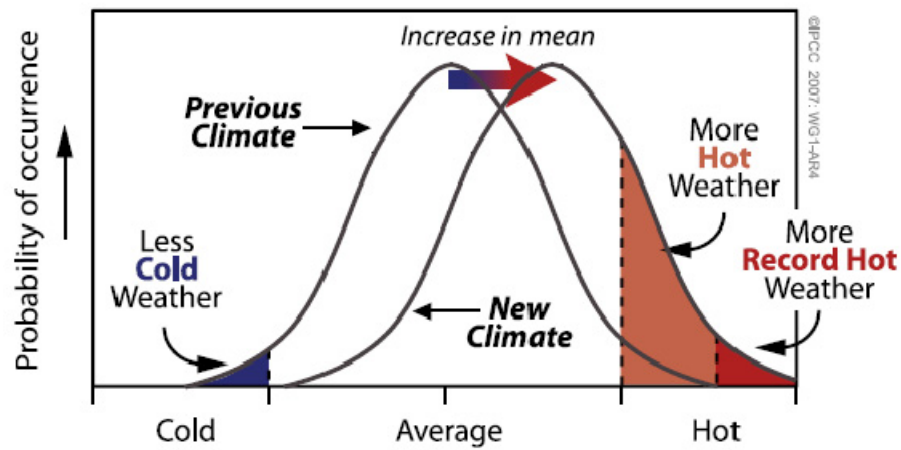


圖5 圖表顯示當溫度分佈為常態分佈時，平均溫度增加對極端氣溫的影響。(摘自 IPCC 第四次評估報告，Box TS.5 圖1)

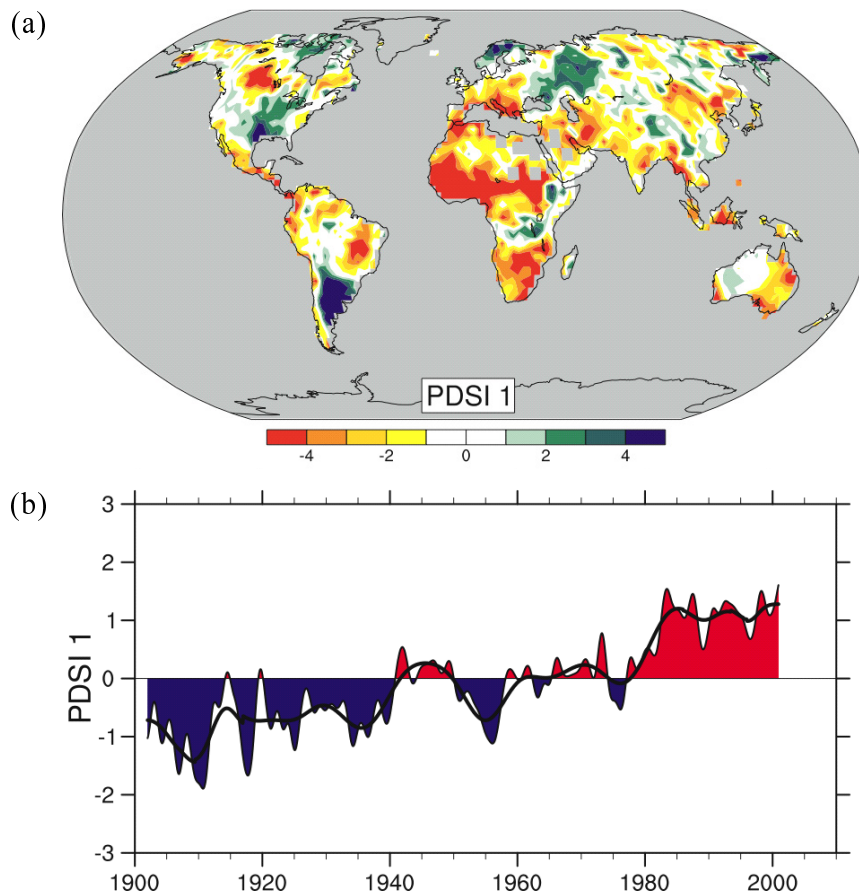


圖6 乾旱指數在1900年~2002年期間的變化趨勢，(a)為空間分佈，(b)為全球平均的時間序列。(摘自 IPCC 第四次評估報告，FAQ3.2，圖1)

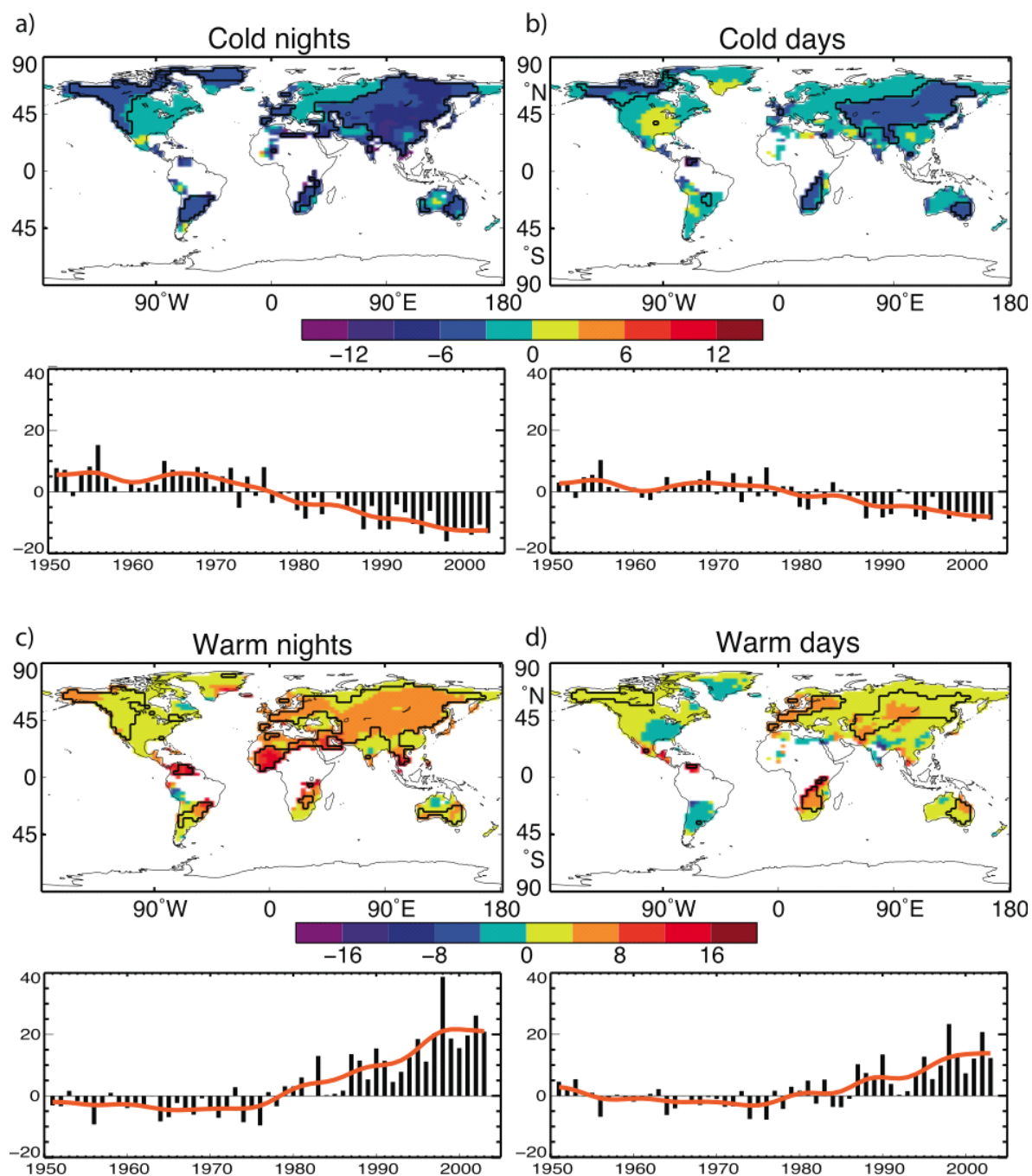


圖 7 極端溫度在 1951~2003 期間各地的變化趨勢和全球時間序列：(a)冷夜 (b)冷晝 (c)暖夜 (d)暖晝。
 (摘自 IPCC 第四次評估報告，FAQ3.3 圖 1)

夜晚增加的趨勢更為快速且區域較大，同樣也是亞洲和北美洲北部的變化較為明顯。

(四) 海平面

1. 海平面

海平面的上升主要是陸地冰雪和冰川的融化，以及海水因溫度上升而膨脹所引起的。陸地冰雪和冰川的融化主要發生在格陵蘭和南極洲。在二十世紀，海平面平均每年上升約 1.7mm（圖 8）。在 1961~2003 年間，海平面平均每年上升 $1.8 \pm 0.5 \text{ mm}$ ，但在 1993~2003 年之間，則平均每年上升約 $3.1 \pm 0.7 \text{ mm}$ ，上升速率遠較過去四十多年的平均高，顯示海平面上升的速率有逐漸加快的趨勢。Levitus et al. (2000) 指出過去 50 年 (1948~1998) 深度 300~1000 公尺的全球海洋熱容量 (global ocean heat content) 隨著海洋溫度上升而持續增加，並在 2005 年進一步估算出 0~

3000 公尺的全球海洋熱容量在 1955~1998 年期間增加了 $14.5 \times 10^{22} \text{ J}$ (焦耳)，相當於全球平均海水溫度增加了 0.037°C ，其中 0~300 公尺深度的海洋增加了 0.171°C 。這段時期海平面上升的主因極可能是受到海洋熱膨脹的影響，且熱膨脹效應對於中低緯度的影響較為明顯。Cabanès et al. (2001) 也得到類似的結果。他們使用 0~500 公尺的海洋熱膨脹量估計 1993~2000 年全球海平面上升速率為 $3.1 \pm 0.4 \text{ mm}(\text{yr}^{-1})$ ，非常接近衛星觀測的 $3.2 \pm 0.2 \text{ mm}(\text{yr}^{-1})$ 。他們利用同樣的方式估計 1955~1996 年的海平面變化，發現這段期間的上升速率則僅為 $0.5 \pm 0.05 \text{ mm}(\text{yr}^{-1})$ ，顯示近年來海面上升的速度比過去數十年快了許多。

2. 冰雪覆蓋面積

北半球中、高緯度大多數的非極區陸上冰川明顯縮短，並且北半球雪覆蓋面積自 1960 年後約

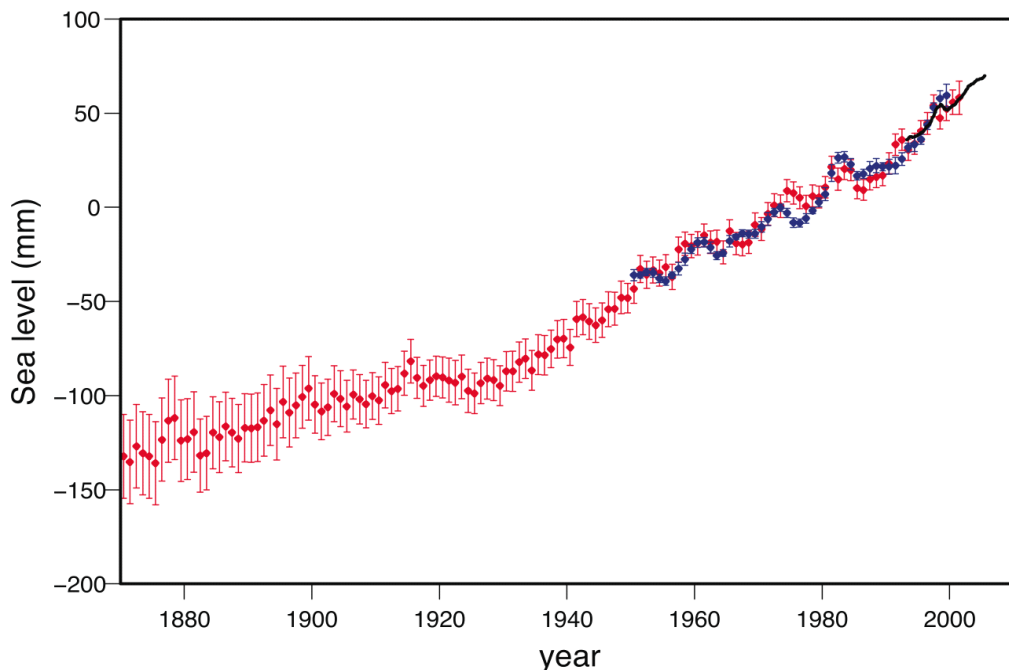


圖 8 全球平均海平面相較於 1961 年至 1990 年之間平均高度的變化。
(IPCC 第四次評估報告，圖 5.13)

減少 10% (圖 9)。北半球冰雪覆蓋面積減少有相當重要的全球氣候變化的指標意義。這是因為雪覆蓋面積減少會產生正回饋作用進一步增加暖化的程度：亦即溫室氣體含量增加，地表溫度上升，溶雪面積增加，雪覆蓋面積因此減少，減少陽光的反射量，地面吸收更多太陽輻射而進一步升溫。至於南極洲冰雪覆蓋面積的變化，雖然有些微增加的趨勢，但是這個變化含有非常大的不確定性，仍須有更多和更準確的觀測才能判斷是否有明顯變遷趨勢。

二、IPCC 第四次評估報告更新與後續研究結果

(一) IPCC 第四次評估報告更新

2009 年 11 月發生了所謂的氣候門事件 (climategate)，主要是因為有駭客盜取了英國安格里亞大學氣候研究小組的一些全球暖化研究相關的電子郵件，造成一些團體認為許多氣候變遷數據遭到惡意竄改，以便凸顯全球暖化的嚴重性。經過跨學術委員會科技小組四個月的獨立調查，科技小組一致認為安格里亞大學氣候研究小組所發表的數據並無問題，並且沒有證據質疑該科學小組的研究結論。科技小組建議如能讓資料的校驗與計算過程更透明化，會有助於降低社會大眾對於研究結論可能產生的誤會。

另外，有關於喜馬拉雅山冰河融化速率的爭議，也引起人們質疑 IPCC 結論審查制度的客觀性。IPCC 第四次評估報告指出，喜馬拉雅山冰河將於 2035 年融化殆盡，但這個研究的結論並沒有得到大多數科學家的認可，便收錄於 IPCC 第四次評估報告。加上許多研究指出喜馬拉雅山冰河的融化速率並沒有如此的快速，IPCC 第四次評估

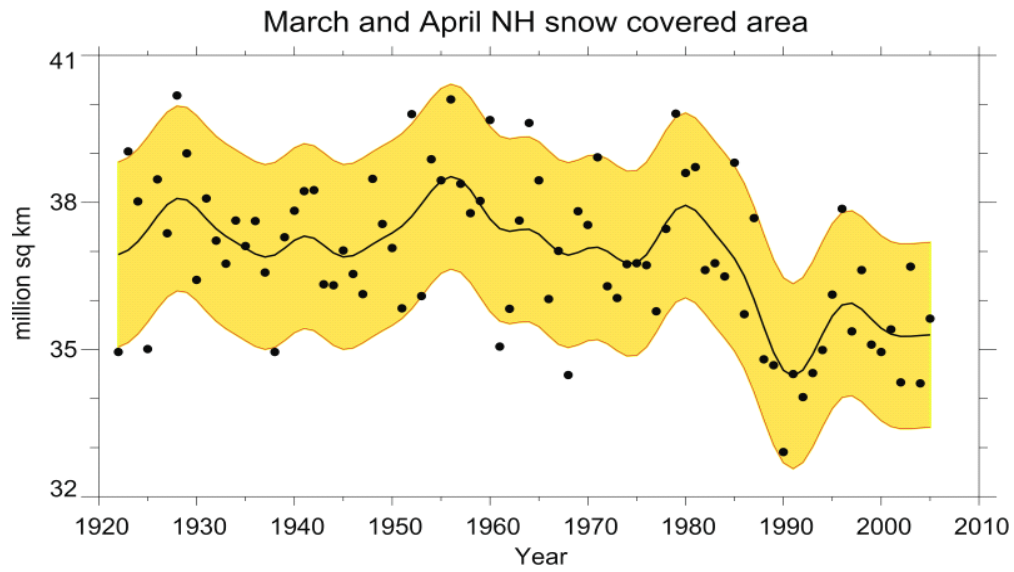
報告明顯過分高估了喜馬拉雅山冰河融化的速率。獨立調查小組調查的結果認為，雖然 IPCC 第四次評估報告有一些錯誤，但不足以影響整體的結論，但也進一步建議審查機制必須在第五份評估報告撰寫時做重大的改革，特別是跨工作小組研究結果的整合。

(二) 後續研究結果

1. 溫度

自從 IPCC 在 2007 年發表第四次評估報告以來，最近的一些研究專注在瞭解過去溫度改變的原因，並且進一步校驗資料的準確度，藉以幫助推估未來溫度的變化。Thompson et al. (2008) 發現在 1945 年附近溫度的急速下降 (圖 1) 是因為海水表面溫度的資料沒有準確的校正的緣故，但在 1968~1972 年之間的溫度下降則是由北半球海水溫度冷卻所造成的 (Thompson et al. 2010)。最近的觀測資料顯示在二十世紀末期到二十一世紀初期 (1998~2008) 的全球溫度雖然停留在高點但並無明顯的增加。這種一、二十年無明顯變化的情形，可能是受到年代際氣候變化 (見第四章) 的影響，而且在未來溫室效應逐漸擴大的環境中，仍然可能發生 (Easterling and Wehner 2009)。此一認知突顯了近期 (near-term) 氣候預報 (見第四章) 的重要性，這也是第五份報告的重點之一。

2011 年初，美國海洋暨大氣總署 (NOAA) 發表的氣候報告指出 2001~2010 年是十九世紀有大規模溫度計紀錄以來最熱的 10 年 (年代)，相較於二十世紀的平均溫度，大約高出 0.56°C 。2005 年和 2010 年則是全球陸地加海洋平均溫度最高的兩年，大約高於二十世紀平均溫度 0.62°C 。



March and April Snow Departure
(1988 through 2004) - (1967 through 1987)

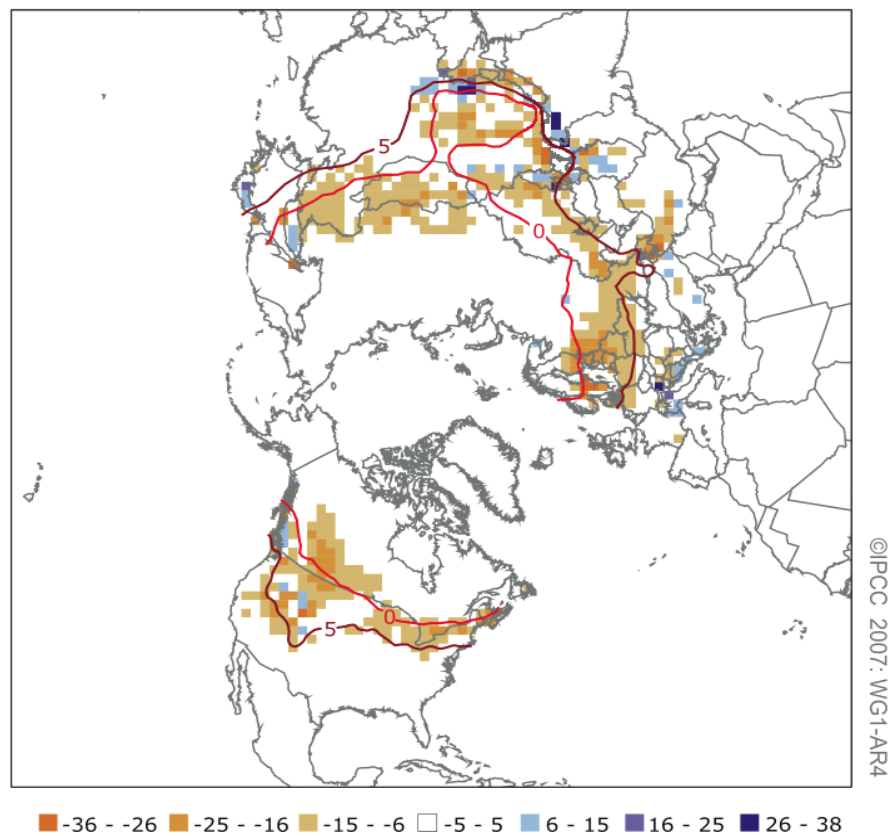


圖9 北半球冰雪覆蓋面積的變化和空間分佈。(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.12)

至於海水表面溫度的改變，現有觀測資料顯示全球大部分的海洋在變暖（如 Chen et al. 2008）。所有觀測資料都顯示印度洋海溫的增暖，但是對於赤道太平洋地區，不同的觀測資料則存在著一些差異 (Vecchi et al. 2008a)。Deser et al. (2010) 結合長期海平面氣壓進行比對研究發現，隨著全球變暖，赤道東太平洋海溫上升是較為明顯的，據以指出部分資料顯示赤道東太平洋變冷，可能是錯誤的。

此外，針對中高對流層暖化速率的爭議也有進展。研究發現模式推估中高層溫度增暖的速度大於低層，但觀測卻顯示兩者的增溫速率是相似的。此一爭議經常被用來證明目前觀察到的全球暖化，不見得是溫室氣體增加所造成的。一份新的研究報告 (Allen and Sherwood 2008) 指出，直接觀測到的中高層溫度準確度較低，可能造成不準確的推估。如果利用較準確的風場資料反演而得到的溫度來估計，中高層溫度變化和模式推估的結果相似。因此，模式與觀測結果可能是一致的。此一結果指出氣候模式推論的全球暖化成因可能是可信的。Johnson and Xie (2010) 利用海水表面溫度對於對流的影響推測大氣穩定度的變化，以驗證氣候模式對於全球暖化所做的推估，發現模式結果是合理的。

2. 全球水循環

一般而言，降雨量的多寡和大氣中水氣含量和大氣環流中上升運動的強弱有關。全球暖化會造成大氣含水氣能力的增加，在相對濕度幾乎不變的情況下，當地表溫度每增加 1°C 全球大氣平均水氣含量大約增加 7%（如圖 4）。大氣中水氣的增加必然會影響大氣的水循環，進而造成降雨的改變，有的地方會增加，但有的地方則會減少，因而降雨所釋放出的能量（潛熱）也會跟著改變，

使得大氣溫度和環流改變。大氣能量主要是在降雨釋放到空氣中的能量（增暖）和大氣本身輻射到外太空的能量（冷卻）之間來做平衡。因為二氧化碳和水氣等溫室氣體的增加造成大氣輻射冷卻的效率降低，所以會降低因降雨所釋放的能量來平衡這個冷卻作用的需求。因此，地表溫度每增加 1°C 全球平均降雨量僅能增加約 2%，這意味著大氣環流必須要減弱 (Knutson and Manabe 1995; Held and Soden 2006)。Vecchi et al. (2006) 的研究顯示東西方向的沃克環流 (Walker circulation) 在過去一百多年來 (1861~1992) 已經呈現減弱的趨勢。大氣環流的強度和大氣穩定度有關，Chou and Chen (2010) 發現在較為溫暖的大氣中穩定度之所以減弱是因為對流高度增加的緣故。雖然根據理論的推導全球平均降雨應增加 $2\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，並且氣候模式對於全球暖化模擬的實驗也證明如此，但是觀測資料所估計的降雨的增加速率卻不一致。Alder et al. (2008) 的估計約為 $2.3\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，和氣候模式的估計相近，但 Wentz et al. (2007) 的估計卻約為 $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，遠大於模式所估計的增加率。一般認為降雨增加率的不一致很可能和使用資料時間的長短有關，但這仍須更多的研究來佐證。不僅僅是降雨的變化，大氣環流是否真的已經減弱，觀測資料的分析也是仍無一致的結論（例如 Sohn and Park 2010）。

即使範圍很大的區域，平均降雨的變化和全球平均的變化仍可能很不一樣，例如 Zhang et al. (2007) 分析過去陸地上降雨的變化並配合氣候模式模擬的研究，發現明顯人為因素對降雨所造成的影響，這些影響包括北半球中緯度地區降雨的增加，北半球熱帶與亞熱帶降雨的減少，以及南半球熱帶與亞熱帶降雨的增加。他們同時發現這些觀測到的變化比模式所預估的還要大，換句

話說，氣候模式可能低估了降雨氣候變遷的程度。因為這些變化均發生在陸地上，所以不僅對生態環境會有影響，同時也會影響農業和人類的健康。另外，研究指出降雨的變化和垂直運動的方向有關 (Allan and Soden 2007)，平均降雨在上升運動區會增加，但在下沉地區則會減少（圖 10）。同樣地，圖 10 顯示氣候模式明顯低估了平均降雨的變化速率。

若考慮大氣環流變化的影響，例如哈德里環流 (Hadley circulation) 這種有明顯季節變化的現象，降雨在夏天半球（6 月至 8 月在北半球，12 月至隔年 2 月在南半球）會有增加的趨勢，在冬天半球（6 月至 8 月在南半球，12 月至隔年 2 月在北半球）則會有些許減少或不變的情形 (Chou et al. 2007)。圖 11 顯示夏天降雨增加的趨

勢已經非常的明顯，冬天則因為被聖嬰與反聖嬰這種年際變化的影響，降雨減少的趨勢較為不顯著。對許多地區來說，夏天是主要的雨季，冬天則是主要的乾季，這個研究的結果意涵著在未來暖化的世界裡，雨季會越來越多雨，而乾季則會越來越少雨，所以即使年降雨不變，降雨卻可能有兩極化的現象。如同 Zhang et al. (2007) 和 Allan and Soden (2007) 的研究報告，這份研究也同樣指出氣候模式的推估有偏低的現象。進一步分析全球乾濕季降雨與降雨季節變化，圖 12 顯示雨季降雨的確已經有增加的趨勢，而乾季降雨則在逐漸減少中，季節的變化因此更為明顯，也就是說雨季越濕，但乾季越乾。這種降雨兩極化的現象在乾濕季分明的地區非常明顯（圖 13）。

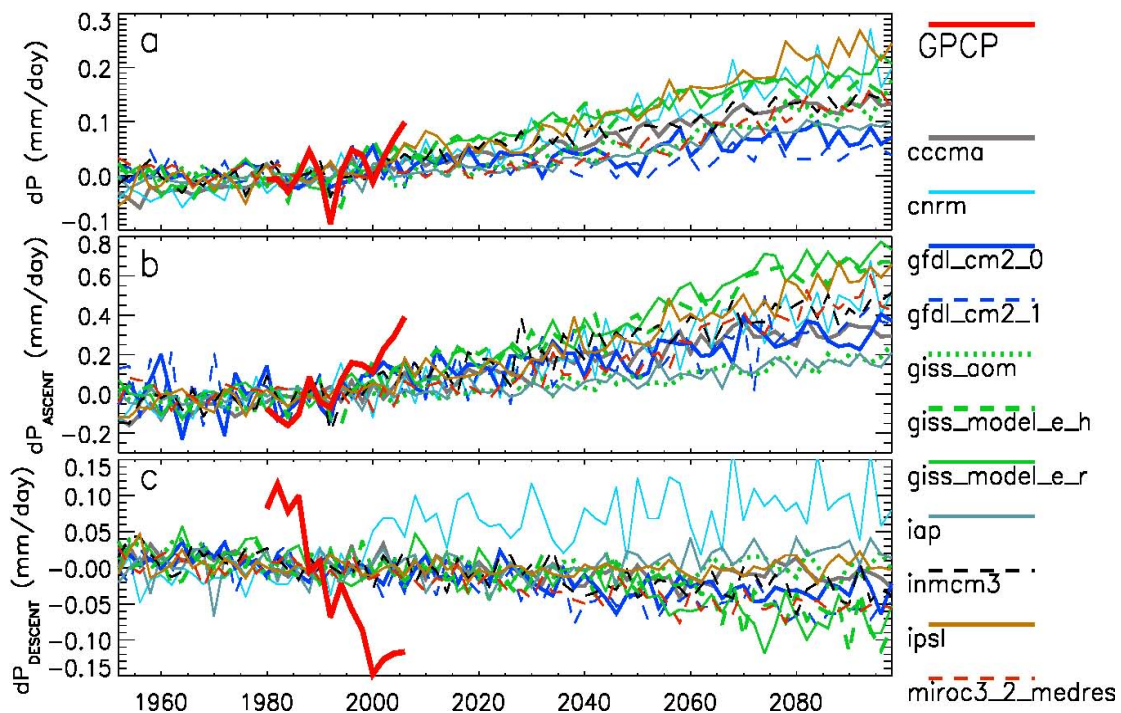


圖 10 IPCC 第四次評估報告中氣候模式對 A2 情境模擬的熱帶降雨相對於 1979~2000 年時期的改變，其中橘色線是衛星觀測降雨的平均(a)全部熱帶地區；(b)上升運動區；(c)下沉運動區。(摘自 Allan and Soden 2007，圖 3)

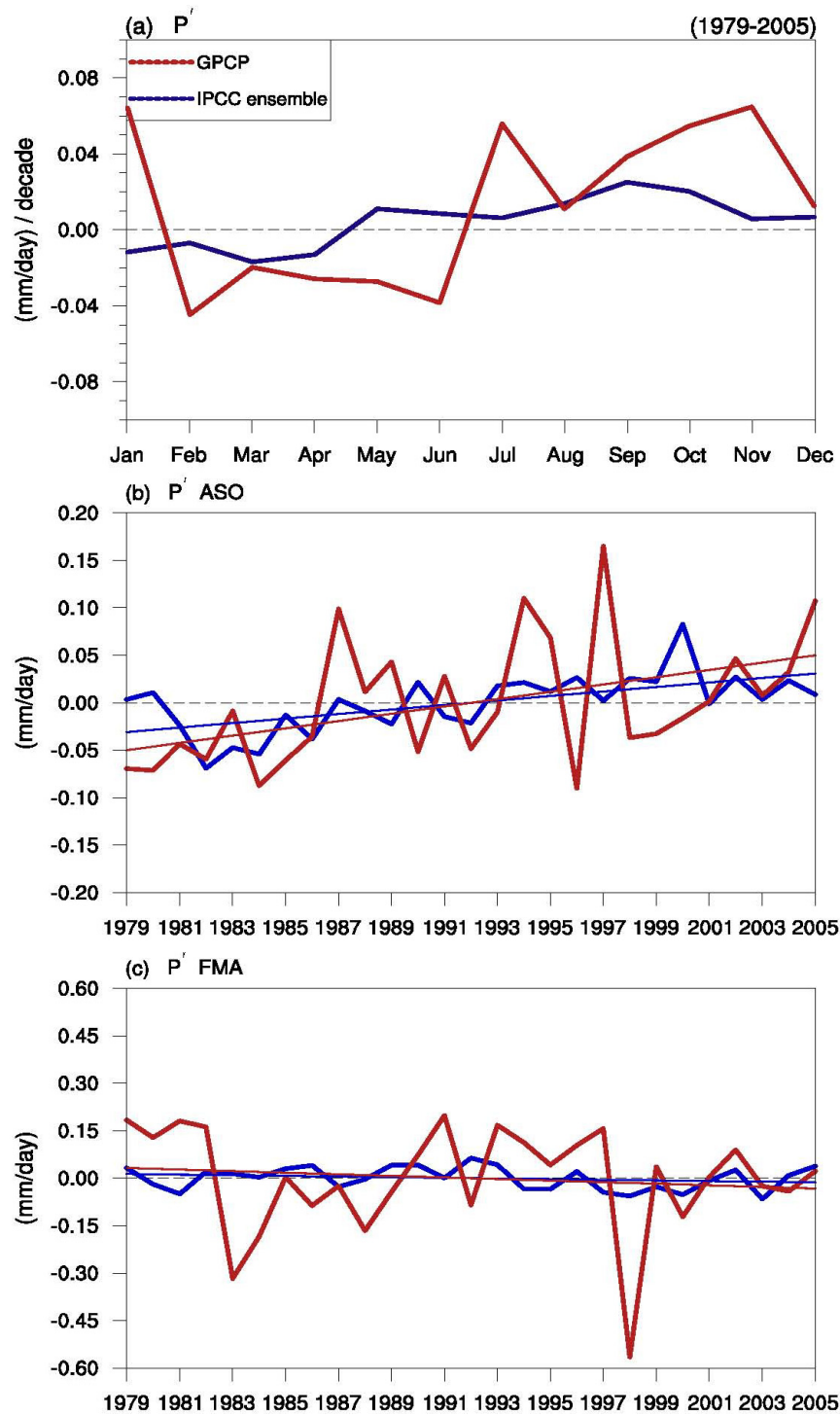


圖 11 北半球熱帶平均降雨在 1979~2005 年期間的季節變化(a)每一個月的變化趨勢，(b)夏季平均的時間序列，(c)冬季平均的時間序列。紅線是衛星觀測資料，藍線是 IPCC 第四次評估報告中的氣候模式平均。
(摘自 Chou et al. 2007, 圖 3)

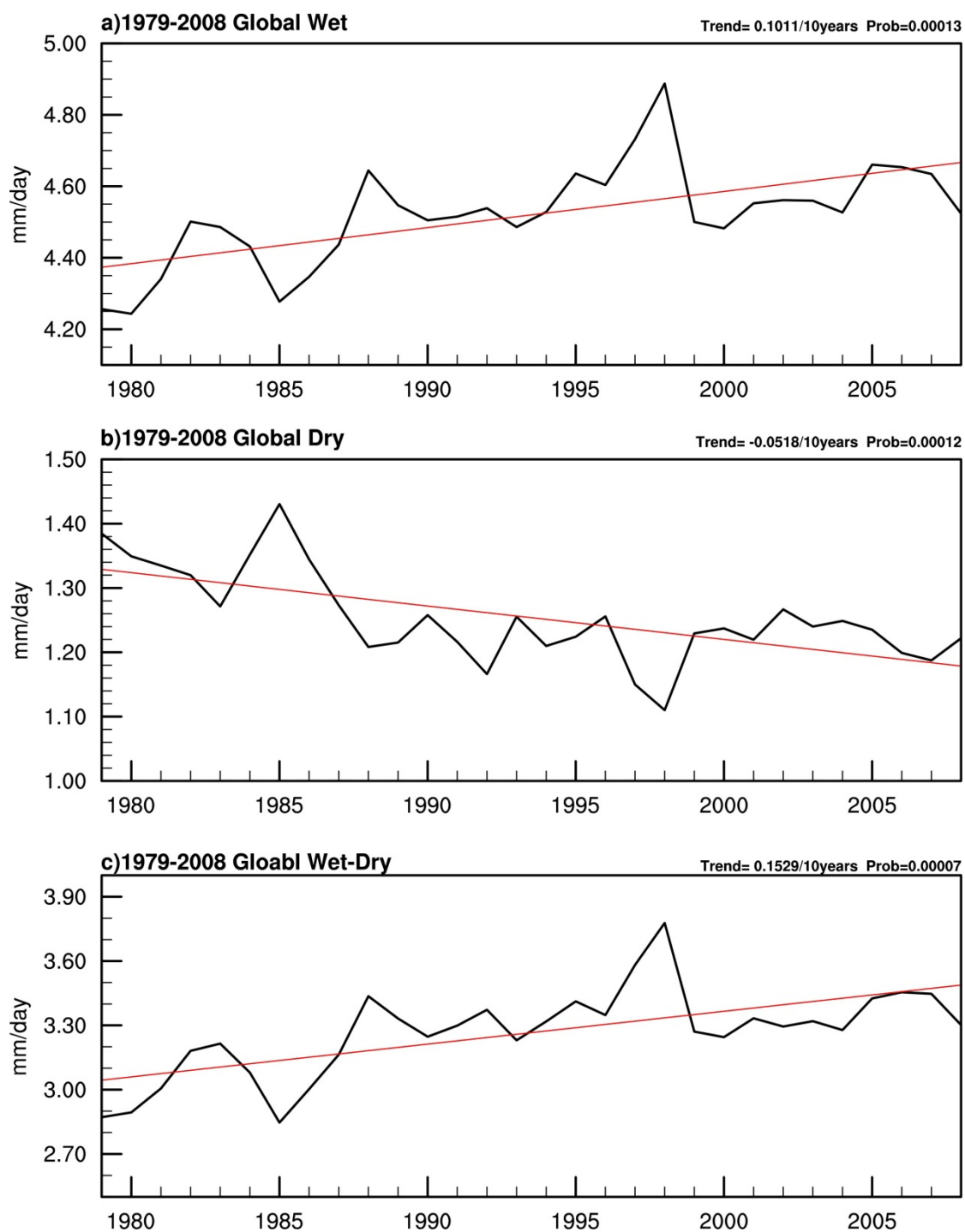


圖 12 全球觀測降雨平均在 1979~2008 年期間的變化：(a)濕季，(b)乾季，(c)濕季減乾季。(Chou and Lan 提供)

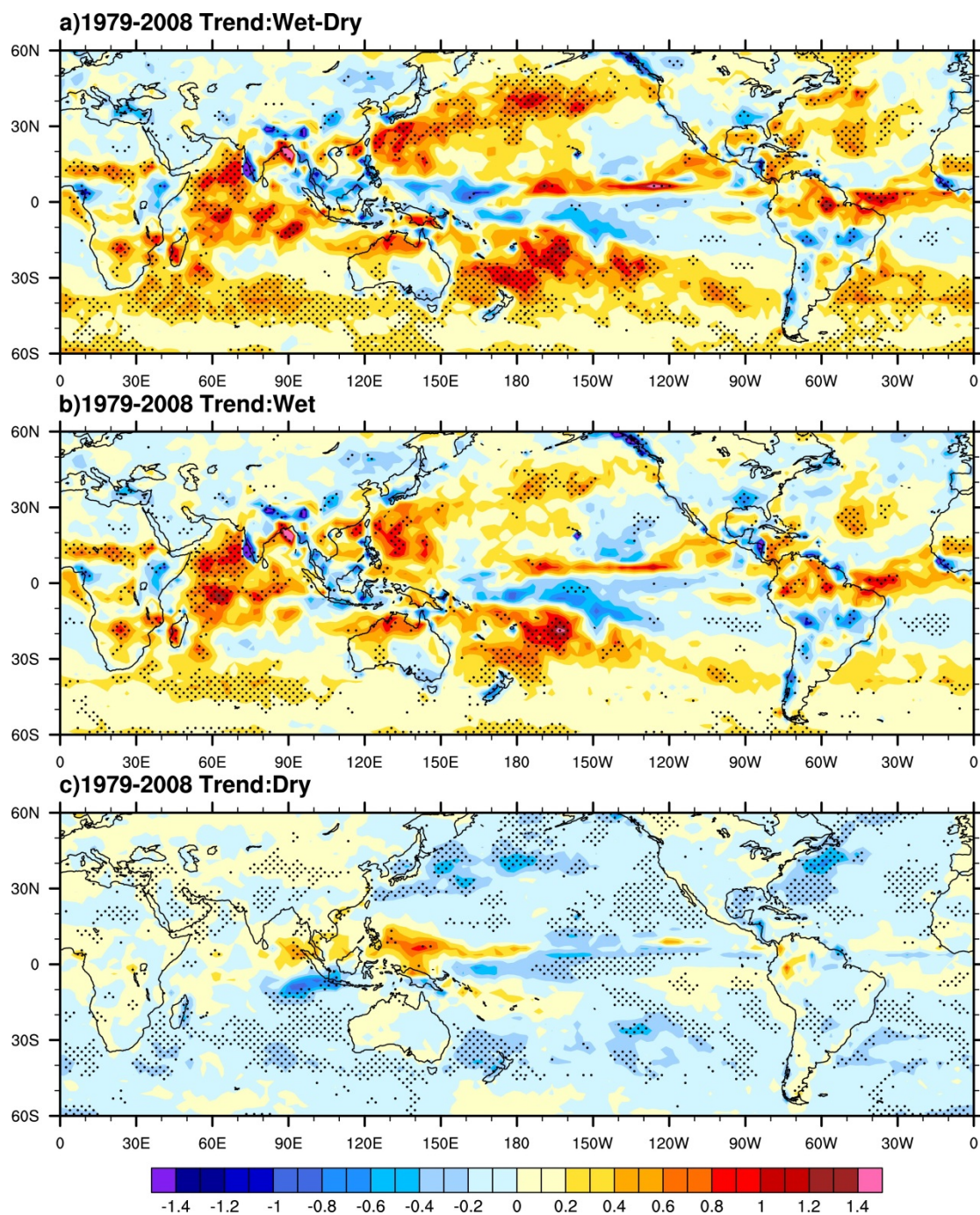


圖 13 觀測降雨在 1979~2008 年期間的變化趨勢：(a)濕季，(b)乾季，(c)濕季減乾季。(Chou and Lan 提供)

瞭解可能造成降雨改變的機制（例如 Chou and Neelin 2004; Chou et al. 2009），可以幫助吾人進一步發現並研究區域降雨變化的趨勢。例如 Neelin et al. (2006) 利用「落井下石」(upped-ante) 機制發現氣候模式和觀測資料均顯示過去幾十年 (1950~2002) 加勒比海和中美洲地區的降雨在逐漸減少中。Neelin et al. (2003) 則發現造成聖嬰期間南美洲亞馬遜河流域降雨減少的機制也會出現在全球暖化的環境，造成亞馬遜河流域的降雨可能會因全球暖化而減少。

3. 降雨頻率與強度

最近許多研究發現全球各地過去數十年強降雨量隨全球溫度的上升而增加，而中、低強度降雨則在減少 (Karl and Knight 1998, Goswami et al. 2006, Lau and Wu 2007)。這些變化有相當可靠的理論支持，根據 Clausius-Clapeyron 方程式，暖化現象導致大氣水氣含量增加約 $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，由於暴雨的降雨率取決於邊界層的水氣輻合，降雨強度增加應與大氣水氣含量有相同的增加率，並且水氣增加所提供的額外能量（潛熱）釋放，會更進一步增加降雨強度。然而，此理論並未受目前 17 個氣候模式模擬結果證實，模式結果顯示全球降雨強度僅增加 $2\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Sun et al. 2007)，遠小於 Clausius-Clapeyron 方程式推估大氣中水氣含量增加率的 $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。這些結果也是 IPCC 第四次評估報告在推估二十一世紀極端降雨隨氣候的變化時可能特別保守的原因之一。

最近 Liu et al. (2009) 在極端降雨與全球氣溫（包含聖嬰等年際變化）的關係上取得定量的結果。圖 14 顯示以 Liu et al. (2009) 的方法得到的結果，當全球平均氣溫每上升 1°C ，降水強度最強的前 10% 的全球降水量增加約 95%，而較低的 30~60% 的降水強度則減少約 $20\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ （圖 14

紅色長條圖）。根據觀測，全球平均降水強度增加約 $23\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，與水氣含量增加 $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ 時降水強度應該增強更多的假說一致。然而目前 17 個系集氣候模式估計的降水強度只增加約 $2\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的量（藍色長條圖，Sun et al. 2007），大約比 Liu et al. (2009) 小了一個等級，顯示實際上由全球暖化所造成的極端降雨事件的風險可能遠大於氣候模式的估計。另外 Liu et al. (2009) 計算的結果也與歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF) 及美國國家環境預報中心 (NCEP) 的天氣預報作業模式的再分析資料做比較，結果相當接近。造成 17 個系集氣候模式低估極端降雨的原因能導因於對流參數化的缺陷，特別是在強對流的狀況下。對流是大氣水氣垂直傳送的中樞過程，這個缺陷如何影響氣候模式中水氣的分佈及雲回饋是一個重要的議題。

圖 15 顯示以 Liu et al. (2009) 的方法得到的緯度變化，全球增溫 1°C ，低緯度的前 10% 強降雨增加約 120%，中緯度的前 10% 強降雨則會增加約 70%，中、小雨減少的程度也有類似的緯度變化。這表示臺灣的強降雨及中、小雨隨全球溫度的變化會比中緯度國家來得劇烈。

4. 乾旱

全球乾旱變化的趨勢仍然不變，局部地區的乾旱明顯有越來越嚴重的情形，例如北美洲、西非和東亞地區，但是有些區域，例如美國，則有偏濕的現象（圖 16）。降雨型態的改變，如中、小雨減少，對旱災及水資源的影響也不容忽視，相對而言，對中國大陸的水資源衝擊會更嚴重，近十幾年來大陸頻繁發生的大面積旱災可能與全球暖化有關，對原已缺水的大陸北方影響更是深遠。

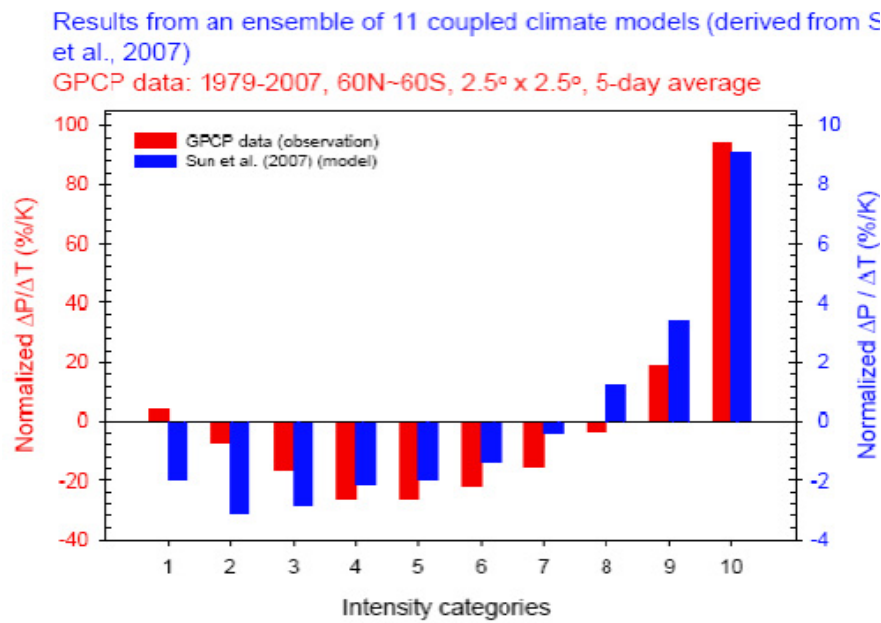


圖 14 全球年均溫增加每°C 下的 10 個降水強度的變化。紅色長條圖為由 GPCP 資料計算所得的值。藍色長條圖為目前 IPCC 第四次評估報告中使用的 17 個系集氣候模式估計結果。注意兩者的尺度差距 10 倍。
(摘自 Liu et al. 2009, 圖 4)

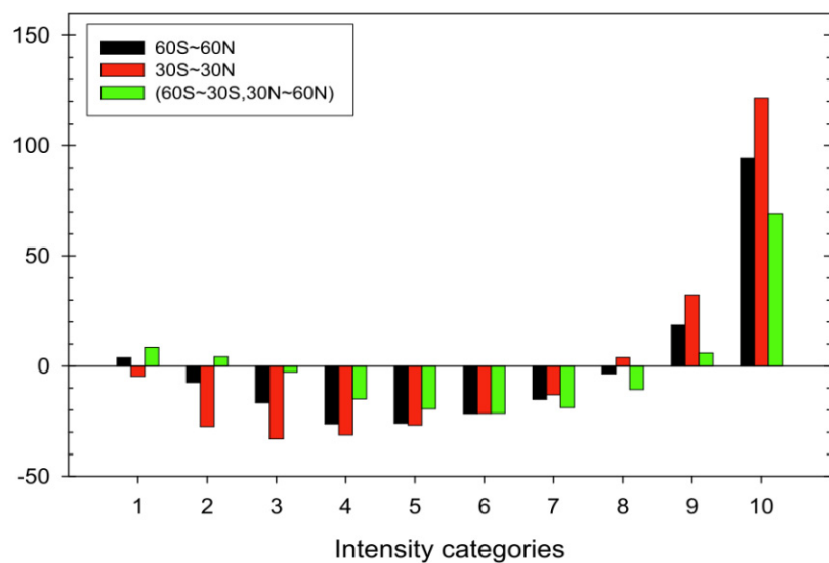


圖 15 降雨強度(ΔP)隨全球溫度(ΔT)之變化圖,紅色為低緯度值(30°S~30°N),綠色為中緯度值(60°S~30°S、30°N~60°N),黑色則為兩者平均值。(Liu et al.提供)

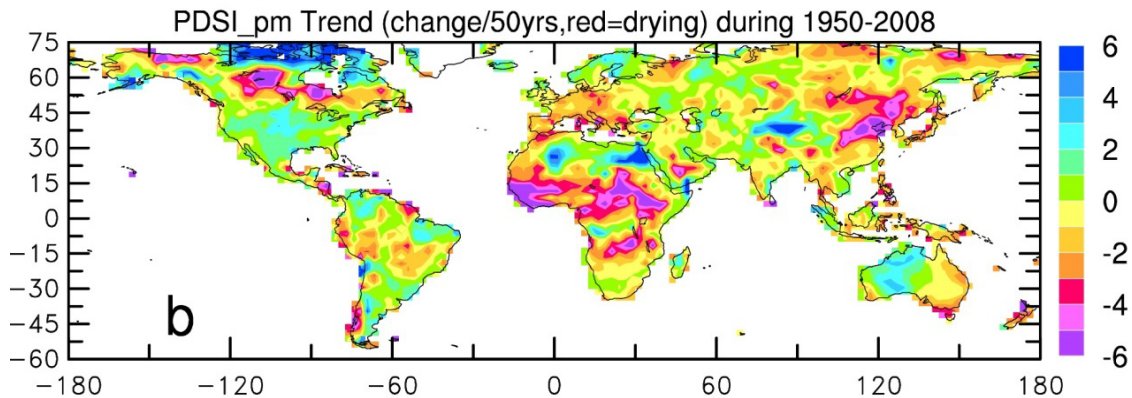


圖 16 全球乾旱指數在 1950~2008 年期間的變化趨勢，紅色區域表示越乾，藍色則是越濕。(摘自 Dai 2010)

5. 颱風

自從 2005 年 Webster et al. (2005) 和 Emanuel (2005) 的文章發表後，對於颱風的研究已從強度與個數是否改變到想要瞭解影響他們的因素為何，藉以在好的資料仍不夠長的情況下判斷颱風可能的變化。Santer et al. (2006) 利用氣候模式所做的研究認為海溫的改變會增加颱風的強度，Saunders and Lea (2008) 的研究認為最近 10 年 (1996~2005) 大西洋颱風的頻繁發生和海水表面溫度有關。Elsner et al. (2008) 進一步分析颱風中心最大風速的變化，研究發現對於最強的前 70% 的颱風其最大風速有明顯的增加，最大值約為每年增加 $0.3 \pm 0.09 \text{ ms}^{-1}$ 。颱風強度的增強不僅僅發生在全球的平均上，而且在不同的海洋都有類似的變化，但是大西洋的增加則是最快的，這研究也同時指出海溫的增加是主要的原因。然而也有研究 (Vecchi and Soden 2007, Vecchi et al. 2008a) 指出影響颱風強度改變的主要因素是海溫的空間分佈，並不是海溫絕對值高低的改變 (圖 17)。從以上觀測資料的研究可以看出從全球角度而言，除了颱風變化的不確定外，即便造成颱風強度改變的原因都無一致的答案。

6. 海平面與冰雪覆蓋面積

海平面的上升不僅會造成沿海地區容易發生水災，同時也會造成沿岸地面和地下水的鹽化，造成生態環境的改變；所以如何準確地推估未來海平面上升的速率是非常重要的。要能準確地推估海平面上升的速率，找出造成海平面上升的原因則是根本之道 (Milne et al. 2009)。最新的研究估計海平面在 1993~2009 年之間大約每年上升 $3.3 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm}$ ，和 IPCC 第四次評估報告中的數據相較，有加速的現象 (圖 18)。在過去 (1993~2003 年) 海平面上升大約有 50% 是因為海水熱漲的緣故，但是到了 1993~2009 年之間海水溫度增溫減緩，所以僅貢獻了約 30% 的海平面上升，而由陸上冰雪和冰川融化所貢獻的比例則有 60%，這代表了近年來 (1993~2009) 海平面加速上升的主因是陸上冰雪融化加速 (Nicholls and Cazenave 2010)。

三、IPCC 第五次評估報告策略與重點

(一) 情境設定

過去的評估報告對於未來環境的情境設定都是以排放溫室氣體和空氣懸浮微粒等造成溫度改

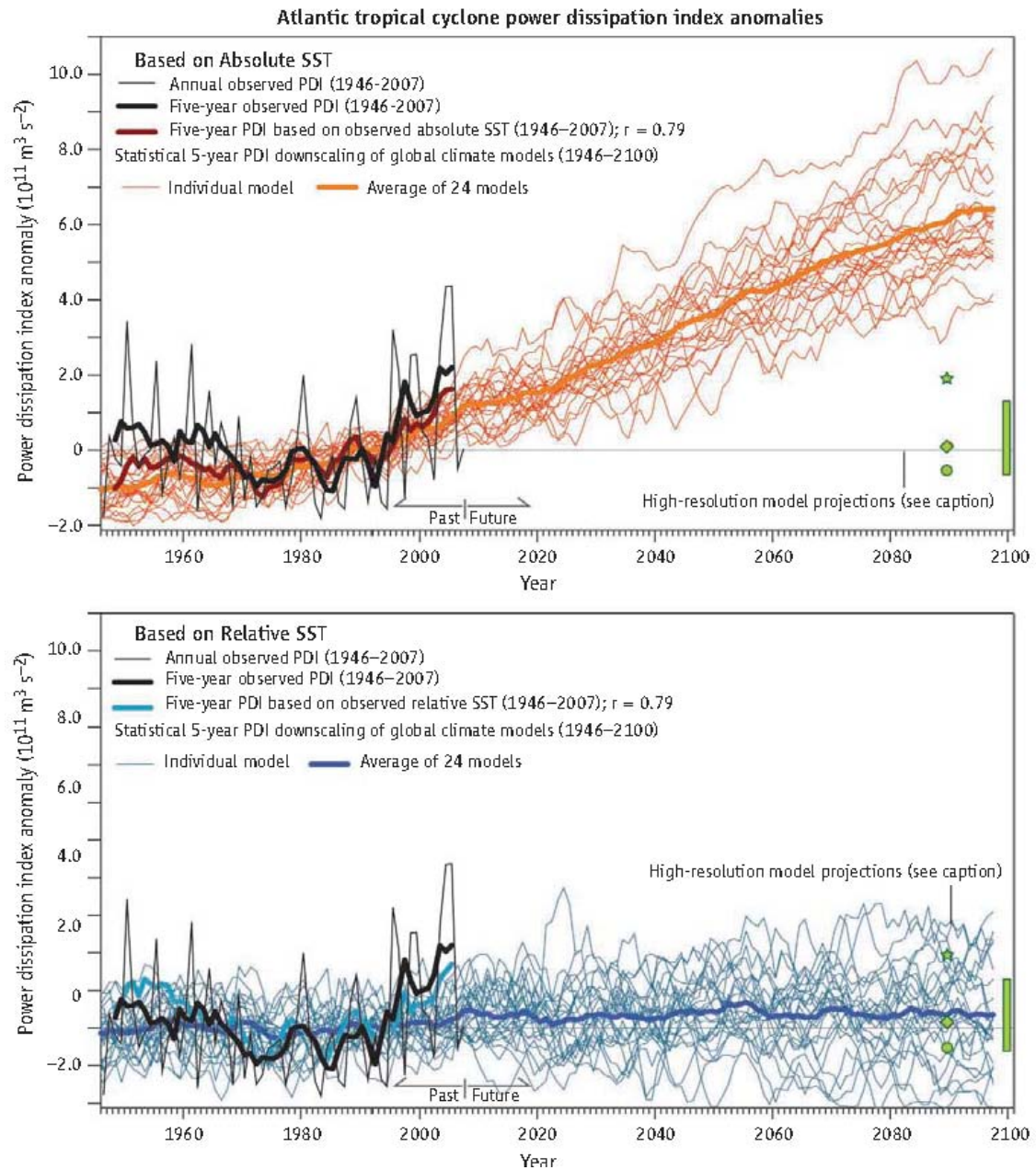


圖 17 大西洋颱風強度(power dissipation index, PDI)在 1946~2007 年期間的變化，包含觀測資料和模式推估；
 (a)根據海溫的大小 (b)根據海溫的空間分佈（大西洋海溫相對於其他大洋溫度的變化）。
 （摘自 Vecchi et al. 2008b）

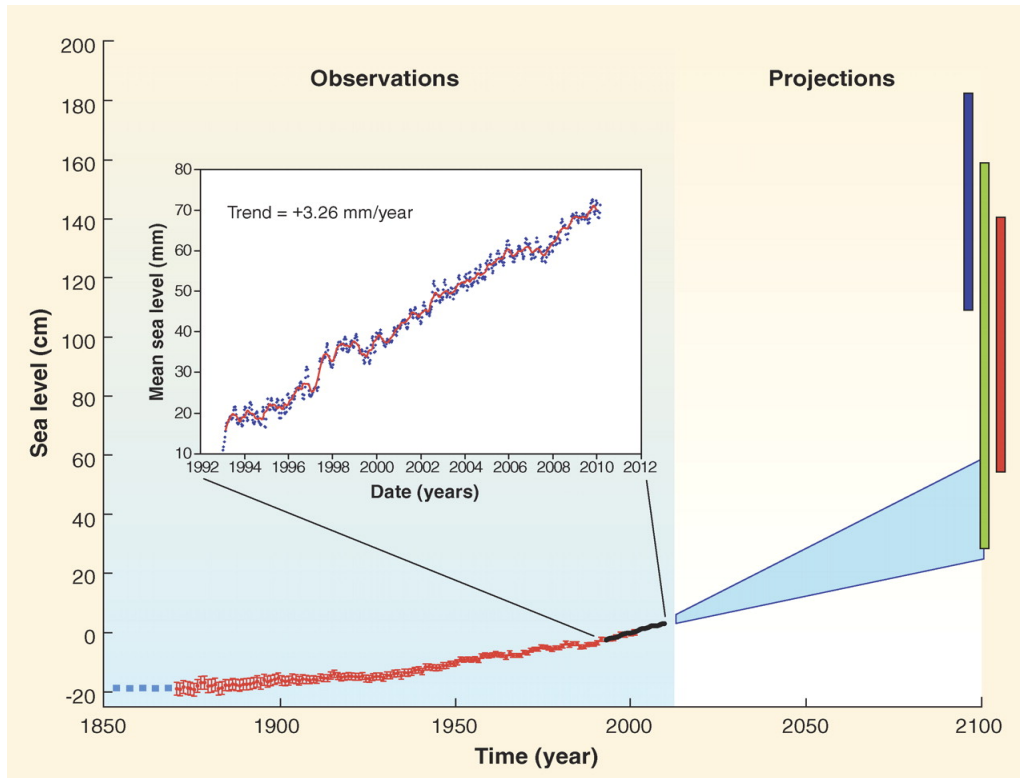


圖 18 全球海平面在二十世紀和二十一世紀的變化。(摘自 Nicholls and Cazenave 2010, 圖 1)

變物質的濃度為準則，也就是說先訂定了幾個未來可能減少排放量 (mitigation) 的策略，所有氣候模式在模擬未來的氣候便都使用相同的排放速率，如此比較容易讓政策制訂者對於因應相同情境有所依據。但是目前各國的減排 (mitigation) 策略非常多元，所以目前的情境已不敷使用且不切實際，訂定新的未來情境變成當務之急。因此 IPCC 在第五次評估報告將改為根據大氣輻射力 (radiative forcing) 來設定情境，也就是所謂的『代表濃度過程』 (Representative Concentration Pathways, RCP)，不同於以前以減排為主要考量的情境設定，這是從比較科學的角度出發並著眼於調適 (adaptation) 策略。

代表濃度過程情境設定是根據四個模式小組

所得到在二十一世紀末的大氣輻射力來設定，總共包括了四種情境 (Moss et al. 2010)：

- (1) RCP2.6：相對較低的溫室氣體增加的情境，大氣輻射力先在二十一世紀中葉達到最大值 3Wm^{-2} ，大約和二氧化碳濃度 490ppm 相似，然後再緩慢下降到二十一世紀末。
- (2) RCP4.5：大氣輻射力會在二十一世紀末到達一個穩定狀態的情境，大約為 4.5Wm^{-2} ，和二氧化碳濃度 650ppm 相似，代表世界各國會想盡辦法做到溫室氣體減量的目標。
- (3) RCP6.0：和 RCP4.5 相似，但大氣輻射力為 6Wm^{-2} ，約為二氧化碳濃度 850ppm，代表世界各國並沒有盡全力積極做到溫室氣體減量的目標。

(4) RCP8.5：大氣輻射力持續的增加到大於 8.5Wm^{-2} ，即二氧化碳濃度會大於 1370ppm，代表世界各國並無任何減量的動作。

新的未來情境設定以大氣輻射力為出發點，科學家可以根據以前的文獻假設多組不同的未來氣候狀態，如此可以更加著重於評估調適的需求和策略，檢視更多減排的方案，並瞭解可能的回饋作用。如此可以增加不同工作小組之間的緊密合作，同時也可以改進複雜議題的分析，如不同政策的選擇所產生的花費、好處和可能遇到危機。

(二) 評估結果的不確定性

由於第四次評估報告中評估結果不確定性的方法在不同的工作小組間並不一致，加上政策制訂者對於一些高影響但低準確的事件的關注和對於災害評估和管理的興趣增加，所以如何有效將不確定性考慮進來是這份報告的重點之一。

(三) 區域氣候

未來氣候變遷的型態與程度都會隨著地區而改變，所以 IPCC 在第五次評估報告中會加重對於區域氣候變遷的研究。由於區域氣候的不確定性更高，所以在模擬區域氣候變遷及其影響的同時，將會提供造成改變的可能機制，藉以增加使用這些資料的可信度和依據。

(四) 水循環的改變和影響

水循環的變化（如降雨）對人類的影響很大，所以 IPCC 希望各個工作小組針對水循環的變化能做到更為一致的研究。第一工作小組（專門探討現象與機制的小組）主要的工作重點會偏重在加強水循環的觀測、模擬能力和機制的探討，並且針對時間尺度從日夜變化、年代際的變化到長期的變遷推估。這些評估將可做為決策者的依

據。最重要的變數包括降雨、溫度、水氣、流量、蓄水、湖水、地下水、乾旱、蒸發等。

(五) 碳循環的回饋和海洋酸化

碳循環是整個地球系統重要的一環，對於氣候變遷的影響包含不同時間尺度的作用和回饋，更對生地化循環有所影響。第三次評估報告已經指出海水酸化的重要性，IPCC 將會針對此問題做更深入的研究。

(六) 冰河和海平面上升

冰河融化對於海平面的影響是制訂溫室氣體減量和未來氣候變遷如何調適的政策重要數據之一。所以，準確的推估冰河融化速率和海平面上升是非常重要的。主要將會針對海平面上升對於沿岸和島嶼等人口密集地區的影響，進一步研究要如何調適。

(七) 長期和近期氣候推估

過去的 IPCC 評估報告主要是針對二十一世紀末和之後的長期推估，對於人們比較關心的近期（如未來二十至三十年內）氣候變遷的推估著墨不多，長期氣候推估顯得緩不濟急。因此，IPCC 在第五次評估報告中除了仍會作二十一世紀末和之後的長期推估，同時也會提供到 2035 年的近期推估。不同於長期氣候變遷主要是受到溫室氣體等人類活動所產生的影響，近期的推估則要同時考慮人類活動所產生的影響和自然變化的因素，特別是年代際變化的影響（詳見第四章的討論）。一般而言，目前的氣候模式對於年代際變化的模擬仍有很大的不確定性，所以這將會是 IPCC 第五次評估報告的一大挑戰。

(八) 空氣懸浮微粒與極端氣候

IPCC 在第四次評估報告中指出影響全球暖化最主要的不確定因子是空氣懸浮微粒和雲產生的交互作用的間接影響，所以第五次評估報告將會要求所有參與實驗的氣候模式均有能力模擬此間接效應，藉以進一步估計空氣懸浮微粒所產生的不確定性。

另外，由於電腦運算速度的增加，加上實際運用上對於高空間解析度模擬的需求，IPCC 在第五次評估報告將會增加全球模式的空間解析度大到約 50km 網格大小，如此便能更進一步地研究例如颱風等極端天氣系統的氣候變遷。極端氣候對於人類社會和生態環境的影響遠大於平均氣候狀態的改變，所以第五次評估報告將有能力對此

議題做進一步的研究。

四、哥本哈根報告

自從 IPCC 在 2007 年發表第四次評估報告以來，很多新的資料和研究持續發表。為了要讓 IPCC 在 2009 年 12 月的哥本哈根會議有最新的資料做依據，一個世界各國研究大學所組成的國際聯盟 (The International Alliance of Research Universities) 在同年的 3 月在哥本哈根舉行了一個高峰會議，整理了世界各國最新的研究結果總結提出哥本哈根診斷報告 (The Copenhagen Diagnosis 2009)。參與此次會議的人數有來自全世界接近 80 個國家大約 2500 人，包含了超過 1400 位科學家，其中許多人都曾參與或貢獻 IPCC 的評估報告。

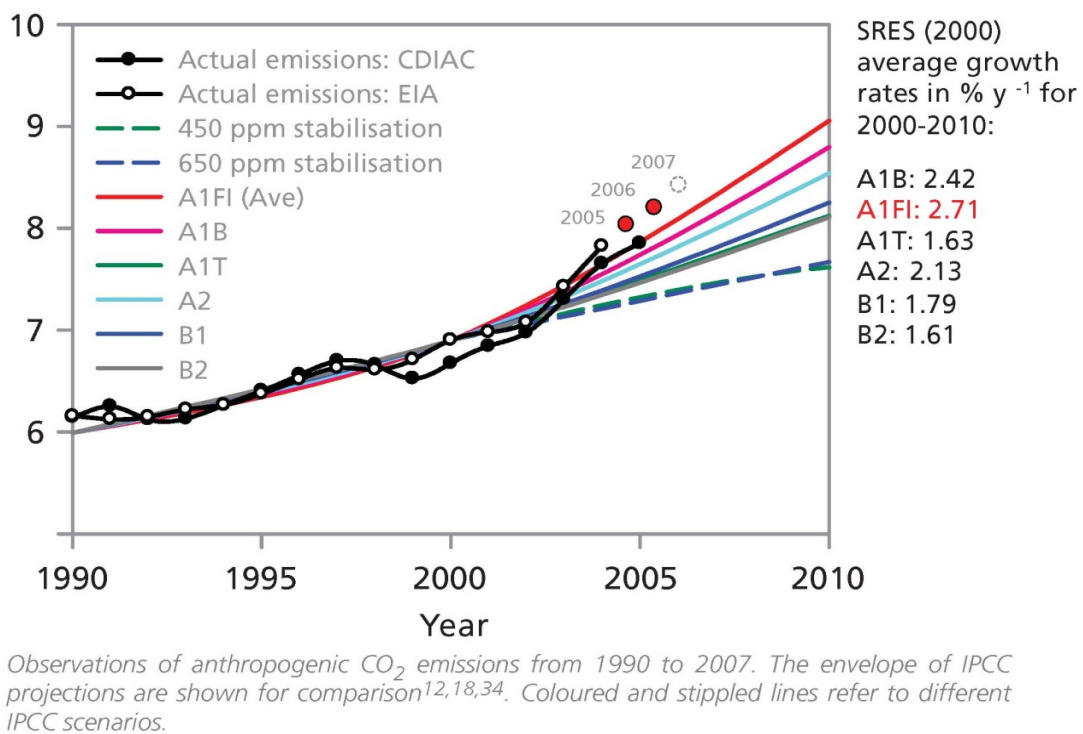


圖 19 二氧化碳在 1990~2007 年期間的排放量。(摘自 Richardson et al. 2009, Box 2)

這個會議提供了 6 個主要的訊息，其中和本報告有關的部分如下：許多觀測資料顯示溫室氣體的排放量幾乎接近 IPCC 所預估的最上限（圖 19），而且很多指標都顯示氣候變化已遠超過自然變化所能造成的改變範圍，這些指標包括了全球地面平均溫度、海平面上升、全球海溫、北極海冰的面積、海水酸化和劇烈氣候。由於目前溫室氣體等影響氣候的物質的排放仍未減少，所以氣候變遷的趨勢只會加劇而不會趨緩，大大地增加了因氣候劇變和無可挽回的氣候狀態改變所造成的傷害。

五、結語

IPCC 第四次評報告對於全球氣候變遷的觀測提供了不少的資訊，然而許多的變化仍有非常大的不確定性，主要是因為觀測資料的準確度，特別是早期的觀測技術不足和觀測點分佈不夠廣，加上許多資料觀測的時間並不夠長到足以顯示是否有明確的氣候變遷。未來衛星遙測將會是一個非常重要的觀測方式，因為衛星所能觀測的範圍廣，涵蓋幾乎整個地球。隨著觀測時間的增長，同時科學家也逐漸瞭解地球氣候動力的過程，這將會增加觀測到更多可能的氣候變遷的機會。

致謝

作者們感謝國家災害防救科技中心工作人員的編輯與校訂，本研究由國科會計畫 99-2625-M-492-001 所贊助。

參考文獻

Adler, R. F., G. Gu, J. J. Wang, G. J. Huffman, S. Curtis, and D. Bolvin, 2008: Relationships

between global precipitation and surface temperature on interannual and longer timescales (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, 113, D22104, doi:10.1029/2008JD010536.

Allan, R. P., and B. J. Soden, 2007: Large discrepancy between observed and simulated precipitation trends in the ascending and descending branches of the tropical circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18705, doi:10.1029/2007GL031460.

Allen, R. J., and S. C. Sherwood, 2008: Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds. *Nature Geo.*, 1, 399-403.

Cabanes, C., A. Cazenave and C. Le Provost, 2001: Sea level rise during past 40 yrs determined from satellite and in situ observations. *Science*, 294, 840-842.

Chan, J. C. L., 2006: Comment on "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment". *Science*, 311, 1713.

Chen, J., B. A. D. Del Genio, B. E. Carlson, and M. G. Bosilovich, 2008: The spatiotemporal structure of twentieth-century climate variations in observations and reanalyses. Part I: Long-term trend. *J. Climate*, 21, 2611-2633.

Chou, C., and J. D. Neelin, 2004: Mechanisms of global warming impacts on regional tropical precipitation. *J. Climate*, 17, 2688-2701.

- Chou, C., J. Y. Tu, and P. H. Tan, 2007: Asymmetry of tropical precipitation change under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17708, doi:10.1029/2007GL030327.
- Chou, C., J. D. Neelin, C. A. Chen, and J. Y. Tu, 2009: Evaluating the “rich-get-richer” mechanism in tropical precipitation change under global warming. *J. Climate*, 22, 1982-2005.
- Chou, C., and C. A. Chen, 2010: Depth of convection and the weakening of tropical circulation in global warming. *J. Climate*, 23, 3019-3030.
- Dai, A., 2010: Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, doi:10.1002/wcc.81
- Easterling, D. R., and M. F. Wehner, 2009: Is the climate warming or cooling? *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.
- Elsner, J. B., J. P. Kossin, and T. H. Jagger, 2008: The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455, 92-95.
- Emanuel, K. A., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30yrs. *Nature*, 436, 686-688.
- Goswami, B. N., V. Venugopal, D. Sengupta, M. S. Madhusoodanan, and P. K. Xavier, 2006: Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment, *Science*, 314, 1442-1445.
- Held, I. M., and B. J. Soden, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, 19, 5686-5699.
- IPCC 2007 Summary for Policymakers, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Johnson, N. C., and S. P. Xie, 2010: Changes in the sea surface temperature threshold for tropical convection. *Nature Geoscience*, 3, 842-845.
- Karl, T. R., and R. W. Knight, 1998: Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 231-242.
- Knudson, T. R., and S. Manabe, 1995: Time-mean response over the tropical Pacific to increased CO₂ in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate*, 8, 2181-2199.
- Landsea, C. W., B. A. Harper, K. Hoarau, and J. A. Knaff, 2006: Can we detect trends in extreme tropical cyclones? *Science*, 313, 452-454.
- Lau, K. M., and H. T. Wu, 2007: Detecting trends in tropical rainfall characteristics, 1979–2003, *Int. J. Climatol.*, 27, 979-988.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer and C. Stephens, 2000: Warming of the world ocean. *Science*, 287, 2225-2229.
- Liu, S. C., C. Fu, C. J. Shiu, J. P. Chen, and F. Wu, 2009: Temperature dependence of global

- precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*, 36, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
- Milne, G. A., W. R. Gehrels, C. W. Hughes, and M. E. Tamisiea, 2009: Identifying the cause of sea-level change. *Nature Geo.*, 2, 471-478.
- Moss, R. H., et al., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- Neelin, J. D., C. Chou, and H. Su, 2003: Tropical drought regions in global warming and El Niño teleconnections. *Geophys. Res. Lett.*, 30(24), 2275, doi:10.1029/2003GL018625.
- Neelin, J. D., M. Münnich, H. Su, J. E. Meyerson, and C. E. Holloway, 2006: Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103, 6110-6115.
- Nicholls, R. J., and A. Cazenave, 2010: Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328, 1517-1520.
- Richardson, K., W. Steffen, H. J. Schellnhuber, J. Alcamo, T. Barker, D. M. Kammen, R. Leemans, D. Liverman, M. Munasinghe, B. Osman-Elasha, N. Stern, O. Wæver, 2009: *Climate Change - Global Risks, Challenges & Decisions : Synthesis Report*.
- Santer, B. D., T. M. L. Wigley, P. J. Gleckler, C. Bonfils, M. F. Wehner, K. AchutaRao, T. P. Barnett, J. S. Boyle, W. Brüggemann, M. Fiorino, N. Gillett, J. E. Hansen, P. D. Jones, S. A. Klein, G. A. Meehl, S. C. B. Raper, R. W. Reynolds, K. E. Taylor, and W. M. Washington, 2006: Forced and unforced ocean temperature changes in Atlantic and Pacific tropical cyclogenesis regions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103, 13905-13910.
- Saunders, M. A., and A. S. Lea, 2008: Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature*, 451, 557-561.
- Sohn, G. J., and S. C. Park, 2010: Strengthened tropical circulations in past three decades inferred from water vapor transport. *J. Geophys. Res.*, 115, D15112, doi:10.1029/2009JD013713.
- Sun, Y., S. Solomon, A. Dai, and R. W. Portmann, 2007: How often will it rain? *J. Clim.*, 20, 4801-4818.
- The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the world on the Latest Climate Science. I. Allison, N. L. Bindoff, R. A. Bindaschadler, P. M. Cox, N. de Noblet, M. H. England, J. E. Francis, N. Gruber, A. M. Haywood, D. J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T. M. Lenton, M. E. Mann, B. I. McNeil, A. J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H. J. Schellnhuber, S. H. Schneider, S. C. Sherwood, R. C. J. Somerville, K. Steffen, E. J. Steig, M. Visbeck, A. J. Weaver. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60pp.
- Thompson, D. W. J., J. J. Kennedy, J. M. Wallace, and P. D. Jones, 2008: A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed

- global-mean surface temperature. *Nature*, 453, 646-650.
- Thompson, D. W. J., J. M. Wallace, J. J. Kennedy, and P. D. Jones, 2010: An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447.
- Vecchi, G. A., B. J. Soden, A. T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa, and M. J. Harrison, 2006: Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441, 73-76.
- Vecchi, G. A. and B. J. Soden, 2007: Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity. *Nature*, 450, 1066-1071.
- Vecchi, G. A., A. Clement and B. J. Soden, 2008a: Examining the Tropical Pacific's Response to Global Warming. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 89(9), 81-83.
- Vecchi, G. A., K. L. Swanson, B. J. Soden, 2008b: Whither hurricane activity? *Science*, 322, 687-689.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H. R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warm environment. *Science*, 309, 1844-1846.
- Wentz, F. J., F. Ricciardulli, K. Hilburn, and C. Mears, 2007: How much more rain will global warming bring? *Science*, 317, 233-235.
- Zhang, S., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. A. Stott, and T. Nozawa, 2007: Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448, 461-465.

Observations of Global Climate Changes

Chia Chou^{1,2} and Shaw Chen Liu¹

¹ Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica

² Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

(manuscript received 16 January 2012 ; in final form 2 March 2012)

ABSTRACT

This study is to summarize previous studies on observed global climate changes, which include a part of the IPCC 4th assessment report (AR4), the latest studies and some results from Taiwan scientists. The general criteria for the IPCC 5th assessment report is also discussed here. For changes in mean state, the most clear and consistent climate change is the increase of surface temperature, which is about 0.74°C in the past century (1906-2005). Other changes, such as sea level rising and sea ice melting, are all observed. In the period of 1961-2003, sea level has risen about 77mm. Precipitation and extremes, such as typhoons, show strong uncertainties, so no clear and consistent tendency has been found. After the IPCC AR4 was published in 2007, there are a lot of studies on the global hydrological cycle. In general, global precipitation is increasing, but the magnitude is still an unsettled issue. Precipitation intensity and frequency also tend to increase. One robust feature is that wet gets wetter and dry gets drier, but with spatial variations. Changes in typhoons are highly uncertain. Unlike the previous IPCC scenarios, the next IPCC assessment report (AR5) will use radiative forcing to define scenarios. The evaluation of uncertainty, regional climate changes and a near-term projection will also be the focus in AR5.

Key Words: Global warming, Climate change

