

# 臺灣氣候變遷科學報告 2011

(精簡版)

## 臺灣氣候變遷科學報告工作小組 / 主要作者

許晃雄 / 中央研究院環境變遷研究中心 (工作小組召集人)  
臺灣大學大氣科學系

(以下依姓氏筆劃排序)

吳宜昭 / 國家災害防救科技中心氣象災害防治組

周 佳 / 中央研究院環境變遷研究中心

陳正達 / 臺灣師範大學地球科學系暨海洋環境科技研究所

陳永明 / 國家災害防救科技中心氣象災害防治組

盧孟明 / 交通部中央氣象局氣象科技中心

## 臺灣氣候變遷科學報告審查委員 (依姓氏筆劃排序)

王作台 / 中央大學大氣科學系

汪中和 / 中央研究院地球科學研究所

張智北 / 臺灣大學大氣科學系

郭鴻基 / 臺灣大學大氣科學系

虞國興 / 淡江大學水資源管理與政策研究中心

鄒治華 / 臺灣師範大學地球科學系

## 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫規畫協調委員

陳亮全 / 國家災害防救科技中心

紀水上 / 交通部中央氣象局

劉紹臣 / 中央研究院環境變遷研究中心

## 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫主持人

林李耀 / 國家災害防救科技中心

## 編輯群

「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」計畫辦公室  
國家災害防救科技中心

## 補助單位

國家科學委員會自然科學發展處

## 序

政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2007 年公布氣候變遷第四次評估報告，揭示地球過去 100 年的氣候變遷現象及在暖化效應影響下未來 100 年所將會受到的各種可能衝擊。報告中指出，過去 100 年全球平均溫度上升  $0.74^{\circ}\text{C}$ ，且增溫的幅度將會持續並加劇，海平面亦因暖化效應而有升高的現象，另外，熱浪、乾旱及豪大雨等極端氣候的強度與頻率亦皆有增加的情形。因此，聯合國多次呼籲各國政府，一方面要持續減少溫室氣體排放，以減緩全球的增溫；另一方面則應針對氣候變遷下各類的衝擊，積極採取適當的調適作為。

臺灣因地理區位及具年輕地質的環境特性，容易發生天然災害，極端氣候更加強了天然災害的發生頻率與規模，影響層面廣及水資源、公共衛生、生態與生物多樣性等領域。又，我國生產經濟系統深切依賴國際貿易，故無法倖免於全球農產品及原物料在氣候變遷下所導致的供需失衡，對我國而言，其衝擊甚至是國土安全層次的課題。因此，氣候變遷的影響受到政府與民眾強烈的關注。

在氣候變遷對我國可能衝擊的認知過程中，科學研究扮演著關鍵性的角色。長期以來，本會已推動台灣地區氣候變遷推估與衝擊研究，且已累積部分的研究能量與成效。為強化相關研究能量的整合，提供資料服務與分享資訊，本會自 98 年底起結合國家災害防救科技中心、中央氣象局、中央研究院及國內氣候研究學者，共同推動「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」，建構氣候變遷之長期

研究平台。其研究課題則包括：氣候變遷的觀測資料與趨勢的分析、對過去氣候變遷的影響程度的了解、未來氣候變遷可能發展趨勢的評估、及可能發生衝擊的影響程度推估等。

「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」團隊彙整該計畫的初期成果及國內外有關氣候變遷的最新研究進展資料，完成「臺灣氣候變遷科學評估報告 2011」，內容超過 16 萬字，除了針對多項氣候變遷關鍵議題說明外，並釐清相關科學數據的涵義。希望此一報告能增進國人對台灣氣候過去變遷與未來趨勢的了解，並成為相關政府單位在擬訂氣候變遷調適政策時之重要依據。

李羅權

2011 年 11 月

## 前言

政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2007 年公布氣候變遷第四次評估報告揭示過去 100 年的氣候變遷現況，與未來 100 年在暖化效應持續的情況下可能的衝擊影響。該報告指出，過去 100 年全球平均溫度上升 0.74°C，並出現加速增溫的現象，海平面高度升高，熱浪、乾旱及豪大雨等極端氣候發生的強度與頻率增加。聯合國亦多次呼籲各國政府一方面需持續減少溫室氣體排放以減緩全球暖化，另一方面須積極面對氣候變遷產生的衝擊並採取積極的調適作為。臺灣屬於高災害風險地區，氣候變遷的衝擊影響受到政府與民眾強烈關注，氣候變遷與國土安全問題已成為臺灣不容忽視的課題。

全球暖化議題的三個主要核心議題 (圖-I)，分別是**氣候變遷科學**、**減緩全球暖化**以及**衝擊與調適**。氣候變遷科學強調的是對氣候變遷資料的觀察、科學問題的釐清以及對未來氣候變遷的推估；減緩全球暖化是以透過政策、產業轉型與科學技術革新等方式控制或減少溫室氣體排放；衝擊與調適面對的問題則是評估氣候變遷產生的衝擊程度，在暖化現象無法抑制的情況下，我們應如何做好準備與落實調適機制，以減少衝擊。茲就國內目前此三大議題之發展現況以及本科學報告產生之背景說明如下：

首先就減緩全球暖化部分，臺灣由於每人平均二氧化碳排放量高出世界平均值甚多，也比鄰近的國家高，在減少溫室氣體排放的工作上，臺灣目前雖然不是「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 會員，也沒有參與「京都議定書」(Kyoto Protocol) 的簽訂，但政府部門針對減緩全球暖化的工作仍持續推動，一方面具體訂定國家的減排目標，另一方面頒布「永續能源政策綱領」以及制定「溫室氣體減量法」(草案)，期望在經濟發展與環境永續兼容並蓄下做好節能減碳工作。

關於調適部分，聯合國發展規劃署與全球環境基金 (United Nations Development Programme-Global Environment Facility) 提出氣候變遷調適策略綱領 (Adaptation Policy Frameworks for Climate Change, APF)，作為各國規劃調適策略時的參考準則，協助各國政府將氣候變遷調適納入國家發展政策。行政院經濟

建設委員會依據於 2010 年開始推動「氣候變遷國家政策調適政策綱領與行動方案」的擬定工作，規劃國家的調適策略整體架構，並分別從不同領域（災害、水資源、海岸、農業生產與生物多樣性、健康、基礎建設、能源供給與產業經濟、土地使用規劃與管理）針對氣候變遷衝擊提出具體因應行動方案。

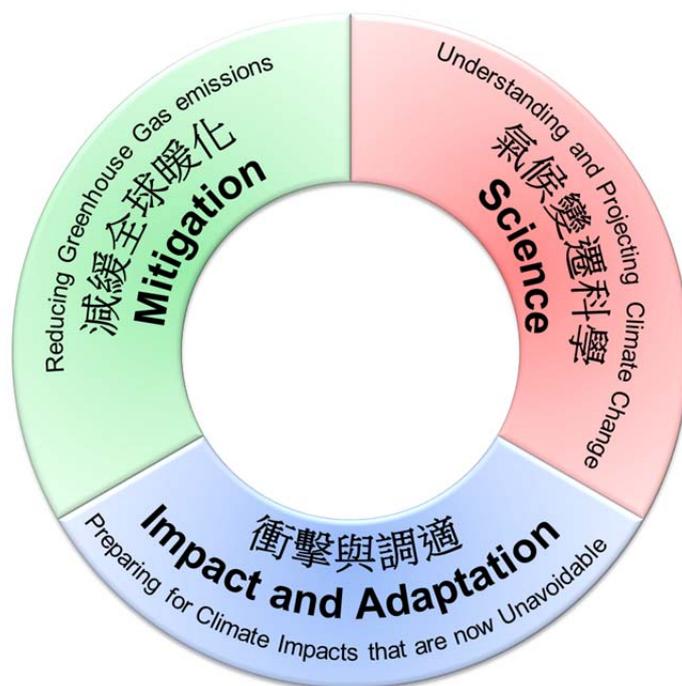


圖-I： IPCC 氣候變遷報告全球暖化的三大核心議題

在氣候變遷科學部分，行政院國家科學委員會過去長期推動本地氣候變遷推估與衝擊研究，已累積部分的氣候變遷研究能量與成效。有鑑於氣候變遷對臺灣造成的影響可能愈趨嚴重，國家推動氣候變遷調適策略需要更多的科學數據與研究成果作為政策擬定依據，2009 年「第八次全國科技會議」在「結合科技能量，促進永續發展」議題的結論中，強調須精進氣候變遷模擬與推估技術與能力，出版氣候變遷科學報告，並評估氣候變遷所造成的脆弱度與衝擊風險。因此，國科會自然處永續學門於 2009 年底，針對氣候變遷科學研究與下游衝擊整合應用部分，推動「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」，盼延續國內過去氣候變遷科研成果，持續強化氣候變遷科學研究與推估能力以及落實氣候變遷資訊的應用研究與服務。本科學報告乃由參與該計畫團隊的學者專家共同撰寫，針對全球及臺灣過去以及現有最新的氣候變遷研究成果進行彙整，提供現階段最新研究成果

與科學進展，作為氣候變遷研究相關領域學術研究與政府部門在推動氣候變遷相關政策時的參考依據。

國科會於 2009 年底推動三年期的「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置」計畫 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project，簡稱 TCCIP)，該計畫由國家災害防救科技中心負責規劃執行，藉由中央氣象局、中央研究院環境變遷研究中心及臺灣大學、臺灣師範大學...等學校的研究學者共同合作，整合國內研究資源與能量，進行臺灣氣候變遷推估與災害衝擊研究，TCCIP 計劃組織與架構見圖-II。



圖-II： 氣候變遷研究平台組織架構圖

TCCIP 計畫以建構氣候變遷跨領域研究與應用整合平台、落實研發成果於跨部會調適政策應用、建立臺灣氣候變遷未來推估、強化臺灣區域氣候研究等重點特色為整體目標，進行區域氣候變遷分析與情境推估、降尺度技術發展，以及極端氣候變異與災害衝擊評估等工作。

TCCIP 計畫分析 IPCC 第四次評估報告結果，利用 24 個全球氣候模式 (GCM) 進行臺灣區域統計降尺度，並利用日本氣候變動革新計畫 (Kakushin Program) 所提供的 20km 高解析度全球氣候模式的結果進行臺灣地區動力降尺度模擬，提供臺灣地區在未來的可能氣候變遷下，極端個案與事件的推估結果。

本科學報告的最新研究成果部分，主要摘自 TCCIP 的第一年重要研究成果，由於相關研究工作仍持續進行中，而且國際間氣候變遷研究成果不斷更新，本科學報告預計在 TCCIP 計畫結束後，提出最新的科學研究成果與進展報告。

本科學報告之內容相當豐富且探討議題甚廣，分兩部份呈現。第一部份特別摘錄五項重要關鍵議題及摘要報告，以增加讀者對主要課題的瞭解與閱讀的效率。第二部份為報告的主要內容。本科學報告第一章為目前全球氣候變遷研究成果的彙整，以 IPCC 第四次評估報告成果以及後續研究成果為主。影響臺灣氣候變化的主要氣候系統以東亞與西北太平洋地區為主，因此第二章彙整該區域的氣候變遷研究成果，以了解區域氣候變遷趨勢與對臺灣的可能影響。在氣候變遷的科學數據的解讀上，必須釐清氣候自然變異（如聖嬰現象、年代際變化等）與人為氣候變遷趨勢之間的差異，第三章特別針對此課題與研究成果進行說明。第四章分析臺灣過去氣候變遷的趨勢，依據過去研究成果以及最新分析結果說明臺灣過去氣候變遷的趨勢與變異程度。第五章討論氣候變遷的未來推估結果，內容包括現階段的全球、東亞與臺灣地區的氣候變遷趨勢推估，以及氣候變遷推估的不確定性說明。最後的第六章則探討氣候變遷與災害衝擊，說明氣候變遷（尤其是極端事件頻率的增加）與環境變遷（如人為環境改變、人口與經濟成長）對災害衝擊的影響，以及兩者皆為造成全球與臺灣的災害損失增加與災害特性改變的重要因素。

## 謝誌

首先，要感謝行政院國家科學委員會，長期推動本地氣候變遷推估與衝擊研究，以及竭盡心力投入於本地氣候變遷、衝擊、因應與調適策略研究的許多先進。有各位先進在氣候變遷的科學面、衝擊面及因應面所累積的研究能量與成效，「臺灣氣候變遷科學報告 2011」才得以完成。

其次，要感謝中央大學大氣科學系王作台教授、中央研究院地球科學研究所汪中和研究員、臺灣大學大氣科學系張智北教授與郭鴻基教授、淡江大學水資源管理與政策研究中心虞國興教授，以及臺灣師範大學地球科學系鄒治華教授，百忙中在有限的時間內為本報告提供專業審查意見。

最後，謝謝所有作者一年來的努力，以及「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」團隊助理們的協助。

「臺灣氣候變遷科學報告 2011」工作小組召集人  
中央研究院環境變遷研究中心研究員  
臺灣大學大氣科學系教授



2011 年 11 月



## 目錄

序 .....	I
前言 .....	III
謝誌.....	VII
關鍵議題.....	1
一、相對於全球的氣候變遷趨勢，臺灣整體的變遷趨勢為何？ .....	1
二、颱風、暴雨、乾旱、熱浪、寒潮等災害性天氣受氣候變遷影響的 程度為何？未來是不是會更為劇烈或頻繁？ .....	4
三、氣候變遷與聖嬰現象、北極振盪等氣候變異（外界通常解讀為異 常氣候）的關係？ .....	7
四、臺灣近年來的災害似乎有越來越嚴重的趨勢，與氣候變遷的關係 為何？ .....	9
五、臺灣氣候變遷未來推估的可信度為何？政府和民眾該如何利用或 解讀相關訊息？ .....	11
執行摘要.....	15
總摘要 .....	21

## 圖目錄

圖_摘 1：全球平均溫度變化與趨勢圖。(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.6).....	22
圖_摘 2：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) .....	23
圖_摘 3：1948 年至 2009 年東亞年平均近地面氣溫 / 海溫的長期線性趨勢，使用資料為 HadCRUT3 (Brohan et al. 2006)。(TCCIP 計畫提供) .....	24
圖_摘 4：1961 年至 2009 年西北太平洋熱帶氣旋生成個數的逐年變化。(TCCIP 計畫提供) .....	25
圖_摘 5：每年潛在破壞力指標、西北太平洋強度至少達 Saffir-Simpson scale 等級四與等級五的熱帶氣旋年個數及每年 5 月至 11 月平均 (5°N~30°N、120°E~180°E) 的海溫距平 (SSTA) 長期變化。圖摘自 Chan (2006) .....	26
圖_摘 6：全球平均地表溫度距平 (相對於 1961~1999 年平均值) 的逐年變化、線性迴歸線、利用 Empirical Mode Decomposition (EMD) 求得的 overall adaptive trend，以及多年代曲線。(摘自 Wu et al. 2007) .....	27
圖_摘 7：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) .....	28
圖_摘 8：北大西洋 30°N~65°N 平均海面溫度的逐年變化。(摘自 Trenberth et al. 2007).....	28
圖_摘 9：南半球 (20°S~90°S)、熱帶 (20°S~20°N) 與北半球 (20°N~90°N) 的海洋、陸地與海洋+陸地平均溫度的長期變化。(李明營提供) .....	29
圖_摘 10：臺灣年平均溫度之時間序列與變化趨勢。(a)1911~2009 年臺灣年平均溫度，(b)長條圖從左到右是各測站的 100 年、50 年、30 年變化幅度。(TCCIP 計畫提供) .....	31
圖_摘 11：臺灣年總降雨日數 (日雨量 $\geq 0.1\text{mm}$ )。(TCCIP 計畫提供) .....	32

圖_摘 12:1911~2009 年 6 個百年測站每年極端高溫日數之時間序列與變化趨勢。 (TCCIP 計畫提供) .....	33
圖_摘 13: 同圖_摘 125, 但為每年寒潮發生次數。(TCCIP 計畫提供) .....	34
圖_摘 14:以 10 年為期距統計 6 個百年測站乾期超過 2 年重現期門檻值的發生次 數。(TCCIP 計畫提供) .....	35
圖_摘 15: 1950~2009 年本島 6 個測站沒有颱風影響下的強風日數統計。(TCCIP 計畫提供) .....	36
圖_摘 16: 同圖_摘 15, 但為外島 4 個測站 6 級以上 (左) 和 7 級以上 (右) 的強 風日數, 分別為(a) 彭佳嶼、(b) 澎湖、(c) 東吉島、(d) 蘭嶼。(TCCIP 計畫提供) .....	37
圖_摘 17: 1961~2009 年每年「影響臺灣颱風」的個數。(TCCIP 計畫提供) .....	38
圖_摘 18:1961~2009 年每年「影響臺灣颱風」在生命史中為 (a) 輕度, 或曾達 (b) 中度, (c) 強烈颱風個數統計。(TCCIP 計畫提供) .....	38
圖_摘 19: 統計 1911~2009 年以臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮和臺東 6 個測站 總體為代表的臺灣地區 (a) 豪雨 (日雨量 $\geq 130$ mm)、(b) 大豪雨 (日雨 量 $\geq 200$ mm) 發生日數。(TCCIP 計畫提供) .....	40
圖_摘 20: 全球平均近地表氣溫隨時間變化的情形。(摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report, Figure SPM.5) .....	41
圖_摘 21: 21 世紀早期與晚期的近地表氣溫上升的分布圖。(摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report, Figure SPM.6) .....	42
圖_摘 22: 在 A1B 的未來發展情境下, 2090 年~2099 年模式系集平均降水量相對 於 1980 年~1999 年的百分比變化。(摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report, Figure SPM.7) .....	44
圖_摘 23: 1900-2005 年天然災害類別次數統計圖。(摘自 UNISDR 2005) .....	48
圖_摘 24: 極端強降雨颱風發生頻率統計, 依據 1970-2009 年排名前 20 名之綜合 降雨指標所定義之極端強降雨颱風發生頻率統計 (國家災害防救科技 中心提供) .....	49
圖_摘 25: 1989~2009 年臺灣全區日降雨量超過淹水警戒值發生頻率。 .....	50
圖_摘 26: 1989~2009 臺灣地區分區日降雨量超過淹水警戒值發生機率。 .....	51

圖_摘 27：1989~2009 年臺灣全區潛在坡地災害發生頻率的變化 .....	52
圖_摘 28：1989~2009 年臺灣分區潛在坡地災害發生頻率的變化 .....	53
圖_摘 29：歷史乾旱發生的季節與水稻期作的時間 .....	54
圖_摘 30：歷史乾旱發生區位示意圖 .....	54
圖_摘 31：各縣市發生乾旱次數 .....	55

## 表目錄

表_摘 1：A1B 未來發展情境所對應的可能未來氣候變遷範圍在臺灣四個分區的 季節氣候平均變化 (2080~2099 年減去 1980~1999 年平均)。	46
表_摘 2：1900~2009 年間全球天然災害統計表 (摘自：災害防救白皮書·2011) ....	47
表_摘 3：水災、坡地災害及複合性災害之氣候與環境變遷因子以及衝擊面向 ....	56



## 關鍵議題

- 一、相對於全球的氣候變遷趨勢，臺灣整體的變遷趨勢為何？ ..... 1
- 二、颱風、暴雨、乾旱、熱浪、寒潮等災害性天氣受氣候變遷影響的程度為何？未來是不是會更為劇烈或頻繁？ ..... 4
- 三、氣候變遷與聖嬰現象、北極振盪等氣候變異(外界通常解讀為異常氣候)的關係？ ..... 7
- 四、臺灣近年來的災害似乎有越來越嚴重的趨勢，與氣候變遷的關係為何？ ..... 9
- 五、臺灣氣候變遷未來推估的可信度為何？政府和民眾該如何利用或解讀相關訊息？ ..... 11



## 一、相對於全球的氣候變遷趨勢，臺灣整體的變遷趨勢為何？

### (1) 臺灣氣候變遷的速率與幅度為何？如溫度、降雨、海平面，與全球暖化趨勢的比較？

臺灣氣候變遷是全球氣候變遷的一部分，許多變化的速率與幅度和全球平均狀態類似。以溫度而言，臺灣全島平均氣溫自上個世紀初以來呈現上升趨勢，1970年代之後的升幅更加明顯，與全球平均氣溫的變化類似（參見第 22 頁，圖\_摘 1；第 31 頁，圖\_摘 10）。雖然上升速率與幅度隨納入計算的測站數量與年分不同會出現微小差異，但是對於瞭解整體氣候變遷趨勢影響不大。

本報告根據「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」分析結果，使用台北、台中、台南、恆春、台東、花蓮等 6 個具 100 年以上完整觀測記錄的氣象測站資料計算，發現臺灣年平均溫度在 1911 年至 2009 年期間上升了  $1.4^{\circ}\text{C}$ ，增溫速率相當於每 10 年上升  $0.14^{\circ}\text{C}$ ，較全球平均值高（每 10 年上升  $0.074^{\circ}\text{C}$ ）。惟此處，臺灣的年增溫率計算是採用陸地之平地測站，而全球平均值則包含海洋及陸地的平均值。此外，全球增溫有地域性的差異，增溫速率較全球平均值高，並非臺灣獨有的現象。根據 IPCC 第四次評估報告，臺灣所在的東亞沿岸（自日本、韓國至南海一帶）是全球增溫較快速的數個區域之一，鄰近的中國、日本與韓國，過去百年來的增溫速率分別為每 10 年上升  $0.081^{\circ}\text{C}$ 、 $0.113^{\circ}\text{C}$  及  $0.187^{\circ}\text{C}$ ，均較全球平均值高。臺灣近 30 年（1980~2009）氣溫的增加明顯加快，每 10 年的上升幅度為  $0.29^{\circ}\text{C}$ ，幾乎是百年趨勢值的兩倍，與 IPCC 第四次評估報告結論一致（參見第 22 頁，圖\_摘 1）（本文 4.3.2 節；2.4 節）。此一較快的增溫速率是否會持續，或者僅是年代際自然變化的一部分，仍有待觀察。

在全球雨量方面，IPCC 第四次評估報告沒有提出變化速率或幅度方面的明確數據，這是因為雨量多寡受到很多因素影響，雨量變化有很明顯的區域性差異。臺灣地形複雜，不同季節有不同的天氣系統，平均雨量雖有數十年尺度的乾濕變化特徵，但是 100 年的線性變化趨勢並不明顯。值得注意的是臺灣降雨日數有較一致的變化，普遍呈現減少的趨勢（參見第 33 頁，圖\_摘 11）。以 6 個測站為代表的全島平均年降雨日數自 1911 年至 2009 年下降幅度約為每 10 年減少 4 天，1980 年之後則為每 10 年減少 6 天，最近一次的 2002 年至 2004 年乾旱事件則是一百年

以來雨日最少的 3 年。四個季節的雨日都呈現減少趨勢，其中以夏季的減少幅度最大。(本文 1.1.2 節；1.2.2 節 B；1.2.2 節 C；4.3.2 節 A(a)；4.2.6 節)

在海平面高度變化方面，IPCC 第四次氣候變遷評估報告指出 1961 年至 2003 年之間海平面高度平均每年上升約 1.7mm，但在 1993 年至 2003 年之間則平均每年上升約  $3.1 \pm 0.7$ mm，顯示上升速率有隨時間加快的跡象 (參見第 23 頁，圖\_摘 2)。臺灣周遭海域驗潮站測得的海平面高度資料分析結果顯示 1993 年至 2003 年間臺灣附近的平均海平面上升速率為每年 5.7mm，上升速率為過去 50 年的 2 倍，略高於衛星所測得的每年 5.3mm，但此數值大於同時期全球平均值上升速率 (每年 3.1mm) (參見表 4.6)。臺灣周遭海域海平面高度上升的可能的原因，除全球暖化後的平均海平面上升外，部分原因屬於區域性的現象，包括近幾十年東太平洋海平面持續下降、西太平洋海平面持續上升、聖嬰現象等氣候現象的影響，以及鄰近海域 (如南海) 海平面的改變。(本文 1.1.4 節；1.2.2 節 F；4.3.2 節 B(e))

## (2) 若不同研究估算的氣候變遷速度與幅度數字不盡相同時應如何解讀？

研究者估算氣候變遷的速度和幅度時，其結果必會隨著使用資料的站數、長度、季節、月份以及資料的校正和補遺方法的不同出現差異。例如，本報告參考「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」計畫之結果，為考量資料完整性，選擇臺灣本島具有百年完整資料記錄的臺北、臺中、高雄、恆春、臺東、花蓮等 6 個海平面高度未達 400m 的平地測站進行臺灣百年增溫趨勢分析，統計結果顯示 1911 年至 2009 年期間平均氣溫上升  $1.4^{\circ}\text{C}$ 。中央氣象局 (2009，1897~2008 臺灣氣候變遷統計報告) 為考量區域特性不同的氣候變遷趨勢，分別計算臺灣 25 個測站 (含平地、高山、都會與離島) 1909~2008 年間之變化趨勢，其中都會區變化趨勢與上述 6 個百年測站上升幅度一致，而全臺 100 年平均氣溫上升速率則為  $0.8^{\circ}\text{C}$  (含部分未達百年觀測紀錄之測站)，與全球百年增溫趨勢類似。讀者在解讀氣候變遷相關數據時須注意作者對於測站和資料特性以及計算方法的說明，避免誤解或誤用計算結果，也要注意資料長度、密度、不均勻性等對於估算結果的影響。例如，上例中提到本報告所引用的平地地區之百年統計結果，即不適用於描述臺灣山區氣溫的長期變化。有關臺灣長期氣候變遷趨勢的分析，亦將依據未來納入考量測站的多寡而有所修正。

### (3) 臺灣未來的變化趨勢為何？

以科學家認為未來世界最可能的發展情境 (A1B) 為例，運用多個全球氣候模式所模擬的未來氣候變遷進行空間降尺度後的推估主要發現如下：

**在近地表氣溫變化部份** (參見第 47 頁，表\_摘 1)，多數氣候模式所推估 21 世紀末臺灣地區的溫度上升幅度介於 2.0°C 至 3.0°C 之間 (相對於 20 世紀末)，略小於全球平均值的上升幅度。在區域與季節方面，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，春季較其他季節略低。(本文 5.1.2 節；5.4.3 節 B)

在降雨推估部分 (參見第 47 頁，表\_摘 1)，全球平均年降水量未來變化的推估值幾乎都小於 5%，但是在空間與區域分布的差異甚大。總的來說，原本多雨的區域降水可能增加，而較為乾燥的副熱帶地區在未來會變為更加乾燥少雨，使副熱帶半乾旱地區向極區略有擴展，中高緯度則由於往極區的水氣輸送增加而有更多降水，特別是冬季半球。由於陸地在未來增溫較海洋明顯，亞洲冬季季風環流可能變弱 (本文 5.3.1 節；5.3.2 節)，**臺灣地區冬季雨量的可能減少趨勢**與此現象一致。整體而言，雖然夏季季風環流不見得會因為上述的海陸溫差增加而加強，但是水氣量的增加將助長水氣的傳送，可能使得**亞洲夏季季風區的降雨增加** (本文 5.3.2 節)。臺灣地區夏季降雨的未來變遷趨勢與此一趨勢一致。依多氣候模式系集分布情形推估，臺灣北、中、南、東四個主要分區的未來冬季平均雨量多半都是減少的，約有一半的模式推估減少幅度介於 -3%至-22%之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似。未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，超過 3/4 的模式推估降水增加，約有一半的模式認為未來夏季平均雨量變化介於 +2%至 +26%之間 (本文 5.4.3 節)。這種原本多雨期間的雨量增加，而少雨季節雨量減少的未來發展情境，對於臺灣未來的水資源調配是一大挑戰。

## 二、颱風、暴雨、乾旱、熱浪、寒潮等災害性天氣受氣候變遷影響的程度為何？未來是不是會更為劇烈或頻繁？

### (1) 侵臺颱風個數、強度、路徑與氣候變遷之關係

全球每年約有 79 個颱風生成，其中約有 27 個在西北太平洋生成。臺灣位於西北太平洋颱風慣常行進的路線範圍，在西北太平洋生成的颱風平均約 13% 侵襲臺灣。資料顯示西北太平洋颱風個數有明顯的跨越數十年的年代際變化 (Inter-decadal Variability)，但是長達百年的變遷趨勢則並不明顯。本報告分析結果顯示影響臺灣的颱風個數存在著年與年之間的變化 (Interannual Variability)，但是沒有顯著的長期線性變化趨勢。值得一提的是 1990 年以後的侵臺颱風個數和 1961~1989 年相比有增多的現象，且在 2000 年出現明顯增多的轉折 (參見第 39 頁·圖\_摘 17)，這與西北太平洋颱風平均路徑向北偏移有關。另外，1980 年以後的侵臺颱風其生命歷程中達到強颱風的比例明顯增高 (參見第 39 頁·圖\_摘 18)，此現象與上述颱風路徑的北偏和太平洋海溫的變遷趨勢及西北太平洋年代際變化密切相關。(本文 2.3 節；4.2.5 節；4.3.2 節 B(b))

颱風在未來氣候變遷影響下有何變化？由於目前所有的氣候模式不夠完善，未來氣候推估模擬時所使用的模式空間解析度不足以模擬風，即使另外以動力降尺度方法或提高解析度的區域與全球氣候模擬，利用模式來推估未來颱風 (熱帶氣旋) 變化仍具有很高的不確定性。此一不確定性源自於現今模式模擬颱風的能力仍有其限制 (參見第 9 頁·議題五)。依據全球目前的研究結果顯示，絕大多數的氣候模式推估，在未來暖化氣候下，全球熱帶氣旋生成數目都是維持不變或減少的 (-6%至-34%)，但對個別洋面上的颱風生成個數的變化則沒有明顯的定論。全球熱帶氣旋生成個數的減少與整體熱帶大氣垂直溫度結構在未來變得較為穩定有關，但是其他影響熱帶氣旋生成的因素 (如垂直風切、中低層溼度等)，往往與未來推估的海溫變化以及伴隨的環流變動有關，在不同的洋面上對熱帶氣旋生成個數的影響則未必一致。例如熱帶太平洋未來可能的海溫變化型態對西北太平洋颱風生成個數的影響比較沒有一致的作用，比較有系統的影響主要是西北太平洋平均颱風生成的位置將向東南偏移，向北偏轉的路徑的發生機會也較大，但是對侵臺颱風數目並沒有系統性的影響。(本文 5.3.2 節)

至於未來颱風強度變化，由於多數動力氣候模式所進行的推估實驗解析度不足，所模擬的颱風結構與強度與實際觀測有相當的差異，因此用來評估未來颱風強度變化必須注意其適用性。但是，由於未來氣候推估的熱帶地區增暖且水氣量增加，模式中一旦產生熱帶氣旋後，其發展成為強烈颱風的比例會增加。以高解析度區域颱風模式針對上述結果進行更適切的颱風強度模擬後，多數研究仍維持強烈颱風比例增加的結論。(本文 5.3.2 節)

## (2) 降雨強度的改變

IPCC 報告指出，在氣候變遷影響下，極端事件可能會有增加的趨勢。在後 IPCC 第四次評估報告時期 (2007 年以後) 的研究，發現全球總降水量在增加，但增加的速率仍有爭議，另一方面，全球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。根據模式推估結果，全球平均降水量在 21 世紀呈現隨時間增加的趨勢，意味著全球水循環的加強，變化的幅度大約是每 1°C 的暖化伴隨 1% 至 2% 的降水量增加，相對於大氣中水氣量 6% 至 7% 的增加。目前的氣候模式明顯低估極端降雨強度，前述變化量是否可靠，仍有待探討。根據模式的推估，極端日降雨量在本世紀末，除了在副熱帶的少雨區外，幾乎所有的地區都是增加的，中高緯度的增加平均為 10~20%，赤道鄰近則可以超過 30% 以上。(本文 1.2.2 節 B；1.2.2 節 C；5.3.1 節)

根據不同降雨強度分析臺灣地區的年發生日數變化，發現大豪雨日數在近 50 年和近 30 年有明顯增多的趨勢，存在著大約 50~60 年週期的年代際變化現象(參見第 41 頁·圖\_摘 19)。臺灣小雨日數則大幅度減少，百年趨勢為每 10 年減少 2 天，而近 30 年增加為每 10 年減少 4 天，與過去全球各地測站極端降雨長期變化分析有相似的趨勢，但是局部區域差異還是相當大。(本文 4.3.2 節 B(a)；4.3.2 節 A(a))

## (3) 乾旱頻率與強度

由於降雨型態發生改變，許多地區的降雨更加集中，部分地區會因降雨不均而發生乾旱現象。IPCC 第四次評估報告指出，在熱帶及亞熱帶地區乾旱發生頻率有增多的情形，且有逐漸增強的趨勢。全球乾濕季的降雨變化分析發現：降雨在雨季有增加的趨勢，而乾季降雨正在逐漸減少。此一結果意味降雨的季節差異

會更加明顯，降雨兩極化現象在乾濕季分明的地區可能會更加明顯。(本文 1.1.3 節 C ; 1.2.2 節 B)

本報告分析全臺 6 個測站的連續不降雨日過去百年來一致的增加。近 30 年，恆春和花蓮極端偏乾事件的發生機率都高於其他時期，其他測站的變化則較不明顯 (參見第 36 頁，圖\_摘 14)。在未來變化方面，上述全球乾濕季越趨明顯的趨勢在 21 世紀將持續維持，此一趨勢對於臺灣北部春冬季的枯水期供水將有所影響。當未來春冬季降雨所帶來雨量不足，北部地區乾旱頻率與強度都可能加強，南部地區由於高度依賴豐水期之降雨，更需加強夏季梅雨季與颱風季之水庫操作與水資源管理。(本文 4.3.2 節 B(c) ; 5.3.1 節 ; 5.4.3 節 C)

#### (4) 熱浪、寒潮事件的變異趨勢

從 1950 年之後，亞洲地區炎熱的白天和夜晚有明顯增加的趨勢，夜晚增加的趨勢較白天更快且發生區域也較大。臺灣地區也有每日最高溫或每日最低溫上升的現象，夜晚的增溫比白天明顯。分析臺灣 6 個測站的高溫日數，百年變化都呈現增加的趨勢，台北站的增加幅度最明顯，2000~2009 年的高溫日數比 1911~1920 年平均增加了 10 天以上 (參見第 34 頁，圖\_摘 12)。極端低溫事件的長期線性趨勢都為下降，表示受到暖化影響，寒潮事件發生頻率逐漸減少，且強度也有逐漸減弱的趨勢 (參見第 35 頁，圖\_摘 13)。(本文 4.3.2 節 B(d) ; 3.4.2 節 B)

在極端氣溫變化的未來推估方面，氣候模式所模擬的日平均氣溫 (含最高與最低) 的機率密度函數分布的改變，呈現平均氣溫值的上升，變異量的改變並不明顯。如果依據現今氣候的極高低溫定義來分析，在多數模式未來均暖化的情形下，極高溫的發生日數將大量增加，極低溫日數則會大量減少。夏季持續高溫的熱浪發生頻率將大幅增加，對能源使用、健康照護、農業等部門都會帶來衝擊。(本文 5.3 節 ; 5.4 節)

### 三、氣候變遷與聖嬰現象、北極振盪等氣候變異 (外界通常解讀為異常氣候) 的關係?

造成氣候變遷的因素很多，有自然的，也可能有人為的影響。罕見且影響大的氣候事件常被引述為異常氣候，歸咎於人為的全球暖化，其實即使在沒有人為暖化的影響下這些現象仍然會發生。

例如近兩年觀察到的北極振盪屬於一個季節以內的變動，2009/2010 與 2010/2011 冬季在北半球中緯度地區造成大規模寒害的北極振盪就像高低氣壓與颱風一樣，是一種大氣自然擾動，我們對它為何發生，如何變動，不甚了解。另外，我們經常聽到之聖嬰/反聖嬰現象則是跨年的變動，屬於自然影響，單一聖嬰事件通常持續不到一年，反聖嬰現象則有持續較久 (1~2 年) 的傾向。聖嬰/反聖嬰現象所造成的影響較為短期，通常短於一年，相較於人為暖化或長達數十年的年代際氣候變化的影響，屬於短期的變化，對長期的氣候變遷無明顯影響。但是氣候變遷改變氣候運作型態，則可能影響到聖嬰/反聖嬰現象的特徵。(本文 3.2.3 節；3.2.2 節；3.3.2 節；3.4.2 節；3.4.3 節)

另一方面，全球長期的氣候變遷趨勢分析發現氣候變化存在數十年時間尺度的變動，吾人稱之為年代際變化。IPCC 第四份報告認為全球暖化趨勢有逐漸加劇的趨勢，但也有研究指出過去十年溫度上升趨勢已經趨緩，甚至指出未來數十年溫度有可能不升反降。這是因為氣候變化具有多重時間尺度的特性。過去一百多年的全球氣溫變化，除了長期的上升趨勢，還有週期長達數十年的年代際變化。這些年代際變化可能是海洋環流引起的自然氣候變化，不見得與人為全球暖化有關，真正原因仍不甚清楚。最近研究發現，年代際變化與長期暖化趨勢的合併效果可能造成近數十年全球暖化加速的現象，但年代際變化本身無法解釋百年的長期趨勢。年代際變化若進入降溫型態，可能與長期暖化趨勢有暫時性的抵銷作用，但仍無法抑制長期暖化趨勢。(本文 3.5 節；3.6 節)

另外，IPCC 氣候變遷推估無法考慮火山爆發或類似中世紀小冰河期現象對未來氣候的影響。過去觀測顯示火山爆發只能造成零點幾 °C 的全球冷卻作用，且僅維持 1-2 年。在小冰河期的影響方面，研究顯示即使未來數十年中發生類似中世紀的小冰河期，其造成的降溫程度約為 0.3°C。過去一百多年觀測到的年代

際變化的影響也都僅有零點幾 °C。雖然吾人無法準確預估自然變因對外來氣候的可能影響，目前的研究皆發現這些自然變因對全球氣溫的影響都遠小於推估的人為全球暖化幅度。

近幾年來觀察到的異常氣候在將來持續暖化的大環境中，發生頻率與強度是否會有明顯改變，則是值得吾人密切注意的訊息，也是氣候變遷研究與推估中相當重要且待突破的一環。另一方面，如何定量評估人為全球暖化的可能影響程度與氣候自然變異的差別，仍是發展中的關鍵技術，尚未有定論。

#### 四、臺灣近年來的災害似乎有越來越嚴重的趨勢，與氣候變遷的關係為何？

根據國際災害資料庫 (EM-DAT) 1900~2009 年全球天然災害事件統計，災害次數、受影響人口與經濟損失在 1970 年代開始急遽攀升，而死亡人口卻有下降趨勢 (參見第 48 頁·表\_摘 2)；大部分的災害以水文氣象型災害為主 (含水災、風災、坡地災害、乾旱)，近 10 年水文氣象型災害占總天然災害次數的比例高達 78% (參見第 49 頁·圖\_摘 23)。水文氣象型災害的增加，一方面與極端天氣與氣候事件發生頻率增加有關，另一方面與快速增加的人口與經濟發展有關。在未來災害的趨勢推估上，IPCC 第四次評估報告指出，在氣候暖化影響下，未來極端事件 (如熱浪、豪大雨、乾旱、颱風強度增加、海平面升高) 發生的機率偏高 (66%~90%)，再加上全球經濟發展與人口成長趨勢，世界銀行預估未來災害的次數、受影響人口與災害損失將會大幅增加。(本文 6.2.1 節；6.2.2 節)

根據世界銀行統計，臺灣屬於高災害風險區域，且同時受多種災害影響，臺灣的災害特性與全球趨勢一致，以水文氣象災害為主。根據近年來的災害統計 (水災、坡地、旱災) 分析，臺灣的災害次數增加且災害特性改變 (近年來多屬水土複合型災害)，災害程度也有加劇 (災害損失增加與牽涉層面變廣) 的現象。災害變嚴重的原因與極端事件的增加以及自然與社會環境變遷有關。統計資料顯示，近年臺灣重大颱風洪水災害與極端降雨的增加有關，不論是短延時降雨強度 (1 小時至 6 小時累積降雨) 或是長延時降雨強度 (超過 48 小時累積降雨)，在近 10 年 (2000~2009) 有增加的趨勢。以 1960~2009 年的颱風降雨統計資料為例，極端強降雨颱風 (排名前 10% 的颱風降雨)，往往造成臺灣重大災害 (如莫拉克、賀伯、納莉)。此颱風極端強降雨發生的頻率在 2000 年以前，平均 3~4 年發生一次，在 2000 年以後則平均每年就發生一次 (參見第 50 頁·圖\_摘 24)。雖然上述極端降雨強度增加是否可以完全由全球暖化的衝擊來解釋，在科學上仍有討論空間，但此現象所呈現的氣候變異特徵對災害風險的提高無疑是一大警訊。(本文 6.1.1 節；6.1.2 節；6.3.1 節)

同時，必須一提的是臺灣近年災害的程度加劇，除了伴隨者氣象上極端事件的增加外，環境變遷也是重要因素之一，包括 921 地震後的影響、地層下陷問題、山區的過度開發與建設、都市化與經濟發展需求...等，都是導致災害更為嚴重的

重要因素。(本文 6.3.2 節)

2010 年末與 2011 年初澳洲世紀大洪水造成重大損失後，聯合國已發表聲明，認為在未來無法預知的極端天氣下，災害損失的將成為新的常態 (new normal)。面對極端災害的常態化，過去對災害的所認知的觀念「天災」 (natural disaster) 需要適度調整為「人為災害」 (man-made disaster)，顯現人為環境變遷對災害衝擊的重要性，聯合國也呼籲世界各國政府必須有計畫性的正視此問題。

## 五、臺灣氣候變遷未來推估的可信度為何？政府和民眾該如何利用或解讀相關訊息？

用來推估全球長期氣候變遷的主要科學方法相當複雜，乃先設定未來世界人口、社會、經濟的可能發展情境，估算溫室氣體與懸浮微粒等大氣成分濃度隨時間的變化，再用以驅動氣候模式模擬未來的氣候演變，最後從中推估未來長期氣候變遷的趨勢。當模擬推估的結果不足以提供局地氣候變遷細節時，還必須運用動力或（與）統計模式進一步加以估算。本報告引用「臺灣氣候變遷推估與資訊平台」計畫所提供的未來氣候變遷推估資料，就是依據這個過程所得到的。

由於氣候變遷的推估伴隨著一些不確定的因素，因此吾人在進行臺灣氣候變遷衝擊評估以及調適策略擬定之前，必須充分瞭解氣候變遷推估的本質，以及使用這些推估數據的可能限制（本文 5.2 節）。臺灣氣候變遷未來推估的不確定性來源如下：

- (1) **模式模擬的不確定性**：源自於對地球氣候系統瞭解的不足與模式的不完善。即使加諸於氣候模式的輻射驅動力完全一樣，不同氣候模式由於結構差異，以及對物理過程的處理方式有所差別，推估出來的地表氣溫與降水的變化也還是可能有所差距。此外，還有許多對於氣候變遷有一定影響程度的物理、化學、生物過程（例如碳循環、生態系統等）尚未完整包含在目前的氣候模式，也會造成差異。例如，初步研究顯示，碳循環對氣候有正回饋作用，氣候模式若包括碳循環，可能會放大模擬的暖化程度。
- (2) **自然氣候變動的不確定性**：源自地球氣候系統的內部動力過程與外部自然驅力的變化。全球氣候模式同時耦合大氣、海洋、陸地模式，其內部系統間的交互作用可能產生自然氣候變動。因此，每個氣候模式推估的未來氣候變遷，除了受到溫室氣體的外在輻射驅動力影響，也包含內部動力過程所造成的自然氣候變動。每一個模式模擬的自然氣候變動各自不同，進而造成模式間的差異。此外，未來外部自然驅力（如太陽輻射量、火山噴發的懸浮微粒等）的變化無法預知，因此也未能被包括在目前的推估中。
- (3) **未來發展情境的不確定性**：源自無法確定未來世界的實際發展情況，以及其所對應的溫室氣體排放量與濃度隨時間的變化。過去 IPCC 設計了一些

未來世界發展的故事情境 (scenarios)，並據之規劃不同的數值模擬實驗，由 24 個全球氣候模式執行。但實際的未來發展未必依循所設計的特定發展情境，也無法估算未來發展情境的可能發生與否，只能依據所選的未來情境討論。氣候推估資料使用者必須瞭解這些不同的未來情境以及其假設。

- (4) **降尺度方法對不確定性的影響**：運用統計或動力方法將全球氣候模式模擬推估的較低解析度資料 (IPCC AR4 平均資料網格點距離約 300 公里) 降尺度 (亦即提升空間解析度到數十公里或更小)，推估局地 (如臺灣) 氣候變遷，會引進額外的誤差與不確定性。一般而言，先前所提及的不確定性的範圍往往比降尺度方法所帶來的不確定性大。降尺度方法所造成的誤差與雜訊，並不會明顯加大臺灣區域氣候變遷模擬推估的不確定範圍，但仍應量化降尺度過程所引進的不確定性。

由於有上述種種的不確定性與資料產製的限制，較符合科學精神的方式，是將未來氣候變遷降尺度到臺灣區域後，以機率分布的方式呈現，量化不確定性的範圍。

如果氣候變遷推估結果遠超過上述種種不確定的範圍，則可信度較高。一般而言，對於 21 世紀末全球平均近地表氣溫的改變，即便是臺灣地區小區域的變化，科學家對其推估的可能性機率範圍的信心相當高。但是在降水方面，由於不確定範圍大，模擬結果的可信度較低。一般而言，區域較小可信度也較低。因此，無論是政府或民間單位在運用臺灣氣候變遷推估與資訊平台所提供的未來氣候變遷推估資料時，必須注意上述的不確定性與信心度高低，審慎評估其應用在相關決策與規劃的限制及風險。

我們無法預見未來世界的真正發展，也不能預知世界如何逐步因應與調適氣候變遷所帶來的影響，甚至科學上對地球氣候系統如何運作的瞭解也仍有所不足。我們所能做的是，瞭解未來氣候變遷推估與其可能性機率範圍是透過什麼過程得到的，其中運用了哪些假設以及必須注意的事項，以便適切的分析與評估其對社會與環境的可能影響與衝擊，並據之規劃發展策略，將影響層面與衝擊程度降至最低。面對氣候變遷的影響與威脅，各國政府積極採取應對作為，除了溫室氣體排放的減緩 (mitigation) 措施外，還須採取相對應的調適 (adaptation) 策略。根據聯合國氣候變遷調適政策綱領 (UNDP Adaptation Policy Framework for Climate Change)，每個國家的氣候變遷調適政策的擬定須先進行未來氣候風險評

估工作。然而以目前的科學能力，雖然可進行全球與各大洲的未來氣候變遷趨勢評估，但推估結果如前所述仍存在不確定性。對臺灣而言更是如此，因為天氣系統複雜且面積很小，進行未來氣候變遷推估所面臨的複雜度與困難度相當高，尤其是在未來「量」的改變部分。如何看待氣候變遷的不確定性，並從中獲取最大效益？建議如下：

- (1) 政府與民眾必須了解科學的極限與未來推估資訊可能的不確定性，在氣候變遷的趨勢上進行風險溝通，如當極端天氣受氣候變遷影響可能有增加的趨勢，我們該如何因應？雖然氣候變遷變化量的多寡與機率的高低會影響政策的強度與共識的形成，但關於「如何解讀數據」我們仍需要在觀念上彼此學習。
- (2) 資料產製者（如學者或研究機構）必須善盡職責提供可能的科學數據，與使用者（如決策者與民眾）進行溝通，讓科學數據轉化成可用與明確的資訊，把可能的風險對資料使用者進行說明與意見溝通，避免使用者錯誤的引用數據造成恐慌或漠視。
- (3) 政府可依據現有的科學評估結果的共識基礎上，衡量國家永續發展的願景與國家可運用的資源，強化民眾溝通與社會共識形成，進行決策與風險評估。



# 執行摘要

全球與東亞氣候變遷 .....	15
臺灣氣候變遷 .....	16
未來氣候變遷推估：全球 .....	17
未來氣候變遷推估：臺灣 .....	18
氣候變遷與災害 .....	18
結語 .....	19



## 執行摘要

本報告依據國科會「臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫」第一年研究成果撰寫而成，整理與探討過去氣候變遷，以及應用動力與統計降尺度方法，依據 IPCC 第四次報告 24 個氣候模式結果，推估臺灣未來的可能氣候變遷。

### 全球與東亞氣候變遷

1. 平均氣候狀態的改變方面，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  $0.74^{\circ}\text{C}$  (參見第 22 頁，圖\_摘 1) (本文 1.1.1 節)。海平面在 1961~2003 年間大約上升了 77mm，平均每年上升約 1.7mm，最近資料顯示上升速率有隨時間加快的跡象 (參見第 23 頁，圖\_摘 2) (本文 1.1.4 節)。
2. 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 (本文 1.1.2 節；1.1.3 節)。在後 IPCC 第四次評估報告時期 (2007 年以後) 的研究，發現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 (參見圖 1.12，圖 1.13) (本文 1.2.2 節)。至於颱風的變化，不確定性仍然非常高 (本文 1.2.2 節；2.3.2 節)。
3. 近 50 年來 (約 1950 年代之後)，東亞夏季與冬季季風皆呈現減弱趨勢 (參見圖 2.4，圖 2.5，圖 2.6)。自 1948 年以來，東亞陸地上 (如中國北方及東部) 均呈現顯著的增溫；在海面上，副熱帶西太平洋全部呈現增暖趨勢。東亞平均降雨的長期趨勢，具有區域性的差異，不過大多數地區的趨勢不顯著 (參見第 24 頁，圖\_摘 3) (本文 2.2 節)。
4. 關於西北太平洋熱帶氣旋 (颱風) 的生成、強度、路徑及伴隨降雨與登陸的變化，以現有觀測資料分析過去趨勢時，受限於觀測資料的品質與長度，無法確認目前觀測到的這些熱帶氣旋活動的長期變異超過自然氣候變異的幅度，亦即仍無法從過去的熱帶氣旋觀測具體辨識出顯著的人為影響 (本文

2.3 節)。

5. 過去百年全球溫度變化包括數十年週期的自然變化與人為暖化的影響 (參見第 27 頁·圖\_摘 6; 第 23 頁·圖\_摘 9)。20 世紀後期至今全球溫度上升較為快速，可能是自然的暖化趨勢加上人為暖化的結果。人造溫室氣體是過去數十年氣溫上升的主因之一。最近的觀測顯示，自京都議定書以來，全球溫室氣體的排放不但無法抑制，反而加速成長。人類排放的溫室氣體造成的溫室效應已經十分明顯，而且大多數氣候模式都顯示人為溫室效應的影響大於其他已知的自然因素，因此過去一百多年來的溫度上升有一部分受到人為溫室效應的影響是極其可能的 (本文 3.6.3 節)。

## 臺灣氣候變遷

1. 溫度：臺灣暖化現象十分明顯，不論是 100 年、50 年和 30 年的年平均溫度變化都有顯著的上升趨勢。近 30 年，西岸測站的增溫趨勢明顯高於東岸 (參見第 31 頁·圖\_摘 10) (本文 4.2.2 節)。在季節特性方面，百年變化以秋季溫度的暖化幅度最大，但近 30 年的變化以冬季的增溫幅度大於其他三季 (表 4.4; 圖 4.5) (本文 4.3.2 節 A(b))。高溫日數百年變化呈現增加的趨勢，以臺北增加幅度最大，約為每 10 年增加 1.4 天，近 50 年與 30 年的極端高溫日數分別增加為每 10 年 2 天與 4 天 (參見第 33 頁·圖\_摘 12)。極端低溫發生頻率顯著下降，1985 年之後，寒潮事件明顯偏少，這樣的情況在 1985 年以前不曾出現過 (參見第 34 頁·圖\_摘 13)。
2. 降雨：臺灣總雨量無明顯長期變化趨勢，但是總降雨日數不論是 100 年、50 年、30 年的變化都有明顯下降趨勢，100 年趨勢為每 10 年減少 4 天，30 年則增至每 10 年減少 6 天 (參見第 32 頁·圖\_摘 11) (本文 4.3.2 節 A(a))。極端偏乾事件分析顯示恆春與花蓮在近 30 年出現頻率高於其他時期，其他地區則較不明顯 (參見第 35 頁·圖\_摘 14)。長期而言，臺灣大豪雨日數有大約 50~60 年週期變化現象，且在近 50 年和近 30 年有明顯增多的現象，未來是否持續上升，目前仍無法判斷 (本文 4.3.2 節 B(a))。臺灣小雨日數則大幅度減少，百年趨勢為每 10 年減少 2 天，而近 30 年增加為每 10 年減少 4 天。

## 未來氣候變遷推估：全球

1. 在溫室氣體濃度持續增加的情境假設下，所有研究一致指出在人為影響下，全球持續暖化的可能性極高。氣候模式估計的全球氣溫變化的氣候平均值最佳估計為增暖 2.8°C，而可能範圍是從增暖 1.8°C 至 4.0°C 之間（參見第 41 頁，圖\_摘 20）。本世紀末，陸地與北半球的極區溫度上升較顯著（參見第 44 頁，圖\_摘 22）。同時極區的溫度上升又以冬季較大，夏季較小。（本文 5.3.1 節）
2. 綜觀不同的未來發展情境，IPCC 推估在 2090~2099 年，全球海平面上升的範圍為 18cm 至 59cm，最可能的變化範圍是上升 30cm 至 40cm，而且最主要的貢獻是來自於伴隨著海水溫度變暖時的膨脹。2007 年 IPCC 報告之後的最新研究，認為 21 世紀末海面上升的幅度應是該報告中的兩倍，甚至有研究認為上限可能是 2 公尺。長期而言，格陵蘭的陸冰大量融化固然可以造成海平面的巨幅上升達 7 公尺，不過如此大規模融化發生在本世紀末的可能性微乎其微。（本文 5.3.1 節）
3. 全球平均降水量在 21 世紀呈現隨時間增加的趨勢（參見圖 5.10），意味著全球水循環的加強，變化的幅度大約是每 1°C 的暖化伴隨 1% 至 2% 的降水量增加，相對於大氣中水氣量 6% 至 7% 的增加，降水的增加量較小。目前的氣候模式明顯低估極端降雨強度，前述變化量是否可靠，仍有待探討。在降水變化的空間分布特性方面（參見第 44 頁，圖\_摘 22），由於向極區的水氣傳送量增加，高緯度的降水量非常可能增加，且冬季的增加比夏季略高，而多數副熱帶的陸地則有降水變少的可能性，鄰近赤道的模式系集平均降雨也有增加的趨勢，但是模式間的差異比較大。極端日降雨量根據模式的推估，在本世紀末，除了在副熱帶的少雨區外，幾乎所有的地區都是增加的，中高緯度的增加平均為 10~20%，赤道鄰近則可以超過 30% 以上。（本文 5.3.1 節）
4. 在全球暖化影響下，未來颱風生成的個數有減少的趨勢，強度在暖化環境中有加強的趨勢，颱風中心附近降雨量也增加（本文 5.3 節）。因為目前的氣候模式仍無法精準模擬颱風等劇烈天氣現象，颱風特性的未來變遷趨勢，仍有待進一步確認。
5. 依據 IPCC 的情境推估，到了 21 世紀末暖化程度將遠大於數十年週期的自然氣候演變造成的溫度變化，也大於火山爆發帶來的短期冷卻。即使考慮

類似造成小冰期的太陽輻射減弱的現象，其造成的全球冷卻效應約為 0.3°C，仍遠小於人為溫室效應造成的暖化。如果溫室氣體的增加無法抑制，全球暖化程度將遠遠超過自然變化的幅度，無任何已知的過去百年來的自然變化可以抵銷。

### 未來氣候變遷推估：臺灣

1. 在本世紀末，臺灣增溫程度在 2.5°C 至 2.7°C 之間，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，而春季較其他季節略低（參見第 46 頁，表\_摘 1）。（本文 5.4.3 節 B）
2. 在降水量平均百分比變化方面，臺灣北、中、南、東四個主要分區未來冬季平均雨量多半都是減少的，約有一半的模式推估是介於 -3% 至 -22% 之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似。未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，超過 3/4 的模式推估降水將增加，約有一半的模式認為未來夏季平均變化主要是介於 +2% 至 +26% 之間（參見第 46 頁，表\_摘 1）。對原本就是夏季多雨、冬季少雨的中南部地區，這些推估結果顯示豐、枯水期的降雨量差距愈來愈大，未來如何調配豐枯水期的水資源，值得重視。（本文 5.4.3 節 B）

### 氣候變遷與災害

1. 全球趨勢：根據國際災害資料庫 (EM-DAT) 1900 年至 2009 年全球天然災害事件統計，災害次數、受影響人口與經濟損失在 1970 年代開始急遽攀升。（參見第 47 頁，表\_摘 2）IPCC 第四次報告指出，在氣候暖化影響下，未來極端事件（如熱浪、豪大雨、乾旱、颱風強度增加、海平面升高）發生的機率偏高（66%~90%），再加上全球經濟發展與人口成長趨勢，世界銀行預估未來災害的次數、受影響人口與災害損失將會大幅增加。（本文 6.2 節）
2. 臺灣屬於高災害風險區域，災害特性與全球趨勢一致，以水文氣象災害為主（參見第 48 頁，圖\_摘 23）。災害變嚴重的原因與極端事件的增加以及自然與社會環境變遷有關（本文 6.3 節）。統計資料顯示，在自然因素層面，近年臺灣重大颱風洪水災害的嚴重程度與極端降雨的增加有關，過去 40 年極端強降雨颱風（排名前 10% 的颱風降雨），往往造成臺灣重大災害（如莫拉克、賀

伯、納莉)。此極端強降雨颱風發生的頻率近 10 年有明顯增加的現象，在 1970~1999 年的 30 年期間，平均 3~4 年發生一次，在 2000 年以後的 10 年間則平均每年就發生一次 (參見第 49 頁，圖\_摘 24)。

3. 臺灣過去淹水災因主要分為自然因素與人為因素，其中部分自然因素與極端氣候事件有密切關係。豪雨是造成坡地災害的原因之一，根據全臺坡地雨量測站分析的結果，全臺各地降雨超過坡地警戒的頻率有逐年上升的現象。其中以南部地區頻強降雨率增加的最為明顯，中央山脈以西的地區坡地強降雨頻率增加較東部為明顯，近年來坡地災害的嚴重性增加，一方面需考量氣候變異對強降雨造成的影響，其他自然因素(如地震)以及人為因素(道路開發、山區休閒產業發展..等)的影響須同時考量。(本文 6.3 節) 另一方面，臺灣過去 40 年來整體年降雨量並無明顯變化，但趨勢上颱風降雨所占年總雨量比例從 1970 年代的 15% 提高至 2000 年代的 30%，這樣的結果顯示豐水期集中降雨量變多，枯水期降雨量減少，顯見季節降雨越來越不平均，雨季留不住水，且增加洪水風險，而旱季缺少降雨補助，對整體水資源系統之影響日益嚴重。(本文 6.4.1 節)
4. 臺灣原本屬高災害風險地區，在氣候與環境變遷下，問題的嚴重性更加凸顯，包括水土複合型災害、水資源問題、山區與海岸衝擊等 (參見第 56 頁，表\_摘 3)。這些問題最容易發生在災害的氣候敏感區位，如：河川流域 (水土橋樑道路複合型災害)、都市與建成地區 (高密度與發展區域)、山區安全 (高脆弱度與環境敏感) 以及沿海與地層下陷區 (高脆弱度與災害風險)。(本文 6.4 節)

## 結語

本報告呈現了在此一階段吾人對臺灣的過去與未來氣候變遷的瞭解程度，有新研究成果，也仍有許多未解決的問題。這些問題包括，對影響臺灣過去氣候的機制仍未能充分掌握，以及未來氣候變遷的不確定性 (本文 5.1.5 節)。後者的癥結，除了全球氣候模式本身的不確定性，還有降尺度過程引進的誤差 (本文 5.2 節)。這些問題在科學上目前尚無完善的方法可以完全解決。氣候變遷研究與推估是一個滾動的研究過程，人類對氣候變遷的瞭解與日俱增，用來推估的氣候模式也日益改良。臺灣的氣候變遷研究與推估也必須是一個持續性的滾動過程，反覆運用

IPCC 的最新資料，針對臺灣未來氣候變遷提出更新的推估。IPCC 預計於 2013 年提出第五份評估報告與新的推估資料，國內研究單位應該據之更新研究結果與推估。

# 總摘要

全球氣候變遷 .....	22
東亞 / 西北太平洋的變遷 .....	23
年代際變化 .....	27
臺灣氣候變遷 .....	30
未來氣候變遷推估 .....	39
氣候變遷與災害 .....	47
結語 .....	56



## 科學報告總摘要

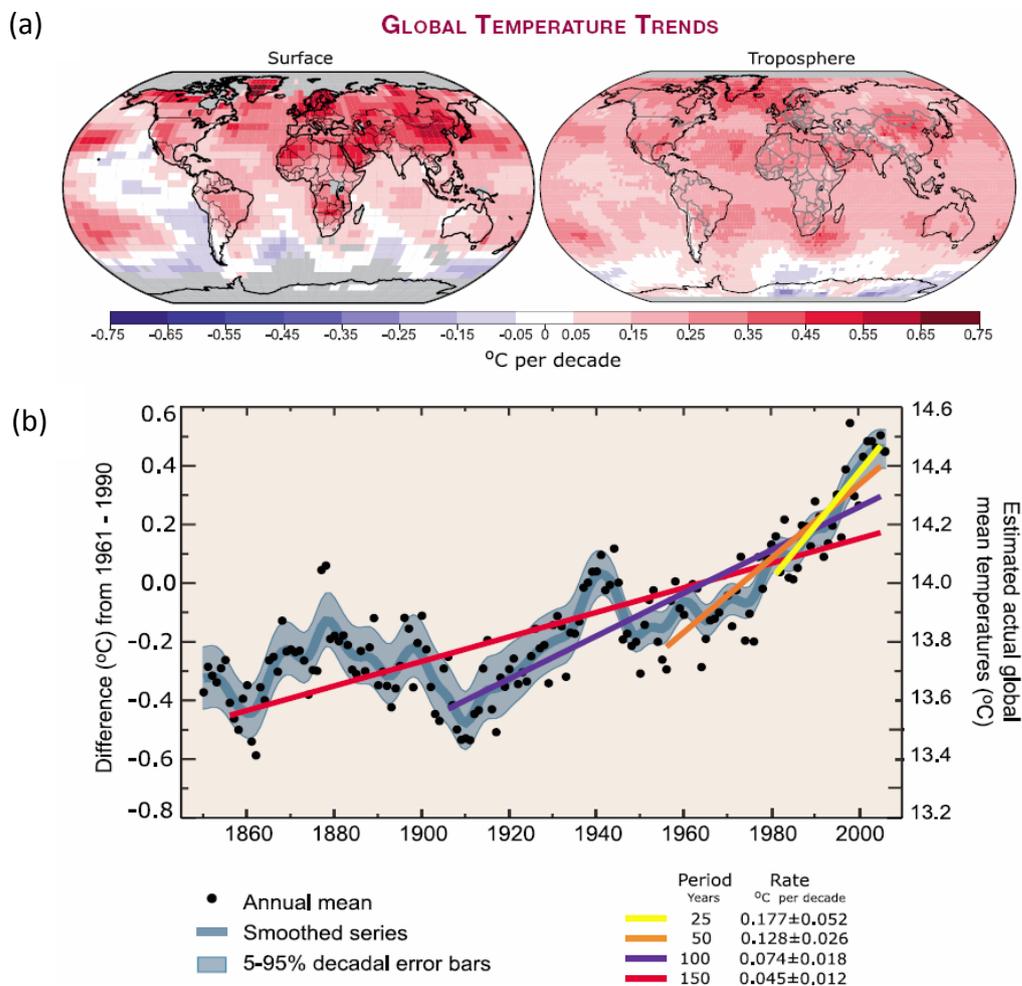
政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2007 年公布氣候變遷第四次評估報告揭示過去 100 年的氣候變遷現況，與未來 100 年在暖化效應持續下可能的衝擊影響。該報告指出過去 100 年全球平均溫度上升  $0.74^{\circ}\text{C}$ ，並出現加速增溫的現象，海平面高度升高，熱浪、乾旱及豪大雨等極端氣候的強度與頻率發生頻率增加。聯合國亦多次呼籲各國政府一方面需持續減少溫室氣體排放以減緩全球暖化，另一方面須積極面對氣候變遷下產生的衝擊並採取積極的調適作為。

臺灣屬於高災害風險地區，受氣候變遷的衝擊影響受到政府與民眾強烈關注，氣候變遷與國土安全問題已成為臺灣不容忽視之課題。有鑑於氣候變遷對臺灣造成的影響可能愈趨嚴重，國家推動氣候變遷調適策略需要更多的科學數據與研究成果作為政策擬定依據，2009 年「第八次全國科技會議」在「結合科技能量，促進永續發展」議題的結論中，強調須精進氣候變遷模擬與推估技術與能力，出版氣候變遷科學報告，並評估氣候變遷之脆弱度與衝擊風險」。因此，國科會自然處永續學門於 2009 年底，針對氣候變遷科學研究與下游衝擊整合應用部分，推動為期三年 (2010~2012) 的「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project，簡稱 TCCIP)，盼延續國內過去氣候變遷科研成果，持續強化氣候變遷科學研究與推估能力以及落實氣候變遷資訊的應用研究與服務。

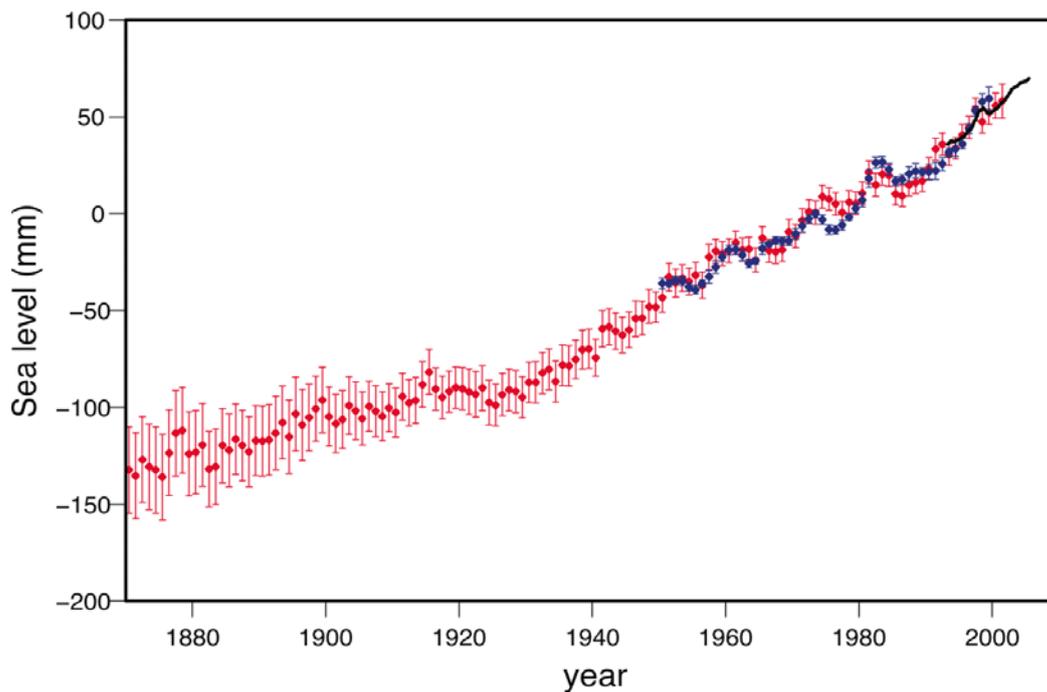
本科學報告由參與該計畫團隊的學者專家共同撰寫，針對全球及臺灣過去以及現有最新的氣候變遷研究成果進行彙整，提供現階段最新研究成果與科學進展，作為氣候變遷研究相關領域學術研究與政府部門在推動氣候變遷相關政策時的參考依據。本科學報告的最新研究成果部分，主要摘自 TCCIP 的第一年重要研究成果，由於相關研究工作仍持續進行中，而且國際間氣候變遷研究成果不斷更新，本科學報告預計在 TCCIP 計畫結束後，再次提出最新的科學研究成果與進展報告。

## 全球氣候變遷

1. 在平均氣候狀態的改變方面，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  $0.74^{\circ}\text{C}$ （圖\_摘 1）。（本文 1.1.1 節）
2. 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 1961~2003 年間大約上升了 77mm，平均每年上升約 1.7mm，但在 1993 年至 2003 年之間則平均每年上升約  $3.1\pm 0.7\text{mm}$ ，顯示上升速率有隨時間加快的跡象（圖\_摘 2）。（本文 1.1.4 節）



圖\_摘 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 年之間平均面溫度的變化。(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.6)



圖\_摘 2：全球平均海平面相較於 1961~1990 年之間平均高度的變化。(IPCC 第四次評估報告·圖 5.13)

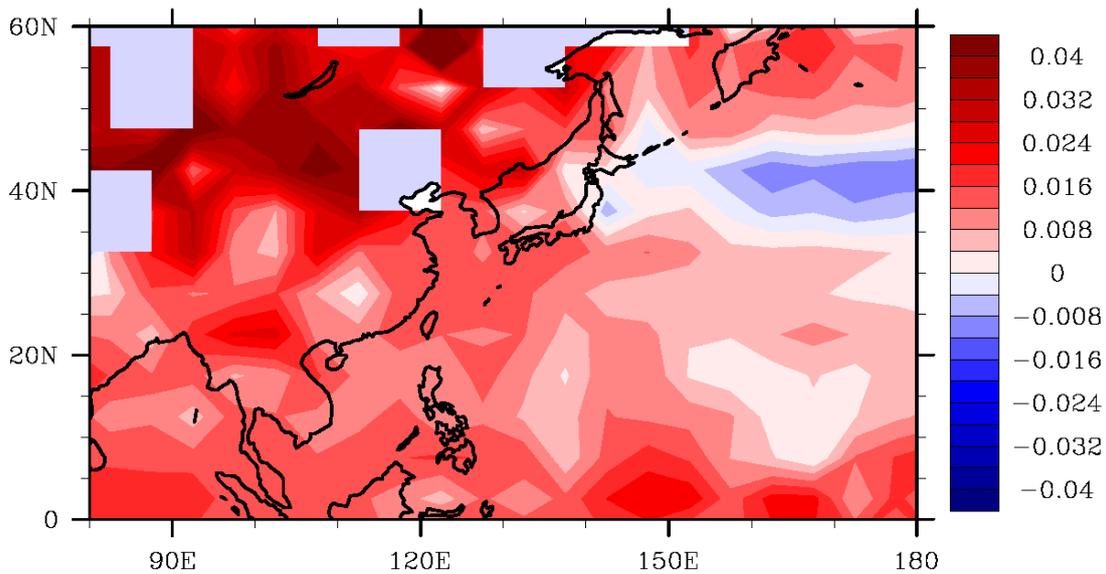
3. 至於降水和極端事件 (如颱風) 的改變，因為有著極高的不確定性，對於其變遷趨勢並無一致性的結論。(本文 1.1.3 節)
4. 在後 IPCC 第四次評估報告時期 (2007 年以後)，對於全球水循環有了更多的研究。整體而言，全球總降水量在增加，但增加的速率仍有爭議。強降水的強度和頻率也有逐漸增加的趨勢，而且趨於兩極化，即雨季越濕、乾季越乾，但這些變化會隨著地區的改變而有所不同。至於颱風的變化，不確定性仍然非常高。(本文 1.2.2 節)

## 東亞 / 西北太平洋的變遷

1. 近 50 年來 (約 1950 年代之後)，東亞夏季季風呈現減弱趨勢。有些研究認為東亞夏季季風並未減弱，而是夏季雨帶南移。有些研究認為亞洲季風的改變是伴隨著 1976/1977 年的氣候遷移而發生的，而且與聖嬰在這期間的變化有密切的關聯。(本文 2.2.1 節)
2. 不論過去一百多年 (1873~1995) 來或是較近期的五十多年來 (約 1950 年

代之後)，東亞冬季季風均呈減弱趨勢。(本文 2.2.2 節)

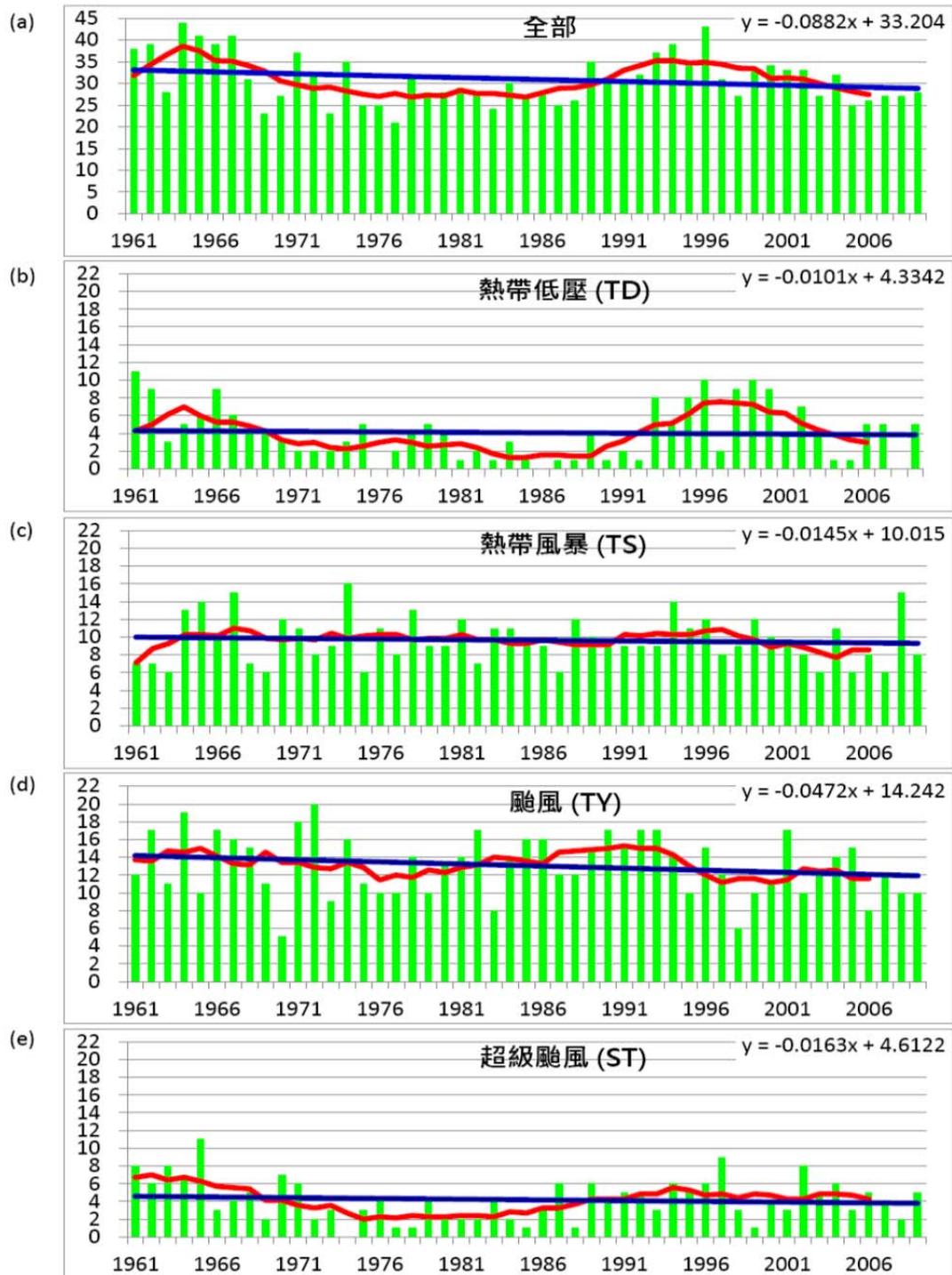
3. 東亞地區的陸地或海面上都有顯著的暖化趨勢。自 1948 年以來，東亞陸地上 (如中國北方及東部) 均呈現顯著的增溫；在海面上，副熱帶西太平洋全部呈現增暖趨勢 (圖\_摘 3)。(本文 2.4 節)



圖\_摘 3：1948 年至 2009 年東亞年平均近地面氣溫 / 海溫的長期線性趨勢 ( $^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ )，使用資料為 HadCRUT3 (Brohan et al. 2006)。(TCCIP 計畫提供)

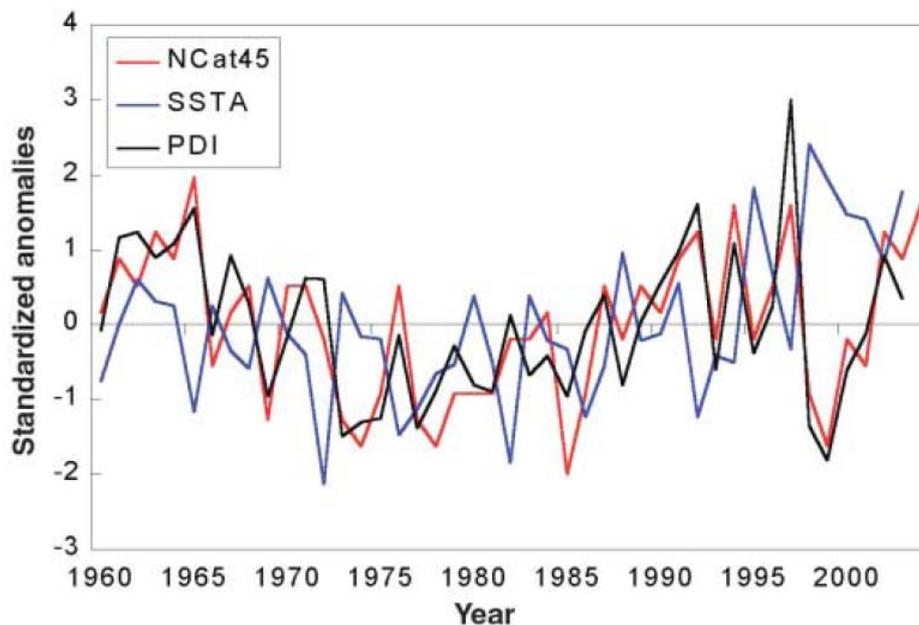
4. 東亞平均降雨的長期趨勢，具有區域性的差異，不過大多數地區的趨勢不顯著。(本文 2.4 節)
5. 關於西北太平洋熱帶氣旋 (颱風) 的生成、強度、路徑及伴隨降雨與登陸的變化，世界氣象組織 (WMO) 專責熱帶氣旋與全球氣候變遷的專家小組回顧過去文獻後，於 2010 年發表專文，認為以現有觀測資料分析過去趨勢時，受限於觀測資料的品質與長度，無法確認目前觀測到的這些熱帶氣旋活動的長期變異超過自然氣候變異的幅度，亦即仍無法從過去的熱帶氣旋觀測具體辨識出顯著的人為影響。(本文 2.3 節)

※ 過去五、六十年 (約 1950 年代之後)，全年熱帶氣旋生成個數具有顯著年代際變異 (圖\_摘 4)，也隨年份增加呈現顯著的下降變化，但若僅考慮較近時期 (1970 年代之後)，則無顯著線性變化。(本文 2.3.1 節)



圖\_摘 4：1961 年至 2009 年西北太平洋熱帶氣旋生成個數的逐年變化。(a) 全部的熱帶氣旋個數，(b) 至 (e) 分別為根據 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 的定義以強度分類得之熱帶低壓、熱帶風暴、颱風及超級颱風的個數。藍線為 49 年的線性趨勢，紅線為 7 年滑動平均值。圖 (a) 及圖(d) 中的線性趨勢通過了 90% 的信心度檢定。(TCCIP 計畫提供)

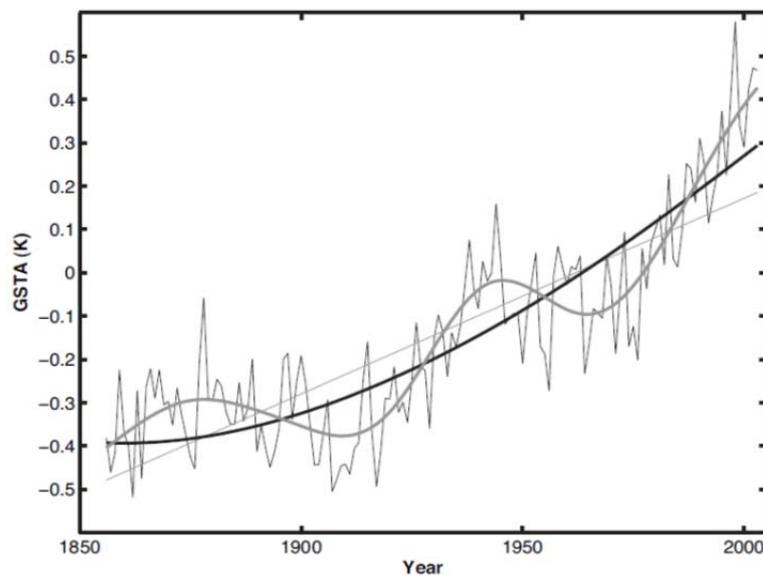
- ※ 在強度的變化方面，2005 年的一些研究認為自 1970 年以後西北太平洋熱帶氣旋強度及強烈熱帶氣旋個數有增加趨勢，並認為其反應了全球暖化的影響。此看法遭到一些研究的質疑，原因包括資料的長期一致性堪慮不足以就是否有顯著增加趨勢下結論，還有些研究認為該變化只是長週期多年代變異中的一部分，並非長期線性趨勢 (圖\_摘 5)。針對以上爭議，目前的共識是現有的觀測不足以讓吾人判斷這些變化是否和人為全球暖化有關。(本文 2.3.2 節)
- ※ 過去五、六十年 (約 1950 年代之後) 熱帶氣旋的路徑有兩次突然的遷移，約在 1976/1977 年及 1998 年左右，均較太平洋年代振盪的兩次氣候遷移 (regime shift) 延遲約兩年。路徑變異是否有顯著的線性趨勢則還不清楚。(本文 2.3.3 節)
- ※ 最近百年 (1902~2005) 登陸菲律賓及近六十年來 (1945~2004) 登陸東亞沿海各區域的熱帶氣旋個數無顯著線性趨勢。(本文 2.3.4 節)



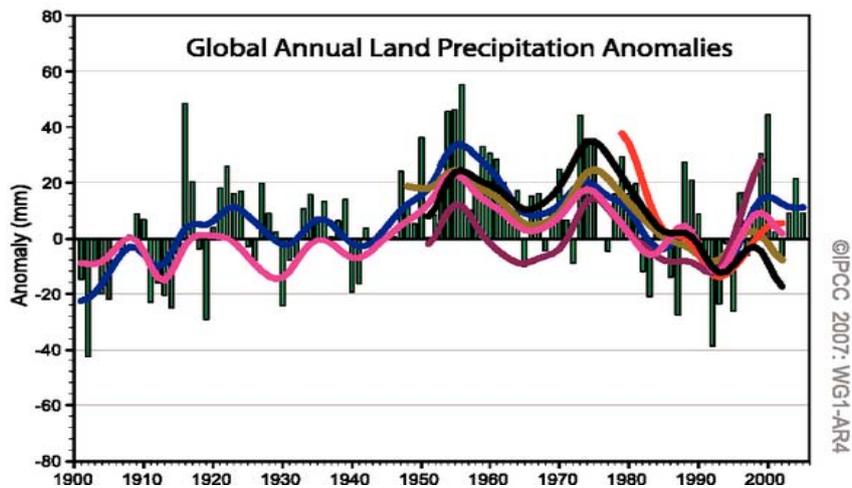
圖\_摘 5：每年潛在破壞力指標 (Potential Destruction Index, PDI)、西北太平洋強度至少達 Saffir-Simpson scale 等級四與等級五的熱帶氣旋年個數 (NCat45) 及每年 5 月至 11 月平均 (5°N~30°N、120°E~180°E) 的海溫距平 (SSTA) 長期變化。所有變數均已經相對各自的標準差經過標準化處理。摘自(Chan 2006)

## 年代際變化

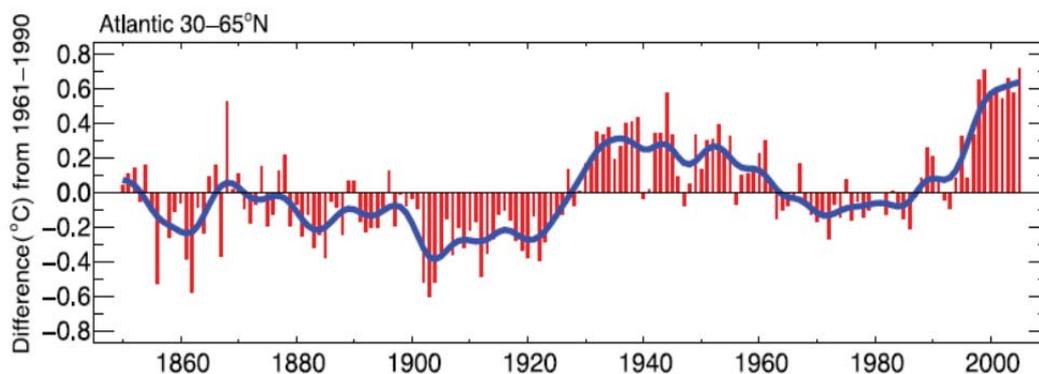
1. 地球氣候不斷的變化，呈現多重時間尺度的特性。過去一百多年的地球氣候除了有長達百年的暖化趨勢，亦呈現明顯的年代際變化，如二十世紀初至 1940 年代的暖化趨勢，1950 年代至 1970 年代的冷卻趨勢，以及 1980 年代以後更明顯的暖化趨勢 (圖\_摘 6)。降雨也呈現明顯的年代際變化，而且區域性強 (圖\_摘 7)。(本文 3.2 節)
2. IPCC 第四次評估報告對過去數十年全球暖化加速的看法，忽略了年代際振盪的貢獻。過去 30 年剛好處於大西洋多年代振盪朝正相位 (亦即溫度上升) 發展的時期 (圖\_摘 8)，加上全球溫度上升趨勢，因此顯得暖化速率特別快 (本文 3.2.1 節)。無論檢視過去氣候變化或推估未來氣候變遷趨勢，都需考慮年代際的影響，因為年代際振盪造成的是近期影響，人為溫室效應則是遠期影響。年代際振盪的影響不僅不可忽視，甚至可能提供較為準確的近期氣候推估。IPCC 已經將年代預報納為重要的研究方向，並將於第五次評估報告首次提出初步研究成果。(本文 3.6.2 節)



圖\_摘 6：全球平均地表溫度距平 (相對於 1961~1999 年平均值) 的逐年變化 (輕黑線)、線性迴歸線 (灰直線)、利用 Empirical Mode Decomposition (EMD) 求得的 overall adaptive trend (黑曲線)，以及多年代曲線 (overall adaptive trend 加上一個多年代振盪，厚灰曲線)。(摘自 Wu et al. 2007)

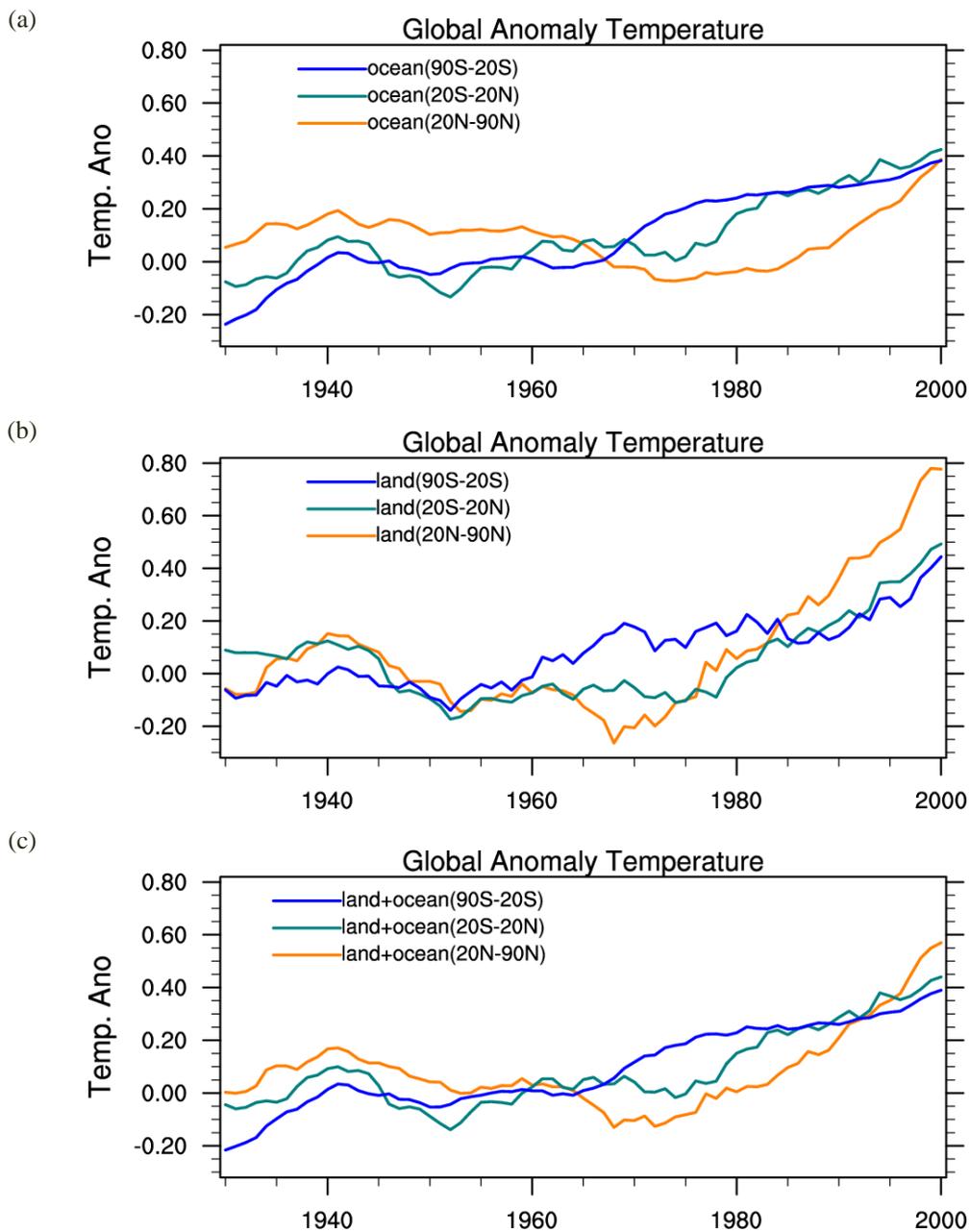


圖\_摘 7：全球陸地平均降雨相較於 1961~1990 年之間平均值的變化。(摘自 IPCC 第四次評估報告，圖 TS.9)



圖\_摘 8：北大西洋 30°N~65°N 平均海面溫度的逐年變化。(摘自 Trenberth et al. 2007)

3. 前項觀察與長期暖化趨勢的存在並不抵觸。年代際振盪以北半球最為明顯 (圖\_摘 9c)，南半球的海溫 (圖\_摘 9a) 與全球海面高度皆呈現顯著的長期上升趨勢與微弱的年代際振盪。理論上，如果人為溫室效應確實影響了地球氣候，海水溫度與熱容量是最容易延續該訊息的氣候變數，這是因為海水的熱容量遠大於氣體與土壤，具有較長的「記憶」。南半球的海溫與全球海面高度的顯著長期上升趨勢很可能反應了此一人為影響。(本文 3.5 節;3.6.1 節)



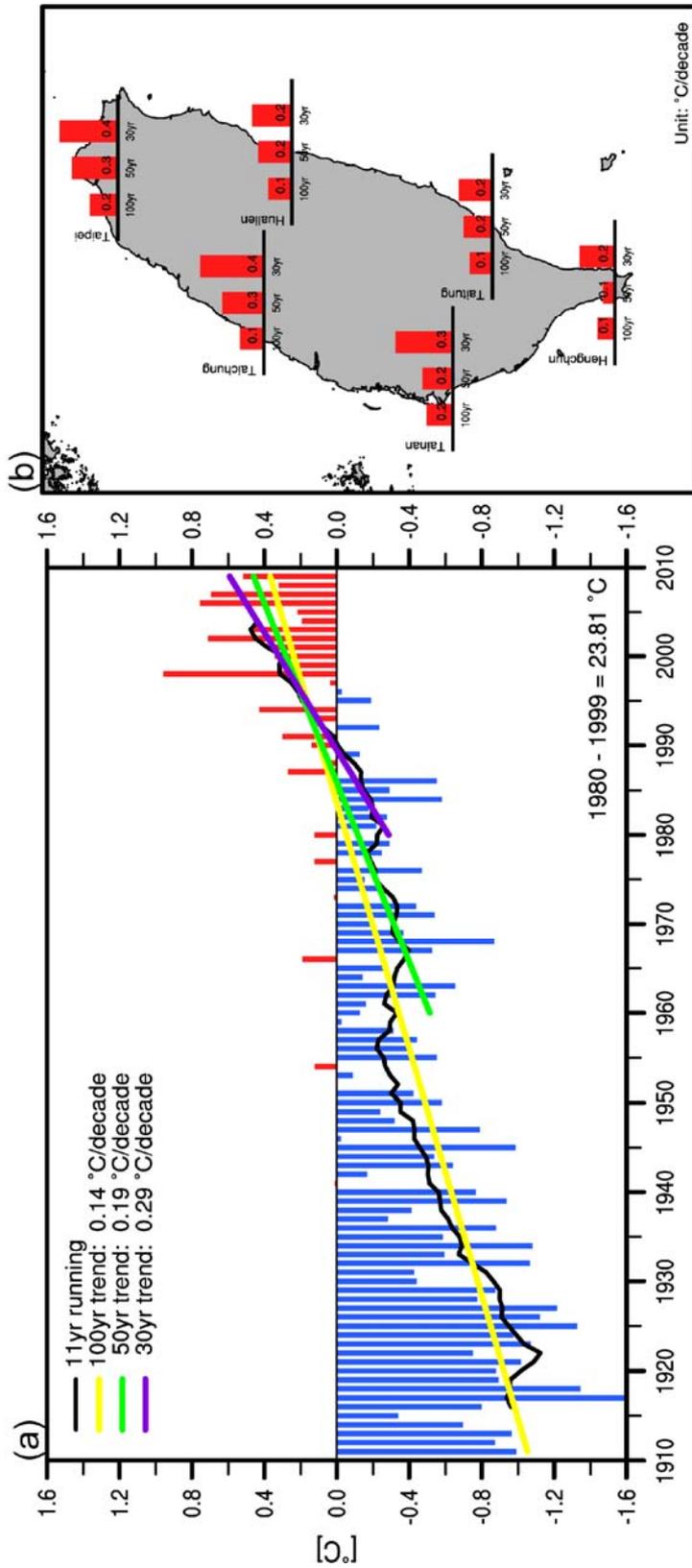
圖\_摘 9：南半球 (20°S~90°S)、熱帶 (20°S~20°N) 與北半球 (20°N~90°N) 的 (a)海洋、(b)陸地與 (c)海洋+陸地平均溫度的長期變化。(李明營提供)

4. 人造溫室氣體是過去數十年氣溫上升的主因之一。最近的觀測顯示，自京都議定書以來，全球溫室氣體的排放不但無法抑制，反而加速成長。人類排放的溫室氣體造成的溫室效應已經十分明顯，而且大多數氣候模式都顯示人為溫室效應的影響大於其他已知的自然因素，因此過去一百多年來的溫度上升有一部分受到人為溫室效應的影響是極其可能的。(本文 3.6.3 節)

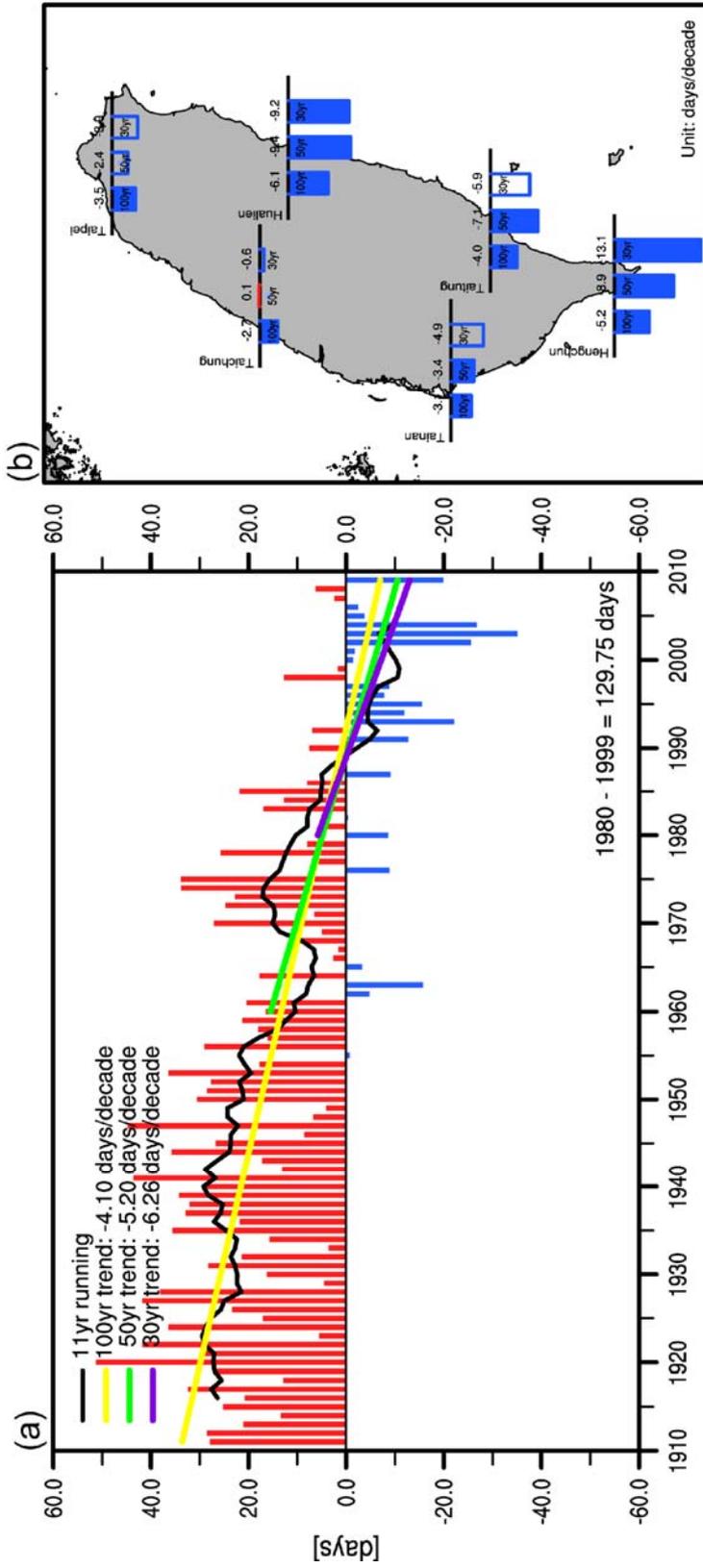
5. 依據 IPCC 的情境推估，在 2100 年暖化程度為 1.1°C 至 6.4°C。此一暖化幅度遠大於年代際振盪造成的溫度變化，也大於火山爆發帶來的短期冷卻。即使考慮未來如果發生像造成小冰期的 **Maunder Minimum**，其造成的全球冷卻效應約為 0.3°C，仍遠小於人為溫室效應造成的暖化。(本文 3.6.3 節)
6. 整體而言，如果溫室氣體的增加無法抑制，全球暖化程度將遠遠超過自然變化的幅度，無任何已知的過去百年來的自然變化可以抵銷。地球史上曾發生過的毀滅性災難如果再次發生，或許可以抑制全球暖化趨勢。但是，這類事件無法預知也非人類所樂見。抑制全球暖化以減緩對地球生態環境的可能衝擊，勢在必行。因此，如何透過節能減碳，加速抑制溫室氣體的排放，以便降低大氣溫室氣體濃度的增加速率，是目前人類面臨的最大的課題與挑戰。(本文 3.6.3 節)

## 臺灣氣候變遷

1. 本報告選用 6 個具有百年以上長期記錄的氣象測站 (臺北、臺中、臺南、恆春、臺東、花蓮)，4 個有 60 年風向風速資料的外島測站 (澎湖、東吉島、蘭嶼、彭佳嶼)，以及美國聯合颱風警報中心整理的颱風最佳路徑資料，期望用比較系統的方式，清楚顯示臺灣區域氣候變遷的特徵。分析結果以呈現近百年線性趨勢達到統計檢定的結果為主，內容包含平均氣候的長期變化趨勢與極端事件的變異特徵兩大部分，前者主要計算了 100 年 (1911~2009)、50 年 (1960~2009)、30 年 (1980~2009) 的線性變化趨勢。
2. 溫度：臺灣暖化現象十分明顯，不論是 100 年、50 年和 30 年的年平均溫度變化都有顯著的上升趨勢 (圖\_摘 10)，臺北在 3 個不同時期的升溫速率都是 6 站中最快，恆春的增溫幅度最小。近 30 年，西岸測站的增溫趨勢明顯高於東岸。在季節特性方面，百年變化以秋季溫度的暖化幅度最大，但近 30 年的變化以冬季的增溫幅度大於其他三季。(本文 4.3.2 節 A(b))
3. 降雨：全島平均年總降雨日數不論是 100 年、50 年、30 年的變化都有明顯下降趨勢 (圖\_摘 11)，100 年趨勢為每 10 年減少 4 天，30 年則增至每 10 年減少 6 天，最近一次發生的 2002 年至 2004 年乾旱事件則是百年以來兩日最少的 3 年。(本文 4.3.2 節 A(a) ; 4.2.6 節)

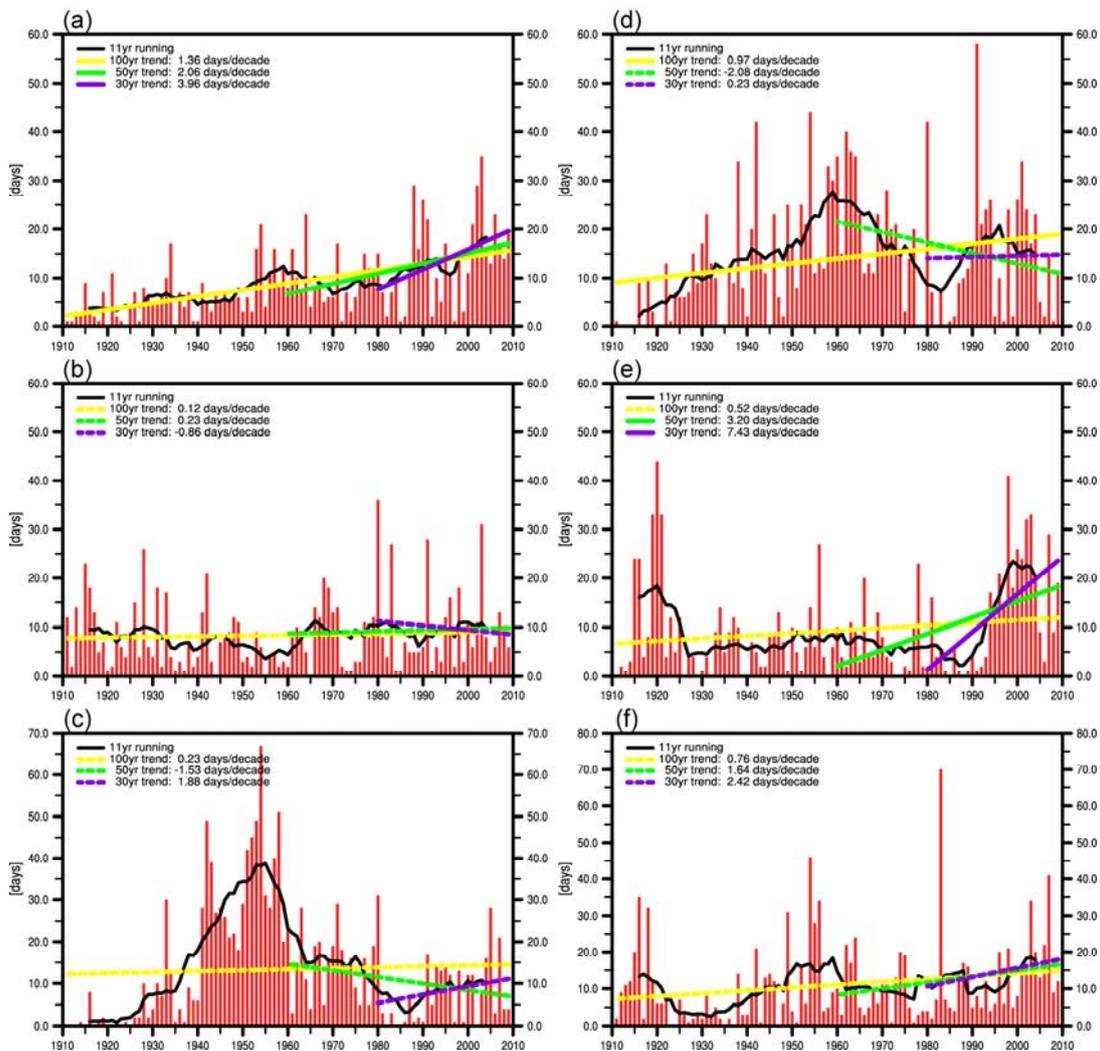


**圖\_摘 10：** 臺灣年平均溫度之時間序列與變化趨勢。(a)1911~2009 年臺灣年平均溫度，是臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮和臺東 6 個測站溫度的平均，黑線表示 11 年滑動平均的結果，黃線為 100 年迴歸線，綠線為 50 年，紫線為 30 年，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定。根據各迴歸線斜率計算的變化趨勢標示於圖左上角，1980~1999 年氣候基期的年平均溫度標示在圖右下角。(b)長條圖從左到右是各測站的 100 年、50 年、30 年變化幅度。實心長條圖表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，空心長條則表示未通過檢定。(TCCIP 計畫提供)



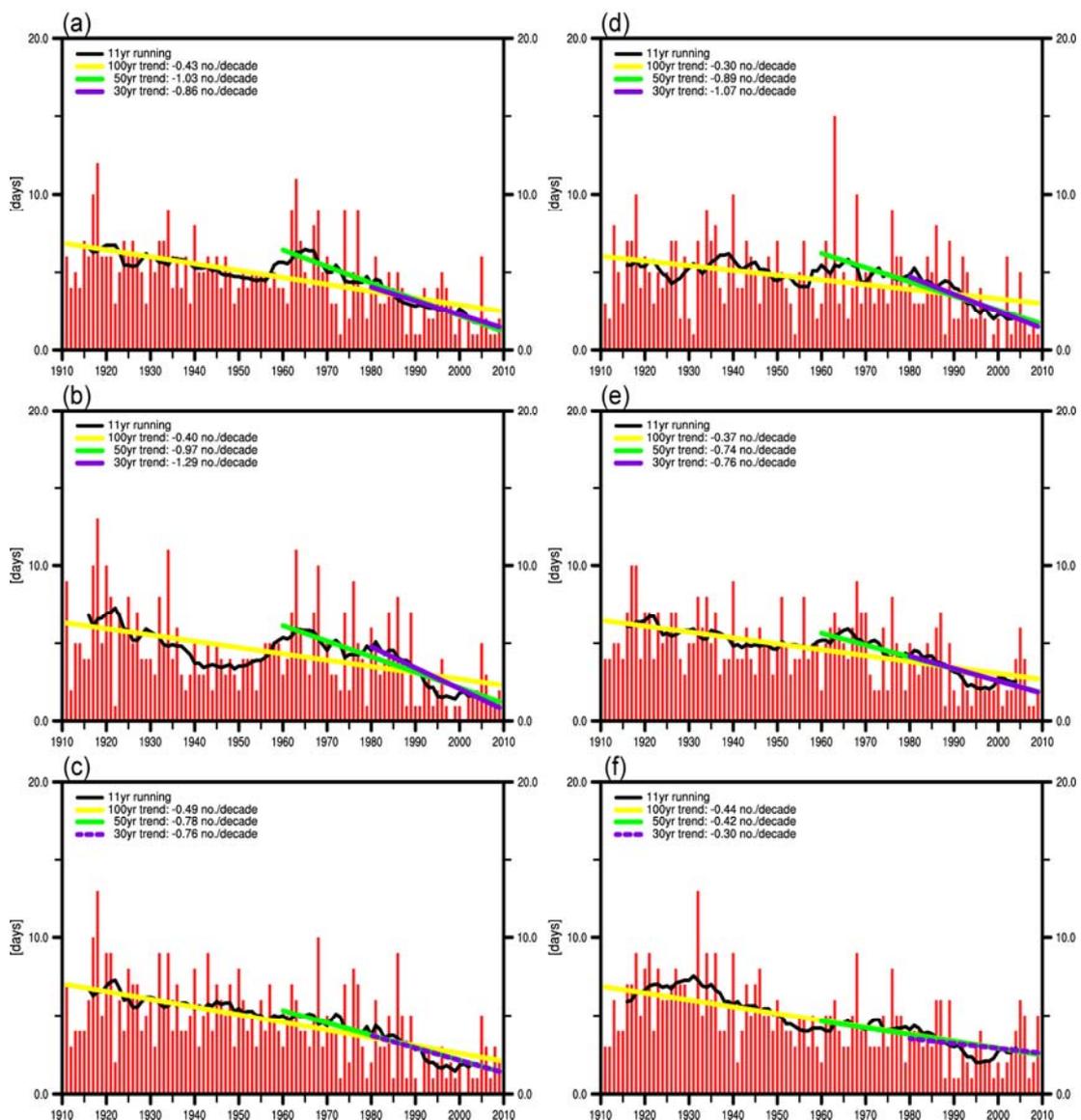
圖\_摘 11：臺灣年總降雨日數（日雨量 $\geq 0.1\text{mm}$ ）。黑線表示 11 年滑動平均的結果，黃線為 100 年迴歸線，綠線為 50 年，紫線為 30 年，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定。根據各迴歸線斜率計算的變化趨勢標示於圖左上角，1980~1999 年氣候基期的年總雨量數值標示在圖右下角。(b)長條圖從左到右是各測站的 100 年、50 年、30 年變化幅度。實心長條圖表示變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，空心長條則表示未通過。(TCCIP 計畫提供)

4. 極端高溫事件：6 個測站的高溫日數百年變化都呈現增加的趨勢，以臺北站增加幅度最大，約為每 10 年增加 1.4 天。臺北站 50 年的極端高溫日數上升速度為每 10 年 2 天，30 年的上升速度則為每 10 年 4 天，2000 年至 2009 年的高溫日數比 1911 年至 1920 年平均增加了 10 天以上，變化相當明顯 (圖\_摘 12)。(本文 4.3.2 節 B(d))

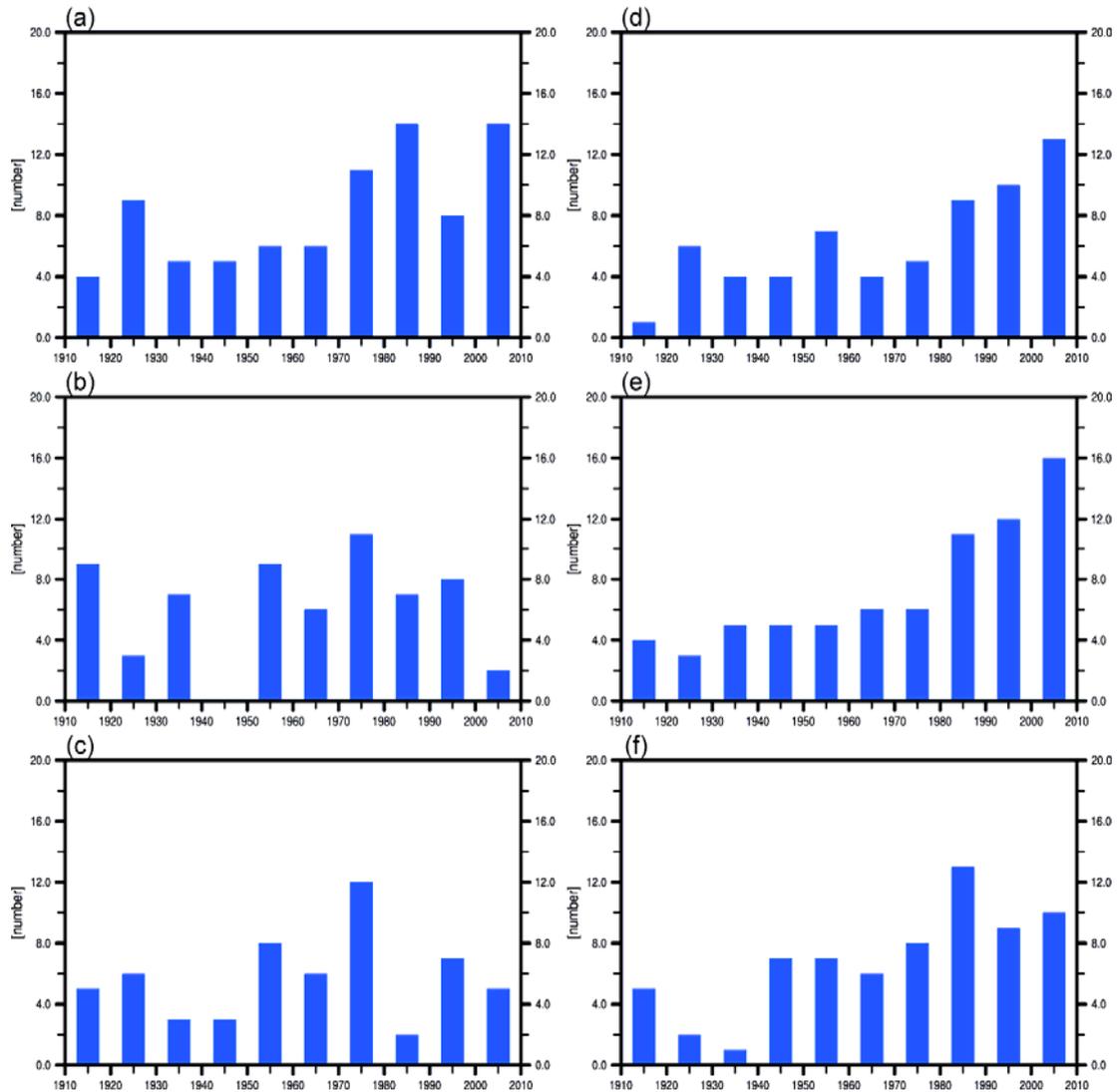


圖\_摘 12：1911~2009 年每年極端高溫日數之時間序列與變化趨勢，(a) 臺北、(b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮、(f) 臺東。極端高溫辨識的門檻值是按照各站夏季 (6~8 月) 溫度機率分布的高溫 90% 定義。黑線表示 11 年滑動平均的結果，黃線為 100 年迴歸線，綠線為 50 年，紫線為 30 年，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定，根據各迴歸線斜率計算的變化趨勢標示於圖左上角。(TCCIP 計畫提供)

5. 極端低溫事件：6 個測站的 100 年、50 年、30 年線性變化趨勢都為下降，臺中、恆春、花蓮的下降速度都以近 30 年最大，50 年次之，100 年最小；臺北、臺南則是近 50 年的下降速度大於近 30 年。臺北與臺中寒潮事件以 1915 年至 1925 年與 1960 年至 1970 年發生比較頻繁，1950 年前後寒潮事件較少。在 1985 年之後，6 個測站的寒潮事件都呈現明顯偏少，這樣的情況在 1985 年以前不曾出現過 (圖\_摘 13)。(本文 4.3.2 節 B(d))
6. 極端偏乾事件：以連續不降雨日數極端偏長定義的極端偏乾事件分析，顯示恆春與花蓮在近 30 年出現頻率都高於其他時期 (圖\_摘 14)。(本文 4.3.2 節 B(c))

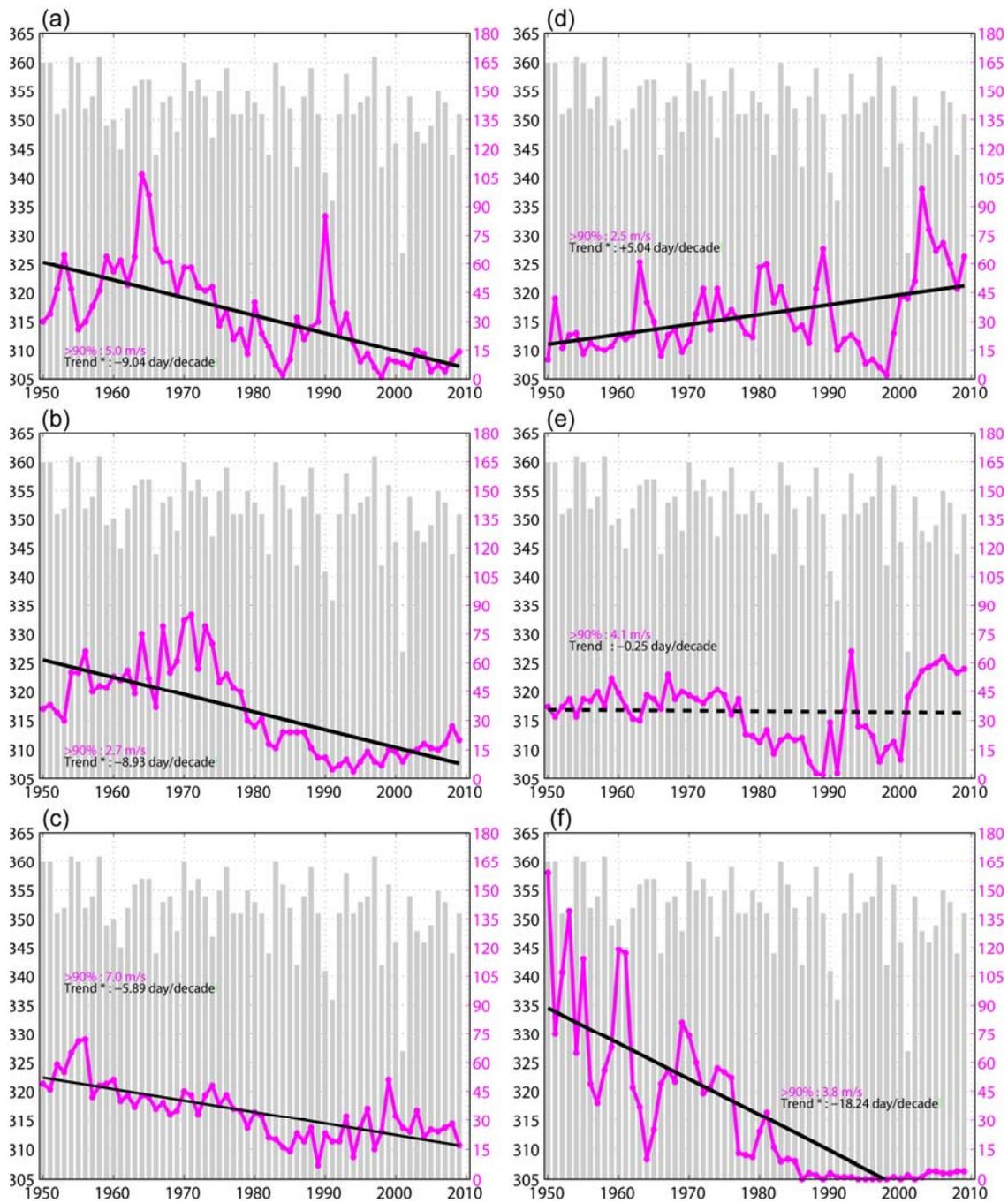


圖\_摘 13：同圖\_摘\_12，但為每年寒潮發生次數。(TCCIP 計畫提供)

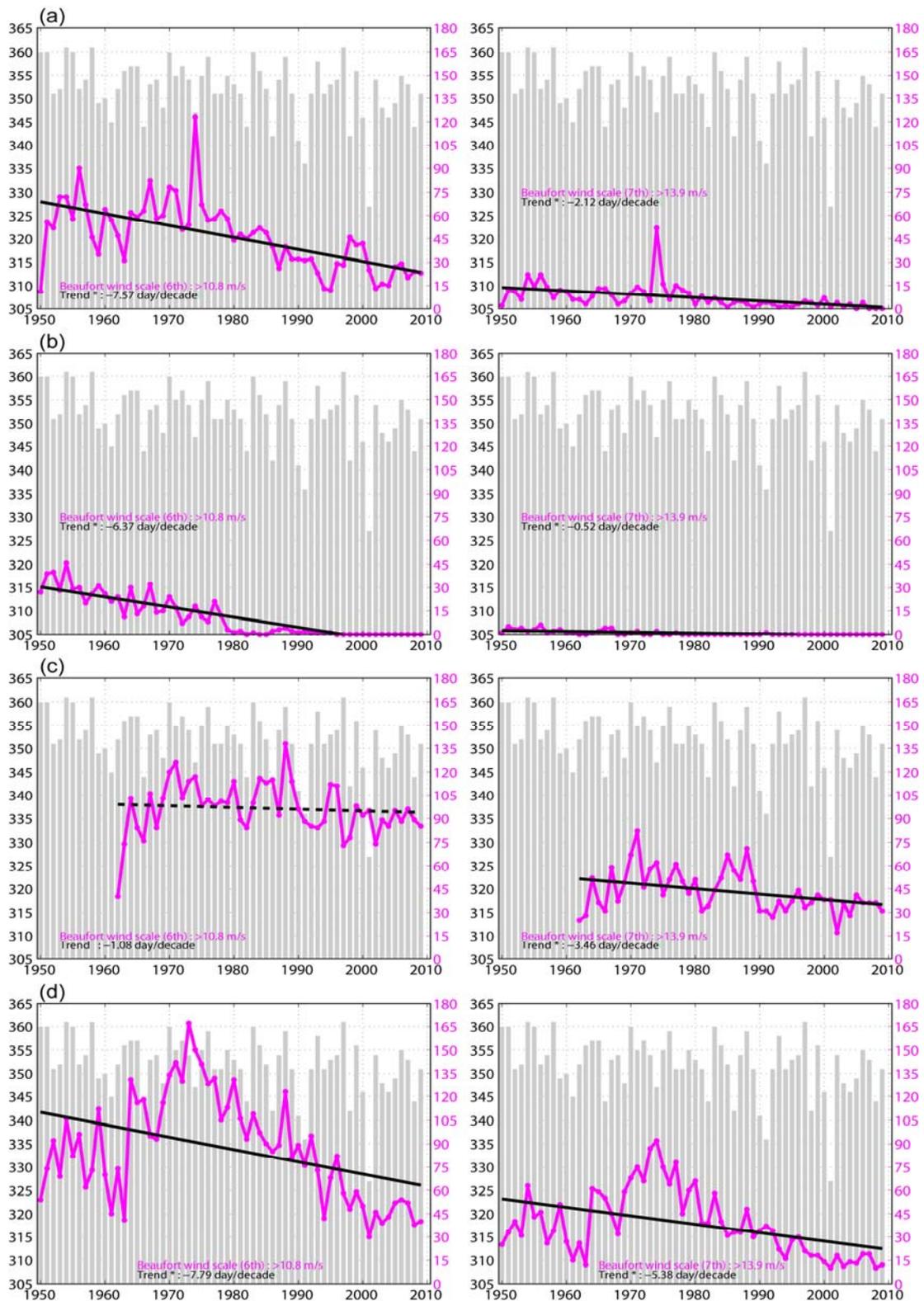


圖\_摘 14：以 10 年為期距統計乾期超過 2 年重現期門檻值的發生次數，分別為 (a) 臺北、(b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮、(f) 臺東。(TCCIP 計畫提供)

7. 風速：將強風日數變化分為有颱風影響和沒有颱風影響兩部分，沒有颱風影響下的強風日數變化方面，除宜蘭強風日數有增加的情形之外，本島其他 5 個測站的強風日數皆呈現遞減的趨勢，臺東日數的減少趨勢最為明顯 (圖\_摘 15)。外島 4 個測站無論是 6 級以上或 7 級以上的強風日數也都呈現減少的趨勢 (圖\_摘 16)。有颱風影響的強風日數分析結果顯示，除宜蘭和花蓮強風日數為增加的趨勢外，其餘 4 站皆呈現減少的趨勢。而外島除了澎湖之外，強風日數呈現增加的趨勢，可能是颱風強度增強的結果。(本文 4.3.2 節 A(c))

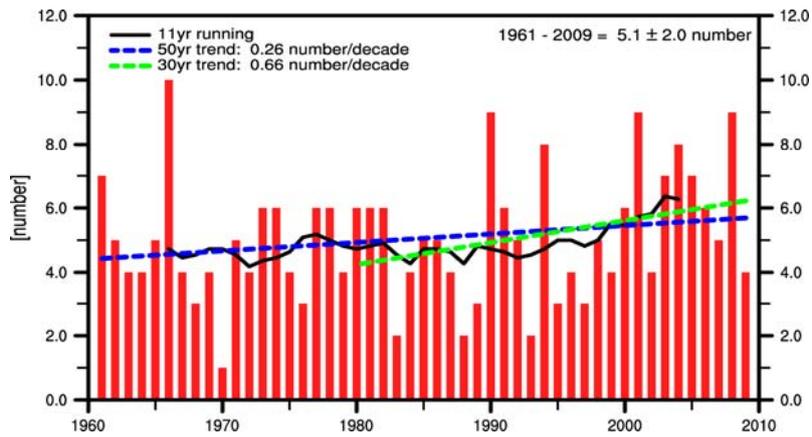


圖\_摘 15：1950~2009 年本島 6 個測站沒有颱風影響下的強風日數統計，分別為 (a) 臺北、(b) 臺中、(c) 恆春、(d) 宜蘭、(e) 花蓮、(f) 臺東。灰色長條為每年不受颱風影響的總日數，紅線為每年強風出現的日數，黑線為 60 年迴歸線，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定。(TCCIP 計畫提供)

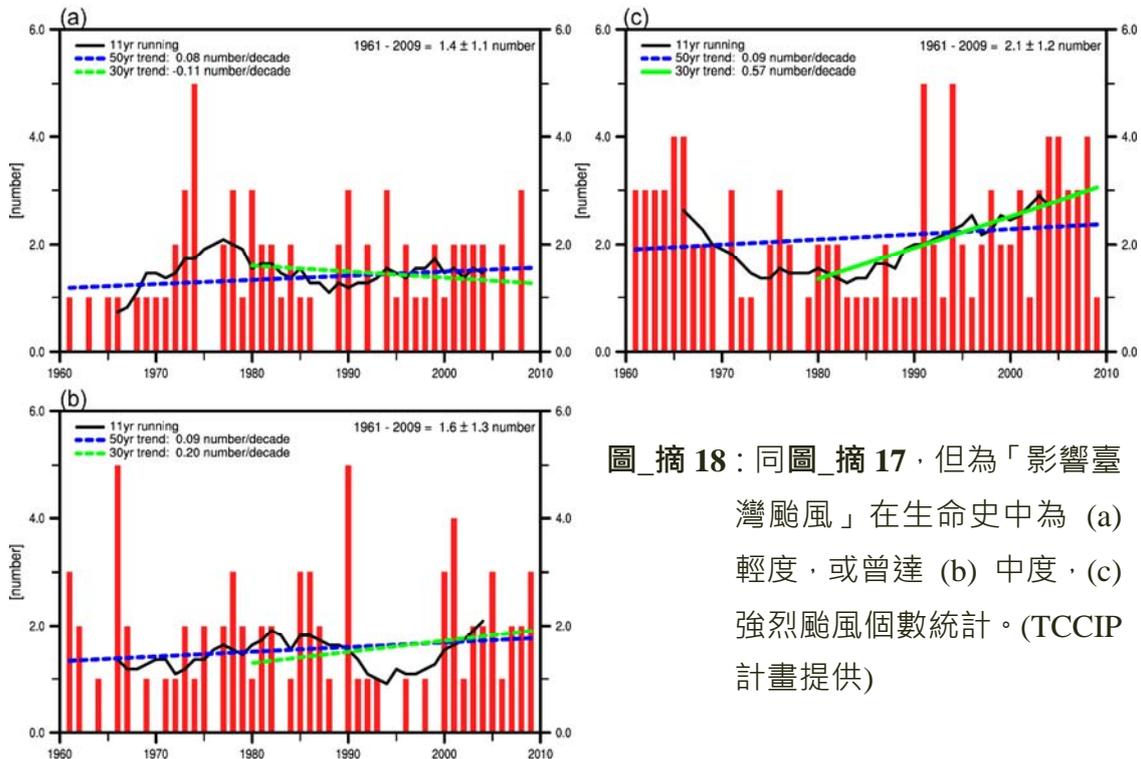


圖\_摘 16：同圖\_摘 15，但為外島 4 個測站 6 級以上 (左) 和 7 級以上 (右) 的強風日數，分別為 (a) 彭佳嶼、(b) 澎湖、(c) 東吉島、(d) 蘭嶼。(TCCIP 計畫提供)

8. 颱風：1990 年以後的颱風個數和 1961 年至 1989 年相比有增多的現象，且在 2000 年出現明顯增多的轉折 (圖\_摘 17)，這與西北太平洋颱風平均路徑向北偏移有關。另外，1980 年以後的侵臺颱風其生命歷程中達到強颱風的比例明顯增高 (圖\_摘 18)，此現象以及颱風路徑的北偏均與西北太平洋海溫與颱風的年代際變化密切相關。(本文 4.2.5 節；4.3.2 節 B(b)；2.3.2 節)



圖\_摘 17：1961~2009 年每年「影響臺灣颱風」的個數。黑線表示 11 年滑動平均結果，藍線為 50 年迴歸線，綠線為 30 年，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定，根據各迴歸線斜率計算的變化趨勢標示於圖左上角。(TCCIP 計畫提供)

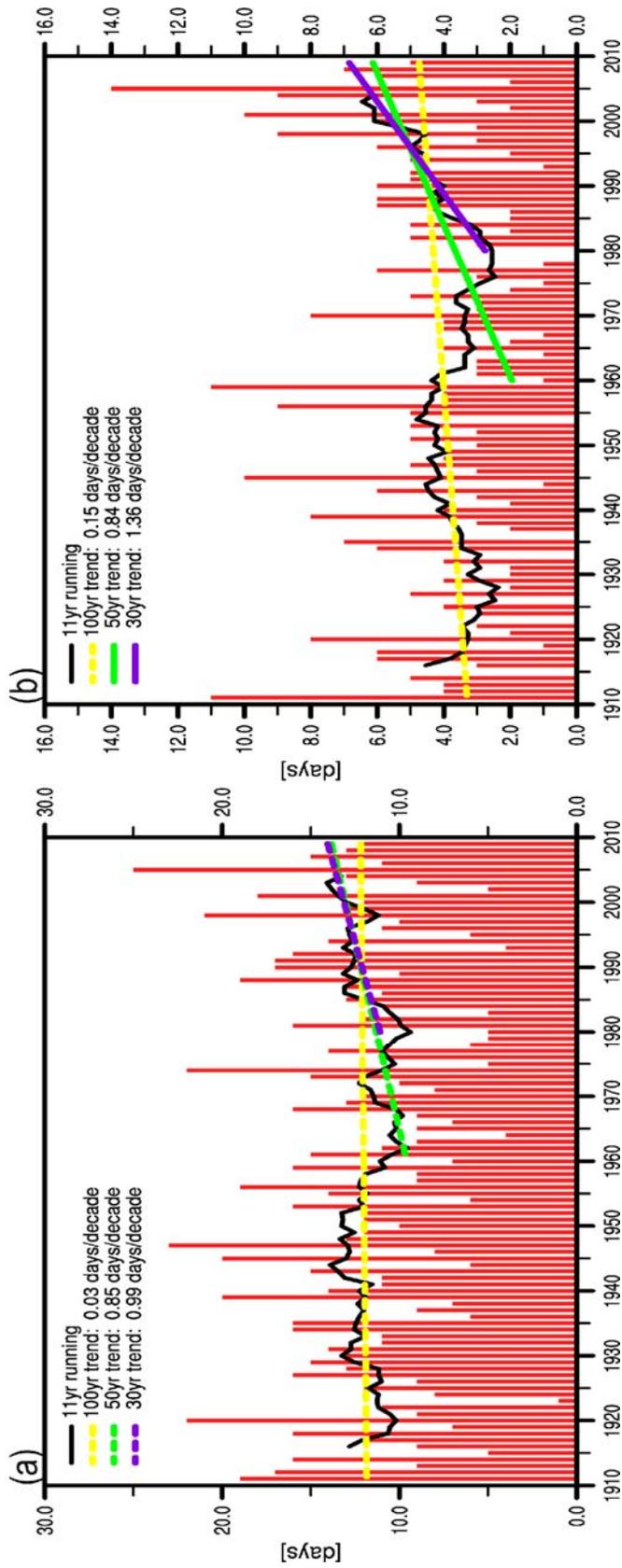


圖\_摘 18：同圖\_摘 17，但為「影響臺灣颱風」在生命史中為 (a) 輕度，或曾達 (b) 中度，(c) 強烈颱風個數統計。(TCCIP 計畫提供)

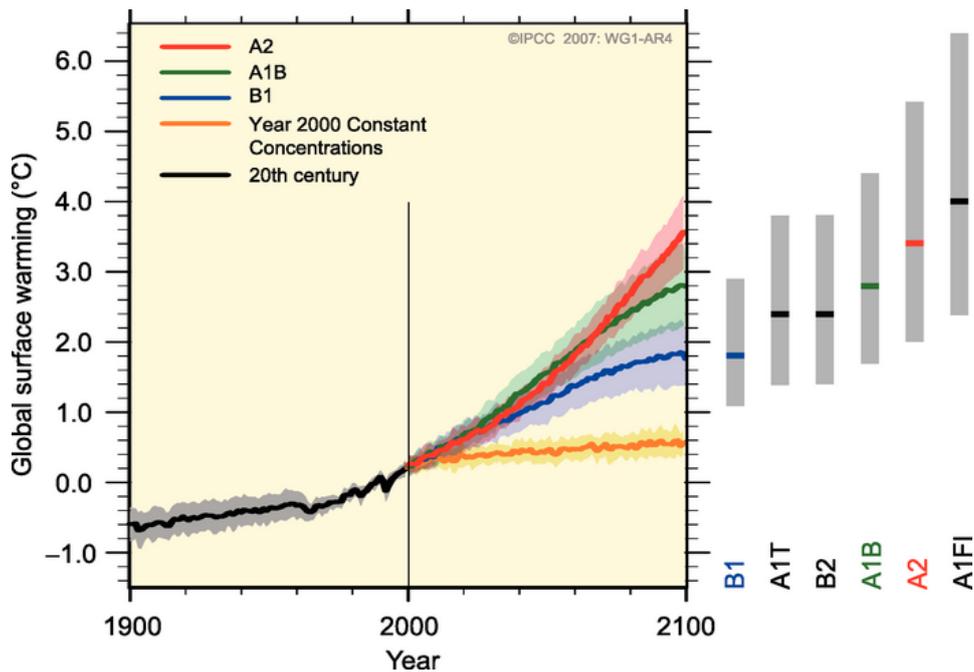
9. 降雨強度：臺灣大豪雨日數在近 50 年和近 30 年有明顯增多的趨勢，大約有 50~60 年週期的年代際變化現象，未來是否持續上升，目前仍無法判斷。臺灣小雨日數則大幅度減少，百年趨勢為每 10 年減少 2 天，而近 30 年增加為每 10 年減少 4 天。另外，大豪雨日數也有以大約 10~20 年為一期的長週期變化現象，1920~1935 年與 1965~1985 年大豪雨日數都偏低，1940~1960 年和 1985 年之後大豪雨日數都偏高，然而不論在日數偏多或日數偏少的年代，年與年之間的差異還是相當明顯 (圖\_摘 19)。(本文 4.3.2 節 B(a); 4.3.2 節 A(a))

## 未來氣候變遷推估

1. 對於未來長期氣候變遷的推估，主要的科學工具是運用全球氣候模式推估人為對未來氣候的可能影響，而前提是依據世界未來的人口、經濟、社會、環境的可能發展情境，推估影響氣候系統輻射平衡的溫室氣體、氣溶膠等在大氣中的濃度變化。由於各個氣候模式的結構與使用參數的不同，以及氣候系統的自然變動與反饋效應無法準確估計，使得科學家無法精準地估計全球平均近地表氣溫的未來百年變化。雖然無法確定增溫程度，所有研究一致指出在人為影響下，全球持續暖化的可能性極高。利用不同的情境假設，氣候模式估計的全球氣溫變化的氣候平均值最佳估計為增暖 2.8°C，而可能範圍是從增暖 1.8°C 至 4.0°C 之間 (圖\_摘 20)。(本文 5.3.1 節)
2. 近地表氣溫變暖的空間分布特性方面 (圖\_摘 21)，氣候模式的推估是在本世紀末時，陸地與北半球的極區溫度上升較顯著。同時極區的溫度上升又以冬季較大，夏季較小。另一個全球氣溫因應溫室氣體增加的變化空間分布特徵是，對流層的增溫與平流層的冷卻，而且透過熱帶地區的對流傳送，熱帶上對流層的增溫又略高於近地表的暖化。(本文 5.3.1 節)
3. 全球平均海平面上升，綜觀不同的未來發展情境，IPCC 推估在 2090~2099 年，全球海平面上升的範圍為 18cm 至 59cm，最可能的變化範圍是上升 30cm 至 40cm，而且最主要的貢獻是來自於伴隨著海水溫度變暖時的膨脹，海冰與陸地冰川、冰帽的融化變動的影響有限，南極大陸上的冰雪累積甚至可能導致海平面下降。由於前述估計並未考慮冰層的動力問題，且吾人對冰層變化機制的瞭解有限，因此許多專家認為這些數據很可能低估了可能的上升速率。最近的觀測發現近年來的海面上升速率逼近 IPCC 估計值

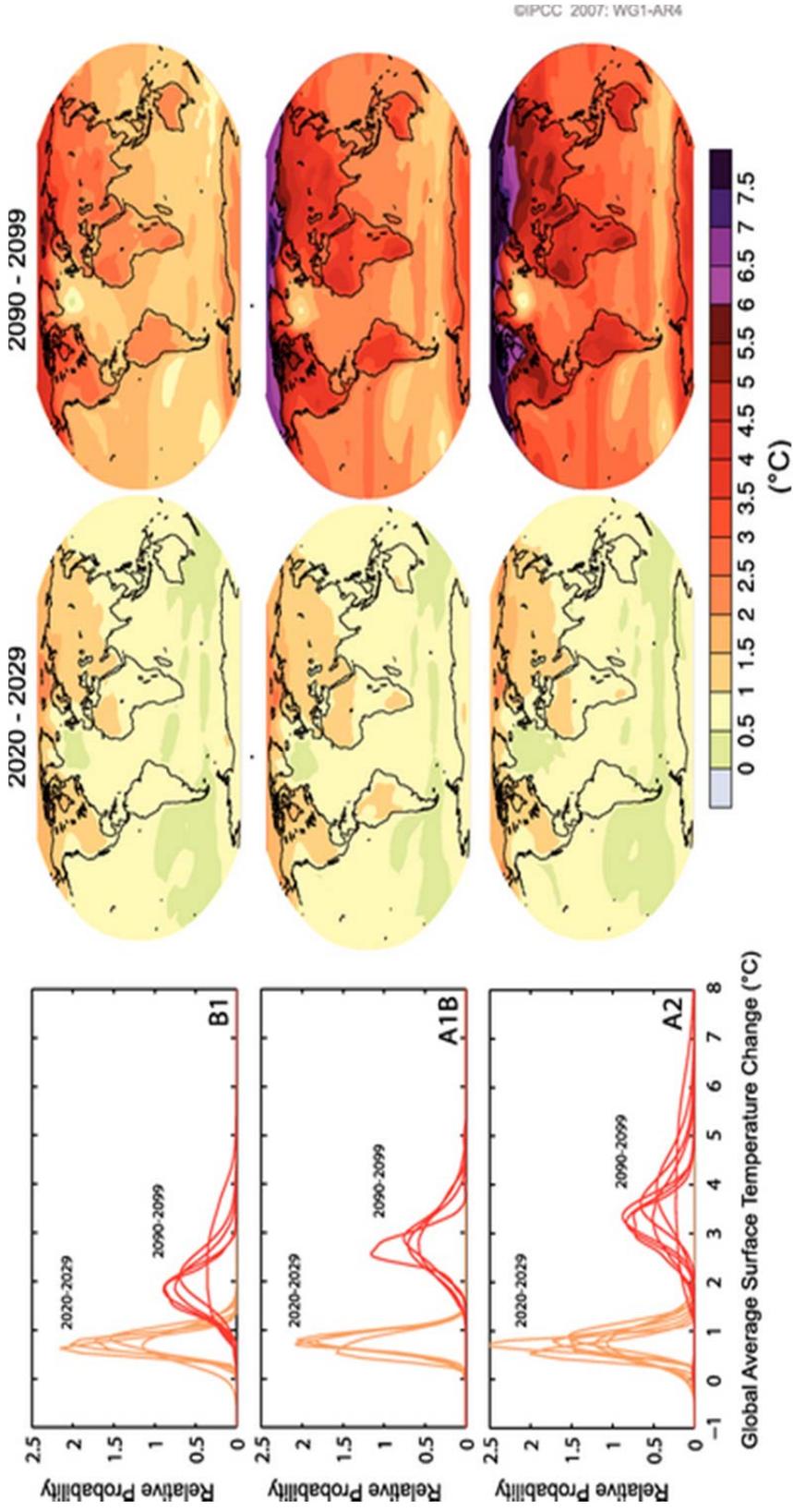


圖\_摘 19：統計 1911~2009 年以臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮和臺東 6 個測站總體為代表的臺灣地區 (a) 豪雨 (日雨量 $\geq 130$  mm)、(b) 大豪雨(日雨量 $\geq 200$  mm) 發生日數。黑線表示 11 年滑動平均的結果，黃線為 100 年迴歸線，綠線為 50 年，紫線為 30 年，實線表示線性變化趨勢通過了 95% 的信心度檢定，虛線則表示未通過檢定，根據各迴歸線斜率計算的變化趨勢標示於圖左上角。(TCCIP 計畫提供)



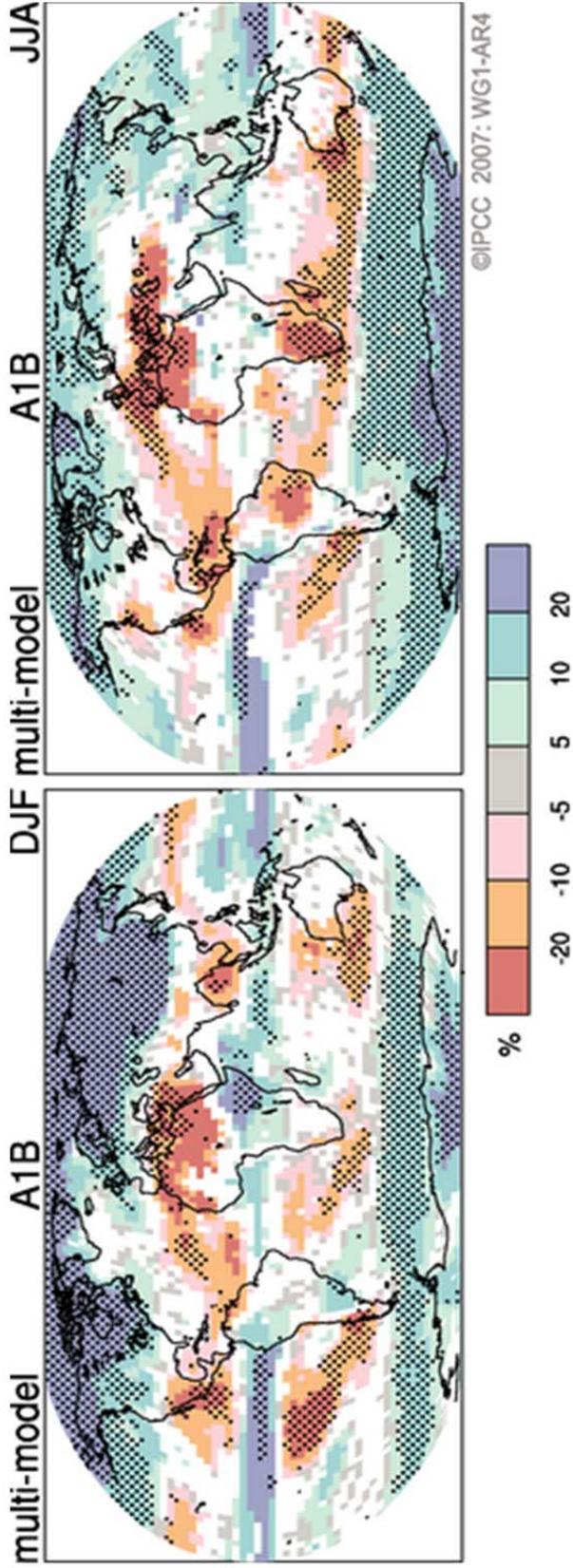
圖\_摘 20：全球平均近地表氣溫隨時間變化的情形，粗實線為多模式的系集平均結果，黑色是針對 20 世紀的模擬，其他不同顏色代表未來發展情境的推估模擬，實線上下的陰影區代表模式間差異的正負一個標準差。右側的灰色區塊是各個未來發展情境所對應的可能範圍，而區塊內的黑線則是該情境氣溫上升量的最佳估計（摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report，Figure SPM.5）。

的上限，北冰洋海冰融化速率也比 IPCC 預估快了許多。2009 年由一群科學家主動發佈的「哥本哈根診斷」(The Copenhagen Diagnosis) 參考了 2007 年 IPCC 報告之後的最新研究，認為二十一世紀末海面上升的幅度應是該報告中的兩倍，甚至有研究認為上限可能是 2 公尺。這方面的研究進展快速，數據與預估在未來幾年可能會不斷更新，國內應密切注意這方面的發展。長期而言，格陵蘭的陸冰大量融化固然可以造成海平面的巨幅上升達 7 公尺，不過以所推估的全球氣候變遷下，如此大規模融化發生在本世紀末的可能性微乎其微，除非是現階段的極區冰雪動力模式還不成熟，忽略了重要的物理過程，而使推估量不足。由於海平面上升的主要原因是海水變暖而膨脹，而海洋深層對氣候的緩慢反應，估計即使溫室氣體含量在大氣中穩定後，海平面依舊會持續緩慢上升達數百年以上。(本文 5.3.1 節)



圖\_摘 21：21 世紀早期與晚期的近地表氣溫上升的分布圖，中間與右側分別代表 2020~2029 年與 2090~2099 年的模式系集平均結果，而上中下圖則分別代表 B1、A1B、A2 的未來發展情境。左側代表的是相對應的兩個時期與不同情境，透過不同複雜程度的氣候模式所估計的不確定性的機率分布（摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report，Figure SPM.6）

4. 全球平均降水量在 21 世紀呈現隨時間增加的趨勢，意味著全球水循環的加強，變化的幅度大約是每 1°C 的暖化伴隨 1% 至 2% 的降水量增加，相對於大氣中水氣量 6% 至 7% 的增加，降水的增加量較小，顯然必須同時考慮大氣環流系統的變化，特別是主宰熱帶地區降雨的哈得雷環流與沃克環流。值得注意的是，目前的氣候模式明顯低估極端降雨強度，前述變化量是否可靠，仍有待探討。這是氣候變遷推估研究中最重要之議題之一。(本文 1.2.2 節 B ; 5.3.1 節)
  
5. 在降水變化的空間分布特性方面 (圖\_摘 22)，由於向極區的水氣傳送量增加，高緯度的降水量非常可能增加，且冬季的增加比夏季略高，而多數副熱帶的陸地則有降水變少的可能性，鄰近赤道的模式系集平均降雨也有增加的趨勢，但是模式間的差異比較大。平均而言，中緯度的主要風暴路徑有北移的情形，哈得里環流下沈區的往北擴張，將造成有些區域的沙漠化。東亞地區的降雨，主要是受到季風環流以及水氣傳送量多寡的影響，從氣候模式的模擬結果顯示，熱帶大尺度環流與亞洲季風環流在暖化的情境下，似乎都有減弱的趨勢。在冬季，雖然亞洲地區的高緯度降水量增加的幅度相當大，但是從西太平洋經過臺灣到南海、中南半島、孟加拉灣以至阿拉伯半島等地區，在多數氣候模式模擬推估的未來降水量卻是降低的。(本文 5.3.1 節)
  
6. 在影響人類生活與社會經濟更顯著的極端天氣方面，模式則是推估在未來氣候變遷的影響下，非常可能有更多而且更劇烈的熱浪與豪雨事件發生，而同時連續不降雨日的平均時間也會拉長，造成降雨在時間分布的變異量更大，許多地方可能需要更積極的水資源管理。極端日降雨量根據模式的推估，在本世紀末，除了在副熱帶的少雨區外，幾乎所有的地區都是增加的，中高緯度的增加平均為 10~20%，赤道鄰近則可以超過 30% 以上。在颱風的發生個數與強度方面，目前多數的模式模擬實驗的共同特徵是，在全球暖化影響下，未來颱風生成的個數，由於整個熱帶的穩定度因為暖化後的溫度剖面改變而增加，因此生成數目有減少的趨勢，不過在強度方面，不管是中心最低氣壓或最大風速都在暖化環境中則有加強的趨勢，颱風中心附近降雨量也有顯著的增加。目前的氣候模式仍無法精準模擬颱風等劇烈天氣現象，颱風特性的未來變遷趨勢，仍有待進一步確認。(本文 5.3.1 節)



圖\_摘 22: 在 A1B 的未來發展情境下，2090 年~2099 年模式系集平均降水量相對於 1980 年~1999 年的百分比變化。左側與右側分別代表北半球的冬季與夏季。白色區域是少於 66% 的模式有相同的變化符號，加註點區則是 90% 以上的模式至少變化的符號相同 (摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report · Figure SPM.7)

7. 對於氣候變遷的影響、調適的評估，最重要的指標是每個局部地區氣溫與降水的未來變化，而非全球平均氣溫的改變。本報告運用統計降尺度技術，以全球氣候模式模擬區域化的結果為基準，分析未來臺灣氣候變遷的可能性機率分布範圍 (本文 5.1.3 節；5.4.1 節；5.4.2 節)。分析結果與全球氣候模式所模擬的區域特徵相似，但提供更多細節。以 A1B 單一未來發展情境為例，下列是未來臺灣氣候變遷推估的主要發現：(本文 5.4.3 節)
- ※ 在近地表氣溫變化部份 (表\_摘 1)，所有氣候模式所推估的區域季節平均變化中位數大約是介於 2.5°C 至 2.7°C 之間，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，而春季較其他季節略低。約有一半的模式認為未來臺灣各區域季節平均變化主要是介於 2.0°C 至 3.0°C 之間。90% 以上的模式推估區域季節平均變化將在 1.7°C 以上或小於 3.4°C，同樣是北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高。
- ※ 在降水量平均百分比變化方面 (表\_摘 1)，依多氣候模式系集分布情形推估，臺灣北、中、南、東四個主要分區未來冬季平均雨量多半都是減少的，約有一半的模式的推估是介於 -3% 至 -22% 之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似。未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，則有超過 3/4 的模式推估降水都是增加，約有一半的模式認為未來夏季平均變化主要是介於 +2% 至 +26% 之間。對原本就是夏季多雨、冬季少雨的中南部地區，這些推估結果顯示豐、枯水期的降雨量差距愈來愈大，未來如何調配豐枯水期的水資源，值得重視。
8. 對於未來臺灣近地面氣溫變遷推估而言，從區域平均到個別網格點，無論是月、季或是年平均的氣候平均氣溫變化，在 21 世紀末的暖化幅度都遠超過模式與統計降尺度方法的誤差，必須嚴正以對。未來臺灣降雨變遷推估的應用，必須注意其變化幅度往往未必具有統計上的顯著性，相關結果可靠性的信心較為不足。(本文 5.4.2 節)

**表\_摘 1：AIB 未來發展情境所對應的可能未來氣候變遷範圍在臺灣四個分區的季節氣候平均變化 (2080~2099 年減去 1980~1999 年平均)，表中標題列中的 10、25、50、75、90 分別代表該區該季節平均值統計機率密度分布的不同百分位值。降水量變化部分有標記顏色的表示其至少有 3/4 以上的模式都有相同的符號，藍色為降水量增加，橘色為減少。**

區域	季節	近地表氣溫平均變化 (°C)									降水量平均百分比變化 (%)								
		最小	10	25	50	75	90	最大	最小	10	25	50	75	90	最大				
北台灣	冬(DJF)	1.9	1.9	2.1	2.7	3.1	3.4	3.8	-44	-29	-20	-13	-3	7	33				
	春(MAM)	1.7	1.8	2.2	2.6	2.9	3.4	3.9	-31	-24	-14	-8	6	17	36				
	夏(JJA)	1.7	1.8	2.2	2.7	3.0	3.3	4.0	-15	-12	-1	14	29	46	64				
	秋(SON)	1.6	1.8	2.2	2.6	3.1	3.3	3.8	-33	-25	-10	8	21	28	34				
中台灣	冬(DJF)	1.8	1.9	2.0	2.6	3.0	3.3	3.7	-49	-33	-22	-15	-4	6	22				
	春(MAM)	1.6	1.8	2.1	2.6	2.9	3.3	3.8	-36	-25	-16	-10	3	17	41				
	夏(JJA)	1.8	1.8	2.2	2.7	3.0	3.2	4.0	-15	13	2	14	26	64	69				
	秋(SON)	1.6	1.8	2.2	2.6	3.0	3.3	3.7	-34	-23	-7	11	25	31	45				
南台灣	冬(DJF)	1.7	1.7	2.0	2.5	2.9	3.2	3.4	-47	-34	-22	-13	-5	5	8				
	春(MAM)	1.5	1.8	2.0	2.5	2.8	3.0	3.6	-41	-26	-21	-14	-5	22	34				
	夏(JJA)	1.7	1.7	2.2	2.5	2.9	3.2	4	-20	-19	7	16	26	69	76				
	秋(SON)	1.5	1.7	2.1	2.6	2.9	3.1	3.6	-28	21	-8	13	25	36	55				
東台灣	冬(DJF)	1.8	1.8	2.0	2.6	3.0	3.3	3.7	-44	-31	-20	-12	-3	5	17				
	春(MAM)	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.3	3.8	-37	-25	-18	-11	1	20	36				
	夏(JJA)	1.7	1.7	2.2	2.6	2.9	3.2	4.0	-17	-15	3	15	26	57	64				
	秋(SON)	1.6	1.8	2.1	2.6	3.0	3.2	3.7	-30	-23	-10	10	23	33	43				

## 氣候變遷與災害

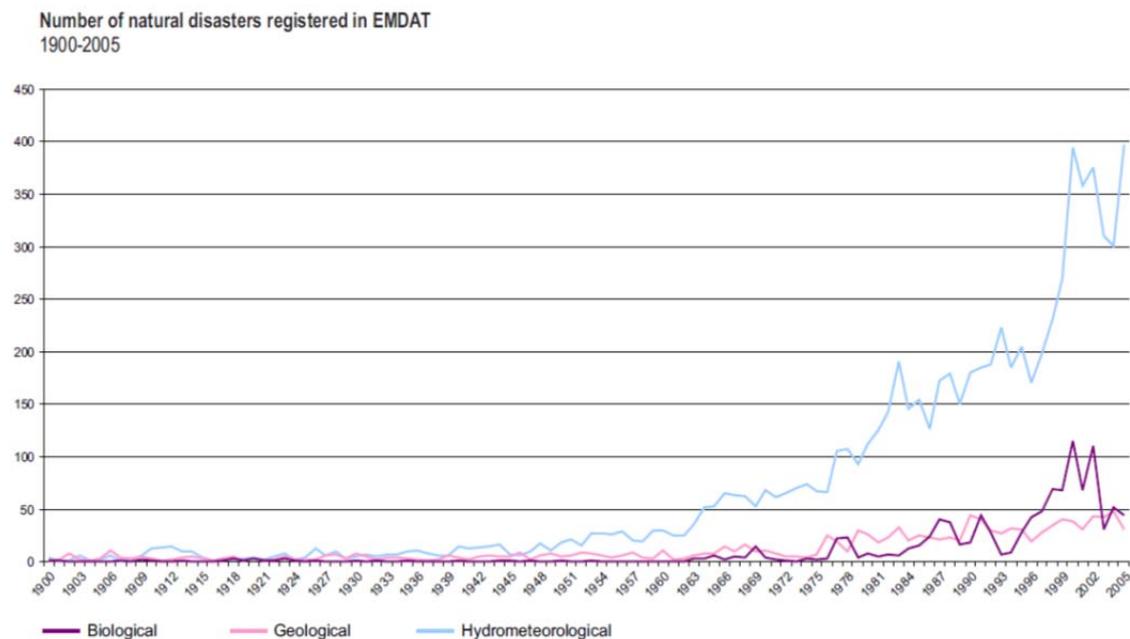
近年來全球受極端天氣與氣候事件影響，災害規模不斷擴大，災害頻率也急遽攀升，了解氣候變遷與災害衝擊兩者之間的關係為決策者、科學家甚至一般民眾所關注的課題。

### 全球趨勢

1. 根據國際災害資料庫 (EM-DAT) 1900 年至 2009 年全球天然災害事件統計，災害次數、受影響人口與經濟損失在 1970 年代開始急遽攀升，死亡人口則有下降趨勢 (表\_摘 2)；大部分的災害以水文氣象型災害為主 (含水災、風災、坡地災害、乾旱)，近 10 年水文氣象型災害占總天然災害次數的比例高達 78% (圖\_摘 23)。根據 EM-DAT 統計 (1990~2008)，與氣候有關之災害 (如極端事件) 導致全球每年約 5900 萬美元的經濟損失，約占 2008 年全球產值的 0.1%，其中熱帶氣旋 (如颱風) 占了 44%，而水災損失為 33%。水文氣象型災害的增加，一方面與極端天氣與氣候事件發生頻率增加有關，另一方面與快速增加的人口與經濟發展有關。(本文 6.2.1 節)

表\_摘 2：1900 年至 2009 年間全球天然災害統計表 (摘自：災害防救白皮書，2011)

	發生次數 (次)	死亡人數 (千人)	影響人數 (千人)	損失金額 (百萬美元)
1900-1909	72	4,497	240	1,307
1910-1919	71	3,326	5,766	600
1920-1929	96	8,724	44,342	979
1930-1939	100	4,700	13,921	3,322
1940-1949	142	3,871	2,885	3,009
1950-1959	293	2,127	19,678	6,059
1960-1969	582	1,750	199,444	17,836
1970-1979	910	987	550,781	54,040
1980-1989	1,832	794	1,252,760	190,965
1990-1999	2,975	526	2,035,562	699,589
2000-2009	4,491	839	2,326,603	890,320



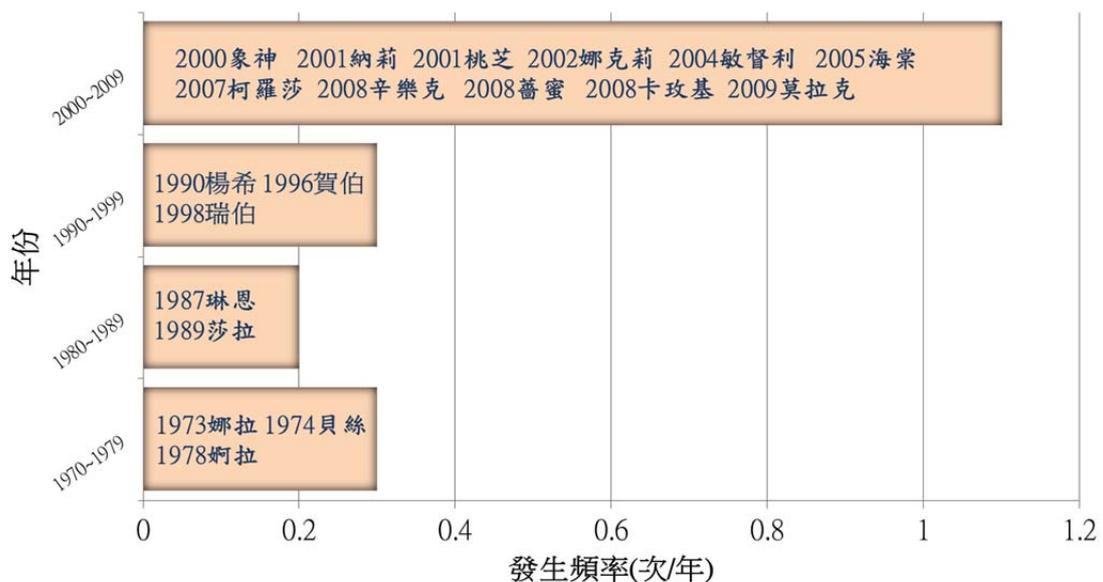
圖\_摘 23：1900~2005 年天然災害類別次數統計圖，藍色:水文氣象災害，粉紅色:地質災害，紫色:生物災害。(摘自 UNISDR 2005)

2. 未來災害趨勢推估：IPCC 第四次報告指出，在氣候暖化影響下，未來極端事件（如熱浪、豪大雨、乾旱、颱風強度增加、海平面升高）發生的機率偏高（66%~90%），再加上全球經濟發展與人口成長趨勢，世界銀行預估未來災害的次數、受影響人口與災害損失將會大幅增加。(本文 6.2.2 節)

## 臺灣氣候變異與災害衝擊

1. 根據世界銀行統計，臺灣屬於高災害風險區域，且同時受多種災害影響，臺灣的災害特性與全球趨勢一致，以水文氣象災害為主，災害變嚴重的原因與極端事件的增加以及自然與社會環境變遷有關。(本文 6.1.1 節)
2. 統計資料顯示，在自然因素層面，近年臺灣重大颱風洪水災害的嚴重程度與極端降雨的增加有關(不一定和颱風強度有關)，從 1970~2009 年統計資料顯示，不論是短延時降雨強度（1 小時至 6 小時累積降雨）、長延時降雨強度（超過 48 小時累積降雨)或著是颱風總累積降雨，極端強降雨颱風事件近 10 年（2000~2009）的發生頻率有明顯增加的現象。而過去 40 年極端強降雨颱風（排名前 10%的颱風降雨），往往造成臺灣重大災害（如莫拉克、

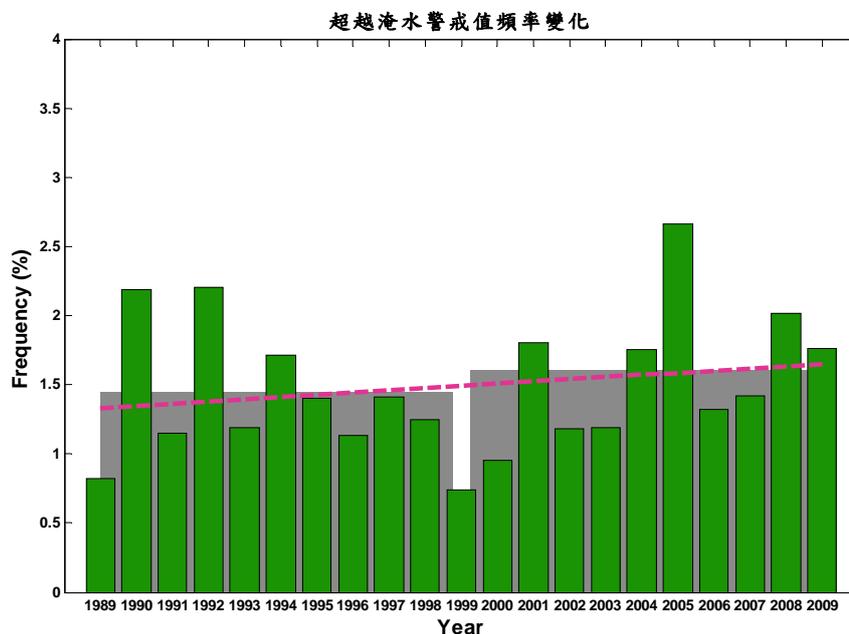
賀伯、納莉)。此極端強降雨颱風發生的頻率近 10 年有明顯增加的現象，在 1970~1999 年的 30 年期間，平均 3~4 年發生一次，在 2000 年以後的 10 年間則平均每年就發生一次 (圖\_摘 24)。此極端強降雨颱風的分析結果顯示具有明顯的氣候變異訊號，其中包含可能的年代際變化與氣候變遷趨勢，未來是否會持續發生，為更為複雜的科學問題，須待進一步科學模式進行評估，儘管未來存在有不確定性，但政府部門尤需積極面對氣候變遷可能帶來的衝擊 (本文 6.1.2 節；6.3.1 節)。另一方面，臺灣過去 40 年來整體年降雨量並無明顯變化，但趨勢上颱風降雨所占年總雨量比例從 1970 年代的 15% 提高至 2000 年代的 30%，這樣的結果顯示豐水期集中降雨量變多，枯水期降雨量減少，顯見季節降雨越來越不平均，雨季留不住水，且增加洪水風險，而旱季缺少降雨補助，對整體水資源系統之影響日益嚴重。(本文 6.4.1 節)



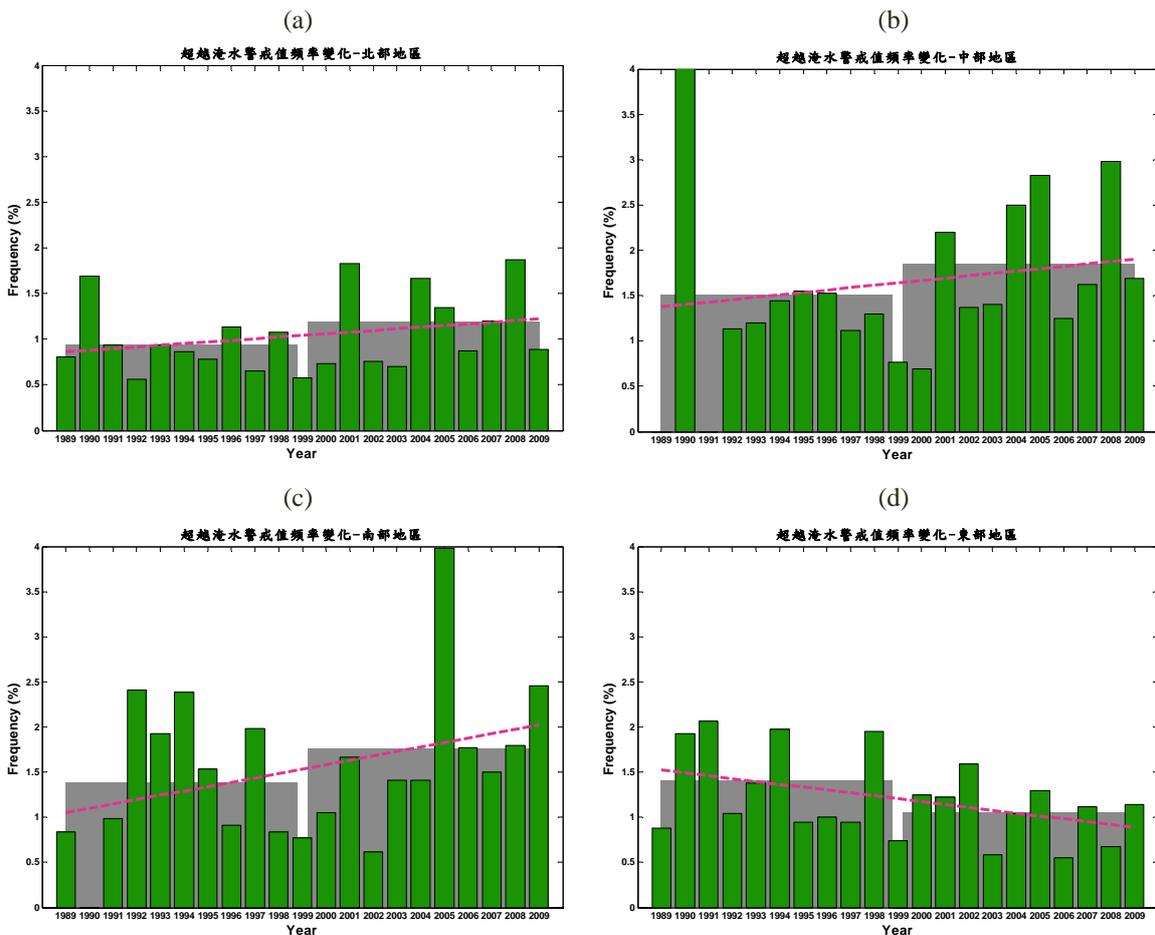
圖\_摘 24：極端強降雨颱風發生頻率統計，依據 1970-2009 年排名前 20 名之綜合降雨指標所定義之極端強降雨颱風發生頻率統計 (國家災害防救科技中心提供)

3. 洪災：彙整臺灣過去淹水災害歷史，災因整理主要分為自然因素與人為因素，其中部分自然因素 (如：降雨量大且超過防洪設施標準、河川上、中游河床遭土石堆積減少通水斷面積...等) 與本報告所強調之極端氣候事件有密切關係，然而人為環境變遷因子對災害的增加亦是不可忽視的重要因

子。由於各地區造成淹水可承受的降雨強度不同，因此不同地區受降雨強度改變的影響程度也有所不同，本報告利用水利署調查之各地區淹水警戒值資料進行降雨強度變異分析，計算全臺各地超過 24 小時淹水警戒的頻率，由前十年 (1989~1999) 與後十年 (1999~2009) 的平均線比較發現後十年的平均值較前十年的值高，但整體變異趨勢不是太明顯 (圖\_摘 25)。以相同的方式分析臺灣地理分析的北、中、南、東四個分區 (圖\_摘 26)，淹水潛在威脅在臺灣的西半部 (包括北、中、南區)，超過當地淹水警戒的降雨強度出現的頻率有增加的現象，不過東區則呈現些微下降的現象。台灣淹水致災的降雨與災害性天氣有關，包括颱風、梅雨、西南季風等，其中多數的淹水事件為颱風所造成，以目前的研究顯示，氣候變遷可能對颱風的強度與生成個數產生影響，但直接造成颱風致災的降雨強度、颱風移動速度、登陸位置等因素相當複雜，有待科學界進一步釐清，雖然目前觀測極端降雨強度有增強趨勢，但與災害分析有關的 20 年觀測資料條件仍無法確定是否與氣候暖直接相關，然而降雨強度的改變加上人為與社會環境的變遷，對洪水災害的衝擊仍不可輕忽。(本文 6.3.2 節)



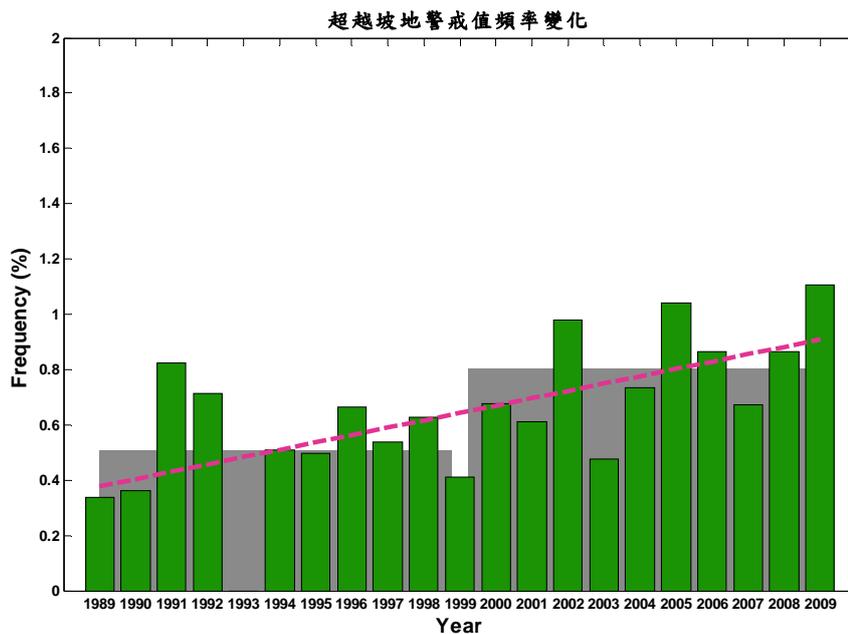
圖\_摘 25：1989~2009 年臺灣全區日降雨量超過淹水警戒值發生頻率，綠色柱狀圖為當年發生平均機率變化，底灰色為前十年與後十年之平均值，紅色虛線為一次回歸趨勢線。



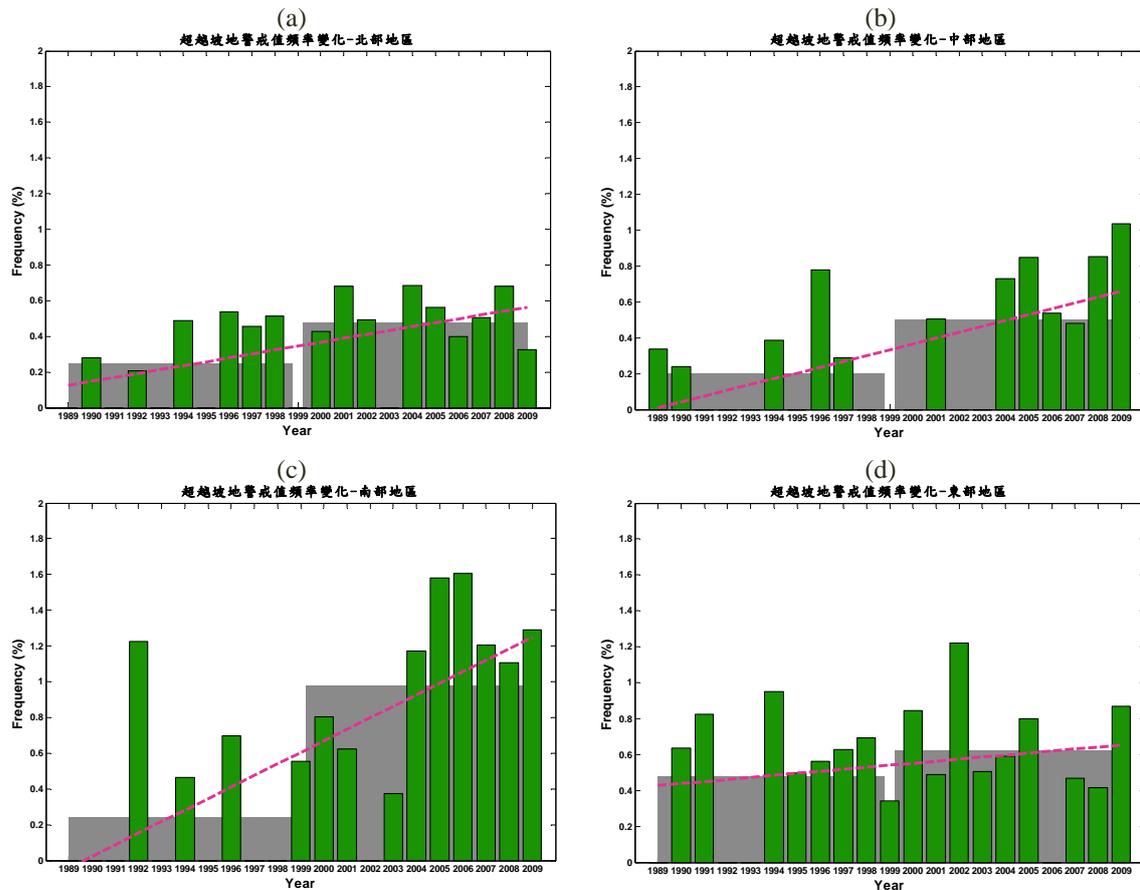
圖\_摘 26：1989~2009 臺灣地區分區日降雨量超過淹水警戒值發生機率 (a)北區、(b)中區、(c)南區、(d)東區，綠色柱狀圖為當年發生平均機率變化，底灰色為前十年與後十年之平均值，紅色虛線為一次回歸趨勢線。

4. 坡地災害：臺灣地區有 73.6% 以上土地，屬於山坡地及高山林地，坡地就佔了接近臺灣地區面積的四分之三，坡地災害除較為一般人所知的土石流、崩塌（山崩）及順向坡滑動外，尚包括落石、地滑、潛移等破壞模式。造成坡地災害形成有幾項主要成因包含了地質構造、地形、地震、豪雨、人為開發等，其中地質與地形屬於天然環境的易致災性，地震及人文開發可歸納為環境變遷因素，豪雨則與氣候變遷與極端降雨因素有關。各地的地質條件可承受的降雨量均有所不同，利用農委會水保局與國家災害防救科技中心研究成果，訂定各地區坡地災害雨量警戒值，分析過去 20 年間（1989~2009）一日累積降雨量超過坡地警戒值的頻率變化，警戒值採日累積降雨量為標準各地區警戒範圍為 300mm 至 700mm 不等。根據全臺坡地

雨量測站分析的結果，全臺各地降雨超過坡地警戒的頻率有逐年上升的現象。1989~1999 的十年間，各雨量降雨強度超過警戒值的頻率約低於 0.6%，在 1999~2009 的十年間，超過警戒值的降雨頻率約大於 0.8% (圖\_摘 27)。分析臺灣地理分區的北、中、南、東四區也發現，四個區域超過警戒值降雨的頻率有上升的現象 (圖\_摘 28)，其中以南部地區頻強降雨率增加的最為明顯，如淹水區域研究結果類似，中央山脈以西的地區坡地強降雨頻率增加較東部為明顯由於臺灣地區山區自動雨量站建站時間較短，無法證明影響坡地災害的山區強降雨頻率是否與氣候變遷直接相關，上述資料僅能說明近 20 年 (1989~2009) 來，影響坡地災害之強降雨發生情形有增加的趨勢。近年來坡地災害的嚴重性增加，一方面需考量氣候變異對強降雨造成的影響，其他自然因素(如地震)以及人為因素(道路開發、山區休閒產業發展..等)的影響須同時考量。(本文 6.3.3 節)



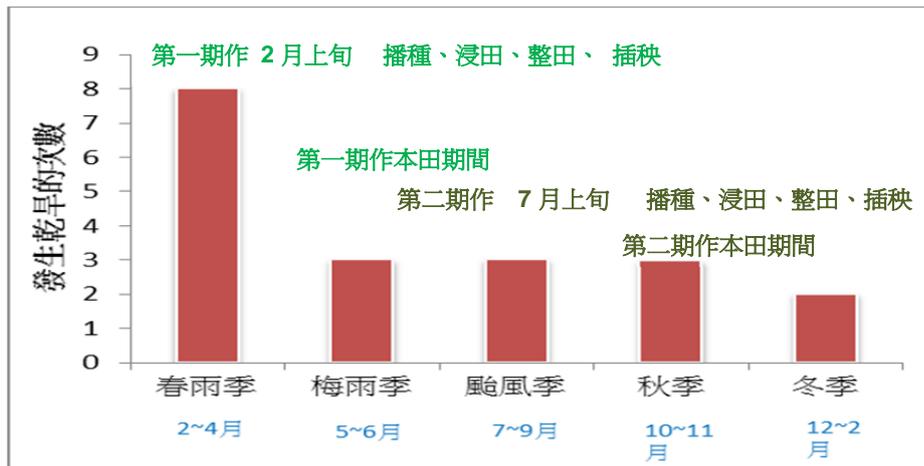
圖\_摘 27：1989~2009 年臺灣全區潛在坡地災害發生頻率的變化，綠色柱狀圖為當年發生平均機率變化，底灰色為前十年與後十年之平均值，紅色虛線為一次回歸趨勢線。



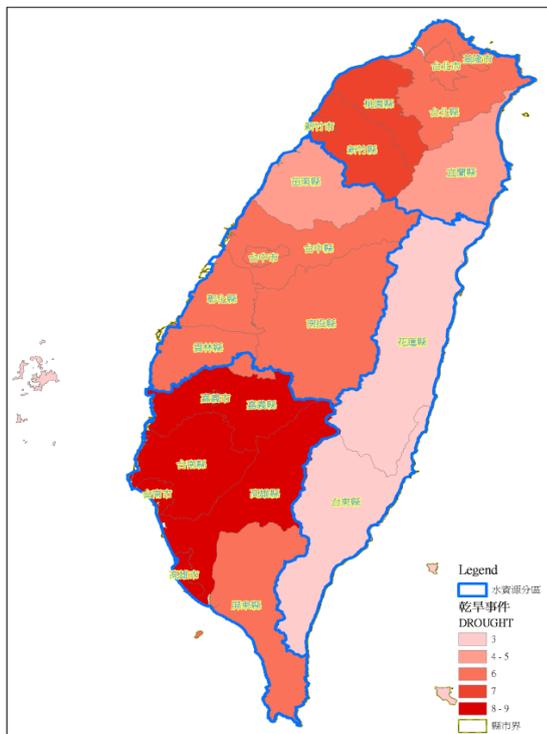
圖\_摘 28：1989~2009 年臺灣分區（北、中、南、東四區）潛在坡地災害發生頻率的變化，綠色柱狀圖為當年發生平均機率變化，底灰色為前十年與後十年之平均值，紅色虛線為一次回歸趨勢線。

- 乾旱：根據水利署統計臺灣平均每 10 年會出現一次大乾旱，2~3 年出現一小旱。本報告整理過去歷史的乾旱事件，呈現過去發生乾旱的季節與空間的分佈特性。臺灣地區發生乾旱的原因與旱象的解除因素複雜（如用水調度...），但較嚴重的乾旱事件與降雨有直接密切的關係。統計資料顯示乾旱的季節主要是集中在春雨季時（圖\_摘 29），因無足夠的春雨且又在農業水稻第一期作用水量最大的時期，降雨不足再加上用水需求量大，而導致乾旱事件。乾旱發生的區域，在空間上的分佈顯示南部區域發生乾旱的次數相對是最高的，嘉南高雄等區域過去發生乾旱的次數較多次；北部地區則是桃園與新竹地區發生乾旱的次數較多（圖\_摘 30）。根據 1953~2007 年北、中、南、東各分區的乾旱次數統計（圖\_摘 31），由可知近十年北部與南部

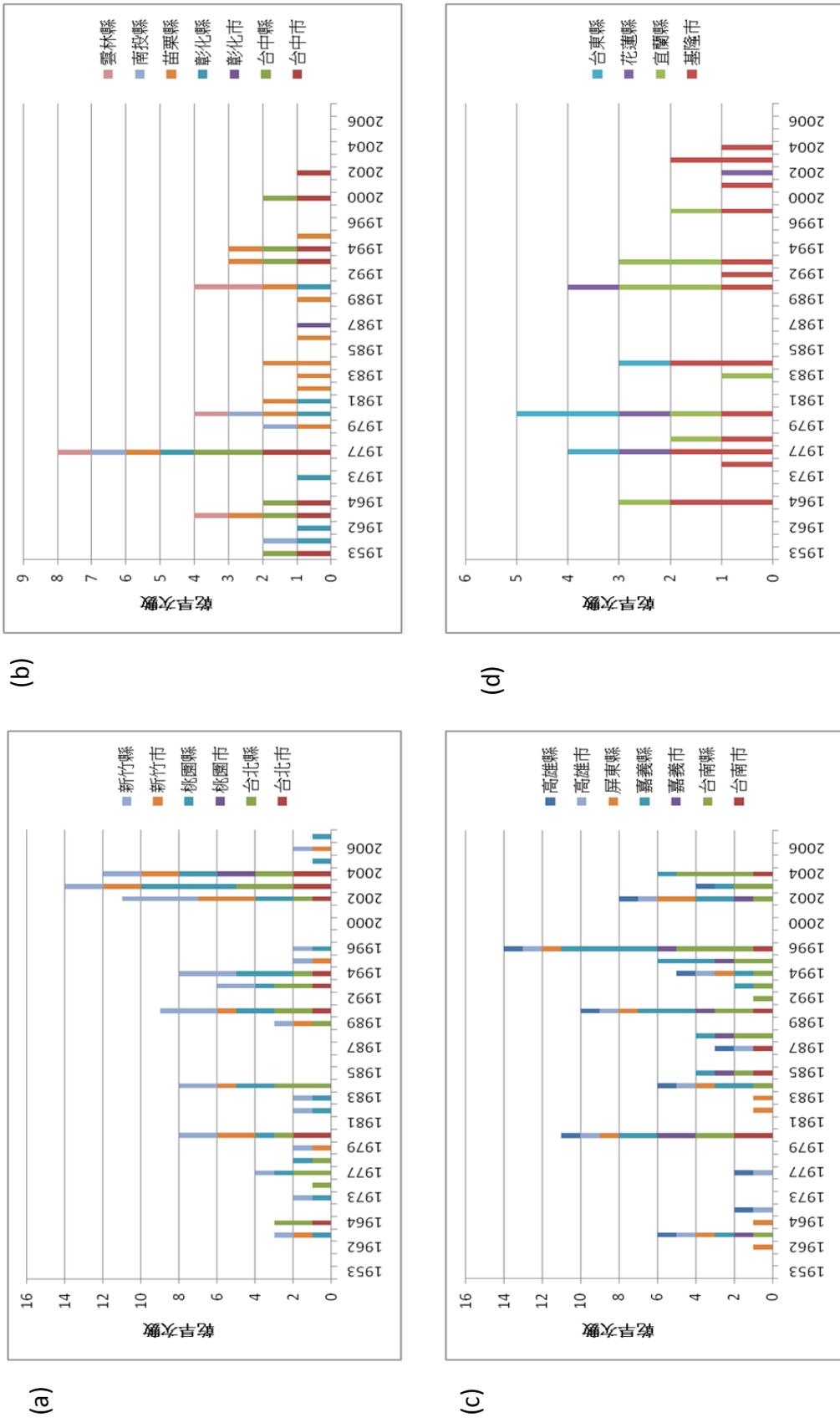
地區發生乾旱頻率，明顯較中部與東部地區多，東部受乾旱的影響較小。此現象一方面與用水量增加有關，另一方面則與臺灣地區季節降雨分布較不均勻（雨季多雨、旱季少雨）有關。（本文 6.3.4 節）



圖\_摘 29：歷史乾旱發生的季節與水稻期作的時間



圖\_摘 30：歷史乾旱發生區位示意圖



圖\_摘 31 : (a) 北部地區 (b) 中部地區 (c) 南部地區 (d) 東部地區 各縣市發生乾旱次數。

6. 臺灣原本屬高災害風險地區，在氣候與環境變遷下，更凸顯問題的嚴重性，包括極端天氣事件衝擊與土地使用所引發的水土複合型災害，降雨不均與用水需求增加的水資源問題，受地層下陷、海水位上升與暴潮增加所導致的海岸地區衝擊等 (表\_摘 3)，這些問題呈現在空間上也凸顯了臺灣災害的氣候敏感區位，如：河川流域 (水土橋樑道路複合型災害)、都市與建成地區 (高密度與發展區域)、山區安全 (高脆弱度與環境敏感) 以及沿海與地層下陷區 (高脆弱度與災害風險)。(本文 6.4 節)

表\_摘 3：水災、坡地災害以及複合性災害之氣候與環境變遷因子以及衝擊面向

氣候與環境變遷因子	水災衝擊	坡地災害衝擊	複合型災害
極端降雨強度增加	過大之降雨強度超過區域排水系統之容量負擔或堤防防護標準將提高淹水之風險	降雨強度增加，導致坡地災害風險提高，直接衝擊山區道路、聚落的安全、山區觀光與產業以及高齡化人口與醫療資源缺乏之防災弱勢族群。	水土複合型災害影響將更為嚴重，衝擊政府在防災體系之應變與長遠防減災政策之規劃。影響層面包括： <ul style="list-style-type: none"> <li>• 高災害風險地區之防災應變能力</li> <li>• 基礎設施的安全(如水庫、橋梁、堤防以及電塔...等)</li> <li>• 水質穩定、水庫操作與乾旱缺水</li> <li>• 土砂沖刷、河道淤積與二次災害</li> <li>• 漂流木與堰塞湖問題</li> </ul>
強颱風發生機率增加	連續性大規模災害衝擊防災體系之軟硬體層面之應變與復原能力	若颱風侵襲機率增加，坡地災害的復原與重建問題較洪災更為嚴重，連續性的災害將提高二次災害風險，以及防災體系之應變與復原能力。	
豐枯期降雨愈趨不均	降雨不均影響水庫蓄水能力、水質穩定與水庫操作安全以及下游淹水風險	降雨不均將影響土壤保水能力，進一步危及水土環境永續與安全	
海水位上升及地層下陷	因海水位上升將使得暴雨侵襲時排水更為困難，將使得沿海低窪及地層下陷地區地區增加淹水之風險		
地震頻繁與重大災害(如莫拉克)之環境衝擊	災後所導致之環境脆弱度增加與公共建設之復原與重建，大大增加後續災害發生之機率與風險		

## 結語

氣候變遷與衝擊是 21 世紀人類面對的最大挑戰之一。世界各國多以長期抗戰的心理展開全面的研究，以期深入瞭解過去氣候變遷的特性與主要影響機制，以便詮釋目前所處的氣候環境，並推估在人為溫室氣體持續增加的情況下的未來氣候變遷的可能情境，藉以評估可能的衝擊與必要的因應作為。氣候變遷研究的

最大困難之一為如何釐清自然因素與人為溫室效應的相對影響，以及未來氣候變遷對小區域的極端氣候與劇烈天氣的衝擊影響。臺灣地窄人稠，地形複雜，又處於運作機制十分複雜的東亞季風區，同時受到高緯度與熱帶氣候變異的影響，未來氣候變遷的不確定性比其它區域高，提出可靠的推估的困難度極高。

本報告依據國科會「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」第一年研究成果撰寫而成，整理與探討過去氣候變遷，以及應用動力與統計降尺度方法，依據 IPCC 第四次報告 24 個氣候模式結果，推估臺灣未來的可能氣候變遷。在推估部分，也提供不確定性分析結果，作為應用端進行風險評估之用。在過去氣候變遷部分，除了整理前人研究結果，亦發現影響臺灣與東亞氣候變遷的重要機制。

本報告呈現了在此一階段吾人對臺灣的過去與未來氣候變遷的瞭解程度，有新研究成果，也仍有許多未解決的問題。這些問題包括，對影響臺灣過去氣候的機制仍未能充分掌握，以及未來氣候變遷的不確定性。後者的癥結，除了全球氣候模式本身的不確定性，還有降尺度過程引進的誤差。這些問題在科學上目前尚無完善的方法可以完全解決。氣候變遷研究與推估是一個滾動的研究過程，人類對氣候變遷的瞭解與日俱增，用來推估的氣候模式也日益改良。臺灣的氣候變遷研究與推估也必須是一個持續性的滾動過程，反覆運用 IPCC 的最新資料，針對臺灣未來氣候變遷提出更新的推估。IPCC 預計於 2013 年提出第五份評估報告與新的推估資料，國內研究單位應該據之更新研究結果與推估。

根據本報告之氣候變遷推估，臺灣未來面臨豐水期降雨越豐、枯水期降雨越枯的可能衝擊，亦即此一過去觀測到的現象有可能受未來氣候變遷影響，情況更為嚴重。面對未來極端氣候與環境變遷所帶來的可能國土環境衝擊，現有防災工作與國土保安也面臨了不同的挑戰，例如極端個案常態化、災害型態改變以及災害規模超過歷史經驗與現有防護能力，因應此一新形態的災害衝擊，政府部門應一方面兼顧過去的災害應變與災害管理經驗，進一步降低災害風險，另一方面採用由新的思維與行動從整體國土安全與永續發展的角度，強化國土環境安全，擬訂因應氣候與環境變遷的防災調適策略，有效降低氣候變遷可能帶來的衝擊。



# 臺灣氣候變遷科學報告 2011

(精簡版)

## 臺灣氣候變遷科學報告工作小組 / 主要作者

許晃雄 / 中央研究院環境變遷研究中心 (工作小組召集人)  
臺灣大學大氣科學系

(以下依姓氏筆劃排序)

吳宜昭 / 國家災害防救科技中心氣象災害防治組

周 佳 / 中央研究院環境變遷研究中心

陳正達 / 臺灣師範大學地球科學系暨海洋環境科技研究所

陳永明 / 國家災害防救科技中心氣象災害防治組

盧孟明 / 交通部中央氣象局氣象科技中心

## 臺灣氣候變遷科學報告審查委員 (依姓氏筆劃排序)

王作台 / 中央大學大氣科學系

汪中和 / 中央研究院地球科學研究所

張智北 / 臺灣大學大氣科學系

郭鴻基 / 臺灣大學大氣科學系

虞國興 / 淡江大學水資源管理與政策研究中心

鄒治華 / 臺灣師範大學地球科學系

## 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫規畫協調委員

陳亮全 / 國家災害防救科技中心

紀水上 / 交通部中央氣象局

劉紹臣 / 中央研究院環境變遷研究中心

## 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫主持人

林李耀 / 國家災害防救科技中心

## 編輯群

「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」計畫辦公室  
國家災害防救科技中心

## 補助單位

國家科學委員會自然科學發展處



