

全球暖化下熱帶降雨的改變

中央研究院環境變遷研究中心 周 佳

一、前言

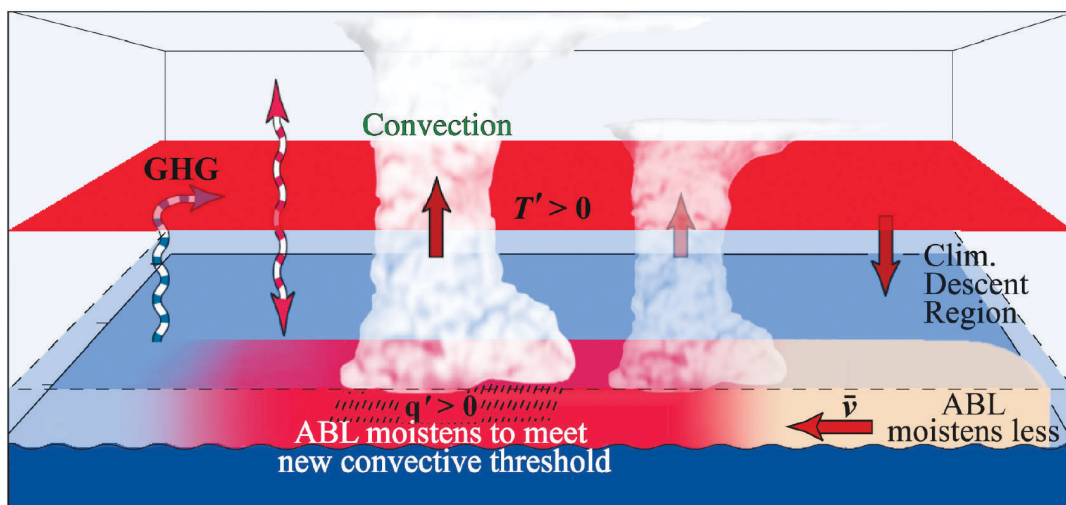
因為人類過度開發及使用自然資源，大量的溫室氣體如二氧化碳排放到大氣中，使得地球的能量平衡因溫室效應的加強而有所改變，進而產生全球暖化的現象。在對未來氣候預測的研究中，絕大多數的氣候模式均顯示暖化現象將會發生在全世界每一個角落，但是對於各地區降雨的預測卻非常的不一致。以台灣為例，部分氣候模式預測台灣地區未來的降雨會增加，但另一部份的模式卻做出降雨減少的預測。解決降雨預測的不確定性，首先必須瞭解造成降雨變化的原因，如此才能增加預測之可信度。在過去五年中，筆者的研究團隊針對三個課題作了一系列研究，成困簡介如下：

二、全球暖化對熱帶區域降雨影響的動力機制

為了解決不同氣候模式在預測區域降雨變遷的差異性，研究團隊從了解造成降雨變化的動力機制著手，希望藉此找出不同氣候模式的相似

性及差異性，進而能真正預測未來因全球暖化所造成區域降雨的變化。

首先利用中型的氣候模式，針對全球暖化所造成區域降雨變化的動力機制做深入探討。在針對造成熱帶地區降雨變化的研究中，我們發現有兩種主要動力機制：“錦上添花”(rich-get-richer)和“落井下石”(upped-ante)機制。在全球暖化的過程中，蒸發會因地表及海面溫度的上升而增加，所以大氣中水氣的含量也會隨之增加。在對流地區又因受到熱帶對流過程的影響，所以對流區水氣的增加量會比非對流區還要多，如此水氣的增加在水平方向會產生梯度。原本熱帶對流伴隨的環流系統在這水氣水平梯度的配合下，會將相對較乾的空氣會從非對流區往對流區傳送，造成熱帶對流區邊緣因無法維持原有的對流強度而減少降雨，這個過程稱之為“落井下石”機制。全球暖化下所增加的水氣主要集中在低對流層，這會使得大氣相對不穩定而容易產生較強的對流，進而造成在熱帶對流中心原本降雨就多的地區降雨更強，這過程稱之為“錦上添花”機制(圖一)。



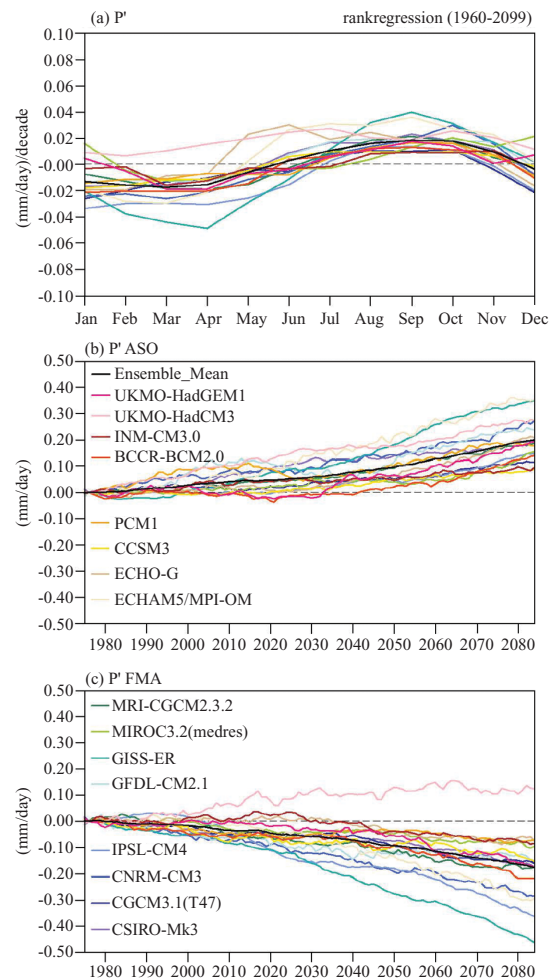
圖一 造成熱帶地區降雨的主要原因的示意圖

根據此理論基礎，我們進一步分析較為複雜且有較完整物理過程的大氣海洋耦合模式ECHAM4/OPYC3針對全球暖化的模擬結果，希望能驗證我們的理論。在此研究中，不僅證明了“錦上添花”和“落井下石”機制可存在較為完整且複雜的氣候模式中，並且對於前述的兩種動力機制有了更精確的描述及改進。除此之外，我們亦發現其他造成降雨變化的原因，例如海洋動力的回饋作用：在全球暖化的過程中，海溫會因海洋環流的改變而改變，然後再影響到降雨。這是第一次有系統地對區域降雨因全球暖化產生改變的原因做詳細研究，將能幫助瞭解何以不同氣候模式對區域降雨預測會如此的不一致，進而降低降雨預測的不確定性，並增加區域降雨預測的準確性。

三、全球暖化造成熱帶降雨變化的不對稱性

根據前一節的研究，降雨的改變很可能和赫德利環流(Hadley Circulation)有關，因為此環流主要是由熱帶對流所造成的。赫德利環流有著非常顯著的季節變化，其主要對流區會隨著季節南北移動，所以全球暖化造成的降雨改變亦可能有明顯的季節變化。我們首先分析了十六個政府間氣候變遷委員(IPCC)第四次評估報告(AR4)中所使用的氣候模擬結果，圖二顯示北半球熱帶(Eq-30°N)在二十一世紀末降雨變化的平均，十六個模式中有十五個均顯示降雨有明顯的季節變化(圖二(a))：北半球的平均降雨在夏季有逐漸增加的趨勢(圖二(b))，在冬季則有逐漸減少的趨勢(圖二(c))。這現象亦發生在南半球，所以降雨的變化除了有明顯的季節變化，並且有著南北半球不對稱的現象。這結果隱含降雨乾濕季的季節變化有逐漸增加的趨勢，南北半球降雨的差距亦有加大的趨勢。這些現象在絕大多數的氣候模式均可發現，所以這結論是相當可靠且一致。

接下來我們分析全球降雨的觀測資料(GPCP)，希望能從觀測資料中驗證此一氣候模式的結果。圖三顯示了北半球熱帶地區降雨的平均在1979-2005間的變化，並比較觀測資料和十六個模式的平均。降雨的季節變化是非常明顯的(圖三(a))：夏天降雨增加，但冬天降雨減少。



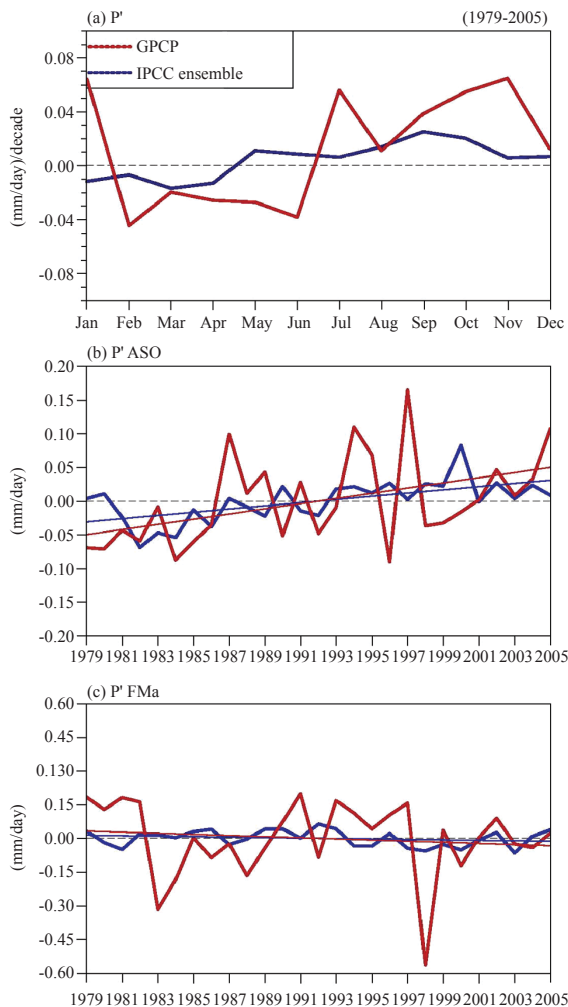
圖二 IPCC AR4 模式中北半球熱帶降雨平均的(a)季節變化及(b)北半球夏天和(c)北半球冬天隨時間的改變

分析不同季節降雨隨時間的改變，夏天降雨增加的趨勢已非常明顯(圖三(b))，但冬天降雨減少的趨勢卻不明顯(圖三(c))，這是因為聖嬰現象亦會產生降雨南北半球不對稱的現象(詳見下節討論)，而冬天則是一般聖嬰現象最強的時候。根據氣候模式的預測，冬天降雨減少的趨勢亦將會在2010通過95%的統計檢定。

在此研究中，我們不僅發現降雨的季節變化會在未來全球暖化的影響下加劇，更進一步提供了一個有用的指標，作為偵測全球暖化對降雨的影響，此結果因此被選為《2007 AGU Journal Highlight》。

四、聖嬰現象與全球暖化對熱帶降雨影響的比較

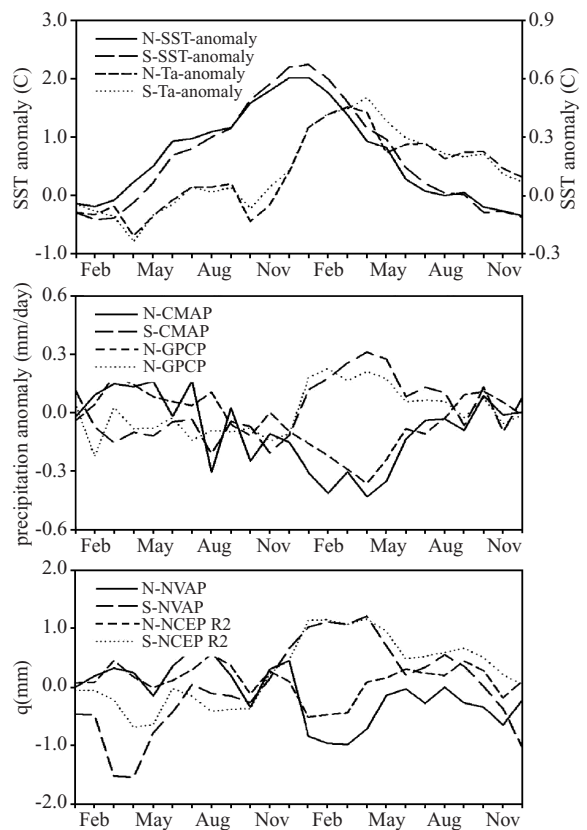
因聖嬰現象所產生的東太平洋近赤道海水



圖三 同圖二，但僅針對 1979-2005 期間。紅線為觀測資料，藍線則為十六個模式平均

增溫的現象，可經由大氣對流及波動，使得整個熱帶大氣暖化非常相似於全球暖化的現象但其強度較弱，所以聖嬰現象常被用來和全球暖化做比較，並進而瞭解全球暖化的動力機制。我們首先分析南美洲夏季(聖嬰現象最強的季節)降雨的變化，發現落井下石機制是造成亞馬遜河流域及大西洋熱帶輻合帶降雨偏少的原因，此一現象亦發生在全球暖化的模擬實驗中，此結果被選為《2004 AGU Journal Highlight》。

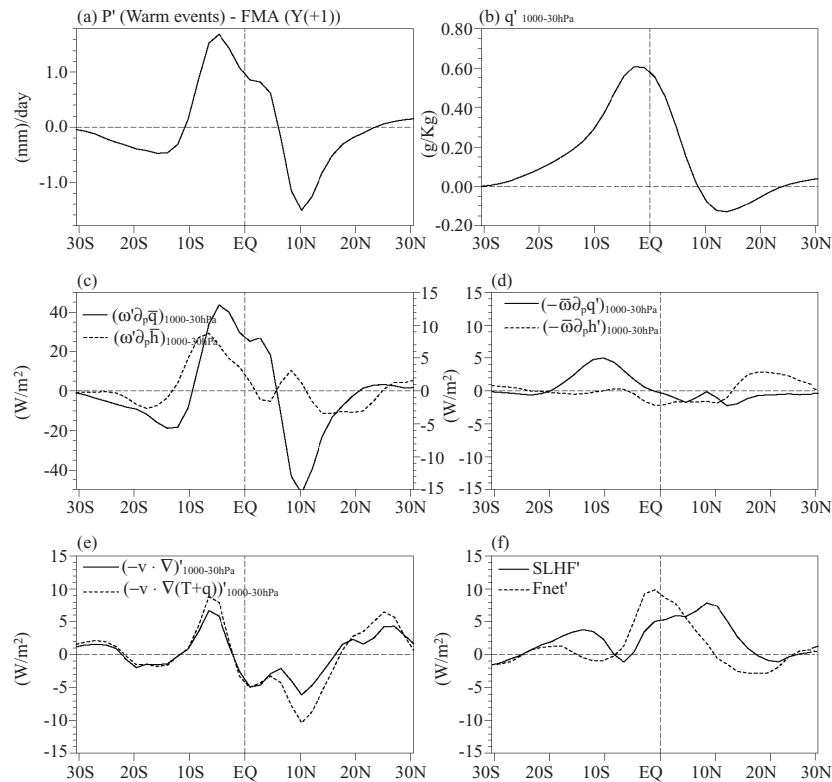
接下來，更進一步地探討聖嬰所造成降雨南北半球不對稱的現象。在聖嬰成熟期(即北半球冬季)，南半球熱帶的平均降雨會增加，但北半球的降雨卻會減少，但海溫及氣溫的變化均呈現南北半球對稱的情形(圖四)。經由分析水汽及能量的收支平衡，我們發現此一現象和赫德利環流有關，亦即在此環流的上升區(即南半球)，



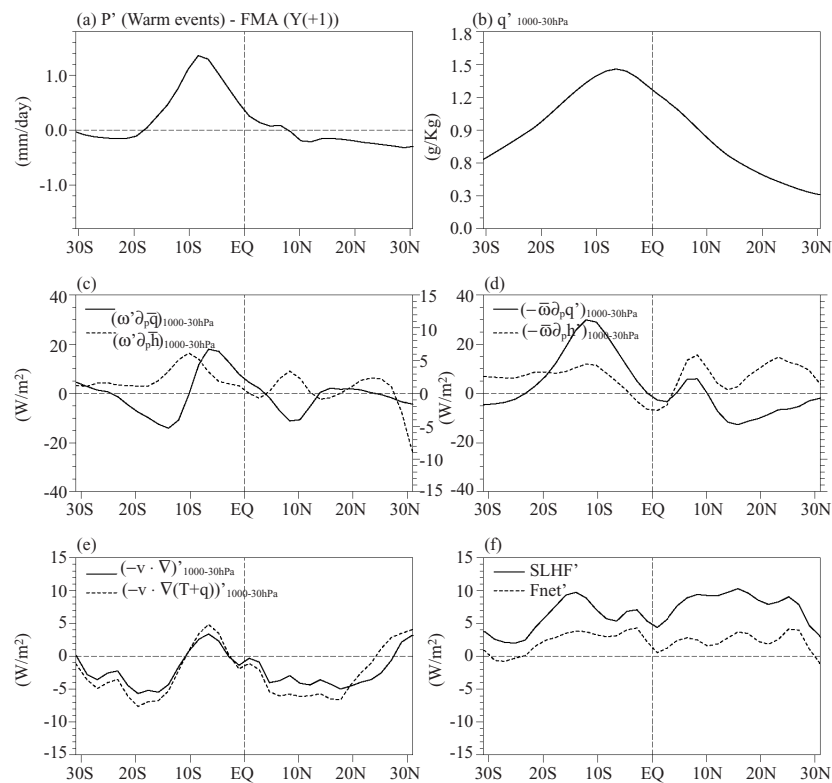
圖四 聖嬰時期(a)海溫(SST)及氣溫(Ta)、(b)降雨及(c)水氣北半球熱帶及南半球熱帶平均的變化

降雨會因“錦上添花”機制而增加，但在環流下沉區與上升區之間(即北半球)，降雨則會因“落井下石”機制而減少。從這些研究我們更進一步地證明“錦上添花”和“落井下石”機制並不只是從氣候模式所導出的理論，他們是發生在真實世界中的。

最近我們利用相同氣候模式中所產生的聖嬰現象及全球暖化，針對其所產生的降雨南北半球不對稱的現象，做直接且更進一步地比較，希望能找出兩者之間相似及相異之處，以利我們瞭解未來可能的氣候變遷。圖五及圖六分別顯示聖嬰現象及全球暖化下水氣及能量的收支平衡。在聖嬰現象中，海水的暖化造成赫德利環流的改變，使得水氣的垂直傳送有所改變，進而產生降雨的不對稱現象(圖五(c))。然而在全球暖化的影響下，因溫度上升而增加的水氣相對較多，所以由原來赫德利環流直接產生的水氣垂直傳送的改變反而是造成降雨不對稱的主因(圖六(d))。簡言之，聖嬰現象及全球暖化所造成降



圖五 聖嬰成熟期（二、三、四月）水氣及能量收支平衡式中各項的經度平均：(a)降雨量、(b)水氣、(c)水氣（實線）和能量（虛線）經垂直運動平均場所造成的垂直傳送、(d)水氣（實線）和能量（虛線）經垂直運動變異場所造成的垂直傳送、(e)水氣（實線）和能量（虛線）的水平傳送和(f)蒸發量（實線）及淨能量（虛線）



圖六 同圖五，但為全球暖化的結果

雨不對稱的原因皆與水氣垂直傳送的改變有關，但產生水氣垂直傳送改變的原因卻不相同。

五、結論

預測全球暖化對降雨的影響是相對困難的，這是因為降雨會有正和負的變化，且空間上差距非常大，造成氣候模式預測結果相當不一致。我們的研究提出了造成降雨改變的動力機制，根據這些理論基礎我們進一步發現全球暖化對降雨影響的訊號。然而對於較小區域降雨改變的預測（例如台灣）仍有相當的困難度，這將是本研究團隊未來研究重點。

參考文獻

- [1] J. D. Neelin, C. Chou and H. Su, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2275 doi:10.1029/2003GL018625 (2003).
- [2] C. Chou and J. D. Neelin, *J. Climate*, **17**, 2688 (2004).
- [3] C. Chou, J. D. Neelin, U. Lohmann and J. Feichter, *J. Climate*, **18**, 4621 (2005).
- [4] C. Chou, J. D. Neelin, J.-Y. Tu and C.-T. Chen, *J. Climate*, **19**, 4207 (2006).
- [5] C. Chou and M.-H. Lo, *J. Climate*, **19**, 3411 (2007).
- [6] S. Solomon et al., IPCC 4th Assessment Report, Climate Change 2007: The physical science basis (2007).
- [7] C. Chou, J.-Y. Tu and P.-H. Tan, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L17708, doi:10.1029/2007GL030327 (2007).
- [8] C. Chou and J.-Y. Tu, *J. Climate*, **20**, in press (2008).