

熱帶地區氣柱水汽量與降水關係之分析

劉曉薇 余嘉裕

中國文化大學大氣科學系

摘 要

本文採用SSM/I衛星反演之氣柱水汽量（column water vapor, 簡稱CWV）及GPCP（Global Precipitation Climatology Project）降水資料，探討1988~2014年間，氣柱水汽量與降水間關係之時空變化特徵。分析結果顯示：熱帶地區氣柱水汽量與降水在空間上有高度相關性，氣柱水汽量愈豐富的地方，降水強度愈強。平均而言，在ITCZ附近，每8mm氣柱水汽量可產生1mm/day降水強度。不過，氣柱水汽量和降水強度間關係並非線性，而是呈現上拋物線關係，亦即當氣柱水汽量愈大時，降水強度增加幅度反而逐漸趨緩。

從時間變化趨勢來看，1988~2014年間，熱帶地區平均氣柱水汽量大約增加4%左右(由36mm增加至37.5mm)，但同時期降水強度幾無明顯改變，這顯示熱帶地區之降雨效率(降水和氣柱水汽量之比值)在這段期間似乎有下降的趨勢。本研究將利用水汽收支分析來解釋造成上述降水效率降低之物理因素。

關鍵字：氣柱水汽量、降水效率

一、前言

近期地球氣候系統暖化造成大氣含水氣能力增加，根據Clausius-Calpeyron方程，在相對濕度不變的情況下，當地表溫度每增加1℃全球大氣平均水氣含量大約增加7%(Trenberth et al. 2003)，但觀測資料顯示，相同條件下全球平均降雨量僅增加約1~3% (Allen and Ingram 2002 ; Held and Soden 2006)，顯示降雨對暖化反應除了受熱力效應（溫度、水汽）影響外，也受到動力效應（風）相當程度影響，呈現較為複雜之區域變化。

近期研究顯示趨勢，例如：氣候暖化下降雨分佈不均的情形有越來越顯著，熱帶與高緯度地區之平均降雨量顯示為增多現象，而副熱帶地區之降雨量為減少的情況 (Held and Soden 2006; Vecchi and Soden 2007)。全球降雨氣候計劃 (GPCP) 提出，1988年至2008年期間熱帶海洋區降水變化趨勢與整體時間序列1979年至2008年模式模擬結果比較發現，潮濕地區以每10年增加1.8%之降雨量，乾燥地區則為每10年減少2.6%之降雨量 (Liu and Allan 2013)，大致上呈現「濕者愈濕、乾者愈乾」之趨勢 (Chou et al. 2009; Chou et al. 2013)。

本文利用最新衛星觀測資料定量分析熱帶地區水

汽含量和降雨強度間關係，並了解暖化環境下其關係如何變化？並利用水汽收支方程探討造成此變化之可能物理機制。

二、資料來源

本文使用SSM/I衛星反演之氣柱水汽量（column water vapor, 簡稱CWV）及GPCP（Global Precipitation Climatology Project）降水資料簡述如下：

(一)SSM/I資料:

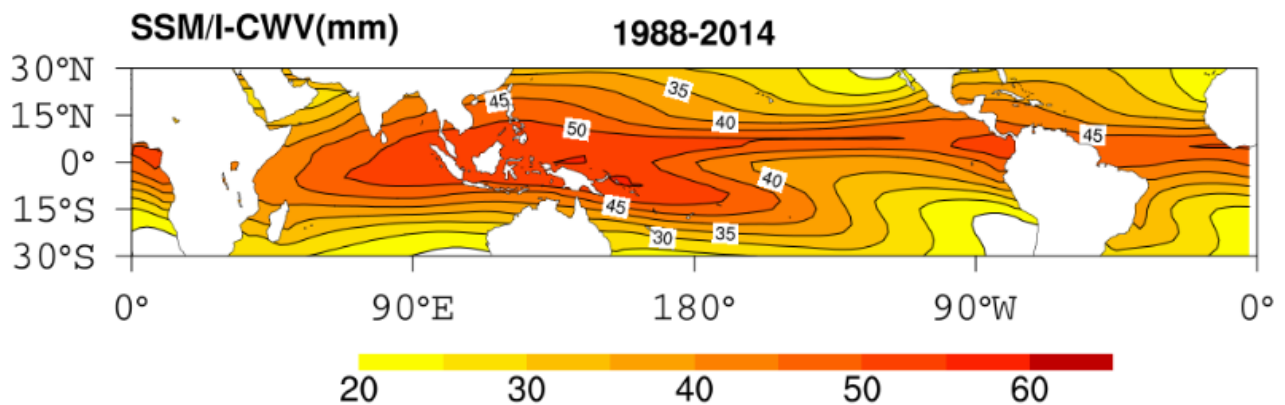
SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 為美國1987年6月所發射DMSP-F8 (Defense Meteorological Satellite Program) 衛星中所裝載的被動式輻射儀，而後陸續發射F-10~F-15號衛星。SSM/I輻射儀包含19.3GHz、22.2 GHz、37.0 GHz 及85.5 GHz 等四個微波頻率，可提供較高的空間解析度(12.5公里至25公里)，對於大氣中液態水含量、水氣、降水量等具有良好的反演能力 (Grody, 1991)。雖然SSM/I並非大氣氣柱水量的『原處觀測』(in-situ observation) 資料，但在海面上缺乏探空資料情況下，它仍然被視為是最接近真實觀測的一種資料。SSM/I氣柱水汽量資料時間由1988年1月1日至2014年12月31日，共27年資料。

(二)GPCP降水資料

GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 降水資料，是由世界氣候研究總計劃 (World Climate Research Program: 簡稱 WCRP) 所建立之子計劃，其目的將全球許多年的降水分佈資料作量化的記錄，

並結合了所有的觀測資料，包含雨量計測量、衛星估計及探空觀測。本文採用 GPCP-V2 版本，水平解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ 之逐月資料，涵蓋時間自 1979 年 1 月至 2014 年 12 月止，共 36 年資料

(a)



(b)

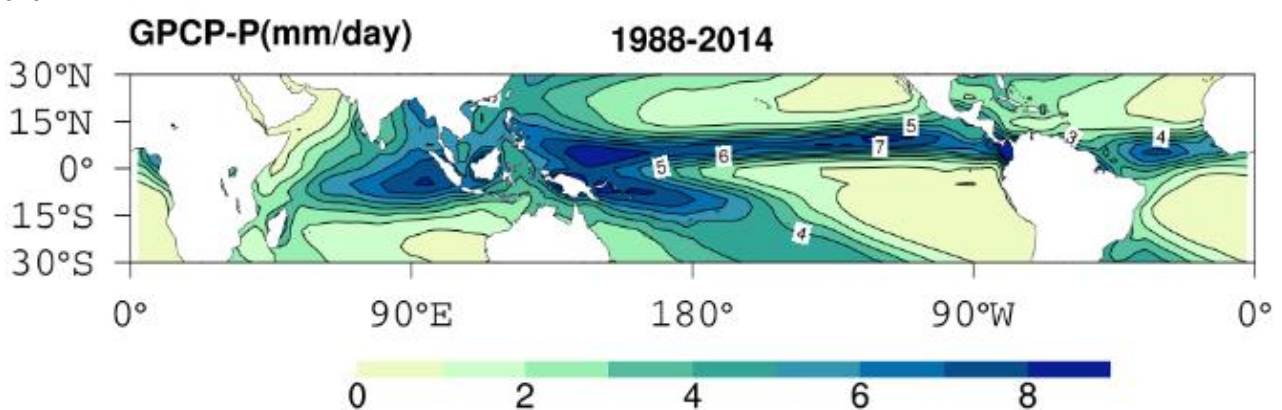


圖1:(a) SSM/I反演氣柱水汽量與(b)GPCP降水資料的氣候空間分佈。資料時間取1988~2014年之平均值，單位分別為mm與mm/day

為了和SSM/I氣柱水汽量進行比對分析，本文僅針對共存的時間範圍（1988年1月至2014年12月止，共27年資料）進行分析，採用月平均資料。

三、氣柱水汽量與降水強度之時空分佈特徵

(一)空間分佈特徵:

熱帶地區氣柱水汽量與降水強度在空間上有高度相關性如圖1所示，大範圍的水汽高值區主要位於熱帶西太平洋及印度洋地區（40~60mm）降水強度為（5~8mm/day）；在東太平洋及大西洋約5°N附近，也可清楚看到南北向狹窄、東西向狹長水汽高值區（40~50mm），降雨強度也有達到（6~8mm/day）。

此外，東太平洋『冷舌』（cold tongue）區上空則有顯著水汽低值區（30mm），而降水強度也顯著減弱（<2mm/day）。整體而言，氣柱水汽量愈豐富的地方，降水強度愈強，例如：在ITCZ（Inter-Tropical Convergence Zone）附近，50mm氣柱水汽等值線大致上與6mm/day降水強度等值線重合，相當於在ITCZ附近平均每8mm氣柱水汽量可產生1mm/day降水強度。

(二)時間變化趨勢:

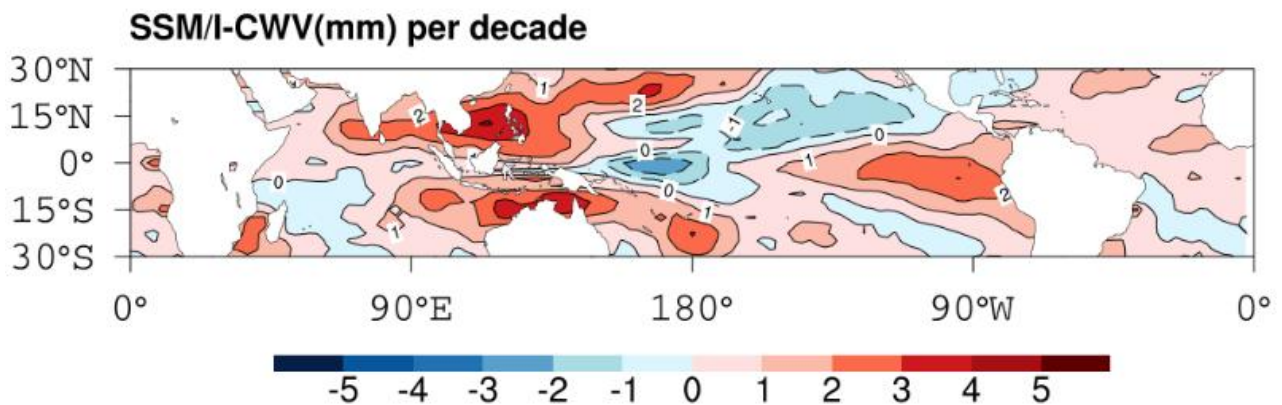
圖2進一步來看SSM/I衛星反演氣柱水汽量與降水強度之時間變化趨勢特徵。SSM/I資料顯示，水汽主要變化區大多集中在太平洋海域，包括(1)從赤道中

太平洋往東北延伸至中美洲外海的大範圍水汽減少區 ($-1.5 \sim -4.5 \text{ mm decade}^{-1}$)、(2)赤道西太平洋和副熱帶太平洋地區水汽增加區 ($1.5 \sim 6 \text{ mm decade}^{-1}$)、(3)北印度洋以及赤道東太平洋地區的水汽增加區 ($1.5 \sim 2 \text{ mm decade}^{-1}$)。整體而言，熱帶地區氣柱水汽量在1988~2014年間呈現上升趨勢，和全球氣溫暖化趨勢一致。

降水強度主要變化區也大多集中於太平洋海域，包括(1)從中太平洋由赤道為界往兩極延伸，北至中美洲與南至南美洲海域之大範圍降水強度減弱區 ($-0.4 \sim -1.2 \text{ mm/day decade}^{-1}$)、(2)赤道西太平洋及南北向

狹窄、東西向狹長延伸至中美洲海域之降水強度增強區 ($0.2 \sim 1.4 \text{ mm/day decade}^{-1}$)。此外，東太平洋『冷舌』(cold tongue)區為兩者最大差異區，水汽有顯著大範圍增加 ($1.5 \sim 2 \text{ mm decade}^{-1}$)，而降水強度變化卻極小 ($-0.2 \sim 0 \text{ mm/day decade}^{-1}$)，亦即全球暖化下使大氣的氣溫增高，造成空氣中含水氣能力增加，但東太平洋海域常年為大氣運動下沉區，空氣不易舉升，水汽較難凝結而產生降雨(Allan and Soden 2007)。因為降雨趨勢正負夾雜、彼此互相抵銷，熱帶地區整體降雨趨勢並無明顯變化。

(a)



(b)

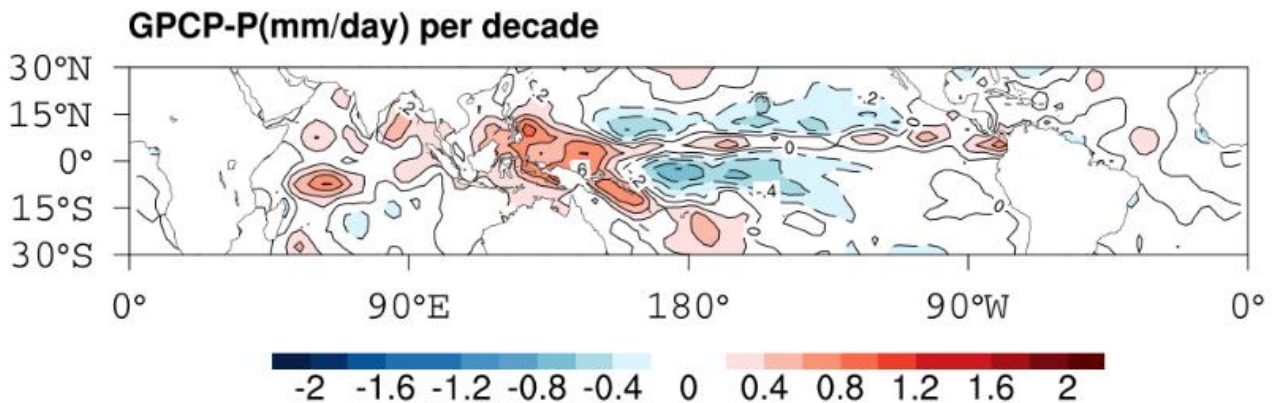


圖2: (a) SSM/I反演氣柱水汽量與(b)GPCP降水資料之時間變化趨勢圖。資料時間取1988~2014年間之變化趨勢，單位分別為 mm decade^{-1} 與 $\text{mm/day decade}^{-1}$

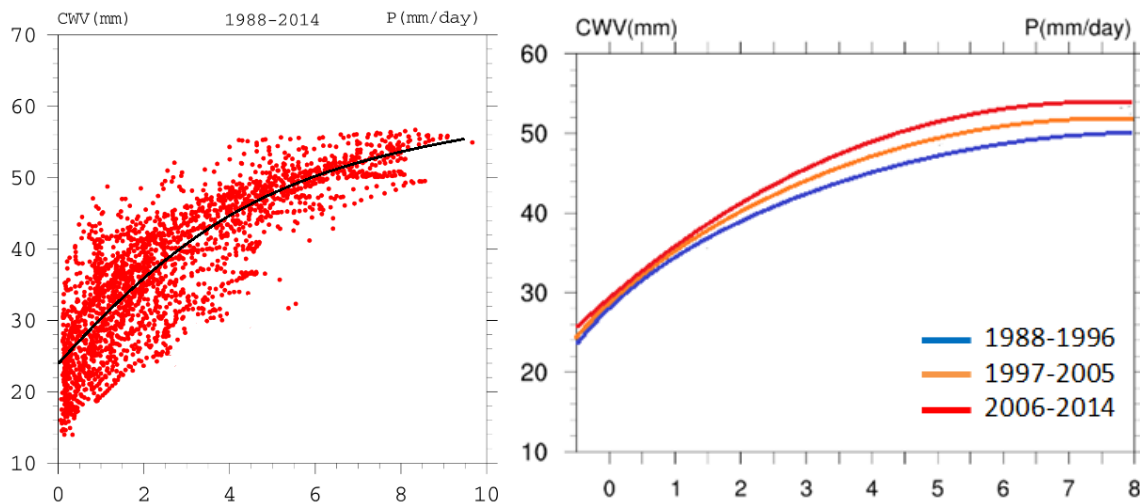


圖3: SSM/I反演氣柱水汽量與GPCP降水資料之關係分佈圖。X軸為降水強度，單位為mm/day。Y軸為氣柱水汽量，單位為mm。資料時間取1988~2014年

氣柱水汽量和降水強度間關係並非線性（圖3），而是呈現上拋物線關係，亦即當氣柱水汽量愈大時，降水強度增加幅度逐漸加大。整體而言，1988~2014年間弱降雨(<2mm/day)區間，每增加1mm/day降水強度所需的氣柱水汽量平均增加需7mm，而強降雨區間(>5mm/day)每增加1mm/day降水強度所需氣柱水汽量平均只需增加2mm。這顯示在氣柱水汽量較高地區（如：ITCZ），些微的水汽增加，即可顯著地增加降水量；反之，在氣柱水汽量較少區域（如：副熱帶和太平洋冷舌區），需要更高的水汽增加門檻，才能產生相同的降水量，和「濕者愈濕、乾者愈乾」趨勢相符。

將1988~2014年間分為3期(圖3右)，1988~1996年間為前期、1997~2005年間為中期及2006~2014年間為後期，發現強降雨(>5mm/day)所需氣柱水汽量逐年有增加趨勢發生，例如：降水強度（5mm/day）所需之氣柱水汽量在前期為47mm，中期則為49mm到後期增加至51mm，亦即相同的降水強度，後期則需更多的氣柱水汽量，意指降雨效率有下降之趨勢。反之，弱降雨(<2mm/day)所對應之氣柱水汽量逐年並無顯著變化趨勢。

進一步從時間變化趨勢來看(圖4)，1988~2014年間，熱帶地區平均氣柱水汽量大約增加4%左右(由36mm增加至37.5mm)，但同時期降水強度幾無明顯改變，這顯

示熱帶地區之降雨效率（定義為降水和氣柱水汽量之比值）在這段期間似乎有下降的趨勢。此現象顯示，控制熱帶地區降水機制除了熱力效應（溫度和水汽）以外，動力效應（大氣環流）也扮演非常重要角色，通常後者（如：大氣環流減弱）扮演部分抵消前者之角色。

(三)聖嬰/反聖嬰成熟期之變化趨勢:

為瞭解氣柱水汽量與降水資料在不同時期對熱帶地區氣候變異訊號反應，圖5顯示聖嬰與反聖嬰成熟期（DJF）氣柱水汽量與降水資料空間距平之緯向平均分佈。發現聖嬰成熟期，氣柱水汽量與降水資料在熱帶地區變化特徵類似，如：1991/92、1994/95及1997/98事件中，赤道以南地區出現正距平，以北地區則為負距平，而2002/03及2009/10事件則有赤道偏北的正距平。反之，反聖嬰時期氣柱水汽量與降水資料主要變化特徵為赤道地區有對稱的負距平。

而空間分佈主要特徵(圖6a)在聖嬰成熟期（如：赤道中太平洋偏南地區的水汽正距平、西南太平洋和南印度洋水汽正距平、以及赤道以北地區之負距平分佈等），而反聖嬰空間分佈最大差異特徵(圖6b)為赤道中太平洋偏南地區的水汽正距平轉為負距平分佈，降水強度也有相同情形發生。

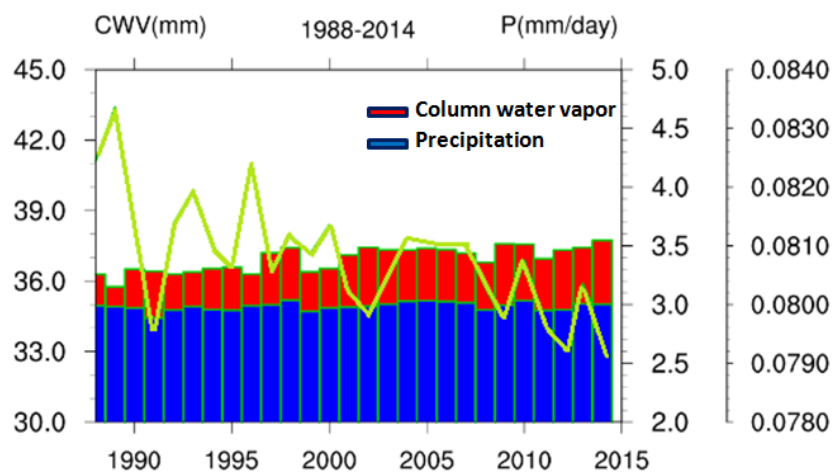


圖4: SSM/I反演氣柱水汽量(紅)、GPCP降水資料(藍)與降雨效率(綠線)之逐年分佈圖。資料時間取1988~2014年

四、結論

本文採用SSM/I衛星反演之氣柱水汽量及GPCP降水資料，發現1988~2014年間，熱帶地區氣柱水汽量與降水在空間上有高度相關性，平均而言，在ITCZ附近，每8mm氣柱水汽量約可產生1mm/day降水強度。

從時間變化趨勢來看，熱帶地區平均氣柱水汽量在1988~2014年間大約增加4%左右(由36mm增加至37.5mm)，但同時期降水強度幾無明顯改變，這顯示熱帶地區之降雨效率(定義為降水和氣柱水汽量之比值)在這段期間似乎有下降的趨勢。從水汽收支分析發現，降水效率降低可能受到大氣環流減弱(動力效應)影響。

參考文獻

- Allan, R. P. and Soden, B. J., 2007: "Large discrepancy between observed and simulated precipitation trends in the ascending and descending branches of the tropical circulation", *Geophysical Research Letters*, **34**, L18705. ISSN 0094-8276 doi: 10.1029/2007GL031460
- Allen, M. R., and W. J. Ingram, 2002: "Constraints on future changes in the hydrological cycle", *Nature*, **419**, 224 – 228.
- 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., J. C.-H. Chiang, C.-W. Lan, C.-H. Chung, and Y.-C. Liao, and C.-J. Lee, 2013: "Increase in the range between wet and dry season precipitation", *Nature Geoscience*, **6**, 263-267. doi:10.1038/ngeo1744
- Held, I. M., and B. J. Soden, 2006: "Robust responses of the hydrological cycle to global warming", *J. Climate*, **19**, 5686 – 5699.
- Liu, C. and R. P. Allan, 2013: "Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850 – 2100", *Environ. Res. Lett.*, **8**, 034002 doi:10.1088/1748-9326/8/3/034002.
- Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, 2003: "The changing character of precipitation", *Bull. Am. Met. Soc.*, **84**, 1205-1217.
- Vecchi, G. A., and B. J. Soden, 2007: "Global warming and the weakening of the tropical circulation", *J. Climate*, **20**, 4316 – 4340.

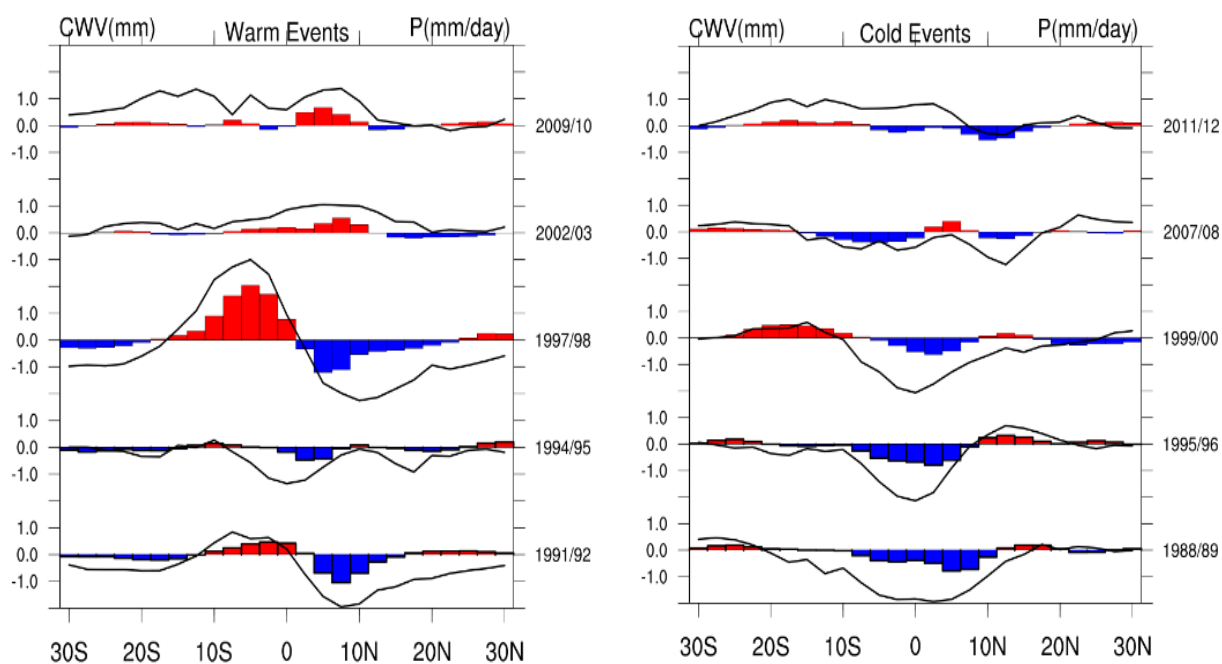
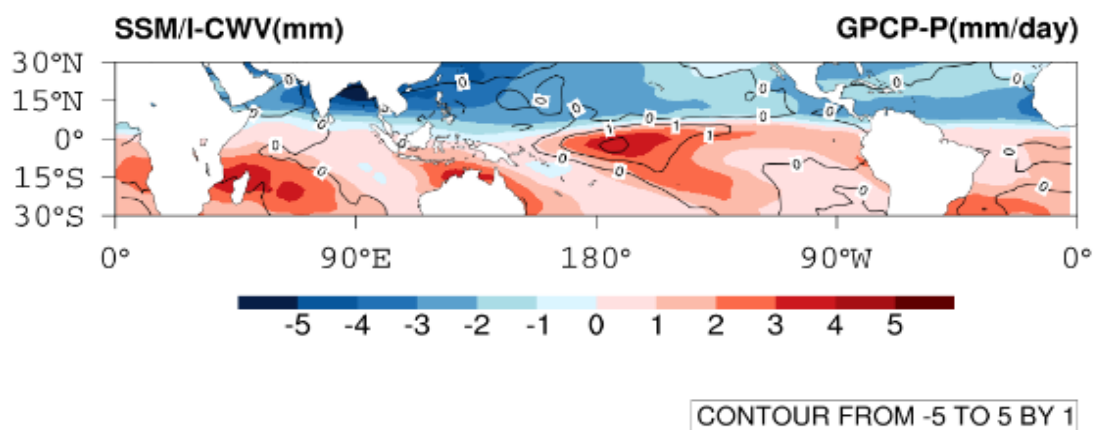


圖5: SSM/I反演氣柱水汽量(柱狀)與GPCP降水資料(黑線)在聖嬰與反聖嬰成熟期(DJF)空間距平之緯向平均。圖左為暖事件，依序為1991/92、1994/95、1997/98、2002/02及2009/10。圖右為冷事件，依序為1988/89、1995/96、1999/00、2007/08及2011/12。

(a)



(b)

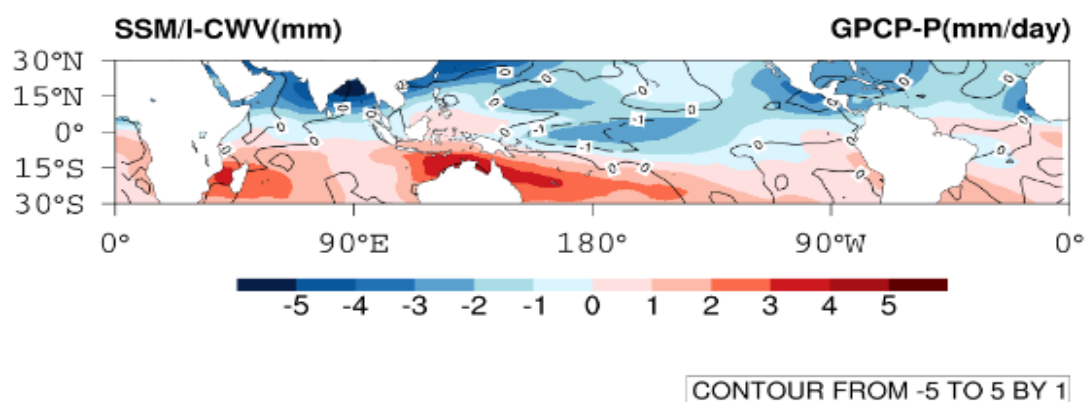


圖6:同圖5但為5事件整合之空間距平分佈圖。SSM/I反演氣柱水汽量(色階)與GPCP降水資料(等值線)(a)聖嬰成熟期、(b)反聖嬰成熟期