

四種常用氣象再分析資料在熱帶地區氣柱水氣量之比較

劉曉薇¹ 余嘉裕^{1,2}

¹ 中國文化大學地學研究所

² 中國文化大學大氣科學系

（中華民國一〇三年四月二十日收稿；中華民國一〇三年五月二十八日定稿）

摘 要

本文分析氣候研究上最常用的四種氣象再分析資料產品，包括 NCEP-R2、CFSR、ERA-40 以及 ERA-interim 資料，在熱帶地區氣柱水汽量的時空分佈特徵，並與 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量進行統計比對。分析結果顯示，ERA-40 的垂直積分氣柱水汽量，無論在空間分佈和時間變化趨勢上，都與 SSM/I 觀測值最為吻合。此結果似乎顛覆了傳統上我們對氣象再分析資料的認知，亦即第三代氣象再分析資料表現不一定優於上一代，值得氣候變遷研究者注意。本研究純屬不同再分析資料氣柱水汽量比較，資料間存在差異原因並不在本文討論範圍內。

關鍵字：氣象再分析資料、氣柱水汽量

一、前言

為因應氣候變遷研究需要高品質、長時間、規則格點資料需求，美國國家環境預報中心（National Center for Environmental Prediction，簡稱 NCEP）和國家大氣科學研究中心（National Center for Atmospheric Research，簡稱 NCAR）合作，於 1990 年代中期率先推出第一代的氣象再分

析資料產品，稱為 NCAR/NCEP（或 NCEP-R1）資料（Kalnay et al., 1996）。大約在同一時期，歐洲中期天氣預報中心（European Center for Medium-range Weather Forecast，簡稱 ECMWF）也發佈了第一代氣象再分析資料產品，稱為 ERA-15 資料。從 2001~2010 年間，NCEP 和 ECMWF 陸續推出了第二代和第三代的再分析資料產品（Uppala et al., 2004; Suranjana et al., 2010;

Dee et al., 2011), 其中屬於第二代的 NCEP-R2 和 ERA-40 以及第三代的 CFSR 和 ERA-interim 是氣候變遷研究者最常用的資料。

但因大氣模式所使用的物理過程參數化差異(如: 積雲對流參數化), 水汽場往往成為再分析資料中, 不確定性最高的產品之一。由於水汽場是氣候變遷研究中非常重要的變數, 因此水汽分析良莠與否, 關係到大氣科學家能否合理地描述真實世界中的氣候狀態和變遷情形。為了解不同資料在水汽場差異, 本文將比較前述四種氣象再分析產品在熱帶地區垂直積分氣柱水汽量差異, 並與衛星反演氣柱水汽量進行比對分析, 以了解何種資料最接近實際大氣狀態。第二節介紹研究所需的資料來源, 第三節針對氣柱水汽量的空間分佈和時間變化趨勢進行定量分析, 第四節總結本研究的主要發現和結論。

二、資料來源

本文使用的四種氣象再分析資料和衛星觀測資料簡述如下:

(一) NCEP-R2 資料

NCEP-R2 資料是由美國 NCEP 在 2001 年所推出來取代 NCEP-R1 的第二代氣象再分析資料產品, 以作為研究天氣尺度現象的氣象場和中尺度氣象模式(或區域氣候模式)的初始場及邊界條件(Kistler et al., 2001)。NCEP-R2 資料在等壓面上由 1000mb 到 10mb, 共 17 層; 等壓面上水平解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 資料涵蓋時間自 1979 年 1 月至 2007 年 12 月止, 共 29 年。

(二) CFSR 資料

CFSR 資料是美國 NCEP 在西元 2010 年推出

的高解析度大氣格點資料, 屬於第三代的氣象再分析資料, 也是目前解析度最高的再分析產品(Suranjana et al., 2010)。CFSR 資料垂直分層由 1000mb 到 1mb, 共 37 層; 等壓面上水平解析度為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$; 資料涵蓋時間自 1979 年 1 月至 2009 年 12 月, 共 31 年。

(三) ERA-40 資料

ECMWF 成立於 1975 年, 其目的為發展中尺度天氣預報模式提供完備的氣象參數資料, ERA-40 資料即為其第二代氣象再分析資料產品(Kalnay et al., 1996)。ERA-40 資料垂直分層由 1000mb 到 1mb, 共 23 層; 等壓面上水平解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 資料涵蓋時間從 1958 年 1 月至 2001 年 12 月, 共 44 年。

(四) ERA-interim 資料

ERA-interim 為 ECMWF 所推出的再分析資料, 以作為取代 ERA-40 的第三代氣象再分析產品(Dee et al., 2011)。ERA-interim 資料垂直分層由 1000mb 到 1mb, 共 37 層; 等壓面上水平解析度為 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$; 資料時間從 1989 年 1 月至 2008 年 12 月, 共 20 年。

(五) 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 1987 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日，共 23 年。

為了和 SSM/I 氣柱水汽量進行比對分析，本文僅針對所有資料共存的時間範圍(1989 年 1 月至 2001 年 12 月止，共 13 年)進行分析，採用月平均資料。

三、氣柱水汽量時空分佈特徵比較

(一) 空間分佈特徵

為瞭解不同氣象再分析資料水汽場在熱帶地區的差異，圖 1 首先比較 NCEP-R2，CFSR，ERA-40 以及 ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量(等值線)和 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量(色階)之氣候空間分佈。SSM/I 資料顯示，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)；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)。此外，在東太平洋『冷舌』(cold tongue) 區上空則有顯著的水汽低值區(<30mm)。整體而言，SSM/I 水汽量空間分佈型態和氣候上 ITCZ (Inter-Tropical Convergence Zone) 所在位置相當一致。

四種再分析資料垂直積分氣柱水汽量雖然大致上都掌握到幾個高值區的特徵，但在位置和強度上，資料間似乎存有不少差異(見圖 1a~d)。為定量估計不同資料之表現，我們將四種氣象再分析資料垂直積分氣柱水汽量和 SSM/I 反演氣柱水汽量取氣候平均後，進行『型態相似度』(pattern similarity) 和『相對均方根誤差』(relative

root-mean-square error，簡稱 *RRMSE*) 的統計檢定。根據 Yu et al. (2011)建議，量度『型態相似度』通常以 R^2 值表示(值介於 0~1 間)，其值愈大，代表相似度愈高($R^2 = 1$ 代表完美相似度)。反之，『相對均方根誤差』量度相對誤差大小(值介於 0~1 間)，其值愈低，代表誤差愈小(*RRMSE* = 0 代表完全沒誤差)。Hollingsworth et al. (1980)認為， $R^2 \geq 0.6$ 以及 *RRMSE* ≤ 0.20 是統計檢定合格的門檻。表 1 顯示，ERA-40 水汽量的空間分佈最接近 SSM/I 觀測值($R^2 = 0.87$ ；*RRMSE* = 0.25)，其次為 ERA-interim ($R^2 = 0.65$ ；*RRMSE* = 0.26)，再其次為 NCEP-R2 ($R^2 = 0.54$ ；*RRMSE* = 0.27)，三種資料都有接近合格的表現。反之，CFSR 氣柱水汽量，無論從型態相似度或相對均方根誤差來看，都和 SSM/I 有當大的差異($R^2 = 0.45$ ；*RRMSE* = 0.65)，是所有再分析產品中表現最差的一種。我們發現，CFSR 資料在 ITCZ 處低估水汽量以及在東太平洋冷舌區上空高估水汽量，是造成 R^2 值偏低和 *RRMSE* 值偏高的主要原因(見圖 1b)。

為進一步了解不同氣象再分析資料水汽場表現是否有季節性差異，表 1 也針對春、夏、秋、冬四季平均氣柱水汽量分別進行統計檢定。分析結果顯示，ERA-40 仍是四種氣象再分析資料中最接近 SSM/I 的一種，其次為 ERA-interim，再其次為 NCEP-R1，CFSR 表現最差，與年平均氣候場結果完全一致。然而我們也發現，所有氣象再分析資料的表現在冬、春二季似乎明顯優於夏、秋二季，這可能與夏、秋兩季在熱帶海洋面上有許多中小尺度對流擾動(如：颱風、積雨雲)有關，因為這些擾動往往無法在氣候模式中被精確地模擬出來(氣象再分析資料為氣候模式同化觀測資料後之產品，並非實際觀測資料)。

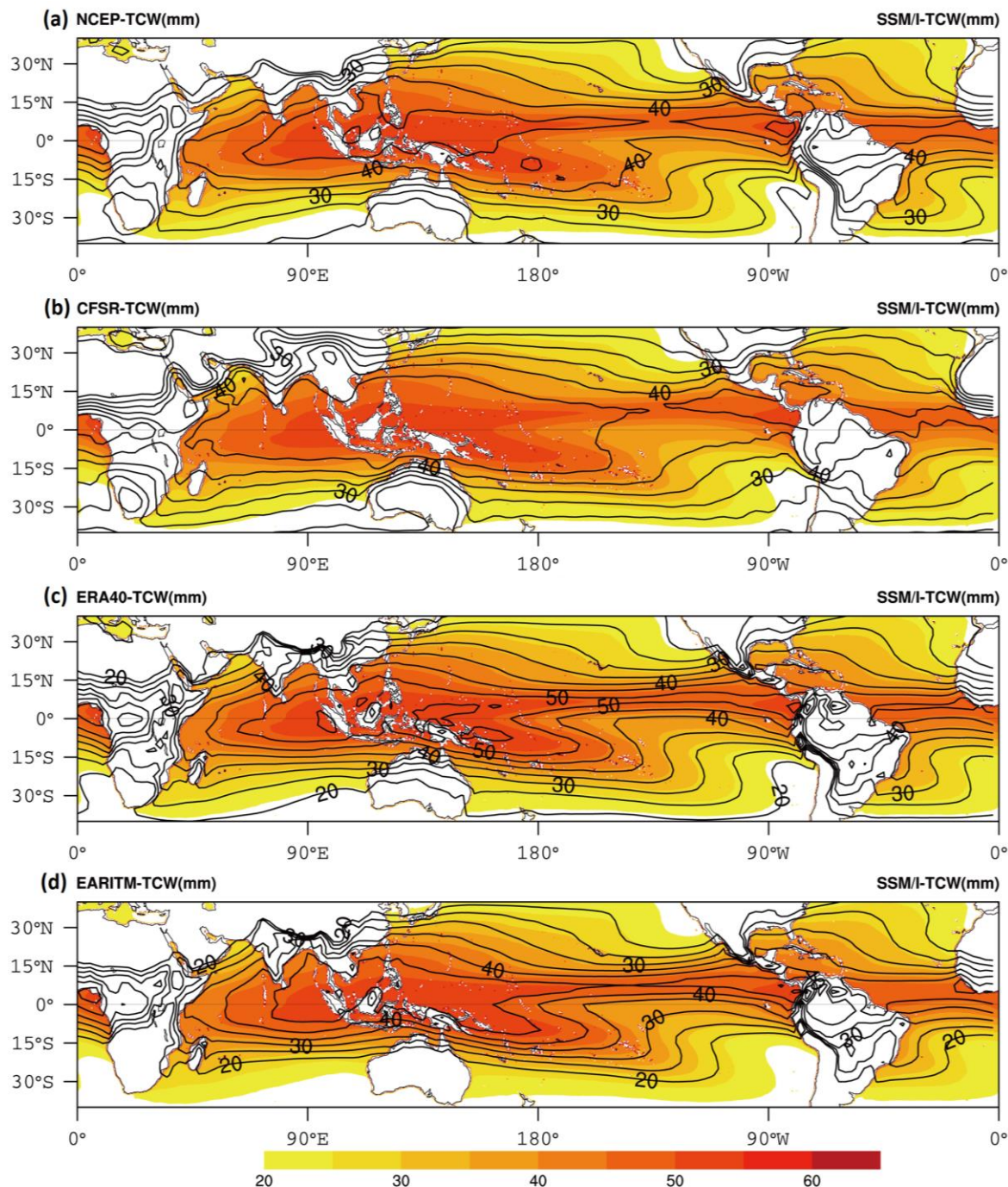


圖 1 (a) NCEP-R2, (b) CFSR, (c) ERA-40 以及(d) ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量 (等值線) 和 SSM/I 反演氣柱水汽量 (色階) 的氣候空間分佈比較。資料時間取 1989~2001 年之平均值, 單位為 mm。

表 1 四種氣象再分析資料垂直積分氣柱水汽量和 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量在年平均氣候(Annual)和春(MAM)、夏(JJA)、秋(SON)、冬(DJF)四季之空間分佈統計檢定，檢定量包含『型態相似度』(R^2)及『相對均方根誤差』(RRMSE)。

	NCEP-R2 vs. SSM/I	CFSR vs. SSM/I	ERA-40 vs. SSM/I	ERA-interim vs. SSM/I
Annual	$R^2 = 0.54$	$R^2 = 0.45$	$R^2 = 0.87$	$R^2 = 0.65$
	RRMSE = 0.27	RRMSE = 0.65	RRMSE = 0.25	RRMSE = 0.26
MAM	$R^2 = 0.61$	$R^2 = 0.55$	$R^2 = 0.89$	$R^2 = 0.70$
	RRMSE = 0.24	RRMSE = 0.56	RRMSE = 0.24	RRMSE = 0.25
JJA	$R^2 = 0.49$	$R^2 = 0.43$	$R^2 = 0.70$	$R^2 = 0.55$
	RRMSE = 0.55	RRMSE = 0.69	RRMSE = 0.30	RRMSE = 0.28
SON	$R^2 = 0.56$	$R^2 = 0.47$	$R^2 = 0.79$	$R^2 = 0.68$
	RRMSE = 0.27	RRMSE = 0.55	RRMSE = 0.27	RRMSE = 0.26
DJF	$R^2 = 0.60$	$R^2 = 0.58$	$R^2 = 0.89$	$R^2 = 0.70$
	RRMSE = 0.26	RRMSE = 0.54	RRMSE = 0.24	RRMSE = 0.25

(二) 時間變化趨勢

圖 2 進一步比較 NCEP-R2，CFSR，ERA-40 以及 ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量（等值線）和 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量（色階）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的馬蹄型水汽增加區（ $1.5 \sim 6 \text{ mm decade}^{-1}$ ）、(3)北印度洋以及赤道東太平洋地區的水汽增加區（ $1.5 \sim 3 \text{ mm decade}^{-1}$ ）。整體而言，熱帶地區氣柱水汽量在 1989~2001 年間呈現上升趨勢，和全球氣溫暖化趨勢一致。

圖 3 比較上述四種氣象再分析資料和 SSM/I 資料在西太平洋($15^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$ ； $110^{\circ}\text{E}-180^{\circ}\text{E}$)、東太

平洋($15^{\circ}\text{S}-15^{\circ}\text{N}$ ； $140^{\circ}\text{W}-80^{\circ}\text{W}$)、及北印度洋($EQ-20^{\circ}\text{N}$ ； $60^{\circ}\text{E}-100^{\circ}\text{E}$)地區之平均氣柱水汽量時間變化趨勢。在西太平洋地區（上圖），ERA-40 和 ERA-interim 資料變化趨勢幾乎重疊，也與 SSM/I 資料變化趨勢最為接近；反之，CFSR 和 NCEP-R2 資料雖然也掌握到氣柱水汽量的年際變化趨勢，但都有明顯低估情形發生，其中後者低估量又較前者嚴重。在東太平洋地區（中圖），除了 CFSR 資料有較顯著高估情形外，其他三種氣象再分析資料的表現差距不大，大致上都能掌握到 SSM/I 水汽量的變化趨勢和震幅。在北印度洋地區（下圖），除了 NCEP-R2 資料有較為顯著的低估情形外，其他三種氣象再分析資料表現也和 SSM/I 資料相當接近。整體而言，ERA-40 和 ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量在上述三地區之變化趨勢和 SSM/I 反演氣柱水汽量最為接近，

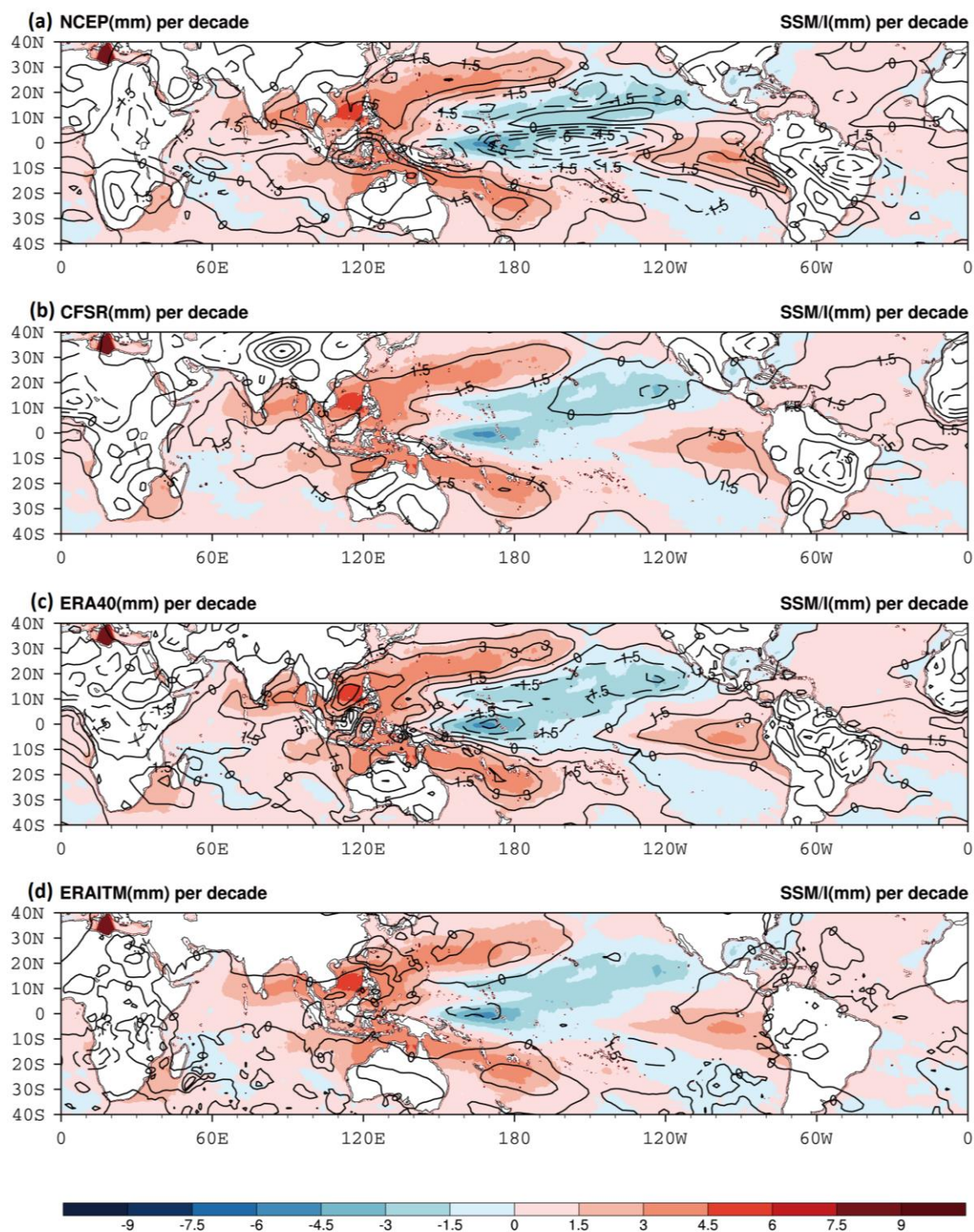


圖 2 (a) NCEP-R2, (b) CFSR, (c) ERA-40 以及(d) ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量（等值線）和 SSM/I 反演氣柱水汽量（色階）的時間變化趨勢比較。資料時間取 1989~2001 年間之變化趨勢，單位為 mm decade^{-1} 。

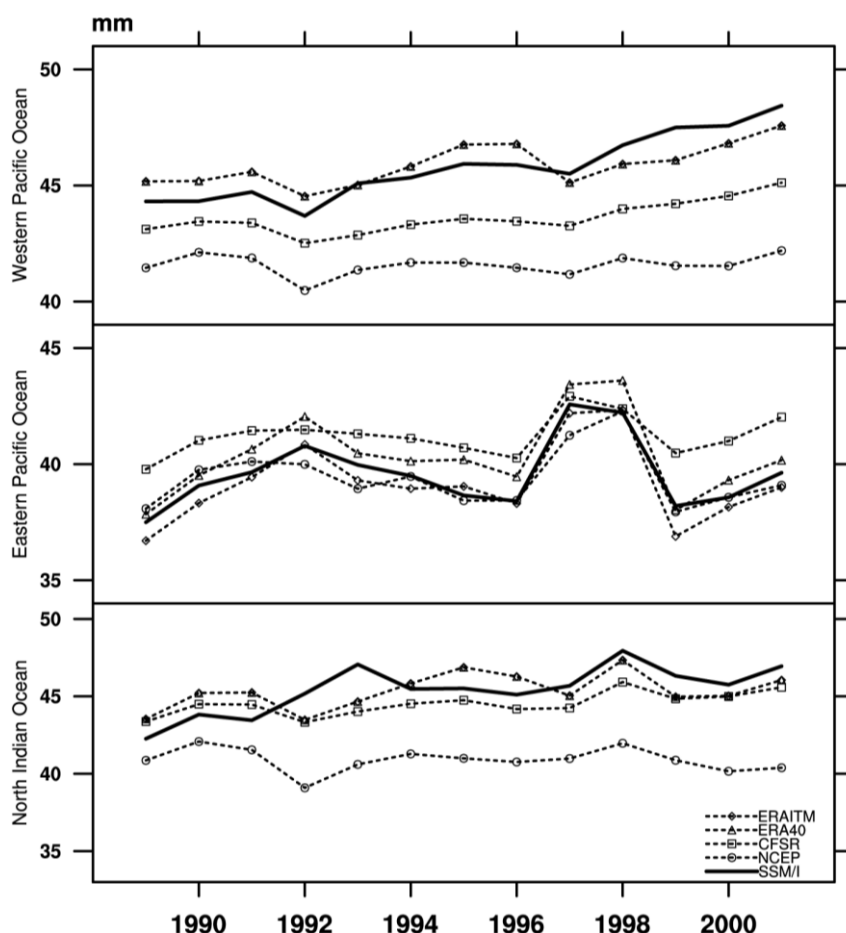


圖 3 SSM/I、NCEP-R2、CFSR、ERA-40 及 ERA-interim 五種資料在西太平洋(15°S-30°N; 110°E-180°E)、東太平洋(15°S-15°N; 140°W-80°W)、及北印度洋(EQ-20°N; 60°E-100°E)地區年平均氣柱水汽量之時間變化趨勢比較，單位為 mm。

NCEP-R2 和 CFSR 表現則相對較差。

表 2 針對四種氣象再分析資料和 SSM/I 資料的氣柱水汽量變化趨勢進行統計檢定。以整個熱帶地區而言，ERA-40 氣柱水汽量時間變化趨勢最接近 SSM/I 觀測值 ($R^2 = 0.88$; $RRMSE = 0.11$)，其次為 NCEP-R2 ($R^2 = 0.57$; $RRMSE = 0.16$)，兩者有合格或接近合格的表現。此外，ERA-interim 資料表現明顯遜於前兩者 ($R^2 = 0.41$; $RRMSE = 0.34$)，CFSR 資料表現仍是四種

氣象再分析產品中表現最差的一種 ($R^2 = 0.26$; $RRMSE = 0.72$)。我們也發現，沒有掌握到水汽變化量和位置是 ERA-interim 和 CFSR 資料表現較差的主要原因(見圖 2b 和 2d)。在分區表現部分，ERA-40 資料在西太平洋和北印度洋地區最接近 SSM/I 資料，ERA-interim 次之，NCEP-R2 和 CFSR 資料則明顯表現不佳。不過，在東太平洋地區，除了 CFSR 外，NCEP-R2 表現並不遜於 ERA-40 以及 ERA-interim，三者都合格的表現。

表 2 四種氣象再分析資料垂直積分氣柱水汽量和 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量在全球熱帶地區(Tropics)、西太平洋(WPO)、東太平洋(EPO)、北印度洋(NIO)地區之時間變化趨勢統計檢定，檢定量包含『型態相似度』(R^2)及『相對均方根誤差』(RRMSE)。

	NCEP-R2 vs. SSM/I	CFSR vs. SSM/I	ERA-40 vs. SSM/I	ERA-interim vs. SSM/I
Tropics	$R^2 = 0.57$	$R^2 = 0.26$	$R^2 = 0.88$	$R^2 = 0.41$
	RRMSE = 0.16	RRMSE = 0.72	RRMSE = 0.11	RRMSE = 0.34
WPO	$R^2 = 0.35$	$R^2 = 0.40$	$R^2 = 0.72$	$R^2 = 0.60$
	RRMSE = 0.56	RRMSE = 0.65	RRMSE = 0.18	RRMSE = 0.32
EPO	$R^2 = 0.80$	$R^2 = 0.42$	$R^2 = 0.79$	$R^2 = 0.78$
	RRMSE = 0.16	RRMSE = 0.58	RRMSE = 0.16	RRMSE = 0.18
NIO	$R^2 = 0.33$	$R^2 = 0.43$	$R^2 = 0.78$	$R^2 = 0.52$
	RRMSE = 0.45	RRMSE = 0.52	RRMSE = 0.15	RRMSE = 0.33

為瞭解不同資料對熱大地區氣候變異訊號反應，圖 4 顯示 1997/98 年超級聖嬰成熟期（1997 年 12 月至 1998 年 1 月）四種氣象再分析資料和 SSM/I 資料氣柱水汽量空間距平之比較。在定性方面，雖然四種氣象再分析資料都有掌握到聖嬰成熟期熱帶地區主要水汽變化特徵（如：赤道東太平洋地區的水汽正距平、西太平洋和副熱帶地區的馬蹄型水汽負距平、以及印度洋地區的雙極型水汽正-負距平分佈等），不過在定量方面，看起來仍然以 ERA-40 和 ERA-interim 資料最接近 SSM/I 觀測值，NCEP-R2 和 CFSR 資料則有低估水汽變化量的情形，其中又以 CFSR 資料低估情形最為顯著。

四、結論

本文比較了氣候研究常用的四種氣象再分析資料，包括 NCEP-R2, CFSR, ERA-40 及 ERA-interim 資料，在熱帶地區的氣柱水汽量時空分

佈，並與 SSM/I 衛星反演氣柱水汽量進行比對。研究分析顯示，ERA-40 垂直積分氣柱水汽量，無論在空間分佈或時間變化趨勢上，都與 SSM/I 觀測值最為接近，也大致符合 Hollingsworth et al. (1980)的合格標準。ERA-interim 和 NCEP-R2 資料表現各有優劣：在空間分佈和聖嬰成熟期反應方面，ERA-interim 資料明顯優於 NCEP-R2 資料；但在時間變化趨勢上，NCEP-R2 反而略勝 ERA-interim 一籌。另外一方面，CFSR 無論在空間分佈、時間變化趨勢、或是聖嬰成熟期反應方面，其表現都是四種氣象再分析產品中最差的一種。此結果似乎顛覆了傳統上對氣象再分析資料的認知，亦即第三代氣象再分析產品（如：CFSR 和 ERA-interim）不一定優於上一代（如：NCEP-R2 和 ERA-40）。本研究的統計檢定顯示，至少在氣柱水汽量上，屬於第二代的 ERA-40 資料，可能是四種常用氣象再分析資料中最好的一種，值得氣候變遷研究者注意。本研究純屬不同再分析

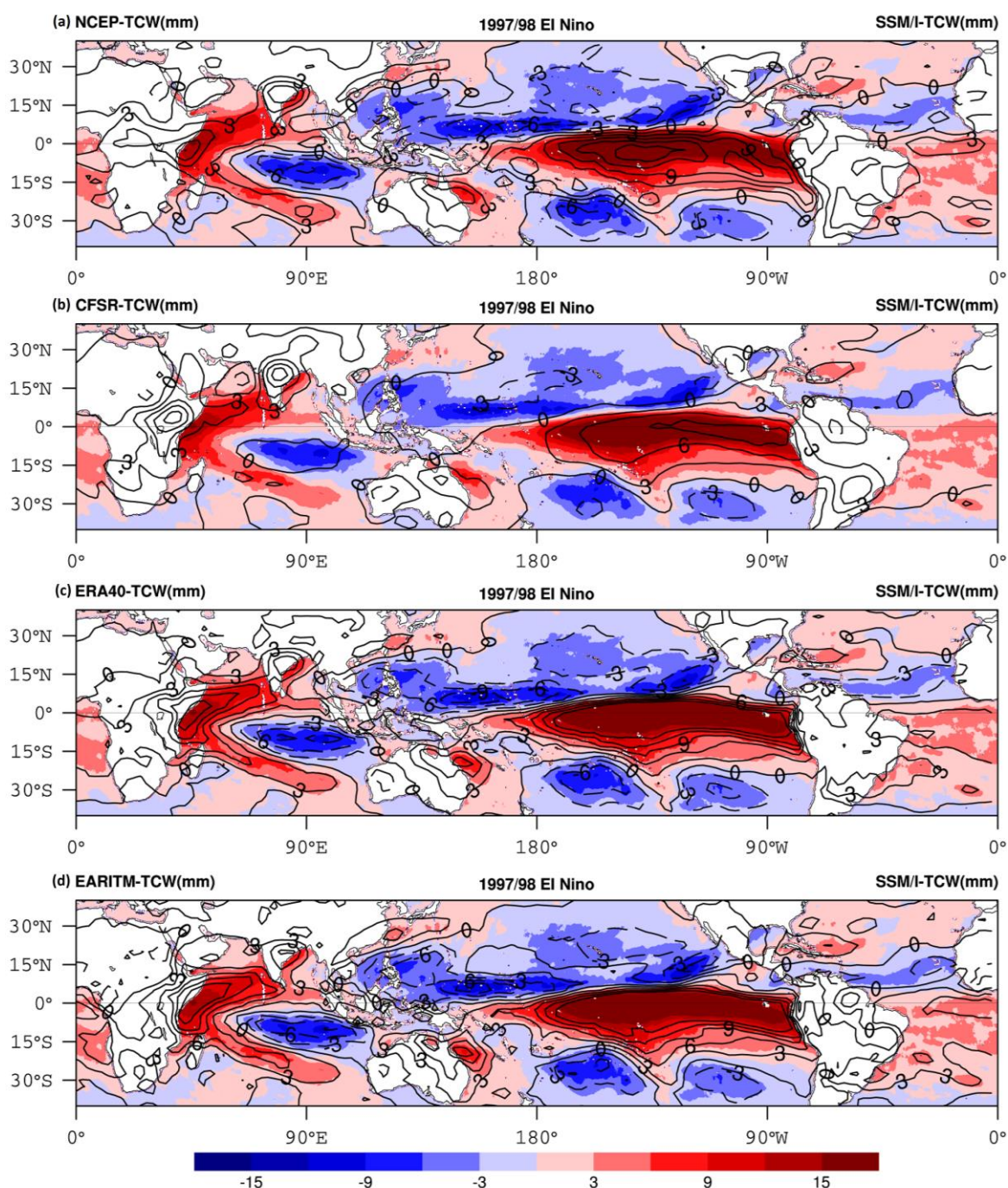


圖 4 (a) NCEP-R2, (b) CFSR, (c) ERA-40 以及(d) ERA-interim 垂直積分氣柱水汽量（等值線）和 SSM/I 反演氣柱水汽量（色階）於 1997/98 超級聖嬰成熟期時之水汽距平空間分佈比較。成熟期定義為 1997 年 12 月至 1998 年 1 月間，單位為 mm。

資料氣柱水汽量比較，資料間存在差異原因需要進一步詳細分析，並不在本文討論範圍內。

致謝

本研究由科技部計畫 MOST 102-2111-M-034-006 支助所完成，所使用的資料則由美國大氣科學大學聯盟（University Corporation for Atmospheric Research，簡稱 UCAR）氣候資料庫連結點下載（<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>）。作者非常感謝兩位審查委員提供的寶貴建議，使本文內容得以更為完善。

參考文獻

- Dee, D. P., and coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, and R. Kistler, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kistler R., E. Kalnay, and W. Collins, 2001: The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 247-267.
- Grody, N. C., 1991: Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave Imager. *J. Geophys. Res.*, **96**, 7423-7435.
- Hollingsworth, A., K. Arpe, M. Tiedtke, M. Capaldo, and H. Savijarvi, 1980: The performance of a medium range forecast model in winter—impact of physical parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1736-1773.
- Suranjana, and Coauthors, 2010: The NCEP Climate forecast system reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057.
- Uppala, S. M., and coauthors, 2004: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012.
- Yu, J.-Y., C.-W. Chang, and J.-Y. Tu, 2011: Evaluation and improvement of a SVD-based empirical atmospheric model. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**, 636-652.

Comparisons of Total Column Water Vapor Among Four Popular Meteorological Reanalysis Data over Tropical Region

Hsiao-Wei Liu¹ and Jia-Yuh Yu^{1,2}

¹ Graduate Institute of Earth Science, Chinese Culture University, Taipei 11114

² Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei 11114

(manuscript received 20 April 2014 ; in final form 28 May 2014)

ABSTRACT

In this study, the vertically-integrated total column water vapor (TCWV) generated from four popular meteorological reanalysis data, including NCEP-R2, CFSR, ERA-40 and ERA-interim, were compared against the SSM/I TCWV, with a focus on spatial distribution and temporal variation patterns. The analyses showed that the TCWV from ERA-40 bears strong resemblance to that from SSM/I in both spatial distribution and temporal variation patterns. This result seems to be in contradiction to what we have anticipated, i.e., the third generation reanalysis products are not necessarily superior to the previous ones, which is a noteworthy caveat for the climate research community. This study simply compares the differences among various reanalysis data; while the underlying causes responsible for such differences are not discussed as those are beyond the scope of this study.

Key Words: Meteorological reanalysis data, Total column water vapor

