

TRMM、CMORPH、PERSIANN 三組衛星資料 對臺灣降雨日變化特色的表現能力評估

陳思穎 黃婉如*

國立臺灣師範大學地球科學系

(中華民國一〇六年八月三日收稿；中華民國一〇六年十一月八日定稿)

摘 要

本研究檢驗 TRMM、CMORPH 及 PERSIANN 三組衛星觀測降雨資料對於臺灣降雨日變化特色的表現能力。檢驗過程從降雨日平均值(daily mean)及日變化量(diurnal variation)兩方面進行探討。在降雨日平均值方面，本研究發現雖然三組衛星產品皆有低估實際降雨量的缺點，但三者皆能大致掌握到「日平均降雨最大值區域，隨季節變化有逆時針移動」之特性，且三者之中以 TRMM 的表現最好。在降雨日變化量方面，本研究發現 TRMM 亦較 CMORPH 及 PERSIANN 更能掌握臺灣春、夏、秋三季降雨之日變化時、空分佈，能呈現最大降雨發生時間及區域為午後山區。但在冬季降雨日變化量方面，三組衛星產品則皆無法良好地表現出「臺灣東邊夜間降雨，西邊清晨降雨」的區域差異特色。最後，本研究亦針對春、夏、秋三季，探討 TRMM 對於臺灣日變化降雨的掌握度比 COMRPH 及 PERSIANN 兩組衛星資料好的可能原因。結果發現，三組衛星資料對臺灣地區降雨差異的表現，主要來自於衛星資料對陸面降雨、地形降雨的表現能力差異。相較之下，三組衛星資料對臺灣臨近海面移動系統的降雨的表現差異則較小。

關鍵字：日變化、降雨、衛星觀測

*通訊作者：黃婉如，116 臺北市文山區汀州路四段 88 號，Email: wrhuang@ntnu.edu.tw，
TEL: 02-77346413

一、前言

臺灣位處於東亞季風區、四面環海，除局地的熱對流降雨外，海面移入的天氣系統更是主要的降雨來源，因此如何有效瞭解海面移入的天氣系統是如何影響臺灣降雨，對臺灣水資源的安排及使用相當重要。然而在海面上觀測站數目不足的情況下，若單就地面測站所量測到之降雨資料，仍很難有效針對「海面上的天氣系統如何影響陸地降雨」這個議題進行深入分析。對此，透過衛星降雨資料產品的應用，能有助於瞭解海面降雨、陸面降雨的變化過程，故常被應用於瞭解臺灣降雨的成因(Wang and Chen, 2008; Huang and Wang, 2014)。然而，由於衛星降雨的推估於陸地及海洋均有特定演算法，於各觀測像素及各單一時刻進行之，因此並非海上推估正確，於數小時後因為流體力學及上下游環流等，依時序陸地上就會有較優異的降雨推估。所以若要將衛星資料產品應用在「海上系統如何影響降雨的成因」的相關研究上，至少要能證明該衛星降雨產品在陸面降雨的表現與實際測站觀測資料相比相近似。在判斷出衛星觀測資料是否能合理呈現當地降雨特性之後，才能進而被應用在相關研究上。

然而，衛星降雨資料產品的應用雖能彌補地面及海上站點資料的不足，但其反演結果與實際測站觀測資料相比，卻往往存在過於高估或低估的情形(Tang et al., 2015; Bai et al., 2008; Zhao et al., 2014; Cai et al., 2014)。舉例來說，Gosset et al. (2013) 檢驗多組衛星資料在西非熱帶乾旱、半乾旱氣候區的降雨估算能力，發現 TRMM 3B42 (往後簡稱 TRMM；全名詳見表一)、CMORPH (全名詳見表一)、GSMaP (全名詳見表一) 產品對西非地區的降雨估算能力相對較高。另一方面，Li et al. (2014)分析 TRMM、CMORPH 和 PERSIANN (全名詳見表一) 等衛星資料對於長江流域降雨的反演能力後發現，整體而言 TRMM 對降雨之估算優於其他資料，而 CMORPH 和 PERSIANN 對於降雨之估算則較為低估。此外，成等(2014)利用 TRMM 及 CMORPH 分別與中國在 2007~2010 年的降雨資料進行分析比對，發現 CMORPH 衛星產品在降雨量上比 TRMM 衛星產品更能反應中國降雨在南北差異及季節性周期變化。而李等(2016)以 1998~2014 年渤海地區 55 個測站資料，分別從日、月時間尺度對 TRMM、CMORPH 及 PERSIANN 等衛星降雨產品進行評估，結果發現整體而言 TRMM 無論在日、月尺度時間中，對於

表 1 衛星資料全名。

縮 寫	全 名
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
CMORPH	Climate Prediction Center Morphing method
PERSIANN	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
GSMaP	Global Satellite Mapping of Precipitation

渤海地區降雨的相關性皆為三者中最高，而 PERSIANN 則為三者中最低。

上述研究中顯示，由於各組衛星產品對不同地區之降雨表現能力不盡相同，因此需透過衛星產品之檢驗，找出對於選定之研究地區表現最佳的衛星產品。然而，在過去針對臺灣降雨特性的研究中，多半以 TRMM 降雨資料進行分析 (Kishtawal and Krishnamurti, 2001; Su et al., 2008; Zhou et al., 2008; Xue et al., 2013; Huang and Wang, 2014)。檢視過去文獻，雖然有研究指出 TRMM 衛星降雨資料對於臺灣暖季降雨的時、空特色有一定的掌握能力 (Kishtawal and Krishnamurti, 2001; Huang and Wang, 2014)，但較少有相關文獻探討其它衛星資料對於「臺灣暖季降雨特性」的降雨掌握能力。此外，有關 TRMM 或其他衛星產品對於「臺灣冷季降雨的時、空特色」之掌握能力，相關分析探討同樣較少。對此，本研究中將藉由分析「臺灣季節性降雨日變化的時、空間特性」，進一步了解三種較常被使用於東亞地區降水研究使用的不同衛星降雨產品(包含 TRMM、CMORPH、PERREASN)對於臺灣季節性日夜降雨真實度的表現。研究主要分析項目包含：(1)四季降雨日平均值(daily mean)之時、空分布特色，(2)四季降雨日變化(diurnal variation)之時、空分布特色，(3)日周期(diurnal)、半日周期(semi-diurnal)現象對於季節性降雨日變化的影響，以及(4)三組衛星降雨資料產品對臺灣降雨日變化表現差異的可能原因探討。

本研究的其它章節安排如下：使用的資料及分析方法將在第二章中說明，第三章中將針對研究的分析結果進行描述及討論，而第四章將總結本研究之主要發現。

二、資料與方法

本研究採用臺灣氣候變遷推估與資訊平臺 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, 以下簡稱 TCCIP) 所產製的地面測站降雨網格化資料當作實際觀測資料 (以下簡稱地面觀測資料，來源：<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/index.aspx>)，其空間解析度為 $0.0125^{\circ} \times 0.0125^{\circ}$ 。此資料所使用的地面測站來自於中央氣象局屬站、中央氣象局自動雨量站及民用航空局測站。近來，已有愈來愈多研究 (如，Huang et al., 2016a-b) 利用此資料對臺灣降雨的區域特性進行分析。

在衛星資料方面，本研究採用 TRMM、CMORPH 和 PERSIANN 三組衛星降雨資料產品做比對。其中，TRMM 衛星 (Simpson et al., 1996) 是由美國國家航空暨太空總署 (NASA) 與日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 聯合開發。而本研究所使用之 TRMM 3B42 降雨資料，是由多衛星降雨分析演算法反演得到。該演算法主要結合 TRMM 衛星的微波輻射儀 (TMI)、DMSP 衛星的微波輻射儀 (SSM/I)、Aqua 衛星的微波掃描儀 (AMSRE) 和美國國家海洋暨大氣總署 (NOAA) 衛星搭載的微波探測裝置 (AMSU-B) 感測器，在獲得微波資料後，反演得到全球 50°N - 50°S 範圍內、時間間隔為 3 小時的降雨值，其水平空間解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Huffman et al., 2007)。至於 CMORPH 衛星資料 (Joyce et al., 2004)，其是由美國 NOAA 氣候預測中心發展，主要透過 Ferraro (1997) 所提出之 SSM/I 衛星降雨率估算方法、Ferraro et al. (2000) 所提出之 AMSU-B 衛星降雨率估算方法及 Kummerow et al. (2001) 提出之 TMI 衛星降雨率估算方法，將 DMSP SSM/I、NOAA AMSU-B、NASA Aqua AMSR-E、TRMM TMI 等衛星微波探測資料進行反演，當微波觀測資料不

足時則使用地球同步軌道衛星觀測之紅外線資料估算而成的全球資料。而 PERSIANN 衛星資料 (Hsu et al., 1997)，則是由美國亞利桑那大學應用人工神經網路方法(ANN)系統功能分類及近似程序，搭配多組全球地球同步衛星(GOES-8、GOES-10、GMS-5、Metsat-6 和 Metsat-7)所提供的紅外亮度溫度(brightness temperature)圖像來估計降雨率，並使用低軌道衛星(TRMM、NOAA-15、NOAA-16、NOAA-17、DMSP F13、DMSP F14、DMSP F15)定期更新模式參數的衛星降雨產品。與 TRMM 相同，本研究所採用的 CMORPH 及 PERSIANN 降雨資料，其空間解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，時間解析度為每 3 小時一筆。

另外，由於在原始的 TRMM 衛星資料中，02:00 時代表意義是 00:30 至 03:30 時的區間平均，並依此類推(Huffman et al., 2007)。而在原始的 CMORPH (Joyce et al., 2004)、PERISANN (Hsu et al., 1997)資料中，02:00 時代表意義是 02:00 至 04:59 時的時間區間，並依此類推。為了一致性，本研究將 CMORPH、PERISANN 的資料進行線性內插後，得到與 TRMM 資料相同的時間區間估算 (i.e., 圖 2 至圖 6、圖 8 至圖 12 之時間標示，“02”時的代表意義是，各資料針對 00:30 至 03:30 時的時間區間之平均值估算，並依此類推)。而在比對不同空間解析度之衛星資料與 TCCIP 資料時，我們將三組衛星資料線性內插為與 TCCIP 資料相同的解析度。

本研究著重在 1998-2015 年之間的降雨特色分析。主要針對春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月) 及冬 (12 月到隔年 2 月) 四個季節的降雨特色進行分析。文中所提及之日變化量，其計算方式如方程式(1)所示：

日變化量 = 原始 3-hourly 資料 - 日平均值。(1)

研究過程中採用波譜分析方法(power spectrum analysis)，找出降雨日變化的主要振盪周期。並採用傅立葉分析方法(Fourier analysis)，將降雨日變化分為日周期及半日周期分量，進行相關討論。有關波譜分析方法及傅立葉分析方法的詳細計算公式，請參見 von Storch and Zwiers (1998)。

三、結果與討論

本章節的安排如下。首先，在第(一)小節中檢視三組衛星資料對四季之日平均降雨量的表現能力。接著於第(二)小節中，分析三組衛星資料針對四季降雨日變化量之時間、空間特性的掌握能力。而在第(三)小節中，我們將更進一步判別三組衛星資料是否能有效掌握「降雨日變化量之季節性差異，主要是受到日周期變化之季節性差異所控制 (將於稍後證明)」現象。最後，在第(四)小節中，我們將針對春、夏、秋三季，TRMM 衛星表現較好的季節 (將於稍後證明)，討論造成三組衛星降雨資料產品對臺灣日變化降雨表現差異之可能原因。

(一) 四季日平均降雨量的差異

首先我們以地面觀測資料分析臺灣年平均降雨量及四季日平均降雨量之空間分布 (圖 1a)。結果發現在臺灣年平均降雨量部分中，主要降雨區域位在北部、東北部及山區。四季日平均降雨量方面，春季的日平均降雨主要集中在山區及北部地區；夏季降雨區域往南部移動，以西南部沿中央山脈西側山區為降雨較多；而秋季的主要降雨區域由夏季的西南部山區往東部移動，其中以東北部地區最多；冬季時臺灣降雨最多處則集中在臺灣北部及東北部沿海地區 (圖 1a)。這些地面觀

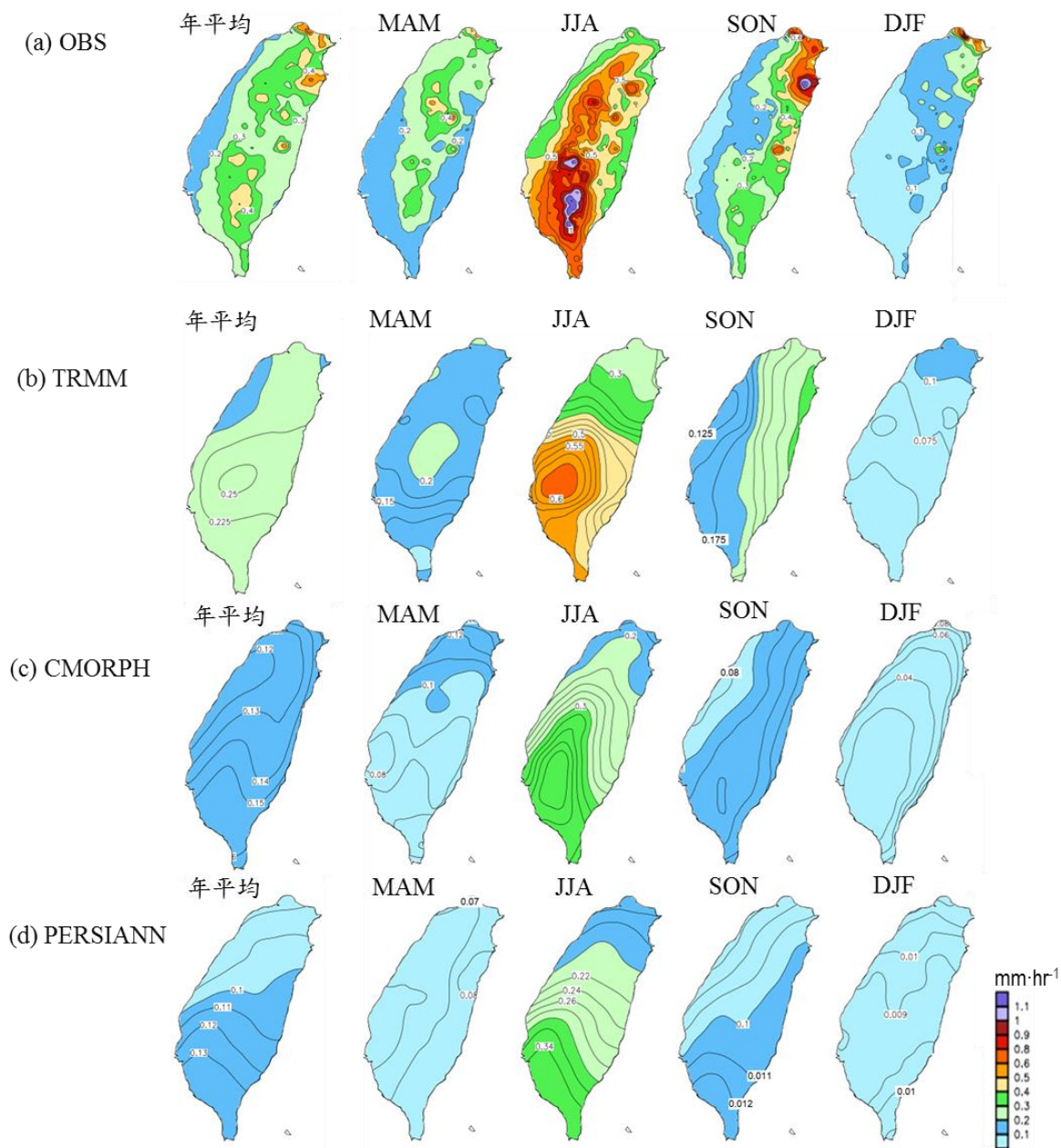


圖 1 臺灣年平均及四季氣候平均場降雨水平空間分布。(a)為地面觀測資料，(b)-(d)為三組衛星觀測資料：(b) TRMM (c) CMORPH 及(d) PERSIANN。色標如圖所示，單位為 $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 。

測降雨分布特性與過去研究相符 (Boyle and Chen, 1987; Chen and Chen, 2003; 陳和汪, 2000; 翁和楊, 2012; 吳等, 2012), 皆呈現臺灣日平均降雨量之最大值區域, 會隨著季節改變而有「逆時針」移動的特色 (Yen and Chen, 2000; 翁和楊, 2012)。

比對上述地面觀測 (圖 1a) 與三組衛星資料 (圖 1b-d) 差異, 結果發現, 在臺灣年平均降雨量部分中, TRMM 能夠掌握到雨量集中在北部、東北部及山區, 而 CMORPH 雖能表現出降雨集中在北部及東北部沿海地區, 但對於山區的降雨較無法完整的呈現其空間分布特徵。至於 PERSIANN, 則是對於北部、東北部及山區的年平均降雨, 皆無法良好的掌握。在四季日平均降雨量的部分中, 春季以 TRMM 降雨分布能夠掌握到雨量多集中在中部山區 (圖 1b), 與地面觀測資料較接近。而 CMORPH (圖 1c) 在北部和西北部地區有較多的降雨量, 但是無法表現出山區之分布特徵, 而 PERSIANN (圖 1d) 則無法掌握春季日降雨多集中在中部山區的情形。從夏季降雨分布結果來看, 三組衛星降雨資料皆能表現出在西南部有較大的降雨分布之特徵, 其中以 TRMM 與地面觀測降雨的分布結果最為相似。而在秋季時, 同樣以 TRMM 與地面觀測降雨的分布結果最為接近, 皆顯示東北部有較大的降雨分布特徵, 並且降雨量有由東向西逐漸遞減的情形。

至於 CMORPH、PERSIANN, 雖亦能掌握到秋季日平均值降雨有由東向西逐漸遞減的情形, 但並無 TRMM 之分布清楚, 且在降雨量的部分, 明顯低估於地面觀測及 TRMM 降雨資料。至於在冬季時, 雖然 TRMM 及 CMORPH 兩者皆能表現出與地面觀測降雨相同的特性 (即在臺灣北部及東北部地區降雨較西南部多的特徵), 但仍以 TRMM 的降雨分布較為接近地面觀測降雨分布。

進一步比較地面觀測資料與三組衛星降雨資料在各季節之空間相關性 (表二), 結果發現在三組衛星降雨資料中, 以 TRMM 在四季的空間分布表現與地面觀測資料的相關係數最高, 而 PRERSIANN 最低。而有關 PERSIANN 與地面觀測資料, 在日平均值的空間相關係數, 於 MAM 呈現極低的相關性 (見表二), 有可能是因為 PERSIANN 在 MAM 中無法掌握山區極大值的現象 (見圖 1), 導致兩者的空間相關性低。綜合以上所述, 我們可以發現, 在氣候平均場的空間分布中以 TRMM 最能表徵臺灣季節性降雨的空間分布特色。需注意的是, 若將三組衛星資料與地面觀測資料的「全臺降雨日平均值」能力表現進行比較評估 (表三), 可發現三組衛星降雨資料皆為低估實際降雨日平均值, 其中又以 PRERSIANN 低估最為明顯。其中的可能差異原因, 將於後面第四小節一併說明。

表 2 地面觀測資料與三組衛星資料之四季氣候平均降雨 (圖 1) 空間相關係數統計表。

資料 \ 季 節	MAM	JJA	SON	DJF
TRMM	0.65	0.64	0.81	0.83
CMORPH	0.63	0.62	0.67	0.74
PERSIANN	0.16	0.59	0.60	0.35

表 3 地面觀測資料與三組衛星資料之四季氣候平均降雨（圖 1）所估算出之臺灣區域降雨日平均值統計表，單位為 mm hr^{-1} 。

資料 \ 季節	MAM	JJA	SON	DJF
OBS	0.37	0.90	0.46	0.19
TRMM	0.17	0.43	0.21	0.07
CMORPH	0.11	0.27	0.15	0.05
PERSIANN	0.08	0.25	0.10	0.01

（二）四季降雨日變化量之時間、空間特性差異

由第（一）小節的結果得知，三組衛星資料中以 TRMM 最能表現出臺灣降雨日平均值的季節性空間分布特色差異。為瞭解 TRMM 是否也是三組衛星資料中，對臺灣降雨日變化量之時、空特性表現最好者，我們接著比對地面觀測資料與三組衛星降雨資料在四季降雨日變化量中的時間和空間分布特色差異（圖 2～圖 5）。

首先，由圖 2a、3a 及 4a 中的地面觀測資料中可以看到，臺灣在春、夏、秋三季的清晨（02-08 時）降雨主要發生在臺灣西部沿海地區，春季時主要位於西部沿海地區（圖 2a）；夏季則由西南部沿海為主（圖 3a）；秋季時，除了在北部及西部沿海部分地區外，在東部沿海部分地區同樣也有降雨發生（圖 4a）。而在春、夏、秋三季的 11-17 時皆可觀測到區域性熱對流降雨產生。到了夜間（20-23 時），三季在東部沿海地區皆有降雨產生，其中以夏季的降雨較少，春、秋兩季最為明顯。接著，將上述地面觀測結果與 TRMM、CMORPH 及 PERSIANN 的空間分布進行比對後，我們發現在春、夏、秋三季主要以 TRMM 與地面觀測資料的空間分布最為相似。以午後為例，TRMM 有掌

握到與地面觀測資料相似之降雨量最大值主要發生在 17 時的現象（見圖 2b、3b 及 4b），但另外兩組衛星資料的降雨量最大值的發生時間則較為提早（見圖 2 c-d、3 c-d 及 4c-d）。至於冬季的日變化量降雨空間分布則與其他三季不同，由地面觀測資料（圖 5a）中可以看到，臺灣冬季清晨（02-08 時）降雨主要發生在西北部地區，而夜間（17-23 時）之降雨則集中在東半部，降雨日變化有明顯的東西差異特徵。而 TRMM、CMORPH 及 PERSIANN 的空間分布表現（圖 5b-d）中，三組資料皆無法完整表現出臺灣降雨日變化之東西差異的空間分布特徵。

若進一步將圖 2～圖 5 中，各季節之地面觀測資料與衛星資料的降雨日變化量進行空間相關分析（表四），我們發現 TRMM 在春、夏兩季之空間相關性皆明顯高於其他兩組衛星資料，而秋季三組衛星降雨資料之相關係數表現差異不大。特別的是，在冬季時，三組衛星降雨資料就降雨日變化量的空間特性變化，其掌握能力皆不佳。這些結果（表四及圖 2～圖 5）顯示，針對春、夏、秋三季而言，TRMM 仍是三組衛星資料中對臺灣降雨日變化量表現較好者。但在冬季方面，三組衛星資料對臺灣降雨日變化量的時間、空間特色表現皆不佳。

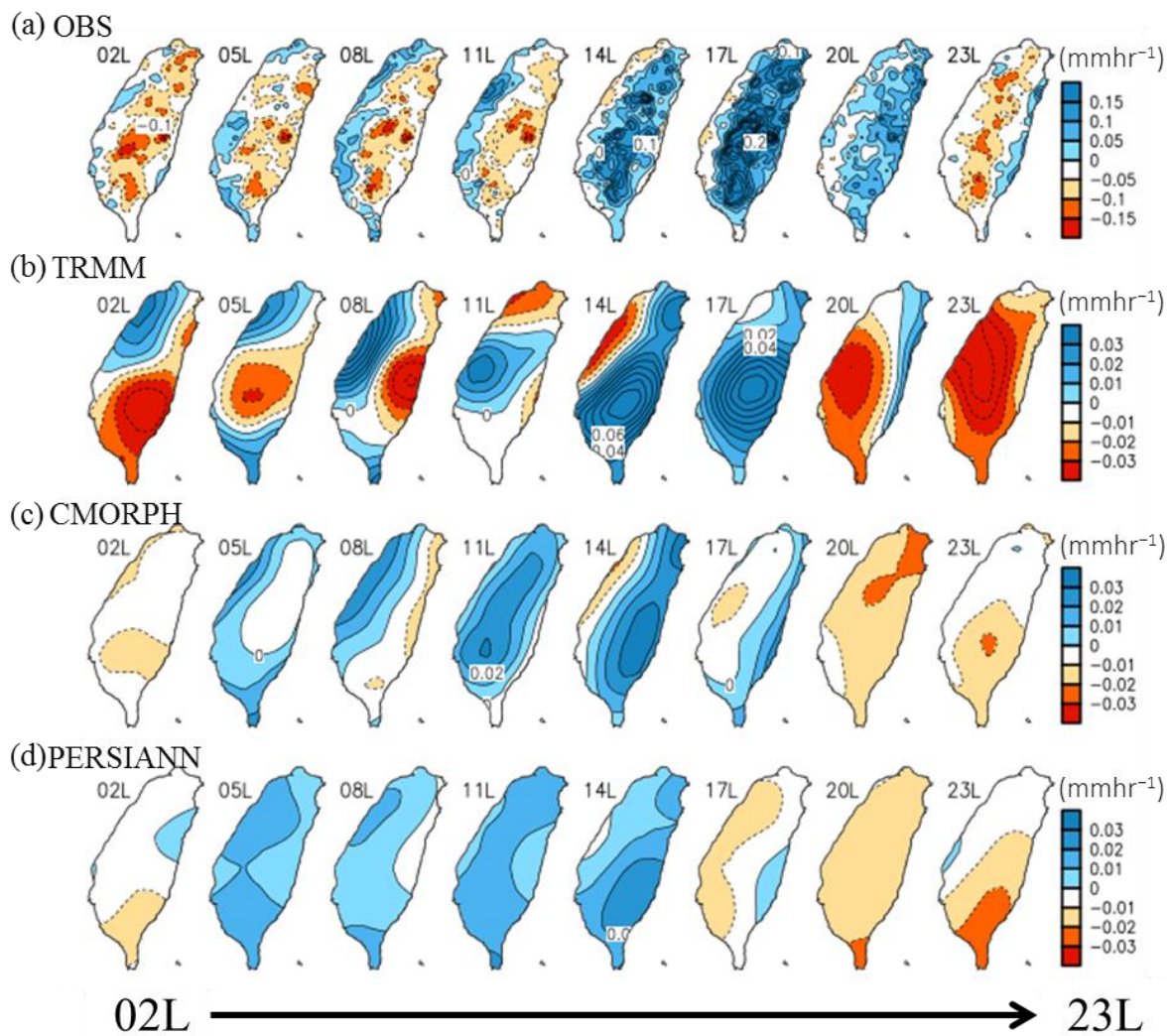


圖2 春季降雨日變化量之時間、空間變化。(a)為地面觀測資料，(b)-(d)為三組衛星觀測資料：(b) TRMM (c) CMORPH 及(d) PERSIANN。色標如圖所示，時間為當地時間 L，單位為 mm hr^{-1} 。

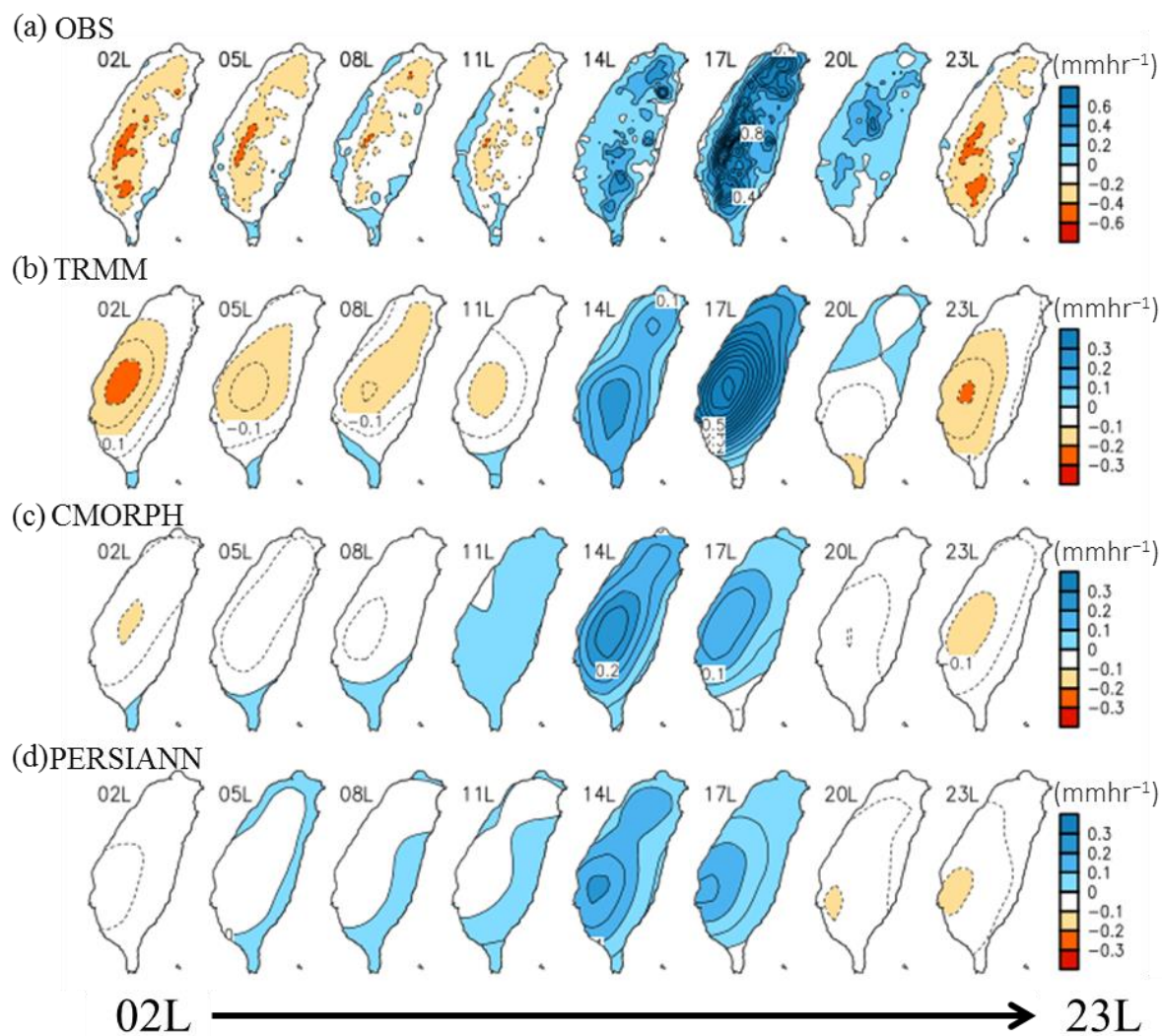


圖 3 類似圖 2，但為夏季降雨日變化量之時間、空間變化。單位為 mm hr⁻¹。

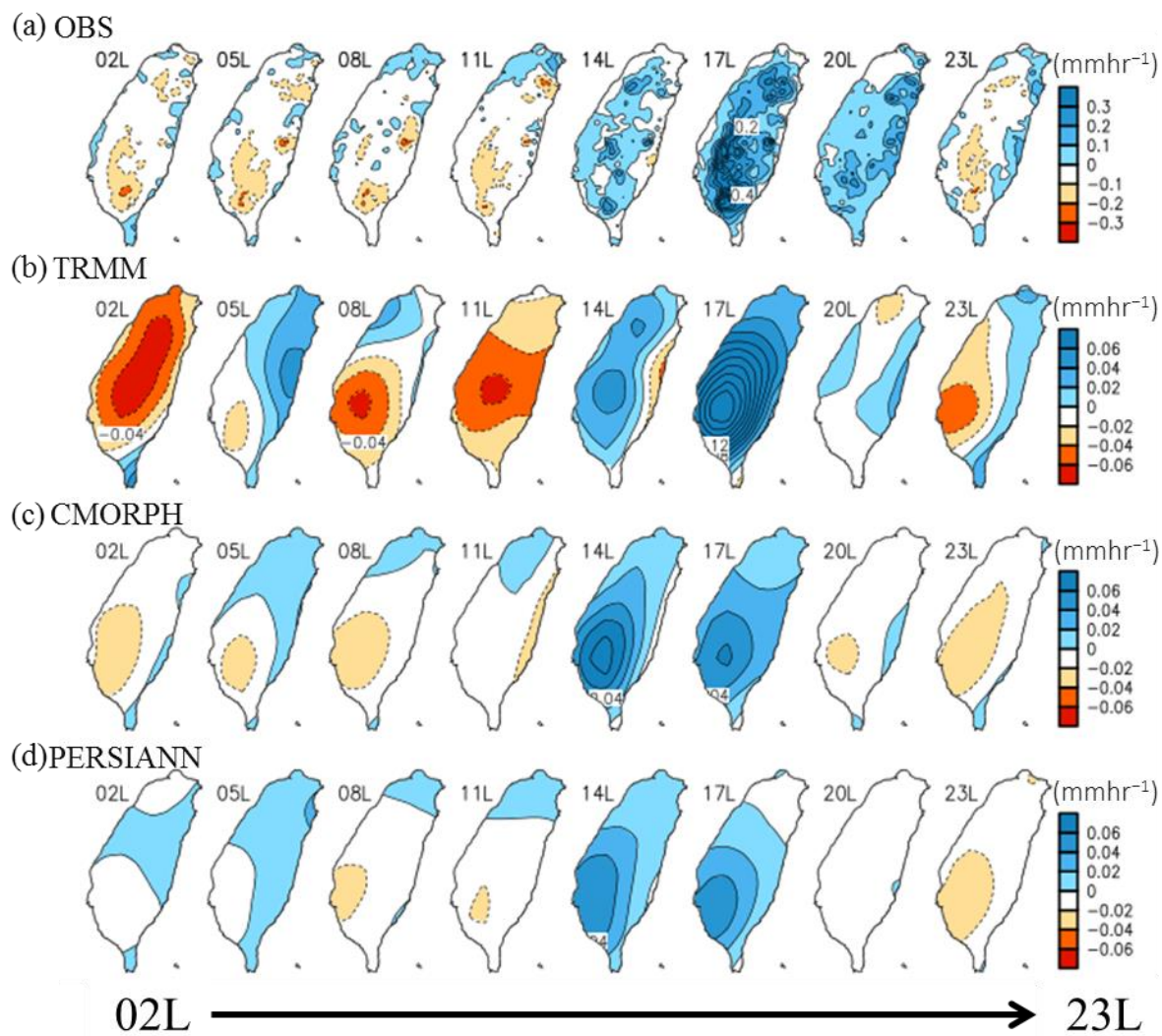


圖 4 類似圖 2，但為秋季降雨日變化量之時間、空間變化。單位為 mm hr⁻¹。

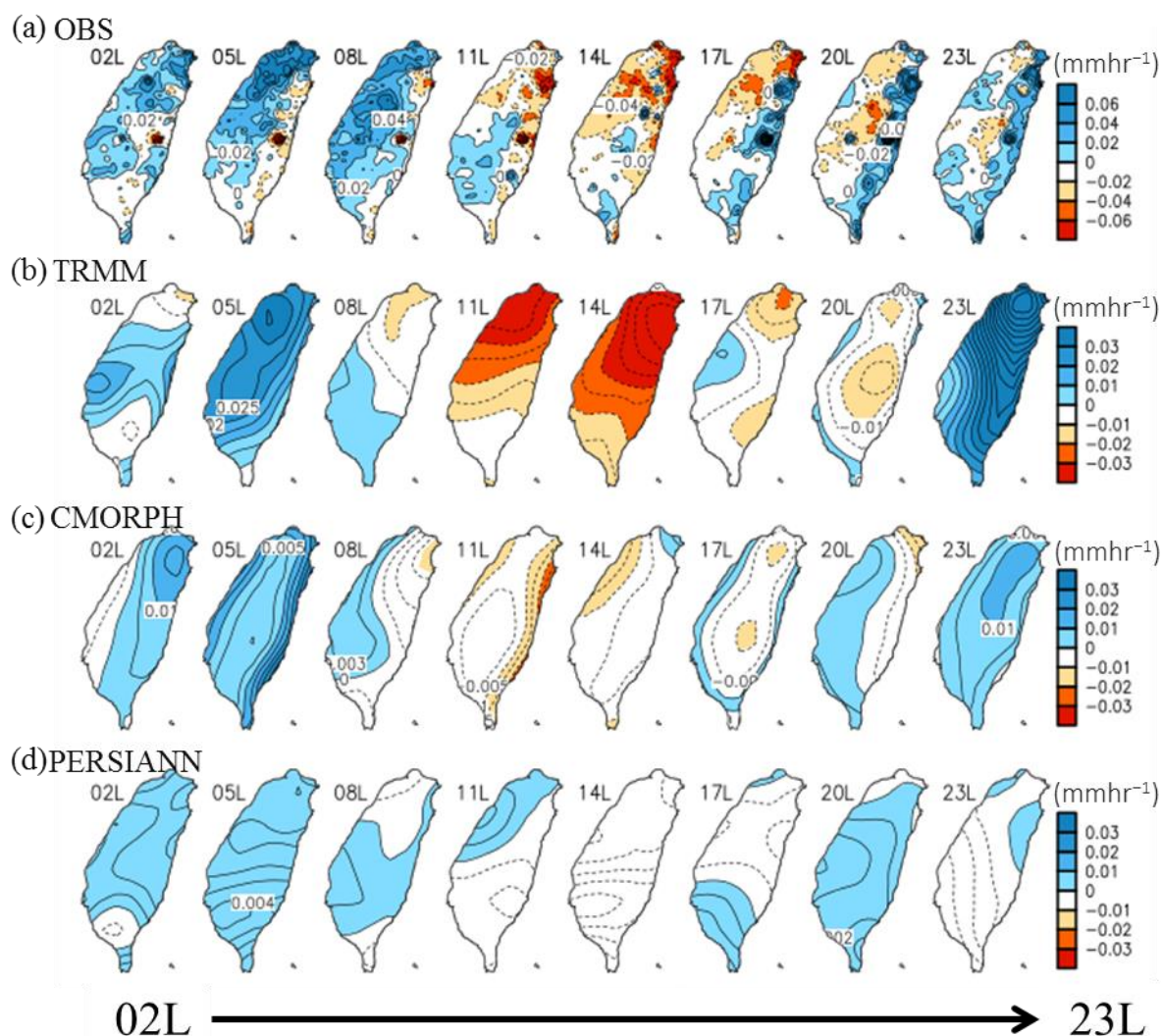


圖 5 類似圖 2，但為冬季降雨日變化量之時間、空間變化。單位為 mm hr^{-1} 。

表 4 地面觀測資料與三組衛星資料在 MAM (圖 2)、JJA (圖 3)、SON (圖 4)、DJF (圖 5) 季節中的日變化量空間相關係數統計表。

資料 \ 季節	MAM (圖 2)	JJA (圖 3)	SON (圖 4)	DJF (圖 5)
TRMM	0.60	0.73	0.57	0.18
CMORPH	0.21	0.60	0.60	-0.07
PERSIANN	0.25	0.58	0.53	-0.06

接著，我們將各季節的降雨日變化進行全臺區域平均（圖 6），比較各組衛星資料對全臺區域平均降雨日變化的表現能力。由地面觀測資料顯示，在春、夏、秋三季主要以午後降雨量最多，全臺區域平均降雨隨時間變化的共同點為最大值出現在下午 17 時（圖 6a-c）；冬季則與其他季節不同，一日中降雨最大值發生在夜晚至清晨間，其發生時間在 23 時（圖 6d）。若將這些地面觀測資料結果與三組衛星降雨資料進行比對，則可發現 TRMM 不但在春、夏、秋三季有著與地面觀測資料相同的表現（即最大降雨量是在 17 時，最小值在 23-02 時）（見圖 6a-c），在冬季時同樣有著與地面觀測資料相同的表現（即且最大值發生時間在 23 時）（見圖 6d）。此結果顯示，雖然 TRMM 無法掌握冬季日變化量的空間分布（圖 5），但對於冬季全臺降雨的區域平均值的掌握能力卻不差（圖 6d）。

而與圖 2~圖 5 相同，CMORPH、PERSIANN 在春、夏、秋三季之全臺降雨的區域平均最大值時間皆出現在 14 時，與地面觀測資料比較後皆有提早的情形（圖 6a-c）。冬季時（圖 6d），CMORPH 資料則顯示全臺降雨的區域平均最大值發生時間在 05 時，此與地面觀測資料結果不同。至於 PERSIANN，其冬季全臺降雨的區域平均之日變化振幅則過小，沒有明顯的日變化現象（圖 6d）。為了佐證上述發現，我們更進一步計算圖 6 中地面觀測資料與三組衛星資料的時間變化相關係數（表五），結果發現 TRMM 在春、夏、秋三季之相關係數皆為三組衛星資料中最高；而冬季時，雖然 TRMM 與 CMORPH 結果相近，但以 TRMM 相關係數略高。另外，需說明的是，在春季時因為 CMORPH、PERSIANN 所呈現出的降雨日變化量，與觀測資料之間有明顯的時間相位差（圖

6a），導致 CMORPH、PERSIANN 所對應到的空間相關性（表四）與時間相關性（表五），數值皆較 TRMM 所對應到的低。

（三）降雨日周期和半日周期的季節性特色

過去研究常採用波譜分析方法，對局部地區之降雨日變化量進行分析，以便瞭解降雨的日變化量是由那些周期變化所組成。舉例來說，Huang and Chan (2012)採用波譜分析方法，對臺灣鄰近的華南地區的降雨日變化量進行頻率分析，發現日周期及半日周期為其主要振盪周期變化。而後，Huang and Chan (2012)再利用傅立葉分析方法，將降雨的日變化量分解成日周期及半日周期分量，進行相關討論，並發現「該地區降雨日變化量之季節性差異」，主要是受到「日周期變化之季節性差異」的控制，而非「半日周期變化之季節性差異」的控制。由於造成局部地區降雨日周期變化與半日周期變化的機制可能不同(e.g., Huang and Chan, 2012)。因此，若能於本研究中進一步瞭解，圖 6 所顯示之「全臺降雨的區域平均日變化量之季節性差異」，主要是受到「日周期變化之季節性差異」或「半日周期變化之季節性差異」所控制，將有助於未來相關研究進行更深入分析。有鑑於此，本小節中我們將沿用 Huang and Chan (2012)所提出之分析步驟，先利用波譜分析方法，找出圖 6 中降雨日變化量的主要振盪周期，之後再透過傅立葉分析方法，將降雨日變化量的主要振盪周期分別取出，進行相關討論。主要結果，如下所述。

由圖 7 中清楚可見，在四季的降雨日變化的波譜分析結果中，日周期及半日周期所對應到的振幅平方數值，較其它周期所對應到的振幅平方數值大，此現象代表日周期及半日周期，為臺灣

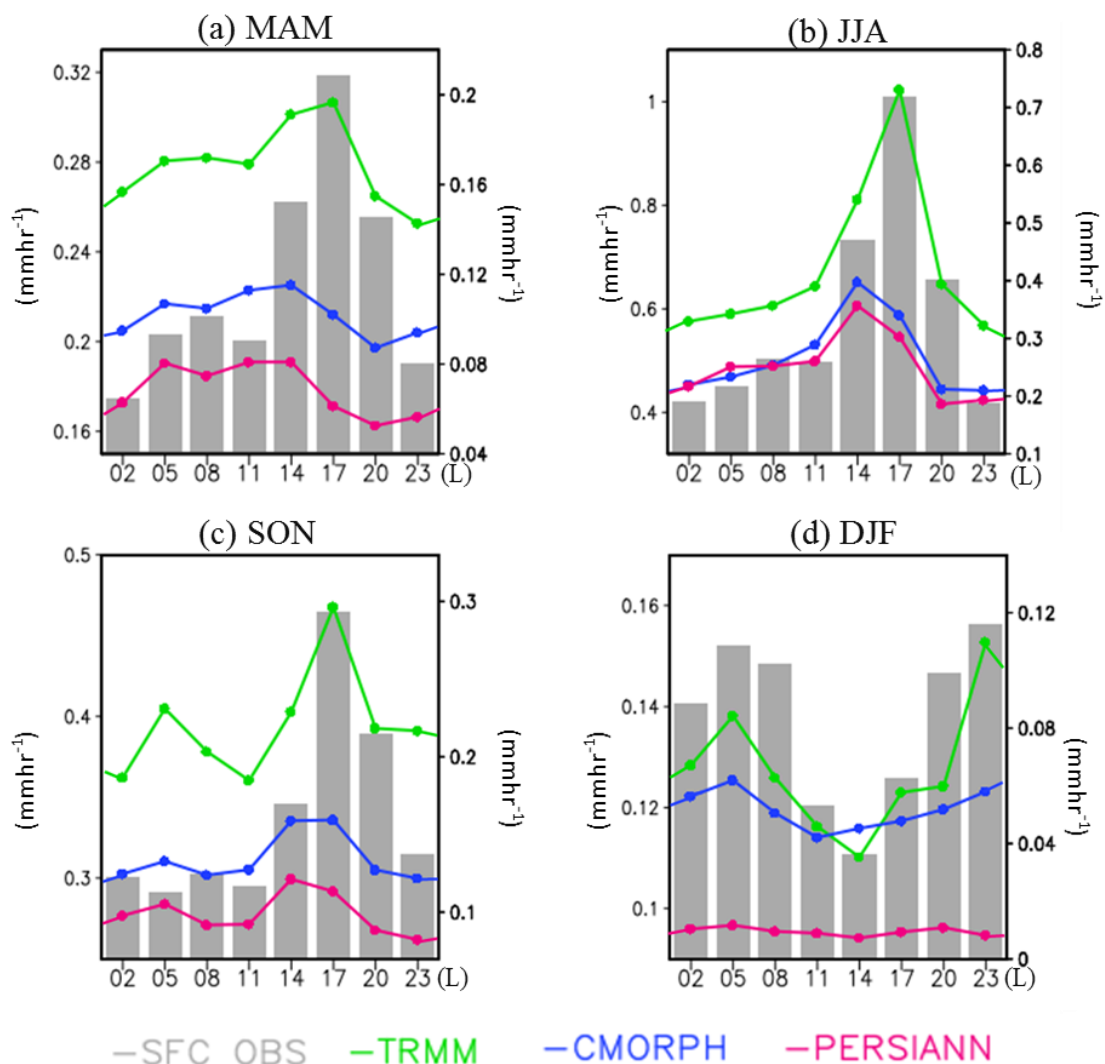


圖 6 區域平均後之臺灣降雨每 3 小時變化。(a)春季(b)夏季(c)秋季(d)冬季。左縱軸表示地面觀測資料(灰柱)雨量值，右縱軸表示衛星資料雨量值(綠線為 TRMM，藍線為 CMORPH，紅線為 PERSIANN)，單位為 mm hr^{-1} 。

表 5 地面觀測資料與三組衛星資料在四季中之平均一日內的每 3 小時變化(圖 6)時間相關係數統計表。

資料 \ 季節	MAM	JJA	SON	DJF
TRMM	0.67	0.98	0.89	0.84
CMORPH	-0.05	0.71	0.70	0.82
PERSIANN	-0.27	0.62	0.47	0.57

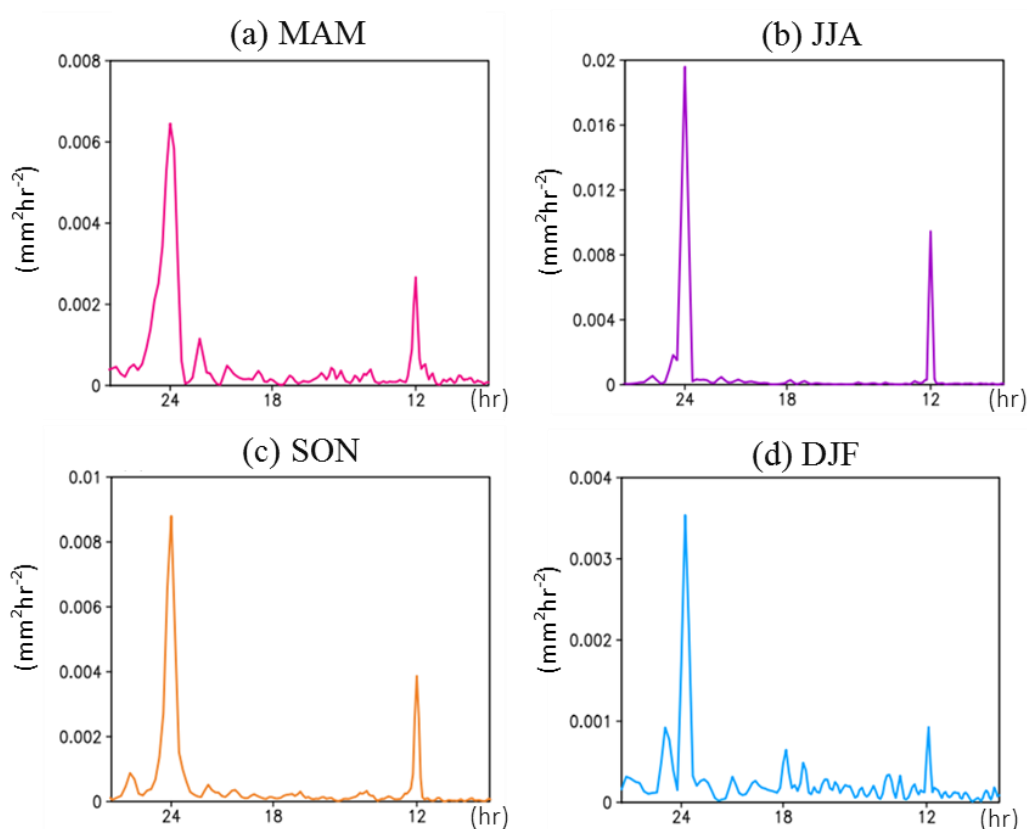


圖 7 針對圖 6 中，地面觀測區域平均後之臺灣降雨每 3 小時變化，所做的波譜分析。(a)春季(b)夏季(c)秋季(d)冬季。橫軸代表振盪周期，縱軸為降雨的振幅平方，單位為 $\text{mm}^2 \text{hr}^{-2}$ 。

降雨日變化的主要振盪周期。而為了瞭解圖 6 所顯示之「全臺降雨的區域平均日變化量之季節性差異」，主要是受到「日周期變化之季節性差異」或「半日周期變化之季節性差異」所控制，我們透過傅立葉分析，將四個季節的降雨日變化量，分解為日周期（圖 8）及半日周期（圖 9）進行討論。由圖 8 中可以發現，在春、夏、秋三季中地面觀測資料之日周期變化（圖 8a-c）與圖 6a-c 特徵相似，皆於 17 時有最大值、05 時有最小值，而在冬季（圖 8d）則大致為反相位。而在半日周期方面，由圖 9a-c 中顯示春、夏、秋三季中地面觀測資料之半日周期的最小值皆出現在 11、23 時，最大值則是出現在 05、17 時。冬季時，地面

觀測資料之半日周期的最小值出現在 02、14 時，最大值則是出現在 08、20 時（圖 9d）。整體而言，雖然在半日周期方面，冬季的相位稍稍落後其他季節，但變化不大。由以上結果可得知，圖 6 中臺灣冬季日夜降雨與其他季節相位不同的主要因素，是受到日周期變化（而非半日周期變化）所主導。

若將上述地面觀測資料顯現之日周期降雨變化特性與三組衛星資料比對，可發現同樣以 TRMM 對於臺灣春、夏、秋三季降雨日周期變化之表現較 CMORPH、PERSIANN 更接近於地面觀測資料（見圖 8）。接續分析半日周期之降雨變化，整體而言可以發現在四季中 TRMM 的最大、

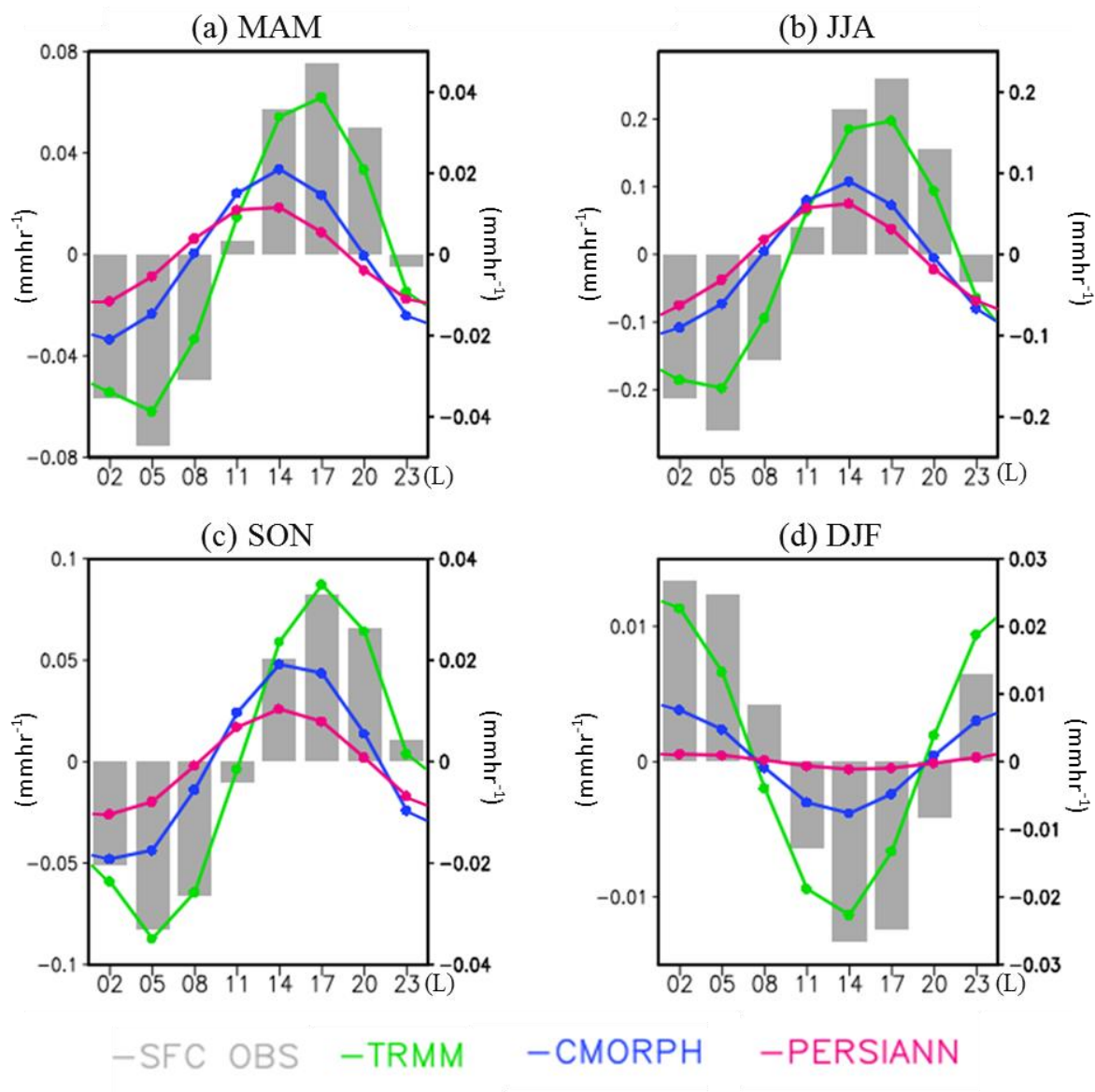


圖 8 類似圖 6，但為日周期變化分量之比較。單位為 mm hr^{-1} 。

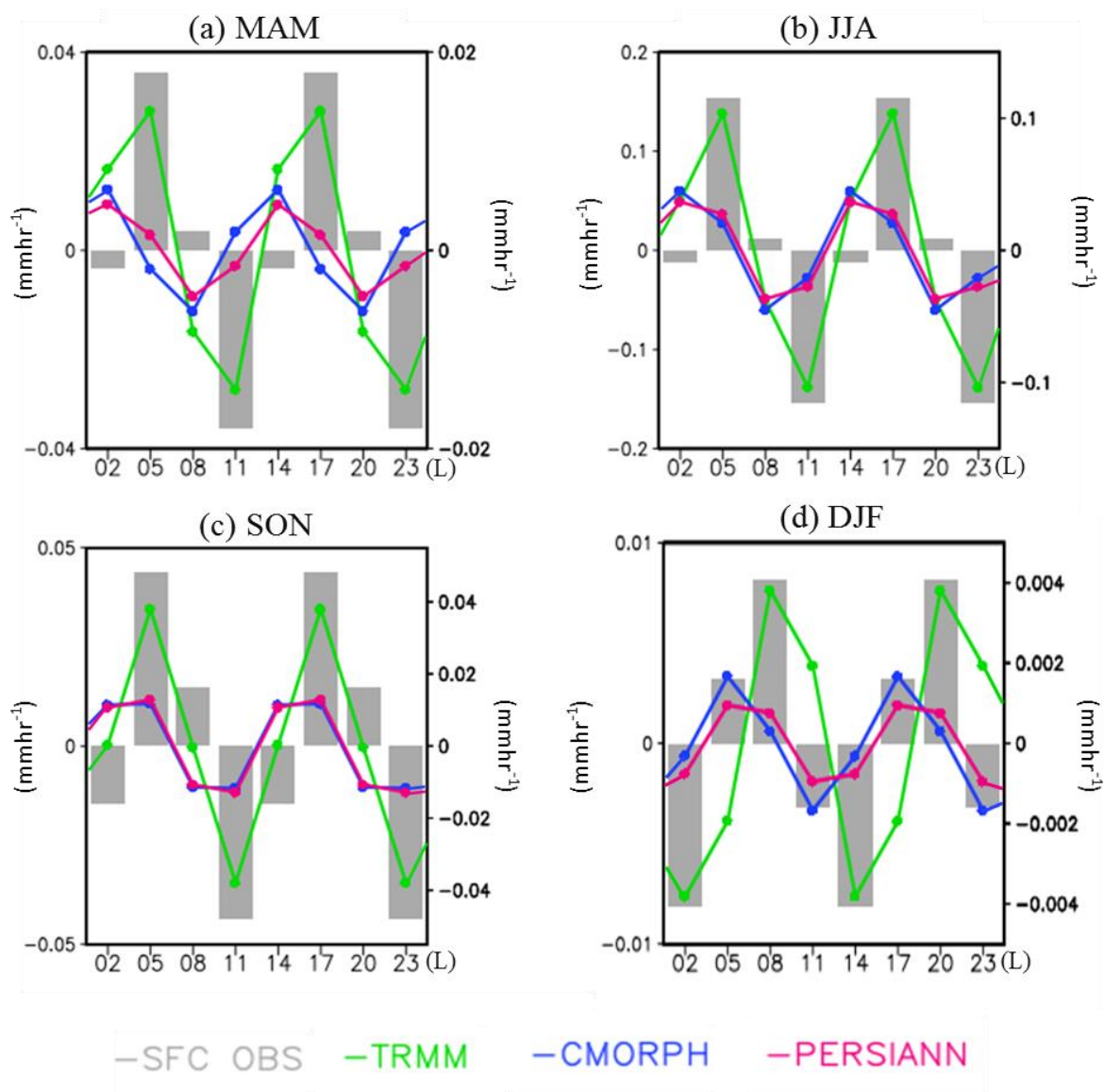


圖 9 類似圖 6，但為半日周期變化分量之比較。單位為 mm hr^{-1} 。

最小值之分布皆與地面觀測資料相似（見圖 9）。而 CMORPH、PERSIANN 在四季中降雨之半日周期表現，則有相位提前的情形（圖 9a-c）。綜合日周期及半日周期變化的分析後，我們發現三組衛星資料中，TRMM 在「全臺降雨的區域平均日變化量之季節性差異」的特性掌握能力較佳，此結果與圖 2～圖 6 的結果相呼應。

(四) 造成三組衛星降雨資料產品對臺灣降雨日變化表現差異之可能原因

而針對上述三組衛星資料表現差異的原因，我們推測可能是由於以下原因造成。由過去的研究中可以得知，以地球同步軌道衛星觀測之紅外線資料進行降雨的估算，其所觀測的物理量為雲頂之溫度，與降雨量無直接關聯（曾，1988；呂等，2012）；相比之下，採用低軌道衛星之微波儀進行觀測，此技術乃是利用數個不同波段的微波觀測對不同程度的降水及雨滴粒徑大小的散射程度，來進行微波雨量推估，因此可獲得較佳的降雨率推估（Prabhakara et al., 1998；曾，1988；Liou, 2002；呂等，2012）。然而三組衛星資料中，由於 TRMM 為著重於「低緯度地區降雨觀測」之計畫，因此對低緯度區域（如臺灣）於三小時以內就至少會有一次於微波波段的「直接觀測」（Huffman et al., 2007）。相較而言，其他兩組衛星則是著重全球，其所使用的「直接觀測」資料於低緯度地區的觀測頻率較 TRMM 低（Hsu et al., 1997；Joyce et al., 2004）。而三組衛星資料於沒有「直接觀測」時，則採用地球同步衛星之紅外線觀測來進行推估，因此有無「直接觀測」將直接影響衛星降雨推估成效，特別是衛星降雨推估所仰賴的低軌道繞極微波觀測頻率，會影響成果品質。因此如想針對本文所探討的臺灣地區（低緯度）日夜降雨分析，採取 TRMM 為較合宜的分析資料。但需注

意的是，由於臺灣具有極度複雜的地形分布特徵，所以即便從整體分析上看 TRMM 對臺灣降雨的掌握較好，但空間分布特徵仍與觀測有極大落差。對此，本研究建議在使用 TRMM 對區域降雨的呈現時，仍需注意其對降雨空間分布掌握的困難度限制。

另一方面，雖然由第(二)小節的研究結果發現，三組衛星降雨資料皆無法完整表現出臺灣冬季日夜降雨的空間分布特徵，但在春、夏、秋三季中，以 TRMM 較能掌握臺灣日夜降雨的空間分布特性。過去 Huang and Wang (2014)檢視臺灣梅雨季降雨日變化指出，除了局地熱對流降雨之外，海面移入的降雨是導致西半部地區清晨降雨的主要來源。然而，由於衛星降雨的推估，於陸地及海洋均有特定演算法，於各觀測像素及各單一時刻進行之。因此，除了臺灣陸面降雨之外，我們亦有必要對三組衛星資料產品在臺灣臨近海面上的表現差異進行瞭解，以利未來相關應用。對此，我們接著針對春、夏、秋三季，檢視三組衛星資料，在東亞地區降雨日周期變化分量，其空間分布隨時間變化的情形（圖 10～圖 12）。

由 TRMM 在春季時的降雨分布（圖 10a）可見：(1)清晨（02-08 時）臺灣海峽中部有降雨系統產生，並往臺灣海峽北部發展後逐漸影響臺灣西部沿海地區，(2) 11-17 時臺灣陸地開始出現區域性午後對流降雨，(3)到了夜間（20-23 時）臺灣東部外海出現降雨系統，午夜過後逐漸遠離。將這些結果與另外兩組衛星資料比對後，發現兩組衛星資料（圖 10b-c）在描繪「海面清晨降雨往東移入，影響西部臺灣清晨降雨」的現象與 TRMM 類似，但午後降雨的持續時間與則與 TRMM 明顯不同，CMORPH、PERSIANN 在 17 時皆掌握不到臺灣有較大降雨的現象。

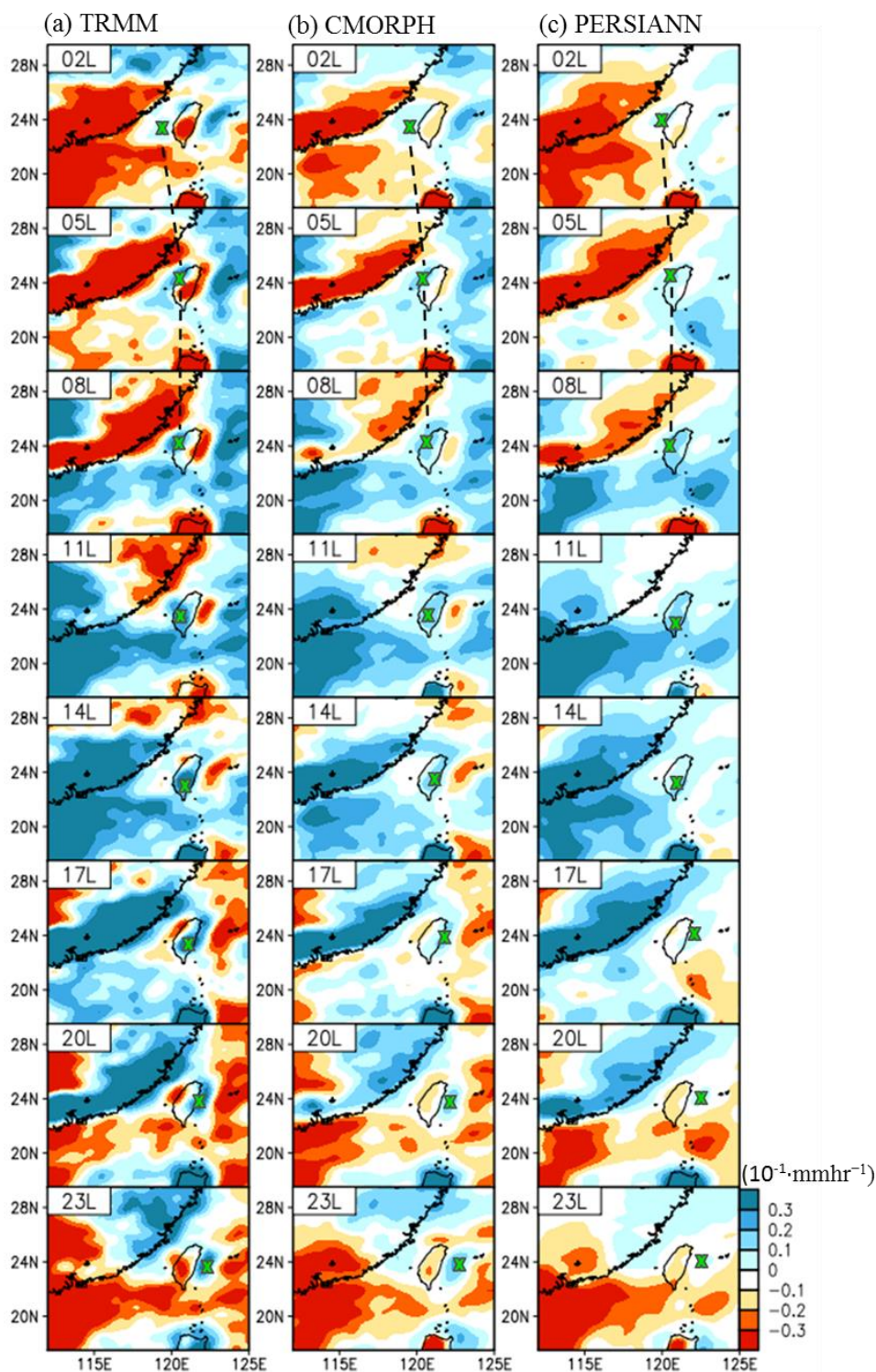


圖 10 春季降雨日周期水平空間分布。(a) TRMM (b) CMORPH 及 (c) PERSIANN。色標如圖所示。綠色 x 之標示，代表影響臺灣降雨之主要雨帶位置，黑色虛線代表文中所提之清晨雨帶移動之連線，單位為 $10^{-1} \text{ mm hr}^{-1}$ 。

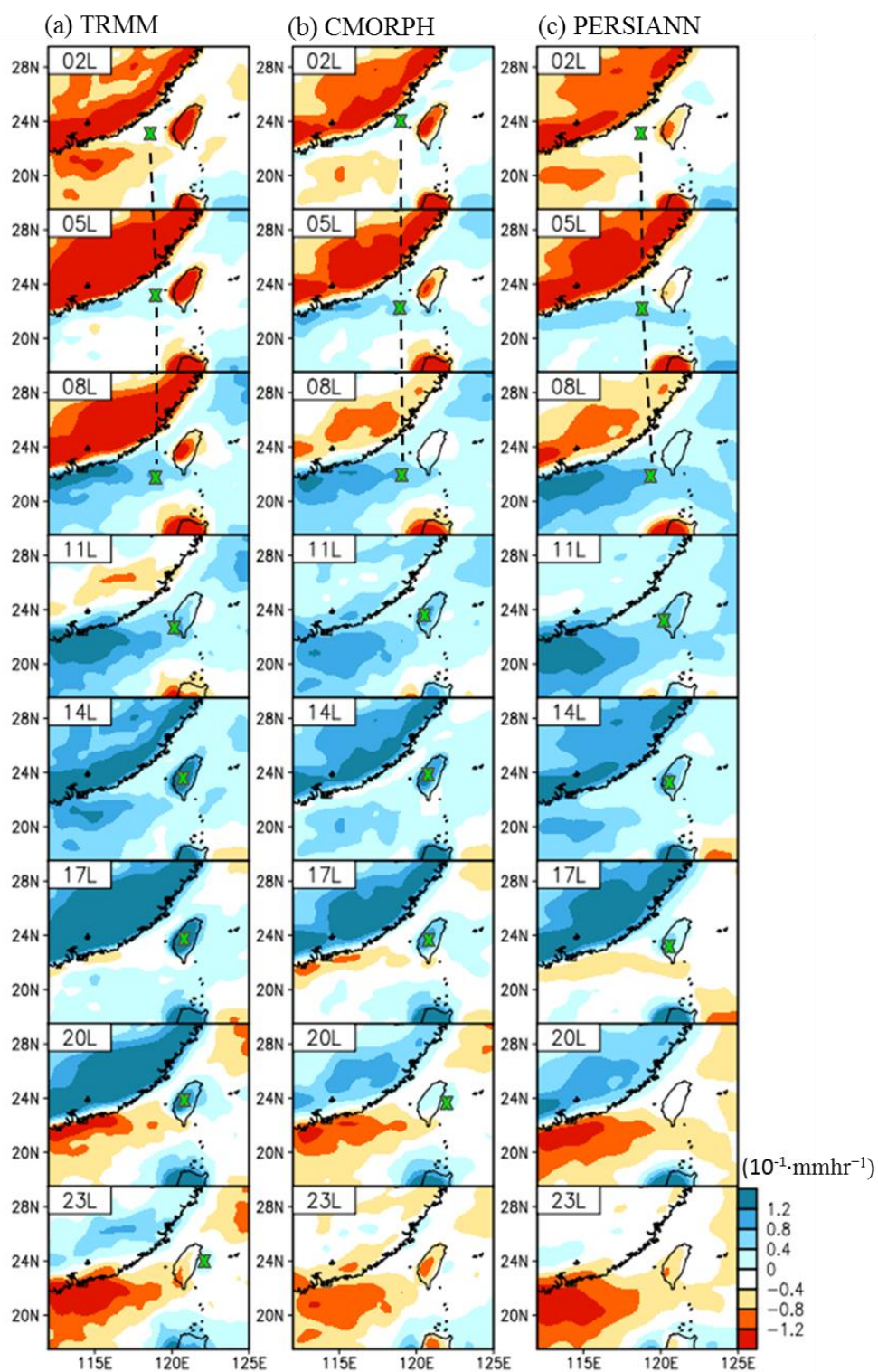


圖 11 類似圖 10，但為夏季降雨日周期水平空間分布。單位為 $10^{-1} \text{ mm hr}^{-1}$ 。

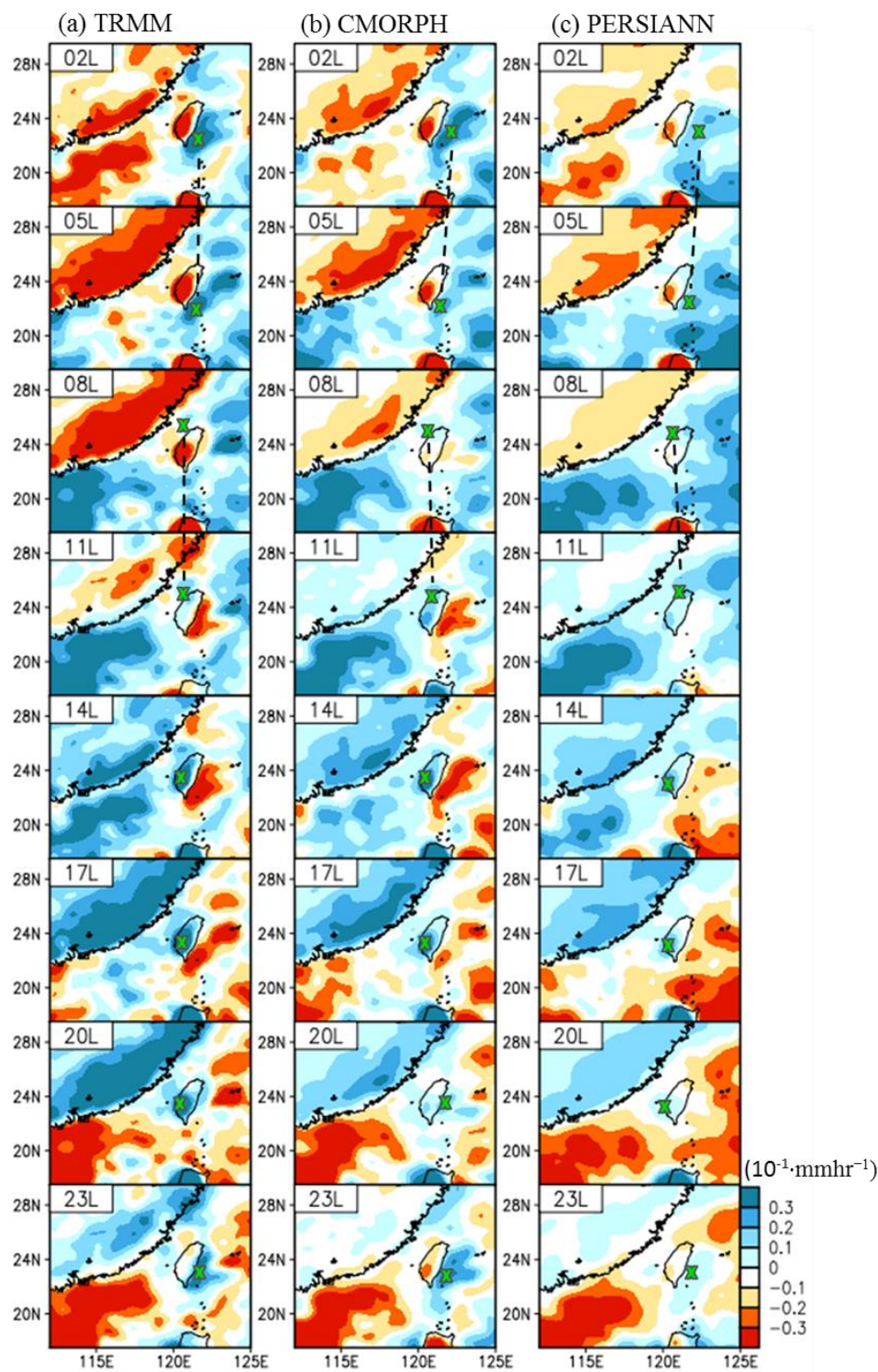


圖 12 類似圖 10，但為秋季降雨日周期水平空間分布。單位為 $10^{-1} \text{ mm hr}^{-1}$ 。

在夏季時，由圖 11a 中的 TRMM 可見：(1) 清晨在臺灣海峽南部有降雨系統產生，且隨時間往臺灣西南部沿海地區移入，(2) 11-17 時臺灣陸地開始出現區域性午後對流降雨，(3) 夜間 20 時臺灣本島仍有殘餘的區域性對流降雨，到了 23 時臺灣東半部外海開始有降雨分布，但降雨量不大。將以上結果與另外兩組衛星資料相比後（圖 11b-c），同樣可發現 CMORPH、PERSIANN 在描繪「海面清晨降雨往臺灣西南部沿海地區移入，導致清晨降雨」的現象方面與 TRMM 類似，但午後降雨的持續時間與則與 TRMM 明顯不同。CMORPH、PERSIANN 在 20 時皆掌握不到臺灣有較大降雨的現象。在 23 時 CMORPH 在東半部外海雖有降雨分布，但強度較小，PRESIANN 則是無降雨分布情形。

而在秋季時，由圖 12a 中的 TRMM 可見：(1) 清晨時，臺灣東部外海有降雨系統產生並影響著東部地區，直至 08 時消散遠離。同時在 08 時臺灣海峽開始出現降雨系統，到了 11 時影響西部沿海地區，(2) 秋季午後降雨與春、夏兩季相同，降雨最大值都發生在 17 時，(3) 夜間降雨趨勢則與夏季較為相似，即在 20 時有殘餘的午後熱對流降雨分布，但不同的是在 23 時東半部外海的降雨比夏季更為明顯。再將這些現象與另外兩組衛星資料比對後（圖 12b-c）後，發現 CMORPH、PERSIANN 在描繪「海面清晨降雨往臺灣東部地區移入」的現象方面與 TRMM 類似。但在 11 時，CMORPH 與 PERSIANN 皆在山區出現局部對流降雨，此發生時間與 TRMM 相比有提早的情形，且持續時間也與 TRMM 明顯不同。另外，CMORPH、PERSIANN 在 20 時皆掌握不到臺灣陸地有較大降雨的現象。而在 23 時東半部外海的降雨現象，CMORPH、PERSIANN 則皆有掌握到，

只是強度與 TRMM 不同。

綜合以上所述，我們發現 TRMM、CMORPH、PERSIANN 對於春、夏、秋三季的臺灣臨近海面降雨現象的表現相似，而三組衛星資料對臺灣地區降雨差異的表現，主要來自於衛星資料對陸面降雨、地形降雨的表現能力差異。

四、結論

本文利用 1998~2015 年臺灣地面觀測降雨資料及三種常用衛星產品 TRMM、CMORPH 及 PERSIANN 之降雨資料做比對，藉由評估三組衛星降雨資料對「臺灣四季降雨日平均值及日變化量的時、空間特性」之掌握能力，用以了解何種衛星資料最能夠表現出臺灣降雨日變化的季節性特色。研究結果發現，三組衛星降雨資料中以 TRMM 最能表現出臺灣四季日平均降雨量的空間分布特性（即最大降雨區在春季以中央山區為主，在夏季以西南部山區為主，在秋季以東半部地區為主，在冬季以北部及東北部沿海地區為主）。而在四季降雨日變化的時、空間分布特性方面，三組衛星資料中，同樣以 TRMM 最能表現出春、夏、秋三季的降雨日變化的時、空間分布特性，最大降雨主要發生在下午 17 時的山區。而 CMORPH、PERSIANN 對於春、夏、秋三季午後降雨最大值的發生時間則有提早之情形。至於冬季，三組衛星資料對於臺灣降雨日變化的時、空間分布區域特性（即西側降雨早上多，東側降雨晚上多），皆無法有效呈現。此外，本研究亦發現三組衛星降雨資料無論在何種季節中皆低估實際降雨日平均值。

另一方面，透過檢驗日周期變化、半日周期變化，我們發現到「臺灣降雨日變化之季節性差

異」主要是受到日周期的影響。且整體而言，三組衛星降雨資料中以 TRMM 最能表徵臺灣日周期變化、半日周期變化情形。而透過比對 TRMM 與其他兩組衛星資料在東亞地區的降雨日變化量，我們更進一步發現三組衛星資料對臺灣地區降雨差異的表現，主要來自於衛星資料對陸面降雨、地形降雨的表現能力差異。根據這些研究結果，我們建議未來在使用衛星資料產品研究「春、夏、秋三季海面上的天氣系統是如何影響臺灣區域日變化降雨」時，三組衛星資料產品中應以 TRMM 為優先考量。但若要研究「海面上的天氣系統如何影響冬季臺灣區域日變化降雨」，則需注意到「TRMM 無法表徵臺灣冬季日變化降雨的區域性特徵」，這個潛在問題。

然需說明的是，國際間 PERSIANN 降雨產品為研究初期計畫之產品，目前雖已更新為較成熟的 NASA IMERG 降雨產品(Huffman et al., 2017)，但因 NASA IMERG 資料之可用年份相對較短，所以在此份研究中我們仍採用與過去多數研究相同之 PERSIANN 降雨產品，而非 NASA IMERG 產品進行分析。近年來，在國際間仍有不少研究是針對 PERSIANN 降雨產品進行分析（如 Alijanian et al., 2017），此顯示在現階段，即 NASA IMERG 可用資料長度仍較短的情況下，分析 PERSIANN 資料仍有其重要性及必要性。未來，我們亦計畫比對更新後之 NASA IMERG 與 PERSIANN 資料，兩者對臺灣降雨掌握能力的差異。

致 謝

感謝兩位審查者的寶貴建議，讓本研究的論述得以更加完整。本研究在科技部計畫 MOST 105-2119-M-003-002、MOST 105-2625-M-003-

002、MOST 106-2625-M-003-002、MOST 106-2628-M-003-001-MY4 及 MOST 106-2621-M-865-001 的資助下完成，特此感謝。

參考文獻

- 李瑞澤、張安定、張華、董德娟，2016：多衛星降水產品在環渤海地區的精度評價。應用生態學報，27，第 2916-2924 頁。
- 陳昭銘、汪鳳如，2000：臺灣地區降雨之長期變化特性—秋雨之準二十年振盪。大氣科學，28 卷 4 期，第 343-361 頁。
- 吳宜昭、許晃雄、Joo-Hong Kim、劉鵬、湯寶君、黃威凱、楊竣凱、周佳、隋中興，2012：東亞／西北太平洋氣候變遷。大氣科學，40 卷 3 期，第 215-248 頁。
- 成璐、沈潤平、師春香、白翎、楊袁慧，2014：CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估計產品的評估檢驗。氣象，40，第 1372-1379 頁。
- 翁叔平、楊承道，2012：臺灣地區月降雨及溫度 1 公里網格資料庫之建立（1960～2009）及其在近未來（2015～2039）的氣候推估應用。大氣科學，40 卷 4 期，第 349-369 頁。
- 曾忠一，1988：大氣衛星遙測學，渤海堂文化事業公司，臺北，630 頁。
- 呂高森、陳萬金、汪建良、劉振榮、胡仁基，2012：結合衛星微波及紅外線資料估算即時定量降水，101 年天氣分析與預報研討會，p.82-87，臺北。
- Alijanian, M., Rakhshandehroo, G. R., Mishra, A. K. and Dehghani, M., 2017: Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH,

- PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.5131
- Bai, Z. G., D. L. Dent, L. Olsson, and M. E. Schaepman, 2008: Global assessment of land degradation and improvement: 1. identification by remote sensing (No. 5). ISRIC-World Soil Information.
- Boyle, J. S., and T. J. Chen, 1987: Synoptic aspects of the wintertime East Asian monsoon. Monsoon Meteorology, C.-P. Chang and T. N. Krishnamurti, Eds., *Oxford University Press*, 125-160.
- Cai, W. W., W. Yuan, S. Liang, X. Zhang, W. Dong, J. Xia, Y. Fu, Y. Chen, D. Liu, and Q. Zhang, 2014: Improved estimations of gross primary production using satellite-derived photosynthetically active radiation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119, 110-123.
- Chen, C. S., and Y. L. Chen, 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Monthly Weather Review*, 131, 1323-1341.
- Ferraro, R. R., 1997: Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 16715-16735.
- Ferraro, R. R., F. Weng, N. C. Grody, and L. Zhao, 2000: Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor. *Geophysical Research Letters*, 27, 2669-2672.
- Gosset, M., J. Viarre, G. Quantin, and M. Alcoba, 2013: Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high - resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139, 923-940.
- Huang, W. R., and J. C. L. Chan, 2012: Seasonal variation of diurnal and semidiurnal variation of rainfall over Southeast China, *Climate Dynamics*, 39, 1913-1927.
- Huang, W. R., and S. Y. Wang, 2014: Impact of land-sea breezes at different scales on the diurnal rainfall in Taiwan. *Climate Dynamics*, 43, 1951-1963.
- Huang, W. R., Y. H. Chang, C. T. Cheng, H. H. Hsu, C. Y. Tu, and A. Kitoh, 2016a: Summer Convective Afternoon Rainfall Simulation and Projection Using WRF Driven by Global Climate Model. Part I: Over Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27, 659-671.
- Huang, W. R., Y. H. Chang, H. H. Hsu, C. T. Cheng, C. Y. Tu, 2016b: Dynamical downscaling simulation and future projection of summer rainfall in Taiwan: Contributions from different types of rain events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 13973-13988.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K. P. Bowman, E. F. Stocker, and D. B. Wolff, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation

- estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38-55.
- Huffman, G. J., D. T. Bolvin, and E. J. Nelkin, 2017: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation. (available online at https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_technical_doc_3_22_17.pdf)
- Hsu, K. L., X. Gao, S. Sorooshian, and H. V. Gupta, 1997: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1176-1190.
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie, 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 487-503.
- Kishtawal, C. M., and T. N. Krishnamurti, 2001: Diurnal variation of summer rainfall over Taiwan and its detection using TRMM observations. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 331-344.
- Kummerow, C., and Coauthors, 2001: The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 1801-1820.
- Li, X., Q. Zhang, and C. Y. Xu, 2014: Assessing the performance of satellite-based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin. *Theoretical and applied climatology*, 115, 713-729.
- Liou, K. N., 2002: An introduction to atmospheric radiation, academic, USA, p. 583.
- Prabhakara, C., R. Meneghini, D. A. Short, and J. A. Weinman, 1998: A TRMM microwave radiometer rain retrieval method based on fractional rain area. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 76, 765-781.
- Simpson, J., C. Kummerow, W. K. Tao, and R. F. Adler, 1996: On the tropical rainfall measuring mission (TRMM). *Meteorology and Atmospheric physics*, 60, 19-36.
- Su, F., Y. Hong, and D. P. Lettenmaier, 2008: Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 622-640.
- Tang, J., C. Deng, G. B. Huang, and B. Zhao, 2015: Compressed-domain ship detection on spaceborne optical image using deep neural network and extreme learning machine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 1174-1185.
- von Storch, H. and F.W. Zwiers, 1998: Statistical Analysis in Climate Research. *Cambridge University Press*, Cambridge, 1999.
- Wang, S. Y., and T. C. Chen, 2008: Measuring East Asian summer monsoon rainfall contributions by different weather systems over Taiwan.

- Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2068-2080.
- Xue, X., Y. Hong, A. S. Limaye, J. J. Gourley, G. J. Huffman, S. I. Khan, C. Dorji, and S. Chen, 2013: Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins?. *Journal of Hydrology*, 499, 91-99.
- Yen, M. C., and T. C. Chen, 2000: Seasonal variation of the rainfall over Taiwan. *International Journal of Climatology*, 20, 803-809.
- Zhao, Z., B. Liu, and X. Li, 2014: Internal solitary waves in the China seas observed using satellite remote-sensing techniques: a review and perspectives. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 3926-3946.
- Zhou, T., R. Yu, H. Chen, A. Dai, and Y. Pan, 2008: Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations. *Journal of Climate*, 21, 3997-4010.

Evaluation on the Performance of TRMM, CMORPH, and PERSIANN in Depicting the Diurnal Precipitation Variation in Taiwan

Szu-Yin Chen and Wan-Ru Huang

Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 3 August 2017 ; in final form 8 November 2017)

ABSTRACT

This study evaluates the performance of TRMM, CMORPH, and PERSIANN precipitation productions in representing the characteristics of diurnal precipitation (including daily mean and diurnal variation) in Taiwan during four different seasons: spring (March to May), summer (June to August), autumn (September to November) and winter (December to next February). Results show that TRMM is the best among the three for depicting both the spatial-temporal characteristics of the daily mean and the diurnal variation of precipitation in Taiwan during the seasons of spring, summer and autumn. While for the winter season, none of the three satellite products can capture the observed regional difference in the timing of occurrence of maximum diurnal precipitation. Possible causes for the differences among TRMM, CMORPH and PERSIANN in depicting the characteristics of diurnal variation of precipitation in Taiwan during the seasons of spring, summer and autumn are also discussed. Analyses also show that the three satellites have larger differences in depicting the diurnal variation of precipitation in Taiwan, compared to the differences in depicting the diurnal variation of precipitation over the nearby ocean.

Key Words: Diurnal variation, Precipitation, Satellite observation.

doi: 10.3966/025400022017064502004