

PDF-Matching 衛星定量降水估計技術可用性評估

劉郁青¹ 陳雲蘭² 王建國¹ 吳冠伯¹ 曾翊涵² 謝平平³

中央氣象局氣象衛星中心¹

中央氣象局科技中心²

美國海洋大氣管理局氣候預測中心(NOAA/CPC)³

摘要

氣象衛星觀測資料具備觀測面積廣大及觀測資料品質一致的特徵，而衛星降水估計技術對於無法透過地面觀測儀器獲取降水資訊的地區，是相當重要的。隨著日本高時空解析度的向日葵八號(Himawari-8)地球同步衛星升空，衛星降水估計技術及資料品質也跟著提升。氣象局於 108 年底引入 PDF Matching 新衛星降水估計技術，並於 109 年上半年完成程式模組建置。

PDF Matching 技術是基於紅外線頻道「發展越高的雲，亮溫越低，越容易降水」的假設，用非線性百分位數函數建立微波降水與紅外線頻道亮溫的關係。本文蒐集 2019 年 5 月至 2020 年 4 月之 IRQPE 未經參數優化的 V0 版，及氣象局現階段使用的衛星降水估計法(CWB-SCaMPR)的降水資料，與國際常用的整合降水資料 CMORPH 及氣象局產製之雷達降水估計資料 QPESUMS 做比較，從較大範圍的亞太區域在週尺度以上的表現，到小範圍的台灣周邊區域在週尺度以下的重要降水個案分析，評估 IRQPE 產品的可應用性及其限制。初步結果顯示 IRQPE V0 版可以有效表現亞太地區的兩區分布型態，且對大尺度波動的移動特徵掌握佳，為 PDF-Matching 方法的可用性提供了支持，而從台灣周邊區域降水個案的初步定性分析則指出 PDF-Matching 法在「應用具參考性的陸地降水真值」，及「對台灣局地降水特徵做參數調整及優化」的重要性。

一、前言

近年來地球暖化趨勢造成氣候的改變與極端天氣的發生，衛星大範圍面積的觀測能夠補足地面觀測時空分辨率不足的缺陷，提供海面上天氣系統的降水分布資訊，如颱風降水強度估計、乾旱區預警等。早期常見的衛星定量降水估計技術可分為以紅外線資料為主及以微波資料為主兩種。紅外線資料具有高時空解析度的優勢，但缺點是僅能觀測到雲頂溫度資訊，與降雨量的相關性較低(王，2001)，而微波資料雖能穿透雲層直接觀測到雲層內的降雨資訊，卻受限於其輻射能量弱，只能運行在繞極軌道衛星上，有時空解析度低的缺點。

為得到較準確且高時空解析度之降水估計資料，近期國際上的衛星降水估計技術著重於整合微波頻道

及紅外線頻道資料，藉由近即時的微波頻道反演降雨率資料，動態修正紅外線頻道亮溫與微波降雨率的關係，在利用其關係式估計當下時間的降雨率。衛星紅外線-微波降水估計技術概括而言可分為「配對、訓練、估計」三個步驟，不同降水估計技術間的差異主要是在「訓練」階段所使用的演算法有別。Adler et al. (2000) 的 AGPI 法 (Adjusted GOES Precipitation Index) 及 Huffman et al. (2001) 的 TMPI 法 (Threshold-Matched Precipitation Index) 是給定紅外線雲頂亮溫一個閾值，亮溫小於此閾值的格點會根據微波資料對應到一個變動的降雨率，再根據雲的面積及持續時間做降雨估計。Kuligowski (2002) 的 SCaMPR 法 (Self-Calibrating Multivariate Precipitation Retrieval) 用紅外線窗區及水氣頻道亮溫、亮溫梯度作為因子，先判別有兩格點再與微波降雨率建立線性回歸式。Kidd et al. (2003) 利用

機率密度函數擬合 (Probability Density Function Matching, PDF-Matching) 建立微波降雨率與雲頂亮溫的非線性關係，類似方法的還有 MIRA 法 (Microwave adjusted IR Algorithm) 及 GMSRA 法 (GOES Multispectral Rainfall Algorithm)。其它用於雲頂亮溫與微波降雨率的非線性關係式包括幕次函數回歸 (power law regression) 及指數函數回歸 (exponential regression)，分別應用在自動估計法 (Vicente et al, 1998) 及近十年來蓬勃發展的類神經網路方法，PERSIANN (Hsu et al, 1997) 及 PERSIANN-CCS (Hong et al, 2004)。

氣象局現階段所發展之降雨估計演算法，為改良美國 NOAA/NESDIS/STAR 於 2010 年發展的 SCaMPR 演算法而產出之即時降水估計產品。此法經過不斷改良及參數調整，仍無法有效地估計降雨，尤其在豪大雨發生的地點會有低估或偏移的現象。為了改善紅外線定量降水估計技術，本局於 108 年底引入 PDF Matching 方法，嘗試用紅外亮溫與降水的非線性關係，取代 SCaMPR 用線性回歸建置關係式的做法。其程式模組由美國 NOAA/CPC 提供，於 109 年上半年完成建置，並產製近 3 年的降水估計產品 (後簡稱 IRQPE)，本研究嘗試透過與其它常見降水真值及舊衛星降水估計法的比較，評估新衛星降水估計法的可用性。

二、新舊衛星降水估計法介紹

(一) PDF-Matching 降水估計法

PDF Matching 法是基於「發展越高的雲，亮溫越低，越容易降水」的假設，將 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 範圍內的亮溫及雨量分布，分成陸地及海洋，轉換成累積百分位數後，根據每一類亮溫的百分比，內插至相對應的雨量值，建立亮溫及雨量之關係式，其內插公式如下：

$$PRCP = Rain_n - 0.1 + 0.2x[(Per_{n_{Rain}} - Per_{n_{TBB}}) / (Per_{n_{Rain}} - Per_{n+1_{Rain}})]$$

其中 n 為第幾類 (1~255 類)， $PRCP$ 為降雨估計值， $Per_{n_{Rain}}$ 為雨量第 n 類的百分位數， $Per_{n_{TBB}}$ 為 TBB 第 n 類的百分位數。有兩種情況無法內插，當 Per_{TBB} 大於 $Per_{n_{Rain}}$ 時， $PRCP$ 為 0，並用 $-0.1 * n$ 記錄距離降雨格點的距離資訊，作為 bias 調教的參考；當 $Per_{n_{TBB}}$ 開始小於 $Per_{n_{Rain}}$ 時， $PRCP$ 會以前一筆最大估計降雨值作取代。而後紅外線亮溫資料可藉由訓練好的關係式來估

計降水值。產製之 IRQPE 的空間解析度為 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ，涵蓋範圍為 $75^\circ E \sim 205^\circ E$ ， $60^\circ S \sim 60^\circ N$ 。IRQPE 現階段所使用的訓練參數為參考美國 NOAA/CPC 使用的全球參數，取的時間窗區為目標時間的前後 15 天 (共 31 天) 及前後 3 小時 (共 7 小時)，空間窗區則根據 2000 筆的降雨次數門檻變動。初始半徑設定為 150km，若不到門檻則擴大半徑 (250km => 500km => 750km.....)，直到降雨次數達到門檻即停止採樣。

(二) SCaMPR 降水估計法

SCaMPR 法利用同步氣象衛星不同紅外線頻道亮溫之特性計算 16 個預測因子，其中 8 個預測因子為線性，另外 8 個預測因子為非線性，依緯度和經度每 $30^\circ \times 30^\circ$ 分一區，共分 16 區，每一區再依雲的性質共分為水雲、冰雲、冷頂對流雲三種，建立 48 類預測因子與降雨率之關係式。每一類所蒐集的資料在空間上彼此不重疊，時間窗區隨資料門檻往前推移且無上限。為解決雨量分布有小雨數量遠大於大雨導致回歸式不適合描述大雨的缺點，不同降雨量資料數目有不同的門檻限制，以增加大雨資料量。

訓練階段，利用多變數線性回歸 (multiple linear regression)，進行有雨 (MWCMB 降雨率 $\geq 0.2\text{mm/hr}$) 或無雨格點的判別分析 (discriminant analysis) 後，再針對有雨格點反演降雨率，多變數線性回歸公式如下：

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \varepsilon$$

其中 y 為微波有雨或無雨 (1/0)。 x_1 和 x_2 為 Himawari-8 預測因子。 b_1 、 b_2 和 b_3 為係數。 ε 為剩餘的誤差，其值被極小化，趨近於 0。判別分析中，利用最佳的 HSS (Heidke Skill Score) 值尋找 8 個線性因子中最佳的一組配對和門檻值。HSS 的公式如下：

$$HSS = 2 \times (c_1c_4 - c_2c_3) / [(c_1 + c_2)(c_2 + c_4) + (c_3 + c_4)(c_1 + c_3)]$$

其中 c_1 - c_4 依序為列聯表中的四個值，hit、false alarm、miss、correct rejection。降雨率反演則是從 16 個預測因子中找出與 MWCMB 降雨率有著最高相關係數的一組配對。其相關係數算法如下：

$$Correlation = cov(x, y) / \sigma_x \sigma_y$$

其中 $cov(x, y)$ 為預測因子和 MWCMB 降雨率的共變異數 (covariance)。 σ_x 、 σ_y 為預測因子和 MWCMB 降

雨率之標準差。從過去的經驗得知，使用超過 2 個以上的預測因子是沒有正面效果的。完成建立 48 類個別的關係式後，便可以預測目標時間之降水量，所產製出之即時降雨估計資料後稱 CWB-SCaMPR，為空間解析度約為 2KM 之不等間距資料，涵蓋範圍約為經度 60°E~138°W、緯度 0~81°N。

從上述新舊降水估計法的原理可知，IRQPE 的原理簡單直接，能夠有效節省電腦運算資源，且每 0.5 度建立一非線性關係式，較能表現真實的降雨特徵，但其訓練過程中不如 SCaMPR 有做有雨/無雨的判別分析，可能會有誤判雲頂亮溫很低但不降水的雲(ex.卷雲)為降雨格點的問題。

三、資料及評估方法說明

本文嘗試從兩種不同的時間及空間尺度下，進行 IRQPE 的可用性評估，分別為：(1) 亞太區域對週尺度以上之綜觀天氣系統的兩區分布型態及移行特徵的掌握；(2) 台灣周邊區域對週尺度以下之天氣個案的局部降水細節表現。為此，本研究蒐集 2019 年 5 月至 2020 年 4 月之 IRQPE 資料、CWB-SCaMPR 資料、混和式微波降雨率資料 MWCOMB (CPC combined microwave dataset)、全球降水網格分析資料 CMORPH (CPC Morphing Technique) 及雷達降水估計資料 QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)。CMORPH 為國際常用的整合降水參考真值，其日雨量空間解析度為 0.25°x 0.25°，可提供亞太區季內尺度與月季氣候上的應用，為與其相比，IRQPE 及 CWB-SCaMPR 資料在亞太區域統一整合至解析度 0.25°x 0.25°之日累積雨量資料。QPESUMS 為氣象局對外提供之經地面雨量站校正之雷達降雨估計產品，原始空間解析度為 0.0125° x 0.0125°，資料範圍涵蓋台灣及周圍海域(118°E~123.5°E，20°N~27°N)，適合作為台灣周邊區域，尤其是陸地降水的參考真值。MWCOMB 為紅外線降水估計之訓練真值，空間解析度為 0.05°x 0.05°，由於 MWCOMB 資料受限於繞極軌道衛星觀測掃描的限制，在台灣上空並非每個時間點皆有資料，因此，在台灣周邊區域，IRQPE、QPESUMS 及 CWB-SCaMPR 將基於 MWCOMB 有資料之時空格點，累加整合成空間解析度為 0.05°x 0.05°之日

累積雨量資料。

IRQPE、CWB-SCaMPR 及 CMORPH 在亞太區會以逐月監測圖及散布圖探討三種資料降雨分布的相關性，並用降雨系統移行分析圖，如區域平均值及經/緯向的波動移行變化，觀察大範圍雨區的移動特徵。由於台灣周邊區域位處亞熱帶與熱帶地區交界，導致全年降雨型態隨著不同天氣系統影響而有不同，要評估 IRQPE 在台灣陸地局部降水的細節表現，初步可從比對 IRQPE、CWB-SCaMPR、MWCOMB 及 QPESUMS 四種資料在個別天氣事件的表現著手，個案包括滯留鋒面、弱綜觀午後對流、颱風、東北季風及冷鋒面降水。

四、評估結果分析

(一) 亞太區域

從逐月監測圖來看，夏季以 2019 年 6 月(圖 1)為例，比對 CMORPH，IRQPE 大致有掌握到熱帶及北半球中緯度地區的降水分布，如中緯度太平洋的鋒面帶、熱帶的積雲對流等，而 CWB-SCaMPR 雖也顯現類似的雨量空間分布，但在中緯度鋒面帶的掌握上，卻不如 IRQPE 表現的好，且有空間不連續的情形。再從冬季 2019 年 12 月(圖 3)的表現來看，IRQPE 對於綜觀尺度天氣系統的掌握仍佳，但是在中緯度則有降水高估的情形，CWB-SCaMPR 則在中國陸地上出現強降水訊號，與 CMORPH 的降水分布有落差，在降雨量值上則有整體明顯高估的情形。圖 2 及圖 4 分別為 IRQPE 及 CWB-SCaMPR 與 CMORPH 的相關性散布圖，IRQPE 及 CWB-SCaMPR 與 CMORPH 皆呈正相關且有正偏差，即降水高估的情形。IRQPE 在夏季的相關性較冬季佳，相關係數分別為 0.91 及 0.89，若將散布圖分為熱帶(10°S~10°N，紅色)、亞熱帶(10°N~20°N，綠色)及溫帶(20°N~40°N，藍色)三區來看，可發現冬季相關係數較差的原因是由於 IRQPE 在中緯度地區有隨著雨量增加，正偏差越大的情形。CWB-SCaMPR 的相關性雖然冬天(0.83)高於夏天(0.76)，但在量值的分布上，冬天的 CWB-SCaMPR 則有明顯高估，且隨著雨量增加，正偏差的情形比 IRQPE 更大，而大量分布在靠近 y 軸的中緯度散布點應是來自中國陸地的降雨訊號。

逐月區域平均分別挑選台灣附近、熱帶對流區以及中緯度鋒面區三個區域進行探討，範圍如圖 5(d)所

示。從圖中可以發現，IRQPE 及 CWB-SCaMPR 在台灣附近的逐月表現最為相似，而在熱帶與中緯度地區差異較大，而又以 IRQPE 的逐月乾溼分布趨勢與 CMORPH 較為接近。更進一步看 IRQPE 與 CMORPH 的變化趨勢，IRQPE 的逐月乾溼分布在台灣附近及熱帶對流區皆與 CMORPH 有一致的相位變化，只有在中緯度地區的冬季有相位變化較不一致的現象。

從逐月監測圖及區域平均圖的結果說明 IRQPE 已經可以有效表現亞太地區大範圍兩區分布型態，且整體而言比 CWB-SCaMPR 的結果來得好。圖 6 至圖 9 分別檢視了台灣附近、東亞地區 以及熱帶的雨量波動情形，包含經向及緯的移行行為，其中台灣附近的波動以逐月分析為主，而東亞地區及熱帶波動則以季節分析為主。整體來說，IRQPE 對於波動的掌握佳，與 CMORPH 的相關性都可達 0.8 以上，顯示 IRQPE 在氣候應用上已具一定程度的可用性。

(二) 台灣周邊區域

由於 IRQPE 及 CWB-SCaMPR 是以 MWCOMB 作為訓練參考真值，因此，在 QPESUMS 與兩種衛星降水估計產品比較前，可先觀察與 MWCOMB 之間的差異。從個案表現來看，MWCOMB 除了對地形性的迎風面降水的掌握度不佳外，在海洋及陸地上，與 QPESUMS 大致上都具有一致的降水空間分布，但降水極值相較於 QPESUMS 偏低。圖 10 為 2019 年 8 月 24 日的颱風個案，中心位於台灣西南方海域，受其環流影響，QPESUMS 在台灣東部的迎風面反映強降水訊號，對比 MWCOMB，降水強度明顯偏低且主要雨帶均勻分布在台灣南部，幾乎沒有反映出迎風面降水特徵。在 2019 年 11 月 1 日的東北季風個案(圖 11)中，也有類似的情形，MWCOMB 無法反映出 QPESUMS 在台灣東部及東北部的迎風面降水。

從 IRQPE 及 CWB-SCaMPR 在不同天氣事件的日累積雨量圖來看，在降水較強的天氣事件，如颱風、滯留鋒面及冷鋒面，兩者的降水空間分布結構上相當一致，而在降水較弱的天氣事件，如東北季風或弱綜觀午後對流，則 IRQPE 會有較明顯的海陸不連續現象。與 QPESUMS 相比，則與 MWCOMB 一樣有無法掌握地形降水且極值偏低的情形，可合理推測與紅外線降水

估計所用的訓練真值有關。

圖 12 為 2019 年 7 月 23 日之午後對流個案，IRQPE 與 CWB-SCaMPR 皆可觀察到西南部降水極值位置沿海偏移的現象，這是由於紅外線估計的降水空間分布完全取決於雲頂溫度分布的關係。另外，IRQPE 也對西南沿海及東北海域的高空卷雲反映錯誤的降水訊號，不如做「有雨/無雨」格點辨識的 CWB-SCaMPR 表現來的好。

五、 結論

本研究透過與 CMORPH、QPESUMS 及 CWB-SCaMPR 的比較，評估 IRQPE 的可用性。初步結果顯示，未經參數優化的 IRQPE 已可有效表現亞太地區的兩區分布型態，且對大尺度波動的移動特徵掌握佳，支持了 PDF-Matching 法在氣候應用上的可行性。從台灣周邊區域降水個案的初步定性分析，則顯示 IRQPE 對地形性的迎風面降水掌握度不佳，且有誤判部分不降水雲類為有雨格點的問題。根據初步研究結果，並考慮現階段 IRQPE 參數無法提供即時作業需求，歸納出兩個未來 IRQPE 可先調整測試的方向：(1) 替換能表現台灣陸地降水特徵的降水資料作為紅外線降水估計的訓練真值；(2) 參數調整及優化，可從時間及空間窗區兩個面向討論。在時間窗區的部分，為滿足即時作業需求，將引入氣候法，期望能涵蓋到當下天氣系統的降水特徵；在空間窗區的部分，考慮到台灣地形複雜，將進行空間不擴點測試，期望能改善陸地上的降水分布。

參考文獻

- 王光華，2001：由衛星資料探討台灣地區降雨雲特性與降雨量關係。《大氣科學》，29，109-124。
- Alder, R. F., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Curtis, S., Nelkin, E. J., 2000: Tropical rainfall distributions determined using TRMM combined with other satellite and rain gauge information. *Journal of Applied Meteorology* 39:2007–2023.
- Hsu, K., Gao, X., Sorooshian, S., and Gupta, H.V., 1997: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks.

Journal of Applied Meteorology 36:1176-1190.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., Bolvin, D. T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., and Susskind, J., 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. Journal of Hydrometeorology 2: 36–50.

Hong, Y., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Gao, X., 2004: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. Journal of Applied Meteorology 43:1834-1852.

Kuligowski, R.J., 2002: A self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. Journal of Hydrometeorology 3: 112–130

Kidd, C. K., Kniveton, D. R., Todd, M. C., Bellerby, T. J., 2003: Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. Journal of Hydrometeorology 4: 1088 – 1104.

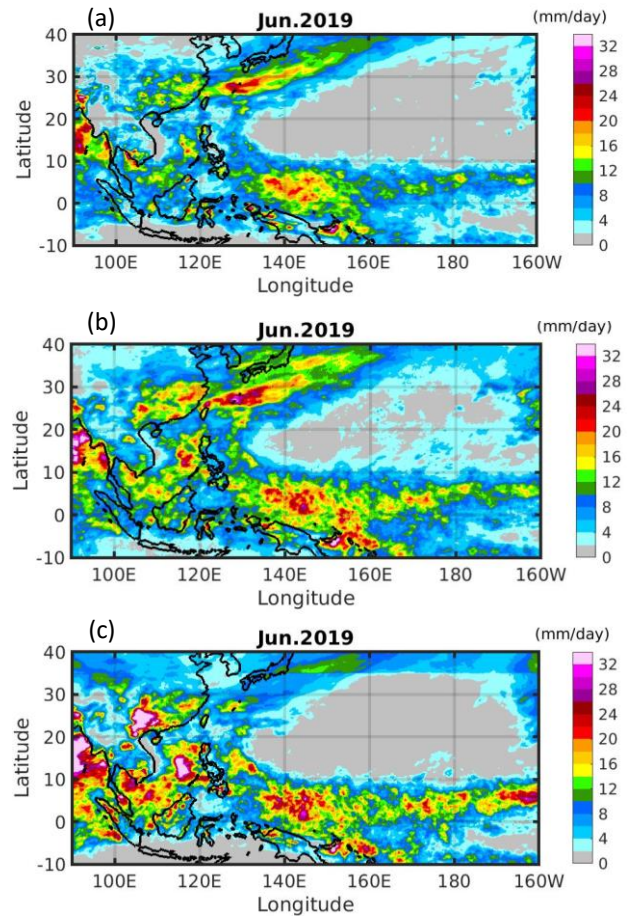


圖 1. 2019 年亞太區 6 月平均雨量圖。(a)CMORPH (b)IRQPE (c)CWB-SCaMPR。

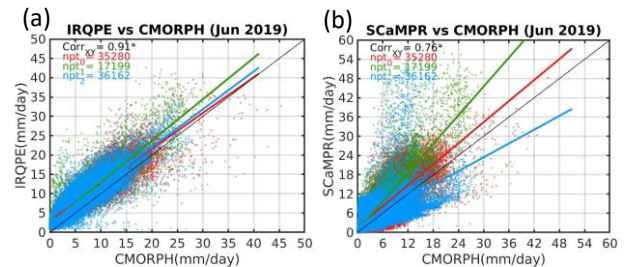


圖 2. 2019 年亞太區 6 月(a)IRQPE (b)CWB-SCaMPR 與 CMORPH 的雨量相關性散布圖。

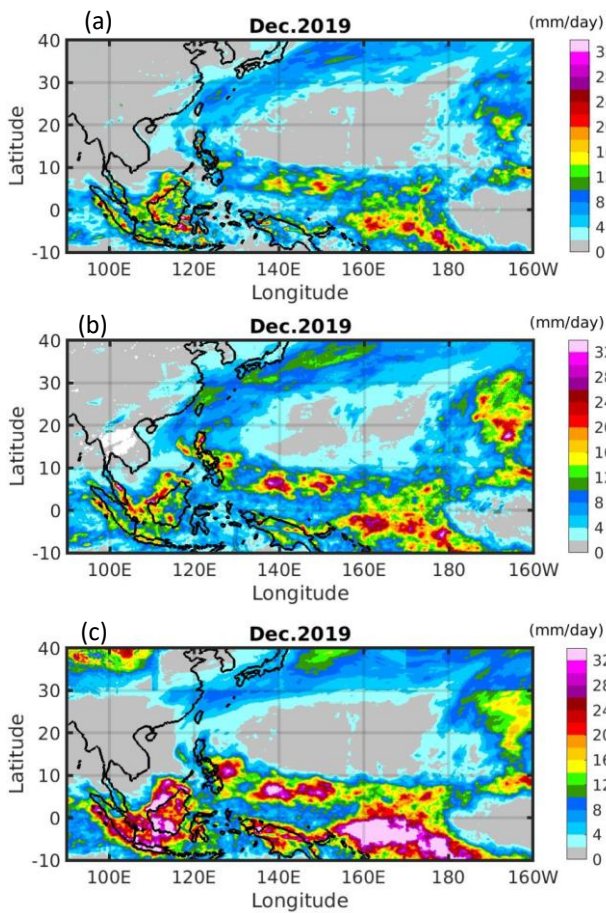


圖 3. 2019 年亞太區 12 月平均雨量圖。(a)CMORPH (b)IRQPE (c)CWB-SCaMPR。

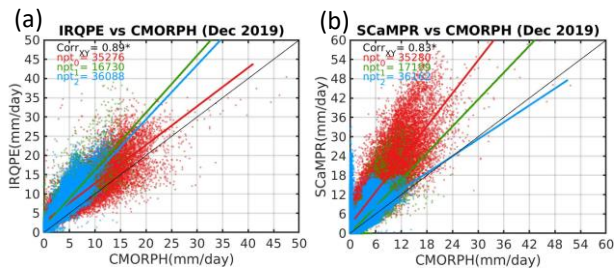


圖 4. 2019 年亞太區 12 月(a)IRQPE (b)CWB-SCaMPR 與 CMORPH 的雨量相關性散布圖。

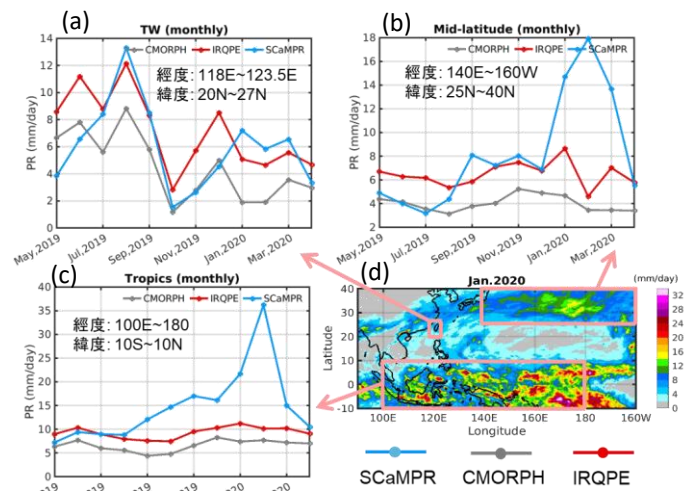


圖 5. 2019 年亞太區逐月區域平均雨量時序圖，其中挑選的區域如(d)，包含(a)台灣地區 (b)中緯度地區及 (c)熱帶地區。

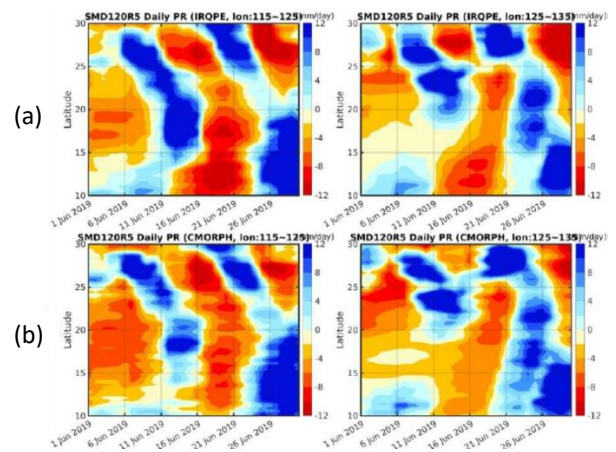


圖 6. 台灣附近 6 月(a) IRQPE (b) CMORPH 之波動南北向移行圖，經度範圍包含 115°E~125°E、125°E~135°E，緯度範圍則為 10°N~30°N。

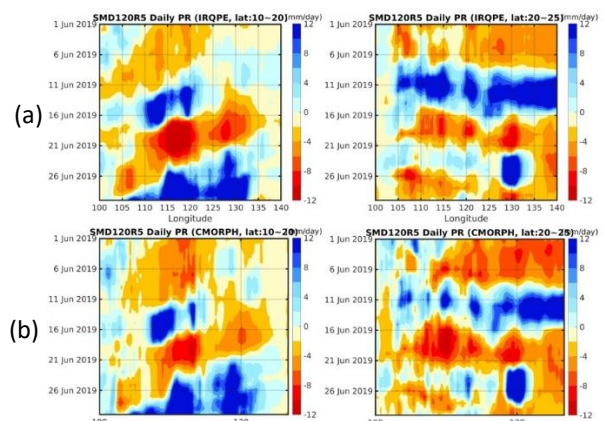


圖 7. 台灣附近 6 月(a)IRQPE (b)CMORPH 之波動東西向移行圖，緯度範圍包含 10°N~20°N、20°N~25°N，經度範圍則為 100°E~140°E。

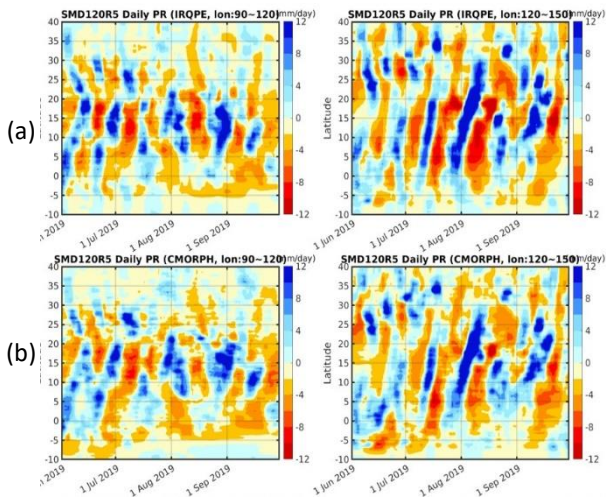


圖 8. 熱帶地區夏季(a)IRQPE (b)CMORPH 之波動南北向移行圖，經度範圍包含 90°E~120°E、120°E~150°E，緯度範圍則為 10°S~40°N。

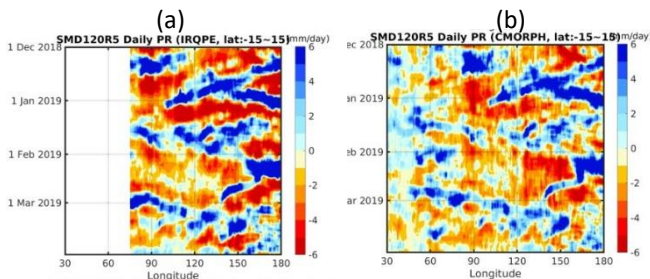


圖 9. 東亞地區冬季(a)IRQPE (b)CMORPH 波動東西向移行圖，經緯度範圍為 30°E~180°E、15°S~15°N。

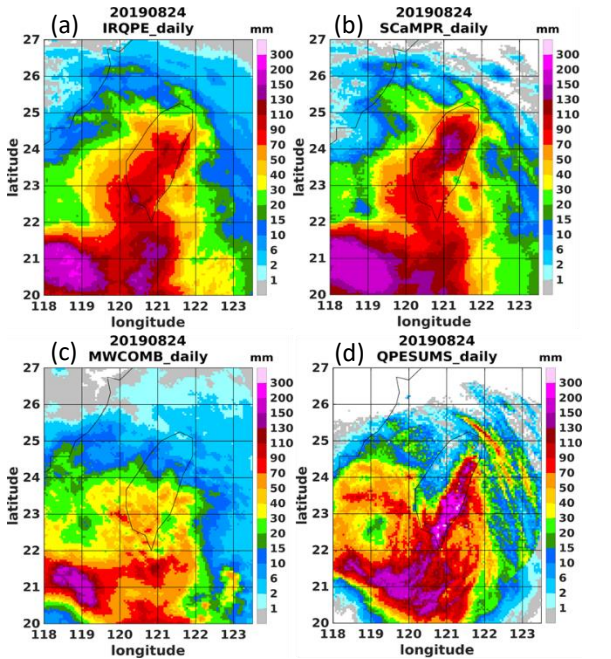


圖 10. 台灣附近 2019 年 8 月 24 日颱風個案的 (a)IRQPE (b)CWB-SCaMPR (c)MWCOMB (d)QPESUMS 累積雨量分布圖。

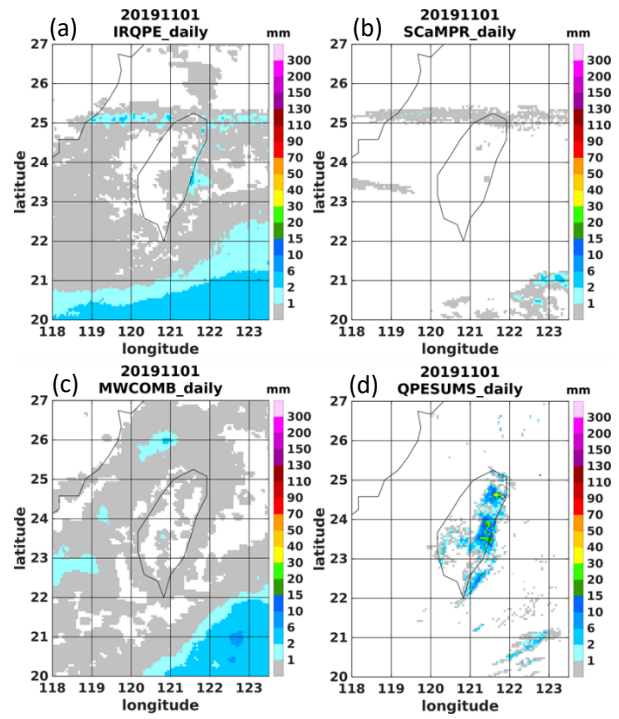


圖 11. 台灣附近 2019 年 11 月 01 日東北季風個案的 (a)IRQPE (b)CWB-SCaMPR (c)MWCOMB (d)QPESUMS 累積雨量分布圖。

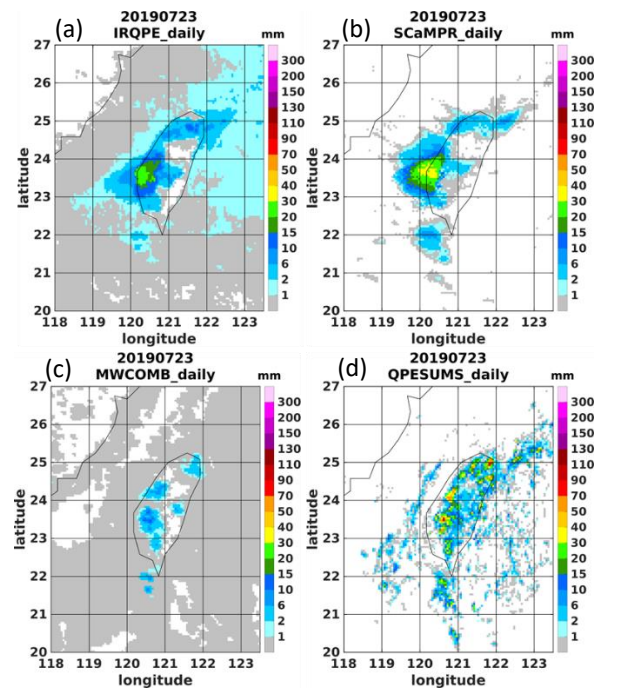


圖 12. 台灣附近 2019 年 7 月 23 日午後對流個案的 (a)IRQPE (b)CWB-SCaMPR (c)MWCOMB (d)QPESUMS 累積雨量分布圖。

Evaluation of satellite quantitative precipitation estimates by using PDF-Matching technique

Yu-Ching Liu¹, Yun-Lan Chen², Guan-Bo Wu¹, I-Han Tseng², Jian-Guo Wang¹, Pin-Pin Xie²

1. Meteorological Satellite Center, Central Weather Bureau

2. Research and Development Center, Central Weather Bureau

3. Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration

Abstract

Meteorological satellite has the capability to observe a wide area with a consistent quality, and the satellite-based quantitative precipitation estimates (QPE) technique can provide important rainfall information where people is hard to reach, such as ocean and dessert. With the launch of high spatial, temporal, and spectral resolution geostationary satellite, Himawari-8, the QPE technique and data quality has also been improved. In the end of 2019, Central Weather Bureau (CWB) of Taiwan introduces a new satellite-based QPE technique, called PDF Matching, from NOAA/CPC of united states and has completed the module building in early 2020.

Based on a straightforward assumption that the higher clouds with lower brightness temperature are more likely to have heavier rain, PDF Matching technique use probability matching to establish a non-linear relationship between microwave-retrieved rain rate and cloud top brightness temperature. This method can effectively reduce the computing resource and get a relatively acceptable precipitation estimation.

The aim of this study is to evaluate the capability of new PDF Matching technique by comparing the validation result with another satellite-based QPE product currently used at CWB, called SCaMPR. For this purpose, we collected QPE data from both SCaMPR and PDF-Matching method during the period between May 2019 and April 2020, and use an international widely-used truth field, CHORPH, and the Radar-based QPE product, QPESUMS, to evaluate the performance of QPE product under two scenarios. One scenario is the seasonal to sub-seasonal synoptic weather system at Asia Pacific region, the other scenario is the precipitation spatial distribution focused on Taiwan area. The primarily result shows that the PDF-Matching method is capable of catching the feature of the large-scale synoptic weather system, which provide a promising support for the new method. As for the performance in a finer spatial and temporal resolution, the results pointed out the importance of choosing the better truth field and parameter optimizing for local area.