

# 臺灣高解析格點月季平均溫度綜合預報技術發展

陳苡甄<sup>1</sup> 馮智勇<sup>1</sup> 劉人鳳<sup>2</sup> 陳孟詩<sup>2</sup>  
多采科技有限公司<sup>1</sup> 中央氣象局<sup>2</sup>

## 摘要

氣候動力模式存在系統性偏差和低解析度等問題，可藉由統計後處理技術提升臺灣月季機率預報技術和可靠度。本計畫使用氣象局1T1R60和美國CFSv2資料，發展月季溫度綜合預報四步驟流程。首先，採用分位數映射法(Quantile Mapping, QM)移除模式原始預報系統性偏差，接著使用校準(Calibration model)和橋接(Bridging model)模型得到目標點降尺度預報，最後，基於條件機率为常態分布函數的假設，採貝氏模型平均法(Bayesian Model Average, BMA)整合目標點降尺度預報得到完整機率密度函數(Probability Density Function)。本研究今年將上述流程推廣至臺灣1公里解析度之高解析網格點，可取鄰近格點預報發展農作專區預報指引，設計並規劃適用於臺灣高解析格點與農作專區月季溫度預報產品。透過遮蔽年實驗採交叉驗證方式評估領先一個月之預報技術與可靠度，並提供長期評估報告供使用者參考。

關鍵字：貝氏模型平均法、高解析格點、三分類機率預報

## 一、前言

隨著多模式與系集模式預報指引快速增加，而氣候動力模式存在系統性偏差和低解析度問題，預報人員於作業階段實不易快速且有效整合大量預報資訊，也不利於由北中南東的四個代表測站擴增至全臺綜觀測站站點以提高預報精緻度，亦難以提供無歷史觀測資料農作專區相關預報指引。

氣象局已於105~106年度「研發短期氣候綜合預報系統計畫案」、107年度「小區域天氣與短期氣候統計預報技術之研發案」，針對臺灣25測站月季平均溫度預報作業需求發展以貝氏模型平均法為核心技術的統計後處理作業化流程，建置包含代表預報、偏差校正、統計降尺度以及綜合預報等四步驟建置流程。透過統計後處理方式，首先移除模式原始預報的系統性偏差並進行測站降尺度預報，參考Raftery等人(2005)提出的BMA機率預報模型與參數估計方式整合一個描述完整溫度量值的機率密度函數(Probability Density Function, PDF)，再依據測站觀測氣候值提供偏低/正常/偏高的三分類預報指引，可依此發展臺灣高解析格點平均溫度綜合預報指引以及臺灣測站月季累積雨量綜合預報指引。108年度「天氣與短期氣候統計後處理技術之研發委外案」完成適用於臺灣地區平均溫度與累積雨量的通用綜合預報指引產製系統，可將綜合預報建置於臺灣測站、臺灣高解析格點以及全球格點。

以下先行說明Raftery等人(2005)提出的BMA機率預報模型與參數估計方式，並以BMA為核心技術開發一套適用於測站與格點平均溫度與累積雨量的通用綜合預報指引產製系統，以及臺灣高解析格點溫

度BMA預報模型建置方案，長期校驗則透過遮蔽年實驗採交叉驗證方式評估領先一個月之預報技術與可靠度，最後綜整研究結論與建議，以為後續發展作業系統參考。

## 二、BMA機率預報模型建置

假設測站溫度觀測值為 $y$ ，而 $K$ 種模式的預報值為 $M_1, M_2, \dots, M_K$ 並且已知資料 $D$ 的情況下，BMA模型描述物理量發生的機率为：

$$p(y|D) = \sum_{k=1}^K p(M_k|D) p(y|M_k, D) \quad (1)$$

其中， $p(y|M_k, D)$ 為各模式利用已知資料 $D$ 估計 $y$ 發生之條件機率密度函數，而 $p(M_k|D)$ 則為各模式的後驗機率，代表模式擬合 $D$ 資料的優劣程度。由於當模式數量大於1時，必須滿足 $\sum_{k=1}^K p(M_k|D) = 1$ 的條件，因此後驗機率可視為權重值。

Raftery等人假設 $f_1, f_2, \dots, f_K$ 分別代表 $K$ 種系集模式成員經過系統性誤差調整後的『最佳』預報值，而 $g_k(y|f_k)$ 為在已知 $f_k$ 時的 $y$ 條件機率密度函數，則BMA模型描述溫度發生機率为：

$$p(y|f_1, f_2, \dots, f_K) = \sum_{k=1}^K \omega_k g_k(y|f_k) \quad (2)$$

其中， $\omega_k$ 為第 $k$ 個成員的後驗機率，代表第 $k$ 個模式在訓練期中成為最佳預報的機率，並滿足條件 $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ ； $g_k(y|f_k)$ 表示在給定預報值 $f_k$ 條件下 $y$ 的PDF。因此BMA模型的預報PDF可視為 $K$ 個模式預報PDF的加權平均，意即以每個模式的後驗機率 $\omega_k$ 為權

重進行加權平均。當物理量為溫度時，模式預報與實際觀測數據分布會非常接近常態分布 (normal distribution)，因此可假設  $g_k(y|f_k)$  為常態分布，其平均值為  $a_k + b_k f_k$ ，標準差為  $\sigma$ ，可表示為：

$$y|f_k \sim N(a_k + b_k f_k, \sigma^2) \quad (3)$$

因此，BMA模型描述物理量發生機率的期望值為：

$$E(y|f_1, f_2, \dots, f_k) = \sum_{k=1}^K \omega_k (a_k + b_k f_k) \quad (4)$$

BMA模型中之未知參數  $a_k$ 、 $b_k$ 、 $\omega_k$  及  $\sigma$ ，需透過訓練期資料進行估計。其中， $a_k$  與  $b_k$  可使用簡單線性迴歸 (simple regression) 逐站進行估算，代表各模式系統性誤差校正參數； $\omega_k$  及  $\sigma$  則透過最大化概似函數 (maximum likelihood) 的過程進行估計。假設預報誤差在時間 (t) 與空間 (s) 上不相關，對數概似函數可寫為  $\sum_{st} \log \left( \sum_{k=1}^K \omega_k g_k(y_{st}|f_{kst}) \right)$ ，則可透過EM演算法求解  $\omega_k$  及  $\sigma$ 。

EM演算法分為E步驟 (Expectation) 計算概似函數，與M步驟 (Maximization) 找出最大化概似函數的最佳化參數。首先假設一個潛在變數  $z_{kst}$ ，當  $z_{kst}=1$  時，代表第  $k$  個模式在  $s$  測站及  $t$  時間時有為最佳預報值，反之則  $z_{kst}=0$ ；意即  $\{z_{1st}, z_{2st}, \dots, z_{kst}\}$  中只有一個為1，其餘皆為0。求解時先給定待估計參數  $\omega_k$  及  $\sigma$  初始猜測值，於第  $j$  次迭代的E步驟中計算：

$$\hat{z}_{kst}^{(j)} = \frac{\omega_k^{j-1} g(y_{st}|f_{kst}, \sigma^{(j-1)})}{\sum_{i=1}^K \omega_i^{j-1} g(y_{st}|f_{ist}, \sigma^{(j-1)})} \quad (5)$$

式中， $g(y_{st}|f_{kst}, \sigma^{(j-1)})$  代表期望值為  $a_k + b_k f_{kst}$ ，標準差為  $\sigma^{(j-1)}$  的常態分布函數。計算  $\hat{z}_{kst}^{(j)}$  後，再於M步驟中計算  $\omega_k$  及  $\sigma$  為：

$$\omega_k^{(j)} = \frac{1}{n} \sum_{s,t} \hat{z}_{kst}^{(j)} \quad (6)$$

$$\sigma^{2(j)} = \frac{1}{n} \sum_{s,t} \sum_{k=1}^K \hat{z}_{kst}^{(j)} (y_{st} - f_{kst})^2 \quad (7)$$

其中， $n$  為訓練資料數。反覆迭代計算式(5)~式(7)的過程將使概似函數值逐漸增加，直到相鄰兩次迭代的對數概似函數值的相對誤差小於  $1E-10$  時 (或迭代次數達10,000次)，參數  $\omega_k$  及  $\sigma$  收斂完成求解。

### 三、臺灣高解析格點溫度預報校驗

#### (一) 月季BMA綜合預報流程架構

圖1為這十一套通用綜合預報指引產製系統，包含代表預報、偏差校正、縮短降尺度以及綜合預報等四步驟流程架構。在有限的訓練期資料量以及每個預報因子有權重與變異數兩個待估參數，基於數學上的考量要求解的未知數需遠小於建模資料量，建議使用系集模式計算溫度與氣候指標系集平均作為代表預報。採用QM法用於移除模式原始預報的系統性偏差。參考Schepen(2014)和Strazzo(2019)作法分成

Calibration model和Bridging model得到目標降尺度預報。最後，經由BMA整合目標降尺度預報並假設其條件機率為常態分布。

#### (二) 臺灣高解析格點溫度BMA預報模型建置方案

表6-1為臺灣高解析格點溫度BMA預報模型建置方案，溫度降尺度預報使用兩模式 (SDBC預報為校準模型，兩模式以副熱帶高壓 (GH)、東亞主槽 (CuiXP) 以及南海海溫指標 (SCS) 迴歸觀測溫度為橋梁模型，透過BMA整合前述降尺度預報以及觀測氣候值共9個BMA預報因子。將所有可用資料量作為BMA訓練期資料並且採分群建模，利用氣候分區特性讓相同性質的格點一起建模增加訓練期資料量，如圖2左側所示。圖2右側標示所使用的氣候指標範圍。

#### (三) 機率預報校驗方法

##### 1. 準確率 (Percent Correct, PC)

PC用於評估預報命中正確類別的比例。如下表預報和觀測透過各自門檻分成三分類，分析這次預報相較於預報門檻是落在偏低/正常/偏高，對應的觀測也依照觀測門檻評估是落在偏低/正常/偏高，統計所有樣本並依照式(8)計算即可求得PC值。PC=1時為完美預報，值域介於 0~1 之間。

FST \ OBS	Below	Normal	Above
Below	$N_{11}$	$N_{21}$	$N_{31}$
Normal	$N_{12}$	$N_{22}$	$N_{32}$
Above	$N_{13}$	$N_{23}$	$N_{33}$

$$PC = (N_{11} + N_{22} + N_{33}) / N_{total} \quad (8)$$

##### 2. 機率預報技術得分 (Ranked Probability Skill Score, RPSS)

RPSS用於評估三分類機率預報誤差相較於氣候值機率的技術，如式(9)：

$$RPSS = 1 - RPS / RPS_{ref} \quad (9)$$

其中

$$RPS = \sum_{n=1}^k (Y_n - O_n)^2 \quad (10)$$

$Y_n$  為預報之累積機率， $O_n$  為觀測之累積機率。 $RPS_{ref}$  為氣候值之RPS (本研究定義為0.33, 0.34, 0.33)。RPSS=1時為完美預報，介於 0~1 之間代表有預報技術，若小於 0 則代表沒有預報技術。

##### 3. 可靠圖 (Reliability Diagram, RD)

三分類機率預報可靠圖用於評估預報機率與觀測發生頻率的一致性，若機率預報為完美可信的曲線會落在對角線。若接近水平/垂直曲線表示預報不具解釋能力。若曲線落於灰色區間表示相較於氣候值預報有預報能力 ( $BSS > 0$ )，落於灰色區間以外則不具預報能力 ( $BSS < 0$ )。

#### (四) 臺灣高解析格點溫度BMA長期校驗

為了評估BMA預報技術與可靠性需進行長期校驗，利用過去已知資料採交叉驗證方式遮蔽預報年，用剩餘年份作為BMA訓練期資料預報目標年，校驗領先一個月預報之季平均溫度。

圖4為領先一個月預報之季平均溫度長期校驗，左至右為春、夏、秋、冬四季，上至下為BMA、MME以及

BMA-MME的三分類機率預報類別命中率(PC)，用於評估三分類機率最大面積是否與觀測類別一致。校驗結果顯示BMA預報以春、秋優於夏、冬兩季，約有一半格點PC高於0.5。BMA與MME在不同季節、不同地區各自具有預報技術，春、秋兩季以BMA表現較佳，夏、冬則是MME。圖5為領先一個月預報之季平均溫度的三分類累積機率預報誤差(RPSS)，用於評估三分類機率整體與觀測機率差異。校驗結果顯示BMA預報以春、夏優於秋、冬兩季，春季整體具有預報技術(RPSS>0)，夏季約有一半格點RPSS>0。

圖6為領先一個月預報之季平均溫度的三分類機率可靠圖(RD)，左至右為春、夏、秋、冬四季，上至下為三分類各自的可靠圖，紅色為BMA預報，藍色MME預報。校驗結果顯示BMA預報以春、夏優於秋、冬兩季，春、夏季三分類機率預報貼近對角線表示預報具有可信度，以直條圖表示的樣本分布顯示BMA有能力預報偏高或偏低機率，秋、冬季三分類機率預報接近氣候值預報表示預報不具解釋能力，較少的樣本導致可靠圖出現明顯的高估/低估，整體以Below和Above表現優於Normal。

#### 四、結果討論

利用BMA客觀整合氣象局1T1R60和美國CFSv2輸出資料，每月自動產製臺灣高解析格點未來三個月季均溫三分類預報指引，校驗結果顯示BMA與MME在不同季節、不同地區各自具有預報技術。

以目前臺灣高解析格點季平均溫度BMA預報校驗結果顯示BMA仍有進一步改善空間，嘗試分析BMA預報因子權重係數，發現BMA給予觀測氣候值較高權重導致三分類機率預報不集中，使得BMA長期校驗表現不理想。由於觀測氣候值是歷史觀測資料的平均值，相較於其他預報因子在BMA訓練時會穩定發生於觀測溫度的兩側，其誤差行為較穩定，致使BMA給予觀測氣候值較高權重。

加入觀測氣候值作為BMA預報因子目的是希望以觀測氣候值為基準結合模式預報達到預報表現加乘效果，以目前長期校驗結果無法反應此特徵。而如何正確使用觀測氣候值於月季BMA綜合預報流程以及如何避免觀測氣候值BMA權重係數獨大導致三分類機率預報不集中的問題將是本研究後續分析課題，期待能有助於BMA預報改善。

待完成臺灣高解析格點月季溫度BMA預報指引，便可用於農作專區預報產製。參考美國CPC利用網格化資料以色階呈現三分類機率最大值，與日本JMA利用燈號警示區分三分類機率並以鄉鎮縣市分界去填色，結合CPC機率網格化與JMA燈號警示之優點，設計規劃適用於臺灣高解析格點三分類機率網格化產品，如圖3所示。此外，也能額外提供以鄰近格點預報農作專區數據檔供農業單位規劃展示網頁使用。

#### 五、參考文獻

1. 交通部中央氣象局，2016、2017：「研發短期氣候綜合預報系統計畫案」期末報告
2. 交通部中央氣象局，2018：「小區域天氣與短期氣候統計預報技術之研發案」期末報告
3. 交通部中央氣象局，2019：「天氣與短期氣候統計後處理技術之研發委外案」期末報告
4. 交通部中央氣象局，2020：「氣象模式統計後處理技術之研發委外案」期末報告
5. Peng, Z., Q. Wang, J. C. Bennett, P. Pokhrel, and Z. Wang, 2014: Seasonal precipitation forecasts over China using monthly large-scale oceanic-atmospheric indices. *J. Hydrol.*, 519, 792–802.
6. Peng, Z., Q. Wang, J. C. Bennett, A. Schepen, F. Pappenberger, P. Pokhrel, and Z. Wang, 2014: Statistical calibration and bridging of ECMWF System4 outputs for forecasting seasonal precipitation over China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 7116–7135.
7. Raftery, A. E., T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakowski, 2005: Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1155–1174.
8. Schepen, A., Q. J. Wang, and D. E. Robertson, 2014: Seasonal forecasts of Australian rainfall through calibration and bridging of coupled GCM outputs. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 1758–1770.
9. Strazzo, S., D.C. Collins, A. Schepen, Q. Wang, E. Becker and L. Jia, 2019: Application of a Hybrid Statistical–Dynamical System to Seasonal Prediction of North American Temperature and Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 607–625.

## 六、附圖

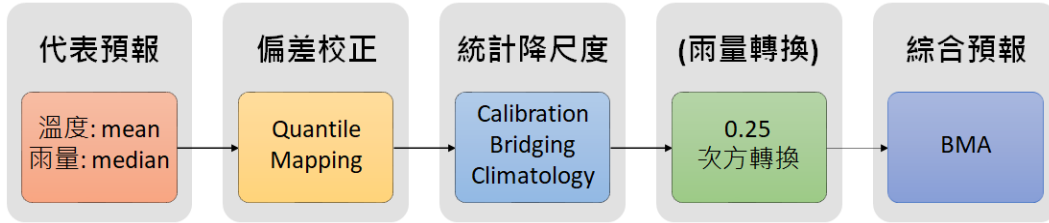


圖1 月季BMA綜合預報流程架構

表1 臺灣高解析格點溫度BMA預報模型建置方案

代表預報 (Representative)	1T1R60、NCEP CFSv2系集模式計算溫度與氣候指標系集平均
偏差校正 (Bias Correction)	分位數映射法 (QM)
統計降尺度 (Downscaling)	BMA預報因子: 9個 1. 2SDBC預報 2. 氣候指標單迴歸 (6SREG: 2GH, 2CuiXP, 2SCS) (圖2右圖) 3. 觀測氣候值
綜合預報 (Consensus Forecast)	所有可用資料量作為BMA訓練期資料
	採氣候分區建置(圖2左圖)增加BMA訓練期資料
	BMA條件機率假設為常態分布
氣候基期	1998~2019年

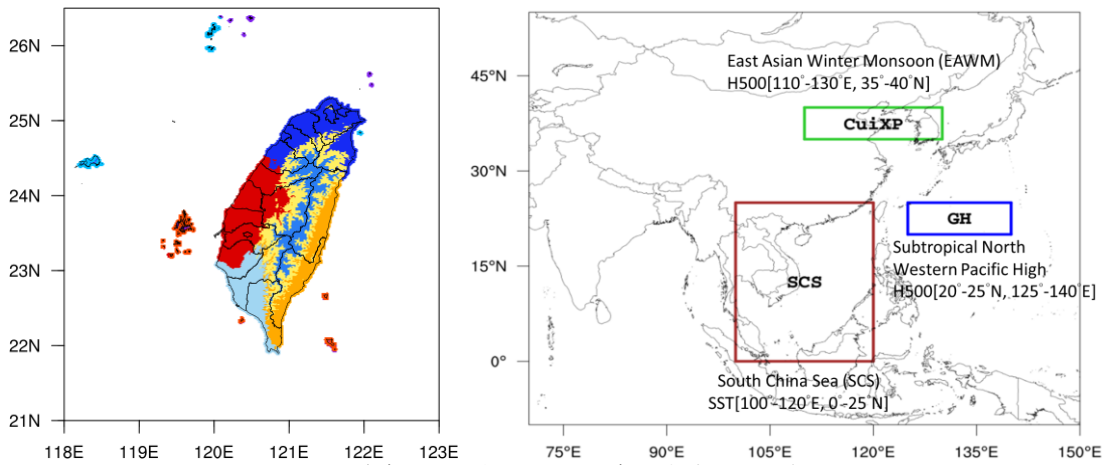


圖2 溫度氣候分區(左圖)以及氣候指標位置(右圖)

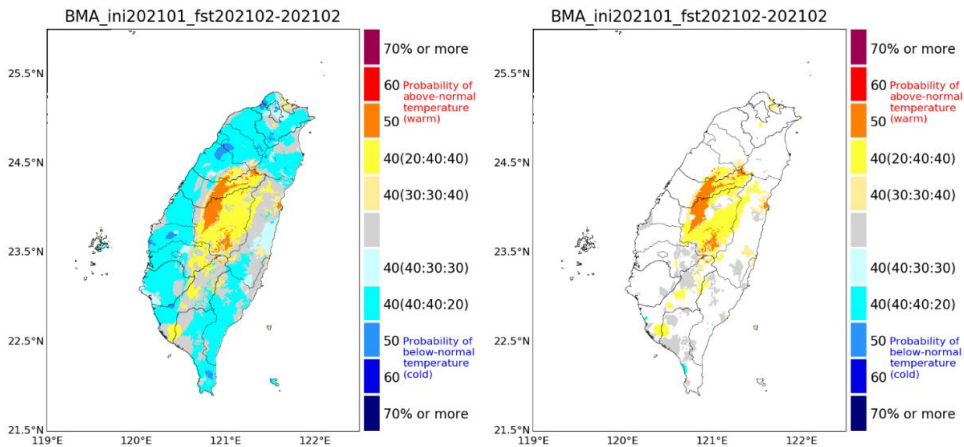


圖3 臺灣高解析格點三分類機率預報(左圖)、校驗(右圖)產品



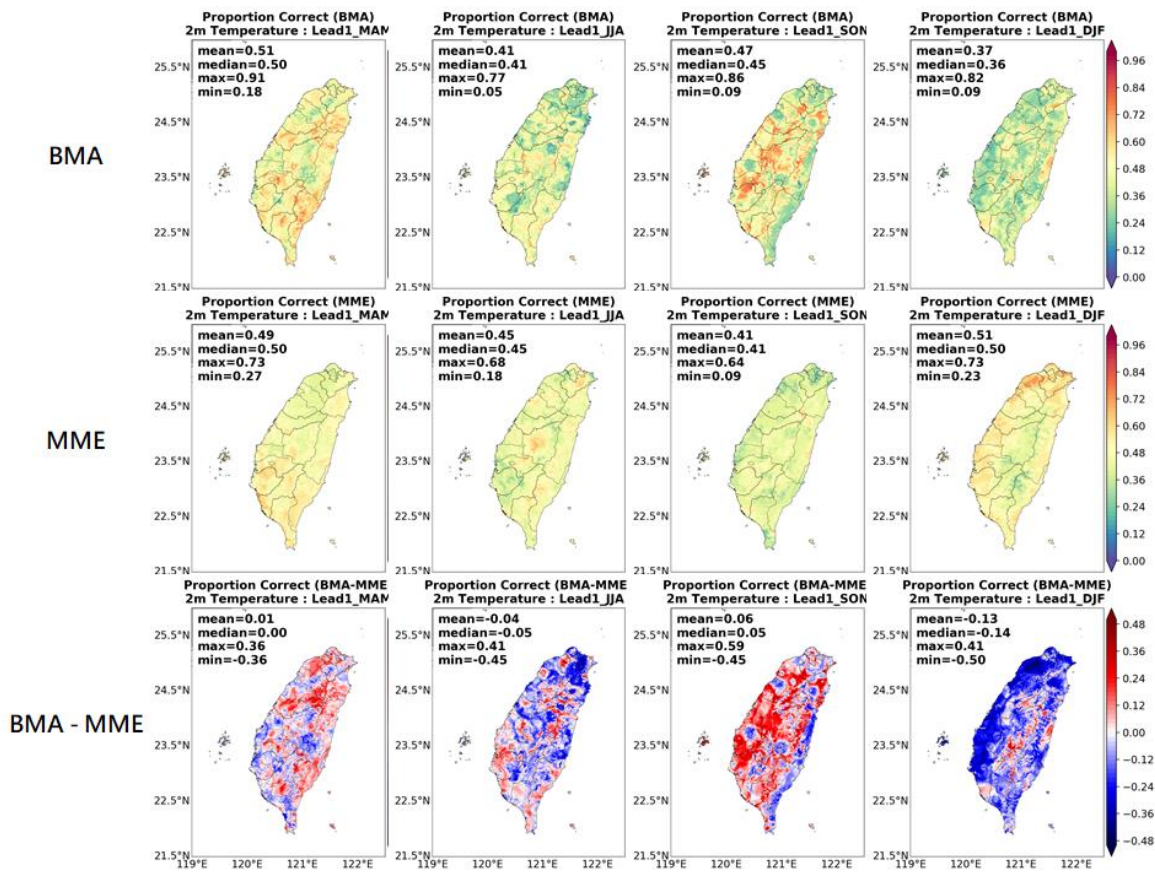


圖4 領先一個月預報之季平均溫度長期校驗，左至右為春、夏、秋、冬四季，上至下為BMA、MME以及BMA-MME的三分類機率預報類別命中率(PC)

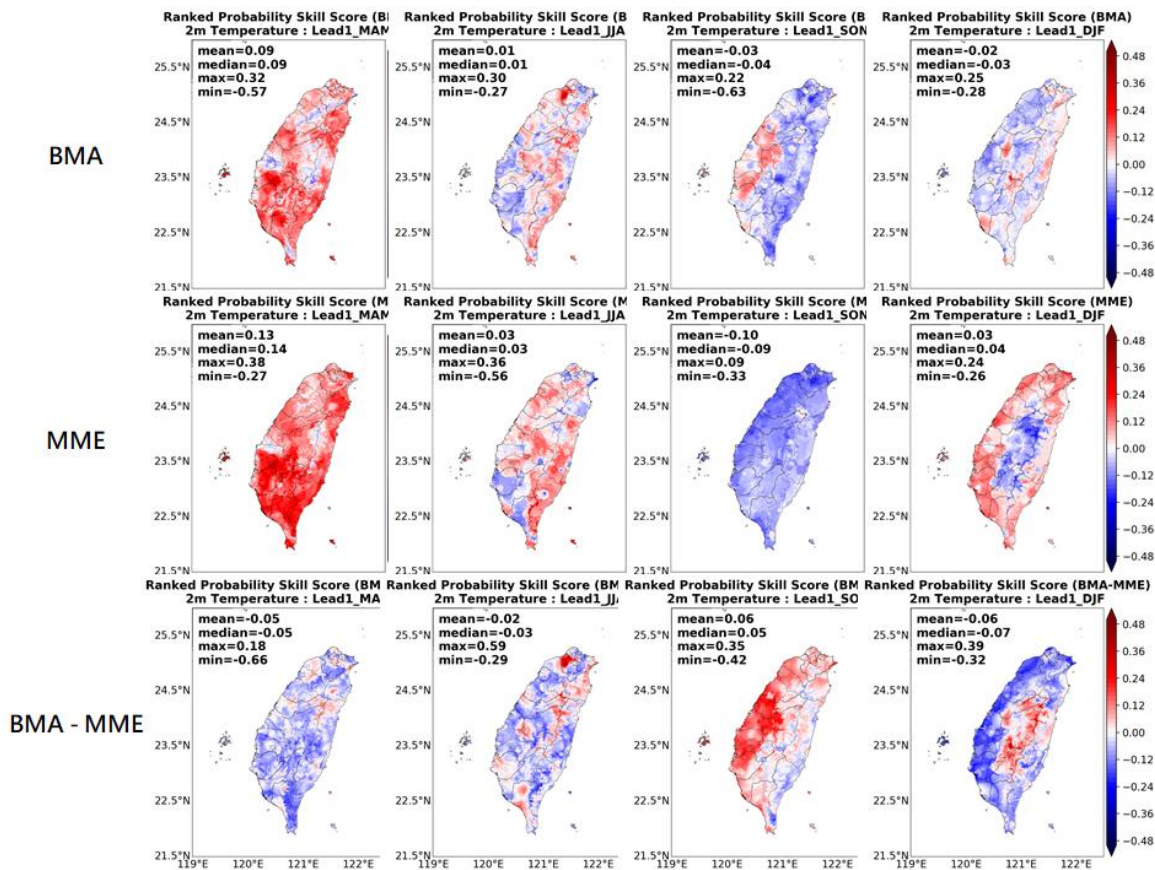


圖5 同圖4，改為三分類累積機率預報誤差(RPSS)

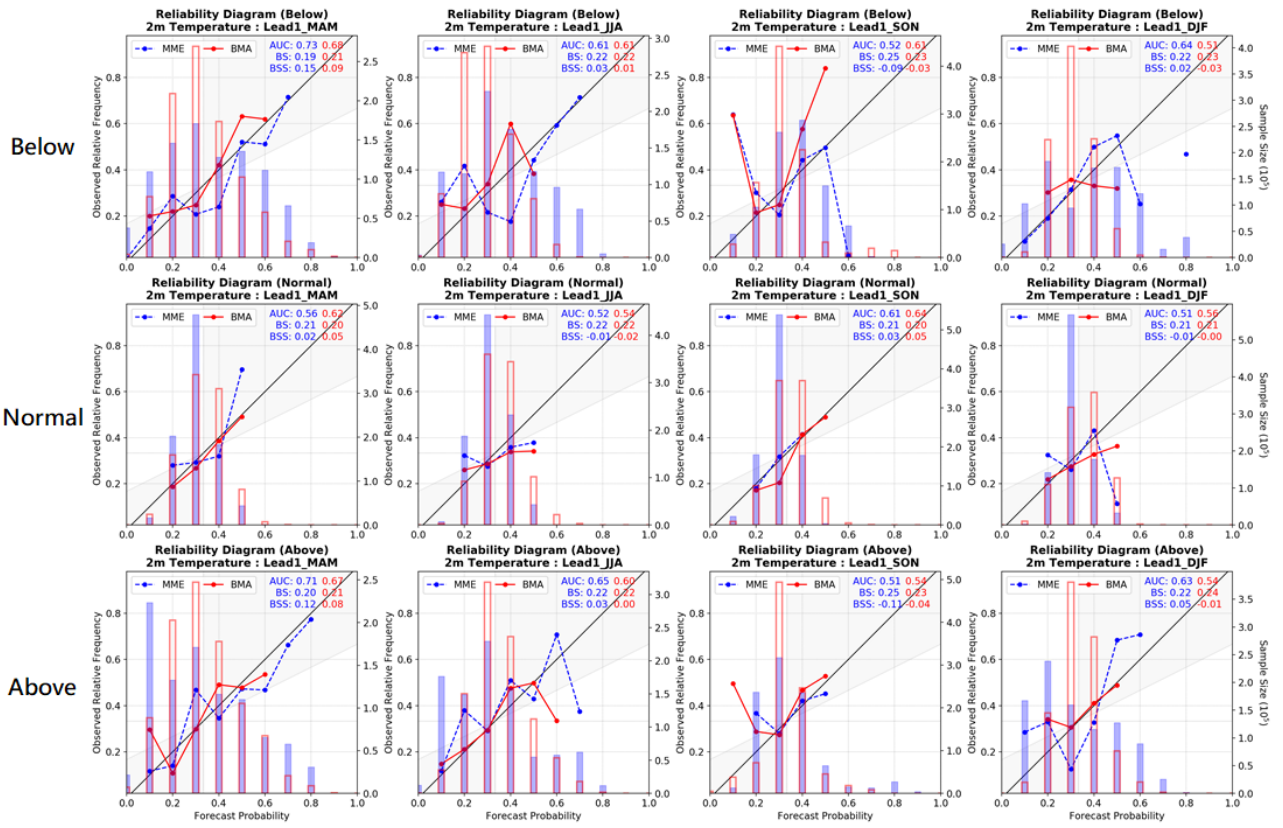


圖6 領先一個月預報之季平均溫度的三分類機率可靠圖(RD)，左至右為春、夏、秋、冬四季，上至下為三分類各自的可靠圖，紅色為BMA預報，藍色MME預報