

交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告

臺灣與東亞地區之月、季定量  
降水估計技術研發與應用

計畫類別：國內 國外

計畫編號：MOTC-CWB-98-6M-03

執行期間： 98 年 1 月 1 日至 98 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳正達

執行單位：財團法人氣象應用推廣基金會

中華民國 98 年 12 月 5 日

## 交通部中央氣象局 98 年度政府部門科技計畫期末摘要報告

### 計畫名稱：臺灣與東亞地區之月、季定量降水估計技術研發與應用

審議編號： 部會署原計畫編號： MOTC-CWB-98-6M-03

主管機關： 交通部中央氣象局 執行單位： 氣象應用推廣基金會

計畫主持人： 陳正達 聯絡人： 黃美鳳

電話號碼： (02)29309545 傳真號碼： (02)29333315

期程： 98 年 01 月 01 日至 98 年 12 月 31 日

經費：(全程) 2893 仟元 經費(年度) 2893 仟元

#### 執行情形：

##### 1.執行進度：

	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
當年	100	100	0
全程	100	100	0

##### 2.經費支用：

	預定	實際	支用率 (%)
當年	2893 仟元	2893 仟元	100%
全程	2893 仟元	2893 仟元	100%

##### 3.主要執行成果：

整合計畫相關學術單位以及氣象局模式的模擬與預報結果，每個月持續以已建立的二階段、多假想海溫、多重模式動力氣候預報系統（參見圖一）進行全球與區域的月季降雨預報實驗，提供作為長期預報科的實際預報參考。延續過去工作重點，除了已完成的預報系統歷史預報（hindcast）驗證評估工作，也取得歐洲中心所主導的 DEMETER 計畫的多模式系集預報系統（參見圖二）歷史預報資料，並分析比較兩個預報系統的異同，評估的內容除了傳統的三分類降雨距平預報（偏多、正常、偏少；30%—40%—30%）外，也同時針對更極端季節降雨距平的預報技術進行客觀評估。本年度新增項目為以可信度圖（reliability diagram）的預報診斷結果為基準的機率預報的誤差修正方法探討，比較其在可信度（reliability）得分與解析度（resolution）得分的影響。針對季節氣候三分類，提供機率預報的誤差修正調整研究發現，在所研究的區域而言多數是可以使 Brier Skill Score 改善，而改善的主要原因是經過校正（calibration）後的可靠度（Reliability）得分增加，但是分辨率（Resolution）得分卻會下降，少數

區域的分辨率得分下降超過可靠度得分提升時，機率預報修正就沒有實質意義。在較為極端（小於 15% 機率）的季節預報方面，特別是夏、秋季的預報，往往修正的效果並不理想。

針對預報應用在水資源經濟模式方面，是以討論多模式系集模擬情境對桃竹苗地區水資源經濟的影響衝擊。當透過降雨量的預報而未採取任何因應措施時，桃竹苗地區之降雨量降少所造成之水資源供給減少，將會顯著地影響到工業和民生用水，因此整體社會福利減少約 18.6 億元。

當生產者或政府掌握了此雨量預報資訊時，可透過水資源管理策略的應用來降低此衝擊。舉例而言，由於農業部門的用水量是最高的一個部門，但是其產值相對而言是較工業部門低，因此在預報雨量偏少時，透過休耕面積的增加來將農業用水移轉至非農業部門時，此時的整體社會利益將會增加 1.48 億元。由於雨量預報資訊系統的提供加上因應策略的執行，就整體的因應策略之效益和成本而言，水資源的成本，含休耕的補助金額加上無法種植水稻所時損失的利潤，再加上水資源移轉到非農業部門的移轉成本的增加，小於用水轉移所產生的效益以及整體社會福利，故就益本比而言，遠高於一，顯示預報系統資訊與因應策略的價值。

#### 4. 計畫變更說明：

在計畫內容方面，並無變更。

但在計畫經費方面，做下列兩項變更：

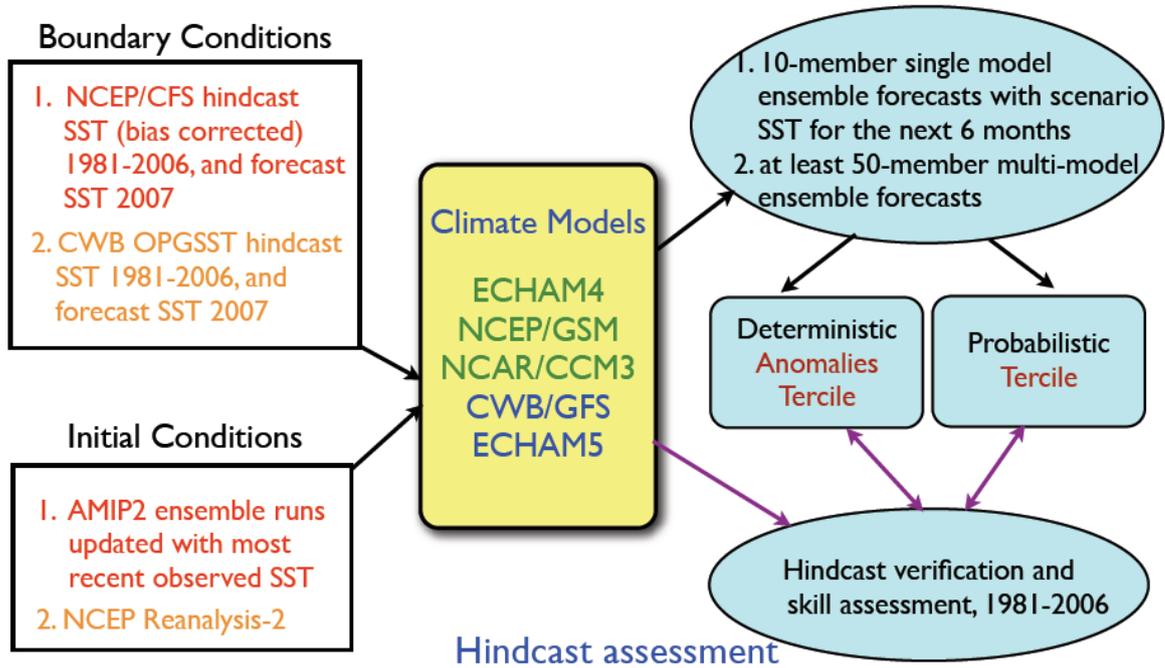
- (1) 人事費：由於其中一名研究助理只聘到學士級，故有多餘經費，將這些多餘的經費用來聘僱一些臨時工，以協助計畫能有效執行，達成預期目標。
- (2) 已於 98 年 6 月行文至中央氣象局變更國外差旅費之時間及地點：在原先預估經費不變更之原則下，更改會議時間及地點，由原先之 98 年 9.13-17 日韓國釜山更改會議時間及地點為 98 年 7 月 12-15 日新加坡。

#### 5. 落後原因：

#### 6. 主管機關之因應對策（檢討與建議）：

本年度各參與預報系統的執行學校單位，並沒有設備租賃採購之費用，但已積極協調各執行單位，運用各執行單位現有計算與資料儲存資源，支援計畫所需。

## 2-Tier Scenario SSTA Multi-Model Ensemble Dynamical Seasonal Forecast System



圖一 二階段、多假想海溫、多重模式系集動力預報系統以及驗證、評估、誤差修正方法架構示意圖。

## Multi-model ensemble system

- DEMETER system: 7 coupled global circulation models

Partner	Atmosphere	Ocean
ECMWF	IFS	HOPE
LODYC	IFS	OPA 8.3
CNRM	ARPEGE	OPA 8.1
CERFACS	ARPEGE	OPA 8.3
INGV	ECHAM-4	OPA 8.2
MPI	ECHAM-5	MPI-OM1
UKMO	HadCM3	HadCM3

9 member ensembles  
ERA-40 initial conditions  
SST and wind perturbations  
4 start dates per year  
6 months hindcasts

圖二 DEMETER多重模式系集動力預報系統架構。

# 臺灣與東亞地區之月、季定量降水估計技術研發與應用

執行單位：財團法人氣象應用推廣基金會      計畫編號： MTOC-CWB-98-6M-03

計畫主持人：陳正達（國立台灣師範大學地球科學系教授）

計畫共同主持人：鄒治華（國立台灣師範大學地球科學系教授）

曾仁佑（國立中央大學大氣科學系副教授）

洪志誠（國立台北教育大學自然科學教育系副教授）

陳吉仲（國立中興大學應用經濟系教授）

研究人員：蕭玲鳳、林修立、邱素瑜、童裕翔

聯絡方式：台北市汀州路4段88號      國立台灣師範大學地球科學系

E-mail: [chen@rain.geos.ntnu.edu.tw](mailto:chen@rain.geos.ntnu.edu.tw)

## 前言

短期氣候預報的技術發展與應用具有相當大的潛在社會經濟價值，具有技術的月季氣候預報可以提供政府與民間參考運用，在重大自然氣候變動（如旱澇與極端冷熱）發生前，儘早採取相關的防減災因應措施。目前世界許多主要氣象預報作業中心都以中長期的月季氣候預報為發展的重點方向，氣候預報模式發展、預報策略以及預報技術的進展，都比傳統的數值天氣預報更加快速。也因此，氣象局的中長期科技發展規劃之一，即是建立這種季節至年際尺度的區域氣候預報能力，並加以評估其預報特性與價值。

在過去幾年，透過氣象局與大學的研究合作，已經運用高速的叢集運算平台與數個全球氣候模式建構完成實驗性的氣候預報系統，以兩階段方式（two-tier approach）進行未來至少兩個季節的降雨與氣溫預報，並同時運用模式與觀測分析資料，進行個別與多重模式系集短期動力氣候的歷史模擬預報（hindcast），同時運用美國環境預報中心的大氣海洋耦合預報系統（NCEP/CFS）與中央氣象局的動力統計預報系統（CWB/OPGSST）所預報的兩種未來海溫距平情境加以驅動。在歷史模擬預報的驗證與技術評估方面，則是運用世界氣象組織所制定的長期預報的標準化驗證程序做為工作準則，並以機率預報形式作為分析評估的

重點。同時也收集歐洲中長期預報中心的 DEMETER 多重模式系集預報系統的資料，並與計畫所建立系統的各種特性加以比較。在預報結果應用方面，則是估計雨量預報在水資源市場的資訊價值，若能透過事先的雨量預報系統，來針對各用水標的做一分配，將可創造更多的社會福利。

本年度的計畫重點，除了持續進行、測試、擴展與測試已建立的多重模式實驗系集氣候預報系統與驗證之外，將從預報系統診斷驗證結果為基準，發展季節氣候機率預報的誤差修正技術，將診斷分析 Reliability Diagram 中所呈現的預報系統特徵，以線性回歸方程加以修正其誤差，並比較本計畫的多模式系集動力預報與 DEMETER 計畫修正前後之異同。此外在氣候預報產品的應用方面，將以降雨預報對水資源管理的影響，並進而以區域水資源經濟模型，估計降雨預報的潛在經濟價值。同時計畫也將協助氣象局積極參與亞太經合會 (APEC) 氣候中心的氣候預報相關活動，充分運用區域共享的氣候預報資源，在 APEC 的架構下，推展區域的國際合作。

期末摘要報告的重點，除了延續從預報診斷資料的特性發展機率預報的誤差修正方式外，主要是將雨量預報技術應用在估計水資源市場的資訊價值，以用水需求較迫切之桃竹苗地區為研究對象，將水資源的供給與需求同時考量，在需求面方面，須針對各標的用水的用水量來做估計；在供給面方面，需針對水庫、河川及地下水的抽取量來估計；並透過數學規劃的方法來建立水資源的經濟模型以求解出其市場的價格，進一步探討農業用水移用補償合理金額之訂定。

## 一、使用資料及評估、修正方法

### 1.1 觀測資料

在觀測資料方面，本研究使用了全球降雨氣候計畫(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)月平均降雨資料，水平解析度為 2.5 x 2.5 (將其差分至 T42)，資料長度為 1981 年 1 月到 2005 年 4 月，詳細資料內容，請參見 Huffman et al. (1997)。

### 1.2 模式資料

在模式資料方面，本研究以美國環境預報中心耦合預報系統(NCEP/CFS)的 Hindcast (後報)海溫預報資料，進行德國馬克斯普朗克氣象研究所的 ECHAM4、中央氣象局的全球大氣模式(CWB/GFS)以及 ECHAM5、美國大氣研究中心的 CCM3(NCAR/CCM3)、大氣海洋總署環境預報中心的 NCEP/GSM，完成五個模式 2、5、8、11 月從 1981 年至 2004 年的系集後報(Hindcast)實驗。其中每個模式均包括十個系集成員，水平解析度為三角截取 42 波 (Triangular truncation 42 wavenumbers, T42)，對應東西方向 網格點，南北方向 64 個高斯網格點。選擇評估區域為東亞地區 (80E-160E, EQ-50N)。此外 德國馬克斯普朗克氣象研究所的 ECHAM4、中央氣象局的全球大氣模式(CWB/GFS)以及 ECHAM5 亦以中央氣象局的動力統計預報系統 (CWB/OPGSST) 所預報的海溫距平驅動，完成第二組假想海溫發展的系集後報(Hindcast)實驗，在多重模式組合的機率預報，是以上述八種模式與驅動海溫組合為基準。美國大氣海洋總署下的國家環境預報中心在 2004 年推出的大氣海洋耦合預報系統 (NCEP/CFS) 當作對應比較之一階段耦合模式。

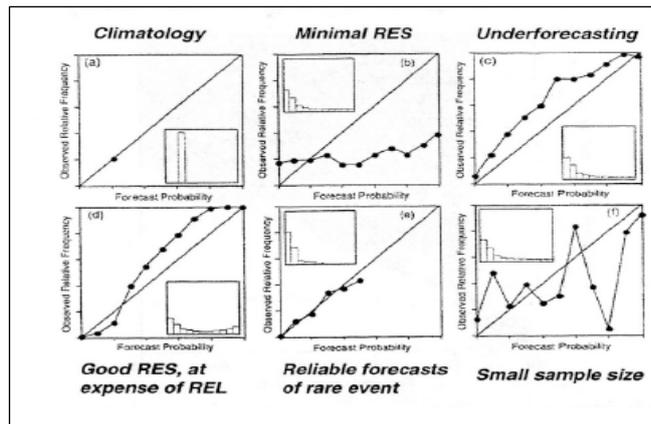
DEMETER 計畫中的多模式系集預報系統是由七個不同的大氣海洋耦合模式組合而成，每個模式有九個系集成員 (參見上述圖二)，也都同樣有超過二十年以上的歷史模擬預報資料，可以加以分析比較。這個比較除了檢驗此計畫的預報系統技術水準外，還可以提供二階段與一階段多模式系集預報系統的初步差異評估，對於未來氣象局在下一期經建計畫中，建立以大氣海洋耦合模式與資料同化系統作為氣候模擬與預報

工具的構想，亦可以有規劃方面的參考價值。

### 1.3 評估方法

#### 1.3.1 可靠度圖 (Reliability diagram) 和 Brier 技術得分

預報技術評估的方法眾多，所著重的預報特性呈現也不相同。相對運作特性 (Relative Operating Characteristics, ROC) 預報技術得分主要是評估預報系統區分不同預報結果的能力，也就是預報解析度 (resolution)，其得分高低對於預報誤差並不敏感，也就是並無法說明預報的可靠度 (Reliability) 的高低，有偏差的預報還是有可能有好的預報解析度及相對運作特性曲線 (ROC curve)，這也代表有可能可以藉由校正 (calibration) 來改善預報結果。不過對於預報可靠度的指標對模式發展者、預報員以及後續使用者都非常重要，除了ROC預報技術得分外，我們也運用可靠度圖與相伴的預報機率的直方圖 (histogram)，同時也計算其Brier技術得分。ROC技術得分所用的是基於觀測資料的條件機率，而可靠度圖則是以預報機率為基準的條件機率畫成，一般而言，可以相輔相成，其中必須要小心的是，可靠度圖需要較多的資料點整合在一起計算，所以無法得到單一網格點的評估值，排序機率技術得分 (Ranked Probability Skill Score) 可以做為這方面預報技術得分分析的補充。可靠度圖與相對運作特性曲線繪製原理相似，不過在X與Y軸所代表的，則是以預報機率範圍為條件下的觀測事件發生頻率；曲線可表示預報偏差，也可以更有效地判斷預報系統的特性，也被稱為是預報的診斷驗證 (diagnostic verification)，根據Wilks (1995) 的分類，預報系統特性可以舉例如圖三中的子圖所示，其中圖a表現出的是氣候之展現值；而圖b展現出較小的預報解析度；圖c為曲線皆在對角線之上，表示預報出現預報偏低 (underforecasting) 的偏差，反之，若曲線在對角線之下，表示預報偏高 (overforecasting)；而圖d為預報可信度表現出非常好的預報解析度；當可靠度圖出現如e圖時，表示出此為一罕見的個案；最後若模式個案非常少，則呈現出的可靠度圖則會類似 f 圖。在本研究中，將可靠度圖結果與後述相對運作特性技術得分互相搭配，可以做為提供預報是否接近真實的一個參考訊息。



圖三 Reliability and sharpness (from Wilks 1995)

此外，在本研究中，並提供 Brier 技術得分 (Brier score skill, BSS) 的值協助可靠度圖的判讀，並將結果與ROC得分互相搭配，作為提供預報是否接近真實的一個參考訊息。Brier score可視為趨勢預報中的均方根誤差 (mean square error)，其最佳得分為0，而BSS最佳得分為1；若BSS的值為0時，表示相對於參考預報是無預報技術的。其中BS和BSS的計算如下：

$$(\text{Brier score}) \text{ BS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$$

其中N為預報的總數， $P_i$ 為趨勢預報結果， $O_i$ 為實際觀測（計算過程中當事件發生時定義得分為1，事件未發生則得分為0），而上式可經轉換變為：

$$\text{BS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^T n_K (P_K - \bar{O}_K)^2 - \frac{1}{N} \sum_{K=1}^T n_K (\bar{O}_K - \bar{O})^2 + \bar{O}(1 - \bar{O})$$

$$\text{Brier skill score : BSS} = \frac{\text{BS} - \text{BS}_{\text{reference}}}{0 - \text{BS}_{\text{reference}}} = 1 - \frac{\text{BS}}{\text{BS}_{\text{reference}}}$$

### 1.3.2 相對運作特性曲線與得分 (Relative Operating Characteristics curve and score)

相對運作特性 (ROC) 是一個利用「命中預報」與「錯誤預報」比較下所得的技術得分，其中「命中預報 $HR_n$ 」(Y軸)與「錯誤預報 $FAR_n$ 」

(X軸)的計算分別為：

$$HR_n = \frac{\sum_{i=n}^N O_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad FAR_n = \frac{\sum_{i=n}^N NO_i}{\sum_{i=1}^N NO_i} \circ$$

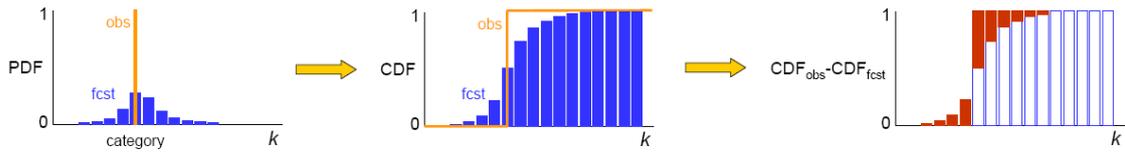
相對運作特性得分也是判定模式模擬結果的一個重要技術得分，其得分大小即為ROC的面積，最完美的技術得分為1，而當曲線剛好落在對角線時，此時技術得分（面積）即為0.5；ROC被用來做為模式技術得分的展現結果，而非判別與預報誤差之數據大小；偏差比較大的預報也許仍有好的ROC，因此ROC也可被視為是一種潛在效益的評量。

除了ROC技術得分外，也可利用曲線來看模式模擬結果的表現。ROC 曲線的定義，一定要從座標(0,0)到(1,1)，其值的範圍從0至1，當曲線向對角線左側彎曲時，表示「命中預報」大於「錯誤預報」；當ROC 曲線正好在對角線上時，此時為無預報技術；而當曲線在對角線之下時，亦即「命中預報」小於「錯誤預報」，則此預報技術低於隨機預報。不同於多數 skill score只能運用在決定性預報上，ROC則同時適用於決定性預報與機率預報。在本研究中，將資料以三分法區分（多雨、正常、少雨），並以此分類畫出三條ROC 曲線，藉此提供模式預報結果之可信度參考。

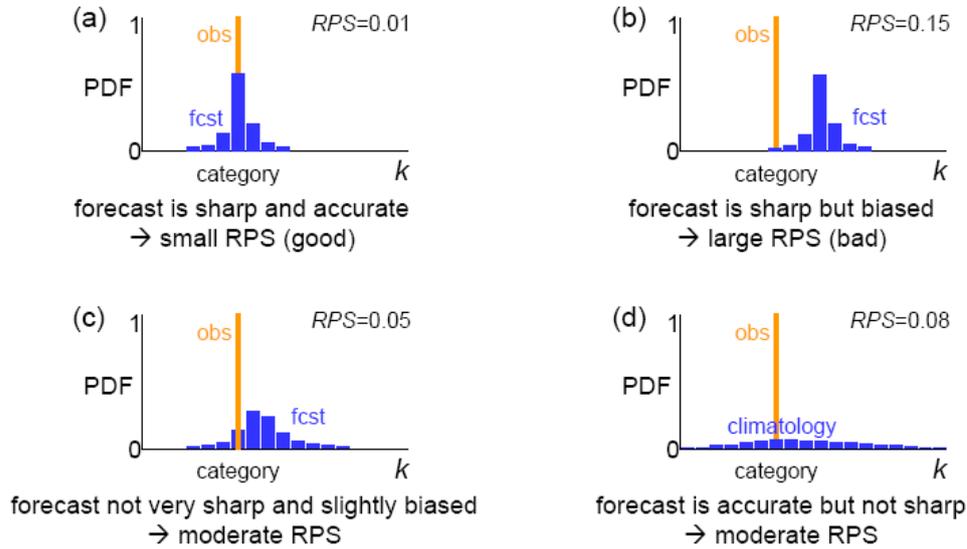
ROC score 的計算可以是整個宏觀區域的特性，也可以是個別網格點的值與分布情形。

### 1.3.3 排序機率技術得分 (Ranked Probability Skill Score)

排序機率技術得分(Ranked Probability Skill Score, 簡稱 RPSS)為一廣泛使用的方法，用以量化系集預報。其方法如圖四(左)所示，fcst 為預報的機率密度函數，obs 為實際觀測值，K 為觀測之分類組數，圖四(中)為 fcst 與 obs 之累加合。圖四(右)紅色部分為兩者差值，其平方合即為RPS 值。圖五為各種 RPS 值好壞之結果。當預報機率最大值與實際觀測值穩合時，RPS 值最小結果最好。當實際觀測發生在預報機率較低位置時，RPS 較差。



圖四 RPS 示意圖(Elbert 2007)



圖五 RPS 比較圖(Elbert 2007)

RPS 和 RPSS 的計算如下：

$$RPS = \frac{1}{K-1} \sum_{m=1}^K \left[ \left( \sum_{i=1}^m P_i \right) - \left( \sum_{i=1}^m O_i \right) \right]^2$$

其中  $P_i$  為趨勢預報結果， $O_i$  為實際觀測（計算過程中當事件發生時定義得分為 1，事件未發生則得分為 0）， $K$  為觀測之分類組數（在本文中，對於資料的事件分類，採取三等分法，偏高、正常與偏少，則  $K=3$ ）RPS 最佳得分為 0，RPSS 最佳得分為 1。

Ranked probability skill score（簡稱 RPSS）計算公式為：

$$RPSS = \frac{RPS - RPS_{Clim}}{0 - RPS_{Clim}} = 1 - \frac{RPS}{RPS_{Clim}}$$

本研究除了計算 RPSS 值之外，亦採用 Weigel et al. (2007) 所提出之

RPSS 修正參數，改進由於系集數量較少導致 RPSS 值較差之情形。歐洲 DEMETER 多重模式系集預報系統亦採用相同之修正法。

以下為等分類多模式之 RPSS 修正式：

$$RPSS_D = 1 - \frac{RPS}{RPS_{Clim} + D}$$

$$D = \frac{1}{M} \cdot \frac{K^2 - 1}{6K}$$

其中 M 為系集數量，K 為觀測之分類組數

#### 1.4 誤差修正方法

在三分類機率預報的誤差修正方面，計畫將診斷分析可靠度圖中所呈現的預報系統特徵，以線性回歸方程加以修正其誤差。可靠度圖是以預報機率為 X 軸，Y 軸為預報機率條件下的觀測事件發生機率（如圖六），因此落在圖形中的對角線上，代表統計上，預報結果的可靠度高。如果條件機率曲線系統性地位在對角線以下，代表所分析的預報系統有高估發生機率的情形；反之，則是預報機率經常性地低估實際發生的頻率；條件機率曲線斜率太小，通常意味著預報系統過於自信（儘管預報不夠精準，還是勇於預報較高（或低）的發生機率）；條件機率曲線斜率太大，則表示預報系統易趨於保守的機率預報，不願預報太高或太低的發生機率。

運用上述曲線分布的特徵，Wilks (2000) 發展出一種簡單的轉換關係式，可以用來修正系統機率預報的誤差，預報修正轉換關係式為

$$f_{adj} = \alpha(f - \bar{f}) + \bar{o}$$

$\alpha$  是修正預報  $f$  在其平均值  $\bar{f}$  的分布收縮或擴散的尺度參數

$\bar{o}$  是觀測發生機率的氣候值

上列的轉換式涵蓋了對於 over confidence ( $\alpha < 1$ ) 與 under confidence ( $\alpha > 1$ ) 的修正，可以使預報的可靠度提高（參見圖六）。

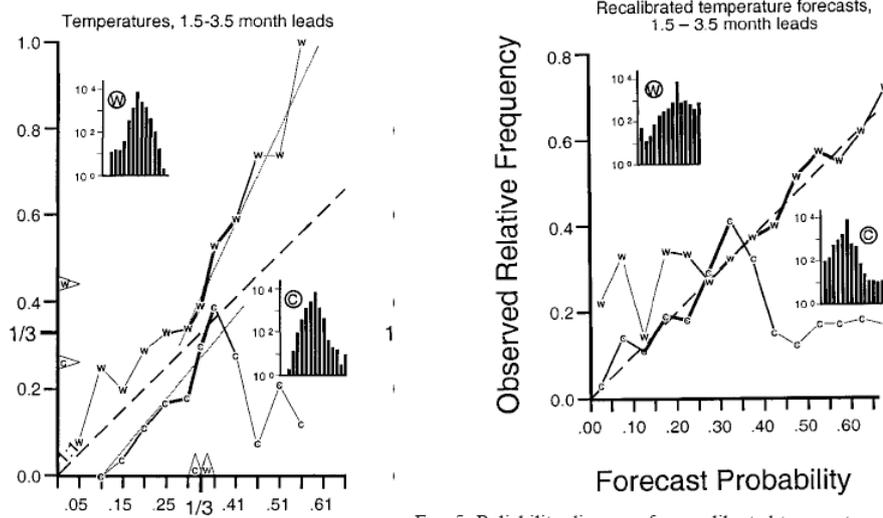


FIG. 5. Reliability diagrams for recalibrated temperature probability forecasts for the 1.5-3.5-month leads.

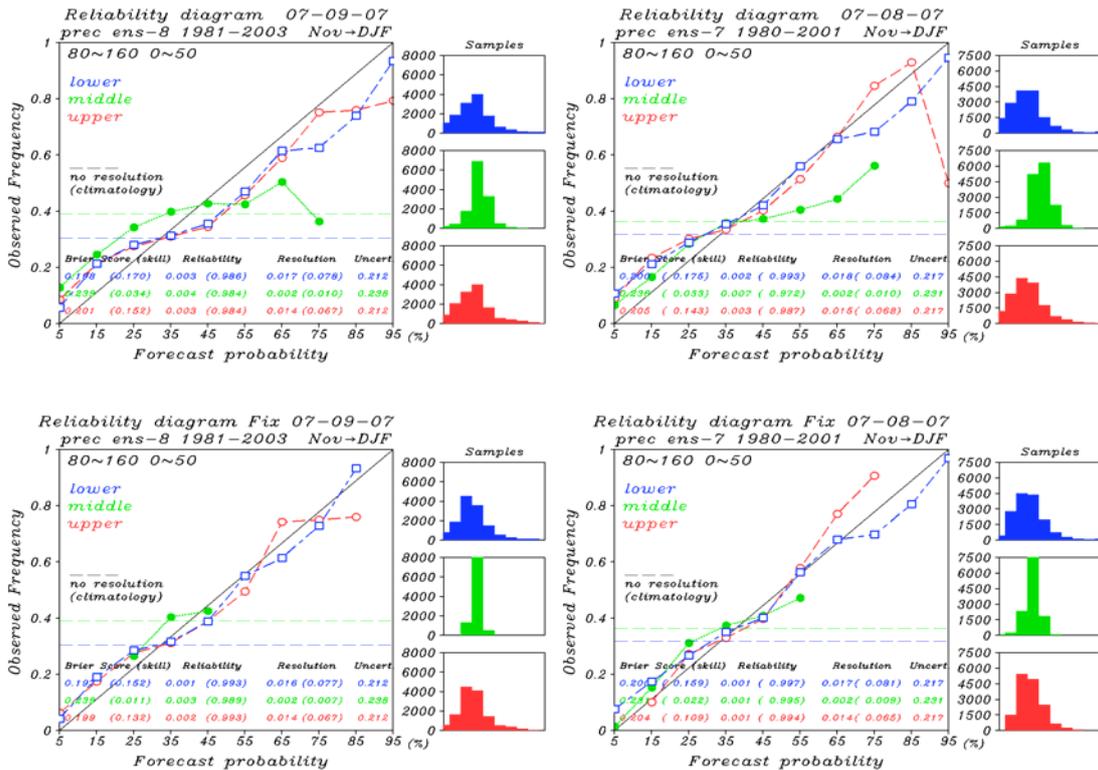
圖六 透過函數轉換式修正預報機率後的 Reliability Diagram 分布曲線，修正前為左圖，修正後為右圖（摘自 Wilks, 2000）

## 二、本計畫與 DEMETER 計畫資料誤差修正結果比較

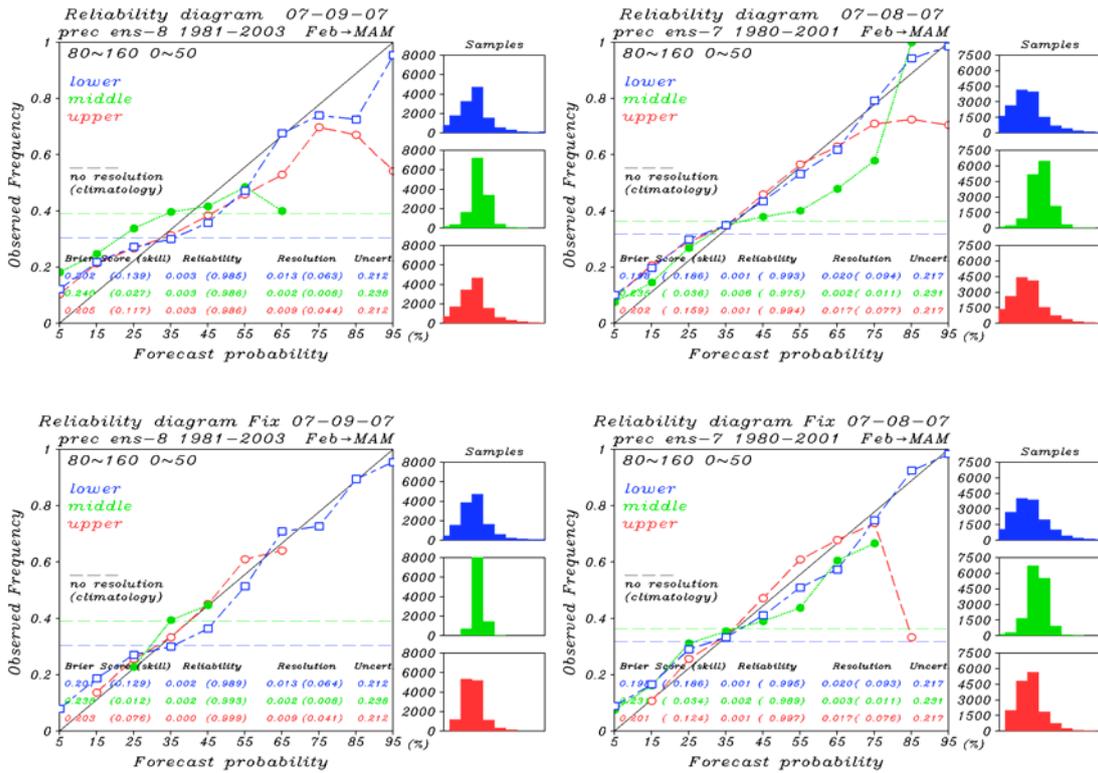
下列將以預報季節降雨距平的偏多（30%）與極多（20%）為例，比較本計畫多模式預報系統（左圖）與DEMETER計畫多模式系集預報系統（右圖）在修正前（上圖）與修正後（下圖）在不同起始月份（含 2, 5, 8, 11月）的各項技術得分。其他單一模式，或者偏少與極少的情形，或者將極多（少）的條件改為15%時的敏感度測試，以及個別模式與不同預報領先時間等結果，可以至完整的計畫結果資料圖庫下載。

### 2.1 Reliability Diagram and Brier Skill Score

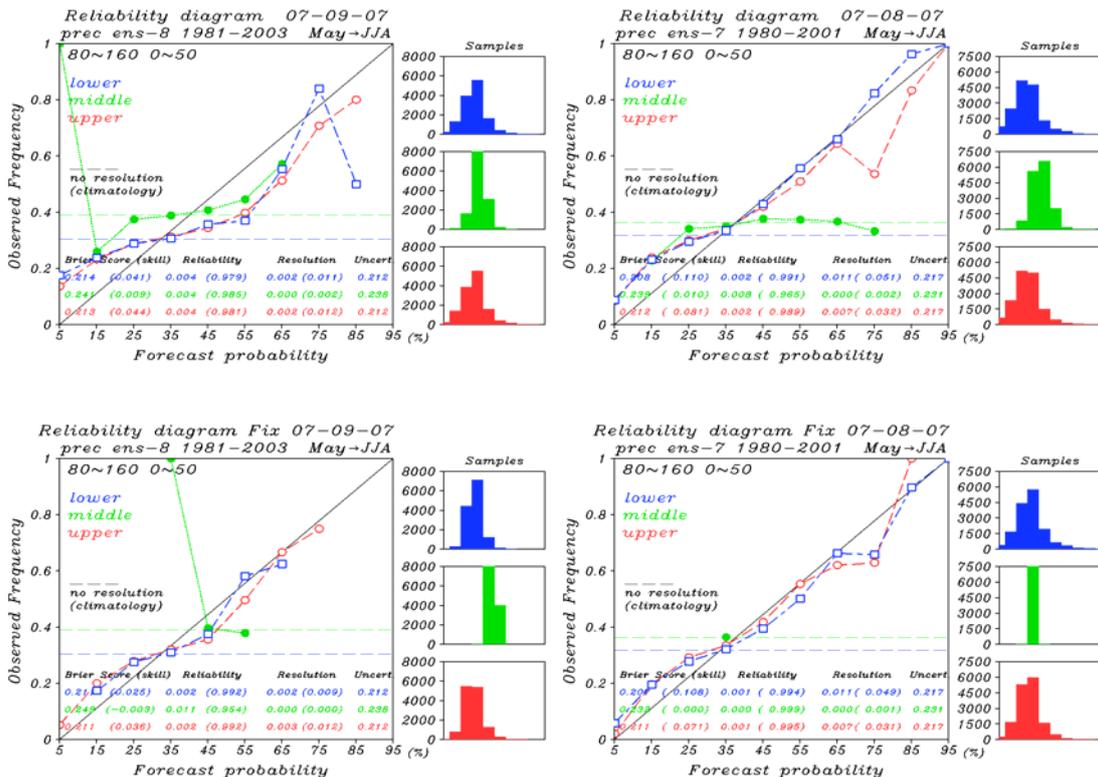
以十一月起始，預報冬季（DJF）降雨距平偏多（30%）的本計畫（左圖）與DEMETER計畫（右圖）修正前（上圖）與修正後（下圖）結果比較：



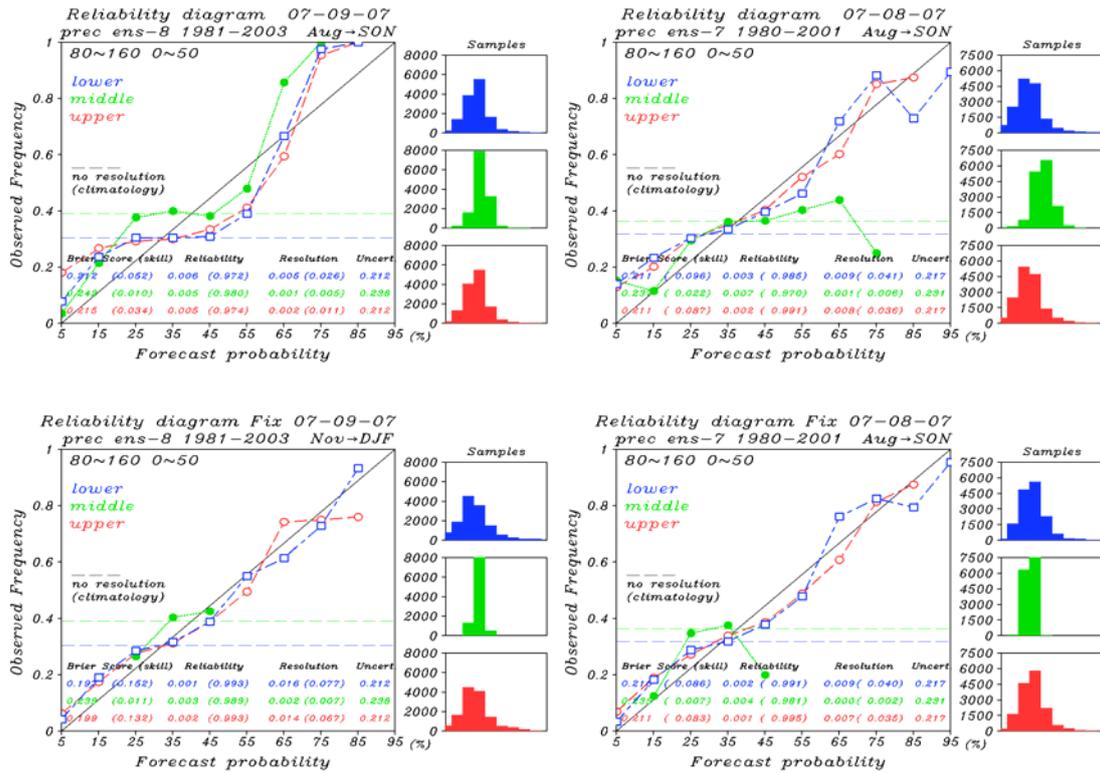
以二月起始，預報春季 (MAM) 降雨距平偏多的比較：



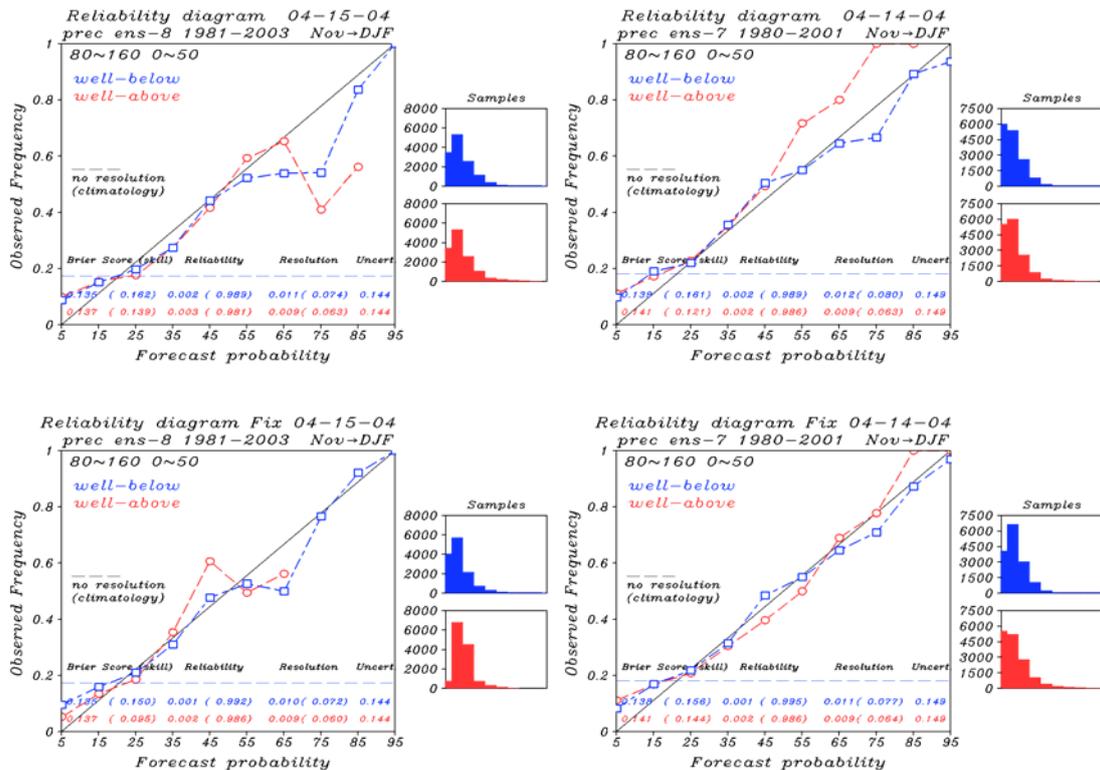
以五月起始，預報夏季 (JJA) 降雨距平偏多的比較：



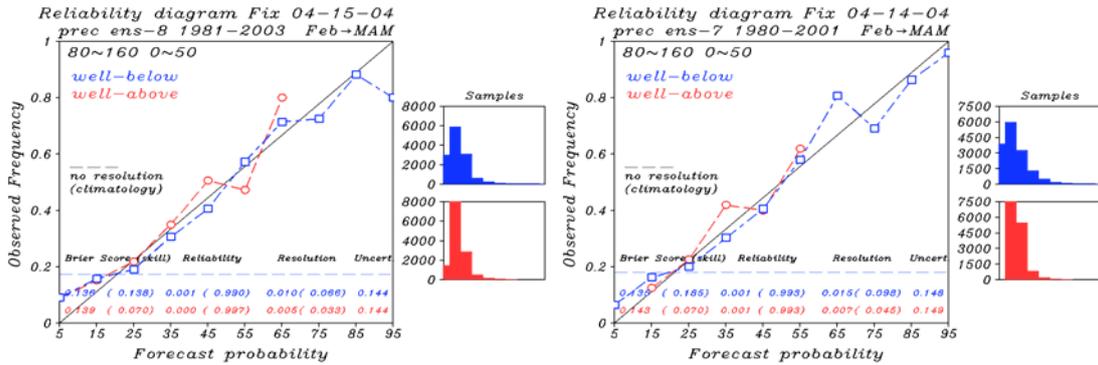
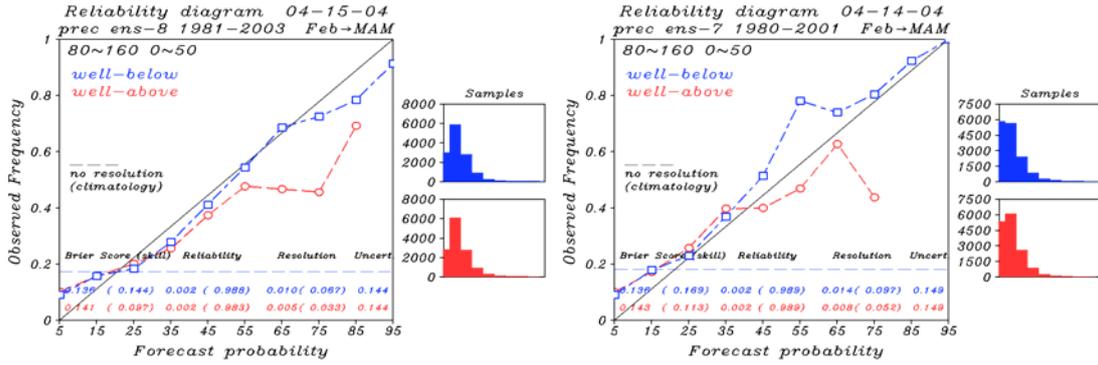
以八月起始，預報秋季（SON）降雨距平偏多的比較：



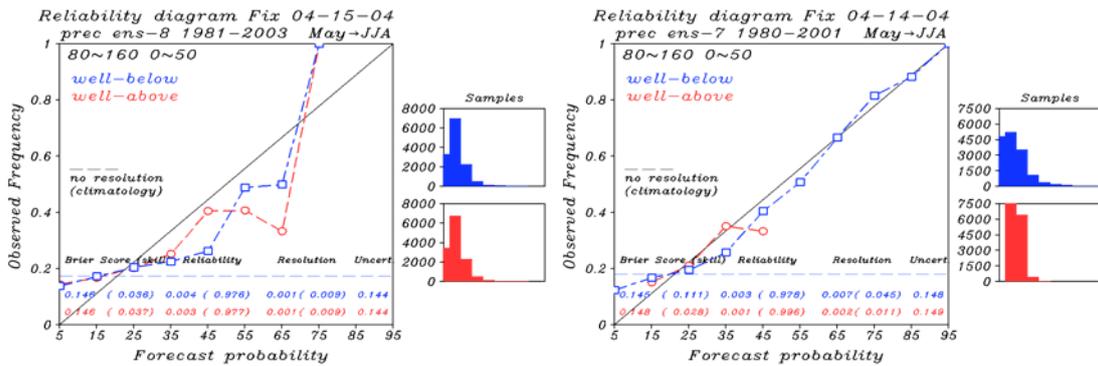
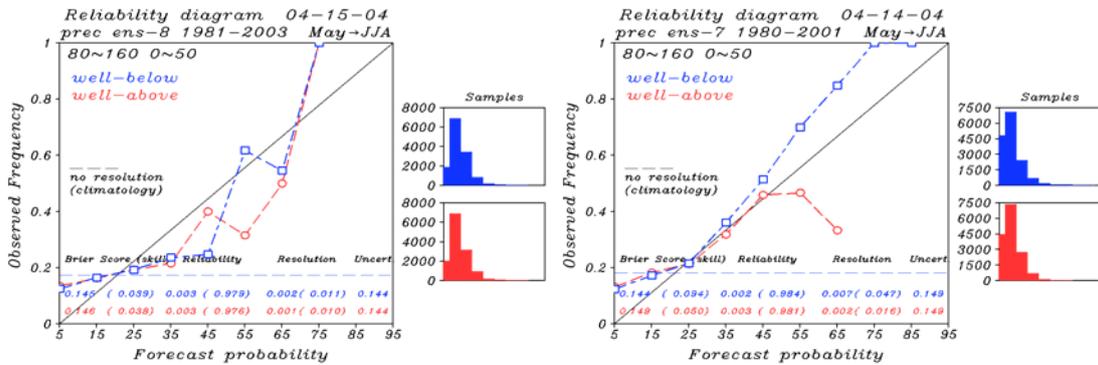
以十一月起始，預報冬季（DJF）降雨距平的極多（20%）的本計畫（左圖）與DEMETER計畫（右圖）修正前（上圖）與修正後（下圖）結果比較：



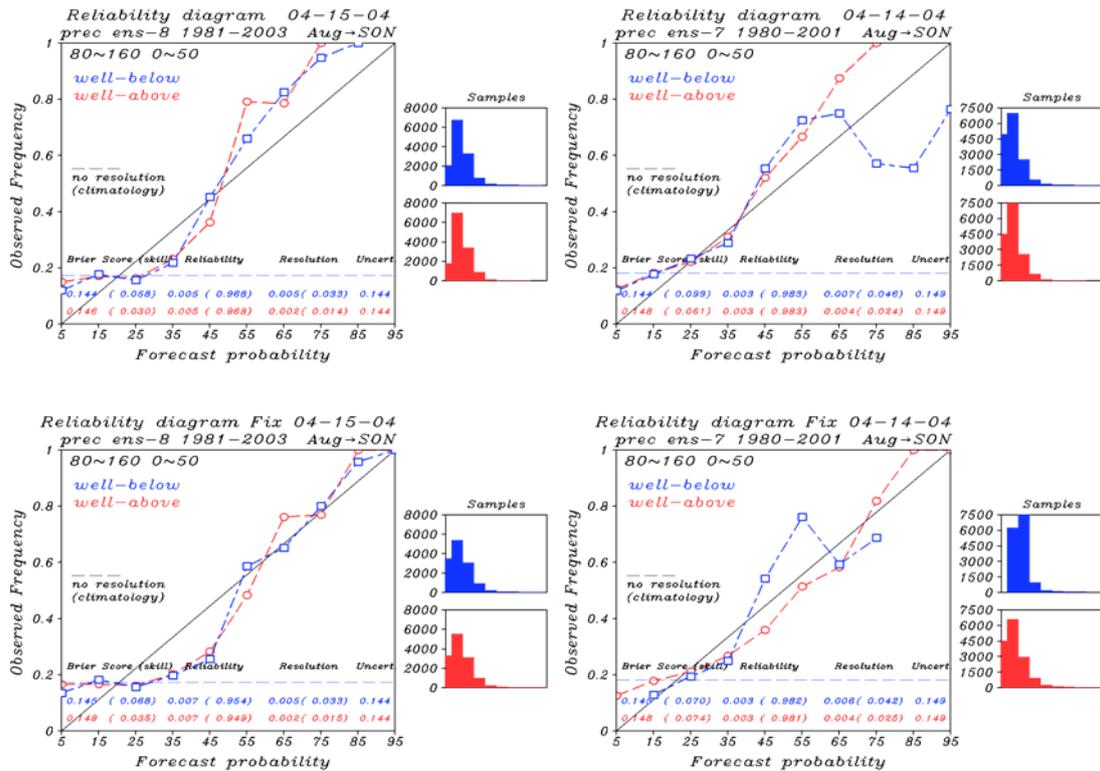
以二月起始，預報春季 (MAM) 降雨距平極多的比較：



以五月起始，預報夏季 (JJA) 降雨距平極多的比較：



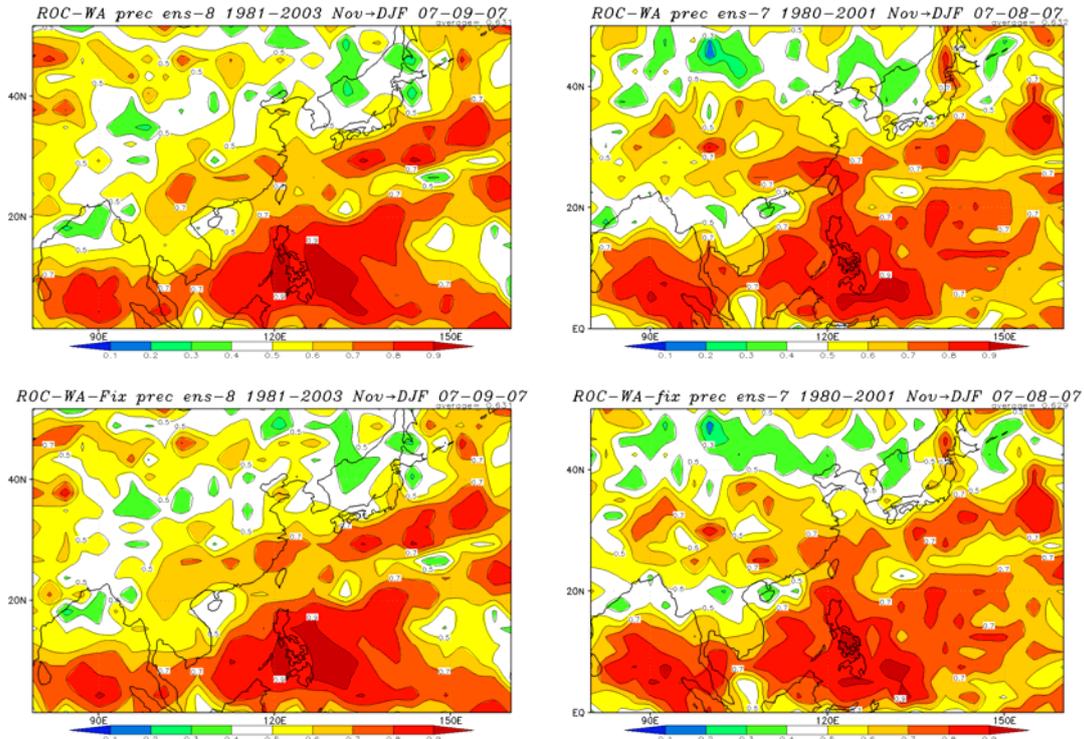
以八月起始，預報秋季（SON）降雨距平極多的比較：



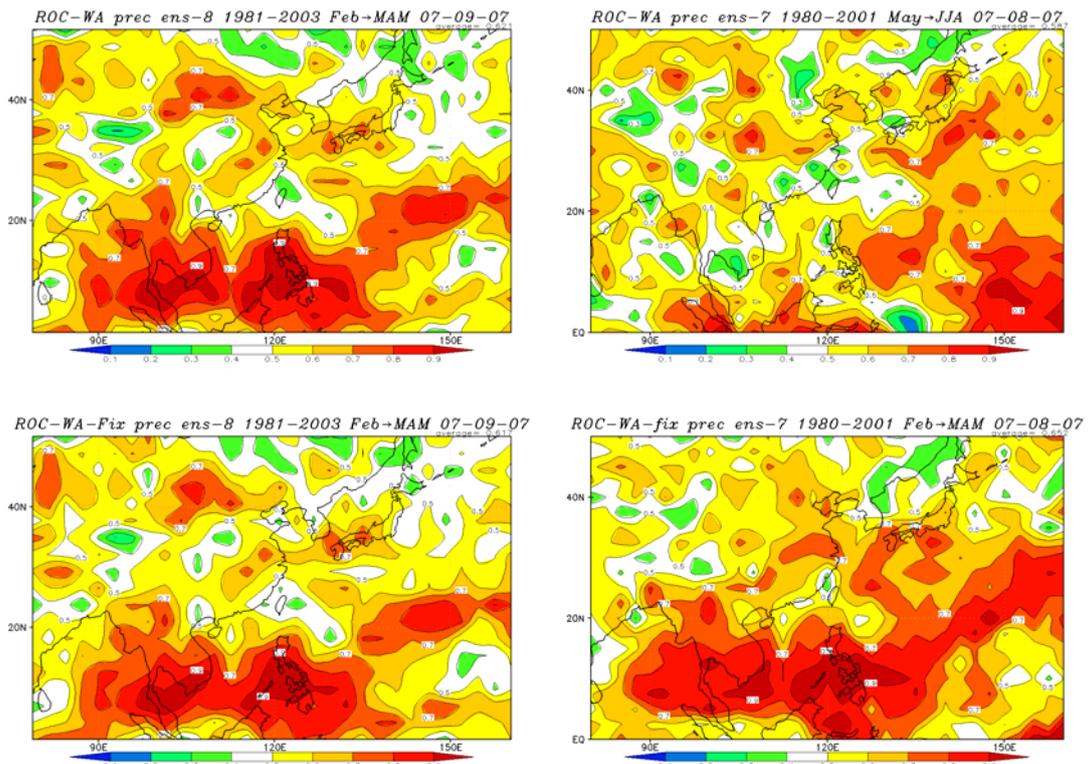
以可靠度圖進行預報校正，在四個不同季節，對於 DEMETER 預報系統與本計畫的多模式實驗預報系統而言，一般三分類的機率預報，絕大多數都可以提升 Brier 技術得分（增高其中預報可靠度的得分，但是略微降低預報解析度得分），不管在偏多（30%）或偏少的預報都有此現象。在極多（15%）時，特別是在夏季與秋季預報，有少數的情形可能無法以其提升機率預報的技術得分，這時須注意對預報解析度的影響（傾向減少預報較高或較低的機率）。

## 2.2 ROC 技術得分

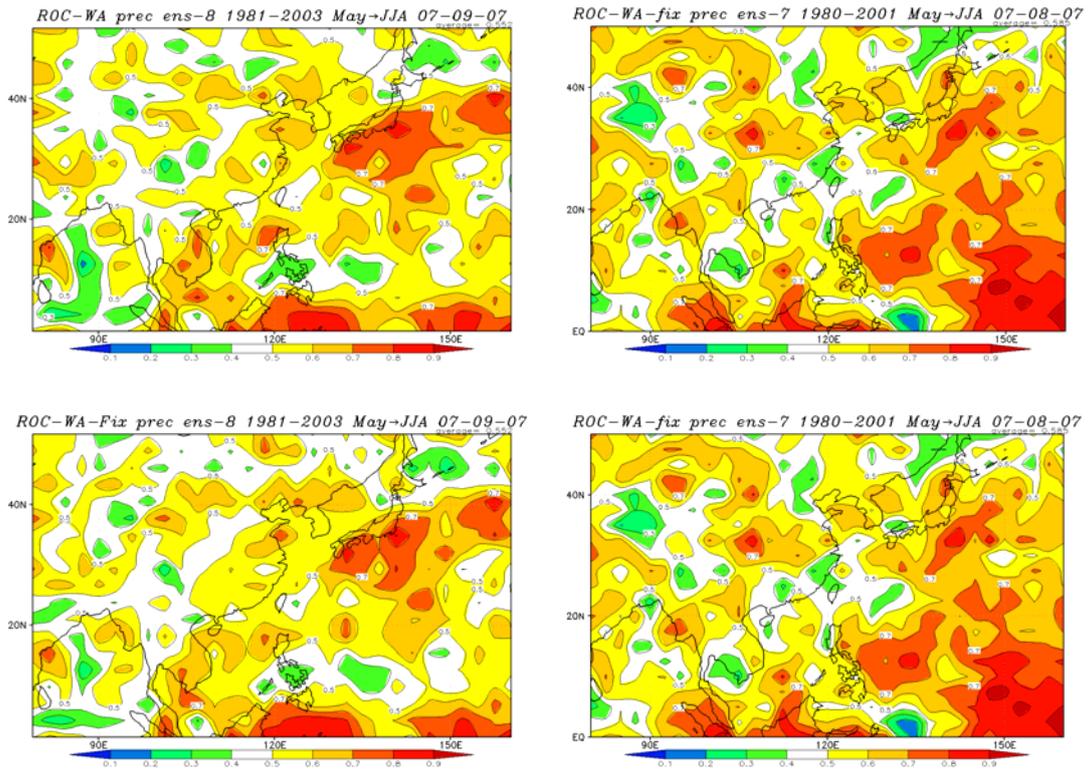
以十一月起始，預報冬季 (DJF) 降雨距平的偏多 (30%) 的本計畫 (左圖) 與DEMETER計畫 (右圖) 修正前 (上圖) 與修正後 (下圖) 結果比較：



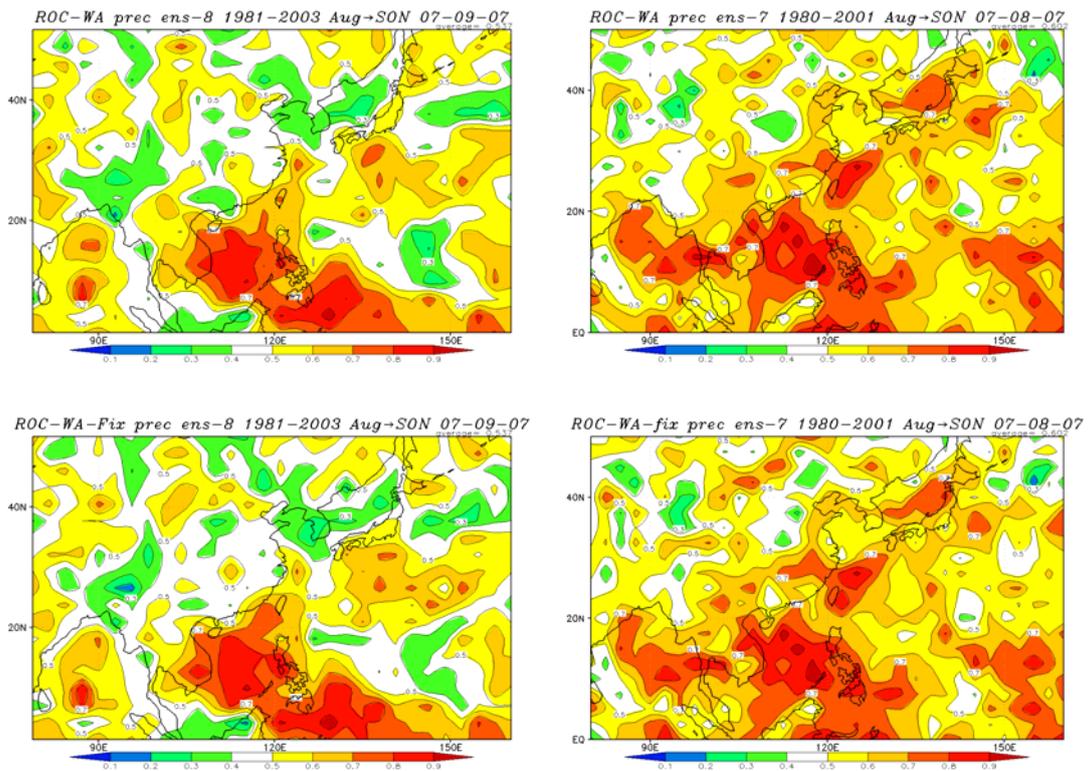
以二月起始，預報春季 (MAM) 降雨距平的偏多比較：



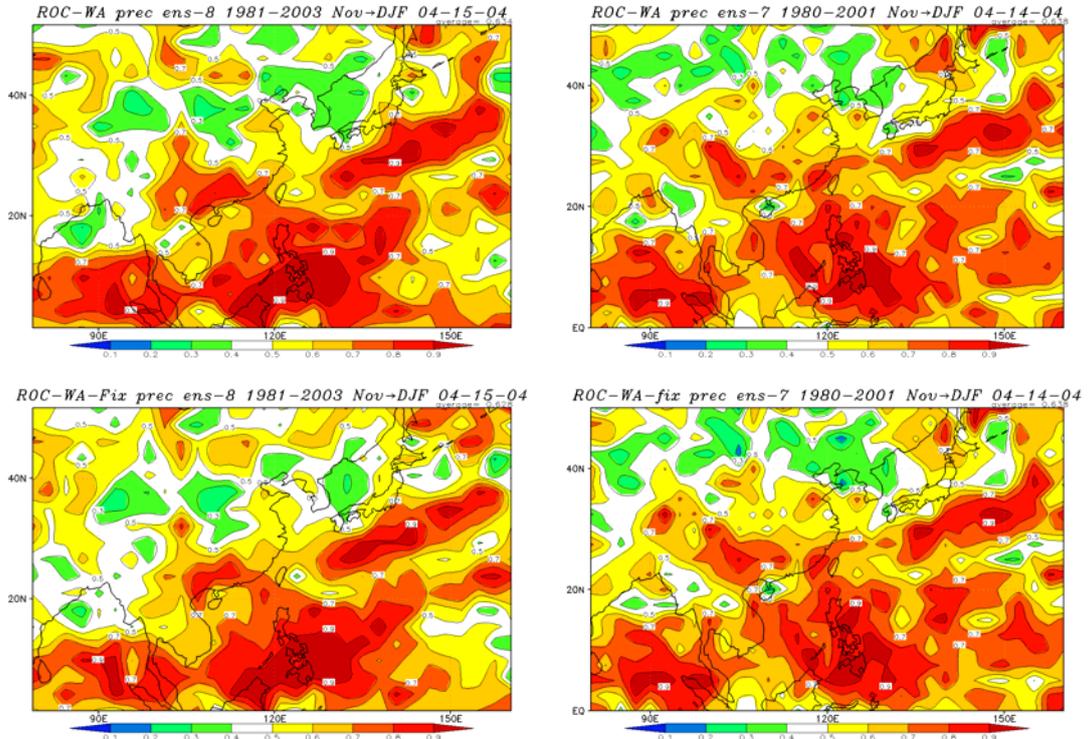
以五月起始，預報夏季（JJA）降雨距平的偏多比較：



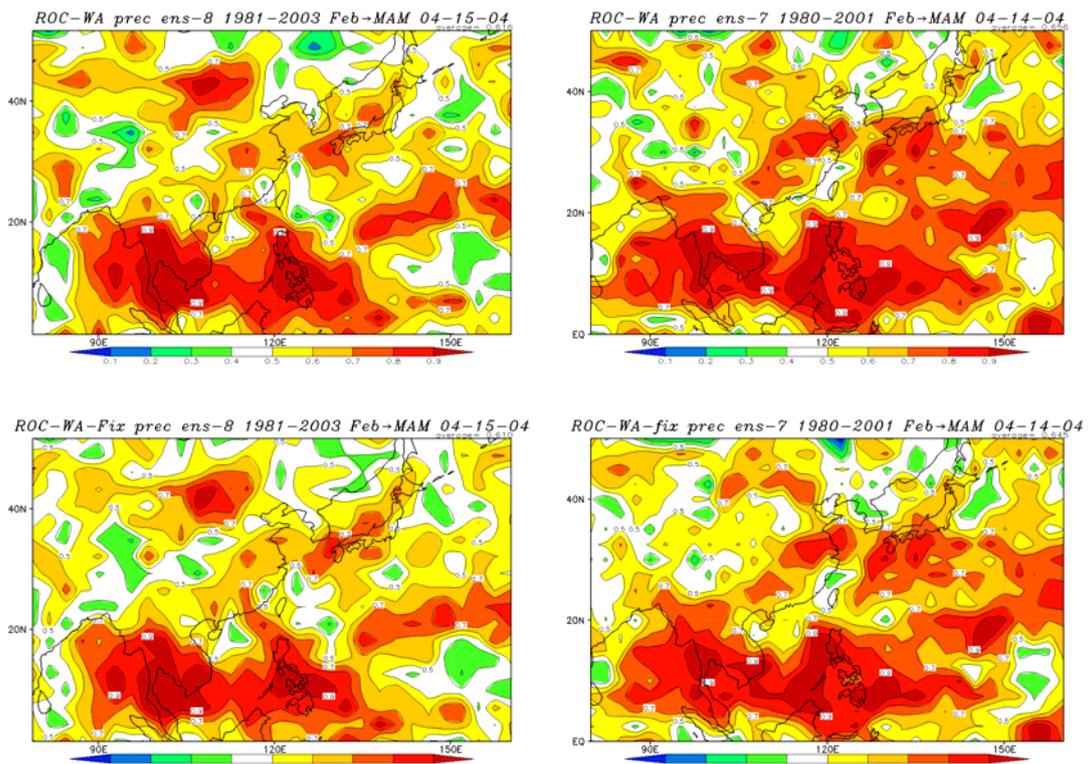
以八月起始，預報秋季（SON）降雨距平的偏多比較：



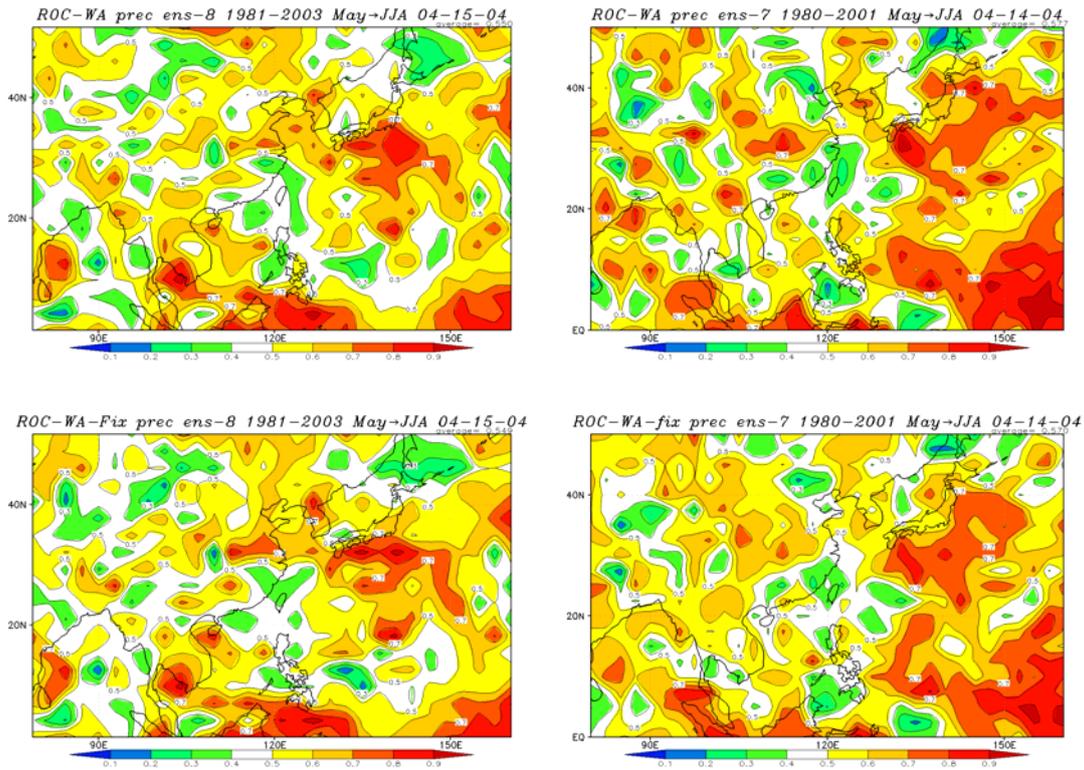
以十一月起始，預報冬季（DJF）降雨距平的極多（20%）的本計畫（左圖）與DEMETER計畫（右圖）修正前（上圖）與修正後（下圖）結果比較：



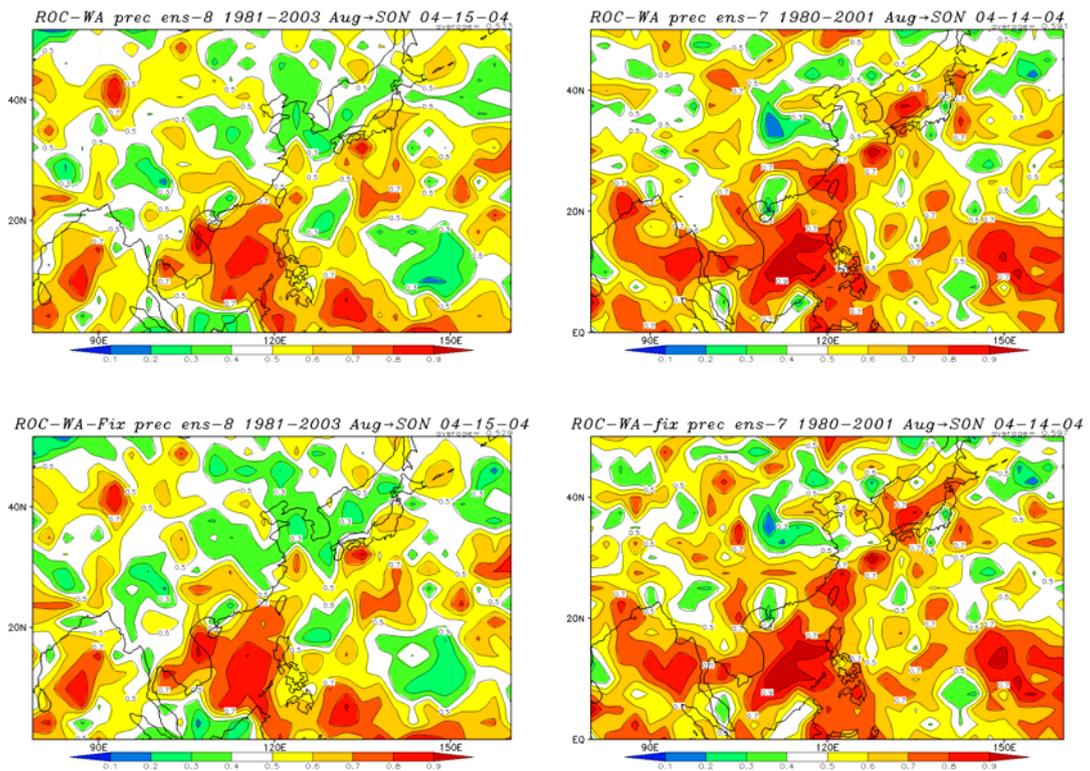
以二月起始，預報春季（MAM）降雨距平的極多比較：



以五月起始，預報夏季（JJA）降雨距平的極多比較：



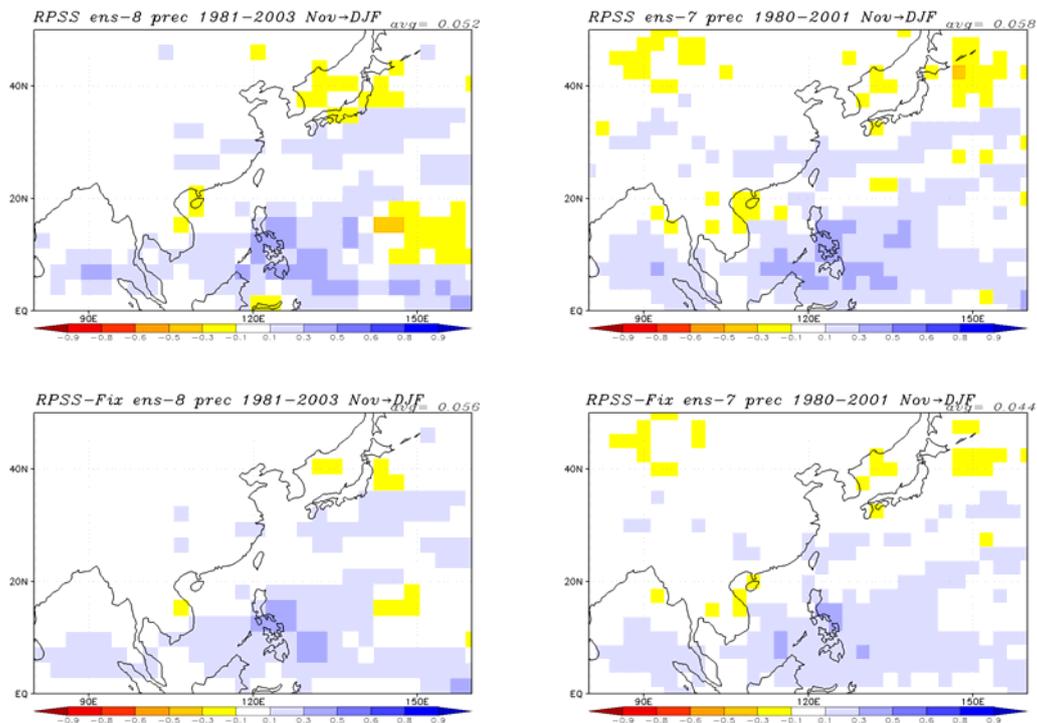
以八月起始，預報秋季（SON）降雨距平的極多比較：



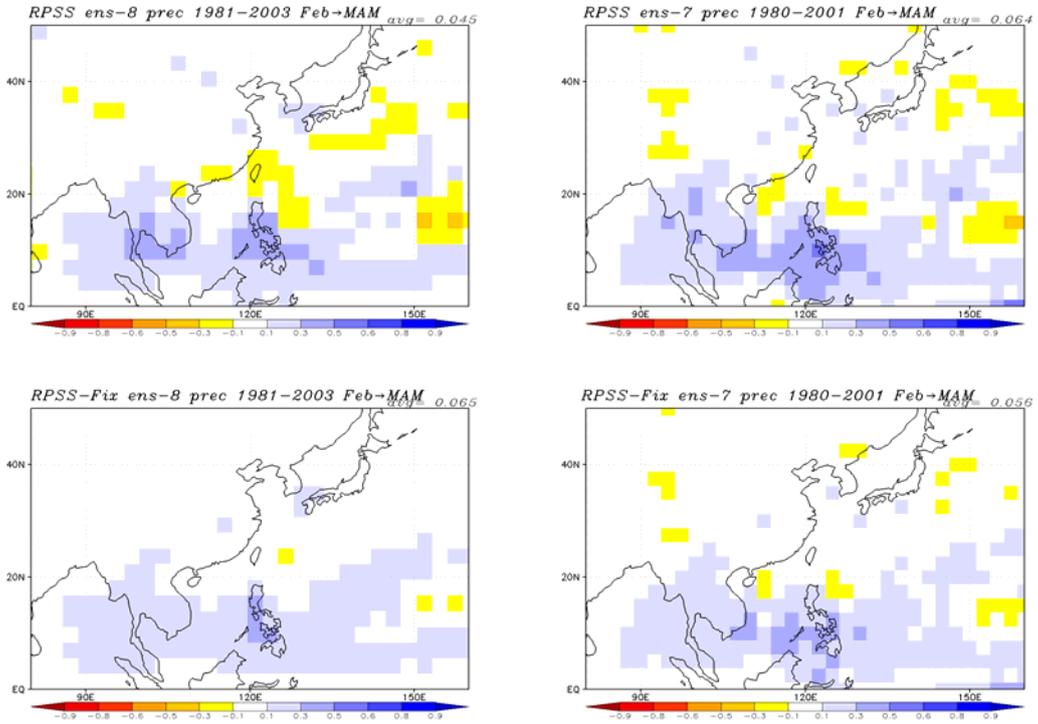
經過此趨勢線修正後，區域ROC score平均值並不會因此而變好或變差，只會造成預報機率往中間集中(紅藍區域變少)，正是預報解析度(resolution)變差的結果。本計畫與DEMETER計畫均有此相同結果。

### 2.3 Ranked Probability Skill Score

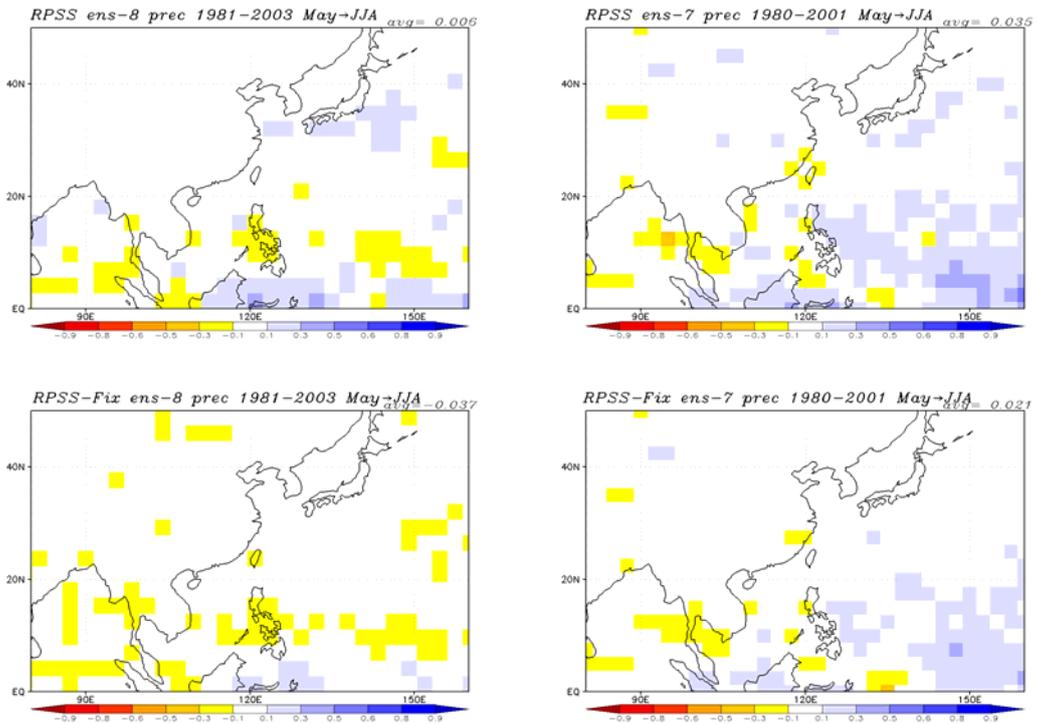
以十一月起始，預報冬季(DJF)降雨距平偏多、正常、偏少三等分類，本計畫(左圖)與DEMETER計畫(右圖)修正前(上圖)修正後(下圖)結果比較：



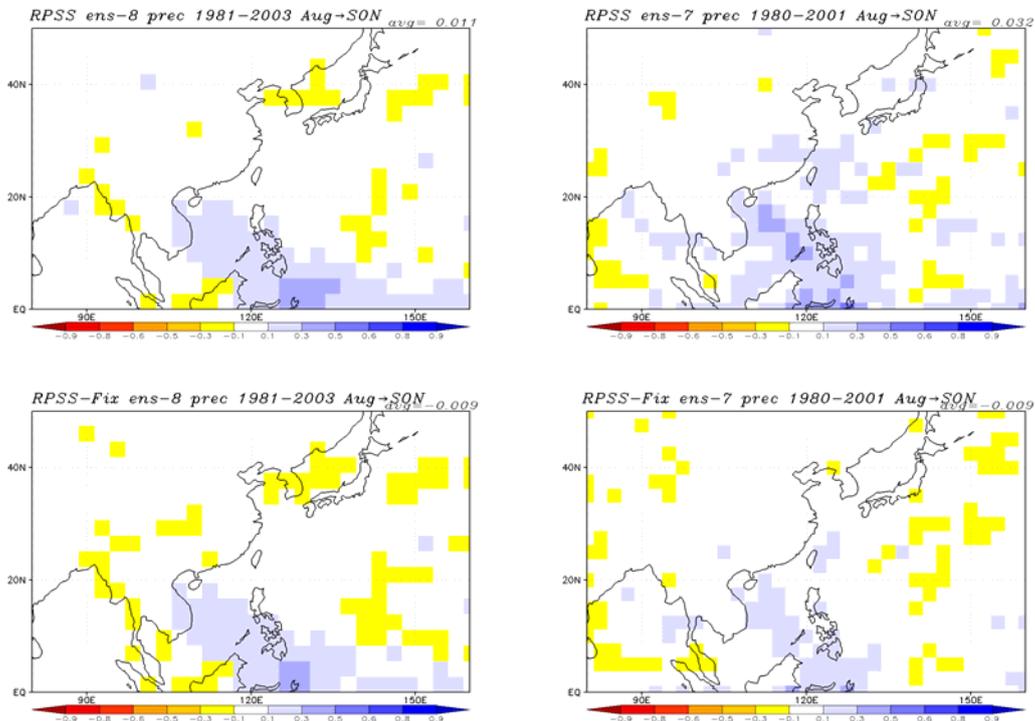
以二月起始，預報春季（MAM）降雨距平的比較：



以五月起始，預報夏季（JJA）降雨距平的比較：



以八月起始，預報秋季（SON）降雨距平的比較：



此修正會造成預報機率往中間集中的現象，本計劃秋冬季經過修正後與 DEMETER 計畫結果更為接近。但是夏季修正完結果變差，DEMETER 計畫也有此現象產生。

## 2.4 診斷驗證的結果

本計畫持續每個月定期進行兩階段、多假想海溫、多樣模式的中長期降水系集動力預報系統的實驗性預報。在運用可靠度圖 (Reliability Diagram) 的預報特性診斷分析，以診斷驗證 (diagnostic verification) 方法，針對季節氣候三分類，提供機率預報的誤差修正調整研究發現，在所研究的區域而言多數是可以使 Brier Skill Score 改善，而改善的主要原因是經過校正 (calibration) 後的可靠度 (Reliability) 得分增加，但是分辨率 (Resolution) 得分卻會下降，少數區域的分辨率得分下降超過可靠度得分提升時，機率預報修正就沒有實質意義。在較為極端 (小於 15% 機率) 的季節預報方面，特別是夏、秋季的預報，往往修正的效果並不理想。

由於驗證的過程是交互檢驗 (Cross-validated)，所以雖然只用 1981-2003 年的資料，結果應有通適性。另外在分析評估月、季降水預報在水資源管理與經濟模式的應用，以及應用所需的降尺度方法將在下一章中討論。

### 三、雨量預報模式對水資源管理之應用--以桃竹苗地區為例

台灣地區屬於降雨量豐沛的地區，年平均降雨量高達 2,510 公釐，是世界年平均降雨量的 2.6 倍，但是降雨量的分佈不均，有 78% 的降雨量是集中在每年的 5 月至 10 月(豐水期)，其餘的 22% 則在每年 11 月至翌年 4 月(枯水期)，加上河川坡陡流急且腹地狹窄，使得大部分的雨水均流入海中，可利用的水量不及總降雨量的 15%，每年每人平均分配到的雨量約為 4,500 立方公尺，只有世界平均值的 1/6，這使得我國成為全球排名第 18 名的缺水國家(李玲玲、楊玉昌，2002)。因台灣地區降雨量的分佈不均和陡峭的地理型態，常因降雨量的異常變動而發生不同程度的災害，在豐水期期間，可能因降雨量的過多而造成水災，但在枯水期卻產生缺水現象，缺水嚴重時還必須藉由農地休耕或者是限制民生用水，以減緩供水量的消耗速度。近幾年來，隨著工商業的發達與人口的快速成長，台灣的民生及工業用水需求皆逐年增加，而農業用水在政府提倡稻田轉作及休耕下則有相對減少的趨勢，但是在枯水期期間，水的供給仍不足以供應各方面的需求。

在過去有關水資源的國內經濟相關文獻中主要集中在水資源需求面的分析，在民生用水方面，有于宗先(1975)、沈信廷(1990)、高惠玲(1992)、劉長齡、李宗仰、吳其璋(1993)、劉繼政(1994)等文獻，利用統計及迴歸的方法來估計民生用水的需求函數，大部分的結論均認為水為民生必需品，其需求彈性小於一。在工業用水方面，則有蕭景楷、徐享田、廖香蘭(1989)、鄭欽龍(1991)、江秀娥(1992)、盧文俊(1997)等估計工業用水的引伸需求函數。而黃宗煌、楊淑麗、李堅明(1993)則針對自來水及地下水作探討，發現土地面積與自來水使用量呈明顯相關，而與地下水使用量無明顯關聯。在農業用水方面，有呂俊達(1990)、鄭立民(1995)，研究發現農業用水受到產業別的影響。

再就水資源調配的相關文獻而言，中已有許多的文獻探討農業用水移轉到其他部門時的補償問題，如吳功顯、鄭秋桂(1994)、林幸樺(1996)、羅慶瑞(1997)、劉欽泉、陳慧秋(2003)人，但是這些研究並未從實際的水資源供給與需求來求得一水資源的價格。在國外的文獻中可發現許多的水資源移轉之相關研究，Bosch(1991)、Becker(1995)及 Syme、Nancarrow(1997)皆針對水資源移轉的經濟分析做一實証估計，這些文獻皆顯示當水資源能有效的分配或是

允許水資源在不同的部門間移轉時，則整體的社會福利以及水資源移轉的供需雙方皆會獲利，不過前題則是移轉的價格須雙方皆能接受。

但是有關氣候變遷或者是氣候條件改變對水資源的供需之影響以及其預報資訊之價值卻較少的文獻，本研究之主要目的在於估計雨量預報在水資源市場的資訊價值，為達此目的，本研究選定了桃竹苗地區，因為新竹科學園區為台灣經濟發展的重要工業區，每日工業需水量大，近幾年來因為台灣的季節性乾旱，而發生與桃竹苗地區其他主要用水團體爭水的情形，根據水利法第 18 條的規定：用水順序是以家用及公共給水為優先，其次為農業用水，再其次才是水力用水、工業用水。但是現今高科技用水的需要性及迫切性已遠超過其他類別的用水需求，而其對經濟所產生的影響也遠比其他用水團體來的大。因此若能透過事先的雨量預報系統，來針對各用水標的做一分配，將可創造更多的社會福利。

因此本研究將以用水需求較迫切之桃竹苗地區為研究對象，將水資源的供給與需求同時考量，在需求面方面，須針對各標的用水的用水量來做估計，包含民生用水、工業用水與農業用水；在供給面方面，需針對水庫、河川及地下水的抽取量來估計；並透過數學規劃的方法來建立水資源的經濟模型以求解出其市場的價格(亦即水資源的移轉價格)，進一步探討農業用水移用補償合理金額之訂定。本文除前言外，第一節介紹桃竹苗地區的水資源需求概況，第二節為桃竹苗地區的水資源供需部門模型之建立，第三節為資料來源說明與實證模型的校準，第四節則雨量預報系統的資訊價值之估計。

### **3.1 桃竹苗地區水資源需求概況**

由於本研究以用水需求較迫切之桃竹苗地區為研究對象，底下首先針對桃竹苗地區的水資源需求，依照民生用水、工業用水及農業用水等三部份扼要加以說明。

#### **3.1.1 民生用水**

桃竹苗地區的民生用水主要是來自於自來水的供應，目前桃竹苗地區自來水普及率以新竹市的 96.8%和桃園縣的 92.5%較高，此數字高於全台灣地區的自來水普及率 90.53%，而新竹縣的 71.7%及苗栗縣的 70.3%則是比平均值

低了不少(如表 1)，另外，表 1 亦顯示每人每日的平均用水量。除自來水的供應外，有一部分的民生用水是來自於民眾的自行取水，如表 2 所示，桃竹苗地區的民生用水中有 89%是來自於自來水公司的供應，另外 11%則是來自於民眾的自行取水。另外桃竹苗地區的每人每日用水量和全台灣地區的平均值 457 公升相當接近，兩者並無太大的差異。

表 1 桃竹苗地區歷年民生用水量及自來水普及率 單位：公升、%

縣市/項目	年別										
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
桃園縣	每人每日用水量	308	300	304	300	300	296	294	340	366	391
	自來水普及率(%)	78.8	81.3	84.8	85.6	88.8	90.8	92.3	93.7	93.9	92.5
新竹市	每人每日用水量	389	391	350	362	353	337	360	405	391	422
	自來水普及率(%)	87.1	86.8	86.2	86.0	94.7	96.1	96.5	96.8	97.1	96.8
新竹縣	每人每日用水量	243	276	230	226	216	222	244	268	347	318
	自來水普及率(%)	48.3	53.2	57.4	60.1	61.2	67.1	69.2	70.2	71.8	71.7
苗栗縣	每人每日用水量	237	237	236	245	229	236	250	266	326	346
	自來水普及率(%)	57.8	61.4	64.3	65.0	65.1	67.0	67.3	68.9	69.8	70.3

資料來源：經濟部水利署，2001。

表 2 桃竹苗地區民生用水量

縣市	自來水供應量			自行取水量			總民生用水量		
	用水人口	每人每日用水量	年用水量	用水人口	每人每日用水量	年用水量	用水人口	每人每日用水量	年用水量
	(千人)	(公升)	(千立方公尺)	(千人)	(公升)	(千立方公尺)	(千人)	(公升)	(千立方公尺)
桃園縣	1,630	397	235,903	132	324	15,740	1,762	391	251,664
新竹市	361	424	55,930	11	355	1,546	373	422	57,476
新竹縣	320	389	45,384	126	321	14,788	446	369	60,173
苗栗縣	394	366	52,667	166	299	18,191	560	346	70,859
合計	2,705	1,576	389,886	437	1,299	50,267	3,143	1,528	440,173

資料來源：經濟部水利署，2001。

### 3.1.2 工業用水

桃竹苗地區工業生產面積及用水量如表 3 所示，工業的生產面積與用水量均以桃園縣為最多，共佔地 4714.78 公頃和用水量為 304.53 百萬立方公尺，在工業 22 種業別中，桃園縣以電子業佔地 777.05 公頃最廣，其次紡織業 673.90 公頃，用水量則以紡織業的 61.85 百萬立方公尺及造紙業的 39.03 百萬立方公尺佔最高。新竹市的工業生產面積則是以化學材料業 41.47 公頃及非金屬業 38.38 公頃為最多，工業用水量則以化學材料業的 3.88 百萬立方公尺為首，其次為造紙業的 1.24 百萬立方公尺。新竹縣的工業生產面積以電子業佔地 189.96 公頃最廣，其次運輸業 134.66 公頃，工業用水量則以紡織業的 11.94 百萬立方公尺為首，其次為電子業的 9.20 百萬立方公尺；苗栗縣工業面積則是以非金屬業的 183.70 公頃最多，其次為食品業的 134.87 公頃，工業用水量則以造紙業的 14.61 百萬立方公尺為首，其次為食品業的 11.93 百萬立方公尺。由表 3 的合計數字可發現工業生產面積和用水量呈正向的比例關係。

表 3 年桃竹苗地區工業面積及用水量 單位：公頃、百萬立方公尺

業別	桃園縣		新竹市		新竹縣		苗栗縣	
	面積	用水量	面積	用水量	面積	用水量	面積	用水量
食品	256.95	22.74	5.04	0.45	31.77	2.81	134.87	11.93
菸草	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
紡織	673.90	61.85	8.23	0.76	130.07	11.94	90.99	8.35
成衣	44.18	1.97	1.11	0.05	2.05	0.09	9.12	0.41
皮革	16.94	1.39	0.38	0.03	0.25	0.02	8.24	0.68
木材	17.54	0.20	2.46	0.03	9.07	0.10	21.60	0.24
傢俱	24.80	0.10	4.39	0.02	6.77	0.03	3.12	0.01
造紙	134.32	39.03	4.27	1.24	17.06	4.96	50.27	14.61
印刷	14.81	0.21	0.98	0.01	1.79	0.03	1.23	0.02
化學材料	265.55	24.84	41.47	3.88	55.34	5.18	82.28	7.70
化學製品	232.09	14.90	8.03	0.52	61.95	3.98	61.48	3.97
石油煉製	480.47	21.78	0.38	0.02	1.95	0.09	55.41	2.51
橡膠	200.38	27.32	2.41	0.33	26.54	3.62	6.12	0.83
塑膠	128.30	8.49	8.03	0.53	22.52	1.49	68.52	4.55
非金屬	255.27	7.99	38.38	1.20	115.93	3.63	183.70	5.75
基本金屬	200.75	7.41	6.51	0.24	18.89	0.70	66.40	2.45
金屬	301.24	11.13	8.50	0.31	60.93	2.25	44.33	1.64
機械	241.73	3.67	12.43	0.19	69.36	1.05	21.55	0.33
電子	777.05	37.65	16.65	0.81	189.96	9.20	79.28	3.84
運輸	356.13	4.73	8.77	0.12	134.66	1.79	109.37	1.45
精密機械	18.28	1.03	1.64	0.09	4.20	0.24	3.22	0.18
雜項	74.37	6.08	2.53	0.21	49.80	4.07	4.76	0.39
合計	4714.78	304.53	182.60	11.02	1010.85	57.26	1106.23	71.84

資料來源：經濟部水利署及本研究整理。

### 3.1.3 農業用水

農業灌溉用水之用水量為 1,378 百萬立方公尺(表 4)，其中農田水利會進水口取水量為 1,006 百萬立方公尺，地面水配合量為 372 百萬立方公尺，地下水的使用量則為 0，這與南部地區大量使用地下水的狀況不同。桃竹苗地區的養殖用水量為 77,393 千立方公尺(表 5)，其中地下水使用了 58,122 千立方公尺，佔養殖用水量的 75%，顯示養殖用水多以地下水為主，養殖面積共為 2,963.74 公頃，主要養殖地區為桃園縣佔了 2,460.49 公頃 (83%)；畜牧用水量則平均分布各縣市，共計 7,953.56 千立方公尺。

表 4 桃竹苗地區各農田水利會實際用水量與種植面積

單位：百萬立方公尺、公頃

農田水利會	一期作 (水稻、雜作、甘蔗等)				小計	面積 (公頃)
	進水口	地面水	地下水			
	取水量	配合量	配合量			
桃園	193	90	0	283	25,933	
石門	69	44	0	113	9,804	
新竹	129	0	0	129	6,297	
苗栗	176	0	0	176	9,136	
二期作 (水稻、雜作、甘蔗等)						
桃園	131	179	0	310	25,933	
石門	54	58	0	113	9,490	
新竹	109	0	0	109	6,262	
苗栗	143	0	0	143	9,457	
合計	1,006	372	0	1,378	102,312	

資料來源：各農田水利會資料輯(2001)及本研究整理。

表 5 桃竹苗地區養殖用水量與畜牧用水量

縣市\項目	養殖面積 (公頃)	養殖用水量 (千立方公尺)			畜牧用水量 (千立方公尺)
		地下水	地面水	合計	
桃園縣	2460.49	47,089	16,164	63,253	3452.52
新竹縣	329.83	6,590	2,616	9,207	2074.02
苗栗縣	173.42	4,443	490	4,933	2427.02
合計	2963.74	58,122	19,270	77,393	7953.56

資料來源：農業用水量化目標及總量清查報告，行政院農業委員會。

民國 90 年漁業統計年報 行政院農委會漁業署。

### 3.2 水資源供需部門模型之建立

為了建立桃竹苗地區的水資源經濟模型以評估雨量預報系統的價值，本節將依照價格內生化的理論來建構水資源供需部門模型經濟評估模式。此部份均衡模型的理論基礎為 Samuelson(1952)所提出完全競爭市場之均衡點可透過生產者剩餘及消費者剩餘加總之極大化而求得的定理，Takayama and Judge(1964)根據此定理進一步發展為一種具有實證能力的空間均衡數學規劃模型，Plessner、Heady(1965)、Yaron(1967)、Duloy、Norton(1973)、Baumes(1978)、Burton、Martin(1987)、Adams、Hamilton&McCarl(1986)、Chang et al.(1992)將之應用在農業上，建立一系列的農業部門模型。由於此種模型具有價格內生與競爭性市場的特質，假設個別生產者和消費者為價格接受者，個別消費者在預算限制與價格給定條件下來追求效用極大，所求得之需求量為價格的函數，再透過個別消費者需求的加總求得市場的需求曲線。同理，生產者在生產函數與價格給定之限制條件下追求利潤極大化，所得供給量為價格、技術等變數的函數，加總所有生產者的供給即可求得市場之供給曲線。模型內每個生產者與消費者因應經濟環境的改變，內生化地調整其產出量、要素使用量及消費量，因此適合用於模擬外在環境或政策改變所造成的影響(McCarl、Spreen，1980)。在國內的研究中有張靜貞、陳吉仲(1995)所建立之臺灣農業部門模型，分析技術變動與保護政策造成之農業部門福利變動；張靜貞、林依瑩(1997)，Chang(2002)續將此部門模型擴充，並納入林業部門，探討各類溫室氣體減量之政策工具如何影響臺灣農業部門。

由水資源之供需情形可將水資源的需求分為民生用水、工業用水及農業用水等三部份。在民生用水部份，假設  $i$  地區的民生用水需求函數如下：

$$QD_{im}^{mu} = f_1(P_{im}^{mu}) \quad (1)$$

式中  $QD_{im}^{mu}$  為  $i$  地區  $m$  月份的民生用水量， $P_{im}^{mu}$  為  $i$  地區  $m$  月份民生用水價格，而變數右上標的  $mu$  代表以民生用水為標的。

同理，假設工業用水的需求函數為下式：

$$QD_{im}^{in} = f_2(P_{im}^{in}) \quad (2)$$

其中  $QD_{im}^{in}$  為  $i$  地區  $m$  月份之工業用水量， $P_{im}^{in}$  為  $i$  地區  $m$  月份之工業用水價格，而變數右上標的  $in$  代表以工業用水為標的。

在農業用水部份，農業用水的需求是間接來自於市場上對農產品的需求，為一引伸需求，假設農民是追求利潤極大化的生產者，如下：

$$\text{Max}_{X_{ip}, q_{im}^{ag}} \pi_{ip} = P_c \times X_{ip} \times Q_{ip} - TC_{ip}^{ag} \times X_{ip} - P_{im}^{ag} \times q_{im}^{ag} \quad (3)$$

$$\text{限制式為： } Q_{ip} = h(q_{im}^{ag})$$

式中  $P_c$  為農產品價格， $X_{ip}$  為  $i$  地區第  $p$  期之生產面積， $p$  為期數(1、2 期)，為  $i$  地區第  $p$  期之單位產出， $TC_{ip}^{ag}$  為  $i$  地區第  $p$  期之單位生產成本， $P_{im}^{ag}$  為  $i$  地區  $m$  月份之農業用水價格， $q_{im}^{ag}$  為  $i$  地區  $m$  月份之農業用水數量，而變數右上標的  $ag$  代表以農業用水為標的。由下列之一階條件可推導得其用水需求函數。

$$\frac{\partial \pi_{ip}}{\partial X_{ip}} = P_c Q_{ip} - TC_{ip}^{ag} = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{ip}}{\partial q_{im}^{ag}} = P_c X_{ip} \frac{\partial h(q_{im}^{ag})}{\partial q_{im}^{ag}} - P_{im}^{ag} = 0$$

因此某一農民的用水需求函數為：

$$q_{im}^{ag} = f_3(P_c, P_{im}^{ag}, X_{ip}) \quad (4)$$

故農業用水的需求為農產品價格、農業用水價格及水稻種植面積的函數，將所有農民的用水函數加總可得到農業用水的需求函數為：

$$QD_{im}^{ag} = \sum_{i=1}^M q_{im}^{ag} = f_3(P_c, P_{im}^{ag}, X_{ip}) \quad (5)$$

另外，在水資源總供給方面，主要有水庫調節、河川引水及地下水等三部份，假設其供給函數分別為：

$$QS_{ikm}^w = g_1(P_{ikm}^w) \quad (6)$$

$$QS_{im}^r = g_2(P_{im}^r) \quad (7)$$

$$QS_{im}^g = g_3(P_{im}^g) \quad (8)$$

其中  $w$  為水庫調節， $r$  為河川引水， $g$  為地下水； $QS_{ikm}^w$  為  $i$  地區  $k$  水庫  $m$  月份之水庫供給量， $k=1, 2, \dots, K$ ； $QS_{im}^r$  為  $i$  地區  $m$  月份河川供給量； $QS_{im}^g$  為  $i$  地區  $m$

月份地下水供給量； $P_{ikm}^w$  為  $i$  地區  $k$  水庫  $m$  月份之水庫用水供給價格； $P_{im}^r$  為  $i$  地區  $m$  月份之河川用水供給價格； $P_{im}^g$  為  $i$  地區  $m$  月份之地下水供給價格。

假設產品之可積分反需求函數(integrable inverse demand function)存在，且各生產要素之可積分反供給函數亦存在，則可將上述的需求函數和供給函數轉換成反需求函數和反供給函數，如下列各式所示： $P_{im}^{mu} = f_1^{-1}(QD_{im}^{mu})$ 、 $P_{im}^{in} = f_2^{-1}(QD_{im}^{in})$ 、 $P_{im}^{ag} = f_3^{-1}(QD_{im}^{ag})$ 、 $P_{ikm}^w = g_1^{-1}(QS_{ikm}^w)$ 、 $P_{im}^r = g_2^{-1}(QS_{im}^r)$ 、 $P_{im}^g = g_3^{-1}(QS_{im}^g)$ 。

假設水資源市場為一完全競爭市場，則在供需曲線相交之處，即供需均衡處，其社會福利會達到極大，根據此概念，參考 Keplinger, et al.(1998)、Mendelsohn、Bennett (1997)及 Chen, et al. (2001, 2005)，建構本研究的水資源經濟模型如下：

$$\begin{aligned}
 \text{MAX } SW = & \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{12} \left( \int_0^{QD_{im}^{mu*}} f_1^{-1}(QD_{im}^{mu}) dQD_{im}^{mu} + \int_0^{QD_{im}^{in*}} f_2^{-1}(QD_{im}^{in}) dQD_{im}^{in} + \int_0^{QD_{im}^{ag*}} f_3^{-1}(QD_{im}^{ag}) dQD_{im}^{ag} \right) \\
 & - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{12} \left[ \sum_{k=1}^K \int_0^{QS_{ikm}^{w*}} g_1^{-1}(QS_{ikm}^w) dQS_{ikm}^w + \int_0^{QS_{im}^{r*}} g_2^{-1}(QS_{im}^r) dQS_{im}^r + \int_0^{QS_{im}^{g*}} g_3^{-1}(QS_{im}^g) dQS_{im}^g \right] \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^2 P_c X_{ip} Q_{ip} - \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^2 TC_{ip}^{ag} X_{ip} - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{12} P_{im}^{ag} QD_{im}^{ag} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^2 PSET * ASIDE_{ip} + \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{12} PTRAN * WTRAN_{im} \quad (9)
 \end{aligned}$$

限制式為：

$$QD_{im}^{mu} + QD_{im}^{in} + QD_{im}^{ag} - \sum_{k=1}^K QS_{ikm}^w - QS_{im}^r - QS_{im}^g + WTRAN_{im} \leq 0 \quad \forall i, m \quad (10)$$

$$X_{ip} + ASIDE_{ip} \leq L_{ip} \quad (11)$$

式中  $QS_{ikm}^w$  為  $i$  地區  $k$  水庫  $m$  月份之放水量；

$QS_{im}^r$  為  $i$  地區  $m$  月份河川供給量；

$QS_{im}^g$  為  $i$  地區  $m$  月份地下水總供給量；

$X_{ip}$  為  $i$  地區第  $p$  期稻米種植面積；

$ASIDE_{ip}$  為  $i$  地區第  $p$  期的休耕面積；

$PSET$  為每公頃休耕的補貼金額；

$L_{ip}$  為  $i$  地區第  $p$  期可耕作的總耕地面積；

$PTRAN$  為水資源移轉之補償價格；

$WTRAN_{im}$  為水資源移轉之數量。

(9)式為模型之社會福利目標式，為需求曲線下的面積減去供給曲線下的面積，第三行則為生產農產品(水稻)的收益減去生產成本和灌溉用水成本再加上休耕補貼金額及移轉灌溉用水的補償金額。(10)式表示每個地區每個月份用水需求量不能超過該地區該月份用水供給量，(11)式表示土地的耕作面積和休耕面積不能超過總耕地面積之限制式。

上述區域水資源供需部門模型具有下列幾項特點：(1)此模型同時考量一個地區的水資源之供給與需求，透過供需均等，使得水資源價格內生化(endogenization)，因此模型所內生求解的價格可反映出水資源的價格，由於本研究所考量的各種需求用水皆是原水，因此由模型求得之水資源的價格是一水資源的移轉價格的概念。(2)此模型將農業的用水以引申需求的方式納入，因此水稻的生產面積為模型的內生變數，此表示不同用水需求的變動(如工業用水需求的增加)和水資源供給的變動(如水庫供給成本的增加)皆會對農業的生產及其用水量產生衝擊；反過來說，農地休耕面積的變動亦會造成農業用水需求的變動，因而對水資源的價格產生影響。(3)本模型假設水資源市場為一完全競爭市場，因此在目標函數的社會福利極大化下，並受到水資源供需均衡以及其他限制式下，供需均衡式的影子價格(Shadow Price)即為市場的價格。理性的生產者會在產品的邊際價值等於購買生產要素的價格條件下購買生產要素，並在產品的價格等於產品的邊際成本條件下來出售其生產的產品。因此模型中產品的供給所對應的是使用要素的邊際成本之加總，而購買要素的引申需求所對應的則是產品的邊際價值之加總。

### 3.3 資料來源與實證模型的校準

本文的桃竹苗地區水資源經濟模型建立所需資料，在用水需求部份，由於本研究將用水需求分為民生用水、工業用水及農業用水，其所需資料主要為桃竹苗地區之民生、工業及農業用水價格、用水量及用水價格彈性；而在用水供給部份，由於本研究將水資源供給來源分為水庫、河川及地下水，所需資料為桃竹苗地區之水庫、河川及地下水之供給價格、供給水量及供水彈性。上述資源來源包括台灣地區生活用水量統計報告、台灣地區工業用水量

統計報告、台灣地區農業用水量統計報告、台灣地區蓄水設施統計報告、台灣省自來水公司、台灣農業年報、行政院農委會、桃園、石門、新竹及苗栗農田水利會等及各相關研究報告。以下為資料來源的詳細說明。

在民生用水價格方面，民生用水價格為 10.14 元/立方公尺，是台灣地區之平均水價，其資料來源為台灣省自來水公司，此價格是由台灣省自來水公司之總水費收入除以總售水量而得。而在民生用水量方面，本文分為自來水供應及自行取水部份，在自來水供應部份，採用桃竹苗地區之月別自來水供應量資料，資料主要來自台灣省自來水公司及台灣地區生活用水量報告。而自行取水部份方面，由於自行取水為年資料，並未細分為月別資料，故本文將其拆解為月別資料，其處理方式為「每天自行取水總用水量」乘上「每月份天數」，如此可得到桃竹苗地區自行取水之月別資料，而將自來水供應量加上自行取水量，可得到桃竹苗地區民生總用水量，如表 6 所示。另外民生用水價格彈性值為-0.1134，此數字取自鄭立民(1995)的實證估計結果。

在工業用水方面，由於工業用水價格並無優惠，但是工業用水的主要來源為自來水公司，因此比照民生用水價格計算，所以工業用水的價格亦為 10.14 元/立方公尺。在工業用水量方面，本研究將其區分為自來水供應及自行取水部份，在自來水供應部份，取自桃竹苗地區之月別自來水供應資料，資料主要來自台灣省自來水公司及台灣地區工業用水量報告。而自行取水部份方面，則參考桃園縣、新竹縣和苗栗縣三縣市工業用水量所佔比例加以設算，桃竹苗地區的工業用水量中來自於自來水的部份占 0.26%，而自行取水占 0.74%，因此各地區的自行取水量為該地區的自來水量除以 0.26 再乘上 0.74 而得，如表 6 所示；本文所採用之工業用水價格彈性值為-0.23，此為江秀娥(1992)的實證估計結果。

表 6 桃竹苗地區民生及工業用水量

單位：百萬立方公尺

月份\縣市	民生用水			工業用水		
	桃園縣	新竹縣	苗栗縣	桃園縣	新竹縣	苗栗縣
一月	19.917	9.717	5.885	22.411	18.162	5.326
二月	19.168	8.953	5.336	24.401	17.403	5.763
三月	21.307	9.827	5.935	26.735	19.083	6.323
四月	20.374	9.533	5.765	24.964	18.268	5.883
五月	21.757	10.047	5.935	26.846	19.448	6.342
六月	21.134	9.833	5.685	25.235	18.890	5.933
七月	22.077	9.967	5.985	26.098	19.044	6.165
八月	22.267	10.337	6.235	26.957	19.944	6.365
九月	19.244	9.733	6.035	24.131	18.490	5.671
十月	21.837	10.177	6.065	25.431	19.362	5.977
十一月	21.224	9.693	6.025	25.945	18.622	6.110
十二月	21.347	9.867	5.655	25.371	18.660	5.983
合計	251.651	117.685	70.542	304.525	225.376	71.841

資料來源：經濟部水利署及本研究整理。

在農業用水價格方面，本文所採用的農業用水價格為 0.28 元/立方公尺，此數字主要是由 2001 年之農業年報中所提供的一、二期水稻購水費及其一、二期水稻用水量計算而得，計算公式為(一期水稻購水費/一期水稻用水量) + (二期水稻購水費/二期水稻用水量)。在農業用水量方面，由於台灣地區農業用水量統計報告中只提供一、二期期農業用水量，經桃園、石門、新竹及苗栗農田水利會之協助，取得桃竹苗地區農業用水量之月別資料如表 7 所示；本文所採用之農業用水價格彈性為-0.732，取自鄭立民(1995)的實證估計。

表 7 桃竹苗地區農業用水量

單位：百萬立方公尺

縣市	月別		
	桃園縣	新竹縣	苗栗縣
一 月	0.000	0.000	0.000
二 月	77.315	0.926	0.000
三 月	80.220	15.413	55.908
四 月	62.707	18.014	38.886
五 月	58.812	18.517	44.846
六 月	72.112	15.968	33.958
七 月	139.047	3.900	17.375
八 月	104.475	18.776	46.125
九 月	91.213	12.137	36.348
十 月	73.775	16.761	36.929
十一月	60.972	7.885	9.385
十二月	0.000	0.000	0.000
合 計	820.648	128.297	319.760

資料來源：經濟部水利署及本研究整理。

在水庫供水價格方面，由於水庫供水價格不易估算，當市場是完全競爭時的市場價格會等於其邊際成本，因此本研究由成本面來推算其供給價格。參考吳惠如(1997)使用 20 年期的成本價格，由於該文並沒有本研究所需的所有水庫成本，故以用水庫容量相近之水庫供給成本代替。石門水庫之供水價格為 1.7147 元/立方公尺，寶山水庫之供水價格為 6.7408 元/立方公尺，永和山水庫之供水價格為 10.9849 元/立方公尺，大埔水庫之供水價格為 6.7408 元/立方公尺，明德水庫之供水價格為 2.9571 元/立方公尺，劍潭水庫之供水價格為 6.7408 元/立方公尺，鯉魚潭水庫之供水價格為 1.7147 元/立方公尺。其中石門水庫與鯉魚潭水庫引用翡翠水庫之供水價格，大埔水庫與劍潭水庫引用寶山水庫之供水價格，如表 8 所示。

在水庫供水量方面，由於台灣地區 2001 年蓄水設施統計報告中只提供主要水庫之年運轉資料，故水庫供給量資料主要來自各水庫之管理機關，其中石門水庫之管理機關為經濟部水利署北區水資源局，寶山水庫及永和山水庫之管理機關為台灣自來水公司，明德水庫及劍潭水庫之管理機關為苗栗農田水利會，鯉魚潭水庫之管理機關為經濟部水利署中區水資源局，大埔水庫的資料則經由經濟部水利署取得，如表 9 所示。在水庫供水彈性方面，由於無法取得歷年來的資料以估計出彈性，故本文假設供水價格彈性值為 0.5。

表 8 桃竹苗地區水庫之供水價格 單位：元/立方公尺

水 庫	供水價格	引用水庫價格之水庫名稱
石 門	1.7147	翡翠水庫
寶 山	6.7408	寶山水庫
永和山	10.9849	永和山水庫
大 埔	6.7408	寶山水庫
明 德	2.9571	白河水庫
劍 潭	6.7408	寶山水庫
鯉魚潭	1.7147	翡翠水庫

資料來源：吳惠如，1997。

表 9 桃竹苗地區水庫供水量 單位：百萬立方公尺

水庫	月別						
	石 門	寶 山	永和山	大 埔	明 德	劍 潭	鯉魚潭
一 月	41.540	1.972	7.144	1.339	1.183	0.000	16.958
二 月	78.190	2.056	6.839	1.989	1.051	0.000	14.323
三 月	93.630	2.342	7.765	3.008	12.228	1.338	15.082
四 月	67.100	2.160	7.025	2.331	3.180	0.953	18.338
五 月	86.310	2.319	7.381	3.084	4.963	1.108	18.655
六 月	78.190	2.267	7.749	3.439	4.673	0.773	19.203
七 月	85.250	2.224	7.294	3.372	5.746	0.372	19.749
八 月	95.010	2.253	7.531	2.430	4.820	1.193	21.769
九 月	49.990	2.187	6.886	2.273	2.945	1.114	19.086
十 月	65.790	2.009	7.371	2.810	4.599	0.945	21.808
十一月	90.790	1.773	7.054	1.748	3.492	0.193	20.047
十二月	52.910	1.801	6.987	0.778	2.603	0.000	17.578
合 計	884.700	25.363	87.026	28.601	51.483	7.989	222.596

資料來源：經濟部水利署及本研究整理。

在河川用水價格方面，由於河川沒有真實用水價格，故本文以農田水利會平均每噸水的營運成本來代替河川用水價格，其計算方法為將農田水利會的事業支出除以其營運水量而得，因此桃園農田水利會的平均每噸水營運成本為 1.743 元；石門農田水利會的平均每噸水營運成本為 2.325 元；新竹農田水利會的平均每噸水營運成本為 0.906 元；苗栗農田水利會的平均每噸水營運成本為 0.925 元。另外由於桃園地區包含了桃園和石門兩水利會，因此以此二水利會的平均營運成本作為桃園之河川用水價格，所以假設桃園縣之河川用水價格約為 1.904 元/立方公尺，新竹縣之河川用水價格為 0.91 元/立方公尺，苗栗縣之河川用水價格為 0.92 元/立方公尺。在河川供水量方面，

因為河川淨流量資料難以取得，故以總需求量（民生用水量＋工業用水量＋農業用水量）等於總供給量（水庫供水量＋地下水供水量＋河川供水量）之方式，求出河川部分之供水量，亦即河川的供水量等於總需求量減去水庫供水量及地下水供水量，如表 10 所示。在河川供水價格彈性方面，由於無法取得歷年來的資料以估計出彈性，故本文亦假設為 0.5。

在地下水供水價格方面，由於地下水用水成本計算不易，而根據地下水的設備和抽取成本等因素，本文假設地下水用水價格為 5 元/立方公尺；在地下水供給量方面，由於地下水多為水位之資料，缺乏地下水用量的統計資料，而將地下水位資料轉成地下水用水量資料有執行上之困難，故將民生用水及工業用水中之自行取水量部份折算為地下水之供水量，如表 10 所示；在地下水供給價格彈性方面，由於無法取得歷年來的資料以估計出彈性，本文亦假設其為 0.5。

表 10 桃竹苗地區河川和地下水供水量 單位：百萬立方公尺

月別\縣市	河川供水量			地下水供水量		
	桃園縣	新竹縣	苗栗縣	桃園縣	新竹縣	苗栗縣
一月	4.240	3.170	2.096	17.318	14.259	5.401
二月	33.994	2.981	2.092	19.389	13.776	5.819
三月	30.915	22.167	72.513	21.152	15.120	6.378
四月	35.806	26.976	48.555	19.648	14.431	5.928
五月	22.286	27.199	54.342	21.113	15.345	6.397
六月	32.739	22.680	40.699	19.659	14.853	6.008
七月	56.671	5.989	13.861	20.255	15.012	6.200
八月	31.906	25.880	42.120	21.044	15.661	6.320
九月	46.897	17.531	34.717	19.205	14.512	5.627
十月	34.111	23.139	33.353	19.668	15.189	5.992
十一月	17.915	12.906	8.569	20.339	14.695	6.065
十二月	0.485	4.270	0.373	19.777	14.697	6.028
合計	347.970	194.892	353.294	238.566	177.551	72.162

資料來源：經濟部水利署及本研究整理。

本文的實證模型是採用數學規劃的方法來求解，模型包含的地區主要為桃園縣、新竹縣及苗栗縣等 3 縣市，以 2001 年桃竹苗地區水資源之供給量及需求量的實際觀察值為基期年的資料，作為實證模型校準(calibration)的依據。水資源供給主要來自水庫、河川及地下水，而水資源需求主要來自民生、

工業及農業用水，所得之實證結果包含供需面的價格及數量。為了確認所建構的實證模型是否可以接受，必須將模型的基本解與實際觀察值作一比對，如果模型基本解與實際觀察值之差距在一可容忍之範圍內，模型就具有某種程度的可信度。由模型的實証結果顯示，這三個地區在民生用水、工業用水及農業用水的模型基本解和實際的觀察值非常接近，誤差範圍皆在1%以下。此顯示本實證模型應可以接受，並可進一步用來做相關的水資源移用補償模擬分析。

由模型之基本解，可求得桃園、新竹及苗栗 3 個地區水資源市場之各種重要經濟變數解，由表 11 可知桃園、新竹及苗栗地區的均衡水資源價格介於 2.57 至 3.16 元/立方公尺之間，其中新竹地區的水資源價格比桃園地區略高，此可能因工業用水在新竹縣的比例較高，另外苗栗地區的水資源價格遠比桃園縣和新竹縣低，這主要是因為桃園及新竹地區內農業用水只占全部用水的 43.69%及 32.17%，而苗栗地區的農業用水則占該地區的全部用水之 70.44%所致。

表 11 亦顯示福利值的部分，桃園地區之總福利值為 18,789 百萬元，消費者剩餘為 17,602 百萬元，生產者剩餘為 1,187 百萬元，新竹地區之總福利值為 10,739 百萬元，其中消費者剩餘為 10,285 百萬元，生產者剩餘為 454 百萬元，苗栗地區之總福利值為 33,484 百萬元，其中消費者剩餘為 31,496 百萬元，生產者剩餘為 346 百萬元，在這三個地區當中因桃園地區的用水總量最高，所以產生的福利值亦為最高。

表 11 桃竹苗地區之價格、用水需求量及社會福利值

		單位：百萬元			
		桃園縣	新竹縣	苗栗縣	合計
水資源價格 (元/立方公尺)		3.12	3.16	2.57	2.99*
需求量 (千立方公尺)	民生用水	251160	117690	70600	439950
	工業用水	304520	225400	71820	601740
	農業用水	472730	170332	364845	1007907
	總需求量	1028910	513422	507265	2049599
社會福利 (百萬元)	消費者剩餘	17602	10285	3609	31496
	生產者剩餘	1187	454	346	1987
	總福利值	18789	10739	3955	33484

資料來源：本研究整理。

註：\*是三個地區的平均水資源價格。

### 3.4 雨量預報系統價值之估計

本研究的主要研究目的在於估計預報系統的資訊之價值，第一步驟是要將所預報的雨量如何影響到水資源的供給結合，透過水庫放流量和雨量間的迴歸分析可獲得雨量對水庫放流量的影響；第二步驟的則是將此影響放入模型中來估計雨量對水資源的經濟影響；第三步驟則是透過水資源的移轉，如透過農業部門的休耕來將水資源由農業部門移轉至工業和民生部門，如此即可估計出雨量預報的資訊價值。

就第一步驟而言，因為雨量的變化對水資源的供給有顯著的影響，為估計雨量變化對供水量的影響，本研究以雨量變化對石門水庫流入量的影響為分析對象，利用為石門水庫 1978 年至 2003 年共 26 年的各月份流入量資料與石門水庫流域歷年平均降雨量，做一簡單迴歸分析，共有 12 條方程式，分別為

$$W_m = \alpha_m + \beta_m RAIN_m + \varepsilon_i \quad m=1, \dots, 12$$

其中  $W_m$  為第  $m$  月份水庫流入量， $\alpha_m$  為常數項， $\beta_m$  為估計之參數， $RAIN_m$  為第  $m$  月份之平均降雨量， $\varepsilon_i$  為誤差項。利用最小平方法，來估計各月份雨量變化對石門水庫流入量之影響，結果發現估計出來之  $t$  值在 95% 之信賴水準下皆為顯著 ( $t$  值大於 1.96)，可通過檢定， $R^2$  也有足夠的解釋能力，由表 12 中之  $\beta$  值得知雨量變化對水庫之流入量有正向之影響，尤其以 3、9、10、11 月份之影響較為明顯，大約增加 1 公厘降雨量，水庫流入量約增加 0.66 百萬立方公尺。另外表 12 中的彈性值是由估計出的係數計算而得，以 1 月份的 0.431 為例，此表示雨量增加 1% 時，對水庫放流量會增加 0.431%，反過來說，若雨量減少了 1%，水庫的供給就會減少 0.431%。

表 12 水庫流入量的估計結果

項目	$\alpha$	$\beta$	彈性值	$R^2$
$W_1$	19.492	0.194 (3.47)	0.431	0.346
$W_2$	-11.649	0.464 (14.81)	1.058	0.905
$W_3$	-41.424	0.662 (8.85)	1.242	0.791
$W_4$	25.235	0.393 (6.59)	0.807	0.657
$W_5$	28.502	0.277 (4.30)	0.675	0.476
$W_6$	21.142	0.544 (9.62)	1.003	0.811
$W_7$	51.158	0.341 (5.51)	0.699	0.570
$W_8$	-24.803	0.593 (11.21)	1.027	0.846
$W_9$	6.139	0.669 (10.56)	0.988	0.834
$W_{10}$	17.570	0.674 (11.73)	0.777	0.860
$W_{11}$	-5.479	0.664 (5.59)	0.753	0.581
$W_{12}$	23.115	0.173 (3.29)	0.750	0.358

資料來源：本文實證統計結果，括弧中為 t 值

接著由雨量的預報系統中，並有 63 種可能的預報結果，每一種預報結果皆有 1980 年至 2001 年的 22 種雨量在 12 個月的預測結果，將每一預報系統中的上述 22 年中的每一月之雨量變動百分比乘上表 12 的彈性值即可得到該預報系統中桃竹苗地區的該月降雨量之變動百分比，如附錄的附表 I 所示。如 1980 年一月的數字是 -0.126，此表示在該模式下的雨量預報資訊在一月份的降雨量將會減少 12.6%，其它數字的意義可以此類推。而附表 II 則是 63 種預報模式下，計算每一模式在 1980 年至 2001 年下的降雨量變動百分比之數字，舉例而言，附表 II 在 RUN1 模式下的一月份之數值為 0.58，此表示此 RUN1 模型式所預測的降雨量透過對水庫流入量的影響之後，一月份會增加 0.58% 水庫供水量。

在開始底下的模擬情境設定及實証模擬之前，要特別說明有關此雨量預報資訊價值的估計之基本理論基礎及其假設，由前人 (Chen and McCarl (2000); Chen et. al(2002); 陳吉仲等人(2003)) 的研究可知，何透過貝式定理可來描述氣候預測資訊下的經濟價值。所謂氣候預報的經濟價值是當生產者或消費者獲得氣候預報資訊時，由於採取了一些調適行為所增加的利益 (或減少的損失)，因此一個風險決策模型必須包含在獲得預報資訊之後的決策行為的調適，若無決策行為的調適，則此種預報資訊就不會產生所謂的經濟價值。舉例而言，Chen and McCarl (2000) 等研究中之預測價值的產生主

要來自於農民調整其生產作物的種類而得。而本研究的預測價值將會來自於水資源的移轉之策略下所產生。

一般經濟個體在做決策時會以過去所發生過的歷史資料來做為決策時的依據，舉例而言，在沒有任何雨量預報資訊下，生產者(或農民)會根據歷史經驗來決定生產何種作物，如過去的豐水年機率是 20%，乾早年的機率是 30%，其餘為正常年，生產者即是在這樣的資訊下做生產決策。現在若政府可以提供生產者雨量的預報訊息，根據這項事前的預報訊息，生產者認為發生上述三種現象的機率(事後機率)會和前述的機率(事前機率或概似機率)不同，此時生產者會根據此事後機率來調整其生產決策。因此本研究亦利用貝式定理來區分有無氣候預報資訊下，並假下此預報的資訊是百分之百的準確程度下，將雨量的預報資訊之降雨量變動結果納入上述的水資源之經濟模型，以計算其預測的價值。

因此本研究的模擬情境設定及其詳細定義如下。

情境一：基期年情境(即未考量任何降雨量的影響)；

情境二：在給定的 63 種預報雨量資訊系統下，對桃竹苗地區的水資源之經濟影響，分別由 1980 年開始來執行，一直致 2001 年為止；亦即每一年皆有 63 種可能的降雨量，即表示將附表 I 及附表 II 的 22 年中，每一年的 63 種不同模式下對桃竹苗地區雨量影響的百分比納入模型中執行；

情境三：在給定的 63 種預報雨量資訊系統下，將此事先預報的資訊透過相關的因應策略，若是當期的雨量預測之平均值是正的，那就不須要有任何的因應策略之調整，反之若當期的雨量之平均值是負的，則將所減少的雨量透過水庫放入量的減少部分，再來換算出應該休耕面積的比例，如附表 III 所示，因此透過休耕面積的增加來將農業用水移轉至非農業部門時，對此水資源市場的經濟影響。

在執行情境二及三時，水資源的經濟模型是要執行 22 次，而每次皆有 63 種可能的狀態(state of nature)，因此模型可求此每一年的 63 種不同預報模式下的水資源之經濟解，亦即求出每一年的水資源供需量、價格及福利解。但是為了方便，我們只呈現這 22 年的平均結果。

表 13 為上述模擬情境下桃竹苗地區水資源經濟的影響衝擊。當透過降雨

量的預報而未採取任何因應措施時(即情境二時)，由於透 63 種雨量預報系統所估計的雨量有增加亦有減少，但是平均而言是減少，且變動幅極大，故此時會造成水資源的價格上升，而工業部門的用水量和民生部分的用水量皆會減少，如工業用水的數量由情境一(基期年的情境)786.2 百萬立方公尺下跌至 718.9 百萬立方公尺，而民生用水則是由 501.9 百萬立方公尺下跌至 480.1 百萬立方公尺，下跌百分比分別為 8.56%及 4.38%。但是農業部門的用水價格較便宜，故農業用水的數量未改變。

情境二的模擬結果隱含在未有任何生產決策調整時，面臨此種雨量預報下的桃竹苗地區之降雨量降少所造成之水資源供給減少，將會顯著地影響到工業和民生用水，因此整體社會福利減少了 18.6 億元。

當採取相關的因應措施時，舉例而言，當生產者或政府掌握了此雨量預報資訊時，且假設此資訊是百分之百正確下，可透過水資源管理策略的應用來降低此衝擊。舉例而言，由於農業部門的用水量是最高的一個部門，但是其產值相對而言是較工業部門低，因此透過休耕面積的增加來將農業用水移轉至非農業部門時，此時的整體社會利益將會增加，此即為情境三的設定。

在針對不同的降雨量之預測來決定是否增加休耕的面積情境下，此時的水資源價格會由情境二的 4.81 元/立方公尺降為 4.67 元/立方公尺，而農業用水量減少了 1.32%，但是工業和民生用水則增加了 0.45%和 0.24%。由於雨量預報資訊系統的提供加上因應策略的執行，才產生上述水資源供需數量和價格的改變，就整體的因應策略之效益和成本而言，表 13 中有水資源成本之項目，所謂水資源的成本是定義在當土地休耕時，休耕的補助金額加上無法種植水稻所時損失的利潤(即種稻的利潤)再加上水資源移轉到非農業部門的移轉成本，故在情境一和二時未有水資源移轉成本，其水資源的成本即只有休耕的補助金額和未種植水稻時而無法賺取的利潤，此時為 1,135 百萬元，當雨量預報資訊提供且將水資源移轉至工業和民生部門時，其水資源成本為 1,192 百萬元，增加了 57 百萬元，此為執行預報資訊系統下之成本。就所產生的效益而言，在情境二下的總福利值為 33,070 百萬元，有執行水資源移轉下的總福利值為 33,218 百萬元，因此整體社會福利增加了 148 百萬元，故就益本比而言(即 148/57)，遠高於一，故此因應策略值得採行。

最後值得注意的是，上述的價值之計算是在預報資訊是百分之百正確下

的估計結果，因此是屬於預測價值的最大範圍；若考量預測的準確機率以及是否採行因應策略時，本研究反推在雨量預報準確度在 38% 以上時，其效益就會大於成本，不過此前題是在上述的 63 種預報的機率是均等分配，且其每一預報模式下的每一年之可能發生結果亦是均等分配的前題假設下所計算之結果。亦即在任何可能的預報雨量系統之機率下，若一律採取水資源的移轉策略，其執行成本為 57 百萬元，此時的預報雨量資訊系統的價值可在 0 至 148 百萬元之間，超過 38% 的正確預報機率下的效益就會超過其成本。

表 13 有無雨量有無雨量預報資訊下之水資源市場的經濟影響

	情境一 (基期年)	情境二 (雨量的直接影響)	情境三 (事先預測及休耕 調整)
平均價格 (元/立方公尺)	2.82	4.81 (0.47)	4.67 (0.47) [-2.91%]
用水量 農業 (千立方 公尺)	1,007,909	1,007,909 (0.00)	994,596 (0.00) [-1.32%]
工業	786,299	718,980 (4419)	722,188 (4121) [0.45%]
民生	501,964	480,177 (1533)	481,345 (1435) [0.24%]
合計	2,296,173	2,207,057 (5950)	2,211,443 (5554) [0.20%]
休耕面積	21,885	21,885	22,590 [3.22%]
休耕給付 (百萬元)	875	875	903 [3.20%]
水資源成本 (百萬元)	1,135	1,135	1,192 [5.02%]
消費者剩餘	32,387	30,183 (383)	30,320 (372) [0.45%]
生產者剩餘	2,541	2,886 (118)	2,898 (104) [0.42%]
總福利值 (百萬元)	34,928	33,070 (492)	33,218 (469) [0.44%]

資料來源：本研究。註：情境三之括弧內和情境一比較的變動分比。

## 參考文獻

### 一、中文部分

- 行政院農業委員會，2001。『台灣農業年報』。台北：行政院農委會。
- 行政院農業委員會，2001。『台灣農業生產調查報告』。台北：行政院農委會。
- 行政院農業委員會，2000。『農業用水量化目標及總量清查報告』。台北：行政院農委會。
- 行政院農委會漁業署，2001。『台灣漁業統計年報』。台北：行政院農委會漁業署。
- 行政院經濟部水利署，2001。『台灣地區生活用水量統計報告』。台北：行政院院經濟部水利署。
- 行政院經濟部水利署，2001。『台灣地區工業用水量統計報告』。台北：行政院院經濟部水利署。
- 行政院經濟部水利署，2001。『台灣地區農業用水量統計報告』。台北：行政院院經濟部水利署。
- 行政院經濟部水利署，2001。『台灣地區蓄水設施統計報告』。台北：行政院院經濟部水利署。
- 農田水利會聯合會，2001。『台灣地區農田水利會資料輯』。台北：農田水利會。
- 李玲玲、楊玉昌，2002。『台灣水資源政策之檢討(一)』。取自 <http://e-info.org.tw/issue/water/2002/wa02072201.htm>。
- 于宗先，1975。「臺北地區自來水需求預測」，『臺灣經濟預測』。7卷，1期，51-66。
- 江秀娥，1992。「台灣南部地區工業用水需求與效率之研究」。碩士論文，中興大學農業經濟研究所。
- 沈信廷，1990。「都市用水需求之研究—以高雄市自來水用戶之工業用水及家庭用水為例」。碩士論文，臺灣大學地理學研究所。
- 呂俊達，1990。「區域開發需水量預測模型」。碩士論文，淡江大學水資源及環境工程研究所。
- 吳功顯、鄭秋桂，1994。「區域間水資源調配補償因素之探討」，『臺灣銀行季刊』。45卷，1期，266-305。
- 吳惠如，1996。「臺灣地區工業用水需求模式之實證分析」，『臺灣銀行季刊』。47卷，1期，253-275。
- 吳惠如，1997。「臺灣地區水庫供水成本之研究」，『臺灣銀行季刊』。48卷，3期，162-180。
- 林幸樺，1996。「乾旱時期農業用水量移用水量之補償標準」，『臺灣經濟研究月刊』。19卷，7期，32-37。
- 張靜貞、林依瑩，1997。「溫室氣體排放減量對台灣農業部門之影響」，『臺灣經濟學會年會論文集』。台北：國立台灣大學。
- 張靜貞、陳吉仲，1995。「農業保護政策與生產結構變動對台灣農業部門福利分配之影響」，『臺灣土地金融季刊』。32卷，1期，67-82。
- 高惠玲，1992。「森林涵養水資源之效益—都會區家庭用水需求函數之應用」。碩士論文，臺灣大學農業經濟研究所。
- 黃宗煌、楊淑麗、李堅明，1993。「臺灣紡織業與食品業對水資源之需求分析」，『臺灣經濟』。194期，44~54。
- 鄭立民，1995。「臺灣地區用水需求模式之建立與預測」。碩士論文，中興大學資源

管理研究所。

- 鄭欽龍，1991。「台灣地區工業用水需求及其經濟價值分析」，經濟部水資會委託研究。中華經濟研究院。
- 劉長齡、李宗仰、吳其璋，1993。「都會區月用水量之模式建立與估測」，『臺灣水利』。41卷，4期，1-13。
- 劉欽泉、陳慧秋，2003。「台灣農田水利會配水機制之研究」，『臺灣土地金融季刊』。40卷，4期，63-80。
- 劉繼政，1994。「臺灣地區水資源之研究」，『臺灣銀行季刊』。46卷，4期，237-280。
- 盧文俊，1997。「臺灣地區工業用水需求分析」，『臺灣銀行季刊』。49卷，1期，365-395。
- 蕭景楷、徐享田、廖香蘭，1989。「高屏地區水資源利用及移轉成本之研究」，『臺灣銀行季刊』。40卷，4期，234-287。
- 羅慶瑞，1997。「臺灣地區農業用水移用工業用水補償制度研究」，『臺灣銀行季刊』。48卷，1期，345-366。

## 二、英文部分

- Adams, R. M., S. A. Hamilton, and B. A. McCarl, 1986. "The Benefits of pollution Control: The Case of Ozone and U. S. Agriculture," *American Journal of Agricultural Economics*. 68: 886-893.
- Adams, R.M., et al., 1990. "Value of Improved Long-Range Weather Information" *Contemporary Economic Policy* 13 : 10-19
- Adams, R.M., K.J. Bryant, B.A. McCarl, D.M. Legler, J.O'Brien, A. Solow, and R. Weither, 1995. "Value of Improved Long-Range Weather Information." *Contemporary Economic Policy* 13 : 10-19
- Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4, 1147-1167.
- Andreas Weigel, Mark Liniger, Christof Appenzeller, 2007. "The Discrete Brier and Ranked Probability Skill Scores." Andreas Weigel, Mark Liniger, Christof Appenzeller. ECMWF, Reading, UK. 1, Feb.
- Baumes, H., 1978. *A Partial Equilibrium Sector Model of U.S. Agriculture Open to Trade: A Domestic Agricultural and Agricultural Trade Policy Analysis*. Ph.D. Dissertation, Purdue University.
- Becker, N., 1995. "Value of Moving from Central Planning to Market System: Lessons from the Israeli Water Sector," *Agricultural Economics*. 12 (1): 11-21.
- Ebert, B., 2007. "Verification of Probability Forecasts." 3rd International Verification Methods Workshop. , Reading, UK. 29, Jan-2, Feb.
- Bosch, D. J., 1991. "Benefits of Transferring Streamflow Priority from Agricultural to Non-Agricultural Use," *Water Resource Bulletin*. 27 (3): 397-405.

- Burton, R. O. and M. A., Martin, 1987. "Restrictions on Herbicide Use: An Analysis of Economic Impacts on U.S. Agriculture," *North Central Journal of Agricultural Economic*. 99: 181-194.
- Chang, C. C., 2002. "The Potential Impact of Climate Change on Taiwan's Agriculture," *Agricultural Economics*. 27 (1): 51-64.
- Chang, C. C., B. A., McCarl, J. W., Mjelde, and J. W., Richardson, 1992. "Sectoral Implications of Farm Program Modification," *American Journal of Agricultural Economics*. 74: 38-49.
- Chang, C.C. "The Potential Impacts of Climate Change on Taiwan's Agriculture." *Agricultural Economics* 27(2002): 51-64.
- Chen, C. C., D. Gillig, B. A. McCarl, and L. Williams, 2005. "ENSO Impacts on Regional Water Management: A Case Study of the Texas Edwards Aquifer Region, USA," *Climate Research* (forthcoming).
- Chen, C. C., Dhazn Gillig, and B. A. McCarl, 2001. "Effects of Climatic Change on a Water Dependent Regional Economy: A Study of the Texas Edwards Aquifer," *Climatic Change*. 49:397-409.
- Chen, Chi-Chung and McCarl, 2000" The value of ENSO Information to Agriculture : Consideration of Event Strength and Trade." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 25 : 368-385
- Chen, Chi-Chung, Bruce A. McCral and Richard M. Adams "Economic Implications of Potential ENSO Frequency and Strength Shifts " *Climate Change* 49 : 147-159
- Duloy, J. H. and R. D., Norton, 1973. "CHAC: A Programming Model of Mexican Agriculture," *Multi-Level Planning: Case Studies in Mexico*, eds., A.S. Manne and L.M., Goreux, Amsterdam: North-Holland Pub., Co., 291-338.
- Gillig, D., B. A. McCarl, and F. O. Boadu, 2001. "An Economic, Hydrologic and Environmental Assessment of Water Management Alternative Plans for the South Central Texas Region," *Journal of Agricultural and Applied Economic*. 33: 59-78.
- Hsu, S. H. and R. C. Griffin, 1993. "The Potential for Water Market Efficiency When Instream Flows Have Value," *American Journal of Agricultural Economics*. 75: 292-303.
- Keplinger, K. O., B. A. McCarl, M. Chowdhury, and R. D. Lacewell, 1998. "Economic and Hydrologic Implications of Suspending Irrigation in Dry Years," *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 23: 191-205.
- McCarl, B. A. and T. H. Spreen, 1980. "Price Endogenous Mathematical Programming as A Tool for Analysis," *American Journal of Agricultural Economics*. 62: 87-102.
- McCarl, B.A., and T.H. Spreen, 1980. "Price Endogenous Mathematical Programming As a Tool for Sector Analysis." *American Journal of Agricultural Economics*

- Mendelsohn R. and L. L Bennett, 1997. "Global Warming and Water Management: Water Allocation and Project Evaluation," *Climatic Change*. 37:271-290.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W., Shaw, D., 1996. Climate Impacts on Aggregate Farm Value: Accounting for Adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology* 80, 55-66.
- Ministry of Agriculture and Forestry, 2001. *Economic Efficiency of Water Allocation*. MAF Technical Paper No: 2001/7, Sturat Ford Agriculture New Zealand Ltd.
- Plessner, Y. and E. O. Heady, 1965. "Competitive Equilibrium Solutions with Quadratic Programming," *Metroeconomica*. 17: 117-130.
- Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 853–872.
- Palmer, T. N., F. J. Doblas-Reyes, A. Weisheimer, and M. J. Roddwell, 2008: Toward Seamless Prediction -Calibration of Climate Change Projections Using Seasonal Forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 459-470.
- Samuelson, P. A, 1952. "Spatial Price Equilibrium and Linear Programming," *American Economic Review*. 42: 283-303.
- Solow, .R. et al.,1998."The value and Improved ENSO Prediction to U.S. Agriculture." *Climatic Change* 39 : 47-60
- Syme, G. J. and B. E. Nancarrow,1997. "The Determinants of Perceptions of Fairness in the Allocation of Water to Multiple Uses," *Water Resource Research*. 33 (9): 2143-2152.
- Takayama, T. and G. G. Judge, 1964. "Equilibrium among Spatially Separated Markets: A Reformulation," *Econometric*. 32: 510-524.
- Weigel, A. P., M. Liniger, C. Appenzeller, 2007: The Discrete Brier and Ranked Probability Skill Scores. *Monthly Weather Review*, 135, 118-124.
- Wilks, D.S., 2000: Diagnostic Verification of the Climate Prediction Center Long-Lead Outlooks, 1995-1999. *Journal of Climate*, 13, 2389-2403.
- Wilks, D.S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Second Edition, Academic Press, 627pp.
- Wu, H., 1996. The Impact of Climate Change on Rice Yield in Taiwan. In: Mendelsohn, R., Shaw, D., eds., The Economics of Pollution Control in the Asia Pacific, Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Yaron, D., 1967. "Incorporation of Income Effects into Mathematical Programming Models," *Metroeconomica*. 19: 141-160.

## 附錄一

附表 I、雨量預報系統在 1980 至 2001 年中桃竹苗地區的每月降雨量之變動百分比

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1980	-0.126	1.824	-0.99	-0.122	0.035	-0.201	0.046	-0.004	-0.359	0.309	-0.075	0.021
1981	0.224	-0.796	-0.42	-0.432	0.326	0.06	0.311	-0.469	-0.06	0.292	0.614	-0.057
1982	0.101	-0.443	-0.616	-0.505	-0.38	0.756	-0.329	-0.506	-0.06	-0.47	-0.297	0.196
1983	0.236	-0.011	-0.599	-0.059	0.226	1.016	0.288	-0.555	0.224	0.453	-0.07	-0.057
1984	-0.099	-0.016	-0.373	-0.018	-0.282	0.803	-0.417	-0.555	-0.197	-0.25	0.46	0.268
1985	-0.152	-0.551	-0.474	-0.342	-0.134	-0.212	-0.087	0.822	-0.65	-0.417	-0.186	-0.114
1986	-0.243	0.308	-0.457	-0.364	-0.135	0.158	-0.431	0.513	0.458	-0.417	-0.4	-0.105
1987	0.228	-0.216	0.357	0.289	-0.49	-0.2	0.149	-0.577	0.233	-0.39	0.969	-0.058
1988	-0.244	1.838	-0.372	0.146	0.04	0.975	0.263	0.847	-0.619	0.655	0.657	-0.058
1989	0.226	-0.779	0.835	-0.544	8.78E-04	0.007	0.318	-0.2	-0.479	0.655	-0.349	-0.093
1990	-0.037	-0.722	2.248	-0.083	0.369	-0.232	0.034	-0.145	-0.358	-0.24	0.044	-0.045
1991	-0.221	-0.165	-0.378	-0.18	-0.121	0.144	-0.401	-0.504	0.85	0.143	-0.513	-0.043
1992	-0.207	-0.05	-0.466	0.9	0.335	0.235	-0.265	-0.189	0.85	0.208	-0.584	0.034
1993	0.498	-0.886	-0.377	0.731	0.352	0.08	0.351	-0.439	0.502	0.208	-0.021	-0.117
1994	-0.11	-0.438	-0.025	-0.004	0.337	-0.313	-0.082	-0.165	-0.141	-0.532	-0.639	-0.058
1995	-0.126	-0.171	-0.438	-0.057	0.412	0.178	-0.322	0.831	0.008	0.669	0.407	0.016
1996	-0.209	-0.782	-0.594	-0.291	-0.157	0.153	-0.184	0.545	-0.454	-0.482	-0.18	-0.133
1997	0.225	-0.782	-0.466	-0.371	-0.182	0.091	0.303	0.364	-0.369	-0.511	-0.531	0.015
1998	-0.165	0.007	0.031	0.365	-0.253	0.394	-0.413	0.364	0.79	0.678	0.84	0.018
1999	-0.21	-0.64	3.424	0.303	0.433	-0.217	0.486	-0.057	0.496	1.01	0.138	0.131
2000	-0.208	-0.599	-0.344	0.577	0.316	0.103	-0.012	0.425	-0.285	-0.485	0.754	-0.014
2001	-0.071	0.133	0.553	0.618	0.316	-0.181	0.039	-0.051	-0.123	0.571	-0.127	-0.057

附表 II、雨量預報系統在不同模式情境下對桃竹苗地區的每月降雨量之影響百分比

氣候模式情境	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
RUN1	-0.55	9.14	3.41	-1.01	0.96	-3.62	0.01	1.17	0.25	-1.11	1.91	0.29
RUN2	-0.69	-3.94	0.06	0.56	1.37	3.60	-0.35	0.29	0.26	1.66	0.91	-0.31
RUN3	1.84	0.31	-0.13	1.33	-0.83	-1.55	0.33	-0.18	1.93	-0.72	-0.07	0.83
RUN4	0.86	-0.05	0.79	2.88	1.73	-1.09	0.48	-0.82	-0.05	0.73	-1.00	0.73
RUN5	0.30	-0.96	-1.68	-3.87	0.56	-3.22	0.24	-0.56	0.82	0.63	-0.51	-0.83
RUN6	-0.85	-5.16	-3.28	-0.16	-0.88	1.10	0.31	1.17	-1.27	2.32	-0.63	-0.25
RUN7	-0.24	-0.74	1.04	1.39	-1.65	1.22	-0.58	0.16	-0.66	-2.16	2.21	-0.48
RUN8	-0.30	-0.61	2.87	-2.31	-0.74	4.72	-0.74	0.11	-1.45	0.88	0.43	0.29
RUN9	-0.37	2.01	-2.83	1.20	-0.51	-1.16	0.30	-1.34	0.19	-2.22	-3.26	-0.27
RUN10	-0.90	-3.78	2.79	-2.05	1.17	-4.10	-0.54	-3.30	-1.53	4.12	-0.15	-0.16
RUN11	-0.07	-1.49	-1.14	2.08	-0.10	-1.19	1.58	0.47	-0.21	-1.85	1.80	0.03
RUN12	-1.25	-2.41	6.19	-4.27	0.11	-2.34	1.35	-0.74	0.79	2.85	1.87	-0.33
RUN13	1.59	1.99	-0.44	1.44	-1.14	2.88	-0.32	0.28	-1.30	0.09	2.69	0.00
RUN14	0.15	-2.58	-4.45	-0.45	-1.68	-1.06	-1.06	-1.54	-0.47	1.99	0.57	1.39
RUN15	-0.49	4.35	1.09	-1.21	0.92	1.81	-0.49	1.57	-1.15	-4.63	-0.84	0.32
RUN16	0.59	5.28	-4.93	1.20	0.39	-2.23	0.23	4.69	1.30	-3.49	-0.92	-0.37
RUN17	0.08	1.95	2.16	1.66	-0.25	3.46	0.07	0.87	2.70	-1.48	-3.96	-0.76
RUN18	0.30	-3.30	-1.28	1.59	0.59	2.78	-0.82	-2.31	-0.13	2.41	-1.05	-0.12
RUN19	0.63	0.45	-0.53	-1.91	1.35	0.18	1.33	-0.14	-0.49	1.09	1.20	0.12
RUN20	-0.95	0.16	1.83	0.24	-0.84	0.91	-1.26	-0.49	0.95	-4.51	-2.87	-0.04
RUN21	1.87	3.61	-0.92	2.48	-0.39	-1.66	0.98	0.40	-1.49	-0.40	-2.25	0.92
RUN22	1.33	0.19	2.41	0.76	0.04	-2.62	-0.67	0.28	0.89	-1.62	1.47	-0.10
RUN23	-0.49	4.80	0.00	-0.34	0.62	-1.26	1.60	0.68	3.15	-0.09	-0.07	-0.25
RUN24	-0.75	-0.73	3.12	1.53	-0.30	3.02	-0.09	0.48	-0.39	2.84	-1.49	0.01
RUN25	-1.51	1.71	-3.26	0.56	0.62	-0.17	-1.42	-0.48	-0.40	0.31	2.68	-0.53
RUN26	-1.07	-4.97	-3.95	0.16	-0.91	2.37	0.83	-1.36	-3.08	3.43	0.42	-0.01
RUN27	0.95	-5.22	1.30	-3.48	-0.19	-0.76	-1.29	0.64	0.86	-1.05	0.92	-0.11
RUN28	-1.28	0.18	-2.74	-1.30	0.37	-0.93	-1.50	-0.52	-0.19	-0.08	-0.63	0.06
RUN29	1.89	-0.22	3.43	4.12	-0.31	0.53	1.56	0.31	-3.78	-2.19	0.95	0.27
RUN30	-1.25	0.81	-1.62	-0.07	-0.61	-0.13	0.16	2.25	-5.38	0.65	-1.56	0.15
RUN31	0.33	1.26	1.65	1.21	0.07	0.60	1.52	-2.25	6.06	1.43	0.11	0.30
RUN32	-0.19	-4.46	-4.00	-1.48	-0.80	1.17	1.79	0.83	0.42	5.62	-1.31	-0.58
RUN33	0.43	0.46	-1.34	-3.28	0.50	-1.53	2.30	1.06	-0.29	-2.00	1.30	-0.89
RUN34	0.03	-5.47	-1.21	1.79	1.45	-0.61	-2.15	0.16	0.32	-1.42	0.62	-0.15

RUN35	-0.35	0.20	3.85	-1.93	1.43	0.29	-2.11	0.16	2.81	0.72	-0.85	0.25
RUN36	0.39	7.25	1.98	0.93	-2.11	0.60	-1.58	-2.00	0.03	-2.72	1.37	0.59
RUN37	-0.58	4.68	-3.26	-0.14	0.10	0.70	-2.07	-0.66	-0.96	0.79	4.41	-0.89
RUN38	-0.56	5.05	-1.00	3.46	-0.73	-0.99	1.33	-1.87	4.03	0.82	-0.62	-0.15
RUN39	-0.79	-3.73	1.86	-0.02	0.48	-2.51	0.28	3.07	0.61	1.31	-2.88	-0.79
RUN40	0.70	2.84	1.08	1.17	0.74	3.36	0.01	0.60	-2.49	-1.60	-1.49	-0.02
RUN41	2.83	-1.75	-0.94	1.97	-0.53	0.39	-1.78	-0.09	-0.23	-2.79	-0.53	0.87
RUN42	-1.28	-1.90	2.74	-3.44	1.22	0.01	3.69	-0.45	-2.02	1.84	-3.61	-0.43
RUN43	0.41	-0.96	1.31	1.22	-0.36	-1.31	1.22	0.57	-0.29	-6.35	2.10	-0.17
RUN44	0.28	-1.88	0.69	-1.41	-0.11	-1.84	-3.38	0.08	2.49	2.95	1.27	1.18
RUN45	-1.02	-2.36	-1.98	-2.82	-0.81	2.19	0.69	-1.25	-1.14	3.03	1.34	0.40
RUN46	0.03	2.52	2.08	-0.99	0.37	0.61	-0.87	-1.87	-0.22	1.77	-2.55	-0.69
RUN47	-0.17	-1.91	-3.32	-0.19	1.69	-3.49	2.22	1.97	-1.17	0.18	-0.30	0.42
RUN48	-1.29	2.68	-2.84	-4.26	-0.11	-0.90	2.16	1.42	-2.83	2.10	-0.42	0.17
RUN49	0.87	-1.40	0.11	1.11	0.93	-1.53	0.58	0.03	-0.79	4.29	-1.25	0.06
RUN50	0.55	3.70	5.00	1.05	-1.64	-1.31	0.51	0.06	2.74	-2.04	-2.38	-0.25
RUN51	-0.08	3.89	-1.00	1.49	-0.68	2.06	-2.74	-0.67	-1.89	0.18	-3.22	-0.27
RUN52	0.10	-0.48	0.48	-0.28	-0.15	0.02	-1.63	-0.83	1.05	-1.93	-0.08	-0.30
RUN53	-0.37	-5.62	2.05	4.11	-0.65	0.27	1.30	0.10	1.57	0.18	2.99	0.68
RUN54	0.36	-3.37	-2.56	-2.05	0.24	4.28	-1.53	-0.21	1.54	-4.74	7.20	0.17
RUN55	-0.80	-0.93	-1.81	-0.12	1.41	-3.27	2.54	0.67	-1.41	-3.50	0.88	-1.17
RUN56	0.53	-1.78	-3.74	1.00	0.01	1.01	0.31	-0.60	-0.21	1.79	-0.79	0.48
RUN57	-0.17	0.98	1.59	1.91	1.59	0.96	0.37	0.91	-0.17	1.56	1.48	0.16
RUN58	-0.13	1.54	-0.77	1.80	-0.21	1.03	-2.24	1.31	0.17	4.50	1.06	0.40
RUN59	-0.98	2.42	1.89	0.57	-1.11	-1.15	-1.40	-0.97	-0.48	-0.47	-0.61	-0.58
RUN60	1.19	2.00	-0.96	-2.30	-1.02	-0.06	-0.57	0.75	2.85	-0.85	0.90	0.34
RUN61	-0.29	-0.79	-0.25	-2.66	-0.28	2.16	3.20	2.36	-2.07	0.89	-1.50	-0.40
RUN62	0.32	-4.53	-0.42	-2.33	0.21	-0.03	-10.13	41.90	2.32	-2.03	0.23	-0.19
RUN63	0.34	1.17	4.73	2.13	-0.60	-0.64	-0.08	-4.43	-0.99	-1.90	-1.65	0.97

---

附表 III、1980 至 2001 年之每年預測之平均降雨量變動百分比及休耕面積調整百分比

	平均降雨量變動百分比	休耕面積增加百分比
1980	-0.033	-0.016
1981	-0.090	-0.040
1982	-0.064	-0.044
1983	0.083	0.025
1984	-0.0001	-0.004
1985	-0.082	-0.033
1986	-0.021	-0.013
1987	-0.072	-0.031
1988	0.146	0.054
1989	-0.103	-0.037
1990	-0.037	-0.008
1991	-0.080	-0.033
1992	0.007	0.014
1993	0.040	0.016
1994	-0.015	0.008
1995	0.073	0.031
1996	-0.083	-0.020
1997	-0.027	-0.028
1998	0.245	0.102
1999	0.042	0.030
2000	0.047	0.010
2001	0.026	0.020

## 附錄二

### 出席 APCC 年度氣候國際學術會議心得報告

出國人員姓名 服務機關及職稱	陳正達（國立台灣師範大學地球科學系教授）
會議時間地點	2009年7月12-15日，Singapore
會議名稱	APEC Climate Symposium 2009

2009年7月12-15日期間，APEC Climate Symposium配合今年APEC相關會議在新加坡舉行，依據去年在祕魯的科學指導會議的決議，也在新加坡召開年度會議，以提高APEC各經濟體對短期氣候季節預報及長期氣候變遷推估相關工作與議題的了解，今年的推動主題是「氣候預測與應用：氣候調適策略的關連性」（Climate Prediction and Application: Relevance for Climate Adaptation Strategies），由於我目前為APEC Climate Center的Affiliated Scientist，通常會應邀參加年度會議。

#### 1. 參加會議經過

會議舉行的地點在新加坡的 Holiday Inn Atrium Singapore，各國與會人員也都住在該飯店，會議第一天7月12日，主要是working group的會議，APEC各經濟體的代表會針對他們參與的相關氣候預報工作進行進度報告，並且討論未來工作的計畫與重點，代表中央氣象局參與此working group為胡志文博士，介紹中央氣象局現階段的季節預報系統的架構與進展，其他所有參與經濟體也分別說明各自的工作重點。

正式會議是由7月13日進入會議議程，APEC會議的秘書與災害預防特別小組的主持人針對APEC科學與技術政策方面的議題報告為大會揭開序幕，接著的議程事先由APCC的科學指導委員會成員針對氣候模擬與預報的新方向進行報告，隨後是來自美國NASA、澳洲氣象局、日本氣象廳、台灣中央氣象局、加拿大環境預報中心、中國國家氣象局、美國環境預報中心以及其他大學氣候相關研究系所等單位介紹在季節預報方面的進展，其中也有幾篇針對區域颱風

季節預報的部份加以討論。下午的議程開始觸及針對氣候預報資訊的應用與調適部份的議題，但也涵蓋新加坡、香港等氣象單位在季節預報方面的工作，我的報告偏重在應用方面，主要是討論熱浪與寒潮等溫度異常對大台北地區老年人因心血管與呼吸道疾病死亡率的影響，由於會議中並沒有其他針對公共衛生方面的應用成果，我的研究結果引起相當多的討論。7月14日的會議集中在氣候預報的應用外，也有部份的報告討論氣候變遷方面的議題，包含祕魯、紐西蘭、俄羅斯、巴布亞新幾內亞等國的氣象水文單位的報告，最後一天主要是分別有科學指導委員會與教育訓練課程的進行，來自美國海軍氣象研究所以及台灣的張智北教授是科學指導委員會的成員之一，會中積極建議APCC應在APEC各經濟體中扮演積極的角色，提供季節預報與氣候變遷研究的專家諮詢。我則參與部份的教育訓練課程，在降尺度應用、機率預報、以及APCC所新發展的CLIK氣候預報應用工具程式都有所接觸。

## 2. 與會心得與建議

APEC相關會議是臺灣少數可以用經濟體的名義正式參與的國際活動，對中央氣象局而言，是難得可以在國際上發聲的機會，季節氣候預報與氣候變遷議題，也是氣象局現階段經建計畫的重要主軸之一。目前透過一位科技中心研究員參與working group活動，配合進行氣候預報模式的模擬工作，以及運用本計畫提高氣象局參與程度的做法，還是顯得相當被動。即使過去幾年也曾經透過計畫或直接派員前往APEC氣候中心進行超過半年以上的訪問，還是會受到人力資源的限制，無以為繼。未來，也許氣象局應該考慮在局內成立氣候工作小組，針對氣象局業務中氣候相關的任務積極規劃工作項目，以氣象局的工作重點及人力的強項，有計劃地逐一建立氣候研究任務群，並將成果透過APEC氣候中心在各APEC經濟體的交流管道展現，希望可以積極提升氣象局的研究能量與國際參與。以未來短期氣候變化與長期氣候變遷推估越來越受重視的趨勢下，這似乎是氣象局無法逃避的任務。

# 赴美學習氣象先進資料同化與預報模式系統發展技術心得報告

蕭玲鳳  
中央氣象局

## 摘要

天氣研究與預報模式 (Weather Research and Forecast Model ; WRF) 由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research ; NCAR) 所發展，為中央氣象局目前使用的區域預報模式之一。有鑑於觀測資料不斷的增加，特別是非傳統觀測資料，如何使用觀測資料決定最佳初始場，已成為目前模式發展重要的項目之一。藉由目前氣象上最新且有效之四維變分 (4-dimensional variational, 4DVAR) 資料同化法進行觀測資料同化配合本局新一代高速電腦系統，期望能有效提升颱風預報準確率。另外，在預報模式系統發展方面，成功地將颱風移置 (Relocarion) 技術加入 WRF 模式。此技術除能改進颱風初始位置外，亦能有效地結合同化颱風虛擬觀測資料，達到提升颱風初始場與預報能力的目的。

## 一、過程

赴美時間為 2009 年 2 月 20 日至 2009 年 12 月 4 日，行程與工作內容概述如下表所示：

日期	地點與相關工作內容
2009/2/20	抵達美國丹佛
2009/2/23~ 2009/2/27	辦理報到並處理電腦使用等相關申請工作
2009/3/2	與郭英華、黃向宇、張昕博士等討論工作內容
2009/3/3~ 2009/3/20	使用新版本的 WRF 與 WRFDA code
2009/3/23~ 2009/3/31	CWB 與 NCAR 討論本年度工作內容
2009/4	進行 TC relocation scheme 加入 WRF 模式 新版 4DVAR code 架設於 CWB 超級電腦
2009/5	成功完成 TC relocation scheme，並進行測試 測試 4DVAR 對颱風預報的能力
2009/6/1~ 2009/6/22	準備 WRF workshop 發表 WRF TC relocation scheme 進行 multi-incremental 4DVAR 架設於 CWB 超級 電腦

2009/6/23~ 2009/7/3	參加第十屆 WRF workshop 與 tutorial，並於會議發表「TYPHOON RELOCATION IN CWB WRF」一文 研討會網頁： <a href="http://www.mmm.ucar.edu/events/2009_wrfusers/agenda.php">http://www.mmm.ucar.edu/events/2009_wrfusers/agenda.php</a>
2009/7	針對 TC relocation scheme 研究個案進行深入分析 測試 multi-incremental 4DVAR 對颱風預報的能力
2009/8~2009/9	撰寫 TC relocation scheme 研究個案論文 測試 new bogus 資料在 4DVAR 對颱風預報的影響
2009/10	完成 TC relocation scheme 研究個案論文 測試 3DVAR 與 4DVAR 對颱風預報之差別
2009/11	投稿「A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF」一文至美國氣象學會期刊 Monthly Weather Review 撰寫 WRF 4DVAR 之工作報告
2009/12/1~ 2009/12/3	準備並報告赴美期間之工作內容
2009/12/4	美國丹佛回台北

## 二、心得

WRF (Weather Research and Forecasting) Model 是由 NCAR、NCEP、FSL (Forecast System Laboratory；美國預報系統實驗室)、AFWA、Oklahoma University 以及其他學術研究人員目前所致力共同發展的最新一代數值天氣預報及資料同化系統，可適用於水平解析度約 1 至 10 公里，並可提供研究以及作業之應用。WRF 4DVAR 的優點在於同化時間窗區給定觀測資料，透過數值預報模式的動力限制調整與伴隨模式反覆積分，依據誤差協方差矩陣適切地調整模式中其他的控制變數。於單點實驗測試中，發現 4DVAR 較 3DVAR 為優，特別在分析增量中有 flow-dependent 與背景誤差協方差隨時間變化的特徵。颱風渦旋植入資料包括動量場與質量場，大部分的研究使用同化風場與海平面氣壓。在此加入同化溫度與相對溼度等質量場觀測資料，並針對 2008 年辛樂克颱風個案模擬研究。由路徑模擬得知同化動量場與質量場的渦旋資料有較好的結果，並且與同化動量場的實驗較大的差異在颱風通過台灣地形前後。模擬颱風中心氣壓顯示由於 4DVAR 同化海平面氣壓，故分析場颱風差異較小，但隨時間積分差異逐漸變大。主要差異在中高層，其中以同化動量場與質量場的渦旋資料有較接近實際且較強的颱風環流。分析海平面氣壓場

和地表熱通量模擬顯示，因為同化完整的動量場和質量場颱風結構，颱風環流較強且配合結構較好的地表熱通量。另一方面，相同的結果亦顯示在分析兩實驗預報場垂直結構。同化動量場與質量場的渦旋資料有發展較好的低層輻合與高層輻散的垂直配置，加以眼牆附近的上升氣流，有助於颱風熱力和動力結構上的發展。綜合上述，WRF 4DVAR 分析同化渦旋動量場與質量場得到較好的熱力和動力的初始結構。其經由低層輻合產生中層的上升運動，造成水氣凝結並釋放潛熱，透過第二類條件不穩定機制的模擬，生成動力與熱力結構較好的颱風渦旋。因此，對此辛樂克颱風個案在分析中加入同化植入質量場和動量場的渦旋，其路徑和結構有較好的模擬結果。

WRF 模式預報颱風路徑往往會發現初始颱風位置和觀測位置差異過大的情形。產生颱風初始位置偏移的原因可能來自全球模式的初始場或是模式本身的預報場，抑或是植入颱風渦旋資料經過客觀分析後產生位置上的差異等因素。過去颱風初始化的研究受限於觀測資料無法直接用於模式，導致預報模式於初始模擬期間產生動力與熱力不一致的情形。本研究之颱風渦旋移置技術為 Kurihara 渦旋初始化方法的延伸，颱風環流則是使用模式產生的颱風擾動加以取代並移至觀測的颱風中心位置。颱風渦旋移置技術已使用於 NCEP 的 GFS (Global Forecast System) 模式 (Liu et al. 2000) 和氣象局 NFS (Nonhydrostatic Forecast System) 模式 (Liou 2004)。此技術的發展主要來自 Kurihara et al. (1995) 將颱風渦旋從首次猜測場 (first guess field) 中分離出來，再移動颱風至觀測位置。此颱風渦旋可避免模式動力和物理不一致，以及其所造成模式的 spin up 問題。利用發展完成的颱風移置技術測試 2008 年辛樂克與薔蜜颱風共 58 個個案，結果呈現若不考慮地形因素，大約高達 70% 個案需要經過颱風移置技術的處理。此顯示颱風六小時預報的中心位置大致上皆超過一個網格點的誤差，故更突顯颱風移置技術的重要性。比較有無使用颱風移置技術其颱風路徑預報，結果發現分析場颱風位置差別最大，採用颱風移置技術有超過 50% 的改進能力。在預報方面，平均則有 38% 颱風路徑預報的提升，最少也有改進 28%。分析颱風移置技術改進的原因，由海平面氣壓場可見颱風移置技術的建置使得颱風環流結構較呈現圓形分布。反之，若未使用颱風移置技術颱風結構明顯有拉伸變形的趨勢。此結果說明颱風初始位置和同化颱風資料的位置距離較大時，分析場則呈現扭曲的颱風中心，導致模式初期需積分一段時間以達到動力和物理平衡。甚者，可發現預報前期 12 小時颱風路徑異常轉折的現象。因此，預報結果 72 小時颱風路徑亦較使用颱風移置技術差。

### 三、建議

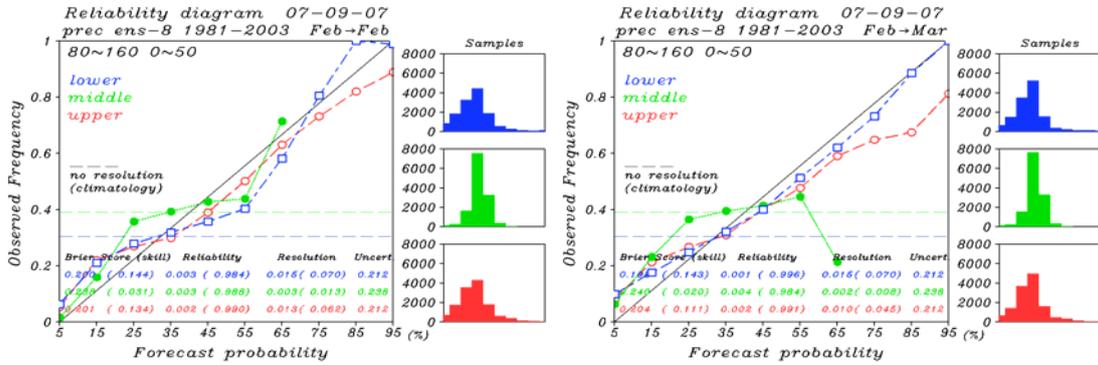
目前 WRF 4DVAR 在切線與伴隨模式中皆為簡單的物理過程，此對颱風預報可能較為局限。因為颱風尺度較小，且有強烈的潛熱釋放，此明顯動力和熱力的變化更需要模式的物理過程。另外，對於觀測資料的使用可能會因為與

初始背景場相差甚大而拒絕好的觀測資料。為此，若能使用多次 outer-loop，亦即將分析資料的偏差進行多次最小化 (minimization) 過程。不僅能使分析解越趨於準確，亦能對觀測資料能夠有效地使用。更能呈現 WRF 4DVAR flow-dependent 的特性。

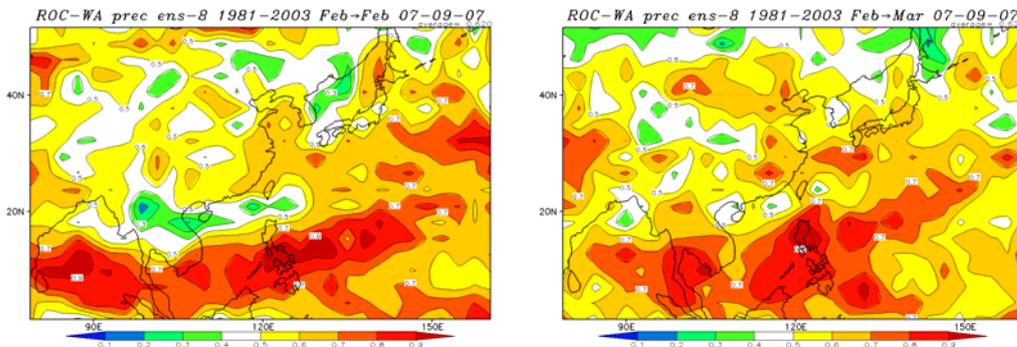
另一方面，颱風移置技術目前已發展完成並將成果發表於國際學術會議與期刊中。但是有鑑於颱風移置技術中設計的颱風環流是根據典型颱風結構，所以對於颱風結構特殊或較弱的颱風，其環流較難定義，故颱風環流的移置有其困難度。因此，未來亦將針對此類型颱風做進一步的研究與探討，以更加提升颱風初始化與預報能力之目的。

附錄三

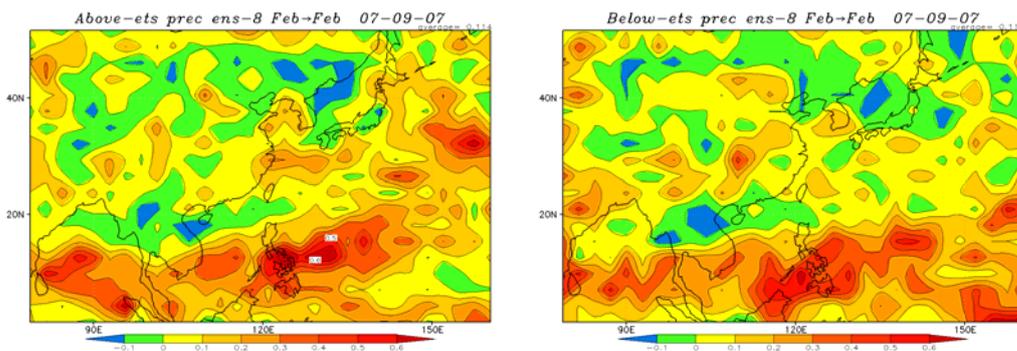
以二月起始，預報二月(左圖)與三月(右圖)之 **Reliability Diagram and Brier Skill Score** :



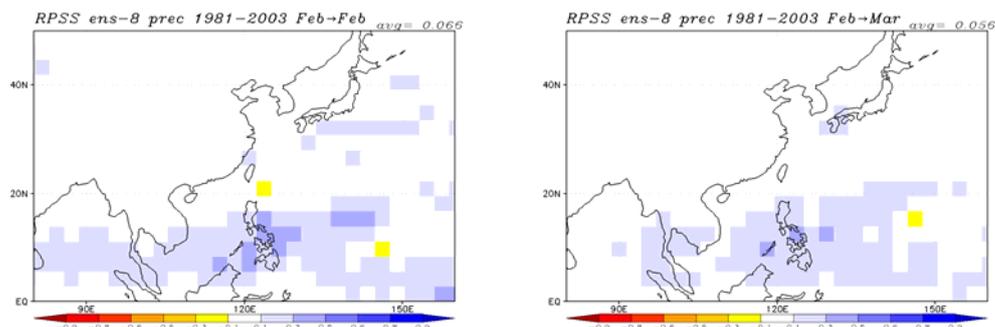
以二月起始，預報二月(左圖)與三月(右圖)之 ROC 技術得分：



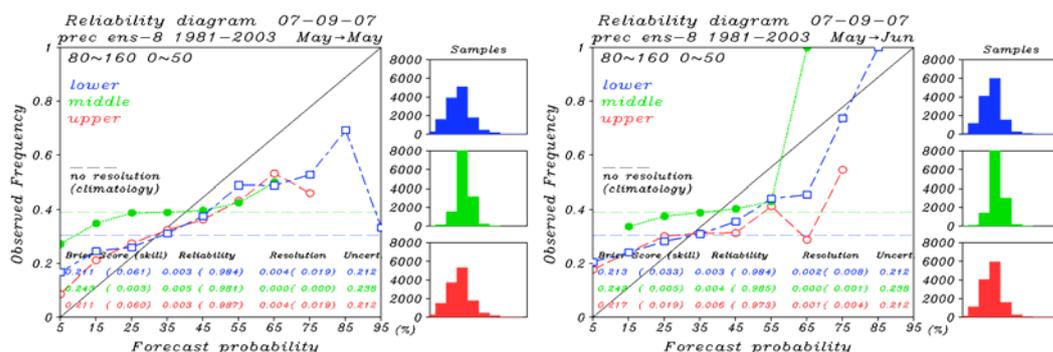
以二月起始，預報二月(左圖)與三月(右圖)之 ETS 技術得分：



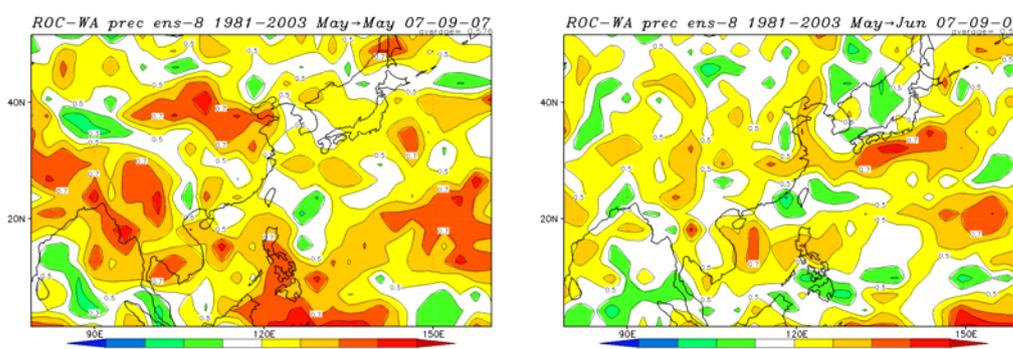
以二月起始，預報二月(左圖)與三月(右圖)之 RPSS 技術得分：



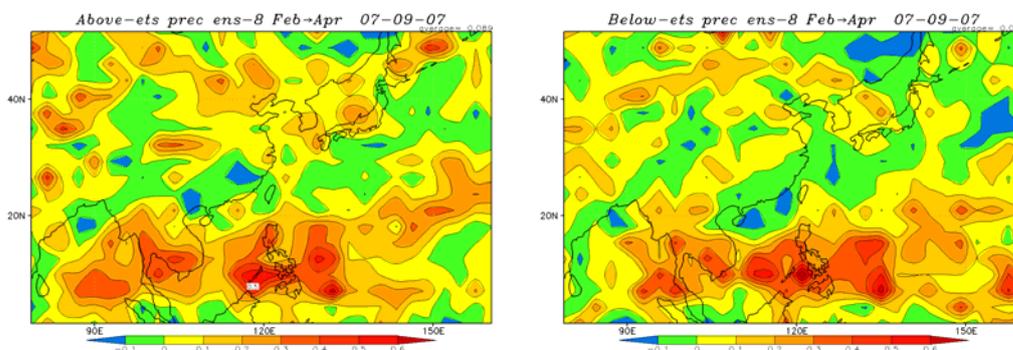
以五月起始，預報五月(左圖)與六月(右圖)之 **Reliability Diagram and Brier Skill Score** :



以五月起始，預報五月(左圖)與六月(右圖)之 ROC 技術得分：



以五月起始，預報五月(左圖)與六月(右圖)之 ETS 技術得分：



以五月起始，預報五月(左圖)與六月(右圖)之 RPSS 技術得分：

