

# 水庫集水區跨尺度定量降雨預報及入庫流量推估

## 整合技術發展

### The development of cross-scale precipitation and runoff estimation technique for reservoir watersheds

主管單位：財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

徐理寰 吳明璋 江宙君 黃麗蓉 高宏名 蕭玲鳳

Hsu, Li-Huan Wu, Ming-Chang Chiang, Chou-Chun

Hwang, Li-Rung Kao, Hong-Ming Hsiao, Ling-Feng

財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

### 摘要

本研究以石門、曾文水庫集水區為研究區域，研發不同時間尺度之降雨預報及入庫流量推估技術，希望能於洪旱時期提供台灣地區水庫管理單位有效資訊，有助水資源管理之效率。本研究發展小範圍、高精度之水庫集水區系集統計預報技術，利用颱風中心台灣定量降雨系集預報實驗(TAPEX)之 72 小時預報雨量，透過機率撮合法(PM)以及遺傳演算法(GA) 2 種系集統計整合預報技術發展水庫集水區未來 24 小時總雨量之推估，且將 1 至 3 天水庫集水區之定量降雨預報結合運動波-地貌瞬時單位歷線模式(KW-GIUH)，發展水庫集水區入庫流量推估技術，以過去歷史颱風個案進行評估，初步結果顯示在水庫集水區之雨量、流量推估值皆能得到合理之結果。除此以外，本研究使用 MPAS 全球模式進行台灣春季降雨實驗及發展台灣分區春季降雨推估技術，評估過去 10 年台灣春季降雨後報實驗結果顯示，MPAS 全球模式大致能掌握春季降雨趨勢之年際變化。

**關鍵詞：**水庫集水區、台灣定量降雨系集預報實驗、機率撮合法、遺傳演算法、運動波-地貌瞬時單位歷線模式、MPAS 全球模式

### Abstract

A cross-scale rainfall-runoff estimation study is conducted for Shinmen and Tsengwen Reservoir watersheds. In this study, 72 hours rainfall forecasts are obtained from the Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment (TAPEX) and improved by the Genetic Algorithm (GA) and Probability-Matched (PM) methods. The KW-GIUH model then uses the rainfall forecasts as input to generate the reservoir inflow. There were six typhoon events used to evaluate the technique performance. The results show that the errors of peak inflow and its occurrence time are within 10% and 3 hours, respectively. For long range forecasts such as seasonal rainfall forecasts, the study uses MPAS global model for

spring rainfall estimation. To evaluate the model performance, Taiwan was geographically divided to four regions and spring rainfall from 2005 to 2014 was used. The ensemble hindcast results indicate that the simulated monthly rainfall is reasonable according to the seasonal tendency, but varied among the members. The model results sometimes underestimate the torrential rainfall events in February. However, the model generates simulations with convinced decadal tendency in April.

**Keywords** : Reservoir watershed, TAPEX, Genetic Algorithm, Probability-Matched method, KW-GIUH, MPAS.

## 一、前言

在全球氣候變遷的影響下，近年來世界各地極端天氣現象的發生頻率漸增。台灣地區位於西北太平洋海域之樞紐位置，每年依季節分別受到梅雨、颱風及中緯度鋒面的影響。因此，台灣地區年平均降雨量約可達 2,500 毫米以上，但由於台灣地區河川坡陡流急，水資源不易蓄存利用，且降雨時空分布不均勻、豐枯差異明顯，若無法針對水資源進行預先的管理與調度，常易造成水資源供需失調，對社會民生與經濟產生重大衝擊。本研究以石門、曾文水庫集水區為研究區域，研發不同時間尺度之降雨預報技術，應用颱風中心「台灣定量降雨系集預報實驗」(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)之 72 小時預報雨量，發展小範圍、高精度之水庫集水區系集統計預報技術，並將 1~3 天水庫集水區之定量降雨預報結合運動波-地貌瞬時單位歷線模式(KW-GIUH)，發展水庫集水區之入庫流量推估技術。除此以外，本研究使用 MPAS 全球模式進行台灣春季降雨實驗及發展台灣分區春季降雨推估技術，評估過去 10 年台灣春季降雨後報實驗結果

## 二、高精度水庫集水區系集統計預報技術發展

本研究以現有颱風中心定量降雨系集實驗(TAPEX)為基礎，分別應用機率撮合法(Probability Matching, PM)以及遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)兩種系集統計整合技術，針對石門水庫與曾文水庫集水區，評估強降雨個案未來 24 小時之總雨量推估表現。

### 2.1 遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)

遺傳演算法，又名基因演算法，係由 John H. Holland 於 1975 年提出的一種基於自然界演化過程而發展的最佳化理論(Holland, 1992)。其基本精神係仿效生物界中物競天擇、適者生存的自然進化法則。藉由從上一代物種中選擇出適應力較優的個體進行繁衍，隨機互換彼此的優良基因資訊，以期產生比上一代個體適應性更佳的后代。如此不斷重複，最終將產生適應力最強的最佳物種。遺傳演算法的最大優點即是不需事先對欲求解的問題做過多假設，只要透過合適的基因編碼(Gene Coding)與目標函數(Object Function)的設計即可與欲解決的問題結合，進行最佳解的搜尋。而且，因遺傳演算法執行時係同時考慮搜尋解空間上多個可行解，故可較快速獲得全域最佳解(Global Optimum)，並避免落入區域最佳解(Local Optimum)的機會。近年來，遺傳演算法技術已被廣泛運用於不同領域中進行最佳化相關研究，例如模式參數、權重與架構最佳化(Wang, 1997; Mohan, 1997; Blanco et al., 2001; Jain and Srinivasulu, 2004; Lin and Wang, 2007; Lin et al., 2013)等等。

### 2.2 機率撮合法(probability-matched, PM)

本研究參考過去機率撮合(probability-matched, PM)方法在雷達降雨、數值實驗上之應用經驗(Rosenfeld et al. 1993, 1994, 1995; Ebert 2001; Fang and Kuo 2013)，將其利用於 TAPEX 系集實驗的基礎上，發展出適合之短期定量降雨預報技術。根據颱風洪水中心過去校驗之結果顯示，系集平均(ensemble mean)在 130 mm/24hrs 之門檻值以上之強降雨事件，其機率密度函數往往小於觀測值，表示在強降雨事件常常有低估的情形；而從累積分布函數來看，系集成員與觀測於 70 mm/24hrs ~ 80 mm/24hrs 之門檻值時，累積分布函

數皆為0.93，顯示整體系集成員相較系集平均來說更有機會能反應出強降雨事件。由整體趨勢來說，系集平均雖然可以反應降雨分布的空間特性，但是往往對於強降雨事件的降雨強度有所低估，各系集實驗中發生機率分布較系集平均更接近實際雨量事件發生的機率分布。因此，PM方法將TAPEX系集平均的雨量值進行排序，得到排序後之網格點上的雨量空間分布資訊，再將各系集實驗成員中網格點上雨量值也進行排序，最後將系集成員雨量資訊依照順序放入系集平均排列後的網格點上(圖1)。如此能同時保持較正確的系集平均雨量空間分布，又能夠修正系集平均雨量值使其更接近觀測雨量值。利用2012年TAPEX系集實驗M01至M19共19個系集成員做為樣本，共194個dtg初始時間之實驗進行全台之PM方法測試之全台24小時累積雨量最大值，結果顯示在發生雨量大值區域，PM方法能有效將系集平均高值提高，但在較低雨量時有略微高估的情況。

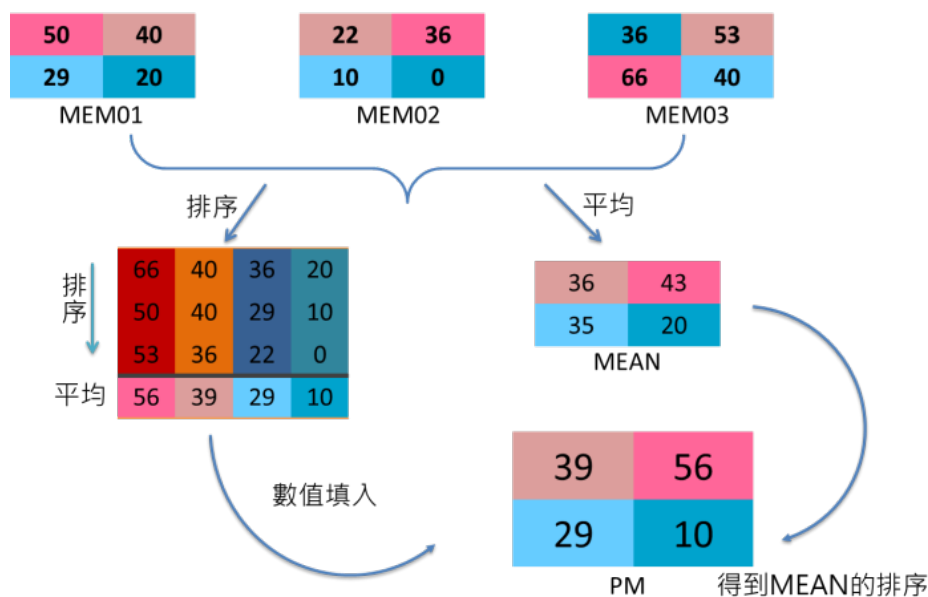


圖1、機率撮合(probability-matched, PM)方法流程圖。

### 2.3 水庫集水區強降雨事件分析評估

針對石門水庫與曾文水庫集水區，今年度分別應用機率撮合法(PM)以及遺傳演算法(GA)兩種系集統計整合技術評估強降雨個案未來24小時總雨量推估之表現。以今年麥德姆與鳳凰颱風為例，分析每6小時預報之未來24小時總雨量資料。其中PM方法首先以系集平均的雨量空間分布為基準，重新分配各系集實驗中雨量值於模式中之格點位置，修正系集平均雨量使其接近觀測雨量值，再分別將預報雨量值內插至石門、曾文水庫集水區內之測站進行評估。GA方法則為即時比對各雨量測站位置處之過去6小時內各系集成員預報雨量值與觀測雨量值，評估各系集成員表現並據以訂定各系集成員間的最佳組合權重，使得加權組合後之預報值與觀測值誤差最小，之後即應用此組最佳組合權重即時整合與修正各系集成員在石門、曾文水庫集水區內測站未來24小時之累積雨量預報值。應用PM與GA於石門水庫集水區之預估結果如圖2所示，PM、GA與系集平均之推估值均高於實際降雨值，麥德姆颱風事件期間三者之均方根誤差分別為89.4 mm、124.6 mm、73.1 mm；鳳凰颱風個案期間三者之均方根誤差分別為58.2 mm、76.7 mm、55.0 mm。有關曾文水庫集水區，PM、GA與系集平均之推估值均與實際降雨值十分接近，麥德姆颱風

風事件期間三者之均方根誤差分別為63.3 mm、80.7 mm、46.1 mm；鳳凰颱風個案期間三者之均方根誤差分別為24.9 mm、42.2 mm、33.2 mm。整體而言，根據2場個案測試結果顯示以系集平均最接近實際值，PM次之，而GA則易高估。由於目前個案數尚少，初步測試未能有一致性的結果，未來預計將納入更多個案持續進行整體性之評估。

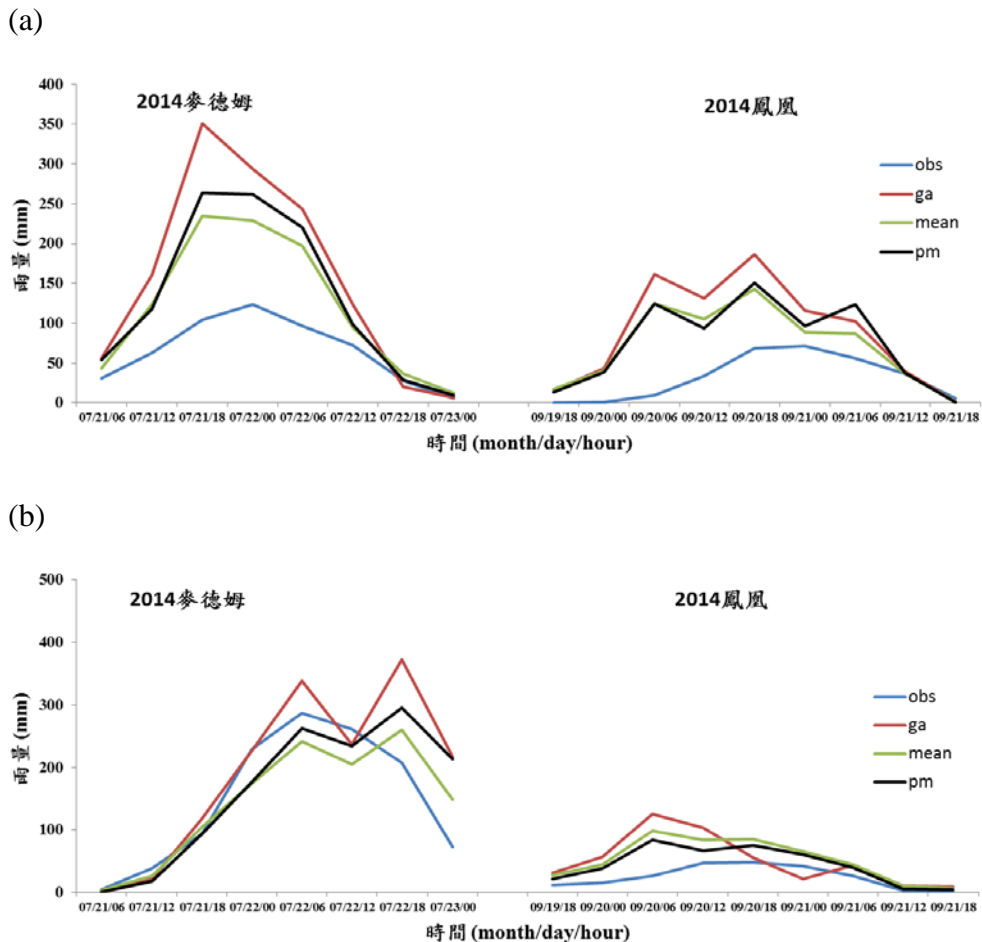


圖2、麥德姆颱風與鳳凰颱風個案在(a)石門水庫及(b)曾文水庫集水區之未來24小時降雨量預報結果。

### 三、水庫集水區降雨逕流推估技術發展

本研究以運動波-地貌瞬時單位歷線模式 KW-GIUH(Lee and Yen, 1997; Lee and Chang, 2005)進行水庫集水區入庫流量推估整合技術之發展。為評估模式所模擬流量與實測流量之差異比較，採用統計及水文學上常用的三種指標，分別為洪峰流量誤差百分比、洪峰到達時刻誤差以及效率係數。洪峰流量誤差百分比表示為：

$$E_{Q_p}(\%) = \frac{(Q_p)_{sim} - (Q_p)_{rec}}{(Q_p)_{rec}} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $(Q_p)_{sim}$ 為模擬洪峰流量， $(Q_p)_{rec}$ 為記錄洪峰流量。洪峰到達時刻誤差可表示為：

$$ET_p = (T)_{sim} - (T_p)_{rec} \quad (2)$$

其中 $(T_p)_{sim}$ 為模擬洪峰到達時間， $(T_p)_{rec}$ 為記錄洪峰到達時間。效率係數可表示為：

$$CE = \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{rec}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{rec}(t) - \bar{Q}_{rec}]^2} \quad (3)$$

其中 $\bar{Q}_{rec}$ 為記錄流量之平均值， $CE$ 值愈接近1表示模式預測效能愈佳。

本年度已完成利用 KW-GIUH 逕流推估模式建置石門水庫與曾文水庫兩個集水區之入庫流量推估技術。在石門水庫集水區，分別以 2009 年莫拉克颱風及 2012 年蘇拉颱風進行模式參數檢定，後以 2013 年蘇力颱風驗證，如圖 3(a)、(b)、(c)所示，不論在洪峰流量模擬(莫拉克颱風： $E_{Qp} = -1.21\%$ ；蘇拉颱風： $E_{Qp} = -6.49\%$ ；蘇力颱風： $E_{Qp} = -1.79\%$ )、洪峰到達時刻(莫拉克颱風： $E_{Tp} = 1 \text{ hr}$ ；蘇拉颱風： $E_{Tp} = 0 \text{ hr}$ ；蘇力颱風： $E_{Tp} = 2 \text{ hr}$ )或歷線上升段與退水段模擬(莫拉克颱風： $CE = 0.92$ ；蘇拉颱風： $CE = 0.78$ ；蘇力颱風： $CE = 0.94$ )，大致上可獲得良好的模擬結果。有關曾文水庫集水區，以 2007 年聖帕颱風及 2008 年卡玫基颱風來檢定，以 2008 年辛樂克颱風作驗證，如圖 3.3(d)、(e)、(f)所示，在洪峰流量模擬(聖帕颱風： $E_{Qp} = -6.02\%$ ；卡玫基颱風： $E_{Qp} = -0.09\%$ ；辛樂克颱風： $E_{Qp} = 8.62\%$ )、洪峰到達時刻(聖帕颱風： $E_{Tp} = 3 \text{ hr}$ ；卡玫基颱風： $E_{Tp} = 1 \text{ hr}$ ；辛樂克颱風： $E_{Tp} = 1 \text{ hr}$ )或歷線上升段與退水段模擬(聖帕颱風： $CE = 0.92$ ；卡玫基颱風： $CE = 0.94$ ；辛樂克颱風： $CE = 0.93$ )。以上結果顯示 KW-GIUH 模式適用於示範水庫集水區之降雨逕流歷程模擬。後續研究工作將結合定量降雨系集實驗 (TAPEX) 之雨量結果，進而推估颱風個案之水庫入流量。

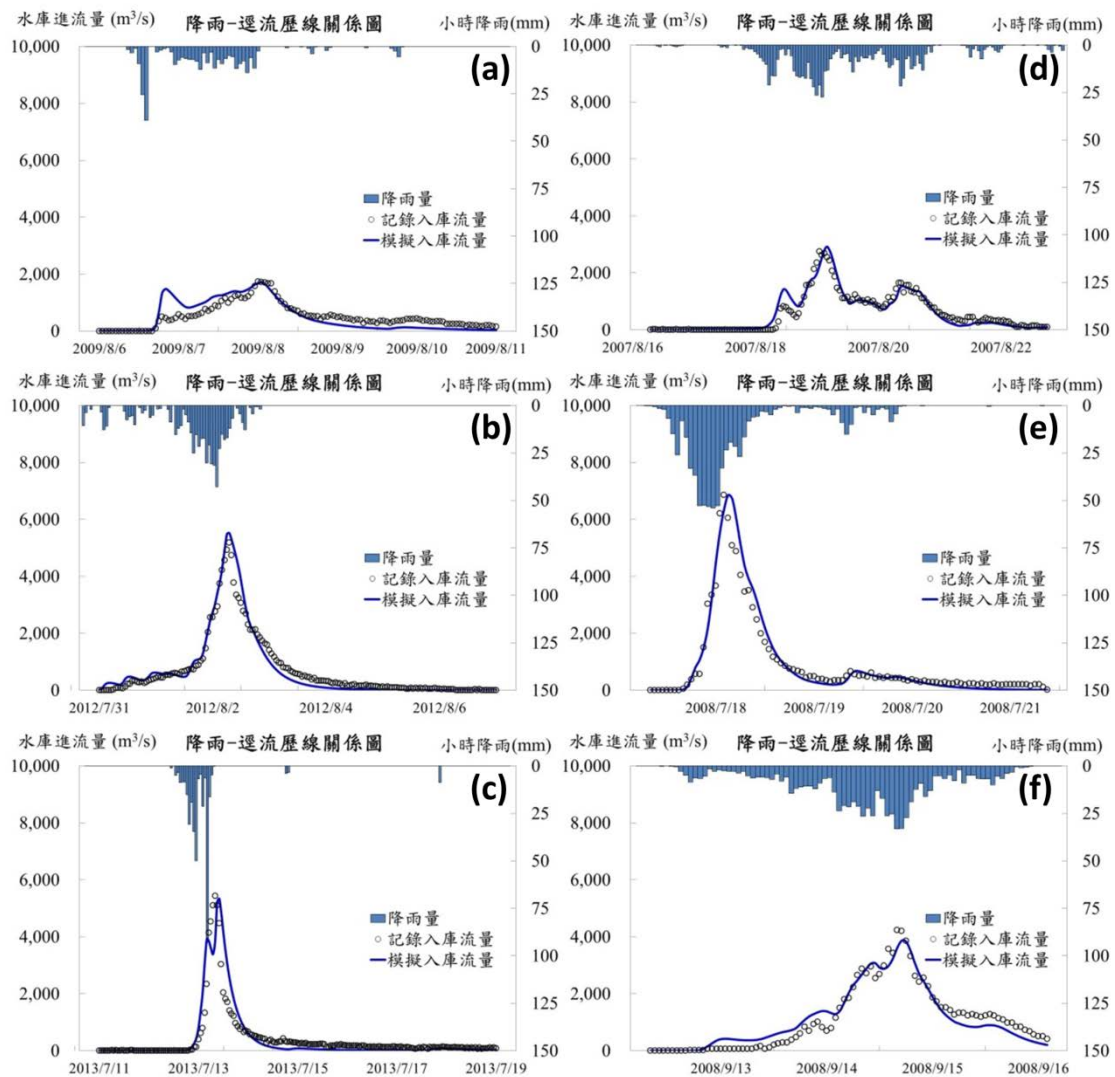


圖3、石門水庫集水區之(a)2009年莫拉克颱風、(b)2012年蘇拉颱風、(c)2013年蘇力颱風之降雨逕流模擬結果及曾水庫集水區之(d)2007年聖帕颱風、(e)2008年卡孜基颱風、(f)2008年辛樂克颱風之降雨逕流模擬結果。

#### 四、春季季節性降雨推估技術發展

##### 4.1 模式設定與實驗設計

Model for Prediction Across Scales (MPAS)高解析度全球模式 MPAS 全球模式由美國大氣科學中心(NCAR)發展，為球面六角形 C 網格配置，並配備有全球均勻或局部可變解析度網格設定，同時模式中包含 WRF ARW 之物理參數化方法(Skamarock et al. 2012)。台灣颱風洪水研究中心自 2012 年起與 NCAR 合作並引進，建置於颶洪中心計算伺服器，開始進行每日準作業化預報實驗。本計畫針對台灣設計春季降雨推估實驗，以 120 km 均勻水平網格解析度配置，如圖 4(a)，進行冬末春初（1 至 4 月共 120 天）降雨實驗，實驗分為 2005 年至 2014 年後報實驗與 2014 年之預報實驗，其中對流參數化方法皆設定為 Kain-Fritsch 參數化法，初始條件則使用 NCEP GFS 分析場，兩組實驗皆無使用資料同化。2005 年至 2014 年後報實驗中以每年 1/1 至 1/10 之 GFS 分析場為初始條

件，設計 10 組系集實驗，每日使用 NCEP NOAA RTG SST（海溫）分析場更新下邊界條件。在 2014 年預報實驗中除了初始條件為每年 1/1 至 1/10 之 GFS 分析場外，分別使用 NOAA CFSV2 模式兩組預報海溫為下邊界條件，共計產生 20 組系集實驗。圖 4(b) 為台灣附近網格配置與石門、曾文水庫集水區位置。首先將台灣依照中央氣象局劃分之北、中、南、東（N、C、S、E）分為四區，石門水庫集水區位置大約落在北區，而曾文水庫集水區大約在中、南區交界。接著將模式格點雨量以面積權重內插至台灣北、中、南、東四區，且與四區中之氣象局測站平均之觀測月雨量進行比對以評估模式表現。以北部為例，圖 4(c) 為包含北部之 3 個模式網格點，定義 3 網格月雨量分別為 R(1)、R(2) 及 R(3)，3 網格分別佔有北部面積比例為 0.9%、60.1% 及 39%，則北部推估降雨即為  $R(1) \times 0.9\% + R(2) \times 60.1\% + R(3) \times 39\%$ 。

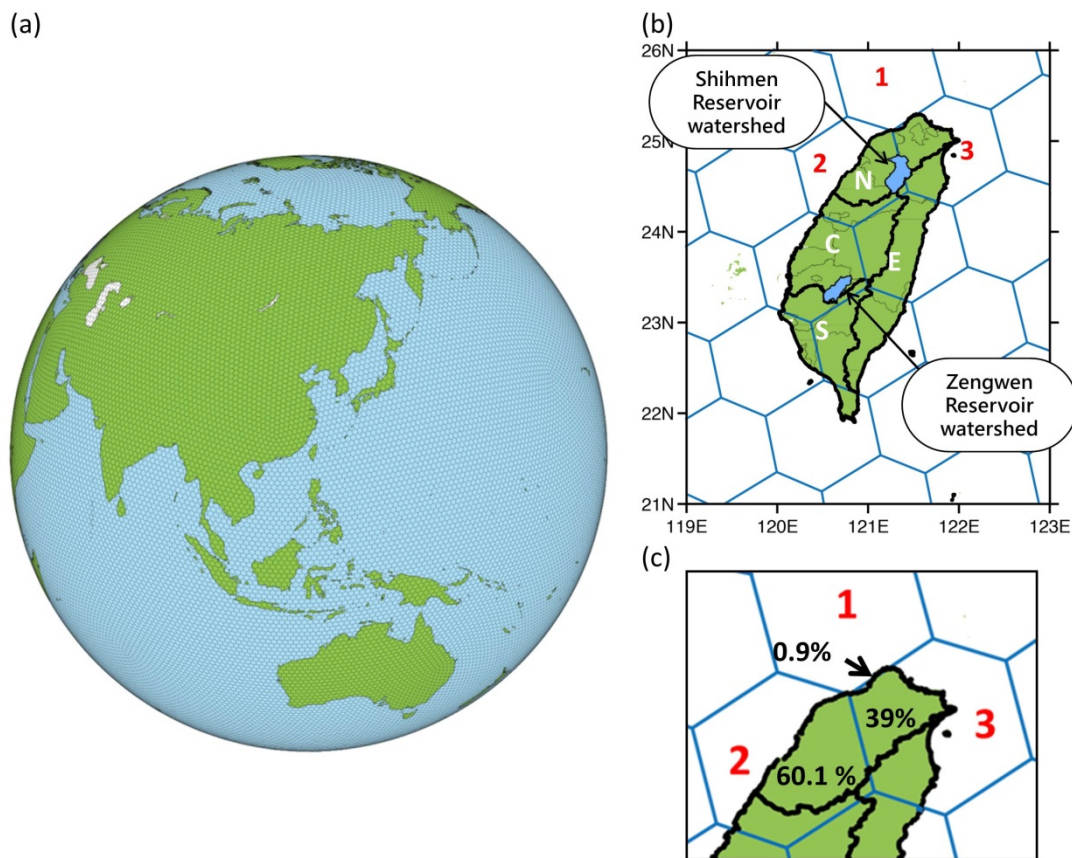


圖 4、MPAS 全球模式台灣春季降雨實驗設定(a)120 km 解析度均勻水平網格配置、(b) 台灣附近之網格配置、台灣分區及水庫集水區位置、及(c)包含台灣北部之網格點與對應之面積權重比例。

#### 4.2 台灣春季降雨推估實驗評估

圖 5、圖 6 以及圖 7 分別代表 2005 至 2014 年 2、3、4 月之台灣四區月雨量年際變化、10 年後報平均以及 2014 年預報箱型圖。圖上藍色橫線為系集實驗平均，紅色折線為觀測區域平均月雨量。從後報實驗結果可知，MPAS 模擬降雨隨時間增加變異度，平均來說模式模擬可呈現台灣 2 至 4 月月雨量增加之趨勢，但 2 月模擬雨量會受到鋒面在台灣造成的短期劇烈降雨影響而在北部表現低估，在中南部表現則略為高估；



3月模擬雨量北部符合觀測，中南部則略為高估；而在4月MPAS模式大致上能掌握春季降雨趨勢之年際變化，雨量值在台灣各地也大致符合觀測。在2014年預報表現上，2、3月雨量北部略為低估，中南部表現則符合觀測；4月雨量北部符合觀測，中南部則略為高估。

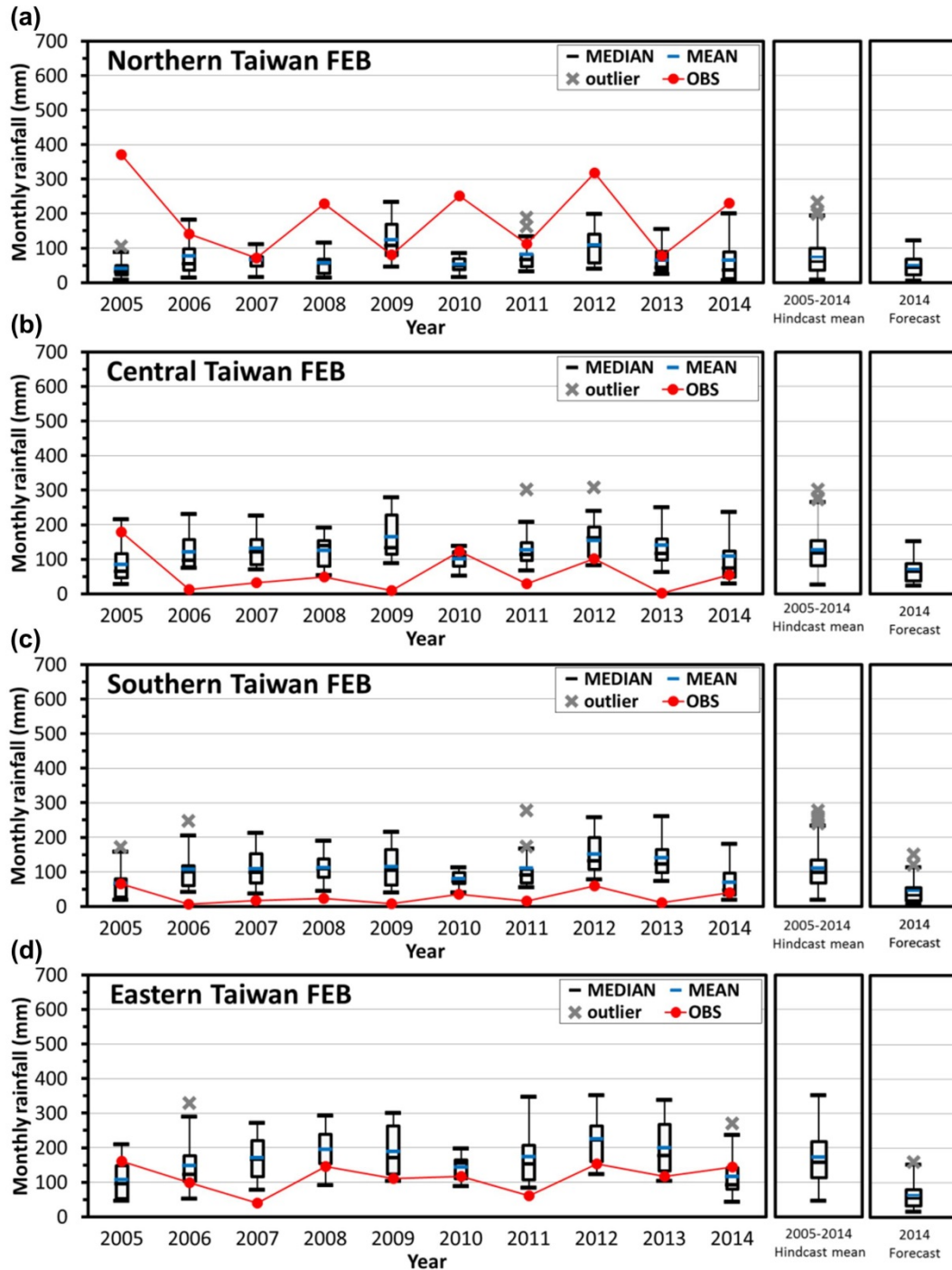


圖 5、2005 至 2014 年 2 月之(a)北、(b)中、(c)南及(d)東部之月雨量年際變化、10 年後報平均及 2014 年預報之箱型圖。

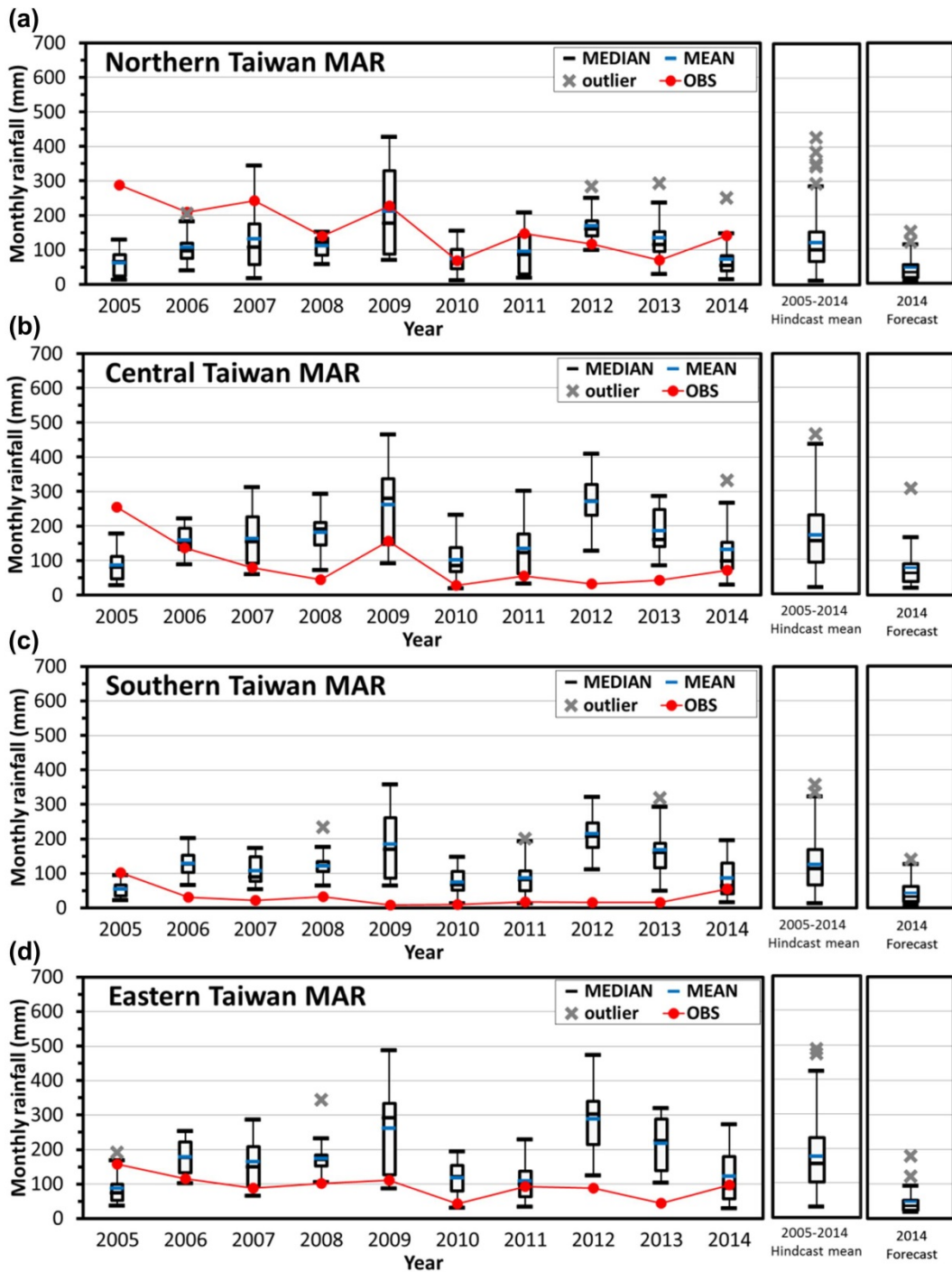


圖 6、2005 至 2014 年 3 月之(a)北、(b)中、(c)南及(d)東部之月雨量年際變化、10 年後報平均及 2014 年預報之箱型圖。

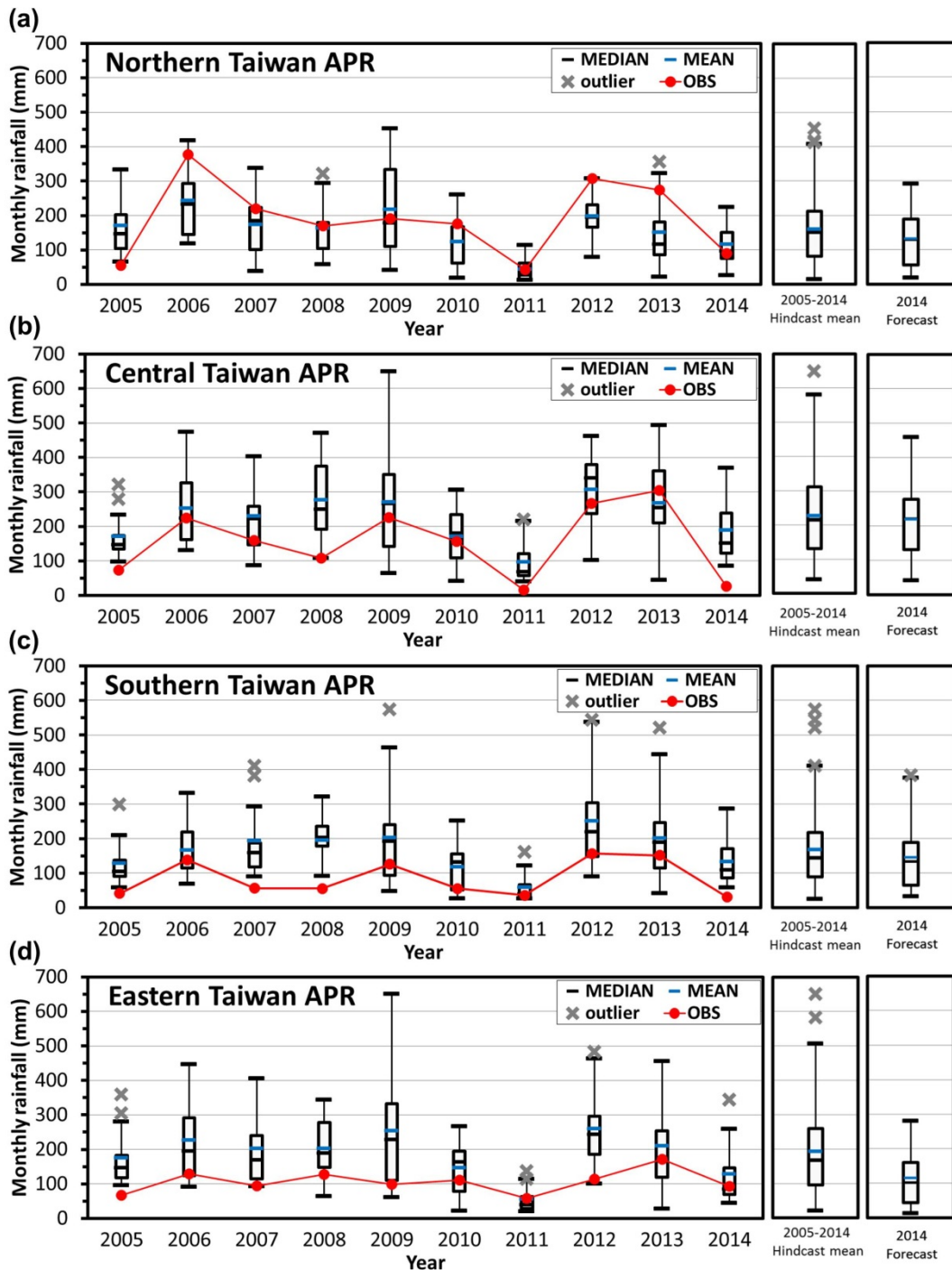


圖 7、2005 至 2014 年 4 月之(a)北、(b)中、(c)南及(d)東部之月雨量年際變化、10 年後報平均及 2014 年預報之箱型圖。

## 五、總結與未來工作

本計畫目的為針對石門與曾文水庫，研發配合水庫供水操作與水資源規劃所須之短期定量降雨預報及入庫流量推估技術，另一方面也針對台灣地區農業供水需求發展春季季節降雨預報技術，以期能適時且適當反應乾旱之警訊。本年度完成工作項目摘要及未來工作如下：

(1) 發展小範圍、高精度之水庫集水區系集統計預報技術: 以颱風中心定量降雨系集實驗(TAPEX)之78小時降雨預報資料, 評估機率撮合法(PM)以及遺傳演算法(GA)這2種系集統計整合預報技術於石門、曾文水庫集水區未來24小時總雨量推估之表現。以2014年麥德姆與鳳凰颱風個案為例進行評估, 石門水庫集水區PM、GA與系集平均之推估值均高於實際降雨值, 而曾文水庫集水區PM、GA與系集平均之推估值均與實際降雨值十分接近。由於目前個案測試尚少, 未來預計將持續納入更多颱風個案進行整體性之評估。

(2) 發展水庫集水區降雨逕流推估技術: 本研究利用KW-GIUH降雨逕流模式, 完成石門水庫與曾文水庫集水區模式之建置。本年度分別選用Morakot、Saola、Soulik與Fitow以及Toraji、Sepat、Kalmaegi與Sinlaku等歷史颱風事件, 進行模式參數群的率定及驗證結果。結果顯示KW-GIUH模式模擬石門水庫、曾文水庫集水區降雨逕流歷程, 洪峰流量與洪峰到達時間最大估計誤差僅8.63%與3小時, 表現不差。未來預計將結合TAPEX系集實驗之預報雨量以及透過上述系集統計預報技術整合後之雨量進行颱風事件期間之未來水庫入庫流量預報。

(3) 發展春季季節性降雨推估技術: 本研究完成建置MPAS全球模式、設計台灣春季降雨實驗及發展台灣分區春季降雨推估技術, 本年度完成模擬過去10年春季降雨推估, 在過去10年的春季降雨後報表現上大致能掌握春季降雨趨勢之年際變化, 4月雨量值在台灣各地大致符合觀測; 3月雨量北部符合觀測, 中南部則略為高估; 2月雨量北部略為低估, 中南部表現略為高估。在2014年預報表現上, 2、3月雨量北部略為低估, 中南部表現則符合觀測; 4月雨量北部符合觀測, 中南部則略為高估。未來工作預計提高模式水平解析度進行實驗, 並將持續與NCAR合作, 進行模式版本改良。

## 參考文獻

1. Blanco, A., M., Delgado, and M. C., Pegalajar, 2001: A real-coded genetic algorithm for training recurrent neural networks. *Neural Networks*, **14(1)**, 93–105.
2. Ebert, E. E., 2001: Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461–2480.
3. Fang, X., and Y.-H. Kuo, 2013: Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3908–3932.
4. Holland, J. H., 1992: *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge, Mass. MIT Press.
5. Hsiao, L.-F., M.-J. Yang, C.-S. Lee, H.-C. Kuo, D.-S. Shih, C.-C., Tsai, C.-J. Wang, L.-Y. Chang, D.-Y.-C. Chen, L. Feng, J.-S. Hong, C.-T. Fong, D.-S. Chen, T.-C. Yeh, C.-Y. Huang, W.-D. Guo, and G.-F. Lin, 2013: Ensemble forecasting of typhoon rainfall and floods over a mountainous watershed in Taiwan. *Journal of Hydrology*, **506**, 55–68.

6. Jain, A., S., Srinivasulu, 2004: Development of effective and efficient rainfall-runoff models using integration of deterministic, real-coded genetic algorithms and artificial neural network techniques. *Water Resource Research*, **40(4)**, W04302.
7. Lee, K.-T., and B.-C., Yen, 1997: Geomorphology and kinematic-wave based Hydrograph derivation, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **123(1)**, 73–80.
8. ———, and C.-H., Chang, 2005: Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology- based IUH modeling, *Journal of Hydrology*, **311**, 91–105.
9. Lin, G.-F., B.C., Jhong, and C.-C., Chang, 2013: Development of an effective data-driven model for hourly typhoon rainfall forecasting. *Journal of Hydrology*, **495**, 52–63.
10. ———, and C.-M., Wang, 2007: A nonlinear rainfall–runoff model embedded with an automated calibration method – Part 2: The automated calibration method. *Journal of Hydrology*, **341**, 196–206.
11. Mohan, S., 1997: Parameter estimation of nonlinear muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **123(2)**, 137–142.
12. Rosenfeld, D., D. B. Wolff, and D. Atlas, 1993: General Probability-matched Relations between Radar Reflectivity and Rain Rate. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 50–72.
13. ———, ———, and E. Amitai, 1994: The window probability matching method for rainfall measurement with radar. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 682–693.
14. ———, E. Amitai, and D. B. Wolff, 1995: Improved Accuracy of Radar WPMM Estimated Rainfall upon Application of Objective Classification Criteria. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 212–223.
15. Skamarock, W. C, J. B. Klemp, M. G. Duda, L. Fowler, S.-H. Park, and T. D. Ringler, 2012: A Multi-scale Nonhydrostatic Atmospheric Model Using Centroidal Voronoi Tessellations and C-Grid Staggering. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3090–3105.
16. Wang, Q.-J., 1997: Using genetic algorithms to optimise model parameters. *Environmental Modeling & Software* **12 (1)**, 27–34.