

統計降尺度 HadCM3 評估台灣 21 世紀氣候

陳圭宏¹ 賈新興²

1. 第三組 2. 象預報中心

中央氣象局

摘要

取台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之每日平均氣溫、最低溫度、最高溫度、雨量為預報對象 (Predictants)，NCEP 重分析大氣環流場指數為預報子 (Predictors)，建立複迴歸方程式。除了用 NCEP 環流指數降尺度模擬預報對象外，也用 HadCM3 預測環流指數降尺度模擬預報對象。並整理討論各氣象站至 21 世紀末之平均氣溫、冬季低溫頻率、夏季炎熱氣溫頻率、日平均雨量、不降雨頻率、豪雨頻率等的趨勢和特徵。結果相對於氣候參考年 (1961-2000 年)，平均氣溫增暖趨勢明顯，冬季低溫頻率呈穩定減少趨勢，21 世紀中葉後，陸續有花蓮、高雄、台北出現低溫機率消失。夏季炎熱氣溫頻率增加幅度驚人。日平均雨量，台北和高雄沒有增減趨勢，台中和花蓮則有減少趨勢。不降雨頻率，台北、台中、花蓮有增加趨勢，高雄沒有增減趨勢。豪雨頻率則 4 個氣象站都沒有增減趨勢。

一、前言

全球環流氣候模式 (GCM) 的解析度一般是數百公里尺度，很難評估未來地方性 (數十公里) 氣候的衝擊，所以必須降尺度處理，才能夠應用環流模式輸出的大氣環流因子，評估地方性氣候的衝擊，尤其對於複雜地形，如：濱海地區、島嶼、山區... 等等，更要經過降尺度處理。降尺度方法有動力降尺度和統計降尺度方法兩種。這兩種方法都有其優點，但也都有其很難克服的缺點。動力降尺度的方程組和全球環流模式類似，可以描述大氣環流的動力過程，並更進一步提高解析度至數十公里尺度，足夠描述地方性地形及評估地方性氣候。但是其對於邊界條件，地形、植被、雲等參數問題敏感，以致於其模擬結果仍有很大改進空間。另外的缺點是需龐大的人力和電腦資源支援。相較下，統計降尺度模式很便宜，而且技術成熟。例如：1970 年代，美國 Klein and Glahn 等人，就已經利用迴歸方法，發展完成 PP 和 MOS 技術，提供氣象預報單位，客觀應用於實際天氣預報作業中。此種迴歸方法也是最傳統的統計降尺度方法。最近統計降尺度模式發展蓬勃，根據歐洲 STARDEX 的報告，尚有 Canonical Correlation Analysis (CCA), Neural Network (NN), Two Stage Analog technique, Conditional Weather Generator, Cluster Analysis... 等等。雖然有那麼多統計降尺度方法，不管是線性或非線性方法，其發展方式相似，都必須根據現有資料，統計推斷出預報對象 (Predictants) 和預報因子 (Predictors) 間的關係，並假設此種關係，未來也適用，這個假設可說是統計降尺度模式最基本的假設，可是這種預報對象和預報因子間的統計關係，沒有那麼固定，導致對未來氣候的模擬存在著無法預期的不確定誤差，因此也是統計降尺度模式很難克服的缺點。本文採用最傳統也是最簡單的迴歸方法，求出大氣環流指數和台灣氣象站平均氣溫、最低溫度、最高溫度及累積雨量的迴歸關係，降尺度 HadCM3 的環流預測指數，以評估台灣地區 21 世紀之可能氣候。

二、資料及計算程序

預報對象 (Predictants) 資料取自氣象局資料庫。包括台

北、台中、高雄及花蓮等 4 個氣象站之每日平均氣溫、最低溫度、最高溫度及日累積雨量。大氣環流預測資料 (預報因子) 是用 Hadley Centre HadCM3 氣候預測模式 A2 情境的預測網格資料。大氣環流客觀資料 (1961-2001)，是 NCEP 重分析資料。並再內插為 2.5 緯度 x 3.75 經度網格資料，以配合 HadCM3 氣候預測模式的輸出格式。以上兩項資料都由 Canadian Climate Impacts Scenarios Group 維護，可自網站 <http://www.cics.ca/scenarios/index.cgi?Scenarios> 下載。共有 26 個環流場指數，都是常態化後之數值。這 26 個環流場指數，主要包括近地面、850 百帕、500 百帕 3 層之高度場、風場、濕度場、溫度場及渦度場、輻散場等。

依據 SDSM 3.1 使用者手冊說明進行降尺度的步驟：

- 1、蒐集資料、檢查資料
- 2、計算預報對象和預報因子的外相關係數
- 3、選取適當預報因子，以建立複迴歸方程式
- 4、依據所建立之複迴歸方程式的係數、標準估計偏差 (Standard Error of Estimate) 及高斯分布亂數，建立天氣產生器 (Weather Generator)，製造 100 組 (members) 評估氣候的天氣數據。
- 5、分析預報對象 (predictant) 實際觀測數值、NCEP 重分析環流指數代入複迴歸方程式的降尺度模擬數值、HadCM3 環流指數代入複迴歸方程式的降尺度模擬數值。
- 6、分析 HadCM3 預測未來的環流指數，代入複迴歸方程式的降尺度模擬數值，並作比較分析。

第 3 個步驟，選取適當預報因子中，遵照的原則是選取對迴歸方程式貢獻最大的預報因子，相當於讓迴歸方程的解釋變異數 (explained variance) 比率 (R^2) 增加最多。又當加入新預報因子，其增加的 R^2 ，如果大於等於 2%，才算選取成功，繼續選下一個預報因子；直到其增加的 R^2 小於 2% 為止，如此複迴歸方程式建立完成。本文 4 個氣象站的平均氣溫、最低氣溫、最高氣溫及雨量。建立複迴歸方程式的預報因子，最多可選到 5 個環流指數 (台中與花蓮的平均氣溫)，最少只有 2 個環流指數可當預報因子 (台北的最低氣溫)。複迴歸方程式的可解釋變異數比率 R^2 ，以台北平均氣溫達 0.723 最高，花蓮平均氣溫 0.719 次之。複迴歸方程式的可解釋變異數比率 R^2 ，最小的是高雄雨量，只有 0.173。一般狀況，

平均氣溫的 R^2 最大，表示複迴歸方程式比較有代表性，預報因子的變化可以有效描述實際對象的變化。雨量的 R^2 最小，表示複迴歸方程式中，預報因子的變化描述實際對象變化的能力很弱。

三、結果討論

圖一是 1961 年至 2099 年期間，台北、台中、高雄、花蓮平均氣溫的觀測與模擬分析結果。第 1 個條柱是 1961-2000 年，40 年期間的實際觀測年平均氣溫，並定義此 40 年為氣候參考年。橫軸標示為 OBS；第 2 個條柱是以 NCEP 重分析環流指數為預報因子，用天氣產生器降尺度模擬 1961-2000 年，同氣候參考年期間的年平均氣溫，橫軸標示為 NCEP；第 3 個條柱是以 HadCM3 預測環流場指數為預報因子，用天氣產生器，降尺度模擬 1961-2000 年，同氣候參考年期間的年平均氣溫，橫軸標示為 HAD；第 4 條柱至第 8 條柱，同第 3 條柱說明，但降尺度模擬期間分別為 2000-2019 年、2020-2039 年、....、2080-2099 年，5 個廿年期間之年平均氣溫。從圖中比較第 1 條柱和第 2 條柱高度，可以大略比較出降尺度模式對實際觀測資料的系統偏差程度。同理，比較第 1 條柱和第 3 條柱高度，可以大略比較出 HadCM3 氣候預測模式降尺度模擬，對實際觀測資料的系統偏差，也相當於校驗 HadCM3 氣候預測模式的預測技術。由圖一所示，4 個氣象站(台北、台中、高雄、花蓮)之第 1、第 2、第 3 條柱，3 個條柱高度幾乎等高，表示不但建立的降尺度模式對描述實際年平均氣溫可信度高，而且 HadCM3 氣候預測模式，對實際年平均氣溫的描述也很有代表性。假設此種關係可以延續到未來的氣候預測。所以圖一中，第 4 條柱至第 8 條柱所代表的 21 世紀每廿年代際之年平均氣溫，不用再加入系統偏差的調整。圖一中另一共同特徵，21 世紀 5 個廿年代際年平均氣溫，4 個氣象站都是呈單調穩定增暖趨勢，台北、台中、高雄、花蓮至 21 世紀中葉(2040-2059 年)廿年代際之年平均氣溫分別比參考氣候年(1961-2000 年)之年平均溫增暖 1.7、1.3、1.3、1.4 度(攝氏)；至 21 世紀末葉(2080-2099 年)廿年代際之年平均氣溫，更加速增暖，比氣候參考年增 3.9、2.9、3.0、3.0 度。以台北增暖幅度最大，其他 3 個氣象站增暖幅度相近。

圖二顯示冬季(DJF)最低氣溫小於等於攝氏 10 度之頻率，簡單稱為出現低溫的頻率。橫座標與縱座標的說明同圖一，縱座標是頻率，單位為天/百天。圖二中，第 1 條柱和第 2 條柱大致上還是等高，表示降尺度模式仍可信賴，但第 3 條柱就已可看出有偏高的系統偏差。先不考慮 HadCM3 氣候預測模式，對出現低溫頻率的系統誤差。4 個氣象站從第 3 條柱至第 8 條柱高度，都有呈單調穩定降低趨勢的共同特徵，台北從氣候參考年(1961-2000 年)的 18.1 天/百天，一直減少至 21 世紀中葉、末葉分別為 10.6 及 4.2 天/百天。如果把系統偏差調整回去，第 3 條柱高度減第 1 條柱高度 18.1-13.2=4.9 天/百天，相當於系統預測偏高 4.9 天/百天，則第 4 條柱到第 8 條柱高度都要再減去 4.9 天/百天，作為系統偏差的調整。則到 21 世紀末，台北出現低溫頻率為 0.7 天/百天，即屆時台北將不出現小於等於攝氏 10 度的最低氣溫。同理，對其他 3 個氣象站調整系統偏差後，則高雄於第 7 條柱(2060-2079 年)開始，就已呈負值，即高雄自 2060 年代際開始，就不出現低溫氣候；花蓮更早，自 2040 年代際開始，不出現攝氏 10 度以下低溫。

圖三顯示，夏季(JJA)最高氣溫大於等於攝氏 35 度的頻

率，簡單稱為出現炎熱氣溫頻率；橫座標與縱座標的說明同圖二，除台中第 2 條柱和第 1 條柱有較明顯的差異外，其他 3 個氣象站第 1 條柱和第 2 條柱高度相差有限，降尺度模式仍有可靠度。HadCM3 氣候預測模式模擬氣候參考年，台北和高雄呈負偏差 4.2 和 0.3 天/百天，台中和花蓮則呈正偏差 +3.5 和 +0.3 天/百天。除台中於 21 世紀第 1 個廿年代際出現炎熱氣溫頻率略低於氣候參考年外，其他 3 個氣象站出現炎熱氣溫頻率都是呈單調穩定增加的趨勢。調整系統偏差後，台北於 21 世紀末葉出現炎熱氣溫頻率為 65.2+4.2=69.4 天/百天。比氣候參考年的 21.1 天/百天，增加 48.3 天，相當於 21 世紀末葉，台北夏季 10 天裏就有近 7 天有炎熱氣溫。其他 3 個氣象站，自氣候參考年至 21 世紀末葉，出現炎熱氣溫頻率的增加情形，分別為台中自 4.2 天/百天，增為 30.5 天/百天、高雄自 1.6 增加到 45.2 天/百天、花蓮自 0.3 增加到 25.8 天/百天。每個氣象站出現炎熱氣溫頻率增加的幅度都很驚人。

圖四顯示日平均雨量(總累積雨量除以總日數)，因為 HadCM3 氣候預測模式，一年只有 360 天，比正常年少 5 至 6 天，所以不用年累積雨量，改用日平均雨量。4 個氣象站的降尺度模擬和 HadCM3 氣候預測模擬結果，都幾乎等高，但都比氣候參考年之觀測資料少，呈負偏差。HadCM3 降尺度模擬台北日平均雨量，自氣候參考年(1961-2000 年)至 21 世紀末葉(2080-2099 年)6 個條柱高度幾乎一樣，最多 5.0 毫米/天，最少 4.6 毫米/天，相當於台北 21 世紀雨量和氣候參考年差不多，沒有增加或減少的趨勢。高雄雨量模擬情形，前 4 個廿年代際(2000-2079 年)，日平均雨量也幾乎等於氣候參考年的日平均雨量，只有最後一個廿年代際，日平均雨量才稍為增加 0.6 毫米/日，增加幅度很有限。台中花蓮之日平均雨量則有減少趨勢，暫不考慮預測模擬的系統誤差，台中自氣候參考年的 2.8 毫米/天，逐漸減少到 21 世紀末葉的 1.8 毫米/天。花蓮自氣候參考年的 4.1 毫米/天，穩定減少至 21 世紀末葉的 2.3 毫米/天，減少 1.8 毫米/天。如換算成年(365 天)雨量，相當於年雨量減少約 660 毫米。

圖五顯示，出現日雨量小於 0.1 毫米的頻率，簡稱不降雨頻率，單位天/百天。和圖四相似，4 個氣象站的降尺度模擬和 HadCM3 氣候預測模擬都比實際觀測資料少，都呈偏少的系統偏差，僅考慮 HadCM3 氣候預測降尺度模擬結果，台北、台中、花蓮之不降雨頻率有逐漸增加的趨勢，如果 21 世紀末葉的不降雨頻率加上系統偏差，則上述 3 站之不降雨頻率分別為 56.7、79.4、66.7 天/百天。高雄之不降雨頻率，21 世紀幾乎沒有變化，和氣候參考年近似。

圖六顯示，日雨量大於等於 130 毫米的頻率，簡稱豪雨頻率，單位天/百天。除了台北的降尺度模擬比氣候參考年高外，其他大致和圖五相似。降尺度模擬和 HadCM3 預測模擬，都有偏少的系統偏差。如以小數點以下一位的精確度看，豪雨頻率只有 0.1 天/百天的變化，相當於 21 世紀發生豪雨頻率幾乎和氣候參考年一樣，沒有增加或減少的趨勢。

四、結論

依據SDSM3.1 使用者手冊說明，進行建立複迴歸方程式，降尺度大氣環流指數，結果平均氣溫之解釋變異數比率 R^2 最大，可達 70%左右，也因此降尺度模擬 NCEP 環流指數為平均氣溫時，模式的系統誤差很小。甚至降尺度模擬 HadCM3 預測模式，系統誤差也很小，外推 21 世紀的降尺度結果可信度較高。相對的，建立雨量的迴歸方程式，解釋

變異數比率較小，只有 20% 左右。也因此降尺度模擬雨量要素，有較大的系統誤差，外推 21 世紀的降尺度結果，可信度較差。

本文討論平均氣溫、冬季低溫頻率、夏季炎熱氣溫頻率、平均雨量、不降雨頻率、豪雨頻率到 21 世紀末的特徵及趨勢。平均氣溫：4 個氣象站都呈單調穩定增暖趨勢，至 21 世紀末葉，台北增暖攝氏 3.9 度最多，台中、高雄、花蓮分別增暖 2.9、3.0、3.0 度。冬季低溫頻率：都呈單調穩定減少趨勢，經系統偏差調整後，出現低溫機率消失年代，台北於 2080-2099 年期間，高雄於 2060-2079 年期間，花蓮更提早到 2040-2059 年期間。夏季炎熱氣溫頻率：經系統偏差調整後，至 21 世紀末，相對於氣候參考年，台北、台中、高雄、花蓮每百天分別增加 48.3、26.3、43.6、25.5 天，增加的幅度很驚人。日平均雨量：台北和高雄沒有增減趨勢，台中和花蓮則有減少趨勢。不降雨頻率：台北、台中、花蓮有增加趨勢，高雄沒有增減趨勢，和氣候參考年一樣。豪雨頻率：4 個氣象站都沒有增減趨勢。

參考文獻

初級統計學，Paul G. Hoel 著，陳啓崗譯，

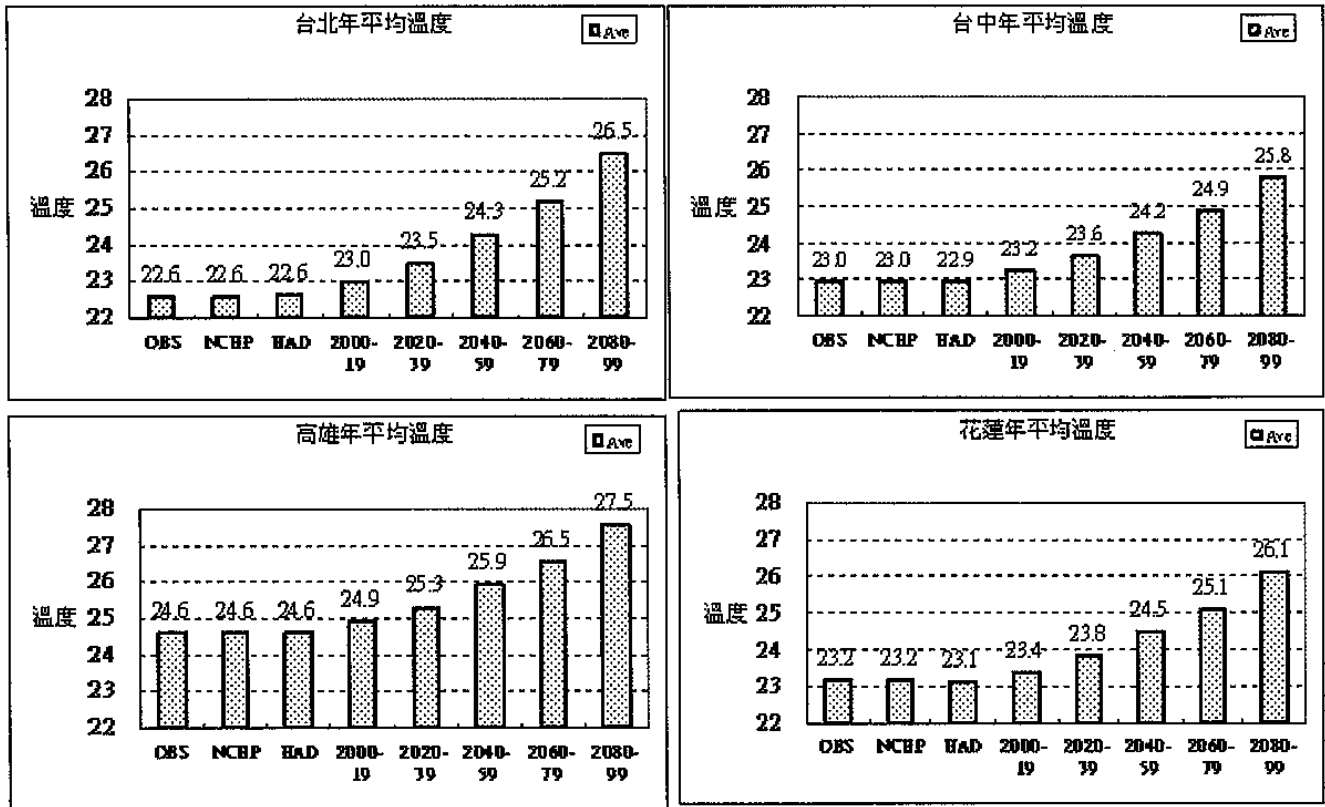
IPCC SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS.
Summary for Policymakers.

Johns, T.C., J.M. Gregory, W.J. Ingram, C.E. Johnson, A. Jones, J.A. Lowe, J.F.B. Mitchell, D.L. Roberts, D.M.H. Sexton, D.S. Stevenson, S.F.B. Tett, and M.J. Woodage, 2001: Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios.

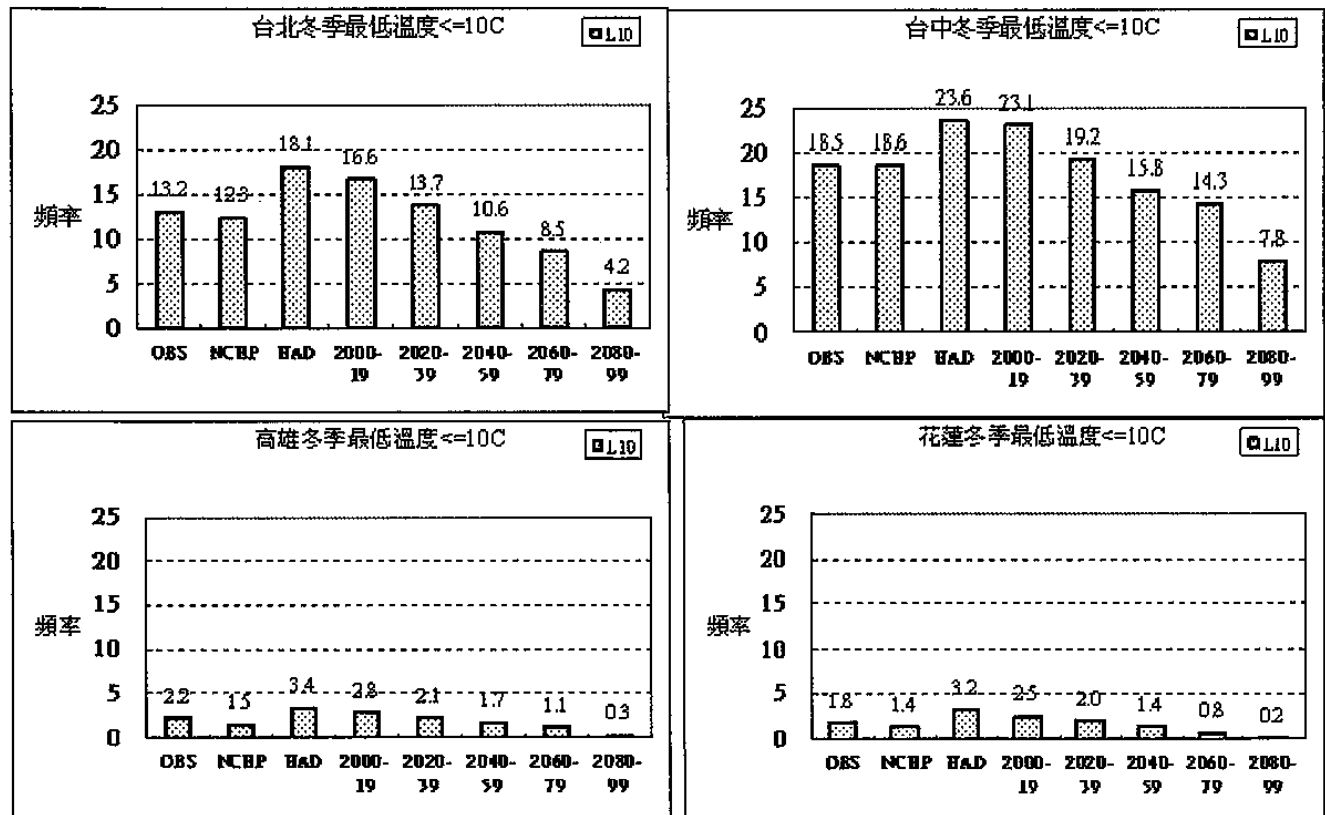
Klein, W.H. and Glahn, H.R. 1974. Forecasting local weather by means of model output statistics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **55**, 1217-1227

Schmith, T., C.M. Goodess and the STARDEX team, 2004: Statistical downscaling of extreme precipitation and temperature – a systematic and rigorous inter-comparison of methods.

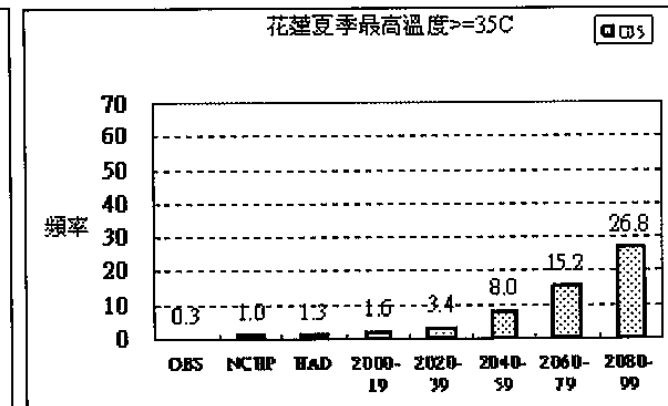
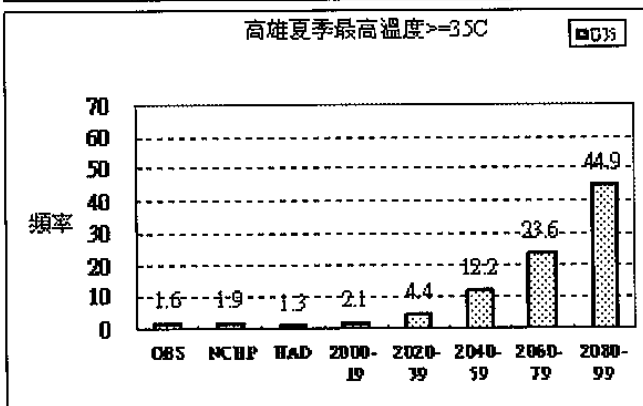
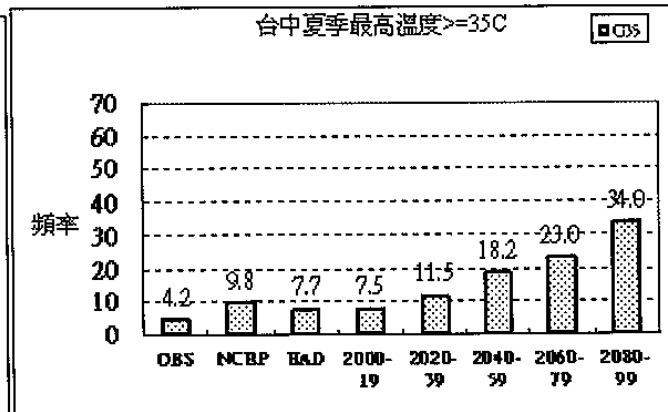
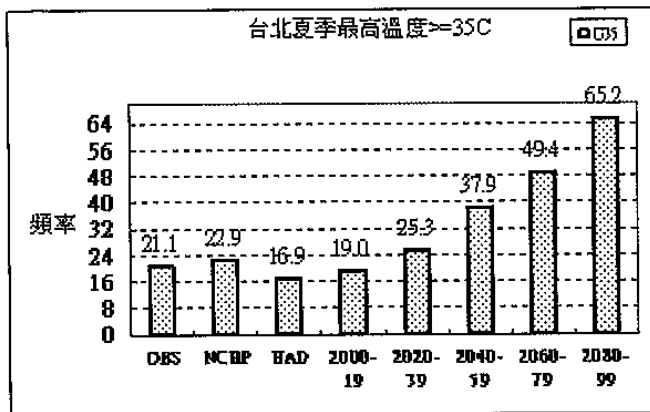
Wilby, Robert L. and Christian W. Dawson, 2004: Using SDSM Version 3.1 – A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts.



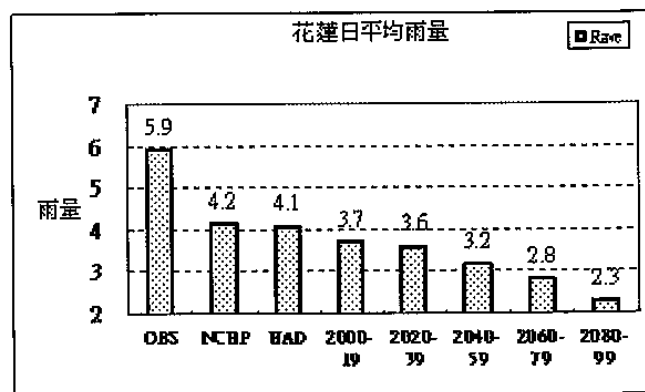
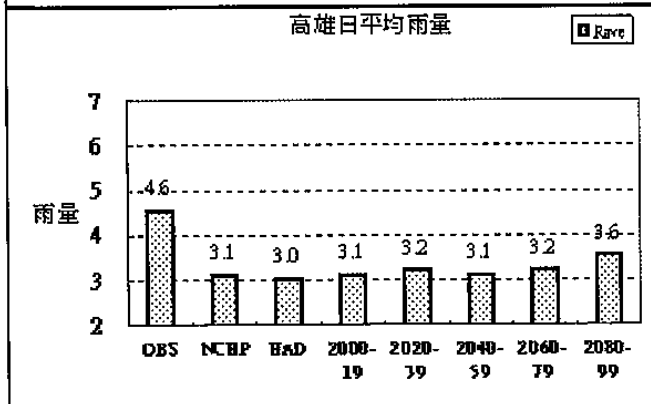
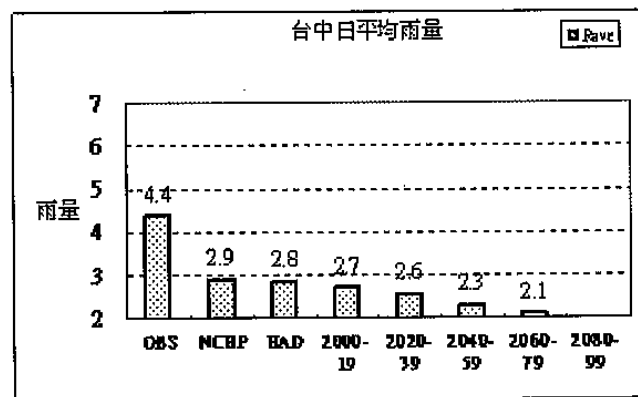
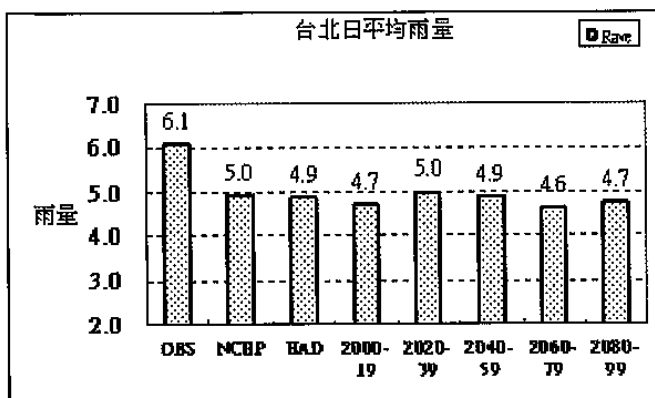
圖一、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之年平均氣溫，其他說明詳見本文。



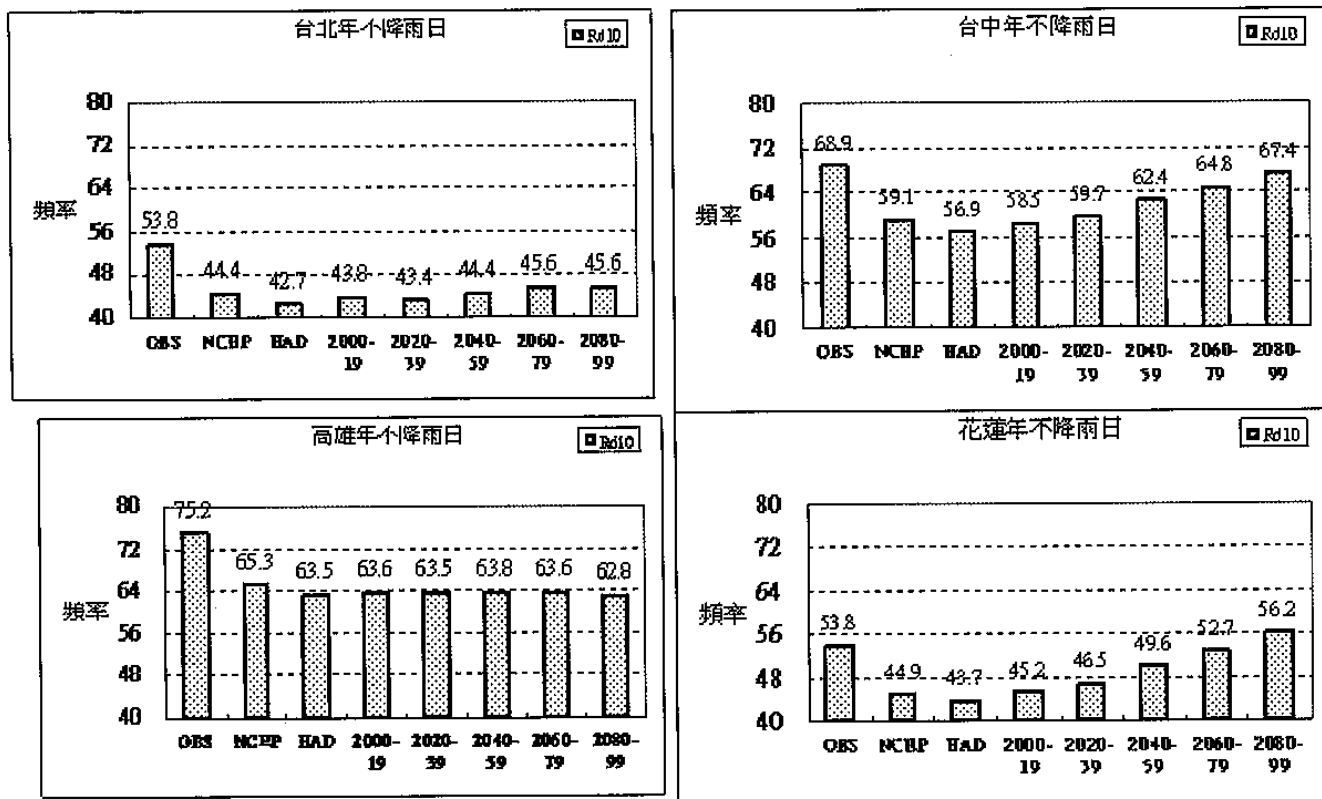
圖二、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之冬季最低氣溫小於等於攝氏 10 度頻率，其他說明詳見本文。



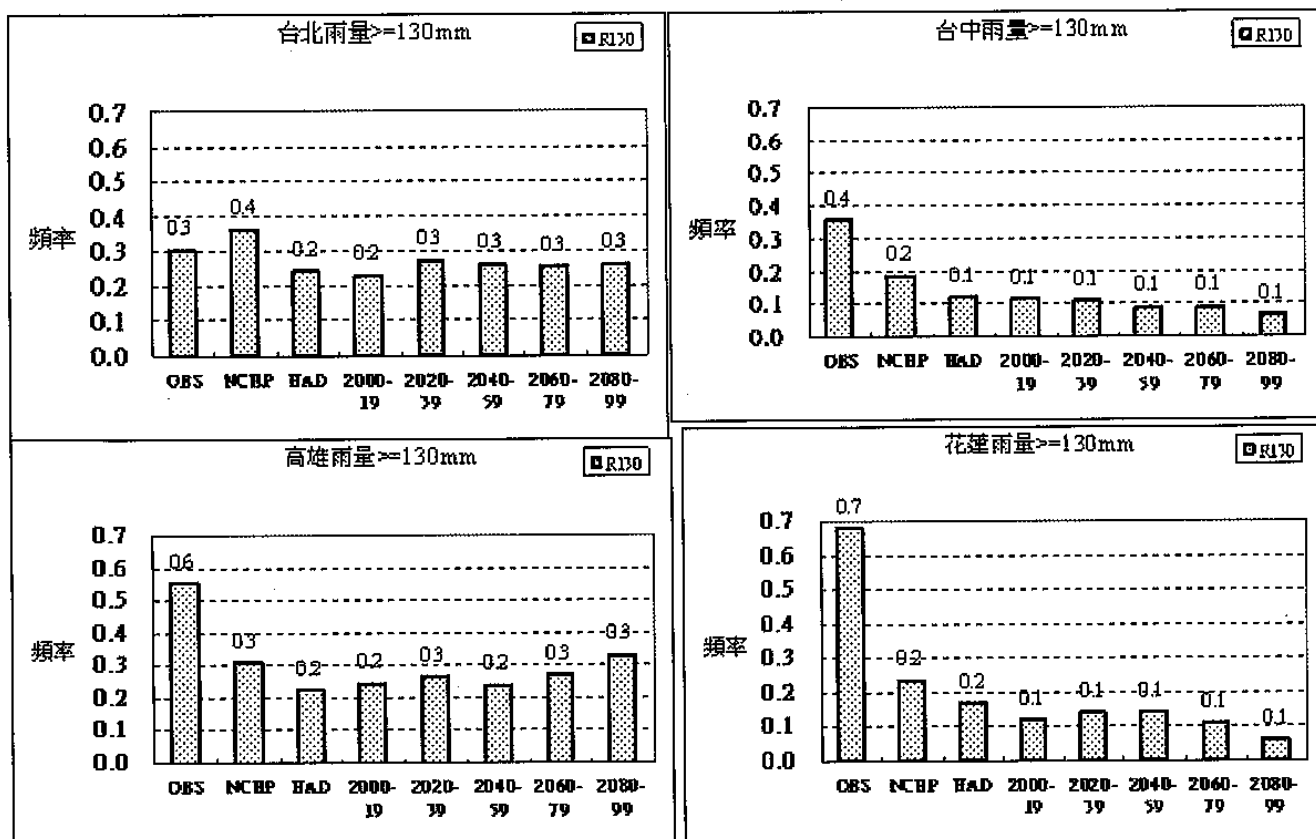
圖三、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之夏季最高氣溫大於等於攝氏 35 度頻率，其他說明詳見本文。



圖四、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之日平均雨量，其他說明詳見本文。



圖五、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之不降雨日頻率，其他說明詳見本文。



圖六、台北、台中、高雄、花蓮 4 個氣象站之觀測值及用 NCEP、HadCM3 環流指數降尺度模擬各年代期間之日雨量大於 130 毫米頻率，其他說明詳見本文。