

乾旱預警系統整合建置

Integrated Establishment of Drought Warning System

朱容練、陳永明、林士堯、朱吟晨、吳宜昭

摘要

春季是我國水稻耕種的重要時期，亦是接續著台灣枯水期之後需水量最大的時期，此時台灣地區的河川會接近乾涸，灌溉、工業及民生用水需皆仰賴水庫的供給，一旦前一年冬季降雨量偏少，造成水庫庫存量不足時，農田就需要停灌休耕，各地也會採取限水措施以因應缺水問題，進而影響到整體社會經濟。

為此本研究的目的為藉由觀測資料分析過去乾旱發生之時空間分布與降雨之關聯性，並進一步找出春季乾旱預報因子，作為乾旱預警系統之開發與前兆分析之參考依據。

根據本研究結果顯示，春雨的主要影響區域分布在臺灣北海岸、西北部及北部部分山區，鋒面降雨是春雨的主要貢獻來源，且春季的總降雨量、鋒面影響的日數都有一遞減的趨勢，可能會對未來水資源運用上造成衝擊。

由過去的統計資料顯示每年的 2 至 4 月乾旱發生的頻率最高，即春季發生降雨偏少的情況高於其他月份，又以台南、高雄以及新竹發生乾旱的次數最多。

Abstract

Spring is the major season for paddy rice cultivation, as well the most water-demanding period following drought period in Taiwan. At this time, rivers in Taiwan are nearly dried; irrigation, industry, and livelihood water usages all rely on reservoirs. Once there's insufficient rain in the former winter, causing the shortage of reservoir storage, farmland irrigation and cultivation may be suspended. While locals take water limitations in response to water shortage, these affect social economy at the same time.

Thus this research aims at analyzing the relationship between spatial and temporal distributions of drought and rainfall, by observation data. Furthermore, predicting factor of spring drought is selected to be the reference for drought warning system development and precursor analysis.

Result shows that spring rainfall mainly influences north coasts, northwestern, and partly mountainous areas in northern Taiwan. Frontal rain is the primary source for spring rain, and there are descending trends in total rainfall, days affected by fronts in spring, which may impact water resource usage in the future.

From the past observation data, it reveals that droughts happen most frequently from February to April every year, and this indicates that droughts occur more in spring than any other season. Locally, droughts occur mostly in Tainan, Kaohsiung, and Hsinchu.

一、 背景說明

1. 前言

乾旱一直是國內長期潛藏的危機，由於臺灣地區的地理位置特殊，降雨的主要來源依序為春雨、梅雨、颱風與熱雷雨以及東北季風地形雨等，而春季對農業而言一直是很重要的耕種時節，相對於使用量較固定的工業及民生用水，需要更為充足的水源供應在農作灌溉階段，所以水源供應的充足與否，就會嚴重影響到收成的面積。但在颱風季之後一直到春季來臨前都是屬於臺灣的乾季，因此若能有效預測臺灣春季降雨，即可掌握春季乾旱程度，相信能對氣候變遷下的水資源管理做更為有效的運用。

從過去的研究指出臺灣春雨的變化與長時間尺度的太平洋十年震盪(Pacific Decadal Oscillation；簡稱 PDO)(Hung et al. 2004)，以及較短期的聖嬰現象(El Nino and Southern Oscillation；簡稱 ENSO)(Chen et al. 2003, Jiang et al. 2003)有著明顯的關聯性，另外從吳等(Wu et al. 2012)的研究指出，背景大氣環流的水氣來源多寡和是否有鋒面通過以提供有效舉升機制，可能都是影響春雨多寡的重要因素，因此本研究嘗試以統計方式從鋒面的角度切入，探討鋒面對於春雨的貢獻程度，並從中探索其多雨少雨背後的环境場配置，試圖找出可能的春雨預報因子。

2. 資料與方法

因春雨主要降雨區域為臺灣北部含山區以及東北部地區，為配合北部地區一期稻作、民生及工業用水等需求，使用水利署水庫集水區石門測站資料與氣象局台北測站資料，針對東亞冬春季鋒面活動與兩個測站降雨量之關聯性進行分析，時間長度取 1979 至 2009 年之間冬春季的逐日變化情形。

在分析東亞春季鋒面活動變化時，使用 1979 年到 2009 年間十二月至四月，由中央氣象局每日之地面天氣圖以統計方式計算通過或接近之可能影響臺灣地區的鋒面活動次數，但有鑑於早期的地面天氣圖一天只有一張，為使評估標準一致，以每日早上八點之地面天氣圖作為判斷依據，標記出當日台灣地區是否為受鋒面所影響，並統計其影響日數，而非計算出受到幾道鋒面的影響。

在分析臺灣整體地區的春季降雨特性時，使用臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫(Taiwan Climate Change projection and Information Platform；簡稱 TCCIP)所產製的臺灣地區 5 公里網格解析度之月降雨觀測資料(1979 年-2009 年)，全台約有 1394 個網格點資料。

於分析觀測之大尺度環流特性時，使用美國 National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research(NCEP/NCAR)的全球網格月解析重分析資料(Kalnay et al., 1996) (簡稱 NCEP/NCAR Reanalysis 資料)，包含各標準層風場、比濕及水氣通量...等變數，其空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，時間同樣取 1979-2009 年。

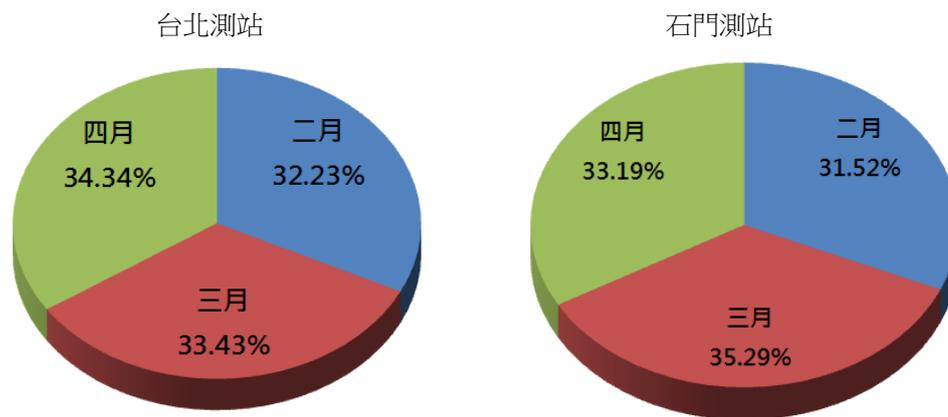
作為與基期觀測資料相互比對，以及未來情境推估用的大尺度環流模式資料，是使用日本氣象廳(Japan Meteorological Agency, JMA)氣象研究所(Meteorological Research Institute, MRI) 20 公里解析度的全球氣候模式(之後稱之為 20km MRI AGCM)所做的氣候推估資料，以及其動力降尺度後的資料 WRF-MRI，空間解析度為 5 公里，時間長度在基期為 1979 年-2003 年，未來推估為 2015 年-2039 年以及 2075 年-2099 年等。

二、 研究結果與討論

1. 測站資料及鋒面資料分析

1.1 台北及石門測站春季降雨及鋒面分析

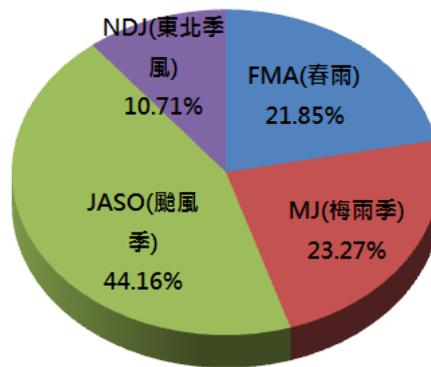
台北及石門測站平均年總降雨量介於 1200mm~4400mm 之間，春季降雨平均約占其中的 23%。而我們所定義的春雨即春季所發生的降雨為每年的二至四月，冬季則定義為前一年的十二月至二月。若從個別月份所占春雨的比例來看，如圖一所示，圖一為台北測站各春季二至四月各月份降雨量佔春季總雨量的比例分布，由圖中可得知三個月份所占比例相近，此情況同樣也顯示在石門測站，顯示若任一月份的春雨偏少，則春雨整體偏乾的機率就會提高。



圖一、台北及石門測站春季降雨各月份所佔比例。

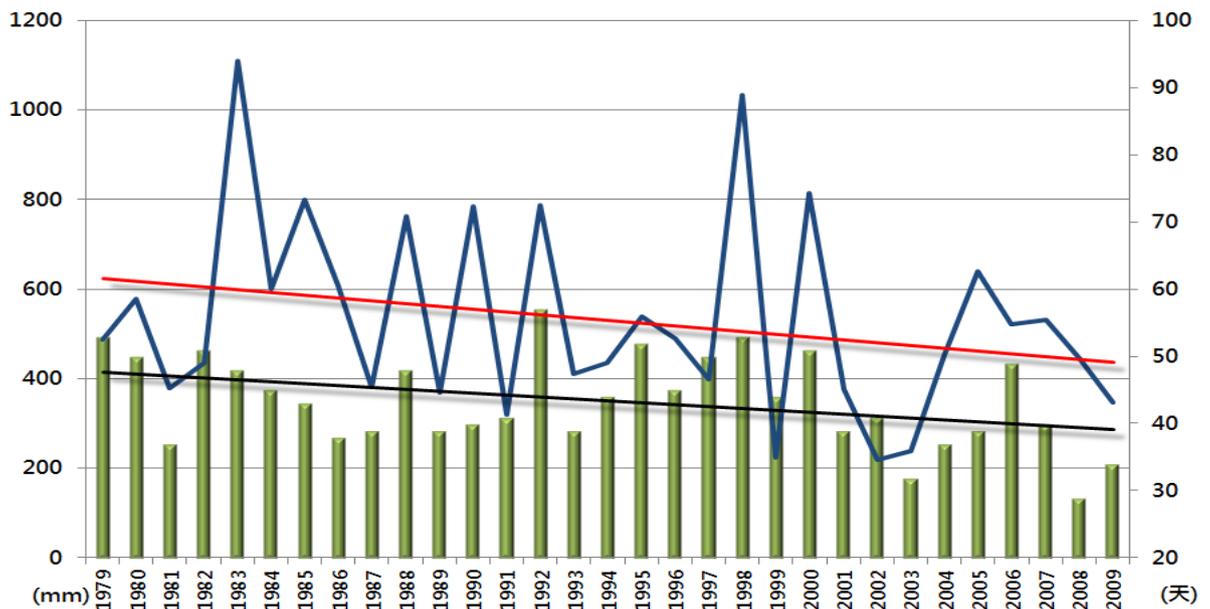
從鋒面活動變化的角度來分析，每年春季鋒面平均影響日數約 42 天(約占總日數的 47%)；冬季約 28 天(約占總日數的 31%)，而依月份逐時來看，三月及四月平均受鋒面影響日數約佔全月一半的日數，二月則較少；冬季則以二月所佔比例最多，一月其次，十二月最少。

依不同的降雨機制來分析台灣地區四種主要降雨季節的雨量貢獻程度，比較春雨對台灣地區的重要性。圖二為台北測站的年總雨量在春雨、梅雨、颱風季及東北季風平均降雨量的比例分布，可得知全年最主要的貢獻來自颱風及熱對流的七到十月，佔全年總雨量的 44%，而春雨的部分雖然只佔全年的 23%左右，但不代表春雨的影響就不重要；就時間順序來說，春雨是接續全年雨量最少的冬雨之後，而春季也是農業灌溉在水資源需求量最多的時刻，因此春雨的多寡將嚴重影響水資源的分配及調度問題。



圖二、台北測站全年總降雨各雨季所占比例。

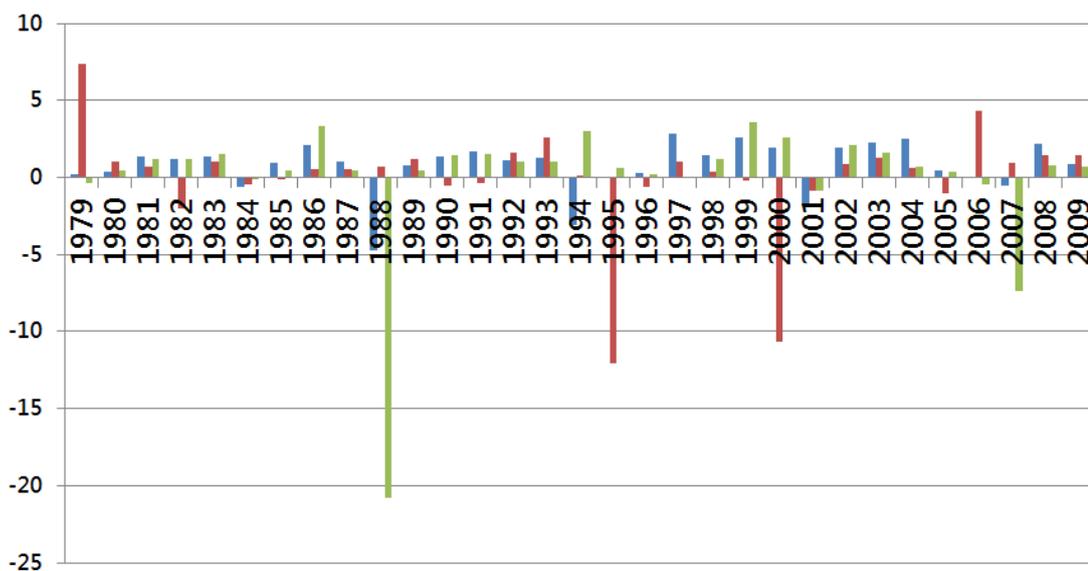
每年受鋒面影響所造成的降雨在春季約佔總降雨量的 74.7%，在冬季約佔 60.4%，由此可知鋒面的影響與否對於冬春季降雨量的多寡舉足輕重。從圖三所示，在過去 31 年(1979 年-2009 年)間的總雨量及鋒面影響日數變化顯示，春季降雨量(藍色折線)存在有一逐年減少的趨勢(紅色線)，而鋒面影響日數(綠色區塊)也同樣有減少的趨勢(黑色線)，此現象同樣顯示在鋒面所造成的降雨量變化上，表示雨量越來越少，鋒面也越來越少，鋒面所造成的降雨也越來越少；因此可推斷未來春雨越來越少的情況極可能會發生。



圖三、台北測站 31 年(1979 年-2009 年)春季降雨總雨量及鋒面影響日數歷線圖。(藍色折線為逐年降雨量，紅色線為降雨趨勢線，單位是 mm，綠色區塊為影響日數，黑色線為日數趨勢線，單位為天。)

我們假設冬季與春季在大尺度環流系統的配置上具有延續性，由此來尋找冬春季的相關性，圖四為冬季及春季在總雨量(藍色區塊)、鋒面影響日數(紅色區塊)及鋒面所造成之降雨量(綠色區塊)的距平比值歷線圖，若為正值，則表示冬季和春季之距平為相同相位，負值則反之；而值的

大小則表示兩季節值的差距。由圖可知，總降雨量幾乎為正值，顯示相關性相當高，其相關係數達到 0.83；鋒面日數的負值相較之下就比較多，在 1979、1995 年、2000 年及 2006 年都出現較大的值，顯示其相關性較低，而經計算後相關係數為 0.62；鋒面降雨則在 1988 年及 2007 年出現較明顯的負值訊號，相關係數為 0.8，由此統計結果可知冬季和春季確實存在相關性，可進一步分析冬春季在大尺度環境系統的差異及變化，藉此取得冬季預報春季降雨的可能因子。

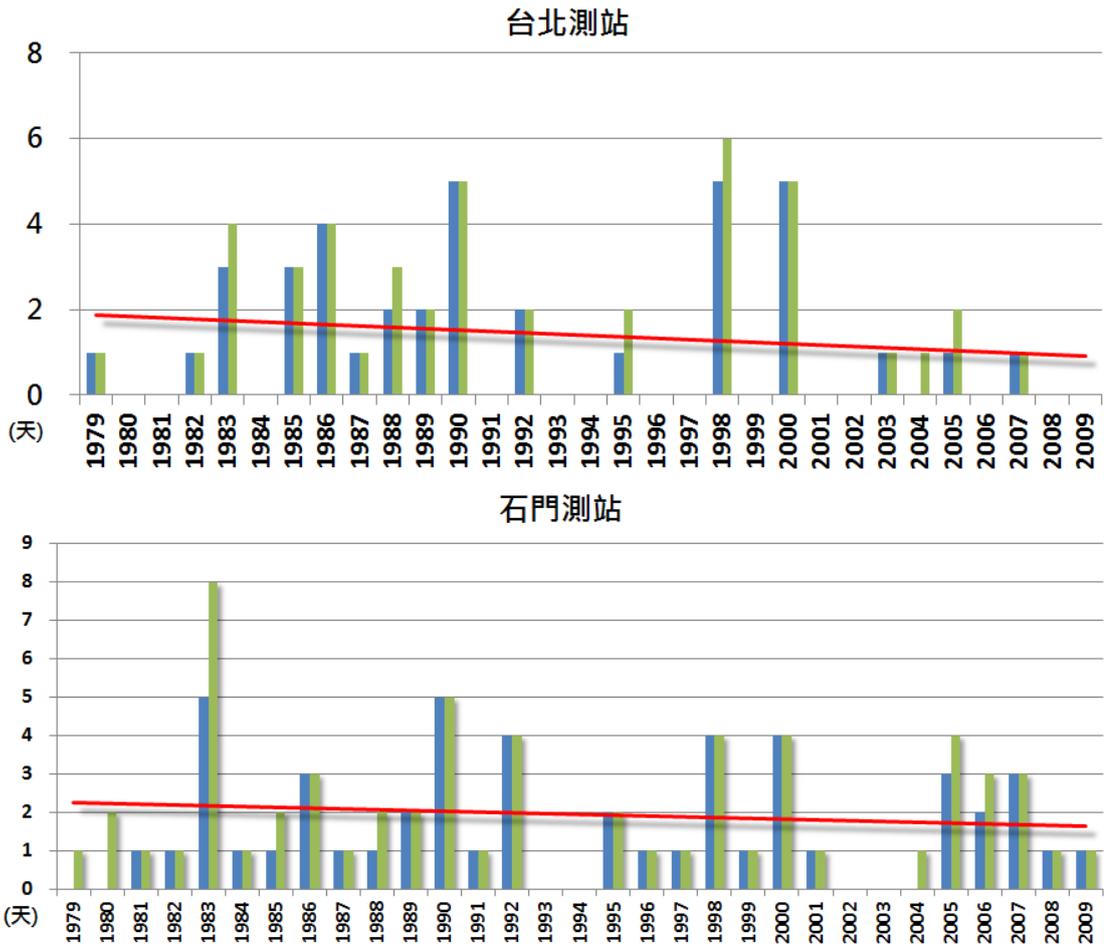


圖四、台北測站冬春季總雨量距平、鋒面影響日數距平、鋒面降雨量距平比值歷線圖。(藍色區塊為降雨量距平比值，紅色區塊為鋒面日數距平比值，綠色區塊為鋒面降雨量距平比值。)

1.2 強降雨分析

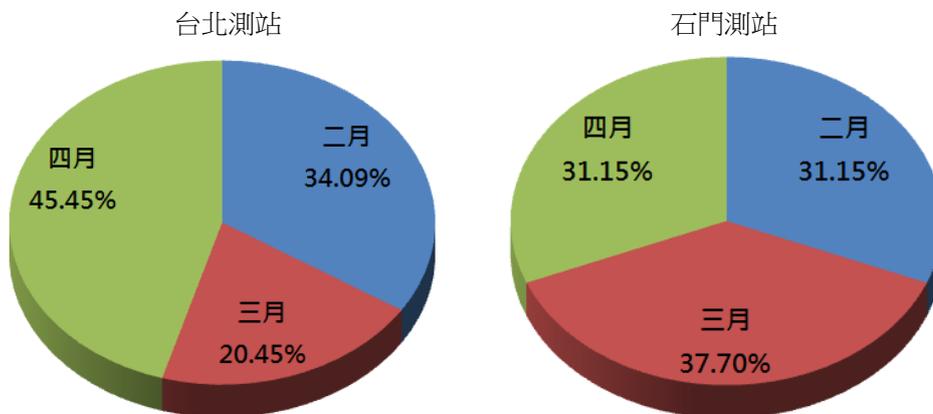
為了瞭解由少數幾道鋒面所帶來的降雨就足以滿足整個春季雨量需求的可能性，我們首先根據中央氣象局的定義，設定大雨的標準為 50mm/day，再經由過去的降雨資料進行統計比對後發現，在過去 31 年(1979 年-2009 年)裡，台北測站春季發生大雨事件的天數有 44 天，而石門測站則是有 61 天，其中由鋒面所造成的各佔 38 天及 50 天(約佔全部大雨天數的 86%及 82%，但是只為總日數的 1.6%和 2.2%)，可得知春雨發生大雨的主要因素是受鋒面影響所造成且發生的機率不高，基本上都是以綿綿細雨為主，而在水庫集水區易受地形因素影響，出現大雨的機率較平地為高。

為了瞭解鋒面影響和大雨發生的相關性及發生頻率，圖五為台北及石門測站春季發生大雨天數及由鋒面影響所引發之大雨發生天數歷線圖，由圖可知鋒面影響是造成大雨發生的主要因素，但和圖三作比較可得知大雨和鋒面影響日數多寡的相關性並沒有很明顯；大雨發生的天數有逐年減少的趨勢並同時顯示在平地及山區；而每年發生一次大雨的頻率在平地上約 54.8%，而在水庫集水區約 87.1%。由以上分析可知，大雨發生時極可能伴隨著鋒面通過，水庫集水區發生大雨的機率較平地為高，大雨發生的機率正逐年減少同鋒面影響日數減少。



圖五、台北及石門測站春季大雨及鋒面大雨發生天數歷線圖。(綠色區塊為大雨發生之天數，藍色區塊為鋒面影響所造成之大雨發生天數，紅色線為大雨天數趨勢線。)

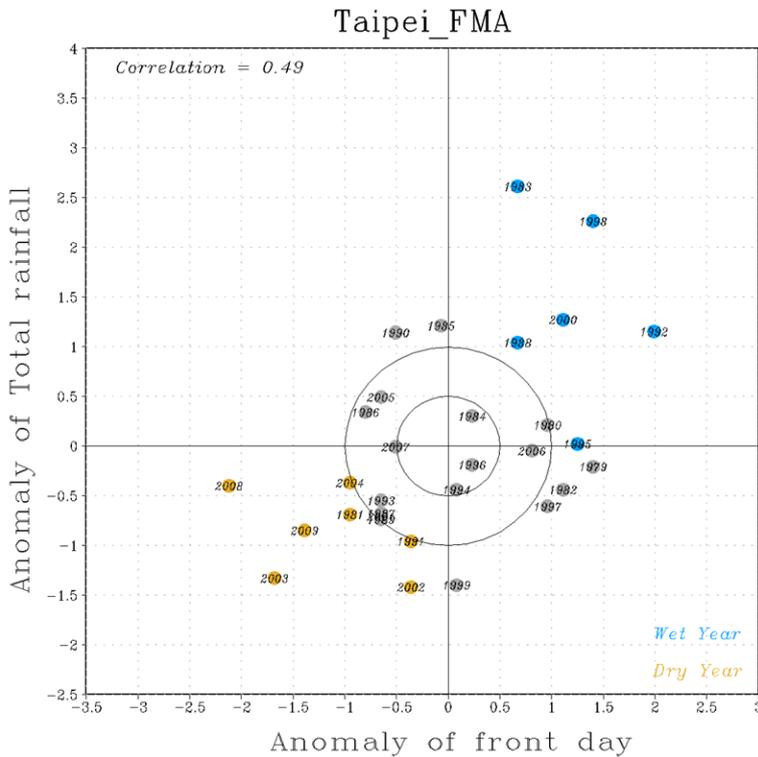
春季大雨在各月份發生的天數經統計結果顯示如圖六所示，在台北測站即平地的四月發生大雨的機率較大，在三月的機率最小，水庫集水區的石門測站部分則各月分比例相近。藉由以上分析可知，大雨發生解除旱象的情況是可以期待的，但不能過度仰賴，尤其在顯示逐年減少的此時。



圖六、台北測站及石門測站春季各月份強降雨發生次數所佔比例

1.3 標準化分析

為區分出春季乾年與濕年在大環境場的特性差異，對春季鋒面影響日數以及台北測站逐年春季總降雨量進行標準化分析，如下圖七，以標準差大於正負 1.0 作為篩選標準，找出代表濕年的 6 個樣本年份，分別為 1983 年、1988 年、1992 年、1995 年、1998 年及 2000 年等，以及代表乾年的 7 個樣本年份，分別為 1981 年、1991 年、2002 年、2003 年、2004 年、2008 年及 2009 年等。



圖七、台北測站春雨乾濕年標準化分布圖。(X 軸為鋒面影響日數距平，Y 軸為總雨量距平，藍色區塊為篩選出之濕年樣本年，黃色區塊為乾年樣本年，同心圓內圈為標準差 0.5，外圈為標準差 1.0。)

分別從降雨量、鋒面影響日數等將乾濕年做個比較，如表一所示，在平均總雨量上，濕年為氣候值的 1.58 倍，乾年則是 0.64 倍；平均鋒面影響日數濕年為氣候值的 1.6 倍，乾年則是 0.83 倍(約佔總日數的 57.87% 和 40.29%)；平均鋒面降雨濕年及乾年分別為氣候值的 1.64 倍和 0.65 倍；平均發生大雨的日數在濕年和乾年分別為氣候值的 2.58 倍及 0.2 倍；而大雨降雨量濕年為氣候值的 1.92 倍，乾年則是只有氣候值的 0.41 倍。其中值得注意的是濕年鋒面影響所造成的降雨量佔濕年平均總雨量的 79.52%，乾年則是佔乾年平均總雨量的 77.59%，兩者皆大於氣候平均值的 74.7%，顯示在濕年及乾年鋒面影響的重要性皆更甚於正常年。

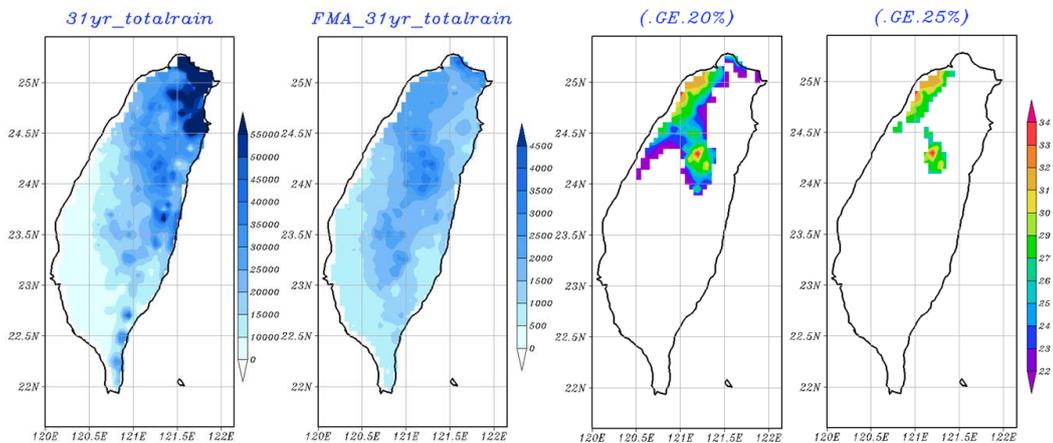
	平均總雨量 (mm)	平均鋒面影 響日數(天)	平均鋒面降 雨量(mm)	平均大雨 日數(天)	平均大雨 量(mm)
濕年(6年)	840.58	51.50 (57.87%)	668.40 (79.52%)	3.67	428.48
乾年(7年)	342.60	35.86 (40.29%)	265.81 (77.59%)	0.29	90.8

表一、台北測站乾濕年降雨量及鋒面影響日數之比較。(濕年樣本包含 1983 年、1988 年、1992 年、1995 年、1998 年及 2000 年等 6 年，乾年樣本包含 1981 年、1991 年、2002 年、2003 年、2004 年、2008 年及 2009 年等 7 年。)

2. 觀測資料分析

2.1 降雨分布與鋒面相關性分析

為了解臺灣地區受春雨影響範圍及與鋒面相關性，圖八為 TCCIP 觀測資料臺灣地區 31 年(1979 年-2009 年)的年平均總雨量(左一)、春季平均總雨量(左二)、大於等於年總雨量 20% 及 25% 以上的春季降雨區域範圍(右二及右一)。由圖中可知年總雨量最多的地方位於台灣的北海岸及東北角，春季降雨則是由北往南，由山區往平地遞減，而春雨的主要影響範圍(20% 以上)為台灣西北部、北海岸、及北部山區等，若取 25% 以上的降雨區域，就僅剩台灣西北部沿海及一小部分北部山區。

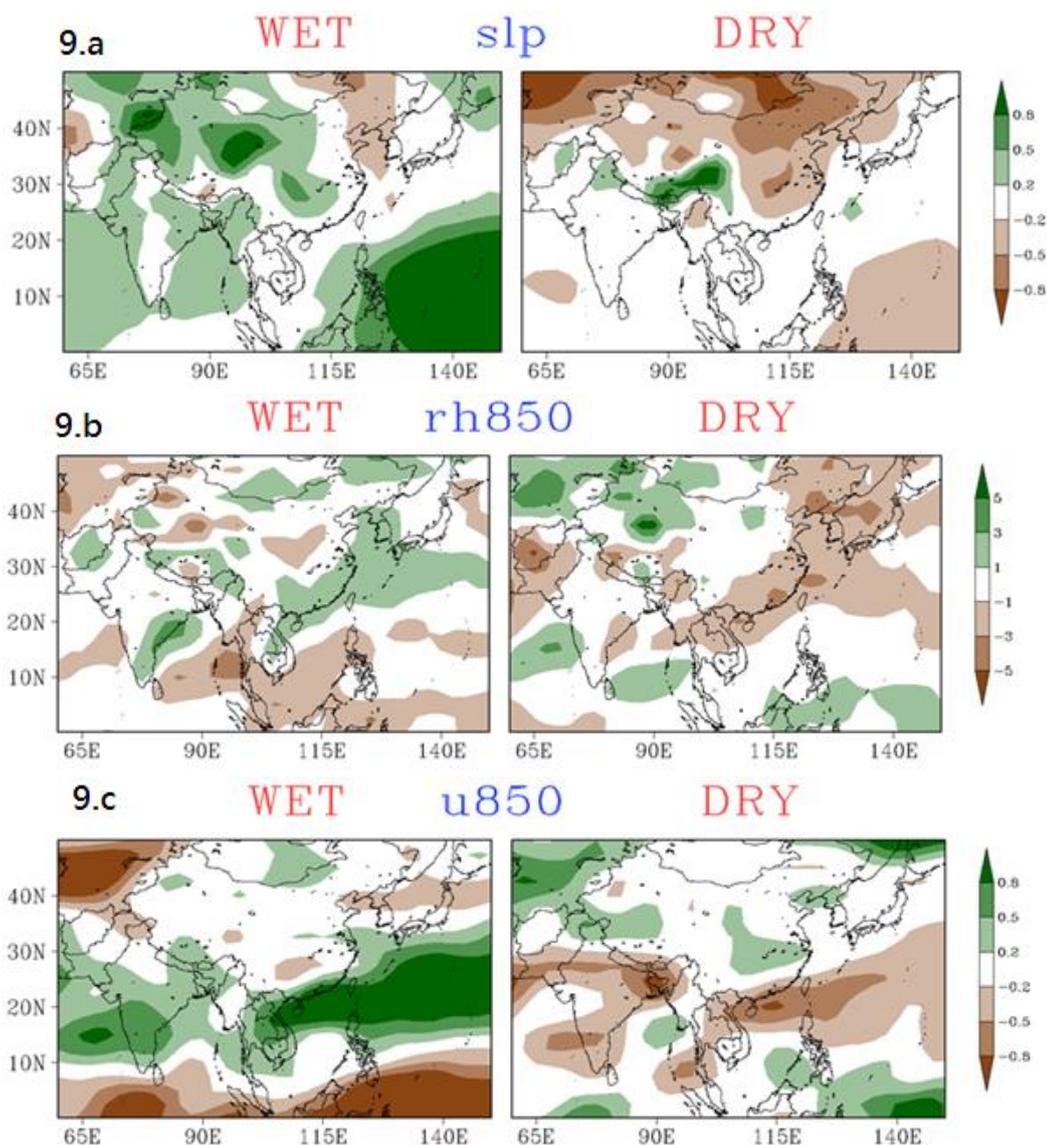


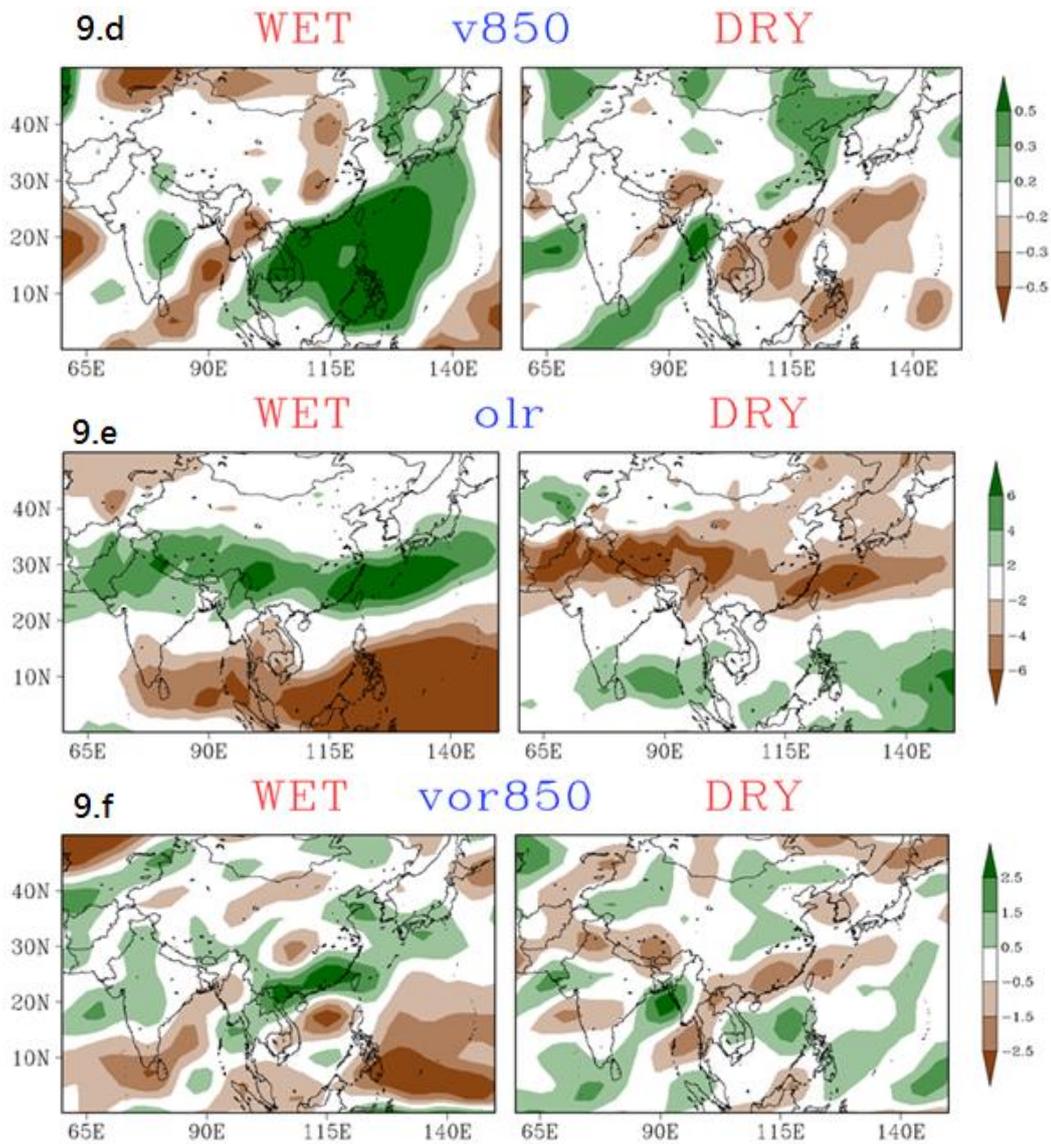
圖八、TCCIP 觀測資料臺灣地區平均年總雨量、春季平均總雨量及春季降雨主要影響區域。(左一為平均年總雨量，左二為平均春季年總雨量，左三及左四為平均春季總雨量佔平均年總雨量 20% 及 25% 以上之區域)

2.2 春季觀測物理量預報因子分析

接著利用測站資料所挑選出的乾濕樣本年，繪製不同物理量資料的大尺度環流系統，藉以比較乾濕年的差異。圖九為 NCEP Reanalysis 東亞地區 31 年(1979 年-2009 年)春季物理量的乾濕年距平值合成圖，圖 9.a 的物理量為海平面氣壓場距平，由圖中可以清楚地看到在台灣東南方的西太平洋是呈現相反相位，即濕年的大平洋副高是呈現高於氣候值的狀況，反之在乾年則偏低；圖 9.b 的物理量為 850 百帕的相對濕度場距平，濕年可看到一條水氣帶自華南地區向東北延伸經過

台灣到高緯日本韓國一帶，在乾年則相反式偏乾的負距平；圖 9.c 的物理量為 850 百帕的東西向風場距平，圖中顯示台灣地區濕年為西風距平所籠罩，即表示當西風分量較強或東風分量較弱時，春雨較多的機率就相對較高，反之乾年台灣地區是東風分量較強或西風分量偏弱；圖 9.d 的物理量為 850 百帕的南北向風場距平，圖中顯示濕年的南風分量較氣候值偏強或是北風分量偏弱，乾年則是以北風分量較強或南風分量偏弱的情形；圖 9.e 的物理量為地表長波輻射，在溼年時台灣地區為正相位，即濕年對流旺盛所以雲量較多，乾年則反之；圖 9.f 的物理量為 850 百帕的渦度場，濕年在臺灣附近為正渦度距平，乾年則為負渦度距平。

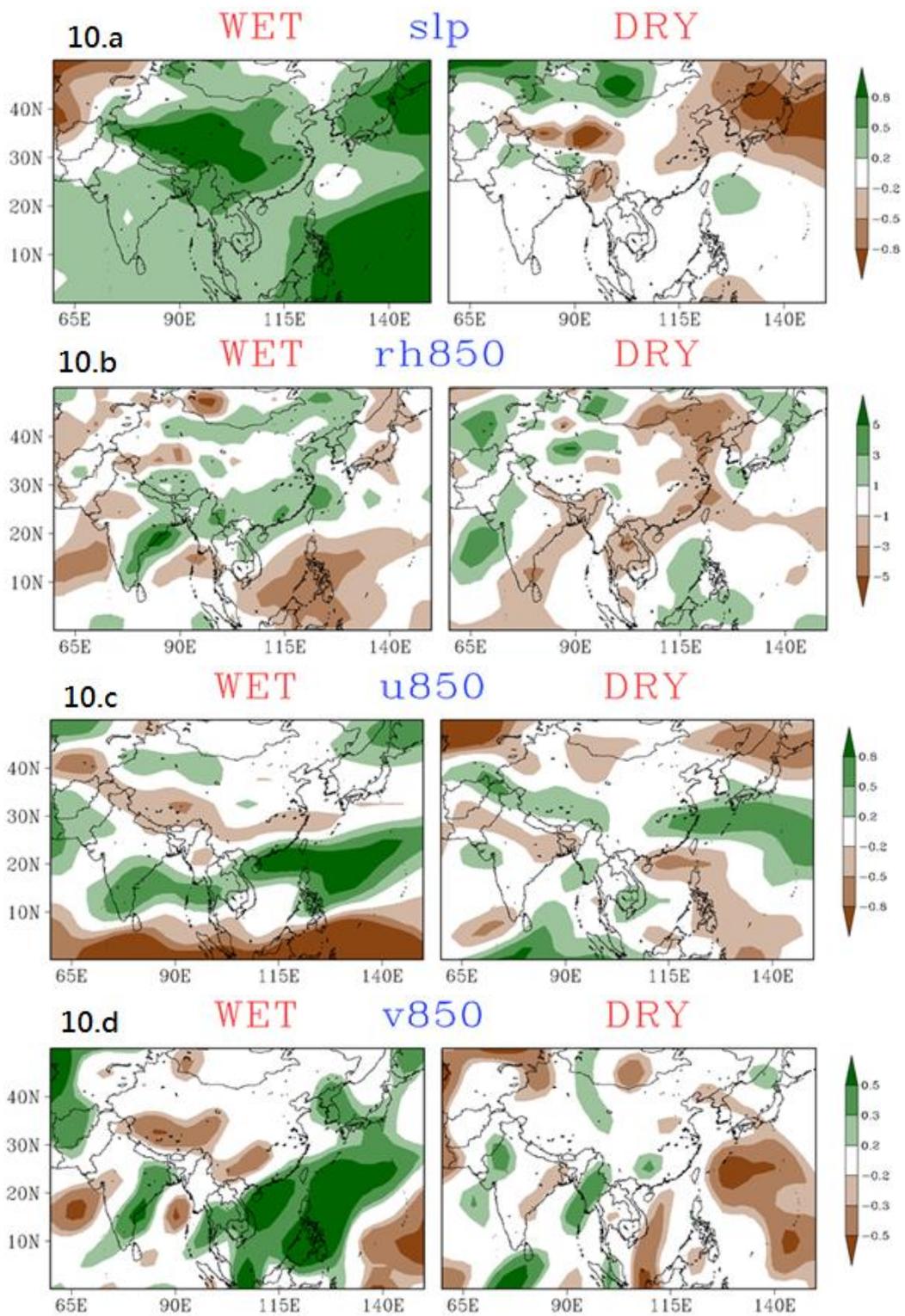


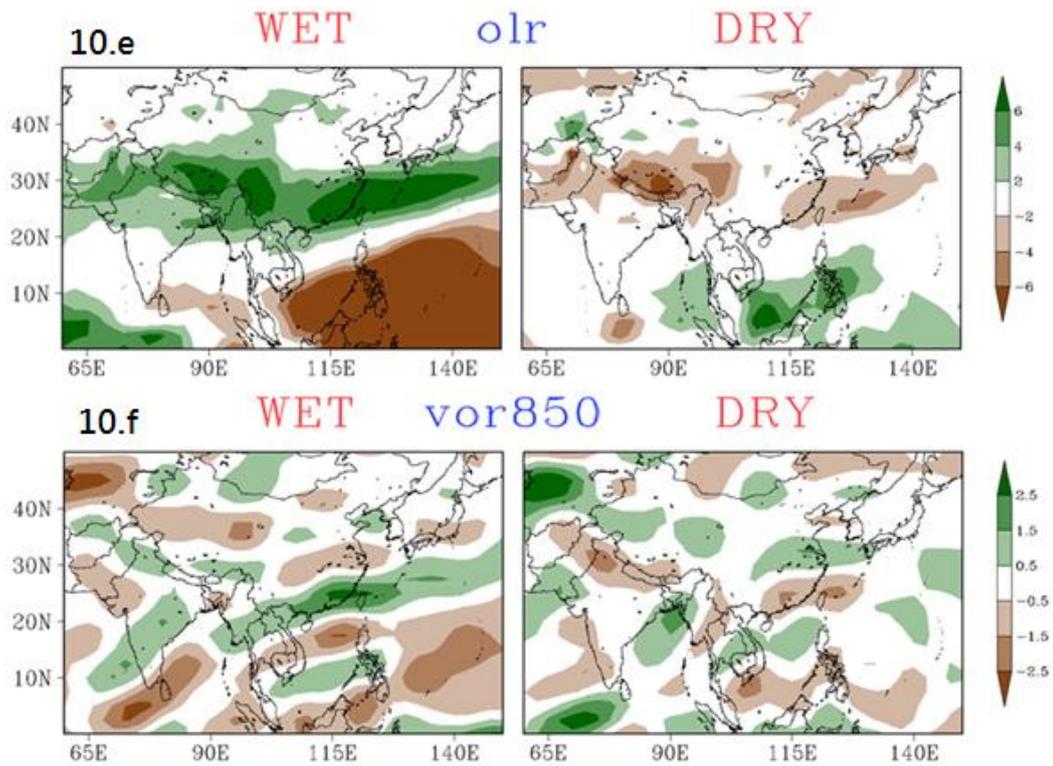


圖九、NCEP 春季乾濕樣本年物理量距平合成分布圖。(左圖為濕年，右圖為乾年，9.a 為海平面氣壓，9.b 為 850hpa 相對濕度，9.c 為 850hpa 東西向風場，9.d 為 850hpa 南北向風場，9.e 為地表長波輻射量，9.f 為 850hpa 渦度場。)

2.3 冬季觀測物理量預報因子分析

由上述分析可得知觀測資料在春季乾溼年的主要差異，接著就必須從冬季來找出相對應的差異作為春季降雨預報用的因子(如圖十)，圖 10.a 為海平面氣壓場距平，圖中顯示濕年在臺灣附近皆呈現正距平，乾年則是在高緯的日本附近有明顯的負距平，而春季所看到的低緯大太平洋副高位置負距平的訊號比較不明顯；圖 10.b 為 850 百帕相對濕度，圖中台灣附近在乾濕年是明顯的反相位，這一點和春季相同；圖 10.c 為 850 百帕東西向風場，在濕年也和春季時同樣是西風分量偏強或是東風分量偏弱，乾年時東風分量較強，或是西風分量比氣候值來的弱；圖 10.d 為 850 百帕南北向風場，濕年在台灣附近為南風正距平所籠罩，乾年附近則存在有負距平的北風分量；圖 10.e 為地表長波輻射量，其顯示濕年對流較氣候值旺盛，而乾年則對流較少；圖 10.f 為 850 百帕渦度場，和春季相同在濕年臺灣附近為正距平，乾年則是負距平。



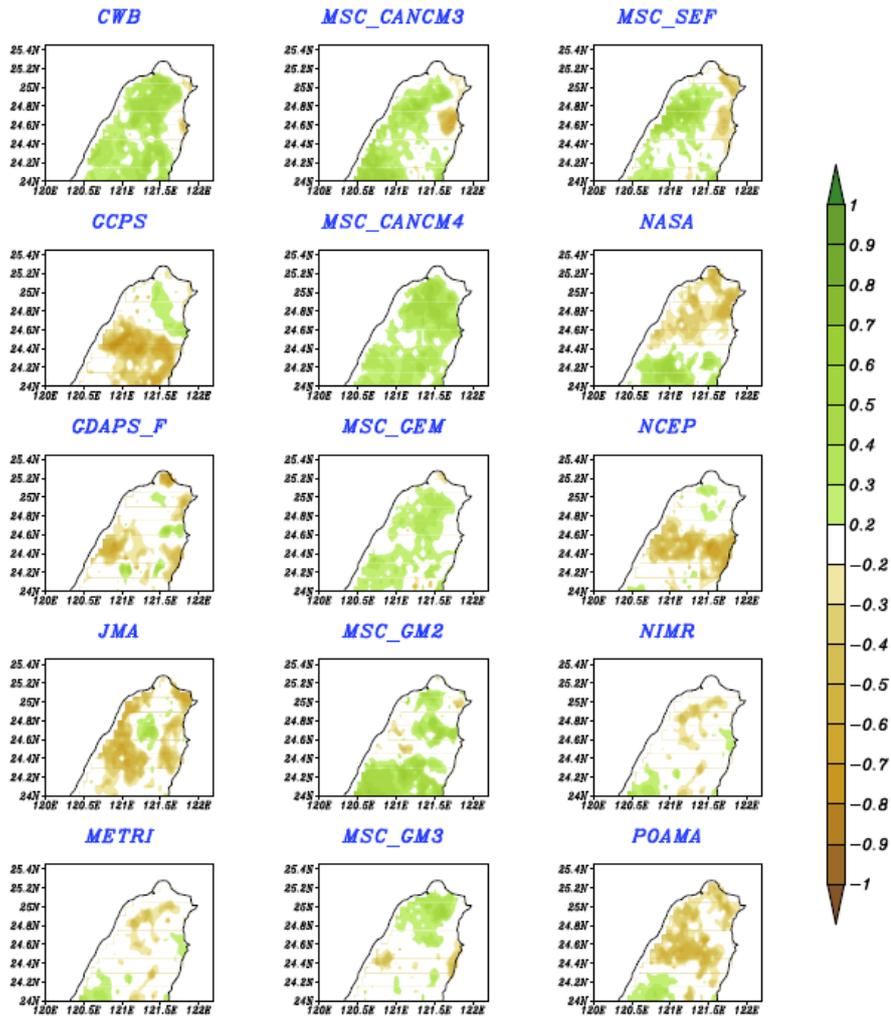


圖十、冬季乾濕樣本年物理量距平合成分布圖。(左圖為濕年，右圖為乾年，10.a 為海平面氣壓，10.b 為 850hpa 相對濕度，10.c 為 850hpa 東西向風場，10.d 為 850hpa 南北向風場，10.e 為地表長波輻射量，10.f 為 850hpa 渦度場。)

3. 技術研發

3.1 月到季降雨預報統計降尺度技術發展

為達成由月到季的降雨預報技術，運用 SVD 統計降尺度方法結合 APEC Climate Center 模式資料及 TCCIP 觀測資料，目前已完成石門水庫集水區之模組建立、驗證以及過去 20 年降雨資料產製，圖十一為台灣北部地區(含石門水庫集水區)統計降尺度後春雨與觀測之驗證結果。結果顯示，各國模式表現各有優劣，其中以 CWB 與加拿大系列之模式表現相對較佳。



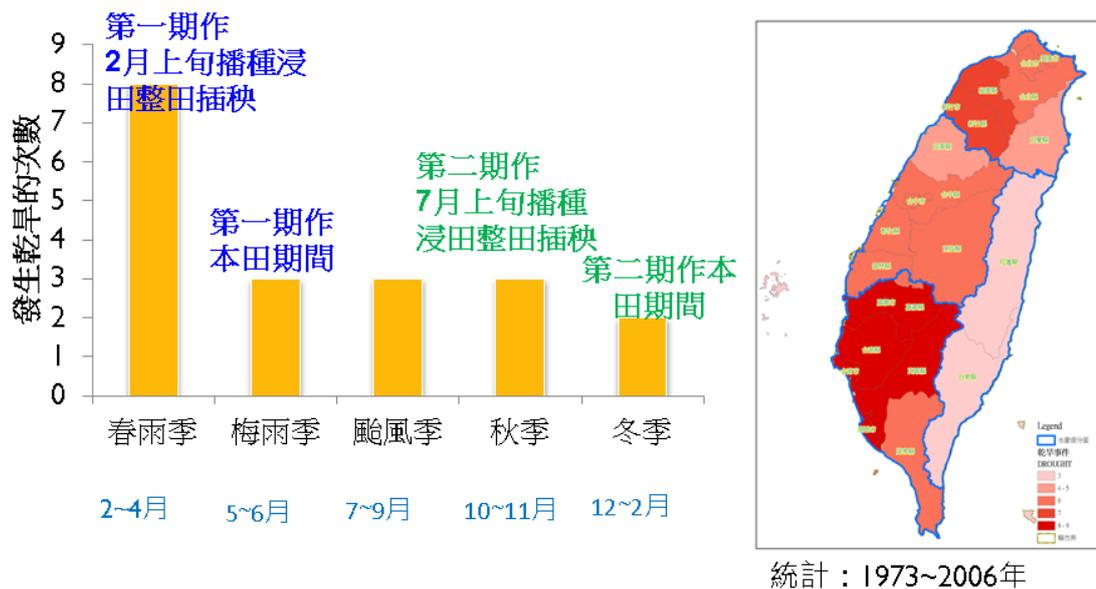
圖十一、台灣北部地區(含石門水庫集水區)統計降尺度後春雨與觀測之相關係數圖

3.2 乾旱歷史資料分析

為降低因春季降雨短缺所造成的農損，所以本研究希望能夠建置乾旱預警系統，以達到提前警示的目的。

水稻耕作時程

首先得先了解春季稻作的耕作時程如圖十二所示，由圖可知，春雨季期間為水稻的整田期及本田期的初期為用水量的高峰期，亦是稻作的開花期，對於缺水敏感度為最高。仰賴水庫供水的農田，在前一年若水庫蓄水量不足時，將採取休耕的策略。但 2 月中至 3 月初才公告休耕，必須付出更高額的補償金。第一期作的休耕決策必須在 2 月初前做出決定。若已完成插秧，則需避免在水稻開花期移用農業用水支援其他標的用水，避免造成收成不佳的問題。



圖十三、過去 34 年(1973 年-2006 年)全台乾旱發生時程與次數及乾旱發生頻率分布圖。

4. 結果與討論

藉由本研究讓我們了解到臺灣春雨對於北部不管在農業、工業或是民生用水及民生經濟上都影響甚鉅，若能有效掌握其未來的降雨趨勢，提前做政策上的調整與乾旱的預警因應措施，將有助於水資源的分配調度以及降低社會資源成本的損耗。

由上述分析結果我們得知，在過去 31 年裡，春季的降雨佔全年總雨量的 23%，其中受到春季鋒面影響的降雨又佔春雨總雨量約 75%，鋒面降雨是春雨的主要貢獻來源；鋒面影響的日數佔春季總日數的 47%，又其中受到鋒面影響而發生降雨的日數約 70%，並非所有鋒面影響都會帶來降雨。從測站資料中得知，春季的總降雨量、鋒面影響的日數都有一遞減的趨勢，可能會對未來水資源運用上造成衝擊。

為證明春季和前一年冬季存在相關性，我們從測站資料總雨量、鋒面日數和鋒面降雨的歷年距平變化，去比較冬春季的差異，其結果得知冬季和春季具有某種程度的相關性，其中雨量的相關性高，代表冬季的環流系統配置可能對於春季有一定程度的延續性或是影響程度；鋒面影響日數相關性略低，顯示鋒面影響的機制是有所不同的；而鋒面所造成的降雨量相關性又相對較高，代表可能在大尺度系統的水氣輸送上，冬春季是有所相關的。所以冬季的降雨多寡是可以做為隔年春季春季水資源管理的部分參考依據。

而進一步分析臺灣春季主要降雨分布及鋒面的相關性，得知春雨的主要影響區域分布在臺灣北海岸、西北部及北部部分山區，而中南部及東半部基本上仍處於乾季影響不大，因此主要受到影響的是北部的的水庫集水區，如果水庫蓄水量在冬季時已偏低，而春季降雨又不顯著，則北部一期稻作的耕種就會連帶受到影響。

藉由標準化分析，我們找出在過去 31 年中較具有顯著性受鋒面影響日數多且總雨量多的濕年樣本 7 個以及鋒面影響日數少且總雨量少的乾年樣本 6 個，再從挑選出來的樣本去繪製大環境場的變數分布，從中比較乾年以及濕年的這些變數在分布上以何差異。從分析中發現，在台灣附近乾溼年的海平面氣壓、東西向風場、南北向風場、地表長波輻射以及渦度場等距平的合成，都存在不同的相位差，其中或許有影響降雨量多寡相關的因子存在。接著同樣在冬季也同樣依照乾濕樣本年繪製合成圖，比較其和春季的差異，分析結果顯示在冬季時這些物理量也呈現相似的訊號，因此這些物理量或許可作為預報春季降雨多寡的重要因子之一。

接著為了解稻作與春季乾旱之間的關係，我們首先了解整個稻作的耕作時序，再配合蒐集到的乾旱資訊，得知最常發生乾旱的時間是在春雨季也就是一期稻作的耕種時間，而最常發生的地點是台南、高雄以及桃園等地區，而台南及桃園皆為稻作的重要生產地區之一，因此，我們得知一旦發生春季乾旱，將對稻作的影響甚鉅。