

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

臺灣地區降雨季度預測在水利面向之結合與應用
-以高屏溪流域為例

計畫類別：■氣象 □海象 □地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-M-10

執行期間：100 年 2 月 10 日至 100 年 12 月 31 日

計畫主持人：張倉榮、余化龍

執行機構：國立臺灣大學生態工程研究中心

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告 1 份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 100 年 11 月 30 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	臺灣地區降雨季度預測在水利面向之結合與應用-以高屏溪流域為例		
計畫編號	MOTC-CWB-100-M-10		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺灣大學生態工程研究中心		
年度	100	執行期間	100年2月10日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	759		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	100	100	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	759	759	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	張倉榮	余化龍	王嘉和
			李信沛
報告頁數	120	使用語言	中文
中英文關鍵詞	劇烈天氣、颱風、暴潮、海岸威脅、降雨預測		
研究目的	<p>本研究配合中央氣象局數值氣候預測系統開發及應用，並結合氣象面向與水利面向之需求與應用，以精進數值氣候預測產品之更新性與應用性，並藉此促進水利面向之防災預警與水資源管理更加完善。</p> <p>關於季度預測在水利面向之應用大致可以分為兩部分，一為豐水期之防洪預警，以及枯水期之水資源調配。每當豐水期之極端降雨事件以及枯水期之缺水事件是防洪預警及水資源調配最重要的問題之一，社會大眾對豐水期強降雨威脅以及枯水期久旱缺水等資訊需求也最為殷切，因此結合水利面向之需求以精進氣候預測產品，藉以增加季度預測之應用並作為防洪減災、水資源調配的參考，使天然災害風險管理機置更為周全，本研究將以高屏溪流域為例，架構氣象水利應用系統之雛型。</p>		

研究成果

本研究團隊利用現階段氣象局所提供之數值天氣或氣候預測等產品進行分析，利用 NCEP Reanalysis Data 以及 JMA Best Track Data 資料等對各季節可能發生之颱風路徑進行分析與評估。本研究先利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析由 NCEP 所提供 1951~2009 年之 Reanalysis Data，包含海面氣壓、海面溫度、可降水量、850hpa 之經向及緯向風速以及南方振盪指數等六個大氣變數，分析出的主要成分作為座標軸，建立一個高維度 EOF 空間，在此空間中結合 K-means 聚類法進行氣候特徵之分類，將氣候特徵相似之月份分類為同一個季節。最後將颱風侵臺季節分為三種：六月(前夏)、七至八月(盛夏)、九至十月(秋季)。接著在不同的季節中，分別使用經驗正交函數分析其主要特徵，這些分析出的主成分將在後續研究中，與颱風之行進路徑建立關係。

本研究所建立的颱風路徑聚類分析方法透過大氣變數之特徵，預估該季節颱風可能的路徑機率，並且此模式之架構可以配合在季度預報之預報產品，利用季度預報推估之大氣特徵，預估各種颱風行進路徑之機率。由於目前颱風路徑聚類分析方法用以評估侵臺之颱風，並針對臺灣附近地區之颱風分析，找出真正可能威脅臺灣之颱風其背後之主要因子。並討論不同類別路徑之不確定性，以建構以季度預報為基礎之機率式颱風路徑頻率分析。並結合中央氣象局侵臺颱風累積動能 (ACE)預報等資料分析可能侵臺的颱風個數，以及聖嬰年份、反聖嬰年份可能發生颱風之路徑與各季節颱風侵臺情況用以評估該年份可能之颱風暴潮威脅度評估。此一方式可預期將氣象局之預報產品與水利相關作業做有效之整合。

本計畫亦利用經驗正交函數法、動態因子分析法與分離季節性趨勢結合進行分析。在結果中我們發現，1.山區與平地降雨型態的有所不同，若以平地測站進行預報會有低估的可能發生；2.經向風速是影響高屏河流域降雨型態的最大的大尺度大氣變數，其次則為緯向風速及海平面氣壓。因此，若要改善對高屏河流域的降雨型態及時空分佈的預測，氣象局季度預報可以提供此三種大氣變數供水利單位進行預測及分析，並將山區、平地分別預報，對進一步的水文分析以進行水資源管理調配及防災也都會有相當大的幫助。

<p>具體落實應用情形</p>	<p>本計畫以蒐集國內外相關之氣候預測模式、颱風暴潮模式、海岸威脅評估方法及定義以及降雨預測評估方法等相關文獻作為基礎，並蒐集臺灣地區過去所發生之海岸災害與豪雨致災情況，分析不同災害性颱風暴潮之威脅性及降雨預警評估方法，試以釐清不同颱風路徑等對臺灣海岸地區可能造成威脅之區域及危害程度，以及不同氣候參數可以用來評估的平地與山區的降雨情況。</p> <p>本研究以中央氣象局侵臺颱風累積動能(ACE)預報並判定聖嬰年份、反聖嬰年、一般年份來評斷該年可能之颱風暴潮風險度評估；並進行平地、山區降雨型態評估分析結果顯示，經向風速、緯向風速及氣壓梯度為主要影響因子，利用此3種大氣參數進行預報，可改善現行只有平地測站之預報成果。</p>
<p>計畫變更說明</p>	<p>無</p>
<p>落後原因</p>	<p>無</p>
<p>檢討與建議 (變更或落後之因應對策)</p>	<p>無變更與落後</p>

(以下接全文報告)

摘要

本研究配合中央氣象局數值氣候預測系統開發及應用，並結合氣象面向與水利面向之需求與應用，以精進數值氣候預測產品之更新性、應用性以及後續研究，並藉此促進水利面向之防災預警與水資源管理更加完善。

關於季度預測在水利面向之應用大致可以分為兩部分，一為豐水期之防洪預警，以及枯水期之水資源調配。每當豐水期之極端降雨事件以及枯水期之缺水事件是防洪預警及水資源調配最重要的問題之一，社會大眾對豐水期強降雨威脅以及枯水期久旱缺水等資訊需求也最為殷切，因此結合水利面向之需求以精進氣候預測產品，藉以增加季度預測之應用並作為防洪減災、水資源調配的參考，使天然災害風險管理機置更為周全，本研究將以高屏河流域為例，架構氣象水利應用系統之雛型。

Abstract

For enhancing the modernization and applicability of the CWB numerical weather forecasting products, this study associates with not only the development and application of the CWB numerical weather forecasting system, but also the demand and application of both meteorological science and hydraulic engineering. Additionally, the study would promote the disaster warning and water resources management in hydraulic engineering.

The application of seasonal precipitation forecasting to hydraulic engineering contains two aspects: flood warning during wet season and water resources management during dry season. The extreme rainfall events and the lack of water supply are the most important issues. Therefore, integrating the demand of hydraulic engineering and seasonal precipitation forecasts would promote the weather forecasting products, and propose valuable information for flood mitigation and water resources management to assist the natural hazard risk control. The Kaoping River is selected as the case study herein for developing a framework of meteorological application system.

目錄

摘要	4
Abstract	5
目錄	6
一、前言	7
二、研究目的及意義	9
三、研究工作項目	10
四、研究方法	11
4.1 颱風路徑與海岸暴潮威脅	11
4.1.1 颱風路徑季節分類	16
4.1.2 颱風路徑模式建構	17
4.1.3 侵臺颱風暴潮威脅程度	21
4.2 降雨預測與防災預警	25
4.2.1 分離季節性趨勢(Seasonal Decomposition by LOESS).....	27
4.2.2 經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF).....	28
4.2.3 動態因子分析法(Dynamic Factor Analysis, DFA).....	31
4.2.4 降雨預測與防災預警研究結果	32
4.3 季度預測在水力面向之結合與應用	40
五、預定進度甘梯圖(Gantt Chart).....	41
六、相關文獻	42
附錄 A-颱風氣候與防災宣導	A-1
附錄 B-會議相關簡報、檔案.....	B-1

一、前言

臺灣位處於歐亞大陸與太平洋交界區域，每年夏、秋兩季，均有颱風侵襲，常造成重大災害，並且因為季風分明，使得臺灣中南部地區乾枯分明，豐水期雨量集中，枯水期久旱缺水。臺灣中南部地區因為枯水期養殖業與農業用水超抽地下水，導致地層下陷，當豪雨、颱風侵襲時，挾帶豐沛之雨量，常常造成暴潮溢淹、積水難退，居民之生命財產飽受威脅。舉凡農作物損害、養殖魚苗流失、海岸堤防損毀、橋樑與道路損壞等，損失金額非常龐大。根據營建署統計，從1961年至1991年豪雨、颱風已造成臺灣地區農業損失高達942億元(1991年實質貨幣)，平均一年損失約30億元；漁業損失則從1975年至1991年共有178億元，平均一年約10億。由此可見豪雨、颱風對我國所造成的生命財產影響非常嚴重。若可建立一套準確的長期氣候預報資料評估方法，對於臺灣地區之降雨與颱風暴潮進行威脅程度預報推估，則可提供臺灣地區災害損害作進一步的應變措施。

水資源長久以來一直是人類不可缺乏的資源，而由於過度的開發，造成近年來世界各地不斷發生極端水文事件，極端的降雨事件會造成洪水災害，對於人民的生命及財產有著莫大的威脅；另一方面，乾旱事件的發生，不但嚴重影響民生、農業與工業用水，水量的供應不足，對社會、經濟、生態等方面都將是一大考驗，並對人民造成相當的災害與損失。民國90年納莉颱風造成全臺灣災情嚴重，並創下多項紀錄，但在隔年民國91年卻發生了水資源供應不足的情形；民國98年8月前臺灣中南部地區嚴重缺水，但在民國98年8月8日時卻發生了嚴重之88水災，此些事件足以說明近年來的極端水文事件已對人民的生活造成嚴重的傷害。

國內在進行氣候預報的研究，除了各大專院校之大氣相關科系進行相關研究之外，則以中央氣象局為國內主要的氣候預報機構。中央氣象局於每個月底會發布下個月的月長期展望以及季長期展望，此為中央氣象局的長期預報課所負責之重要業務。月長期展望為預報未來一個月內，每一旬可能的溫度與降雨變化情況；季長期展望則以預報未來三個月內，每個月可能的溫度與降雨變化情況。無論是月長期預報或是季長期預報，預報內容均會對於過去的氣候以及未來可能的氣候做一概述，然後再以“偏低”、“正常”以及“偏高”的出現機率方式來進行預報。

因此本研究團隊利用氣象局數值天氣預測模式及資料對海岸地區威脅評估以及降雨季度預測可行性分析，以歷史觀測資料與預測模式利用統計分析與案例研究等方法來判定臺灣海岸區域之威脅程度以及降雨季度預測分析，並且提出運用氣象局數值天氣預測模式之方法與建議，進而提供水利面向之需求以精進氣候預測產品，藉以增加季度預測之應用並作為防洪減災、水資源調配的參考，使天然災害風險管理機制更為周全，本研究將以高屏河流域為例，架構氣象水利應用系統之雛型。

二、 研究目的及意義

中央氣象局近年逐步提高天氣預報指引及監測技術之精密度，以期有效提升天氣預報的尺度層級，增加常規天氣預報的精度並改善災害性天氣的監測及預警能力。並以提升氣象資訊服務效能、提升氣象防災資訊品質，以及加強氣象防災資訊服務為主要目標之一，以達防災減災之效益。

近年來高屏河流域因氣候異常造成了嚴重的損失與災害，以近年的降雨情況而言，枯水期降雨量減少，造成休耕、限水等現象；豐水期豪大雨事件頻傳，使得堤防溢淹、低地淹水等事件。為了有效的達到水利防災預警與水資源管理，必須配合中央氣象局之災害性天氣監測與預報作業建置，以達到氣象科學(上游端)與水利應用(下游端)之連接與合作。

因此本計畫將利用中央氣象局所發展之氣候預測產品來進行降雨防災預警評估，以提出防災預警系統前端之雨量推估實行方案，並配合中央氣象局之天氣預報的尺度層級精進，以高屏河流域為示範區域，並結合中央氣象局氣候預測產品、水利面相防災預警機制，以及水資源調配原則，使天然災害風險管理機制更為周全，以達到架構氣象水利應用系統的雛型。

三、 研究工作項目

本計畫將以臺灣西南部之高屏河流域為研究示範區域，利用中央氣象局所提供之實際觀測資料、季度預報及數值模式進行分析，推估可能形成之颱風侵臺路徑、颱風暴潮，以及可能之降雨推估，並與防災預警結合，評估颱風暴潮以及降雨推估對高屏河流域之威脅及危害程度，最後提出颱風氣候與防災宣導，以及防災預警系統前端之雨量推估方法。相關細部規劃工作項目詳述如下：

1. 颱風氣候與防災宣導：根據侵臺颱風路徑類型，以海岸災害為核心，提供明白易懂的口語化且有科學基礎之氣候與防災宣導材料。
2. 防災預警系統前端之雨量推估方法：提出可與氣象局數值氣候預測產品銜接的防災預警系統前端之雨量推估實行方案。
3. 氣候資訊在防災面向的應用：提出適合給政府各單位參考的氣候與防災架構說明，以高屏溪為例提出具體可行的建議。

四、 研究方法

本計畫蒐集國內外相關之氣候預測模式、颱風暴潮模式、海岸威脅評估方法及定義，以及降雨預測評估方法等相關文獻作為基礎，並以臺灣地區過去所發生之海岸災害與豪雨致災情況，分析不同災害性颱風暴潮之威脅性及降雨預警評估方法，釐清不同颱風路徑等對臺灣海岸地區可能造成威脅之區域及危害程度，以及不同氣候狀況可能帶來的豪雨威脅與缺水情況；分析氣象局數值天氣預測模式及資料對海岸地區威脅與降雨預測可行性評估，並提出運用氣象局數值天氣預測模式之方法與建議，進而提供防災預警系統之推估方法及所需之天氣預測資料。

4.1 颱風路徑與海岸暴潮威脅

颱風是臺灣所面對的各種天然災害之中最常發生的，並且對生命安全造成重大威脅的災害，平均每年約有三至四個颱風侵襲臺灣(Wu and Kuo 1999)。颱風侵襲臺灣時除了帶來強烈的暴風以及降雨之外，並且有可能引進西南氣流或是東北季風，更加強了原本就猛烈的雨勢，同時沿海地區可能會產生暴潮、海水倒灌的現象，使得沿海地區人們加倍受到威脅。為了預防這些嚴重的災害，對於颱風路徑的預測便顯得相當重要，目前世界上有 CSU、NOAA、香港大學、Tropical Storm Risk 等氣象研究中心在進行颱風路徑分析以及預測。

在過去許多前人的研究中發現海面氣溫、聖嬰/反聖嬰現象、風場與颱風生成之間的關係(Gray 1984; Haarsma, 1993; Whitney and Hobgood 1997; Chan and Liu 2004; Camargo 2007)，其中海平面溫度為提供熱帶氣旋增強所需要的能量來源，當颱風生成時的海面溫度必須要高 26.5°C ；聖嬰/反聖嬰現象循環則影響海平面溫度熱區的位置變化；風場則主要影響大氣的不穩定性，進而促進或抑制氣旋的生成與增強。Camargo(2004)指出，當聖嬰年份時，侵襲西北太平洋之強烈颱風(categories 3-5)數量較多，如圖 4-1 所示；Wu(2003)之文獻中指出，當反聖嬰年時，9、10、11 月侵襲臺灣以及中國華南地區之秋颱明顯增加，如圖 4-2 所示。本計畫亦將 1960-2010 年分為聖嬰年份、反聖嬰年、一般年份三種，其中聖

聖年份侵臺月份以7、8月為主，反聖嬰年以9、10月為主，而一般年份以8、9月為主；而以侵臺颱風強度而言，聖嬰年每年平均有1.4個強颱風侵臺，反聖嬰年約1個強颱風侵臺，一般年份約1個強颱風侵臺。

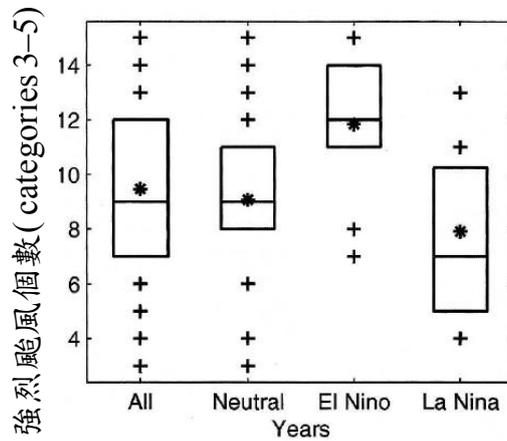


圖4-1 1970-2002年侵襲西北太平洋之強烈颱風年平均個數

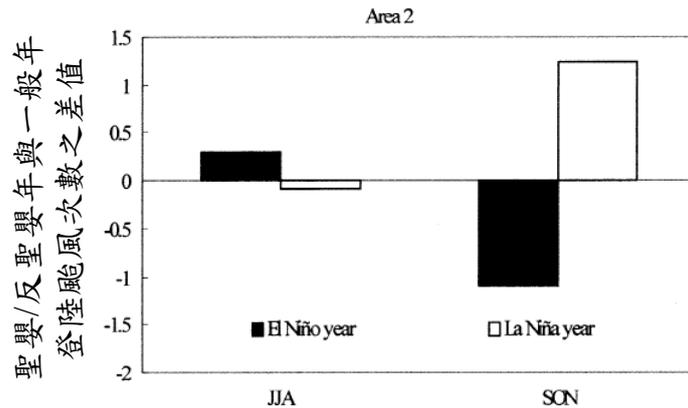
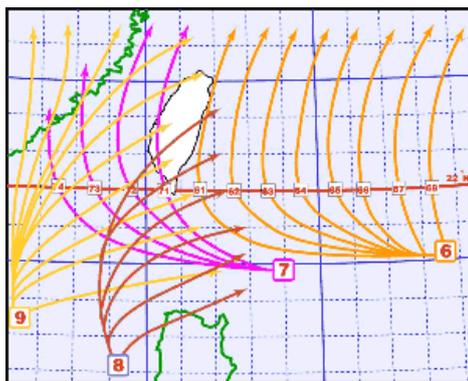


圖4-2 不同年份登陸華南地區之颱風次數年平均差值

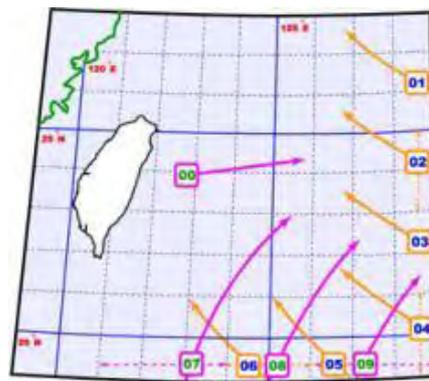
颱風的路徑亦會受到許多因素的影響，例如氣壓場分布、聖嬰現象(Chan 1985; Camargo 2007)、風切以及槽線(trough)(Holland 1995; Simpson 1997)等等，這些因素很容易直接影響颱風的行進路徑，這些影響颱風生成與路徑的大氣因素，後續都納入分析考量的變數之中。

在颱風路徑預測的部份，Camargo(2007)利用群聚的方式來分類颱風路徑，歸納出各種季節中出現頻率較高的颱風路徑，結果顯示七、八、九月是颱風生成頻率最高的月份，並且分析聖嬰現象發生與否與颱風生成數量間之關係、大尺度

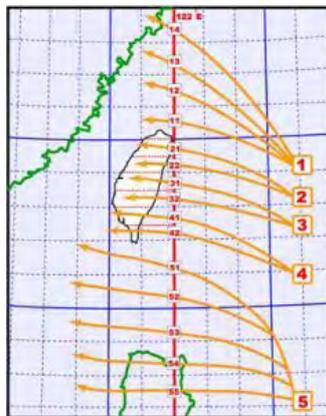
環流與颱風路徑之間的關係。Zhang and Krishnamurti(1997)、Goerss(2000)、Aberson(2001)等人提出利用 ensemble 的動力模式，來改善過去的颱風路徑預測結果，相較於與 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Hurricane Prediction System)、NOGAPS(Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)、UKMO(United Kingdom Meteorological Office Global Model)等模式所預測之颱風路徑，使用 ensemble 動力模式的方法使得未來 24h(16%)、48h(20%)、72h(23%) 的路徑預測水準都獲得了改善。Bril(1995)亦利用 Kalman filter 建立颱風路徑預報模式，並且與 HURRAN、CLIPER、NHC 等三個模式輸出進行比較，同樣獲得了比 HURRAN 以及 CLIPER 優秀的成果。將歷年侵襲臺灣的颱風路徑先進行分類，此部分將與中央氣象局目前所採用的 0~9 之颱風路徑分類進行比較與結合，其各颱風路徑如圖 4-3 所示。



北行颱風(CWB網頁)



0類路徑(CWB網頁)



西行颱風(CWB網頁)

圖4-3 0~9之颱風路徑分類

臺灣位處西北太平洋颱風行進區域，也是亞熱帶氣候與熱帶氣候交接區域，每年夏秋之際平均約遭受到 3 個以上之颱風侵襲。在於颱風侵襲期間，除了強風豪雨之外，往往也造成海岸地區海水位異常上升，這些因颱風所引起的異常海水位變化稱為「颱風暴潮」。颱風暴潮的大小通常與颱風強度、暴風半徑、風速大小、風向角及颱風行徑路徑等因子有關(徐月娟 2001；歐善惠等 1999；詹錢登等 2005；Jan et al. 2006)。

颱風暴潮往往加大潮位高度對海岸地區之威脅，加重沿海低窪地區海水倒灌、河口與河川之洪水溢淹等災害。因此，為了評估海岸地區之威脅方式及威脅程度，颱風期間海水位的推估非常重要，其中颱風期間海岸地區之海水位包含天文潮潮位及颱風暴潮潮位，其中颱風暴潮生成原因主要係受到颱風低氣壓及強風的影響，所造成海水位之異常上升，屬於氣象潮，其特性與天體引力所引發週期性海水位變化之天文潮潮汐有很大差異。

根據邱(2007)之研究，將 1992 年至 2004 年臺灣沿岸 23 個測站潮位資料整理可得出的實測水位、預測天文潮位及暴潮偏差可繪製成暴潮偏差歷線圖，從中可得知，強烈颱風一般而言會造成的暴潮偏差為較大，如強烈颱風席斯(1994)所造成淡水測站的最大暴潮偏差高達 92.8cm，而輕度颱風造成的暴潮偏差較小。另外由中度颱風奇比在澎湖測站(2001)造成的最大暴潮偏差為 94.2cm，此最大暴潮偏差大於強烈颱風，其原因為可能為此颱風的路徑直接通過澎湖地區沿海地區，因此形成較大的暴潮偏差。由此可知，除了颱風強度會影響各地區的暴潮偏差外，颱風路徑亦是影響各地區暴潮偏差的重要因素之一。文中亦提出影響臺灣各區域之侵臺颱風路徑，以高屏河流域而言，以侵臺颱風路徑 4、5、7、8、9 類對暴潮有較大的影響。

本計畫利用中央氣象局侵臺颱風累積動能(Accumulated Cyclone Energy index, ACE index)預報資料，評估颱風侵襲臺灣鄰近區域之年際個數變化，當侵臺颱風累積動能年際個數變化增加時，代表該年份可能有較多之颱風侵襲臺灣，

因此該年颱風暴潮對海岸威脅亦有較高之風險。而比對歷史颱風資料，當侵臺颱風累積動能年際個數變化減少時，發現秋颱侵臺機率明顯增高，15 年中有 14 年 9-12 月發生侵臺颱風；有 11 年 10-12 月發生侵臺颱風，因此當侵臺颱風個數的年際變化減少時，9-12 月有較高之颱風暴潮風險。

4.1.1 颱風路徑資料來源

1、Weather Data

本研究所使用的大氣資料分別為：1. sea surface temperature (SST) 2. sea level pressure (SLP) 3. precipitable water (PWAT) 4. 850-hPa relative vorticity (Vor850) 5. vertical wind shear (VWS) 6. Southern Oscillation Index (SOI)。其中 SLP, PWAT, Vor850 及 VWS 來自於 NCEP 所直接或間接提供之 NCEP/NCAR reanalysis data。vertical wind shear (VWS) 的計算方式則是根據 CLARK(2002)等人提出的計算方式計算。NCEP reanalysis data 自 1948 年開始即有提供，SST 資料來源則是美國 NOAA 所提供之 ERSST 資料。本研究選用 1951 至 2009 年間各大氣變數之月平均網格資料，網格大小為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，研究範圍則選取 $60^{\circ}E \sim 150^{\circ}W$ 、 $0^{\circ}N \sim 70^{\circ}N$ (如圖 4-4)。

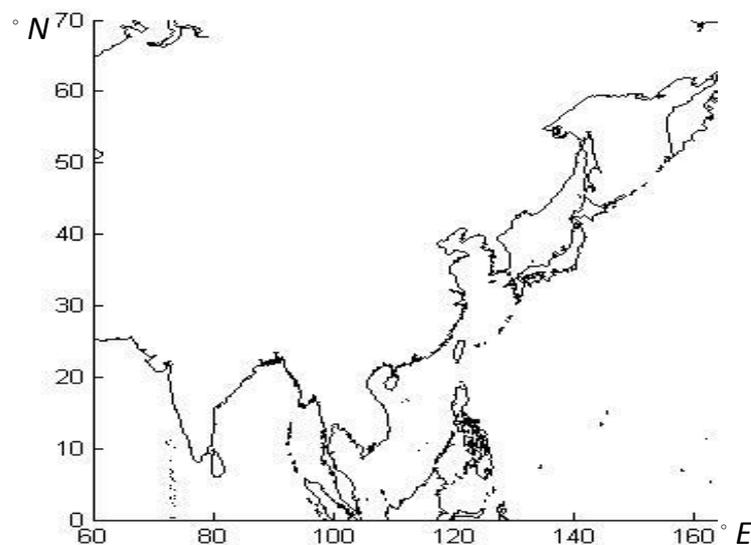


圖 4-4 選取之研究區域

2、JMA Best Track Data

本研究使用颱風路徑資料為日本氣象廳 JMA(Japan Meteorological Agency)1951-2009 年西北太平洋地區，六小時觀測頻率的颱風路徑觀測資料。其中利用 1951-2000 年的颱風路徑作為模式建立的資料來源，2001-2009 的颱風路徑資料則預計作為模式的驗證資料。日本氣象廳的颱風資料觀測範圍為 $0^{\circ} - 60^{\circ}\text{N}$ ， $100^{\circ}\text{E} - 180^{\circ}$ (圖 4-5)。本研究利用 1951-2000 年共 1019 個颱風路徑作為建立模式的資料來源，此外，颱風強度自熱帶性低氣壓以上即納入路徑推估模式中。在颱風季節分類方面，六月發生的颱風包含在初夏的颱風中，而七月與八月的颱風則歸類為盛夏颱風，九月與十月的颱風則為秋季颱風。

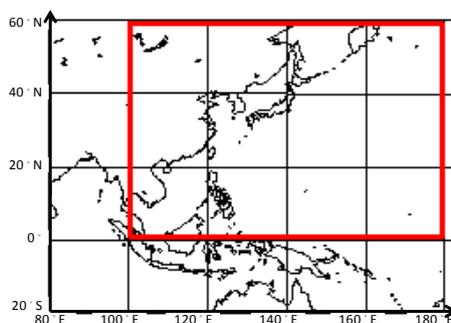


圖 4-5 日本氣象廳颱風路徑觀測範圍

(來源:<http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/intcorp.html>)

4.1.2 颱風路徑季節分類

為了區分不同時節之主要大氣機制，本研究先利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析由 NCEP 所提供 1951~2009 年之 Reanalysis Data，包含海面氣壓、海面溫度、可降水量、850hpa 之經向及緯向風速、南方振盪指數等六個大氣變數，利用分析出的主要成分作為座標軸，建立一個高維度 EOF 空間，在此空間中結合 K-means 聚類法進行氣候特徵之分類，將氣候特徵相似之月份分類為同一個季節。最後將一年可能之颱風季節分為三個季節：六月(前夏)、七至八月(盛夏)、九至十月(秋季)。

接著在不同的季節中，分別使用經驗正交函數分析其主要特徵，這些分析出的主成分將在後續研究中，與颱風之行進路徑建立關係。

4.1.3 颱風路徑模式建構

利用前述之季節分類，將颱風依季節分類，再分別進行路徑聚集分析(Curve Clustering Analysis)。利用路徑聚集分析分類出不同路徑聚集之後，統計各 1951-2000 年每年各季的各路徑分類發生個數，並與同一時間 NCEP 各個變數的資料進行 EOF 分析找出前三個較重要的主成分(Expansion Coefficient, EC)進行對照。利用 Generalized Linear Model 的卜瓦松分配 (Poisson distribution)來建立各個路徑分類與各個大氣變數主成分的模式。即建立各路徑分類為 NCEP 各個變數其主成分的函數：

$$Track_i = f(EOF_k \text{ of Weather Variable}_j)$$

其中 $i=1,2,\dots$ track cluster number , $k=1,2,3$

$j=sst,slp,vor850\dots$

$Track_i$ 為第 i 個路徑分類發生的個數

例如第一個路徑分類可以寫為：

$$Track_1 = f(SST_{EOF1}, SST_{EOF2}, SST_{EOF3}, SLP_{EOF1}, \dots)$$

NCEP 資料一共有 6 個變數，再加上每一個變數都選了最重要的前三個主成分，因此整個模式裡會包含多個變數(Full Model)如下表 4-1，因此需再利用 AIC(Akaike Information Criterion)選擇重要的變數作為減低變數後的模式 (Reduced Model)。

表 4-1：颱風路徑模式之候選大氣變數主成分

vwsEC1	vwsEC2	vwsEC3	slpEC1	slpEC2	slpEC3	pwatEC1	pwatEC2
pwatEC3	vorEC1	vorEC2	vorEC3	sstEC1	sstEC2	sstEC3	SOI

(a) 颱風路徑聚集分析

颱風路徑聚集分析方面，Gaffney(2004)及 Camargo(2007)提出了利用以 Finite mixture model 為基礎的 Regression mixture model 架構來分類各個颱風路徑聚集。Regression mixture model 為 standard mixture modeling framework 的一種延展，乃是將架構中的 marginal component densities 替換為 conditional density

component。新的條件密度函數是在自變量(ex.時間)的條件下，資料(ex.颱風位置)的函數。本模式將經度與緯度視為條件上獨立的變數對時間用 quadratic polynomial regression functions 進行迴歸，因此完整的颱風路徑聚集函數即為經度與緯度的函數。此外，更高階的多項式以及 spline 等亦可以使用在整個 mixture model 的架構中，但是 Camargo(2007)提到，利用二次多項式迴歸即可以達到不錯的 fitting 結果亦有較佳的解釋性，因此本研究亦採用此法。

假設每一個颱風路徑都由 K 個不同迴歸模式之一所產生，每一個都有其形狀參數(shape parameters)。因此計算聚集必須要解決的目標即是(i)利用颱風路徑資料找出全部 K 個不同迴歸模式的參數(ii)推算出 K 個不同的迴歸模式中，哪一個最適合用來產生每一個颱風路徑。從已知的路徑中找出具有最高的事後機率 (posterior probability)即為迴歸路徑聚集，此外，並利用 EM-algorithm 來推求模式的參數。在此僅簡單介紹，更詳細的方法與討論可以參見 Gaffney(2004)的文章。

(b) Generalized Linear Model

GLM(Generalized Linear Model) 又稱廣義線性模式，是一種廣泛應用的線性模式。在過去的線性迴歸模式中，反應變數都必須服從常態分配(normal distribution)。然而在實際運用上遇到的狀況並非全部都是常態分配的，而可能是二項式分配(binomial distribution) 或是卜瓦松分配 (Poisson distribution)，因此 GLM 可以視為是一般線性模型的擴展。

原本的一般線性模型可以表示如下：

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_{p-1} x_{p-1,i} + \varepsilon_i \quad (4-1)$$

其中 y_i 是為第 i 個反應變數(response)， $i=1, \dots, n$ 。

x_1, x_2, \dots, x_{p-1} 為 $p-1$ 個解釋變數。

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ 為解釋變數係數。

ε 為誤差項並且假設服從常態分配，以 $N(0, \sigma^2)$ 簡化表示。

其中 σ^2 為變異數。

擴展(4-1)式的假設條件，使其變成一個應用範圍更廣的 GLM，而 GLM 可以由下列三個部分所構成：

I. 系統成分 (systematic component)：

由 p 個解釋變數跟其係數所形成的一個線性預測值向量：

$$\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)^T \text{ (linear predictor) :}$$

$$\eta = X\beta, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{n,p-1} \end{bmatrix}, \quad \beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1})^T$$

其中 η 是由 n 個線性預測值所構成的向量。

T 表示為向量的轉置。

X 稱為設計矩陣 (design matrix)。

β 則是需要估計的參數，可利用疊代加權最小平方法求得。

II. 連結函數 (link function)：

將解釋變數構成的線性組合與期望值 Y 連結在一起的一個函數，用以調整模型成為一個線型模型的轉換函式，通常以 $g(\cdot)$ 表示。本研究採用 \log 為連結函數。

$$\begin{aligned} \eta &= X\beta \\ &= E(Y) = g^{-1}(\eta) \end{aligned}$$

III. 隨機成分 (random component)：

反應變數 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 為 n 個觀測值並以向量表示。 Y 需相互獨立且其機率分配都服從某一個相同的指數族 (exponential family) 機率分配。反應變數可能的機率分配較常見的有下列五種：(1) 二項式分配 (binomial distribution) (2) 卜瓦松分配 (Poisson distribution) (3) 伽瑪分配 (gamma distribution) (4) 常態分配 (normal distribution) (5) 逆高斯分配 (inverse Gaussian distribution)。

(c) 路徑聚集個數

在路徑聚集分析中，為了要找出最佳的路徑聚集分類個數，我們觀察不同路徑聚集個數的 log-likelihood 值來決定最後要用幾個聚集個數。

log-likelihood 被定義為在這個模式下，觀測資料的 log-probability，常被用來作為模式的適合度指標。從圖 4-6 可以看出，log-likelihood 隨著聚集個數的增加而增加(絕對值越小)，無法直接看出哪一個聚集個數為最佳。因此在不要有太多聚集個數以及 log-likelihood 的取捨下，選取下圖轉折較大，log-likelihood 開始隨聚集個數趨緩增加的個數約為 5-7 個，而取六個聚集個數為最終個數的選擇。

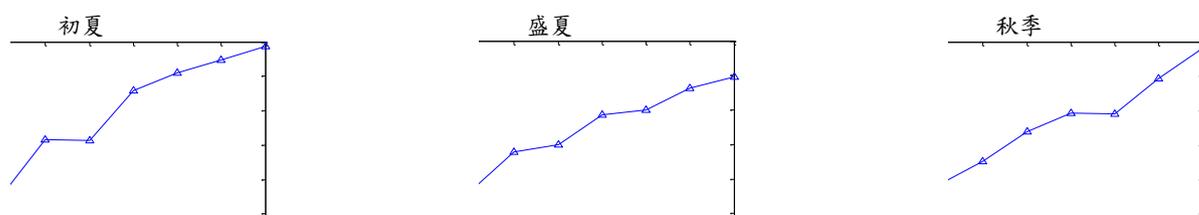


圖 4-6 初夏、盛夏、秋季不同路徑聚集分類個數對 log-likelihood 變化

(d) 臺灣附近颱風路徑聚集分類

為了更了解歷年颱風路徑分類對臺灣的影響，以及增加本模式在臺灣的可用度，本部分僅挑選颱風路徑有經過臺灣附近的颱風，也就是以臺灣南投埔里地理中心(120°58'25"E, 23°58'32"N)為中心，向東西南北各增減六度所圍成的一個矩形範圍，若歷年的颱風路徑有經過此範圍者，則將被納入本模式分析，否則不予考慮。挑選颱風後，再進行與上述相同之流程進行分析。

此外，為特別觀察各路徑對高屏河流域的影響，選定高屏河流域出海口為中心週邊一度的範圍，若颱風路徑經過此一範圍內則視為中心影響高屏河流域，以計算各路徑侵襲高屏地區的機率，如圖 4-7；圖 4-8 為颱風路徑研究流程圖。

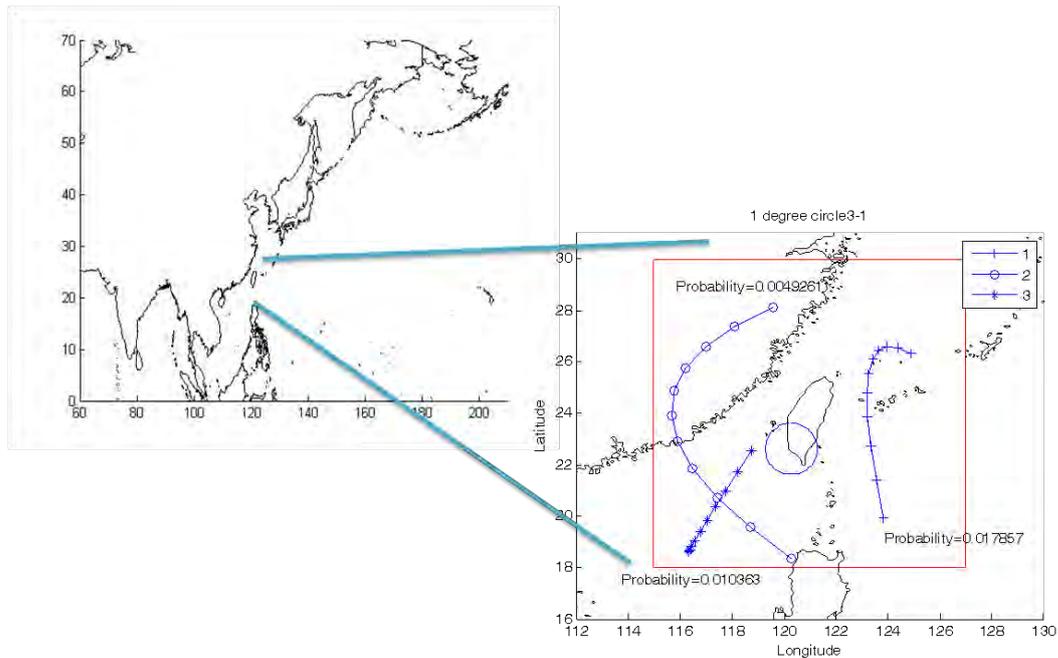


圖 4-7 高屏河流域附近 1 度範圍示意圖

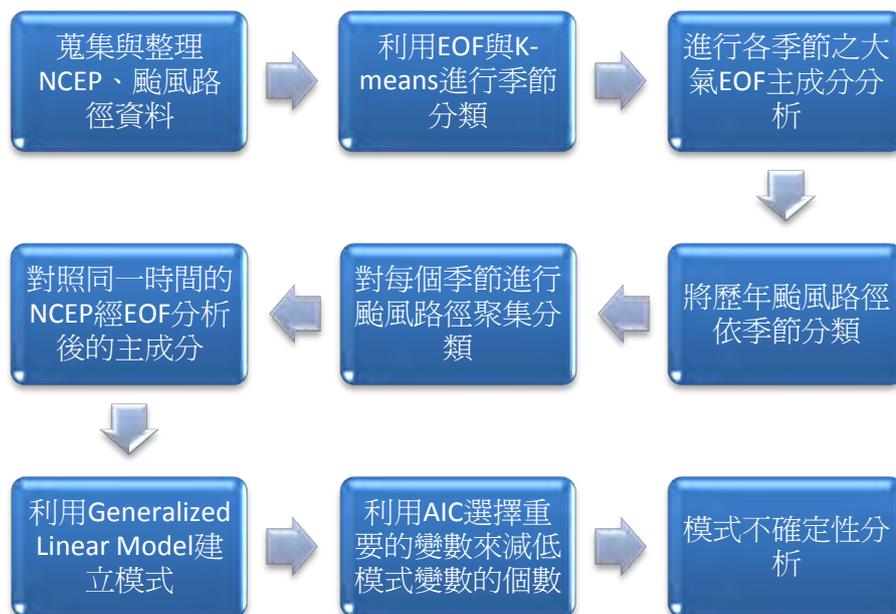


圖 4-8 研究流程圖

4.1.4 侵臺颱風暴潮威脅程度

本計畫依據相關以季節侵臺颱風路徑、聖嬰/反聖嬰現象、侵臺颱風累積動能此三項因子來評估侵臺颱風暴潮威脅程度。利用季節颱風路徑聚集分析結果判定該年份是否有颱風暴潮風險，其中高屏河流域初夏以颱風路徑聚集中之路徑 1 以及路徑 2 有較高的風險(類似中央氣象局颱風路徑 7、8 類)；盛夏以颱風路徑

聚集中之路徑 1 以及路徑 6 有較高的風險(類似中央氣象局颱風路徑 4、5 類)；而秋季以颱風路徑聚集中之路徑 1 以及路徑 4 有較高的颱風暴潮風險(類似中央氣象局颱風路徑 8、9 類)。並以聖嬰/反聖嬰現象判定該年份颱風侵襲可能之月份，其中聖嬰年份以 7、8 月有較高的颱風侵襲可能性；反聖嬰年以 9、10 月有較高的颱風侵襲機率；而一般年份颱風侵襲機率以 8、9 月較高。本計畫利用中央氣象局侵臺颱風累積動能之年際個數變化來評估該年份侵臺颱風暴潮威脅程度，當該年份侵臺颱風累積動能之年際個數變化大於 0.5 時，表示該年份初夏、盛夏(6、7、8 月)有較多颱風會侵襲臺灣之可能；而當該年份侵臺颱風累積動能之年際個數變化小於 0.5 時，表示該年份秋季(9、10 月)可能有較多颱風會侵襲臺灣。

(a) 暴潮風險評估模式

因此，本計畫以此三項因子來評定高屏河流域颱風暴潮風險度評估。初夏(6 月)：符合零項或一項風險因子，風險度為低；符合兩項風險因子，風險度為中；符合三項風險因子，風險度為高。由於盛夏屬於颱風侵襲的敏感時期，當颱風暴潮在 7、8 月份時，沿海區域風險承受度較低，故符合零項風險因子，風險度為低；符合一項或兩項風險因子，風險度為中；符合三項風險因子，風險度為高。秋季(9、10 月)：符合零項或一項風險因子，風險度為低；符合兩項風險因子，風險度為中；符合三項風險因子，風險度為高，如表 4-2 所示。

表 4-2 初夏、盛夏及秋季暴潮風險度定義

暴潮 風險度	符合因子個數		
	初夏	盛夏	秋季
高	3	3	3
中	2	1、2	2
低	1	0	1

(b) 歷史暴潮事件風險定義

本計畫暴潮風險評估模式之驗證，採用歷史資料 1981-2009 共 29 年高雄港潮位站逐時潮位資料，並利用調和分析求出暴潮偏差，並挑選 6-10 月份當月最大暴潮偏差值，視為當月暴潮極端值。以該值作為歷史事件與風險評估模式之驗

證參考。歷史事件定義如下：初夏、盛夏(6、7、8月)：該月份最大暴潮偏差低於30cm者，風險度定義為低；該月份最大暴潮偏差高於30cm但低於50cm者，風險度定義為中；該月份最大暴潮偏差高於50cm者，風險度定義為高，如表4-3所。秋季(9、10月)：該月份最大暴潮偏差低於40cm者，風險度定義為低；該月份最大暴潮偏差高於40cm但低於60cm者，風險度定義為中；該月份最大暴潮偏差高於60cm者，風險度定義為高，如表4-4所示。海岸堤防設計水位以愛河為例，採7-10月之大潮平均高潮位之平均值為標準設計，並未考慮到暴潮偏差造成的風險。因此當暴潮偏差達30cm以上時，堤岸便有出水之顧慮，定義此值為低風險與中度風險之臨界點。而當暴潮偏差達50cm以上時，堤岸有溢淹風險，定義此值為中度與高度風險之臨界點。然而在秋季時，將低風險與中風險、中風險與高風險之臨界值上修，乃因高雄港秋季之大潮平均高潮位歷年統計結果(如表4-5所示)，明顯與春、夏兩季低於至少10cm以上，即堤岸可承受之暴潮量較多。因此定義秋季之臨界值上調10cm。

表 4-3 初夏、盛夏暴潮風險度分級

暴潮偏差值(cm)	風險度
50 以上	高
30~50	中
30 以下	低

表 4-4 秋季暴潮風險度分級

暴潮偏差值(cm)	風險度
60 以上	高
40~60	中
40 以下	低

表 4-5 高雄港潮位站歷年 6-10 月大潮平均高潮位統計結果

月份	大潮平均高潮位(cm)
6	58
7	64
8	61
9	46
10	41

(c) 暴潮風險模式驗證結果與評析

本研究採用歷史資料 1981-2009 共 29 年資料，評估每年 6-10 月之每個月風險度共 135 個月份。本模式採用的三項因子綜合而言，準確度可達 0.63。由於季度預報屬於長期預報的範疇，隨著時間的發展修正大氣參數，各項因子推估可以更為精確，以改善此模式的準確率。然從長期推估而言，準確率 0.63 之結果已相對出色。本研究以 1990 年(一般年份)、2004 年(聖嬰年份)、2007 年(反聖嬰年)為例來評定該年颱風暴潮風險評估，如表 4-6 所示。以 1990 年為例，6、8、9 月有發生影響高屏流域較大暴潮之颱風路徑；並且 1990 年為一般年份，故 8、9 月為高風險月份；1990 年侵臺颱風累積動能之年際個數變化為 1.19，所以 6、7、8 月有較高的暴潮風險。依據表 4-2 之風險度定義風險層級，1990 年 10 月為低風險度，6、7、9 月為中風險度，8 月為高風險度。

表 4-6 颱風暴潮風險評估

	年	路徑	月份	ACE	暴潮風險	該月歷史最大暴潮(cm)
一般年份	1990	V	6	1.19	中	44
		X	7	1.19	中	35
		V	8	1.19	高	64
		V	9	1.19	中	40
		X	10	1.19	低	28
聖嬰年份	2004	V	6	0.79	中	36
		X	7	0.79	中	43
		X	8	0.79	中	38
		V	9	0.79	低	29
		X	10	0.79	低	27
反聖嬰年份	2007	X	6	0.49	低	18
		X	7	0.49	低	23
		V	8	0.49	中	43
		V	9	0.49	中	30
		X	10	0.49	低	32

4.2 降雨預測與防災預警

另一方面，除了分析颱風路徑並且進行預報之外，地面降雨的降尺度推估亦是本計畫之研究目標之一。本研究地面部分以臺灣南部之高屏溪流域為研究區域，蒐集該流域中央氣象局 1994 年至 2010 年 28 個自動測站(表 4-7、圖 4-9)實際觀測之小時降雨量，並整理為每週連續 24 小時最大降雨量。高屏溪流域主流河長 171.00 公里，為全臺第二長河；流域面積廣達 3,256.85 平方公里，分佈於南投縣南端、嘉義縣東端、台東縣西端，及高雄市、屏東縣的 23 個鄉鎮市區，流域面積為全臺第一大河。高屏溪流域內平均降雨量每年達 3046 毫米，平均年逕流量高達 84 億 5500 萬立方公尺。平均年輸砂量是 3561 萬噸，每平方公里流域面積輸送 10934 噸，居全世界第 11 位。近年來由於氣候變遷的影響，極端降雨事件層出不窮，2009 年莫拉克颱風就曾經在此流域五天內降下 2908.5 毫米的驚人雨量，造成嚴重的災情及生命財產損失。

表 4-7 高屏溪流域中央氣象局測站站名、站碼、海拔對照表

站名	站碼	海拔(m)	站名	站碼	海拔(m)
排雲	C1V17	3690	甲仙	C0V25	270
南天池	C1V19	2700	大津	C1V34	190
溪南	C1V27	1792	古夏	C1R11	140
小關山	C1V22	1781	月眉	C1V26	112
御油山	C1V30	1637	三地門	C0R15	99
阿禮	C1R13	1040	吉東	C1V32	95
民生	C1V16	1040	旗山	C1V33	63
尾寮山	C0R10	1018	新園	C1R16	56
梅山	C1V20	860	美濃	C0V31	46
上德文	C1R12	820	里港	C1R09	42
高中	C1V23	760	溪埔	C1V35	30
瑪家	C1R14	740	鳳山	C1V44	27
復興	C1V21	700	屏東	C1R17	25
新發	C1V24	470	大寮	C1V18	24

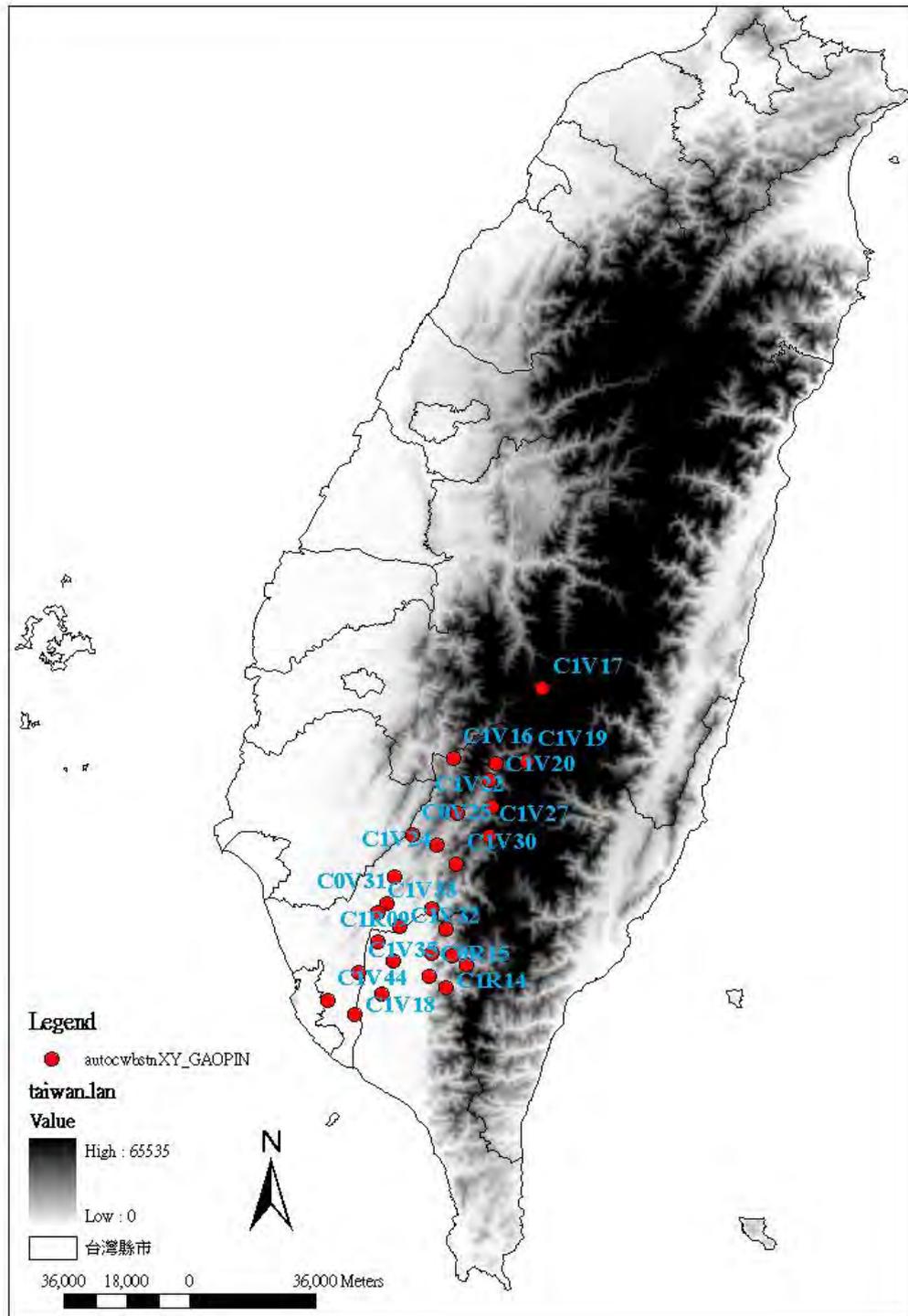


圖 4.9 高屏河流域中央氣象局測站地理位置及海拔高程分布圖

本研究大氣部分大尺度大氣變數採用美國 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)所提供之同一時間尺度再分析資料(NCEP/NCAR Reanalysis 1)，選取海面氣壓(slp)、海面溫度(sst)、850hpa 之經向(vwnd)及緯向風速(uwnd)等四個大氣變數以建立本模式，選取的資料為以臺灣為中心鄰近的 80 個網格點

資料，並以中央氣象局所提供之降雨季度預測進一步分析本模式，瞭解季度預測產品對於本流域未來的時空降雨特性的預測能力，未來將進一步以季度預報產品整合本模式以預測流域未來的時空降雨特性。

為了區分不同時節之主要大氣機制，本研究先利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析由 NCEP 所提供 1994 年至 2010 年之再分析資料(Reanalysis Data)，利用分析出的主要成分作為座標軸，建立一個高維度 EOF 空間，分析各大氣變數的主要特徵。接著使用動態因子分析法(DFA)分析高屏河流域 28 個降雨測站之間每週連續 24 小時最大降雨的時空特性，包括測站之間之共同趨勢與測站之間降雨型態的關係，其次利用經 EOF 分析後的 NCEP 大氣變數作為解釋變數，瞭解那些變數對高屏河流域降雨分布的型態有影響，若為氣象局季度預報已有之產品，則可從本模式預測本流域未來的時空降雨特性；若為季度預報所沒有之產品，則可作為未來季度預報產品發展的參考，最後再以中央氣象局降雨季度預測資料納入本模式中進行分析，分別作為 DFA 之反應變數以及解釋變數，以結合季度預報資料於降雨時空分佈之應用，瞭解季度預測趨勢與各測站之間的關係。所有資料都事先經過標準化處理，以避免不同尺度資料的影響導致結果的差異。以下分別詳述本研究採用之各方法：

4.2.1 分離季節性趨勢(Seasonal Decomposition by LOESS)

在分析不同因子之間之共同趨勢時，在長時間尺度下，整體資料大趨勢的變動往往會受到季節性因素的影響，使得在進行因子分析的時候無法觀察出因子之間的擾動關係。因此我們必須將每一個變數資料的時間序列的季節性趨勢分離出來並移除，這樣才能顯現出資料中真正細微的變化。本研究中，所有資料都事先經過 Repeated LOESS smoothing 去除季節性趨勢處理再進行後續分析。

假設一個單變量時間序列 Y_t ，則 Y_t 可以用以下模式表示：

$$Y_t = Trend_t + Seasonal_t + remainder_t$$

因此，此一單變量時間序列可以被分解為三部分分別為大趨勢、季節性趨勢以及剩餘資訊。此方法為 Cleveland(1993)所提出，利用 Repeated LOESS smoothing 來計算各部份的值。最後去除掉季節性趨勢，僅以 Trend + Remainder 進行下一步的動態因子分析。

4.2.2 經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)

經驗正交函數(EOF)與一般統計上常用的主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)其實並無二致，我們可將一個時空間變數透過 EOF / PCA 拆解成多個時間與空間的變數，這些拆解出來的時空間變數經過乘積與線性疊加之後，可以還原成原本的時空間變數(Pearson 1901; Hotelling 1933; Hannachi, Jolliffe et al. 2007)，如式 4-2：

$$X(t,s) = \sum_{k=1}^M c_k(t)u_k(s) \quad (4-2)$$

式中 $X(t,s)$ 代表時空間變數矩陣，矩陣維度包含空間座標以及時間序列， $u_k(s)$ 代表此時空間變數的第 k 個空間特徵，亦即第 k 個空間變數； $c_k(t)$ 代表此時空間變數的第 k 個時間特徵，可看作第 k 個空間變數所佔之權重(expansion coefficient)； k 由 1 至 M 按照此 EOF 在原始資料中所佔的解釋變異量大小排列，EOF1 為原始資料中變異量最大的空間特徵，在本研究中最多僅使用前三個 EOF 即足以解釋原始資料中 70~80%的變異量。

在原始的 EOF 方法中，首先將資料移除時間趨勢(trend)之後，排列成時間序列×空間座標的數值矩陣 X ：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & & & & \vdots \\ x_{31} & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

式中，橫列為空間位置(由 1 到 p)，直欄為該空間位置的時間序列(由 1 到 n)

便可計算出共變異矩陣 $S = \frac{1}{n} X^T X$ ，EOF 方法的目標即是找到一些互不相關的 (uncorrelated) 變數組合以解釋最多的原始變量，亦即找到共變異矩陣特徵向量 (eigenvector) $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_p)^T$ ，使得 X 在經過此單位向量投影轉換後得到的 $X\vec{u}$ 可以有最大的解釋變異量。

$$\begin{aligned} \max(\vec{u}^T S \vec{u}), \quad s.t., \quad \vec{u}^T \vec{u} &= 1 \\ \vec{u}^T S \vec{u} &= \lambda \\ S \vec{u} &= \lambda \vec{u} \end{aligned} \quad (4-3)$$

而第 k 個 EOF 即為此共變異矩陣的第 k 個特徵向量 \vec{u}_k ，其對應的特徵值 (eigenvalue) 為 $\lambda_k^2, k = 1, 2, \dots, p$ 。

$$\lambda_k^2 = \vec{u}_k^T S \vec{u}_k = \frac{1}{n} \vec{u}_k^T X^T X \vec{u}_k = \frac{1}{n} \|X \vec{u}_k\|^2$$

此時的第 k 個特徵值 λ_k^2 即可代表在 \vec{u}_k 方向的投影所解釋的變異量，通常特徵值由大到小排列 $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_p^2$ ，而經由 \vec{u}_k 投影的解釋變異量百分比可以表示為：

$$\frac{100\lambda_k^2}{\sum_{i=1}^p \lambda_i^2} \%$$

將原始資料經由第 k 個 EOF： $\vec{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kp})^T$ 投影後所得的

$\vec{a}_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})^T = X \vec{u}_k$ 即為第 k 個 PC (principal component)，可將 \vec{a}_k 改寫為：

$$a_{\alpha} = \sum_{j=1}^p x_{\alpha j} u_{kj} \quad (4-4)$$

至此可將式(4-4)與式(4-2)進行對照，在式(4-2)中的 $c_k(t)$ 與 $u_k(s)$ 即為式(4-4)中的 x_{ij} 與 u_{kj} 。

然而在目前的實務應用上，當時空間變數的維度增加時，共變異矩陣的大小也就相應增加，一個過於龐大的共變異矩陣在計算特徵值的過程會變得過於複

雜，因此我們利用奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 這個線性代數的工具來替我們解決特徵值的問題。SVD 可以將一個 $n \times p$ 的資料矩陣 X 分解：

$$X = A\Lambda U^T \quad (4-5)$$

其中 A 與 U 分別為 $n \times r$ 與 $n \times p$ 的 unitary matrices $A^T A = U^T U = I_r$ ， $r \leq \min(n, p)$ ，

Λ 則為奇異值組成的對角矩陣 $\Lambda = \text{Diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ ，此時把資料矩陣用 $\sqrt{n}X$

代入：

$$\sqrt{n}X = A\Lambda U^T$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{n} n X^T X \\ &= (A\Lambda U^T)^T (A\Lambda U^T) \\ &= U \Lambda^T A^T A \Lambda U^T \\ &= U \Lambda^T U^T \end{aligned}$$

$\Lambda^2 = \text{Diag}(\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_r^2)$ ，便可得到與式(4-3)類似的式子。

回到式(4-5)，利用 SVD 所解析出的 A 矩陣中之直欄 $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_r$ 即為 EOF， U 矩陣中之欄 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_r$ 則為 PC，且 EOF 之間彼此垂直、PC 之間彼此不相關。我們可以將式(4-5)改寫成如下形式：

$$\begin{aligned} X &= \sum_{k=1}^r \lambda_k \vec{a}_k \vec{u}_k^T \\ \vec{x}_t &= \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{tk} \vec{u}_k \end{aligned} \quad (4-6)$$

此時可將式(4-6)看作式(4-4)的向量形式，再與式(4-2)進行對照：

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (4-2)$$

$$a_s = \sum_{j=1}^p x_{sj} u_j \quad (4-4)$$

$$\vec{x}_t = \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{tk} \vec{u}_k \quad (4-6)$$

$c_k(t) = x_{tj} = \lambda_k a_{tk}$ ， $u_k(s) = u_{kj} = \vec{u}_k$ ， $c_k(t)$ 即為此時空間變數的時間變量

(expansion coefficient, EC)，通常亦被稱為 EOF 振幅(EOF amplitude)、PC 時間序

列(PC time series)、PC 得分(PC score)；而 $u_k(s)$ 則為空間變量 EOF，或是被稱為 PC 權重(PC loading)。

4.2.3 動態因子分析法(Dynamic Factor Analysis, DFA)

DFA(Dynamic Factor Analysis)是用來計算共同趨勢(common trend)、解釋變量(explanatory variable)的影響程度以及多變量時間序列交互關係的方法。DFA 在各個領域都有許多不同的應用。

對於一個單一變量的 *time series* 來說，DFA 可以用以下模式來表示：

$$1 \text{ time series} = \text{constant} + \text{trend} + \text{explanatory variables} + \text{noise}$$

其中 *trend* 乃是 *smoothing curve* 以 *Kalman filter/smoothing algorithm* 來模擬。若有 N 個 *time series* 的話，DFA 可以估算出以線性結合的 M 個共同趨勢(common trends)，其中 $M < N$ ，以下式表示之：

$$N \text{ time series} = \text{constant} + \text{linear combination of } M \text{ common trends} \\ + \text{explanatory variables} + \text{noise}$$

舉例來說，假設有一筆 5 個 *time series* 的資料($N=4$)想要利用 DFA 估計 2 個 *common trends*($M=2$)以及一個 *explanatory variable* 則可以表示如下：

$$\begin{aligned} y_{1t} &= c_1 + a_{11} z_{1t} + a_{12} z_{2t} + b_1 x_t + \text{noise}_{1t} \\ y_{2t} &= c_2 + a_{21} z_{1t} + a_{22} z_{2t} + b_2 x_t + \text{noise}_{2t} \\ y_{3t} &= c_3 + a_{31} z_{1t} + a_{32} z_{2t} + b_3 x_t + \text{noise}_{3t} \\ y_{4t} &= c_4 + a_{41} z_{1t} + a_{42} z_{2t} + b_4 x_t + \text{noise}_{4t} \end{aligned}$$

其中 y_{1t} 是在 t 時間的第一個 *time series*， z_{1t} 和 z_{2t} 分別是在 t 時間的第一個和第二個 *common trend*。 x_t 則為 *explanatory variable*。 a_{i1} 及 a_{i2} 則為 *factor loading* 並顯示出哪一個 *time series* 和這個 *common trend* 較有關聯。 b_i 則指出 *explanatory variable* 對於哪個 *time series* 較有影響。此外， c_i 則是線性迴歸中的常數，若經標準化之後的時間序列則常數為零。進一步可以將 DFA 模型擴展寫成矩陣形式，且可以從 *Factor Loading* 的大小以及正負看出這些共同趨勢與個變數的相關性，以及 *Explanatory Variables* 對於本模式的解釋能力。

4.2.4 降雨預測與防災預警研究結果

本研究首先使用 Repeated LOESS Smoothing 的方式，將季節性資料去除之後，討論剩下殘差項的關係，以了解在季節性大趨勢影響之外，各個測站之間的細微關係。圖 4-9 與圖 4-10 分別顯示以大寮測站(C1V18，平地測站代表)及民生測站(C1V16，山區測站代表)為例，原始資料(第一列)經過 LOESS 分離季節性趨勢(Seasonal, 第二列)後，我們可以看到同一個流域中的整體大趨勢(Trend, 第三列)變化有相當大的不同，特別在近幾年的幾場極端降雨事件中，山區跟平地會有明顯的差異。而殘差(Remainder, 第四列)部分則包含了極端降雨事件以及個別地區性降雨事件的資訊在內。值得一提的是，作為山區測站代表的民生測站的殘差值在前十年左右都相當小，然而近年來殘差值則明顯增大並產生許多高峰值，相對的作為平地測站代表的大寮測站則沒有這個現象，代表近幾年來山區不同以往的，產生了較多或更極端的降雨事件。

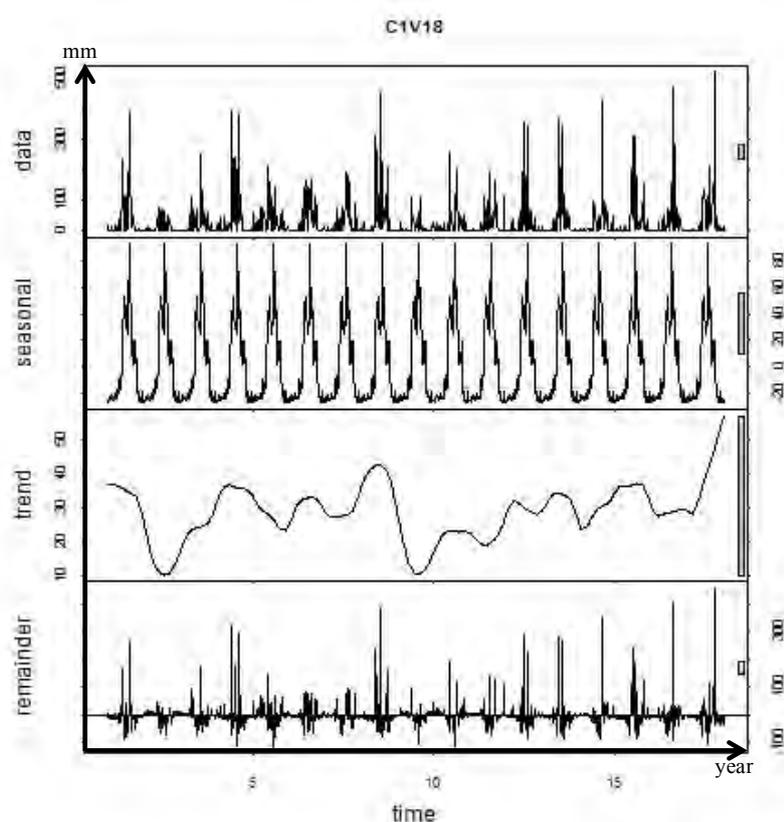


圖 4-9 大寮雨量站原始資料經 LOESS 分離季節性資料後的結果

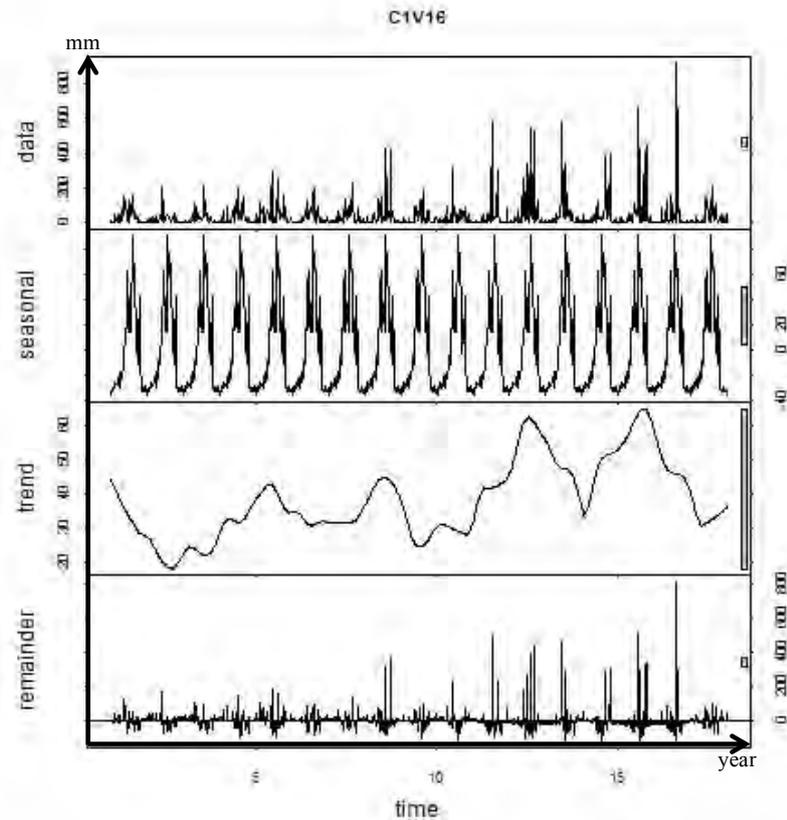


圖 4-10 民生雨量站原始資料經 LOESS 分離季節性資料後的結果

其次使用各測站每週連續 24 小時最大降雨作為反應變數，以動態因子分析法進行分析。在未加入大氣變數作為解釋變數之前，以 AIC(Akaike Information Criterion)值選取最佳的模式為兩個共同趨勢(*common trends*)為最佳模式，如表 4-8 所示。

再者，以兩個共同趨勢的動態因子模式中，再分別加入大氣變數的前三個主成分作為解釋變數。表 4-8 顯示，模式中經向風速第二個 EC(vwndEC2)的加入使得模式有最佳的改善，AIC 從原本的 14307.484(①)降為 14242.82(②)，為影響最鉅的一個大氣變數主成分，其次則為緯向風速的第一個 EC(uwndEC1)，使 AIC 降至 14247.398(③)，再次則為海平面氣壓第三個 EC(slpEC3)，使 AIC 降至 14282.446(④)。以上三個大氣變數：經向風速第二個 EC、緯向風速的第一個 EC 及海平面氣壓第三個 EC 是對本模式有較顯著的影響的三個變數。進一步結合所有對本模式有改善的大氣變數作為解釋變數的結果也如表的最下方所示，最佳的

模式亦即 AIC 最小的模式為同時採用以上三個影響最為顯著的三個大氣變數作為解釋變數的模式，其 AIC 達到 14165.485 (打※者)，顯示這三個大氣變數作為解釋變數對原始模式有顯著的改善，也就是說，他們對高屏溪流域各測站之間降雨的時間、空間模式有很顯著的影響。

表 4-8 DFA 各模式之 AIC 值，灰色底色為加入之解釋變數比原始較佳

Common Trends	AIC	Explanatory Variables
1	14320.427	N/A
①2	14307.484	N/A
3	14314.84	N/A
2	14327.108	slpEC1
2	14335.013	slpEC2
④2	14282.446	slpEC3
2	14309.904	sstEC1
2	14311.949	sstEC2
2	14323.936	sstEC3
③2	14247.398	uwndEC1
2	14301.568	uwndEC2
2	14309.398	uwndEC3
2	14324.224	vwndEC1
②2	14242.82	vwndEC2
2	14304.939	vwndEC3
2	14217.029	vwndEC2,uwndEC1
※2	14165.485	vwndEC2,uwndEC1,slpEC3
2	14166.509	vwndEC2,uwndEC1,slpEC3,uwndEC2
2	14167.343	vwndEC2,uwndEC1,slpEC3,uwndEC2,vwndEC3

因此，我們更進一步深入探討此三大變數 EOF 的結果，以瞭解這三大主成分變數是如何影響高屏地區的降雨情形。圖 4-11 顯示經向風速的第二個、緯向風速第一個、海平面氣壓第三個的 EOF 及其對應之 EC。經向風速的第二個 EOF 顯示了一個很明顯的臺灣東西兩邊各自有強烈的南北向風場存在，臺灣正好位於此兩大相反風向的交界處。同時緯向風速的第一個 EOF 也顯現了類似的情形，臺灣正好位於兩大東西向相反風場之間，搭配經向風速的結果，經向風速的第二

個 EC 和緯向風速的第一個 EC 為正相關(相關係數=0.33)，正好於臺灣附近形成一個渦旋風場的狀況，風自西南邊引進高屏地區影響高屏流域的降雨狀況。此外，第三個影響的大氣變數，海平面氣壓第三個 EOF 也顯示，臺灣位於兩大高壓與低壓系統位於西南及東北區所交界的情形對於高屏流域降雨的影響很大，主要亦由於此一氣壓系統產生的氣壓梯度影響造成的西南氣流影響，與前述經向風速及緯向風速的主成分分析結果可以完全呼應之。

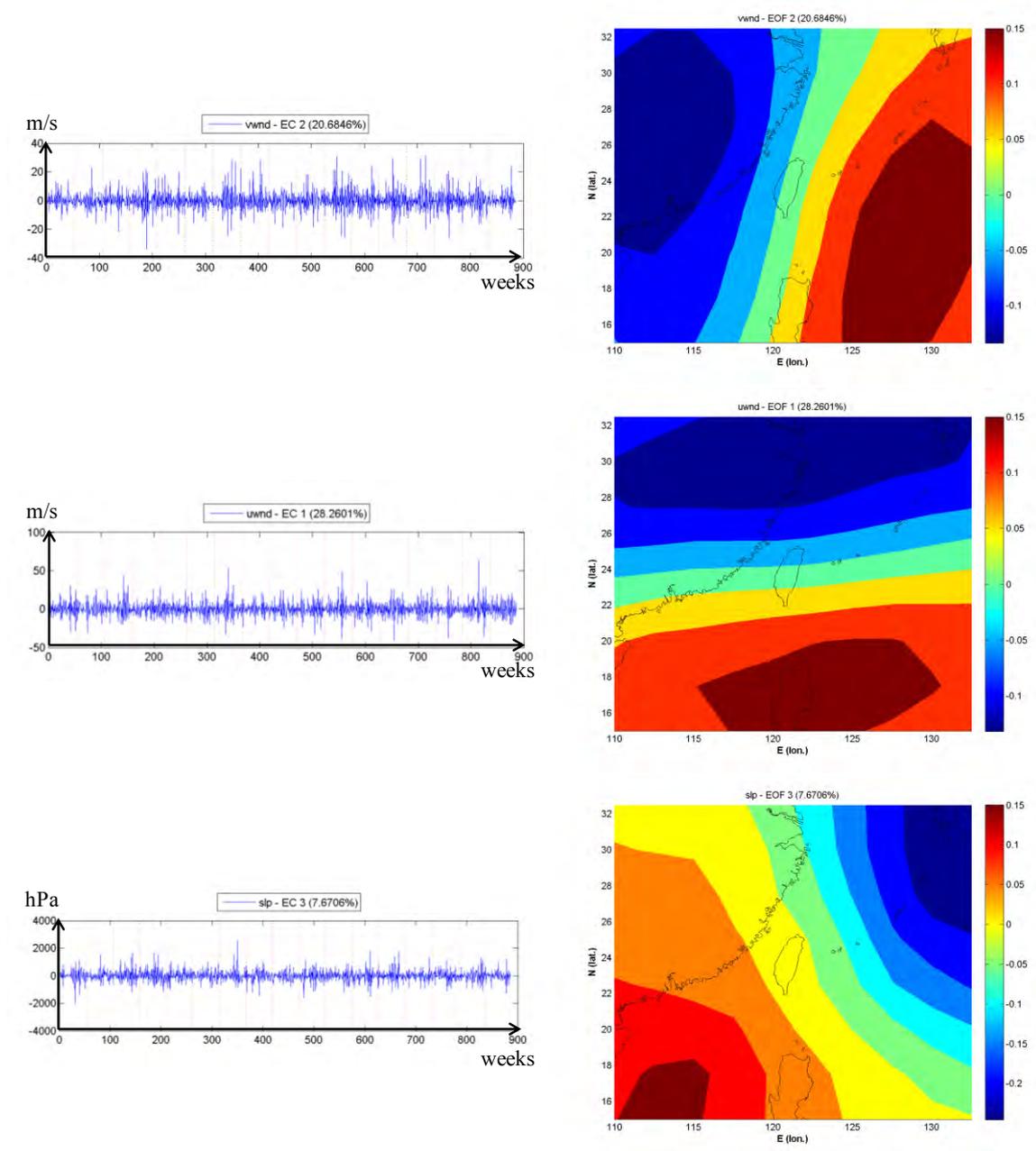


圖 4-11 三大變數 EC(左)與 EOF(右)，由上至下分別為 vwndEC2, uwndC1, slpEC3

經過前述 AIC 模式最佳化選擇後，動態因子分析法以三個共同趨勢與 $vwndEC2$, $uwndC1$, $slpEC3$ 作為三個解釋變數為最佳模型。其三個共同趨勢 (*common trend*)及因子權重(*factor loading*)如圖 4-12 所示。

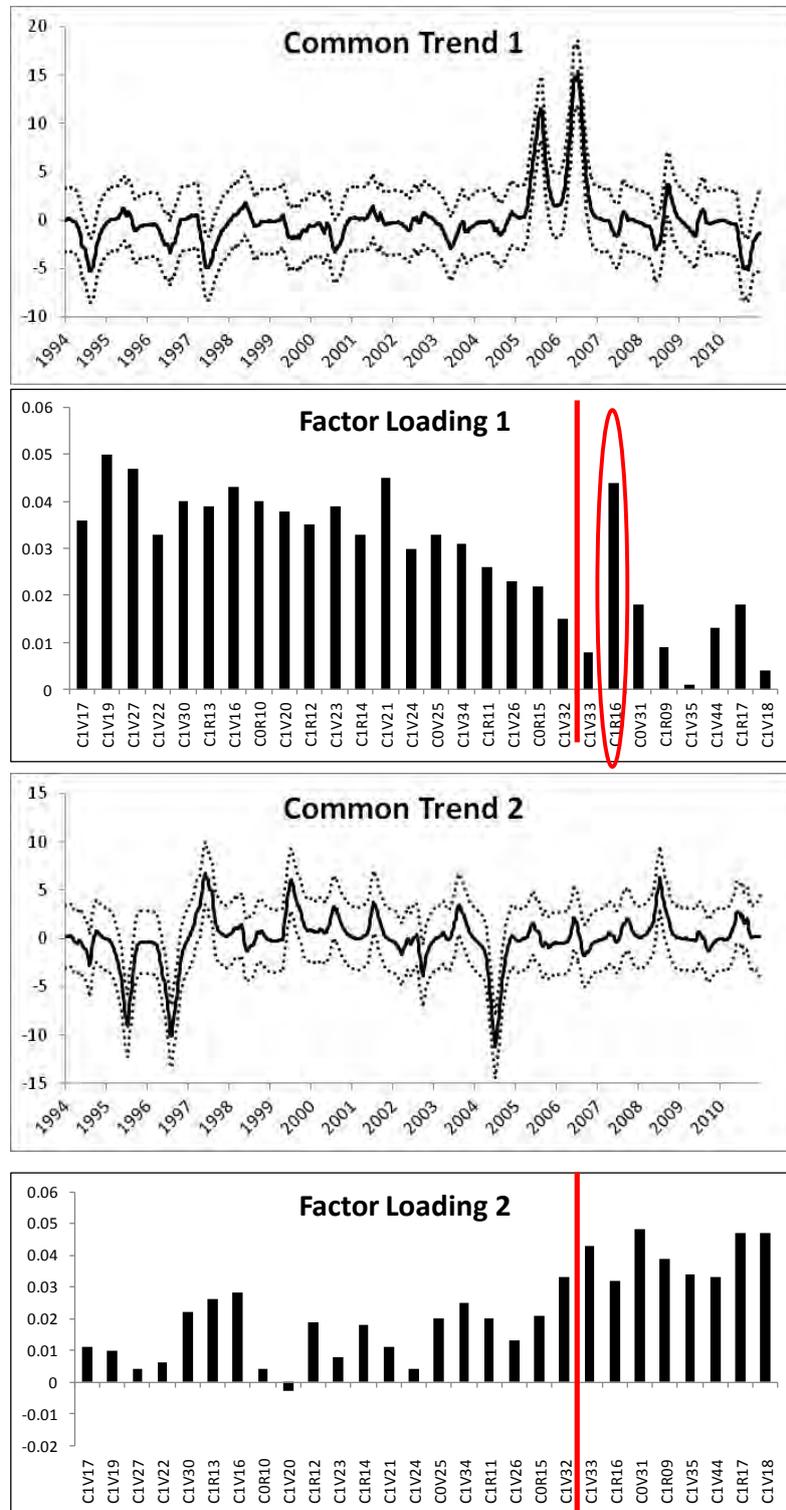


圖 4-12 DFA 兩個共同趨勢及因子權重

因子權重由左至右為海拔由高至低排列，由共同趨勢及其因子權重可以看出，第一個共同趨勢主要是以山區的降雨型態為主，而第二個共同趨勢則主要為平地的降雨型態，且在海拔 100m 左右有十分明顯的分界(C1V32 測站)，如圖 4-12 所示。由圖 4-13 為將兩因子權重標記在地形圖上，能更明顯地看出各測站降雨型態的差異，以及兩個共同趨勢中，山區與平地降雨型態的不同。

第一個共同趨勢中，比較特別的就是屬於平地的新圍測站(C1R16)，海拔僅 56 米但卻有類似於山區的降雨型態。此外，共同趨勢的圖 4-12 中有兩個明顯的峰值出現，分別由於 2005 年 7 月份的海棠颱風及 2006 年的 7 月份的碧利斯颱風所影響。這是由於歷年多場颱風降雨事件中，此兩次颱風降雨事件山區與平地降雨型態有顯著的不同所導致，其他颱風降雨事件則反之。同樣地，第二個共同趨勢中，三個峰谷的颱風降雨事件也是由於山區降雨比平地降雨明顯相對較大所導致，分別為 1995 年的肯特、1996 年的賀伯及 2004 年的敏督利及艾利颱風都有此一現象。

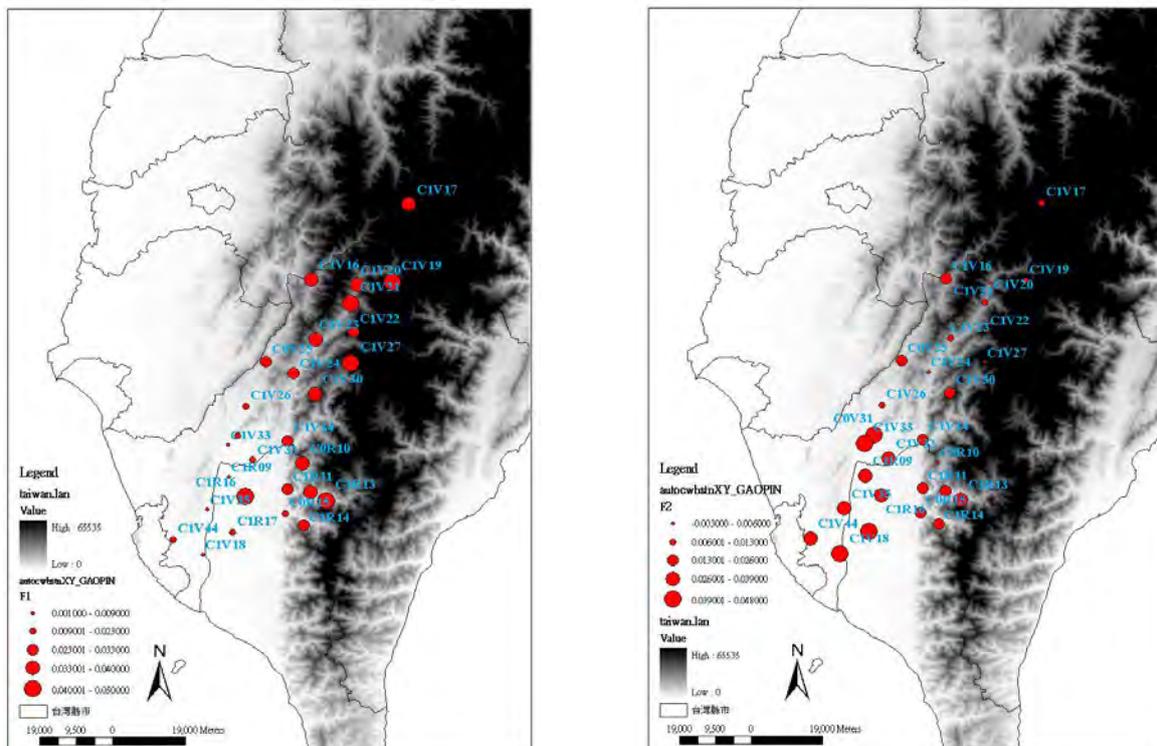


圖 4-13 各測站共同趨勢一(左)、共同趨勢二(右)之因子權重大小
(紅圈越大代表因子權重越大)

由 DFA 的解釋變數的選取，我們發現，經向風速是影響高屏溪流域降雨型態的最大的大尺度大氣變數，其次則為緯向風速及海平面氣壓。因此，若要改善對高屏溪流域的降雨型態及時空分佈的預測，氣象局季度預報可以提供此三種大氣變數供水利單位進行預測及分析，對進一步的水文分析以進行水資源管理調配及防災也都會有相當大的幫助。

氣象局降雨季度預報資料高屏溪流域附近可使用的資料僅一筆高雄區預報資料可供使用，且為月尺度之資料。因此本研究取高雄測站自 1994 年至 2010 年每月的季度預報預測下個月的降雨變化資料加入本研究 DFA 模式中。首先加入季度預報資料為反應變數之一，觀察此季度預測與高屏溪流域哪一個測站有較大的關係，或是擁有類似的趨勢，也能同時瞭解季度預測對各測站的預測能力差異。最後，改以氣象局季度預報資料作為解釋變數，瞭解對各測站之間關係的原始模型的解釋能力，然而結果顯示，AIC 值分別在未加入季度預測資料之前，由一個到三個共同趨勢分別為 3289.298, 3281.941, 3300.167。最低為兩個共同趨勢，然而加入季度預報資料作為解釋變數後，AIC 反而增加到 3286.021，由此結果顯示季度預報資料對各測站之間長時間尺度的共同解釋能力並沒有很好，亦低於上述結果所示之經向風速、緯向風速等大氣變數。

以季度預報資料作為反應變數的結果部分，同樣首先透過 AIC 分析最佳共同趨勢個數，前三個 DFA 的 AIC 分別為 3859.518, 3854.852, 及 3874.493 因此依舊為兩個共同趨勢為最適模式。圖 4-14 顯示和上述結果類似，兩個共同趨勢分別代表了山區平地降雨型態，而因子權重的最後一個項目則為氣象局季度預報，可以看出季度預報的趨勢與平地降雨型態較為類似，也就是比較能夠解釋平地降雨，但是對於山區降雨就顯得略差。

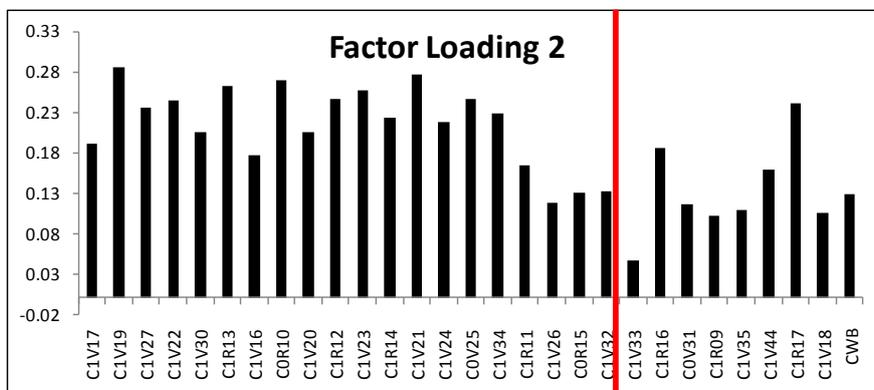
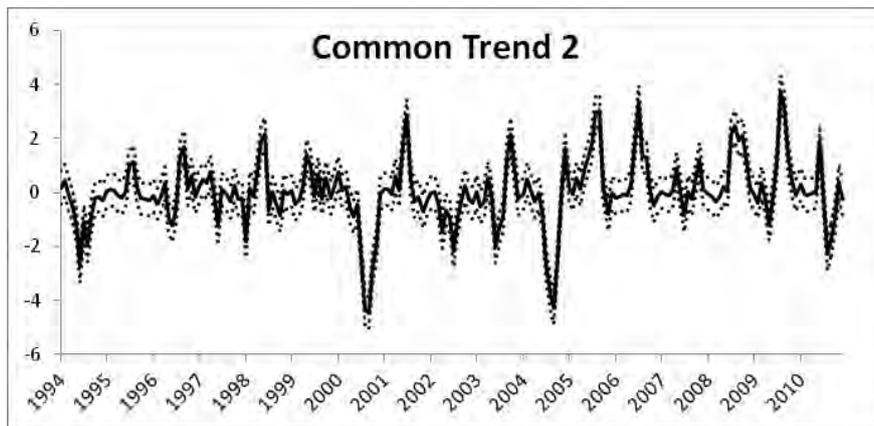
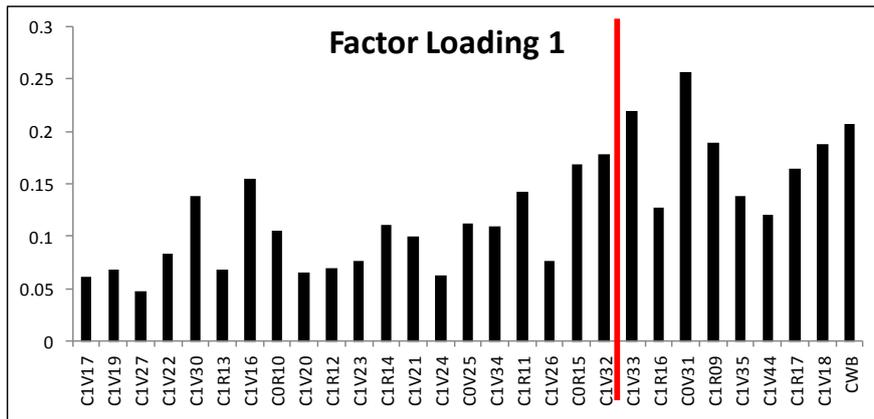
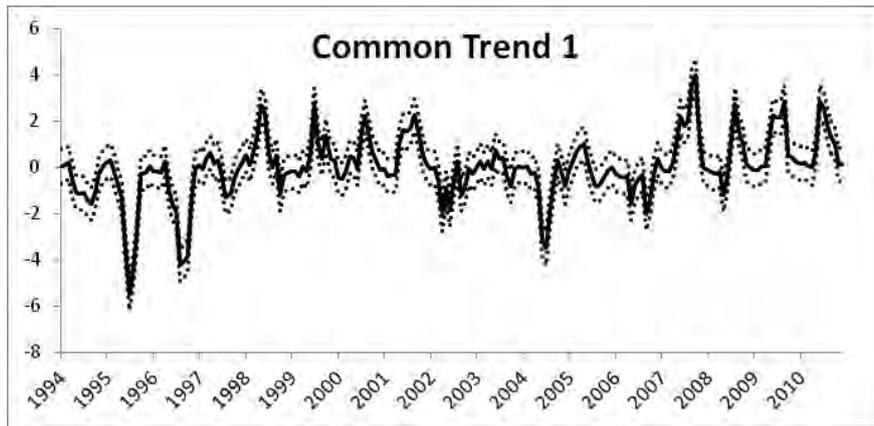


圖 4-14 加入氣象局歷年季度預報資料的 DFA 模式結果(月尺度)

4.3 季度預測在水力面向之結合與應用

季節侵臺颱風路徑、聖嬰/反聖嬰現象、侵臺颱風累積動能三項因子來評估暴潮風險，其中聖嬰/反聖嬰現象、侵臺颱風累積動能可從中央氣象局長期預報，配合季節侵臺颱風路徑預測，可以作為防汛整備宣導、防汛器材人員超前佈署與淹水潛勢情境參考依據，對於河川、海岸防災及防護保全極具參考價值。

利用大氣參數之經向風速、緯向風速及海平面氣壓可以推估出每週連續 24 小時最大降雨的時空特性，並可以分辨出平地與山區降雨型態的差異。因此，若要改善對高屏河流域的降雨型態及時空分佈的預測，氣象局季度預報可以以此三種大氣變數作為參考，提供時間尺度、空間尺度較小之降雨預報，以利提供水利單位進行預測及分析，對進一步的水文分析以進行水資源管理及災害防治也都會有相當大的幫助。

五、 預定進度甘梯圖(Gantt Chart)

本計畫預定執行進度如下表以甘梯圖分月表示之。

工作項目	年別	100										
	月次	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨預測相關數值天氣或氣候預測產品之收集與整理												
國內外颱風暴潮模式與降雨預測評估方法文獻回顧												
降雨預測與防災預警之推估方法與所需氣候產品描述												
氣候資訊在防災系統之應用與可行性評估												
撰寫期中、期末報告												
預定進度累計百分比(%)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100

六、 相關文獻

1. Aberson, S. D. (2001). "The ensemble of tropical cyclone track forecasting models in the north Atlantic basin (1976-2000)." *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(9): 1895-1904.
2. Brill, G. (1995). "Forecasting Hurricane Tracks Using the Kalman Filter." *Environmetrics* 6(1): 7-16.
3. Camargo, S. J., A. W. Robertson, et al. (2007). "Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General properties." *Journal of Climate* 20(14): 3635-3653.
4. Camargo, S. J., A. W. Robertson, et al. (2007). "Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: Large-scale circulation and ENSO." *Journal of Climate* 20(14): 3654-3676.
5. Camargo, S. J., Adam H. Sobel (2004). "Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO." *Journal of Climate* 18(15): 2996-3006.
6. Chan, J. C. L. (1985). "Tropical Cyclone Activity in the Northwest Pacific in Relation to the El Niño/Southern Oscillation Phenomenon." *Monthly Weather Review* 113(4): 599-606.
7. Chan, J. C. L. and K. S. Liu (2004). "Global Warming and Western North Pacific Typhoon Activity from an Observational Perspective." *Journal of Climate* 17(23): 4590-4602.
8. Chen, C. S. and Y. L. Chen (2003). "The rainfall characteristics of Taiwan." *Monthly Weather Review* 131(7): 1323-1341.
9. Chu, J. L., H. W. Kang, et al. (2008). "Seasonal forecast for local precipitation over northern Taiwan using statistical downscaling." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 113(D12).
10. Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I., 1990. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *J. Official Statistics* 6, 3 –73.
11. Ghosh, S. and P. P. Mujumdar (2006). "Future rainfall scenario over Orissa with GCM projections by statistical downscaling." *Current Science* 90(3): 396-404.
12. Goerss, J. S. (2000). "Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models." *Monthly Weather Review* 128(4): 1187-1193.
13. Gray, W. M. (1984). "Atlantic Seasonal Hurricane Frequency .1. El-Nino and 30-Mb Quasi-Biennial Oscillation Influences." *Monthly Weather Review* 112(9): 1649-1668.

14. Haarsma, R. J., J. F. B. Mitchell, et al. (1993). "Tropical Disturbances in a Gcm." *Climate Dynamics* 8(5): 247-257.
15. Hannachi, A., I. T. Jolliffe, et al. (2007). "Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review." *International Journal of Climatology* 27(9): 1119-1152.
16. Hisdal, H. and O. E. Tveito (1992). "Generation of Runoff Series at Ungauged Locations Using Empirical Orthogonal Functions in Combination with Kriging." *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 6(4): 255-269.
17. Holland, G. J. (1995). "Scale Interaction in the Western Pacific Monsoon." *Meteorology and Atmospheric Physics* 56(1-2): 57-79.
18. Hotelling, H. (1933). "Analysis of a complex of statistical variables into principal components." *Journal of Educational Psychology* 24: 417-441.
19. Jan, C. D., Tseng, C. M., Wang, J. S., and Cheng, Y. H. (2006). "Empirical relation of typhoon surge deviation and its corresponding typhoon characteristics: a case study in Taiwan." *Journal of Marine Science and Technology*, 11(3), 193-200
20. M. C. Wu, W. L. Chang, W. M. Leung (2003). "Impacts of El Niño–Southern Oscillation Events on Tropical Cyclone Landfalling Activity in the Western North Pacific." *J. Climate*, 17, 1419-1428 48.
21. Maraun, D., F. Wetterhall, et al. (2010). "Precipitation Downscaling under Climate Change: Recent Developments to Bridge the Gap between Dynamical Models and the End User." *Reviews of Geophysics* 48 (3), 34-72.
22. Molenaar PCM. 1985. A dynamic factor model for the analysis of multivariate time series. *Psychometrika* 50: 181–202.
23. Molenaar PCM. 1989. Aspects of dynamic factor analysis. In *Analysis of Statistical Information*. The Institute of Statistical Mathematics: Tokyo; 183–199.
24. Molenaar PCM. 1993. Dynamic factor analysis of psychophysiological signals. In *Advances in Psychophysiology*, Vol. 5, Jennings JR, Ackels P, Coles MGH (eds). Jessica Kingsley Publishers: London; 229–302.
25. Paul, S., C. M. Liu, et al. (2008). "Development of a statistical downscaling model for projecting monthly rainfall over East Asia from a general circulation model output." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, VOL. 113, D15117, doi:10.1029/2007JD009472

26. Pearson, K. (1901). "On lines and planes of closest fit to systems of points in space." *Philosophical Magazine* 2(7-12): 559-572.
27. Simpson, J., E. Ritchie, et al. (1997). "Mesoscale Interactions in Tropical Cyclone Genesis." *Monthly Weather Review* 125(10): 2643-2661.
28. Wang, S.-T., and H. Cheng, 1982. "Natural seasons as shown by the variation of the circulation in Asia (in Chinese with English abstract)." *Atmos. Sci.* 9, 125-146.
29. Whitney, L. D. and J. S. Hobgood (1997). "The Relationship between Sea Surface Temperatures and Maximum Intensities of Tropical Cyclones in the Eastern North Pacific Ocean." *Journal of Climate* 10(11): 2921-2930.
30. Wu, C. C. and Y. H. Kuo (1999). "Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges." *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(1): 67-80.
31. Zhang, Z. and T. N. Krishnamurti (1997). "Ensemble forecasting of hurricane tracks." *Bulletin of the American Meteorological Society* 78(12): 2785-2795.
32. Zuur, A.F., Fryer, R.J., Jolliffe, I.T., Dekker, R., Beukema, J.J., 2003a. Estimating common trends in multivariate time series using dynamic factor analysis. *Environmetrics* 14, 665- 685.
33. Zuur, A.F.,Pierce, G.J., 2004. Common trends in northeast Atlantic squid time series.
34. 邱啟敏 (2007)，臺灣四周沿岸潮汐特性探討及颱風暴潮迴歸分析之研究，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
35. 徐月娟 (2001)，臺灣地區颱風暴潮分類特性之研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告，NSC89-2611-E052-002，台北。
36. 詹錢登、鄭允翔、曾志民 (2005)，颱風暴潮與颱風特性之關係-以宜蘭縣梗枋測站為例，中國土木水利工程學刊，17(1)，51-60。
37. 歐善惠、許泰文、臧效義 (1999)，東北海岸防波堤颱風波浪與暴潮合成作用力評估研究，交通部科技顧問室專題研究計畫成果報告。