

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

無母數統計降尺度模式之發展與實例應用



**Development and Case Study of Non-Parametric
Statistic Downscaling Model**

研究生：黃瀚聖

指導教授：張良正 博士

中華民國九十八年五月

無母數統計降尺度模式之發展與實例應用

**Development and Case Study of
Non-Parametric Statistic Downscaling Model**

研究生：黃瀚聖
指導教授：張良正

Student : Han S. Huang
Advisor : Liang C. Chang

國立交通大學
土木工程學系碩士班

碩士論文

A Thesis

**Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
May 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十八年五月

無母數統計降尺度模式之開發與實例應用

學生：黃瀚聖

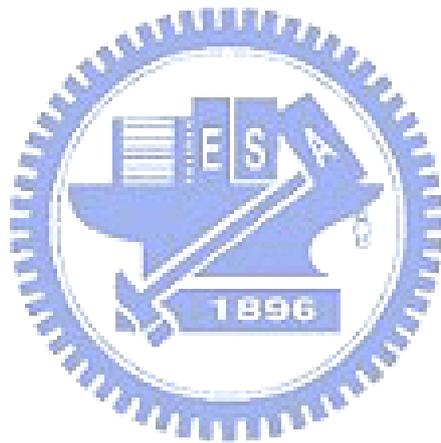
指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

近年來溫室效應所造成的氣候變遷議題日益受到重視，而全球大氣環流模式(GCM)的模擬結果，常為評估氣候變遷所造成之衝擊的重要依據。然而 GCM 模式的空間尺度一般均遠大於流域尺度，因此，如欲應用(GCM)的模擬結果去探討氣候變遷對流域尺度之區域水文或水資源的影響，往往需要透過降尺度模式，建立大尺度氣候因子與小尺度集水區或流域水文量間的關係。傳統降尺度方法均以某種數學函數，描述大小尺度資料間的對應關係，然而由資料顯示往往兩者間雖有某種程度之相關，惟此對應關係卻常顯示出相當大的變異性與不確定性，因而較適合以條件機率的概念來描述。因此本研究乃應用條件機率的觀念，建立一個無母數統計降尺度模式(Non-Parametric Statistic Downscaling Model, NPDM)，直接由大小尺度資料統計出，以選定之大尺度氣候因子為條件之集水區雨量的無母數條件機率分佈，再進一步以此進行大尺度氣候因子為條件下之集水區雨量合成。本研究另外與 SDSM 模式之雨量合成結果作比較，結果顯示在考量相同之大尺度氣候因子下，NPDM 模式之合成資料較 SDSM 之合成

結果，在統計特性上更近似觀測資料，其中又以豐水期(五到十月)之月標準差最為顯著，因此證明 NPDM 模式可為合適之統計降尺度模式，其合成資料可作為後續其他水資源相關評估之用。



Development and Case Study of Non-Parametric Statistic Downscaling Model

Student: Han-Sheng Huang Advisor: Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Climate change caused by the greenhouse effect and its related issues are becoming an increasing concern. The simulation results of general circulation models (GCMs) are an important basis for evaluating the impact of climate change on a river basin. However, the spatial scale of a GCM is generally much larger than a river basin. Therefore, a downscaling model is required to relate the GCM data to basin weather information before the GCM model can be applied to studying the impact of climate change on a basin scale problem. Conventional downscaling methods use a mathematical function to describe the data relation between large scales and basin scales. Although there is some degree of correlation between the data of these different scales, the relationship is highly uncertain and random. Instead of a deterministic function, a conditional probability distribution can better describe this scale relationship. Therefore, this study proposes a novel non-parametric statistic downscaling model (NPDM) to describe the scale relationship between selected large scale factors and basin rainfall using a non-parametric conditional probability distribution. This study also compares the NPDM performance with that of the statistical downscaling model (SDSM) through synthesis of basin rainfall. The results of this

comparison show that, using the same large scale climate factors, the statistical parameters such as sample mean and standard deviation of the NPDM synthesis data is closer to the statistical parameters of observation data than those produced by the SDSM. This study demonstrates that the proposed novel NPDM is an appropriate downscaling model and its data can be used to investigate the impact of climate change on regional water resource management.



謝誌

此篇論文能順利完成，在此感謝吾師張良正教授對於學生論文方向的指引以及耐心的教導，使得學生能夠增進學術領域的經驗與擴展學習的視野。另外亦得感謝口試委員童慶斌教授、吳瑞賢教授於口試期間提供許多寶貴的意見，使得本論文能夠更佳完備，在此由衷的感謝。

此外需特別感謝陳宇文學長，於學生遭遇困難無助時，給予學生莫大的指引與幫助，也感謝何智超學長的提點及指教，感謝張老師研究室全體成員的陪伴與幫助，使研究生活增添許多色彩，在此感謝你們，也祝福你們一切順心。最後感謝一直支持我的家人以及陪伴我奮鬥的亭勻，真的很感謝你們，有你們的鼓勵才有現在的我。



目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
謝誌.....	V
目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 前言及研究目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.2.1 降尺度種類.....	3
1.2.2 序率氣象合成.....	4
第二章 研究流程.....	7
第三章 相關理論與模式說明.....	13
3.1 降尺度方法概述.....	13
3.2 SDSM模式介紹.....	16
3.3 條件機率介紹.....	22
3.4 序率氣象合成介紹.....	26
第四章 無母數統計降尺度模式.....	31

4.1 模式架構.....	31
4.2 參數說明.....	41
第五章 模式應用與案例說明	42
5.1 研究區域概述.....	42
5.1.1 降雨量資料蒐集與分析.....	44
5.1.2 氣候因子分析.....	47
5.1.3 集水區降雨量與大尺度氣候因子相關分析	51
5.2 案例概述.....	55
5.3 單氣候因子降尺度氣象合成結果比較	58
5.4 雙氣候因子降尺度氣象合成結果比較	75
5.5 自相關單氣候因子降尺度模式	87
第六章 結論與建議	95
6.1 結論.....	95
6.2 建議.....	97
參考文獻.....	98

表目錄

表 3-1 馬可夫鏈轉移矩陣	27
表 5.1-1 石門集水區雨量站資訊表	44
表 5.1-2 再分析資料氣候因子表	49
表 5.1-3 各因子與降雨量之相關係數表	52
表 5.2-1 不同情境之WAR權重值	57
表 5.3-1 月分群架構下之降雨發生機率與平均年降雨量資料表	63
表 5.3-2 月分群架構下各氣候因子之NPDM模式WAR表	69
表 5.3-3 相關係數絕對值前五大之氣候因子	70
表 5.3-4 相關係數絕對值前五大之氣候因子模式WAR比較表	73
表 5.4-1 月分群架構下之降雨機率與平均年降雨量資料表	78
表 5.4-2 月分群架構下之WAR表	78
表 5.4-3 再分析資料之雙氣候因子組合表	84
表 5.4-4 雙氣候因子不同降尺度模式之WAR值比較表(月架構)	84
表 5.5-1 月分群架構下之降雨機率與平均年降雨量資料表	90
表 5.5-2 不同情境不同降尺度模式之WAR表	90

圖目錄

圖 2-1 研究流程圖	10
圖 2-2 大尺度格點與台灣地區的相對位置圖	11
圖 2-3 石門水庫集水區雨量站分佈位置圖	12
圖 3-1 SDSM模式架構圖	17
圖 3-2 傳統序率氣象合成流程圖	30
圖 4-1 無母數統計降尺度模式架構圖	36
圖 4-2 無母數模式矩陣	37
圖 4-3 無母數條件機率分佈矩陣	37
圖 4-4 降尺度氣象合成模組流程圖(單氣候因子).....	38
圖 4-5 降尺度氣象合成模組流程圖(雙氣候因子).....	39
圖 4-6 自相關降尺度氣象合成模組流程圖.....	40
圖 5.1-1 石門水庫集水區位置圖	43
圖 5.1-2 各月之平均日雨量圖(檢定年份：西元 1961 至 1985 年).....	45
圖 5.1-3 各月之日雨量標準偏差圖(檢定年份：西元 1961 至 1985 年).....	45
圖 5.1-4 各月之平均日雨量圖(驗證年份：西元 1986 至 1990 年).....	46
圖 5.1-5 各月之日雨量標準偏差圖(驗證年份：西元 1986 至 1990 年).....	46
圖 5.1-6 大尺度氣候因子選用格點位置圖	48
圖 5.1-7 各氣候因子的平均值分佈圖 (因子 1 至因子 9)	50
圖 5.1-8 各氣候因子的平均值分佈圖 (因子 10 至因子 18)	50
圖 5.1-9 各氣候因子的平均值分佈圖 (因子 19 至因子 26)	51
圖 5.1-10 各氣候因子與降雨量關係分布圖 (因子 1 至因子 9)	53
圖 5.1-11 各氣候因子與降雨量關係分布圖 (因子 10 至因子 18)	53
圖 5.1-12 各氣候因子與降雨量關係分布圖 (因子 19 至因子 26)	54
圖 5.2-1 各月之降雨量平均值分佈示意圖	57

圖 5.2-2 各月之降雨量標準差分佈示意圖	57
圖 5.3-1 年分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa渦度).....	59
圖 5.3-2 季分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa渦度).....	60
圖 5.3-3 月分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa渦度).....	61
圖 5.3-4 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	63
圖 5.3-5 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	64
圖 5.3-6 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	64
圖 5.3-7 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	65
圖 5.3-8 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定).....	65
圖 5.3-9 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定).....	66
圖 5.3-10 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證).....	66
圖 5.3-11 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證).....	67
圖 5.3-12 月分群架構下各氣候因子相關係數對WAR散佈圖(情境一).....	70
圖 5.3-13 月分群架構下各氣候因子相關係數對WAR散佈圖(情境二).....	70
圖 5.3-14 月分群架構下各氣候因子相關係數對WAR散佈圖(情境三).....	71
圖 5.3-15 不同氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(權重情境一).....	73
圖 5.3-16 不同氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(權重情境二).....	74
圖 5.3-17 不同氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(權重情境三).....	74
圖 5.4-1 月分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖	76
圖 5.4-2 不同情境不同降尺度模式之WAR比較圖	78
圖 5.4-3 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	79
圖 5.4-4 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	79
圖 5.4-5 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	80
圖 5.4-6 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	80
圖 5.4-7 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定).....	81
圖 5.4-8 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定).....	81

圖 5.4-9 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證).....	82
圖 5.4-10 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證).....	82
圖 5.4-11 雙氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(月架構)(情境一).....	85
圖 5.4-12 雙氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(月架構)(情境二).....	85
圖 5.4-13 雙氣候因子不同降尺度模式之WAR比較圖(月架構)(情境三).....	86
圖 5.5-1 月分群架構下之單氣候因子自相關降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa 渦度).....	88
圖 5.5-2 不同情境不同降尺度模式之WAR比較圖.....	90
圖 5.5-3 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	91
圖 5.5-4 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(檢定).....	91
圖 5.5-5 月分群架構下一月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	92
圖 5.5-6 月分群架構下九月份之 850hPa渦度與降雨量散佈圖(驗證).....	92
圖 5.5-7 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定).....	93
圖 5.5-8 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定).....	93
圖 5.5-9 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證).....	94
圖 5.5-10 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證).....	94

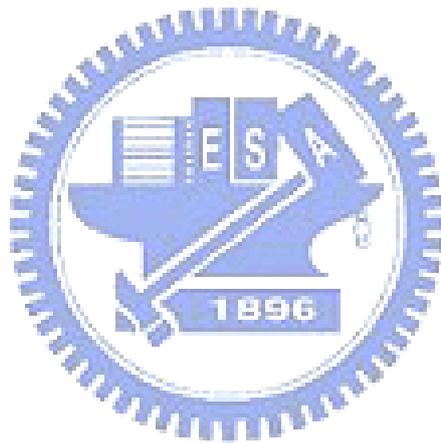
第一章 緒論

1.1 前言及研究目的

因溫室效應與全球暖化所造成的氣候變化，是近年來國際上的熱門議題，氣候變遷所帶來的全球氣候異常與災害是不可忽視，如洪水氾濫、乾旱加重、冰川融化、冰蓋萎縮及海平面上升淹沒低窪地區等重大災難事故。在 1988 年成立的全球氣候變遷小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱 IPCC)，依據大氣層、冰層及冰的覆蓋率等數據，指出因人類活動所大幅排放的氣體，如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、PFCs、HFCs，及 SF_6 等(京都議定書，1997)，為氣候變遷的主要原因，且於 2007 年發表第四次評估報告，其中指出溫度的改變、雨量的改變及極端事件發生頻率增高，將影響生態系統、水資源與作物的生長，甚至危害到全人類的安危。

在探討氣候變遷的影響，IPCC 也提供了數個大氣環流模式 (General Circulation Model, 簡稱 GCM) 模擬結果，其模式是以全球為基礎來劃分，雖可模擬全球氣候的趨勢，但其劃分的大尺度網格面積與台灣面積相差極大，如直接應用大尺度模式網格輸出資料來預測台灣區域集水區的雨量特性，難以顯現出台灣氣候雨量時間及空間分佈不均的特性，因此我們必須透過降尺度 (Downscaling) 的方式，建立大尺度模式輸出資料與研究集水區雨量的關係。

因此本研究將以條件機率的概念，發展一套無母數之統計降尺度模式(Non-Parametric Statistic Downscaling Model, NPDM)，其中分成「無母數統計模組建立」與「降尺度氣象資料合成」兩階段，「無母數統計模組建立」乃以歷史資料統計出，大尺度氣候因子為條件下集水區降雨量之無母數條件機率分佈。「降尺度氣象資料合成」則是應用前述之無母數條件機率分佈，配合氣候因子合成集水區之日雨量資料。



1.2 文獻回顧

1.2.1 降尺度種類

由於大氣環流模式網格尺度與流域集水區面積空間差異頗大，對於空間尺度越小以及豐枯水季變化懸殊之區域，並不能合理預測其區域氣象特性，因此大氣環流模式模擬結果並不能直接使用，需先透過降尺度方法來推估集水區之氣象特性。

在降尺度探討上，童慶斌(2002)指出降尺度的方法大致可分為三類：簡易降尺度、統計降尺度與動力降尺度。李庭鵬(2007)針對簡單降尺度方法與國際上常用之 SDSM 模式(Statistical Downscaling Model, Wilby et al, 2002)進行頭前溪水質變化之比較，SDSM 模式可歸類為統計降尺度方法，比較結果顯示 SDSM 模式之合成結果較符合觀測資料之變化特性，顯示統計降尺度方法較簡單降尺度為佳。

在統計降尺度方法上，唐亦宣(2008)同時應用「多變量線性降尺度方法」與「支撐向量機降尺度方法(SVM)」建立石門水庫集水區之降雨量降尺度模擬，其中並比較氣候因子之不同選定準則。謝明昇(2005)應用遺傳規劃法建立三峽站之降尺度模式。林淑華(2007)以多變量線性回歸方式建立全台地區之降尺度模式。陳守泓(2007)應用 SDSM 模式推估氣候變遷對台灣水稻生產的影響。

在動力降尺度方法上，吳明進(2004)研究巢狀區域模式內嵌於大

尺度模式，其應用全球大氣環流模式結果作為邊界條件，並考慮台灣陸地特性進行網格加密的模擬。李清騰(2005)利用區域波譜模式 (Regional Spectral Model, RSM) 建立兩階段動力降尺度模式，首先是將 GCM 尺度降到 50km 見方解析度之東亞地區，接著再進一步降階至 15km 見方解析度之台灣地區。顏子豪(2008)依據動力降尺度模式，評估翡翠水庫集水區在氣候變遷下之流量變化。

雖然動力降尺度具備實際物理意義，但因為動力降尺度所需的計算資源與耗費的時間較多，大氣知識背景要求門檻極高(謝明昇, 2005)，且統計降尺度法仍有極佳之降尺度效果，因此水利領域多採用統計降尺度法。本研究亦採用統計降尺度概念，應用本研究開發之 NPDM 模式與傳統慣用之 SDSM 模式，進行石門集水區降雨量之降尺度比較。

1.2.2 序率氣象合成

序率氣象合成(Stochastic weather generation)的理論主要依據蒐集之歷史資料統計特性，重新建立與合成另外一組氣象資料，合成資料之統計特性必須與歷史資料之統計特性一致。由於氣象合成理論是分析蒐集之歷史資料，藉此合成另外一組或多組具備相同特性之資料，因此輸入資料與輸出資料之種類必須一致，亦即如欲合成降雨量資料，則必須輸入歷史之降雨量資料，也無法使用或參考其他類型之資

訊，例如溫度、日照或風速等其他類型之資訊。

氣象合成理論的應用上，常以歷史觀測資料的氣象特性，建立一統計模式(statistical models)，並透過此模式來合成相同特性的氣象資料，此類模式亦可稱為氣象產生器(weather generators)。部分研究無法單純只觀察一次之模擬結果，必須透過蒙地卡羅模擬(Monte-Carlo simulation)來探究問題特性，亦可應用氣象產生器來產生多組之氣象時序資料。

多數的氣象產生器皆著重於降雨本身，在時間尺度上多採取日模擬，而雨量氣象產生器之相關研究亦可分為兩大類，一個是著重於降雨機率，另一個則是降雨強度。Todorovic與Woolhiser(1975)以指數分佈函數(Exponential distribution model)結合一階馬可夫鏈(first order Markov chain)來建立雨量合成模式。指數分佈函數則用以決定降雨強度，一階馬可夫鏈用以決定降雨機率，文章指出在降雨機率的預測上，一階馬可夫鏈計算流程(Markov chain counting process)表現優於二項式計算流程 (Binomial counting process) ，後續相關研究多半沿用一階馬可夫鏈在降雨機率上的作法。Woolhiser與Pegram(1979)則結合馬可夫鏈與混合指數模式(Mixed Exponential model)來建立雨量合成模式。Wilks(1992)則結合馬可夫鏈與伽馬分佈模式(Gamma distribution model)。Wilks與Wilby(1999)則分別比較指數分佈模式、

混合指數模式與伽馬分布模式在雨量合成上的差異，研究指出伽馬分布模式與混合指數分布模式較指數分佈模式所產生之合成雨量，其分布型態更貼近歷史雨量。Richardson(1981)則應用馬可夫鏈—指數分布模式建立氣象合成模式，所合成之對象包含降雨量、單日最高溫度、單日最低溫度與日輻射等。

近年來，氣候變遷成為目前著重的研究方向，氣候變遷下的雨量合成模式或氣象合成模式多參考上述理論加以擴充。謝明昇(2005)結合馬可夫鏈與指數分佈模式，並搭配統計降尺度理論，合成建立多組氣候變遷後的雨量資料與溫度資料，各組資料具備相同統計特性。此合成資料再供GWLF地表逕流模式，評估氣候變遷下的河川流量變化。王世為(2006)則以合成之雨量資料與溫度資料，供後續GWLF地表逕流模式與QUAL2E水質模式使用，探討氣候變遷下河川BOD與DO變化。何宗翰(2007)則將合成資料應用於石門水庫，探討氣候變遷對氮磷變化之影響。

第二章 研究流程

圖 2-1 為本研究之研究流程圖，其細部說明如下：

(一) 大尺度再分析資料與集水區降雨資料蒐集：

首先為資料蒐集，蒐集對象包含大尺度氣候資料與小尺度氣象資料。大尺度氣候資料是採用美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)所提供的 NCEP 再分析日資料(NCEP re-analysis daily data)，其選用的點位座落於東經 120 度、以及北緯 25 度交會處，圖 2-2 為最鄰近的四個節點與台灣地區的相對位置圖，該點位約位於集水區至少 100 公里以外。小尺度氣象資料則是採用石門水庫集水區內的四個雨量站，包含巴陵、玉峰、嘎拉賀及鎮西堡四個雨量站，藉由算數平均求得的集水區的平均日雨量資料，用以代表石門水庫區域之氣象特性，雨量站分佈位置如圖 2-3 所示。

根據 IPCC 之定義，其以 30 年為基礎長度，分別定義未氣候變遷的基期(Base-line)，以及氣候變遷的短、中、長期情境，其中基期定義為西元 1961 至 1990 年，短期則定義為西元 2010 至 2039 年，中期則定義為西元 2040 至 2069 年，長期則定義為西元 2070 至 2099 年。本研究為建立一個統計降尺度模式，為驗證本研究之準確性，本研究以基期之大尺度資料，即西元 1961 至 1990 年，來進行統計降尺度轉換，基期所蒐集的小尺度氣象之歷史資料可作為模擬資料之對照與驗

證。

(二) 資料分群

為了檢驗本研究的可用性、準確性與強健性，本研究後續將以「模式檢定」與「模式驗證」進行檢驗，因此本步驟將前述收集的歷史資料區分為檢定年份及驗證年份，檢定年份為西元 1961 年至 1985 年，供模式建模使用；驗證年份為西元 1986 年至 1990 年，供模式驗證使用。

(三) 統計模式建置

由於 NCEP 再分析資料在空間上涵蓋全球，因此其資料格點解析度較實際所需為粗，無法合理反應研究區域之氣象特性，故本研究以無母數條件機率概念建立「無母數統計降尺度模式(NPDM)」，其中無母數統計模組將以歷史資料，建立以大尺度氣候因子為條件下之小尺度降雨量無母數條件機率分佈。此外，本研究亦以國際上常用的統計降尺度軟體 SDSM 作為 NPDM 模式的對照組，其模式的建置為求得大小尺度線性回歸方程式之參數值。

(四) 降尺度氣象資料合成

接著在小尺度氣象資料合成上，將以相同時期的大尺度氣候因子配合先前建立好的統計模組，來合成多組相同統計特性的集水區雨量資料，這些合成資料可作為其他模式與分析使用，例如：都市排水、

水資源規劃與堤防安全性評估等分析，也可進一步探討氣候變遷對於各項問題之影響。

(五) 結果比較

兩種統計降尺度模式，將以石門水庫集水區作為研究區域，並以相同研究期間同時合成區域之降雨資料，所合成之降雨資料與所蒐集之觀測降雨資料將計算各月之平均值與標準偏差，作為兩統計降尺度合成模式驗證比較之用。



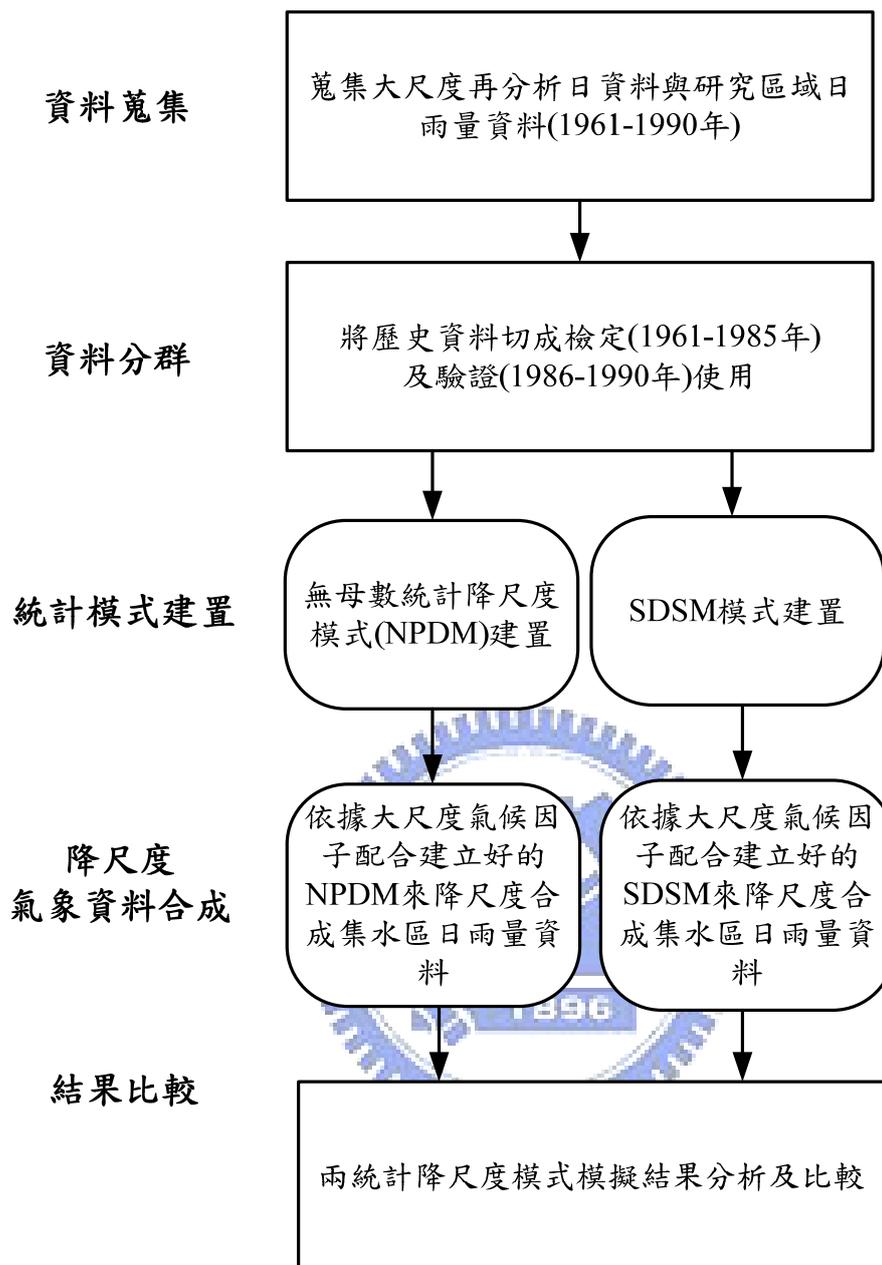


圖 2-1 研究流程圖

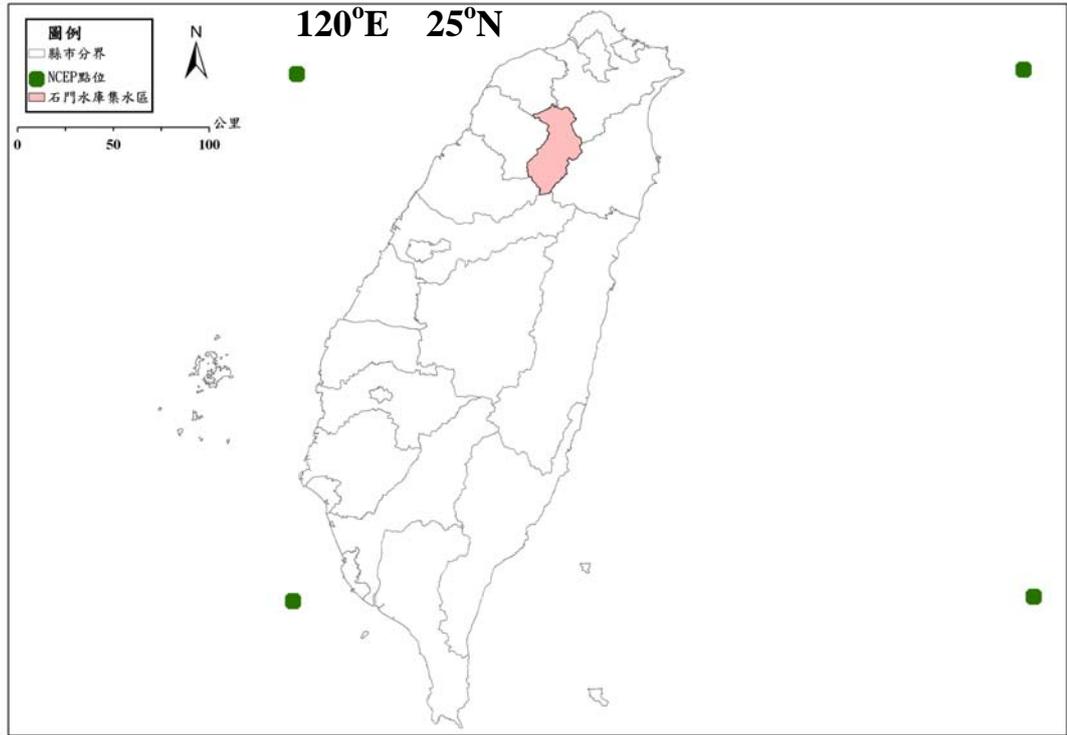


圖 2-2 大尺度格點與台灣地區的相對位置圖



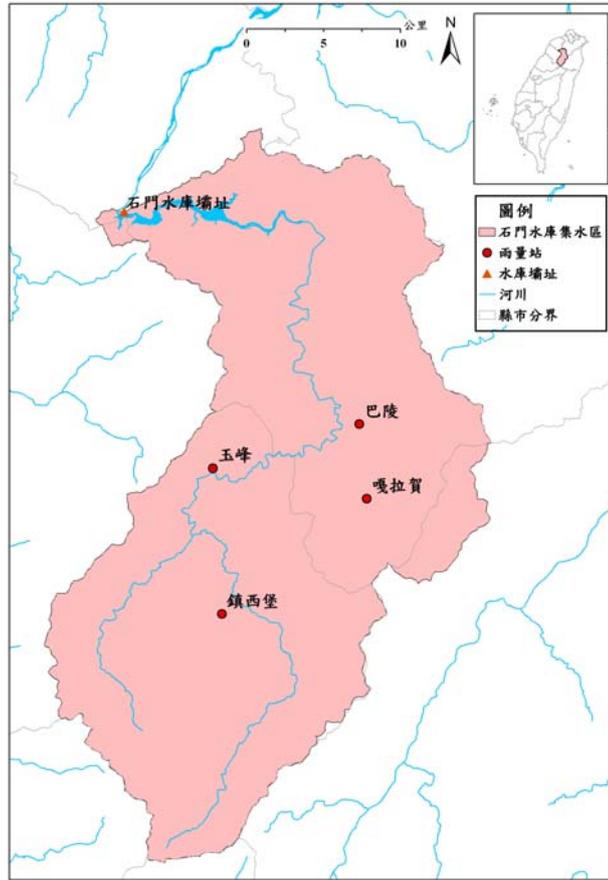


圖 2-3 石門水庫集水區雨量站分佈位置圖

第三章 相關理論與模式說明

本研究依據無母數條件機率的概念建立無母數統計降尺度模式，來建立大小尺度資訊間的轉換，本章將會介紹相關理論及模式，3.1 節為「降尺度方法概述」，3.2 節將介紹「SDSM 模式」，3.3 節為「條件機率介紹」，3.4 節為「序率氣象合成介紹」。

3.1 降尺度方法概述

全球大氣環流模式(GCM)之模擬區域涵蓋全球，基於計算量之考量，其格網點解析度比台灣地區為大，然若欲探討各項水利問題在氣候變遷下的影響時，往往需要的是集水區之局部氣象變化，因此兩者在空間尺度上與資料點位距離上有極大之差異，故降尺度方法即是大小尺度間的轉換方法。童慶斌(2002)指出了降尺度方法可分為三大類，分別如下所示：

1. 簡單降尺度
2. 統計降尺度分析
3. 動力降尺度分析

首先，「簡單降尺度」方法是假設局部區域與最鄰近之 GCM 格網點之氣候變化一致，因此無須作任何空間上的轉換。其次，「統計降尺度」方法則是蒐集大小尺度間的資料，藉由統計類型的方法分析空間上的轉換特性，藉由建立歷史上大小尺度間的氣候差異，進而應

用於未來之空間轉換。最後，相較於「統計降尺度」由歷史資料來進行資料探勘(data mining)型的分析，「動力降尺度」則是建立具備物理意義之模式進行空間轉換，其以大氣環流模式(GCM)格網點之模擬結果為邊界條件，建立局部區域之大氣環流模式，進而提供所需之集水區局部氣象資訊。然因其應用大氣環流模式進行降尺度的動作，因此在背景知識上需要瞭解大氣環流理論，且需要大量之計算資源作為大氣環流數值模式模擬之用。因此在水文領域方面，統計降尺度為最常見之降尺度方法。

傳統上，統計降尺度方法是以統計類型之演算法，分析並建立大小尺度資料在歷史上的空間對應關係，常見之演算法很多種，其中包含線性迴歸(linear regression)、非線性迴歸(non-linear regression)、類神經網路 (artificial neural networks) 與主成分分析 (principal components analyses) 等，國際上常用之 SDSM 模式亦為統計降尺度模式，其應用理論即為多變量線性迴歸，後續將於 3.2 節進一步說明。然傳統上，前述各項統計降尺度演算法建立之大小尺度關係，均為一對一之關係，亦即輸入相同之大尺度氣候因子數值進傳統統計降尺度模式後，模式必回應相同之小尺度氣象資料數值。然在歷史資料的分析上，大小尺度因子間的變化雖有其規律性，但是變異性仍大，無法單由上述之一對一函數型模式去描述。

本研究應用無母數條件機率理論作為基礎，依據歷史之大小尺度資料，建立大小尺度間的對應關係，合成時先輸入大尺度之氣候因子作為條件，模式將依此選定小尺度氣象資料之分佈機率，再以此分佈機率合成降雨量。藉此方式，本研究發展之降尺度模式，可同時反應大小尺度資料間之相關性與隨機性，後續將於第四章進一步介紹。



3.2 SDSM 模式介紹

SDSM 模式(Statistical Down-Scaling Model)是英國 Robert L. Wilby 與 Christian W. Dawson (2002)所發展的統計降尺度軟體，其應用理論為是多變量線性迴歸(Multiple linear regression)及序率氣象合成(Stochastic weather generation)之結合，由大區域氣候資料推估小尺度氣象變化，可提供使用者評估小尺度氣象的變化以及對應的衝擊影響。

可於 SDSM 官方網站下載 SDSM 模式及其輸入資料，其中軟體版本為 2008 年更新之 4.2.2 版本。輸入資料為 SDSM 開發者整理自 NCEP 氣候資料，包含 26 種氣候因子，其類型包含壓力、風速、風向及濕度等資訊。

此外，SDSM 模式更將繁瑣的統計降尺度過程簡化成八個步驟，包含「資料品質管(Quality control)」、「資料轉換(Data transformation)」、「篩選氣候因子(Screening of predictor variables)」、「模式檢定(Model calibration)」、「氣象合成(Weather generation)」、「統計分析(Data analysis)」、「圖形輸出(Graphical analysis)」及「未來情境繁衍資料(Scenario generation)」，其中以「模式檢定」及「氣象合成」為 SDSM 模式最重要的一步，以下將進一步說明上述八項步驟，圖 3-1 為 SDSM 模式架構圖。

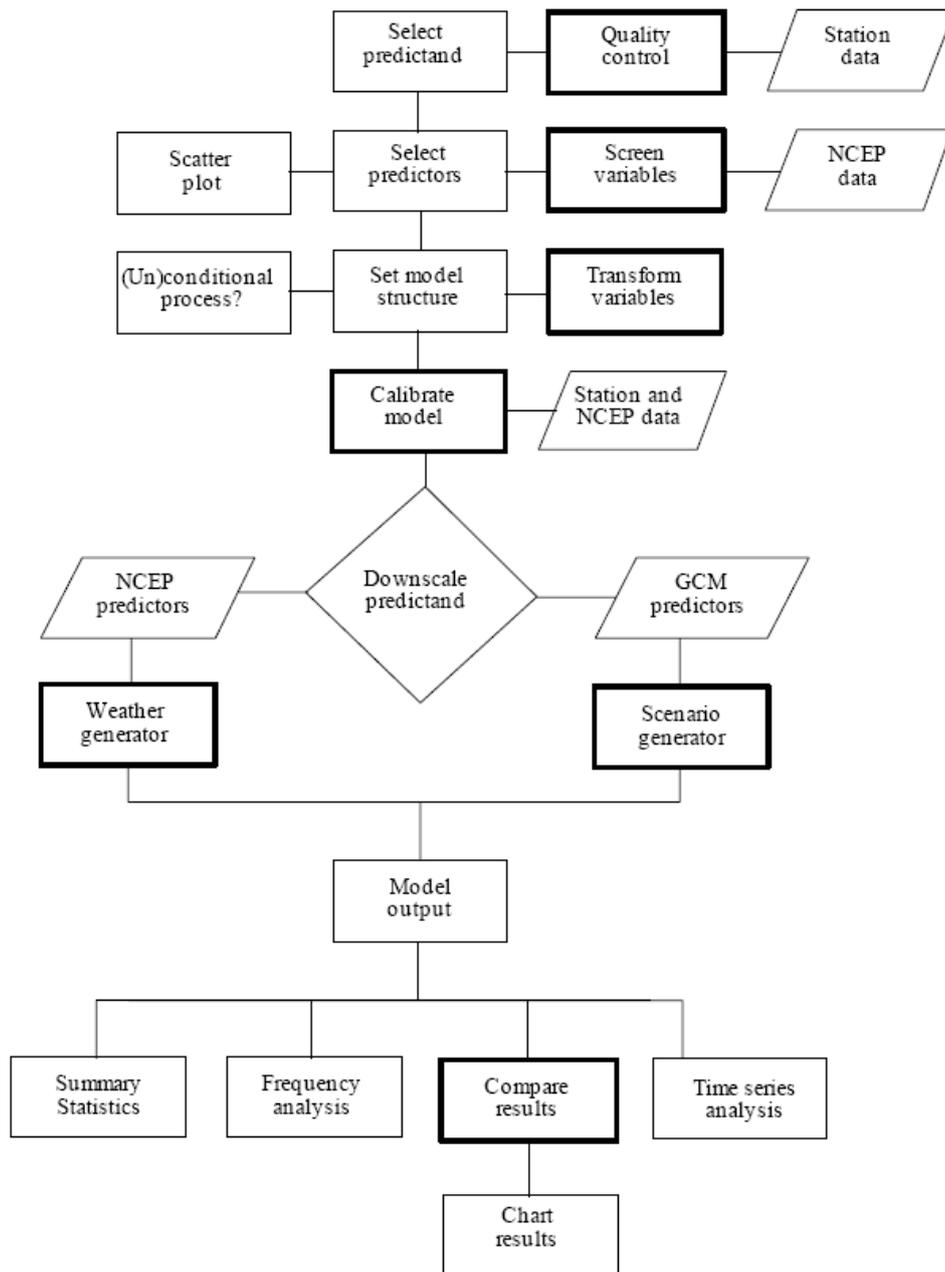


圖 3-1 SDSM 模式架構圖

- 資料品管與資料轉換(Quality control and data transformation)

首先於模式建立之前需先將所要探討的年份資料準備齊全，而大部分的氣象站於某些時段會有缺漏之料，對於缺漏及不完整的資料如拿去建立模式則可能導致模式的錯誤，因此 SDSM 提供資料的品管功能，可以將氣候因子以及氣象站的資料作個簡單的分析，分析其中的平均值、最大最小值以及確認資料筆數，也可以標注缺漏值使得模式忽略此時刻的資料。

當資料品管結束後也可以於模式檢定之前，可將所需的變數做適當的轉換，因此 SDSM 對於氣候因子及氣象資料提供轉換函數的功能，其中包含有自然對數、對數、開根號、時間延遲(lag)、倒數等函數。而本研究參考唐亦宣(2008)在氣象變量為雨量時，考量雨量之變動性較大，嘗試以轉換資料方式進行研究，然而若以對數轉換雨量為零時會產生錯誤，故採用以四次方根(fourth root)作為轉換依據。

- 篩選氣候因子(Screening of predictor variables)

而這個篩選氣候因子的方面上，是在發展任何一個統計降尺度模式最有挑戰性的階段，也是全部統計降尺度的核心所在，因此在找出哪些大尺度氣候因子與單站氣象變量(如雨量)有較高的相關性是日前首要的任務，SDSM 在此方面提供了挑選參數的分析，可以協助使用者挑選出每個月份與氣象變量具有高度相關的氣候因子，或是以季

節來挑選各季節與氣象變量具有高度相關的氣候因子，也可以分析最簡單的以整年來挑選之。

- 模式檢定(Model calibration)

先前已將與測站氣象變量具有高度相關性氣候因子篩選之後，接著在透過 SDSM 模式檢定的功能，以氣象變量為應變數，氣候因子為自變數，來建立測站氣象變量與大尺度氣候因子的回歸關係式，並透過「線性規劃」求解最佳的回歸參數值(weights)，本研究選用 SDSM 中的偶簡型演算法(dual simplex algorithm)來計算多變量線性回歸關係式的權重。

而模式的設定上，使用者可以定義模式是屬於年、季節或者是月模式，並且定義模擬過程為條件式(Conditional)或非條件式(Unconditional)，其中氣象變量為雨量時，選擇模擬過程為條件式，則此模式會建立兩個關係，一個是降雨機率與大尺度氣候因子的關係式，另一個是降雨量與氣候因子的關係式。如果氣象變量為風速時，則模擬過程應選擇非條件式，其風速直接為大尺度氣流的函數。

- 氣象合成(Weather generation)

氣象合成的功能為依據給定的氣候因子來合成多組相同特性的時序氣象日資料，如以檢定年份氣候因子作為模式的輸入時，可以模擬出檢定年份的氣象推估值；如以獨立年份的氣候因子則是推估

驗證年份的結果與歷史的比較。因此使用氣象合成時，除了需選擇已經率定好的回歸式外，也須定義模擬的年份及模擬組數，則模式會依據選擇好的組數及年份來自動連結所需氣候因子，並且繁衍多組的時序氣象資料，以作為之後統計分析的使用。

- 統計分析(Data analysis)

此統計分析的功能可以分別統計出降尺度結果與觀測氣象值的統計特性，內定的統計分析包含月、季節或者是年的平均值、最大值、最小值、變異數以及總和等特性，使用者只需定義分析的年份及組數，即可透過統計分析的功能來分析整體的統計特性，如各月的日平均值及各月的日標準差結果。

- 圖形輸出系統(Graphical analysis)

SDSM 提供兩種繪圖比較工具。一種是結果比較(Compare Results)，另一種是時間序列繪圖(Time Series Plot)。其中的結果比較可以提供使用者以圖形的比較方式來評估兩筆資料的特性差異，圖形的選擇有柱狀圖及折線圖兩種，因此可以快速以圖形來呈現降尺度結果與觀測值的特性差異，如平均值、最大值、最小值、變異數以及總和等特性比較。另一種時間序列繪圖功能允許使用者同時將最多 5 組時間序列繪在同一張圖上。

- 未來情境繁衍資料(Scenario generation)

最後，可以依據 GCM 模式所提供的現況或未來的氣候因子，來合成現況或未來的日氣象資料。此功能除了必須針對 GCM 所提供的氣候因子給定不同的模擬時間外，其餘跟氣象合成的過程是一樣的。而輸入檔的時間長度並不需要跟氣象合成資料的時間一樣。



3.3 條件機率介紹

條件機率屬於統計機率理論中的一部份，因此本節將先從基本的機率來介紹。

- 隨機變數(random variable)及結合事件(joint events)

人類生活中所發生的各種現象，一般來說可分為兩類，一類為「確定性現象」，也就是說在一定的條件下，其發生的結果可於事前確定之。例如，只要是人，那麼一定會老的；太陽從東邊升起西邊落下；水於一大氣壓的條件下，其沸點為攝氏 100 度等等皆為必然發生的現象。另一類屬於「隨機現象」，其現象的發生常為一種偶發性的現象，例如，投擲一枚均值的硬幣，其結果可能為正面，也可能為反面；檢查一批貨源的合格商品數量；投擲一顆公正的骰子，其出現的點數等等皆為不可預測的現象。

因此人類對於自然界中不確定的變量開始有所探討，也藉由多次試驗結果當中的基本事件，也就是樣本，來找出其發生的規律性，而這種對於具有不確定性的變量做重複性的試驗稱之為「隨機試驗」。如在水文方面，可以透過歷史實測資料的收集來得知其試驗的結果，接著再透過量化歷史的實測結果來得知此不確定性變量的發生範圍及其數值分佈的規律性，而這個以數值方式來描述隨機試驗的結果常以「隨機變數」來稱之。

而隨機變數也可以很方便來描述事件的發生，如需描述一大尺度氣候因子與集水區雨量兩變量同時發生的事件時，則可以運用兩個隨機變數 X 與 Y 來描述此事件的發生，其中隨機變數 X 之值 x 表示為氣候因子的值；隨機變數 Y 之值 y 表示為降雨量，則可以此兩隨機變數的結合來描述此結合事件(joint events)，可用(3-1 式)表示之。

$$E = (X = x, Y = y) = n(xy) \dots\dots\dots (3-1 式)$$

其中， $n(xy)$ 為 E 事件發生的次數。

● 機率的定義及性質

一個隨機試驗所有可能的事件為已知，但僅知道可能出現的隨機事件是不夠的，還要知道各種事件出現的可能性大小，因此如為了瞭解大小尺度的結合事件發生的機率特性時，可透過資料統計分析的方式，來求出事件發生的聯合機率(Joint Probability)， $P(X=x, Y=y)$ 。

而在描述隨機事件發生的可能程度時，常以一數值的大小來呈現之，則此數值稱之為「機率」(Probability)。其範圍通常以 0 到 1 來表示。而機率的計算方式可由假設樣本空間 S 是由 n 個樣本點所組成，且於各個基本事件發生的機會相等之情形下， A 事件發生的機率 $P(A)$ 為組成 A 事件的樣本個數 $n(A)$ 與樣本空間 S 內的樣本個數 $n(S)$ 的比值，其數學式為：

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(S)} \dots\dots\dots (3-2 式)$$

接續前集水區的例子，如為求得結合事件 $E=(X=x, Y=y)$ 的發生機率時，則可以依據結合事件氣候因子發生於 x 值同時雨量發生於 y 值的樣本點數，如(3-1 式)，與樣本空間 S 的內所有樣本點數的比值，求出此結合事件發生的機率為：

$$P(X = x, Y = y) = \frac{n(xy)}{n(S)} \dots\dots\dots (3-3 \text{式})$$

且對於樣本空間 S 中之任意事件 E ，其發生的機率需滿足以下機率的性質：

1.非負性：樣本空間 S 中之任意事件 E ，其發生的機率：

$$0 \leq P(E) \leq 1$$

2.正規性：整個樣本空間 S 發生的機率則是：

$$P(S) = 1$$

3.可加性：如樣本空間 S 中 E_1, E_2, \dots, E_n 為互斥事件的話，則：

$$P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} E_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(E_n)$$



● 條件機率的定義及性質

上一節已介紹過機率的一些基本概念，因此本節將介紹一些機率的應用，而條件機率的觀念是機率論中一個非常重要的概念，也是本研究氣候因子與集水區平均雨量統計分析模組建立的基礎，為敘述某已知事件發生的前提之下，該探討的事件發生的機率有多少。

如樣本空間 S 中含有 A 、 B 兩事件，在 A 事件發生之前提下，同時 B 事件發生之機率，其意義為已知樣本點屬於 A 事件之條件下，

又屬於 B 事件之可能性有多少，換句話說是以 A 為整個樣本空間，來探討樣本屬於 A 且 B 的個數為多少，則 A 事件已發生的情況下，B 事件發生的機率可以定義為：

如 $P(A) > 0$ 則

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = \frac{P(AB)}{P(A)} = \frac{n(AB)}{n(A)} \dots\dots\dots (3-4 \text{ 式})$$

因此如欲探討某事件已經發生的情況下可以運用(3-4 式)，來求得其對應事件的條件機率關係，則先前集水區的例子以給定的氣候因子 X 已發生的情況下，樣本空間將縮小到只包含給定 X 的樣本個數，不再是全部 X 的樣本個數，接著再探討集水區平均雨量 Y 發生的機率時，也就是找出 X 發生同時 Y 發生的樣本數，如(3-1 式)的結合事件發生的樣本數，因此本研究在於求得給定的氣候因子 X 條件下，集水區平均雨量 Y 的發生機率時，可由樣本各數的比值求得：

$$P(Y|X) = \frac{P(X \cap Y)}{P(X)} = \frac{P(XY)}{P(X)} = \frac{n(XY)}{n(X)} \dots\dots\dots (3-5 \text{ 式})$$

同樣地，條件機率 $P(Y|X)$ 也需具備機率的基本性質，若 $P(X) > 0$ ，則：

1. 對任何 X 事件而言，其事件 Y 的條件機率 $P(Y|X)$ ：

$$0 \leq P(Y|X) \leq 1$$

2. 而樣本空間 S 的條件機率則是：

$$P(S|X) = 1$$

3. 如樣本空間 S 中 Y_1 與 Y_2 為互斥事件的話，則

$$P(Y_1 \cap Y_2 | X) = 0$$

$$P(Y_1 \cup Y_2 | X) = P(Y_1 | X) + P(Y_2 | X)$$

3.4 序率氣象合成介紹

序率氣象合成之概念與相關模式已長期被廣泛使用，其以已知之氣象資料為基礎，並依據其統計特性重新產生多組具備相同特性的時序資料，可提供其他模擬模式進行蒙地卡羅型式(Monte-Carlo)之探討。例如：降雨量之氣象合成，將收集之降雨量，透過統計特性之分析，合成建立另外一組或多組之時序降雨量。因此傳統序率氣象合成，是以相同種類之資料，合成另一組相同種類之資料。

步驟上，序率氣象合成首先是進行歷史資料的分析，其次依據歷史統計特性，來合成與重現特性相同的時序資料，傳統研究的重點可分為兩部分，一是降雨機率的探討，另一則是降雨強度的分析。

- 降雨機率的探討：

傳統降雨機率的探討是以一階馬可夫鍊(first-order Markov chain)的概念，概念中應用轉移矩陣來描述連續兩天之降雨與不降雨之間的關係(如表 3-1 所示)。其中應用條件機率概念來描述(如 3-6 式至 3-9 所示)， $p(w_t | d_{t-1})$ 以前一天不降雨為條件，今天降雨的機率，式中 w 代表降雨(wet)， d 代表不降雨(dry)，下標 t 代表時刻，由此轉移矩陣可以描述連續兩天降雨與否的所有可能性。

$$p(w_t | w_{t-1}) = p(w_t \cap w_{t-1}) / p(w_{t-1}) \dots\dots\dots (3-6式)$$

$$p(w_t | d_{t-1}) = p(w_t \cap d_{t-1}) / p(d_{t-1}) \dots\dots\dots (3-7式)$$

$$p(d_t | w_{t-1}) = p(d_t \cap w_{t-1}) / p(w_{t-1}) \dots\dots\dots (3-8式)$$

$$p(d_t | d_{t-1}) = p(d_t \cap d_{t-1}) / p(d_{t-1}) \dots\dots\dots (3-9式)$$

表3-1 馬可夫鏈轉移矩陣

	w_t	d_t
w_{t-1}	$p_{11} = p(w_t w_{t-1})$	$p_{10} = p(d_t w_{t-1})$
d_{t-1}	$p_{01} = p(w_t d_{t-1})$	$p_{00} = p(d_t d_{t-1})$

● 降雨強度的分析：

降雨強度的決定則是採用機率密度函數來描述。前述已透過馬可夫鏈來決定降雨發生與否，因此降雨強度的決定僅應用於雨天(wet day)。因此分析前，須將蒐集之歷史資料，去除晴天資料。相關文獻指出降雨組體多具有強烈右偏情況，微小數值之降雨量出現頻率頻繁，反之，大數值之降雨量出現頻率極為罕見，因此為符合前述偏右特性，傳統上多以指數分佈(Exponential distribution)來重現降雨強度的機率分佈型態。

指數分佈有很多變形，其中最簡單的是單參數的指數分佈函數(one-parameter exponential distribution)，而使用此函數之前需先定義參數 μ ，而此分佈之平均值為 μ ，變異數為 $\sigma^2 = \mu^2$ ，其函式型態如(3-10式)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\mu} \exp\left[-\frac{x}{\mu}\right] \dots\dots\dots (3-10式)$$

在雙參數的類型中，則以雙參數 Gamma 分佈(two-parameter gamma distribution)為最受歡迎的選擇，其數學式如(3-11 式)示。其中包含兩參數 α 及 β ， α 為形狀參數(shape parameter)，影響分佈的陡峭程度； β 為尺度參數(scale parameter)，影響分佈的散佈程度，因此可以透過調整此兩參數來更貼近真實的雨量分佈，而此分佈的平均值變異數分別為 $\mu = \alpha\beta$ 與 $\sigma^2 = \alpha\beta^2$ 。其中當 $\alpha=1$ 時，Gamma 分佈將退化成單參數的指數分佈。

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp[-x/\beta]}{\beta \Gamma(\alpha)} \dots\dots\dots (3-11式)$$

另一個混和指數分佈(mixed exponential distribution)，其為兩個單參數指數分佈的組成，其中的第一個指數分佈是依據降雨機率 α 來產生降雨量；而第二個指數分佈則是應用 $1-\alpha$ 的降雨機率來合成降雨量，因此繁雜的指數分佈的平均值及變異數分別為 $\mu = \alpha\mu_1 + (1-\alpha)\mu_2$ 與 $\sigma^2 = \alpha\mu_1^2 + (1-\alpha)\mu_2^2 + \alpha(1-\alpha)(\mu_1 - \mu_2)^2$ 。其數學式如(3-12 式)所示。

$$f(x) = \frac{\alpha}{\mu_1} \exp\left[-\frac{x}{\mu_1}\right] + \frac{1-\alpha}{\mu_2} \exp\left[-\frac{x}{\mu_2}\right] \dots\dots\dots (3-12式)$$

圖3-2為傳統序率氣象合成之流程圖，其合成流程如下所述：

1. 起始時刻時，令降雨門檻機率(P_c)等於歷史資料之降雨機率($P(w_t)$)。
2. 隨機產生0至1之間的均勻分佈亂數 u_1 ，如果 u_1 小於降雨門檻

機率(P_c)，即表示該日為降雨，接著執行步驟三來決定降雨強度；反之，則表示該日為不降雨，接著執行步驟四。

3. 如果決定該日會降雨，則將描述降雨天雨量強度的機率密度函數，轉換成累積機率的反函數形式，並將均勻分佈之隨機亂數 u_2 代入此反函數推求對應的降雨量值。
4. 步驟四是重新決定降雨門檻機率(P_c)，如果先前決定為不降雨，在此降雨門檻機率(P_c)應等於馬可夫鏈轉移矩陣中的 $P(w_t | d_{t-1})$ ；反之，如果先前決定為降雨，在此降雨門檻機率(P_c)應等於馬可夫鏈轉移矩陣中的 $P(w_t | w_{t-1})$ 。
5. 接著進行下一時刻之合成。

綜合上述作法，傳統序率氣象合成主要進行降雨量資料本身的合成，亦即以歷史降雨量資料來合成另外一組或多組具相同特性的降雨量資料。如欲將序率氣象合成技術應用於氣候變遷問題上，其分析資料僅可使用降雨量型態之資料，大尺度之各項氣候因子並無法應用於其中，因此傳統上必須於合成之前，將氣候變遷之特性轉化成降雨量型別之資訊。例如：指數分佈函數之氣象合成模式中需要降雨量平均值作為合成參數，因此傳統上僅能間接應用大尺度資訊，必須預先歸納評估氣候變遷前後之降雨平均值差異，而無法直接使用大尺度之各項氣候因子。

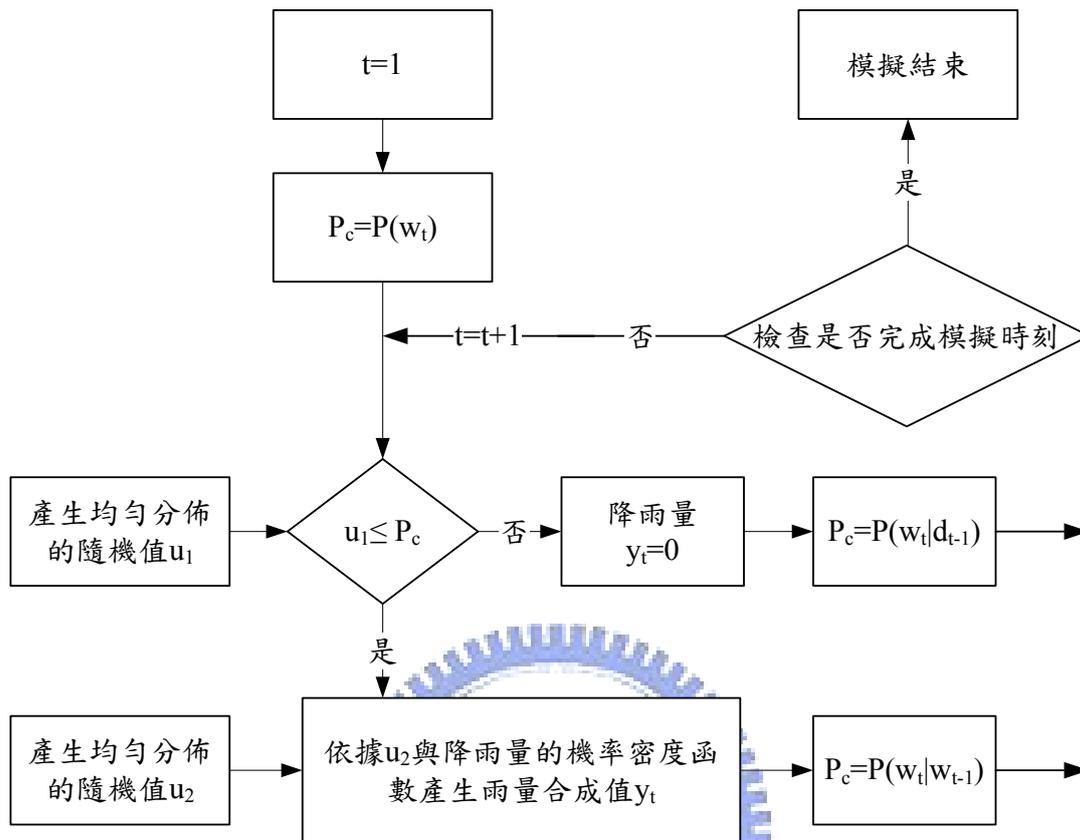


圖 3-2 傳統序率氣象合成流程圖

第四章 無母數統計降尺度模式

根據大尺度各項氣候因子資訊與小尺度降雨量資料之相關分析，分析結果顯示部分因子與小尺度降雨量之間相關性雖然較高，但是仍然有極大之變異性，因此顯示大尺度與小尺度之間並不能直接以一個 $\bar{Y} = f(\bar{X})$ 類的定率轉換公式，去處理大尺度氣候因子與小尺度降雨量之對應關係。本研究建立「無母數統計降尺度模式」跳脫定率之概念，改以序率之想法，建立大尺度氣候因子與對應條件之降雨量分佈機率，從而以此條件分佈機率合成降雨量。

4.1 模式架構



本模式應用 Matlab 程式語言開發撰寫，模式架構包含「無母數統計模組」及「降尺度氣象合成模組」兩部分，「無母數統計模組」是依據歷史實測資料，統計出以氣候因子為條件下之降雨量無母數條件機率分佈。「降尺度氣象合成模組」是依據前面「無母數統計模組」所提供的無母數條件機率分佈，來合成時序之氣象資料，圖 4-1 為無母數統計降尺度模式架構圖。以下將有更進一步的說明。

- 無母數統計模組

傳統的統計降尺度模式是建立出歷史實測氣候因子(\bar{X})與集水區降雨量(\bar{Y})的一對一關係，有別於傳統模式，無母數統計模組則是

建立歷史實測氣候因子(\bar{X})為條件下集水區降雨量(\bar{Y})之無母數條件機率分佈，提供後續「降尺度氣象合成模組」使用。

「無母數統計模組」的計算步驟是先依據歷史實測氣候因子(\bar{X})與集水區降雨量(\bar{Y})的上下限，將數據切割成有限個區間。由於降雨量的分佈偏向小數值之降雨居多，因此雨量較小數值上給予較密的網格切割。此外，無降雨亦為其中一個區間。

圖 4-2 為無母數模式矩陣，橫軸為選定之氣候因子區間，其中包含 $x_1^{\min} \sim x_1^{\max}$ 、 $x_2^{\min} \sim x_2^{\max}$ 、 $x_3^{\min} \sim x_3^{\max}$ 、 \dots 、 $x_M^{\min} \sim x_M^{\max}$ ，合計共 M 個區間；縱軸為降雨量區間，其中包含 $y_1^{\min} \sim y_1^{\max}$ 、 $y_2^{\min} \sim y_2^{\max}$ 、 $y_3^{\min} \sim y_3^{\max}$ 、 \dots 、 $y_N^{\min} \sim y_N^{\max}$ ，合計共 N 個區間。矩陣中之數值代表位於該區間之資料數量。

(4-1 式)為各區間降雨機率之計算公式，式中代表降雨量各區間 ($P(i, j)$)之降雨機率，分母為所有資料之筆數，其並非本研究所需之條件機率，為各氣候因子區間與各降雨區間之交集機率。

(4-2 式)則為降雨量之條件機率計算公式，式中代表當氣候因子位於區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 為條件下，降雨區間 $j(y_j^{\min} \sim y_j^{\max})$ 之條件機率，其分母為位於氣候因子區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 之所有資料筆數。圖 4-3 為無母數條件機率分佈矩陣，將(4-2 式)所計算之數值填入矩陣中所形成之矩陣，將提供後續「降尺度氣象合成模組」使用。

$$P(i, j) = \frac{Num(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Num(i, j)} \dots\dots\dots (4-1式)$$

$$P(j|i) = \frac{Num(i, j)}{\sum_{j=1}^N Num(i, j)} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \dots\dots\dots (4-2式)$$

● 降尺度氣象合成模組

本模組主要功能是依據前述建立之無母數條件機率分佈矩陣，來產生另外一組或多組相同特性的降雨量資料，輸入時序之大尺度氣候因子(x_t)與前述之無母數條件機率分佈矩陣，來計算對應時刻之降雨量(y_t)。

$$F(1|i) = 0, \quad F(j+1|i) = P(j|i) + F(j|i) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \dots\dots\dots (4-3式)$$

(4-3 式)可用以計算降雨量條件機率之累積機率，所計算之累積機率總和為 1。「降尺度氣象合成模組」即是應用降雨量之條件機率分佈矩陣或其累積機率來合成時序資料，其步驟如圖 4-4 所述：

1. 依據當時刻之氣候因子(x_t)數值，來選擇所在之區間 $i(x_t^{\min} \sim x_t^{\max})$ 。
2. 取出區間 i 對應之累積條件機率向量。
3. 隨機產生一個 0 至 1 間之均勻分佈亂數，代入(4-4式)找尋對應之降雨量區間 j 。
4. 在決定之降雨量區間 j 內，以均勻分佈隨機亂數決定降雨合

成量(y_i)，如(4-5式)所示。

if $[F(j|i) < u_1 \leq F(j+1|i)]$ then select j -th zone (4-4式)

$y_i = u_2 \times [y_j^{\max} - y_j^{\min}] + y_j^{\min}$ (4-5式)

前述已描述單氣候因子之建構流程，在雙氣候因子時，在無母數統計模組階段，其無母數模式矩陣與無母數條件機率分佈矩陣應為三維矩陣，亦即雙氣候因子與降雨量所構成的三個維度。在降尺度氣象合成模組階段，其流程圖如圖 4-5 所示，依據前述建立之三維無母數矩陣，當輸入雙氣候因子為條件時，即可取出以雙氣候因子為條件之機率分布，後續合成動作則與單氣候因子合成動作一致。

- 自相關降尺度氣象合成模組

原始型態之降尺度氣象合成模組在降雨機率與降雨強度上之決定上，僅依據無母數條件機率分佈矩陣來決定，細究降雨機率上的步驟，近似以單純之降雨機率($p(w_i)$)來決定，而非前期研究建議之一階馬可夫鏈，本研究在此依據原始型態降尺度氣象合成模組，擴充建立成「自相關降尺度氣象合成模組」。

在無母數統計模組階段，將降雨量資料往前挪移，形成一日稽延之降雨量，以此一日稽延降雨量與選定之單氣候因子，以及對應之降雨量來建立三維之無母數模式矩陣與無母數條件機率分佈矩陣。在降尺度氣象合成模組階段，其流程圖如圖 4-6 所示，步驟如下所示：

1. 起始時刻時，由外部給予初始降雨量(y_0)，其數值本研究設定為0。
2. 依據當時刻之氣候因子(x_t)與一日稽延降雨量(y_{t-1})，來選擇所在之區間 $i(x_i^{\min} \sim x_i^{\max})$ 與 $j(y_j^{\min} \sim y_j^{\max})$ 。
3. 取出區間 i 與 j 對應之累積條件機率向量。
4. 隨機產生一個0至1間之均勻分佈亂數，代入(4-4式)找尋對應之降雨量區間 j 。
5. 在決定之降雨量區間 j 內，以均勻分佈隨機亂數決定降雨合成量(y_t)，如(4-5式)所示。
6. 檢查是否完成模擬時刻，如未完成，則將合成值(y_{t-1})遞迴代入模式中，進行下一時刻之合成模擬。



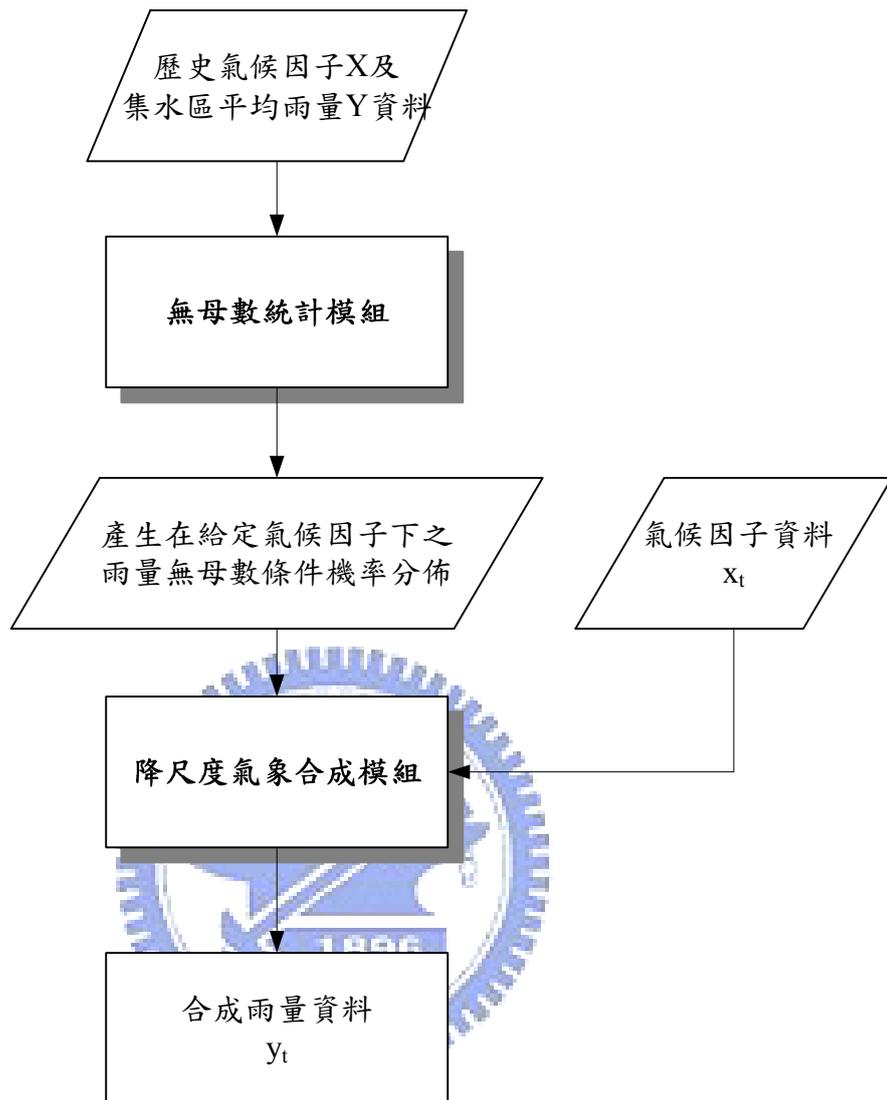


圖 4-1 無母數統計降尺度模式架構圖

降雨量
第j區間

j=1	Num(1, 1)	Num(2, 1)	...	Num(M, 1)
j=2	Num(1, 2)	Num(2, 2)	...	Num(M, 2)
⋮	⋮	⋮	...	⋮
j=N	Num(1, N)	Num(2, N)	...	Num(M, N)
	i=1	i=2	...	i=M

氣候因子
第i區間



圖 4-2 無母數模式矩陣

降雨量
第j區間

j=1	$\frac{Num(1, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$...	$\frac{Num(M, 1)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
j=2	$\frac{Num(1, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$...	$\frac{Num(M, 2)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
j=N	$\frac{Num(1, N)}{\sum_{j=1}^N Num(1, j)}$	$\frac{Num(2, N)}{\sum_{j=1}^N Num(2, j)}$...	$\frac{Num(M, N)}{\sum_{j=1}^N Num(M, j)}$
	i=1	i=2	...	i=M

氣候因子
第i區間

圖 4-3 無母數條件機率分佈矩陣

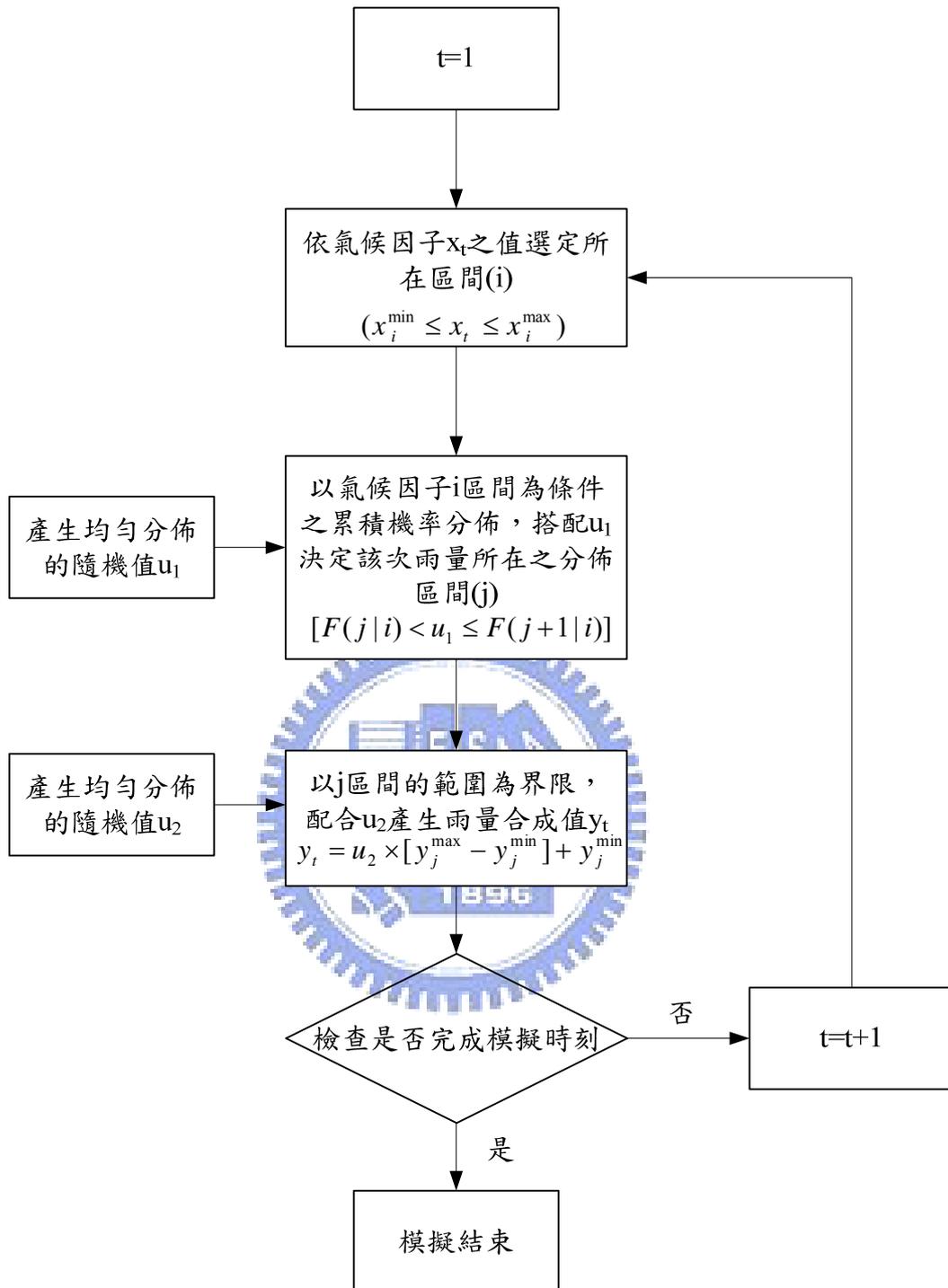


圖 4-4 降尺度氣象合成模組流程圖(單氣候因子)

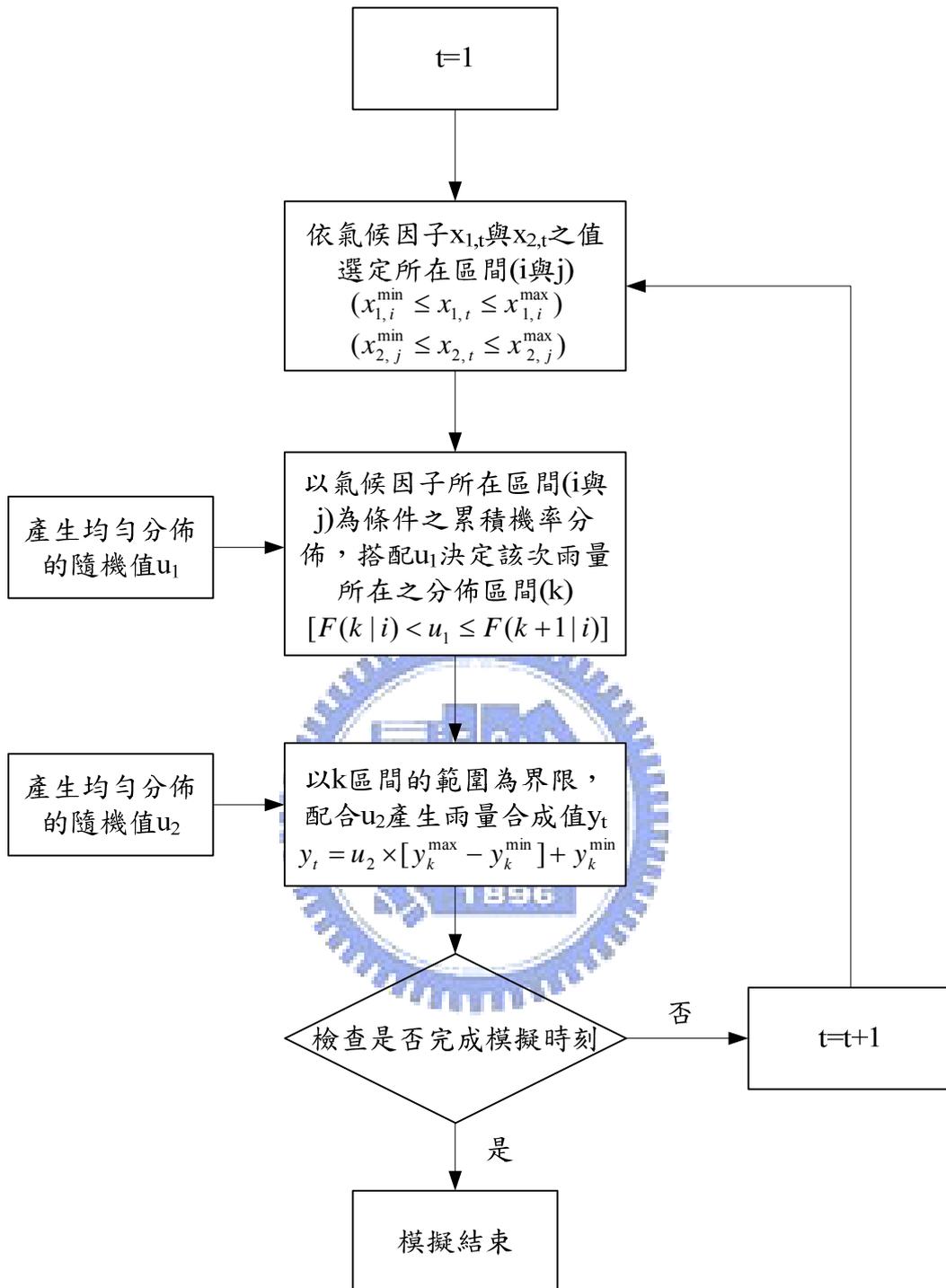


圖 4-5 降尺度氣象合成模組流程圖(雙氣候因子)

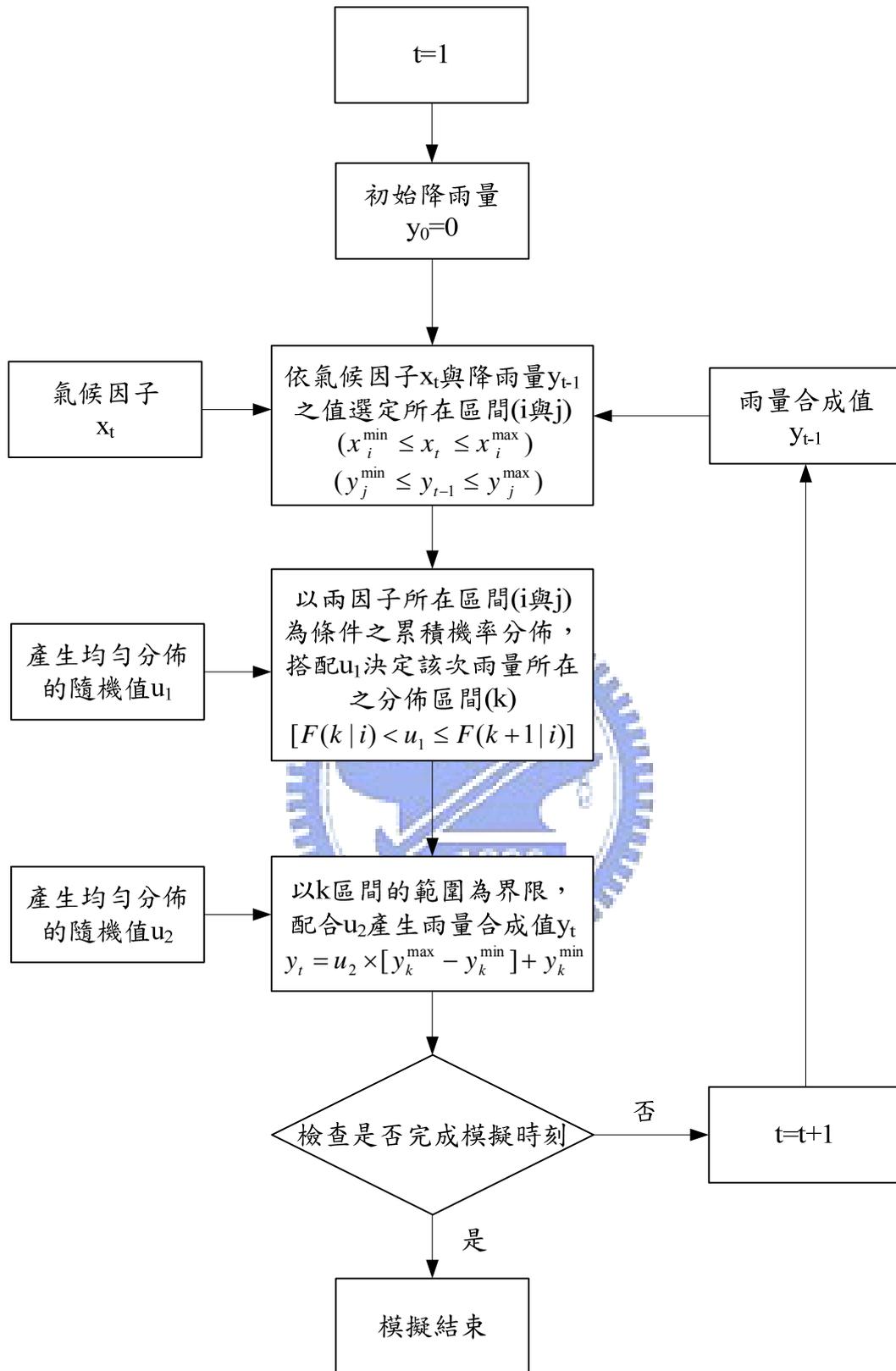


圖 4-6 自相關降尺度氣象合成模組流程圖

4.2 參數說明

先前於無母數統計模組介紹中有提到，此模式會依據歷史資料統計出氣候因子為條件下集水區降雨量的無母數條件機率分佈，因此需先設定氣候因子與集水區降雨量的區間數，以讓程式依據氣候因子與降雨量各自的上下限範圍來切割設定好的區間，在此氣候因子設定為均勻切割成 10 個等分，而降雨量區間數設定為 11 個，其切割方式則是依據降雨資料來切割成一個不降雨的區間加上 10 個降雨的區間，其中在降雨的區間上，為求合成雨量的精度考量，在降雨量較小的部分給予較密集的切割。



第五章 模式應用與案例說明

本章節首先針對研究區域進行概述，其次則應用不同之統計降尺度模式建立合成資料，其中將以合成資料與歷史觀測資料之統計特性進行比較分析。

5.1 研究區域概述

本研究以石門水庫集水區做為研究對象，集水區範圍從石門水庫大壩往大漢河流域上游延伸，總面積約 763.4 平方公里，大部分地區之行政分區為桃園縣復興鄉與新竹縣尖石鄉，集水區位置圖如圖 5.1-1 所示。



集水區內沿水庫周圍為丘陵地，其餘大部分均屬於山岳地帶，地勢起伏由最低之海拔 135 公尺（石門水庫壩址處）變化至最高之海拔 3,529 公尺（品田山），全域自東南向西北傾斜，周圍形狀呈南北向之狹長腰型，主要山脈自品田山沿集水區邊境向東北蜿蜒延伸。水系以大漢溪為主，主流長 135 公里，流域面積 1,163 平方公里，平均坡降為 1/37，發源於品田山，支流總數合計共 64，流路呈不規則樹枝狀，總長約 352.63 公里。

在大漢溪上游主河道已建有巴陵、榮華、義興三座攔砂壩。石門水庫位居本流中游，民國 53 年完工後開始運轉，為兼具灌溉、發電、給水、防洪與觀光等效益之多目標水庫，經桃園及石門二大圳供應下

游公共及農業用水，滿水位標高為245公尺。後池堰調節容量220萬立方公尺，調節尖峰發電放水，供應桃園地區及板新地區之公共用水。

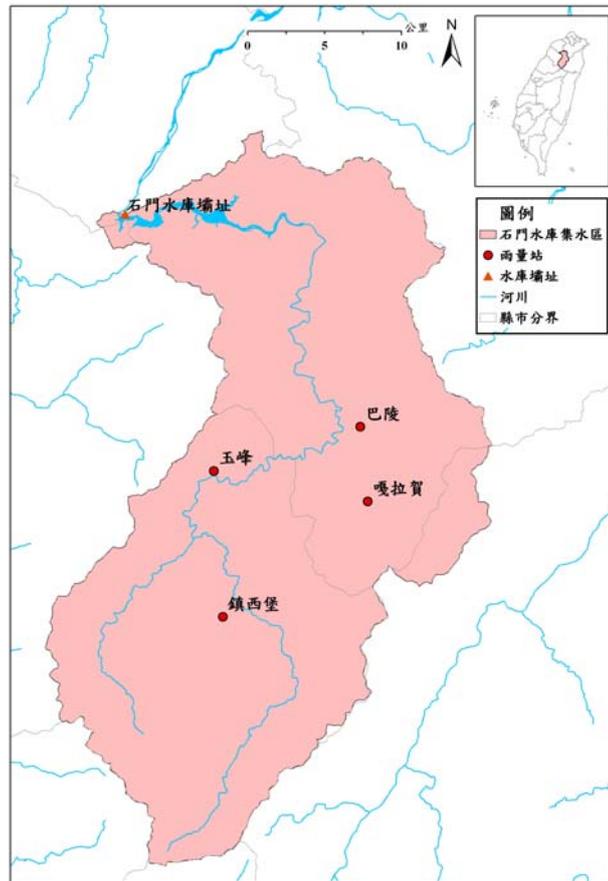


圖 5.1-1 石門水庫集水區位置圖

5.1.1 降雨量資料蒐集與分析

石門水庫集水區內有四座雨量，分別為巴陵、玉峰、嘎拉賀、鎮西堡，本研究蒐集西元 1961 至 1990 年四站之日雨量資料。此外，本研究以四站之算數平均作為石門水庫集水區之代表雨量，而所選的雨量站分佈如圖 5.1-1 所示，其細部資訊詳列於表 5.1-1。

表5.1-1石門集水區雨量站資訊表

站名	流域	經辦單位	TM2 度分帶X座標	TM2 度分帶Y座標	標高(m)
巴陵	大漢溪	經濟部水利署	289171	2731177	1220
嘎拉賀	大漢溪	經濟部水利署	289655	2726339	1260
玉峰	大漢溪	經濟部水利署	279650	2728315	780
鎮西堡	大漢溪	經濟部水利署	280235	2718811	630

一般而言，為確保模式之正確性，一般均會將所收集之資料，區分為檢定年份與驗證年份，檢定年份用以建立模式，而驗證年份則用以確認模式可以預測未被告告知之情況。本研究將西元 1961 至 1985 年作為檢定年份，合計共 25 年；而西元 1986 至 1990 年則作為驗證年份，合計共 5 年。

檢定年份之平均年降雨量為 2,195(mm/yr)，驗證年份之平均年降雨量為 2,238(mm/yr)，兩者差異不大。圖 5.1-2 為檢定年份各月之平均日雨量圖，其先將檢定年份之歷史資料依據不同月份進行分組，在各自計算各月之平均值，最後繪製於圖面上。圖 5.1-3 則為各月之日雨量標準偏差圖，其以各月之分組數據計算標準偏差。圖 5.1-4 與圖

5.1-5 則為分別為驗證年份之平均日雨量圖與日雨量標準偏差圖。

從檢定與驗證年份的圖面觀察，兩者圖形均近似，六至十月份為豐水期，平均降雨量均較其他月份枯水期為高，在標準偏差上亦有相同之趨勢，顯示檢定年份與驗證年份有相近之統計特性。

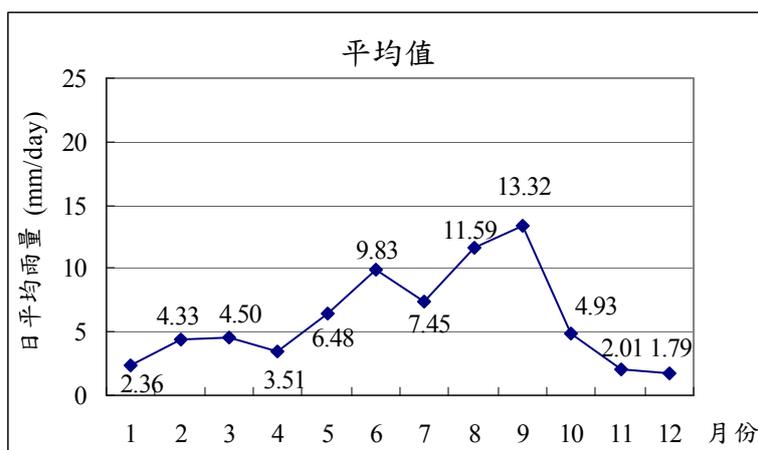


圖 5.1-2 各月之平均日雨量圖(檢定年份：西元 1961 至 1985 年)

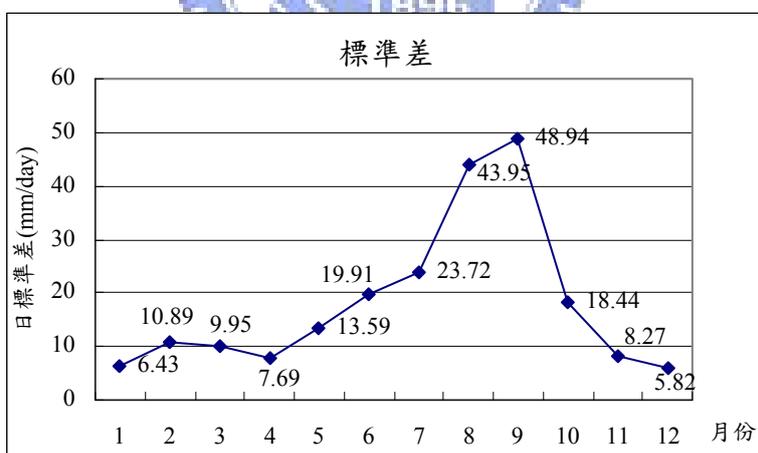


圖 5.1-3 各月之日雨量標準偏差圖(檢定年份：西元 1961 至 1985 年)

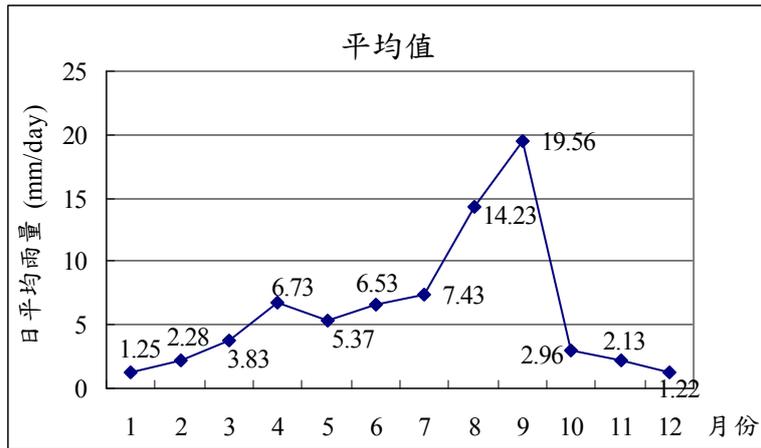


圖 5.1-4 各月之平均日雨量圖(驗證年份：西元 1986 至 1990 年)

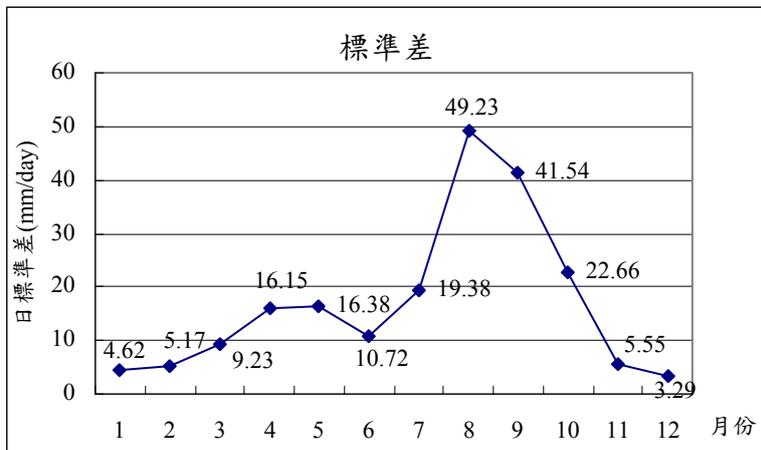


圖 5.1-5 各月之日雨量標準偏差圖(驗證年份：西元 1986 至 1990 年)

5.1.2 氣候因子分析

在大尺度氣候資料方面，本研究是採用美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)所提供的再分析日資料(reanalysis data)，圖 5.1-6 為 NCEP 格網分布圖，其網格大小為 2.5° 緯度 \times 3.75° 經度，最鄰近石門集水區之格點位於東經 120 度以及北緯 25 度交會處。再分析資料中包括海平面壓力、氣流強度、緯向風速、經向風速、渦度、風向、散度、重力位高度及溼度等大氣相關的氣候資訊。表 5.1-2 為再分析資料氣候因子表。

再分析資料蒐集了西元 1948 年至今之氣候觀測資料，其為蒐集之原始資料重新進行分析所產出的資料，蒐集來源包括地面觀測、船艦觀測、飛機觀測、無線電探空觀測及衛星等(林淑華, 2007)，資料本身已經過正規化。本研究取西元 1961 至 1990 年之在分析資料，依據月份與各旬進行分組，再將分組後數據計算平均值，且繪製於圖面上，圖 5.1-7 至 5.1-9 分別為各因子之平均值分布圖，且與圖 5.1-2 或圖 5.1-4 之平均降雨量圖相比，部分因子與降雨量具有較高之正相關性或負相關性，例如因子 1、3、6、11 和 25 等。

Asia

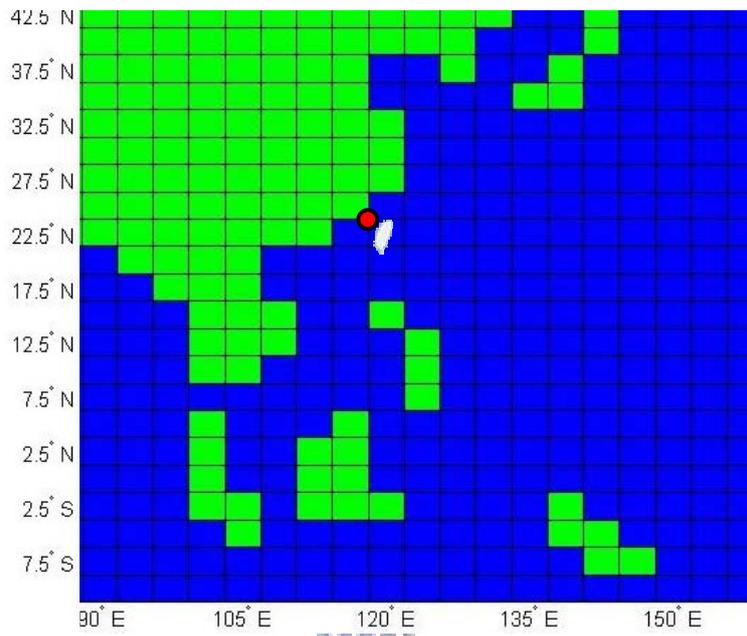


圖 5.1-6 大尺度氣候因子選用格點位置圖



表5.1-2再分析資料氣候因子表

代號	縮寫	英文全名	氣候因子
因子 1	mslpas	Mean sea level pressure	平均海平面壓力
因子 2	p5_fas	500 hPa airflow strength	500 hPa 氣流強度
因子 3	p5_uas	500 hPa zonal velocity	500 hPa 緯向風速
因子 4	p5_vas	500 hPa meridional velocity	500 hPa 經向風速
因子 5	p5_zas	500 hPa vorticity	500 hPa 渦度
因子 6	p5thas	500 hPa wind direction	500 hPa 風向
因子 7	p5zhas	500 hPa divergence	500 hPa 散度
因子 8	p8_fas	850 hPa airflow strength	850 hPa 氣流強度
因子 9	p8_uas	850 hPa zonal velocity	850 hPa 緯向風速
因子 10	p8_vas	850 hPa meridional velocity	850 hPa 經向風速
因子 11	p8_zas	850 hPa vorticity	850 hPa 渦度
因子 12	p8thas	850 hPa wind direction	850 hPa 風向
因子 13	p8zhas	850 hPa divergence	850 hPa 散度
因子 14	p500as	500 hPa geopotential height	500 hPa 重力位高度
因子 15	p850as	850 hPa geopotential height	850 hPa 重力位高度
因子 16	p_fas	Surface airflow strength	表面氣流強度
因子 17	p_uas	Surface zonal velocity	表面緯向風速
因子 18	p_vas	Surface meridional velocity	表面經向風速
因子 19	p_zas	Surface vorticity	表面渦度
因子 20	p_thas	Surface wind direction	表面風向
因子 21	p_zhas	Surface divergence	表面散度
因子 22	r500as	Relative humidity at 500 hPa	500 hPa 相對溼度
因子 23	r850as	Relative humidity at 850 hPa	850 hPa 相對溼度
因子 24	rhumas	Near surface relative humidity	鄰近表面相對溼度
因子 25	shumas	Surface specific humidity	表面絕對溼度
因子 26	tempas	Mean temperature at 2m	高度 2m 平均溫度

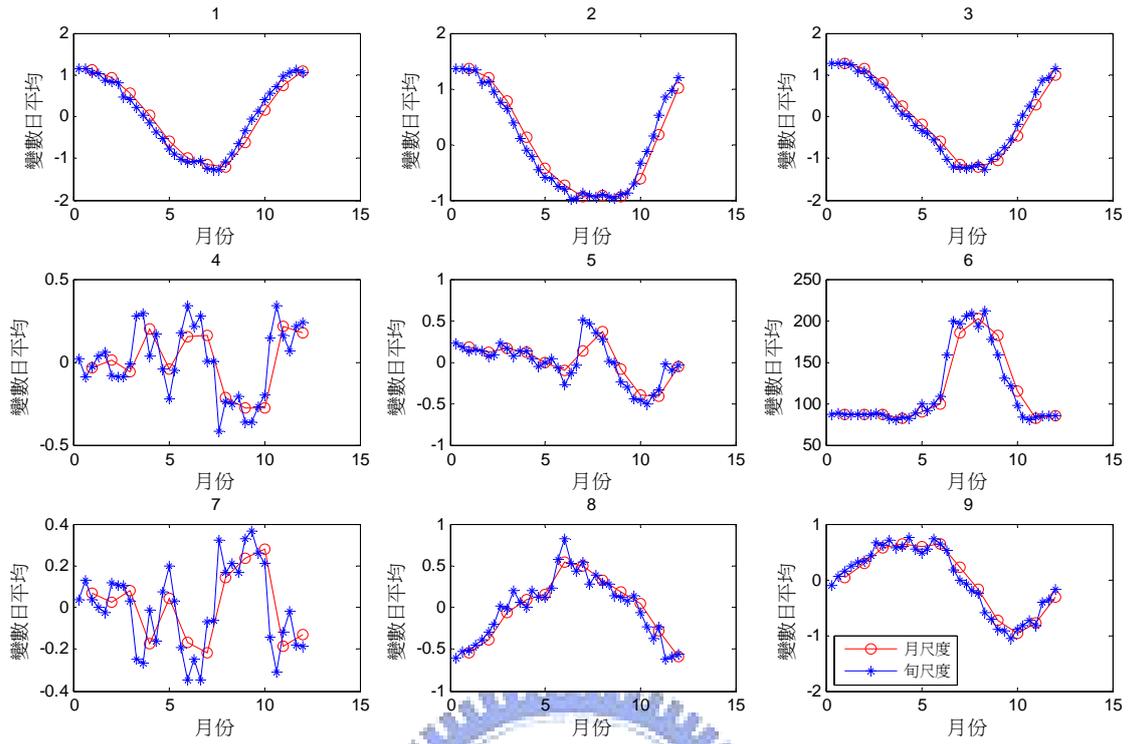


圖 5.1-7 各氣候因子的平均值分佈圖 (因子 1 至因子 9)

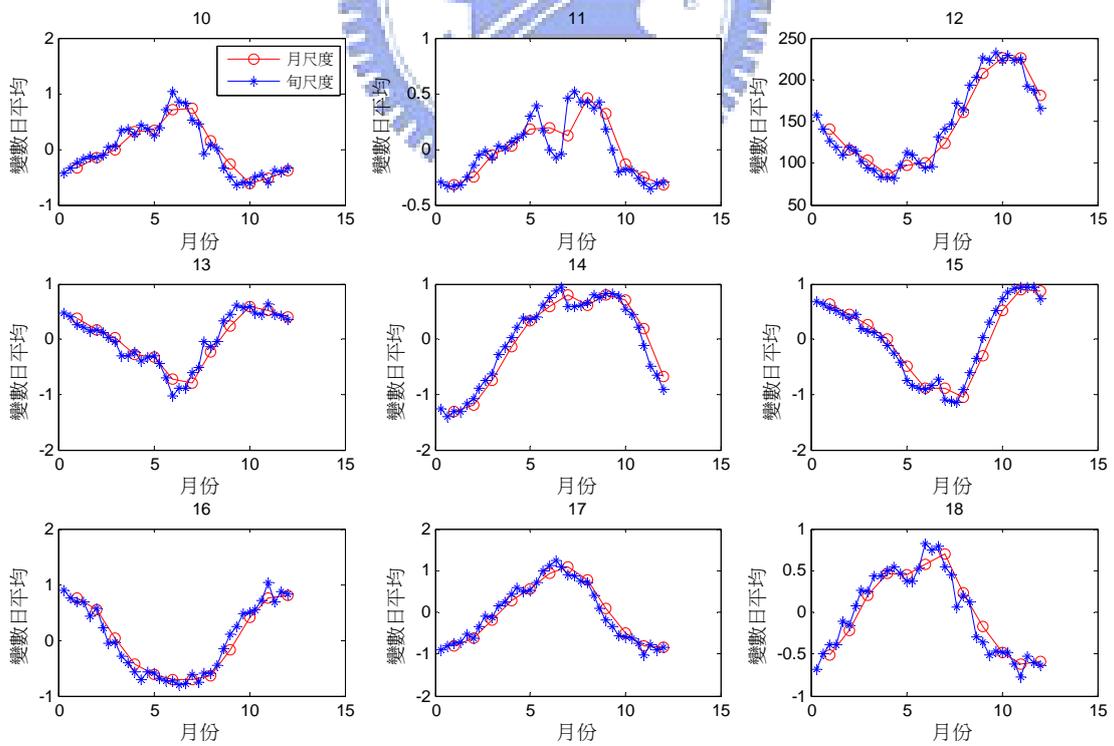


圖 5.1-8 各氣候因子的平均值分佈圖 (因子 10 至因子 18)

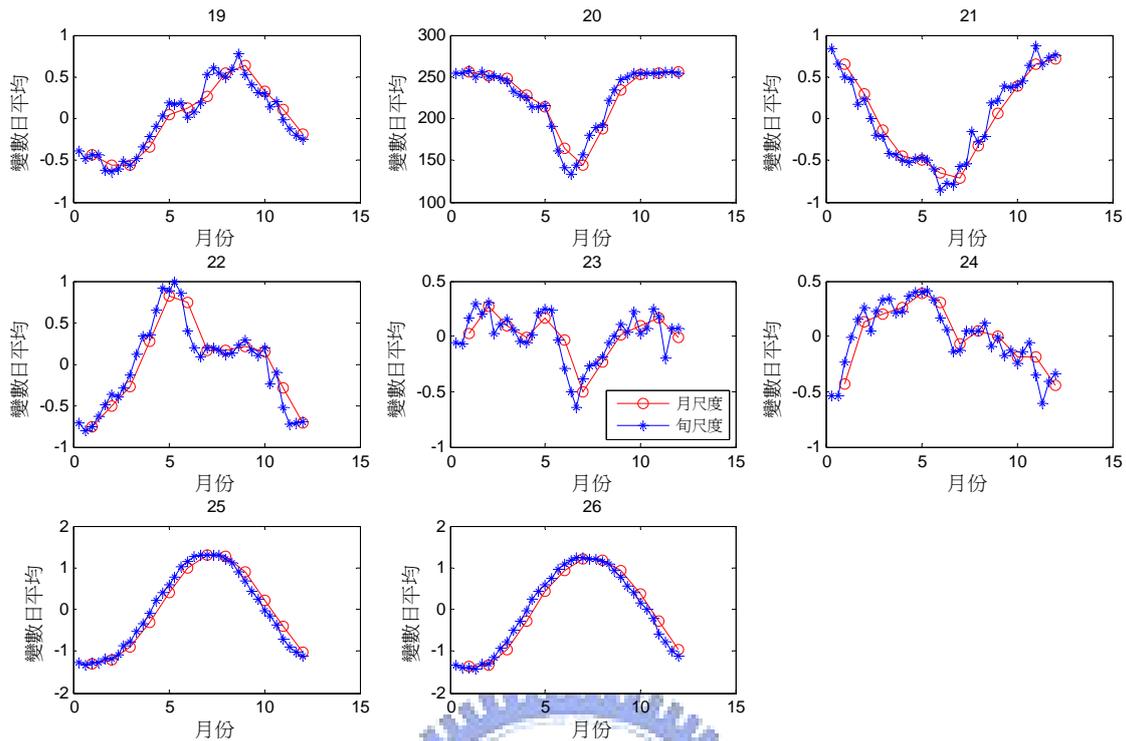


圖 5.1-9 各氣候因子的平均值分佈圖（因子 19 至因子 26）

5.1.3 集水區降雨量與大尺度氣候因子相關分析

統計上，常以相關係數(correlation)來描述兩數列相關性，本研究在此評判各氣候因子對於降雨量之關係，作為後續挑選氣候因子之依據。相關係數之公式如(5.1-1 式)所示。

$$r(X,Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \dots\dots\dots (5.1-1 式)$$

本研究取西元1961至1990年之資料進行分析，首先將依據月份進行分群，亦即30年內的一月的日資料都歸於一群。其次再計算各分群之平均值，因此各因子或降雨量均轉化為長度為12之數列。最後，計

算各因子與降雨量之相關係數，此稱之為月時間尺度之比較。以相同方式製作旬時間尺度與日時間尺度之相關係數，表5.1-3為各因子與降雨量之相關係數表。

將月時間尺度及旬時間尺度之各因子數列與降雨量數列繪製於圖面上，X軸代表各氣候因子，Y軸代表降雨量，圖 5.1-10 至 5.1-12 分別為各氣候因子與降雨量之關係分布圖。

表5.1-3各因子與降雨量之相關係數表

因子	相關係數												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
日時間尺度	-0.58	-0.51	-0.56	-0.39	0.26	0.53	0.31	0.50	-0.07	0.14	0.68	0.04	-0.18
旬時間尺度	-0.78	-0.72	-0.77	-0.53	0.28	0.77	-0.40	0.65	-0.09	0.28	0.90	0.07	-0.33
月時間尺度	-0.83	-0.77	-0.82	-0.53	0.23	0.81	0.37	0.73	-0.06	0.38	0.91	0.04	-0.43
因子	相關係數												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
日時間尺度	0.43	-0.58	-0.41	0.43	0.20	0.53	-0.34	-0.28	0.41	-0.07	0.28	0.55	0.53
旬時間尺度	0.61	-0.77	-0.62	0.61	0.36	0.73	-0.48	-0.47	0.57	-0.22	0.37	0.76	0.74
月時間尺度	0.68	-0.79	-0.69	0.68	0.45	0.74	-0.56	-0.55	0.59	-0.39	0.39	0.82	0.79

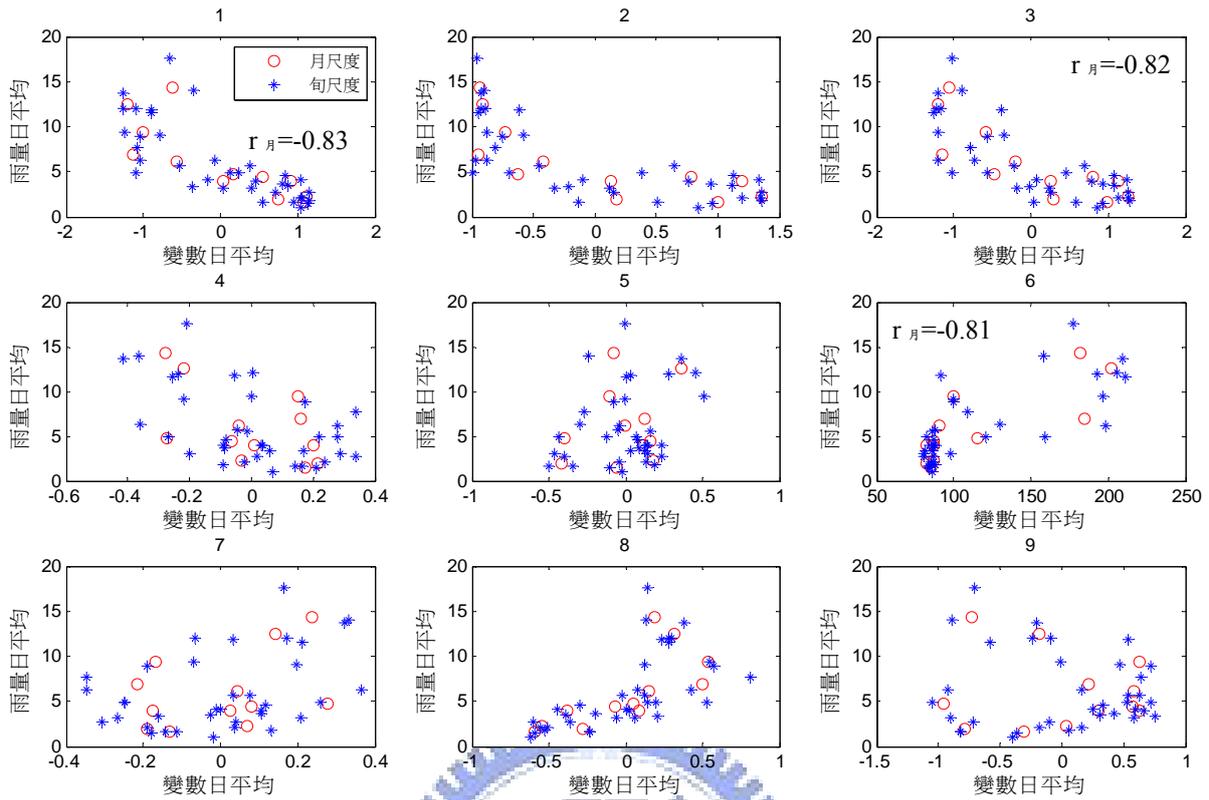


圖 5.1-10 各氣候因子與降雨量關係分布圖（因子 1 至因子 9）

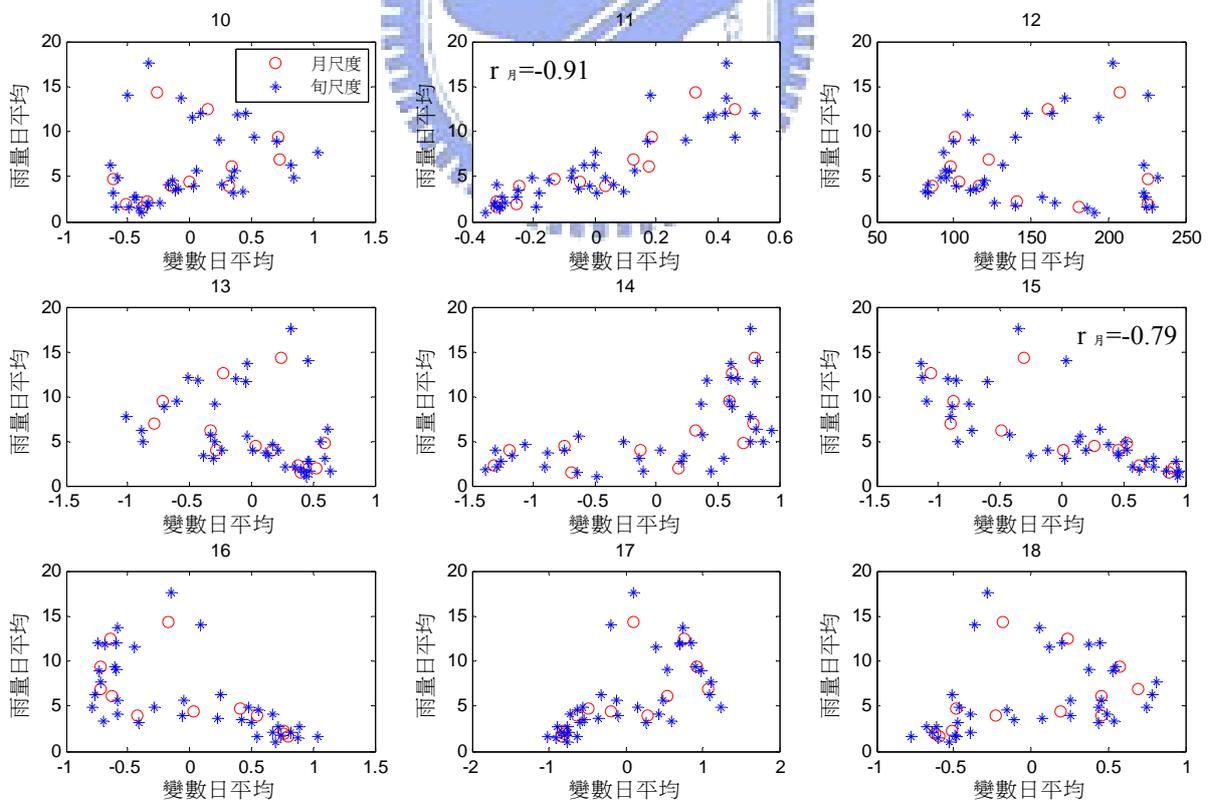


圖 5.1-11 各氣候因子與降雨量關係分布圖（因子 10 至因子 18）

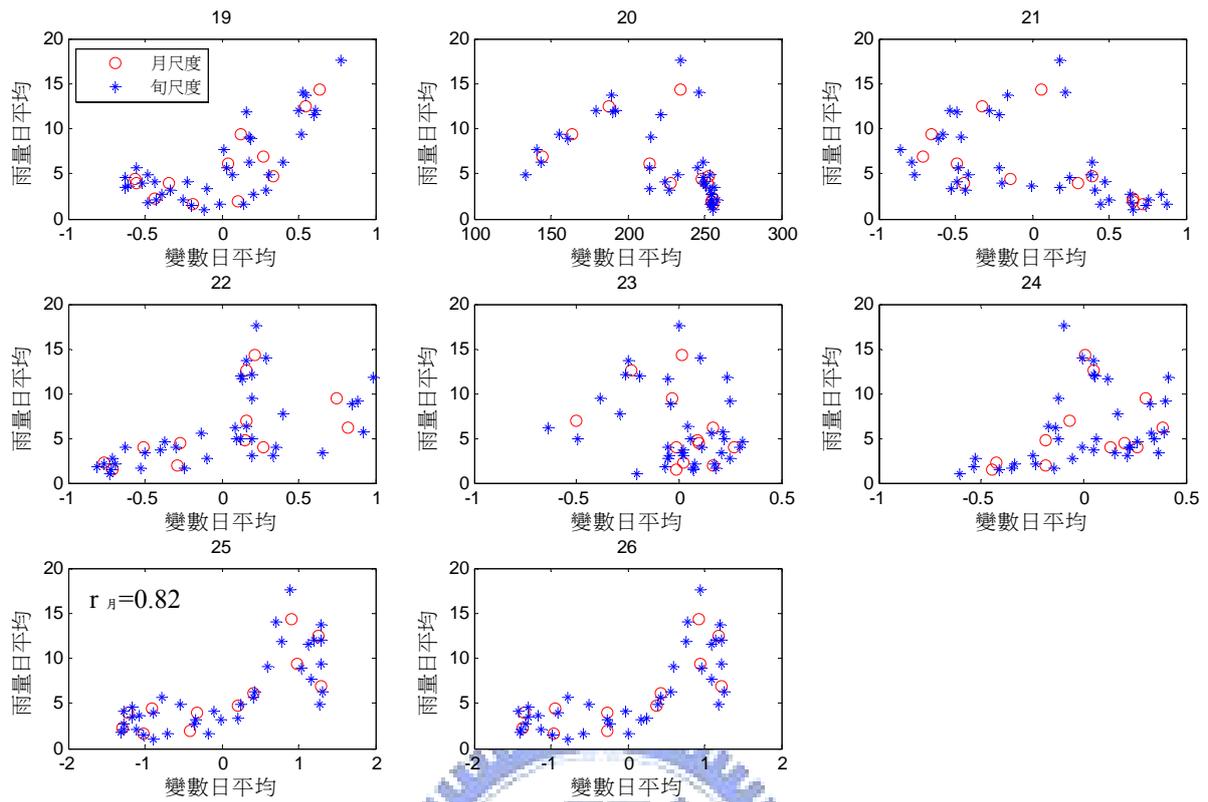


圖 5.1-12 各氣候因子與降雨量關係分布圖 (因子 19 至因子 26)



5.2 案例概述

在模式上，本研究所開發之 NPDM 模式與國際慣用之 SDSM 模式進行雨量合成之模擬，藉由國際慣用之 SDSM 模式作為對照組，證實本研究模式之正確性與適用性。模擬上，分別探討依據「單一氣候因子」所合成之降雨量合成效果，與依據「雙氣候因子」所合成之降雨量效果，探討因子選用數量上對於降雨量合成之差異，最後將依據有無考量「降雨量自相關」來評估降雨量之合成效果。此外，本研究在資料上採取三種分群方式，分別為年分群、季分群與月分群三種架構，月分群是依據月份將所有資料分成十二群，分別檢定建立各月模式，最後利用各月模式重新合成降雨量資料。季分群則是將所有資料分為四群。年分群簡單地說，就是不分群。

此外，為評斷模式所合成資料之優劣，需要藉由一定之指標綜合評判不同模式或不同架構下的優劣。可將歷史資料與合成資料分別依據月份進行分群，再各自計算各月之平均值與標準偏差，均為長度12之數列(分別如圖5.2-1與圖5.2-2所示)。分別比較平均值數列與標準差數列對於歷史資料與合成資料之均方根誤差(Root mean square error, RMSE)，其公式如(5.2-1式)所示，由於年份上共分為檢定年份與驗證年份，故合計可得四個均方根誤差(RMSE)，分別為「檢定年份之平均值RMSE」、「檢定年份之標準差RMSE」、「驗證年份之平均值

RMSE」與「驗證年份之標準差RMSE」。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (T_m - P_m)^2} \dots\dots\dots (5.2-1 \text{ 式})$$

其中， T_m 代表第m月的歷史資料， P_m 代表第m月的合成資料。

四個均方根誤差(RMSE)再進一步透過加權平均的方式計算 RMSE 之加權平均值(Weighted Average of RMSE, WAR)，因此藉由 WAR 之數值大小即可評判合成效果，WAR 越小即代表合成資料在統計特性上越貼近歷史資料。

$$WAR = \sum_{i=1}^4 w_i \times RMSE_i \dots\dots\dots (5.2-2 \text{ 式})$$

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 1 \dots\dots\dots (5.2-3 \text{ 式})$$

其中， $RMSE_1$ 為檢定年份之平均值 RMSE， $RMSE_2$ 為驗證年份之平均值 RMSE， $RMSE_3$ 為檢定年份之標準差 RMSE， $RMSE_4$ 為驗證年份之標準差 RMSE， w_i 則代表各自對應的權重值，權重值之總和須等於 1。

在計算 WAR 數值上，本研究為消弭平均值 RMSE 與標準差 RMSE 之數值尺度的差異，已將兩 RMSE 數值做數值尺度上的處理，即平均值 RMSE 乘上各因子標準差 RMSE 的平均值，再除上各因子平均值 RMSE 的平均值。且在加權平均之權重給定上，本研究認定平均值之重要性應高於標準差，因此平均值方面之權重總和為 0.6，

標準差方面之權重總和為 0.4，亦即平均值方面與標準差方面之重要性比重為 6 比 4。此外，在檢定年份與驗證年份方面，本研究擬定三種不同之情境，如表 5.2-1 所示，權重情境一至三所代表的含意分別是「不偏重檢定或驗證年份」、「偏重檢定年份」與「偏重驗證年份」。

表5.2-1不同情境之WAR權重值

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
權重情境一	0.3	0.3	0.2	0.2
權重情境二	0.35	0.25	0.25	0.15
權重情境三	0.25	0.35	0.15	0.25

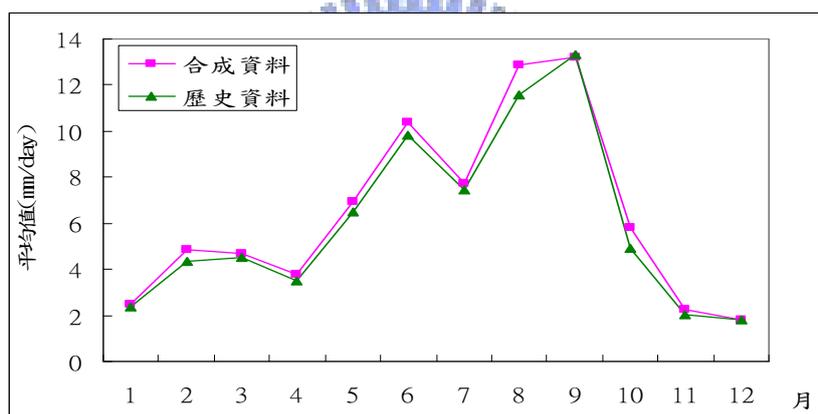


圖 5.2-1 各月之降雨量平均值分佈示意圖

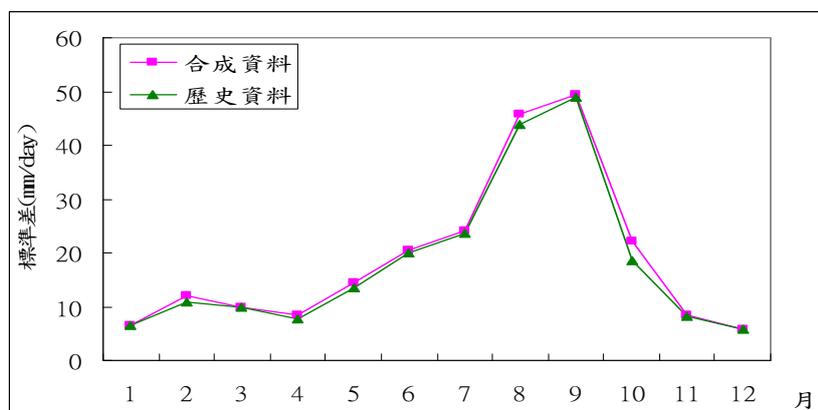
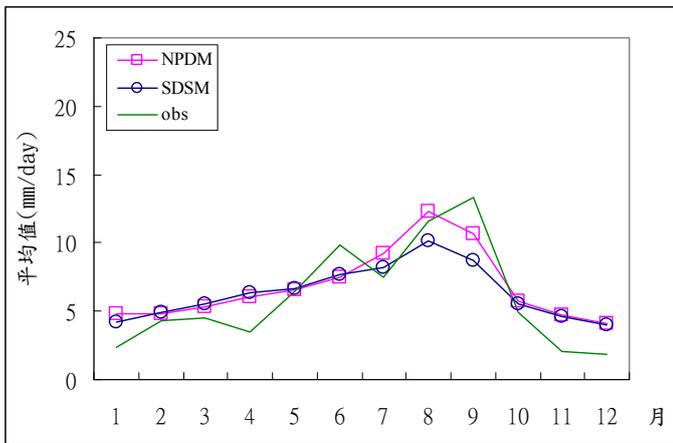


圖 5.2-2 各月之降雨量標準差分佈示意圖

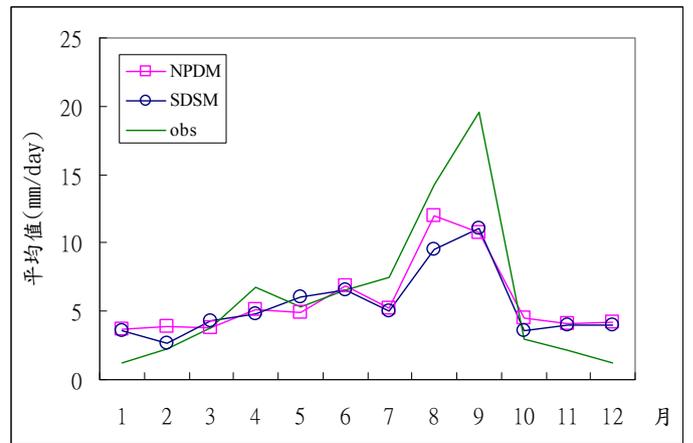
5.3 單氣候因子降尺度氣象合成結果比較

一、850hPa 渦度之單氣候因子降尺度合成資料比較

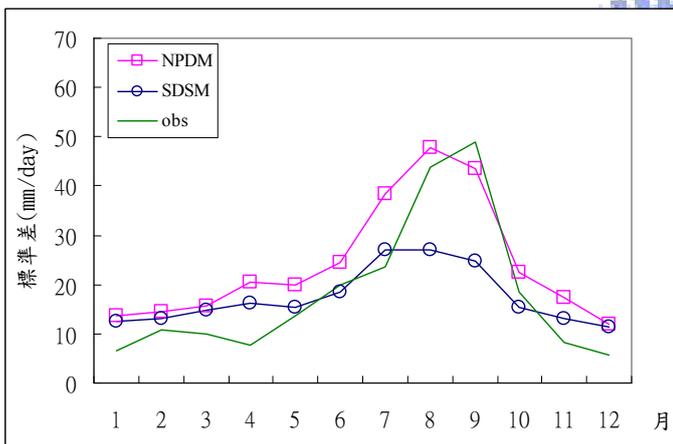
依據歷史資料分析氣候因子與降雨量間的相關係數(如表 5.1-3 所示)，以氣候因子 11 之相關性最高，其為 850hPa 下的渦度，以下先以該因子進行本模式(NPDM)與 SDSM 模式之成果展示。圖 5.3-1 至 5.3-3 分別為不同分群架構之各月統計特性分佈圖，圖上分別畫出檢定年份與驗證年份之歷史資料與合成資料之統計特性，統計項目包含平均值與標準偏差。綜合來講，在檢定年份中，NPDM 合成資料均較 SDSM 合成資料貼近歷史資料，尤其以標準偏差更為明顯，SDSM 合成資料之標準偏差在豐水期時都有偏低的趨勢。綜觀年、季與月不同分群架構，跟隨分群群數的增加，無論是 NPDM 或 SDSM 之合成資料均可以進一步符合歷史資料之統計特性，因此建議後續可直接以月分群架構進行探討。在驗證年份中，雖然驗證年份之歷史資料並未納入分析，但是無論是 SDSM 模式或 NPDM 模式均可呈現出大致之豐枯趨勢。



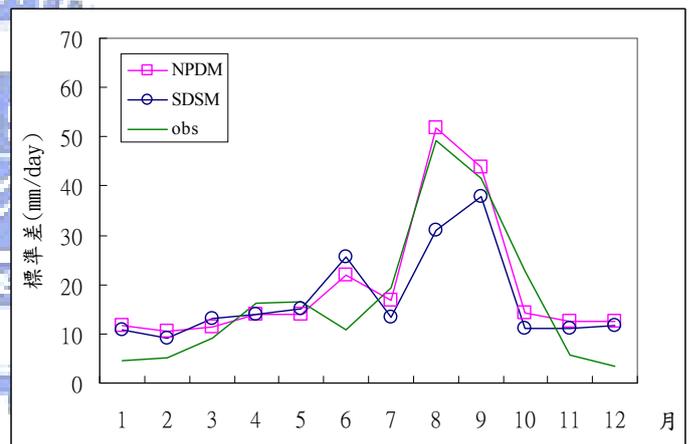
各月平均雨量分佈圖(檢定)



各月平均雨量分佈圖(驗證)

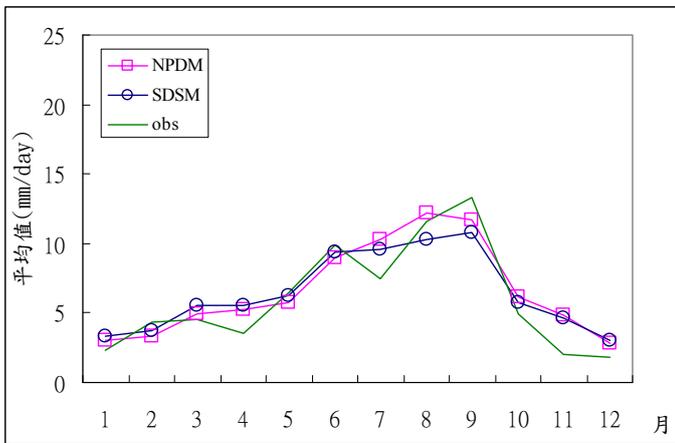


各月標準差分佈圖(檢定)

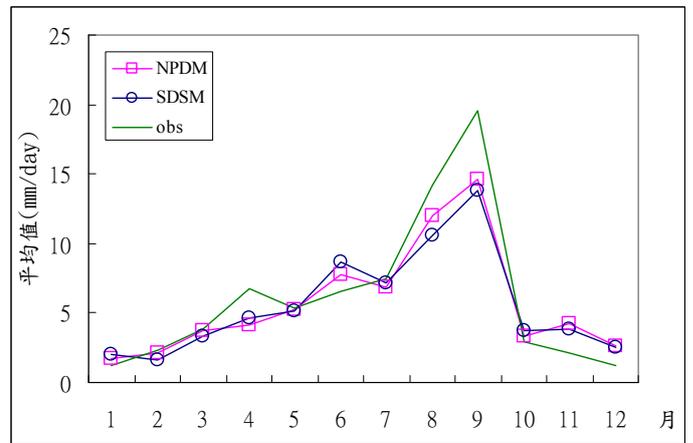


各月標準差分佈圖(驗證)

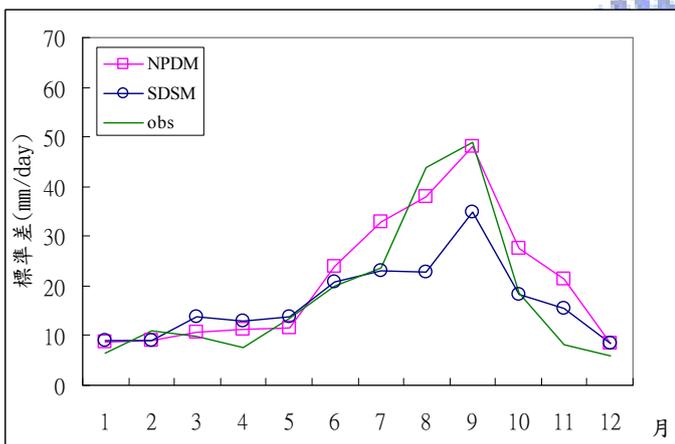
圖 5.3-1 年分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa 渦度)



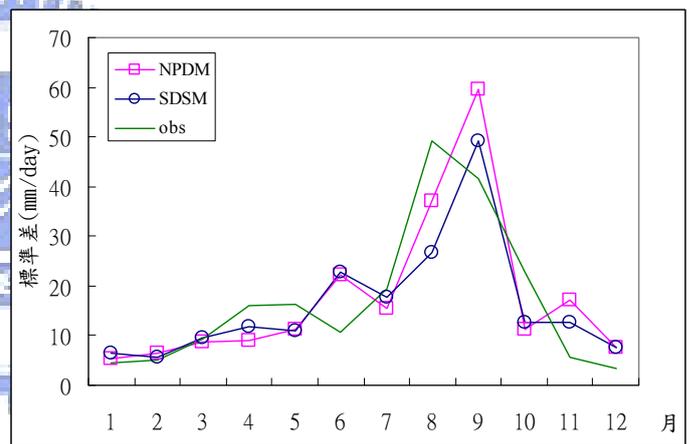
各月平均雨量分佈圖(檢定)



各月平均雨量分佈圖(驗證)

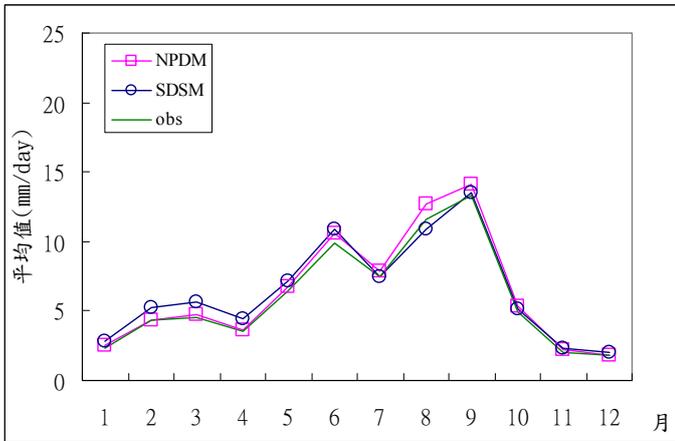


各月標準差分佈圖(檢定)

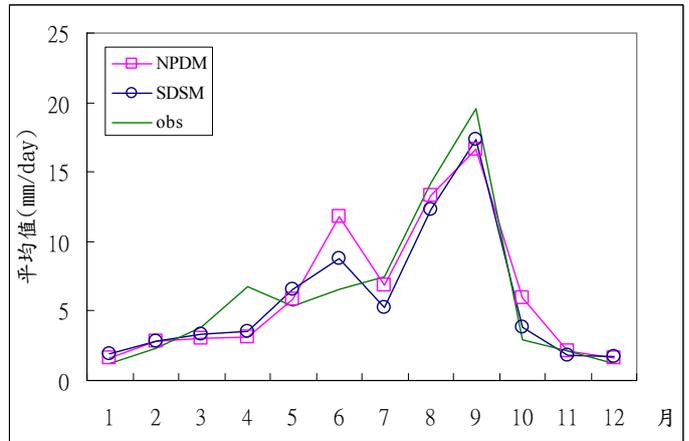


各月標準差分佈圖(驗證)

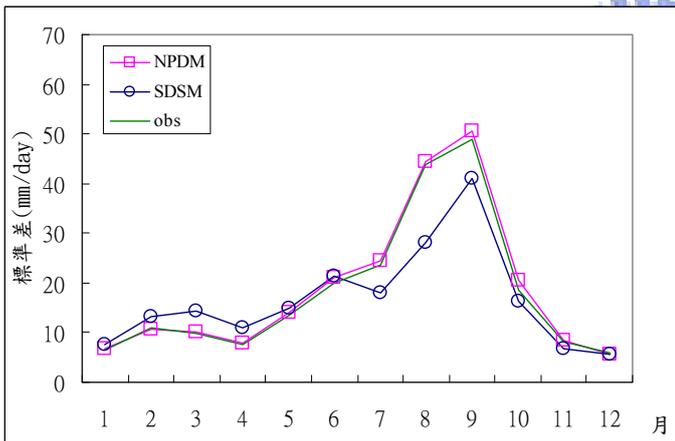
圖 5.3-2 季分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa 渦度)



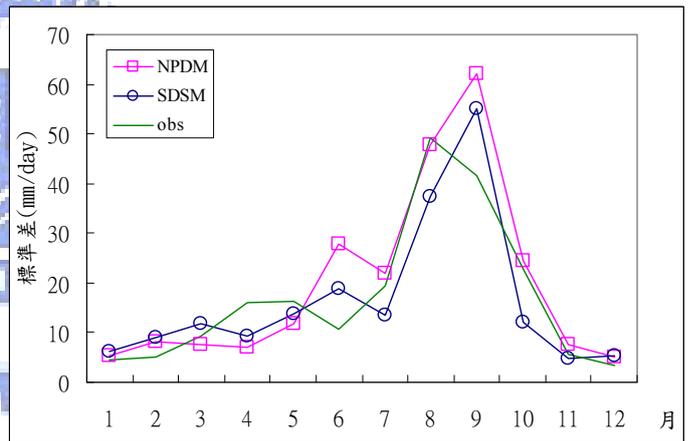
各月平均雨量分佈圖(檢定)



各月平均雨量分佈圖(驗證)



各月標準差分佈圖(檢定)



各月標準差分佈圖(驗證)

圖 5.3-3 月分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa 渦度)

表 5.3-1 為月分群架構下之降雨發生機率與平均年降雨量分析資料表，在檢定年份之降雨機率上，兩模式均有不錯之表現，然在驗證年份上 NPDM 合成資料較 SDSM 合成資料更近似歷史資料。此外，在檢定年份的平均年降雨量上，NPDM 和 SDSM 之合成資料皆略約高估一成，在驗證年份上，NPDM 合成資料之平均年降雨量比 SDSM 合成資料更接近於歷史資料。

圖 5.3-4 至 5.3-7 分別為月架構下不同月份之 850hPa 渦度與降雨量之散佈圖，圖 5.3-8 至 5.3-11 為不同月份之降雨量組體圖，其中以一月與九月分別代表枯水月與豐水月，在檢定年份上，兩模式均可掌握歷史資料之分佈特性，在驗證年份上，豐水月之散佈圖與組體圖差異較大，其原因應是驗證年份與檢定年份上之歷史資料即有差異，因此合成上較難以符合驗證年份之歷史資料。

所示，可以得知單氣候因子 NPDM 與 SDSM 模式皆會隨著模式架構從年、季節到月而更接近於真實雨量的月平均值及月標準差分佈，也可以突顯出單氣候因子 NPDM 模式於各架構的豐水期(5 到 10 月)模擬結果有越趨近於歷史雨量的分佈，其中又以月標準差最為明顯，其他單氣候因子的結果也是一致的。

表5.3-1 月分群架構下之降雨發生機率與平均年降雨量資料表

		歷史資料	NPDM 資料	SDSM 資料
檢定	降雨發生機率	51%	51%	50%
	平均年降雨量	2195(mm/yr)	2336(mm/yr)	2358(mm/yr)
驗證	降雨發生機率	47%	48%	43%
	平均年降雨量	2238(mm/yr)	2275(mm/yr)	2106(mm/yr)

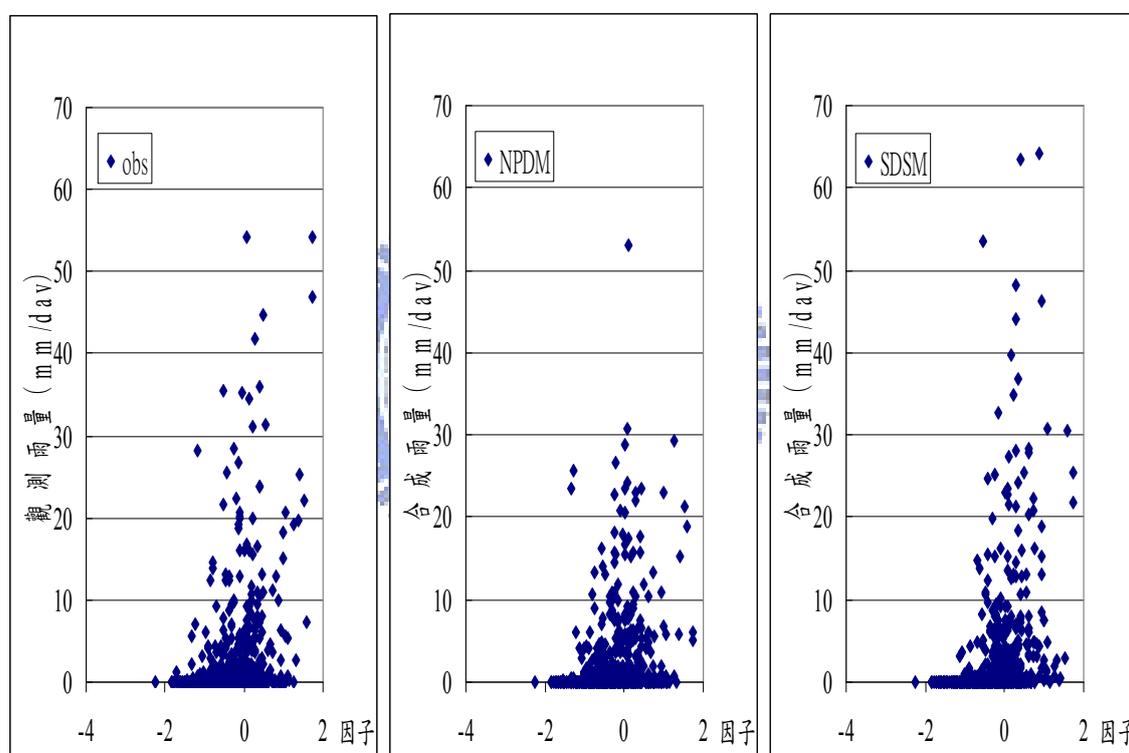


圖 5.3-4 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

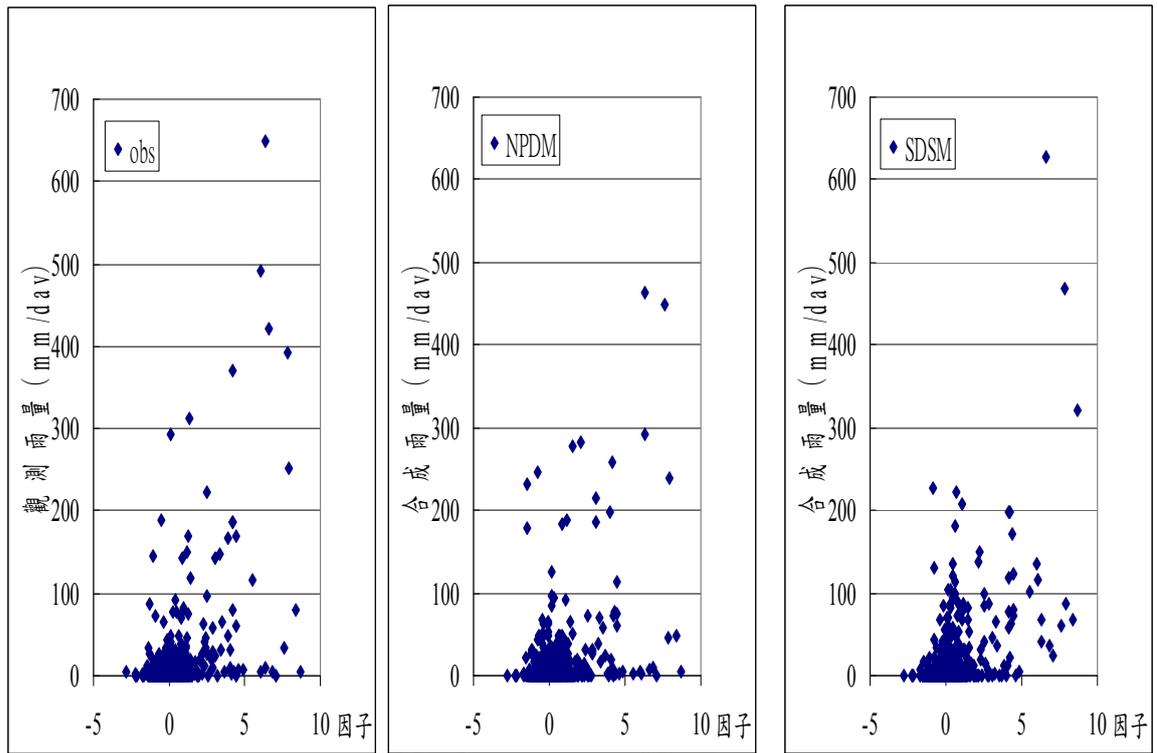


圖 5.3-5 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

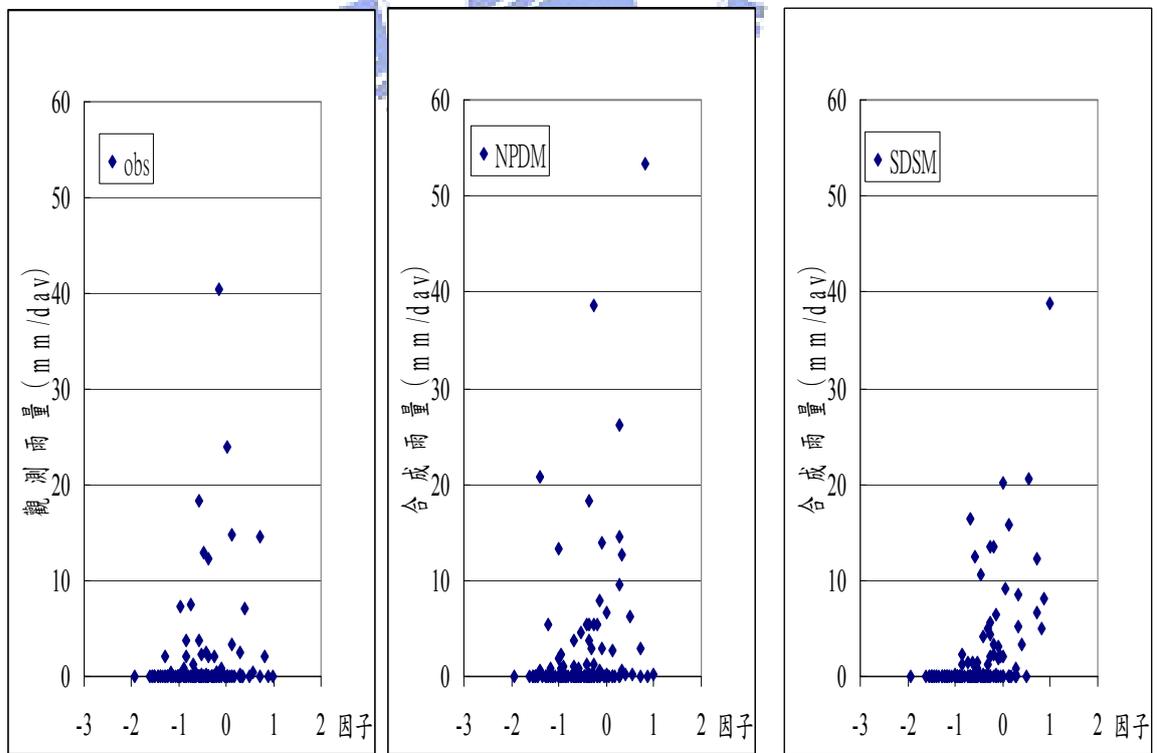


圖 5.3-6 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

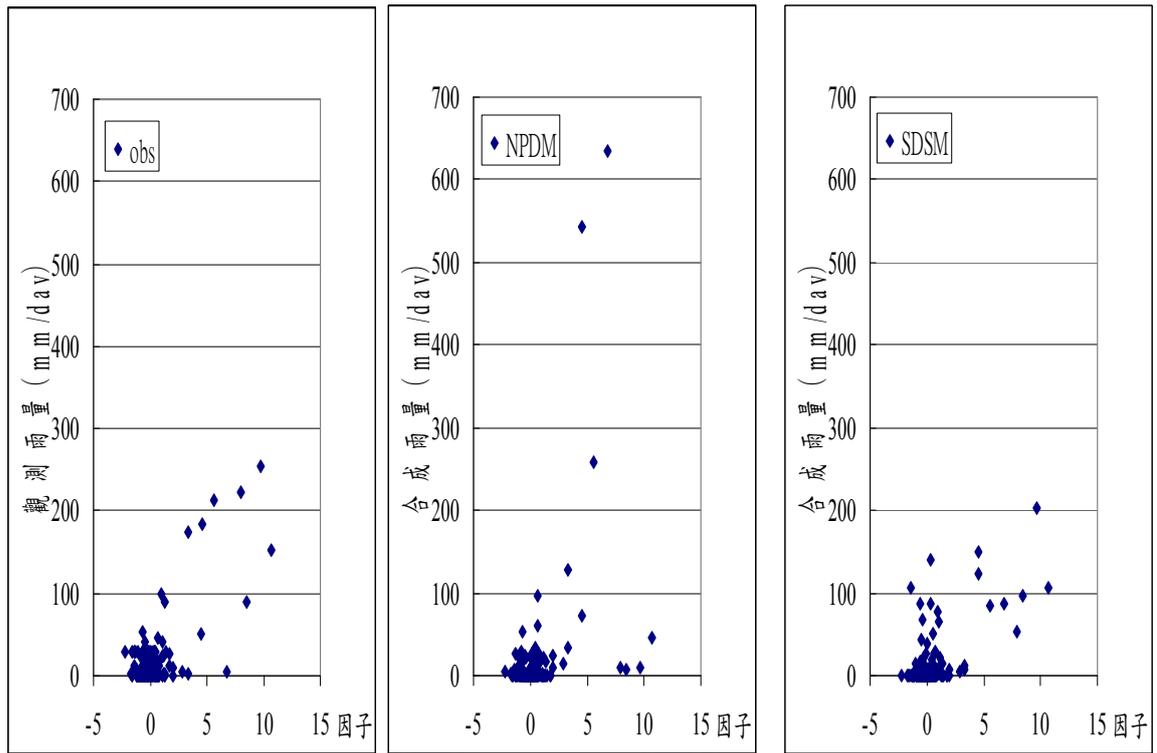


圖 5.3-7 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

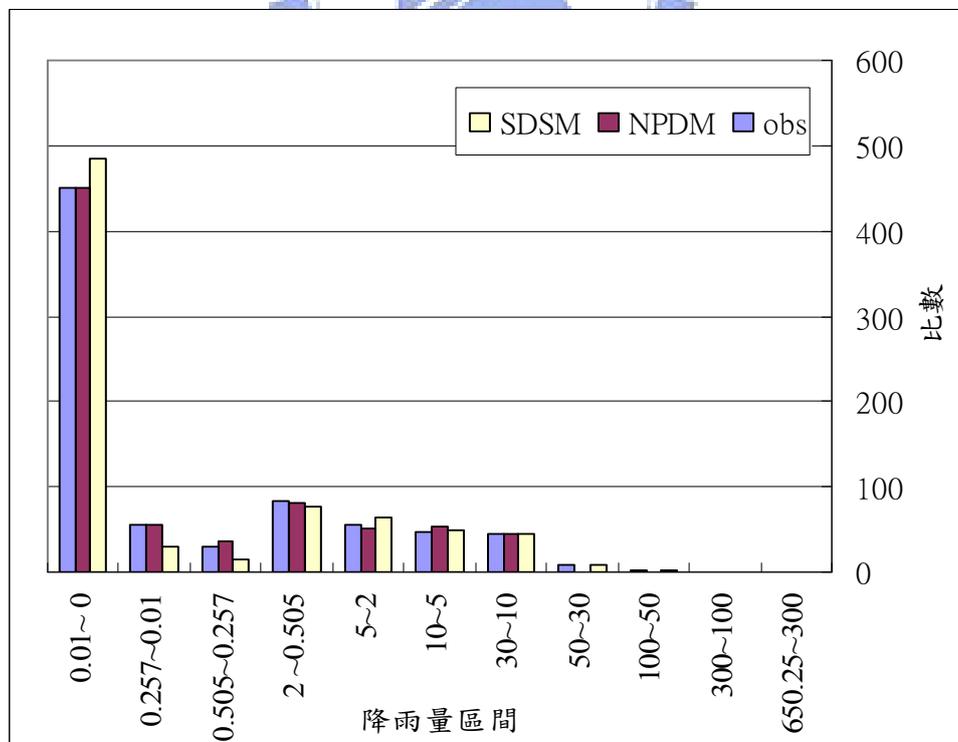


圖 5.3-8 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定)

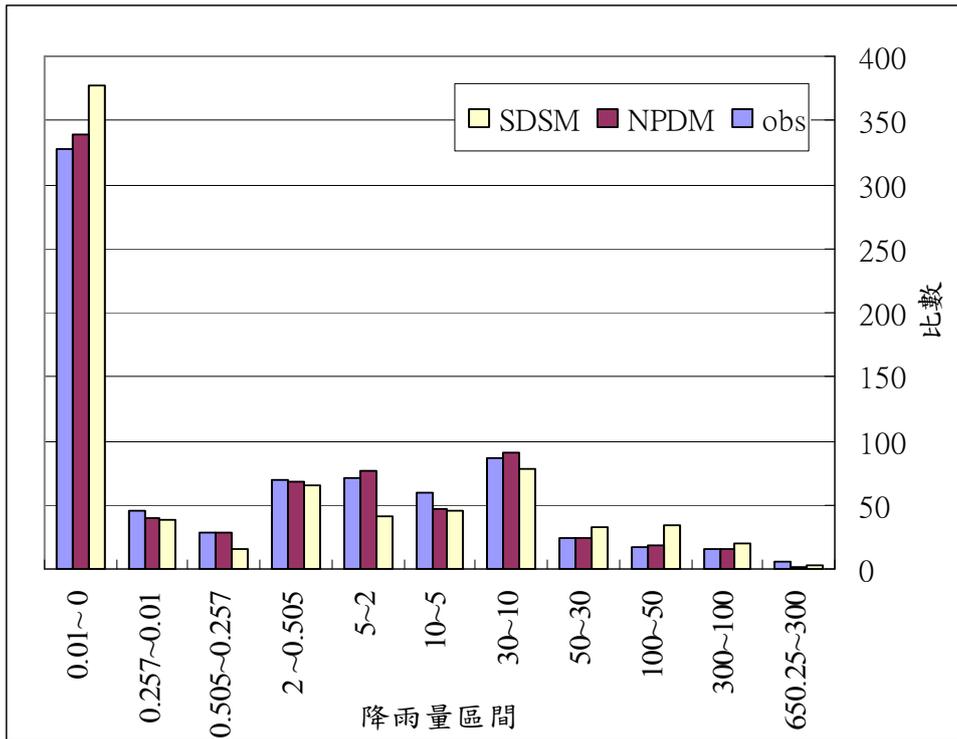


圖 5.3-9 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定)

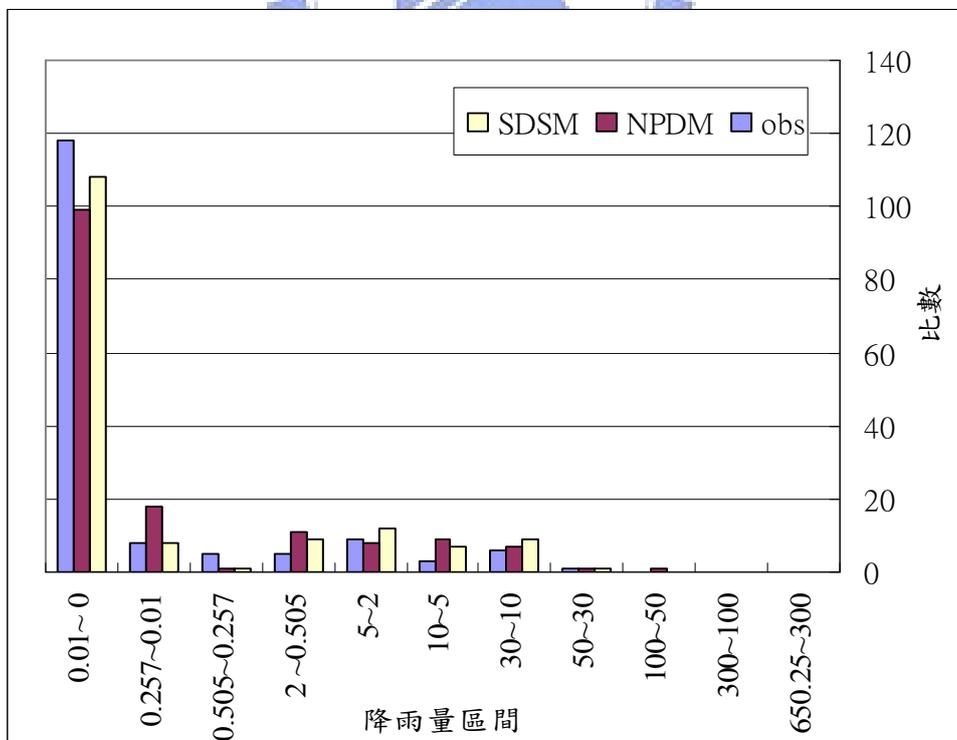


圖 5.3-10 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證)

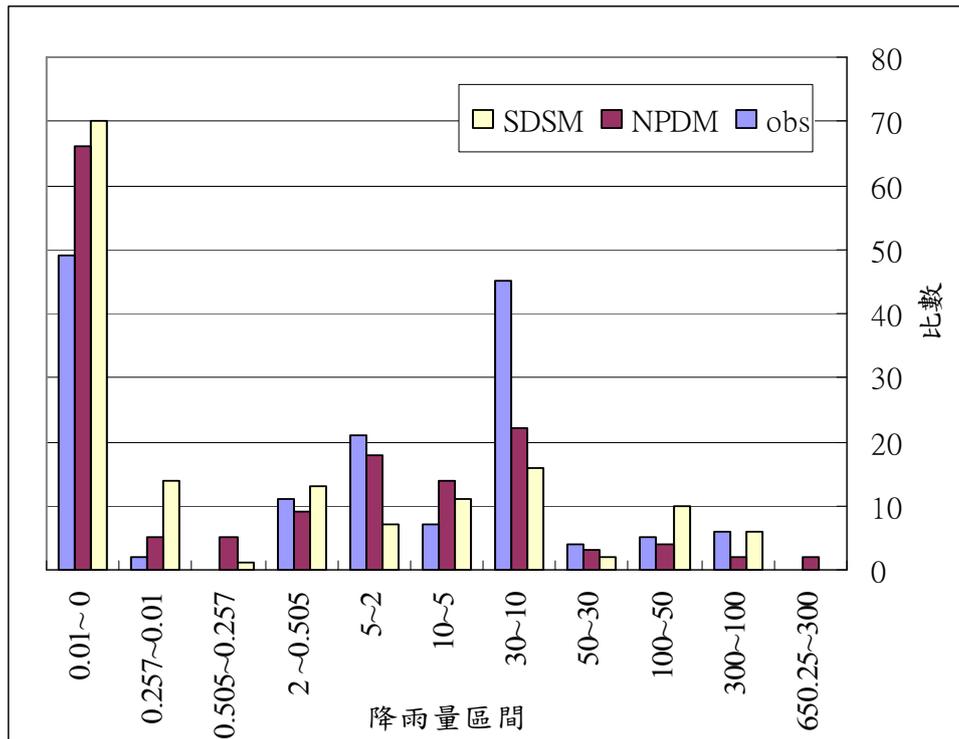


圖 5.3-11 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證)



二、不同氣候因子相關係數絕對值與降尺度合成資料成果之比較

NCEP 再分析資料共包含 26 個氣候因子，850hPa 渦度(氣候因子 11)雖然其與集水區降雨量之相關係數最高，但其他因子亦可能有不錯之合成效果。本研究首先分別應用 26 個氣候因子檢定 NPDM 模式，並計算各自之各月平均值與標準偏差，以及與歷史資料統計特性之四個 RMSE，將四個 RMSE 以三種權重情境分別計算對應之 WAR，表 5.3-2 為月分群架構下不同情境之 WAR 資料表。其次將各因子之 WAR 與表 5.1-3 之月尺度相關係數絕對值同時繪於圖面上，圖 5.3-12 至 5.3-14 分別為月分群架構不同權重情境下之相關係數與 WAR 散佈圖。

圖上除了前述之點位外，另外也畫出其趨勢線，趨勢線顯示當氣候因子與降雨量之相關係數絕對值與模式 WAR 有一定之相關性，當相關係數絕對值越大時，模式 WAR 有可能會變小。因此由於 WAR 數值之大小代表模式合成效果之優劣，WAR 數值越小代表合成效果越好，雖然該變化關係從圖面顯示並非絕對，但在尚未進行模式檢定前，可以作為挑選氣候因子之依據。

觀察第 5.1 節表 5.1-3 所述之相關係數列，若以月時間尺度之相關係數絕對值高於 0.8 為門檻，僅有 5 個氣候因子符合標準，分別為因子 1、3、6、11 與 25，其含意分別為平均海平面壓力、500hPa 緯

向風速、500hPa 風向、850hPa 渦度與表面絕對濕度(如表 5.3-3 所示)，
 本研究後續將藉由這些相關性較高之氣候因子，探討本 NPDM 模式
 與 SDSM 模式之合成差異，另外也會作為雙氣候因子模式中的基礎。

表5.3-2 月分群架構下各氣候因子之NPDM模式WAR表

代號	因子名稱	權重情境一	權重情境二	權重情境三
因子 1	平均海平面壓力	4.64	3.93	5.36
因子 2	500 hPa 氣流強度	4.80	4.05	5.55
因子 3	500 hPa 緯向風速	4.01	3.57	4.45
因子 4	500 hPa 經向風速	4.15	3.65	4.65
因子 5	500 hPa 渦度	4.60	3.97	5.24
因子 6	500 hPa 風向	4.02	3.42	4.62
因子 7	500 hPa 散度	5.01	4.44	5.59
因子 8	850 hPa 氣流強度	5.83	5.08	6.59
因子 9	850 hPa 緯向風速	4.39	3.75	5.03
因子 10	850 hPa 經向風速	4.66	4.11	5.22
因子 11	850 hPa 渦度	4.49	3.82	5.16
因子 12	850 hPa 風向	4.16	3.55	4.76
因子 13	850 hPa 散度	5.55	4.81	6.29
因子 14	500 hPa 重力位高度	4.27	3.74	4.80
因子 15	850 hPa 重力位高度	4.00	3.45	4.54
因子 16	表面氣流強度	4.74	4.09	5.39
因子 17	表面緯向風速	4.54	3.99	5.10
因子 18	表面經向風速	5.59	4.74	6.44
因子 19	表面渦度	4.76	4.14	5.39
因子 20	表面風向	5.71	5.14	6.28
因子 21	表面散度	5.28	4.48	6.09
因子 22	500 hPa 相對溼度	3.95	3.49	4.40
因子 23	850 hPa 相對溼度	4.32	3.76	4.89
因子 24	鄰近表面相對溼度	4.43	3.93	4.93
因子 25	表面絕對溼度	4.17	3.57	4.77
因子 26	高度 2m 平均溫度	4.79	4.25	5.34

表5.3-3 相關係數絕對值前五大之氣候因子

代號	縮寫	英文全名	中文全名
因子 1	mslpas	Mean sea level pressure	平均海平面壓力
因子 3	p5_uas	500 hPa zonal velocity	500 hPa 緯向風速
因子 6	p5thas	500 hPa wind direction	500 hPa 風向
因子 11	p8_zas	850 hPa vorticity	850 hPa 渦度
因子 25	shumas	Surface specific humidity	表面絕對溼度

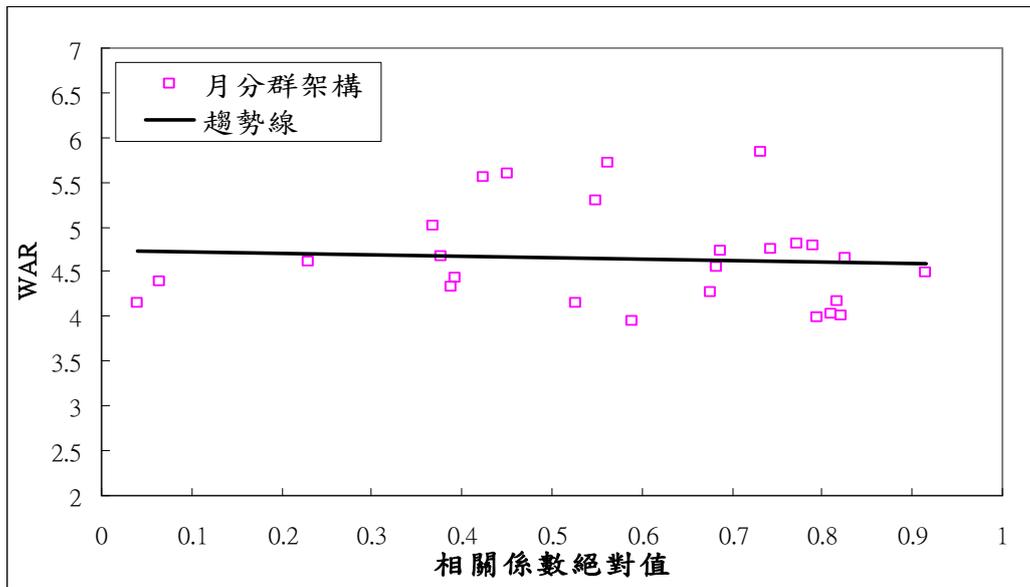


圖 5.3-12 月分群架構下各氣候因子相關係數對 WAR 散佈圖(情境一)

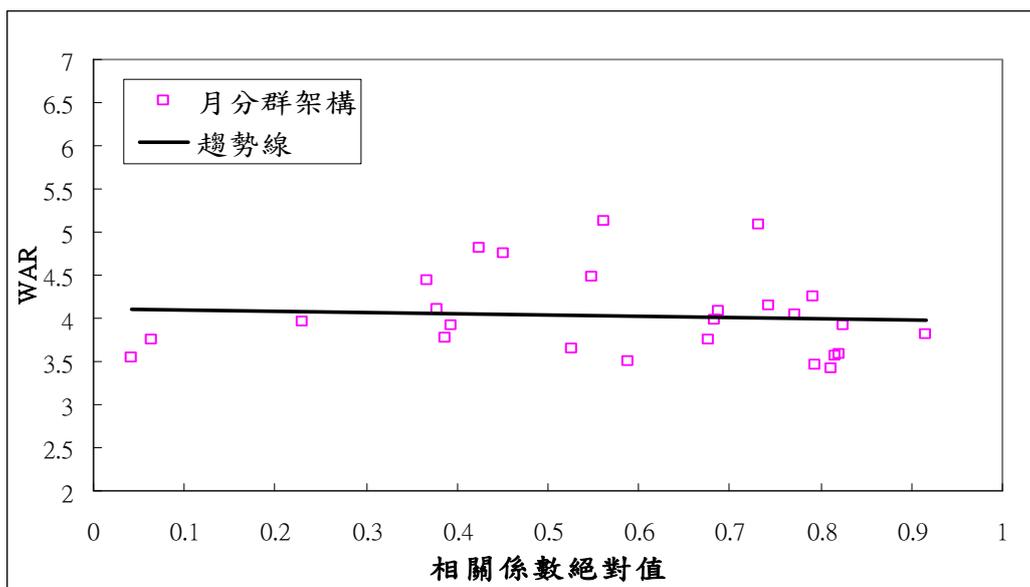


圖 5.3-13 月分群架構下各氣候因子相關係數對 WAR 散佈圖(情境二)

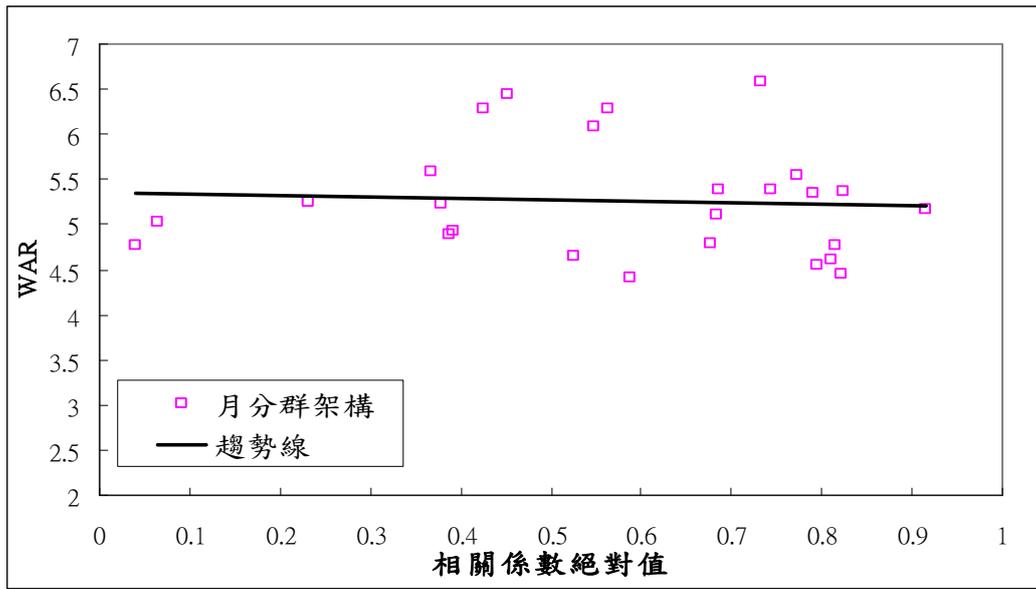
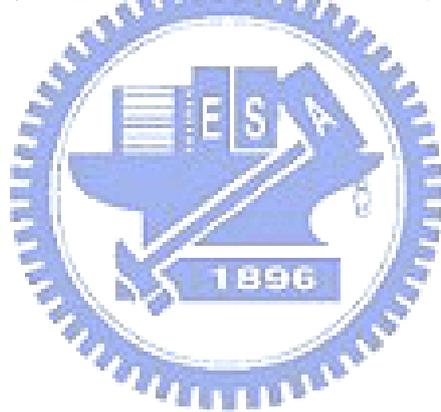


圖 5.3-14 月分群架構下各氣候因子相關係數對 WAR 散佈圖(情境三)



三、不同氣候因子之單氣候因子降尺度合成資料比較

在此本研究以前述選定之五個氣候因子進行 NPDM 模式與 SDSM 模式之合成效果比較，將分別以三種不同權重情境來呈現，研究數據如表 5.3-2 與圖 5.3-15 至 5.3-17 所示。

從圖面上來看，以不同因子 WAR 進行排序，可得知「500 hPa 緯向風速」與「500 hPa 風向」及「表面絕對濕度」的合成效果於三種情境中皆有不錯的表現，因此顯示出『風速、風向與濕度』為影響石門水庫集水區降雨量的關鍵因素。

圖面顯示依據五個不同氣候因子所建立之 SDSM 合成資料與 NPDM 合成資料之 WAR，在數值大小上，NPDM 之 WAR 普遍比 SDSM 之 WAR 為小，由於 WAR 數值代表合成資料與歷史資料之統計特性差異，數值越小顯示統計特性差異越小，因此可以了解 NPDM 模式之合成效果優於 SDSM 模式。

表5.3-4 相關係數絕對值前五大之氣候因子模式WAR比較表

因子	權重情境一		權重情境二		權重情境三	
	NPDM	SDSM	NPDM	SDSM	NPDM	SDSM
500hPa 緯向風速	3.83	9.56	3.40	9.35	4.25	9.77
500hPa 風向	3.84	9.05	3.26	9.10	4.41	9.01
表面絕對濕度	4.00	6.09	3.41	5.97	4.58	6.20
850hPa 渦度	4.31	5.70	3.65	5.67	4.96	5.73
平均海平面壓力	4.45	7.76	3.76	7.57	5.15	7.96

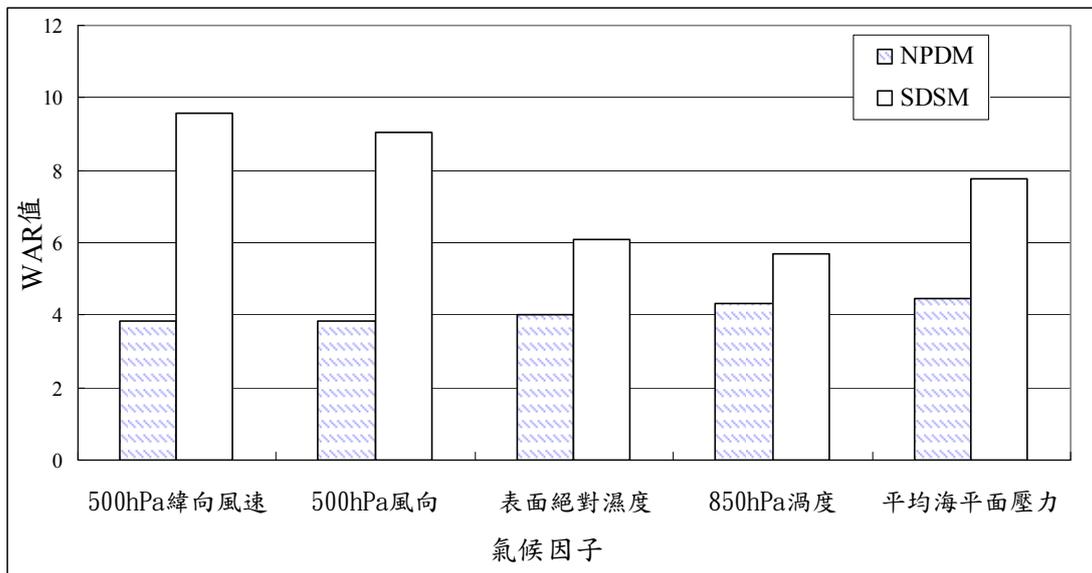


圖 5.3-15 不同氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(權重情境一)

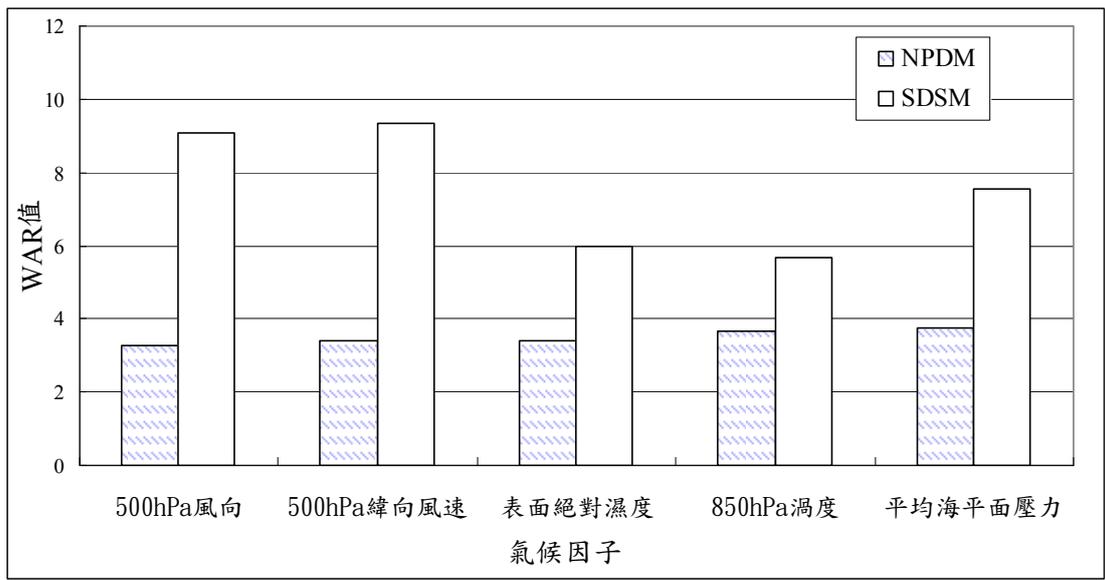


圖 5.3-16 不同氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(權重情境二)

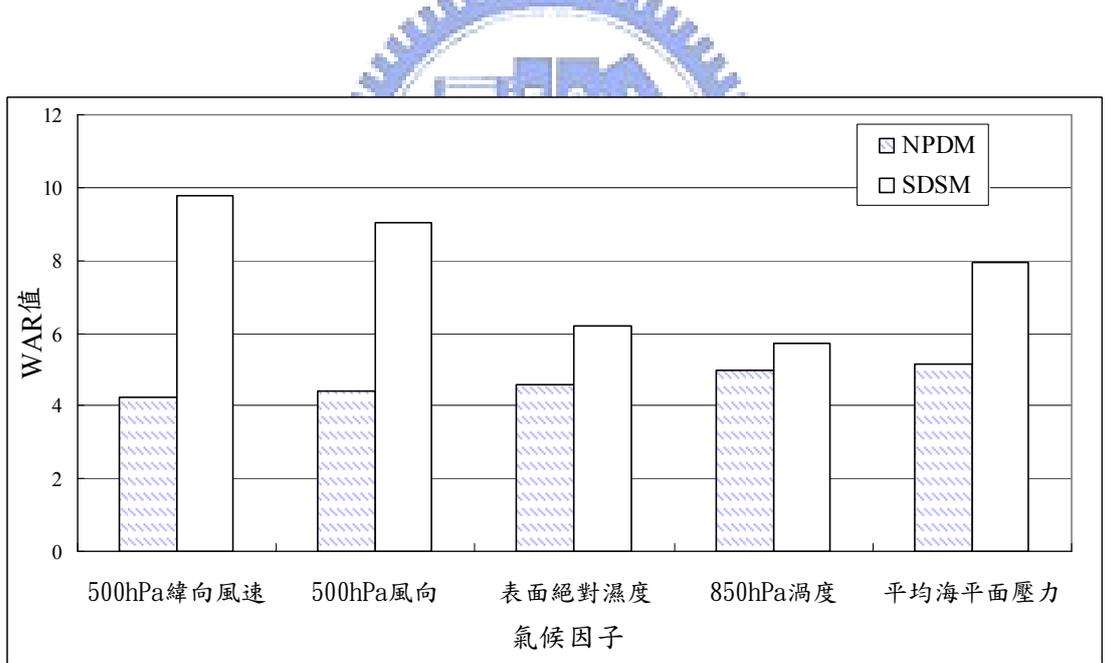
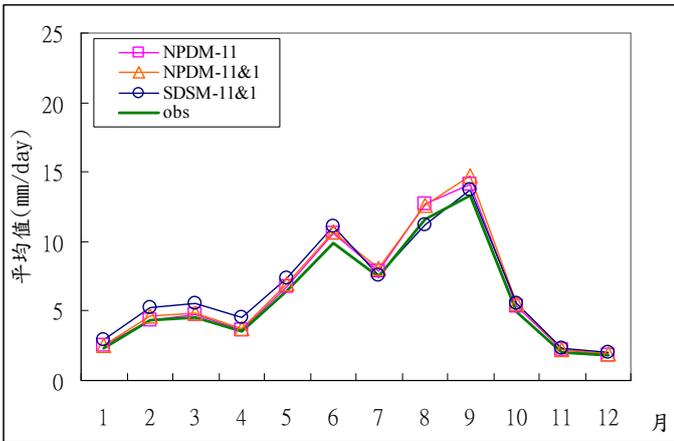


圖 5.3-17 不同氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(權重情境三)

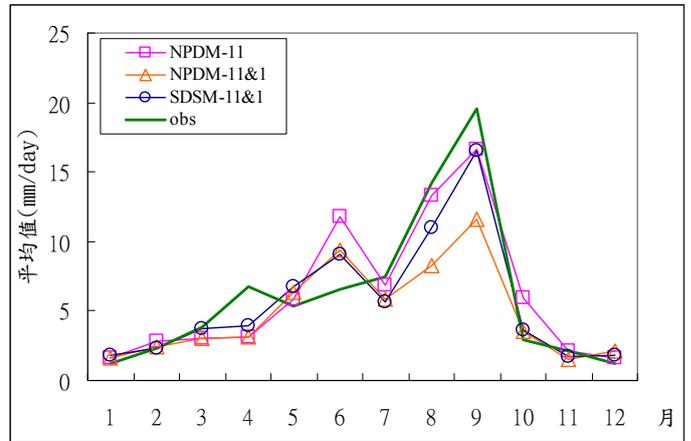
5.4 雙氣候因子降尺度氣象合成結果比較

一、 850hPa 渦度及平均海平面壓力之雙氣候因子降尺度合成資料比較

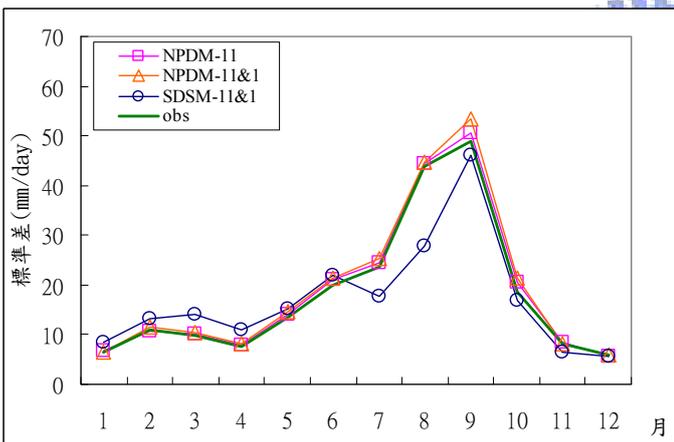
依據表 5.1-3 之相關係數分析，相關係數最高之前兩個氣候因子分別為因子 11 與因子 1，其中文名稱分別為「850hPa 渦度」與「平均海平面壓力」，在此以這兩個因子建立雙氣候因子降尺度模式(以下簡稱 NPDM-11&1)，以下將跟同為相同雙氣候因子之 SDSM 模式(以下簡稱 SDSM-11&1)與前述單氣候因子 NPDM 模式(以下簡稱 NPDM-11)進行比較。圖 5.4-1 為三模式在月分群架構下之各月統計特性分佈圖，在檢定年份中，除了 SDSM-11&1 合成資料之標準偏差在豐水期有偏低的現象外，其餘各模式皆與歷史資料之特性極相近。在驗證年份中，NPDM-11 與 SDSM-11&1 資料之特性皆與歷史特性符合，唯有 NPDM-11&1 資料在豐水期時的平均值有低估的現象。



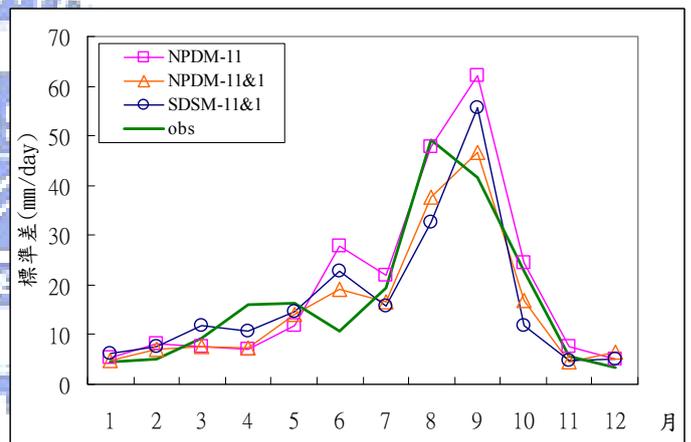
各月平均雨量分佈圖(檢定)



各月平均雨量分佈圖(驗證)



各月標準差分佈圖(檢定)



各月標準差分佈圖(驗證)

圖 5.4-1 月分群架構下之降尺度氣候合成結果比較圖

表 5.4-1 呈現各模式之降雨發生機率與平均年降雨量之比較，在降雨發生機率上，三模式於檢定年份均有不錯之表現；然在驗證年份上 NPDM-11 與 NPDM-11&1 模式仍可維持同樣的水準，僅 SDSM-11&1 之降雨機率上較差。在平均年降雨量之探討上，三模式於在檢定年份皆約略高估一成；在驗證年份上，NPDM-11&1 之平均年降雨量則有明顯偏低之趨勢。

由表 5.4-2 與圖 5.4-2 之 WAR 值得知，由單氣候因子提升到雙氣候因子的時候，NPDM 之合成效果是沒有太大的差異；而 SDSM 之合成效果則是有明顯的變差現象。且不管於那個情境下，NPDM 的合成效果皆比 SDSM 的合成效果來得好。

圖 5.4-3 至 5.4-6 與圖 5.4-7 至 5.4-10 分別為本模式單氣候因子 (NPDM-11) 與雙氣候因子 (NPDM-11&1) 之散佈圖與降雨量組體圖，其中分別以一月與九月作為枯水代表月與豐水代表月，以散佈圖來看，在檢定年份上，兩模式均可掌握歷史資料之分佈特性，在驗證年份上，豐水月之散佈圖與組體圖差異較大，其原因應是驗證年份與檢定年份上之歷史資料即有差異，因此合成上較難以符合驗證年份之歷史資料。

表5.4-1 月分群架構下之降雨機率與平均年降雨量資料表

		歷史資料	NPDM 資料 -11	NPDM 資料 -11&1	SDSM 資料 -11&1
檢 定	降雨機率	51%	51%	51%	50%
	平均年降雨量	2195(mm/yr)	2336(mm/yr)	2389(mm/yr)	2409(mm/yr)
驗 證	降雨機率	47%	48%	47%	43%
	平均年降雨量	2238(mm/yr)	2275(mm/yr)	1790(mm/yr)	2070(mm/yr)

表5.4-2月分群架構下之WAR表

	NPDM-11	NPDM-11&1	SDSM-11	SDSM-11&1
情境一	4.31	4.42	5.70	6.29
情境二	3.65	3.92	5.67	6.13
情境三	4.96	4.91	5.73	6.45

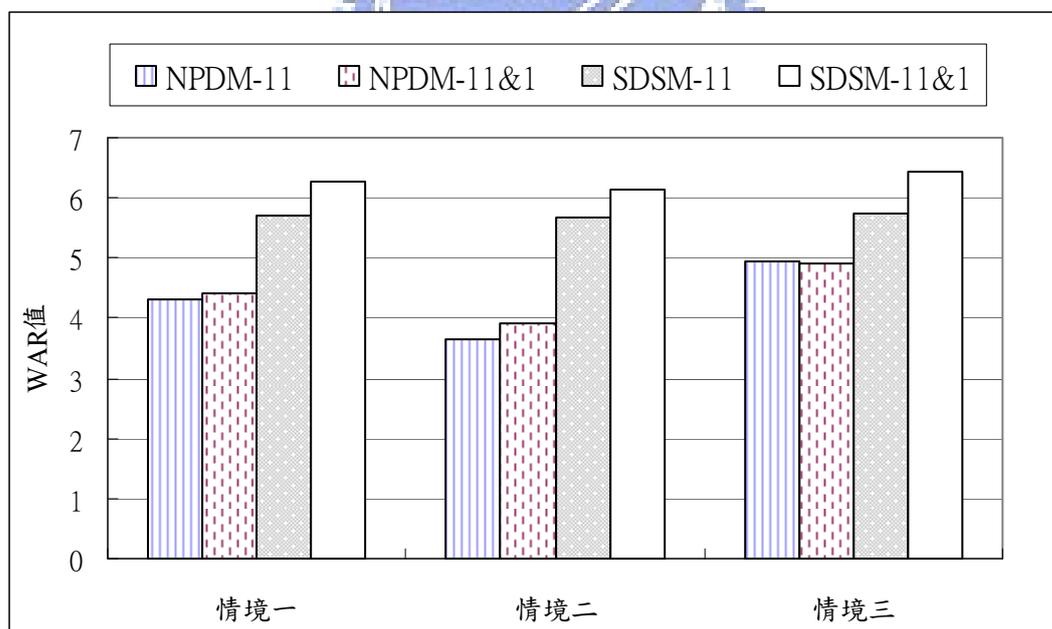


圖 5.4-2 不同情境不同降尺度模式之 WAR 比較圖

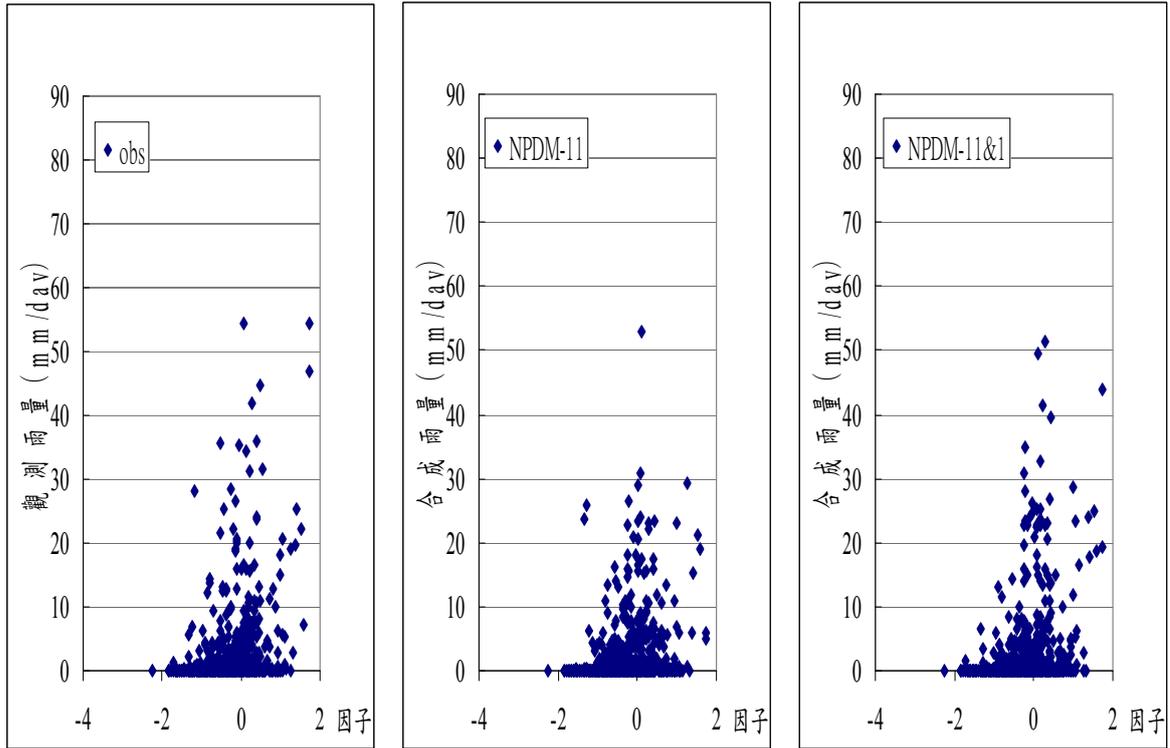


圖 5.4-3 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

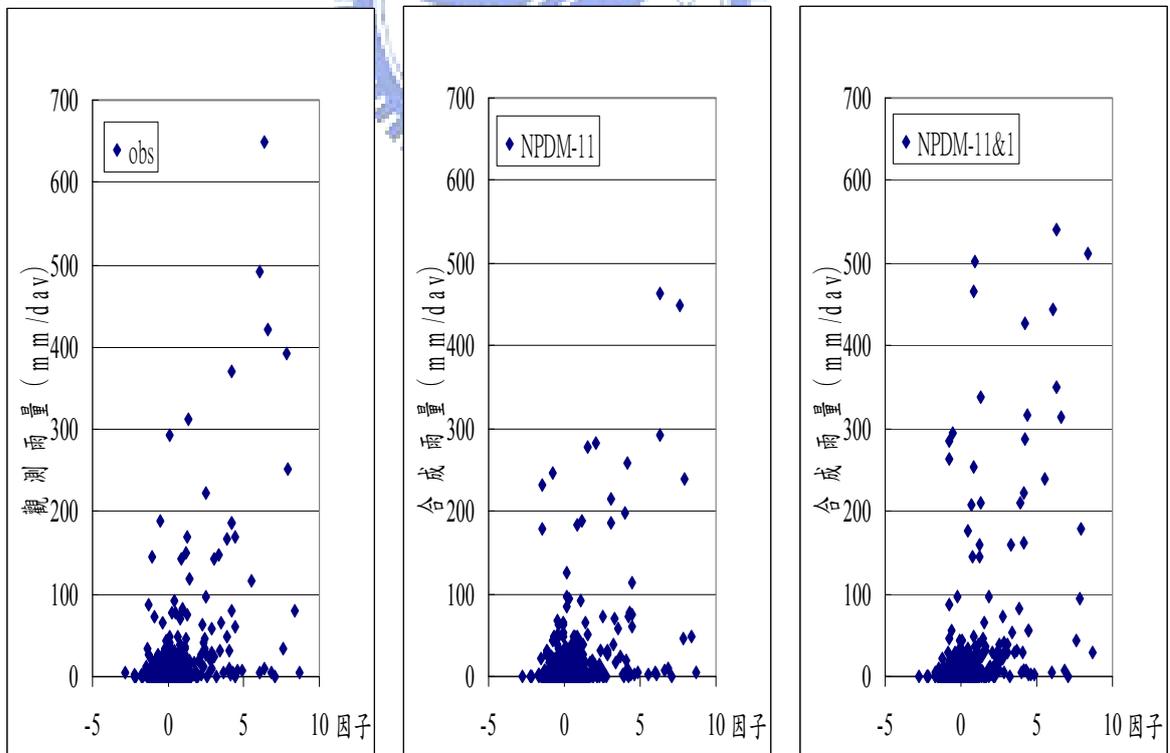


圖 5.4-4 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

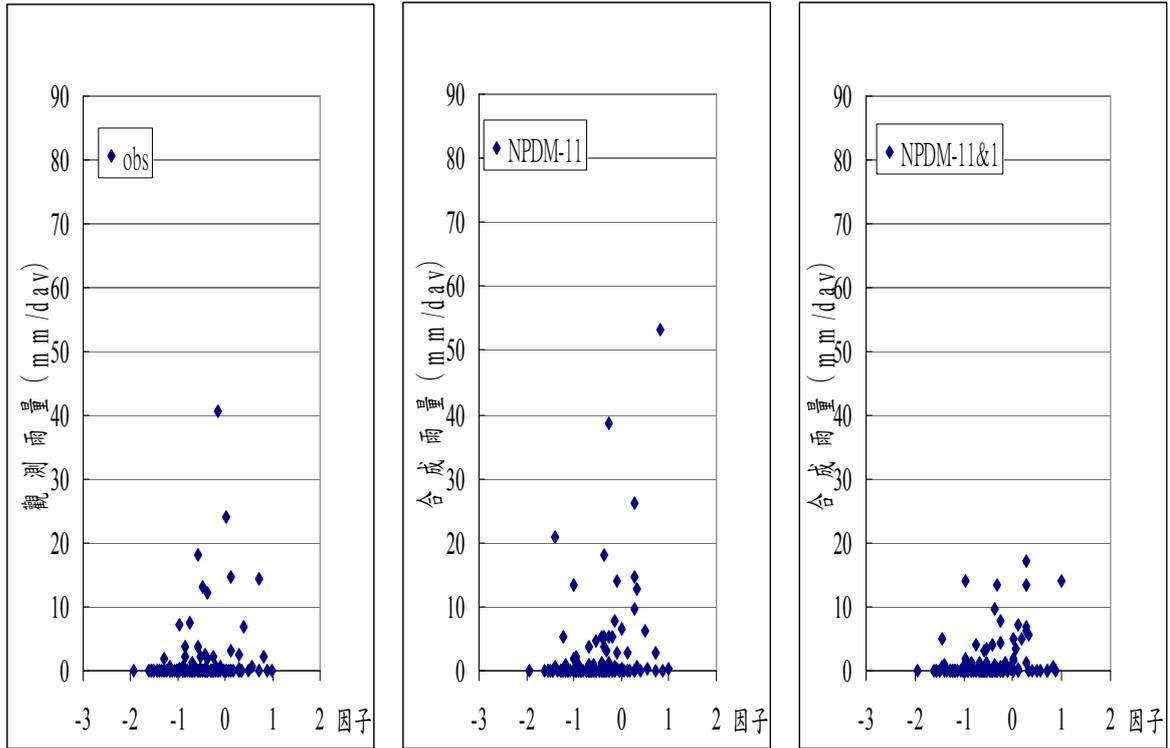


圖 5.4-5 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

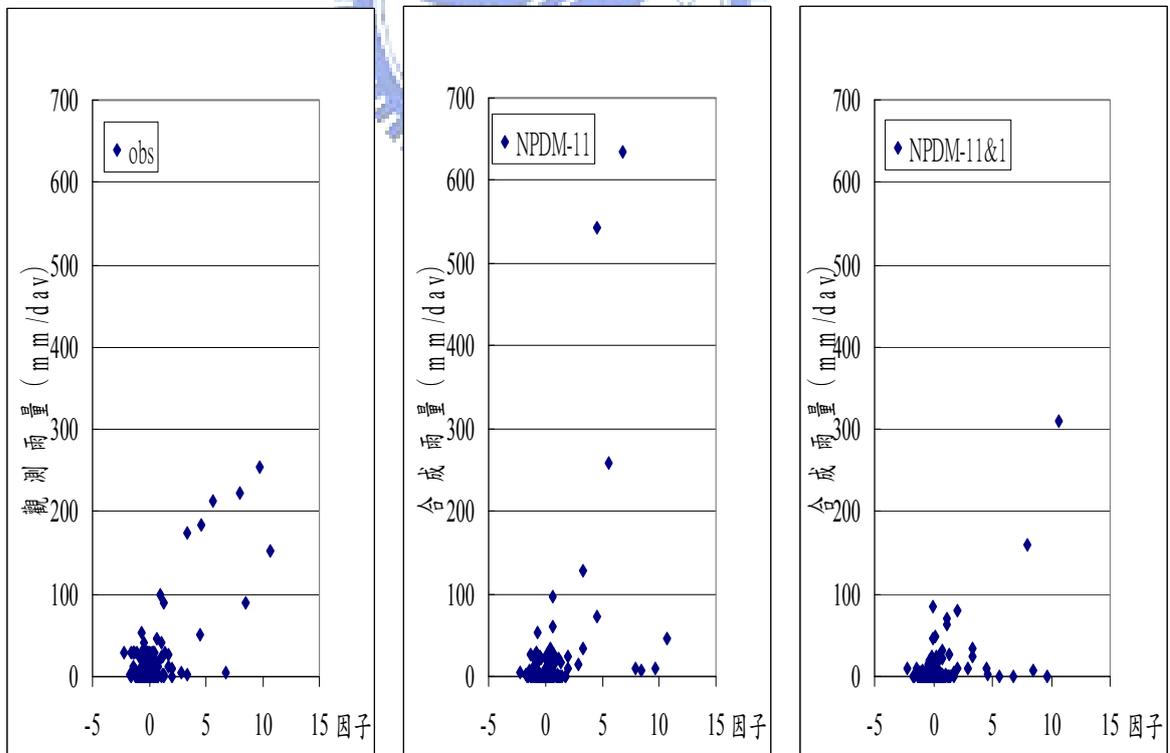


圖 5.4-6 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

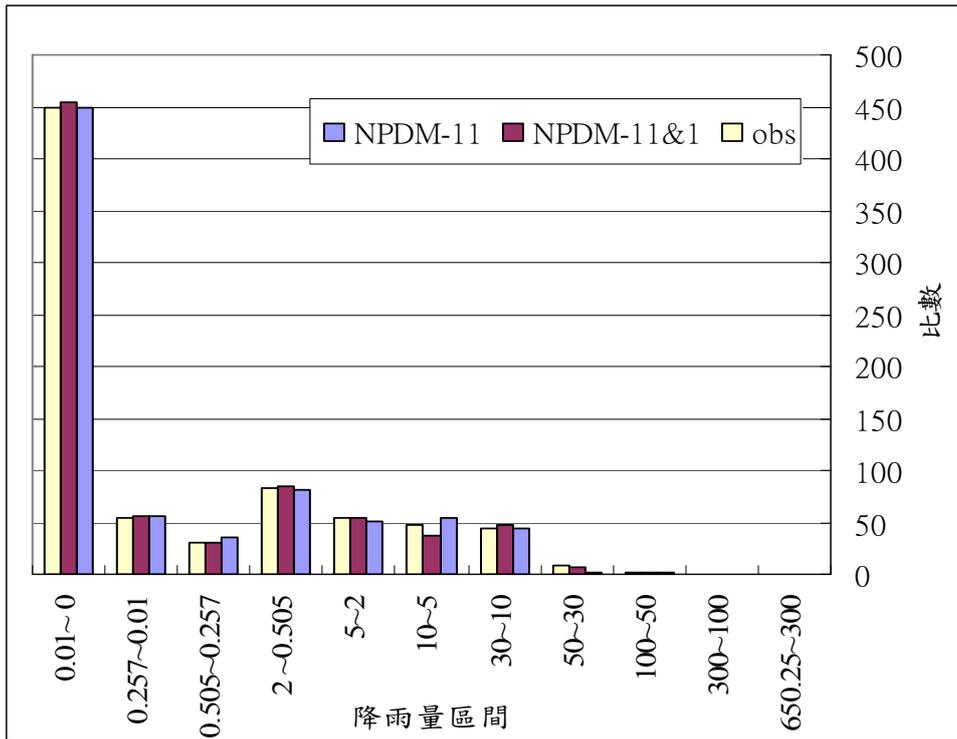


圖 5.4-7 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定)

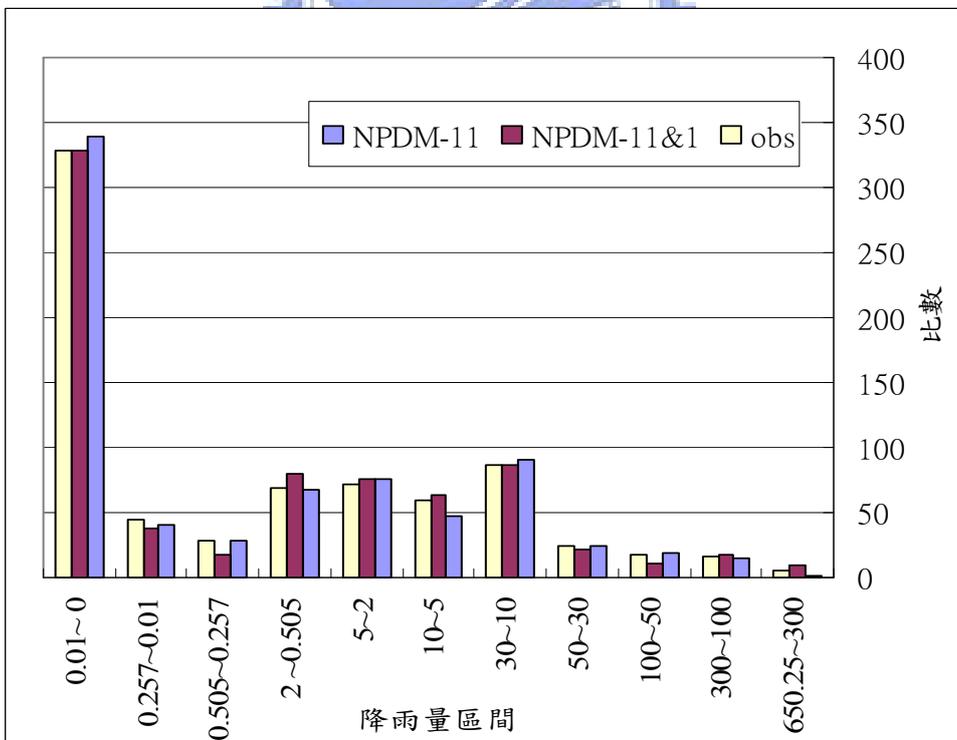


圖 5.4-8 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定)

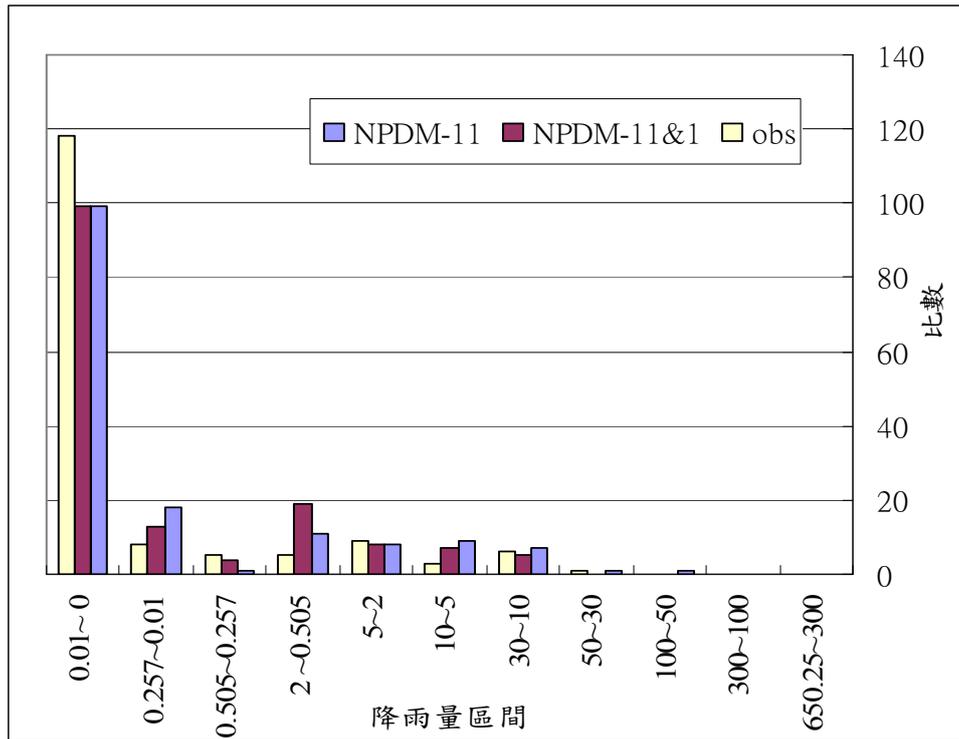


圖 5.4-9 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證)

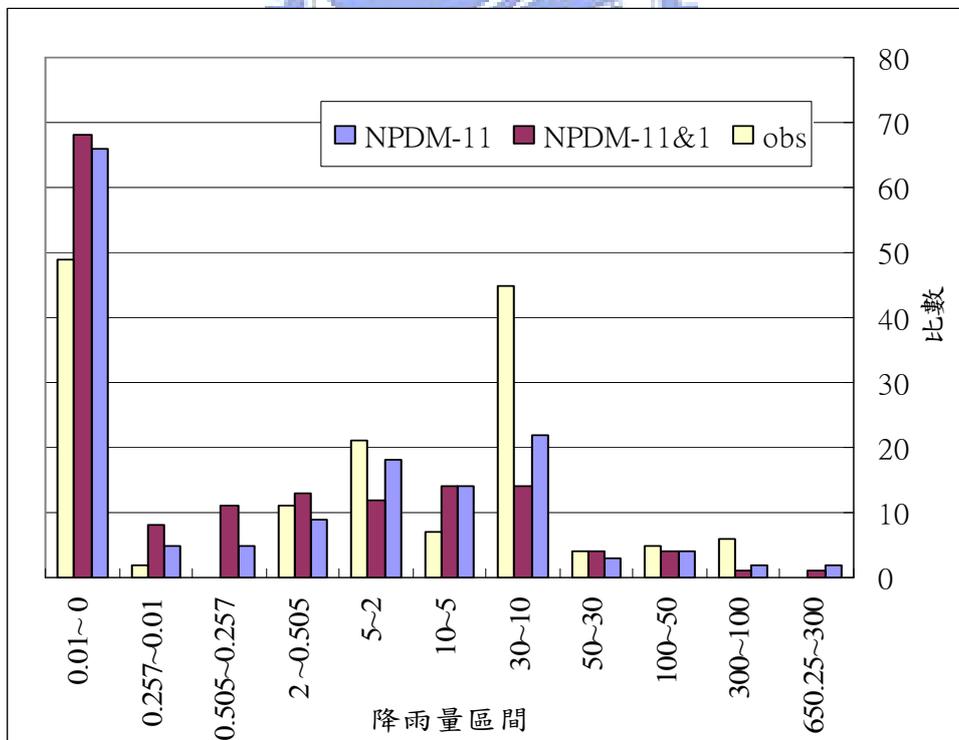


圖 5.4-10 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證)

二、 不同氣候因子之雙氣候因子降尺度合成資料比較

表 5.3-3 為應用相關係數分析挑選之單氣候因子，其中包含五個氣候因子，如以此五個氣候因子為基礎，兩兩組合可得十組雙氣候因子，如表 5.4-3 所示，以下將以此十組雙氣候因子分別探討 NPDM 及 SDSM 模式之差異。

表 5.4-4 與圖 5.4-11 至 5.4-13 呈現十組雙氣候因子之 WAR 數值，圖上已預先以 NPDM 之 WAR 值作排序，因此最左方之組合即為最佳組合。如綜合三個情境，從前三名挑選共同之組合，組合 1&25 (平均海平面壓力&表面絕對濕度) 與組合 3&6 (500hPa 緯向風速與 500hPa 風向) 在三種情境中均列於最佳之前三名。在大部分的情境下，NPDM 模式之 WAR 均較 SDSM 模式為佳。



表5.4-3再分析資料之雙氣候因子組合表

代號	縮寫	英文全名	中文全名
11&1	p8_zas & mslpas	850 hPa vorticity & Mean sea level pressure	850 hPa 渦度 & 平均海平面壓力
11&3	p8_zas & p5_uas	850 hPa vorticity & 500 hPa zonal velocity	850 hPa 渦度 & 500 hPa 緯向風速
11&25	p8_zas & shumass	850 hPa vorticity & Surface specific humidity	850 hPa 渦度 & 表面絕對溼度
11&6	p8_zas & p5thas	850 hPa vorticity & 500 hPa wind direction	850 hPa 渦度 & 500 hPa 風向
1&3	mslpas & p5_uas	Mean sea level pressure & 500 hPa zonal velocity	平均海平面壓力 & 500 hPa 緯向風速
1&25	mslpas & shumass	Mean sea level pressure & Surface specific humidity	平均海平面壓力 & 表面絕對溼度
1&6	mslpas & p5thas	Mean sea level pressure & 500 hPa wind direction	平均海平面壓力 & 500 hPa 風向
3&25	p5_uas & shumass	500 hPa zonal velocity & Surface specific humidity	500 hPa 緯向風速 & 表面絕對溼度
3&6	p5_uas & p5thas	500 hPa zonal velocity & 500 hPa wind direction	500 hPa 緯向風速 & 500 hPa 風向
25&6	shumass & p5thas	Surface specific humidity & 500 hPa wind direction	表面絕對溼度 & 500 hPa 風向

表5.4-4雙氣候因子不同降尺度模式之WAR值比較表(月架構)

代號	情境一		情境二		情境三	
	NPDM	SDSM	NPDM	SDSM	NPDM	SDSM
11&1	4.42	6.29	3.92	6.13	4.91	6.45
11&3	4.08	6.80	3.72	6.70	4.44	6.91
11&25	4.26	6.46	3.69	6.36	4.83	6.55
11&6	3.99	6.27	3.42	6.25	4.56	6.28
1&3	4.84	7.28	4.18	7.03	5.50	7.53
1&25	3.25	7.08	2.83	6.97	3.67	7.20
1&6	5.04	9.12	4.44	9.18	5.64	9.06
3&25	4.31	7.52	3.85	7.30	4.76	7.73
3&6	3.33	8.33	3.03	8.12	3.63	8.54
25&6	4.25	8.10	3.89	7.99	4.61	8.21

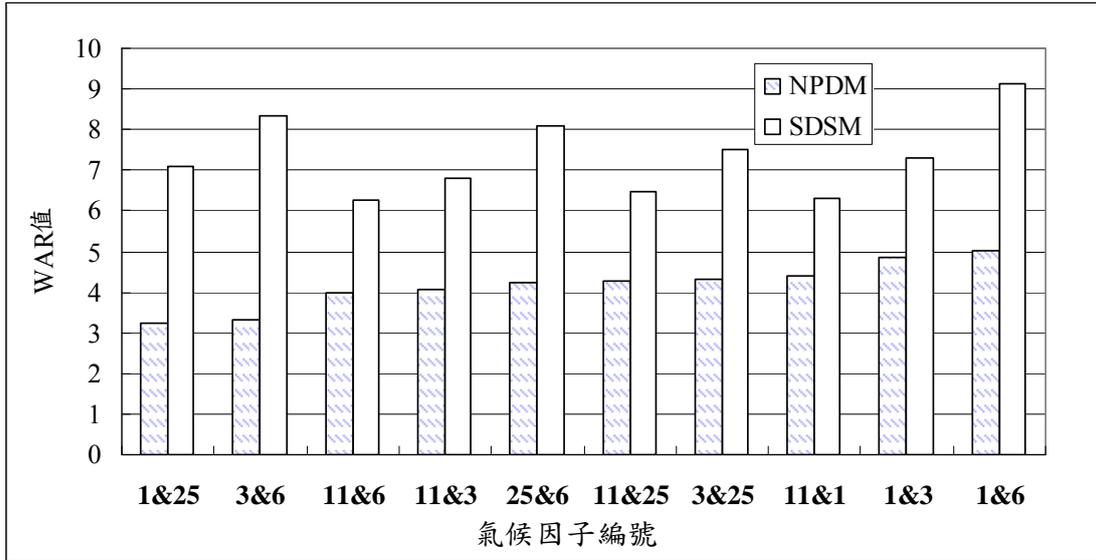


圖 5.4-11 雙氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(月架構)(情境一)

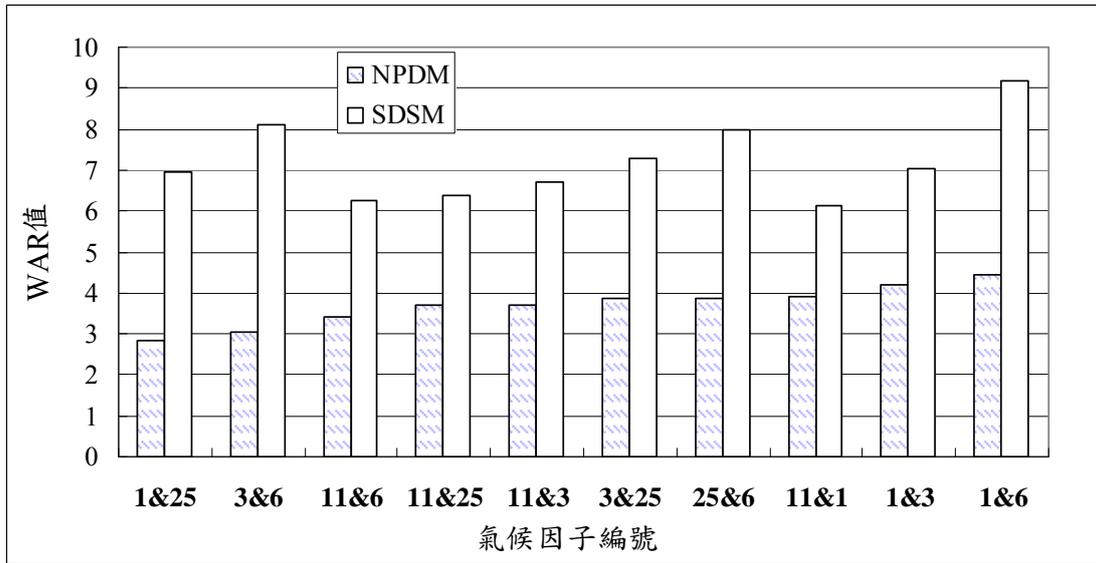


圖 5.4-12 雙氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(月架構)(情境二)

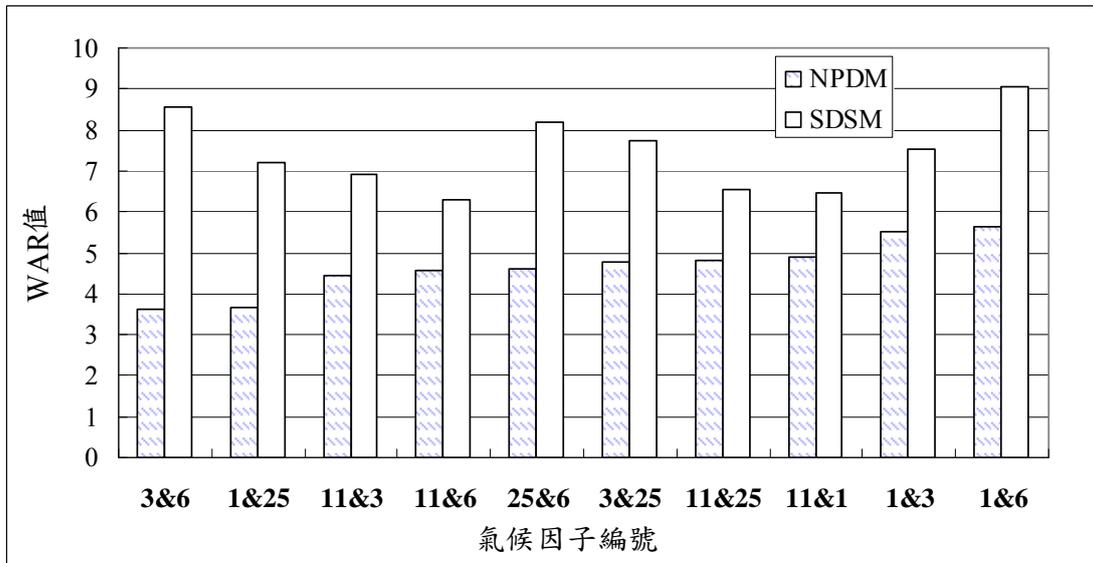


圖 5.4-13 雙氣候因子不同降尺度模式之 WAR 比較圖(月架構)(情境三)

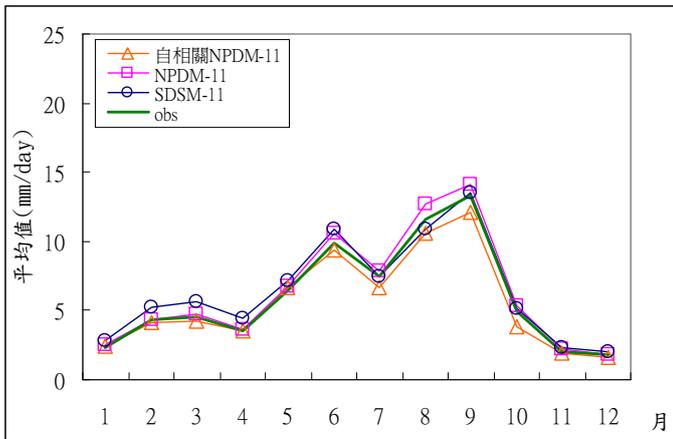


5.5 自相關單氣候因子降尺度模式

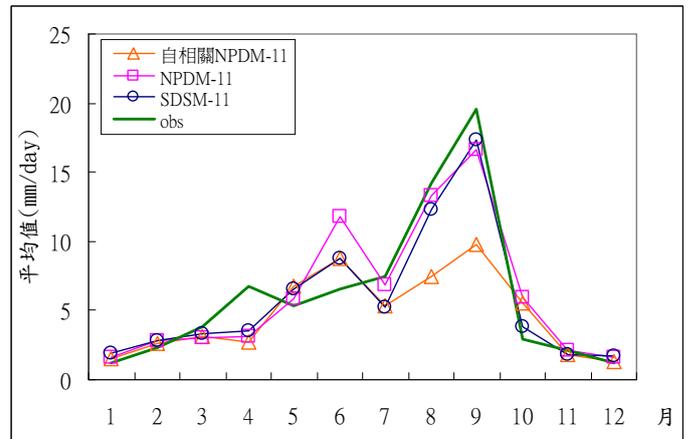
在此以前述相關係數最高之氣候因子建立自相關單氣候因子降尺度模式，相關係數最高之因子為 850hPa 渦度，後續簡稱為「自相關 NPDM-11」。將一日稽延之降雨量歷史資料與 850hPa 渦度輸入無母數統計模組，建立三維之無母數模式矩陣與無母數條件機率分佈矩陣，最後應用自相關降尺度氣象合成模組合成雨量資料。合成結果將與 NPDM-11 與 SDSM-11 之合成結果做比較。

圖 5.5-1 為三個模式之月分群架構下各月統計特性分佈圖，綜合來講，於檢定上來說，三模式的合成效果均不錯，統計特性與歷史特性極為相近；在驗證上來說，自相關 NPDM-11 的月平均值及標準差曲線於八、九月之豐水期時有低估的現象。

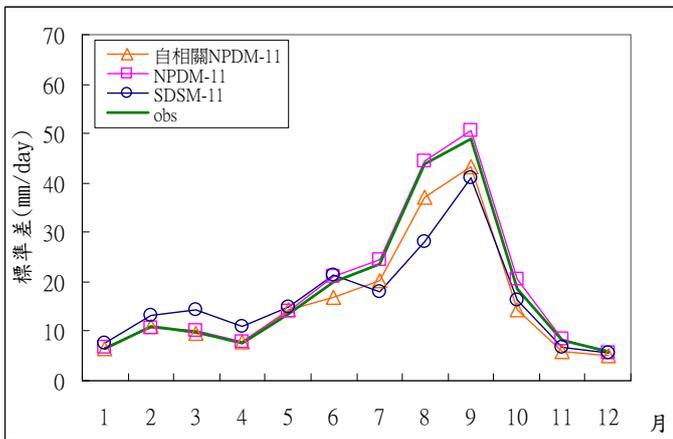




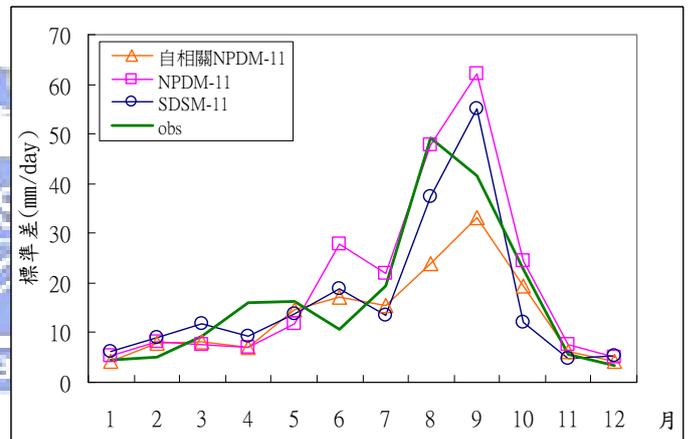
各月平均雨量分佈圖(檢定)



各月平均雨量分佈圖(驗證)



各月標準差分佈圖(檢定)



各月標準差分佈圖(驗證)

圖 5.5-1 月分群架構下之單氣候因子自相關降尺度氣候合成結果比較圖(850hPa 渦度)

表 5.5-1 呈現各模式之降雨發生機率、一階馬可夫鏈降雨發生機率($p(w_t | w_{t-1})$ 與 $p(w_t | d_{t-1})$)與平均年降雨量之比較，在降雨發生機率上，三模式均有不錯之表現，僅有在驗證年份上 SDSM-11 之降雨機率偏低。在一階馬可夫鏈之降雨發生機率上，NPDM-11 與 SDSM-11 無論是檢定年份還是驗證年份，其特性差異極大，因為兩模式並非採用馬可夫鏈形式之合成方式，因此在此點上效果較差，然自相關 NPDM-11 則不同，在驗證年份上差異較大，然在檢定年份上極為近似。此外，在平均年降雨量上，三個模式於檢定年份之誤差量皆為一成左右，差距不大；然在驗證年份上，以自相關 NPDM-11 之平均年降雨量表現最差，相較於歷史資料有低估兩成左右。

由表 5.5-2 與圖 5.5-2 呈現三模式之 WAR 數值，以單氣候因子 NPDM 的合成效果為最好，自相關 NPDM-11 的合成效果則是與 SDSM-11 的合成效果是較接近的。

圖 5.4-3 至 5.4-6 與圖 5.4-7 至 5.4-10 分別為 NPDM-11 與自相關 NPDM-11 之散佈圖與降雨量組體圖，其中以一月與九月分別代表枯水月與豐水月，在檢定年份上，其豐枯水月的散佈圖及降雨量組體圖皆接近歷史資料分佈，在驗證年份上，自相關 NPDM-11 於豐水月份的散佈圖與組體圖的分佈上得知，則有其極大值有偏低的現象，且不降雨的合成次數也有高估歷史的現象。綜合上述資訊，自相關 NPDM 模式雖然在平均降雨量、各月平均值或各月標準偏差等評估項目上表現較差，但在降雨的連續性上有較好的呈現結果，因此如欲探討的問題需要較為精準的描述連續降雨特性，例如水資源管理問題，會嚴重受到密集地集中降雨或分散至全年之降雨量特性與入流特性所影響，可以選擇建立自相關降尺度模式。

表5.5-1 月分群架構下之降雨機率與平均年降雨量資料表

		歷史資料	自相關 NPDM-11	NPDM-11	SDSM-11
檢 定	降雨發生機率	51%	49%	51%	50%
	$p(w_t w_{t-1})$	71%	68%	54%	55%
	$p(w_t d_{t-1})$	31%	31%	48%	45%
	平均年降雨量	2195(mm/yr)	2044(mm/yr)	2336(mm/yr)	2358(mm/yr)
驗 證	降雨發生機率	47%	46%	48%	43%
	$p(w_t w_{t-1})$	74%	65%	50%	50%
	$p(w_t d_{t-1})$	23%	29%	45%	38%
	平均年降雨量	2238(mm/yr)	1729(mm/yr)	2275(mm/yr)	2106(mm/yr)

表5.5-2不同情境不同降尺度模式之WAR表

	自相關 NPDM-11	NPDM-11	SDSM-11
情境一	5.86	4.31	5.70
情境二	5.33	3.65	5.67
情境三	6.38	4.96	5.73

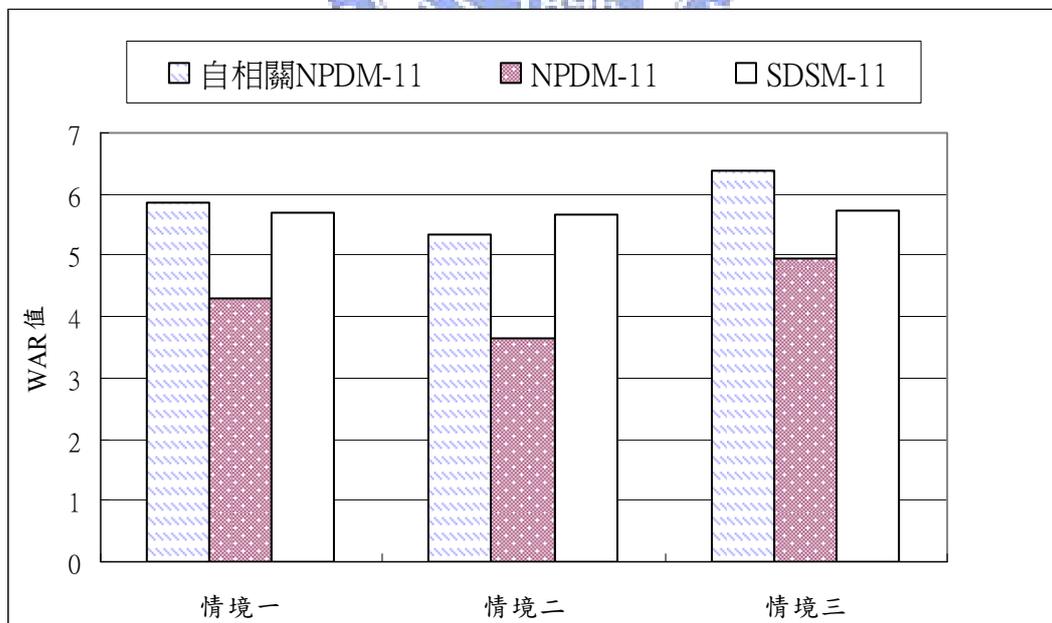


圖 5.5-2 不同情境不同降尺度模式之 WAR 比較圖

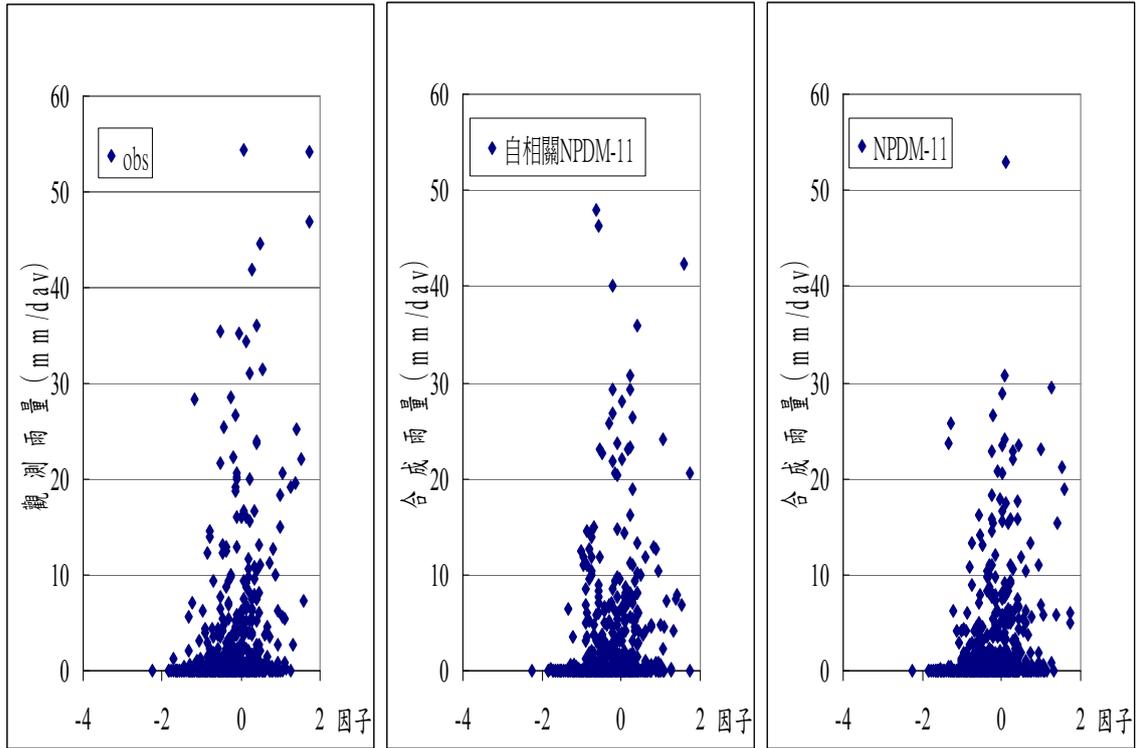


圖 5.5-3 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

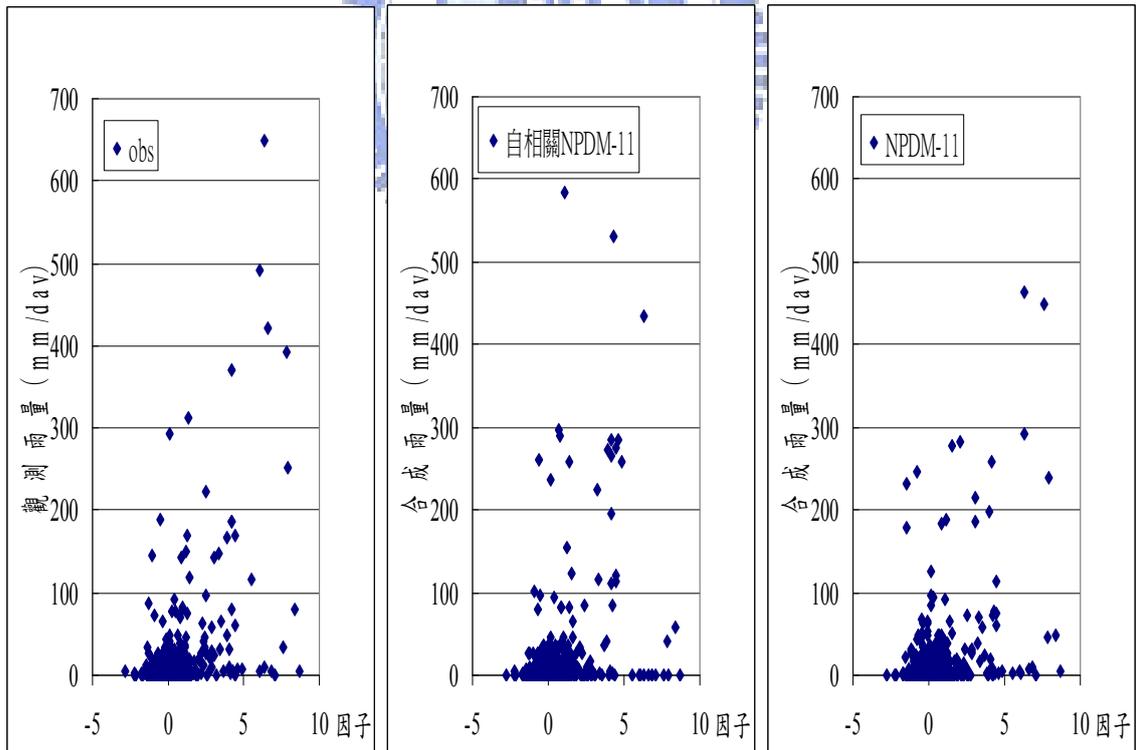


圖 5.5-4 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(檢定)

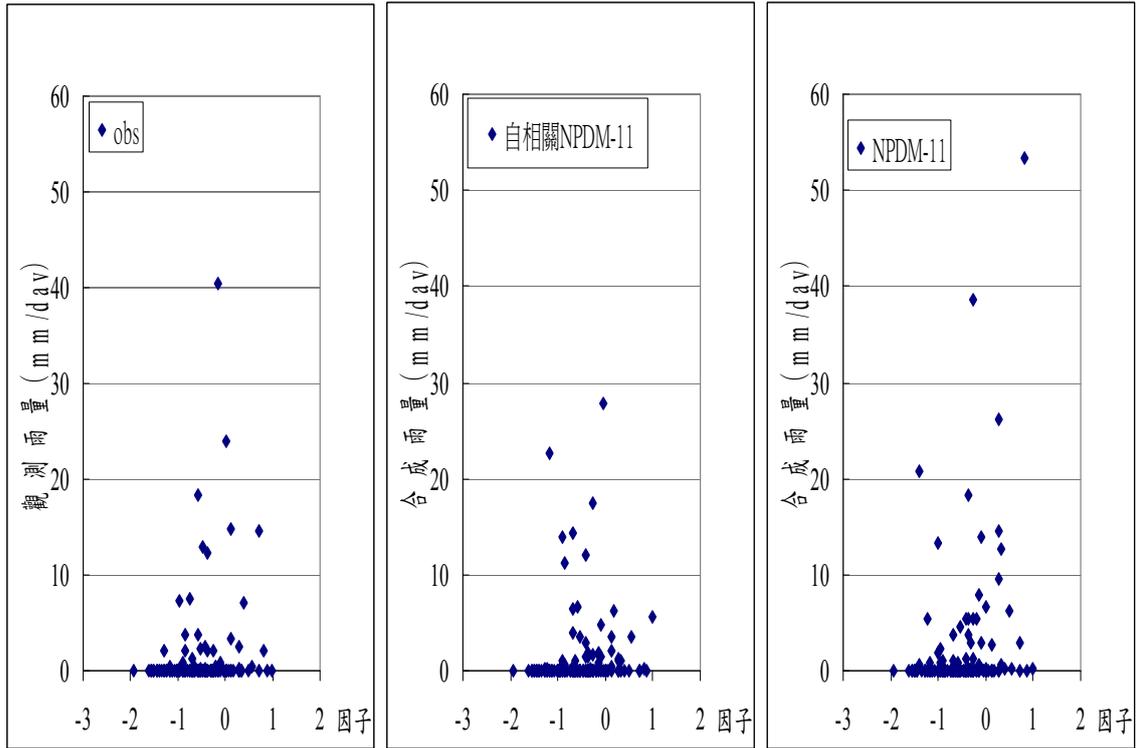


圖 5.5-5 月分群架構下一月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

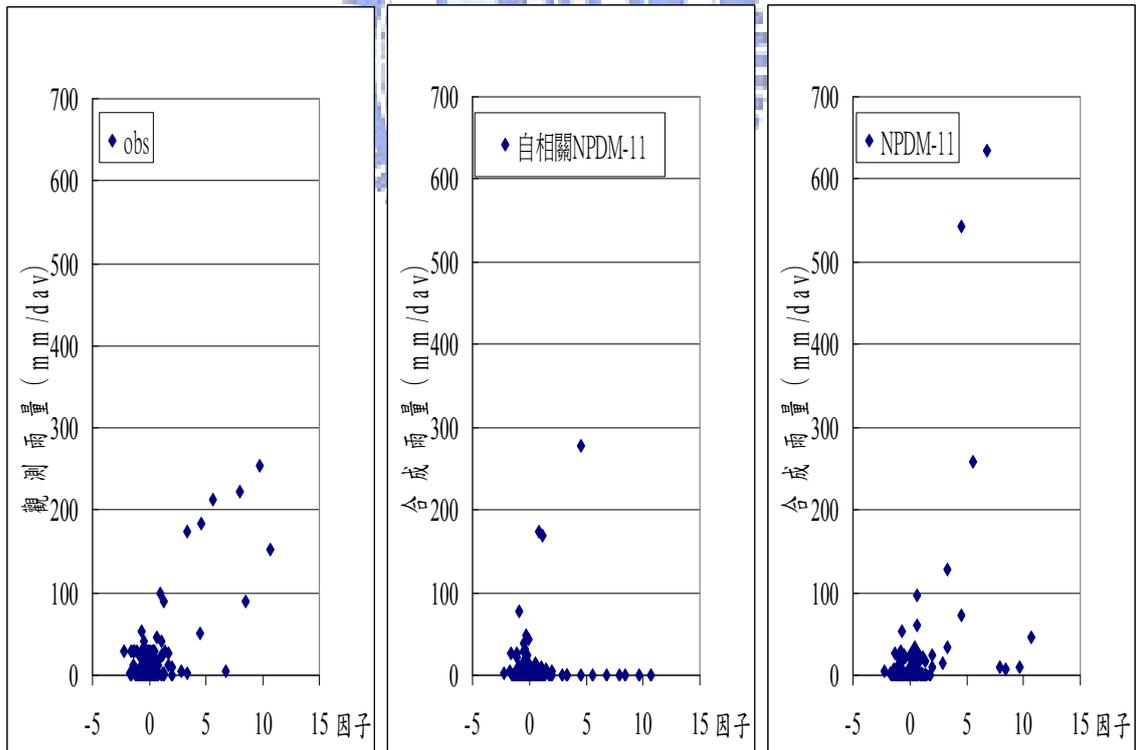


圖 5.5-6 月分群架構下九月份之 850hPa 渦度與降雨量散佈圖(驗證)

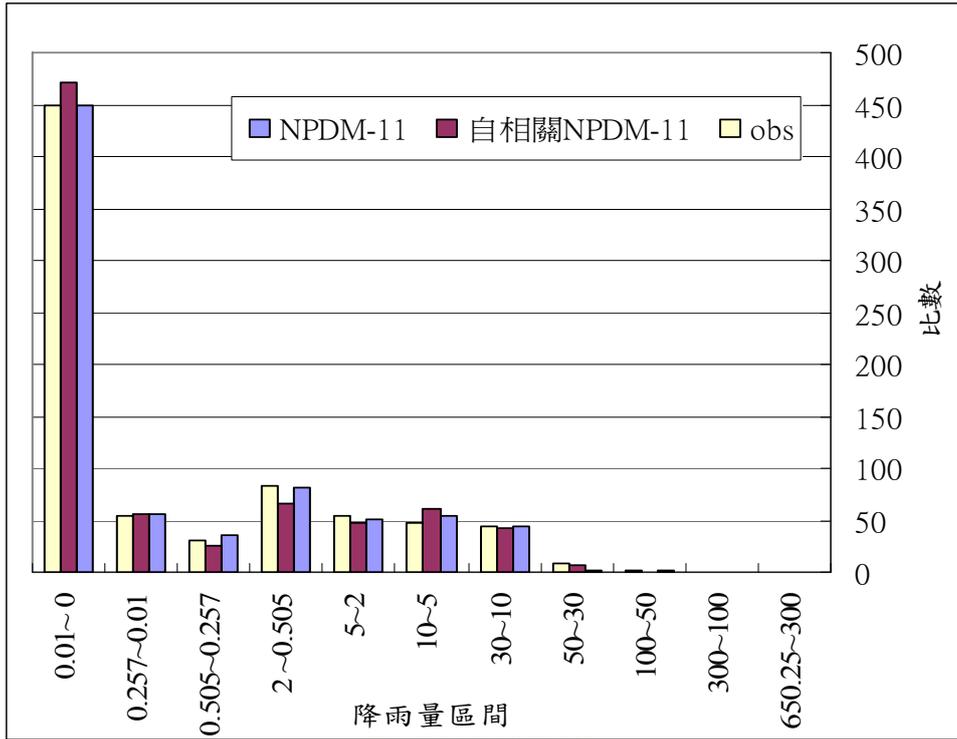


圖 5.5-7 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(檢定)

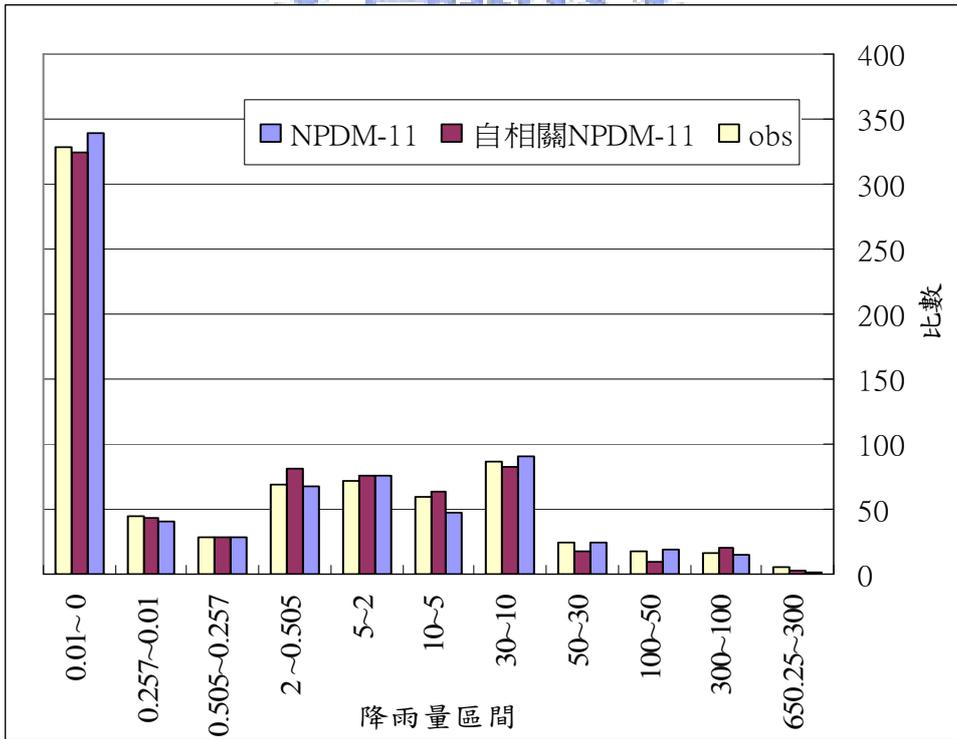


圖 5.5-8 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(檢定)

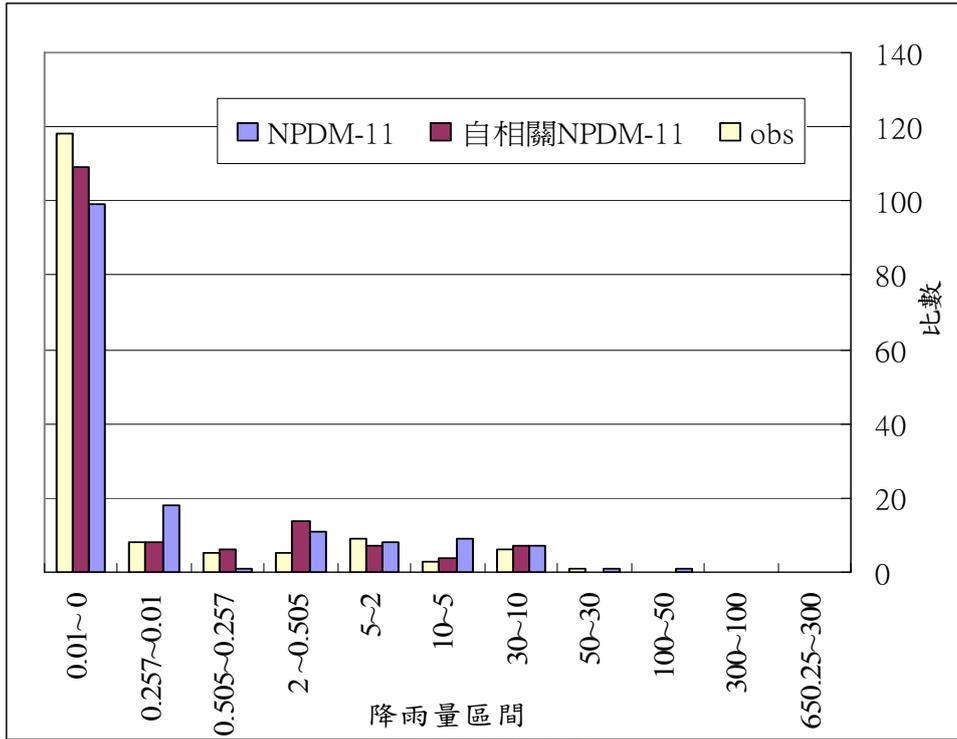


圖 5.5-9 月分群架構下一月份之降雨量組體圖(驗證)

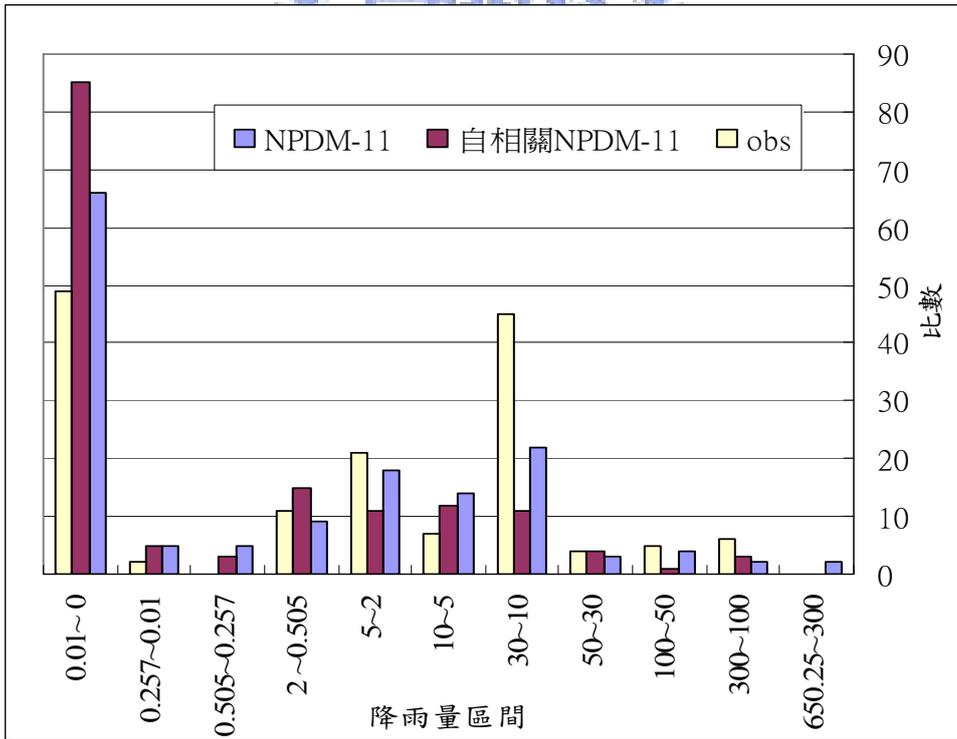


圖 5.5-10 月分群架構下九月份之降雨量組體圖(驗證)

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 本研究應用條件機率的概念完成石門水庫集水區降雨量的無母數統計降尺度模式(NPDM)，其應用歷史之大尺度氣候因子及集水區雨量資料，經統計分析而得到對應至大尺度氣候因子不同數值間之多組集水區降雨量的無母數條件機率分佈。降尺度雨量資料之合成，則應用此多組集水區降雨量的無母數條件機率分佈，依歷史或預測之氣候因子數值，配合隨機取樣方式產生多組雨量值。
2. 無母數條件機率分佈為本研究發展之統計降尺度模式的核心，其乃直接由資料計算而得，從而直接反映原資料的統計特性，免除了機率分佈模式及其它統計特性的假設所造成的可能偏差(Bias)。
3. 本研究以日資料為基礎，選取不同的時間尺度，如日、旬、月等，進行資料分群，接著再分析歷史氣候因子與歷史雨量資料間的相關係數，發現大時間尺度的分群(月時間尺度)，其大尺度氣候因子與集水區雨量間有較高的相關性。且大時間尺度的資料分群(月時間尺度)，亦較能分辨出何種氣候因子與雨量有較高的相關性，從而提供建立降尺度模式時，選定氣候因子的參考。
4. 本研究提出以均方根誤差之加權平均值(Weighted Average of RMSE, WAR)作為模式合成效果之綜合評估指標，指標中同時考量檢定與驗證時，歷史資料與模式合成資料平均值與標準差之誤差。
5. 本研究分析結果顯示，氣候因子與雨量的相關係數與 WAR 值呈現一定關係，再次驗證可以氣候因子與雨量間的相關係數作為選定因子之參考。
6. 由雨量合成結果顯示，採用平均海平面壓力、500hPa 緯向風速、500hPa 風向、850hPa 渦度或表面絕對濕度，所建立之單氣候因子

NPDM 降尺度模式，相較其他單氣候因子 NPDM 有較低之綜合評估指標(WAR)，此結果與一般之預期相符。

7. 在案例驗證中證實，在模式綜合評估指標(WAR)、降雨發生機率與平均年降雨量等項目上，NPDM 模式之合成資料多較 SDSM 模式所得，更接近歷史資料。
8. 由 26 個單因子 NPDM 的 WAR 結果得知，以 500hPa 緯向風速所合成的雨量資料，相較於其他因子有較近似於歷史資料的表現。
9. 若衡量在以前一天降雨發生與否為條件下之條件型降雨發生機率的效果，則考量降雨量自相關之單氣候因子 NPDM 降尺度模式，優於未考量降雨量自相關之 NPDM 與 SDSM 模式的合成結果，惟驗證年份之平均年降雨量的表現上，考量降雨量自相關之單氣候因子 NPDM 降尺度模式之合成效果則是與雙因子 NPDM 一樣仍須改善。



6.2 建議

1. 在無母數統計模組的參數設定上，目前於雨量切割方式及雨量上限值的訂定，皆為人工給定，雨量切割方式即於降雨量較小數值上給予較密的網格切割，未來可以考量以等量的方式來切割。於雨量上限值的訂定，將會影響合成雨量的極端值，因此後續可探討雨量上限訂定，對雨量合成結果的影響。
2. 本研究所發展的 NPDM 與 SDSM 模式，皆是採用單一 GCM 點位資料降尺度到代表性集水區雨量資料，然而 GCM 對於單點的預測是不準確的，是模擬一個全區域的型態(Pattern)，因此還是需要透過「統計降尺度」的方式，建立大小尺度資料間的對應關係，未來可建議採用以面的 GCM 資訊降尺度到代表性集水區雨量資料。
3. 本研究目前著重於石門水庫集水區降雨量的統計降尺度模擬，未來可以提供其他區域做統計降尺度模擬及分析，也可以進一步提供後續對於研究區域氣候變遷的衝擊評估。
4. 本研究目前只著重於 850hPa 之自相關模式的模擬分析，建議後續可對其他因子之自相關模式的模擬結果進行更深入的研究，以評估自相關模式合成效果的優劣。
5. 目前成果顯示，採用平均海平面壓力、500hPa 緯向風速、500hPa 風向、850hPa 渦度或表面絕對濕度，所建立之單氣候因子 NPDM 降尺度模式，有較佳之合成效果，此雖與一般之預期相符，建議仍可進一步探討其物理意義。

參考文獻

1. Todorovic, P. and Woolhiser, D.A., "A stochastic model of n-day precipitation", *Journal of Applied Meteorology* 14, 17-24, 1975.
2. Woolhiser, D.A. and Pegram, G.G.S., "Maximum likelihood estimation of Fourier coefficients to describe seasonal variations of parameters in stochastic daily precipitation models", *Journal of Applied Meteorology* 18, 34-42, 1979.
3. Wilks, D.S., "Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies", *Climatic Change* 22, 67-84, 1992.
4. Wilks, D.S. and Wilby, R.L., "The weather generation game: a review of stochastic weather models", *Progress in Physical Geography* 23, 329-357, 1999.
5. Richardson, C.W., "Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation", *Water Resources Research*, 17, 182-190, 1981.
6. Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M., "SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts", *Environmental Modelling & Software*, 17, 147-159, 2002.
7. 謝明昇，「應用遺傳規劃法進行氣候預報降尺度分析於季節性河川流量預報」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2005。
8. 王世為，「永續性水質管理系統受氣候變遷影響之脆弱度評估」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2006。
9. 何宗翰，「氣候變遷影響集水區氮磷輸出之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2007。

10. 李庭鵬，「氣候變遷衝擊河川水質永續管理之長期預警機制」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2007。
11. 蘇竹君，「氣候變遷與土地利用改變對石門水庫集水區之流量與泥砂產量影響」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2008。
12. 唐亦宣，「石門水庫集水區日降雨統計降尺度之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，2008。
13. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)」，2007。
14. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)」，2008。
15. 吳明進，「溫室效應氣體倍增對台灣區域氣候的衝擊」，全球變遷通訊雜誌，2004。
16. 李清滕，「東亞及台灣區域氣候之降尺度模擬」，國立台灣大學大氣科學研究所博士論文，2005。
17. 顏子豪，「氣候變遷對於集水區入流量之衝擊評估-以翡翠水庫集水區為例」，國立台灣大學工學院土木工程學系碩士論文，2008。