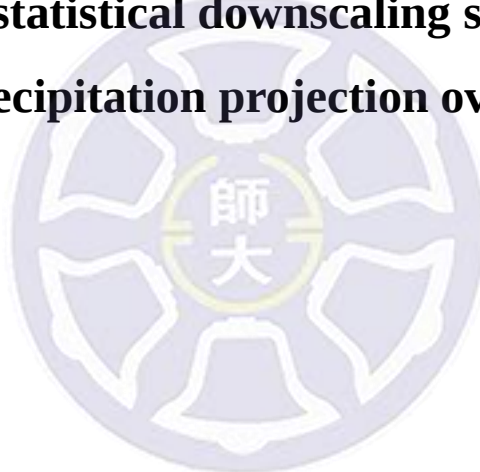


國立臺灣師範大學地球科學研究所

碩士論文

台灣區域未來降雨推估的統計降尺度穩定性研究

**The study of statistical downscaling stationarity for
future precipitation projection over Taiwan**



研究生：奚子泰

指導教授：陳正達 博士

中華民國 109 年 1 月

致謝

在即將畢業的此刻，我首先要先感謝陳正達老師這兩年半來在研究和論文中給予的指導與幫助，以及黃婉如老師、鄒治華老師、盧孟明老師、洪志誠老師口試委員們對於論文內容的悉心指導和寶貴的建議。另外，還要感謝系上的王重傑老師、簡芳菁老師和黃婉如老師在課堂上給予專業知識的教導，讓我這個在大學不是讀大氣系的學生能夠習得大氣領域相關的基本和專業知識，進而使我有能力能夠做我有興趣的大氣科學的研究。

而在這兩年半裡，曾遭遇過許多挫折，也曾動過無數次想要放棄的念頭，但也都被我一一克服且撐了過來，不過這其中也要感謝幫助我最多的世豪學長，如果沒有學長在程式上的幫忙和精神上的鼓勵的話，我想我可能也無法走到這步。同時，也要感謝李彥緯老師給予在程式上的教導與幫助，讓我撰寫程式的能力得以持續進步。另外，也感謝研究室裡同學的陪伴與幫助，以及修立、騰平學長的幫助，和美鳳姐與系辦的純棉助教幫我解決學務行政上的問題。

最後要感謝我最重要的家人，在讀研究所的這兩年半裡，不管是在經濟還是精神層面上都給予我最大的支柱，讓我可以無後顧之憂的做我有興趣的研究並完成它，沒有你們就沒有今天的我，是你們的支持讓我有勇氣繼續追夢。

摘要

目前 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)所使用的氣候模式其空間解析度對於區域性的地區或國家(如台灣)在評估未來氣候變遷的影響時仍有所不足，此時為了克服氣候模式其解析度較低的限制，降尺度方法的運用便成為研究區域氣候的必要手段。

統計降尺度方法因其簡便且計算的需求相對較少，因此此方法已廣泛應用於全球各個區域的氣候研究上且行之有年。而統計降尺度方法在應用於未來氣候推估的降尺度時，其前提皆是假設過去(或現今)資料所建立的統計關係到未來時仍是穩定的；然而，近年來氣候變遷日趨嚴重，已有人開始質疑此無法驗證(在無未來的觀測資料情況下)的前提假設在未來是否仍成立。因此本研究採用"理想模式"("perfect model")此實驗架構利用高解析度的模式資料(動力降尺度資料)代替原本降尺度中所使用的觀測資料(因模式資料有模擬未來的部分)，以驗證誤差修正氣候特徵法(Bias corrected Climate Imprint，簡稱 BCCI)、誤差修正建構類比法(Bias corrected Constructed Analogues，簡稱 BCCA)和誤差修正建構類比兼分位映射法(BCCA with quantile mapping reordering，簡稱 BCCAQ)此三種統計降尺度方法在應用於未來的降尺度時能否遵守上述的前提假設，並比較不同統計降尺度方法其結果在現在和未來時期的表現，以及在這兩個時期表現的穩定性。

研究結果顯示，BCCA 此降尺度方法降尺度後的日降雨結果在強度上皆有低估的情況，BCCI 和 BCCAQ 的結果在強度和極端降雨指標(r1mm、rx1day、rx5day)的表現上則與原始高解析度的模式資料較相近；至於統計穩定性的評估是以平均

絕對誤差的比值(未來/現在)是否大於 1 而定，大於 1 即表示統計降尺度方法在應用於未來的降尺度時，其誤差會比應用於現在時期要來的大，此也代表違反了上述的前提假設。而本研究所驗證的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)其比值皆大於 1，其中 BCCA 最大，其次為 BCCAQ，BCCI 則最小，此也表示 BCCA 的統計穩定性表現較差，BCCI 則表現較佳。

關鍵字:統計降尺度、極端降雨、統計降尺度穩定性



Abstract

The spatial resolution of the climate models currently used by CMIP5 is still insufficient for regional regions or countries (such as Taiwan) in assessing the impact of future climate change. At this time, in order to overcome the limitation of the lower resolution of the climate models, the application of the downscaling method has become a necessary approach for studying regional climate.

The statistical downscaling method is simple and requires relatively fewer computing resources. Therefore, this method has been widely used in climate research in various regions of the world for many years. The statistical downscaling method when applied to the downscaling of future climate projections, assumes that the statistical relationships established by past (or present) data will remain stable in the future. However, in recent years, climate change has become increasingly serious, and some people have begun to question whether this premise assumption that can't be verified (in the absence of future observations) is still valid in the future. Therefore, this study uses the "perfect model" experimental design, this experimental design used high-resolution model data (dynamic downscaling data) instead of observation data in downscaling (because the model can simulate the future part) to verify whether bias corrected climate imprint (BCCI), bias corrected constructed analogues (BCCA),

and bias corrected constructed analogues with quantile mapping reordering (BCCAQ) this three statistical downscaling methods can comply with the above that premise assumption when applied to the future projections downscaling and compare the performance of different statistical downscaling methods in the present and future periods and the stability performance in these two periods.

The results of this study show that the BCCA method underestimates in intensity on its daily precipitation results. By contrast, the daily precipitation results of BCCI and BCCAQ are similar to the original high-resolution model data in terms of intensity and extreme precipitation indices. As for the evaluation of statistical stability, it depends on whether the ratio of the mean absolute error (future divided by present) is greater than 1. If the ratio greater than 1 indicates that when the statistical downscaling method is applied to future period, its error will be greater than that applied in the present period, which also represents a violation of the above premise assumption. The three statistical downscaling methods (BCCI, BCCA, BCCAQ) validated by this study all have ratios greater than 1, among which BCCA is the largest, followed by BCCAQ, and BCCI is the smallest. This also means that BCCA performed poorly on statistical stability, and BCCI performed better.

台灣區域未來降雨推估的統計降尺度穩定性研究

目錄

致謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	IV
目錄.....	VI
圖表目錄.....	VIII
第一章 前言.....	1
第二章 資料介紹.....	8
2.1 高解析度模式資料.....	8
2.2 低解析度模式資料.....	9
第三章 研究架構及方法.....	11
3.1 研究架構.....	11
3.2 統計降尺度方法.....	13
3.2.1 氣候特徵法(Climature imprint).....	13
3.2.2 誤差校正氣候特徵法(Bias-correction and climate imprint)	13
3.2.3 建構類比法(Constructed analogues)	14
3.2.4 誤差校正建構類比法(Bias-correction and constructed analogues).....	14
3.2.5 誤差校正建構類比兼分位映射法(BCCA with quantile mapping reordering).....	15

第四章 降尺度後之結果分析.....	16
4.1 空間型態相關性之分析.....	17
4.2 平均絕對誤差之分析.....	25
4.3 降雨值的強度與分布之分析.....	37
4.4 時間序列相關係數之分析.....	46
第五章 極端降雨指標探討.....	51
5.1 年期間雨日日數.....	51
5.2 年最大單日降雨量.....	56
5.3 年最大五日累積降雨量.....	61
第六章 結論.....	66
參考文獻.....	71
附錄.....	76



圖表目錄

圖 1-1 氣候變遷導致的暖化趨勢如何影響極端事件示意圖。.....	76
圖 1-2 氣候變遷對極端氣候事件的影響，根據科學證據充分程度由左至右漸強 (50~100%的可能性)。.....	77
圖 1-3 PCIC 於 2014 年報告裡依據三個分析面向所通過的檢定(百分比)比較不 同統計降尺度方法的表現。.....	77
表 1-1 PCIC 於 2014 年報告裡依據三個分析面向所通過的檢定百分比將不同的 統計降尺度方法其表現做比較並排名。.....	78
表 2-1 本研究所選用之動力降尺度資料(高解析度模式資料)介紹。.....	78
圖 2-1 WRF 模式(3.5.1 版本)動力降尺度物理參數化之設定。.....	79
表 2-2 本研究所使用之低解析度模式資料(高解析度模式資料升尺度後而得)介 紹。.....	79
表 2-3 本研究所使用之低解析度模式資料(原始模式資料)介紹。.....	80
圖 3-1 (a)實際應用統計降尺度方法之流程示意圖，(b)本研究所應用的統計降 尺度流程示意圖。.....	80
圖 3-2 氣候特徵法(CI)之降尺度流程示意圖。.....	81
圖 3-3 誤差校正氣候特徵法(BCCI)之降尺度流程示意圖。.....	81
圖 3-4 建構類比法(CA)之降尺度概念(流程)示意圖。.....	82
圖 3-5 誤差校正建構類比法(BCCA)之降尺度流程示意圖。.....	82
圖 3-6 誤差修正建構類比兼分位映射法(BCCAQ)之降尺度概念(流程)示意 圖。.....	83
圖 4-1 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原	

始高解析度動力降尺度資料的空間相關性。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	83
圖 4-2 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	84
圖 4-3 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	84
圖 4-4 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	85
圖 4-5 WRF-HiRAM 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	85
圖 4-6 WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	86
圖 4-7 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大	

值。.....	86
圖 4-8 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	87
圖 4-9 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	87
圖 4-10 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	88
圖 4-11 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	88
圖 4-12 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	89
圖 4-13 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	89
圖 4-14 WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三	

種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....90

圖 4-15 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....90

圖 4-16 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....91

圖 4-17 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位: mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....91

圖 4-18 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位: mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....92

圖 4-19 WRF-HiRAM 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為

最小值、平均值、最大值。.....	92
圖 4-20 WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。.....	93
圖 4-21 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....	93
圖 4-22 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....	94
圖 4-23 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期與未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差比值(未來時期/現在時期)之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....	95
圖 4-24 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單	

位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大
值。.....96

圖 4-25 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結
果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單
位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大
值。.....96

圖 4-26 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此
三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資
料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右
分別為最小值、平均值、最大值。.....97

圖 4-27 WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三
種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料
在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分
別為最小值、平均值、最大值。.....97

圖 4-28 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結
果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區
域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由
左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....98

圖 4-29 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結
果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區
域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由
左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....99

圖 4-30 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期與未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差比值(未來時期/現在時期)之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....100

圖 4-31 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。.....101

圖 4-32 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。.....101

圖 4-33 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。.....102

圖 4-34 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英

文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大

值。.....103

圖 4-35 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結

果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大

值。.....103

圖 4-36 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結

果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大

值。.....104

圖 4-37 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結

果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大

值。.....105

圖 4-38 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結

果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大

值。.....105

圖 4-39 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....106

圖 4-40 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....107

圖 4-41 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....108

圖 4-42 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。.....109

圖 5-1 WRF-HiRAM 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數 (rlmm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最

大值。.....110

圖 5-2 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動

力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大

值。.....111

圖 5-3 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度

動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大

大值。.....112

圖 5-4 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動

力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大

值。.....113

圖 5-5 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數 (r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....114

圖 5-6 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數 (r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....115

圖 5-7 WRF-HiRAM 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數 (r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....116

圖 5-8 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解

析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數
(rlmm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資
料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左
至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ
的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最
大值。.....117

圖 5-9 WRF-HiRAM 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度

動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量
(rx1day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度
資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排
由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、
BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均
值、最大值。.....118

圖 5-10 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動

力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量
(rx1day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度
資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排
由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、
BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均
值、最大值。.....119

圖 5-11 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度

動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量

(rxlday)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....120

圖 5-12 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量

(rxlday)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....121

圖 5-13 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量

(rxlday)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....122

圖 5-14 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量

(rxlday)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度

資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....123

圖 5-15 WRF-HiRAM 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....124

圖 5-16 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....125

圖 5-17 WRF-HiRAM 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的

下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、
 BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最
 小值、平均值、最大值。.....126

圖 5-18 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動

力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量
 (rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度
 資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的
 下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、
 BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最
 小值、平均值、最大值。.....127

圖 5-19 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度

動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量
 (rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度
 資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的
 下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、
 BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最
 小值、平均值、最大值。.....128

圖 5-20 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動

力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量
 (rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度
 資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的
 下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、

BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....129

圖 5-21 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....130

圖 5-22 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....131

圖 5-23 WRF-HiRAM 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最

小值、平均值、最大值。.....132

圖 5-24 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。.....133

表 6-1 本研究所使用的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各個分析指標的表現統整。表格中括號內的數值即為在 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組資料的表現平均後所得，紅色分析指標代表在升尺度部分和原始模式資料部分具有一致性。.....134

表 6-2 本研究所使用的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各個分析指標的表現統整。表格中括號內的數值即為在 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組資料的表現平均後所得，紅色分析指標代表在升尺度部分和原始模式資料部分具有一致性。.....135

第一章 前言

根據美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)對於全球平均氣溫的統計分析顯示，截至 2018 年的統計分析，全球平均氣溫最高的五年也就是最近的五年，第一到第五高溫年依序為 2016、2015、2017、2018、2014 年，且前十大高溫年皆是出現自 1998 年之後，加上近年來氣候極端與異常事件發生的頻率有增加的趨勢，氣候變遷儼然已成為一事實，使得近年來氣候變遷的研究不再只是侷限於探討未來全球氣候平均值的改變，極端事件的議題探討也逐漸受到重視，因極端事件(如：熱浪、豪雨、洪水、乾旱等)往往對人類社會影響快速且甚劇，且聯合國氣候變遷政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC)於 2012 年的 SREX 報告中指出極端事件發生頻率的增加與否皆會受到平均值和變異數的改變以及氣候變化而影響(圖 1-1)，美國環保智庫憂思科學家聯盟(Union of Concerned Scientists)根據 SREX 報告中科學家提出證據的一致性，將氣候變遷與極端天氣事件的連結強度用證據充分程度表現製作出一張圖表(圖 1-2)，圖中證據充分的極端事件包含極端高溫(熱浪)、海岸溢淹、極端降雨以及乾旱，此表示氣候變遷將導致這些極端事件的發生頻率增加。而雖然目前氣候模式發展已趨於成熟，能根據不同的代表濃度途徑(Representative Concentration Pathways，簡稱 RCPs)未來情境模擬未來的氣候特徵之推估，但在區域尺度的特徵描述上仍然不足(Washington et al., 2000)；而區域氣候模式(RCMs)雖然在區域尺度上具有相當強的特徵描述能力，但仍還是有許多系統性誤差的問題存在(Theme β l et al., 2010)，此時，降尺度方法就成為在評估未來區域氣候特徵時的重要方法。

代表濃度途徑(RCPs)(途徑所指的是濃度的變化歷程)為 IPCC 於第五次評估

報告中提出是用來重新重新定義四組未來變遷的情境，分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6 和 RCP8.5，並以輻射強迫力(radiative forcing)在 2100 年與 1750 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。之所以被命名為 RCP2.6 的情境意味著每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 則代表每平方公尺的輻射強迫力分別增加了 4.5、6.0 與 8.5 瓦。在這四種情境中，RCP2.6 為暖化減緩的情境(輻射強迫力在 2100 年呈減少趨勢)；RCP4.5 與 RCP6.0 是屬於穩定的情境(輻射強迫力的變化在 2100 年呈較為穩定狀態)；RCP8.5 則是溫室氣體高度排放的情境(輻射強迫力在 2100 年呈持續增加趨勢)。相較於第三次評估報告與第四次評估報告所考慮的情境，這四種情境所能涵蓋層面更廣。除了設定了逐年的溫室氣體濃度，同時根據整合評估模式、簡化氣候模式、大氣化學模式以及全球碳循環模式的組合計算，每個 RCP 情境可以估算出人為溫室氣體排放量，並提供土地利用變遷的空間分布以及各區域空氣污染物的排放量。然而，雖然這些 RCP 情境已經涵蓋了相當廣的輻射強迫力範圍，但仍有其不足之處，特別是與氣溶膠相關的部分。

目前大多數的 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 模式與地球系統模式都使用各 RCP 情境所設定的溫室氣體濃度變化來進行氣候推估的模擬。到了 2100 年，在 RCP2.6 情境中，二氧化碳的濃度會達到 421 ppm；RCP4.5 情境會達到 538 ppm；RCP6.0 情境會達到 670 ppm；而 RCP8.5 情境則會達到 936 ppm。然而，2019 年 5 月 11 日夏威夷莫納羅亞火山天文臺(Mauna Loa Observatory)的感測器記錄顯示，地球大氣中的二氧化碳濃度已達到 415.26 ppm，且自 1960 年代以來，地球大氣中二氧化碳濃度每年增長的速率約為 0.6 ± 0.1 ppm，而過去十年，二氧化碳濃度每年增長的速率則接近 2.3 ppm，也就是說

自 1960 年代以來地球大氣中的二氧化碳濃度除了每年持續增長之外，還有增長速率越來越快的趨勢，因此本研究在應用統計降尺度方法於未來模擬的氣候推估資料時將以人類現今的發展模式選用 RCP8.5 情境的未來氣候推估資料進行降尺度的研究。

動力降尺度(Barnston et al., 1999)方法是藉由提高氣候模式 (General Circulation Model, 簡稱 GCM) 的解析度以獲得高解析度的氣候推估資料，由於使用較接近真實的地形資料 (例如：地形高度、海岸線、土地利用等)，因此較能夠精準地呈現區域範圍的地理及氣候特徵，高解析度也讓模式能模擬出較大的極值，進而提升模式對極端事件的模擬能力。實際上通常會使用區域氣候模式 (Regional Climate Model, 簡稱 RCM) 將 GCM 所做的低解析度氣候推估資料作為邊界條件進行降尺度，以得到動力降尺度後高解析度的氣候推估資料。而之所以稱為「動力」是因為所用的模式包含了許多物理、化學的參數計算，其目的是試圖模擬出真實自然環境的運作，而每個參數之間皆會互相影響，且此相互影響為動態過程，因此所用的 GCM 或 RCM 可說是一種動力模式。此方法的優點在於由於模式包含了大氣的物理、化學及動力過程，因此對於模擬的結果能以物理機制做適當的解釋，也能針對極端氣候進行研究(Wang et al., 2008)。而其主要的缺點則是需要大量的電腦運算資源和儲存空間，且計算相對較耗時，以及模式的物理參數化可能不夠完善，或是模式所使用的參數化可能隨著解析度的過度提高而不再適用。

統計降尺度(Von stroch et al., 1993)方法則是藉由過去長期的觀測資料與氣候模式過去長期的模擬資料，利用回歸與統計分析等方法建立兩者之間長期且穩定的統計關係(Wilby and Wigley, 2000; Chu., 2008)，並利用此統計關係應用

於氣候模式未來的推估資料上。其優點在於計算的需求相對較少而且方法也相對簡易，而缺點是模擬的結果無法顯示氣候的物理過程，缺少適當的物理解釋，且用來作為預報時需要假設未來氣候特徵是統計穩定的，而這個假設一般無法滿足也無法證明。

無法證明之原因即是因缺乏未來的觀測資料，因此無法證明在未來觀測資料和模式資料的變數之間仍維持著現有的統計關係；而本研究將透過"理想模式"("perfect model")的實驗設計(Dixon et al., 2016)利用高解析度的模式資料代替原本高解析度的觀測資料，便可以用來評估及驗證統計降尺度方法在現在時期的資料裡所尋找出的統計關係，是否在未來時期的資料裡此統計關係仍維持穩定的狀態。

而關於統計降尺度的方法，2014年太平洋氣候影響協會(Pacific Climate Impacts Consortium，簡稱PCIC)這支加拿大團隊提出誤差校正建構類比兼分位映射法(BCCAQ)此統計降尺度方法並應用觀測和模式資料於北美洲未來氣候推估的研究，其依據三個面向進行分析，而三個面向分別為：

(1) 事件的連續性(sequencing of events) — ETCCDI(極端氣候指標)
correlation

(2) 值的分布與強度(distribution of values) — ETCCDI
Kolmogorov-Smirnov D-statistic (K-S test)

(3) 空間結構(spatial structure) — spatial autocorrelation

三個面向後所列即為PCIC所用之分析方法，其結果所通過檢定的百分比整體表現相較於以往所發展出來的統計降尺度方法(如:BCCI、BCCA、BCSD)皆較好(Sobie et al., 2014)。

圖 1-3 即為 PCIC 在報告裡依據上述此三個分析面向所通過的檢定(百分比)比較不同統計降尺度方法的表現，圖下所列的英文簡稱即為統計降尺度方法，QMAP 即為 BCCI，而由圖可看出，雖然 BCCAQ 並不是在每個分析面向通過的百分比皆最高，但以整體來看，BCCAQ 所通過的檢定累積百分比為最高。

表 1-1 則為將圖 1-3 中的統計降尺度方法依據在三個分析面向所通過的檢定百分比表現化為排名之表格。由表中更可看出，雖然 BCCAQ 並非在各個面向表現皆最好，但平均整體而言，BCCAQ 的表現為最好，而表中不同的統計降尺度方法在各個面向的表現其實也反映了其方法的特性，如 BCCA 的做法是尋找觀測和模式資料之間降雨分布的關係，因此其在空間(Spatial)面向上的表現會較好；而 QMAP(即 BCCI)的做法較能保留原始模式資料日連續性的變化以及降雨強度，因此其在連續性(Sequencing)和值的分布(Distribution)面向上的表現會較好；而 BCCAQ 簡單地來說其在做法上則是結合 BCCA 與 BCCI，具有截長補短的特性，因此其在三個分析面向上皆有不錯的表現，也使得在整體平均的表現上為最佳。關於不同統計降尺度方法較詳細的介紹將於第三章第二節(3.2)做完整的說明。

而 BCCAQ 此統計降尺度方法自提出之後便陸續有研究將它和其他的統計降尺度方法應用於北美洲其中較小的區域以比較降尺度後的結果(Werner and Cannon, 2016；Sobie and Murdock, 2017)；中國南京大學也在 2018 年出了兩篇關於應用 BCCAQ 和其他統計降尺度方法(BCSD、BCCI、CDF-t)於觀測和模式資料中的溫度和降雨於中國的氣候研究(Yang et al., 2018)，其中一篇為利用過去的觀測和模式資料作為驗證以比較不同統計降尺度方法其降尺度後結果的表現，另一篇則是利用這些不同的統計降尺度方法以過去的觀測和模式資料所建立的統計關係為基礎所做的中國未來氣候推估的降尺度結果。而從 Yang et al. (2018)

在利用過去的觀測和模式資料以比較不同統計降尺度方法的這篇結果來看，BCSD、BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果表現皆是不錯的，但以整體來說 BCSD 的表現更為突出，而 BCCI 和 BCCAQ 的結果在極端氣候指標(ETCCDI)上的表現相差不多，唯一較大的差異在於降雨的機率分布(PDF)，BCCAQ 降尺度後的降雨結果其機率分布相較於 BCCI 的結果是較接近於觀測資料的。至於未來氣候推估的部分，BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的推估結果不管是在溫度或是降雨的部分其趨勢、機率分布和極端氣候指標皆是非常相近的，不過其仍是如以往應用統計降尺度方法於區域氣候的研究並比較不同統計降尺度方法的表現，因此其前提皆是假設統計降尺度方法其統計穩定性在未來仍是穩定的，所以也並沒有探討到統計降尺度方法其統計穩定性的問題。

因台灣目前所應用於未來氣候推估的統計降尺度方法仍以改良過的誤差校正空間分解法(BCSD)為主，而 BCCAQ 為更新的方法，且經過 PCIC 應用於北美洲並比較 BCCAQ 和 BCSD(未經改良的)的結果表現顯示 BCCAQ 的整體表現優於 BCSD。因此本研究將採用"理想模式"的實驗架構(Dixon et al., 2016)應用 BCCI、BCCA 以及 BCCAQ 此三種統計降尺度方法於台灣區域降尺度的研究，並探究 BCCAQ 降尺度後的結果是否的確具有結合 BCCI 和 BCCA 各別優點的趨勢，以及本研究之主要目的是要驗證並評估 BCCI、BCCA 以及 BCCAQ 此三種統計降尺度方法在應用於未來氣候推估資料的降尺度時，其統計穩定性的表現是否仍遵守現在在應用統計降尺度方法於未來氣候推估時的前提假設(stationarity assumption)。而目前這部分的探討尚少(Vrac et al., 2007; Hertig and Jacobeit, 2013; Dixon et al., 2016)，雖然以往在評估統計降尺度方法的表現時，會將降尺度所用的資料時間區分為兩部分，一部分為校準期(calibration

periods)，另一部分則為驗證期(validation periods)，以利於能將此兩部分降尺度後的結果做交叉驗證(cross-validation)，進而評估統計降尺度方法的表現(Theme β 1 et al., 2011； Volosciuk et al., 2017)，但這做法並無法評估統計降尺度方法的穩定性，因校準期和驗證期的氣候狀態可能並不類似於過去和未來此兩氣候狀態。根據 Wang et al. (2018) 的論文中提到目前針對評估統計降尺度穩定性的方法主要有兩種，一種為使用高解析度的區域氣候模式(RCMs)資料代替真實的觀測資料("pseudo-reality")，如"理想模式"的實驗設計，另一種則為使用差異交叉驗證("differential cross-validation")，其做法是將期望能夠反映出氣候變化的兩個時期分為校準期和驗證期(Teutschbein and Seibert, 2013； Salvi et al., 2016)。而如今已有許多研究應用上述這三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)於區域氣候的研究，因此本研究想了解 BCCAQ 在應用於台灣區域未來氣候推估上相較於 BCCI 和 BCCA 是否具有較高的統計穩定性。

本文將於第二章介紹本研究所使用的資料及來源；第三章介紹本研究之研究架構以及不同的統計降尺度方法；第四章將不同的統計降尺度方法之結果做進一步的分析，以利於比較不同的統計降尺度方法之表現，並評估不同的統計降尺度方法其統計穩定性的表現；第五章則是針對不同的統計降尺度方法之結果在極端降雨指標上的表現做些比較和探討；第六章闡述結論。

第二章 資料介紹

2.1 高解析度模式資料

本研究所使用的高解析度模式資料為 WRF-HiRAM (Weather Research and Forecasting - High Resolution Atmospheric Model) 和 WRF-MRI (Weather Research and Forecasting - Meteorological Research Institute) 此兩種模式動力降尺度的日平均降雨資料(單位:mm/day)(如表 2-1)，其空間解析度皆為 5km x 5km(約 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$)，選取的資料空間範圍皆為台灣區域($120^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$ ； $21.5^{\circ}\text{N} \sim 25.5^{\circ}\text{N}$)，本研究所選用 WRF-HiRAM 此動力降尺度資料現在時期的時間為 1979-2005 年，以及世紀末時期(未來情境 RCP 8.5)則為 2075-2099 年的模擬降雨結果為主，而所選用 WRF-MRI 此動力降尺度資料的現在時期則為 1979-2003 年，以及世紀末時期(未來情境 RCP 8.5)同樣為 2075-2099 年的模擬降雨結果為主，吾人便是利用此兩組高解析度的動力降尺度資料來當作本研究統計降尺度中的高解析度模式資料(代替原本高解析度的觀測資料)。

在此兩種資料中 WRF(Weather Research and Forecasting modeling system)皆為執行動力降尺度時所使用的區域模式(3.5.1 版本)，此模式為美國大氣研究中心(NCAR)發展的天氣研究與預報模式系統，模式的水平解析度為 5 公里，為單層網格，網格數為 380×400 ，垂直方向共有 36 層。模式物理參數化的設定方面(Bukovsky and Karoly, 2009)包括：邊界層參數化採用 Yonsei University scheme、微物理參數化採用 WSM 5-class graupel scheme、Kain-Fritsch 積雲參數化、近地表面過程的計算採用 Noah land surface module、輻射的計算則採用 CAM3 的短波及長波輻射參數化、表面層的計算則用 Monin-Obukhov surface layer scheme(圖 2-1)。另外，亦使用一組更貼近臺灣土地使用現況的

地表資料(戴等, 2008), 採用跟隨 WRF 模式所提供的美國地質調查 (USGS)、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 及中鼎工程顧問公司的高解析度土地利用資料(CTCI)合成而得, 使得 WRF 模式在一個較合理的土地利用資料下進行更精確的模擬。

2.2 低解析度模式資料

本研究所使用低解析度的模式資料有兩組(如表 2-2、2-3), 一組為高解析度模式資料經由 CDO 軟體保守內插(First order conservative remapping)後而得(簡稱升尺度(Coarsen)部分), 升尺度後的兩組動力降尺度資料除了空間解析度皆轉為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (約為 $25\text{km} \times 25\text{km}$) 之外, 其他資料特性(如: 時間解析度、空間範圍、時間範圍)則與高解析度模式資料一致; 另一組則是使用 GFDL HiRAM 和 MRI-AGCM 原始的日平均降雨模式資料(簡稱原始模式資料部分), GFDL HiRAM 為美國普林斯頓大學地物流力動力實驗室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)所發展的一個高解析度全球大氣模式, 是一個可以解析雲的模式, 其模擬劇烈天氣系統的能力甚佳(Chen and Lin, 2011), 本研究使用的版本(C384)為水平解析度約 25 公里(約為 $0.23^{\circ} \times 0.23^{\circ}$) 之非靜力全球模式, 選取的空間範圍同樣為台灣區域($120^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$; $21.5^{\circ}\text{N} \sim 25.5^{\circ}\text{N}$), 時間範圍則為現在時期的 1979-2003 年, 以及世紀末時期(未來情境 RCP 8.5)的 2075-2099 年; MRI-AGCM 則為日本氣象廳氣象研究所(JMA/MRI)發展的高解析度全球大氣模式, 此模式可以模擬出強的深對流以及颱風, 本研究使用的版本為 3.2 版(Mizuta et al., 2012), 此模式資料的空間解析度則為 $0.1875^{\circ} \times 0.1875^{\circ}$ (約為 $20\text{km} \times 20\text{km}$), 至於選取的空間和時間範圍則跟 GFDL HiRAM 原始模式資料相同, 而本研

究會利用這兩組低解析度的模式資料去和高解析度的模式資料做降尺度，進而得到兩組降尺度後的結果並加以分析。

而升尺度部分之所以會將高解析度模式資料升尺度至 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 後當作低解析度模式資料的原因有二，一為在做統計降尺度時通常會利用較低解析度的模式資料和較高解析度的觀測資料經由降尺度過程而得到較高解析度的模式資料(結果)，二則為以台灣範圍較小之區域，通常將資料的空間解析度升尺度至 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 時，已會將資料受地形影響的因素排除掉(如:降雨)。至於升尺度部分所做的降尺度因其高、低解析度的模式資料為同一筆只是解析度不同，基本上不存在模式資料之間的誤差，因此此部分之目的主要是要測試統計降尺度方法的極限。同時本研究也想要比較不同的統計降尺度方法在應用於模式資料後所得到的結果能否還原原本保有受地形影響之特徵和其降尺度後結果的優劣，以及統計降尺度方法應用於世紀末時期的資料是否能維持其表現。

第三章 研究架構及方法

3.1 研究架構

本研究之研究架構參照於"理想模式"的實驗設計(Dixon et al., 2016)之降尺度流程，降尺度流程示意圖如圖 3-1(b)，而上述的"理想模式"並不是指模式本身的模擬完全沒有誤差，而是指為了研究分析之目的，利用高解析度的模式資料來代替原本高解析度的觀測資料或是所謂的真值(truth)，因此此降尺度流程不同於以往實際應用降尺度流程(圖 3-1(a))所用的資料，以往實際應用降尺度所用之資料一為較高解析度的觀測資料，另一為較低解析度的模式資料，經過降尺度後得到一較高解析度(解析度同觀測資料)的模式結果；然而，本研究之降尺度流程所用的資料則為一較高解析度的模式資料和一較低解析度的模式資料，而較低解析度的模式資料(共兩組)即是使用一組由較高解析度的模式資料升尺度後而得(簡稱升尺度部分)，而另一組則是原始的模式資料(HiRAM、MRI)(簡稱原始模式資料部分)，在經過降尺度後即會得到一較高解析度(解析度同原本高解析度的模式資料)的降尺度結果，而本研究所採用此降尺度流程的原因之一便是要比較不同的統計降尺度方法在將低解析度的模式資料經過降尺度後所得到的結果能否趨近、還原成原本高解析度的模式資料所擁有之特徵，並比較不同的統計降尺度方法所得之結果在空間和時間上的優劣性。

而本研究之另一項主要目的，便是要評估不同的統計降尺度方法應用在世紀末(2075-2099 年)時期(RCP8.5)的模式資料時，是否能維持其統計的穩定性(statistical stationarity)(Fowler et al., 2007)，目前對於此一問題的研究尚少(Vrac et al., 2007； Hertig and Jacobbeit, 2013； Dixon et al., 2016)，以往在實際應用統計降尺度方法於觀測和模式資料不管是現在時期或是未來時

期模式資料的降尺度時，都是假定觀測和模式資料其現在時期的統計關係在未來也維持不變同樣適用(Wilby and Wigley 1997)；然而，近年來氣候變遷儼然已成為一事實，現在時期的統計關係在未來是否仍維持不變已成一大問號，加上由於缺乏未來的觀測資料，造成統計降尺度應用於模式模擬未來時期資料的可信度自然成一問題，而本研究所採用"理想模式"的研究架構便可應用統計降尺度的方法於現在和未來時期的模式資料上，由此便可計算統計降尺度方法應用於未來時期模式資料上的誤差相較於現在時期是否有增長的趨勢，並評估其統計的穩定性是否仍可適用於未來。

本研究應用統計降尺度方法於現在時期時，皆是使用現在時期的高、低解析度的模式資料去做降尺度，而得到的結果會跟現在時期高解析度的模式資料做比對，並比較不同統計降尺度方法的表現；而在做未來時期的降尺度時，則是使用現在時期的高解析度模式資料，以及未來時期低解析度的模式資料(共兩組)，一組為未來時期高解析度的模式資料升尺度後而得(簡稱升尺度部分)，另一組則為未來時期原始的模式資料(HiRAM、MRI) (簡稱原始模式資料部分)，最後將降尺度後的結果跟未來時期的高解析度模式資料去做對照，並比較不同統計降尺度方法應用於未來時期(RCP8.5)的表現。而不管是在現在時期或未來時期的降尺度過程中皆未使用到未來時期高解析度的模式資料，未來時期高解析度的模式資料在本研究中的角色較像是未來時期的觀測資料，其用途便是用來讓我們比較不同統計降尺度方法應用於未來時期(RCP8.5)的表現和評估統計降尺度方法應用於未來的穩定性。

3.2 統計降尺度方法

3.2.1 氣候特徵法(Climate imprint, 簡稱 CI)

本方法(Hunter and Meentemeyer, 2005)之流程示意圖如圖 3-2，其降尺度概念為將低解析度模式的降雨距平值(anomalies)內插到高解析度的觀測資料網格上，而模式的降雨距平值即是將模式每個網格點上每日的降雨值除上模式長時間月氣候平均的降雨值而得，並將內插後每個網格上模式的距平值乘上高解析度觀測資料長時間的月氣候平均值，所得到之結果即為此方法降尺度後之結果。

此方法因為是內插模式連續每日的距平值，因此可以保留原始資料日連續的降雨變化，也較能表現極端事件的代表(Maraun, 2013)，使其為此降尺度方法之優點；但此方法不像建構類比法(CA)是以挑選模式和觀測資料之間相近的空間分布型態為主，且主要是將低解析度的距平值直接內插至高解析度的網格點上，而這可能會導致結果過度平滑的現象，因此此方法所得到之降尺度的結果在空間協變性(spatial covariability)上的表現通常會較差(Sobie and Murdock 2017)，而這也是此降尺度方法之缺點。

3.2.2 誤差校正氣候特徵法(Bias-correction and climate imprint, 簡稱 BCCI)

本方法之流程示意圖如圖 3-3，其降尺度概念為將氣候特徵法(Climate Imprint)所得到之結果，再按照月份將氣候特徵法所得到之結果和高解析度的觀測資料所有年份當月每天的降雨值繪製成累積機率分布曲線(CDF)並依據各個百分位(quantile)去做誤差校正(quantile mapping algorithms)，進而得到此方法之降尺度後結果。此方法相較於氣候特徵法之優點在於能將模式通常模擬較弱的降雨強度向觀測資料修正、增強，並能保留氣候特徵法所擁有之優點。

3.2.3 建構類比法(Constructed analogues, 簡稱 CA)

本方法(Hidalgo et al.,2008)之流程示意圖如圖 3-4，其降尺度概念為將模式模擬過去或未來某一天的降雨分布型態，利用計算出最小之標準差(RMSE)以尋找出與此模式分布型態相加起來最相近的 30 筆(天)升尺度後與模式解析度一致的觀測資料，接著再利用最小平方法計算並分配此相加起來最相近的 30 筆低解析度觀測資料的權重，之後再將這些分配好的權重乘上原本那 30 筆(天)未升尺度前高解析度的觀測資料，最後將這 30 筆資料的結果做相加，所得到的結果即把它當作是模式降尺度後之結果。

此方法因為是從觀測資料中尋找出 30 筆(天)相加起來與模式資料最相近的空間分布型態，因此自然能保留並表現出較佳的空間協變性此優點，但也因為是從長時間(通常為數十年)的觀測資料裡挑選出 30 天乘上權重後做相加以代替原本的模式資料，因此會無法保留原本模式資料日連續的降雨變化，且這個做法可能會再重新引入一些偏差(bias)，尤其是當所選取的空間區域範圍越大時，偏差通常也會越大。而在挑選空間分布型態還有另一項缺點，那就是模式模擬的降雨強度通常都會較實際觀測弱，因此在挑選那 30 筆(天)觀測資料時，也會挑選出和模式模擬降雨強度相近的觀測資料；然而，這會造成極端事件的低估(Gutmann et al., 2014)，此方法之優缺點與氣候特徵法(CI)有恰巧相反之意味。

3.2.4 誤差校正建構類比法(Bias-correction and constructed analogues, 簡稱 BCCA)

本方法之流程示意圖如圖 3-5，其降尺度概念為在做建構類比法之前，先將模式資料和升尺度後的觀測資料按照月份將所有年份當月每天的降雨值繪製成累積機率分布曲線並依據各個百分位去做誤差校正，做完誤差校正後才接著進行

建構類比法的步驟，而最後所得到的結果即為此方法降尺度後之結果。而此方法相較於建構類比法(CA)的優點和 BCCI 一樣，都是能將模式模擬原本較弱的降雨強度修正至趨向觀測資料的降雨強度，同時也保有建構類比法空間協變性較佳之優點。

3.2.5 誤差校正建構類比兼分位映射法(BCCA with quantile mapping reordering, 簡稱 BCCAQ)

本方法(Sobie et al., 2014; Werner and Cannon, 2016)之流程示意圖如圖 3-6，其降尺度概念為先各別將模式和觀測資料做 BCCA、BCCI，之後再拿 BCCI 的結果來對 BCCA 的結果同樣按照月份將所有年份當月每天的降雨值繪製成累積機率分布曲線並依據各個百分位去做誤差校正，做完誤差校正後的結果即為此降尺度方法之結果。此方法能解決上述氣候特徵法(CI)和建構類比法(CA)各別的缺點，並同時保留這兩種方法的優點，具有截長補短之特性。

此降尺度方法也是本研究之重點，本研究之目的便是要利用此方法所得到之降尺度結果與上述的誤差校正氣候特徵法(BCCI)與誤差校正建構類比法(BCCA)所得到之結果做比較，看看此方法所得到之降尺度結果是否能比上述這兩個統計降尺度方法之結果更趨近於原本動力降尺度的資料，以便於確認更能應用此降尺度方法於模式模擬未來氣候變遷以得到區域氣候更接近真實的情況。

第四章 降尺度後結果之分析

本研究將降尺度後之結果(升尺度部分、原始模式資料部分)依據三個面向著手進行分析，分別為：

1. 空間型態相關性 — 空間型態相關係數(Pattern correlation coefficient)。
2. 降雨值的強度與分布 — 平均絕對誤差(MAE)、機率分布圖(PDF)、累積機率分布圖(CDF)、極端降雨指標分布圖(時間平均)。
3. 降雨事件的連續性 — 每日降雨值的時間序列相關係數(time correlation)

分析圖。而三個面向後所列即為本研究所使用之分析方法，而在後續的分析探討中因較具邏輯連貫性吾人會將平均絕對誤差的分析獨立成一節接續在空間型態相關性的分析之後，極端降雨指標的分析則獨立於第五章討論。

而關於降尺度後此兩部分的結果(升尺度部分、原始模式資料部分)其代表的涵義並不相同，在升尺度部分因高、低解析度資料為同一筆資料(只是解析度不同)，基本上不存在模式資料之間的誤差，因此所做的降尺度之目的主要是想測試統計降尺度的極限，並評估統計降尺度方法的穩定性；至於原始模式資料部分由於高、低解析度資料不為同一筆資料，其較像以往傳統統計降尺度的應用(觀測-模式資料)，其降尺度之目的主要是由於將動力降尺度資料當作觀測資料，並透過動力降尺度前所使用的原始模式資料(HIRAM & MRI)當作模式資料，進而來訓練統計降尺度方法，希望藉由尋找動力降尺度資料和動力降尺度前的模式資料之間的統計關係，看看統計降尺度方法能藉由這統計關係多逼近於動力降尺度資料，因此此部分降尺度後的結果表現其實較具參考價值，而此部分的結果同樣也可評估統計降尺度方法的穩定性。

4.1 空間型態相關性之分析

對於降尺度後的日降雨資料，我們在不外乎就是降雨的分布位置以及降雨強度是否與原始的高解析度資料相接近，而降雨的分布位置與強度是否相符合可用空間型態相關係數表示，而空間型態相關係數即是計算兩空間樣本的相關係數，而我們所說的相關係數通常是指皮爾森相關係數(Pearson's correlation coefficient)，其計算方程式定義如下：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}}$$

上式中的 x_i 、 y_i 即為兩不同的變數或樣本， μ_x 、 μ_y 則分別為變數 x 和 y 的平均值，相關係數 ρ (有時會用 r 表示) 是用以反映兩變數之間相關關係密切程度的統計指標，其值介於 $-1 \sim 1$ 之間 ($-1 \leq \rho \leq 1$)，當 $\rho > 0$ 時，即表示兩變數呈正相關，而當 $\rho < 0$ 時，則表示兩變數呈負相關，其值所代表的相關程度一般可劃分為三級，當 $|\rho| < 0.4$ 時，為低度相關；而當 $0.4 \leq |\rho| < 0.7$ 時，為中度相關；最後當 $0.7 \leq |\rho| < 1$ 時，則為高度相關。而本研究在此計算降尺度後的日降雨資料與原始高解析度資料的相關係數之用意，即是要判斷此兩空間樣本的降雨分布與強度是否能維持高度相關(相近)。

Part I 升尺度部分

圖 4-1 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，而圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料皆顯示以整體平均來看，此三種統計降尺度方法的結果皆可達到 0.85 以上，

而其中以 BCCA 的空間型態相關係數為最高(約為 0.98)，其次為 BCCAQ(約為 0.93)，BCCI 則最差(約為 0.885)，三者之間的差距皆約為 0.05，而這結果表現也與這三種統計降尺度方法的做法有關且符合其特性。

而圖 4-2 為 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分應用於未來時期(RCP8.5)所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料皆顯示以平均來看，在升尺度部分即使將此三種統計降尺度方法應用於未來時期(RCP8.5)的資料上，其空間型態相關係數仍能維持在 0.75 以上(高度相關)，不過相較於現在時期的表現皆有以下滑的趨勢。而其中以 BCCA 的降幅為最大，降低約 0.16~0.17，其次則為 BCCAQ 的 0.14~0.15，而 BCCI 則只略降約 0.03~0.04，因而使得在未來時期這三個統計降尺度方法的表現相較於現在時期有所不同，在未來時期空間型態相關係數上的平均表現，變成以 BCCI 為最好(約為 0.88)，其次為 BCCA(約為 0.81)，BCCAQ 則最差(約為 0.78)，三者之間的差距以 BCCI 較為凸出，BCCA 和 BCCAQ 則差距較小，而其共同點為低度相關($|\rho| < 0.4$)的天數相較於現在時期皆有增加的趨勢。

圖 4-1、4-2 所呈現的是現在和未來時期降尺度後日降雨資料與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，雖然大部分的結果其空間型態相關係數皆能維持在中度相關或以上，只有少部分的天數為低度相關。但由此兩張圖我們很難看出這三種統計降尺度方法所得到的日降雨結果其空間型態相關係數是否具有在哪些月份或季節表現會較好之特性，因此圖 4-3 即為圖 4-1 在做了月氣候平均後所得，而由圖 4-3 便可看到在 WRF-HIRAM & WRF-MRI 這兩種資料中皆得到相同的結果，在現在時期 BCCA 的空間型態相關係數表現較穩定，基本上不會隨

著季節變化而改變，至於 BCCAQ 和 BCCI 則有在台灣的夏季(雨季)表現較差，在冬季(乾季)表現較好的趨勢，尤以 BCCI 更為明顯，其最大差距可達 0.06~0.08 之間。而之所以造成此乾濕季之差異的原因可能是在於在計算空間型態相關係數時，其降雨值的分布和強度皆會造成影響，而台灣夏季的降雨範圍和強度通常皆較冬季降雨來得廣和強，因此就算在夏季降尺度後的結果在降雨分布位置上能夠準確地掌握，但只要降雨強度(值的大小)和原始高解析度動力降尺度資料有差距時，便會拉低其空間型態相關係數的表現，再加上降雨範圍廣，其拉低作用會更加明顯；而台灣冬季的降雨通常較局部且強度也較弱，因此其降尺度後的結果只要降雨分布位置能掌握到的話，基本上其空間型態相關係數的表現便不會太差，因其降雨強度的影響較小。

圖 4-4 則為圖 4-2 在做了月氣候平均後所得，這兩種資料也有相似的結果，在未來時期時，這三個統計降尺度方法所得到的日降雨結果其空間型態相關係數皆具有在夏季表現較差，冬季表現較好的趨勢，不過 BCCI 的差異相較於 BCCA 和 BCCAQ 則為最小，其最大差距約為 0.07~0.09 之間，而 BCCA 的最大差距則可達到 0.13~0.15 之間，至於 BCCAQ 其最大差距更可達到 0.13~0.16 之間，且三個方法的最大差距在 WRF-MRI 這組資料皆較在 WRF-HiRAM 大，而此三種方法的曲線起伏在這兩種資料皆相似。然而，BCCA 在現在時期和未來時期的表現會有如此大落差的原因在於 BCCA 此方法的優點為較能掌握降雨的空間分布，缺點為通常還原的降雨強度較弱，而在現在時期時，由於皆是使用現在時期的高、低解析度的模式資料去做降尺度且為升尺度部分，因此得到的降尺度結果其降雨強度並不至於低估太多，進而使得 BCCA 在現在時期時夏、冬兩季的差異較不明顯，而到了未來時期，由於是使用現在時期的高解析度模式資料和未來時期的低解析度

模式資料去做降尺度，因而造成降雨強度低估的問題被凸顯出來，而當降雨範圍廣且強度差距大時便會使得空間型態相關係數被拉低，進而導致 BCCA 在未來時期時其空間型態相關係數在夏、冬兩季的差距為最大。

圖 4-5 和圖 4-6 則分別是將圖 4-3 和圖 4-4 中抽出各別的統計降尺度方法在現在和未來時期其月氣候平均的空間型態相關係數以比較這三種統計降尺度方法的統計穩定性，圖 4-5 為 WRF-HiRAM 升尺度部分三種統計降尺度方法的結果，圖 4-6 則為 WRF-MRI 升尺度部分的結果，圖上現在和未來時期後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而在這兩組資料中可看到相同的結果，其中 BCCI 的月氣候平均空間型態相關係數的表現在未來時期(相較於現在時期)平均約只稍稍下降了 0.003~0.004(幾乎沒有衰退)；而 BCCA 則平均下降了約 0.16~0.17 為最多；至於 BCCAQ 則平均下降約 0.12~0.14 位居中間，由此可以說在空間型態相關係數上統計穩定性的表現以 BCCI 為最高，其次為 BCCAQ，BCCA 則為最差。

而圖 4-1、4-2 所呈現的是現在和未來時期降尺度後每日的降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，其中有少部分的天數為低度相關，吾人發現這些低度相關的天數裡大部分是由於原始高解析度動力降尺度資料仍是模式資料，而模式由於參數化過程在模擬降雨值時，常會出現零以下小數點後好幾位的小值，通常我們將這些小值稱為模式的雜訊(noise)，但降尺度後的結果則會將如此小的值輸出為零，因而造成在計算空間型態相關係數時形成低值(低度相關)。然而，如果以雨日之定義(降雨量 $\geq 1\text{mm/day}$)的話，這些零以下小數點後好幾位的小值和零(值)皆會被判定為無降雨，且之所以計算降尺度後日降雨結果的空間型態相關係數主要是通常我們較關注於雨日甚至是強降雨的時候

其降尺度後的結果是否能還原原本的降雨分布位置和強度。因此在這裡吾人設定了一區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 的門檻，並將高解析度動力降尺度資料超過此門檻的天數取出(約有 6、7000 天左右)，之後再計算其三個統計降尺度方法相對應天數的日降雨結果的空間型態相關係數，進而得到圖 4-7、4-8 的結果，圖 4-7 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分的現在時期，圖 4-8 則為未來時期，而由圖 4-7 相較於圖 4-1 可看出，當我們設定了區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 此門檻後，發現原本空間型態相關係數表現非常差(低度相關)的天數就如預期地皆被過濾掉，而剩下超過此門檻的降尺度結果其空間型態相關係數的表現幾乎皆能維持在 0.7 以上(高度相關)，且三個統計降尺度整體平均的表現也有上升的趨勢，統計降尺度方法表現的排名則維持不變。而到了未來時期的圖 4-8 時，相較於圖 4-2 一樣和現在時期有著相似的結果，只是在未來時期超過降雨門檻的降尺度結果其空間型態相關係數的表現僅幾乎皆能維持在 0.4 以上(中度相關)。

Part II 原始模式資料部分

圖 4-9 本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由這張圖可看出，相較於圖 4-1，當低解析度的模式資料由高解析度的模式資料升尺度而得(升尺度部分)替換為 HiRAM、MRI 原始的模式資料(原始模式資料部分)去做降尺度後所計算出的空間型態相關係數明顯降低許多，這屬合理，因升尺度部分在做降尺度時，高、低解析度的模式資料基本上是一樣的，差別只在於解析度，而原始模式資料部分在做降尺度時所用的高、低解析度的模式資料則實為兩種不同的資料，因而造成此差異。不過其統計降尺度方法在整體平均上的表現則和升尺度部分現在時期類似，皆以 BCCA 的表現為最好，其次為 BCCAQ，BCCI 則最差，只是其平均的空間型態相關係數仍只介於低度～中度相關之間，且在原始模式資料的部分(HiRAM、MRI)之間的差距較升尺度部分來得大。

圖 4-10 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分應用於未來時期(RCP8.5)所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。這張圖相較於現在時期(圖 4-9)的表現皆有略微降低的趨勢，其中在 WRF-HiRAM 的部分，此三個統計降尺度方法的平均整體表現皆下降約 0.06 左右，而在 WRF-MRI 的部分，則下降較多約為 0.07~0.09，不過其表現仍是以 BCCA 為最好，BCCI、BCCAQ 則次之。

圖 4-11 則為圖 4-9 在做了月氣候平均後所得，在原始模式資料部分的現在

時期和升尺度部分同樣有著空間型態相關係數在夏季表現較差、在冬季表現較好的趨勢，且其夏、冬兩季的差距更甚升尺度部分，此三個統計降尺度方法在這兩種資料的最大差距皆為 0.3 左右，且三者的曲線走勢相似，BCCA 在每個月份的表現皆略高於 BCCI 和 BCCAQ。

圖 4-12 亦為圖 4-10 在做了月氣候平均後所得，在原始模式資料部分的未來時期相較於現在時期，其在季節和不同統計降尺度方法的表現上皆有同樣的結果，而不同的是除了空間型態相關係數在整體平均上有略降的趨勢之外，其最大的差距在這兩種資料皆可達到 0.4 左右。然而，不管是在升尺度部分，還是原始模式資料部分，在未來時期的空間型態相關係數在夏、冬兩季的最大差距相較於現在時期皆有加大的趨勢，這表示此三個統計降尺度方法應用於未來時期的降尺度時，其在夏季的降雨分布位置或是降雨強度上掌握的能力會較冬季來得更弱一些。

圖 4-13 和圖 4-14 則是將圖 4-11 和圖 4-12 中抽出各別的統計降尺度方法在現在和未來時期其月氣候平均的空間型態相關係數以比較這三種統計降尺度方法的統計穩定性，圖 4-13 為 WRF-HIRAM 原始模式資料部分三種統計降尺度方法的結果，圖 4-14 則為 WRF-MRI 原始模式資料部分的結果，圖上現在和未來時期後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而在這兩組資料中也可看到相同的結果，雖然這三種統計降尺度方法在現在和未來時期的表現皆相差不多，但如以比較統計穩定性的角度來看的話，仍可看到些許差異，其中 BCCI 的月氣候平均空間型態相關係數在未來時期(相較於現在時期)的表現在這兩組資料裡平均下降分別為 0.059、0.079；而 BCCA 則平均分別下降了 0.065 和 0.092；至於 BCCAQ 則平均分別下降 0.061、0.086，而 BCCI 在這兩組資料中皆下降最少，BCCAQ 次之，BCCA 則皆下降最多，因此可以說在空間型態相關係數上統計穩定性

的表現以 BCCI 為最高，其次為 BCCAQ，BCCA 則最低，而此結果與升尺度部分一致。

由於在原始模式資料部分也皆是使用模式資料在做降尺度，因此也會有在升尺度部分所說的高解析度模式資料其降雨值存在零以下小數點後好幾位的小值，而降尺度後之結果輸出為零，進而使得這些雜訊造成在計算空間型態相關係數時形成低值的問題存在，所以吾人也將區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 的門檻套用於此，而得到圖 4-15、4-16 的結果，圖 4-15 為 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分的現在時期，圖 4-16 則為未來時期，而由圖 4-15 相較於圖 4-9 以及圖 4-16 相較於圖 4-10 可看到，相較於在升尺度部分，雖然在計算超過降雨門檻的天數後，空間型態相關係數的整體平均表現在這三個統計降尺度方法同樣皆有略微上升的趨勢，但不同的是，不管是在現在或是未來時期，即使是將未達降雨門檻的天數篩選掉，其空間型態相關係數表現較差(平均值以下)的天數仍舊不占少數，這表示在原始模式資料的部分除了模式降雨雜訊的少許影響之外，其空間型態相關係數表現較差的原因主要還是受到降尺度後的日降雨結果其降雨分布位置和強度與高解析度的動力降尺度資料之間的差異所導致。

在 4.1 節的分析裡我們發現，不管是在升尺度的部分還是原始模式資料的部分，其空間型態相關係數在現在時期的表現皆優於未來時期，且在季節上皆有在台灣夏(雨)季表現較差、冬(乾)季表現較好的現象，而升尺度部分的降尺度結果的表現則較原始模式資料部分的降尺度結果為好。然而，藉由空間型態相關係數我們只能得知降尺度後的日降雨結果其降雨的分布位置和強度在時期(現在、未來)、季節上相對的表現如何，並無法知道好是多好、差是多差，誤差有多大等等的這些訊息，因此我們便需要接下來更進一步的分析。

4.2 平均絕對誤差之分析

平均絕對誤差(Mean Absolute Error, 簡稱 MAE)為將各次測量的絕對誤差取絕對值之後再求取其平均值,而絕對誤差即為測量值-真值,與平均誤差相比,平均絕對誤差由於離差被絕對值化,不會出現正負相抵消的情況,因而,平均絕對誤差能更好地反映測量值誤差的實際情況。因此,平均絕對誤差也常被用來計算並代表降尺度後的結果與原始的高解析度資料之間的誤差關係,其計算方程式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|$$

上式中的 f_i 為測量值,即為本研究中降尺度後日降雨結果的降雨值, y_i 則為真值,在此指的是高解析度動力降尺度資料的降雨值,平均絕對誤差其值介於零~正無窮大($0 \leq MAE \leq \infty$),而當平均絕對誤差越接近零時,則代表降尺度後的日降雨結果與當日的高解析度動力降尺度日降雨資料越一致,而如果平均絕對誤差越大,即表示兩者之間的差異(誤差)越大。

Part I 升尺度部分

圖 4-17 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的平均絕對誤差,圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由這張圖來看,圖上方的平均值代表的是在經過時間平均後,降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在台灣區域(每個網格點)每天平均的降雨(值)差距,在這兩組資料中皆得到相似的結果,在現在時期中是以 BCCA 約接近 1mm/day 的誤差為最小,其次為 BCCAQ 的 1.5~1.6mm/day, BCCI 則以約接近 BCCA

兩倍的 1.8mm/day 為最差，此表現排名與空間型態相關係數一致，由此也說明了當降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的降雨分布位置和強度相關性越高時，其平均絕對誤差也會越小。而在現在時期也可看到 BCCA 在平均絕對誤差最大的時候，其值仍還是比 BCCI、BCCAQ 的最大值低許多。

而在升尺度部分的現在時期 BCCA 之所以為平均絕對誤差最小的原因可能為升尺度部分現在時期的降尺度架構加上 BCCA 做法的特性所致，由於在升尺度部分現在時期的降尺度架構裡所用的高、低解析度的模式資料其實是同一筆資料，只是解析度不同，因此高解析度的模式資料在經過升尺度後會和低解析度的模式資料極為相似，而 BCCA 的做法是依據空間相關性從升尺度後的高解析度模式資料尋找出相加起來和當天低解析度模式資料最相近的 30 天出來，所以基本上每天的低解析度模式資料皆會從升尺度後的高解析度模式資料挑出當天的日降雨資料出來，並給予較大的權重，因而使得 BCCA 此方法在升尺度部分現在時期的平均絕對誤差為最小。

圖 4-18 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期(RCP8.5)的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的平均絕對誤差，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由這張圖可看到，到了未來時期時，由於 BCCI 的平均絕對誤差增長最少(相較於現在時期增長約 0.2mm/day)，而使得此方法的平均絕對誤差為最小(約為 2mm/day)，BCCAQ 的平均絕對誤差則增長稍多(約增長 1.4~1.5mm/day)，而使得此方法的平均絕對誤差居中(約為 3mm/day)，至於 BCCA 的平均絕對誤差則增長最多(增長約 2.2 mm/day)，進而使得此方法的平均絕對誤差為最大(約為 3.2mm/day)，且三者最大的平均絕對誤差其值相較於現在時期皆

大上許多，尤以 BCCA 為最大，此與現在時期的結果皆呈現相反的趨勢。

而之所以造成 BCCA 此降尺度方法應用於升尺度部分的未來時期其平均絕對誤差增長的相較於其他兩種方法大的原因可能仍是升尺度部分未來時期的降尺度架構和不同的統計降尺度方法做法上的差異所致。由於在升尺度部分未來時期的降尺度架構裡用的是現在時期的高解析度模式資料和未來時期的低解析度模式資料去做降尺度，BCCA 的做法是先將現在時期的高解析度模式資料升尺度後去和未來時期的低解析度模式資料做誤差修正，修正其降雨強度後，再從升尺度後的現在時期高解析度模式資料中去尋找與未來時期低解析度模式資料空間相關性高的天數出來以取代原本未來時期低解析度的模式資料，進而得到此降尺度方法於未來時期降尺度後的結果。但由於此方法誤差修正的步驟是在低解析度的情況下進行，然而，未來時期高解析度的模式資料在經過升尺度變成未來時期低解析度的模式資料後，其降雨強度通常會減弱許多，而使得未來時期低解析度的模式資料其降雨強度無法真正代表未來時期高解析度模式資料的降雨強度，因而造成即使是和升尺度後的現在時期高解析度模式資料做完誤差修正後其降雨強度仍不足，最後造成降尺度後的結果其降雨強度相較於未來時期高解析度的模式資料仍有低估的趨勢，使得其平均絕對誤差變得較大。

而 BCCI 的做法則是先將現在時期高解析度的模式資料其月氣候平均值按照月份當作每日的降雨平均值，之後再將未來時期低解析度的模式資料的距平值內插到高解析度模式資料的網格上並與降雨平均值做相乘，最後再將此結果去和現在時期高解析度的模式資料做誤差修正，做完誤差修正後的結果即為 BCCI 此降尺度方法的結果，雖然 BCCI 在最後會拿現在時期高解析度的模式資料去和其結果做誤差修正，進而使得降尺度後的結果其降雨強度可能會因為此修正而減弱，但

因誤差修正的步驟是在高解析度的情況下進行，因此其減弱的程度應較小，再加上 BCCI 會利用到未來時期低解析度模式資料的距平值並進行內插，這其中包含了模式在模擬未來氣候變遷的部分，因而使得 BCCI 在應用於升尺度部分未來時期的降尺度時，其平均絕對誤差來得比 BCCA 小。

由於圖 4-17、4-18 呈現的是升尺度部分現在和未來時期降尺度後日降雨資料與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後每天的平均絕對誤差，但同樣由此兩張圖我們無法確切得知這三種統計降尺度方法降尺度後的日降雨結果其平均絕對誤差在現在和未來時期裡通常在哪些月份或季節誤差較小(表現較好)，什麼時候誤差則較大(表現較差)。因此圖 4-19、4-20 即為將本研究所用的三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期降尺度後日降雨結果的平均絕對誤差在做了月氣候平均後所得，圖 4-19 分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 這三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM 升尺度部分現在和未來時期所得到的結果，圖 4-20 則為 BCCI、BCCA、BCCAQ 這三種統計降尺度方法應用於 WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期所得到的結果，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值，而 Ratio(黑色虛線)則為未來時期的平均絕對誤差除上現在時期的平均絕對誤差而得。而由此兩張圖可看到這三種統計降尺度方法不管是在現在還是未來時期，皆是在台灣的 5~10 月(梅雨、颱風季)其平均絕對誤差較大，此乃是因為在台灣的梅雨和颱風季的降雨其強度和範圍通常皆較冬季的鋒面降雨來得大，因此當降尺度後的日降雨結果在此兩雨季的降雨強度和分布位置與原始高解析度的模式資料有差距時，其平均絕對誤差通常也會來得較大，而由 4.1 節空間型態相關係數的分析(圖 4-3、4-4)也可看到，在升尺度部分不管是現在還是未來時期，其 5~10 月的空間型態相關係數相較於冬季的表

現皆是較差的，進而驗證了當降尺度後的日降雨結果其降雨強度和分布位置與原始高解析度的模式資料差異越大時，其平均絕對誤差也會來得越大。

而關於平均絕對誤差在未來時期相較於現在時期月氣候平均增幅(Ratio)的部分，可看到其中以 BCCA 為最大，其平均增幅約為 3 倍，其次為 BCCAQ 的 1.7~1.84 倍，BCCI 的 1~1.1 倍則最小，造成此增幅之差異的原因已在此前兩段所述，至於 Ratio 比值的振幅則大致上皆因平均絕對誤差在現在和未來時期裡在季節上有著同相位的趨勢，因此較不隨季節變化且起伏變化小，除了 BCCA 因在現在時期其平均絕對誤差隨季節變化的起伏較小而使得 Ratio 比值在夏季有稍微較高的趨勢。

因本研究所使用的統計降尺度方法皆能應用於日(降雨)資料的降尺度上，因而擁有高時間解析度的特性，因此上述的探討皆是著重於平均絕對誤差隨時間(每天、月氣候平均)變化的分析，而要看平均絕對誤差其整體表現隨時間的變化則勢必需將台灣的區域範圍做平均以求其整體表現。然而，關於降尺度後的日降雨結果其平均絕對誤差在區域上的分布情形也是我們所好奇與關心的。因此圖 4-21、4-22 即為本研究所使用的三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期在做了時間平均後的平均絕對誤差其區域分布圖，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。此兩張圖中由左而右的三張圖依序為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖 4-21 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分的現在時期，圖 4-22 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期。首先，由圖 4-21 這兩組資料的現在時期中可看到，BCCA 相較於 BCCI 和 BCCAQ 的平均絕對誤差在區域分布上皆較小，而此三種統計降尺度方法的平均絕對誤差在區域分布上的共同點為在台灣西半部和台灣海峽此兩個年總降雨量較少之區

域相較於台灣東北部及其沿海、東半部(中央山脈)和東部外海這些年總降雨量較多之區域其平均絕對誤差要來得較小，其中 BCCA 的結果在此兩區域的平均絕對誤差約為 0~1mm/day 對上 1~2mm/day，BCCI 和 BCCAQ 則是約為 0~2mm/day 對上 1~3mm/day，而台灣東北部(宜蘭)相較於台灣其他平地地區的平均絕對誤差要來得較大，不過平均絕對誤差最大的地方還是以中央山脈為主，且平均絕對誤差的極大值也都集中於此，這可能導因於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組動力降尺度資料在夏季中央山脈的降雨強度皆較高，且降雨強度的極大值也都出現於此，而由前面空間型態相關係數的分析也得出降尺度後的日降雨結果其整體表現在夏季較差，進而造成此結果，也使得平均絕對誤差在區域分布上有著山區(中央山脈)大於平地的現象。

而到了未來時期的圖 4-22 時，可看出平均絕對誤差在區域分布上的表現和現在時期相似之外，統計降尺度方法的表現由原本的 BCCA 變成以 BCCI 表現較佳，在上述兩區域 BCCI 的平均絕對誤差上升到約為 1~2mm/day 對上 1~3mm/day，BCCA 和 BCCAQ 則上升到約為 1~3mm/day 對上 2~5mm/day，且 BCCA 和 BCCAQ 其平均絕對誤差的極大值在中央山脈皆有增多的趨勢，而這三種統計降尺度方法降尺度後的日降雨結果其平均絕對誤差從現在到未來時期的區域分布圖可大致看出幾乎在所有的區域皆有增加的趨勢。然而，平均絕對誤差在未來時期相對於現在時期在區域分布上的增幅，我們較無法從各別的兩張圖判別出，因此圖 4-23 即分別為將圖 4-22 除上圖 4-21 後所得，也就是將未來時期除上現在時期而得，相除之用意便是要看誤差增長的倍率，而圖 4-23 則分別為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分平均絕對誤差比值(未來時期/現在時期)的結果，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均

值、最大值。整體來看可看到這三種統計降尺度方法的平均絕對誤差在台灣西半部和台灣海峽此兩區域誤差增長的倍率是較台灣東半部(包括中央山脈)和東部外海要來得大，而單看這三種統計降尺度方法平均整體表現的話，可看到其中以 BCCI 增長的平均倍率約為 1.15 倍左右為最低，且也只有 BCCI 在某些網格點(最接近白色的點)的比值小於 1，此表示在這些網格點中其未來時期的平均絕對誤差是低於現在時期的；而其次則為 BCCAQ 的 2 倍，且其最低的增長倍率皆約在 1.4 倍以上；而 BCCA 增長的平均倍率 3.4 倍則為最高，且其最低的增長倍率皆在 2.3 倍以上，此表示在這兩組資料中皆是以 BCCI 的統計穩定性較好，其次為 BCCAQ，BCCA 則最差。

由於這三種統計降尺度方法其平均絕對誤差的比值在台灣區域的範圍裡幾乎皆大於 1，而當比值 >1 時，即表示統計降尺度方法應用於未來時期的平均絕對誤差大於應用於現在時期，此也表示了統計降尺度方法在應用於未來時期時違反了其統計關係仍維持穩定的前提假設(stationarity assumption)。

Part II 原始模式資料部分

圖 4-24 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的平均絕對誤差，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由這張圖同樣可看到，在原始模式資料部分的現在時期這三種統計降尺度方法的表現和升尺度部分的現在時期(圖 4-17)一樣，在時間平均之後皆以 BCCA 的平均絕對誤差為最小，其次為 BCCAQ，BCCI 則最大，此表現排名與空間型態相關係數(圖 4-9)也相吻合，且 BCCA 平均絕對誤差的最大值和 BCCI、BCCAQ 平均絕對誤差的最大值也仍相差許多(尤以 WRF-HiRAM 這組資料)，不過和升尺度部分現在時期不同的是，三者之間平均值的差距著實不大，且由於高、低解析度的模式資料為不同的兩種資料，而使得降尺度後的日降雨結果與原始高解析度模式資料的平均絕對誤差皆可達到 5~6.5mm/day 的差距，三者平均絕對誤差的最大值也大上許多。

圖 4-25 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的平均絕對誤差，圖上方不同統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由這張圖可看到，當這三種統計降尺度方法應用於未來時期時，相較於現在時期其平均絕對誤差在 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組資料中皆約增加了約 1mm/day 的誤差，使得降尺度後的日降雨結果與原始高解析度模式資料的平均絕對誤差來到 6.2~7.3mm/day，而此時統計降尺度方法的表現排名則和現在時期不太一樣，且在這兩組資料中也有不同的結果，在 WRF-HiRAM 這組資料裡是以

BCCAQ 的平均絕對誤差為最小，其次為 BCCI，BCCA 則最大；而在 WRF-MRI 這組資料裡則是以 BCCA 的平均絕對誤差為最小，其次為 BCCI 和 BCCAQ，不過在這兩組資料中其三者之間的差距著實不大。至於統計降尺度方法應用於未來時期在原始模式資料部分和升尺度部分的結果不盡相同的原因為使用不同的低解析度模式資料所致，在升尺度部分未來時期裡 BCCI 的平均絕對誤差增長較少的原因為其低解析度的模式資料為高解析度的模式資料升尺度後而得，基本上為同一組資料(只是解析度不同)，而 BCCI 的做法即是內插低解析度模式資料的距平值，因此其降尺度後的結果相較於 BCCA 和 BCCAQ 會較接近於未來時期高解析度的模式資料；然而，在原始模式資料部分未來時期裡所使用的高、低解析度模式資料分別為現在時期高解析度的動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和未來時期低解析度的原始模式資料(HiRAM & MRI)，此兩組資料為不同的資料，因此 BCCI 失去了因研究架構而擁有較不公平的優勢；但以統計穩定性來看，仍是以 BCCI 其平均絕對誤差在這兩組資料中分別增長 0.8mm/day、0.98mm/day 為最少，其次為 BCCAQ 的 0.84mm/day、1.04mm/day，BCCA 的 1.11mm/day、1.14mm/day 為最多，而此與升尺度部分的結果一致。

由於圖 4-24、4-25 呈現的是原始模式資料部分現在和未來時期降尺度後日降雨資料與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後每天的平均絕對誤差，但同樣由此兩張圖我們無法確切得知這三種統計降尺度方法降尺度後的日降雨結果其平均絕對誤差在現在和未來時期裡通常在哪些月份或季節誤差較小(表現較好)，什麼時候誤差則較大(表現較差)。因此在這裡吾人做了和升尺度部分同樣的分析，圖 4-26、4-27 即為將本研究所用的三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期降尺度後日降雨結果的

平均絕對誤差在做了月氣候平均後所得，圖 4-26 為 BCCI、BCCA、BCCAQ 這三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在和未來時期所得到的結果，圖 4-27 則為 BCCI、BCCA、BCCAQ 這三種統計降尺度方法應用於 WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期所得到的結果，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值，而 Ratio(黑色虛線)則同樣為未來時期的平均絕對誤差除上現在時期的平均絕對誤差而得。由此兩張圖同樣可看到這三種統計降尺度方法不管是在現在還是未來時期，皆是在台灣的 5~10 月(梅雨、颱風季)其平均絕對誤差較大，此結果與升尺度部分一致，且在此同時其 5~10 月的空間型態相關係數皆較冬季來得差(圖 4-13、4-14)，進而同樣得到進一步的驗證，另一值得注意的是在原始模式資料部分的降尺度裡 WRF-HiRAM 這組資料不管是現在還是未來時期其平均絕對誤差在季節上的最大差距(現在時期約 9~10mm、未來時期約 12~13mm)皆較 WRF-MRI 這組資料(現在時期約 7~8mm、未來時期約 9~10mm)來得大。

而至於平均絕對誤差在未來時期相較於現在時期月氣候平均增幅(Ratio)的部分，可看到由於這三種統計降尺度方法在現在和未來時期的平均絕對誤差其值和增幅皆相差不多，且現在和未來時期的平均絕對誤差在季節上具有同相位的變化，因而使得其比值(Ratio)較不隨季節而變化。

在看完了平均絕對誤差隨時間(每天、月氣候平均)變化的結果分析之後，接著同樣來看其在區域分布上的情況，圖 4-28、4-29 為本研究所使用的三種統計降尺度方法應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期在做了時間平均後的平均絕對誤差其區域分布圖，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值，此兩張圖中由左而右的三張圖依序為 BCCI、BCCA、BCCAQ

的結果，圖 4-28 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分的現在時期，圖 4-29 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分的未來時期。由圖 4-28、4-29 可看到，平均絕對誤差在區域分布上的情況和升尺度部分相似，皆為在台灣西部及台灣海峽此兩年總雨量較少之區域較小，在台灣東部及其外海較大，台灣東北部(宜蘭)較其他平地地區大，且平均絕對誤差的極大值皆集中於中央山脈，以及未來時期相較於現在時期幾乎在所有的區域其平均絕對誤差皆有增長的情形。由圖 4-28 可看到這三種統計降尺度方法在 WRF-HiRAM 原始模式資料部分的現在時期所得到的日降雨結果在經過時間平均後其平均絕對誤差在台灣西部和台灣海峽約為 3~5mm/day(低於區域平均值)，在台灣東部及其外海其平均絕對誤差皆約在 5mm/day 以上(花東縱谷稍低)，在台灣東北部(宜蘭)則為 8~10mm/day，宜蘭南端甚至可達 10mm/day 以上，而中央山脈的極大值則可達到 25~30mm/day 的誤差範圍；到了未來時期的圖 4-29 可看到，平均絕對誤差在台灣西部和台灣海峽上升到約為 4~6mm/day(仍舊低於區域平均值)，在台灣東部及其外海上升到皆約在 7mm/day 以上(花東縱谷除外)，在台灣東北部(宜蘭)則仍維持在 8~10mm/day，宜蘭南端同樣可達 10mm/day 以上，而中央山脈的極大值則更可達到 30~35mm/day 的誤差範圍。而在 WRF-MRI 原始模式資料部分的現在時期(圖 4-28)所得到的日降雨結果在經過時間平均後其平均絕對誤差在台灣西部和台灣海峽約為 2~4mm/day(低於區域平均值)，在台灣東部及其外海皆約在 5mm/day 以上(花東縱谷除外)，在台灣東北部(宜蘭)則為 8~10mm/day，宜蘭南端甚至可達 10mm/day 以上，而中央山脈的極大值則可達到 25~30mm/day 的誤差範圍；到了未來時期的圖 4-29 則可看到，平均絕對誤差在台灣西部和台灣海峽上升到約為 3~5mm/day(仍舊低於區域平均值)，在台灣東部及其外海上升到皆約在 6mm/day

以上(花東縱谷除外)，在台灣東北部(宜蘭)則仍維持在 8~10mm/day，宜蘭南端同樣可達 10mm/day 以上，而中央山脈的極大值則同樣更可達到 30~35mm/day 的誤差範圍。

上述皆是在描述平均絕對誤差在現在和未來時期在區域分布上的情形，然而，我們較無法從各別的兩張圖判別出平均絕對誤差的增幅在區域分布上的情況，因此圖 4-30 即為將圖 4-29 除上圖 4-28 後所得，也就是將未來時期除上現在時期後而得，相除之用意便是要看誤差增長的倍率，而圖 4-30 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分平均絕對誤差比值(未來時期/現在時期)的結果，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。在 WRF-HiRAM 這組資料裡可看到，這三種統計降尺度方法其平均絕對誤差的比值在台灣西半部、台灣海峽及中央山脈中段(皆約在 1.15 倍以上)皆較台灣東半部及其外海(約在 0.9~1.1 倍)要來得大，表示前面所述的這三個區域其平均絕對誤差的增幅較大；至於統計降尺度方法的表現則可看到平均增幅以 BCCA 的 1.2 倍為最高，其次為 BCCAQ 的 1.16 倍，BCCI 的 1.15 倍則為最低。而在 WRF-MRI 這組資料裡則可看到，這三種統計降尺度方法其平均絕對誤差的比值則在台灣海峽有明顯較高的增幅(約皆在 1.3 倍以上)，不過中、南部沿海地區及東南部相較於其他地區也有稍微較高的比值，至於統計降尺度方法的表現則同樣可看到平均增幅以 BCCA 的 1.26 倍為最高，其次為 BCCAQ 的 1.23 倍，BCCI 的 1.21 倍則為最低，此表示在這兩組資料中皆是以 BCCI 的統計穩定性較好，其次為 BCCAQ，BCCA 則最差，此結果與升尺度部分一致。而在這兩組資料裡這三種統計降尺度方法的比值在台灣區域也幾乎皆大於 1，此亦表示如升尺度部分所述，當比值 >1 時，即表示統計降尺度方法應用於未來時期的平均絕對誤差大於

應用於現在時期，同時也表示了統計降尺度方法在應用於未來時期時違反了其統計關係仍維持穩定的前提假設(stationarity assumption)。

4.3 降雨值的強度與分布之分析

在經過了平均絕對誤差的分析之後，我們知道了降尺度後的日降雨結果其每天降雨平均的誤差大小，和其隨月份(季節)變化的情況，以及其在區域分布上的情形。然而，由於平均絕對誤差是將原始高解析度的動力降尺度資料和降尺度後的日降雨結果之間的差值取絕對值，因此我們無法得知降尺度後的日降雨結果其降雨強度相較於原始高解析度的動力降尺度資料是較強所造成的誤差，還是是較弱所造成的誤差，也就是說我們無法得知本研究所使用的這三種統計降尺度方法其得到的降尺度結果在降雨強度上通常會有高估還是低估的情況。因此，在此吾人將原始高解析度的動力降尺度資料和降尺度後的日降雨結果的降雨值(所有網格)挑出，並畫出機率分布圖(PDF)和累積機率分布圖(CDF)，藉以進行降雨值的強度與分布之分析。

所謂的機率分布圖指的是機率密度函數(Probability Density Function，簡稱 PDF)在數學中，描述的是一連續型隨機變量 X 的輸出值，在某個確定的取值點附近的可能性的函數。簡單地說，即是指一變量 X 在某個值(域)所發生的機率密度大小的意思。圖中橫軸代表的是變量 X 其值的範圍，縱軸則為機率密度值，而變量 X 其值落在某個範圍內的機率為機率密度函數在這個區域上的積分，此可用下列數學式表示：

$$P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) = \int_a^b f_X(x) dx$$

然而，為了讓機率分布圖能較直觀的呈現降雨的機率分布，本研究所呈現的降雨

機率分布圖皆已將縱軸(Y 軸)的機率密度值轉換為機率值(probability)，這樣便可以直接看出降雨在各個強度下所發生的機率，以及方便於做不同降尺度後的結果與資料的比較。

而累積機率分布圖指的是累積分布函數(Cumulative Distribution Function，簡稱 CDF)在數學中，為機率密度函數的積分，其能完整描述一實隨機變數 X 的機率分布。簡單來說，即是將機率分布圖在各個值所發生的機率做累加的動作而得。圖中橫軸代表的是一隨機變數 X 其值的範圍，縱軸則為累積機率值。對於任一隨機變數 X ，其累積分布函數的定義如下：

$$F_X(x) = P(X \leq x)$$

上式中的小寫 x 為任一實數。

Part I 升尺度部分

圖 4-31 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，因 X 軸所代表的降雨值其範圍較廣(1~2000 多 mm)，因此在這裡吾人將 X 軸的範圍固定在 0~1500mm，截取掉尾端極(大)值發生機率極低的部分(即使留下尾端的極值範圍也會因其發生機率極低而不容易看出其降雨值的分布)，其目的是為了拉長 X 軸的間距，以利於我們能更清楚地看出整段降雨範圍其在各個降雨區間所發生的機率為何，此外，吾人也將 Y 軸的機率值取對數($\log 10$)，此目的也是讓中、後段降雨範圍的發生機率能夠較凸顯出來之效果。由這兩種資料可看到相似的結果，而由於疊圖的關係基本上原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM &

WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的曲線大部分是重疊的(藍色)，唯獨 BCCA 大多不重疊，而實際上在一開始(接近 0mm，實際為 1mm)，BCCA 此統計降尺度方法所得到的日降雨結果裡所發生的機率是較原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的日降雨結果為高的(較不明顯)，此現象也可由中位數反應出，而 BCCA 的平均值和最大值也皆小於原始高解析度動力降尺度資料和 BCCI、BCCAQ 的結果，此反映在降雨值約在 50mm 之後 BCCA 所發生的機率皆小於其他三者，說明了 BCCA 此統計降尺度方法所得到的日降雨結果其在降雨強度的還原上會有低估的情況，此也吻合了前述其方法的特性。而 BCCAQ 的做法是拿 BCCA 的結果去和 BCCI 的結果做誤差修正，因此其降雨強度能趨近於 BCCI，這同時也說明了 BCCA 的平均絕對誤差在降雨強度上是由低估所造成，而 BCCI 和 BCCAQ 在升尺度部分的現在時期尚能夠還原原始高解析度動力降尺度資料的降雨強度。

而圖 4-32 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，由於如將累積機率分布圖畫出所有範圍(1~2000 多 mm)的降雨值的話，其 CDF 曲線會被壓縮至幾乎看不出彼此之間的差異，因此在這裡僅畫出 1~100mm 此發生機率差異較大的降雨值範圍的累積機率分布圖，同時也能將機率分布圖(PDF)因 Y 軸取對數($\log_{10}$)而使得其降雨前段(0~100mm)被壓縮的區域其機率分布放大出來看。由這兩種資料可看到相似的結果，由於疊圖的關係基本上原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的曲線是重疊

的(藍色)，當所有時間所有網格 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值從 $1\sim 20\text{mm}$ 所發生的機率做累加後，可看到 BCCA 的日降雨結果其累積的機率已達 80%以上，至於原始高解析度動力降尺度資料和 BCCI、BCCAQ 的日降雨結果則尚未到達或接近 80%而已，且明顯可看到在降雨值 60mm 之前所累積的機率值皆是 BCCA 高於其他三者，此表示由於 BCCA 的日降雨結果在小雨值範圍的發生機率較高，因而使得其 CDF 曲線在一開始便上升的較快。

圖 4-33 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，在此同樣將 X 軸的範圍固定在 $0\sim 1500\text{mm}$ ，Y 軸所代表的機率值取對數($\log_{10}$)。由這兩種資料也可看到相似的結果，由於疊圖的關係基本上 BCCI 和 BCCAQ 的曲線幾乎是重疊的(藍色)，到了未來時期時，其中和現在時期最大的差別在於 BCCI 和 BCCAQ 的日降雨結果其降雨值的強度和分布已無法還原至與原始高解析度動力降尺度資料一致，由圖中可看到雖然較不明顯但 BCCI 和 BCCAQ 的 PDF 曲線(藍色)在一開始(降雨值 1mm)其發生的機率皆略高於原始高解析度動力降尺度資料的 PDF 曲線(黑色)，而 BCCA 的 PDF 曲線(綠色)則同樣較不明顯地可看到其發生機率又高於 BCCI 和 BCCAQ 的 PDF 曲線，在降雨值中段(約 $500\sim 1200\text{mm}$) BCCI 和 BCCAQ 其發生的機率則有略低於原始高解析度動力降尺度資料的情形，而 BCCA 則是從降雨值約 50mm 以上便持續有發生機率較其他三者低的情況，且由圖上的中位數、平均值、最大值可得到同樣的結果，也就是說本研究所使用的這三種統計降尺度方法在應用於未來時期升尺度部分的降尺度時，因使用的高解析度模式

資料為現在時期的資料(比照傳統使用現在時期的觀測資料於未來時期的降尺度應用)，因此其降尺度後的日降雨結果在降雨強度上相較於未來時期高解析度的動力降尺度資料皆有低估的趨勢，其中 BCCI 和 BCCAQ 此兩個統計降尺度方法低估的程度相似且較少，而 BCCA 此方法造成低估的程度則較為嚴重。

圖 4-34 則為 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，由於如將累積機率分布圖畫出所有範圍(1~2000 多 mm)的降雨值的話，其 CDF 曲線會被壓縮至幾乎看不出彼此之間的差異，因此在這裡同樣僅畫出 1~100mm 此發生機率差異較大的降雨值範圍的累積機率分布圖。由這兩種資料也可看到相似的結果，由於疊圖的關係基本上 BCCI 和 BCCAQ 的曲線是重疊的(藍色)，當所有時間所有網格 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值從 1~20mm 所發生的機率做累加後，可看到 BCCA 的日降雨結果其累積的機率已達 80%以上，而 BCCI 和 BCCAQ 則接近 80%，至於原始高解析度動力降尺度資料則和 BCCI、BCCAQ 差不多但稍微再低一些(較不明顯)，且同樣明顯可看到在降雨值 60mm 之前所累積的機率值皆為 $BCCA > BCCI, BCCAQ > \text{原始高解析度動力降尺度資料}$ ，此顯示了由於降雨在小雨範圍發生的機率為 $BCCA > BCCI, BCCAQ > \text{原始高解析度動力降尺度資料}$ ，因而使得 BCCA 的 CDF 曲線在一開始上升的最快，其次為 BCCI 和 BCCAQ，原始高解析度動力降尺度資料則最慢(較不明顯)。

Part II 原始模式資料部分

圖 4-35 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，在此同樣將 X 軸的範圍固定在 $0\sim 1500\text{mm}$ ，Y 軸所代表的機率值取對數 ($\log_{10}$)。由這兩種資料也可看到相似的結果，由於疊圖的關係基本上原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的曲線幾乎是重疊的(藍色)，唯獨 BCCA 大多不重疊，而實際上在一開始(降雨值 1mm)，BCCA 此統計降尺度方法所得到的日降雨結果裡所發生的機率是較原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的日降雨結果為高的(較不明顯)，且在 WRF-MRI 這組資料裡差距較大，此現象也可由中位數反應出，而 BCCA 的平均值和最大值也皆小於原始高解析度動力降尺度資料和 BCCI、BCCAQ 的結果，此反映在降雨值約在 50mm 之後 BCCA 所發生的機率皆小於其他三者，說明了 BCCA 此統計降尺度方法所得到的日降雨結果其在降雨強度的還原上會有低估的情況，此結果也與升尺度部分一致，且也進一步說明了 BCCA 的平均絕對誤差在降雨強度上是由低估所造成，而 BCCI 和 BCCAQ 雖在平均值有稍微高於原始高解析度動力降尺度資料的現象，但因差距甚小(小數點後兩位)，因此可以說此兩統計降尺度方法在原始模式資料部分的現在時期尚能夠還原原始高解析度動力降尺度資料的降雨強度。

圖 4-36 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨

值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，由於與升尺度部分有同樣的情況，因此在這裡僅畫出 $1\sim 100\text{mm}$ 此發生機率差異較大的降雨值範圍的累積機率分布圖。由這兩種資料可看到相似的结果，由於疊圖的關係基本上原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)和 BCCI、BCCAQ 的曲線幾乎是重疊的(藍色)，當所有時間所有網格 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值從 $1\sim 20\text{mm}$ 所發生的機率做累加後，可看到 BCCA 的日降雨結果其累積的機率已達 80%以上，至於原始高解析度動力降尺度資料和 BCCI、BCCAQ 的日降雨結果則尚未到達或接近 80%而已，且明顯可看到在降雨值 60mm 之前所累積的機率值皆是 BCCA 高於其他三者，此表示由於 BCCA 的日降雨結果在小雨值範圍的發生機率較高，因而使得其 CDF 曲線在一開始便上升的較快。

圖 4-37 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，在此同樣將 X 軸的範圍固定在 $0\sim 1500\text{mm}$ ，Y 軸所代表的機率值取對數($\log_{10}$)。由這兩種資料也可看到相似的结果，由於疊圖的關係基本上 BCCI 和 BCCAQ 的曲線是重疊的(藍色)，到了未來時期時，其中和現在時期最大的差別在於 BCCI 和 BCCAQ 的日降雨結果其降雨值的強度和分布已無法還原至與原始高解析度動力降尺度資料一致，由圖中可看到雖然較不明顯但 BCCI 和 BCCAQ 的 PDF 曲線(藍色)在一開始(降雨值 1mm)其發生的機率皆略高於原始高解析度動力降尺度資料的 PDF 曲線(黑色)，而 BCCA 的 PDF 曲線(綠色)則同樣較不明顯地可看

到其發生機率又高於 BCCI 和 BCCAQ 的 PDF 曲線。在 WRF-HiRAM 這組資料中在降雨值約為 100mm 左右和大於 1000mm 此兩區段，BCCI 和 BCCAQ 其發生的機率皆有略低於原始高解析度動力降尺度資料的情形；而在 WRF-MRI 這組資料中則是 BCCI 和 BCCAQ 普遍皆有略低於原始高解析度動力降尺度資料的情況，至於 BCCA 的 PDF 曲線(綠色)在這兩組資料中則明顯地可看到其發生機率同樣也是低於其他三者，且由圖上的中位數、平均值、最大值可得到同樣的結果，也就是說本研究所使用的這三種統計降尺度方法在應用於未來時期原始模式資料部分的降尺度時，因同樣使用的高解析度模式資料為現在時期的資料(比照傳統使用現在時期的觀測資料於未來時期的降尺度應用)，因此其降尺度後的日降雨結果在降雨強度上相較於未來時期高解析度的動力降尺度資料皆有低估的趨勢，其中 BCCI 和 BCCAQ 此兩個統計降尺度方法低估的程度相似且較少，而 BCCA 此方法造成低估的程度則較為嚴重，此結果與升尺度部分一致。

圖 4-38 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各別挑出所有時間所有網格其降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值出來畫的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值，由於與升尺度部分有同樣的情況，因此在這裡僅畫出 1~100mm 此發生機率差異較大的降雨值範圍的累積機率分布圖。由這兩種資料可看到相似的結果，由於疊圖的關係基本上 BCCI 和 BCCAQ 的曲線是重疊的(藍色)，當所有時間所有網格 $\geq 1\text{mm}$ 的降雨值從 1~20mm 所發生的機率做累加後，可看到 BCCA 的日降雨結果其累積的機率已達 80%以上，而 BCCI 和 BCCAQ 則接近 80%，至於原始高解析度動力降尺度資料則又比 BCCI 和 BCCAQ 稍低，且同樣明顯可看到在降雨值

60mm 之前所累積的機率值皆為 $BCCA > BCCI、BCCAQ > \text{原始高解析度動力降尺度資料}$ ，此顯示了由於降雨在小雨範圍發生的機率為 $BCCA > BCCI、BCCAQ > \text{原始高解析度動力降尺度資料}$ ，因而使得 BCCA 的 CDF 曲線在一開始上升的最快，其次為 BCCI 和 BCCAQ，原始高解析度動力降尺度資料則最慢，此結果也與升尺度部分一致。

在經過了降雨值的強度與分布的分析之後，我們知道了本研究所使用的這三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)所得到降尺度後的日降雨結果，其在升尺度和原始模式資料部分皆得到相同的結論，也就是應用在現在時期時，BCCI 和 BCCAQ 在降雨強度上尚能夠還原至與原始高解析度動力降尺度資料一致，但 BCCA 在此時已因其方法的做法與特性而造成降尺度後的日降雨結果在降雨強度上有稍微低估的情形，而應用於未來時期時，發現這三種方法所得到的日降雨結果在降雨強度上皆有低估的情況，其中 BCCI 和 BCCAQ 低估的程度較輕微，BCCA 低估的程度則較嚴重。

4.4 時間序列相關係數之分析

在探討完前兩大面向(空間型態相關性、降雨值的強度與分布)的分析之後，便是最後一個面向的分析—降雨事件的連續性，所謂的連續性即是指在時間序列上的連續程度，而降雨事件的連續性便是想要瞭解原始高解析度的動力降尺度資料與降尺度後的日降雨結果其兩者的降雨值在每天的時間序列中其連續的變化是否具有相關性，而在此吾人同樣是利用 4.1 節所介紹的皮爾森相關係數(Pearson's correlation coefficient)來計算原始高解析度的動力降尺度資料與降尺度後的日降雨結果其兩者之間每個網格的降雨值在每天的時間序列中其連續變化的相關性，如相關係數高即表示兩者的降雨值在時間序列中其連續的起伏變化呈高度相關，意即降尺度後的日降雨結果較能掌握原始高解析度的動力降尺度資料其降雨事件的連續性，反之則亦然。

Part I 升尺度部分

圖 4-39 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料可看到相似的結果，在升尺度部分的現在時期裡，這三種統計降尺度方法在降雨值的时间序列相關係數上的表現是以 BCCA 為最好(平均約為 0.992)，其次為 BCCAQ(平均約為 0.971)，BCCI 則最差(平均約為 0.962)。在這兩組資料中，BCCA 其幾乎所有的網格值皆在 0.98 以上，而 BCCI 和 BCCAQ 則在中南部、中央山脈其值有表現較差的趨勢，尤以 BCCI 較為

嚴重，而此表現排名其實並不意外，由 4.1 節空間型態相關性之分析我們得知了在經過所有時間的平均之後 BCCA 的表現為最好，其次為 BCCAQ，BCCI 則最差，這表示每一天在計算台灣區域所有網格降雨的空間型態相關係數時可以說 BCCA 的表現通常會是最好，因此當所有網格的降雨值在每一天(時間序列)所計算出的空間型態相關係數表現較好時，單一網格點的降雨值其隨時間變化的時間序列相關係數理應也會表現得較好。然而，在 4.3 節降雨值的強度與分布之分析中，我們得知了 BCCA 其降尺度後的日降雨結果在強度上通常較弱，不過時間序列相關係數的計算則是依據兩者的降雨值隨時間序列其起伏變化的趨勢是否一致(相似程度)而定，而不受兩者之間其值是否相近、一方普遍低於另一方或一方普遍高於另一方所影響，因此僅能說 BCCA 其降雨值(事件)隨時間變化的趨勢與原始高解析度動力降尺度資料較一致，至於降雨值的強度則可能普遍較原始高解析度動力降尺度資料來的弱，而 BCCI 和 BCCAQ 則是其降雨值(事件)隨時間變化的趨勢與原始高解析度動力降尺度資料較不一致，因而表現得較差，表現較差的原因可能為 BCCI 和 BCCAQ 皆是在高解析度的網格下做誤差修正(而不像 BCCA 是在低解析度的網格下做誤差修正)，因此其降雨值可能會做較大幅度的修正，較有可能把原本的小值修正成大值、大值修正成小值的情況發生，進而造成其降尺度後的降雨值隨時間的起伏變化與原始高解析度動力降尺度資料較不一致，但其兩者的降雨值在強度上是較 BCCA 接近於原始高解析度動力降尺度資料的。

圖 4-40 則為 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料也可看到相似的結果，到了升

尺度部分的未來時期時，除了這三種統計降尺度方法的表現皆有所下降之外，最大的差別在於這三種統計降尺度方法的表現排名有所改變，此時變成 BCCI 的表現為最好(平均約為 0.954)，其次為 BCCAQ(平均約為 0.914)，BCCA 則變為最差(平均約為 0.907)，這也表示了從現在時期到未來時期時，BCCA 的日降雨結果其降雨值的時間序列相關係數衰退的最多，下降了約 0.085，其次是 BCCAQ 下降約 0.057，BCCI 則僅下降約 0.008(幾乎無衰退現象)，這也反映出了 BCCI 其統計穩定性較佳、BCCA 則較差的特性；而在區域分布上的情況，BCCI 和現在時期相似，其降雨值的時間序列相關係數表現較差的區域主要仍集中於中央山脈，而 BCCA 和 BCCAQ 表現較好的區域則是集中於中央山脈高度位於 1000m 以上和台灣周圍海域之地區(仍有些許表現較差的網格點)，其降雨值的時間序列相關係數在這兩組資料中(WRF-HiRAM & WRF-MRI)分別皆在 0.92、0.9 以上，而在 WRF-HiRAM 這組資料中，山區(1000m 以上)和平地的差距較大。

Part II 原始模式資料部分

圖 4-41 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料可看到相似的結果，在原始模式資料部分的現在時期裡，這三種統計降尺度方法在降雨值的时间序列相關係數上的表現仍是以 BCCA 為最好，其次為 BCCAQ，BCCI 則最差，此與升尺度部分一致，相較於升尺度部分其值相對較低的原因乃是因高、低解析度的模式資料不為同一筆資料(升尺度部分為同一筆，只是解析度不同)，在此這三種統計降尺度方法在 WRF-MRI 這組資料中的表現較在 WRF-HiRAM 這組資料中為好，而從區域分布上的情況來看，三者表現較好和較差的區域皆相近。在 WRF-HiRAM 這組資料中，三者表現較好的區域皆位於中部以北的西半部地區和中央山脈南段，其值皆可達到 0.7 以上(高度相關)，而表現較差的區域則集中於中南部地區和東部外海，其值皆約在 0.55 以下(BCCA 較高)；而在 WRF-MRI 這組資料中，三者皆除了在中南部的表現較差之外，其餘地區的表現皆相對較好(其值皆在 0.55 以上)。

圖 4-42 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。由這兩種資料也可看到相似的結果，到了原始模式資料部分的未來時期時，這三種統計降尺度方法的表現與升尺度部分同樣有下降的現象，而與升尺度部分不同的是此時依舊是 BCCA 的表現較好，其次則為相差不多的 BCCI 和 BCCAQ，不過三者之間的差距較現在時期為小，此

乃是因為從現在時期到未來時期時 BCCA 其降雨值的時間序列相關係數仍舊是衰退最多的，其在兩組資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)中分別下降了 0.14、0.123，其次為 BCCAQ 的 0.124 和 0.112，BCCI 則分別下降 0.119 和 0.105 為最低，此降幅的排名則與升尺度部分一致；而從區域分布上的情況來看，三者表現較好和較差的區域皆相近，在 WRF-HiRAM 這組資料中，BCCI 和 BCCAQ 僅在中部以北和中央山脈南段的表現較好(其值皆在 0.5 以上)，BCCA 則是中部以北和整段中央山脈的表現皆較好，尤以在中央山脈的表現更為突出，其值約皆可達 0.6 以上，而三者表現較差的區域皆位於中南部地區，其值皆在 0.5 以下；在 WRF-MRI 這組資料中，三者表現皆較好的區域主要集中在中央山脈 1000m 以上的山區和北部，其值皆可達 0.65 以上，BCCA 的表現也較 BCCI 和 BCCAQ 為好且範圍較大，而三者表現較差的區域則皆位於中南部地區和海岸山脈與花東縱谷一帶以及東部外海，尤以東部這帶的表現較差，其值皆約在 0.55 以下。

由 4.3 節的分析中我們得知了降尺度後的日降雨結果在降雨強度上普遍會有低估的情況發生後，吾人想瞭解其低估的情形對於其在極端降雨指標的表現影響有多大，因極端降雨指標是用於分析長時間降雨資料的氣候特徵，而降尺度後的日降雨結果其氣候特徵是否與原始高解析度動力降尺度資料相近也是驗證統計降尺度方法其表現優劣的手段之一，因此接下來吾人將挑選三個較重要的極端降雨指標(r1mm、rx1day、rx5day)來分析本研究所使用的這三種統計降尺度方法其降尺度後之日降雨結果的氣候特徵，以及是否與原始高解析度動力降尺度資料相近，如有差距其誤差又是多少，這些將成為後續分析與討論的重點。

第五章 極端降雨指標探討

根據 ETCCDI(Expert Team on Climate Detection and Indices)所定義出的 27 種極端氣候指標，可用於分析長期逐日或逐時的氣象資料之氣候特徵，因此本研究從其中挑選三種與降雨相關的指標來進行台灣區域統計降尺度結果之分析，分別為年期間雨日日數(r1mm)、年最大單日降雨量(rx1day)、年最大五日累積降雨量(rx5day)，並計算降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料之間的誤差以比較不同的統計降尺度方法在極端降雨指標上之表現。

因誤差(E)即為原始高解析度動力降尺度資料(M)和降尺度後之日降雨結果(O)的差值，因此在此以絕對誤差百分比(E%)來表示本研究所使用的這三種統計降尺度方法所得到的結果與原始高解析度動力降尺度資料之間的誤差以利於進行比較，而絕對誤差百分比的計算方式為原始高解析度動力降尺度資料與降尺度後之日降雨結果的差值取絕對值之後，再除以原始高解析度動力降尺度資料並乘以 100%，所得即為絕對誤差百分比，其計算公式如下：

$$E\% = \frac{|\bar{M} - \bar{O}|}{\bar{M}} \times 100\%$$

5.1 年期間雨日日數(r1mm)

年期間雨日日數指的是計算年總降雨日數，而本研究將雨日的定義為單日累積雨量 $\geq 1\text{mm}$ 即算為雨日，其表示公式如下：

$$RR_{ij} \geq 1\text{mm}$$

i : 雨日日數(一天) ; j : 一年(統計範圍)

Part I 升尺度部分

圖 5-1、5-2 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺

度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位:天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖可看到相似的結果，在升尺度部分的現在時期裡，BCCI 和 BCCAQ 所得到的降尺度結果在還原雨日日數上的表現非常好，可看到兩者幾乎接近零誤差，最大的誤差也只有約 1.2~1.3%，而 BCCA 在還原雨日日數上的表現則有高估的情況，由圖的上排可看到 BCCA 降尺度後的結果相較於原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)平均的雨日日數皆多了約 20 天左右，其中可看到在台灣西半部、東北部和東部其差異是較明顯的。在原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)中其雨日日數的氣候平均值在台灣西半部大約是 60~90 天左右，而 BCCA 降尺度後的結果則為 60~120 天；在台灣東北部，WRF-HiRAM 高解析度動力降尺度資料的雨日日數其氣候平均值約為 180~240 天，而 BCCA 降尺度後的結果則增加到約為 210~270 天，在 WRF-MRI 的資料裡，其雨日日數的氣候平均值約為 210~270 天，而 BCCA 降尺度後的結果則增加到約為 240~300 天；至於在台灣東部的部分，雖然在這兩組資料裡其天數分布範圍較廣，但在 BCCA 降尺度後的結果裡可看到皆有明顯增加的趨勢，而在誤差的部分，BCCA 降尺度後的結果在這兩組資料裡其平均絕對誤差的百分比皆約在 15~16% 左右，其中台灣西半部的誤差皆較東半部來得大。

至於 BCCA 降尺度後的結果在雨日日數上有高估趨勢的原因可從 4.3 節的分析中得到，在 4.3 節的分析中我們得知 BCCA 降尺度後的結果其所有網格在所有

時間小雨範圍($\geq 1\text{mm}$)發生的機率較其他三者(原始高解析度動力降尺度資料、BCCI 降尺度後的結果、BCCAQ 降尺度後的結果)皆高，因此在計算每個網格的雨日日數時，BCCA 降尺度後的結果其雨日日數自然會有較高的趨勢。

圖 5-3、5-4 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數($r1\text{mm}$)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖也可看到相似的結果，到了升尺度部分的未來時期時，BCCI 和 BCCAQ 所得到的降尺度結果在還原雨日日數上的表現仍舊不錯，其氣候平均值相當接近未來時期高解析度動力降尺度資料的氣候平均值，因此絕對誤差百分比平均約為 2~3%，而 BCCA 則和現在時期一樣有高估的問題，且在 WRF-HiRAM 這組資料中高估的情況較嚴重，其年期間雨日日數的氣候平均值(約 162 天)相較於未來時期高解析度動力降尺度資料的氣候平均值(約 118 天)多了接近 44 天，而在 WRF-MRI 這組資料中其氣候平均值也多了 26 天，因而使得其絕對誤差百分比分別約為 39%、19%。

值得注意的是，從 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期原始的高解析度動力降尺度資料中所計算的年期間雨日日數，可看到在未來時期其年期間雨日日數的氣候平均值相較於現在時期皆有天數減少的趨勢，而這在本研究所使用的三種統計降尺度方法降尺度後的結果中也顯示 BCCI 和 BCCAQ 此兩種方法皆能掌握此趨勢，至於有嚴重高估問題的 BCCA，(在升尺度部分)則似乎不太

能掌握到此趨勢。

Part II 原始模式資料部分

圖 5-5、5-6 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖可看到相似的結果，在原始模式資料部分的現在時期裡，BCCI 和 BCCAQ 所得到的降尺度結果在還原雨日日數上的表現仍舊非常好，可看到兩者幾乎接近零誤差，最大的誤差也只有約 2.2~2.3%，雖然最大的誤差相較於升尺度部分稍有增長，但在原始模式資料部分所使用的低解析度模式資料已不再是高解析度動力降尺度資料升尺度後而得，而是使用原始模式(HiRAM & MRI)的資料，由左下角那張圖可看到，在 HIRAM & MRI 的原始模式資料中，其年期間雨日日數的氣候平均值在台灣東半部皆在 150 天以上，然而，BCCI 和 BCCAQ 皆能根據尋找高、低解析度模式資料之間的統計關係將原本較低解析度的模式資料(HiRAM & MRI)降尺度至與高解析度模式資料相似的細部氣候特徵，而 BCCA 降尺度後的結果雖然也能呈現較細部的特徵，但在還原雨日日數上的表現仍有高估的情況，且相較於升尺度部分其高估的情況更嚴重，由圖上的數值可看到，BCCA 降尺度後的結果相較於原始高解析度動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)平均的雨日日數皆多了約 40 天左右，其中可看到在台灣西半部、東北部和東部其差異同樣是較明顯的。在原始高解析度動力降尺度資料中其雨日日數的氣候平均值在台灣

西半部大約是 60~90 天左右，而 BCCA 降尺度後的結果則幾乎為 90~120 天；在台灣東北部，WRF-HiRAM 高解析度動力降尺度資料的兩日日數其氣候平均值約為 180~240 天，而 BCCA 降尺度後的結果則增加到約為 210~300 天，在 WRF-MRI 的資料裡，其兩日日數的氣候平均值約為 210~270 天，而 BCCA 降尺度後的結果則增加到約為 240~330 天；至於在台灣東部的部分，雖然在這兩組資料裡其天數分布範圍較廣，但在 BCCA 降尺度後的結果裡同樣可看到皆有明顯增加的趨勢。而在誤差的部分，BCCA 降尺度後的結果在這兩組資料裡其平均絕對誤差的百分比皆約在 32~33% 左右，其中台灣西半部的誤差同樣皆較東半部來得大，至於 BCCA 降尺度後的結果在兩日日數上有高估趨勢的原因則和升尺度部分一致。

圖 5-7、5-8 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間兩日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間兩日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間兩日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖也可看到相似的結果，到了原始模式資料部分的未來時期時，BCCI 和 BCCAQ 所得到的降尺度結果在還原兩日日數上的表現依舊不差，其氣候平均值仍舊相當接近未來時期高解析度動力降尺度資料的氣候平均值，因此絕對誤差百分比平均約在 4~6%，而 BCCA 則同樣有高估的情況，且在原始模式資料部分這兩組資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)高估的程度差不多，其氣候平均值相較於未來時期高解析度動力降尺度資料的氣候平均值皆多了約 45 天，因而使得絕對誤差百分比平均介於 36~40% 之間。

值得注意的是，在此原始模式資料部分這三種統計降尺度方法降尺度後的結果除了能掌握到在升尺度部分提到的未來時期相較於現在時期其年期間雨日日數有減少的趨勢之外，還能將原始的模式資料(HiRAM & MRI)其年期間雨日日數的大值皆集中於中央山脈東側的模擬結果藉由高解析度動力降尺度資料的修正，進而使得原始模式資料其降尺度後的日降雨結果之氣候特徵能修正到較接近於高解析度動力降尺度資料的氣候特徵。

5.2 年最大單日降雨量(rx1day)

年最大單日降雨量是極端降雨中最常被討論的指標，其代表的是計算出一年之中單日最大累積降雨量之值，而由此指標也可評估不同的統計降尺度方法在還原極端降雨強度時的表現，其計算公式如下：

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij})$$

RR ：累積雨量； i ：雨日日數(一天)； j ：一年(統計範圍)

Part I 升尺度部分

圖 5-9、5-10 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖可看到相似的結果，在升尺度部分的現在時期裡，這三種統計降尺

度方法皆能根據尋找高、低解析度模式資料之間的統計關係將原本較低解析度的模式資料降尺度至與高解析度模式資料相似的細部氣候特徵，在此為中央山脈東側的這些極值，且 BCCI 和 BCCAQ 還原後的氣候平均值和最大值在強度上皆和原始高解析度動力降尺度資料相近，而 BCCA 整體平均(氣候平均值)來看則皆有稍微低估的情況，使得其年最大單日降雨量的絕對誤差百分比平均為 4~5%較 BCCI 和 BCCAQ 的接近 2%來得大，且誤差大的區域較集中於中南部，較不像 BCCI 和 BCCAQ 皆較分散。

圖 5-11、5-12 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖也可看到相似的結果，到了升尺度部分的未來時期時，BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果在年最大單日降雨量的強度表現上是較接近於原始高解析度動力降尺度資料的，三者的氣候平均值皆相當接近，因此兩者的絕對誤差百分比平均皆約在 4~5%，相較於現在時期誤差有些微增加，不過其誤差較大值的分布仍舊較分散，而 BCCA 則同樣有低估的情形，且相較於現在時期其低估的程度變得較嚴重，因而使得平均的絕對誤差百分比從現在時期的 4~5%到了未來時期時增加到約 11~14%，且在這兩組資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)中，皆只有在台灣東北部、中部近山區和東部零星地區的誤差較小以外，其餘地區平均的絕對誤差百分比皆在 6%以上。

值得注意的是，到了未來時期時，高解析度的動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)相較於現在時期其年最大單日降雨量的氣候平均值皆有增加的趨勢，而 BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果都能掌握到此趨勢，且增加的幅度和高解析度動力降尺度資料相近，至於 BCCA 則只有在 WRF-HiRAM 這組資料的降尺度結果中有掌握到此趨勢，不過增幅相對較小，而在 WRF-MRI 這組資料的降尺度結果則有減少的趨勢，因此 BCCA 在年最大單日降雨量的表現上不僅有低估的情形，應用於升尺度部分未來時期的資料時會較凸顯出其統計穩定性的問題。此外，降尺度後的結果在年最大單日降雨量最大值(極值)的強度表現上相較於未來時期的高解析度動力降尺度資料是來的較弱的(尤以 BCCA)，而在現在時期則不會有此現象，這主要是因為在做未來時期的統計降尺度時我們是根據現在時期的高、低解析度的模式資料所尋找出的統計關係應用於未來時期上，而這個應用的假設前提為氣候在未來仍是穩定的，因此，當未來的氣候變遷日趨嚴重、極端事件的頻率和強度皆有增加的情況下，便會有上述此問題產生，這也是本研究之所以使用高解析度的模式資料來代替原本降尺度中觀測資料的原因，便是有未來的資料能做此驗證。

Part II 原始模式資料部分

圖 5-13、5-14 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由此兩張圖可看到相似的結果，在原始模式資料部分的現在時期裡，BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果其年最大單日降雨量的平均強度(氣候平均值)相較於 BCCA 同樣是較接近原始高解析度動力降尺度資料的，不過此時與升尺度部分不同的是其在強度上有稍微高估的現象，因而使得絕對誤差百分比平均約在 4~5%之間，而 BCCA 在強度上則和升尺度部分一樣皆有低估的情況，且低估的情況相較於 BCCI 和 BCCAQ 高估的情況有較嚴重，因而使得其絕對誤差百分比平均介於 9~12%之間。

圖 5-15、5-16 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。而由此兩張圖也可看到相似的結果，到了原始模式資料部分的未來時期時，BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果其年最大單日降雨量的平均強度(氣候平

均值)相較於 BCCA 同樣是較接近原始高解析度動力降尺度資料的，不過與現在時期同樣有稍微高估的現象，且在東部外海和台灣海峽上有較大的誤差，因而使得平均的絕對誤差百分比介於 13~15%之間，而 BCCA 在強度上則依舊有低估的情況，不過其平均絕對誤差在區域上較不像 BCCI 和 BCCAQ 有誤差極大的地方，因而使得其平均的絕對誤差百分比介於 11~14%之間，與 BCCI 和 BCCAQ 的誤差相近。

值得注意的是，在原始模式資料部分的未來時期時，由於與升尺度部分一樣是使用同一組高解析度的動力降尺度資料(WRF-HIRAM & WRF-MRI)，因此其年最大單日降雨量在未來時期相較於現在時期皆有增加的趨勢，而 BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果在此與升尺度部分一致同樣能掌握到此趨勢，只是與升尺度部分不同的是在強度上有稍微高估的現象，至於 BCCA 在此則與升尺度部分不同，BCCA 在此也同樣能掌握到此趨勢，且增幅較 BCCI 和 BCCAQ 來得大，不過與升尺度部分一樣的是，BCCA 降尺度後的結果不管是在現在時期還是未來時期其年最大單日降雨量在強度上的表現皆有低估的情形。而在年最大單日降雨量最大值(極值)的強度表現上，此三種統計降尺度方法所得到降尺度後的結果相較於原始高解析度動力降尺度資料同樣是較弱的，這部分的問題描述與升尺度部分一致。

5.3 年最大五日累積降雨量(rx5day)

年最大五日累積降雨量為計算出一年之中最大的連續五日累積降雨量之值，其計算公式如下：

$$Rx5day_j = \max(RR_{kj})$$

RR ：累積雨量； k ：雨日日數(連續五天)； j ：一年(統計範圍)

因台灣位於季風亞洲區域，在此區域強降雨除了對流性降雨之外，還包含了颱風所帶來的強降雨、季節(鋒面)性降雨，而後面這兩種較具系統性的降雨型態通常持續時間較長，短則常可達 3、4 天，長則可能持續一星期之久，因此本研究多挑選了此指標來加以分析降尺度後的結果，並加以評估和比較不同的統計降尺度方法在降尺度於低解析度的日降雨模式資料時是否擁有能夠還原並掌握較具系統性強降雨的能力。

Part I 升尺度部分

圖 5-17、5-18 為本研究所使用的三種不同的統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期所得到的日降雨降尺度結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位：mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由此兩張圖可看到相似的結果，在升尺度部分的現在時期裡，這三種統計降尺度方法同樣皆能根據尋找高、低解析度模式資料之間的統計關係將原本較低解析度的模式資料降尺度至與高解析度模式資料相似的細部氣候特徵，在此為高度位於 1000m 以上的山區(包含中央山脈)的這些極值，而 BCCI 和 BCCAQ

降尺度後的結果其氣候平均值相較於 BCCA 在強度上是較接近於原始高解析度動力降尺度資料的，不過在氣候平均值和最大值的強度表現上是有稍微高估的現象，誤差的部分相較於 BCCA 則有落差較大的情形，大部分的地區其絕對誤差百分比約皆在 3%以下(平均絕對誤差百分比為接近 3%)，但仍有些許絕對誤差百分比大於 6%的網格點分散分布於台灣陸地上，至於 BCCA 其氣候平均值在強度表現上則有稍微低估的情況，低估的程度和 BCCI 與 BCCAQ 高估的程度差不多，因而使得其絕對誤差百分比也約為 3%，不過其誤差在區域分布上落差較小，較無誤差較大之地區。

圖 5-19、5-20 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由此兩張圖也可看到相似的結果，到了升尺度部分的未來時期時，這三種統計降尺度方法的表現與現在時期類似，BCCI 和 BCCAQ 相較於 BCCA 其氣候平均值仍是較接近於原始高解析度動力降尺度資料，不過在強度表現上仍有稍微高估的情況，且誤差在區域分布上落差仍較大，大部分的區域(網格)其絕對誤差百分比皆約在 3%以下，其餘少數地區(網格)的誤差較大(8%以上)，只是誤差較大的網格數相較於現在時期有略顯增加，因而使得其平均的絕對誤差百分比從現在時期的接近 3%上升到 4~5%之間；而 BCCA 降尺度後的結果其在強度表現上則仍是低估的情況，且相較於現在時期其低估的程度有較嚴重，因而使

得其平均的絕對誤差百分比從現在時期的接近 3% 上升到 7~8% 之間，且其誤差在區域分布上的落差同樣較大，只有少數地區(兩組資料的共同區域為台灣北部、中部近山區和南部地區)的絕對誤差百分比位在 3% 以下，其餘大多數的區域(共同區域為中央山脈北段、中南段和東、西部外海)其誤差皆在 8% 以上，和 BCCI 與 BCCAQ 有恰巧相反的意味。

值得注意的是，到了未來時期時，高解析度的動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)其年最大五日累積降雨量相較於現在時期同樣有增加的趨勢(與年最大單日降雨量(rx1day)一樣)，此表示在動力降尺度的資料中顯示在未來時期較具系統性的降雨其降雨強度也會有所增強。而本研究所用的這三種統計降尺度方法在應用於未來時期的降尺度時也同樣能掌握到此趨勢，且 BCCI 和 BCCAQ 在氣候平均值上還有稍微高估的現象，而 BCCA 雖然在未來時期也有所增加，但其強度相較於原始高解析度動力降尺度資料仍是低估的。此外，這三種統計降尺度方法應用於未來時期時在最大值(極值)的強度表現上相較於原始高解析度動力降尺度資料仍是較弱的，而在此所做的解釋與年最大單日降雨量的部分一致，意思即為雖然 BCCI 和 BCCAQ 應用於未來時期時其區域平均的氣候平均值在強度上仍能掌握得很好，但當未來氣候變遷日趨嚴重時，這三種統計降尺度方法便會較無法掌握山區此極端降雨事件降雨強度較強的地區，因而造成低估了極端降雨事件在山區所降下的雨量。

Part II 原始模式資料部分

圖 5-21、5-22 為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由此兩張圖可看到相似的結果，在原始模式資料部分的現在時期裡，在 WRF-HiRAM 這組資料中，BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果其年最大五日累積降雨量的氣候平均值相較於 BCCA 是較接近原始高解析度動力降尺度資料的；而在 WRF-MRI 這組資料中則相差不多，但在這兩組資料中，BCCI 和 BCCAQ 的氣候平均值皆有稍微高估的情況(WRF-MRI 這組資料較嚴重)，而 BCCA 的氣候平均值則是皆有低估的情形(WRF-HiRAM 這組資料較嚴重)。至於誤差的部分，BCCI 和 BCCAQ 在這兩組資料中其平均的絕對誤差百分比皆約在 6~7%之間，且誤差較大的區域幾乎皆位於台灣周圍海域、中央山脈(WRF-HiRAM 這組資料)，而 BCCA 則因在 WRF-HiRAM 這組資料中低估較嚴重，使得其平均的絕對誤差百分比在這兩組資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)中分別約為 10%、6%，且誤差較大的區域皆位於台灣陸地。

圖 5-23、5-24 則為 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後的日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累

積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。由此兩張圖(這兩組資料)可看到較不一樣的結果，到了原始模式資料部分的未來時期時，在 WRF-HiRAM 這組資料中可看到 BCCI 和 BCCAQ 降尺度後的結果其年最大五日累積降雨量的氣候平均值相較於 BCCA 仍是較接近原始高解析度動力降尺度資料的，不過在強度表現上 BCCI 和 BCCAQ 是有稍微低估的情況，BCCA 則仍是低估的較為嚴重的；而在 WRF-MRI 這組資料中則是 BCCA 降尺度後的結果其年最大五日累積降雨量的氣候平均值相較於 BCCI 和 BCCAQ 是較接近原始高解析度動力降尺度資料的，主要是因為在強度表現上 BCCI 和 BCCAQ 高估的較為嚴重，而 BCCA 低估的較輕微，因而使得這兩組資料有較不一樣的結果。至於誤差的部分，這三種統計降尺度方法的表現皆相差不大，兩組資料間的誤差也相差不多，其中 BCCI 和 BCCAQ 的平均絕對誤差百分比約在 10~12%之間，誤差較大的共同區域主要位於台灣周圍海域、宜蘭以及中南部地區，而 BCCA 平均的絕對誤差百分比則介於 9~12%之間。

值得注意的是，到了原始模式資料部分的未來時期時，這三種統計降尺度方法依舊能像升尺度部分一樣掌握到年最大五日累積降雨量在未來時期相較於現在時期有所增加的趨勢，不過在最大值(極值)的強度表現上則也與升尺度部分有著同樣的問題。

第六章 結論

本研究主要目的是藉由"理想模式"的實驗(研究)架構來驗證統計降尺度方法(BCCI、BCCA 和 BCCAQ)在應用於模式模擬未來的氣候推估資料時是否能維持其統計穩定性的假設，同時依據三個面向的分析以比較上述三種統計降尺度方法的表現並評估不同的統計降尺度方法應用於未來降尺度時其統計穩定性的表現。本研究使用的模式資料主要分為高、低解析度兩種模式資料，高解析度的模式資料是使用動力降尺度資料(WRF-HiRAM & WRF-MRI)(代替原本的觀測資料)，低解析度的模式資料則又分為兩部分，分別為高解析度動力降尺度資料升尺度後而得(簡稱升尺度部分)、原始模式資料部分(HiRAM & MRI)。而在這兩組低解析度模式資料的降尺度中皆是使用同一組高解析度的模式資料，至於高、低解析度的模式資料其資料時間皆分為現在時期(1979-2003 年，部分為 1979-2005 年)和未來時期(2075-2099 年)。

本研究將現在時期和未來時期降尺度後的日降雨結果(升尺度部分、原始模式資料部分)依據三個面向進行分析，這三個面向分別為空間型態相關性、降雨值的強度與分布、降雨事件的連續性，表 6-1、6-2 即是將本研究應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA 和 BCCAQ)其未來時期降尺度後的日降雨結果(升尺度部分、原始模式資料部分)在上述三個面向中各個分析指標的表現統整(而 WRF-HiRAM & WRF-MRI 在此兩部分的降尺度結果皆具有相當高的一致性，並不會受不同的模式資料而影響其表現，因此此兩表格皆是將 WRF-HiRAM & WRF-MRI 的結果平均後而得)，表 6-1 為升尺度部分的表現統整，表 6-2 則為原始模式資料部分的表現統整。而在此僅比較未來時期降尺度後的結果表現主要是因為在本研究未來時期降尺度後的結果其實就相當於以往傳統在做降尺度時

驗證期(validation periods)所得到的結果，而以往在評估並比較統計降尺度方法的表現時，皆是著重在驗證期降尺度後的結果表現；至於升尺度部分和原始模式資料部分的表現統整可能會有所不同，但就如第四章第二段所述，基本上原始模式資料部分的表現統整(表 6-2)是較具參考價值的，而如果此兩部分的表現有一致性的話則能更加地肯定此統計降尺度方法在此表現上有此特性。

首先，在空間型態相關性上的表現，現在時期皆是以 BCCA 的表現較好，其次為 BCCAQ，BCCI 則為最差；而到了未來時期時，兩部分的結果在空間型態相關性上的表現皆有下降的趨勢，升尺度部分變成是以 BCCI 的表現較好，其次為 BCCA，BCCAQ 則為最差，原始模式資料的部分則仍是以 BCCA 的表現較好，其次為 BCCI，BCCAQ 則為最差；在季節上的表現，不管是現在還是未來時期這三種統計降尺度方法的結果皆是在 4~10 月(溼季)的表現較差、11~3 月(乾季)的表現較好；至於應用於未來時期其統計穩定性的表現上則可看到 BCCA 的衰退較多，其次為 BCCAQ，BCCI 則衰退的最少。

接著，在降雨值的強度與分布的表現上，以平均絕對誤差來看，在現在時期時也同樣皆是以 BCCA 的誤差為最小，其次為 BCCAQ，BCCI 則最大；而到了未來時期時，升尺度部分則變成相反過來，變成以 BCCI 的誤差為最小，其次為 BCCAQ，BCCA 則最大，原始模式資料部分三者的誤差差距則較小；在季節的表現上，這三種統計降尺度方法的結果皆在 5~10 月(溼季)的誤差較大、11~4 月(乾季)的誤差較小(與空間型態相關性的表現相呼應)；至於應用於未來時期其統計穩定性的表現上則同樣可看到 BCCA 其誤差增長的最多(平均約為 1.26 倍)，其次為 BCCAQ 的 1.23 倍，BCCI 的 1.22 倍則最少，不過此表示這三種統計降尺度方法降尺度後的結果在未來時期的誤差皆大於現在時期(比值大於 1 倍)，因此這三種統

計降尺度方法皆違反了統計穩定性的假設。而以機率分布圖(PDF)和累積機率分布圖(CDF)則可看到，不管是現在還是未來時期，BCCA 相較於高解析度的動力降尺度資料和 BCCI 與 BCCAQ 皆有小雨發生機率較高，中、大雨發生機率較低的情形，也就是 BCCA 的結果在降雨強度上皆有低估的情況，且在未來時期會更嚴重，這也是 BCCA 應用於未來時期誤差增長較多的原因。

再來，在降雨事件連續性的表現上，升尺度部分的現在時期是以 BCCA 的表現較好，其次為 BCCAQ，BCCI 則較差，而到了未來時期時，則變成正好相反過來；至於原始模式資料部分則是在現在和未來時期皆是以 BCCA 的表現較好，其次為 BCCAQ，BCCI 則較差，不過在此兩部分的結果皆顯示到了未來時期時，BCCA 其降雨值的時間序列相關係數下降的最多，其次為 BCCAQ，BCCI 則下降的最少，此也凸顯了 BCCA 此統計降尺度方法其統計穩定性較弱的問題，再加上 BCCA 的日降雨結果在強度上皆有低估的情況，因此僅能說 BCCA 其結果的降雨值(每個網格)在時間序列上的起伏變化趨勢與高解析度動力降尺度資料的相關性較高。

最後，以極端降雨指標來說，BCCA 在雨日日數(r1mm)上的表現在現在和未來時期皆有高估的情形，至於 BCCI 和 BCCAQ 則皆能得到與高解析度動力降尺度資料相近的雨日日數；而在年最大單日降雨量(rx1day)和年最大五日累積降雨量(rx5day)的表現上，BCCA 的結果在現在和未來時期皆有低估的情形，至於 BCCI 和 BCCAQ 的結果在強度上相較於 BCCA 則是與高解析度動力降尺度資料較相近的(雖然部分結果其氣候平均值有稍微高估的情況)。不過這三種統計降尺度方法皆能掌握高解析度動力降尺度資料其雨日日數到未來時期時有減少的現象、年最大單日降雨量和年最大五日累積降雨量到未來時期時有增加的趨勢，並反映在降尺度後的結果上。

以往在應用統計降尺度方法於未來氣候推估的部分時，皆是假設現今(包含過去)的觀測和模式資料之間建立的統計關係也同樣適用於未來(統計關係是穩定的)。然而，目前種種的跡象和事實皆證明氣候變遷正日趨嚴重，現今的資料所建立的統計關係能否適用於未來已受到質疑並已有一些驗證方法的提出與討論，而"理想模式"此實驗架構便是其中之一。因此本研究便利用了此實驗架構驗證了三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA 和 BCCAQ)在應用於未來的降尺度時其統計穩定性的表現能否遵守上述的前提假設，而評估的方式是以平均絕對誤差(MAE)的比值(未來/現在)是否大於 1 而定，如比值大於 1 即表示統計降尺度方法在應用於未來時期時的誤差相較應用於現在時期是要來的大，此也代表違反了上述的前提假設，而本研究所驗證的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA 和 BCCAQ)其比值皆大於 1，其中 BCCA 最大，其次為 BCCAQ，BCCI 則最小，此也表示 BCCA 的統計穩定性表現較差，BCCI 則表現較佳。BCCA 的統計穩定性表現之所以會較差的原因在於此方法應用於現在時期的降尺度時其結果已有低估的情形，而當高解析度的模式資料其降雨強度在未來時期有增強的趨勢，但 BCCA 因其方法的特性而使得在應用於未來時期的降尺度時其結果無法有效的增強其降雨強度，因而造成其結果低估的更嚴重，最後導致其誤差增加最多、表現衰退最多、統計穩定性表現最差；而 BCCI 有正好相反的意味，其應用於現在時期的降尺度時的誤差較大，但因其方法是將(未來時期)低解析度模式資料的距平值(anomalies)去做內插，再和高解析度模式資料的平均值做相乘，因而使得其應用於未來時期的降尺度時誤差增長的較少、表現衰退最少、統計穩定性表現最好；至於 BCCAQ 是將 BCCA 的結果去和 BCCI 的結果做誤差修正，因而使得其誤差的增長、表現的衰退和統計穩定性表現皆介於中間，在本研究應用於台灣的降尺度研究其結果並無如預期

般的表現。而由於統計降尺度方法應用於原始模式資料部分未來時期的結果表現(表 6-2)是較具參考價值的，因此藉由表 6-2 可看出 BCCA 此統計降尺度方法相較於 BCCI 和 BCCAQ 在應用於台灣的降尺度研究上其整體平均結果的表現是較佳的，但在升尺度部分和原始模式資料部分皆顯示 BCCA 此方法在極端降極端降雨指標和統計穩定性的表現上仍有其問題和隱憂，這也表示現今在應用統計降尺度方法於評估未來區域氣候特徵時須更謹慎的使用與解讀且其統計穩定性同時是一大考驗。



參考文獻

戴俐卉、洪景山、莊秉潔、蔡徵霖與倪佩貞，2008：WRF 模式臺灣地區土地利用類型之更新與個案研究。大氣科學，36，43-62。

Barnston, A.G., M.H. Glantz, and Y. He, 1999: Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in SST Forecasts during the 1997–98 El Niño Episode and the 1998 La Niña Onset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 217–244, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2)

Bukovsky, M. S., and D. J. Karoly, 2009: Precipitation Simulations Using WRF as a Nested Regional Climate Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 2152–2159.

Cannon, A.J., S.R. Sobie, and Murdock T.Q., 2015: Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?. *Journal of Climate*, 28, 6938 – 6959, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P.

Thornton, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Chen, J.-H., and S.-J. Lin, 2011: The remarkable predictability of inter-annual variability of Atlantic hurricanes during the past decade. *Geophysical Research Letters*, 38, L11804.

Chu, J.-L., H. Kang, C. -Y. Tam, C. -K. Park, and C. -T. Chen, 2008: Seasonal forecast for local precipitation over northern Taiwan using statistical downscaling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D12118, <https://doi.org/10.1029/2007JD009424>

Dixon, K.W., Lanzante, J.R., Nath, M.J. et al., 2016: Evaluating the stationarity assumption in statistically downscaled climate projections: is past performance

- an indicator of future results?. *Climatic Change*, 135: 395-408,
<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1598-0>
- Dockrill, P., 2019: It's Official: Atmospheric CO₂ Just Exceeded 415 ppm For The First Time in Human History. [Science Alert](#)
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C., 2007: Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12):1547–1578
- Gutmann, E., T. Pruitt, M. P. Clark, L. Brekke, J. R. Arnold, D. A. Raff, and R. M. Rasmussen, 2014: An intercomparison of statistical downscaling methods used for water resource assessments in the United States. *Water Resource Research*, 50, 7167–7186, doi:<https://doi.org/10.1002/2014WR015559>.
- Hertig, E. and Jacobeit, J., 2013: A novel approach to statistical downscaling considering nonstationarities: application to daily precipitation in the Mediterranean area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2):520–533
- Hidalgo, H. G., Dettinger, M. D. and Cayan, D. C., 2008: Downscaling With Constructed Analogues: Daily Precipitation and Temperature Fields Over The United States. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. CEC-500-2007-123.
- Hiebert et al., 2018: ClimDown: Climate Downscaling in R. *Journal of Open Source Software*, 3(22), 360. <https://doi.org/10.21105/joss.003601>
- Hunter, R.D. and R.K. Meentemeyer, 2005: Climatologically Aided Mapping of Daily Precipitation and Temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 1501 – 1510, <https://doi.org/10.1175/JAM2295.1>
- Lanzante, J.R., K.W. Dixon, M.J. Nath, C.E. Whitlock, and D. Adams-Smith, 2018: Some Pitfalls in Statistical Downscaling of Future Climate. *Bulletin of American Meteorological Society*, 99, 791–803,
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0046.1>
- Lavell, A., M. Oppenheimer, C. Diop, J. Hess, R. Lempert, J. Li, R. Muir-Wood, and S. Myeong, 2012: Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working

Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 25-64

Levi, B., Bridget, L., Edwin, P. et al., 2013: Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate Projections.

Maraun, D., 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, RG3003, doi:10.1029/2009RG000314.

—, 2013: Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *Journal of Climate*, 26, 2137–2143, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00821.1>

Maurer, E. P. and Hidalgo, H. G., 2008: Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods, *Hydrology and Earth System Science*, 12, 551-563, <https://doi.org/10.5194/hess-12-551-2008>.

Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 233-258

Murdock, T.Q., Sobie, S.R. and James, M.H., 2014: Statistical downscaling of future climate projections for North America. *Pacific Climate Impacts Consortium*. KM040-131148/A

Salvi, K., Ghosh, S. and Ganguly, A.R., 2016: Credibility of statistical downscaling under nonstationary climate. *Climate Dynamics*, 46(5): 1991–2023. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2688-9>.

Sobie, S.R. and T.Q. Murdock, 2017: High-Resolution Statistical Downscaling in Southwestern British Columbia. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 56, 1625 – 1641, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0287.1>

Teutschbein, C., Seibert, J. 2013: Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology Earth System Sciences* 17(12): 5061–5077. <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>.

Theme β I, M.J., Gobiet, A. and Leuprecht, A., 2011: Empirical-statistical downscaling

and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31, 1530-1544, <https://doi.org/10.1002/joc.2168>

Vrac, M., Stein, M.L., Hayhoe, K., Liang, X.Z., 2007: A general method for validating statistical downscaling methods under future climate change. *Geophysical Research Letters*, 34(18):L18701

Volosciuk, C., Maraun, D., Vrac, M., Widmann M., 2017: A combined statistical bias correction and stochastic downscaling method for precipitation. *Hydrology Earth System Sciences*, 21(3): 1693–1719. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1693-2017>.

von Storch, H., E. Zorita, and U. Cubasch, 1993: Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime. *Journal of Climate*, 6, 1161–1171, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2)

Wang, J. and X. Zhang, 2008: Downscaling and Projection of Winter Extreme Daily Precipitation over North America. *Journal of Climate*, 21, 923–937, <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1671.1>

Wang, Y., Sivandran, G. and Bielicki, J. M., 2018: The stationarity of two statistical downscaling methods for precipitation under different choices of cross-validation periods. *International Journal of Climatology*, 38: e330-e348. doi:[10.1002/joc.5375](https://doi.org/10.1002/joc.5375)

Washington, W. M., Weatherly, J.W., Meehl, G.A. et al., 2000: Parallel Climate Model (PCM) control and transient simulations. *Climate Dynamics*, 16, 755-774, doi:10.1007/s003820000079.

Werner, A. T. and Cannon, A. J., 2016: Hydrologic extremes – an intercomparison of multiple gridded statistical downscaling methods, *Hydrology and Earth System Science*, 20, 1483-1508, <https://doi.org/10.5194/hess-20-1483-2016>,.

Wilby R.L. and Wigley T.M.L., 1997: Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21,530–548. doi:[10.1177/030913339702100403](https://doi.org/10.1177/030913339702100403)

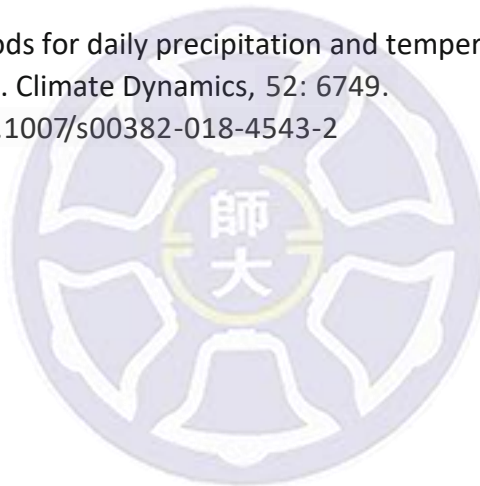
—, and Wigley T.M.L., 2000: Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *Journal of Climatology*, 20(6):641–661

Wood, A. W., Leung, L.R., Sridhar, V. et al., 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62(1):189–216

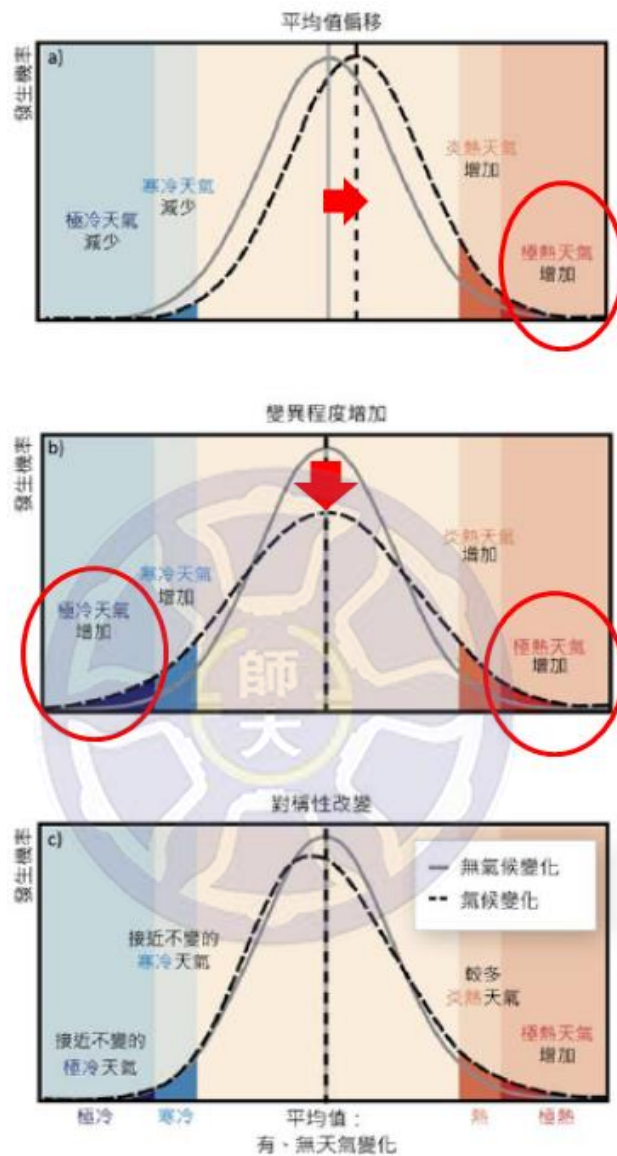
—, Maurer, E. P., Kumar A., Lettenmaier D. P., 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107:D20, <https://doi.org/10.1029/2001JD000659>

Yang, Y., Tang, J., Xiong, Z. et al., 2018: An intercomparison of multiple statistical downscaling methods for daily precipitation and temperature over China: present climate evaluations. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04809-x>

—, Tang, J., Xiong, Z. et al., 2018: An intercomparison of multiple statistical downscaling methods for daily precipitation and temperature over China: future climate projections. *Climate Dynamics*, 52: 6749. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4543-2>



附錄



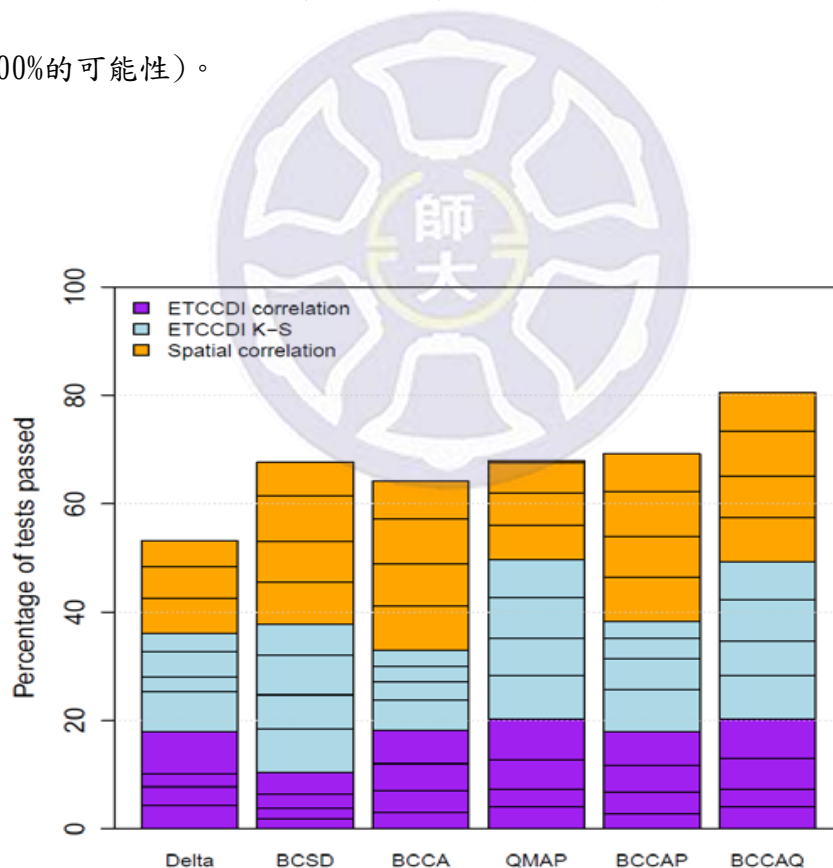
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_faq_one.aspx?kid=20150408134944

圖 1-1 氣候變遷導致的暖化趨勢如何影響極端事件示意圖。a)當平均值改變時對極端事件發生機率的影響，b)當變異數改變時對極端事件發生機率的影響，c)當氣候變化時對極端事件發生機率的影響。



(來源: Union of Concerned Scientists 網站 根據: IPCC SREX, 2012 整理)

圖 1-2 氣候變遷對極端氣候事件的影響，根據科學證據充分程度由左至右漸強 (50~100%的可能性)。



Sobie et al., 2014

圖 1-3 PCIC 於 2014 年報告裡依據三個分析面向所通過的檢定(百分比)比較不同統計降尺度方法的表現。

Method	Sequencing		Distribution		Spatial		Average	
DELTA	4	✓	5	X	6	X	5	X
BCSD	6	X	3	✓	4	✓	4	OK
BCCA	3	✓	6	X	1	✓	3	OK
QMAP	1	✓	1	✓	5	X	2	OK
BCCAP	4	✓	4	✓	1	✓	3	✓
BCCAQ	1	✓	2	✓	1	✓	1	✓

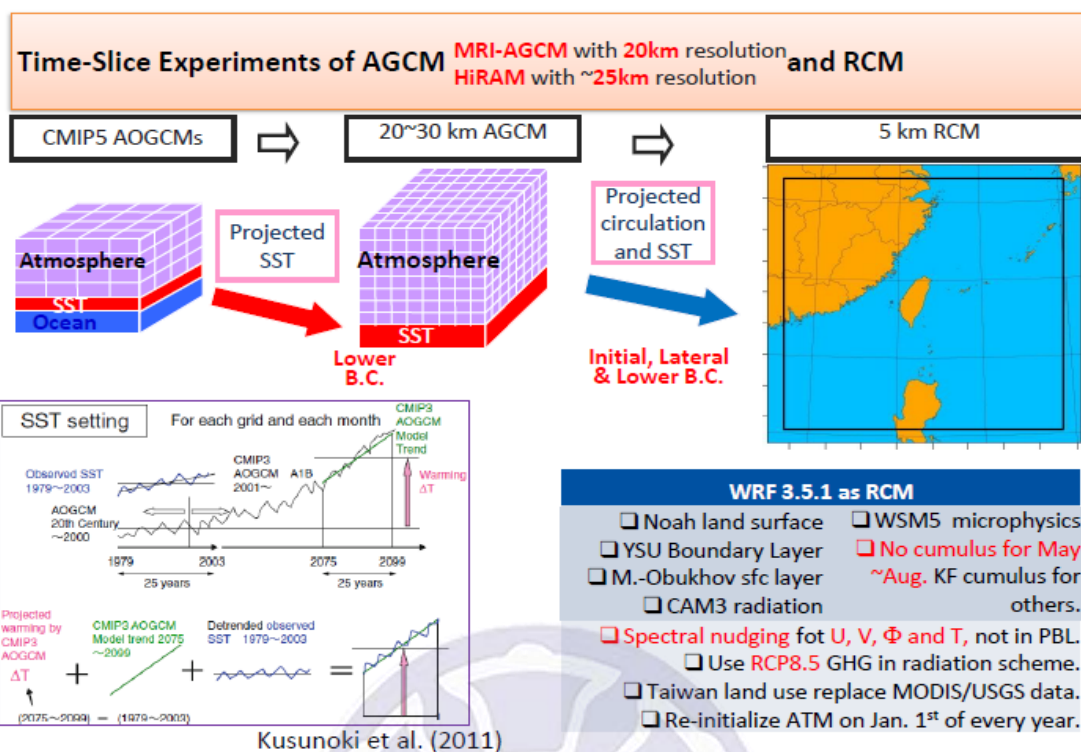
Sobie et al., 2014

表 1-1 PCIC 於 2014 年報告裡依據三個分析面向所通過的檢定百分比將不同的統計降尺度方法其表現做比較並排名。

動力降尺度資料 (高解析度模式資料)	WRF-HiRAM	WRF-MRI
時間解析度	皆為日平均降雨資料(單位:mm/day)	
空間解析度	皆為 5km x 5km(約為 0.05° x 0.05°)	
區域範圍	皆為台灣區域(120°E~122°E ; 21.5°N~25.5°N)	
時間範圍	現在時期:1979-2005 年 (升 尺度部分) 1979-2003 年(原始模式資料 部分) 未來時期:2075-2099 年(RCP 8.5 情境)	現在時期:1979-2003 年 未來時期:2075-2099 年 (RCP 8.5 情境)

表 2-1 本研究所選用之動力降尺度資料(高解析度模式資料)介紹。

Dynamical downscaling from ~25km to ~5km



Bukovsky and Karoly, 2009

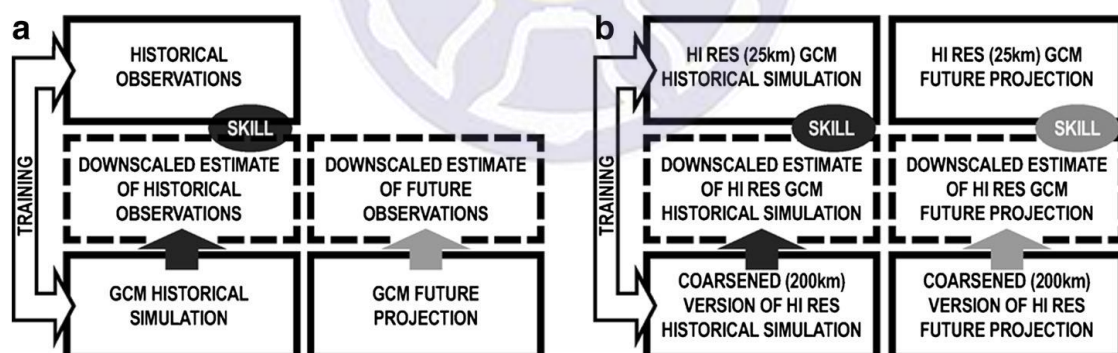
圖 2-1 WRF 模式(3.5.1 版本)動力降尺度物理參數化之設定。

升尺度(Coarsen)部分 (低解析度模式資料)	WRF-HiRAM	WRF-MRI
時間解析度	皆為日平均降雨資料(單位:mm/day)	
空間解析度	皆為 25km x 25km(約為 0.25° x 0.25°)	
區域範圍	皆為台灣區域(120°E~122°E ; 21.5°N~25.5°N)	
時間範圍	現在時期:1979-2005 年 未來時期:2075-2099 年 (RCP 8.5 情境)	現在時期:1979-2003 年 未來時期:2075-2099 年 (RCP 8.5 情境)

表 2-2 本研究所使用之低解析度模式資料(升尺度部分)介紹。

原始模式資料部分 (低解析度模式資料)	HiRAM	MRI
時間解析度	皆為日平均降雨資料(單位:mm/day)	
空間解析度	0.23° x 0.23° (約為 25km x25km)	0.1875° x 0.1875° (約為 20km x20km)
區域範圍	皆為台灣區域(120°E~122°E ; 21.5°N~25.5°N)	
時間範圍	現在時期:1979-2003 年 未來時期:2075-2099 年(RCP 8.5 情境)	

表 2-3 本研究所使用之低解析度模式資料(原始模式資料部分)介紹。



Dixon et al., 2016

圖 3-1 (a)實際應用統計降尺度方法之流程示意圖，(b)本研究所應用的統計降尺度流程示意圖。

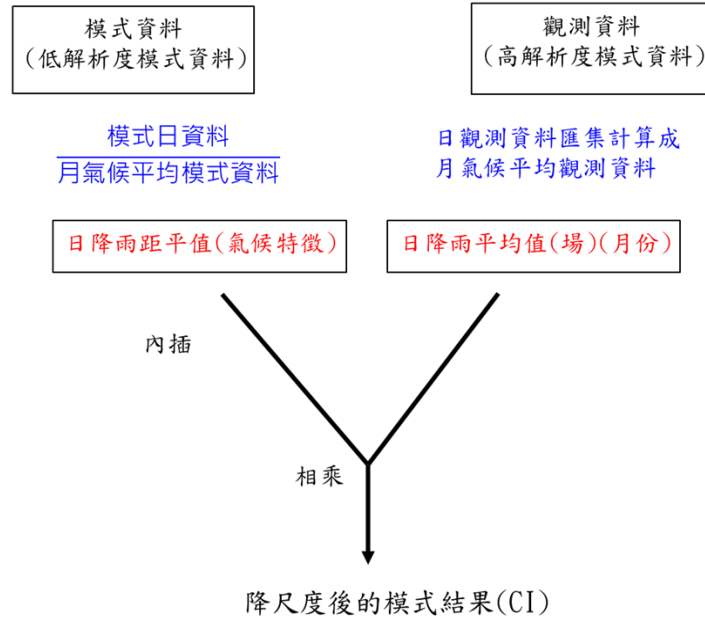
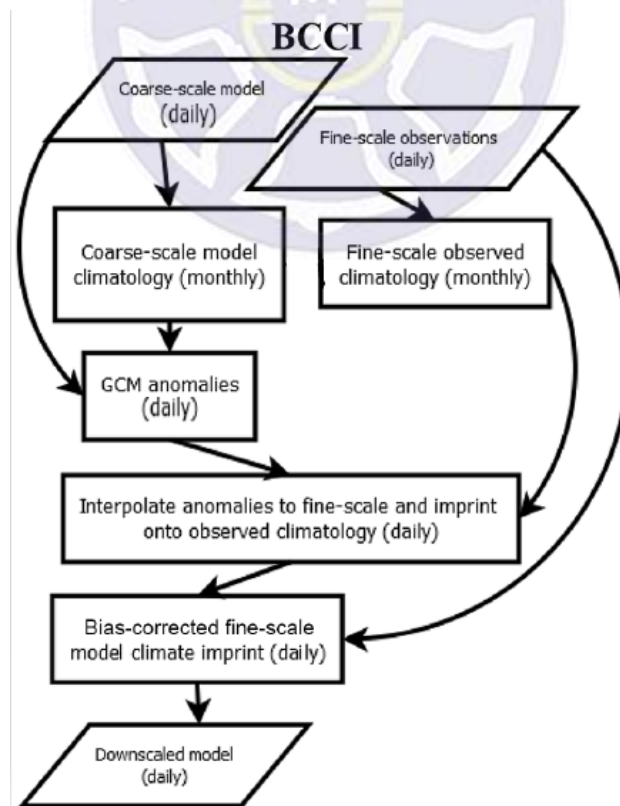
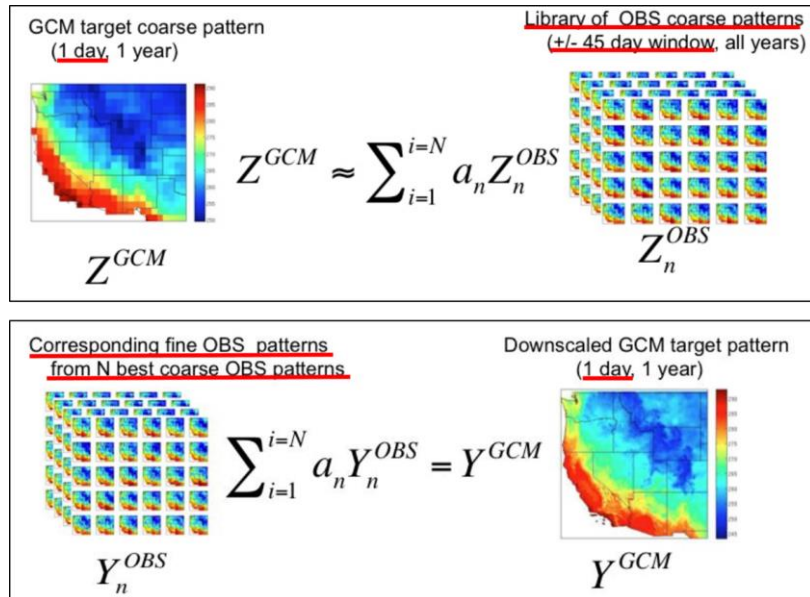


圖 3-2 氣候特徵法(CI)之降尺度流程示意圖。



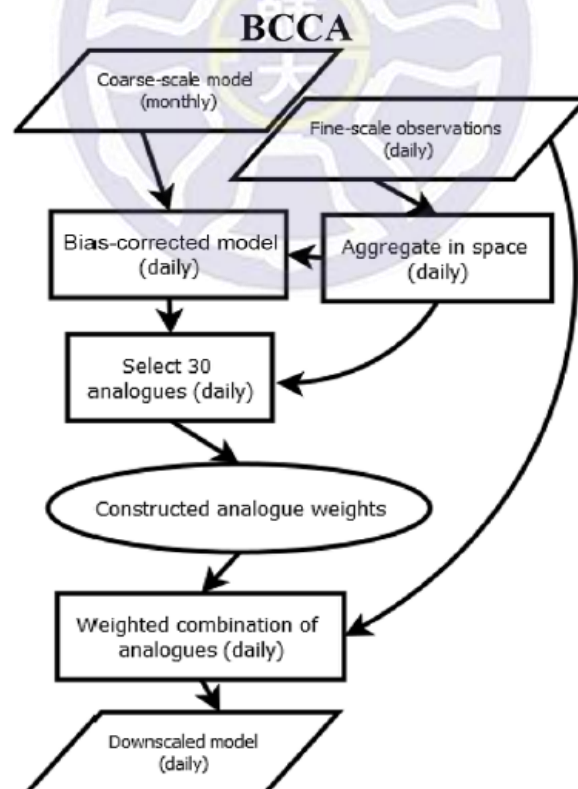
Werner, A. T. and Cannon, A. J., 2016

圖 3-3 誤差校正氣候特徵法(BCCI)之降尺度流程示意圖。



<http://maca.northwestknowledge.net/index.php>

圖 3-4 建構類比法(CA)之降尺度概念(流程)示意圖。



Werner, A. T. and Cannon, A. J., 2016

圖 3-5 誤差校正建構類比法(BCCA)之降尺度流程示意圖。

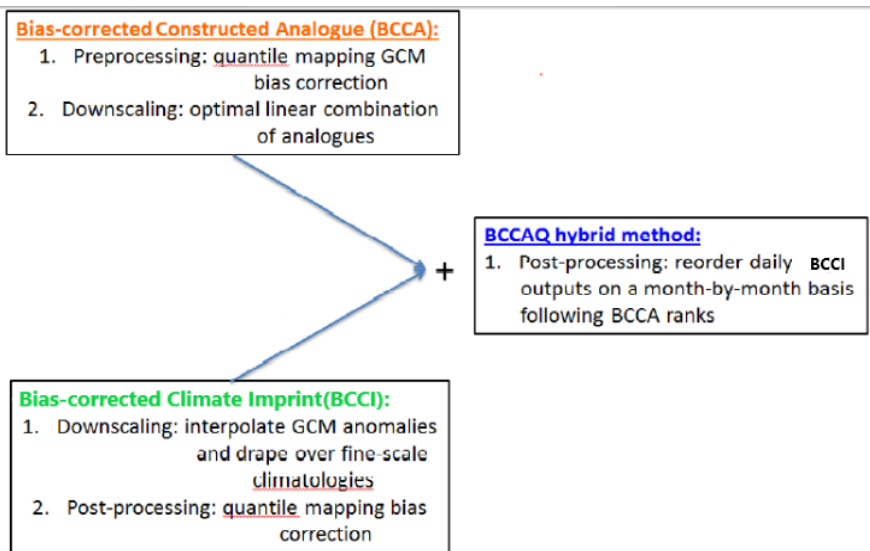


Figure 6: Schematic BCCAQ methodology

Sobie et al., 2014

圖 3-6 誤差校正建構類比兼分位映射法(BCCAQ)之降尺度概念(流程)示意圖。

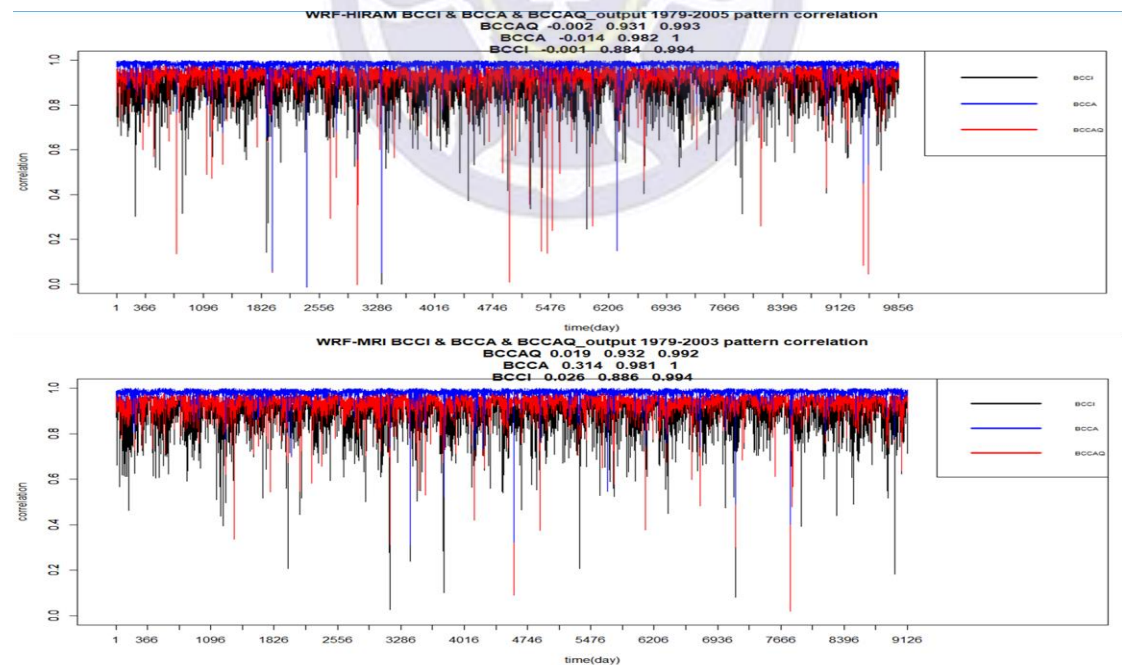


圖 4-1 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

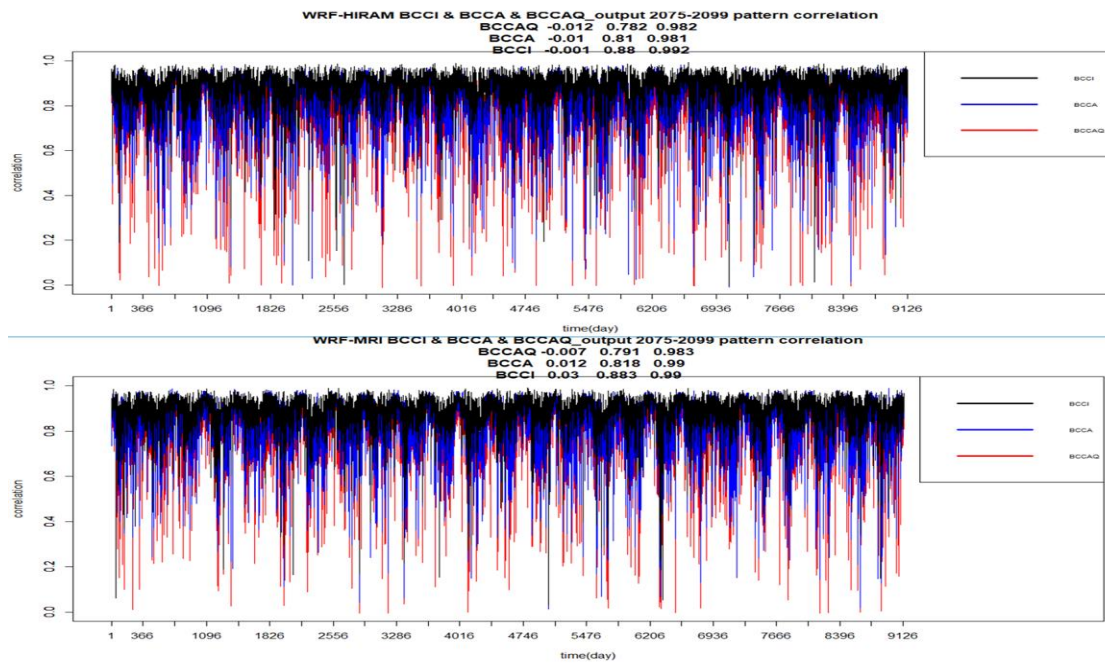


圖 4-2 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

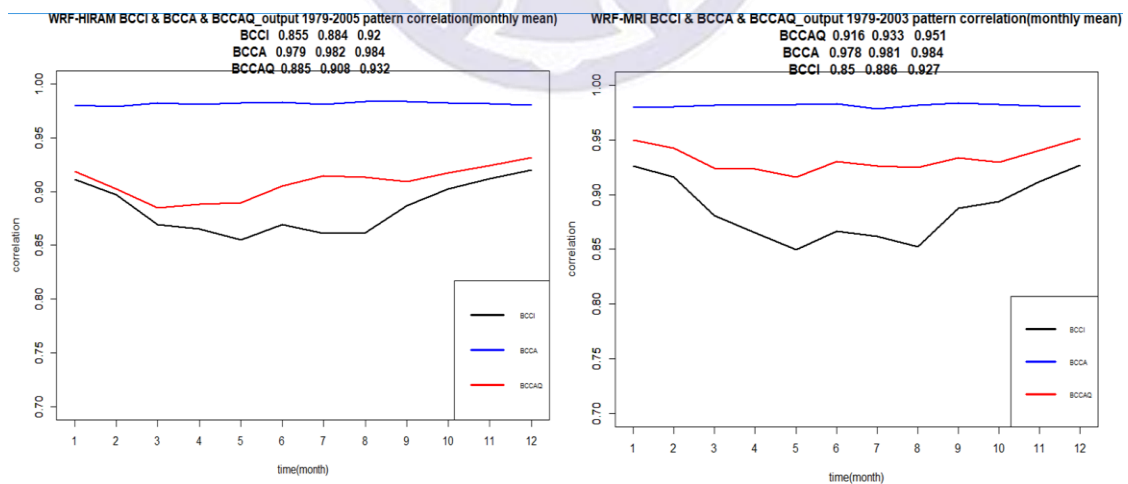


圖 4-3 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

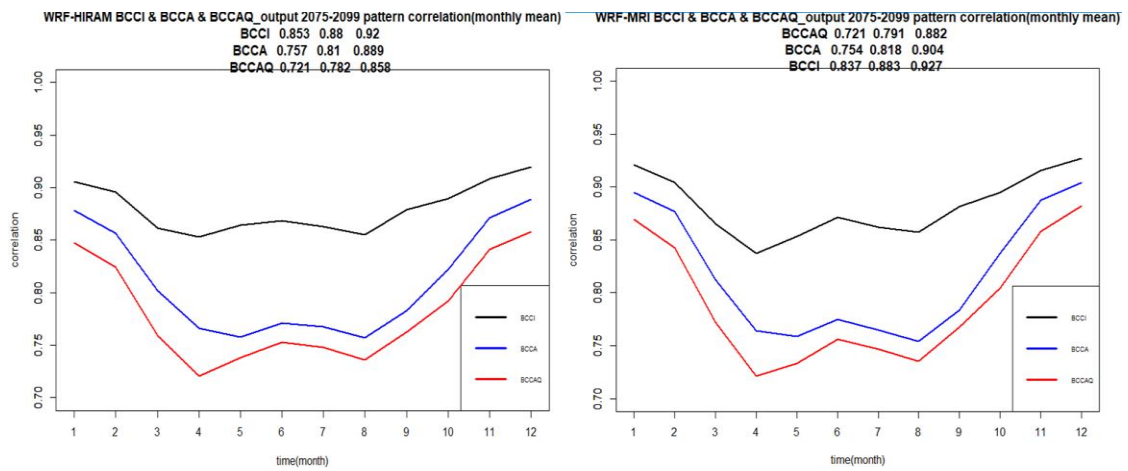


圖 4-4 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

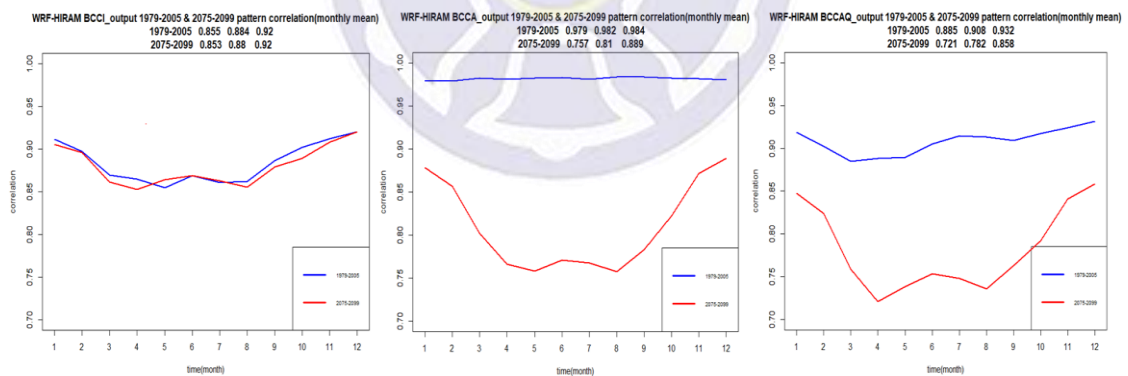


圖 4-5 WRF-HIRAM 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

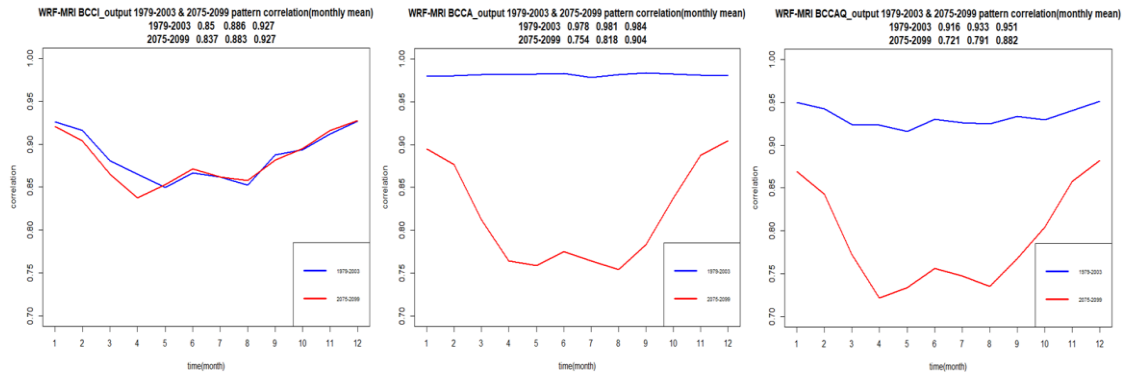


圖 4-6 WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

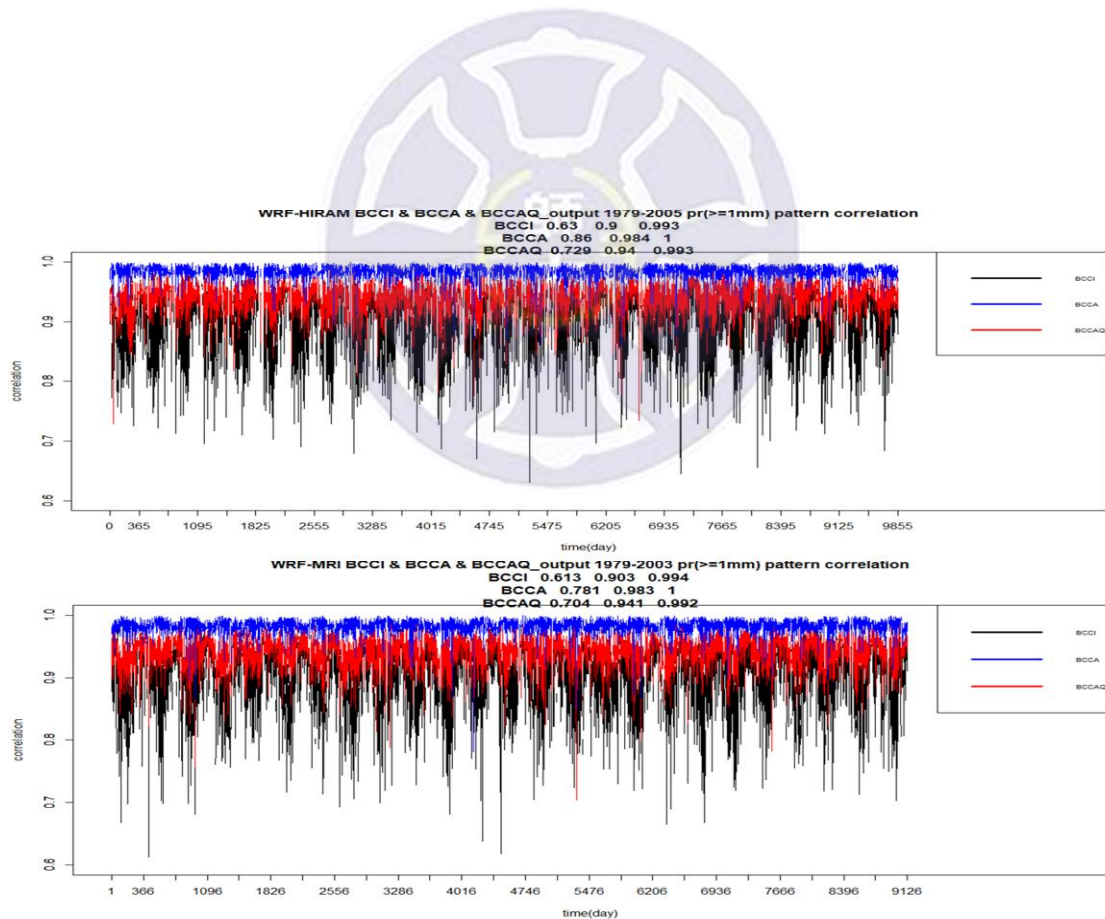


圖 4-7 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

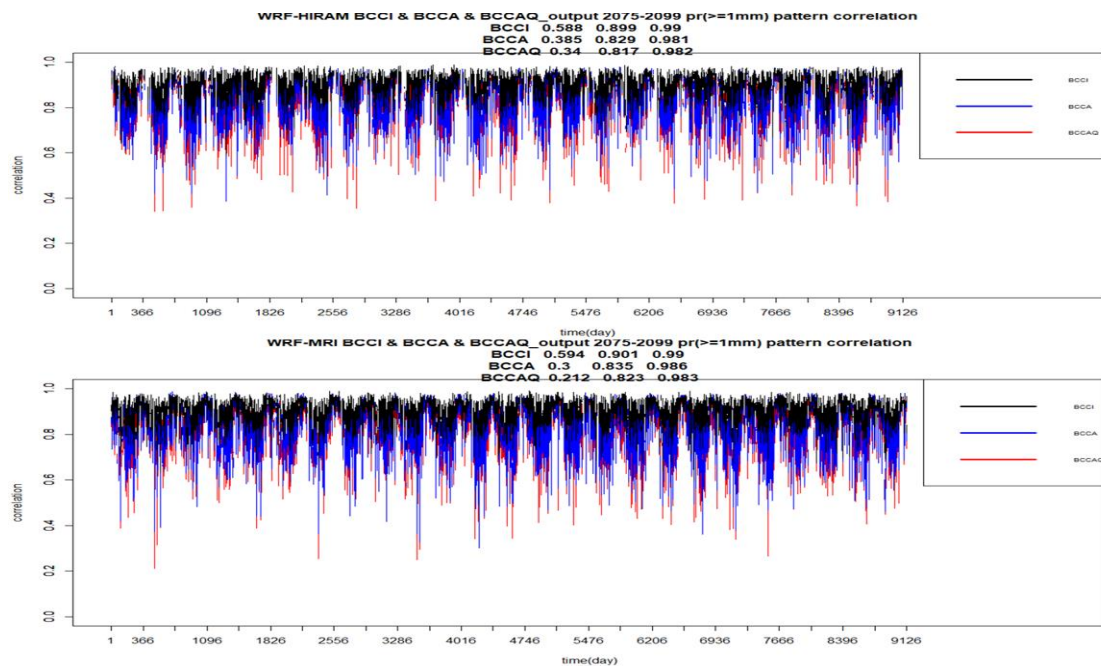


圖 4-8 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

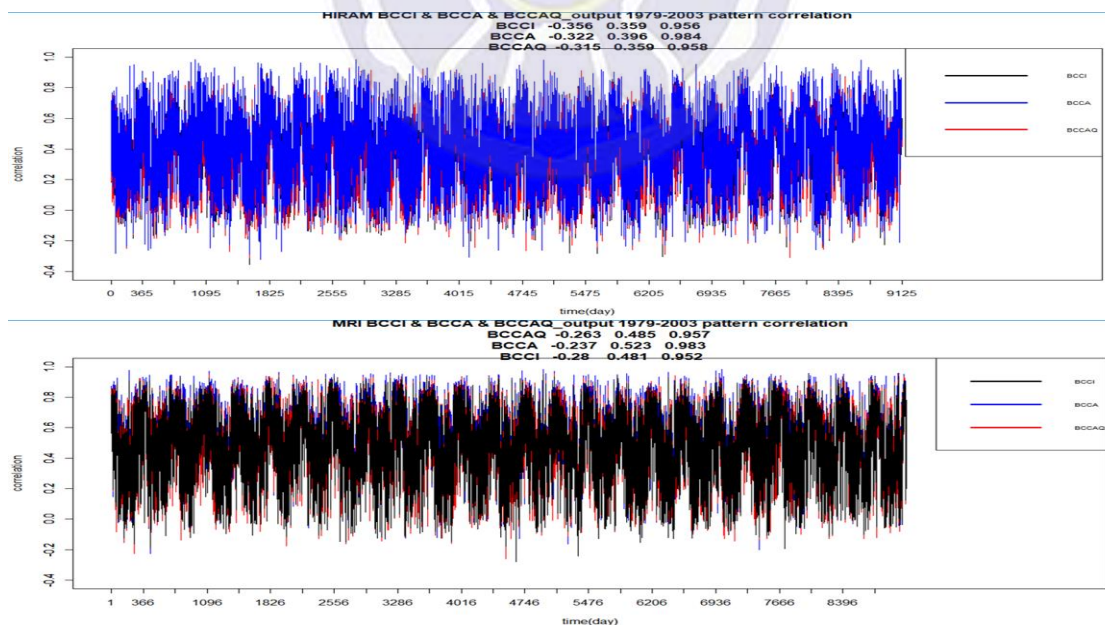


圖 4-9 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

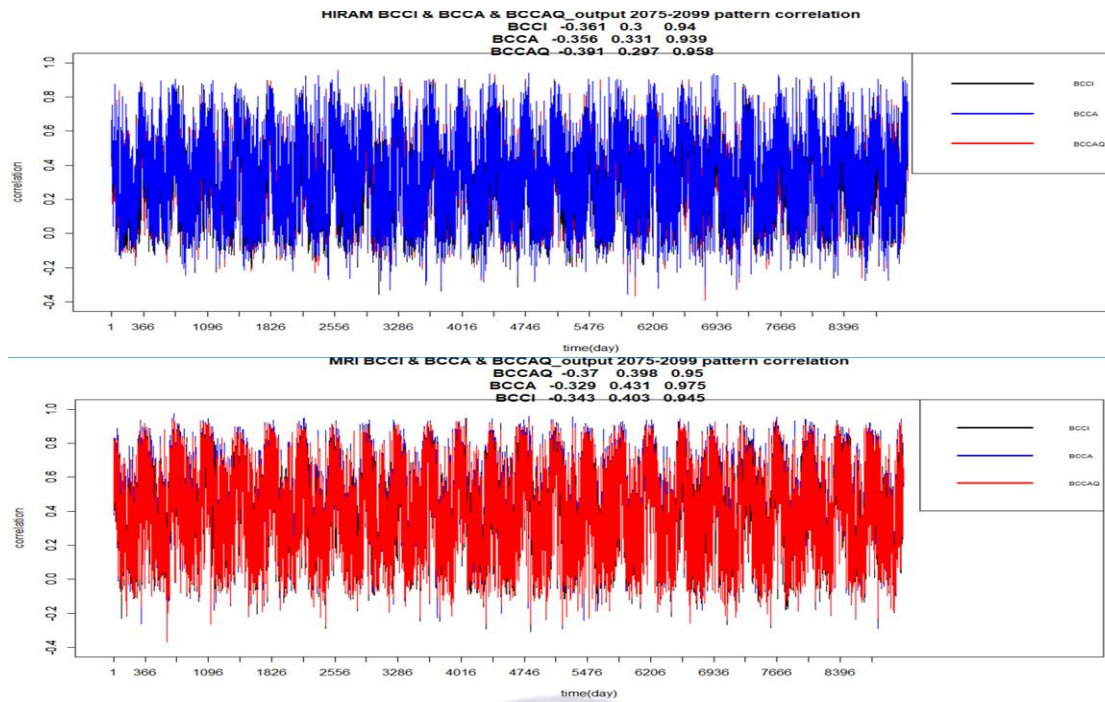


圖 4-10 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

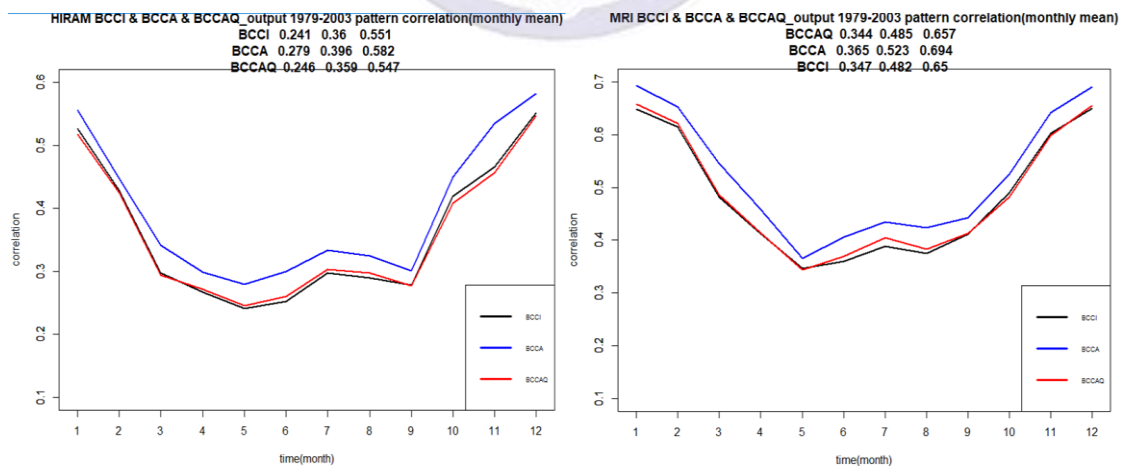


圖 4-11 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

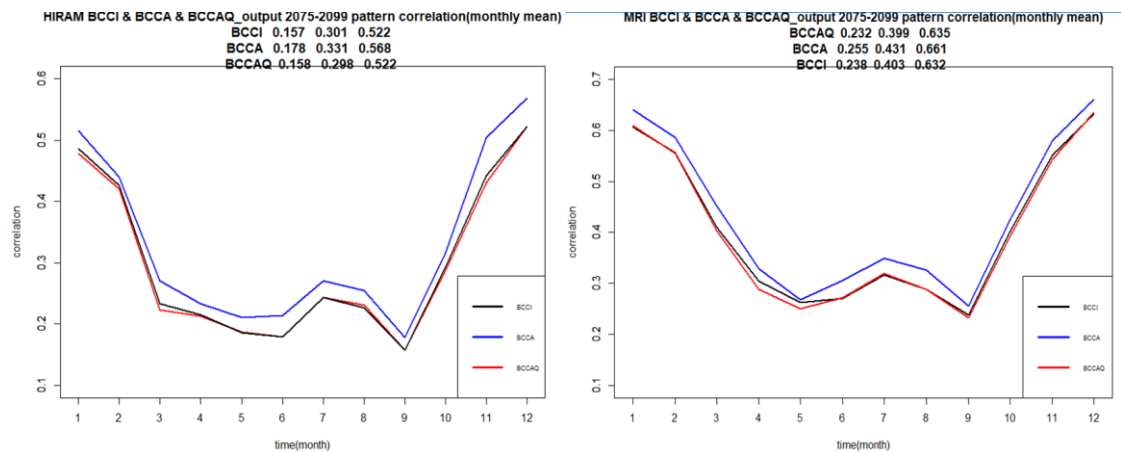


圖 4-12 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

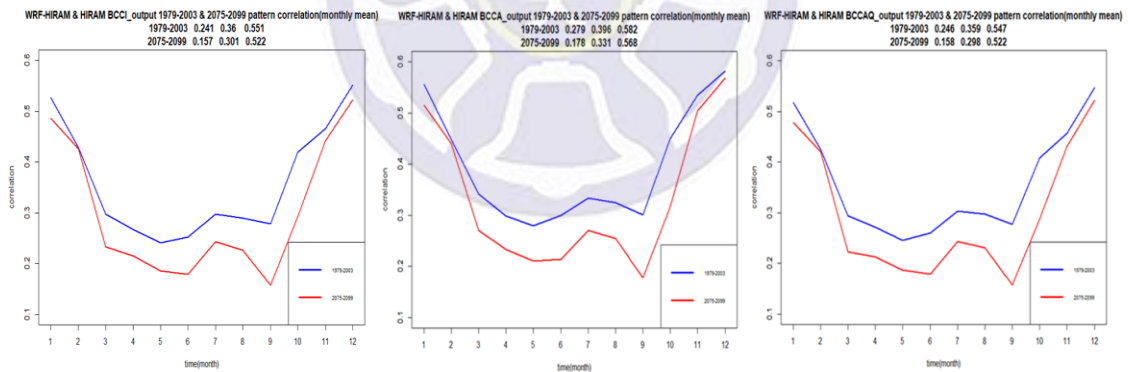


圖 4-13 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

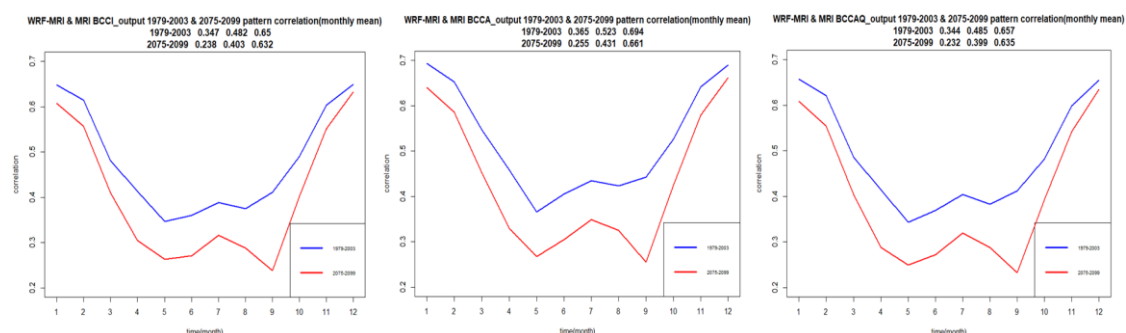


圖 4-14 WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料的月氣候平均之空間型態相關係數。圖上方不同時期後所列的數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

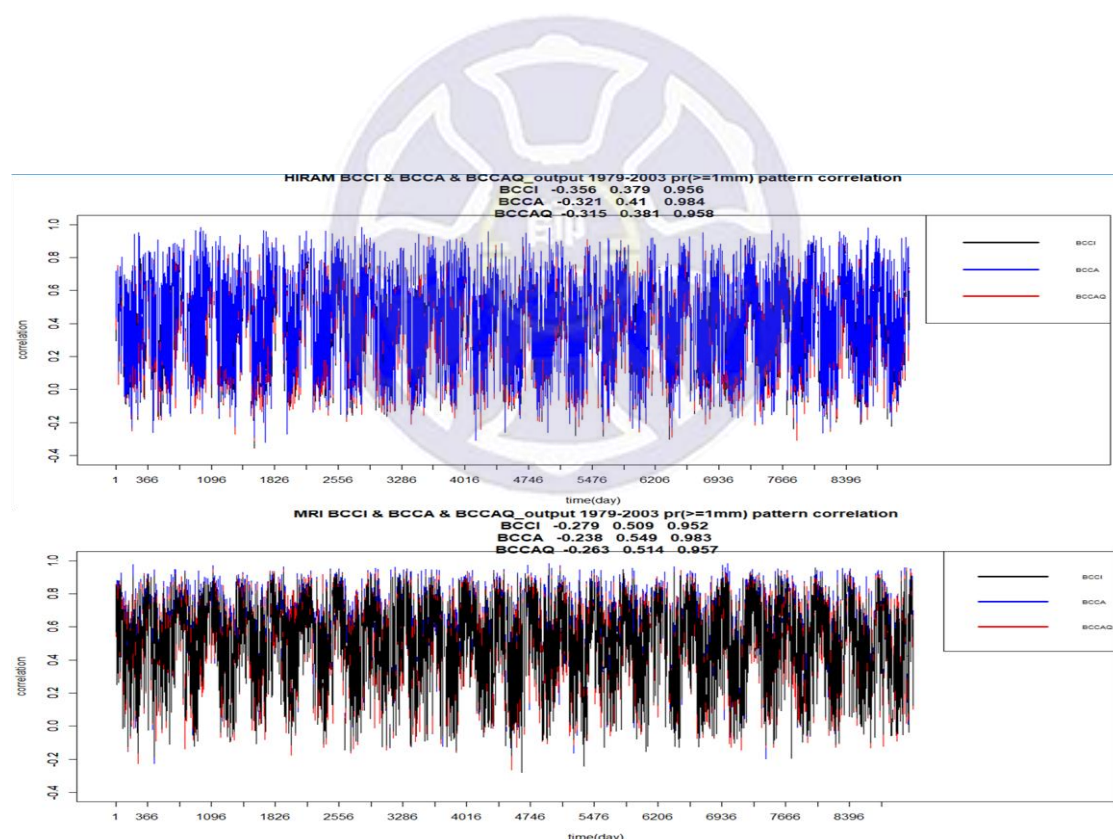


圖 4-15 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

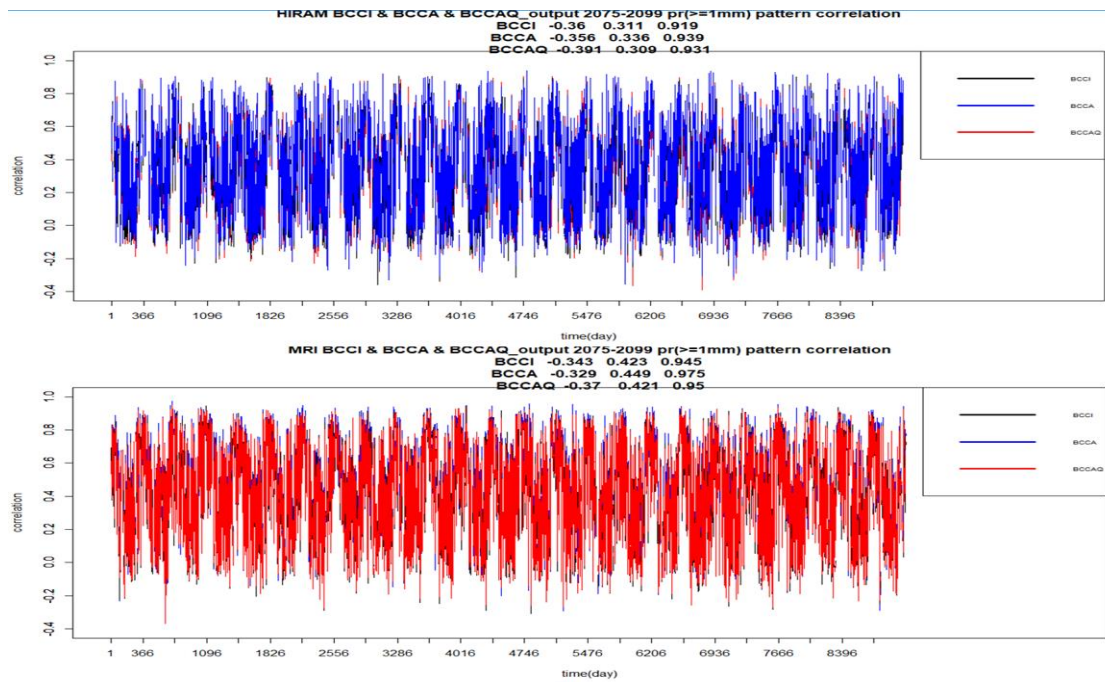


圖 4-16 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其區域平均降雨 $\geq 1\text{mm/day}$ 門檻之天數的空間型態相關係數。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

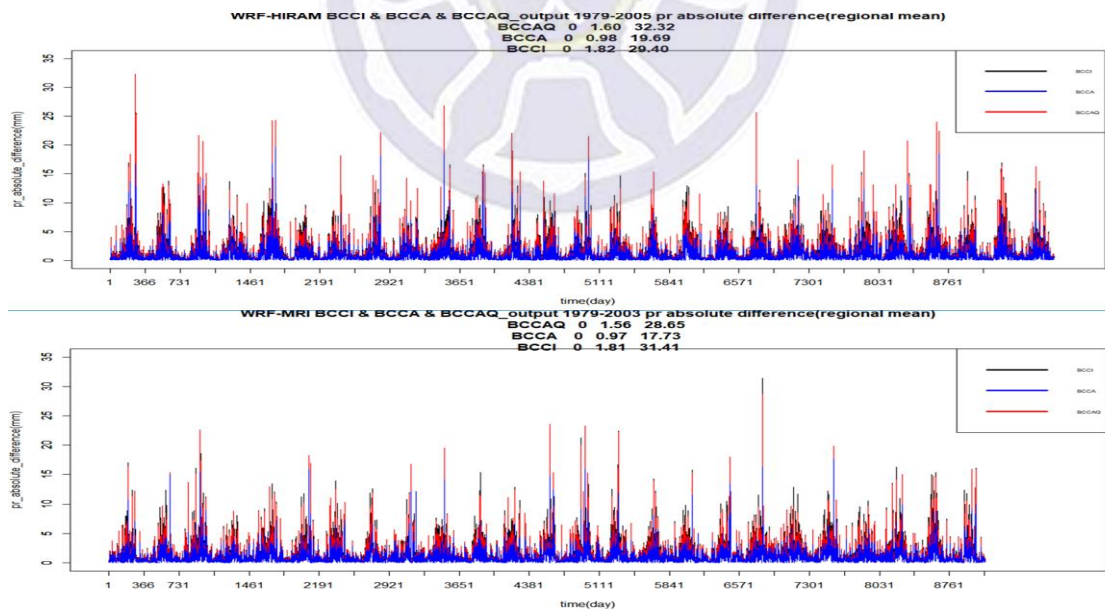


圖 4-17 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

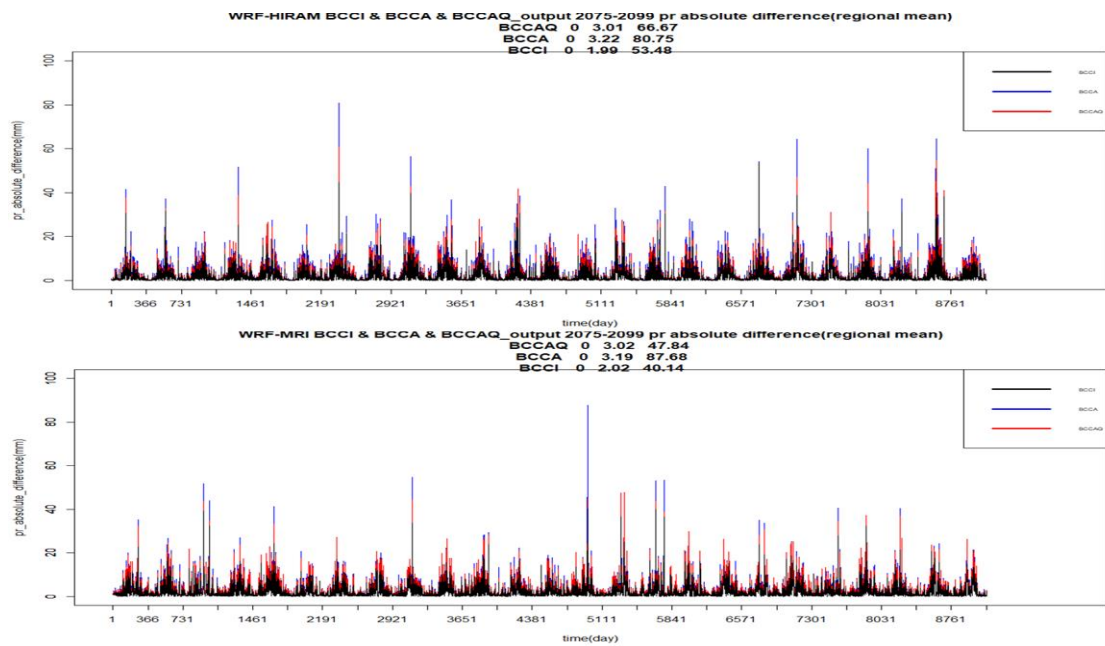


圖 4-18 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

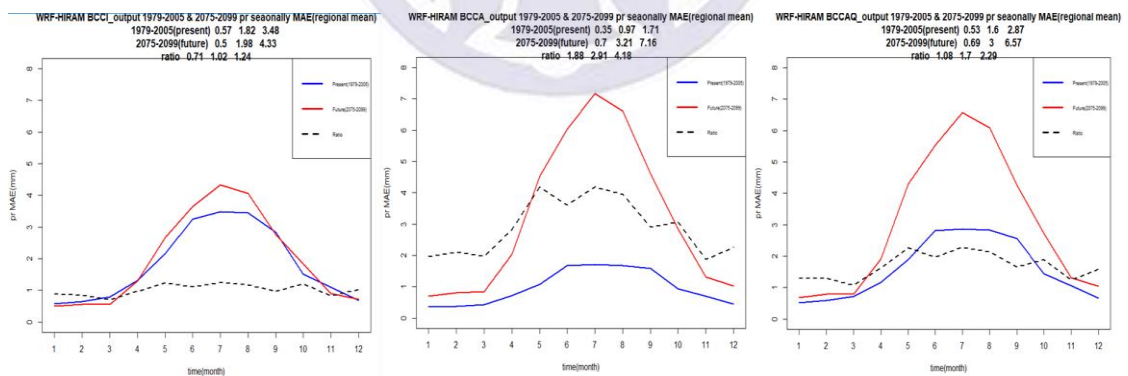


圖 4-19 WRF-HiRAM 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

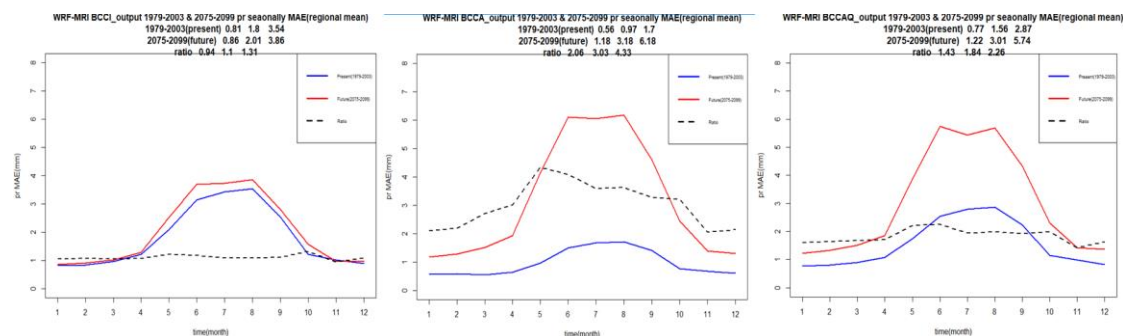


圖 4-20 WRF-MRI 升尺度部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

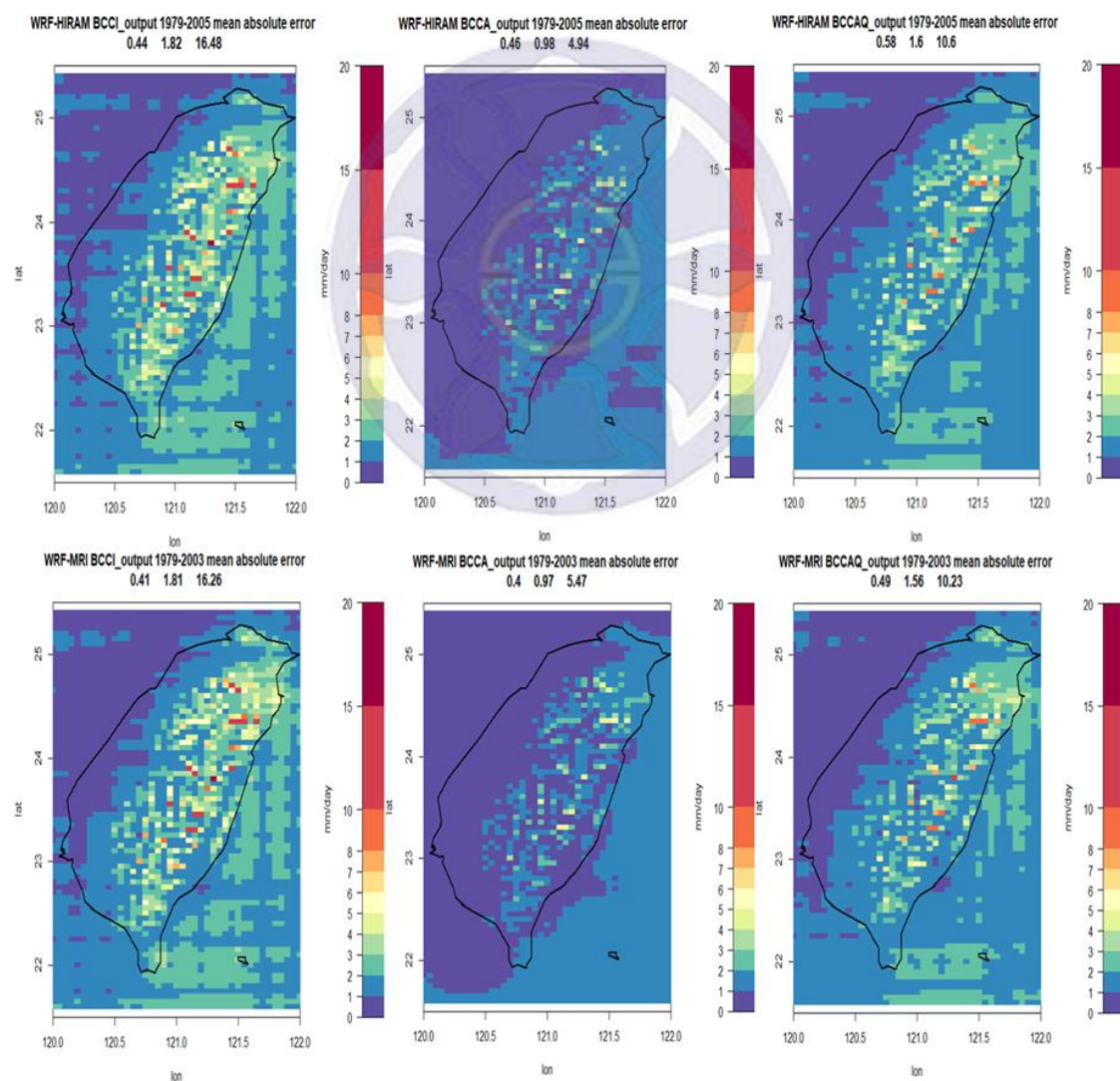


圖 4-21 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原

始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

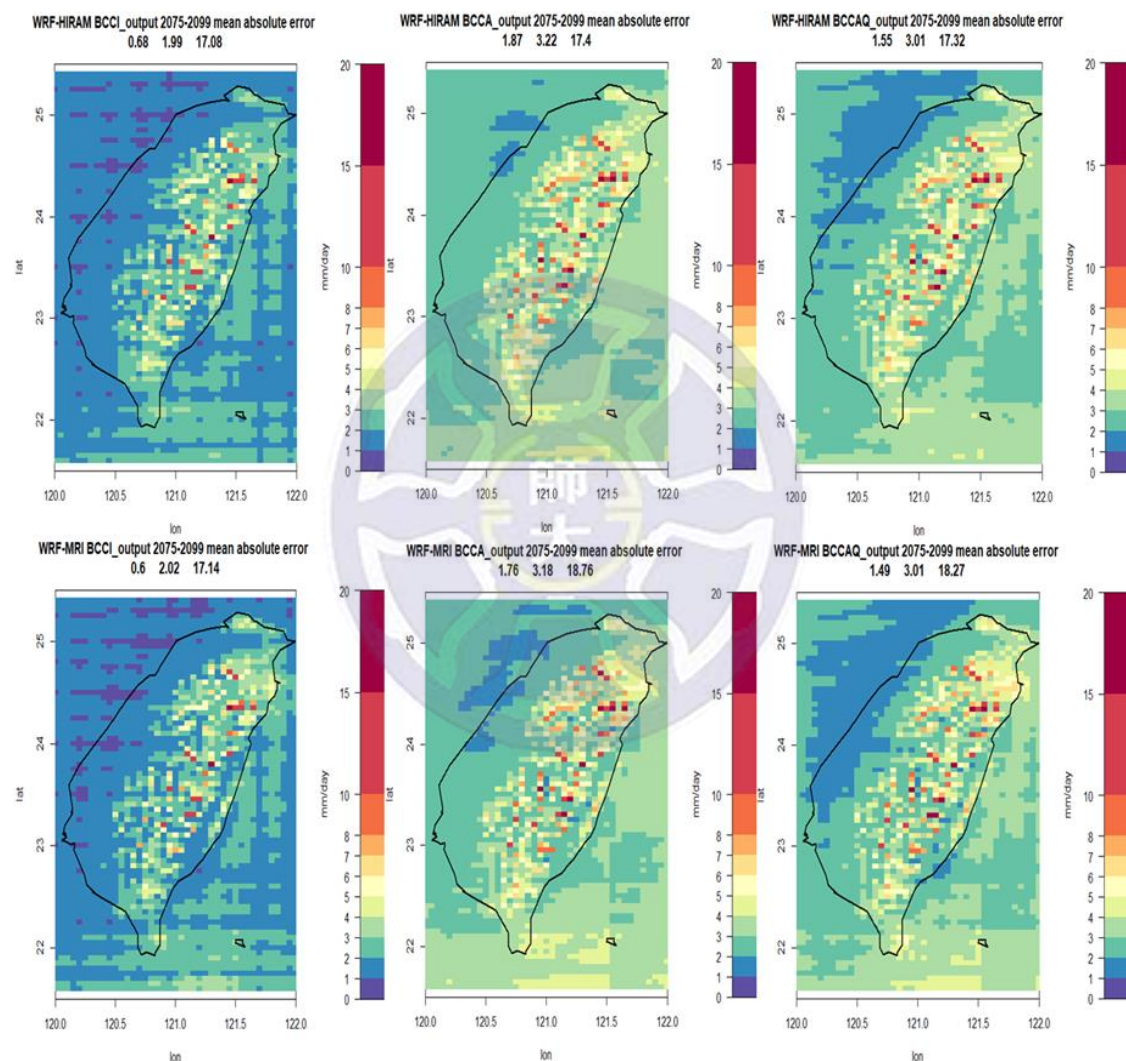


圖 4-22 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

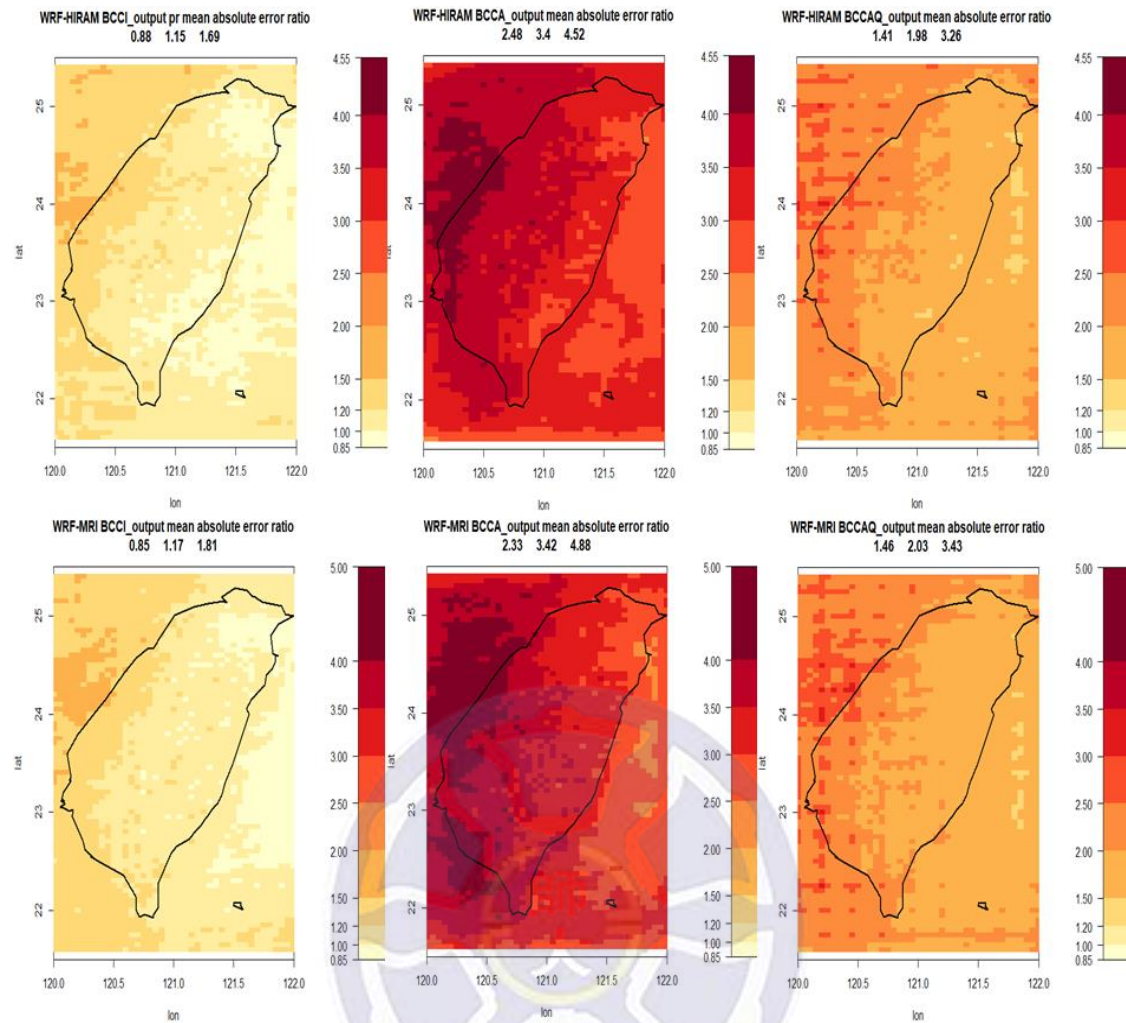


圖 4-23 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期與未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差比值（未來時期/現在時期）之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

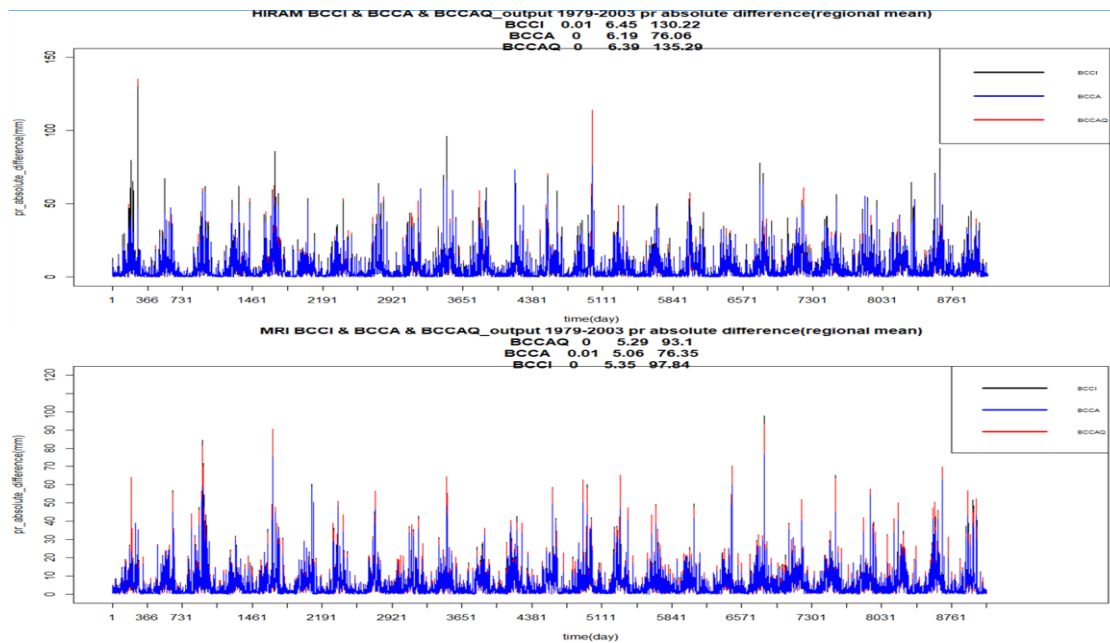


圖 4-24 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

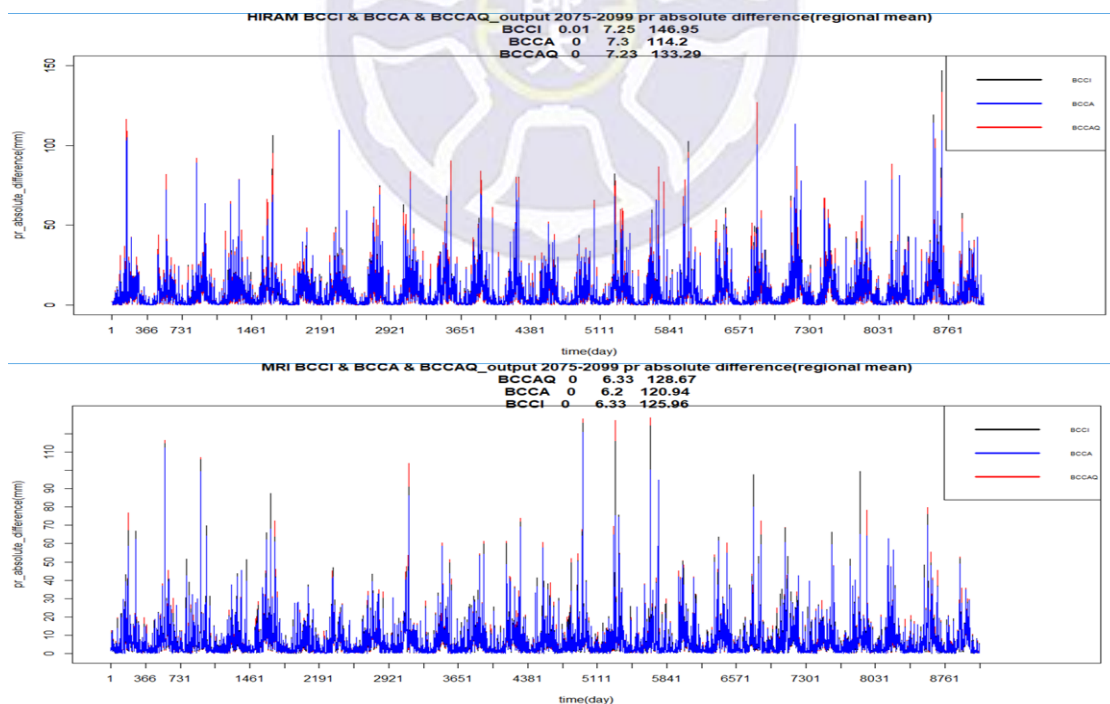


圖 4-25 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料做了區域平均後的平均絕對誤差(單位:mm/day)。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

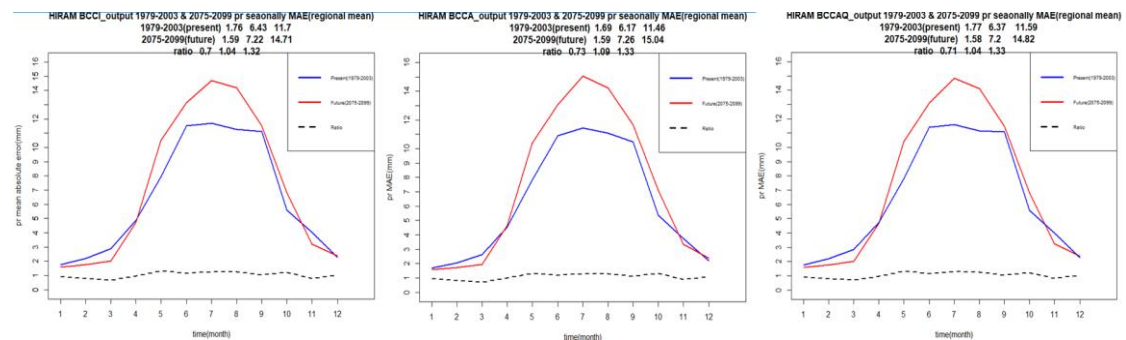


圖 4-26 WRF-HIRAM 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

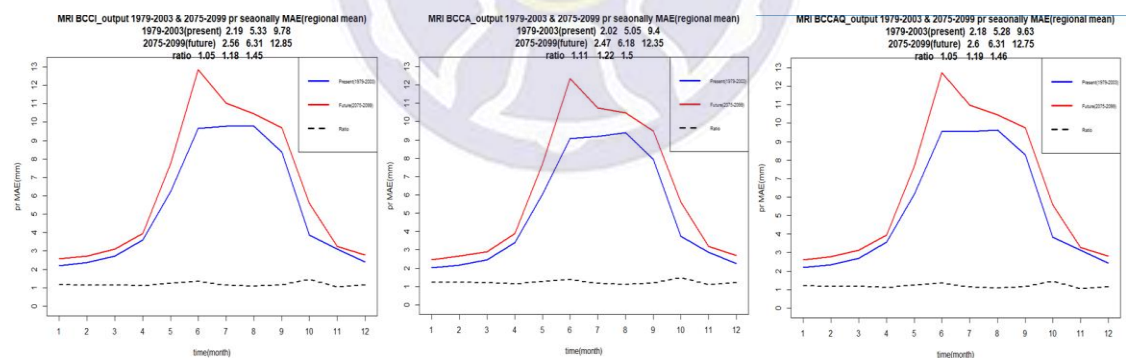


圖 4-27 WRF-MRI 原始模式資料部分現在和未來時期 BCCI、BCCA 和 BCCAQ 此三種統計降尺度方法降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了區域平均後的月氣候平均之平均絕對誤差。圖上方數值由左至右分別為最小值、平均值、最大值。

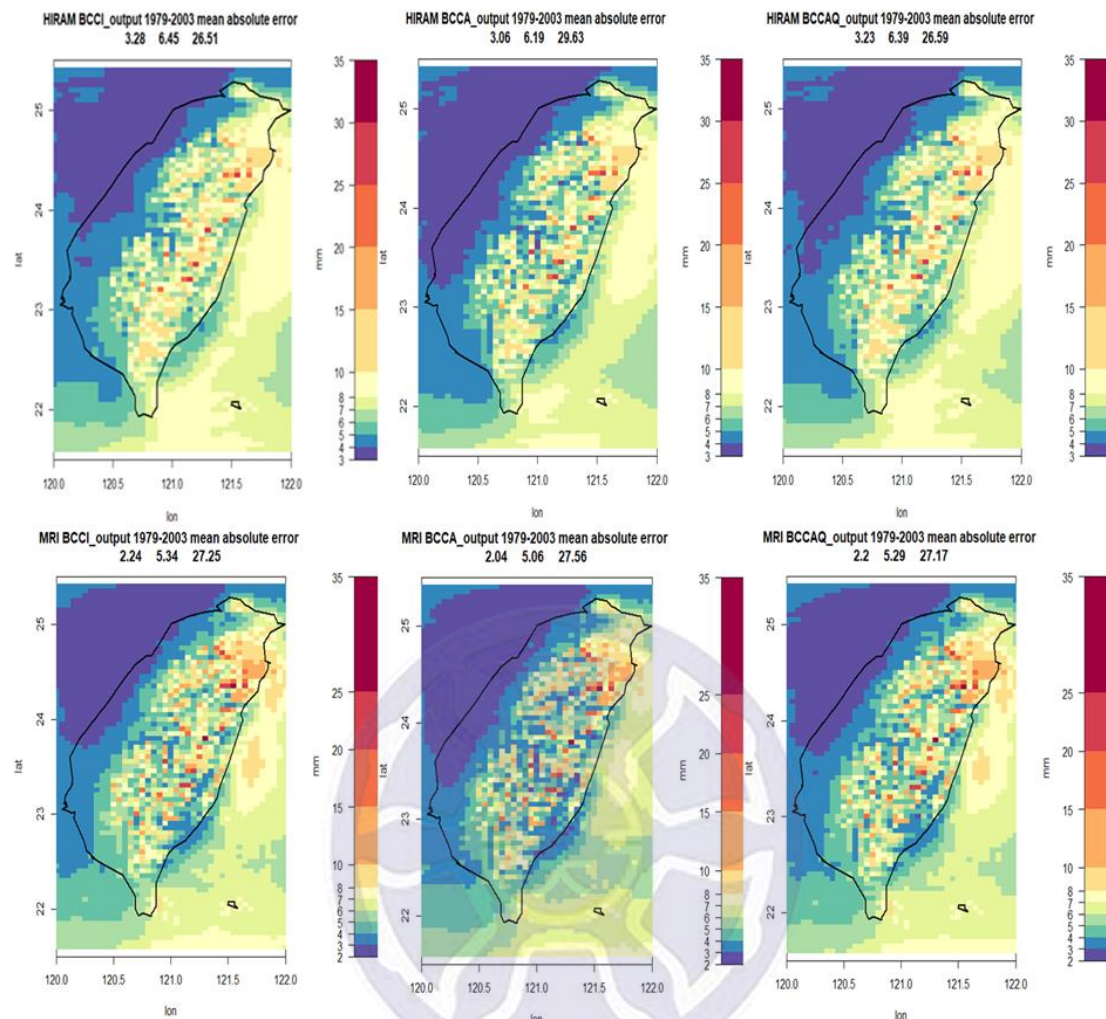


圖 4-28 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

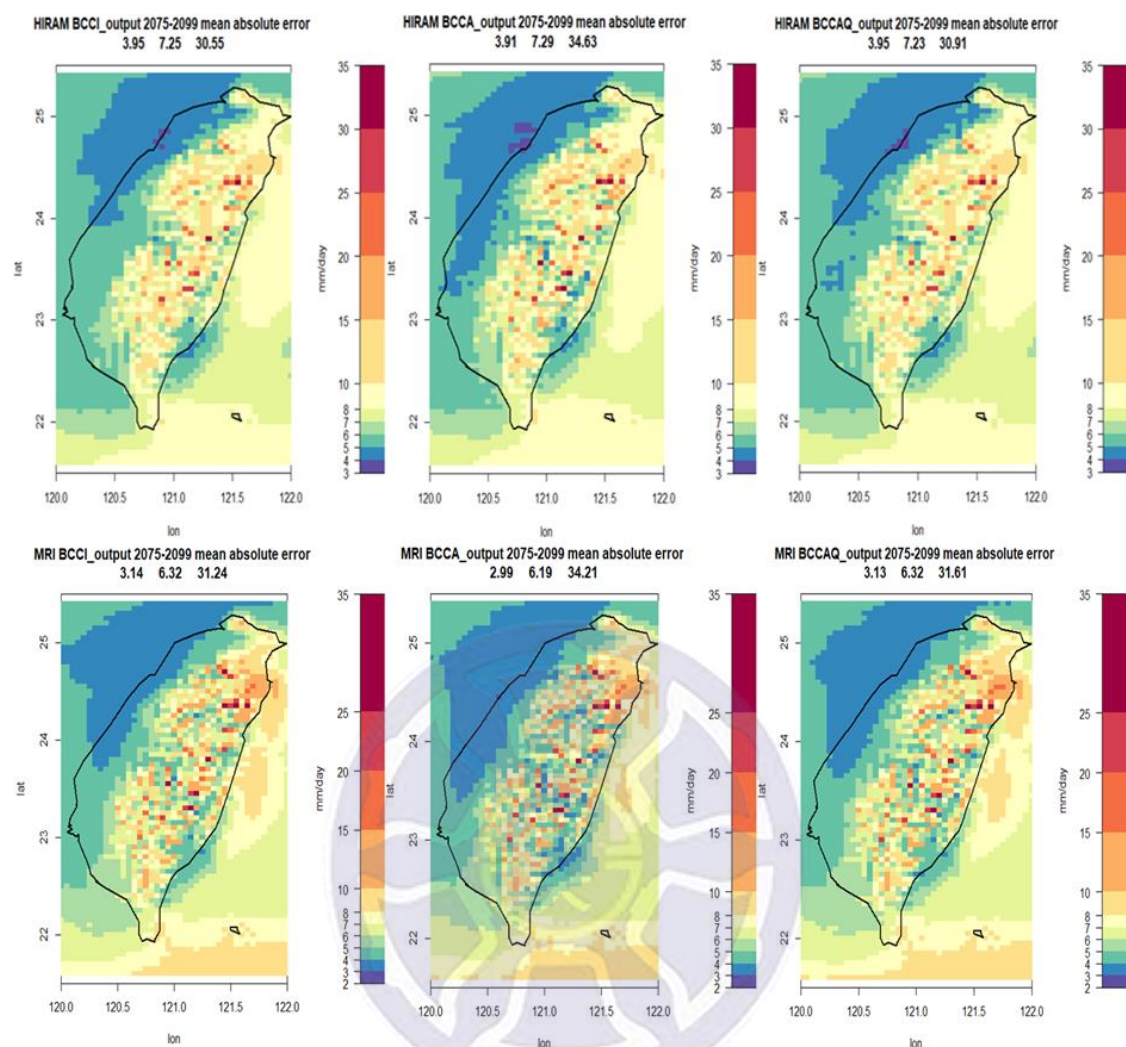


圖 4-29 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

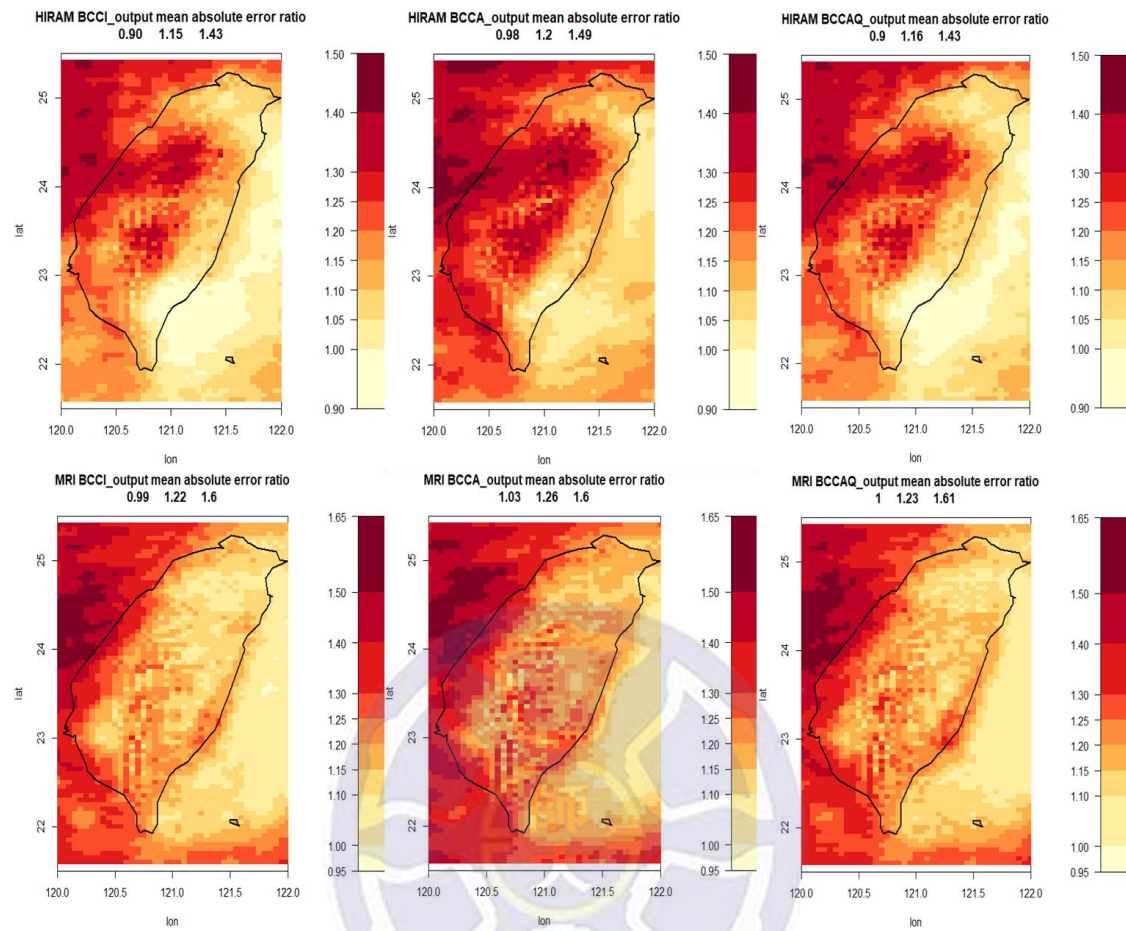


圖 4-30 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期與未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均後的平均絕對誤差比值(未來時期/現在時期)之區域分布圖。由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

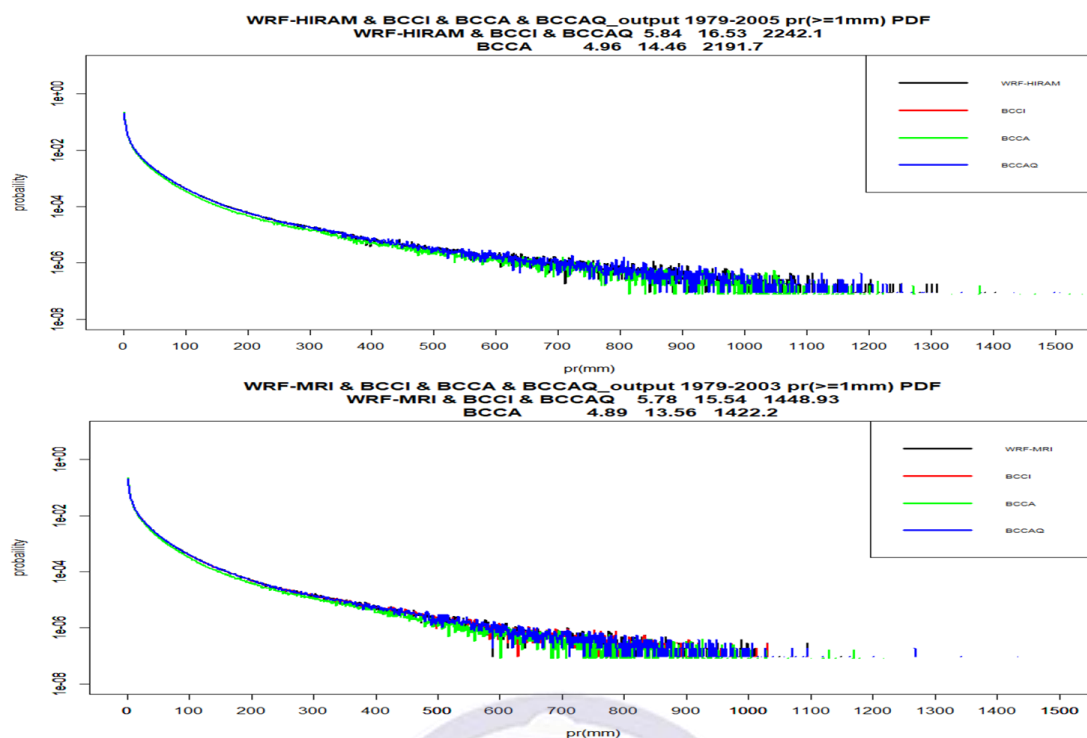


圖 4-31 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

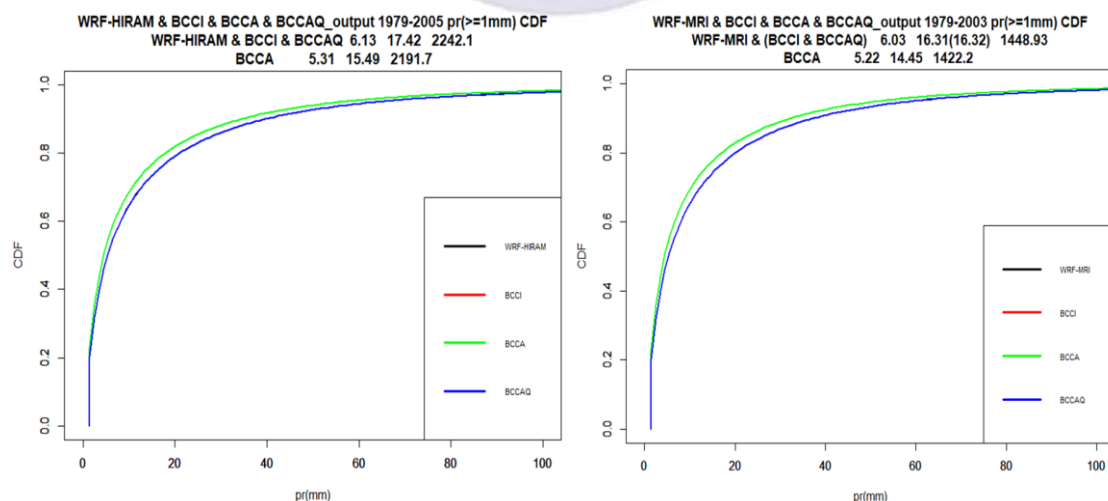


圖 4-32 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布

圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

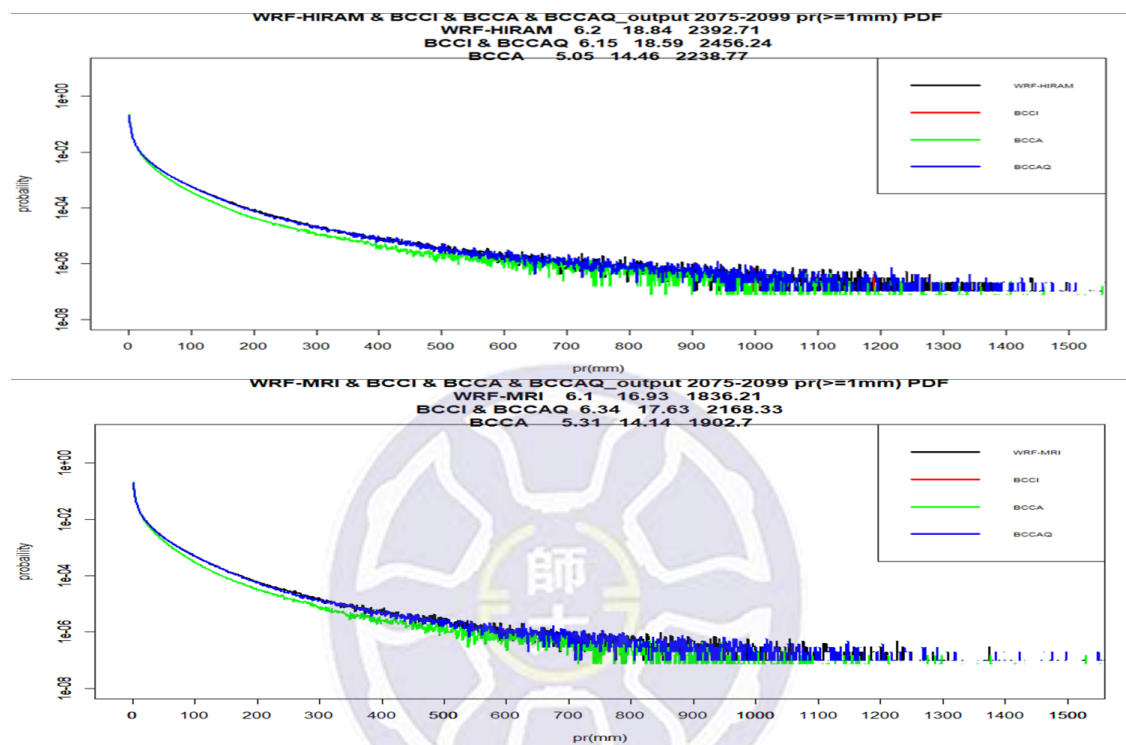


圖 4-33 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

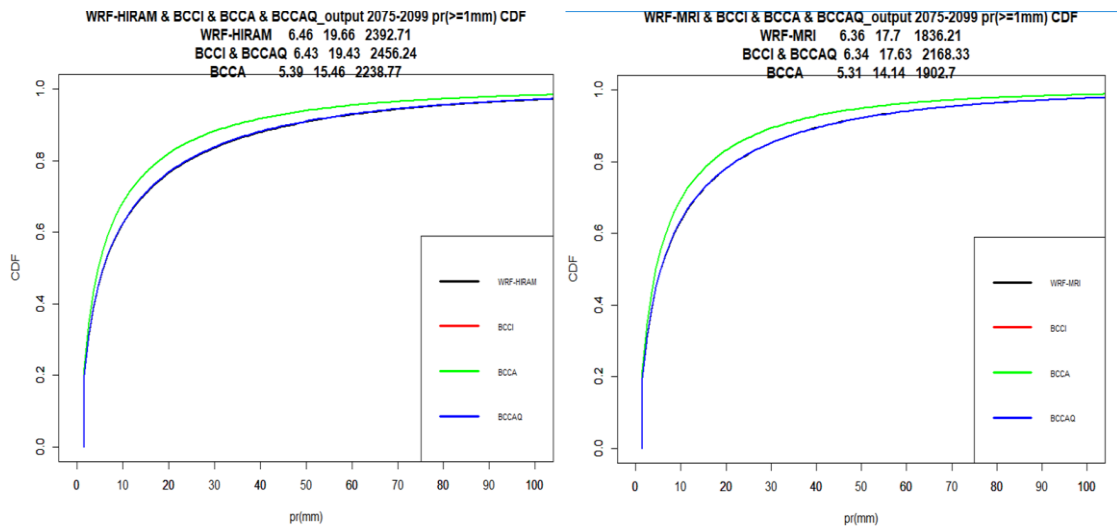


圖 4-34 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

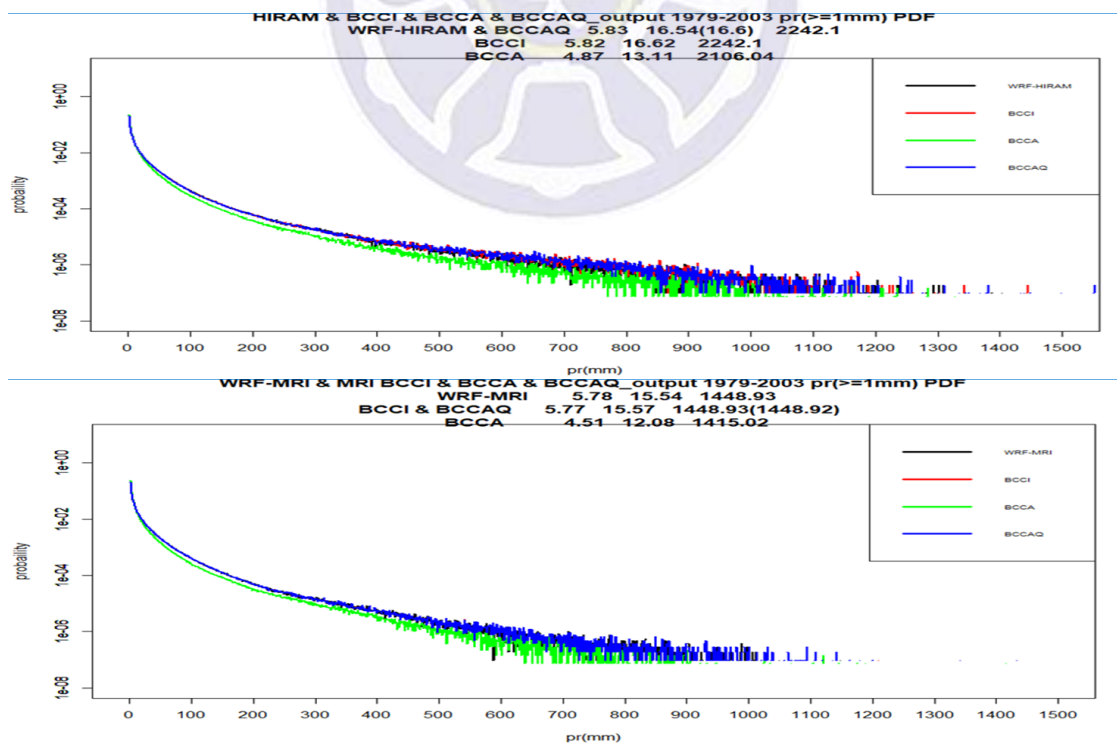


圖 4-35 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分

布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

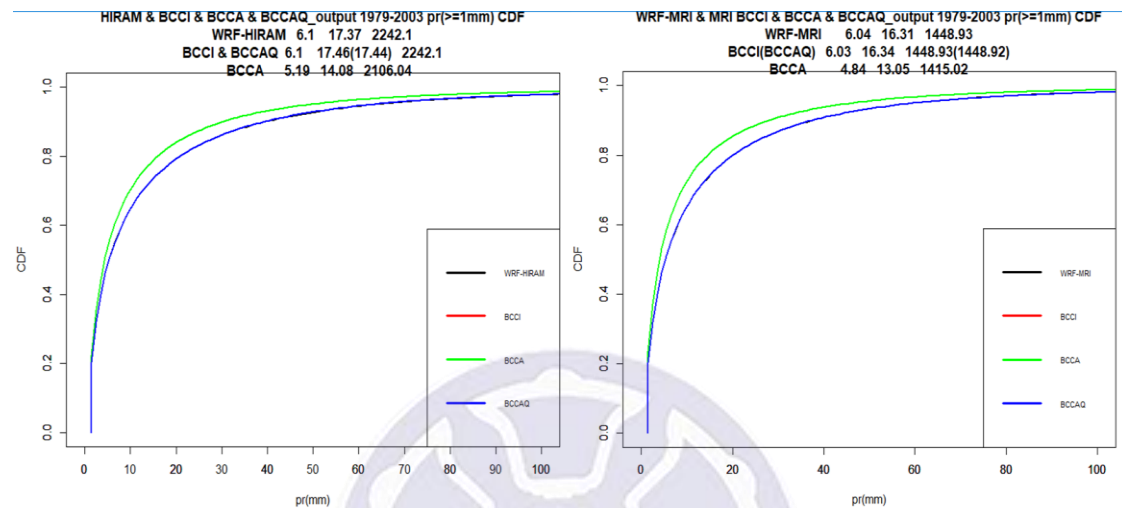


圖 4-36 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

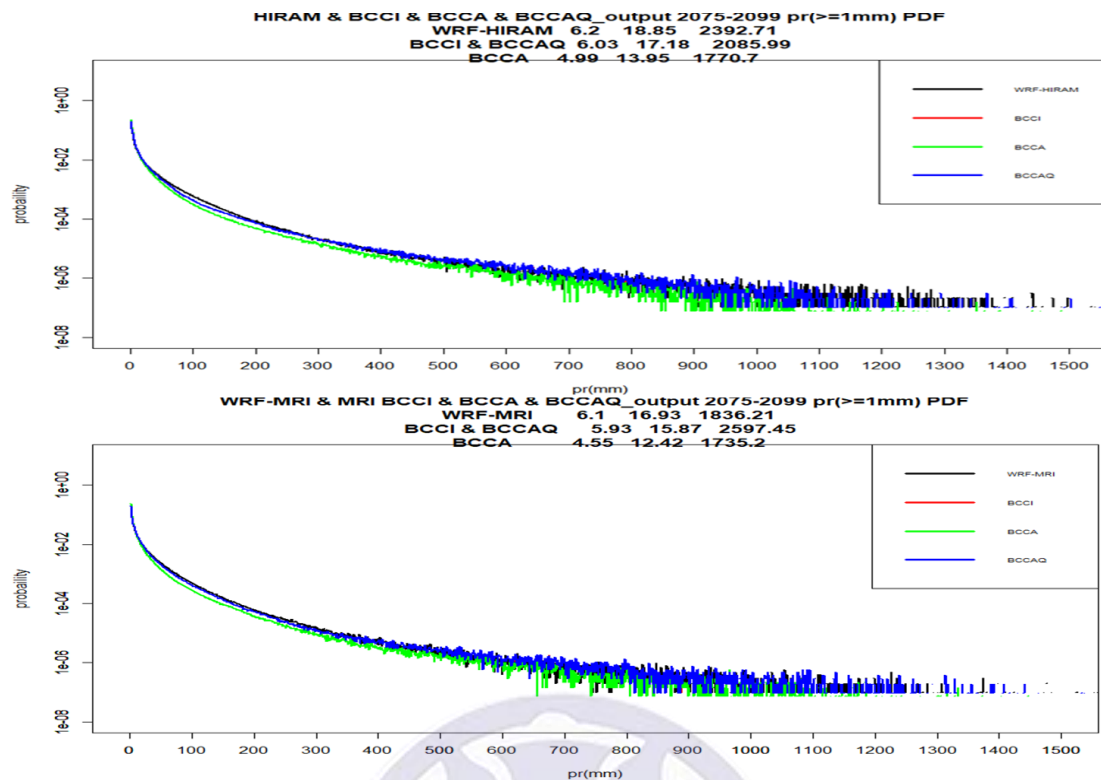


圖 4-37 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

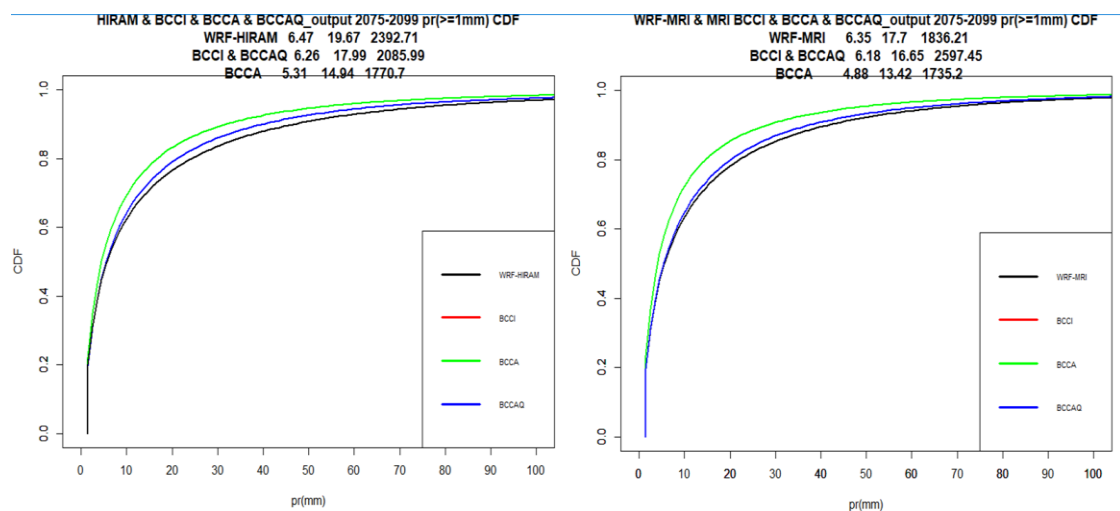


圖 4-38 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果

果與原始高解析度動力降尺度資料其所有時間所有網格降雨值 $\geq 1\text{mm}$ 的累積機率分布圖。圖上在原始高解析度動力降尺度資料名稱及統計降尺度方法的英文代稱後所列的三個數值分別為中位數、平均值、最大值。

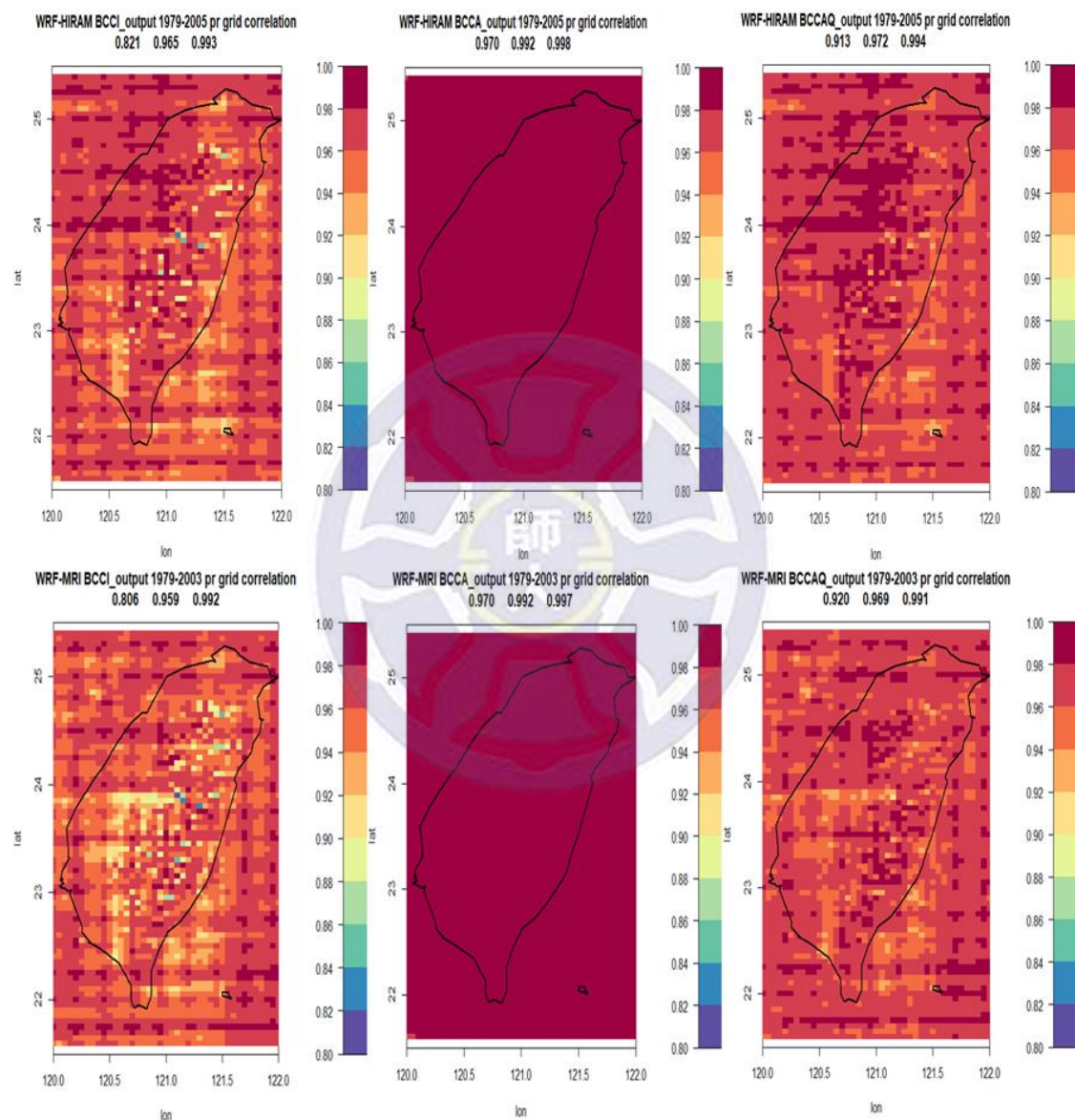


圖 4-39 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

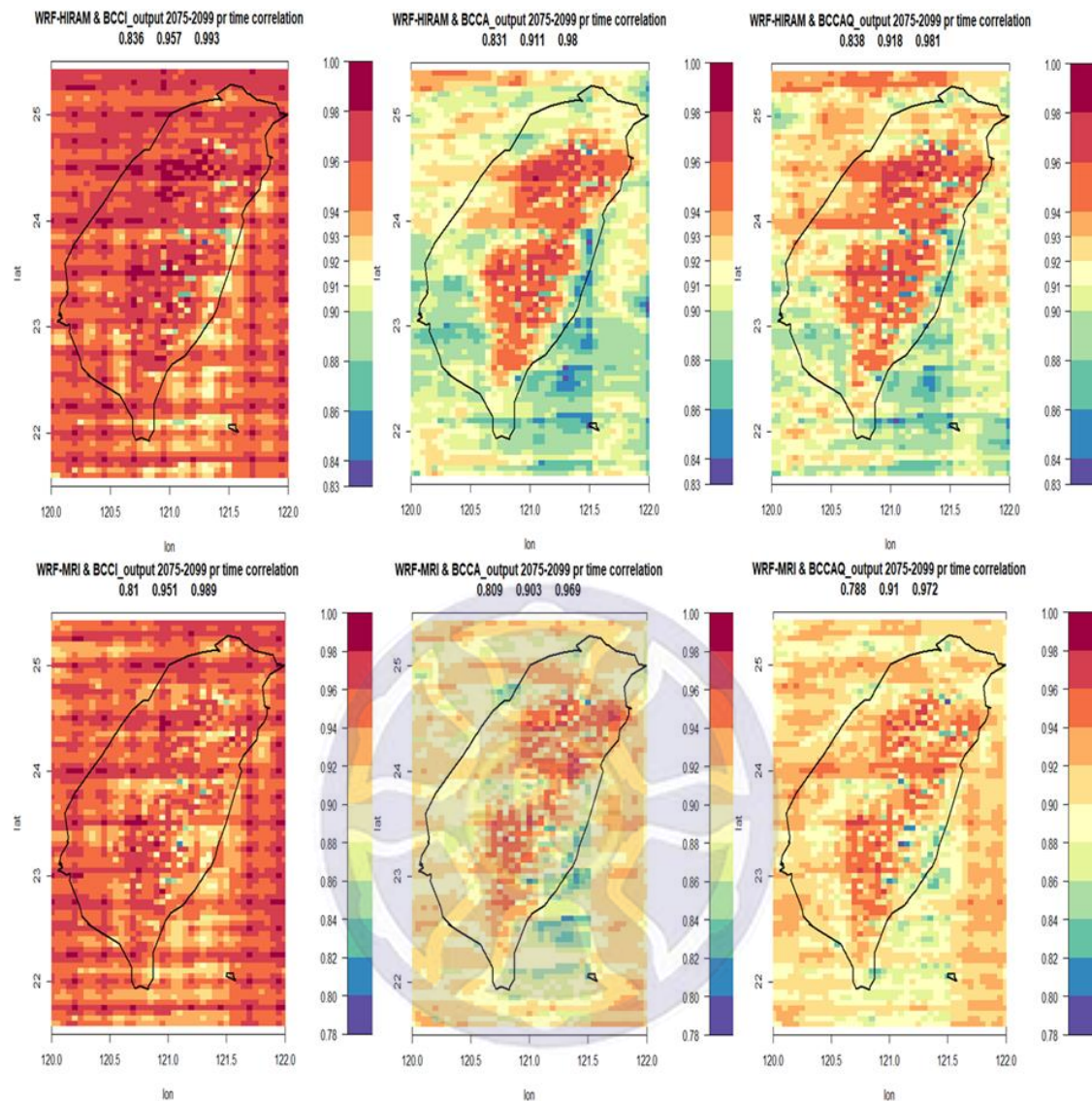


圖 4-40 WRF-HIRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

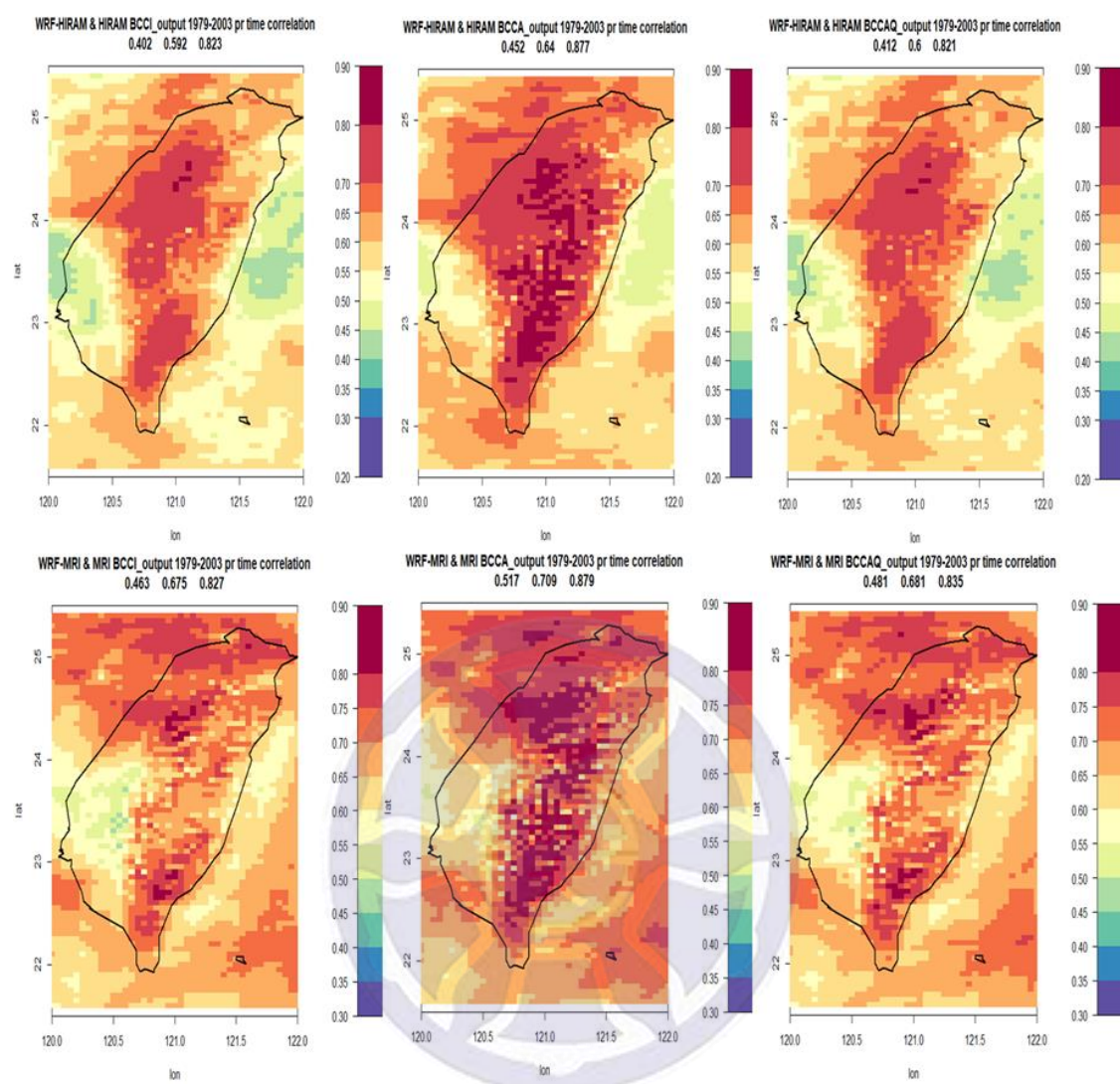


圖 4-41 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

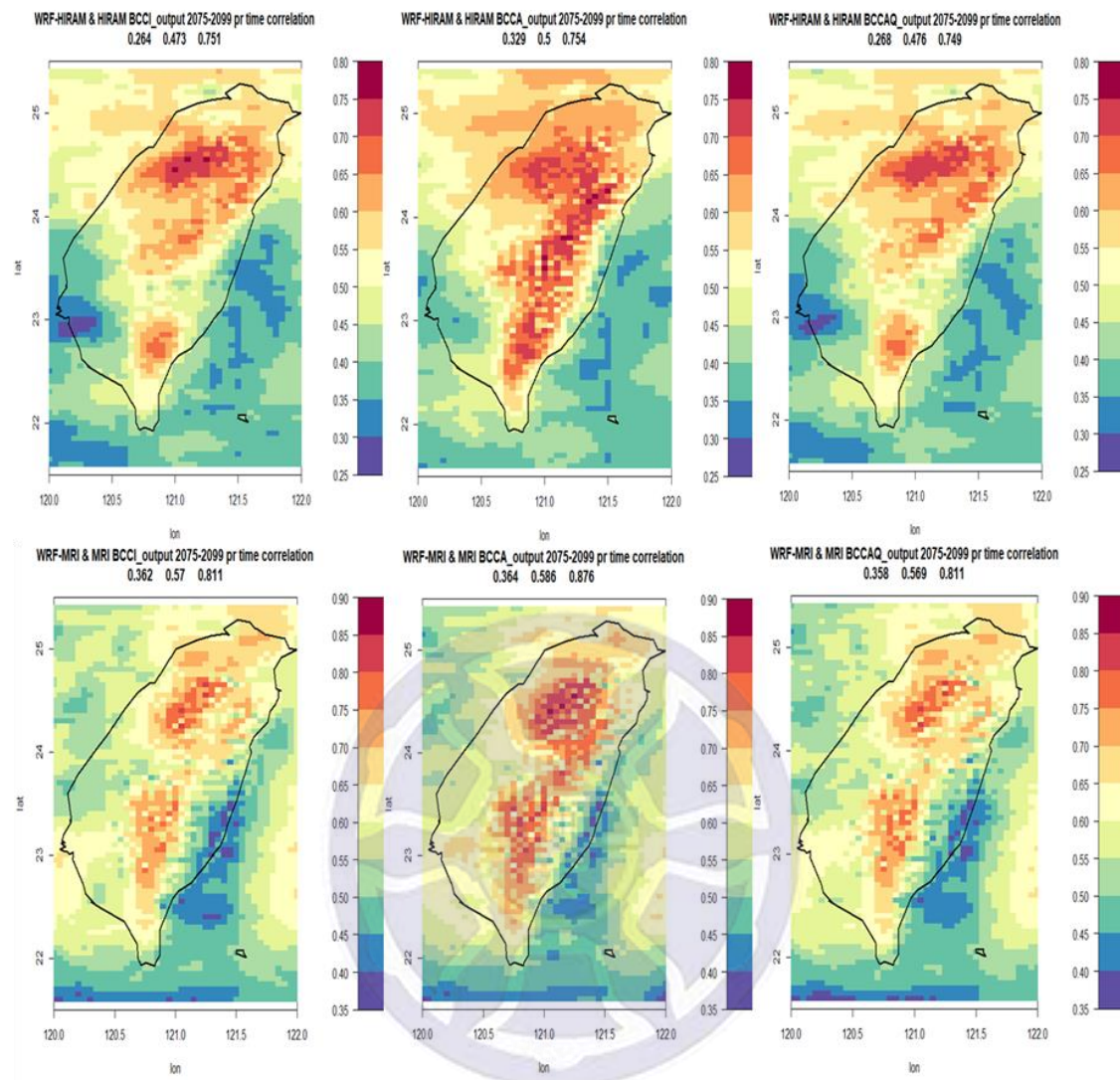


圖 4-42 WRF-HIRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料其每個網格的降雨值所計算的時間序列相關係數圖，由左而右分別為 BCCI、BCCA、BCCAQ 的結果，圖上方的數值由左至右則分別為最小值、平均值、最大值。

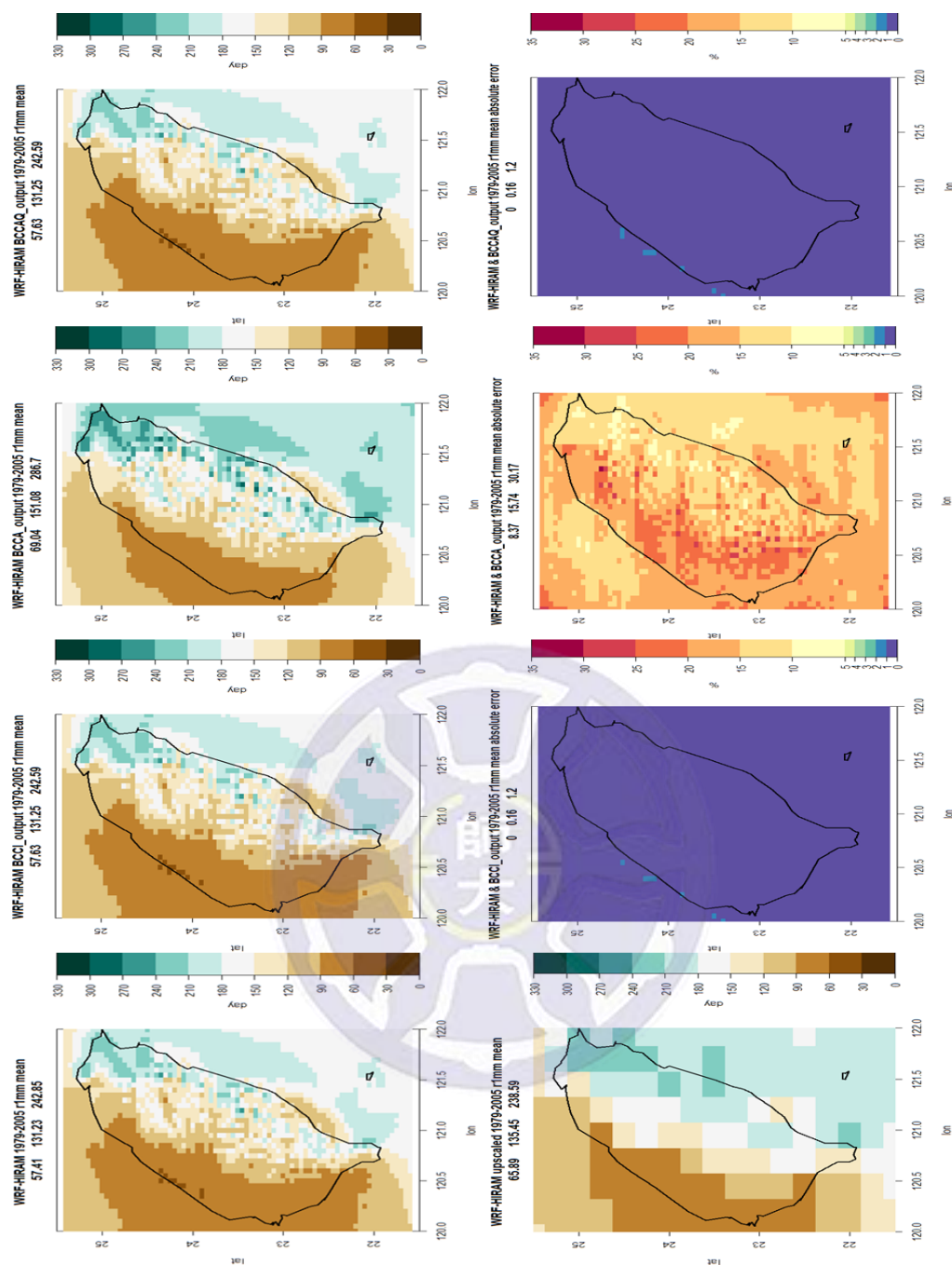


圖 5-1 WRF-HiRAM 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

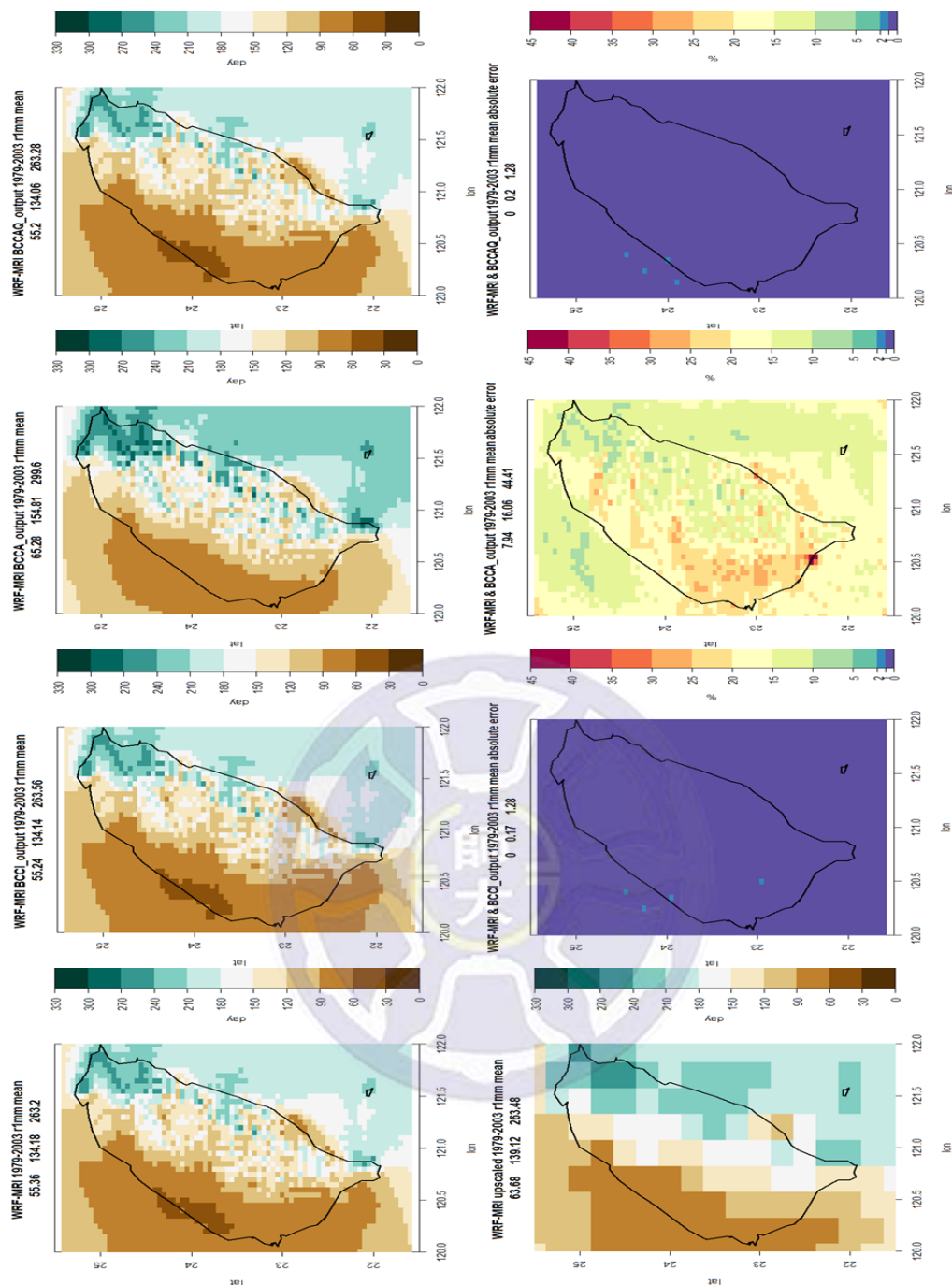


圖 5-2 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

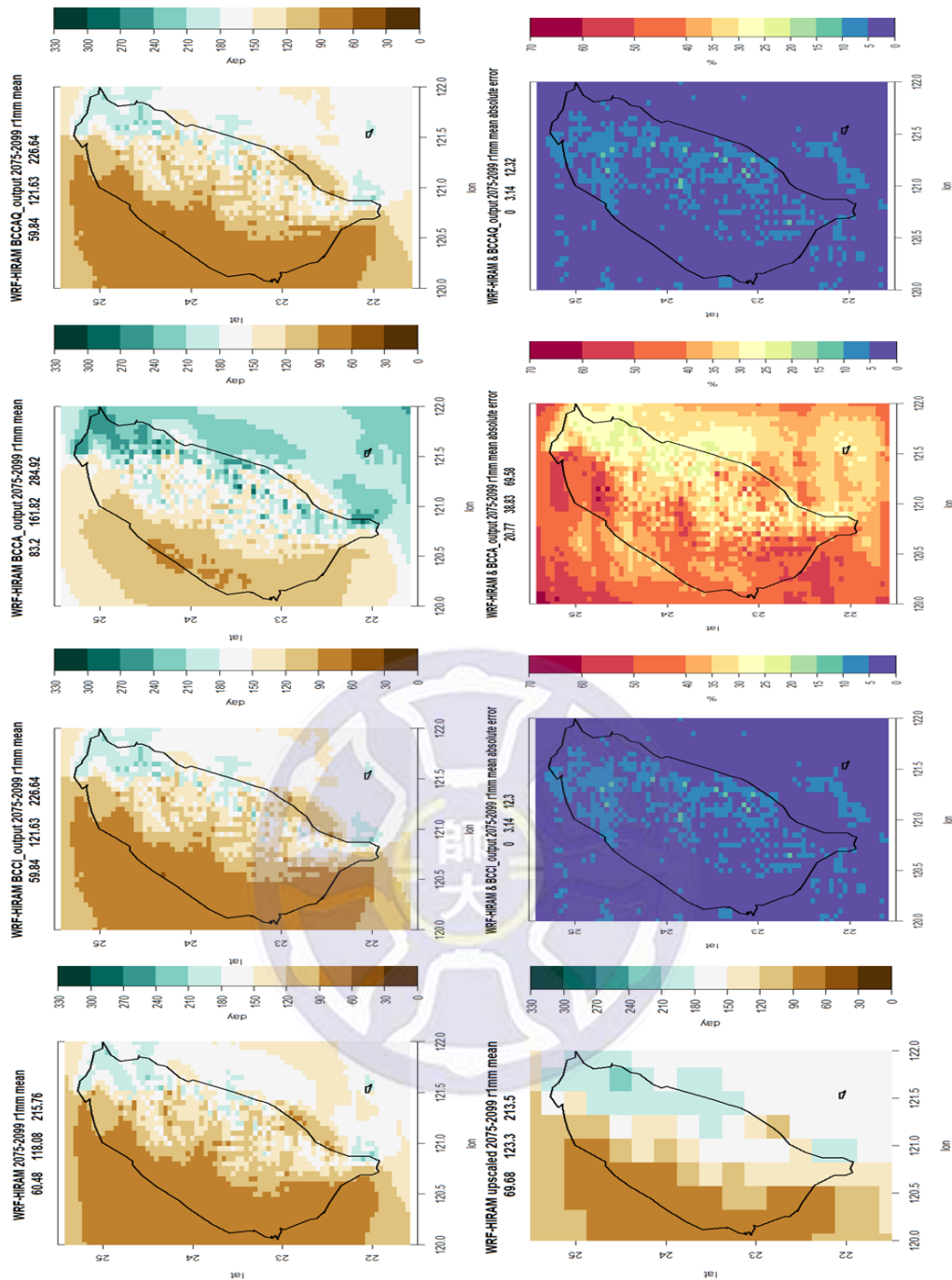


圖 5-3 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

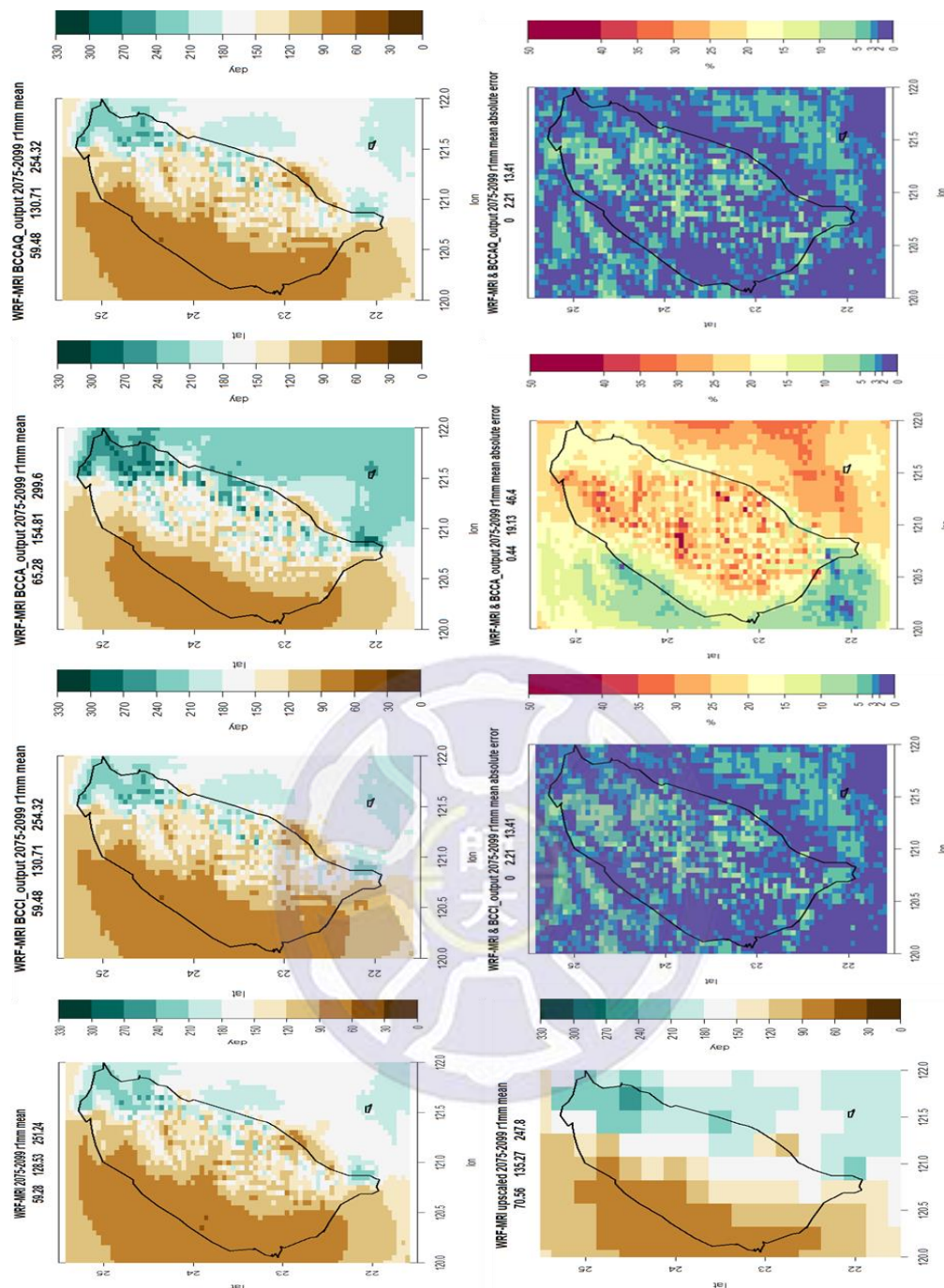


圖 5-4 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

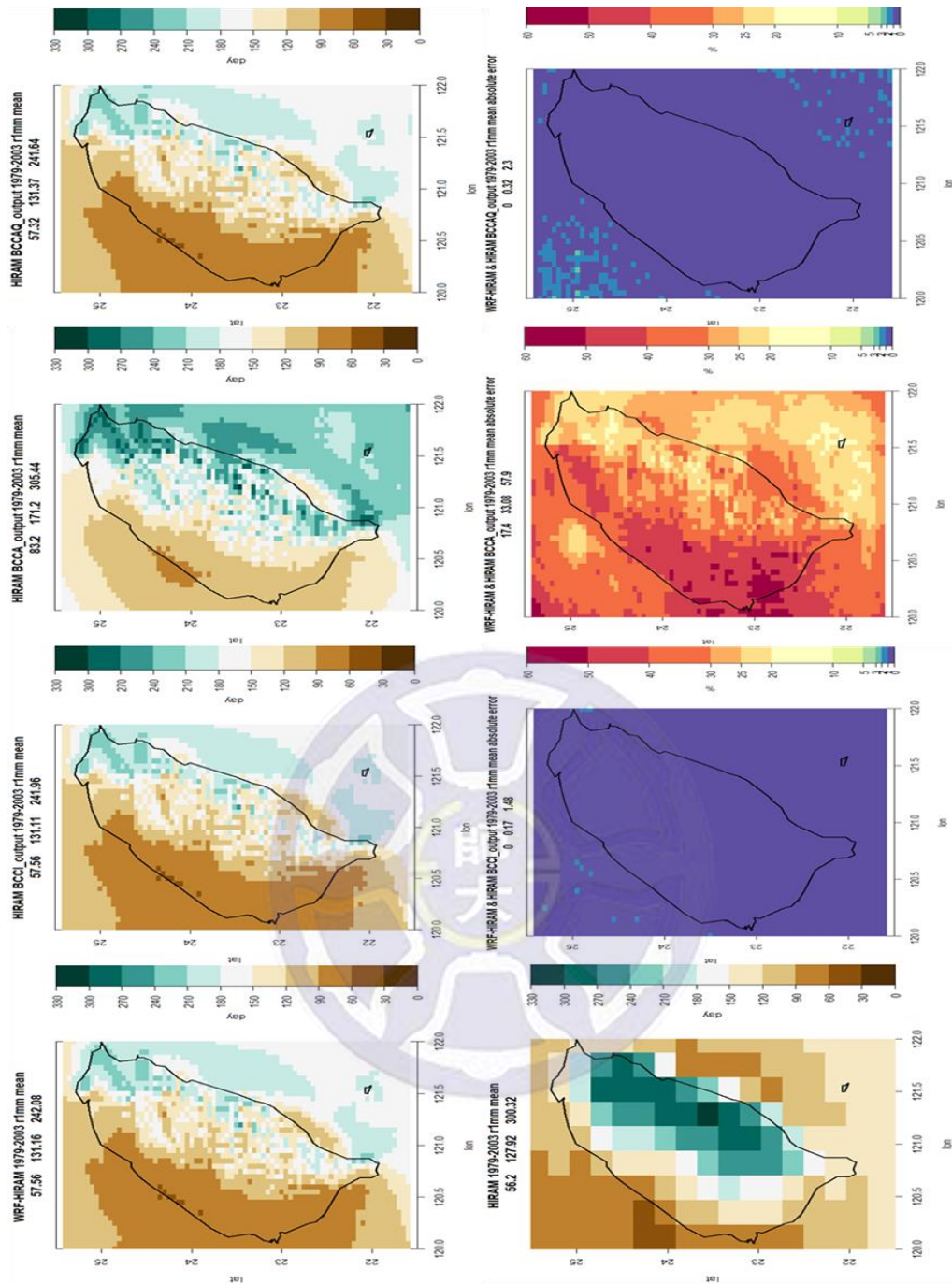


圖 5-5 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數 (r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

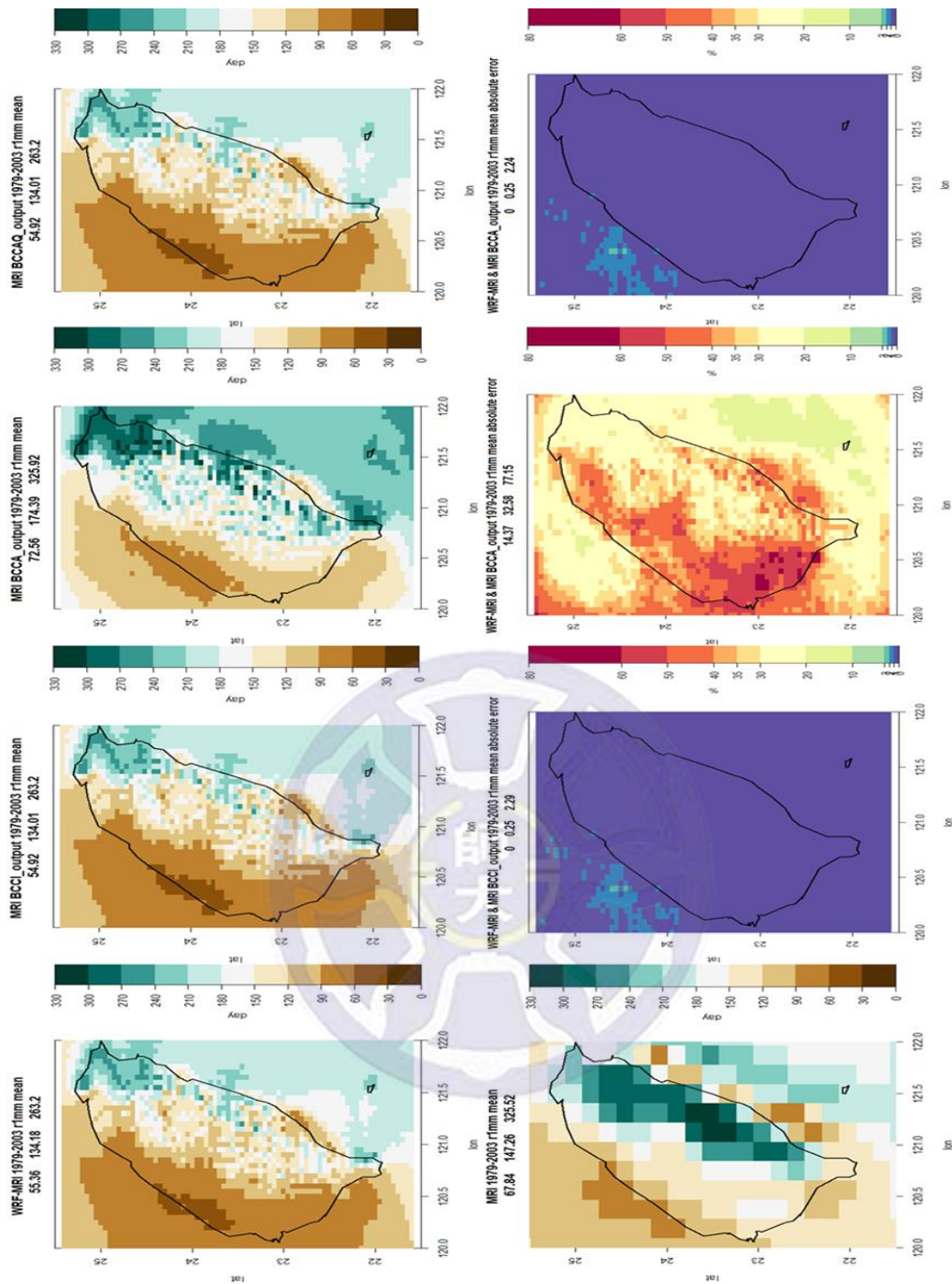


圖 5-6 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

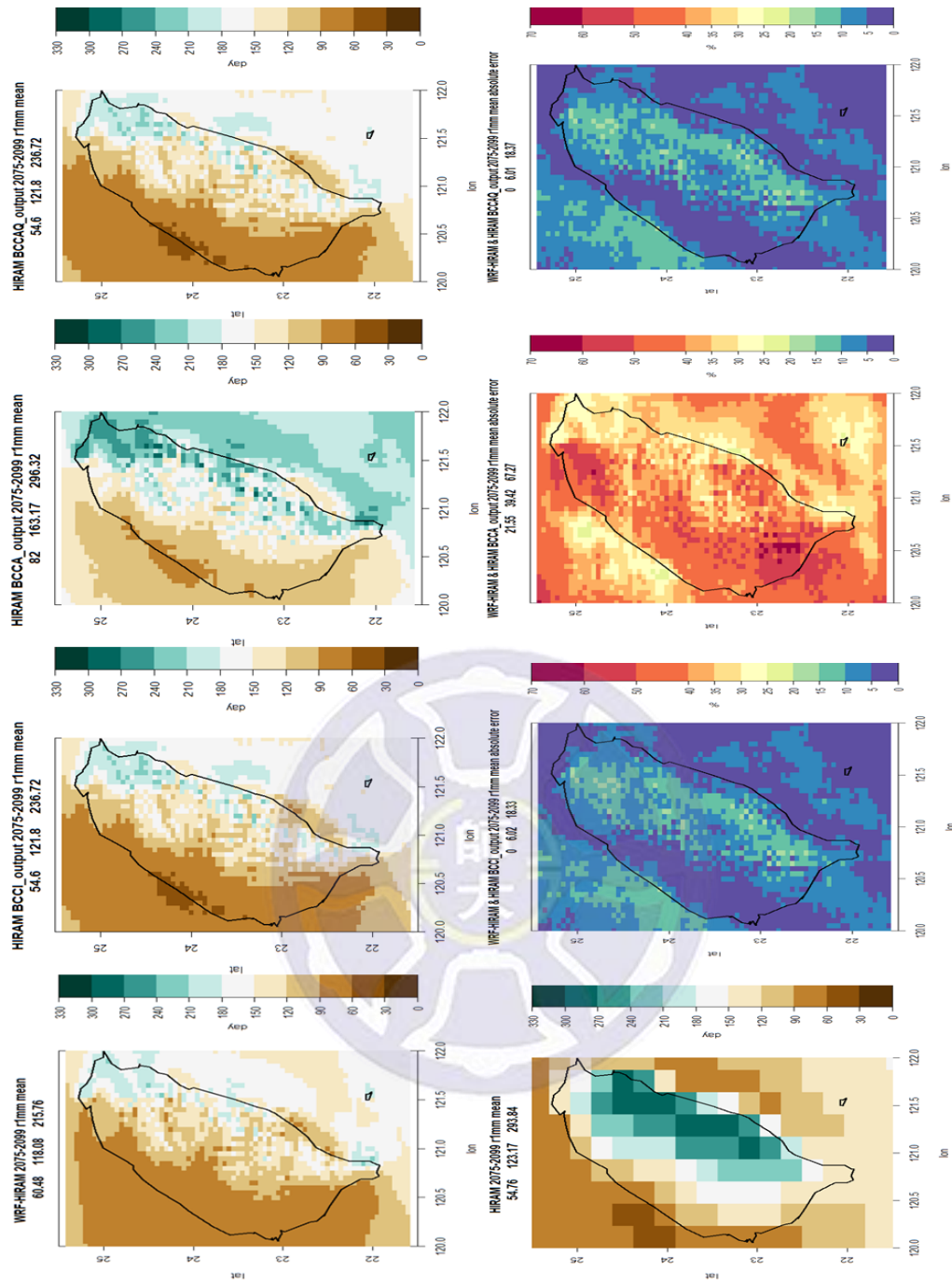


圖 5-7 WRF-HiRAM 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

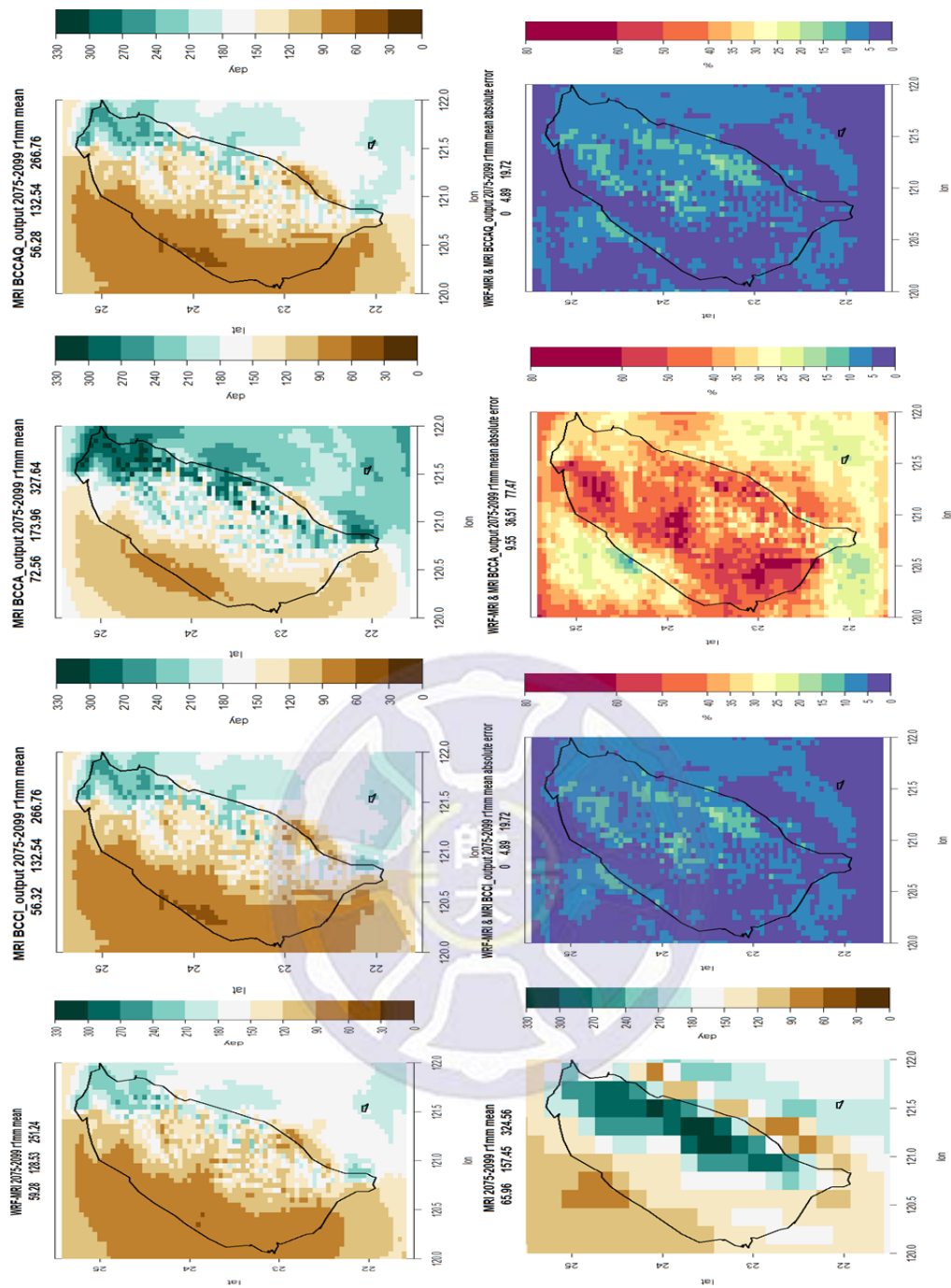


圖 5-8 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年期間雨日日數(r1mm)(單位：天)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年期間雨日日數，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年期間雨日日數、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

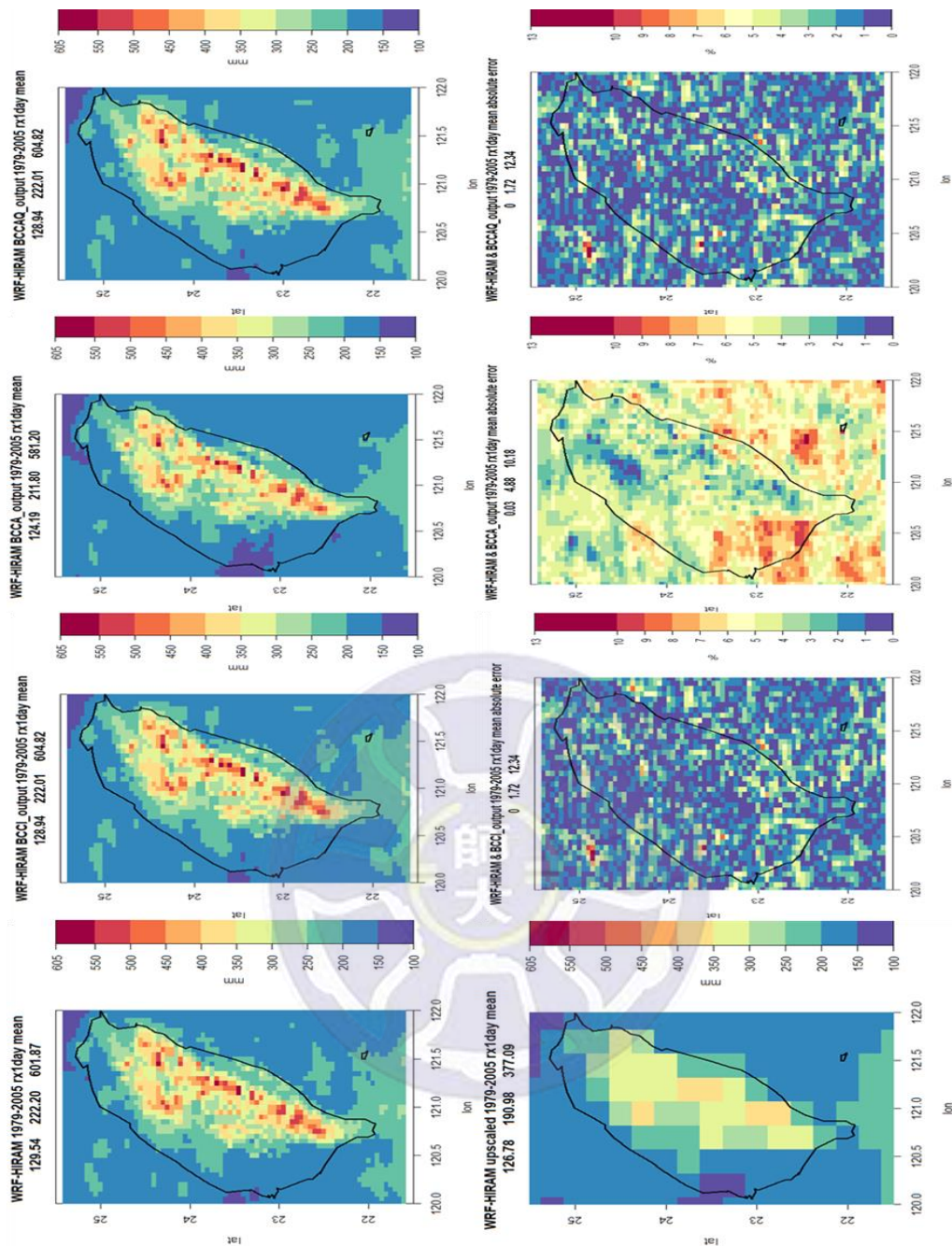


圖 5-9 WRF-HIRAM 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rxlday)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

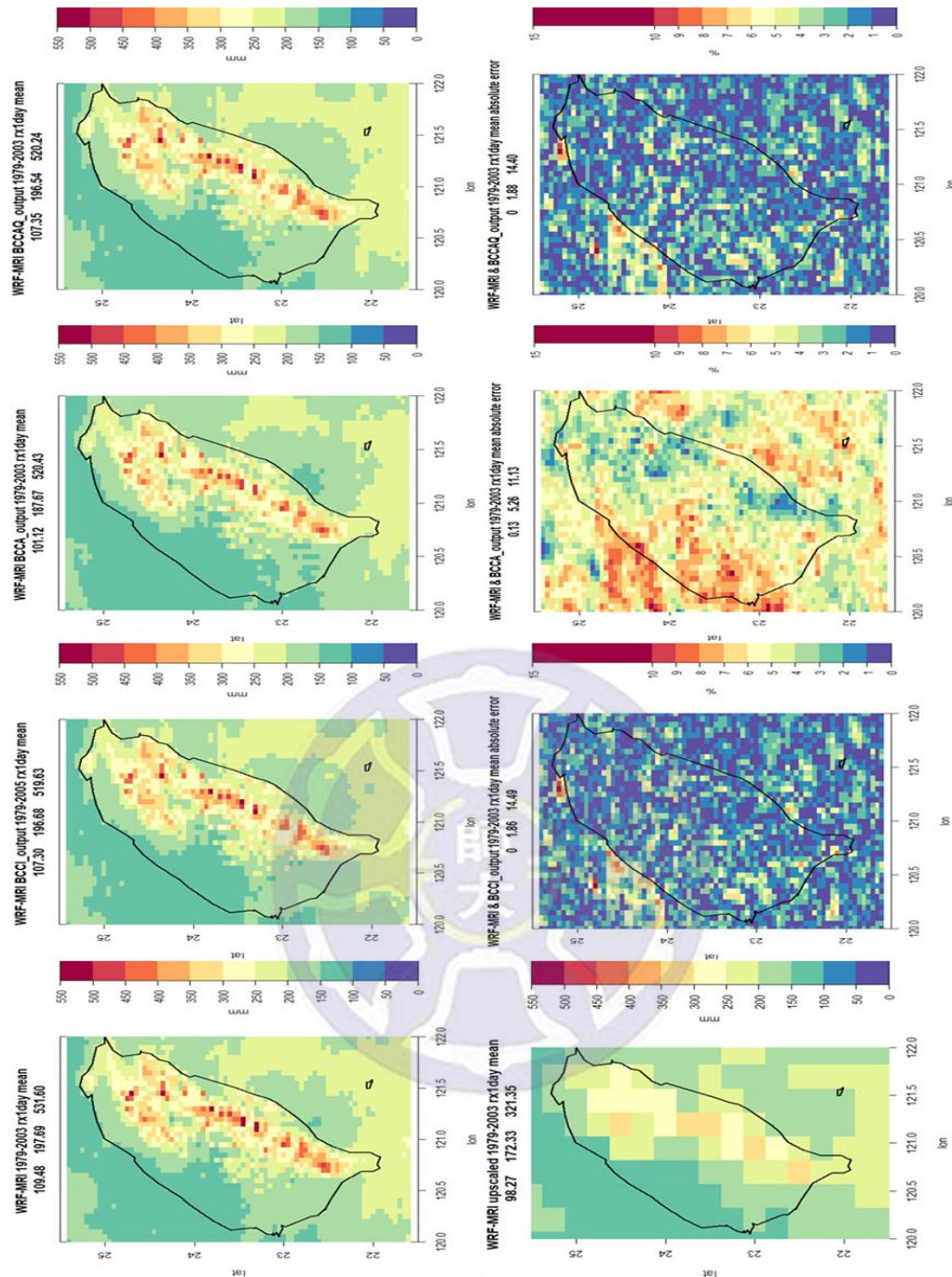


圖 5-10 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

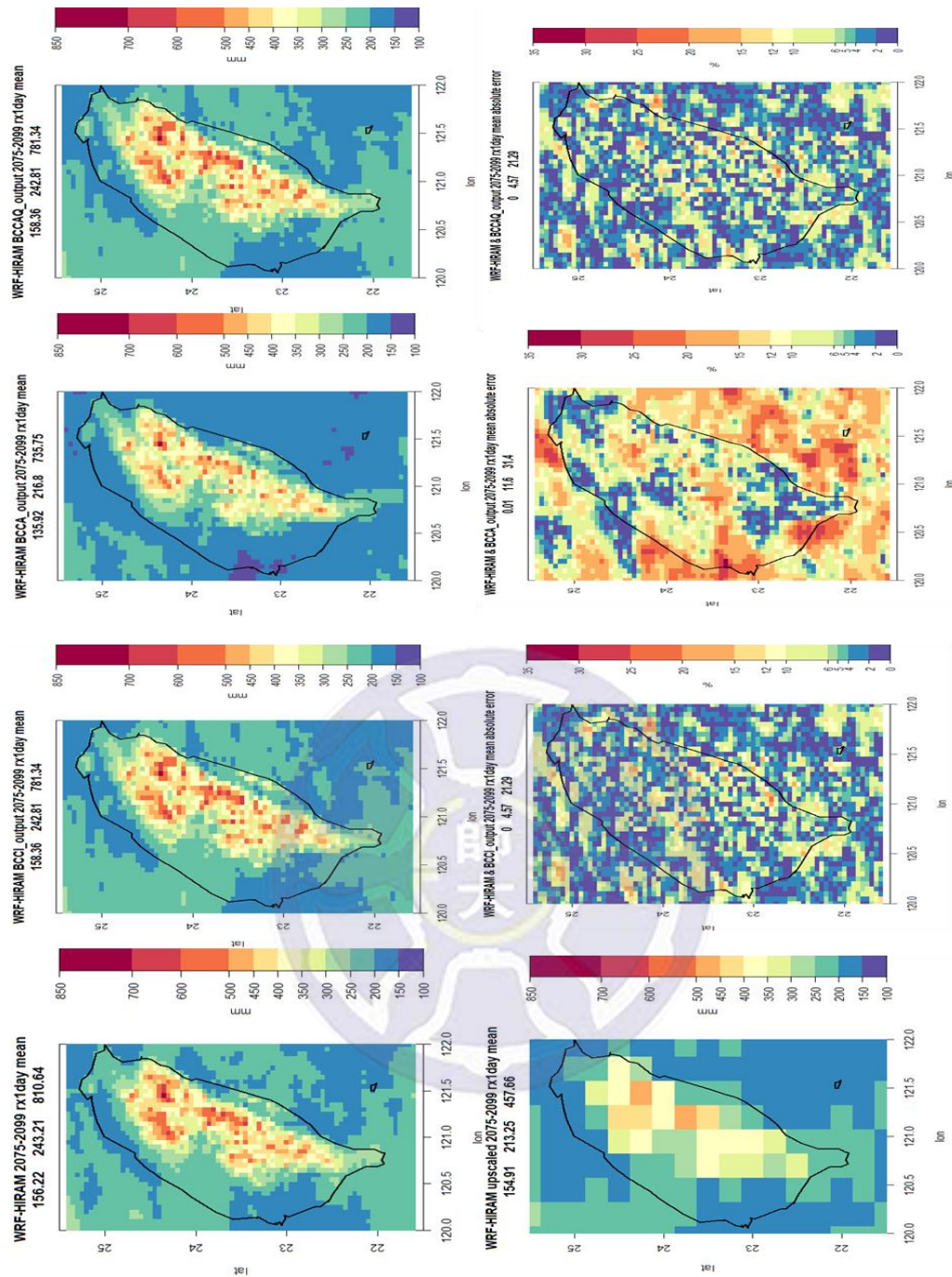


圖 5-11 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

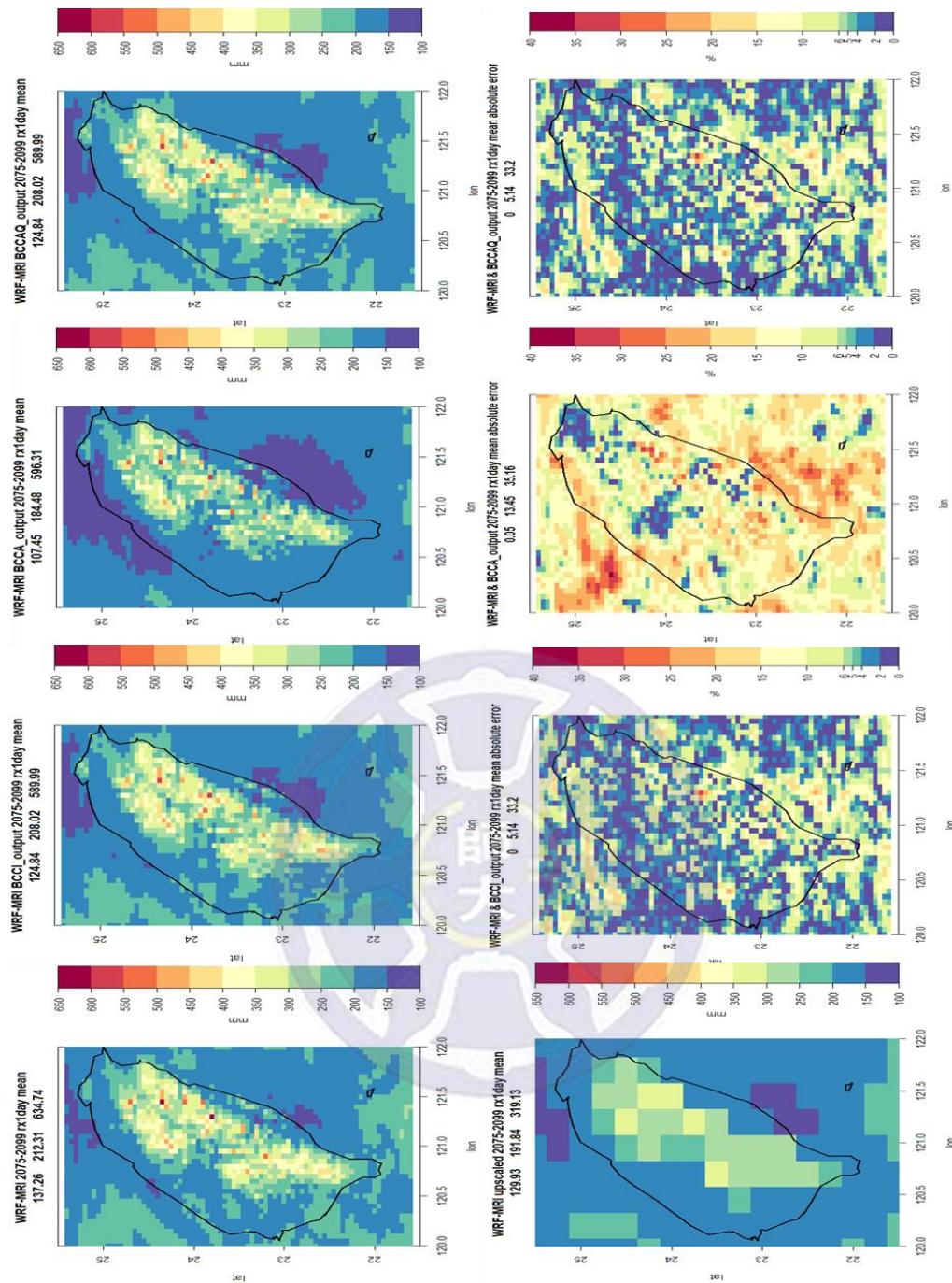


圖 5-12 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

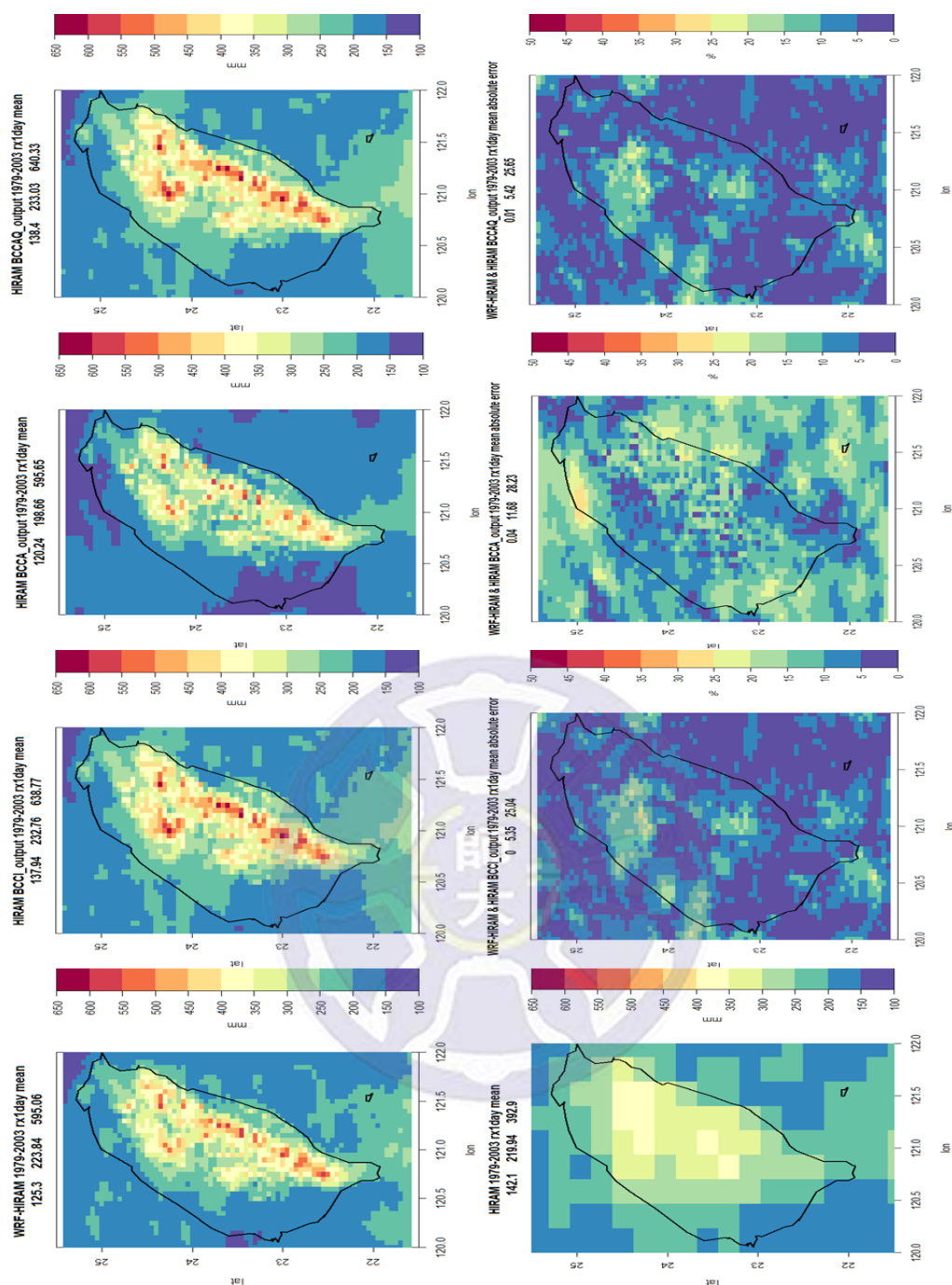


圖 5-13 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

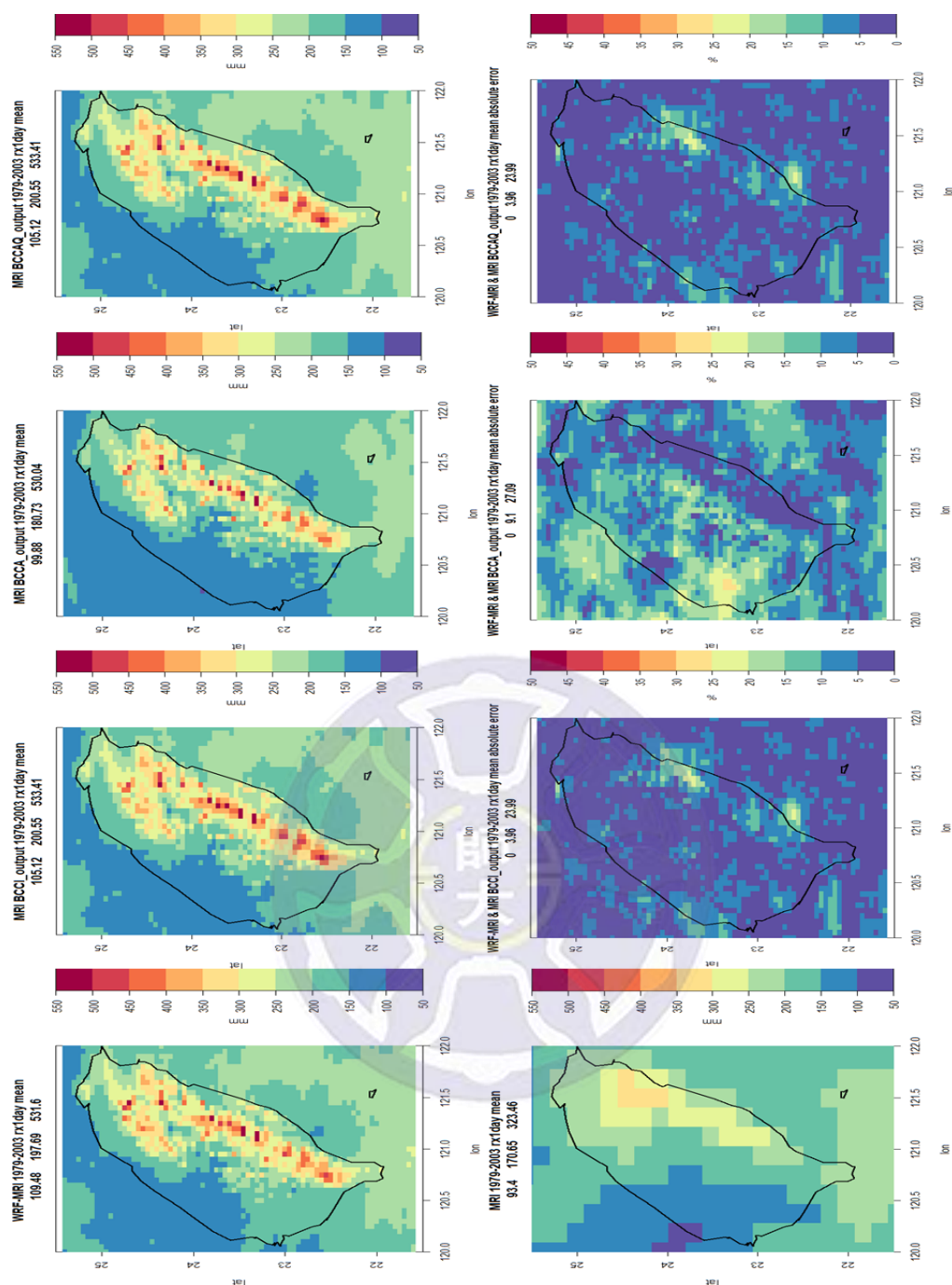


圖 5-14 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

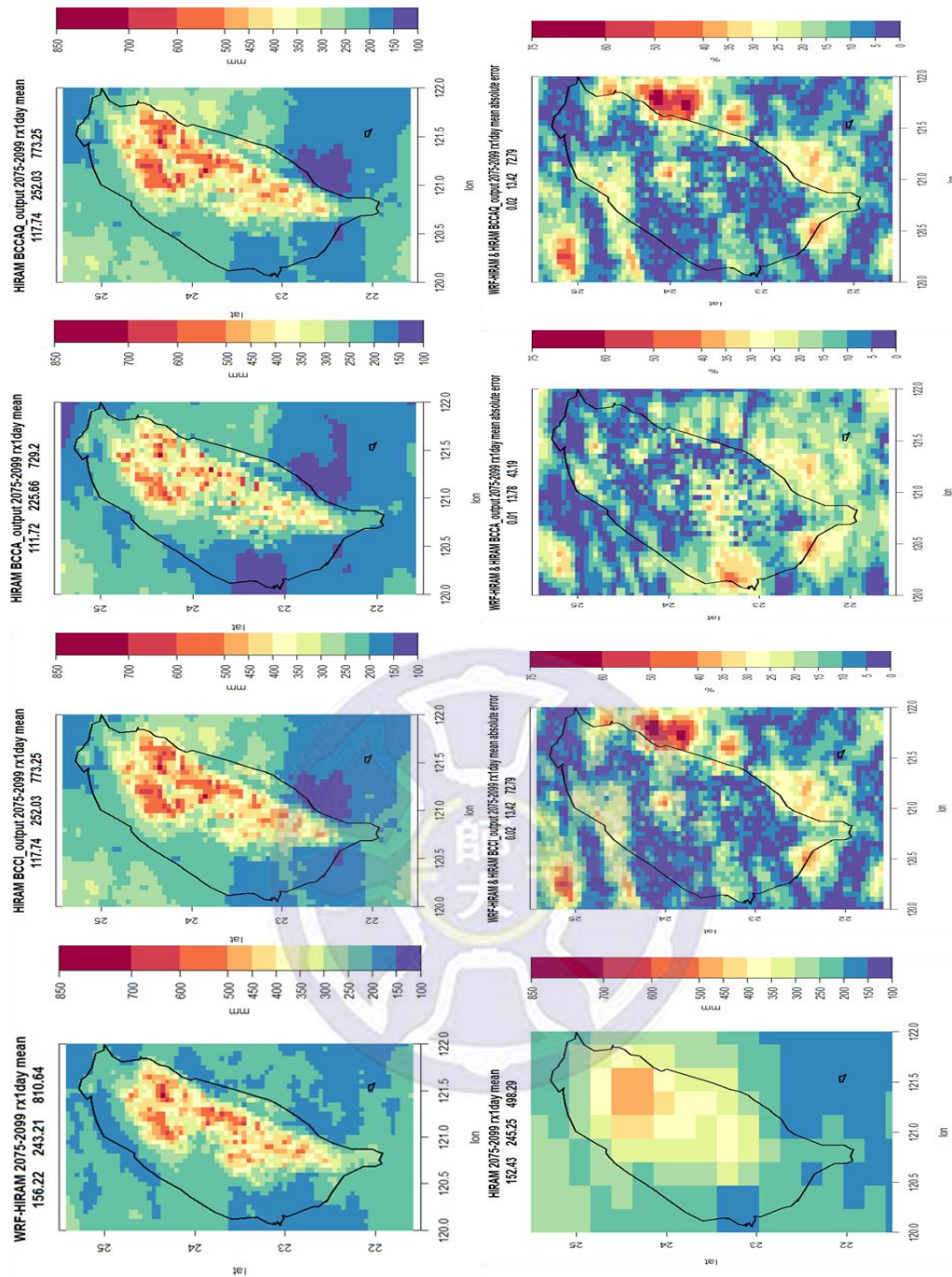


圖 5-15 WRF-HiRAM 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量 (rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

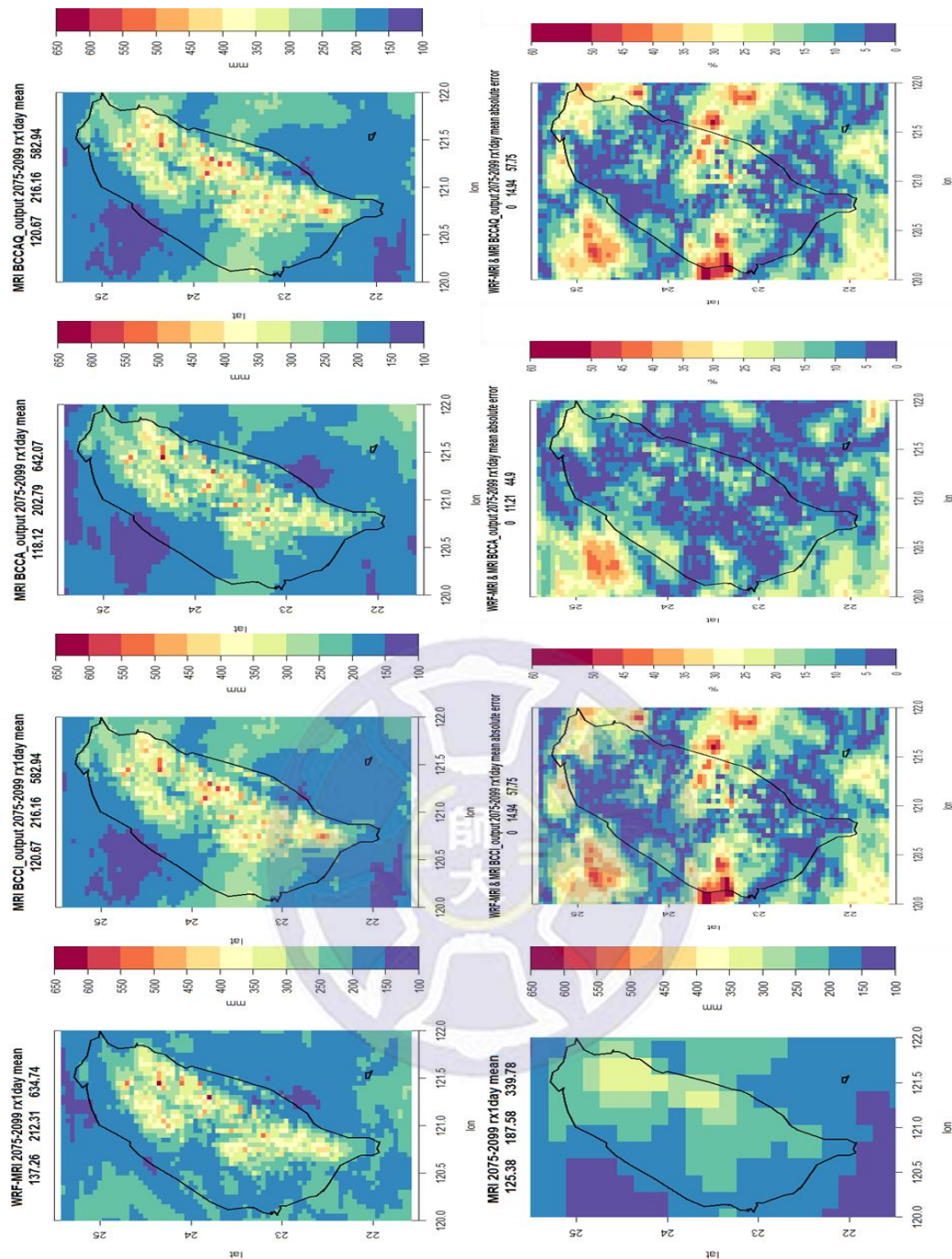


圖 5-16 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大單日降雨量(rx1day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大單日降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大單日降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

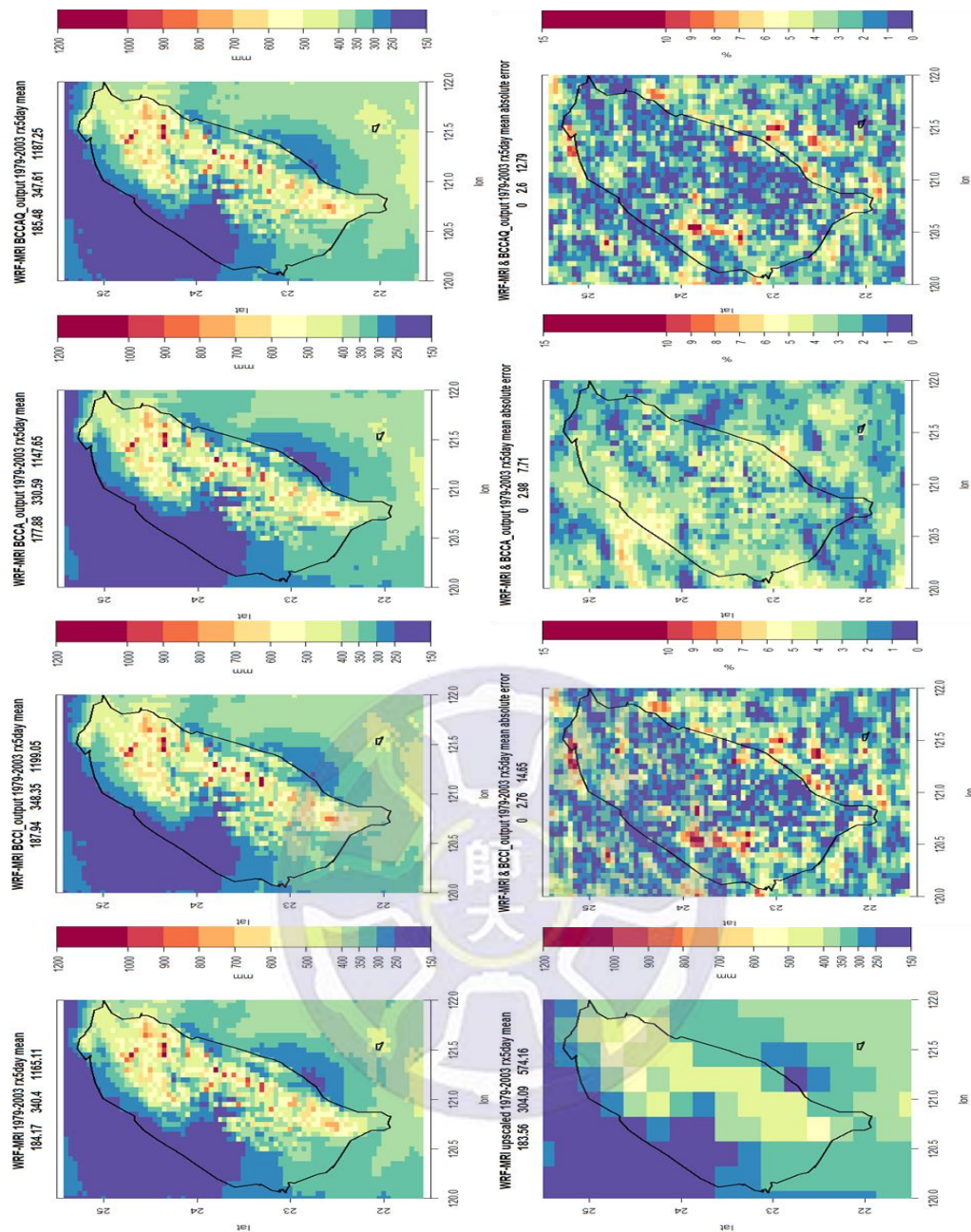


圖 5-18 WRF-MRI 升尺度部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量 (rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

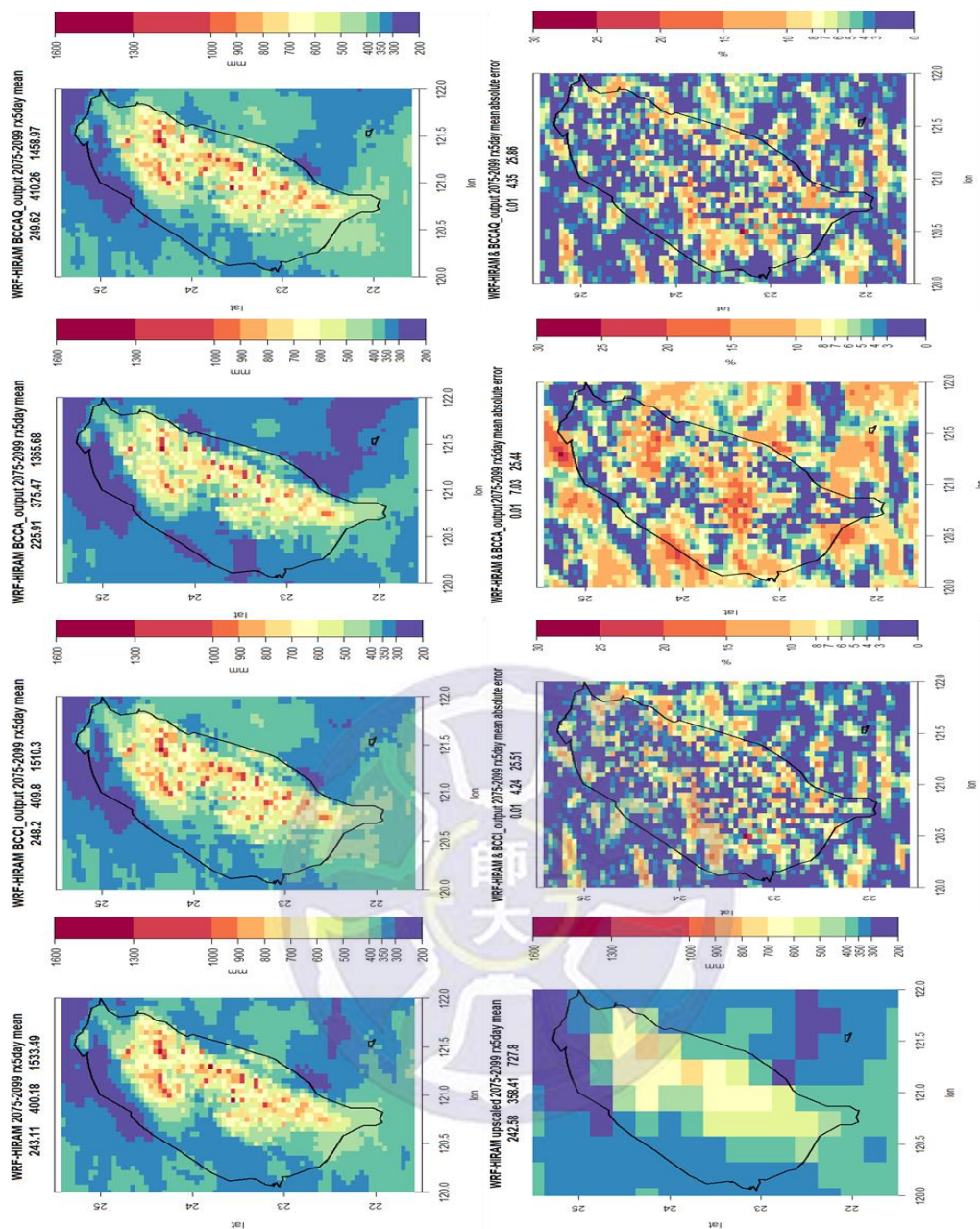


圖 5-19 WRF-HiRAM 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

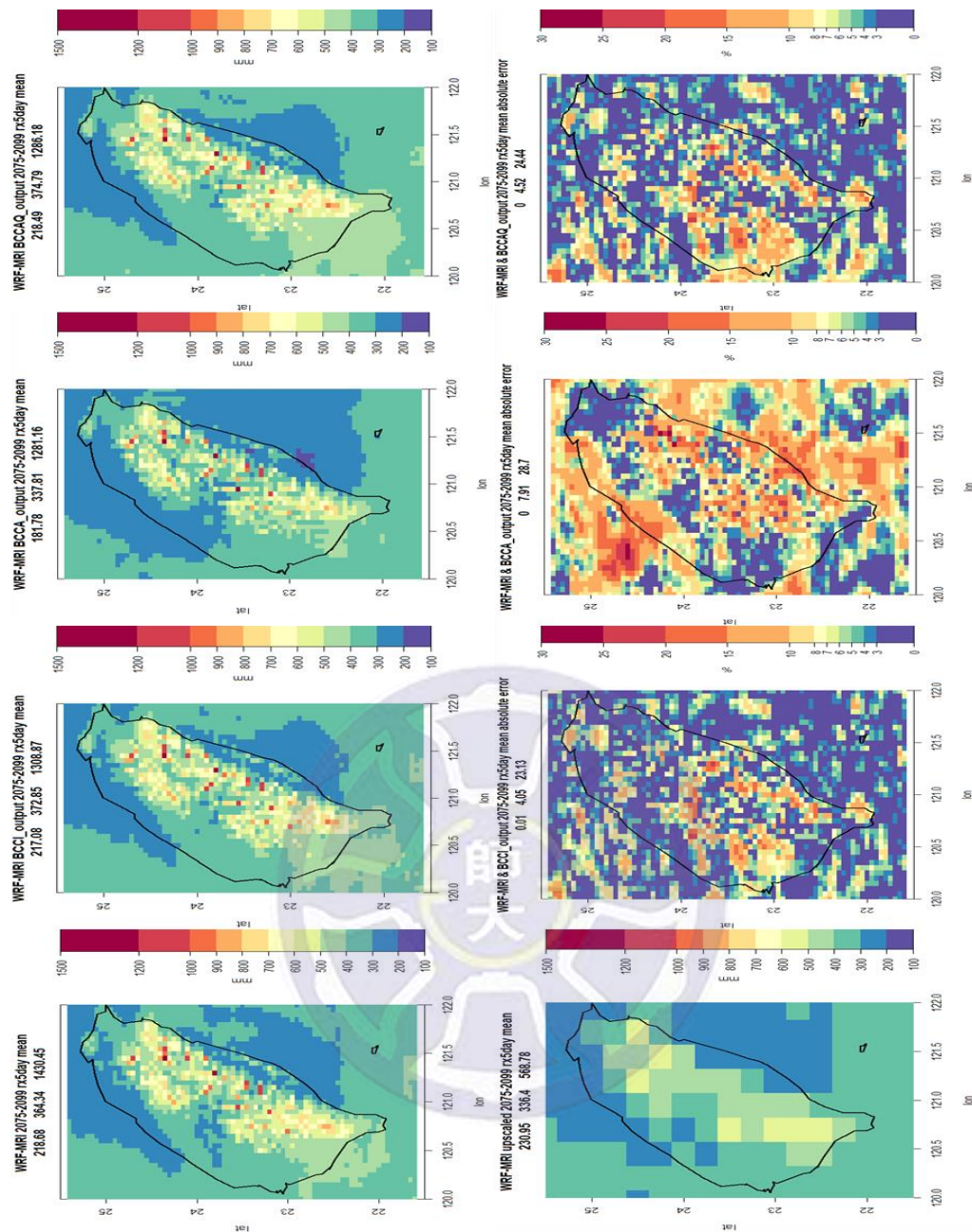


圖 5-20 WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量 (rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

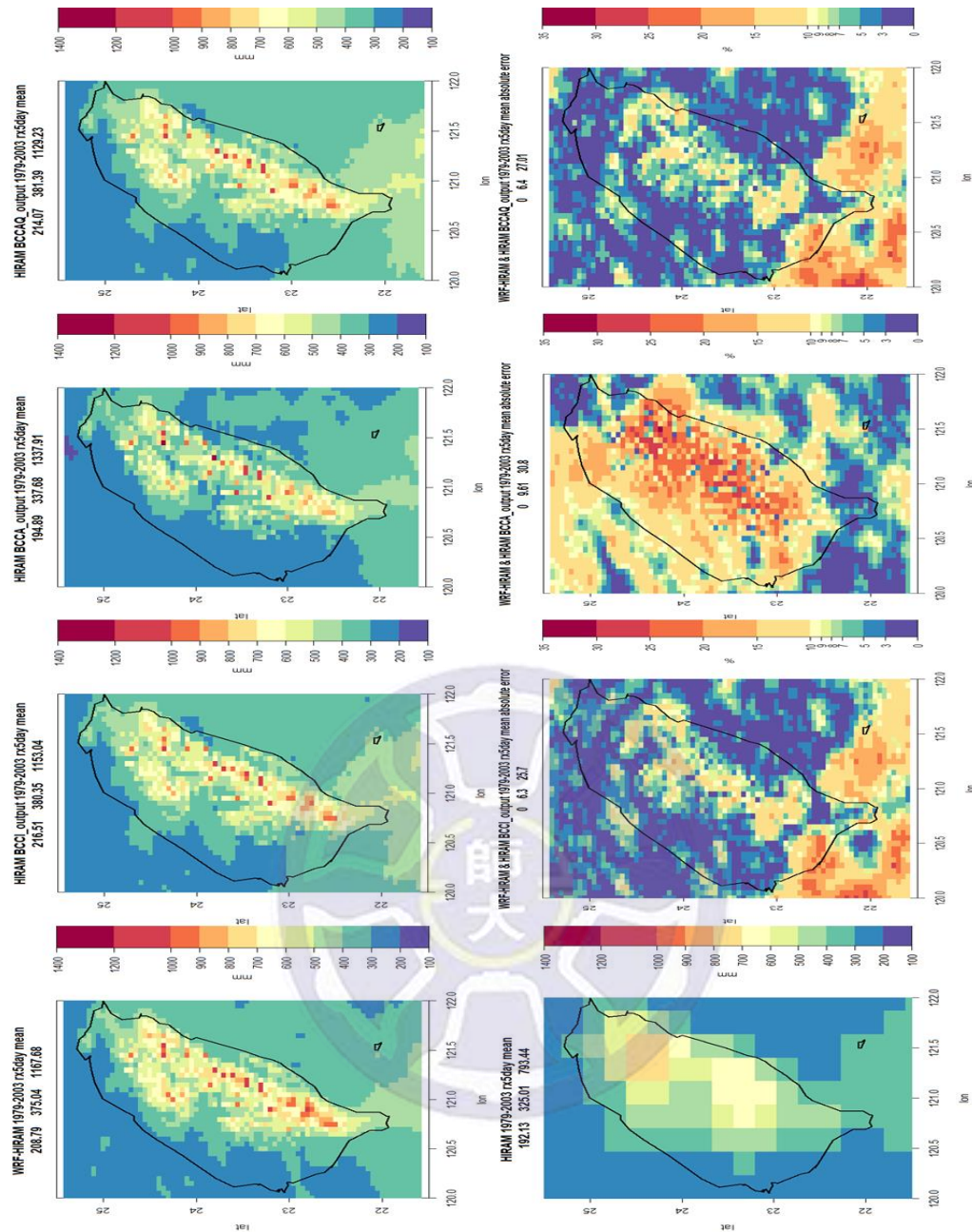


圖 5-21 WRF-HiRAM 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量 (rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

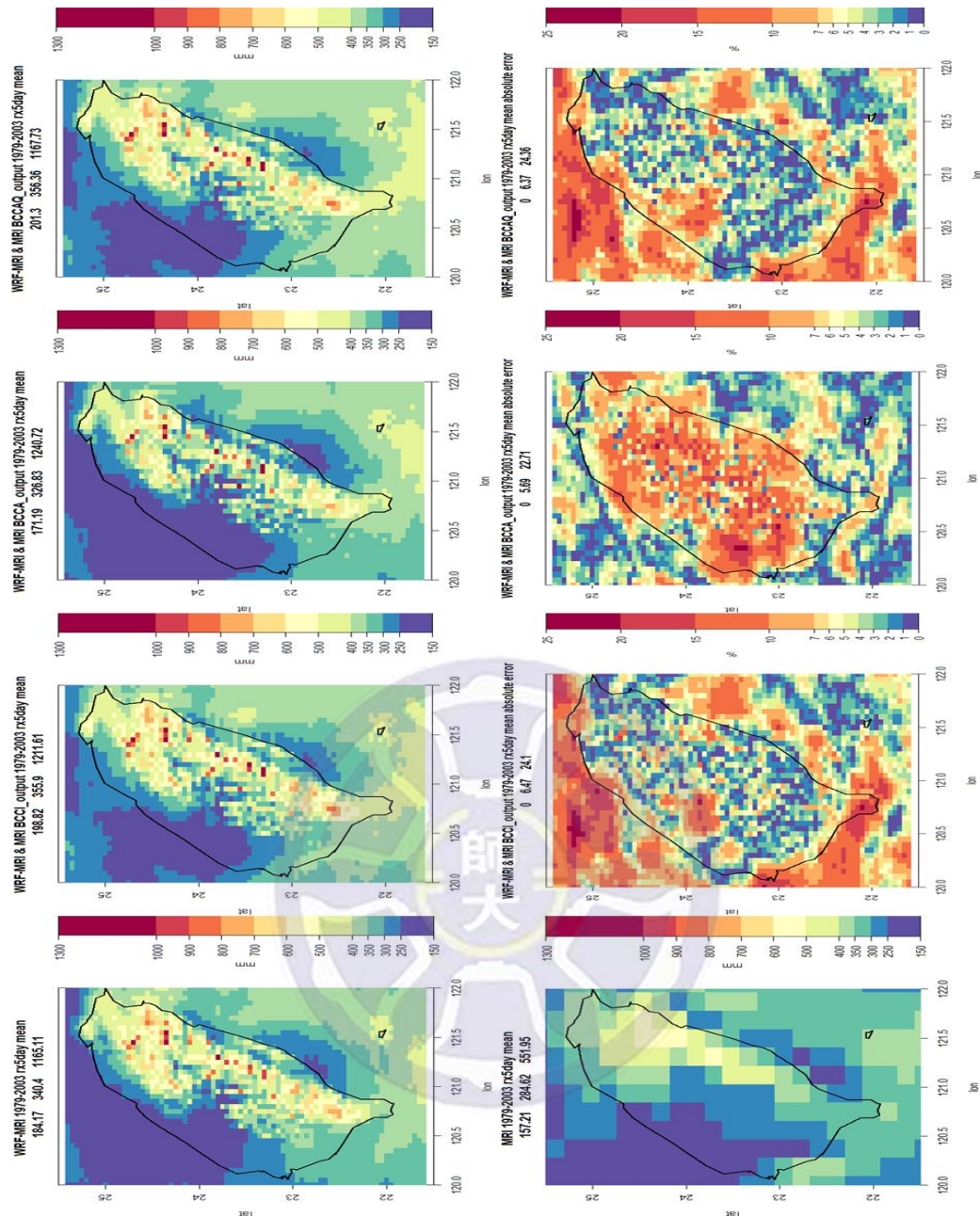


圖 5-22 WRF-MRI 原始模式資料部分現在時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

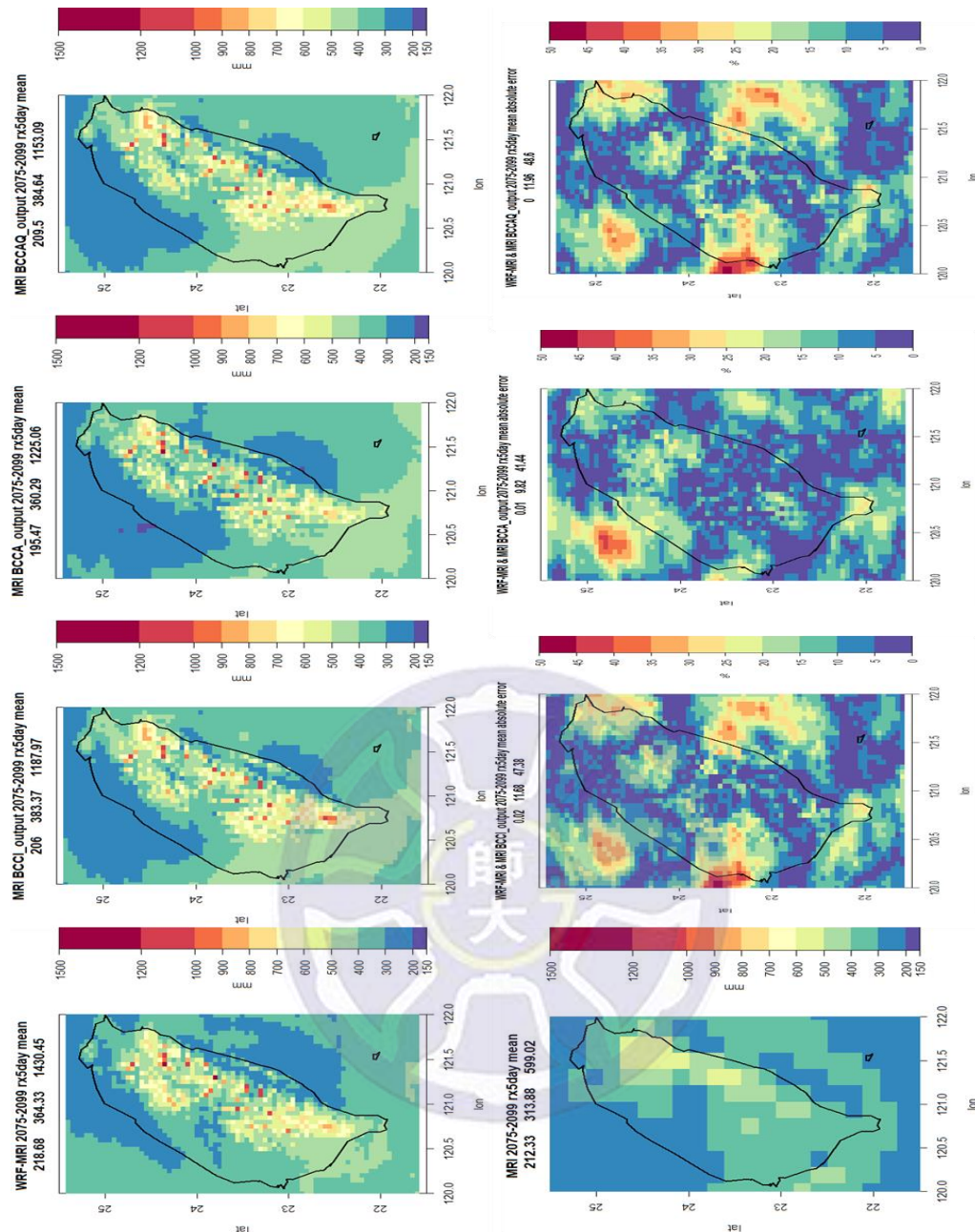


圖 5-24 WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在做了時間平均(氣候平均)後的年最大五日累積降雨量(rx5day)(單位:mm)。圖的上排由左至右分別為原始高解析度動力降尺度資料、BCCI、BCCA、BCCAQ 降尺度後之結果的年最大五日累積降雨量，圖的下排由左至右則分別為低解析度模式資料的年最大五日累積降雨量、BCCI、BCCA、BCCAQ 的絕對誤差百分比，所有圖上所列的三個數值分別為最小值、平均值、最大值。

統計降尺度方法之表現比較(升尺度部分)	BCCI	BCCA	BCCAQ
空間型態相關性 (日降雨結果)	較佳 (0.882)	居中 (0.814)	較差 (0.787)
平均絕對誤差 (日降雨結果)	較小 (2.01mm/day)	較大 (3.21 mm/day)	居中 (3.02 mm/day)
時間序列相關性 (日降雨結果)	較佳 (0.954)	較差 (0.907)	居中 (0.914)
極端降雨指標	較佳	較差	較佳
整體平均結果表現	較佳	較差	居中
統計穩定性 (平均絕對誤差比值)	高 (1.16)	低 (3.41)	中 (2.01)

表 6-1 本研究所使用的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 升尺度部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各個分析指標的表現統整。表格中括號內的數值即為在 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組資料的表現平均後所得，紅色分析指標代表在升尺度部分和原始模式資料部分具有一致性。

統計降尺度方法之表現比較(原始模式資料部分)	BCCI	BCCA	BCCAQ
空間型態相關性 (日降雨結果)	較差 (0.352)	較佳 (0.381)	較差 (0.348)
平均絕對誤差 (日降雨結果)	稍大 (6.79 mm/day)	稍小 (6.75 mm/day)	稍大 (6.78 mm/day)
時間序列相關性 (日降雨結果)	較差 (0.522)	較佳 (0.543)	較差 (0.523)
極端降雨指標	較佳	較差	較佳
整體平均結果表現	稍差	稍佳	稍差
統計穩定性 (平均絕對誤差比值)	較高 (1.19)	較低 (1.23)	居中 (1.2)

表 6-2 本研究所使用的三種統計降尺度方法(BCCI、BCCA、BCCAQ)應用於 WRF-HiRAM & WRF-MRI 原始模式資料部分未來時期降尺度後之日降雨結果與原始高解析度動力降尺度資料在各個分析指標的表現統整。表格中括號內的數值即為在 WRF-HiRAM & WRF-MRI 這兩組資料的表現平均後所得，紅色分析指標代表在升尺度部分和原始模式資料部分具有一致性。