

氣候變遷下可能水文情境資料特性分析： 以臺南地區為例

CHARACTERISTICS OF HYDROLOGICAL VARIATION UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS:
A CASE STUDY IN TAINAN

國立成功大學
水利及海洋工程學系
副研究員

曾宏偉
Hung-Wei Tseng

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究員

楊道昌
Tao-Chang Yang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究員

郭振民
Chen-Min Kuo

經濟部水利署
副總工程司

張廣智
Kuang-Chih Chang

經濟部水利署
綜合企劃組
組長

郭純伶
Chun-Ling Kuo

經濟部水利署
綜合企劃組
科長

鄭欽韓
Chin-Han Cheng

國立成功大學
水利及海洋工程學系
名譽教授

游保杉*
Pao-Shan Yu

25

摘 要

臺灣主要雨量集中發生於梅雨季與颱風季，一旦梅雨或颱風有偏少或延遲情況，即容易造成用水緊張，故有必要針對梅雨與颱風之特性進行詳細分析。為此，本研究藉由綜合考慮水文變異與氣候變遷影響，推估基期與未來情境下梅雨與颱風之機率密度函數，以探討氣候變遷對於梅雨與颱風之衝擊。其中，為盡可能涵蓋氣候變遷資料之不確定性，本研究採用全部全球環流模式之推估資料作為系集，以進行候變遷衝擊評估，RCP4.5 情境下分析結果顯示：針對容易造成用水緊張之「梅雨延遲」情況而言，其發生機率有增加情況，由 13.4% 增加至 14.7%，而總量亦有增加情況，由 920 mm 增加至 992 mm；針對 7 月雨量偏少之「颱風延遲」情境而言，其發生機率有增加情況，由 12.5% 增加至 14.6%，而總量亦有增加情況，由 1,421 mm 增加至 1,541 mm。

關鍵詞：氣候變遷、水文變異、梅雨與颱風。

* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系名譽教授
701 台南市東區大學路 1 號，yups@mail.ncku.edu.tw

CHARACTERISTICS OF HYDROLOGICAL VARIATION UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS: A CASE STUDY IN TAINAN

Hung-Wei Tseng

Department of
Hydraulic and
Ocean Engineering,
National Cheng Kung
University

Tao-Chang Yang

Department of
Hydraulic and
Ocean Engineering,
National Cheng Kung
University

Chen-Min Kuo

Department of
Hydraulic and
Ocean Engineering,
National Cheng Kung
University

Kuang-Chih Chang

Water Resources
Agency, Ministry of
Economic Affairs

Chun-Ling Kuo

Water Resources Agency,
Ministry of Economic Affairs

Chin-Han Cheng

Water Resources Agency,
Ministry of Economic Affairs

Pao-Shan Yu*

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering,
National Cheng Kung University

ABSTRACT

In Taiwan, the majority of rainfall occurs during the mei-yu and typhoon seasons. Delayed or below-normal rainfall in the mei-yu or typhoon season often causes water supply issues, hence it is critical to better investigate the rainfall characteristics in these two seasons. To this end, this study estimated the probability density function of rainfall amount for the both seasons with consideration of hydrological variation and climate change impact. To reflect potential uncertainty from climate change projections, the study applied entire available projections of general circulation models in the impact assessment. A comparison of rainfall characteristics between baseline and RCP4.5 scenario shows: (1) for the delayed situation in the mei-yu season, the probability of occurrence increases from 13.4% to 14.7% and the rainfall amount also increases from 920 mm to 992 mm; (2) for the delayed situation in the typhoon season (*i.e.*, below-normal rainfall in July), the probability of occurrence increases from 12.5% to 14.6% and the rainfall amount also increases from 1,421 mm to 1,541 mm.

Keywords: Climate change, Hydrological variation, Mei-yu and typhoon.

一、前言

2018 年因太平洋高壓偏強且向西延伸籠罩臺灣，造成南部地區 5 月雨量較往年明顯偏少，此種大氣情況持續至 6 月中旬左右才解除，而南部地區水情才逐漸回復正常。由於此種梅雨延遲情況，導致曾文水庫蓄水率一度僅剩 2.02%，臺南地區用水吃緊，故實施減壓供水加以因應旱象。此外，2020 年無颱風登陸臺灣，打破 56 年以來之紀錄，導致臺灣用水危機，於 10 月中公告桃竹苗地區實施二期作停灌，而隨後 11 月底亦公告嘉南地區隔年一期作停灌，其停灌面積達 1 萬 9 千公頃。

由於臺灣雨量主要集中發生於梅雨季與颱風季，一旦梅雨或颱風偏少或延遲情況，即容易造成用水緊張。為瞭解氣候變遷可能之衝擊，已有許多研究投入梅雨季與颱風季之情境雨量分析，例如：「臺灣氣候變遷乾旱及水資源風險調適策略建議」(中央研究院永續科學研究計畫，2016-2018) 採用歷史事件重現方法，模擬重現歷史極端乾旱時期(2001 至 2004 年乾旱事件)在 RCP8.5 情境之雨量變化情況，其分析結果指出：豐水期間(梅雨季與颱風季)，臺南高雄除外，5 月全臺雨量有增加情況，6 月隨即轉為雨量減少情況，而 7 至 10 月全臺雨量則為略微增加情況，北部與中部雨量為增加，而南部雨量則為減少，變化率介於 $\pm 40\%$ 之間；「臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制(總摘要)」(臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫，2017)針對梅雨季與颱風季，採用全球環流模式搭配動力降尺度資料，探討 A1B 情境下雨量特性，其分析結果指出：21 世紀末(2075 至 2099 年)梅雨季雨量在中、南部地區大致為明顯增加情況，尤其西南地區沿海，其雨量增加可達 30% 左右；若不考慮颱風路徑與頻率之改變，21 世紀末臺灣颱風雨量強度呈現增加情況(平均約 20% 至 40%)，尤其是中部與中北部山區增加較為顯著，增加可達 60%；「因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)」(經濟部水利署，2020)針對臺南地區主要集水區之梅雨季、颱風季以及枯水季(10 至 4 月)探討 RCP4.5 與 RCP8.5 情境下平均情境雨量之增減情況，其分析結果指出：RCP4.5 情境雨量之部分，梅雨季、颱風季以及枯水季之平均情境雨量皆有增加情況，其增率分別為 7.7%、14.6% 以及 7.6%，尤其颱風季雨量增加最為顯著；而 RCP8.5 情境雨量之部分，梅雨季、颱風季以及枯水季之平均情境雨量亦皆有增加情況，其增率分別為 13.5%、15.2% 以及 3.3%，梅雨季與颱風季雨量

相較於枯水季皆有顯著增加情況。

從上述文獻可知，在氣候變遷影響下未來梅雨季與颱風季之情境雨量可能有所變動，且臺灣整體水情是否正常主要係取決於每年之梅雨季與颱風季情況，故本研究進一步聚焦分析梅雨季與颱風季之水文變異，例如：梅雨與颱風之偏少、延遲以及正常情況，同時亦將可能之氣候變遷影響納入考慮，以深入探討不同情況梅雨與颱風之特性(發生機率與總量)，可供未來水資源設計規劃與管理調度作為參考。

二、研究區域與資料

本研究選擇臺南地區作為研究對象，其豐枯水期之雨量懸殊亟需仰賴水庫蓄存豐水期水量，以穩定全年供水。一旦梅雨或颱風發生雨量偏少情況，其即易受枯旱影響而造成用水緊張與經濟衝擊，例如：農業停灌或衝擊南科產值等，適合探討各種水文情境對其影響。此外，除枯旱風險較高之外，其用水標的多元，包含民生、工業以及農業用水，枯旱影響層面廣大。本研究蒐集臺南地區主要集水區(曾文水庫與南化水庫集水區)之歷史觀測雨量資料與推估情境雨量資料，作為氣候變遷下可能水文情境研擬之依據，針對雨量相關資料說明如下：

2.1 歷史觀測雨量資料

採用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(簡稱 TCCIP)(林李耀等人，2018)產製之歷史觀測網格雨量月資料(1960 至 2017 年)作為上游端水文資料，其空間解析度為 5 公里 $\times$ 5 公里，每筆網格數據係代表該網格範圍內 25 平方公里之平均值，而網格範圍涵蓋全臺陸地區域。其中，本研究採用資料係挑選臺南主要集水區對應之網格點(圖 1)，首先計算網

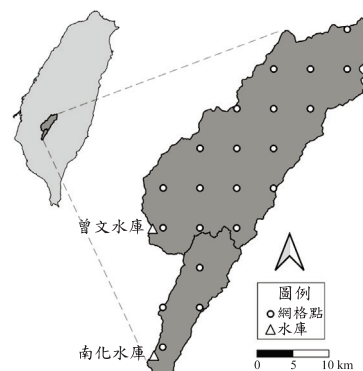


圖 1 臺南主要集水區範圍與對應網格點

格點之平均值，再整理並統計歷年各月雨量資料，提供後續分析使用。

2.2 推估情境雨量資料

採用 TCCIP 產製之第五版評估報告 (AR5) 統計降尺度月資料作為推估情境雨量資料 (包含基期推估資料與溫室氣體排放情境推估資料)，其空間解析度亦為 5 公里 × 5 公里，每筆網格數據係代表該網格範圍內 25 平方公里之平均值，而網格範圍涵蓋全臺陸地區域；其時間解析度為每月一筆資料，基期推估資料之時段係自 1960 年 1 月至 2005 年 12 月，資料全長 46 年，共計 552 筆數據；而溫室氣體排放情境推估資料之時段係自 2006 年 1 月至 2100 年 12 月，資料全長 95 年，共計 1,140 筆數據。其中，針對溫室氣候排放

情境推估資料之氣候變遷情境與全球環流模式選擇詳細說明如下：

2.2.1 氣候變遷情境

AR5 氣候變遷情境主要係以代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathways, RCP) 重新定義溫室氣體排放情境，包含：RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5，其以輻射強迫力在 2100 年 (世紀末) 與 1750 年之間的差異量當作為指標性數值加以區分，即情境中數字愈大代表暖化情況愈嚴重。由於 RCP4.5 與 RCP8.5 有相對完整之全球環流模式數量 (表 1)，其分別涵蓋 30 與 33 組全球環流模式之推估值，更能完整反應出氣候變遷之高度不確定性，故本研究選擇此兩種情境作為後續衝擊分析之依據。

表 1 TCCIP 統計降尺度資料之全球環流模式清單

模式名稱	產製單位	解析度	基期情境	未來情境			
			Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	192×145	○		○		○
ACCESS1-3		192×145	○		○		○
bcc-csm1-1	BCC	128×64	○	○	○	○	○
bcc-csm1-1m		320×160	○	○	○	○	○
BNU-ESM	BNU	128×64	○	○	○		○
CanESM2	CCCMA	128×64	○	○	○		○
CCSM4	NCAR	288×192	○	○	○	○	○
CESM1-BGC	NCAR	288×192	○		○		○
CESM1-CAM5		288×192	○	○	○	○	○
CMCC-CESM	CMCC	96×48	○				○
CMCC-CM		480×240	○		○		○
CMCC-CMS		192×96	○		○		
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	256×128	○	○	○		○
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	192×96	○	○	○	○	○
EC-EARTH	ICHEC	320×160	○				○
FGOALS-g2	LASG-CES	128×60	○	○	○		○
GFDL-CM3	NOAA-GFDL	144×90	○	○		○	○
GFDL-ESM2G		144×90	○	○	○	○	○
GFDL-ESM2M		144×90	○		○	○	○
HadGEM2-AO	MOHC	192×145	○	○	○	○	○
HadGEM2-CC		192×145	○		○		○
HadGEM2_ES		192×145	○	○	○	○	○
inmcm4	INM	180×120	○		○		○
IPSL-CM5A-LR	IPSL	96×96	○	○	○	○	○
IPSL-CM5A-MR		144×143	○	○	○	○	○
IPSL-CM5B-LR		96×96	○		○		○
MIROC5	MIROC	256×128	○	○	○	○	○
MIROC-ESM		128×64	○	○	○	○	○
MIROC-ESM-CHEM		128×64	○	○	○	○	○

模式名稱	產製單位	解析度	基期情境	未來情境			
			Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
MPI-ESM-LR	MPI-M	192×96	○	○	○		○
MPI-ESM-MR		192×96	○	○	○		○
MRI-CGCM3	MRI	320×160	○	○	○	○	○
MRI-ESM1		320×160	○				○
NorESM1-M	NCC	144×96	○	○	○	○	○
加總			34	22	30	17	33

註：¹○表示有資料；²資料來源：「AR5 推估模式網格月資料生產履歷」。

2.2.2 氣候變遷期程設定

在氣候變遷期程設定之部分，本研究參考水利署於 AR4 期程訂定經驗與國土計畫設定之長程目標年(2036 年)，往未來推移 10 年左右作為起始年，採用 2031 至 2050 年作為未來時段，而基期時段則採用 1986 至 2005 年，後續將以此期程設定進行氣候變遷衝擊分析。此外，本研究亦透過國際上氣候變遷相關文獻之回顧，檢視國際是否有採用相同氣候變遷期程設定，以下列出採用相同期程設定之國際文獻：(1) 2019 年 IPCC 發表之特別報告「變遷氣候下之海洋與冰雪圈」(IPCC, 2019)、(2) 2018 年紐西蘭環境部發表之評估報告「紐西蘭氣候變遷推估資料」(Ministry for the Environment, New Zealand, 2018)、(3) 2018 年世界銀行發表之評估報告「面對氣候變異與乾旱事件：摩洛哥農業部門之乾旱管理」(Eorte *et al.*, 2018) 以及 (4) 2019 年加拿大政府發表之評估報告「加拿大氣候變遷報告」(Bush and Lemmen, 2019)。上述國際文獻皆與本研究採用相同之氣候變遷期程設定，基期時段皆為 1986 至 2005 年，而未來時段則為 2031 至 2050 年。

2.2.3 全球環流模式選擇

一般模式選擇經常基於系集概念，藉由選擇全部或部分全球環流模式作為系集，再以系集推估結果探討未來氣候特性或可能導致之衝擊。其中，選擇全部模式作為系集之優點在於能夠完整涵蓋全球環流模式之不確定性，而選擇部分模式作為系集之優點則在於能夠直接聚焦特定模式，例如：以較適合研究區域之全球環流模式進行分析。針對上述兩種模式選擇作法分別說明如下：

1. 以全部模式作為系集

為能盡量涵蓋氣候變遷資料之高度不確定性，採全部全球環流模式資料作為系集以進行分析，例如：針對 RCP4.5 與 RCP8.5 情境，分別考慮該情境下全部模式之推估值，即 RCP4.5 採用 30 組全球環流模式，

而 RCP8.5 則採用 33 組全球環流模式，以探討氣候變遷之水文衝擊。

2. 以部分模式作為系集

因不同研究在需求與特性上可能有所差異，並非所有研究皆能涵蓋氣候變遷全部之不確定性，一般可參考國際上(Ahmed *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2018; Ahmaadalipour *et al.*, 2017; Hussain *et al.*, 2018) 全球環流模式挑選之作法(基於模式歷史表現進行模式挑選)，挑選較適合臺灣使用之全球環流模式作為系集，以進行後續氣候變遷衝擊評估。其中，針對模式歷史表現與相關挑選原則之部分，臺灣可參考 TCCIP 全球環流模式於基期模擬之綜合表現排序，作為後續全球環流模式挑選依據，針對其模式挑選應考慮之原則說明如下：

(1) 模式獨立性

為維持全球環流模式之獨立性，建議從各個氣候研究單位最多挑選一個表現較佳之全球環流模式，避免影響整體系集平均結果之權重平衡。

(2) 模式表現

基於全球環流模式於臺灣降雨季節循環變化之模擬能力，優先考慮於歷史模擬表現較好之全球環流模式，避免挑選表現不佳之全球環流模式。而在全球環流模式數量上，Ahmed *et al.* (2019) 建議可選擇表現較好之前 3 至 10 個模式，以反應氣候變遷之高度不確定性。此外，亦可搭配豐枯特性篩選方式，例如：排除豐水期與枯水期情境雨量皆為增加之全球環流模式，以聚焦探討氣候變遷對於水資源可能造成之負面衝擊。

在特定氣候變遷情境下，氣候變遷資料於水資源衝擊分析應用所面對之不確定性來源主要為全球環流模式，為處理其不確定性一般經常配合全球環流模式篩選(模式表現)，挑選適合應用於臺灣之全球環流模式，再依據全球環流模式於基期與未來之推估值計算

可能衝擊量；而本研究為能盡量涵蓋全球環流模式之不確定性，採用全部全球環流模式之推估值，再以全部模式組成之系集探討未來氣候特性或可能導致之衝擊。

三、氣候變遷下可能水文情境

本研究藉由綜合考慮氣候變遷情境與可能水文情境，進行氣候變遷下可能水文情境研擬，可作為後續水資源供需影響分析或經濟影響分析之依據，其定義如下：

氣候變遷下可能水文情境 =

氣候變遷情境 + 可能水文情境(1)

其中，氣候變遷情境主要係考慮 AR5 氣候變遷情境資料，而可能水文情境則考慮梅雨與颱風之偏少、延遲以及正常情況。以下分別說明：(1)可能水文情境研擬流程與(2)氣候變遷下可能水文情境衝擊評估流程。

30

3.1 可能水文情境之研擬流程

首先，本研究依據歷史雨量觀測資料提出可能水文情境研擬流程如圖 2 所示，其主要分成三大步驟，分別為：(1)雨量時間序列資料整理、(2)推求機率分布函數以及(3)機率分布函數與定義水文情境之關係。針對各步驟詳細說明如下：

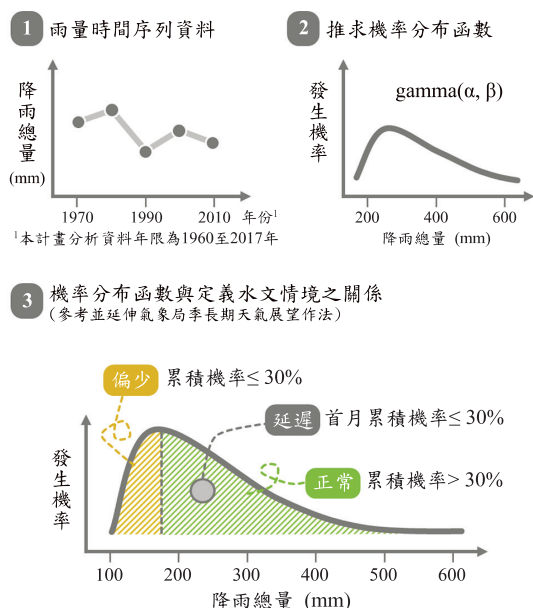


圖 2 可能水文情境之研擬流程

3.3.1 雨量時間序列資料整理

採用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料 (1960 至 2017 年) 作為上游端水文資料，挑選臺南主要集水區對應之網格資料，整理並統計歷年梅雨季 (5 至 6 月) 與颱風季 (7 至 9 月) 之月雨量資料。其中，本研究採用之月雨量資料，係考慮該月份內全部型態降雨事件之總雨量，並非僅單純梅雨事件或颱風事件所造成之雨量。

3.3.2 推求機率分布函數

本研究參考國際上作法 (Husak *et al.*, 2007; Svensson *et al.*, 2017)，採用伽瑪分布進行月雨量資料擬合，該分布係以零作為左邊界，可避免不合理情況發生 (例如：月雨量為負值)，經常被應用在月雨量資料之擬合。

3.3.3 機率分布函數與定義水文情境之關係

中央氣象局於季長期天氣展望中，定義雨量偏少為其總雨量累積機率分布函數值小於等於 30%。本研究參考並延伸其作法，進一步說明與定義梅雨與颱風之偏少、延遲以及正常等可能水文情境如下：

1. 偏少情境

若梅雨或颱風符合偏少特性，其總雨量相較於歷史長期平均會有較少情況。偏少情境之定義為總雨量之累積機率分布函數值小於等於 30%。

2. 延遲情境

若梅雨或颱風符合延遲特性，其首月雨量相較於歷史長期平均會有較低情況，即梅雨季首月 (5 月) 或颱風季首月 (7 月) 發生較低雨量，但需排除上述偏少情境。延遲情境之定義為總雨量之累積機率分布函數值大於 30% 且首月雨量之累積機率分布函數值小於等於 30%。

3. 正常情境

若梅雨或颱風符合正常特性，其總雨量會接近或高於歷史長期平均值。正常情境之定義為總雨量之累積機率分布函數值大於 30% 且首月雨量之累積機率分布函數值大於 30%，或者同時排除上述偏少情境與延遲情境之資料即為正常情境。

3.2 氣候變遷下可能水文情境衝擊評估流程

為探討氣候變遷對於梅雨與颱風可能水文情境之衝擊，本研究提出氣候變遷下可能水文情境衝擊評估流程 (圖 3)，評估雨量機率密度函數之變動。藉由長期觀測資料所推求之伽瑪機率分布參數作為基礎，再

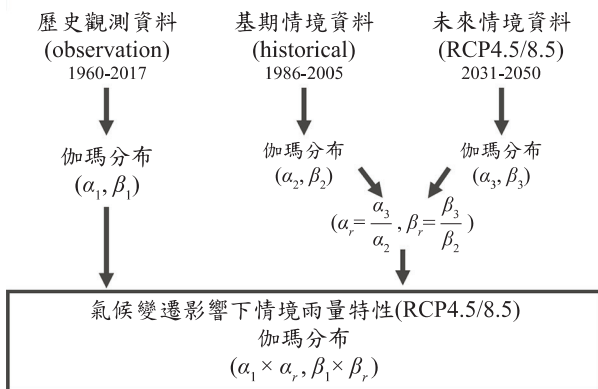


圖 3 氣候變遷下可能水文情境衝擊評估流程

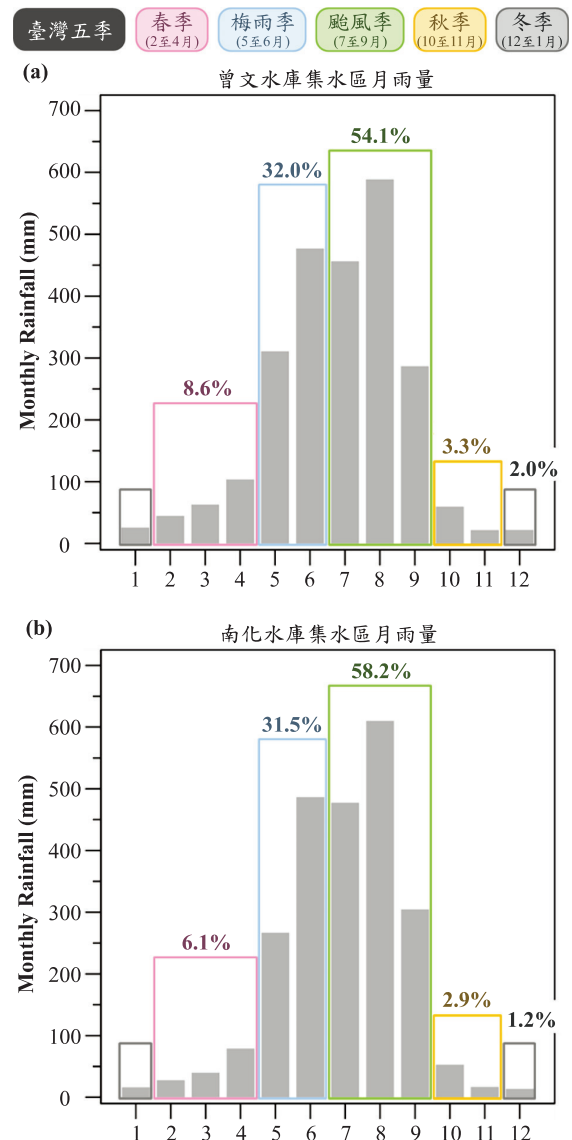
配合基期與未來情境資料所推求之伽瑪機率分布參數之變動資訊，重新推算長期觀測資料之伽瑪機率分布在氣候變遷影響下可能之變動。氣候變遷下可能水文情境衝擊評估流程說明如下：

首先，藉由長期（1960 至 2017 年）觀測雨量資料推求伽瑪機率分布參數（ α_1 與 β_1 ），再分別推求基期時段降尺度雨量資料與未來時段降尺度雨量資料之伽瑪機率分布參數（ α_2 與 β_2 ）與（ α_3 與 β_3 ）。然後，採用基期與未來之伽瑪機率分布參數來量化氣候變遷對衝擊資訊（ $\alpha_r = \alpha_3/\alpha_2$ 與 $\beta_r = \beta_3/\beta_2$ ）。最後，將衝擊資訊回饋至長期觀測之伽瑪機率分布參數（ $\alpha_1 \times \alpha_r$ 與 $\beta_1 \times \beta_r$ ），即可推算出氣候變遷對於長期雨量機率密度函數之衝擊。

四、結果與討論

4.1 臺南地區主要集水區之季節雨量特性分析

本研究參考陳昭銘（2008 年）季節劃分方式，將臺灣季節分為五季，分別為：春季（2 至 4 月）、梅雨季（5 至 6 月）、颱風季（7 至 9 月）、秋季（10 至 11 月）以及冬季（12 月至隔年 1 月），並針對臺南地區主要集水區：曾文水庫集水區與南化水庫集水區進行水文量統計分析，以瞭解各季節水文特性，並作為後續氣候變遷下可能水文情境研擬之依據。基於「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料進行分析，挑選主要集水區對應網格並統計其長期（1960 至 2017 年）平均月雨量，分析結果（圖 4）顯示：曾文水庫集水區春季雨量佔全年雨量 8.6%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為 32.0%、54.1%、3.3% 以及 2.0%；南化水庫集水



註：集水區雨量分析成果係基於「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」產製之歷史觀測網格雨量月資料

圖 4 臺南地區主要集水區之季節雨量分布情況

區春季雨量佔全年雨量 6.1%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為 31.5%、58.2%、2.9% 以及 1.2%。整體而言，曾文水庫集水區與南化水庫集水區雨量主要集中於梅雨季與颱風季，其佔全年雨量分別為 86.1% 與 89.7%，故本研究後續水文情境分析僅將聚焦於梅雨與颱風兩季節。

4.2 臺南地區主要集水區之月雨量擬合

為產製氣候變遷下可能水文情境資料，本需先依據歷史月雨量資料推求各月雨量之伽瑪機率分布參數（雙參數： α_1 與 β_1 ），並配合統計檢定方法檢測雨量資料是否符合伽瑪機率分布（表 2），檢定結果顯示各月

表 2 臺南地區各月雨量之伽瑪機率分布參數與檢定結果

月份	α_1	β_1	p-value	檢定結果
01	0.74	37.40	0.94	通過
02	0.62	65.36	0.91	通過
03	0.90	67.85	0.85	通過
04	1.16	87.90	0.99	通過
05	2.76	108.16	0.85	通過
06	2.10	234.54	0.93	通過
07	2.08	221.73	0.81	通過
08	2.56	226.43	0.82	通過
09	1.26	238.41	0.09	通過
10	0.59	101.42	0.52	通過
11	0.49	43.56	0.96	通過
12	0.65	30.69	0.64	通過

註：採用統計檢定方法為 Cramér-von Mises 檢定，屬於改良版本之 Kolmogorov-Smirnov 檢定，其於檢定過程給予機率分布兩端更高之權重值，避免造成極小值與極大值之擬合誤差過高。其中，若 p-value 低於設定顯著水準($\alpha=0.05$)則不通過檢定(即拒絕月雨量為伽瑪分布之虛無假設)。

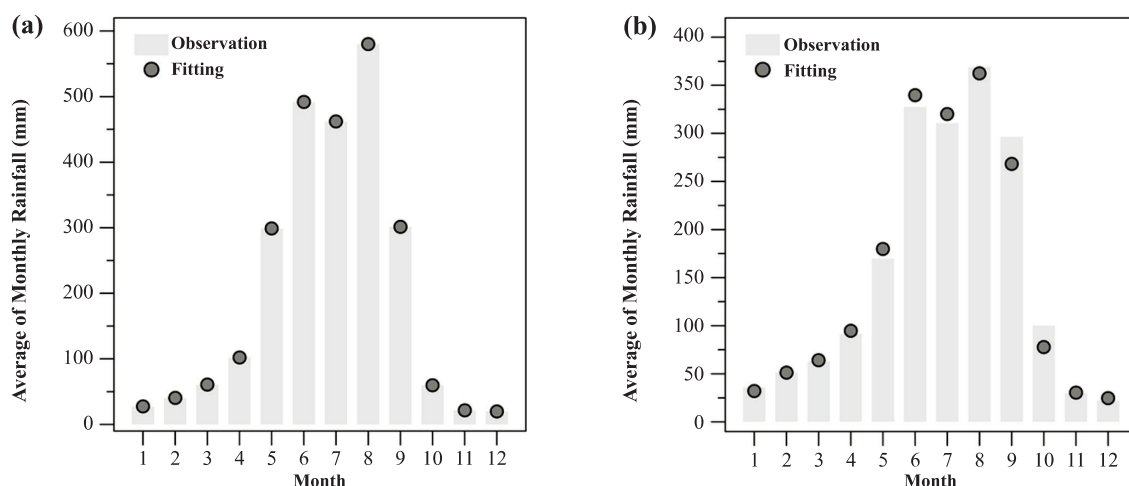


圖 5 臺南地區各月觀測雨量與擬合雨量之比較(a)平均值與(b)標準偏差

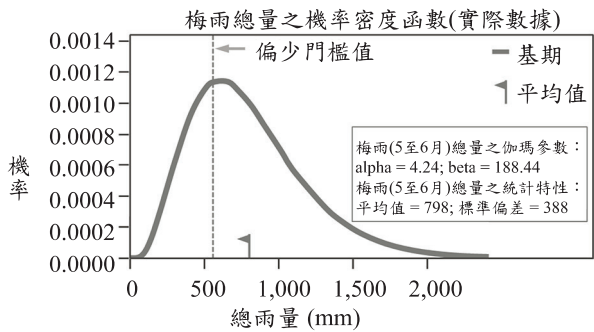
雨量皆可應用伽瑪機率分布加以描述。此外，為瞭解觀測雨量與擬合雨量之統計特性是否一致，本研究分析比較觀測雨量與擬合雨量之平均值與標準偏差(圖 5)，分析結果亦顯示擬合雨量可以合理描述觀測雨量之統計特性。其中，各月觀測雨量與擬合雨量之平均值幾乎重疊；就觀測雨量與擬合雨量之標準偏差而言，兩者在枯水期亦幾乎重疊，惟豐水期兩者略有差異，5 至 7 月擬合雨量之標準偏差略高，8 至 10 月擬合雨量之標準偏差則略低，但仍可合理描述觀測雨量之標準偏差。

整體而言，藉由上述統計檢定與統計特性分析結果，得以驗證本研究採用之伽瑪機率分布可應用於描述臺南地區主要集水區之月雨量特性。

4.3 基期可能水文情境

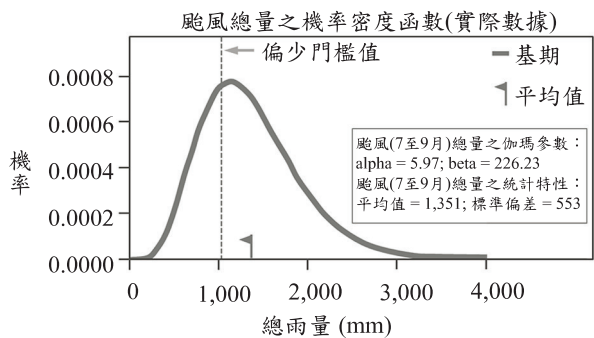
為探討基期可能水文情境之特性，本研究採用上述伽瑪機率分布參數針對梅雨季(5 至 6 月)與颱風季(7 至 9 月)間各月進行雨量繁衍，並應用繁衍資料於推求梅雨總量與颱風總量之機率密度函數，以探討基期梅雨與颱風可能水文情境之統計特性。

針對基期梅雨總量之部分，圖 6 為臺南地區基期梅雨總量之機率密度函數(伽瑪機率分布參數分別為 $\alpha=4.24$ 與 $\beta=188.44$)，其平均值為 798 mm 而標準偏差為 388 mm，配合偏少情境之定義(累積機率分布函數值小於等於 30%)，可計算出偏少門檻值為 559 mm；針對基期颱風總量之部分，圖 7 為臺南地區基期颱風總



註：梅雨總量之偏少門檻值為559mm，而梅雨總量之長期平均則為798mm

圖 6 臺南地區基期梅雨總量之機率密度函數



註：颱風總量之偏少門檻值為1,016mm，而颱風總量之長期平均則為1,351mm

圖 7 臺南地區基期颱風總量之機率密度函數

量之機率密度函數 (伽瑪機率分布參數分別為 $\alpha = 5.97$ 與 $\beta = 226.23$)，其平均值為 1,351 mm 而標準偏差為 553 mm，配合偏少情境之定義 (累積機率分布函數值小於等於 30%)，可計算出偏少門檻值為 1,016 mm。

基於梅雨總量與颱風總量之機率密度函數，再配合可能水文情境(偏少、延遲以及正常)之定義，本研究得以進行更深入之情境分析，可瞭解更多雨量統計資訊，並探討梅雨與颱風之偏少、延遲以及正常情況所對應之總量與發生機率。

圖 8 與圖 9 分別為臺南地區基期梅雨與颱風之可能水文情境分析結果，圖中橫軸為可能水文情境之總量，而縱軸則為可能水文情境之發生機率。基期梅雨分析結果顯示：梅雨偏少之總量與發生機率分別為 428 mm 與 34.6%、梅雨延遲之總量與發生機率分別為 920 mm 與 13.4%、梅雨正常之總量與發生機率分別為 1,014 mm 與 52.0%；而基期颱風分析結果顯示：颱風偏少之總量與發生機率分別為 781 mm 與 31.1%、颱風延遲之總量與發生機率分別為 1,421 mm 與 12.5%、颱風正常之總量與發生機率分別為 1,649 mm 與 56.4%。整體而言，無論是基期梅雨或基期颱風之可能水文情

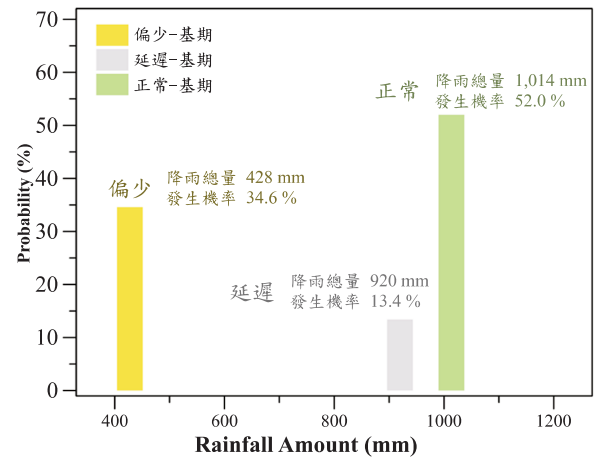


圖 8 臺南地區基期梅雨可能水文情境之總量與發生機率

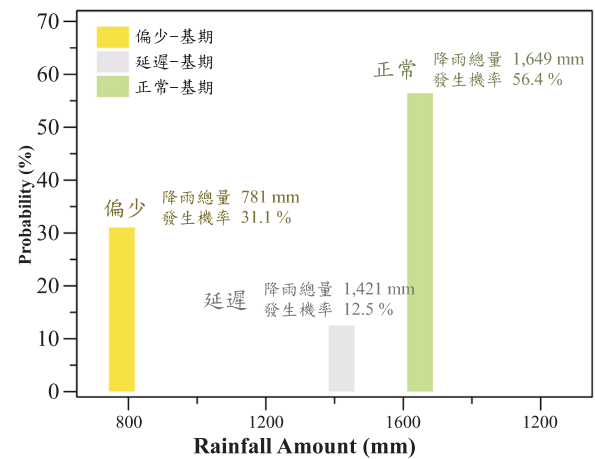


圖 9 臺南地區基期颱風可能水文情境之總量與發生機率

境，其總量由大至小皆分別為正常、延遲以及偏少；而發生機率由大至小則分別為正常、偏少以及延遲。

4.4 基期可能水文情境之聯合發生機率

因梅雨季 (5 至 6 月) 與颱風季 (7 至 9 月) 在時間上係依序發生，配合梅雨與颱風之可能水文情境，兩者之組合包含下列 9 種可能：(1)梅雨偏少與颱風偏少、(2)梅雨偏少與颱風延遲、(3)梅雨偏少與颱風正常、(4)梅雨延遲與颱風偏少、(5)梅雨延遲與颱風延遲、(6)梅雨延遲與颱風正常、(7)梅雨正常與颱風偏少、(8)梅雨正常與颱風延遲以及(9)梅雨正常與颱風正常。本研究假設梅雨與颱風互為獨立事件，以梅雨與颱風各個水文情境發生機率之乘積作為上述 9 種可能組合之聯合發生機率 (圖 10)。

圖 11 為基期梅雨與颱風可能水文情境組合之聯合發生機率，而圖中粗體底線數字為可能水文情境之

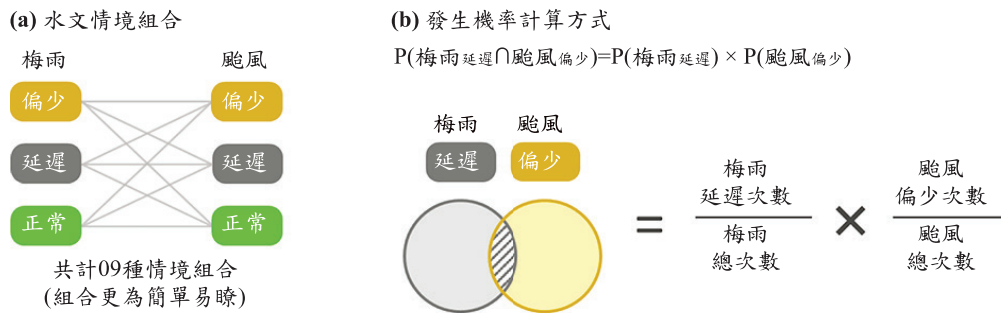


圖 10 梅雨與颱風之水文情境組合與聯合發生機率之計算方式

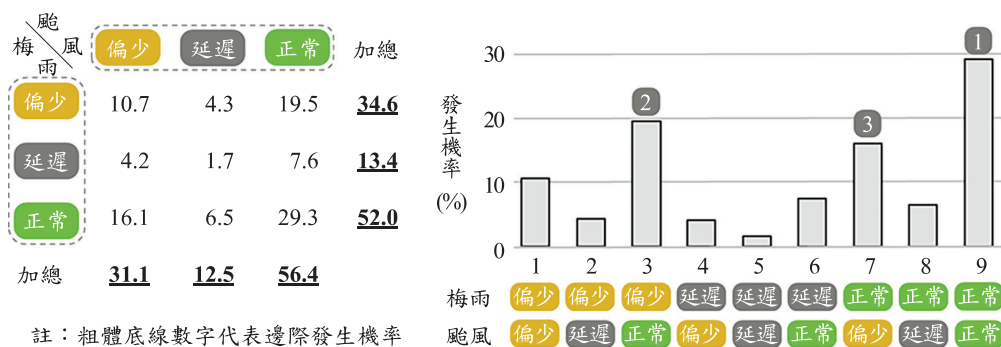


圖 11 基期梅雨與颱風可能水文情境組合之聯合發生機率

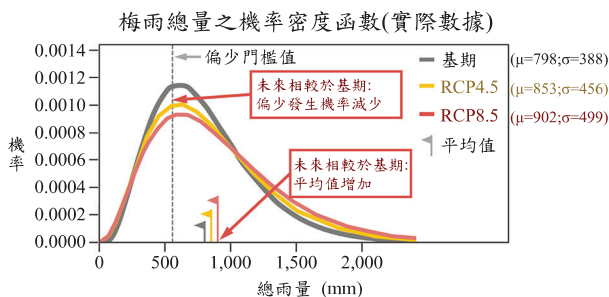


圖 12 臺南地區基期與未來情境下梅雨總量之機率密度函數

邊際發生機率，其係為單一可能水文情境對應之發生機率。以梅雨之可能水文情境為例，梅雨偏少之邊際發生機率為 34.6%，其等同於梅雨偏少與颱風偏少 (10.7%)、梅雨偏少與颱風延遲 (4.3%) 以及梅雨偏少與颱風正常 (19.5%) 之聯合發生機率總和。就各種水文情境組合之聯合發生機率而言，梅雨正常與颱風正常之聯合發生機率最高 (29.3%)，次高為梅雨偏少與颱風正常之聯合發生機率 (19.5%)，第 3 高為梅雨正常與颱風偏少之聯合發生機率 (16.1%)，而最低則為梅雨延遲與颱風延遲之聯合發生機率 (1.7%)。

4.5 氣候變遷下可能水文情境

本研究藉由比較基期與未來情境下之雨量機率密

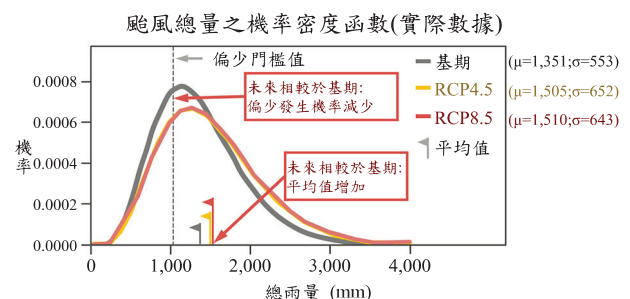


圖 13 臺南地區基期與未來情境下颱風總量之機率密度函數

度函數，以探討氣候變遷對於梅雨與颱風特性之衝擊。圖 12 與圖 13 皆為基期與未來情境下雨量機率密度函數，粗線代表基期雨量機率密度函數，次粗線則為氣候變遷下雨量機率密度函數，而雨量平均值則以旗幟圖示標記。

就氣候變遷對梅雨總量影響而言 (圖 12)，整體趨勢顯示：相較於基期梅雨總量之平均值，氣候變遷下梅雨總量 (RCP4.5 與 RCP8.5) 之平均值皆有增加情況；而基期梅雨總量之機率密度函數形狀較為集中，未來情境下梅雨總量之機率密度函數形狀則較為分散。雖 RCP4.5 與 RCP8.5 情境下梅雨平均值皆大於基期梅雨平均值，但檢視梅雨總量之機率密度函數，可發現相較於基期極端小雨 (梅雨) 與極端大雨 (梅雨)

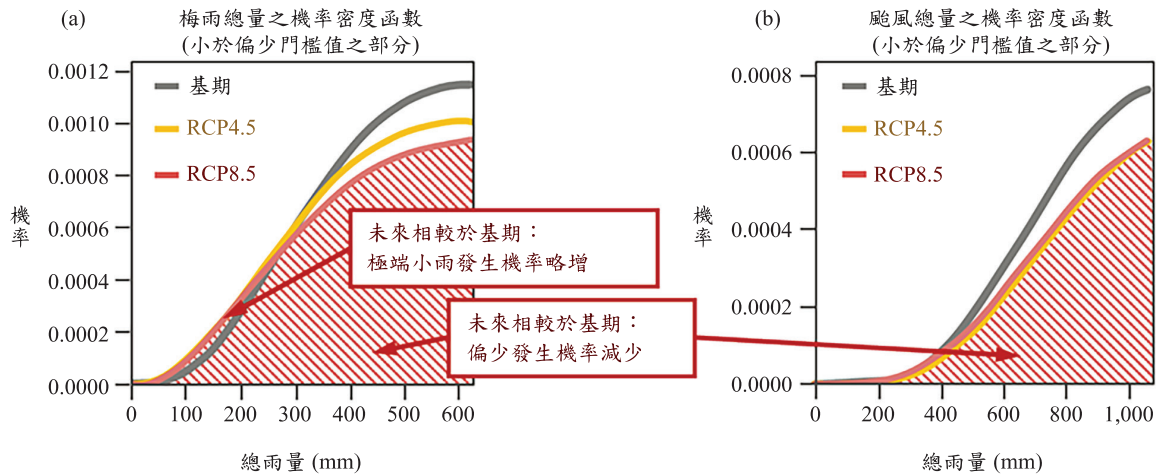


圖 14 梅雨與颱風之機率密度函數 (小於偏少門檻值之部分)

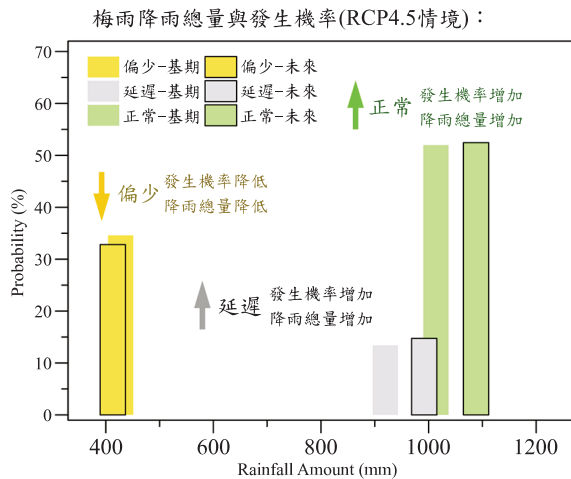


圖 15 RCP4.5 情境下梅雨可能水文情境之總量與發生機率

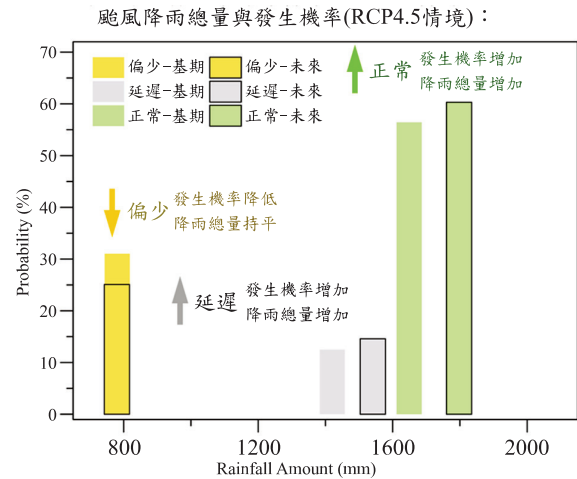


圖 16 RCP4.5 情境下颱風可能水文情境之總量與發生機率

之發生機率，氣候變遷下其發生機率皆有增加情況。以水資源管理調度角度而言，需特別注意此種極端小雨 (梅雨) 情況，尤其南部地區經常仰賴梅雨補注水庫蓄水量，梅雨不足可能造成用水緊張，若此種極端小雨 (梅雨) 情況因氣候變遷影響而更常發生，將造成水資源管理調度之難度增加。

就氣候變遷對颱風總量影響而言 (圖 13)，整體趨勢顯示：相較於基期颱風總量之平均值，未來情境下颱風總量 (RCP4.5 與 RCP8.5) 之平均值皆有增加情況；而基期颱風總量之機率密度函數形狀較為集中，RCP4.5 與 RCP8.5 情境下颱風總量之機率密度函數則較為分散且有右偏情況 (雨量變更大)。檢視颱風總量之機率密度函數，可發現相較於基期條件下小雨 (颱風) 與大雨 (颱風) 之發生機率，RCP4.5 與 RCP8.5 情境下小雨 (颱風) 發生機率有降低情況，而大雨 (颱風) 發生機率則有增加情況。

以水資源管理角度而言，梅雨與颱風偏少將直接影響可運用水量，故本研究特別放大檢視梅雨與颱風之機率密度函數，探討氣候變遷對於偏少情況之影響。圖 14(a) 為梅雨總量之機率密度函數 (小於偏少門檻值之部分)，其結果顯示：相較於基期梅雨，未來情境下 (RCP4.5 與 RCP8.5) 梅雨偏少之發生機率有降低情況，惟極端小雨 (梅雨) 則有略增情況；圖 14(b) 為颱風總量之機率密度函數 (小於偏少門檻值之部分)，其結果顯示：相較於基期颱風，未來情境下 (RCP4.5 與 RCP8.5) 颱風偏少之發生機率有降低情況。

圖 15 與圖 16 分別為 RCP4.5 情境下梅雨與颱風可能水文情境之總量與發生機率，圖中橫軸為可能水文情境之總量，而縱軸則為可能水文情境之發生機率。RCP4.5 情境下梅雨分析結果 (圖 15) 顯示：在氣候變遷影響下未來「梅雨偏少」之發生機率有降低情況 (34.6% 降至 32.8%)，且總量亦有降低情況 (428 mm 降至

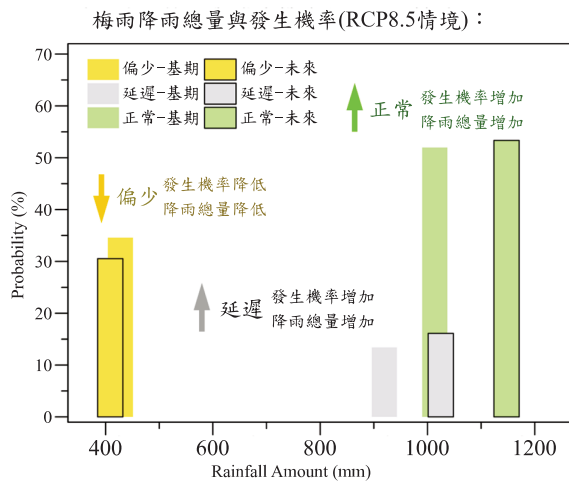


圖 17 RCP8.5 情境下梅雨可能水文情境之總量與發生機率

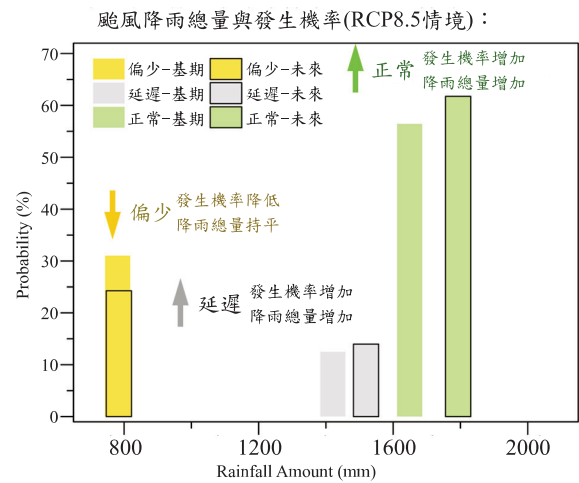


圖 18 RCP8.5 情境下颱風可能水文情境之總量與發生機率

		基期情境下聯合發生機率			加總			RCP4.5情境下聯合發生機率			加總
梅	風	偏少	延遲	正常		梅	風	偏少	延遲	正常	
偏少	偏少	10.7	4.3	19.5	<u>34.6</u>	偏少	偏少	8.2	4.8	19.8	<u>32.8</u>
延遲	延遲	4.2	1.7	7.6	<u>13.4</u>	延遲	延遲	3.7	2.2	8.9	<u>14.7</u>
正常	正常	16.1	6.5	29.3	<u>52.0</u>	正常	正常	13.2	7.7	31.6	<u>52.4</u>
加總		<u>31.1</u>	<u>12.5</u>	<u>56.4</u>		加總		<u>25.1</u>	<u>14.6</u>	<u>60.3</u>	

註：粗體底線數字代表邊際發生機率

圖 19 RCP4.5 情境下可能水文情境組合之聯合發生機率

413 mm)；未來「梅雨延遲」之發生機率有增加情況 (13.4%增至 14.7%)，且總量亦有增加情況 (920 mm 增至 992 mm)；未來「梅雨正常」之發生機率有增加情況 (52.0%增至 52.4%)，且總量亦有增加情況 (1,014 mm 增至 1,088 mm)。整體而言，總量較小之偏少情境，未來發生機率降低，且總量亦有降低情況；總量較大之延遲與正常情境，未來發生機率有增加情況，且總量亦為增加情況。

RCP4.5 情境下颱風分析結果 (圖 16) 顯示：在氣候變遷影響下未來「颱風偏少」之發生機率有降低情況 (31.1%降至 25.1%)，而總量則為持平情況 (781 mm 與 780 mm)；未來「颱風延遲」之發生機率有增加情況 (12.5%增至 14.6%)，且總量亦有增加情況 (1,421 mm 增至 1,541 mm)；未來「颱風正常」之發生機率有增加情況 (56.4%增至 60.3%)，且總量亦有增加情況 (1,649 mm 增至 1,797 mm)。整體而言，總量較小之偏少情境，未來發生機率降低，而總量則為持平情況；總量較大之延遲與正常情境，未來整體發生機率增加，且總量亦為增加。

圖 17 與圖 18 則分別為 RCP8.5 情境下梅雨與颱風可能水文情境之總量與發生機率。RCP8.5 情境下梅雨分析結果 (圖 17) 顯示：整體而言，總量較小之偏少情境，未來發生機率降低，且總量亦有降低情況；總量較大之延遲與正常情境，未來發生機率皆為增加，且其總量亦皆為增加；RCP8.5 情境下颱風分析結果 (圖 18) 顯示：整體而言，總量較小之偏少情境，未來發生機率降低，而總量則為持平情況；總量較大之延遲與正常情境，未來發生機率皆為增加，且總量亦皆為增加。

4.6 氣候變遷下可能水文情境之聯合發生機率

針對 RCP4.5 情境下聯合發生機率之部分 (圖 19)，分析結果顯示：就雨量相對豐沛之「梅雨正常與颱風正常」組合而言，其基期聯合發生機率為 29.3%，而 RCP4.5 情境之聯合發生機率增加至 31.6%。惟針對容易造成用水緊張之「梅雨延遲」情況而言，其基期邊

基期情境下聯合發生機率				加總	RCP8.5 情境下聯合發生機率				加總
梅雨	偏少	延遲	正常		梅雨	偏少	延遲	正常	
偏少	10.7	4.3	19.5	34.6	偏少	7.4	4.3	18.9	30.5
延遲	4.2	1.7	7.6	13.4	延遲	3.9	2.3	10.0	16.1
正常	16.1	6.5	29.3	52.0	正常	12.9	7.5	32.9	53.3
加總	31.1	12.5	56.4		加總	24.3	14.0	61.7	

註: 粗體底線數字代表邊際發生機率

↑ 機率增加

↑ 機率增加

圖 20 RCP8.5 情境下可能水文情境組合之聯合發生機率

際發生機率為 13.4%，而 RCP4.5 情境之邊際發生機率則增加至 14.7%。此外，針對 7 月雨量偏少「颱風延遲」情境而言，其基期邊際發生機率為 12.5%，而 RCP4.5 情境之邊際發生機率則增加至 14.6%。整體而言，雖然 RCP4.5 情境下「梅雨正常與颱風正常」之聯合發生機率增加，但「梅雨延遲」與「颱風延遲」之邊際發生機率亦有增加情況，即雨量相對豐沛之機率增加但同時梅雨延遲與颱風延遲之機率亦有所增加，未來會朝極端水文情況更加頻繁發生之方向發展。

針對 RCP8.5 情境下聯合發生機率之部分(圖 20)，分析結果顯示：就雨量相對豐沛之「梅雨正常與颱風正常」組合而言，其基期聯合發生機率為 29.3%，而 RCP8.5 情境之聯合發生機率增加至 32.9%。惟針對容易造成用水緊張之「梅雨延遲」情況而言，其基期邊際發生機率為 13.4%，而 RCP8.5 情境之邊際發生機率則增加至 16.1%。此外，針對 7 月雨量偏少「颱風延遲」情境而言，其基期邊際發生機率為 12.5%，而 RCP8.5 情境之邊際發生機率則增加至 14.0%。整體而言，雖然 RCP8.5 情境下「梅雨正常與颱風正常」之聯合發生機率增加，但「梅雨延遲」與「颱風延遲」之邊際發生機率亦有增加情況，即雨量相對豐沛之機率增加但同時梅雨延遲與颱風延遲之機率亦有所增加，未來會朝極端水文情況更加頻繁發生之方向發展。

五、結論與建議

本研究綜合考慮氣候變遷情境與可能水文情境，嘗試提出氣候變遷下可能水文情境，探討氣候變遷對於梅雨與颱風偏少、延遲以及正常情況之衝擊。基於基期與未來情境下可能水文情境資料，後續可應用於水資源供需影響分析或經濟影響分析，有助於瞭解各

種水文情境(例如：颱風偏少)可能導致之潛在影響，以提早擬定因應策略並提升抗旱韌性。針對重要研究成果與建議說明如下：

1. 本研究應用伽瑪機率分布參數(雙參數： α 與 β)擬合各月雨量、梅雨以及颱風，並配合統計檢定方法檢測雨量資料是否符合伽瑪機率分布，檢定結果顯示各月雨量皆可應用伽瑪機率分布加以描述。未來可採用率定之伽瑪機率分布參數進行資料繁衍，產製多組可能水文情境資料，例如：梅雨延遲與颱風偏少同時發生之情況，以提供其他相關研究或計畫進行後續供水檢討或衝擊評估。
2. 就氣候變遷對梅雨與颱風特性之影響而言，RCP4.5 情境下衝擊分析結果顯示：針對容易造成用水緊張之「梅雨延遲」情況而言，其發生機率有增加情況，由 13.4% 增加至 14.7%，而總量亦有增加情況，由 920 mm 增加至 992 mm；針對 7 月雨量偏少之「颱風延遲」情境而言，其發生機率有增加情況，由 12.5% 增加至 14.6%，而總量亦有增加情況，由 1,421 mm 增加至 1,541 mm。
3. 就氣候變遷對梅雨與颱風之聯合發生機率而言，RCP4.5 與 RCP8.5 情境下衝擊分析結果皆顯示：雖然未來情境下「梅雨正常與颱風正常」之聯合發生機率增加，但「梅雨延遲」與「颱風延遲」之邊際發生機率亦有增加情況，即雨量相對豐沛之機率增加但同時梅雨延遲與颱風延遲之機率亦有所增加，未來會朝極端水文情況更加頻繁發生之方向發展。
4. 基於氣候變遷下可能水文情境資料，本研究得以探討梅雨與颱風之偏少、延遲以及正常情況下其特性變化情況，建議未來於水資源規劃管理或檢討時，亦可以將不同可能水文情境納入考慮，以評估嚴重枯旱(例如：梅雨偏少或颱風偏少)對於水資源系統之影響。此外，氣候變遷

下可能水文情境資料亦可應用於各地區定期之供水情勢分析，例如：梅雨延遲情況發生時可能遭遇之供需情況。

5. 本研究係基於月雨量資料進行分析，建議未來可使用時間尺度更加細緻之資料進行分析，除總雨量之外，亦可探討氣候變遷對於雨日特性之影響，例如：降雨總日數與連續不降雨日數等。

謝誌

本研究承蒙經濟部水利署計畫「因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)」(計畫編號：MOEAWRA1090349)經費補助與科技部「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>)提供網格化觀測月資料與統計降尺度資料，得以順利完成並持續精進與推廣，謹致謝忱。

參考文獻

1. Ahmadalipour, A., Rana, A., Moradkhani, H., and Sharma, A. (2017) Multi-criteria evaluation of CMIP5 GCMs for climate change impact analysis, *Theor. Appl. Climatol.*, 128, 71-87, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1695-4>.
2. Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., Chung, E.-S. (2019) Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4803-4824, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4803-2019>.
3. Bush, E. and Lemmen, D.S., editors (2019) Canada's Changing Climate Report; Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p.
4. Dorte *et al.* (2018) Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector. World Bank Group.
5. Husak, G.J., Michaelsen, J., Funk, C. (2007) Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. *International Journal of Climatology*, 27, 935-944. doi: 10.1002/joc.1441.
6. Hussain, M., Yusof, K. W., Mustafa, M. R. U., Mahmood, R., Jia, S. (2018) Evaluation of CMIP5 models for projection of future precipitation change in Bornean tropical rainforests, *Theor. Appl. Climatol.*, 134, 423-440, <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2284-5>.
7. IPCC (2019) Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Pörtner *et al.*)
8. Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Nawaz, N., Son, M. (2018) Performance Assessment of General Circulation Model in Simulating Daily Precipitation and Temperature Using Multiple Gridded Datasets, *Water*, 10, 1793, <https://doi.org/10.3390/w10121793>.
9. Ministry for the Environment, New Zealand (2018) Climate Change Projections for New Zealand: Atmosphere Projections Based on Simulations from the IPCC Fifth Assessment.
10. Svensson, C., Hannaford, J., Prosdocimi, I. (2017) Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications. *Water Resources Research*, 53, 999-1018. doi:10.1002/2016WR019276.
11. 中央研究院永續科學研究計畫，2016-2018，臺灣乾旱研究：變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫，臺灣氣候變遷乾旱及水資源風險調適策略建議。
12. 林李耀等人，2018，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫，科技部補助專題研究計畫成果報告。
13. 陳昭銘，2008，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42期，第1至9頁。
14. 經濟部水利署，2020，因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)。
15. 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫，2017，臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制(總摘要)。

收稿日期：民國 110 年 01 月 28 日
修改日期：民國 110 年 03 月 19 日
接受日期：民國 110 年 11 月 29 日