



氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析

Impact Assessment of Climate Change on Water Resources of

Major River Basins



主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

中華民國 111 年 12 月

氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析

Impact Assessment of Climate Change on Water Resources of

Major River Basins

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

計畫主持人：游保杉

目錄

表目錄.....	表-1
圖目錄.....	圖-1
摘要.....	摘-1
Abstract.....	A-1
結論與建議.....	結-1
第一章 前言.....	1-1
一、緣由與目的.....	1-1
二、重要分析項目說明.....	1-1
三、分析範圍.....	1-3
四、重要項目之定義與概念.....	1-4
第二章 氣候變遷下水文分析之背景資料.....	2-1
一、臺灣嚴重乾旱與美國嚴重乾旱回顧.....	2-1
二、臺灣過去氣候變遷情境設定相關文獻回顧.....	2-7
第三章 氣候變遷 IPCC AR6 資料及臺灣地區可能情境探討.....	3-1
一、氣候變遷 IPCC AR6 資料.....	3-1
二、AR6 氣候變遷情境下臺灣未來氣候推估.....	3-7
三、氣候變遷下臺灣可能情境探討.....	3-15
第四章 淡水河等 10 條水系在設定之可能情境下降雨量與流量分析.....	4-1
一、重要水系基本水文資料整理.....	4-1
二、氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析.....	4-14
三、降雨-逕流模式建置與驗證.....	4-30
四、氣候變遷下臺灣可能情境之流量分析.....	4-36
第五章 氣候變遷設定情境下各超越機率之地面水可利用水量分析.....	5-1
一、各月份各超越機率流量分析.....	5-1
二、可利用水量分析.....	5-9
三、低流量特性分析.....	5-12

四、氣候變遷下流量衝擊總結	5-15
五、氣候變遷下情境流量資料之不確定性	5-16
參考文獻	參-1
附錄一 氣候變遷情境說明	附 1-1
附錄二 臺灣統計降尺度產品介紹	附 2-1
附錄三 淡水河等 10 條水系內重要控制點	附 3-1
附錄四 淡水河等 10 條水系內流量推估公式	附 4-1
附錄五 水文趨勢延伸方法	附 5-1

表目錄

表 1-1	臺灣 10 條主要水系之重要控制點清單	1-4
表 2-1	美國乾旱分級表.....	2-4
表 2-2	全球環流模式於基期模擬之綜合表現排序	2-12
表 3-1	不同氣候變遷情境下氣候模式列表	3-17
表 4-1	淡水河等 10 條水系之重要控制點清單	4-2
表 4-2	石門、德基以及曾文水庫集水區各季節總雨量趨勢檢定結果.....	4-13
表 4-3	石門、德基以及曾文水庫集水區各季節總雨量變異點檢定結果.....	4-13
表 4-4	不同氣候變遷情境下臺灣 10 條主要水系之豐枯雨量特性變化 .	4-29
表 4-5	淡水河等 10 條水系重要控制點之修正型 HBV 模式參數.....	4-35
表 4-6	淡水河等 10 條水系重要控制點之評鑑指標數值	4-36
表 4-7	不同氣候變遷情境下臺灣 10 條主要水系之豐枯流量特性變化 .	4-42

圖目錄

圖 1-1	氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析流程圖	1-2
圖 1-2	臺灣 10 條主要水系內重要控制點之空間分布圖	1-3
圖 2-1	民國 110 年 3 月 23 日全臺水庫水情	2-2
圖 2-2	2021 年 12 月 21 日至 28 日美國加州乾旱改善狀況	2-3
圖 2-3	2021 年 7 月 13 日美國各地乾旱狀況	2-4
圖 3-1	IPCC AR6 主要氣候變遷情境之二氧化碳排放量與特徵	3-2
圖 3-2	固定增溫條件衝擊分析流程與說明	3-5
圖 3-3	各種不同固定增溫條件對於全球各地年平均降水變化之衝擊	3-6
圖 3-4	各種不同固定增溫條件對於全球氣候系統之衝擊分析結果	3-7
圖 3-5	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年平均氣溫	3-8
圖 3-6	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來極端高溫日數	3-9
圖 3-7	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來季節長度	3-9
圖 3-8	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年總降雨量	3-10
圖 3-9	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年最大 1 日暴雨強度	3-11
圖 3-10	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年最大連續不降雨日數	3-11
圖 3-11	氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來颱風特性	3-12
圖 3-12	氣候變遷固定增溫條件下臺灣未來水稻產量變化趨勢	3-13
圖 3-13	氣候變遷固定增溫條件下海平面上升變化與溢淹分析	3-14
圖 3-14	氣候變遷固定增溫條件下未來冬季空氣品質不良日數變化	3-14
圖 4-1	石門、德基以及曾文水庫集水區各季節雨量佔全年雨量百分比	4-4
圖 4-2	淡水河等 10 條水系重要控制點之季節雨量特性	4-4
圖 4-3	淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯雨量特性	4-5
圖 4-4	淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯流量特性	4-6
圖 4-5	曾文水庫集水區各季節總雨量時間序列資料與趨勢	4-12
圖 4-6	氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析流程	4-15
圖 4-7	不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區月雨量之變化情況	4-17
圖 4-8	不同氣候變遷情境下石門水庫集水區月雨量之變化情況	4-18

圖 4-9	不同氣候變遷情境下士林堰集水區月雨量之變化情況	4-19
圖 4-10	不同氣候變遷情境下德基水庫集水區月雨量之變化情況	4-20
圖 4-11	不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區月雨量之變化情況	4-21
圖 4-12	不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區季節雨量之變化情況	4-22
圖 4-13	不同氣候變遷情境下石門水庫集水區季節雨量之變化情況	4-23
圖 4-14	不同氣候變遷情境下士林堰集水區季節雨量之變化情況	4-23
圖 4-15	不同氣候變遷情境下德基水庫集水區季節雨量之變化情況	4-23
圖 4-16	不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區季節雨量之變化情況	4-24
圖 4-17	不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區豐枯雨量之變化情況	4-25
圖 4-18	不同氣候變遷情境下石門水庫集水區豐枯雨量之變化情況	4-25
圖 4-19	不同氣候變遷情境下士林堰集水區豐枯雨量之變化情況	4-25
圖 4-20	不同氣候變遷情境下德基水庫集水區豐枯雨量之變化情況	4-26
圖 4-21	不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區豐枯雨量之變化情況	4-26
圖 4-22	未來中期不同氣候變遷情境下豐水期雨量增減情況	4-27
圖 4-23	未來中期不同氣候變遷情境下枯水期雨量增減情況	4-28
圖 4-24	未來中期不同氣候變遷情境下連續不降雨日數增減情況	4-28
圖 4-25	AR6 與 AR5 情境雨量特性之比較	4-29
圖 4-26	逕流與蒸發散量受土壤含水量影響關係圖	4-32
圖 4-27	逕流反應部分之模式架構圖	4-32
圖 4-28	修正型 HBV 模式於淡水河等 10 條水系重要控制點之評鑑指標	4-36
圖 4-29	氣候變遷下臺灣可能情境流量之分析流程	4-37
圖 4-30	不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區豐枯流量之變化情況	4-38
圖 4-31	不同氣候變遷情境下石門水庫集水區豐枯流量之變化情況	4-38
圖 4-32	不同氣候變遷情境下士林堰集水區豐枯流量之變化情況	4-38
圖 4-33	不同氣候變遷情境下德基水庫集水區豐枯流量之變化情況	4-39
圖 4-34	不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區豐枯流量之變化情況	4-39
圖 4-35	未來中期不同氣候變遷情境下豐水期流量總體積增減情況	4-40
圖 4-36	未來中期不同氣候變遷情境下枯水期流量總體積增減情況	4-41
圖 4-37	未來中期不同氣候變遷情境下低流量日數增減情況	4-41

圖 5-1	未來中期 SSP2-4.5 情境下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-2
圖 5-2	未來中期 SSP2-4.5 情境下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-2
圖 5-3	未來中期 SSP2-4.5 情境下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	....5-3
圖 5-4	未來中期 SSP2-4.5 情境下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-3
圖 5-5	未來中期 SSP2-4.5 情境下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-3
圖 5-6	未來中期 SSP5-8.5 情境下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-4
圖 5-7	未來中期 SSP5-8.5 情境下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-5
圖 5-8	未來中期 SSP5-8.5 情境下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	....5-5
圖 5-9	未來中期 SSP5-8.5 情境下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-5
圖 5-10	未來中期 SSP5-8.5 情境下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	5-6
圖 5-11	固定增溫 2°C 條件下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	.....5-7
圖 5-12	固定增溫 2°C 條件下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	.....5-7
圖 5-13	固定增溫 2°C 條件下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	.....5-7
圖 5-14	固定增溫 2°C 條件下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	.....5-8
圖 5-15	固定增溫 2°C 條件下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線	.....5-8
圖 5-16	未來短期 SSP2-4.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況	.....5-10
圖 5-17	未來短期 SSP5-8.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況	.....5-10
圖 5-18	未來中期 SSP2-4.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況	.....5-11
圖 5-19	未來中期 SSP5-8.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況	.....5-11
圖 5-20	固定增溫 2°C 條件下各月份流量 Q85 之增減情況	.....5-12
圖 5-21	低流量特性分析方法示意圖(a)門檻值法與(b)低流量事件	.....5-13
圖 5-22	不同未來情境下臺灣 10 條主要水系之低流量特性	.....5-14
圖 5-23	不同未來情境下高屏溪水系之低流量特性	.....5-14
圖 5-24	氣候變遷影響下未來可能之流量特性總結	.....5-17
圖 5-25	氣候變遷下情境流量資料之不確定性(不同 ESM 推估結果之變動)	5-17

摘要

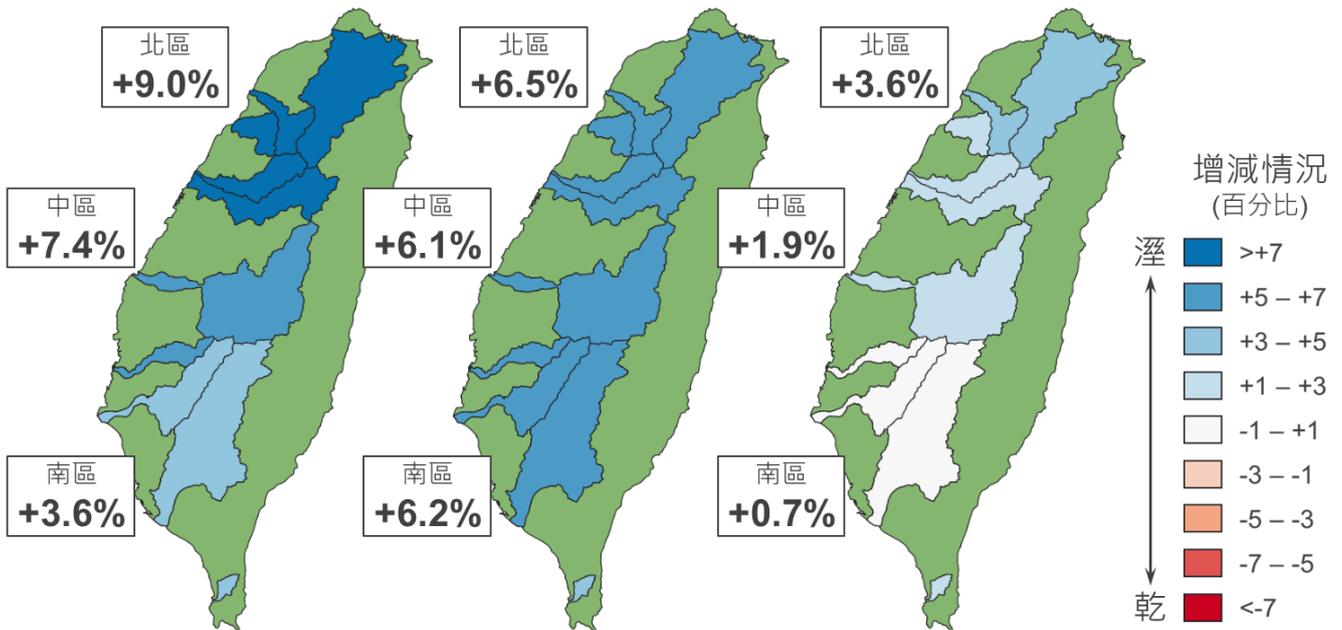
聯合國氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)約每 5 至 7 年進行氣候變遷情境推估資料更新，其藉由不斷改良與提升模式能力、空間解析度以及溫室氣體情境設定等，提供品質更佳氣候變遷衝擊資訊。為瞭解新版氣候變遷情境對臺灣水資源可能造成之影響，需先從水文角度探討氣候變遷對於供水水系水源水量可能之衝擊，以提供未來氣候變遷下水資源經營管理作為參考。因此，採用聯合國政府間氣候變遷專門委員會第六次評估報告(簡稱 IPCC AR6)之氣候變遷情境推估降尺度資料進行分析，藉由國際最新氣候變遷資料蒐集及探討，研選適用之情境，並從水文角度分析其對主要供水水系之流量影響分析，瞭解在氣候變遷情境下各水系降雨及流量之變化，及各超越機率之地面水可利用水量，以作為未來水資源規劃及管理之參據。針對不同氣候變遷情境(SSP2-4.5、SSP5-8.5 以及固定增溫 2°C條件)下臺灣 10 條主要水系(淡水河、頭前溪、中港溪、大安溪、大甲溪、濁水溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪及四重溪)，以水文角度進行情境雨量分析與情境流量分析，並將相關重要成果彙整如下：

一、臺灣 10 條主要水系之情境雨量分析

摘圖-1 至摘圖-3 為臺灣 10 條主要水系於未來中期不同氣候變遷情境下豐水期雨量、枯水期雨量以及連續不降雨日數(日雨量低於 1.0 mm)相較於基期雨量資料之空間變化情況。分析結果顯示：(1)就整體增減情況而言，未來豐水期雨量相較於基期雨量資料有一致的增加情況、未來枯水期雨量則有一致的減少情況以及未來連續不降雨日數有一致的增加情況。(2)就空間上變化情況而言，未來豐水期雨量相較於基期雨量資料在空間上增加幅度有所不同，以北區增加幅度最大，而南區增加幅度則多為較小。其中，3 種未來氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及固定增溫 2°C條件)之中，以未來中期 SSP5-8.5 情境豐水期雨量增加幅度在空間上差異較不顯著，其增幅約落於 6.1%至 6.5%左右；未來枯水期雨量有一致的減少情況，但空間上減少幅度有所不同，以北區與南區減少幅度較大，而中區減少幅度則較小；

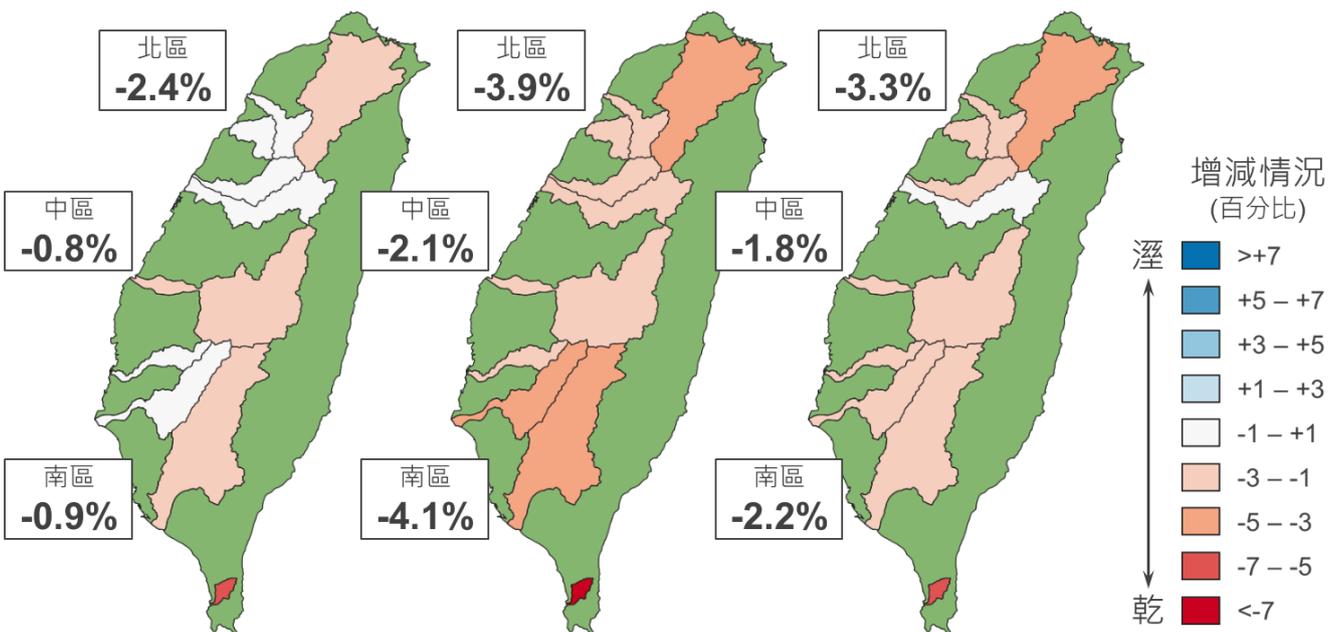
未來連續不降雨日數有一致的增加情況，但空間上增加幅度有所不同，以北區與南區增加幅度最大，而中區增加幅度則為次大。(3)上述比對分析係基於各區之豐枯增減幅度，若需瞭解氣候變遷影響下豐枯總量之定量衝擊，可依據基期豐枯總量搭配上上述增減幅度進行計算。

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境

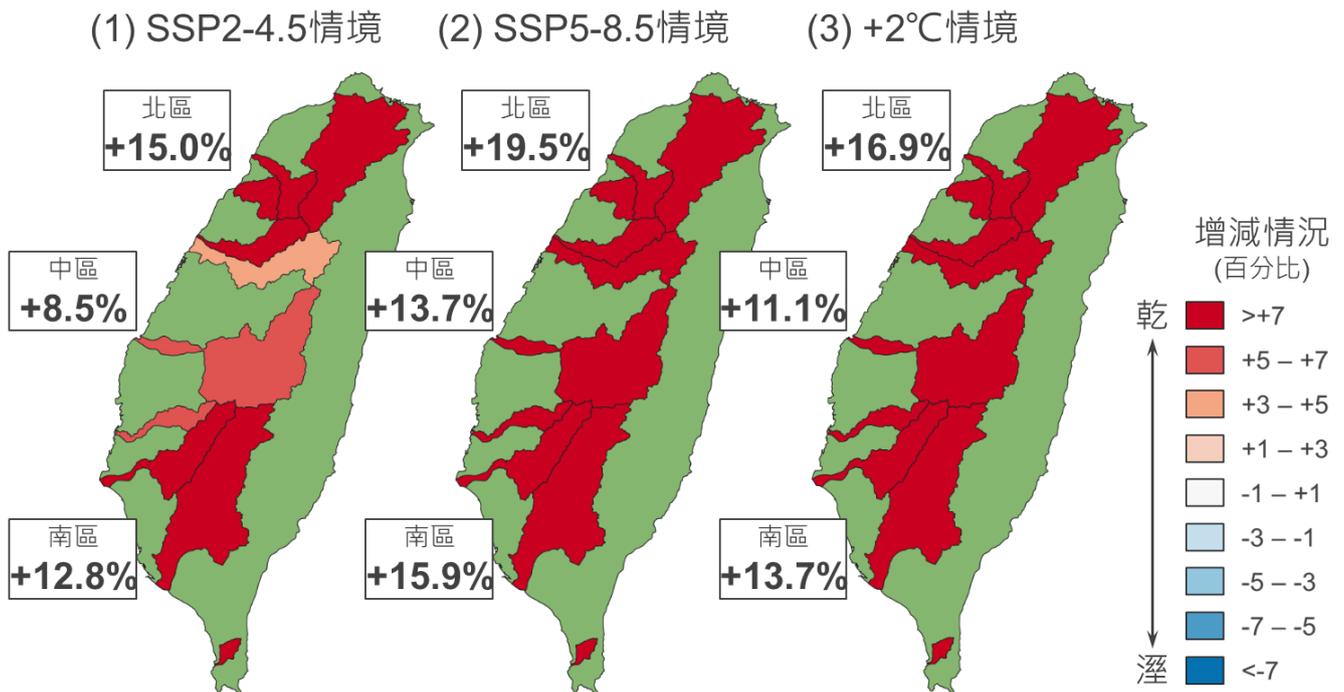


摘圖-1 未來中期不同氣候變遷情境下豐水期雨量增減情況

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境



摘圖-2 未來中期不同氣候變遷情境下枯水期雨量增減情況



摘圖-3 未來中期不同氣候變遷情境下連續不降雨日數增減情況

二、臺灣 10 條主要水系之降雨-逕流模式

臺灣 10 條主要水系重要控制點之修正型 HBV 模式評鑑指標數值如摘表-1 所示。以 5 處代表集水區為例，降雨-逕流模擬效能分析結果顯示：翡翠水庫集水區之體積比約為 0.83、均方根誤差約為 10.04 mm/day 以及相關係數約為 0.89；石門水庫集水區之體積比約為 1.09、均方根誤差約為 7.91 mm/day 以及相關係數約為 0.86；士林堰集水區之體積比約為 1.07、均方根誤差約為 8.14 mm/day 以及相關係數約為 0.77；德基水庫集水區之體積比約為 1.07、均方根誤差約為 4.64 mm/day 以及相關係數約為 0.83；而曾文水庫集水區之體積比約為 0.88、均方根誤差約為 10.55 mm/day 以及相關係數約為 0.92。整體而言，修正型 HBV 模式於淡水河等 10 條水系重要控制點之模擬表現良好，其體積比平均值約為 0.95、均方根誤差平均值約為 9.46 mm/day 以及相關係數平均值約為 0.81。

摘表-1 淡水河等 10 條水系重要控制點之評鑑指標數值

編號	控制點	體積比 (-)	相關係數 (-)	均方根 誤差 (mm/day)	編號	控制點	體積比 (-)	相關係數 (-)	均方根 誤差 (mm/day)
CP01	五堵	0.80	0.84	11.61	CP18	雪山坑	0.98	0.57	10.13
CP02	介壽橋(1)	0.83	0.86	12.59	CP19	鯉魚潭水庫	0.66	0.81	9.60
CP03	寶橋	0.93	0.91	7.52	CP20	德基水庫	1.07	0.83	4.64
CP04	翡翠水庫	0.83	0.89	10.04	CP21	霧社水庫	0.89	0.86	8.93
CP05	橫溪	0.84	0.77	10.42	CP22	桶頭攔河堰	0.89	0.91	8.54
CP06	三峽堰	1.02	0.83	8.55	CP23	玉峰橋	1.04	0.88	4.88
CP07	石門水庫	1.09	0.86	7.91	CP24	內茅埔	0.99	0.84	6.06
CP08	霞雲	1.08	0.78	9.67	CP25	栗栖壩	0.95	0.78	5.52
CP09	稜角	0.87	0.72	8.50	CP27	觸口	1.09	0.81	12.27
CP10	玉峰(馬利哥灣)	1.03	0.83	6.83	CP28	曾文水庫	0.88	0.92	10.55
CP11	秀巒	1.10	0.74	11.03	CP30	玉田	0.82	0.78	15.80
CP12	內灣	1.05	0.64	13.39	CP31	左鎮	0.94	0.82	12.08
CP13	上坪	1.08	0.72	11.46	CP32	南化水庫	0.91	0.85	11.97
CP15	永興橋	1.05	0.83	8.40	CP33	甲仙攔河堰	0.91	0.83	11.03
CP16	象鼻(3)	1.03	0.71	7.36	CP34	高屏溪攔河堰	0.78	0.90	10.06
CP17	士林攔河堰	1.07	0.77	8.14	CP35	牡丹水庫	0.82	0.90	7.31

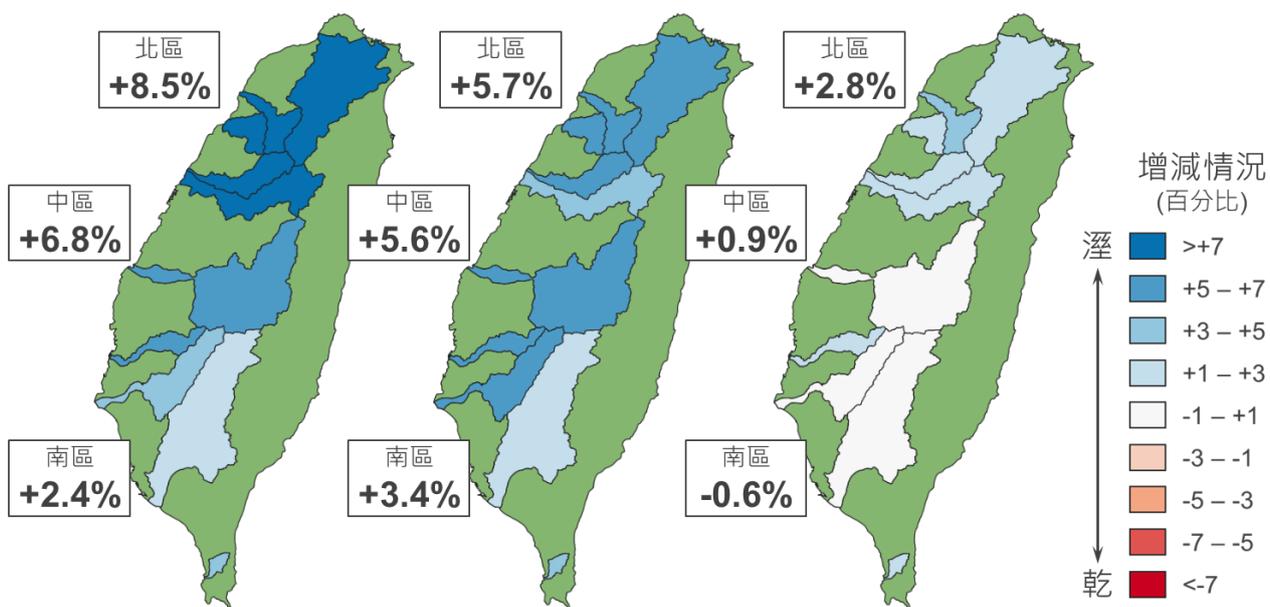
三、臺灣 10 條主要水系之情境流量分析

摘圖-4 至摘圖-6 為臺灣 10 條主要水系於未來中期不同氣候變遷情境下豐水期流量總體積、枯水期流量總體積以及低流量日數(流量低於基期 Q85 之日數)相較於基期流量資料之空間變化情況。分析結果顯示：

(1)就整體增減情況而言，未來豐水期流量總體積相較於基期流量資料多數有增加情況(僅固定增溫 2°C 條件下南區豐水期流量總體積略微減少)、未來枯水期流量多數有減少情況(僅未來中期 SSP2-4.5 情境下中區與南區枯水期流量總體積略微增加)以及未來低流量日數則多數有增加情況。

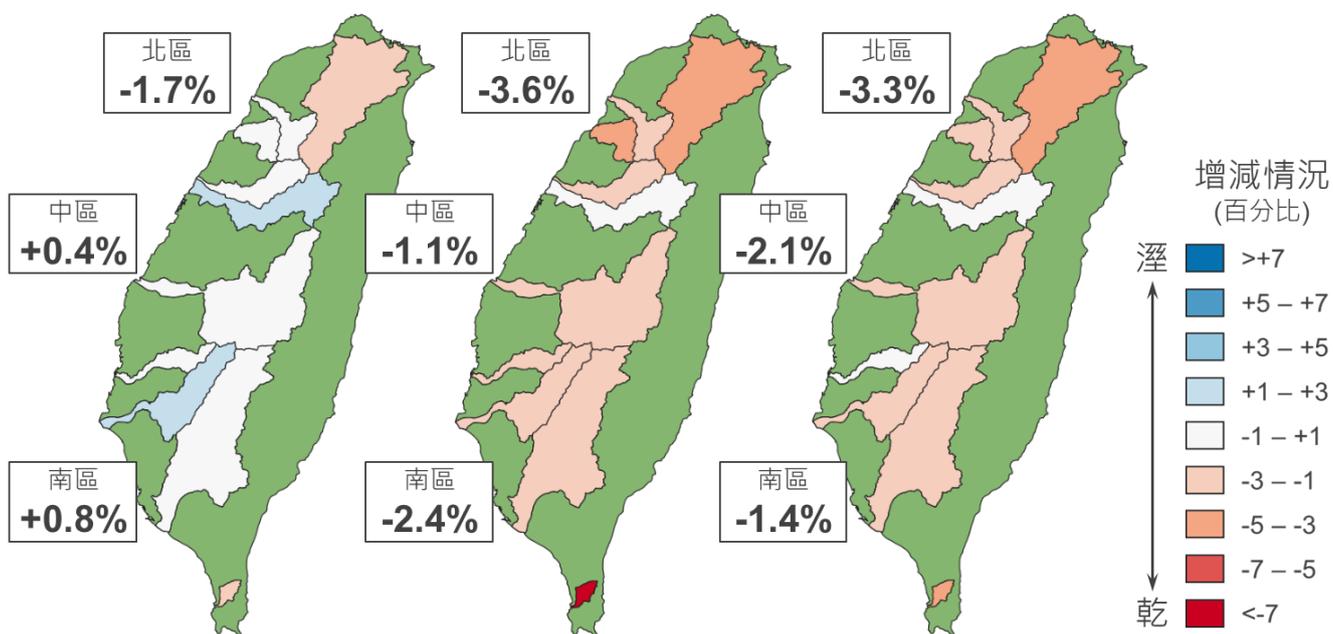
(2)就空間上變化情況而言，未來豐水期流量總體積相較於基期流量資料多數有增加情況，但空間上增加幅度有所不同，以北區增加幅度較大，而南區增加幅度則較小；未來枯水期流量總體積多數有減少情況，但空間上增加幅度有所不同，以北區減少幅度最大；未來低流量日數多數有增加情況，其空間上增加幅度有所不同，以南區增加幅度最大，而北區與中區增加幅度則為次大。(3)上述比對分析係基於各區之豐枯增減幅度，若需瞭解氣候變遷影響下豐枯總量之定量衝擊，可依據基期豐枯總量搭配上上述增減幅度進行計算。

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境

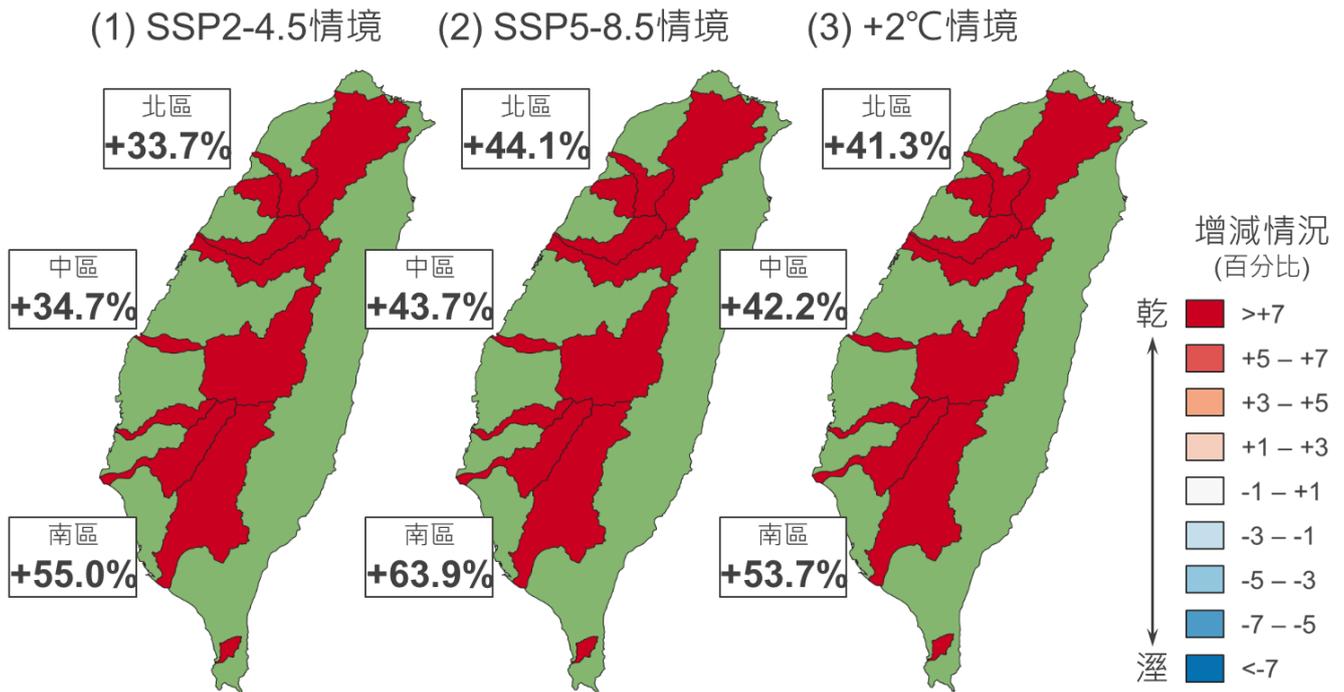


摘圖-4 未來中期不同氣候變遷情境下豐水期流量總體積增減情況

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境



摘圖-5 未來中期不同氣候變遷情境下枯水期流量總體積增減情況

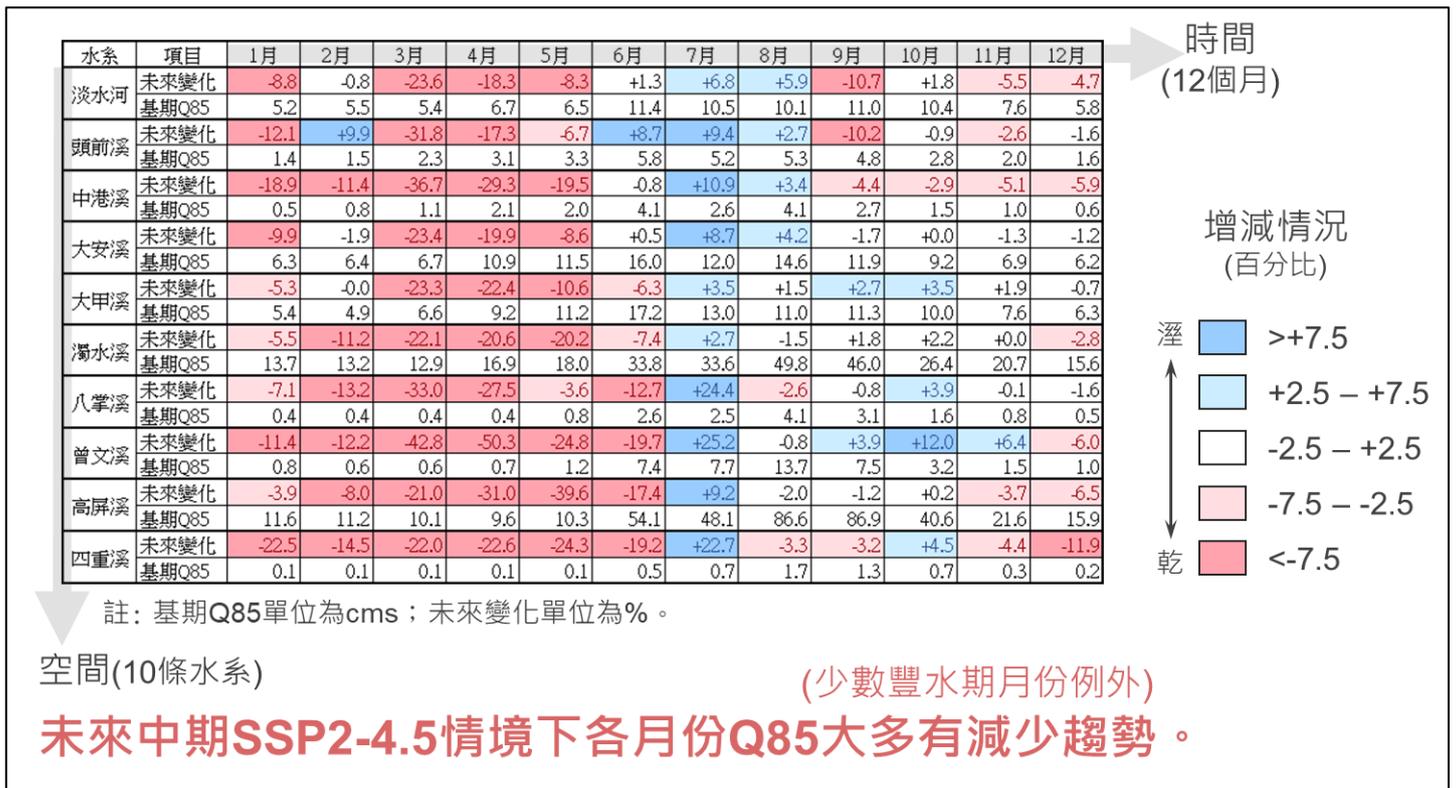


摘圖-6 未來中期不同氣候變遷情境下低流量日數增減情況

四、臺灣 10 條主要水系之可利用水量分析

針對淡水河等 10 條水系內重要控制點之可利用水量分析，其評估上主要係基於各月份流量超越機率曲線，首先從各月份基期與未來情境流量超越機率曲線中挑選出 Q85 流量，再將各月份基期與未來情境 Q85 流量資訊繪製成圖，即可瞭解氣候變遷對於可利用水量造成之衝擊。其中，可利用水量(或者超越機率流量)為採用不同超越機率流量所對應而得之水量，其係指特定河川之流量，與水權法規中之剩餘水量定義不同，故毋須扣除下游已申請之水權量。摘圖-7 至摘圖-9 為不同未來情境下臺灣 10 條主要水系之可利用水量分析成果，為方便釐清氣候變遷可能導致之衝擊程度，以相較於基期情境增減百分比之形式呈形不同未來情境下可利用水量之變化，並配合顏色深淺反映出衝擊程度之高低(衝擊較大顏色則較深)。以摘圖-7 為例，其為未來中期 SSP2-4.5 情境下可利用水量(各月份流量 Q85)之變化情況，分析結果在時間上涵蓋 1 至 12 月，可同時反映出氣候變遷與豐枯水期對於可利用水量所造成影響，而在空間上則由北至南同時呈現臺灣 10 條主要水系之可利用水量，以利檢視可利用水量變化之空間特性。分析結果顯示：整體而言，無論於何

種氣候變遷情境下，臺灣 10 條主要水系之可利用水量(各月份流量 Q85)大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。此外，進一步比對情境流量分析結果(摘圖-4 至摘圖-5)與可利用水量分析結果發現：在氣候變遷影響下，豐枯水期流量總體積具有豐愈豐、枯愈枯之特性，而可利用水量(各月份流量 Q85)卻大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。其顯示氣候變遷將導致豐水期流量變化更加劇烈，使得水資源經營管理更加不易。

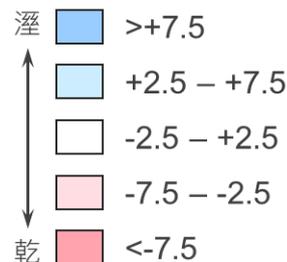


摘圖-7 未來中期 SSP2-4.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

水系	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
淡水河	未來變化	-13.1	1.5	-30.5	-30.5	-13.2	-1.5	-1.4	4.4	-2.7	-0.1	-7.3	-12.7
	基期Q85	5.2	5.5	5.4	6.7	6.5	11.4	10.5	10.1	11.0	10.4	7.6	5.8
頭前溪	未來變化	-20.0	15.8	-43.5	-35.3	-4.1	7.3	-1.4	4.2	0.0	0.3	-2.6	-10.6
	基期Q85	1.4	1.5	2.3	3.1	3.3	5.8	5.2	5.3	4.8	2.8	2.0	1.6
中港溪	未來變化	-24.1	-10.7	-36.3	-43.8	-29.4	-5.9	0.6	-0.4	-2.9	-3.0	-2.1	-8.5
	基期Q85	0.5	0.8	1.1	2.1	2.0	4.1	2.6	4.1	2.7	1.5	1.0	0.6
大安溪	未來變化	-10.8	0.4	-30.3	-33.7	-13.5	-2.6	4.9	3.4	2.2	0.1	-0.6	-4.8
	基期Q85	6.3	6.4	6.7	10.9	11.5	16.0	12.0	14.6	11.9	9.2	6.9	6.2
大甲溪	未來變化	-5.7	1.3	-28.0	-35.7	-18.0	-9.4	-0.9	0.7	0.2	-0.2	1.8	-2.5
	基期Q85	5.4	4.9	6.6	9.2	11.2	17.2	13.0	11.0	11.3	10.0	7.6	6.3
濁水溪	未來變化	-7.5	-8.8	-21.8	-30.4	-24.8	-13.0	-6.3	-5.3	0.5	0.3	-3.2	-6.9
	基期Q85	13.7	13.2	12.9	16.9	18.0	33.8	33.6	49.8	46.0	26.4	20.7	15.6
八掌溪	未來變化	-7.2	-10.6	-42.5	-51.6	-10.4	-18.2	6.2	4.3	7.2	6.0	-2.3	-4.7
	基期Q85	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	2.6	2.5	4.1	3.1	1.6	0.8	0.5
曾文溪	未來變化	-12.3	-14.3	-43.8	-68.0	-36.3	-19.5	0.5	-5.3	14.8	18.6	5.7	-8.3
	基期Q85	0.8	0.6	0.6	0.7	1.2	7.4	7.7	13.7	7.5	3.2	1.5	1.0
高屏溪	未來變化	-5.4	-7.6	-23.6	-44.9	-53.2	-23.4	-5.0	-6.4	0.5	2.6	-4.0	-8.4
	基期Q85	11.6	11.2	10.1	9.6	10.3	54.1	48.1	86.6	86.9	40.6	21.6	15.9
四重溪	未來變化	-34.6	-14.7	-23.1	-34.2	-36.6	-15.8	8.7	-5.7	8.5	5.4	-10.7	-17.3
	基期Q85	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.7	1.7	1.3	0.7	0.3	0.2

時間
(12個月)

增減情況
(百分比)



註：基期Q85單位為cms；未來變化單位為%。

空間(10條水系)

(少數豐水期月份例外)

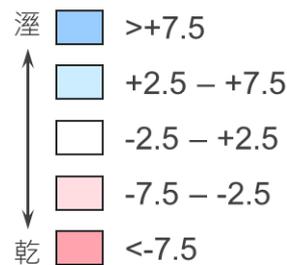
未來中期SSP5-8.5情境下各月份Q85大多有減少趨勢。

摘圖-8 未來中期 SSP5-8.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

水系	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
淡水河	未來變化	-8.7	-0.8	-25.2	-24.6	-14.3	-10.4	-2.8	-2.1	-4.5	0.5	-6.7	-7.0
	基期Q85	5.2	5.5	5.4	6.7	6.5	11.4	10.5	10.1	11.0	10.4	7.6	5.8
頭前溪	未來變化	-12.9	12.3	-36.7	-27.1	-9.3	-3.7	0.3	-0.4	-2.0	-1.7	-3.7	-3.7
	基期Q85	1.4	1.5	2.3	3.1	3.3	5.8	5.2	5.3	4.8	2.8	2.0	1.6
中港溪	未來變化	-15.1	-9.4	-26.7	-35.4	-25.9	-11.5	-3.3	-4.8	-4.4	-4.7	-6.9	-8.3
	基期Q85	0.5	0.8	1.1	2.1	2.0	4.1	2.6	4.1	2.7	1.5	1.0	0.6
大安溪	未來變化	-7.2	-1.5	-24.0	-26.2	-13.2	-14.0	-2.1	-3.0	0.1	-1.0	-2.5	-3.5
	基期Q85	6.3	6.4	6.7	10.9	11.5	16.0	12.0	14.6	11.9	9.2	6.9	6.2
大甲溪	未來變化	-3.3	2.5	-22.7	-26.5	-15.0	-13.8	-4.6	-6.2	-0.3	0.1	0.3	-3.1
	基期Q85	5.4	4.9	6.6	9.2	11.2	17.2	13.0	11.0	11.3	10.0	7.6	6.3
濁水溪	未來變化	-5.6	-8.1	-16.9	-22.0	-22.0	-14.5	-6.6	-5.8	0.0	-0.9	-4.0	-6.0
	基期Q85	13.7	13.2	12.9	16.9	18.0	33.8	33.6	49.8	46.0	26.4	20.7	15.6
八掌溪	未來變化	-2.6	-6.7	-28.8	-36.7	-7.1	-24.9	7.0	-6.3	2.7	2.5	-2.7	-2.9
	基期Q85	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	2.6	2.5	4.1	3.1	1.6	0.8	0.5
曾文溪	未來變化	-10.2	-8.5	-31.3	-52.0	-19.7	-26.8	4.2	-7.8	5.8	5.6	-5.0	-13.0
	基期Q85	0.8	0.6	0.6	0.7	1.2	7.4	7.7	13.7	7.5	3.2	1.5	1.0
高屏溪	未來變化	-3.3	-6.3	-16.7	-31.7	-39.4	-22.8	-2.7	-6.5	-0.6	-0.7	-5.8	-6.7
	基期Q85	11.6	11.2	10.1	9.6	10.3	54.1	48.1	86.6	86.9	40.6	21.6	15.9
四重溪	未來變化	-24.3	-12.7	-18.9	-24.8	-25.5	-30.1	5.1	4.9	1.9	4.4	-8.0	-11.4
	基期Q85	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.7	1.7	1.3	0.7	0.3	0.2

時間
(12個月)

增減情況
(百分比)



註：基期Q85單位為cms；未來變化單位為%。

空間(10條水系)

(少數豐水期月份例外)

固定增溫2°C條件下各月份Q85大多有減少趨勢。

摘圖-9 固定增溫 2°C 條件下各月份流量 Q85 之增減情況

五、氣候變遷下流量衝擊總結

為瞭解氣候變遷對於臺灣整體流量特性之衝擊，綜合臺灣 10 條主要水系內重要控制點之流量衝擊資訊，提出氣候變遷影響下未來可能之流量特性總結(摘圖-10)。於未來中期(2041 至 2060 年)SSP 氣候變遷情境下，SSP2-4.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+5.7%、0.0%、+41.9%以及+61.1%，而 SSP5-8.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+4.9%、-2.2%、+51.2%以及+77.4%。就整體流量特性而言，未來中期兩種 SSP 氣候變遷情境之中，SSP5-8.5 情境亦屬於相對惡劣(較乾)之情境，亦可能導致水資源系統面臨較大之供需風險；於固定增溫 2°C 條件下，情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+0.9%、-2.2%、+46.3%以及+78.5%，雖然未來豐枯流量整體特性為豐愈豐、枯愈枯，但在低流量特性之時間與水量上則皆有增加(更乾)趨勢，其顯示出未來流量可能變動範圍將更大，增加水資源經營管理難度。

		未來短期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		未來中期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		固定增溫 +2°C
豐水期 流量總體積		+3.1%	-0.6%	+5.7%	+4.9%	+0.9%
枯水期 流量總體積		0.0%	-1.5% 乾	0.0%	-2.2% 乾	-2.2%
低流量特性	未達基期 Q85之時間	+37.6%	+45.0% 乾	+41.9%	+51.2% 乾	+46.3%
	未達基期 Q85之水量	+62.0%	+74.6% 乾	+61.1%	+77.4% 乾	+78.5%

摘圖-10 氣候變遷影響下未來可能之流量特性總結

Abstract

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) releases assessment reports and climate change projections every five to seven years. In the latest IPCC sixth assessment report (AR6), the experiment projections of earth system models are more reliable due to the improvements in model capabilities (e.g., spatial resolution, physical and chemical mechanisms). In order to evaluate the possible impact of climate change on rainfall and runoff of major basins in Taiwan, a spatial downscaled product of IPCC AR6 climate change projection from the Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform (TCCIP) was adopted. The important findings of this study are given as follows:

1. Scenario rainfall statistics for major basins of Taiwan

Three scenario rainfall statistics including the average total amount during wet seasons, the average total amount during dry seasons, and the maximum consecutive dry days (the days with rainfall below 0.1 mm) were investigated for the medium-term future under two SSPs (i.e., SSP2-4.5 and SSP5-8.5) scenarios and 2-deg warming level scenario as well. Overall, the results show that the wet seasons will receive more rainfall (wetter), the dry seasons will receive less rainfall (drier) and the annual maximum dry spell will prolong under the impact of climate change.

2. Scenario runoff statistics for major basins of Taiwan

Three scenario runoff statistics including the average total amount during wet seasons, the average total amount during dry seasons, and the low flow days (the days where flow is below Q85) were investigated for the medium-term future under two SSPs (i.e., SSP2-4.5 and SSP5-8.5) scenarios and 2-deg warming level scenario as well. Overall, the impact of climate change on scenario runoff is same as scenario rainfall. The results show that

the wet seasons will yield more runoff (wetter), the dry seasons will yield less runoff (drier) and the annual low flow days will get longer under the impact of climate change.

3. Low-flow conditions of scenario runoff

Two low-flow conditions of scenario runoff including the average annual duration and average annual amount of low-flow events (where the low-flow conditions are defined as flow is below baseline Q85) were investigated for the medium-term future under two SSPs (i.e., SSP2-4.5 and SSP5-8.5) scenarios and 2-deg warming level scenario as well. Overall, the results show that the average annual duration of low-flow events will get longer and the average annual amount of low-flow events will enlarge under the impact of climate change.

4. Summary of scenario runoff statistics

In general, for the short to medium term future under two SSPs (i.e., SSP2-4.5 and SSP5-8.5) scenarios and 2-deg warming level scenario as well, the average total amount during wet seasons will increase (wetter) but the average total amount during dry seasons will decrease (drier). However, for the low-flow conditions (duration and amount below baseline Q85), a consistent increase in both duration and amount (i.e., drier in terms of duration and amount) is found among all five climate change scenarios. The results suggest that the variation of scenario runoff will get higher which might cause more difficulties in water resources management and operation.

Keywords: IPCC AR6, scenario runoff, low-flow conditions.

結論與建議

一、結論

- (一)臺灣 10 條主要水系於不同 AR6 氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5、未來中期 SSP5-8.5 以及固定增溫 2°C 條件)下雨量分析結果顯示：(1)就空間上增減情況而言，未來豐水期雨量相較於基期雨量資料在空間上有一致的增加情況、未來枯水期雨量在空間上則大多有減少情況以及未來連續不降雨日數在空間上有一致的增加情況；(2)就臺灣整體平均增減情況而言，未來豐水期雨量增減情況約介於+1.9%至+6.4%間、未來枯水期雨量增減情況約介於-3.3%至-1.2%、未來連續不降雨日數增減情況則約介於+11.7%至+16.0% (表 4-4)。
- (二)就北、中、南區情境雨量分析結果而言，AR6 與 AR5 情境雨量在豐枯變化趨勢上具有一致性，惟兩者於分析過程採用不同氣候變遷資料、期程設定以及模式篩選機制，故造成其增減幅度略有不同。其中，AR6 情境下豐水期雨量增減介於+0.7%至+9.0%之間，而枯水期雨量增減則介於-4.1%至-0.8%之間；AR5 情境下豐水期雨量增減介於+3.0%至+9.0%之間，而枯水期雨量增減則介於-12.0%至-6.0%之間。
- (三)臺灣 10 條主要水系於不同 AR6 氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5、未來中期 SSP5-8.5 以及固定增溫 2°C 條件)下流量分析結果顯示：(1)就空間上增減情況而言，未來豐水期流量總體積相較於基期流量資料在空間上大多有增加情況、未來枯水期流量總體積在空間上則大多有減少情況(未來中期 SSP2-4.5 情境下部分水系呈現增加情況)以及未來低流量日數在空間上有一致的增加情況；(2)就臺灣整體平均增減情況而言，未來豐水期流量總體積增減情況約介於+0.9%至+5.7%間、未來枯水期流量總體積增減情況約介於-2.2%至 0.0%、未來低流量日數增減情況則約介於+41.6%至+51.0% (表 4-7)。

- (四)無論於何種氣候變遷情境下，臺灣 10 條主要水系之可利用水量(各月份流量 Q85)大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。此外，進一步比對情境流量分析與可利用水量分析結果發現：在氣候變遷影響下，豐枯水期流量總體積具有豐愈豐、枯愈枯之特性，而可利用水量(各月份流量 Q85)卻大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。其顯示氣候變遷將導致豐水期流量變化更加劇烈，使得水資源經營管理更加不易。
- (五)無論於何種氣候變遷情境下，臺灣 10 條主要水系之低流量特性在時間與水量上有一致的增加趨勢(更乾)。就未達基期 Q85 之時間而言，衝擊較大之水系為曾文溪與高屏溪，其增加幅度約介於+36.8%至+88.3%間；就未達基期 Q85 之水量而言，衝擊最大之水系為大甲溪，其增加幅度約介於+77.8%至+107.9%間，而衝擊次大之水系則為淡水河、大安溪以及濁水溪，其增加幅度約介於+67.4%至+98.7%間。
- (六)因應氣候變遷可能造成之潛在威脅，建議後續可以針對氣候變遷影響較大之區域(例如：部分情境下中南部出現豐枯皆乾之情況)進行水資源供需影響分析，以瞭解 AR6 氣候變遷情境對於水資源供應造成之衝擊，並據以檢視是否具有足夠調適能量。例如：高屏溪水系未來未達基期 Q85 之水量可能進一步增加 33.7%至 47.9%間，建議因應方式如下：(1)可參考未達 Q85 之時間與水量配合適合規劃工具(例如：乾旱頻率分析)，進行替代水源規劃；(2)提供水權管理單位氣候變遷下水文衝擊資料(例如：流量 Q85 減少)作為參考。
- (七)受到氣候變遷影響，未來季節降雨特性整體而言維持豐愈豐、枯愈枯之特性，以未來中期 SSP2-4.5 情境下石門水庫季節雨量為例，其梅雨季(5 至 6 月)、颱風季(7 至 9 月)以及秋季(10 至 11 月)雨量有增加情況，而春季(2 至 4 月)與冬季(12 月至隔年 1 月)雨量則有減少情況。

二、建議

- (一)藉由 TCCIP 高解析度之降尺度產品得以探討氣候變遷對於臺灣 10 條主要水系上游區域雨量與流量造成之可能衝擊，並瞭解氣候變遷所導致水文衝擊之空間變化，建議未來可以擴大至下游區域，以掌握更加完整之空間上衝擊資訊。
- (二)聯合國氣候變遷專門委員會(簡稱 IPCC)約每 5 至 7 年進行氣候變遷情境推估資料更新，其藉由不斷改良與提升模式能力、空間解析度以及溫室氣體情境設定等，提供品質更佳氣候變遷衝擊資訊。然而，為瞭解新版氣候變遷情境資料對於臺灣集水區水文衝擊，亦需重新投入大量時間與經費，建議未來可發展由下而上(bottom up)¹方法，藉以快速辨識氣候變遷對於水資源系統造成之風險，以聚焦於氣候變遷調適因應。
- (三)因氣候變遷具有高度不確定性(期程、情境、模式、區域)，難以將其資料應用於設計規劃，建議可採風險管理角度進行分析(例如：增加或減少之模式數量)，再以風險管理之安全係數觀念作為呈現。以英國水資源經營管理架構²為例，其架構主要可分為水資源管理計畫(長期水資源供需規劃)、乾旱管理計畫(乾旱期間之抗旱操作計畫)以及緊急計畫(針對極端乾旱所提出之因應框架)，若考慮氣候變遷之高度不確定性可將安全係數觀念導入乾旱管理計畫之中，透過評估增加彈性管理強度(±10%)方式作為因應。

¹由下而上(bottom up)方法係指事先制定多種本土情境資料以辨識關鍵之情境邊界(例如：致災但可調適或者致災且不可調適)，未來再藉由情境資料比對(例如：以 AR6 資料比對已辨識出之情境邊界)即可快速評估不同版本氣候變遷下風險變化。

²英國水資源經營管理架構之詳細介紹內容可參考「游保杉等人，2022 年，淺談臺灣水資源經營管理與策進建議，水資源管理會刊，第 24 卷，第 1 期。」

第一章 前言

一、緣由與目的

聯合國氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)約每 5 至 7 年進行氣候變遷情境推估資料更新，其藉由不斷改良與提升模式能力、空間解析度以及溫室氣體情境設定等，提供品質更佳氣候變遷衝擊資訊。IPCC 近期已公布最新版氣候變遷第六次評估報告(the Sixth Assessment Report, AR6)系列研究報告中第一冊「物理科學依據」(2021 年 8 月)、第二冊「衝擊、調適以及脆弱度」(2022 年 2 月)以及第三冊「減緩氣候變遷」(2022 年 4 月)。而「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP)則配合 IPCC 氣候變遷資料之更新頻率，針對其所發布之最新版資料進行空間降尺度分析，以評估各種氣候變遷情境設定下氣候變遷對於臺灣雨量與溫度之影響。

為瞭解新版氣候變遷情境對臺灣水資源可能造成之影響，需先從水文角度探討氣候變遷對於供水水系水源水量可能之衝擊，進行情境雨量與情境流量分析，以提供未來氣候變遷下水資源經營管理作為參考。因此，採用聯合國政府間氣候變遷專門委員會第六次評估報告(簡稱 IPCC AR6)之氣候變遷情境推估降尺度資料進行分析，藉由國際最新氣候變遷資料蒐集及探討，研選適用之情境，並從水文角度分析其對主要供水水系之流量影響分析，瞭解在氣候變遷情境下各水系降雨及流量之變化，及各超越機率之地面水可利用水量，以作為未來水資源規劃及管理之參據，有助於儘早研提相關因應對策。

二、重要分析項目說明

為從水文角度切入探討氣候變遷下情境雨量與流量特性，導入 IPCC AR6 所採用新版氣候變遷情境資料，研選適合臺灣應用之情境設定，探討氣候變遷對於重要供水水系水源水量之衝擊，以提供未來在水資源規劃與管理上參考，分析流程如圖 1-1 所示，針對重要分析項目說明如下：

氣候變遷IPCC AR6資料及台灣地區可能情境探討

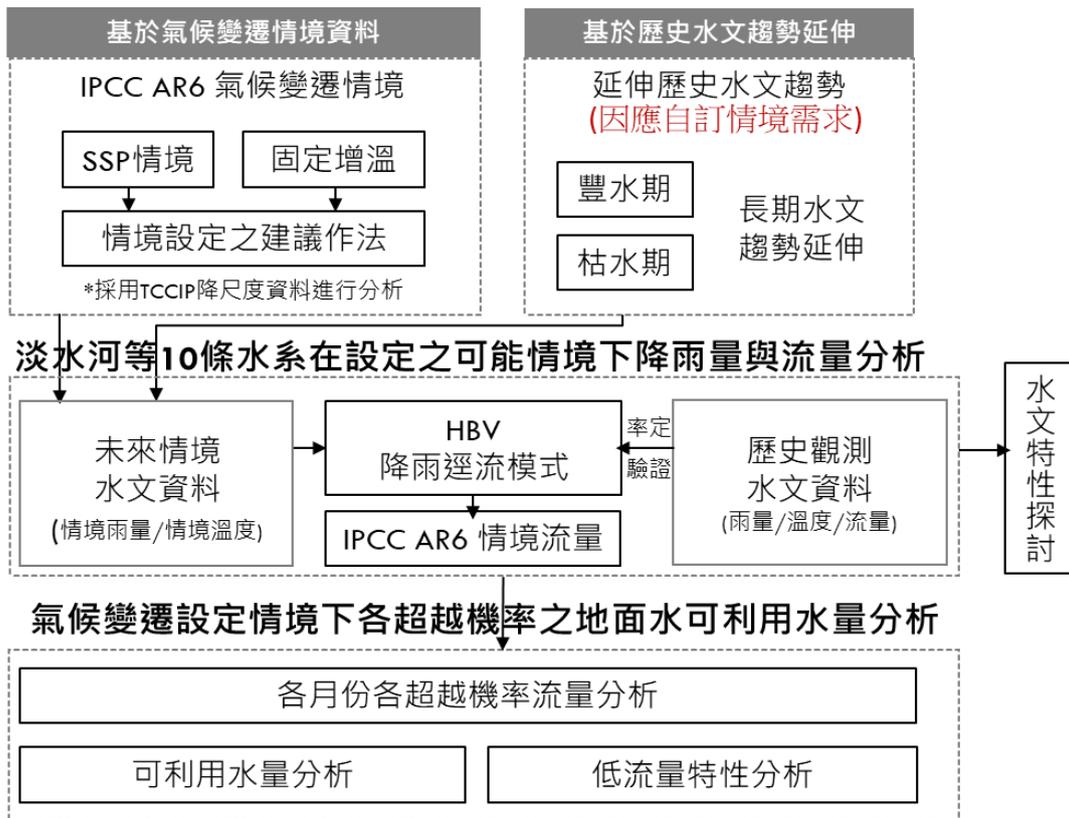


圖 1-1 氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析流程圖

(一) 氣候變遷 IPCC AR6 資料及臺灣地區可能情境探討

回顧整理 IPCC AR6 在氣候變遷情境設定上所採用作法，且針對不同作法進行優劣評估，提出適合臺灣應用之氣候變遷情境設定，並彙整臺灣目前 IPCC AR6 情境資料應用情況。此外，在氣候變遷情境設定上，除採用國際主流作法進行情境雨量探討，亦考量歷史水文趨勢延伸方式作為情境設定依據，藉由導入多元氣候變遷情境設定以瞭解不同作法在未來可能情境雨量造成之差異。

(二) 淡水河等 10 條水系在設定之可能情境下降雨量與流量分析

針對臺灣 10 條主要水系(淡水河、頭前溪、中港溪、大安溪、大甲溪、濁水溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪及四重溪)內重要控制點(水源設施與流量站)蒐集整理歷史水文觀測資料與降雨-逕流模式之率定驗證，配合氣候變遷情境資料評估各個重要控制點於未來可能情境下雨量特性，並藉由降雨-逕流模式轉換為情境流量資料，以探討不同氣候變遷情境下各主要水系之整體流量特性(例如：月

流量、季節流量以及豐枯流量)。

(三)氣候變遷設定情境下各超越機率之地面水可利用水量分析

針對臺灣 10 條主要水系內重要控制點之歷史觀測流量與未來情境流量進行深入探討與比對分析，項目包含：(1)各月份各超越機率流量、(2)可利用水量以及(3)低流量特性，以瞭解氣候變遷對於不同程度流量(例如：高流量、中流量以及低流量情況)所造成之影響。

三、分析範圍

以臺灣 10 條主要水系作為分析範圍，包含：淡水河、頭前溪、中港溪、大安溪、大甲溪、濁水溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪及四重溪，而水系內重要控制點之空間分布圖如圖 1-2 所示。控制點可分為水源設施與流量站兩種類型，水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)。依據上述篩選原則，篩選出 35 處重要控制點(表 1-1)，作為情境雨量與情境流量分析探討之對象。

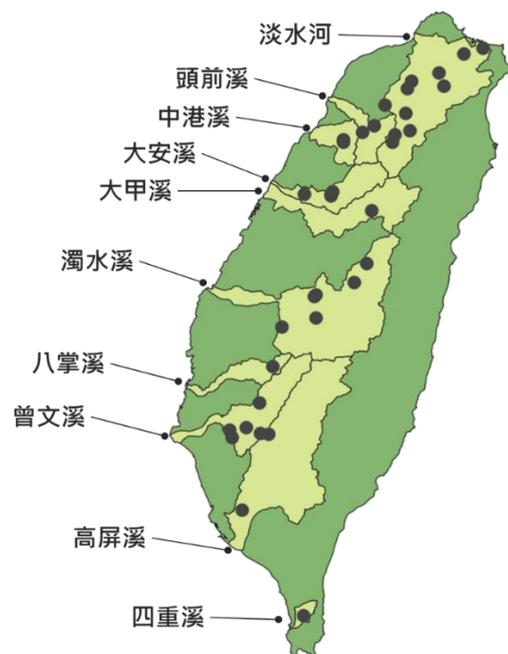


圖 1-2 臺灣 10 條主要水系內重要控制點之空間分布圖

表 1-1 臺灣 10 條主要水系之重要控制點清單

控制點	流域	類型	控制點	控制點	流域	類型	控制點		
CP01	淡水河	流量站	橫溪	CP20	大甲溪	水源設施	德基水庫		
CP02		流量站	介壽橋(1)	CP21	濁水溪	水源設施	霧社水庫		
CP03		流量站	寶橋	CP22		流量站	水里		
CP04		流量站	五堵	CP23		水源設施	桶頭攔河堰		
CP05		水源設施	翡翠水庫	CP24		流量站	玉峰橋		
CP06		水源設施	三峽堰			CP25	流量站	內茅埔	
CP07		水源設施	石門水庫	CP26			水源設施	栗栖壩	
CP08		流量站	秀巒				CP27	流量站	觸口
CP09		流量站	稜角			八掌溪		流量站	曾文水庫
CP10		流量站	霞雲					曾文溪	流量站	左鎮
CP11		流量站	玉峰(馬利哥灣)	CP28		水源設施	南化水庫		
CP12	頭前溪	流量站	內灣	CP29	流量站	玉田			
CP13		流量站	上坪	CP30	水源設施	玉峰堰			
CP14	中港溪	水源設施	田美攔河堰		CP31	流量站	甲仙攔河堰		
CP15		流量站	永興橋	CP32	水源設施	高屏溪攔河堰			
CP16	大安溪	水源設施	鯉魚潭水庫		高屏溪	水源設施	牡丹水庫		
CP17		流量站	象鼻(3)			CP33	水源設施		
CP18		流量站	雪山坑	CP34	水源設施				
CP19		水源設施	士林攔河堰	CP35	四重溪				

註：¹控制點類型可分為水源設施與流量站兩大類。其中，水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)，而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；²控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加。

四、重要項目之定義與概念

(一)IPCC AR6 氣候變遷情境

IPCC AR6 於氣候變遷情境設定上主要採用共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathways, 簡稱 SSP)與固定增溫條件兩種作法，說明如下：

1、共享社會經濟路徑

共享社會經濟路徑(SSP)係假設未來全球社經發展可能採取之路線，並配合世紀末輻射強迫力數值表達暖化程度高低。IPCC AR6 中採用之共享社會經濟路徑主要包含：SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5。

2、固定增溫條件

固定增溫條件係將複雜氣候情境簡化為不同全球平均溫度增減幅度(相較於工業化前時段 1850 至 1900 年)，例如：增溫達到 1.5°C、2°C、3°C 或者 4°C 條件。此種作法有助於決策者聚焦於瞭解不同增溫幅度下衝擊程度(而非聚焦於共享社會經濟路徑 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 或者 SSP5-8.5 之抉擇)，以控制全球平均溫度增幅低於 1.5°C 或 2°C 為目標，掌握正確氣候政策與推動時間點，共同為減緩全球暖化目標而努力。

(二)臺灣季節降雨劃分依據

為能綜合反映臺灣於空間與時間上雨量長期特性以作為氣候變遷衝擊比較之基準，故從「雨量」角度切入，參考陳昭銘(民國 97 年)³季節降雨劃分方式與氣象局季節定義，將臺灣季節降雨分為五種，分別為：春季(2 至 4 月)降雨、梅雨季(5 至 6 月)降雨、颱風季(7 至 9 月)降雨、秋季(10 至 11 月)降雨以及冬季(12 月至隔年 1 月)降雨。

(三)流量超越機率曲線

流量超越機率係以 N 筆流量資料由大至小排序，流量排序編號為 m ，最大流量資料 $m=1$ 。各排序 m 所對應流量之發生超越機率 $p\%$ 以韋伯法(Weibull)公式 $p = m/(N+1)$ 計算。再以流量為縱軸、超越機率為橫軸，可繪製流量超越機率曲線(exceedence probability curve)，建立流量與超越機率之關係。

(四)可利用水量

可利用水量(或者超越機率流量)為採用不同超越機率流量所對應而得之水量，其係指特定河川之流量，與水權法規中之剩餘水量定義不同，故毋須扣除下游已申請之水權量。其中，一般常取 Q85 流量所對應而得之水量來決定水權量(單位：cms)，而 Q50 流量所對應而得之水量則可用於決定臨時水權量(單位：cms)。

³陳昭銘，民國 97 年，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42 期，第 1-9 頁。

第二章 氣候變遷下水文分析之背景資料

回顧整理臺灣近年嚴重乾旱與過去應用 IPCC 氣候變遷第四次評估報告(AR4)與氣候變遷第五次評估報告(AR5)情境資料之作法，包含：氣候變遷情境、統計降尺度資料、氣候變遷期程設定以及全球環流模式篩選等項目。

一、臺灣嚴重乾旱與美國嚴重乾旱回顧

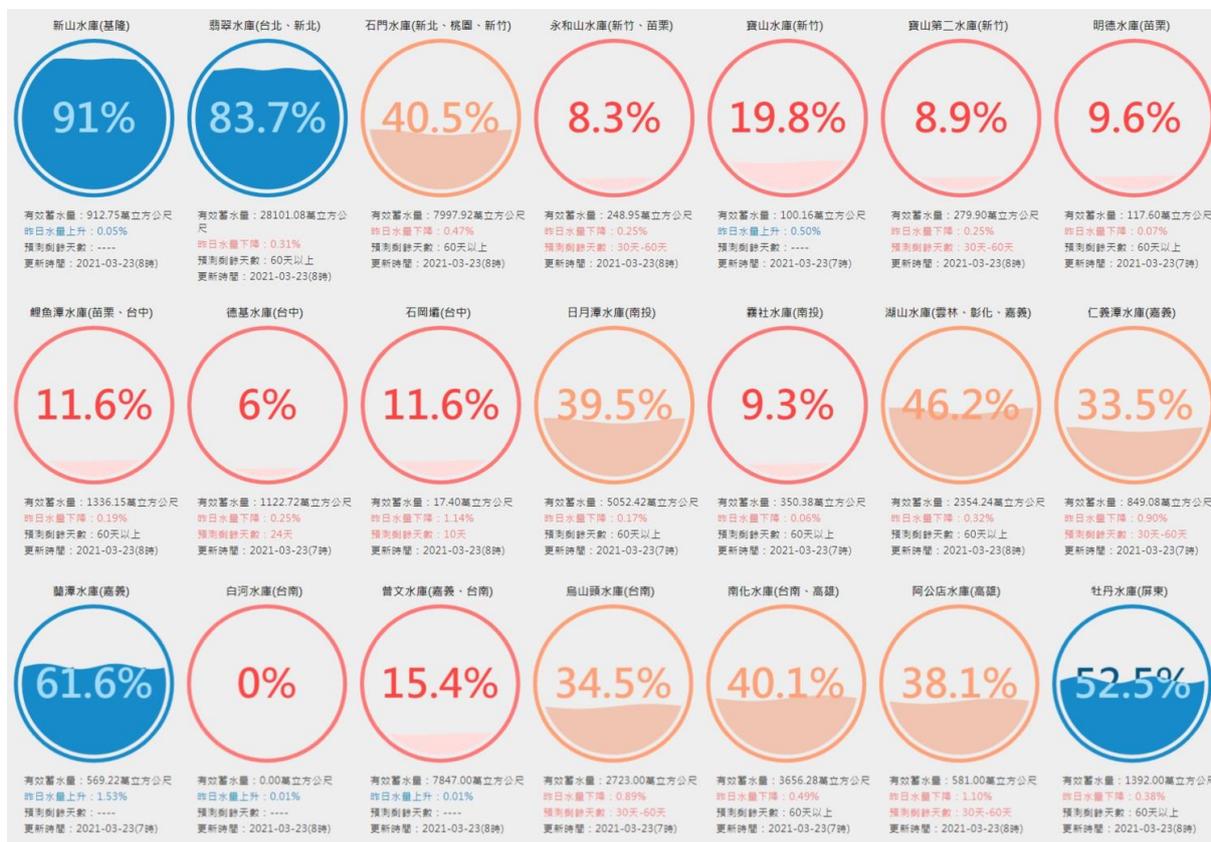
(一)臺灣嚴重乾旱

回顧臺灣近 10 年嚴重乾旱事件，於民國 103 年夏季少雨，且該年 8 月份無颱風侵臺，致使水庫儲水量偏少。政府首先實施夜間減壓供水措施，接著實施減量供水措施，惟兩者效果有限，迫使臺灣北部地區開始分區供水措施，直到隔年(民國 104 年)梅雨季來臨，各地才陸續解除供水限制。民國 106 年秋冬季時雨量稀少，水庫蓄水量偏少，民國 107 年乾旱災害再度造成影響，全臺水情拉起警報，其中曾文水庫蓄水率甚至跌至剩下 2%。

民國 109 年臺灣梅雨季短且無颱風登陸，豐水期降雨量極少，面臨 56 年來最嚴峻乾旱，各地水庫水情多處於吃緊之狀態，政府陸續宣布搶救水情政策，先是各縣市水情燈號調整，接著桃竹苗地區 1.9 萬公頃農地實施全面停灌。臺灣於民國 110 年初，面對大規模的乾旱事件，全臺 21 個水庫中有 17 個水庫蓄水率不足 50%，更有 10 個水庫蓄水率低於 20%(圖 2-1)，導致我國西部各地區進行不同程度的減壓減量供水、停灌、歇業等情況，此乾旱事件為自民國 36 年以來最嚴重之乾旱，被諸多專家學者稱作「百年大旱」。直至 5 月底~6 月底連續幾波的梅雨鋒面、陣雨及西南氣流帶來降雨而緩解旱象。

乾旱影響期間，國內專家學者、水利機關、民間團體同樣針對水資源相關議題提出諸多的討論與優化方向，例如短期的因應：透過減壓減量供水、停灌，以及一系列的水資源調度，並呼籲民眾自主節水，延長水庫之供水時程。中長期的因應：針對耗水費的開徵、水價的調整、新水源的開發、水資源的有效再利用、採用近自然解

決方案強化環境的蓄水與保水能力，以及民眾對於珍惜水資源意識的宣導與教育，等議題廣泛進行討論，並正視氣候變化下，臺灣未來將面臨長期降水減低的乾旱挑戰。



資料來源：臺灣水庫即時水情

圖 2-1 民國 110 年 3 月 23 日全臺水庫水情

(二)美國嚴重乾旱

1、災況概述

2021 年在美國西部地區而言，是極端的一年。截至 12 月初美國西部大約 80% 的地區仍處於美國乾旱監測機構分類的「極端乾旱」狀態；近一半仍符合「罕見乾旱」狀態。極端乾旱導致部分社區缺水、田地休耕，加州的水庫蓄水量下降到平均水平的 60%，直至 12 月 28 日加州才因一系列的風暴所帶來之降雨及降雪影響，使大部分地區才脫離「極端乾旱」狀態(圖 2-2)，約從全州的 80% 降至 34%，而罕見乾旱狀況之地區則由全州的 23% 降至 1% 以下。

回溯至 2021 年 6 月中旬，美加西岸屢次出現破紀錄的高溫，科學家稱為「千年一遇」的極端事件，估計影響超過 4000 萬人。根據 CNN 報導指出，與去年同時期相比，今年全美乾旱面積幾乎是去年的兩倍。至 7 月 15 日(圖 2-3)，全美幾乎近半地區都正經歷乾旱，美國西岸則是破紀錄有超過 9 成地區籠罩在乾旱陰霾下，其中 60% 的地區達到最嚴重的「極端」(D3)到「罕見」(D4)等級(美國乾旱分級表詳表 2-1)。加州、奧勒岡州、內華達州、猶他州、愛達荷州、北達科他州等 6 州，處於完全乾旱狀態。

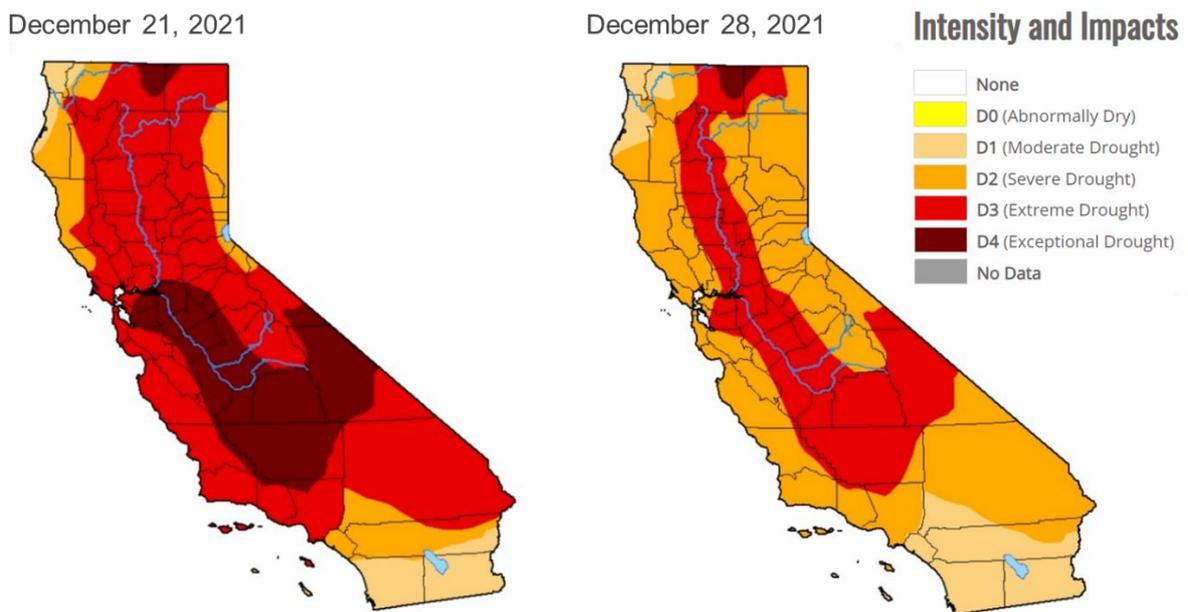
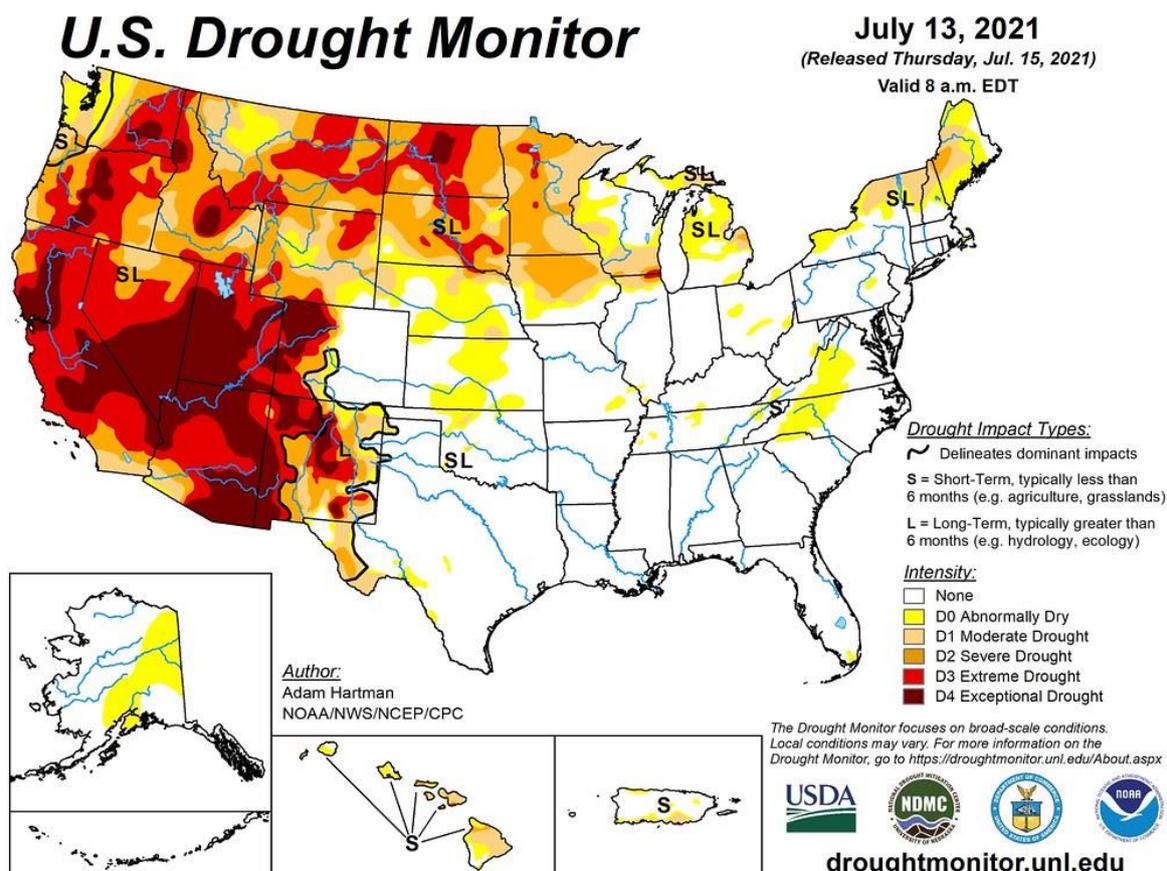


圖 2-2 2021 年 12 月 21 日至 28 日美國加州乾旱改善狀況

表 2-1 美國乾旱分級表

乾旱分級	描述	可能影響
D0	異常乾燥 (Abnormally dry)	<ul style="list-style-type: none"> • 短期乾燥使得作物、牧草生長減緩 • 仍有缺水情形 • 牧草與作物尚未完全恢復生長
D1	中度乾旱 (Moderate drought)	<ul style="list-style-type: none"> • 損害作物與牧草 • 溪流、水庫或水井水位降低，正在或即將發生缺水問題 • 必須實行自主限水
D2	劇烈乾旱 (Severe drought)	<ul style="list-style-type: none"> • 可能造成作物或牧草損失 • 缺水情形普遍 • 強制執行限水
D3	極端乾旱 (Extreme drought)	<ul style="list-style-type: none"> • 較大範圍作物與牧草損失 • 缺水與限水範圍廣大
D4	罕見乾旱 (Exceptional drought)	<ul style="list-style-type: none"> • 異常且範圍廣大的作物、牧草損失 • 水庫、溪流與水井缺水，造成水情緊急狀態

資料來源：US Drought Monitor



資料來源：US Drought Monitor

圖 2-3 2021 年 7 月 13 日美國各地乾旱狀況

美國西南部城市來年的水資源多寡，取決於降雪量以及積雪量，而作為該區域大部分供水來源的高山積雪。例如，洛基山脈積雪融化補充河流與湖泊的水源，佔美國全部淡水水源的 1/4，而靠近科羅拉多州的南洛基山脈，近期降雪量低於往年，意味著到了春天，預計流入科羅拉多河流域與其他附近流域的融雪量將減少。此外，位於加州的內華達山脈，其積雪貢獻加州約 30% 的用水，但近期該州一直在經歷嚴重的「雪旱」。而根據 Siirila-Woodburn et al. (2021) 研究顯示，在全球碳排放量不減的狀況下，到 2050 年內華達山脈與喀斯喀特山脈的積雪量可能降低 45%，同時降雪量將減少甚至不再有雪季。與過去相比(1950 年至 2000 年)，只有 8%~14% 的年份被歸類為「低到無雪」，而在 2050 年到 2099 年之間，此一數字可能達到 94%，亦即罕見的事件變成幾乎每年都會發生的事件。

氣候變暖導致積雪比以前更早、更快的融化，無法保證融雪可持續使用到下個季節。即使可透過山地水庫儲存融雪，然而存量可能也有不足之風險，且許多城市並未對於即將到來的的水資源短缺作好準備，城市中的基礎設施無法應對持續乾旱以及因乾燥而造成越來越多的野火。

2、相關作為

整理美國西部三個城市面對水資源短缺之管理策略以提供臺灣借鏡，詳細說明如下：

(1) 科羅拉多州丹佛市

科羅拉多州只有 20% 的降水落在洛基山脈以東和南普拉特河分水嶺上。剩下的 80% 落在山脈的西側，在科羅拉多河流域的集水區。結果，丹佛不得不將水從西移到東，以供居住在該市及其部分郊區共約 150 萬人使用。丹佛的主要供水公司在 4,000 平方英里的區域內收集雨及雪，平均每年收集約 940 億加侖。由於丹佛一半的飲用水來自洛基山脈西側的科羅拉多河支流(該流域在過去的二十年裡經歷了特大乾旱)，

目前正以水資源多樣化為日益稀缺的未來做進行儲備，並加強水資源保護措施和強化水資源應用效率。

經農業與民生用水戶的評價，丹佛水務公司採用的再節水努力值得效仿與肯定。丹佛水務公司使用該州約 2%的水提供給該州 25%的人口使用，並針對購買設置高效率用水廁所設備與灑水器的居民提供回饋金。同時，在夏季草坪的澆水實施限制措施，並參與環境保護局的 WaterSmart 計畫。此外，未來 10 年將投資 26 億美元升級基礎設施以增加儲水量。目前丹佛市最大的水務項目，為擴建博爾德縣以西的 Gross Reservoir，將針對 Gross Dam 提高 131 英尺，使其後方的水庫大小增加三倍，估計耗資 4.64 億美元，惟該項擴展計畫受到鄰近博爾德縣與環保人士的反對。此一爭議已於 2021 年 11 月得到解決：丹佛水務公司同意減輕溫室氣體排放，並針對提高水庫大壩而造成的環境破壞，向博爾德縣支付 1,250 萬美元。

(2) 亞利桑那州鳳凰城

鳳凰城位處炎熱、乾燥的沙漠中心，且在 2010 年至 2020 年間經歷了美國人口的最大增長。鳳凰城水務公司負責為 540 平方英里的約 150 萬用戶提供供水服務。面對氣候變化的影響，鳳凰城於 2021 年 10 月，投資於水管、水資源處理場、抽水設備、水庫以及水井的修復與更換以提供城市的飲用水。此外，亦規劃投資於新的基礎設施：規劃 66 英寸的「乾旱管線」，由鳳凰城南部的 Salt River 以及 Verde River 往北部針對受科羅拉多州水資源短缺影響的地區進行供水。

(3)猶他州聖喬治

早在 2020 年秋天，乾早已逐漸影響猶他州，2021 年 3 月時，猶他州約 90%的地區已被列為「極端乾旱」狀態，猶他州州長 Spencer Cox 宣布進入緊急狀態，呼籲該州所有用水戶減少用水，並嚴格減少用水量。

該州州長表示，超過 70%的市政用水以及工業用水都被使用於戶外景觀的美化，認為該州與各城市應對此採用更積極的節水策略。其中包括 Flip Your Strip 與 Localscapes Rewards 等兩項節水之激勵計畫。Flip Your Strip 係提供每平方英尺 1 或 1.25 美元之獎勵金，給予自願移除自家草坪並以節水植物及滴灌系統(drip irrigation system)取代之用戶，估計每年可節省約 5000~8000 加侖之用水。Localscapes 則係為居民改進景觀設計，並根據地塊大小與節水情況分配獎勵金。

此外，由於猶他州大部分的水都用於農業，故該州透過水資源優化計畫(Water Optimization Program)：促進水資源優化，減少消耗性用水，並為農業用水者提供更大的營運靈活性；促進水資源量化，顯示準確、實時的引水量測值，以展示確切的節水量，據以針對滿足水資源優化標準的用戶給予補助金。該項計畫為猶他州節省了 91 億加侖的水量。

針對各州面對乾旱影響時所採用之水資源管理策略，除透過基礎建設的強化提升水資源的貯集量，並加強水資源的調度能力外，透過全民共同積極節水，並引入水資源使用的優化技術，提升水資源的使用效率，亦為渡過極端乾旱影響重要之一環。

二、臺灣過去氣候變遷情境設定相關文獻回顧

參考「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估」(經濟部水利署，民國 105 至 106 年)回顧整理臺灣過去應用 IPCC 氣候變遷第四次評估報告(AR4)與氣候變遷第五次評估報告(AR5)情境資料之作法，包含：氣

候變遷情境、統計降尺度資料、氣候變遷期程設定以及全球環流模式篩選等項目，針對各項內容說明如下：

(一)氣候變遷情境

1、IPCC AR4 情境

IPCC 於 2007 年發布 AR4，並評估各種溫室氣體排放情境下氣候變遷對於雨量與溫度等變量之影響。其溫室氣體排放情境主要由 IPCC 排放情境特別報告(IPCC Special Report on Emissions Scenarios, SRES)所製定，藉由預測未來可能之經濟、人口、工業以及環境之發展趨勢，提出可能的溫室氣體排放情境，SRES 訂立四個情境來闡述未來不同發展可能導致之溫室氣體排放情境，假設未來可能致力於經濟發展，或是朝永續發展利用目標等可能情形，並考慮全球性或區域性不同發展對氣候所造成之影響，其主要分成 A1、A2、B1 以及 B2，共計四大項情境。針對各情境之詳細說明請參考附錄一。

2、IPCC AR5 情境

IPCC 於 2014 年公布 AR5，其係以代表濃度路徑(Representative Concentration Pathways, RCP)重新定義四組未來變遷情境，其情境分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5。AR5 採用之基期與未來期程(近未來)分別為 1986 至 2005 年與 2021 至 2040 年。以輻射強迫力在 2100 年(世紀末)與 1750 年之間的差異量當作指標性數值加以區分。以 RCP2.6 情境為例，2.6 意味著每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年相較於 1750 年會增加 2.6 瓦。針對各情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5)之詳細說明請參考附錄一。

(二)臺灣統計降尺度資料說明

地球系統模式(earth system model, ESM)或者全球環流模式(general circulation model, GCM)⁴皆係評估氣候變遷對於水文因子衝擊的重要工具，其藉由設定不同溫室氣體排放情況，可模擬出未來情境底下大氣與海洋之狀態。然而，ESM 或者 GCM 之空間解析度往往高達數百公里，其網格遠大於臺灣一般集水區之空間尺度，推估結果僅能呈現大範圍之平均，而無法捕捉集水區尺度的氣候特性。為評估氣候變遷對於臺灣各地區集水區之水文衝擊，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP)結合行政法人國家災害防救科技中心、中央氣象局、中央研究院環境變遷研究中心以及國內氣候變遷研究學者，進行臺灣區域氣候變遷分析與未來推估、降尺度技術發展以及極端氣候變異與災害衝擊評估等工作。針對 TCCIP 提供之 IPCC AR4 及 IPCC AR5 降尺度產品說明請參考附錄二「臺灣統計降尺度產品介紹」。

(三)氣候變遷期程設定

在氣候變遷期程設定之部分，臺灣於 IPCC AR4 期程訂定上係採用 1980 至 1999 年作為基期時段，而 2020 至 2039 年作為未來時段；臺灣於 IPCC AR5 期程訂定上則參考「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，民國 109 年)於民國 109 年 5 月 26 日召開第 1 次工作會議，其會議決議(經水綜字第 10914036340 號)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民國 125 年(2036 年)，以目前時間點往後推移 10 年左右作為起始年，故採用 2031 至 2050 年作為未來時段，而基期時段則採用 1986 至 2005 年。

⁴全球環流模式主要僅針對地球大氣、海洋以及冰雪圈之物理機制進行模擬，而地球系統模式除上述物理機制之外，並進一步將陸域與海域之生物地球化學循環納入考量，屬於更加進階且複雜之物理型模式。

此外，配合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⁵：(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」(Verner 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)。上述國際文獻皆採用相同之氣候變遷期程設定，基期時段為 1986 至 2005 年，而未來時段則為 2031 至 2050 年。

(四) 模式選擇

一般模式選擇經常基於系集概念，其藉由選擇全部或部分全球環流模式作為系集，再基於系集推估結果以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：以較適合計畫區域之全球環流模式進行分析。針對上述兩種作法(1)選擇全部模式作為系集與(2)選擇部分模式作為系集分別說明如下：

1、選擇全部模式作為系集

為能盡量涵蓋氣候變遷資料之高度不確定性，可採用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，以進行後續氣候變遷下可能降雨情境研擬。

⁵採用與臺灣於 IPCC AR5 相同氣候變遷期程設定之國際文獻清單：(1) IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Pörtner et al.); (2) Ministry for the Environment 2018. Climate Change Projections for New Zealand: Atmosphere Projections Based on Simulations from the IPCC Fifth Assessment; (3) Verner et al. (2018) Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector. World Bank Group; (4) Bush, E. and Lemmen, D.S., editors (2019): Canada's Changing Climate Report; Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p.

2、選擇部分模式作為系集

因不同計畫在需求與特性上可能有所差異，並非所有計畫皆能涵蓋氣候變遷全部之不確定性，一般常參考國際上(Ahmed et al., 2019; Khan et al., 2018; Ahmaadalipour et al., 2017; Hussain et al., 2018)全球環流模式挑選採用之作法(基於模式歷史表現進行模式挑選)，挑選較適合應用於臺灣水資源分析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 針對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(表 2-2)，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。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，而為反映氣候變遷之高度不確定性，故選擇 10 個模式進行後續衝擊分析。

(3) 豐枯特性

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。

表 2-2 全球環流模式於基期模擬之綜合表現排序

模式名稱	產製單位	解析度	排序
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	192×145	13
ACCESS1-3		192×145	30
bcc-csm1-1	BCC	128×64	22
bcc-csm1-1m		320×160	09
BNU-ESM	BNU	128×64	08
CanESM2	CCCMA	128×64	01
CCSM4	NCAR	288×192	18
CESM1-BGC	NCAR	288×192	27
CESM1-CAM5		288×192	19
CMCC-CESM	CMCC	96×48	26
CMCC-CM		480×240	03
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	256×128	15
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	192×96	23
EC-EARTH	ICHEC	320×160	29
FGOALS-g2	LASG-CESS	128×60	33
GFDL-CM3	NOAA-GFDL	144×90	24
GFDL-ESM2G		144×90	11
GFDL-ESM2M		144×90	20
HadGEM2-AO	MOHC	192×145	10
HadGEM2-CC		192×145	12
HadGEM2_ES		192×145	06
inmcm4	INM	180×120	28
IPSL-CM5A-LR	IPSL	96×96	16
IPSL-CM5A-MR		144×143	17
IPSL-CM5B-LR		96×96	14
MIROC5	MIROC	256×128	04
MIROC-ESM		128×64	31
MIROC-ESM-CHEM		128×64	32
MPI-ESM-LR	MPI-M	192×96	02
MPI-ESM-MR		192×96	05
MRI-CGCM3	MRI	320×160	25
MRI-ESM1		320×160	21
NorESM1-M	NCC	144×96	07

資料來源：「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(TCCIP)。

第三章 氣候變遷 IPCC AR6 資料及臺灣地區可能情境探討

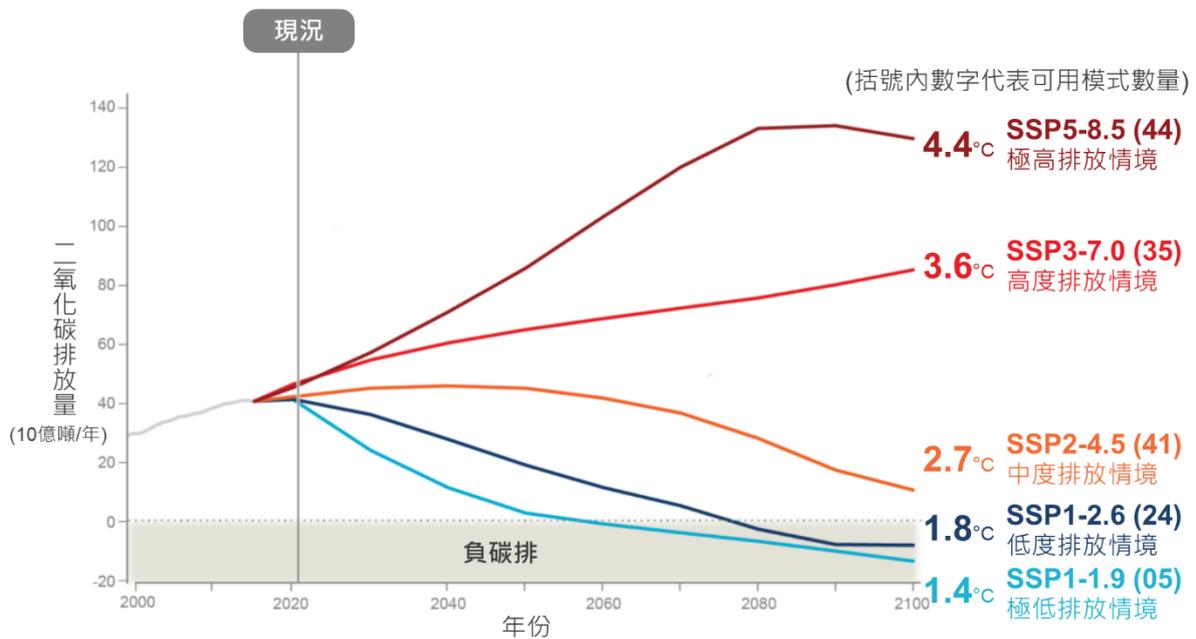
回顧整理 IPCC AR6 氣候變遷情境設定上所採用作法，且針對不同作法進行介紹說明，提出適合臺灣應用之氣候變遷情境設定，並彙整臺灣目前 IPCC AR6 情境資料應用情況。此外，在氣候變遷情境設定上，除採用 IPCC AR6 氣候變遷資料進行情境雨量探討，亦嘗試考量歷史水文趨勢延伸方式作為情境雨量，藉由導入多元氣候變遷情境設定以瞭解不同作法在未來可能情境雨量造成之差異。

一、氣候變遷 IPCC AR6 資料

聯合國政府間氣候變遷專門委員會第六次評估報告(IPCC AR6)主要採用之新版氣候變遷情境設定為 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5 (圖 3-1)，其在設定上主要由社經發展情況與輻射強迫力數據兩部分組成，社經發展情況係藉由「共享社會經濟路徑」(SSP)假設未來全球社經發展可能採取之路線，而輻射強迫力數值則用以代表世紀末之暖化程度高低，數值愈高代表暖化程度亦愈高，其與 AR5 代表濃度路徑(RCP)中輻射強迫力數值意義相同。此外，IPCC AR6 為能呼應巴黎協定所設定 1.5°C 與 2.0°C 目標，在未來氣候推估時亦採用各種固定增溫條件(1.5°C、2.0°C、3.0°C 以及 4.0°C)進行氣候變遷影響分析。針對 IPCC AR6 所採用之氣候變遷 SSP 情境與固定增溫條件作法說明如下：

IPCC AR6主要氣候變遷情境之二氧化碳排放量與特徵

(不同社會經濟發展情況可造成明顯二氧化碳排放量與特性差異)



註：圖片改繪自 IPCC AR6 第一工作小組報告「物理科學依據」，技術摘要，資訊圖表 TS-1，第 TS-53 頁。

圖 3-1 IPCC AR6 主要氣候變遷情境之二氧化碳排放量與特徵

(一)SSP 情境介紹

1、SSP1-1.9 (極低排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP1-1.9 為溫室氣體極低排放情境，SSP1 描述全球各國將氣候變遷視為重大議題，其社會經濟發展路徑屬於永續路線(sustainability)，而 1.9 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 1.9 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較低者。在此情境下，其逐漸減少碳排放量，大約於 2050 年達到淨零碳排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP1-1.9 情境世紀末暖化程度大概為 1.4°C ，符合巴黎協定致力將全球增溫控制於 1.5°C 內之目標。

2、SSP1-2.6 (低度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP1-2.6 為溫室氣體低度排放情境，SSP1 描述全球各國將氣候變遷視為重大議題，其社會經濟發展路徑屬於永續路線(sustainability)，而 2.6 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 2.6 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主

要情境中相對較低者，但仍略高於 SSP1-1.9。在此情境下，其逐漸減少碳排放量，大約於 2075 年達到淨零排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP1-2.6 情境世紀末暖化程度大概為 1.8°C，符合巴黎協定將全球增溫控制於 2.0°C 內之目標。

3、SSP2-4.5 (中度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP2-4.5 為溫室氣體中度排放情境，SSP2 描述全球各國將依照現況持續發展，其社會經濟發展路徑屬於中間路線(middle of the road)，而 4.5 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 4.5 Wm⁻²，暖化影響為中等程度。在此情境下，其將維持目前碳排放程度，大約至 2040 年碳排放達到高峰後開始才減少碳排放量，但至世紀末前都無法達到淨零碳排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP2-4.5 情境世紀末暖化程度大概為 2.7°C。

4、SSP3-7.0 (高度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP3-7.0 為溫室氣體高度排放情境，SSP3 描述全球各國因區域或民族意識高漲，以提高自身競爭力為主要目標，無視社經發展對於環境可能造成之負面影響，其社會經濟發展路徑屬於區域競爭路線(regional rivalry)，而 7.0 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 7.0 Wm⁻²，暖化影響為 5 種主要情境中相對較高者。在此情境下，因無推動額外氣候政策(no additional climate policy)，導致碳排放量不斷增加，尤其非碳溫室氣體(包含空氣中氣溶膠物質)排放量增加最為顯著，其碳排放量將於世紀末增加至目前兩倍。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP3-7.0 情境世紀末暖化程度大概為 3.6°C。

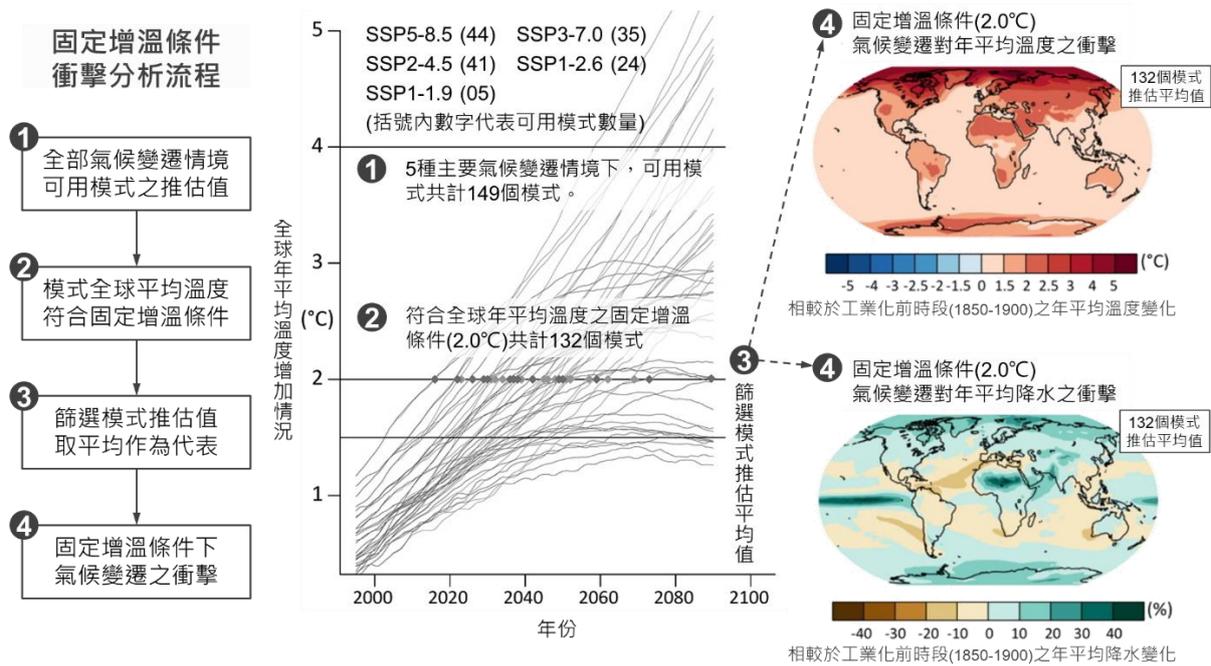
5、SSP5-8.5 (極高排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP5-8.5 為溫室氣體極高排放情境，SSP5 描述全球市場逐漸整合且經濟成長快速，因成功解決許多環境議題使各國相信即使全力發展化石燃料，仍然可邁向永續發展，其社會經濟發展路徑屬於石化燃料發展路線(fossil-fueled development)，而 8.5 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 8.5 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較高者。在此情境下，因無推動額外氣候政策(no additional climate policy)，導致碳排放量不斷增加，其碳排放量將約於 2050 年增加至目前兩倍，而約於 2075 年增加至目前三倍。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP5-8.5 情境世紀末暖化程度大概為 4.4°C 。

(二)固定增溫條件介紹

IPCC 自 1990 年公布氣候變遷第一次評估報告以來，氣候變遷評估報告已更新至第六版，由於運算能力、科學理論、物理模式以及觀測技術與資料等不斷改善，全球環流模式在時間與空間解析度上已有顯著提升，並藉由導入更多大氣與海洋物理機制或參數，讓模式可以更加合理推估歷史、現況以及未來氣候。然而，隨著全球環流模式精進，其所採用氣候變遷情境亦愈來愈多元與複雜，一般氣候變遷情境係假設不同社會經濟發展條件或假設不同程度溫室氣體排放情況加以區分，無論氣候變遷情境係依據社會經濟發展條件或溫室氣體排放情況作為設定，其最終都將反映在全球平均溫度增減上，再進而造成全球氣候型態改變。因此，若能將複雜氣候情境簡化為不同全球平均溫度增減幅度(相較於工業化前時段 1850 至 1900 年)，例如：增溫達到 1.5°C 、 2°C 、 3°C 或者 4°C 條件，此種簡化方式將有助於決策者聚焦於瞭解不同增溫幅度下衝擊程度(而非聚焦於共享社會經濟路徑抉擇)，以控制全球平均溫度增幅低於 1.5°C 或 2°C 為目標，掌握正確氣候政策與推動時間點，共同為減緩全球暖化目標而努力。

固定增溫條件衝擊分析流程與說明如圖 3-2 所示，在探討固定增溫條件下氣候系統反應之前，需先針對全部或部分氣候變遷情境(全部氣候變遷情境係指 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5)下各個全球環流模式之溫度推估結果進行比對分析，篩選出全球平均溫度推估值剛好符合固定增溫條件之模式，然後再計算篩選模式推估結果(例如：年平均降水變化率)之平均值，用以代表固定增溫條件對於全球氣候系統可能造成之衝擊。



註：圖片改繪自 IPCC AR6 第一工作小組報告「物理科學依據」，第 11 章，Cross-Chapter Box 11.1，圖 3，第 11-327 頁。

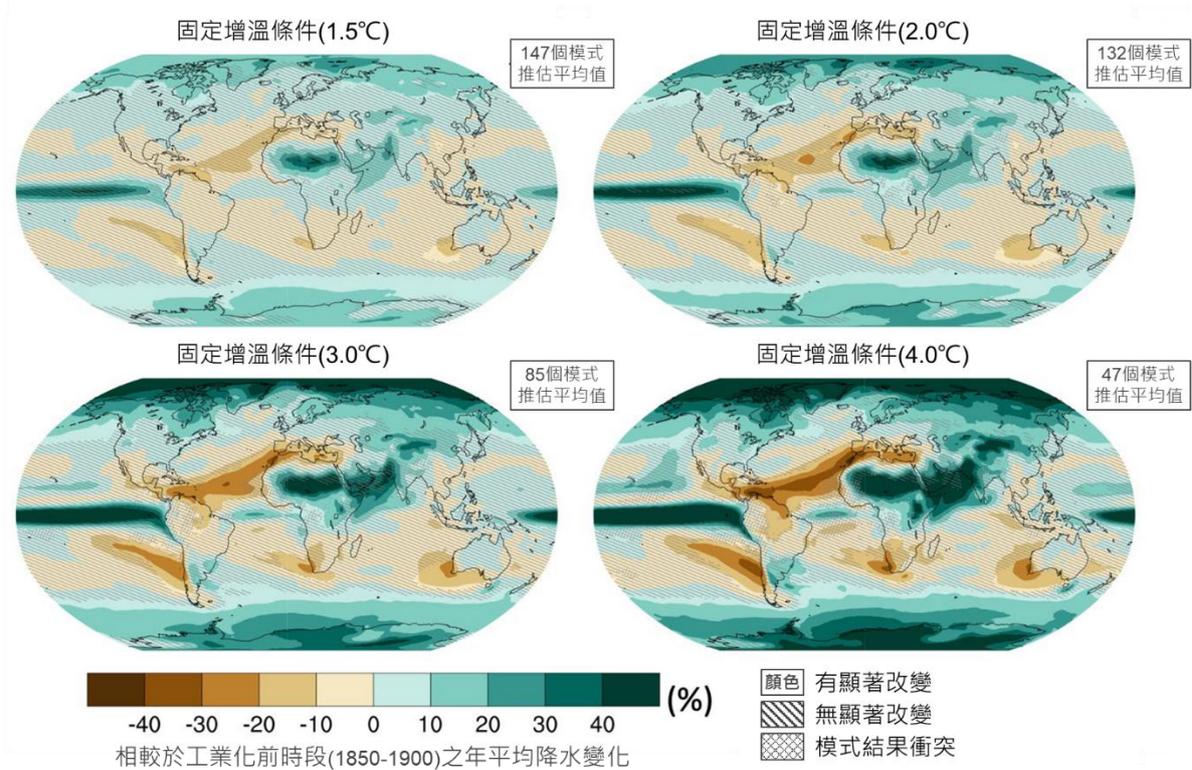
圖 3-2 固定增溫條件衝擊分析流程與說明

IPCC AR6 常用固定增溫條件包含 1.5°C、2.0°C、3.0°C 以及 4.0°C，並配合探討各個增溫條件下全球氣候型態變化，此種作法可更直覺呈現全球暖化程度與氣候型態變化之關聯性。例如：以不同固定增溫條件下所對應之年平均降水變化率(圖 3-3)而言，隨著全球暖化程度加劇，年平均降水變化隨著區域不同而有增加或減少之情況，針對年平均降水增加之區域(例如：非洲北部與中部區域)，其增加幅度與影響範圍會隨著暖化程度加劇而擴大；針對年平均降水減少之區域(例如：智利西岸區域)，其減少幅度與影響範圍亦會

隨著暖化程度加劇而擴大。整體而言，當全球暖化程度愈嚴重，其將導致年平均降水變化在幅度與範圍上皆有增加趨勢。

各種不同固定增溫條件對於全球各地年平均降水變化之衝擊

(衝擊量為相較於工業化前時段1850-1900)



註：圖片改繪自 IPCC AR6 第一工作小組報告「物理科學依據」，第 4 章，圖 4-32，第 4-181 頁。

圖 3-3 各種不同固定增溫條件對於全球各地年平均降水變化之衝擊

依據各種不同固定增溫條件對於全球氣候系統之衝擊分析結果(圖 3-4)可知，隨著全球暖化程度加劇，其對於溫度(10 年一遇高溫事件)、乾旱(10 年一遇乾旱事件之發生頻率)、降水(10 年一遇降水事件之發生頻率)、積雪(積雪覆蓋面積變化)以及熱帶氣旋(強烈熱帶氣旋比例)所造成之衝擊幅度亦愈來愈大。就暖化程度對於乾旱特性之影響而言，現況增溫條件下 10 年一遇乾旱事件之發生頻率約為工業化前時段(1850 至 1900 年)之 2 倍，而在固定增溫 1.5°C、2.0°C 以及 4.0°C 條件下，10 年一遇乾旱事件之發生頻率則分別約為工業化前時段(1850 至 1900 年)之 2.4、3.1 以及 5.1 倍，其發生頻率將隨著暖化程度加劇而增加。上述各種不同固定增溫條件下氣

候變遷衝擊分析結果可作為有效決策資訊，讓決策者可更直接瞭解全球暖化程度與氣候型態變化之關聯性，利於氣候政策之及時推動，然後藉由氣候政策之確實執行，以避免可能造成嚴重衝擊之固定增溫條件發生。

各種不同固定增溫條件對於全球氣候系統之衝擊 (衝擊量為相較於工業化前時段1850-1900)



註：圖片改繪自 IPCC AR6 第一工作小組報告「物理科學依據」，技術摘要，資訊圖表 TS-1，第 TS-54 頁。

圖 3-4 各種不同固定增溫條件對於全球氣候系統之衝擊分析結果

二、AR6 氣候變遷情境下臺灣未來氣候推估

IPCC AR6 氣候變遷情境資料目前於臺灣未來氣候推估應用尚處於初步階段，其在氣候變遷情境設定上可分為 SSP 情境與固定增溫條件兩種，依據「IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告⁶」與「IPCC 氣候變遷第六次評估報告：衝擊、調適與脆弱度之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告⁷」整理兩種情境設定之相關成果如下：

⁶「IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告」由科技部、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心於 2021 年 8 月 10 日聯合發布。

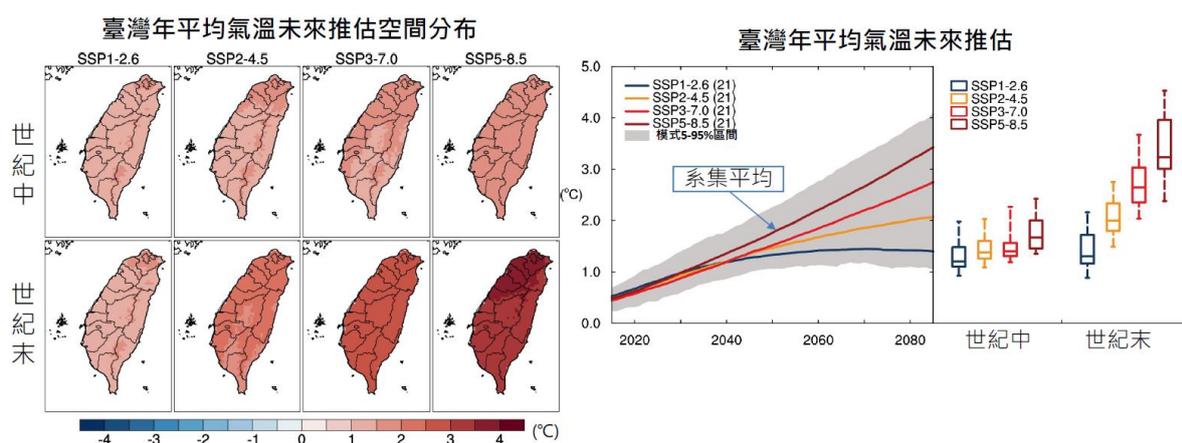
⁷「IPCC 氣候變遷第六次評估報告：衝擊、調適與脆弱度之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告」由科技部於 2022 年 3 月 1 日發布。

(一)SSP 情境下衝擊分析

「IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告」在氣候變遷情境設定上主要係以 SSP 情境作法為主，其於未來臺灣氣候推估上採用 1985 至 2014 年作為基期，而 2036 至 2065 年與 2071 至 2100 年則分別作為世紀中與世紀末時段，整理其氣候變遷情境下推估結果如下：

1、未來年平均氣溫

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣各地氣溫將持續上升，於氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，世紀中與世紀末之年平均氣溫可能分別上升超過 1.3°C 與 1.4°C；而於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末之年平均氣溫則可能分別上升超過 1.8°C 與 3.4°C (圖 3-5)。

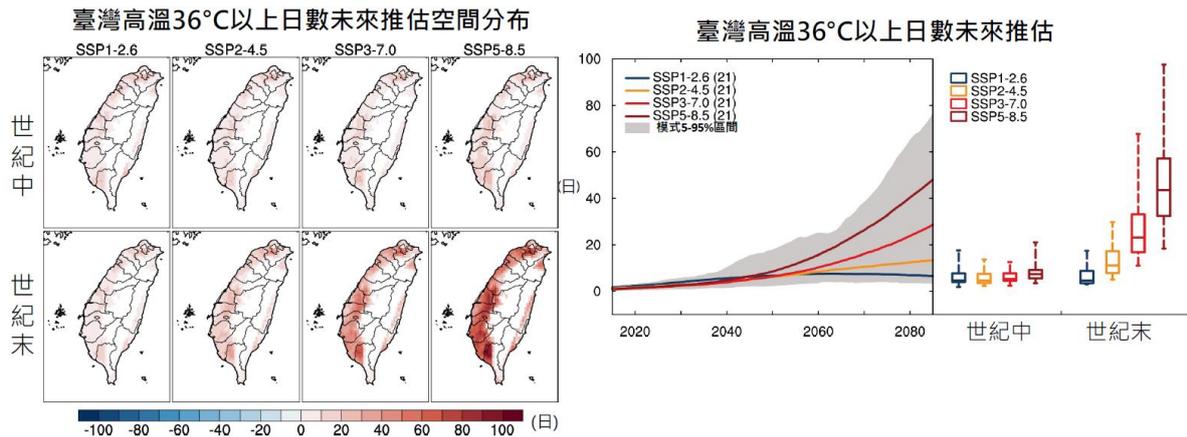


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-5 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年平均氣溫

2、未來極端高溫日數

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣各地發生高溫 36°C 以上之極端高溫日數有增加情況，於氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，世紀中與世紀末之極端高溫日數可能分別增加 6.8 日與 6.6 日；而於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末之極端高溫日數則可能分別增加 8.5 日與 48.1 日，尤其都市地區增加程度更為顯著(圖 3-6)。

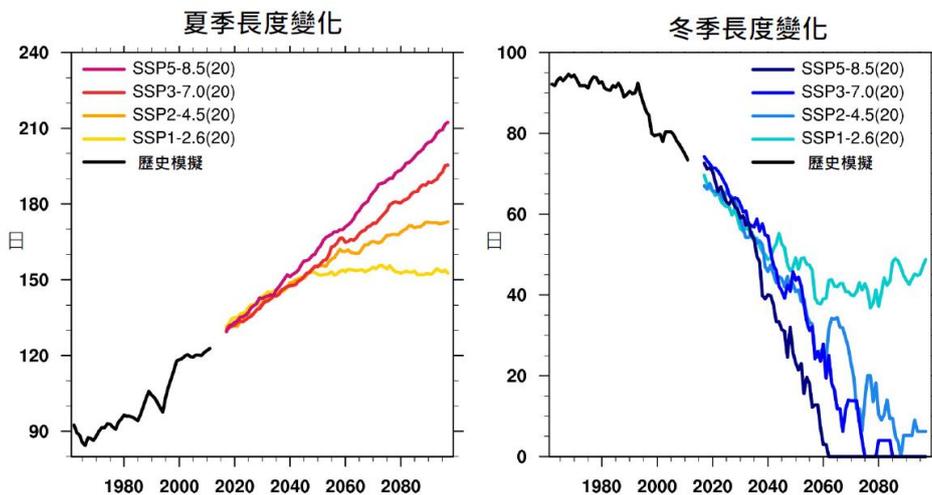


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-6 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來極端高溫日數

3、未來季節長度

氣候變遷情境下推估結果顯示世紀末臺灣夏季長度將從目前約 130 日增長為 155 至 210 日，而冬季長度則從目前約 70 日減少為 0 至 50 日。其中，氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，其季節長度變動相對較為緩和；而氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，其季節長度變動則相對較為明顯，出現冬季可能完全消失之情況(圖 3-7)。

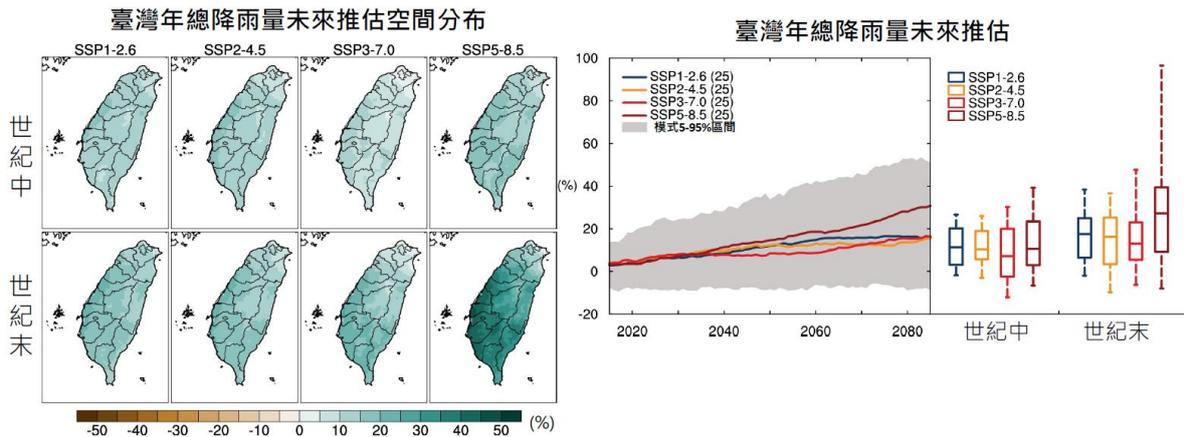


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-7 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來季節長度

4、未來年總降雨量

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣年總降雨量有增加趨勢，於氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，世紀中與世紀末之年總降雨量增加幅度分別為 12%與 16%；而於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末之年總降雨量增加幅度則分別為 15%與 31% (圖 3-8)。

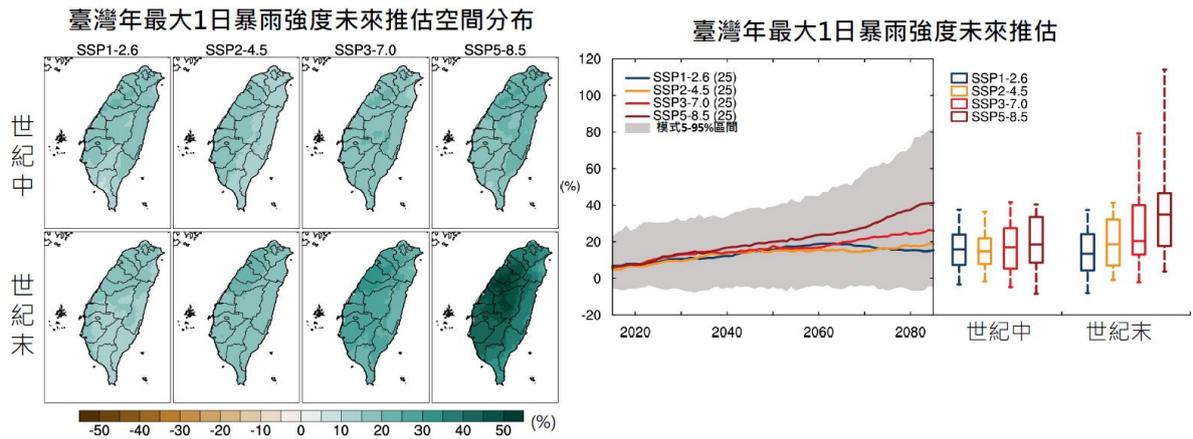


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-8 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年總降雨量

5、未來年最大 1 日暴雨強度

氣候變遷情境下推估結果顯示未來年最大 1 日暴雨強度有增加趨勢，於氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，世紀中與世紀末之年最大 1 日暴雨強度增加幅度分別為 15.7%與 15.3%；而於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末之年最大 1 日暴雨強度增加幅度則分別為 20.0%與 41.3% (圖 3-9)。

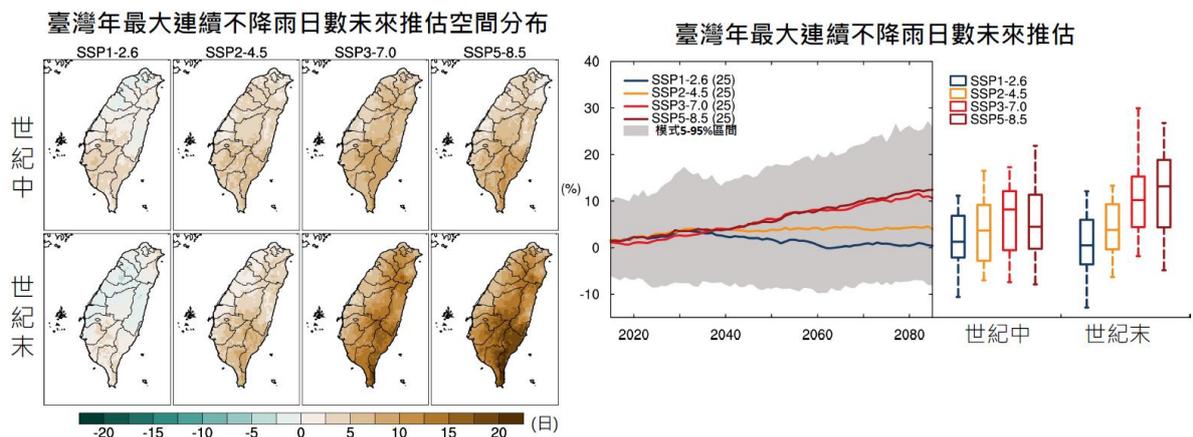


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-9 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年最大 1 日暴雨強度

6、未來年最大連續不降雨日數

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣各地之年最大連續不降雨日數可能有減少或增加趨勢，於氣候變遷 SSP1-2.6 情境(低度排放情境)下，世紀中與世紀末之年最大連續不降雨日數減少幅度分別為 1.8%與 0.4%；而於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末之年最大連續不降雨日數增加幅度則分別為 5.5%與 12.4% (圖 3-10)。

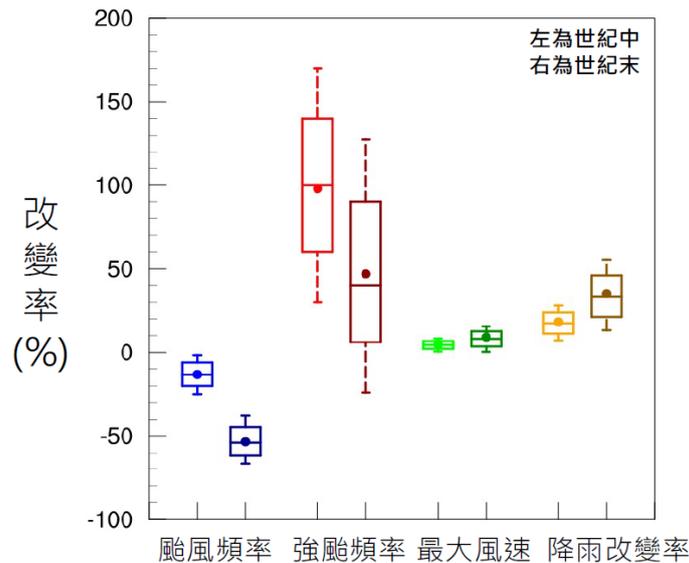


圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-10 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來年最大連續不降雨日數

7、未來颱風特性

氣候變遷情境下推估結果顯示未來影響臺灣之颱風特性將有所變化，於氣候變遷 SSP5-8.5 情境(極高排放情境)下，世紀中與世紀末影響臺灣颱風個數將分別減少約 15%與 55%，強颱風比例將分別增加約 100%與 50%，而颱風降雨改變率則將分別增加約 20%與 35% (圖 3-11)。



圖片來源：IPCC AR6 報告之氣候科學重點發現-臺灣版。

圖 3-11 氣候變遷 SSP 情境下臺灣未來颱風特性

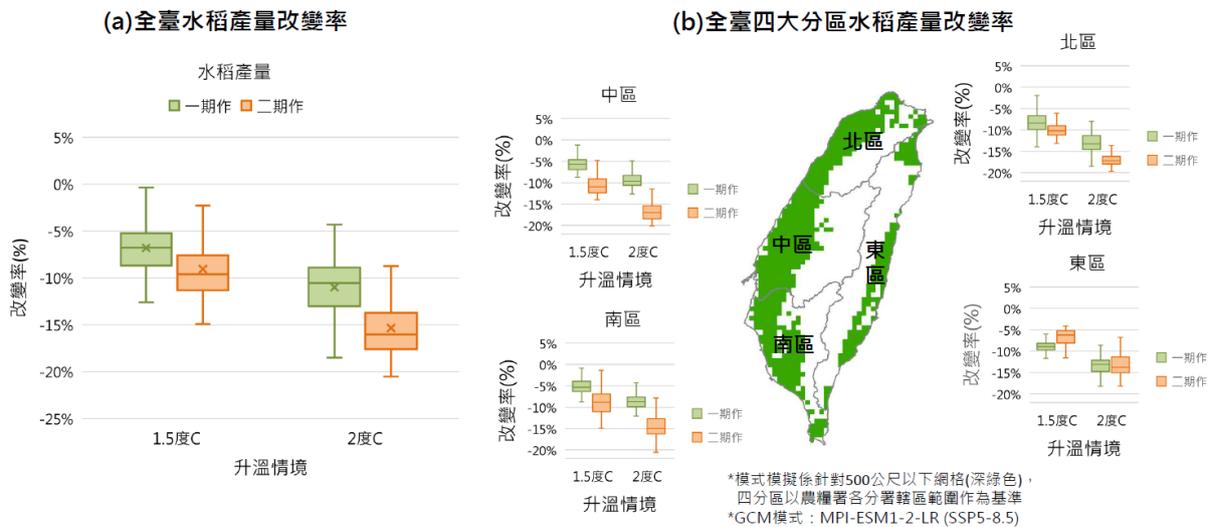
(二)固定增溫條件下衝擊分析

「IPCC 氣候變遷第六次評估報告：衝擊、調適與脆弱度之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告」在氣候變遷情境設定上開始出現固定增溫條件之作法，其主要係採用全球平均溫度增溫達到 1.5°C、2°C 以及 4°C 條件進行衝擊評估，整理其氣候變遷情境下推估結果如下：

1、未來水稻產量

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣各地水稻產量有減少趨勢，相較於固定增溫 1.5°C 條件下水稻產量減少情況，固定增溫 2°C 條件下水稻產量減少幅度更加明顯(圖 3-12)。此外，無論何種固定增溫條件，相較於一期作水稻產量減少情況，二期

作減少幅度皆更加明顯。



圖片來源：IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。

圖 3-12 氣候變遷固定增溫條件下臺灣未來水稻產量變化趨勢

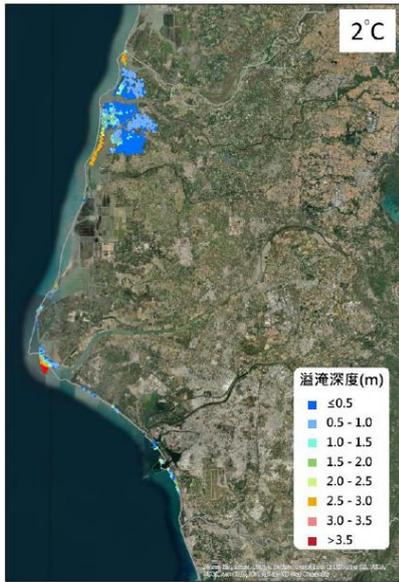
2、未來海平面上升變化

氣候變遷情境下推估結果顯示未來臺灣周邊海域海平面上有上升趨勢，於固定增溫 2°C條件下臺灣周邊海域海平面上升約 0.5 公尺，而於固定增溫 4°C條件下臺灣周邊海域海平面上升情況可達 1.2 公尺(圖 3-13)。若以西南沿海之臺南地區為例，海平面上升可能導致地勢較低窪地區有溢淹情形(以現有地形資料模擬)，而溢淹較深區域則以沿海養殖魚塭、濕地以及沙洲為主。

3、未來空氣品質

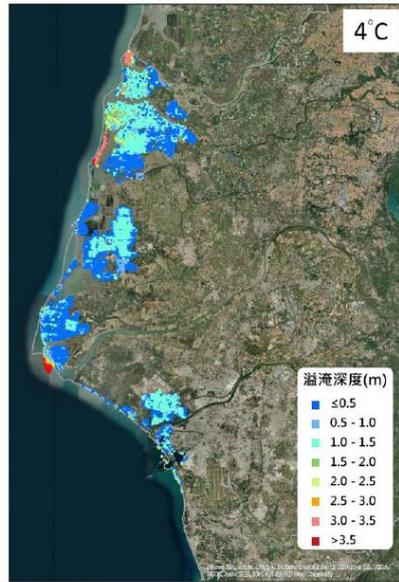
氣候變遷情境下推估結果顯示未來受到升溫影響，造成氣候因素改變(風力減弱、穩定度增加以及邊界層變淺等)，導致臺灣西半部冬季空氣品質不良(AQI⁸大於 100)日數有增加趨勢，其中又以中南部區域增加幅度較為明顯(圖 3-14)。若以不同固定增溫條件而言，相較於固定增溫 2°C條件下空氣品質不良日數，固定增溫 4°C條件下空氣品質不良日數增加幅度更加明顯。

⁸空氣品質指標(Air Quality Index, AQI)為依據監測資料將當日空氣中臭氧(O₃)、細懸浮微粒(PM_{2.5})、懸浮微粒(PM₁₀)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)以及二氧化氮(NO₂)濃度等數值，以其對人體健康之影響程度，分別換算出不同污染物之副指標值，再以當日各副指標之最大值為該測站當日之空氣品質指標值(AQI)。



海平面上升0.5公尺

SSP3-7.0情境(第95百分位)



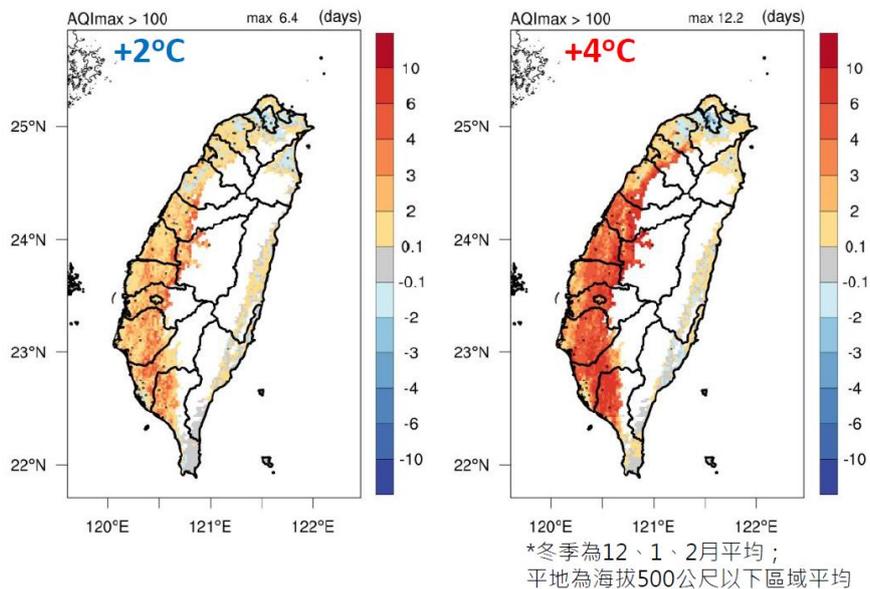
海平面上升1.2公尺

SSP5-8.5情境(第95百分位)

圖片來源：IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。

圖 3-13 氣候變遷固定增溫條件下海平面上升變化與溢淹分析

冬季空氣品質不良(AQI>100)日數變化



圖片來源：IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告。

圖 3-14 氣候變遷固定增溫條件下未來冬季空氣品質不良日數變化

三、氣候變遷下臺灣可能情境探討

為瞭解氣候變遷對於臺灣未來水文可能造成之影響，參考國際上主流作法採用氣候變遷情境資料下 ESM 推估資料進行分析，並因應水利署需求嘗試發展臺灣水文趨勢延伸方法進行未來氣候推估，其成果可與國際上主流作法互相比對，有助於初步瞭解趨勢延伸方法之可行性與合理性，可作為未來自訂氣候情境參考。此外，整理回顧氣象上不同氣候預測方法(van den Dool, 2007)以提供未來於自訂氣候情境精進上作為參考。針對各種氣候變遷下臺灣可能情境探討作法說明如下：

(一)氣候變遷情境下 ESM 推估資料

採用 TCCIP 產製之 IPCC AR6 降尺度資料⁹進行分析，其於氣候變遷情境設定上主要採用 SSP 情境與固定增溫條件兩種作法：
(1)SSP 情境係假設未來全球社經發展可能採取之路線，並配合世紀末輻射強迫力數值表達暖化程度高低；而(2)固定增溫條件則係將複雜氣候情境簡化為不同全球平均溫度增減幅度(相較於工業化前時段 1850 至 1900 年)，例如：增溫達到 1.5°C、2°C、3°C 或者 4°C 條件。

此兩種氣候變遷情境之設定方式皆有其優勢，例如：SSP 情境可依使用者需求或國際作法自訂未來期程，例如：考慮水資源評估規劃之目標年為民國 125 年(2036 年)，故可採用涵蓋目標年之期程作為未來分析時段，但此種情境設定作法則需面對 SSP 情境之不確定性(無法確定未來情境路徑為何)；而固定增溫條件作法則可排除 SSP 情境之不確定性，但其全球平均溫度符合固定增溫條件之發生時間區間較廣(可能從世紀中至世紀末)，不易與特定時間點連結。整體而言，在 IPCC AR6 氣候變遷情境設定上，上述兩種作法各有其優勢，建議可同時考慮兩種設定方式。

⁹TCCIP 產製之 IPCC AR6 空間降尺度資料係透過水利署與 NCDR MOU 所取得，資料取得時間為民國 111 年 7 月。

1、氣候變遷情境選擇

在 IPCC AR6 氣候變遷情境設定上，同時考慮 SSP 情境與固定增溫條件兩種設定方式。在 SSP 情境的部分，因 SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 氣候變遷情境下有相對完整之模式推估結果，故以此兩種情境作為主要氣候變遷分析情境；在固定增溫情境之部分，採用增溫 2.0°C 作為未來條件進行氣候變遷影響分析，以呼應巴黎協定所設定目標。不同氣候變遷情境下候模式列表可參考表 3-1。

2、氣候變遷期程設定

在氣候變遷期程設定之部分，參考 IPCC AR6 與 NCDR 國家氣候變遷調適工作推動現況，採用 1995 至 2014 年作為基期時段、2021 至 2040 年作為未來短期時段以及 2041 至 2060 作為未來中期時段，後續將以此期程設定進行氣候變遷衝擊分析。

(二)水文趨勢延伸方法

以 ESM 推估值進行未來氣候探討雖為國際上主流作法，但其資料取得與處理門檻較高，且臺灣在應用前仍須進行空間降尺度分析以提高其空間解析度至集水區尺度。因本土水文資料具有取得相對容易且更新速度快之特性，故嘗試發展臺灣水文趨勢延伸推估未來氣候，在本土水文趨勢將繼續延伸之前提下進行未來氣候推估，其分析結果可與國際上主流作法互相比對，有助於初步瞭解趨勢延伸之可行性與合理性，可提供未來自訂氣候情境作為參考。詳細內容說明於附錄五。

表 3-1 不同氣候變遷情境下氣候模式列表

編號	模式名稱	氣候變遷情境						
		historical	SSP2-4.5	SSP5-8.5	固定增溫 2°C 條件			
					SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
01	ACCESS-CM2	V	V	V	V	V	V	V
02	ACCESS-ESM1-5	V	V	V	V	V	V	V
03	AWI-CM-1-1-MR	V	V	V	V	V	V	V
04	BCC-CSM2-MR	V	V	V		V	V	V
05	CanESM5	V	V	V	V	V	V	V
06	CMCC-ESM2	V	V	V	V	V	V	V
07	EC-Earth3-AerChem	V					V	
08	EC-Earth3-CC	V	V	V		V		V
09	EC-Earth3-Veg-LR	V	V	V		V	V	V
10	EC-Earth3-Veg	V	V	V	V	V	V	V
11	EC-Earth3	V	V	V	V	V	V	V
12	FGOALS-g3	V	V	V		V	V	V
13	GFDL-CM4	V	V	V		V		V
14	GFDL-ESM4	V	V	V		V	V	V
15	INM-CM4-8	V	V	V		V	V	V
16	INM-CM5-0	V	V	V		V	V	V
17	IPSL-CM6A-LR	V	V	V	V	V	V	V
18	KACE-1-0-G	V	V	V	V	V	V	V
19	KIOST-ESM	V	V	V		V		V
20	MIROC6	V	V	V		V	V	V
21	MPI-ESM1-2-HR	V	V	V		V	V	V
22	MPI-ESM1-2-LR	V	V	V		V	V	V
23	MRI-ESM2-0	V	V	V		V	V	V
24	NESM3	V	V	V	V	V		V
25	NorESM2-LM	V	V	V		V	V	V
26	NorESM2-MM	V	V	V		V	V	V
27	TaiESM1	V	V	V	V	V	V	V
模式數量加總		27	26	26	86			

註：固定增溫 2°C 條件係由 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5 情境下共計 86 組 ESM 推估值所組合而成，每組推估值皆包含 20 年資料，其全球平均氣溫相較於 1850 至 1900 年之全球平均值符合增溫 2°C 之條件。

(三)其他氣候預測方法

應用氣候變遷情境下氣候模式推估資料進行未來水文衝擊分析之資料取得與處理門檻較高，且臺灣在應用前仍須進行空間降尺度分析以提高其空間解析度至集水區尺度。因此，除國際上主流作法之外，整理回顧氣象上不同氣候預測方法(van den Dool, 2007)以提供未來於自訂氣候情境精進上作為參考，說明如下：

1、以長期氣候值作為預報值

在缺乏可靠氣候預測資訊之前提下，可採用長期氣候值(30年平均)作為未來氣候預報值，惟其僅適用於短期氣候預報，無法反映出長期氣候變遷趨勢。

2、考慮氣候持續性進行預報

假設未來氣候與目前氣候具有一定程度之相關性，考慮氣候持續性(persistence)進行未來氣候預報，其預報表現通常可優於以長期氣候值作為預報值，但無法反映出大氣物理機制改變所造成之氣候變化(例如：高壓增強導致少雨情況)。此外，若針對特定水文變量(例如：月雨量資料)進行線性迴歸分析，再將分析而得之線性趨勢加以外推延伸，據以進行未來氣候推估，其亦屬於考慮氣候持續性進行預報之作法。

3、以最佳氣候平均法進行預報

針對特定區域測試適合之時間視窗大小(例如：10年)，據以決定最佳之氣候平均值，可用於代表區域平均值並進一步作為未來氣候預報值，此種作法即稱為最佳氣候平均法(optimal climate normals)，惟其無法反映出長期氣候變遷趨勢與大氣物理機制改變所造成之氣候變化(例如：高壓增強導致少雨情況)。

4、以區域迴歸法進行預報

從本土區域選擇適當變量作為預報因子(predictor)進行預報，例如：選擇本土氣壓值作為預報因子，用以預測未來數週之可能氣溫，此種作法即稱為區域迴歸法(local regression)。

5、以非區域迴歸與聖嬰現象法進行預報

考慮研究區域鄰近之大氣變量、水文變量或者與聖嬰現象相關之變量因子進行未來氣候預報，某種程度上可反映出大氣物理機制，此種作法即稱為非區域迴歸與聖嬰現象法(non-local regression and ENSO)。

6、以複合法進行預報

應用歷史水文大氣資料庫建立海溫指標 Nino34 與華盛頓冬季氣溫之關係，當海溫指標符合特定條件時(例如：海溫高於平均值)，即可應用當前 Nino34 觀測值進行華盛頓冬天氣溫之預測，此種作法即稱為複合法(composite)。

7、以樣式迴歸法進行預報

採用經驗正交函數(empirical orthogonal functions)推求水文大氣變量之空間主成分，再應用其空間主成分進行線性複迴歸分析以預測未來氣候，此種作法即稱為樣式迴歸法(pattern regression)。

8、以數值分析法進行預報

採用短期預報常見之 ECMWF 模式或者長期氣候推估常見之 ESM 或者 GCM 進行未來氣候預報，此種作法即稱為數值分析法(numerical methods)。

第四章 淡水河等 10 條水系在設定之可能情境下 降雨量與流量分析

針對淡水河等 10 條水系(包含：淡水河、頭前溪、中港溪、大安溪、大甲溪、濁水溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪及四重溪)內重要控制點(水源設施與流量站)蒐集整理歷史水文觀測資料與降雨-逕流模式之率定驗證，並配合氣候變遷情境與臺灣季節特性評估各個重要控制點於未來可能情境下雨量特性，再藉由降雨-逕流模式轉換為情境流量資料，以探討不同氣候變遷情境與臺灣季節降雨特性下，各重要水系之整體流量特性(例如：月流量、季節流量以及豐枯流量)。以下分別說明：(1)重要水系基本水文資料整理、(2)氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析、(3)降雨-逕流模式建置與驗證以及(4)氣候變遷下臺灣可能情境之流量分析。

一、重要水系基本水文資料整理

(一)重要控制點篩選原則與結果

各個水系重要控制點主要可分為水源設施與流量站兩種類型，其中水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)。依據上述篩選原則，篩選出淡水河等 10 條水系共計 35 處重要控制點(表 4-1)，作為後續情境雨量與情境流量分析探討之主要對象。其中，針對各個水系內重要控制點空間分布圖詳附錄三所示。

考量流量資料未來可能需要延伸應用至鄰近區域，故蒐集整理臺灣各地區水資源經理計畫中採用流量資料推估公式(詳附錄四)。一般而言，流量資料推估公式主要係依據面積比例法或者面積比例法搭配鄰近雨量資料，其通式可表達如下：

$$Q_1 = Q_2 \times \frac{A_1}{A_2} \times \frac{P_1}{P_2} \quad (4-1)$$

其中， Q_1 與 Q_2 分別為待推估流量點資料與已知流量點資料，而 A_1

與 A_2 分別為 Q_1 與 Q_2 流量點上游集水區之面積， P_1 與 P_2 則分別代表 Q_1 與 Q_2 流量點鄰近雨量站之年平均雨量。

表 4-1 淡水河等 10 條水系之重要控制點清單

控制點	流域	類型	控制點	控制點	流域	類型	控制點
CP01	淡水河	流量站	橫溪	CP20	大甲溪	水源設施	德基水庫
CP02		流量站	介壽橋(1)	CP21	濁水溪	水源設施	霧社水庫
CP03		流量站	寶橋	CP22		流量站	水里
CP04		流量站	五堵	CP23		水源設施	桶頭攔河堰
CP05		水源設施	翡翠水庫	CP24		流量站	玉峰橋
CP06		水源設施	三峽堰				
CP07		水源設施	石門水庫	CP25		流量站	內茅埔
CP08		流量站	秀巒				
CP09		流量站	稜角				
CP10		流量站	霞雲	CP26		水源設施	栗栖壩
CP11		流量站	玉峰(馬利哥灣)	CP27		八掌溪	流量站	觸口
CP12	頭前溪	流量站	內灣	CP28	曾文溪	水源設施	曾文水庫
CP13		流量站	上坪	CP29		流量站	左鎮
CP14	中港溪	水源設施	田美攔河堰	CP30		水源設施	南化水庫
CP15		流量站	永興橋	CP31		流量站	玉田
CP16	大安溪	水源設施	鯉魚潭水庫	CP32	水源設施	玉峰堰	
CP17		流量站	象鼻(3)	CP33	高屏溪	水源設施	甲仙攔河堰
CP18		流量站	雪山坑			CP34	水源設施	高屏溪攔河堰
CP19		水源設施	士林攔河堰	CP35	四重溪	水源設施	牡丹水庫

註：¹控制點類型可分為水源設施與流量站兩大類。其中，水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)，而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；²控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加。

(二)歷史長期雨量特性分析

1、季節雨量特性

參考陳昭銘(民國 97 年)¹⁰季節雨量劃分方式與氣象局季節定義，將臺灣季節雨量分為五季，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)，針對臺灣北部、中部以及南部區域分別選擇一處代表集水區(北部：石門水庫；中部：德基水庫；南部：曾文水庫)進行水文量統計分析，以瞭解臺灣北中南各季節降雨特性，作為後續情境雨量分析之比對依據。其中，各個集水區季

¹⁰陳昭銘，民國 97 年，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42 期，第 1-9 頁。

節雨量主要係基於 TCCIP 產製之歷史觀測網格雨量資料進行分析，挑選集水區範圍所對應網格並統計其長期(1960 至 2020 年)平均月雨量¹¹，分析結果顯示(圖 4-1)：石門水庫集水區春季雨量佔全年雨量 19%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為 22%、43%、10%以及 6%；德基水庫集水區春季雨量佔全年雨量 24%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為 27%、34%、8%以及 7%；曾文水庫集水區春季雨量佔全年雨量 9%，而梅雨季、颱風季、秋季以及冬季佔比則分別為 32%、54%、3%以及 2%。整體而言，代表集水區之中以曾文水庫集水區雨量豐枯最為懸殊，其雨量主要集中發生於梅雨季與颱風季，其佔全年雨量分別為 86%。

淡水河等 10 條水系重要控制點之季節雨量特性如圖 4-2 所示，呈現各個控制點(編號原則大致上由北至南逐漸增加)於春季、梅雨季、颱風季、秋季以及冬季之總雨量，三處代表集水區(石門水庫、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示。分析結果顯示：就 35 處重要控制點而言，僅部分坐落於東北角控制點秋季與冬季雨量較多，其餘控制點雨量相對豐沛季節主要為春季、梅雨季以及颱風季，而豐沛季節雨量佔全年雨量百分比以颱風季佔比最高、梅雨季佔比次高、春季則最小。其中，梅雨季與颱風季雨量佔全年雨量百分比由北至南有增加情況，而春季雨量佔全年雨量百分比在北部與中部較高，在南部則有明顯降低情況。

¹¹藉由套疊集水區範圍圖層與觀測網格雨量之網格點位圖層即可決定集水區範圍所對應網格，然後透過計算挑選出網格資料之平均值以求得集水區代表雨量資料。

臺灣五季

春季

(2至4月)

梅雨季

(5至6月)

颱風季

(7至9月)

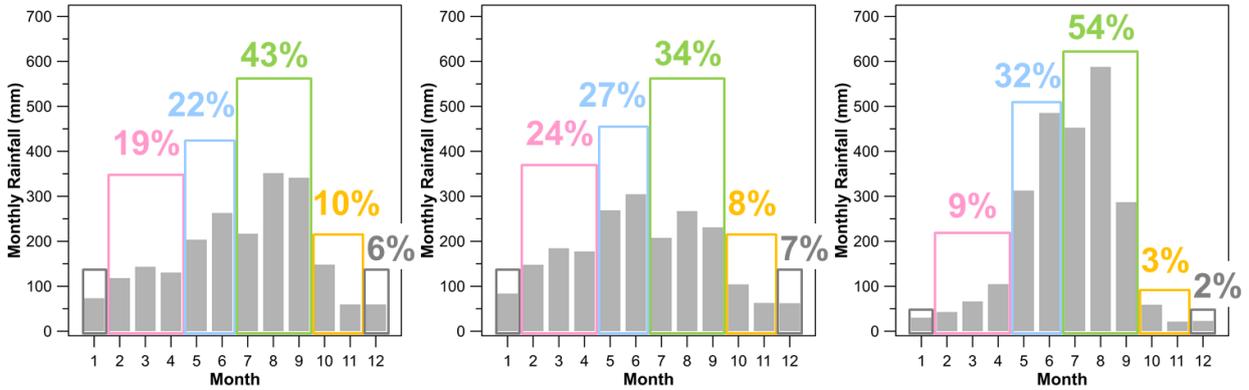
秋季

(10至11月)

冬季

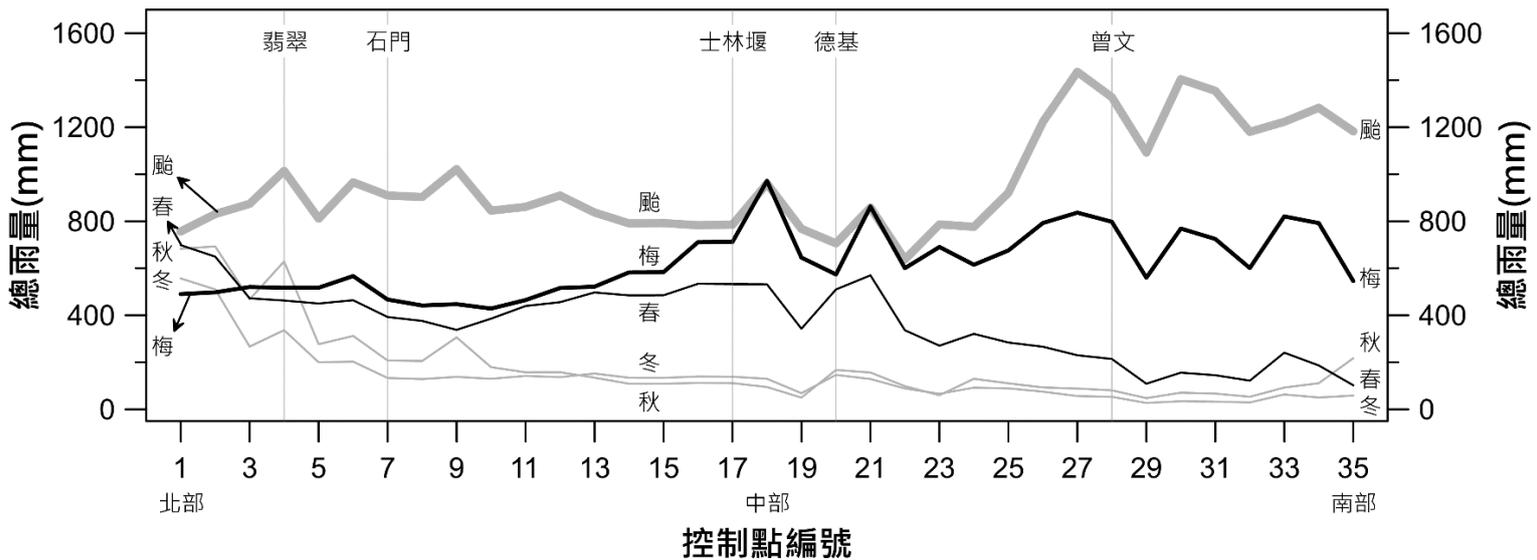
(12至1月)

(a) 石門水庫雨量分布 (b) 德基水庫雨量分布 (c) 曾文水庫雨量分布



註：集水區雨量分析成果係基於「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」產製之歷史觀測網格雨量資料(1960至2020年)。

圖 4-1 石門、德基以及曾文水庫集水區各季節雨量佔全年雨量百分比



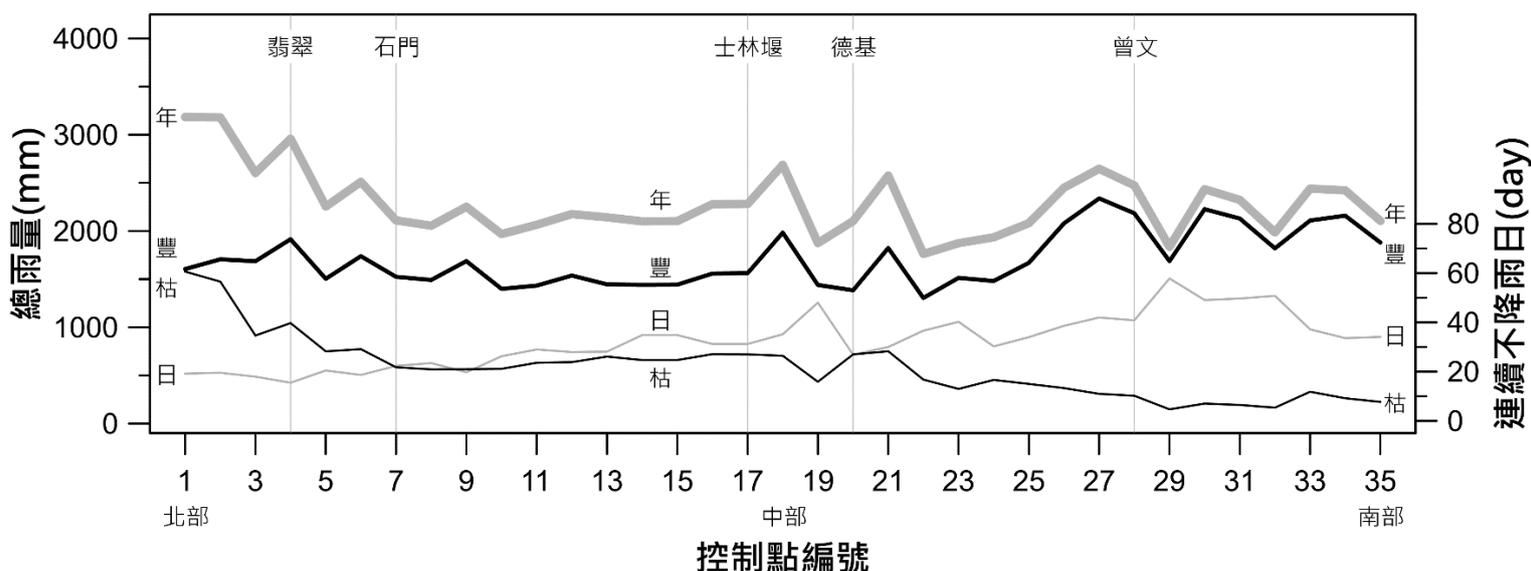
註：線段呈現係僅用於標示出各個重要控制點之季節雨量特性，以方便快速辨識其差異，無法代表控制點間之趨勢。控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加；5 處代表集水區(翡翠水庫、石門水庫、士林堰、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示；「春」表示春季(2 至 4 月)總雨量、「梅」表示梅雨季(5 至 6 月)總雨量、「颱」表示颱風季(7 至 9 月)總雨量、「秋」表示秋季(10 至 11 月)總雨量以及「冬」表示冬季(12 至 隔年 1 月)總雨量。

圖 4-2 淡水河等 10 條水系重要控制點之季節雨量特性

2、豐枯雨量特性

淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯雨量特性如圖 4-3 所示，圖中呈現各個控制點(編號原則大致上由北至南逐漸增加)全年度總雨量、豐水期(5 至 10 月)總雨量、枯水期(11 至 隔年 4 月)總雨量以及連續不降雨日數(雨量連續低於 1.0 mm 日數)，三處

代表集水區(石門水庫、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示。分析結果顯示：就 35 處重要控制點而言，僅部分坐落於東北角控制點枯水期雨量較多(豐枯比約 5:5)，其餘控制點雨量主要集中發生於豐水期，北部區域豐枯比約略為 6:4，而南部區域豐枯比則約略為 9:1，豐枯雨量差異由北至南逐漸增加。而連續不降雨日數之部分，亦由北至南呈現逐漸增加情況，其數日最多增加至約 60 日左右。



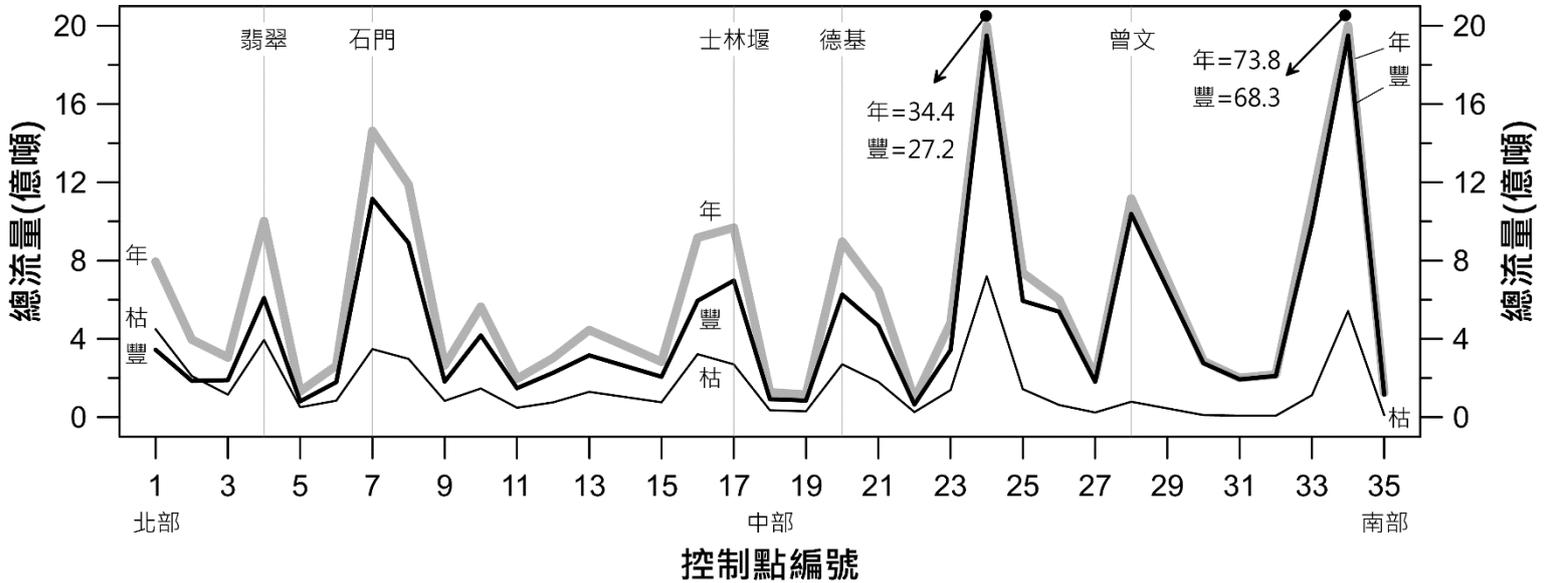
註：線段呈現係僅用於標示出各個重要控制點之豐枯雨量特性，以方便快速辨識其差異，無法代表控制點間之趨勢。控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加；5 處代表集水區(翡翠水庫、石門水庫、士林堰、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示；「年」表示全年度總雨量、「豐」表示豐水期(5 至 10 月)總雨量、「枯」表示枯水期(11 至隔年 4 月)總雨量以及「日」表示連續不降雨日數(雨量連續低於 1.0 mm 日數)。

圖 4-3 淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯雨量特性

(三)歷史長期流量特性分析

淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯流量特性如圖 4-4 所示，圖中呈現各個控制點(編號原則大致上由北至南逐漸增加)全年度總流量、豐水期(5 至 10 月)總流量以及枯水期(11 至隔年 4 月)總流量，三處代表集水區(石門水庫、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示。分析結果顯示：就 35 處重要控制點而言，僅部分坐落於東北角控制點枯水期總流量略高於豐水期總流量，其餘控制點枯水期總流量皆低於豐水期總流量。而全年度總流量與豐水期總流量之部分，兩者差異程度在空間

上有所不同，例如：在北部區域全年度總流量與豐水期總流量差異較為明顯，而南部區域約從濁水溪桶頭攔河堰(控制點編號 22)以南，全年度總流量與豐水期總流量之間已幾乎無明顯差異。



註：線段呈現係僅用於標示出各個重要控制點之豐枯流量特性，以方便快速辨識其差異，無法代表控制點間之趨勢。控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加；5 處代表集水區(翡翠水庫、石門水庫、士林堰、德基水庫以及曾文水庫)所對應之控制點編號於圖中分別採用垂直細線予以標示；「年」表示全年度總流量、「豐」表示豐水期(5 至 10 月)總流量以及「枯」表示枯水期(11 至隔年 4 月)總流量；因濁水溪流域玉峰橋站(控制點編號 24)與高屏溪流域高屏溪攔河堰(控制點編號 34)集水區面積廣大，其流量明顯高於其他控制點，故另採數字形式標示其總流量。

圖 4-4 淡水河等 10 條水系重要控制點之豐枯流量特性

(四)現況氣候情勢分析

針對淡水河等 10 條水系內重要控制點之歷史水文資料(例如：季節雨量、豐枯雨量以及年雨量等)進行統計檢定分析，以瞭解歷史水文資料之統計特性是否具有趨勢或變異點存在。為分析與探討現況氣候情勢，首先回顧統計檢定相關研究，瞭解如何採用統計檢定分析水文資料趨勢與變異點。再介紹常用水文統計檢定理論與流程，並應用於後續現況氣候情勢分析。以下分別說明：(1)統計檢定分析文獻、(2)統計檢定理論以及(3)現況氣候情勢分析結果。

1、統計檢定分析文獻

經濟部水利署水利規劃試驗所於民國 99 至 101 年期間推動一系列計畫，針對臺灣北部、中部、南部以及東部採用統計方法檢定水文資料是否具有趨勢，其虛無假設為水文資料於時間上

係隨機分布，即水文資料不具趨勢性，而對立假設則為水文資料具有遞增或遞減趨勢。針對各個分區趨勢檢定結果整理如下：

「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年)針對臺灣北部降雨資料進行分析，其年雨量變化趨勢分析結果顯示：多數測站年雨量呈現增加趨勢，47 個雨量站中有 9 個雨量站為顯著增加(顯著水準=0.05)，而有 7 個雨量站呈現減少趨勢。

「強化中部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年)針對臺灣中部降雨資料進行分析，該研究針對兩時段內雨量特性進行分析，兩時段分別為(1)時段一：民國 69 至 88 年與(2)時段二：民國 89 至 99 年，其年雨量變化趨勢分析結果顯示：臺灣中部年雨量於時段一，8 個雨量站為增加趨勢，而有 14 個雨量站為減少趨勢；臺灣中部年雨量於時段二，多數雨量站(17 個雨量站)為增加趨勢，而 4 個雨量站為減少趨勢。然而，無論是時段一或時段二，皆無雨量站具有顯著增加趨勢或減少趨勢。

「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 99 年)針對臺灣南區降雨資料進行分析，其年雨量變化趨勢分析結果顯示：曾文溪以南區域之年雨量明顯高於急水溪以北區域(含急水溪)，且丘陵與山區之年雨量明顯高於平原地區。相較於過去紀錄，近 10 年雨量在時間與空間上有明顯變化，多數測站年雨量呈現增加趨勢，且年雨量增加與降雨強度增加有關，尤其豐水期期間之雨量呈現顯著增加趨勢。

「強化東部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年)針對臺灣東區降雨資料進行分析，該研究針對兩時段內雨量特性進行分析，兩時段分別為(1)時段一：民國 69 至 88 年與(2)時段二：民國 89 至 99 年，其分析結果指出：時段一期間，年雨量呈現增加趨勢

的雨量站共有 5 站，其中 2 站為顯著增加趨勢(顯著水準=0.05)，而年雨量呈現減少趨勢的雨量站共有 8 站，其中 4 站為顯著減少趨勢；時段二期間，年雨量呈現增加趨勢的雨量站共有 3 站，其中 1 站為顯著增加趨勢(顯著水準=0.05)，而年雨量呈現減少趨勢的雨量站共有 10 站，其中 3 站為顯著減少趨勢。

許多其他研究亦指出臺灣水文資料具有增減趨勢：錢滄海等人(民國 99 年)蒐集中央氣象局臺北雨量站自民國前 12 年至民國 95 年共 107 年之日雨量紀錄，針對年降雨日數、年降雨量、一日最大降雨量、最大連續不降雨日數以及年平均降雨強度，加以統計分析，並以 Mann-Kendall 趨勢檢定法針對上列之時間序列進行趨勢檢定，其結果指出臺北地區降雨分布隨著時間確實有變化，且短延時暴雨增多，乾旱機率有增加的趨勢。陳憲宗與游保杉(民國 98 年)以近 10 年來之 24 小時暴雨，與過去 40 年來的變異比值比較後，發現臺灣北、中、南、東等地區，分別有 14%、20%、28%以及 2%的增幅，反應未來臺灣地區暴雨強度將持續增加，若以上述預測結果外插，可推估民國 119 年之暴雨規模約增加 20%。

而國外水文趨勢分析結果亦有類似發現：Serrano *et al.* (1999)利用 Mann-Kendall 趨勢檢定方法分析伊伯利亞半島之月降雨量，發現三月份之降雨量有呈現明顯減少之趨勢。Collischonn *et al.* (2001)利用統計方法分析巴拉圭地區因受氣候變遷之影響，發現自 1970 年後之降雨量有增加現象。Mirza *et al.* (1998)以統計方法探討降雨量趨勢變化和持續性，結果發現恆河流域之年降雨量有增加趨勢，但位於雅魯藏布江地區之降雨量自 1960 年則有遞減趨勢。Kiely (1999)利用統計方法分析愛爾蘭地區因受氣候變遷而影響之降雨量與流量特性，其研究結果顯示自 1975 年起，年降雨量與流量有呈現增加現象，尤其在三至十月之降雨量具有明顯增加趨勢。

綜合以上文獻可知，國內外在探討水文序列之變異點與趨勢分析，大多採用 Mann-Whitney-Pettitt (MWP) 檢定與 Kruskal-Wallis (KW) 檢定，而趨勢分析之部分則採用 Mann-Kendall (MK) 檢定。

2、統計檢定理論

參考「臺灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年) 節錄 MWP 檢定、KW 檢定以及 MK 檢定詳細說明於下：

(1) Mann-Whitney-Pettitt (MWP) 檢定

MWP 檢定(Pettitt, 1979)，係利用無母數統計方法檢測時序資料中是否存在顯著差異的變異點。變異點之定義為：該點前後資料之平均值在統計上有顯著差異。給定一組長度為 T 之時間序列資料，假設 t 為最可能之變化點，以 t 點為界將時間序列資料分為前後兩部分，即 $\{X_1, X_2, \dots, X_t\}$ 與 $\{X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_T\}$ ，計算 Pettitt 定義之 U_t 指標如下：

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (4-2)$$

其中，令 $(X_i - X_j) = x$ ，再依據下式計算 $\text{sgn}(x)$ ：

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{if } x = 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

若 $|U_t|$ 持續增加至某一處開始減少，其轉折點即為變異發生位置。然而，時間序列中可能會存在好幾個轉折點，一般僅針對最大轉折點計算其發生機率 P 。呂季蓉(民國 95 年) 提出當 t 時刻之 $|U_t|$ 值為時間序列中最大值且發生機率大於 0.9 時，則存在有顯著改變點之現象越加明顯。

$$P = 1 - \exp\left[\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right] \quad (4-4)$$

$$K_T = \max|U_t| \quad (4-5)$$

(2)Kruskal-Wallis (KW)檢定

KW 檢定又稱為 Kruskal - Wallis 因子分類變異數分析，由 Kruskal 與 Wallis 將 Wilcoxon 兩樣本檢定法加以推廣所得，此檢定運用於檢測 k 組獨立隨機樣本是否來自同一母體，其虛無假設為各組資料皆來自相同母體；而對立假設為至少有一組資料來自不同母體。其檢定步驟如下(顏月珠，民國 75 年)：

首先，將 k 組獨立樣本所有觀測值由小至大排列，並分別給予適當等級。將各組樣本(全部資料)視作一組資料，由小至大進行排序，資料中最小值其等級即為 1，而次小者其等級即為 2，據此推求各筆資料對應之等級。其中， $k=2$ 即為變異點前後所組成之兩組樣本。

然後，求算檢定統計量 H ，若樣本中 N 個觀測值均不相等，則 H 為：

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (4-6)$$

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (4-7)$$

其中， n_i 為各組樣本大小，例如： n_1 為變異點(含)前之資料筆數，而 n_2 為變異點後之資料筆數； R_i 為各組樣本的等級和，例如： R_1 為第一組樣本的等級和，其值等於第一組樣本內所有資料對應等級之加總。

若樣本中存有部分觀測值相等，尤其相同觀測值達 25% 以上，則 H 須校正為：

$$H = \frac{\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)}{1 - \frac{\sum_{j=1}^c (t_j^3 - t_j)}{N^3 - N}} \quad (4-8)$$

其中， c 為相同等級的集合數， t_j 為第 j 個相同等級集合中的觀測值個數。

最後，當 $n_i > 5$ 時， H 分配近於 χ^2 分配，故自由度 $\nu = k - 1$ ，且於 95% 信賴區間時，若下式成立則拒絕母體相同的虛無假設。

$$H > \chi_{(1-\alpha, k-1)}^2 \quad (4-9)$$

(3) Mann-Kendall (MK) 檢定

MK 檢定可用於檢測資料是否具有趨勢 (Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987)，其虛無假設視資料在時間上之分布是隨機的，即資料不具趨勢性；而對立假設為資料具有遞增或遞減的趨勢。若有 n 個樣本， $y_i, i = 1, \dots, n$ ，並定義 S 指標如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad (4-10)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{if } \theta > 0 \\ 0, & \text{if } \theta = 0 \\ -1, & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (4-11)$$

Kendall (1975) 推導 S 指標於隨機條件下之期望值與變異數分別為：

$$E(S) = 0 \quad (4-12)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \{n(n-1)(2n+5)\} \quad (4-13)$$

並定義統計檢定量 Z 為：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4-14)$$

如果 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ 則拒絕虛無假設，表示資料在時間上有趨勢存在。其中， α 為顯著水準。若 S 為正值，表示資料有逐漸增加趨勢；若 S 為負值，則表示資料有逐漸減少趨勢。

3、現況氣候情勢分析結果

為瞭解淡水河等 10 條水系內重要控制點之現況氣候情勢，首先採用英國國家氣候資訊中心(National Climate Information Centre)廣泛採用之核平滑(kernel smoothing)分析，針對各個重要控制點之月雨量、季節雨量、豐枯雨量以及年雨量進行分析，檢視其整體水文趨勢。然後，再配合上述統計方法檢測水文資料之趨勢與變異點，藉由分析歷史觀測資料以瞭解其現況氣候情勢。

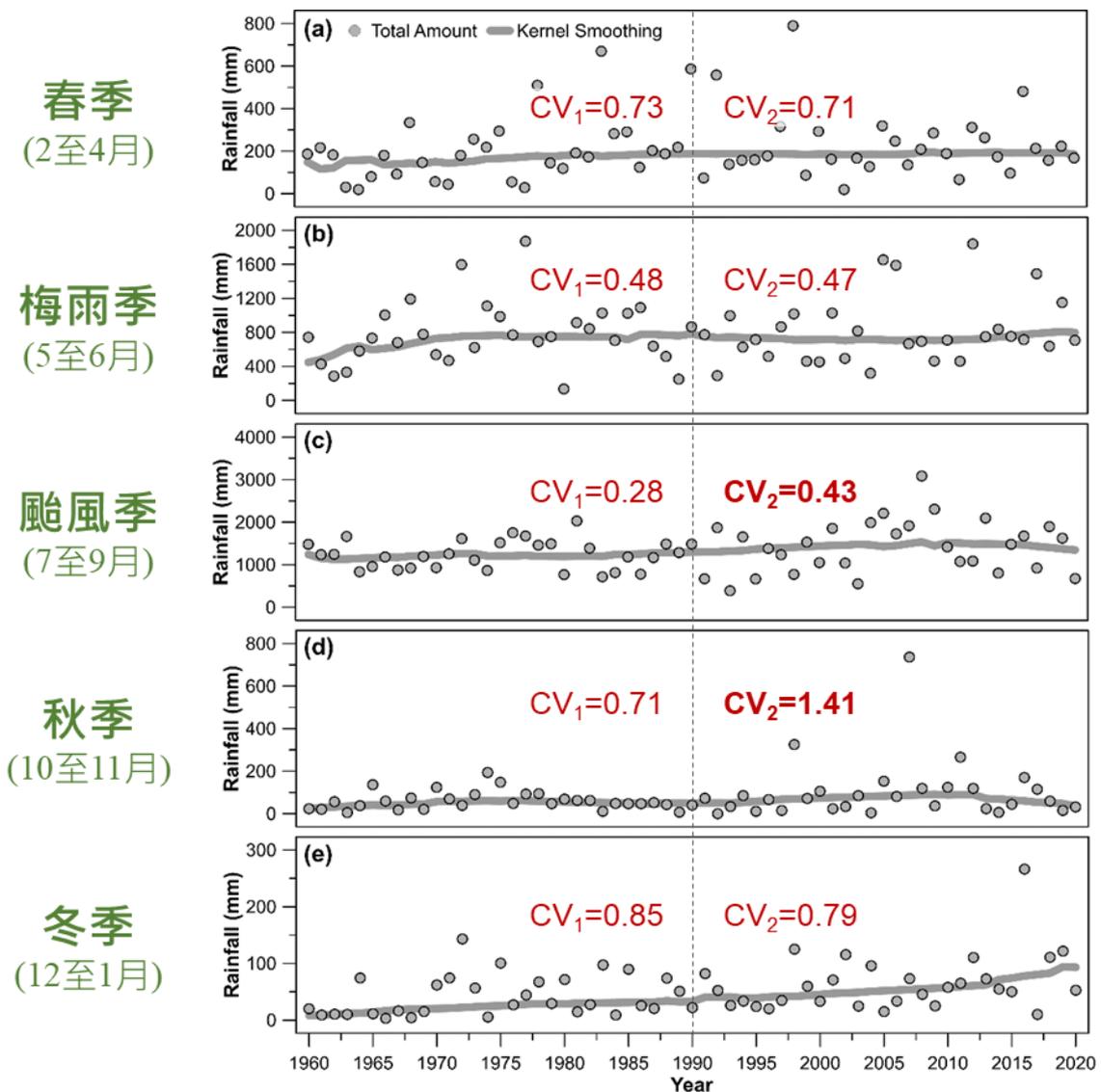


圖 4-5 曾文水庫集水區各季節總雨量時間序列資料與趨勢

以曾文水庫集水區為例，圖 4-5 為其春季、梅雨季、颱風

季、秋季以及冬季之總雨量時間序列資料與核平滑分析結果，圖中圓點為觀測雨量資料，而粗線則代表核平滑雨量。藉由核平滑分析結果可快速檢視資料長期變動情況，分析結果指出：曾文水庫集水區於颱風季與冬季之雨量有增加趨勢，而其餘季節則無明顯增減趨勢，其資料趨勢大致維持水平。然而，因冬季雨量佔全年雨量比例較低，其增加趨勢對於全年雨量之貢獻有限。此外，再採用前述趨勢檢定及變異點檢定方法進行總雨量趨勢研討，分析結果如表 4-2 與表 4-3 所示。在趨勢檢定結果之部分，各季節總雨量為增加情況且颱風季增加最多，僅冬季總雨量在統計上呈現顯著趨勢，其趨勢為 6.51 mm/10 年，而其餘季節之總雨量趨勢在統計上不顯著；而在變異點檢定結果之部分，颱風季總雨量存在顯著變異點於民國 92 年，冬季總雨量存在顯著變異點於民國 58 年，其餘季節之總雨量則無顯著變異點存在。

表 4-2 石門、德基以及曾文水庫集水區各季節總雨量趨勢檢定結果

控制點	季節	增減率 (mm/10 年)	MK 統計量	MK 檢定量	顯著 與否	變化百分比 (%)
石門水庫	春季	15.22	1.15	1.96	否	23.26
	梅雨季	1.32	0.09	1.96	否	1.69
	颱風季	-6.95	-0.18	1.96	否	-4.59
	秋季	6.53	0.73	1.96	否	18.85
	冬季	6.23	1.09	1.96	否	28.04
德基水庫	春季	33.31	1.67	1.96	否	39.2
	梅雨季	-1.21	-0.04	1.96	否	-1.27
	颱風季	-0.15	-0.01	1.96	否	-0.13
	秋季	3.39	0.38	1.96	否	12.17
	冬季	16.55	2.84	1.96	是	67.79
曾文水庫	春季	11.21	1.40	1.96	否	31.41
	梅雨季	15.31	0.75	1.96	否	11.51
	颱風季	52.84	1.33	1.96	否	23.88
	秋季	2.81	0.65	1.96	否	20.92
	冬季	7.48	3.06	1.96	是	84.26

註：¹採用分析資料之年限為 1960 至 2020 年；²顯著水準採用 $\alpha = 0.05$ 。

表 4-3 石門、德基以及曾文水庫集水區各季節總雨量變異點檢定結果

控制點	季節	變異點	MWP 統計量	MWP 檢定量	顯著 與否	KW 統計量	KW 檢定量	顯著 與否
石門水庫	春季	1977	0.99	0.80	是	10.715	2.706	是
	梅雨季	1964	0.49	0.80	否	—	—	—
	颱風季	2008	0.45	0.80	否	—	—	—
	秋季	1997	0.59	0.80	否	—	—	—
	冬季	1969	0.75	0.80	否	—	—	—
德基水庫	春季	1977	0.99	0.80	是	11.993	2.706	是
	梅雨季	1965	0.43	0.80	否	—	—	—
	颱風季	2003	0.52	0.80	否	—	—	—
	秋季	1997	0.54	0.80	否	—	—	—
	冬季	1996	0.99	0.80	是	9.521	2.706	是
曾文水庫	春季	1980	0.84	0.80	是	4.076	2.706	是
	梅雨季	1964	0.57	0.80	否	—	—	—
	颱風季	2003	0.94	0.80	是	7.045	2.706	是
	秋季	1997	0.70	0.80	否	—	—	—
	冬季	1969	0.98	0.80	是	13.700	2.706	是

註：¹採用分析資料之年限為 1960 至 2020 年；²顯著水準採用 $\alpha = 0.05$ ；³「—」代表無顯著變異點存在，故不執行 KW 檢定

二、氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析

氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析流程如圖 4-6 所示，其流程為：(1)比對基期觀測資料與雨量降尺度基期資料之統計特性，藉以檢核雨量降尺度資料是否具有偏差，在無偏差情況下可進行後續分析，若具有偏差則需先加以處理¹²；(2)計算未來情境雨量資料相較於基期情境雨量資料之變化情況，統計各月份雨量變化情況之平均值與標準偏差，並據以將各月份雨量變化情況轉換為標準分數；(3)參考 IPCC 不確定性處理方式¹³，綜合考慮 1 至 12 月份之標準分數，排除較為極端之雨量情況 (10%推估結果)；(4)依據篩選後推估結果進行情境雨量特性分析。

¹²偏差處理方法係採用 quantile delta mapping (Cannon, 2015)，其主要係考慮氣候變遷對於特定水文變量之特定百分位數所造成之衝擊，可有效保留 ESM 或者 GCM 推估值之衝擊資訊。

¹³針對模式不確定性之處理方式，IPCC 主要係從全部模式推估值中保留模式 90%推估值所涵蓋之非常可能範圍(very likely range)，而排除較為極端 10%之模式推估值。

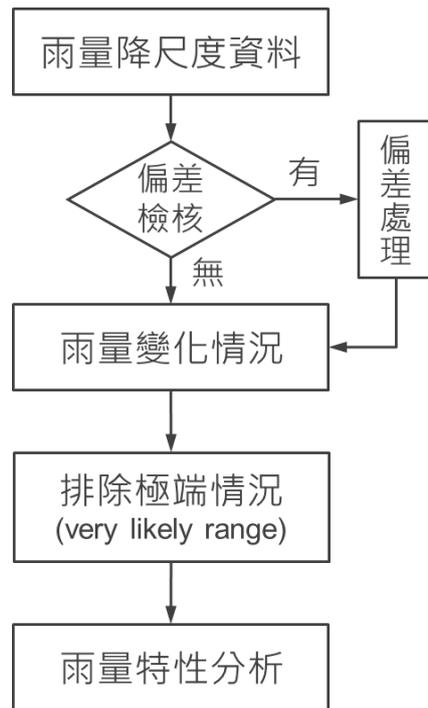


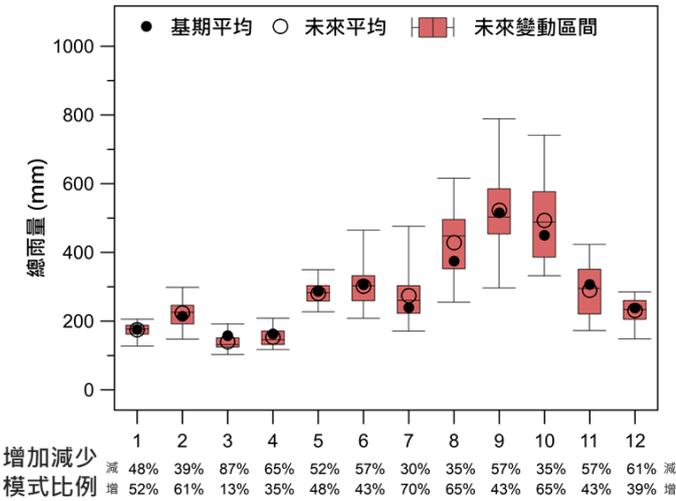
圖 4-6 氣候變遷下臺灣可能情境之降雨量分析流程

(一)基期與未來情境月雨量

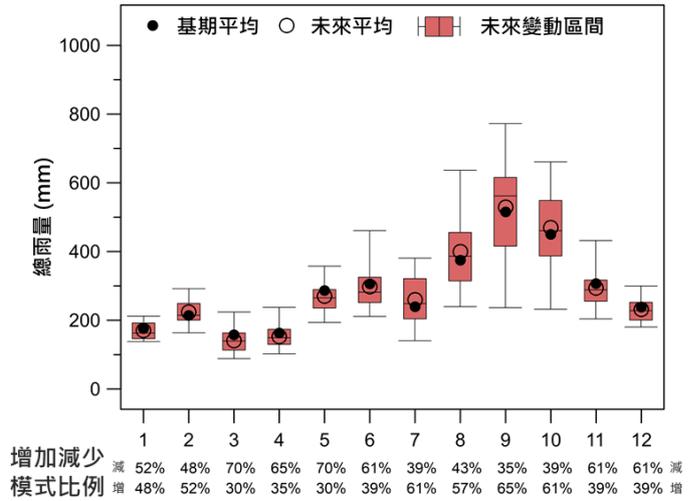
藉由基期與未來情境月雨量分布情形之比較，可瞭解氣候變遷對於淡水河等 10 條水系內重要控制點之雨量衝擊。以 5 處代表集水區(翡翠水庫、石門水庫、士林堰、德基水庫以及曾文水庫集水區)為例，探討 5 種不同氣候變遷情境下情境雨量特性，因氣候變遷資料具有高度不確定性，故採用盒狀圖以呈現其變動區間。圖 4-7 至圖 4-11 為不同氣候變遷情境下 5 處代表集水區月雨量之變化情況與不同氣候變遷情境平均值之比較，圖中實心圓點代表基期時段歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部 ESM 未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個 ESM 未來推估平均值之變動區間，而未來推估結果相較於基期平均值之增減比例則標示於 X 軸下方。其中，氣候變遷情境涵蓋未來短期 SSP2-4.5 情境、未來短期 SSP5-8.5 情境、未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及固定增溫 2°C 條件共計 5 種情境組合。情境雨量分析結果顯示氣候變遷對於 5 處代表集水區雨量造成之衝擊類似，以翡翠水庫集水區分析結果為例：(1)以情境雨量平均值而言，枯水期間之情境雨量平

均值相較於基期平均值多數為略微減少或持平，而豐水期間之情境雨量平均值相較於基期平均值多數則為增加(即空心圓點高於實心圓點)；(2)以情境雨量變動區間而言，無論何種氣候變遷情境，枯水期間之情境雨量變動區間皆較小，而豐水期間之情境雨量變動區間則較大，尤其8至10月份之變動區間明顯大於其他月份(即盒狀圖範圍較大)；(3)以各個月份情境雨量之時間分布型態而言，無論何種氣候變遷情境，情境雨量與基期雨量之時間分布型態皆為類似，雨量主要集中於豐水期間，尤其8至10月雨量最為豐沛，月雨量之時間分布型態在氣候變遷影響下並無明顯變動。

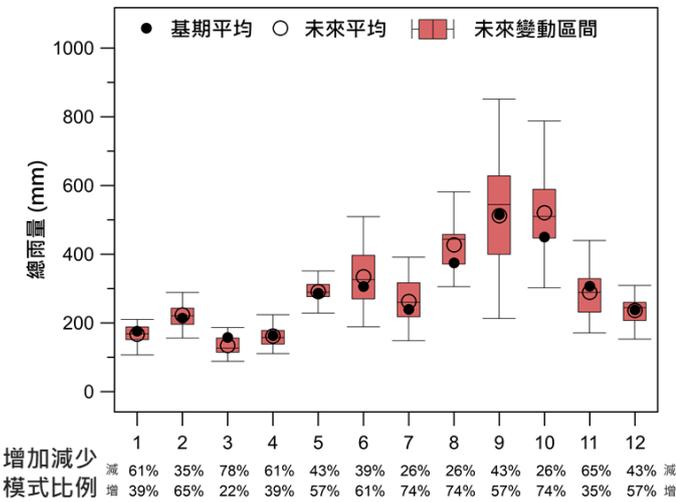
(a) 未來短期SSP2-4.5情境



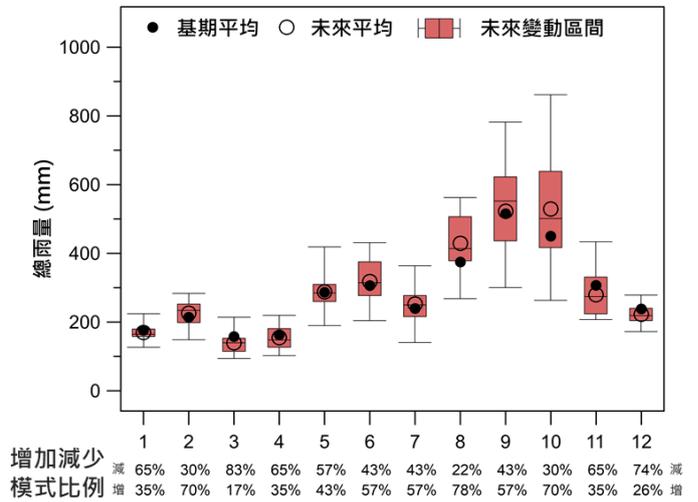
(b) 未來短期SSP5-8.5情境



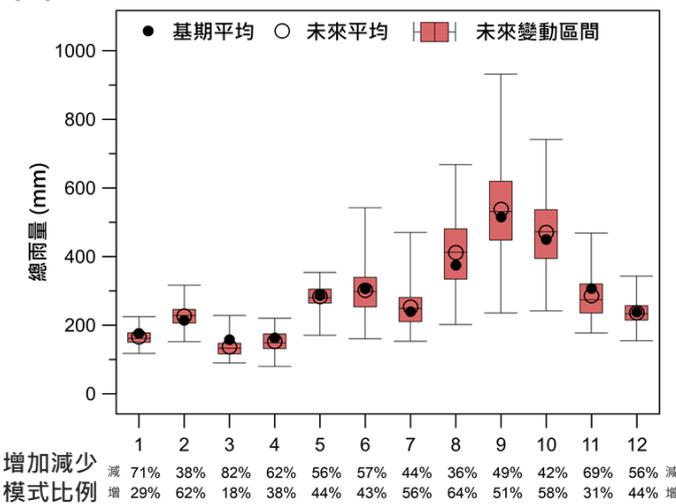
(c) 未來中期SSP2-4.5情境



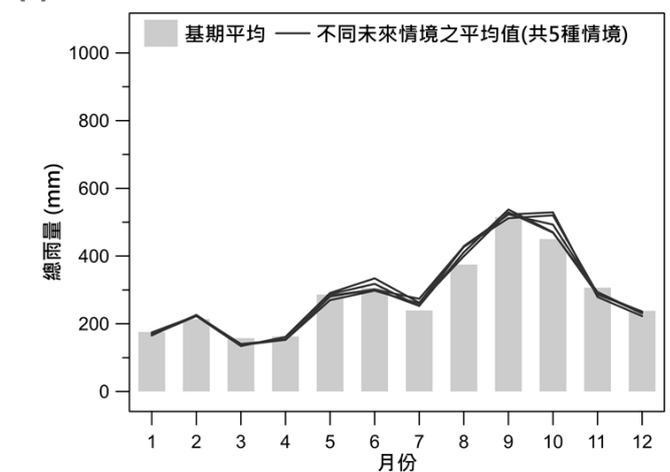
(d) 未來中期SSP5-8.5情境



(e) 固定增溫2°C條件



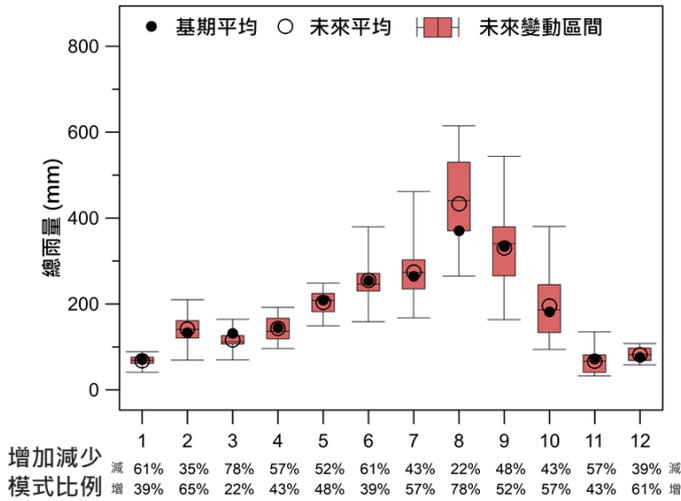
(f) 不同氣候變遷情境平均值之比較



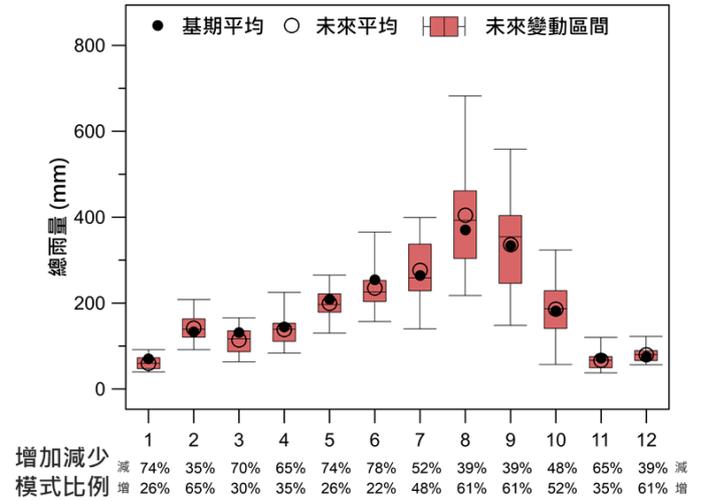
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-7 不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區月雨量之變化情況

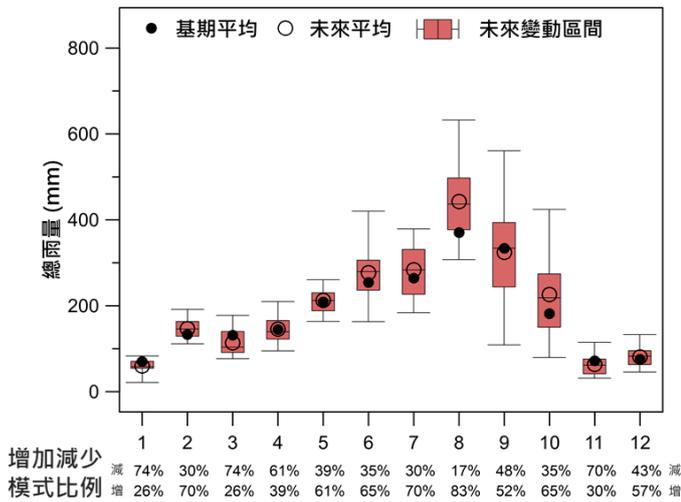
(a) 未來短期SSP2-4.5情境



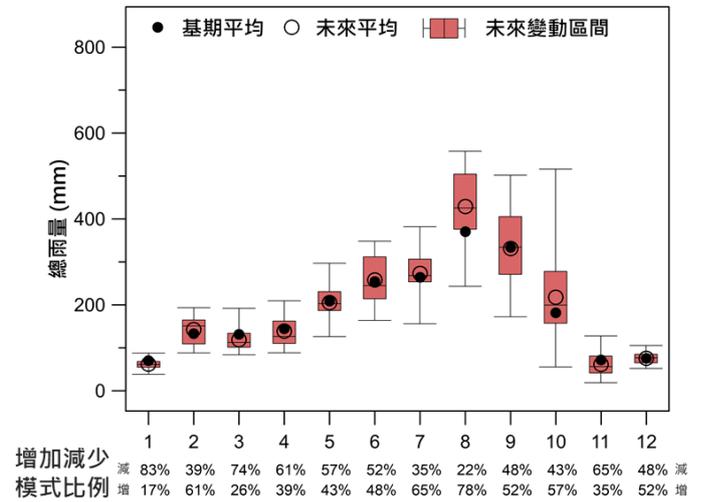
(b) 未來短期SSP5-8.5情境



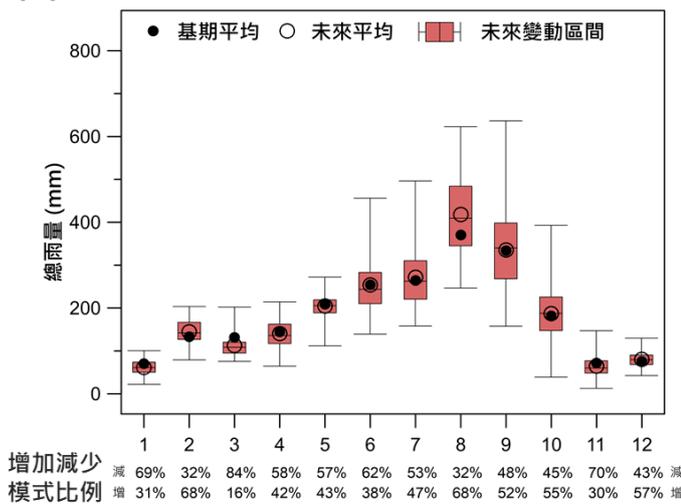
(c) 未來中期SSP2-4.5情境



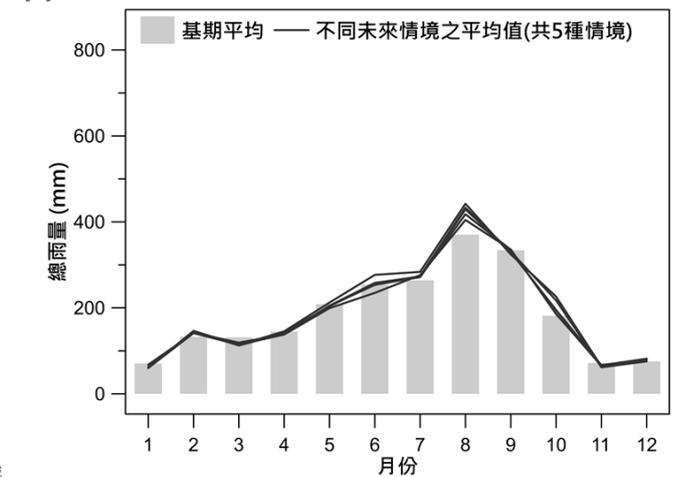
(d) 未來中期SSP5-8.5情境



(e) 固定增溫2°C條件



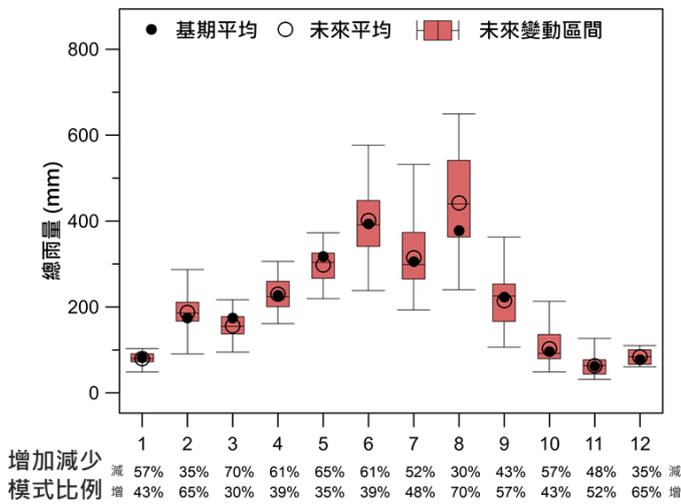
(f) 不同氣候變遷情境平均值之比較



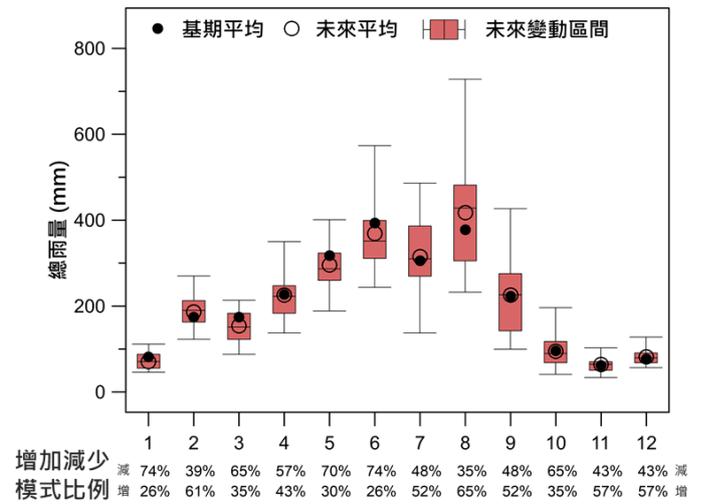
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-8 不同氣候變遷情境下石門水庫集水區月雨量之變化情況

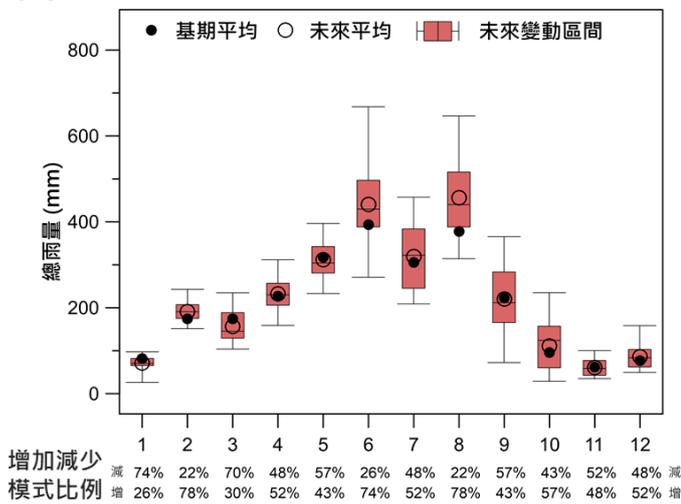
(a) 未來短期SSP2-4.5情境



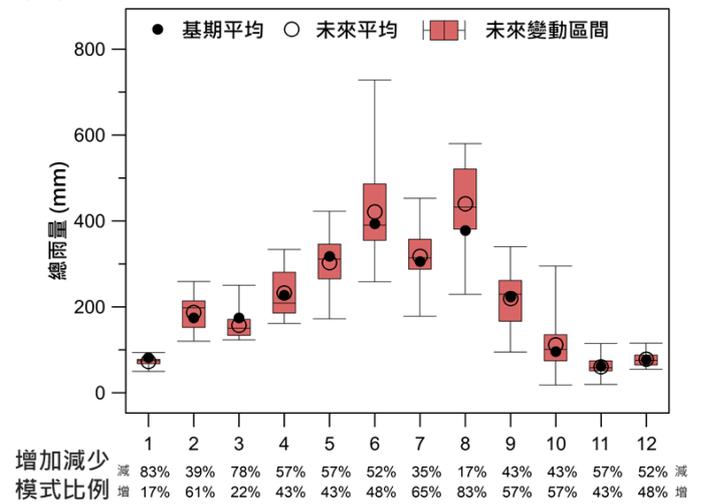
(b) 未來短期SSP5-8.5情境



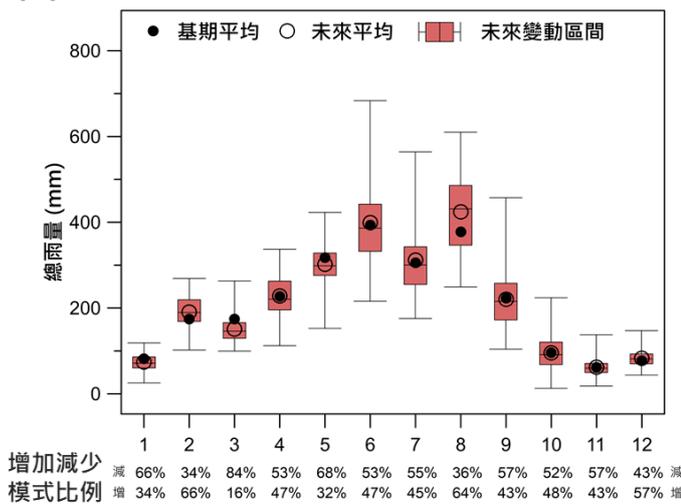
(c) 未來中期SSP2-4.5情境



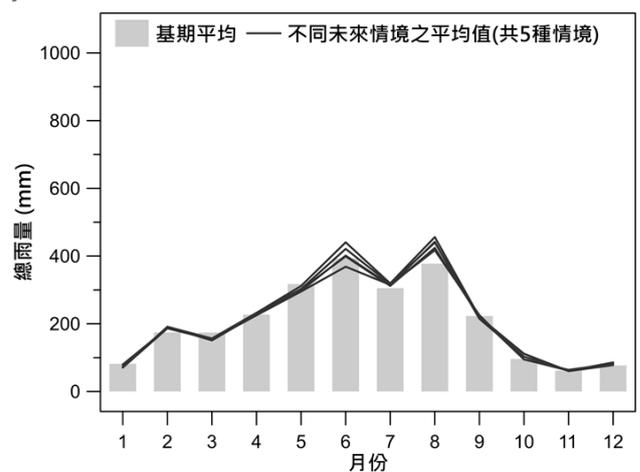
(d) 未來中期SSP5-8.5情境



(e) 固定增溫2°C條件



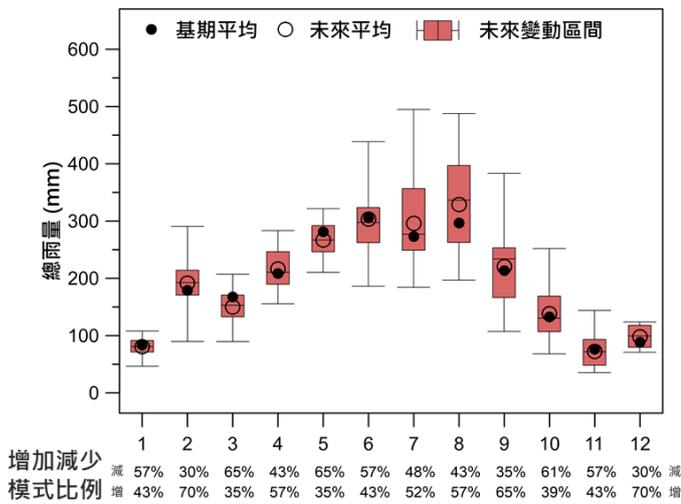
(f) 不同氣候變遷情境平均值之比較



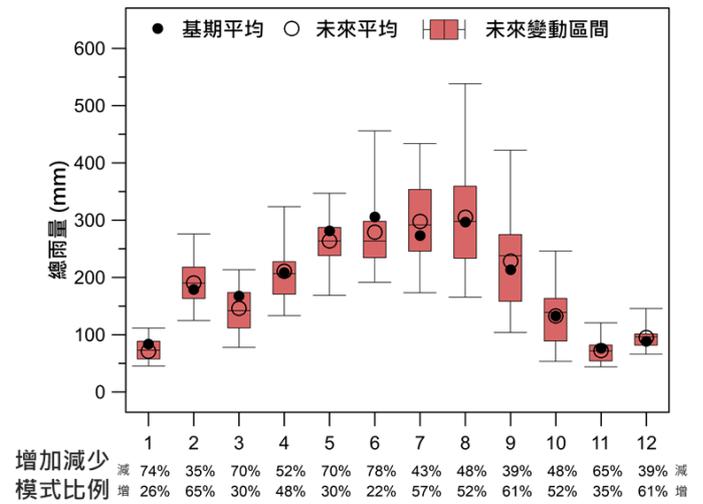
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-9 不同氣候變遷情境下士林堰集水區月雨量之變化情況

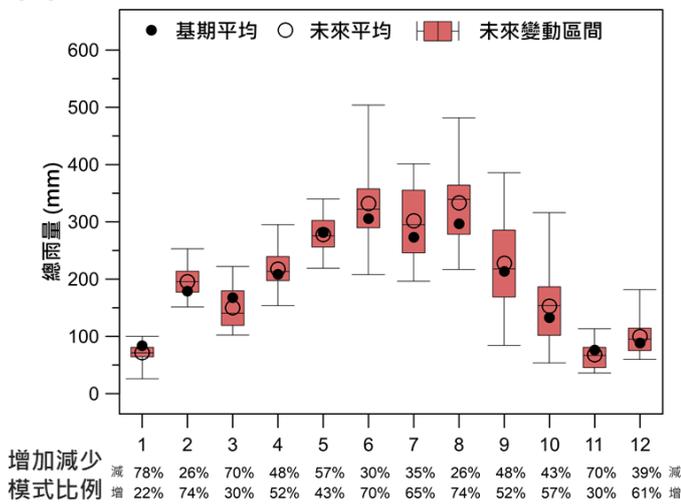
(a) 未來短期SSP2-4.5情境



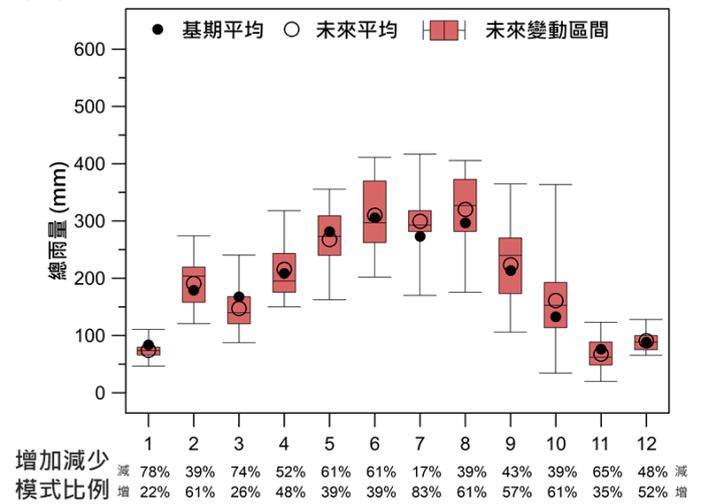
(b) 未來短期SSP5-8.5情境



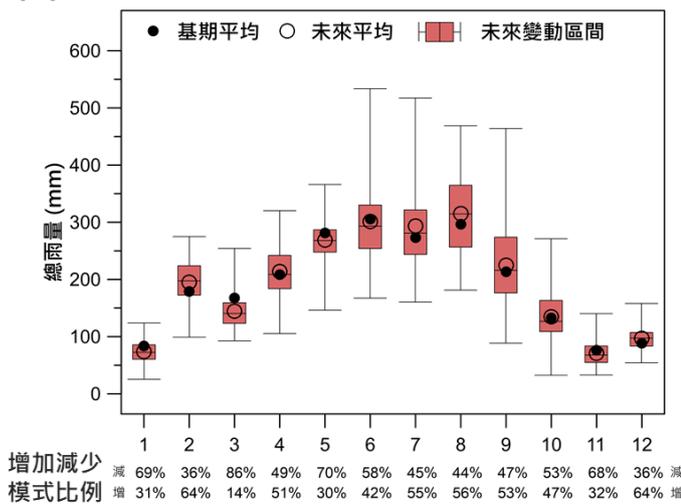
(c) 未來中期SSP2-4.5情境



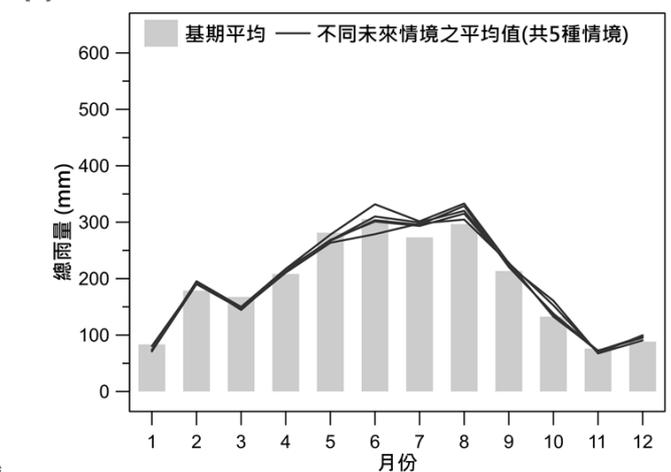
(d) 未來中期SSP5-8.5情境



(e) 固定增溫2°C條件



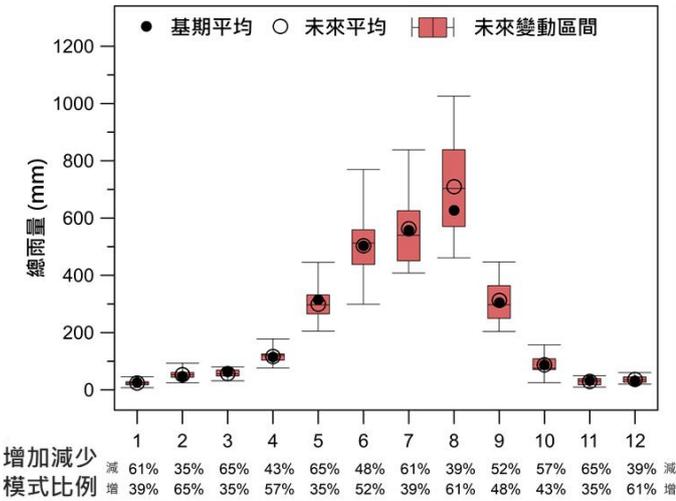
(f) 不同氣候變遷情境平均值之比較



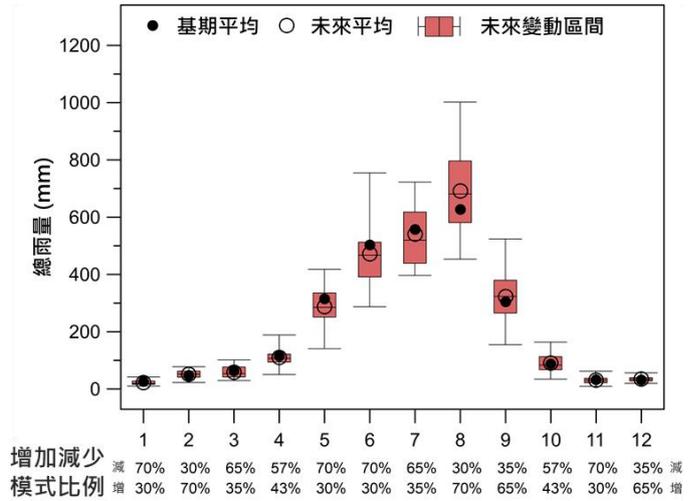
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-10 不同氣候變遷情境下德基水庫集水區月雨量之變化情況

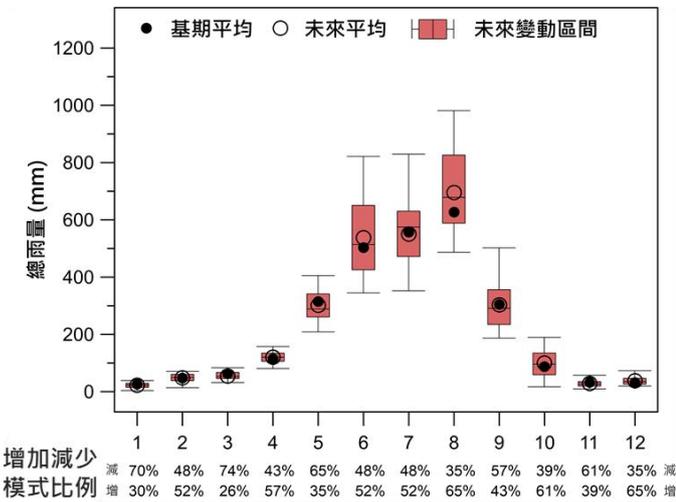
(a) 未來短期SSP2-4.5情境



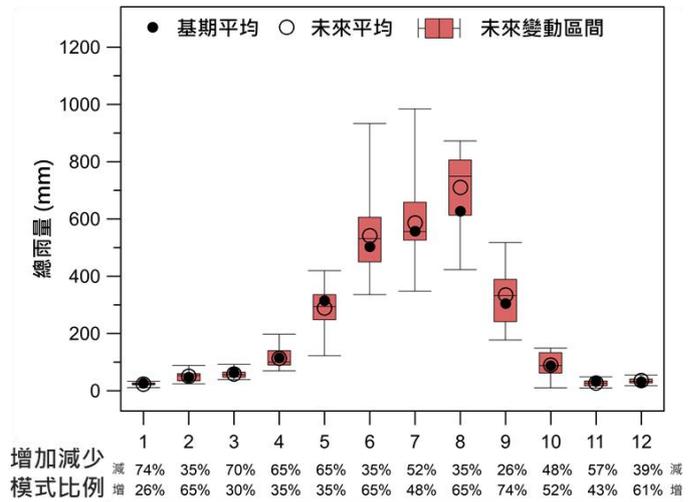
(b) 未來短期SSP5-8.5情境



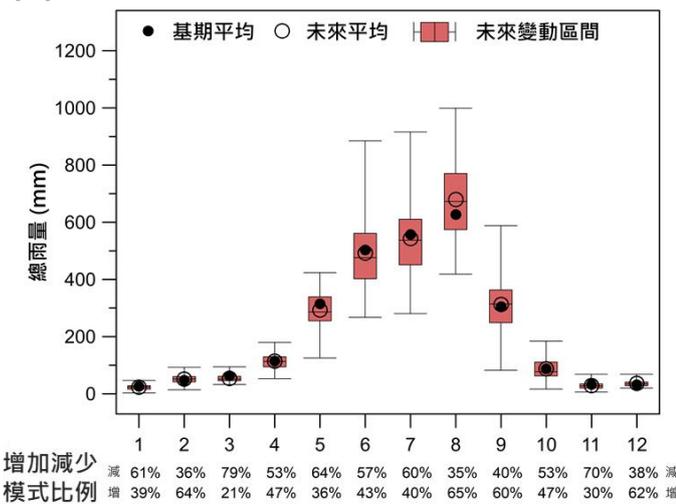
(c) 未來中期SSP2-4.5情境



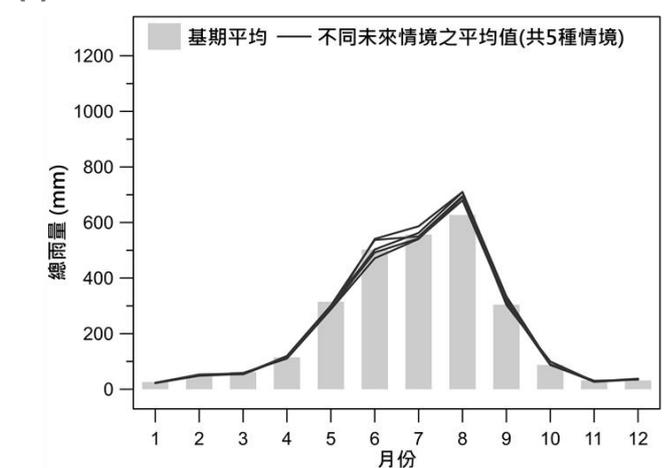
(d) 未來中期SSP5-8.5情境



(e) 固定增溫2°C條件



(f) 不同氣候變遷情境平均值之比較



註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-11 不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區月雨量之變化情況

(二)基期與未來情境季節雨量

基於不同氣候變遷情境下情境雨量推估資料，進一步針對春季、梅雨季、颱風季、秋季以及冬季分析季節雨量增減情況。圖 4-12 至圖 4-16 分別為不同氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及固定增溫 2°C 條件)下 5 處代表集水區之季節雨量分布情況，圖中實心圓點代表基期時段歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部 ESM 未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個 ESM 未來推估平均值之變動區間，而未來推估結果相較於基期平均值之增減比例則標示於 X 軸下方。分析結果指出 5 處代表集水區未來情境季節雨量：(1)未來氣候變遷情境下颱風季之情境季節雨量相較於基期季節雨量有一致的增加情況，而梅雨季之情境季節雨量相較於基期季節雨量則無一致的增減情況，而(2)就情境雨量變異程度(盒狀圖範圍)而言，其變異程度與水文豐枯情況相關，雨量豐沛季節所對應之變異程度較高，5 處代表集水區於颱風季變異程度最大，而梅雨季變異程度則為次大。其中，固定增溫 2°C 條件下颱風季情境雨量之變異程度相較於未來中期 SSP2-4.5 與未來中期 SSP5-8.5 情境下颱風季情境雨量之變異程度皆有明顯增加情況。

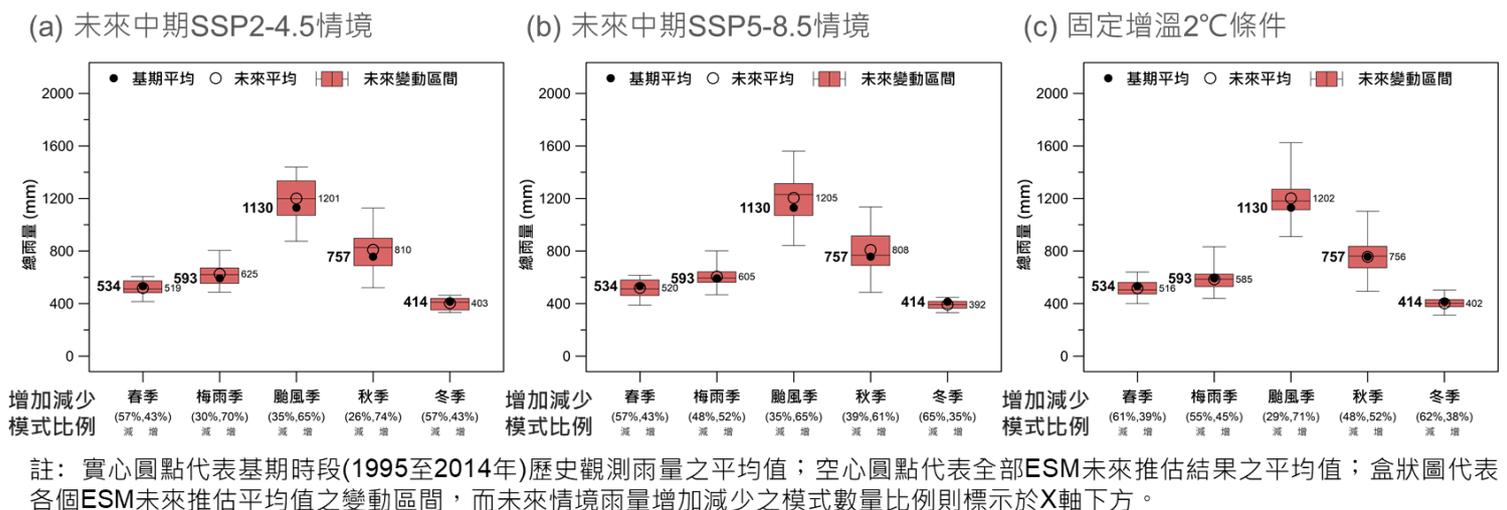
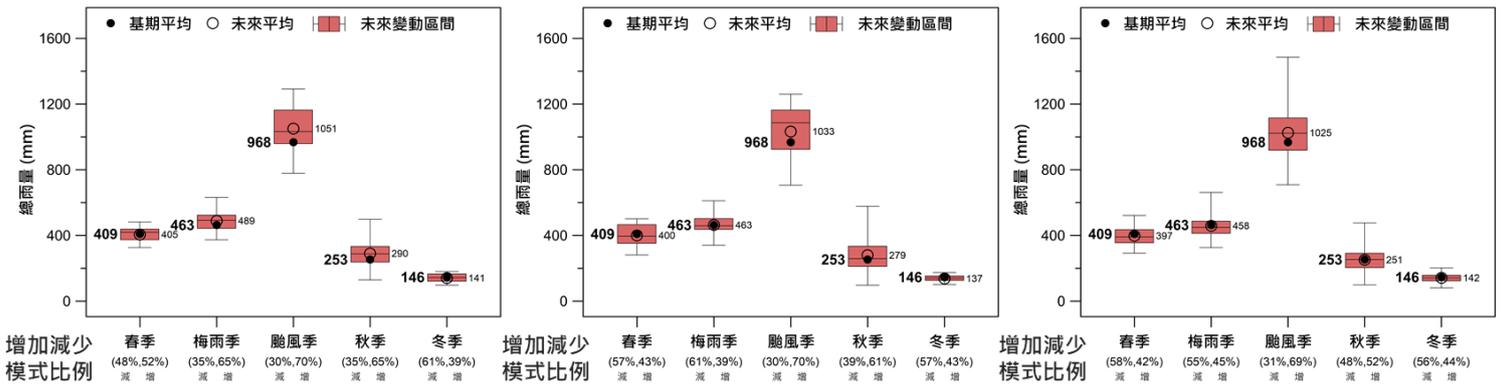


圖 4-12 不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區季節雨量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



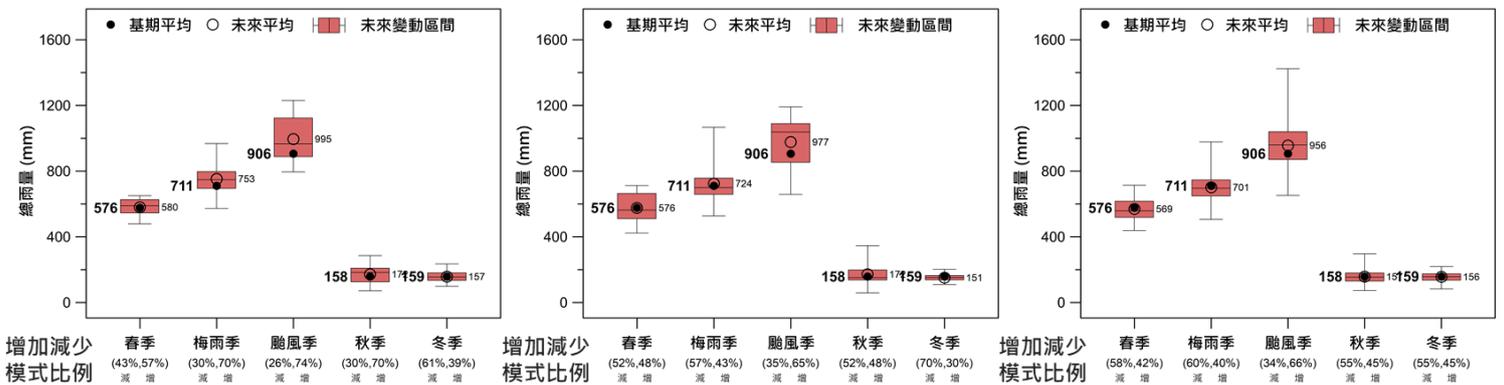
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-13 不同氣候變遷情境下石門水庫集水區季節雨量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



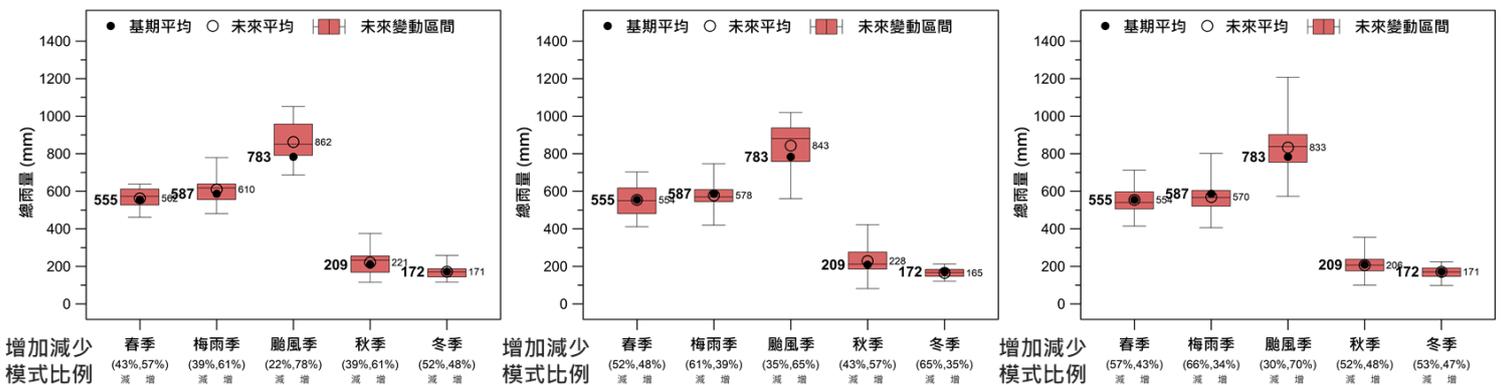
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-14 不同氣候變遷情境下士林堰集水區季節雨量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

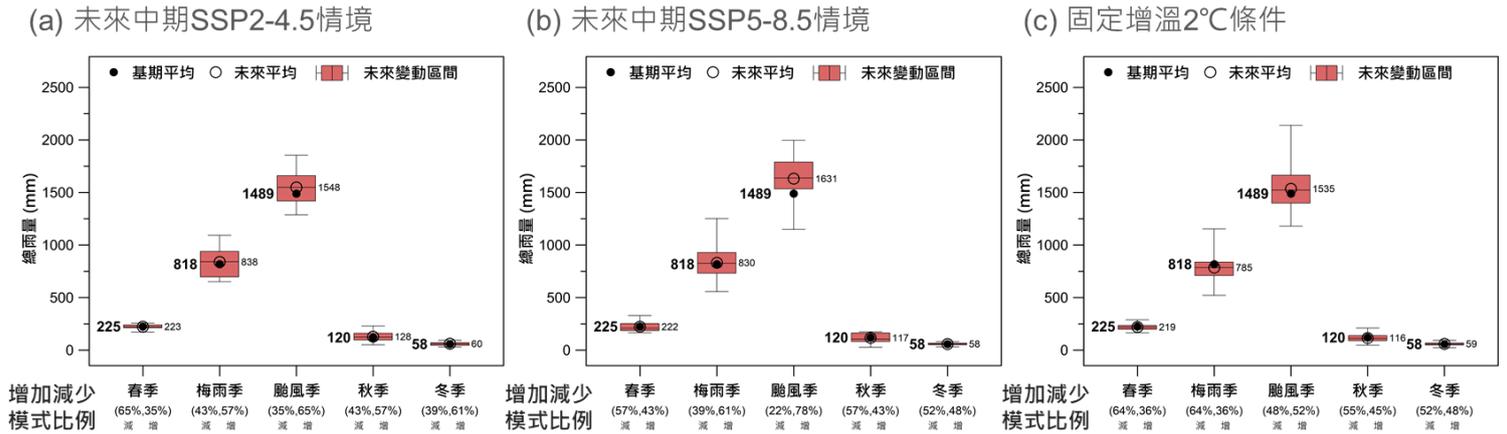
(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-15 不同氣候變遷情境下德基水庫集水區季節雨量之變化情況



註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

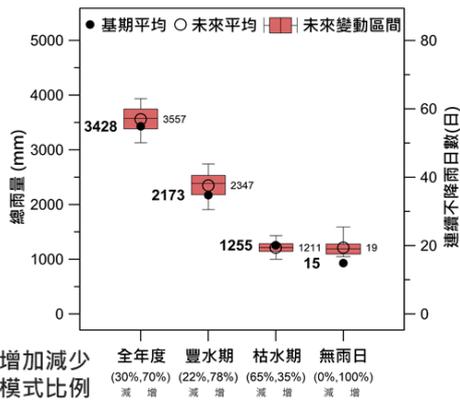
圖 4-16 不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區季節雨量之變化情況

(三)基期與未來情境豐枯雨量

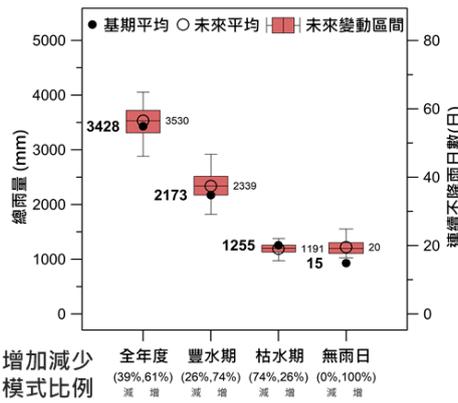
基於不同氣候變遷情境下情境雨量推估資料，進一步針對全年度、豐水期、枯水期以及連續不降雨日數分析¹⁴豐枯雨量特性變化情況。圖 4-17 至圖 4-21 分別為不同氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及固定增溫 2°C 條件)下 5 處代表集水區之豐枯雨量分布情況，圖中實心圓點代表基期時段歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部 ESM 未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個 ESM 未來推估平均值之變動區間，而未來推估結果相較於基期平均值之增減比例則標示於 X 軸下方。分析結果指出 5 處代表集水區未來情境豐枯雨量：(1)未來氣候變遷情境下豐水期雨量相較於基期豐水期雨量有一致的增加情況，未來枯水期雨量相較於基期枯水期雨量多數有減少情況，(2)未來氣候變遷情境下連續不降雨日數相較於基期連續不降雨日數有一致的增加情況，而(3)就情境雨量變異程度(盒狀圖範圍)而言，其變異程度與水文豐枯情況相關，豐水期雨量變異程度較高，而枯水期雨量變異程度則較小。其中，固定增溫 2°C 條件下豐水期雨量之變異程度相較於未來中期 SSP2-4.5 與未來中期 SSP5-8.5 情境下豐水期雨量之變異程度皆有明顯增加情況。

¹⁴連續不降雨日數分析上係參考 WMO 與 TCCIP 作法，採用 1.0 mm 作為門檻值進行無兩日判斷。

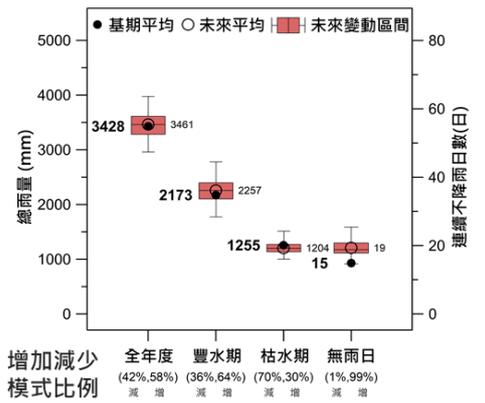
(a) 未來中期SSP2-4.5情境



(b) 未來中期SSP5-8.5情境



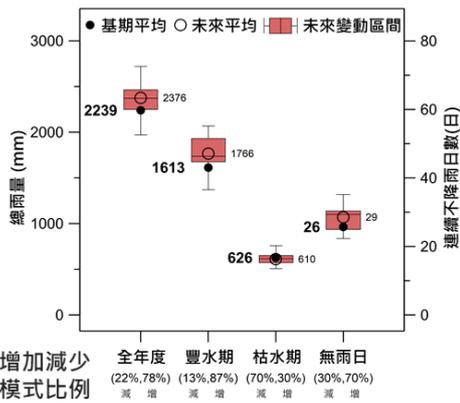
(c) 固定增溫2°C條件



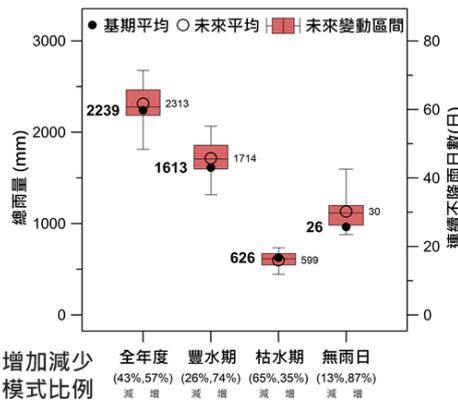
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-17 不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區豐枯雨量之變化情況

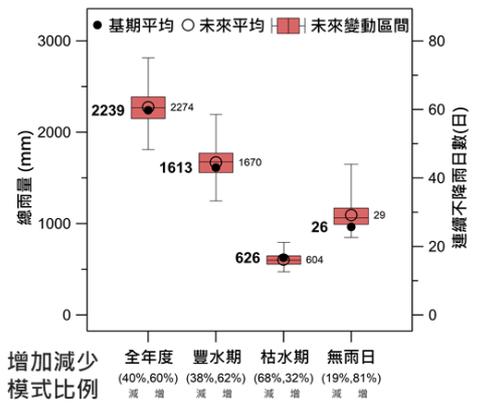
(a) 未來中期SSP2-4.5情境



(b) 未來中期SSP5-8.5情境



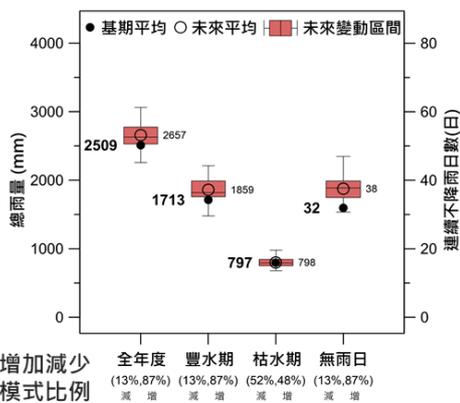
(c) 固定增溫2°C條件



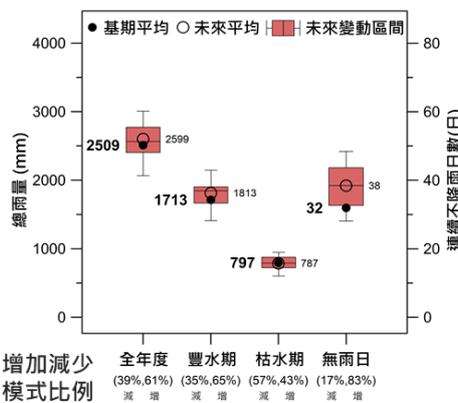
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-18 不同氣候變遷情境下石門水庫集水區豐枯雨量之變化情況

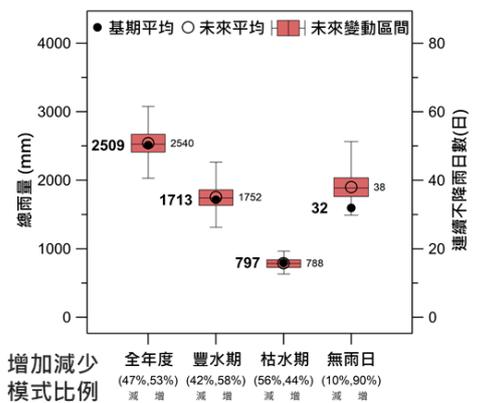
(a) 未來中期SSP2-4.5情境



(b) 未來中期SSP5-8.5情境



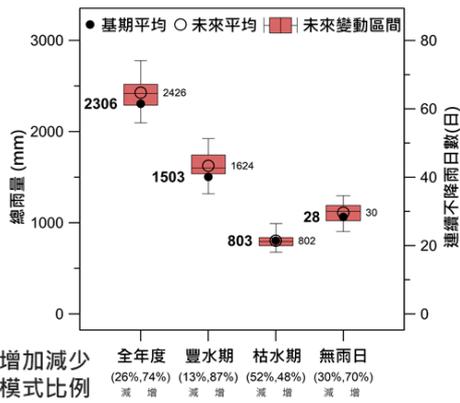
(c) 固定增溫2°C條件



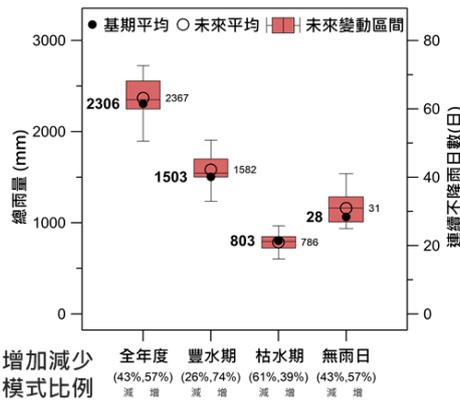
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-19 不同氣候變遷情境下士林堰集水區豐枯雨量之變化情況

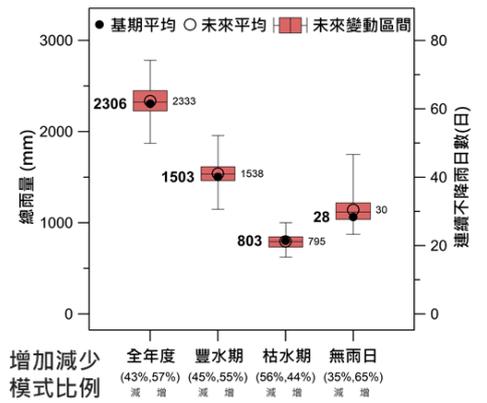
(a) 未來中期SSP2-4.5情境



(b) 未來中期SSP5-8.5情境



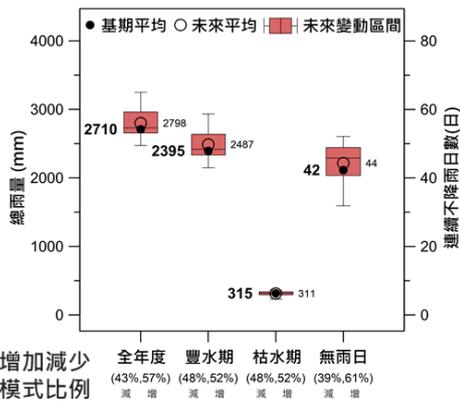
(c) 固定增溫2°C條件



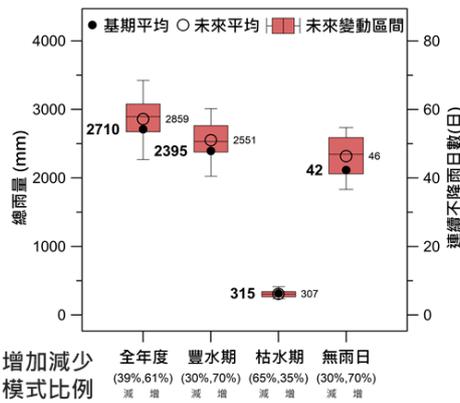
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-20 不同氣候變遷情境下德基水庫集水區豐枯雨量之變化情況

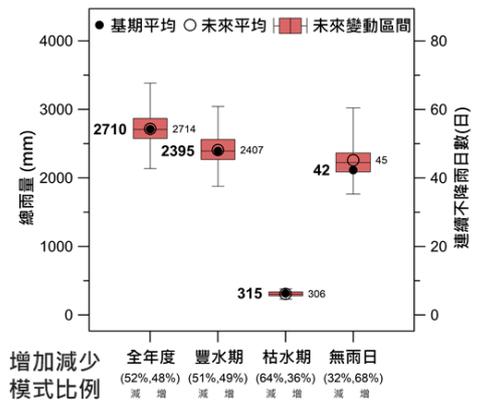
(a) 未來中期SSP2-4.5情境



(b) 未來中期SSP5-8.5情境



(c) 固定增溫2°C條件



註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境雨量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-21 不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區豐枯雨量之變化情況

圖 4-22 至圖 4-24 為臺灣 10 條主要水系於未來中期不同氣候變遷情境下豐水期雨量、枯水期雨量以及連續不降雨日數(日雨量低於 1.0 mm)相較於基期雨量資料之空間變化情況。分析結果顯示：(1)就整體增減情況而言，未來豐水期雨量相較於基期雨量資料有一致的增加情況、未來枯水期雨量則有一致的減少情況以及未來連續不降雨日數有一致的增加情況。(2)就空間上變化情況而言，未來豐水期雨量相較於基期雨量資料在空間上增加幅度有所不同，以北區增加幅度最大，而南區增加幅度則多為較小。其中，3 種未來氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及

固定增溫 2°C 條件) 之中，以未來中期 SSP5-8.5 情境豐水期雨量增加幅度在空間上差異較不顯著，其增幅約落於 6.1% 至 6.5% 左右；未來枯水期雨量有一致的減少情況，但空間上減少幅度有所不同，以北區與南區減少幅度較大，而中區減少幅度則較小；未來連續不降雨日數有一致的增加情況，但空間上增加幅度有所不同，以北區與南區增加幅度最大，而中區增加幅度則為次大。(3) 上述比對分析係基於各區之豐枯增減幅度，若需瞭解氣候變遷影響下豐枯總量之定量衝擊，可依據基期豐枯總量搭配上上述增減幅度進行計算。

表 4-4 為不同氣候變遷情境下臺灣 10 條主要水系之豐枯雨量特性變化，分析結果顯示：就整體增減情況而言，臺灣 10 條主要水系之未來豐水期雨量相較於基期雨量資料有一致的增加情況、未來枯水期雨量則多數有減少情況(僅未來中期 SSP2-4.5 情境下大安溪與八掌溪分別為略微增加與持平情況)以及未來連續不降雨日數有一致的增加情況。

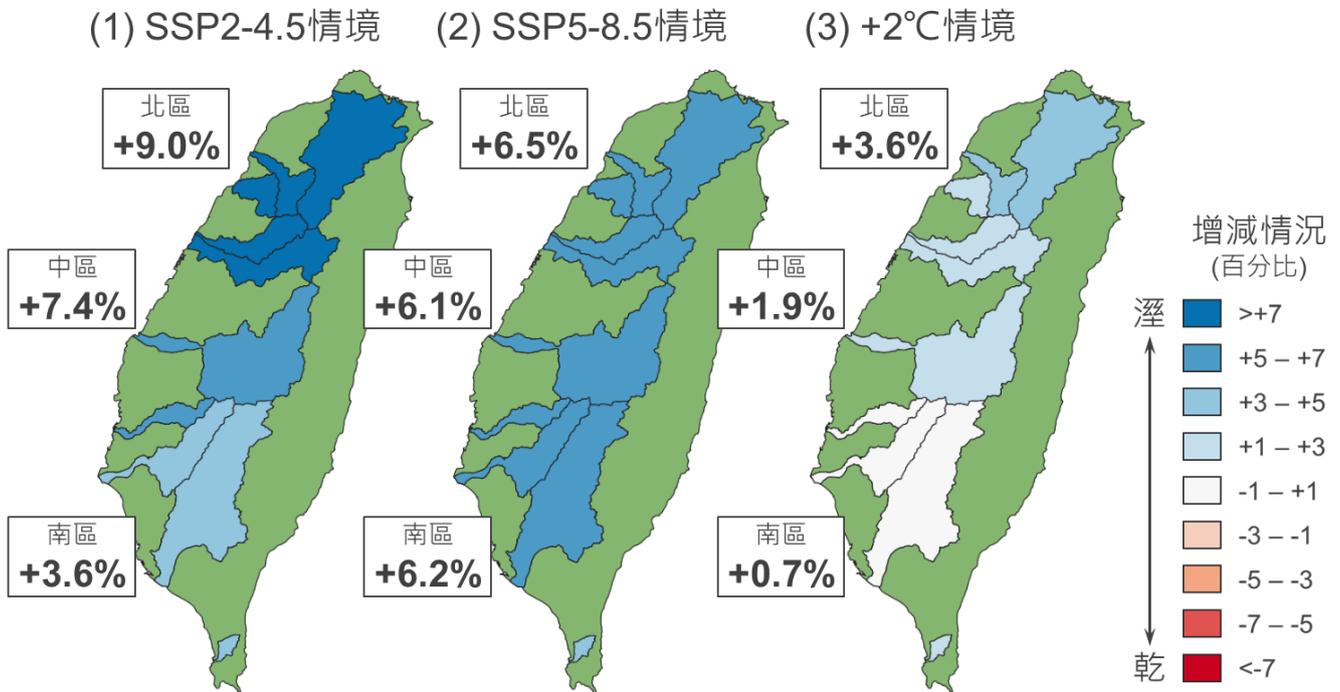


圖 4-22 未來中期不同氣候變遷情境下豐水期雨量增減情況

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境

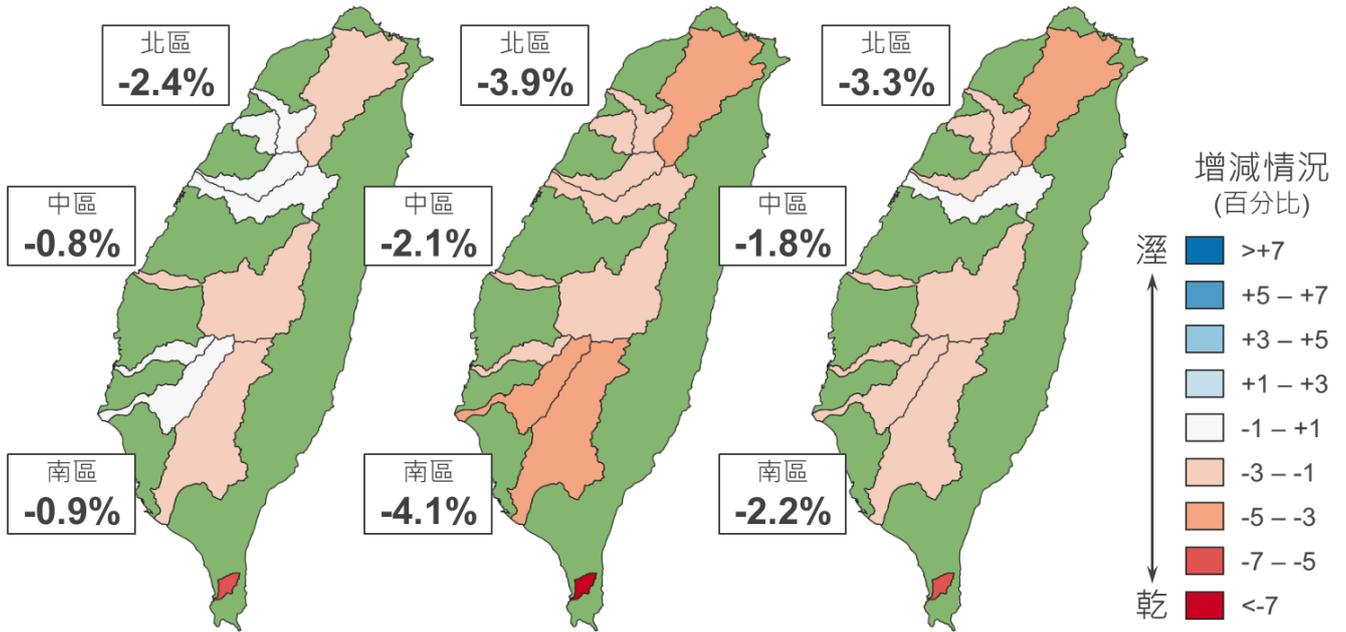


圖 4-23 未來中期不同氣候變遷情境下枯水期雨量增減情況

(1) SSP2-4.5情境 (2) SSP5-8.5情境 (3) +2°C情境

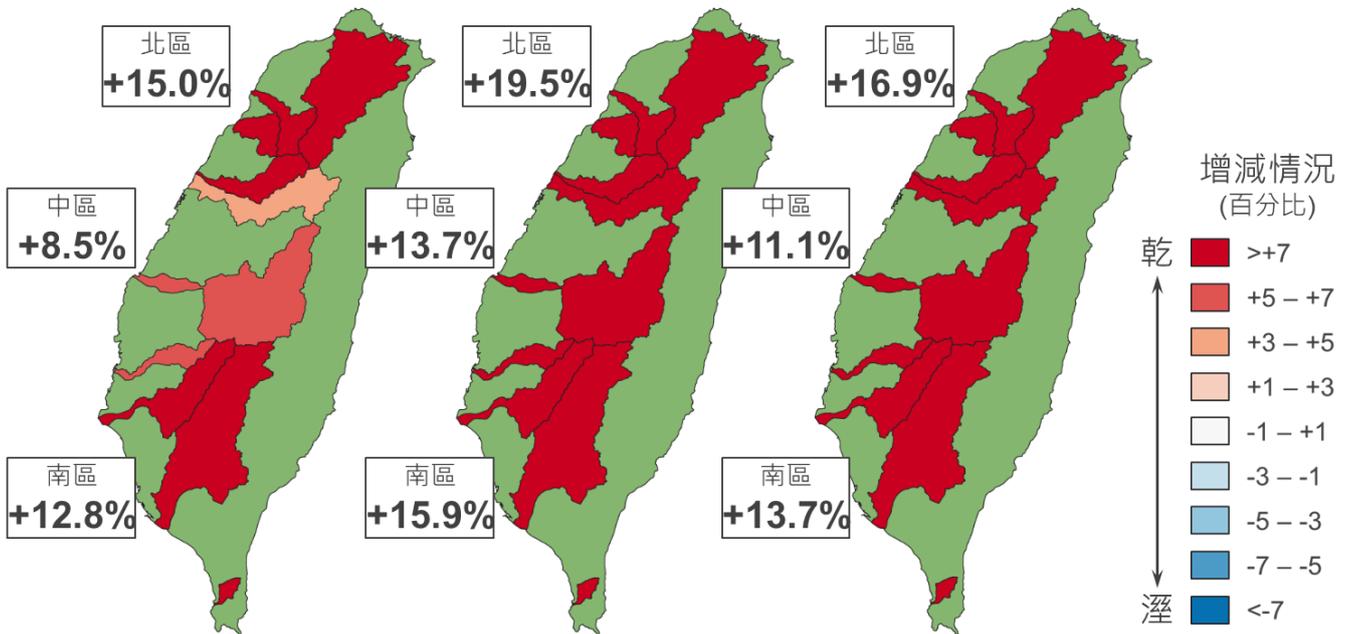


圖 4-24 未來中期不同氣候變遷情境下連續不降雨日數增減情況

表 4-4 不同氣候變遷情境下臺灣 10 條主要水系之豐枯雨量特性變化

水系	未來中期 SSP2-4.5 情境			未來中期 SSP5-8.5 情境			固定增溫 2°C 條件		
	豐水期	枯水期	無雨日	豐水期	枯水期	無雨日	豐水期	枯水期	無雨日
淡水河	9.2	-2.6	14.0	6.5	-4.1	18.4	3.6	-3.5	15.7
頭前溪	7.9	-0.7	22.9	6.7	-2.4	28.2	3.3	-2.1	26.5
中港溪	9.1	-0.2	11.3	6.4	-1.8	16.3	3.0	-1.5	15.8
大安溪	8.6	0.2	16.7	5.9	-1.2	19.3	2.3	-1.1	18.1
大甲溪	8.1	-0.1	4.4	5.2	-2.1	8.9	2.3	-0.9	7.3
濁水溪	6.7	-1.3	6.4	6.2	-2.4	12.5	1.6	-2.3	9.2
八掌溪	5.5	0.0	5.9	6.9	-2.2	8.8	1.0	-1.8	7.3
曾文溪	3.8	-0.1	10.3	5.9	-3.5	13.2	0.8	-1.5	10.7
高屏溪	3.4	-1.1	13.5	6.4	-4.2	16.5	0.6	-2.4	14.4
四重溪	4.7	-5.3	35.5	3.7	-9.6	47.6	2.6	-5.1	38.1
整體平均	6.4	-1.2	11.7	6.2	-3.3	16.0	1.9	-2.3	13.5

註：¹單位：%；²無雨日係指雨量低於 1.0 mm 之日數；³負值另外以灰底註記。

(四)AR6 與 AR5 情境雨量特性之比較

依據上述情境雨量分析結果，整理各區豐枯水期增減幅度並與 AR5 情境雨量分析結果(臺灣各區水資源經理基本計畫，經濟部，民國 110 年)進行比較(圖 4-25)，比較結果顯示：AR6 與 AR5 情境雨量在豐枯變化趨勢上具有一致性，惟兩者於分析過程採用不同氣候變遷資料、期程設定以及模式篩選機制，故造成其增減幅度略有不同。

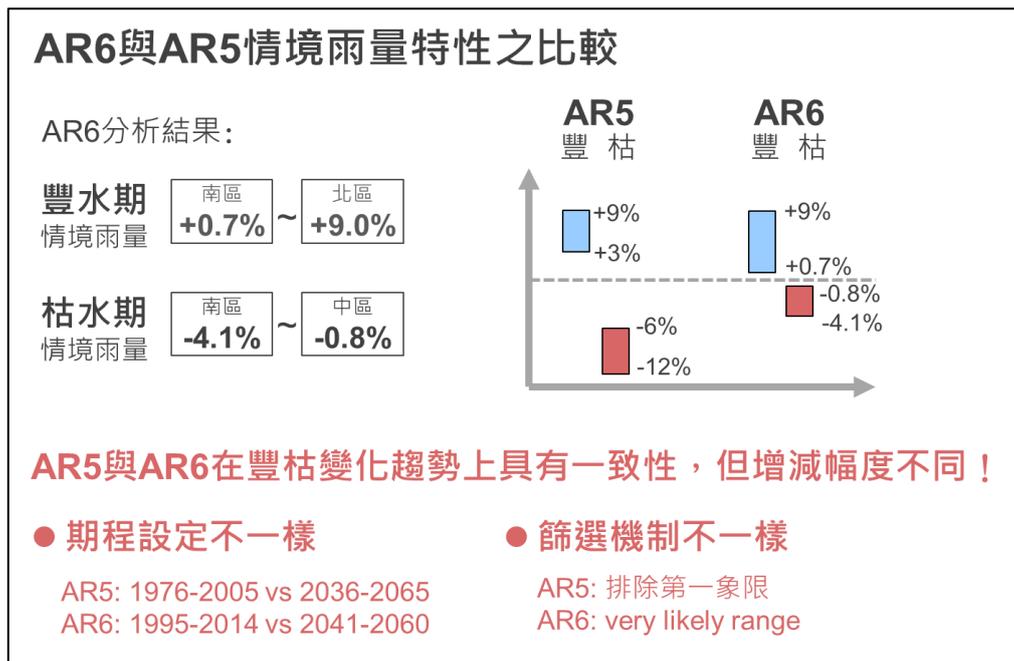


圖 4-25 AR6 與 AR5 情境雨量特性之比較

三、降雨-逕流模式建置與驗證

(一)降雨-逕流模式理論說明

1、修正型 HBV 模式介紹

修正型 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 模式可用於模擬集水區之降雨-逕流機制，經研究證實在臺灣集水區有良好的流量模擬能力(楊道昌與游保杉，民國 86 年；楊道昌，民國 88 年；吳雷根，民國 93 年；李晏全，民國 95 年)。此外，修正型 HBV 模式亦可進一步將氣候變遷情境下雨量與溫度作為輸入資料，模擬出氣候變化對於河川流量之影響。

修正型 HBV 模式為連續型集塊模式，係將集水區降雨-逕流之機制概念化為上、下兩個水桶進行長期逕流量的連續模擬。模式架構包含三個主要部分：(1)土壤含水量作用機制，(2)逕流反應機制，(3)土壤層與上、下水桶之水平衡方程式。以下針對修正型 HBV 模式進行概略說明：

(1)土壤含水量作用部分

由土壤含水量之多寡依下式將降雨量分為提供逕流反應部分之水量與貯蓄於土壤表層之水量，其關係示意圖如圖 4-26 所示。

$$Q_s(t) = \left[\frac{S_{sm}(t)}{FC} \right]^\beta \cdot P(t) \quad (4-15)$$

其中， $Q_s(t)$ 為第 t 日提供逕流反應部分之水量(mm/day)； $P(t)$ 為第 t 日之降雨量(mm/day)； $S_{sm}(t)$ 為第 t 日之土壤含水量(mm)； FC 為田間容水量(mm)，待率定參數； β 為待率定參數。

貯蓄於土壤表層之水量為 $P(t)$ 扣除 $Q_s(t)$ 後之剩餘量，由土壤含水量之多寡依下式計算實際蒸發散量，其關係示意圖亦如圖 4-26 所示。

$$E_a(t) = \begin{cases} E_p(t) \cdot S_{sm}(t-1) / LP & S_{sm}(t-1) \leq LP \\ E_p(t) & S_{sm}(t-1) > LP \end{cases} \quad (4-16)$$

其中， $E_p(t)$ 為第 t 日之潛能蒸發散量(mm/day)； $E_a(t)$ 為第 t 日

之實際蒸發散量(mm/day)； LP 為待率定參數，為實際蒸發散量達潛勢蒸發散量時之土壤含水量，當土壤含水量大於此值時，實際蒸發散量即以潛勢蒸發散量作計算。

蒸發散量的估算部分，主要利用 Hamon 公式計算勢能蒸發散量，只需輸入觀測溫度及日照時數等資料即可，於模式中利用 Hamon 公式計算勢能蒸發散量，以進行模式參數率定。Hamon 公式如下：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{ot}}{T_t + 273} \quad (4-17)$$

其中， PET_t 為第 t 日的勢能蒸發散量(cm/day)； H_t 為第 t 日的日照時數(hr)； e_{ot} 為第 t 日的飽和蒸氣壓(mb)； T_t 為日平均溫度($^{\circ}C$)。飽和蒸氣壓為溫度的函數，可由下式表示：

$$e_{ot} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)]^8 - 0.000019 \times |1.8 \cdot T_t + 48| + 0.001316 \quad (4-18)$$

由於實際蒸發散量估算不易，故導入 C_e 參數以進行勢能蒸發散量之修正(即將勢能蒸發散量乘以 C_e)。

(2) 逕流反應部分

逕流反應部分主要將集水區降雨與逕流之機制概念化為上、下兩個水桶，上層水桶接受提供逕流反應部分之水量(Q_s)，迅速釋放地表逕流與中間流為快速反應層，並部分提供滲漏量到下層水桶。而下層水桶接受來自於上層水桶之滲漏量後，釋出基流量為慢速反應層。由降雨量提供逕流反應部分之水量(Q_s)流入上層水桶後，並依下方公式計算上、下層水桶之出流量，上、下層水桶之出流量和為集水區總出流量。修正型 HBV 模式逕流反應部分之架構如圖 4-27 所示。

$$Q_u(t) = \begin{cases} K_1 \cdot S_{uz}(t) + K_0(S_{uz}(t) - UZL) & S_{uz}(t) > UZL \\ K_1 \cdot S_{uz}(t) & S_{uz}(t) \leq UZL \end{cases} \quad (4-19)$$

$$Q_d(t) = K_2 \cdot S_{lz}(t) \quad (4-20)$$

$$Q(t) = Q_u(t) + Q_d(t) \quad (4-21)$$

其中， $Q_u(t)$ 為第 t 日之上層水桶出流量(mm/day)； $Q_d(t)$ 為第 t

日之下層水桶出流量(mm/day)； $Q(t)$ 為第 t 日之總出流量(mm/day)； $S_{uz}(t)$ 為第 t 日之上層水桶貯蓄量(mm)； $S_{lz}(t)$ 為第 t 日之下層水桶貯蓄量(mm)； UZL 為上層水桶孔口高度(mm)，待率定參數，值越大表示上層水桶之貯蓄能力愈大，釋放至地表逕流量越小； K_0 為上層水桶孔口高度 UZL 之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至地表逕流量越大； K_1 為上層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至中間流量越大； K_2 為下層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示下層水桶釋放至基流量越大。

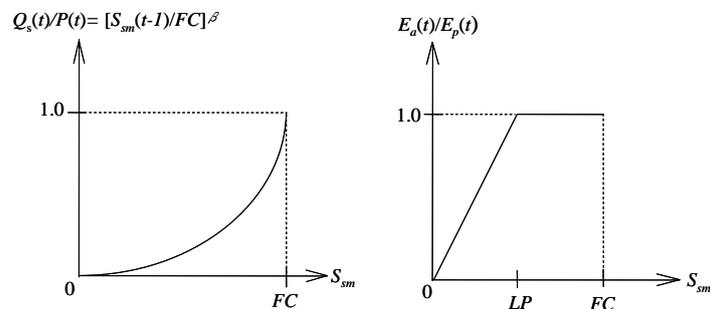


圖 4-26 逕流與蒸發散量受土壤含水量影響關係圖

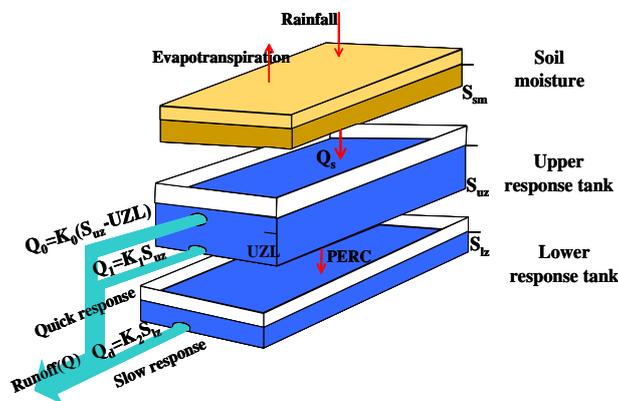


圖 4-27 逕流反應部分之模式架構圖

(3)連續方程式

模式模擬各時段之土壤含水量、上層水桶蓄水量與下層水桶蓄水量之變化，將依下述三個連續方程式進行演算。

$$dS_{sm} / dt = P - Q_s - E_a \quad (4-22)$$

$$dS_{uz} / dt = Q_s - Q_u - PERC \quad (4-23)$$

$$dS_{lz} / dt = PERC - Q_d \quad (4-24)$$

其中，PERC 為上層水桶至下層水桶之滲漏量(mm/day)。

(4) 目標函數與參數最佳化

目標函數於參數率定過程中為引導參數搜尋工具之指標方向，使得各個參數在滿足限制之條件下求取最佳目標值，因此目標函數之設定將直接影響搜尋工具是否能找到適當之參數值。楊道昌與游保杉(民國 86 年)指出模糊多目標函數(fuzzy multi-objective function, FMOF) (Yapo et al., 1998)可針對各個流量階段之目標，定義其可接受之隸屬函數，並利用模糊集理論之觀點，求得同時滿足各個流量階段可接受最大誤差之目標函數。藉由採用 FMOF 為目標函數，配合 Duan et al. (1992)提出的最佳化搜尋法 SCE (shuffled complex evolution method)進行模式參數之率定。模糊多目標函數定義如下：

$$FMOF = 1 - \bigwedge_{i=1}^n \mu(MPE_i) \quad (4-25)$$

$$MPE_i = \frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} \left| \frac{Q_o(t) - Q_s(t)}{Q_o(t)} \times 100\% \right| \quad (4-26)$$

其中， n_i 為流量第 i 階段內之樣本數； $Q_o(t)$ 為第 t 日觀測流量(mm)； $Q_s(t)$ 為第 t 日模擬流量(mm)； MPE_i 為流量第 i 階段內之平均百分比誤差； $\mu(MPE_i)$ 為流量第 i 個階段之平均百分比誤差隸屬函數值； \bigwedge 為取最小值之運算符號。使用上述目標函數之前，利用流量延時曲線將流量範圍適當劃分為 11 個階段，並設定各個流量階段之平均絕對百分比誤差隸屬函數，而其預設起始值為 100%。

2、降雨-逕流模式之評鑑指標

降雨-逕流模式¹⁵之可靠性一般常用體積比(V_r)、均方根誤差($RMSE$)以及相關係數(CC)等作為評鑑指標，針對各個指標之計算方式說明如下：

$$V_r = \frac{\sum_{t=1}^n Q_s(t)}{\sum_{t=1}^n Q_o(t)} \quad (4-27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_s(t) - Q_o(t))^2}{n}} \quad (4-28)$$

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_o(t) - \bar{Q}_o)(Q_s(t) - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_o(t) - \bar{Q}_o)^2 \sum_{t=1}^n (Q_s(t) - \bar{Q}_s)^2}} \quad (4-29)$$

其中， $Q_o(t)$ 為第 t 日觀測流量； $Q_s(t)$ 為第 t 日模擬流量； \bar{Q}_o 為觀測流量之平均； \bar{Q}_s 為模擬流量之平均； n 為總日數。

(二)修正型 HBV 模式參數與效能評估

淡水河等 10 條水系重要控制點之修正型 HBV 模式參數如表 4-5 所示，而各個重要控制點之模式評鑑指標如圖 4-28 與表 4-6 所示。修正型 HBV 模式於 5 處代表集水區之效能分析結果顯示：翡翠水庫集水區之體積比約為 0.83、均方根誤差約為 10.04 mm/day 以及相關係數約為 0.89；石門水庫集水區之體積比約為 1.09、均方根誤差約為 7.91 mm/day 以及相關係數約為 0.86；士林堰集水區之體積比約為 1.07、均方根誤差約為 8.14 mm/day 以及相關係數約為 0.77；德基水庫集水區之體積比約為 1.07、均方根誤差約為 4.64 mm/day 以及相關係數約為 0.83；而曾文水庫集水區之體積比約為 0.88、均方根誤差約為 10.55 mm/day 以及相關係數約為 0.92。整體而言，修正型 HBV 模式於淡水河等 10 條水系重要控制點之模擬

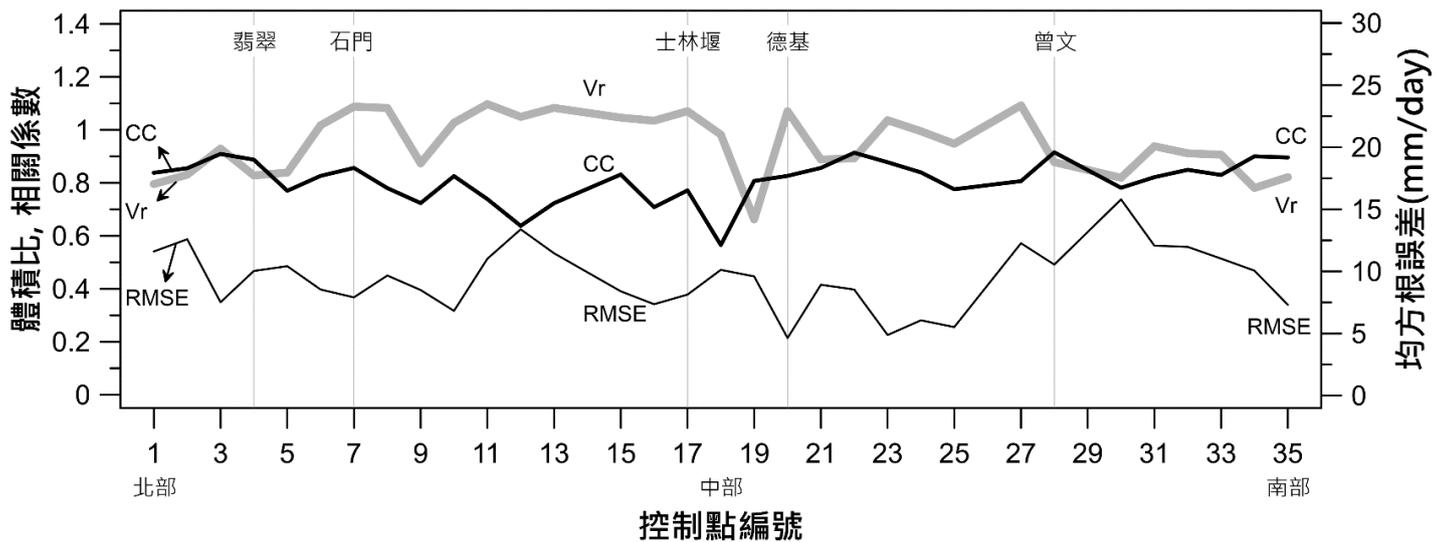
¹⁵修正型 HBV 模式與 GWLF 模式皆為臺灣常用之降雨-逕流模式，修正型 HBV 模式需配合率定驗證方式決定模式參數(9 個)，而 GWLF 模式則屬於物理型模式無需透過率定驗證方式即可決定模式參數(2 個)。兩種模式於臺灣 10 條主要水系之降雨-逕流模擬之綜合評估結果顯示：GWLF 模式在參數決定上快速且表現良好，但修正型 HBV 模式因模式參數(9 個)較多且導入參數最佳化程序，其在降雨-逕流模擬上整體表現較佳，故於降雨-逕流模擬上以修正型 HBV 模式為主。

表現良好，其體積比平均值約為 0.95、均方根誤差平均值約為 9.46 mm/day 以及相關係數平均值約為 0.81。

表 4-5 淡水河等 10 條水系重要控制點之修正型 HBV 模式參數

編號	控制點	FC (mm)	β (-)	LP/FC (-)	PERC (mm)	UZL (mm)	K_0 (day ⁻¹)	K_1 (day ⁻¹)	K_2 (day ⁻¹)	C_e (-)
CP01	五堵	126.421	8.346	0.325	1.923	46.525	0.334	0.302	0.065	0.111
CP02	介壽橋(1)	270.170	7.543	0.761	1.675	52.425	0.435	0.312	0.095	0.000
CP03	寶橋	147.085	3.732	0.402	11.184	50.352	0.458	0.251	0.078	0.219
CP04	翡翠水庫	234.861	6.606	0.447	15.019	69.676	0.436	0.226	0.154	0.256
CP05	橫溪	322.965	3.418	0.731	9.914	54.635	0.356	0.246	0.095	0.114
CP06	三峽堰	226.169	4.764	0.454	10.252	82.762	0.298	0.202	0.042	0.167
CP07	石門水庫	225.138	5.521	0.748	6.395	60.443	0.312	0.121	0.025	0.059
CP08	霞雲	211.806	6.572	0.426	9.833	63.551	0.230	0.130	0.046	0.000
CP09	稜角	225.253	5.635	0.564	12.054	193.995	0.167	0.095	0.042	0.188
CP10	玉峰(馬利哥灣)	207.094	8.654	0.413	14.352	34.102	0.183	0.086	0.062	0.375
CP11	秀巒	143.018	8.282	0.219	7.627	57.492	0.119	0.130	0.025	0.270
CP12	內灣	294.985	9.167	0.161	3.553	32.410	0.183	0.093	0.126	0.000
CP13	上坪	78.182	6.477	0.171	8.028	19.246	0.235	0.026	0.087	0.000
CP15	永興橋	302.026	6.043	0.661	8.816	106.585	0.327	0.173	0.032	0.357
CP16	象鼻(3)	203.331	3.211	0.487	16.693	57.359	0.174	0.068	0.053	0.105
CP17	士林攔河堰	184.217	7.039	0.729	11.907	85.296	0.125	0.099	0.039	0.190
CP18	雪山坑	79.265	5.446	0.450	9.947	106.080	0.021	0.077	0.030	0.100
CP19	鯉魚潭水庫	148.898	9.999	0.823	20.000	199.999	0.286	0.487	0.500	0.616
CP20	德基水庫	29.825	1.636	0.814	8.528	75.054	0.115	0.099	0.022	1.998
CP21	霧社水庫	247.061	7.703	0.573	11.993	50.459	0.268	0.138	0.096	0.000
CP22	桶頭攔河堰	399.947	5.302	0.599	6.678	112.437	0.469	0.164	0.038	0.526
CP23	玉峰橋	140.407	7.226	0.700	6.897	120.375	0.227	0.080	0.011	0.479
CP24	內茅埔	215.389	3.203	0.782	6.046	104.651	0.165	0.086	0.020	0.187
CP25	栗栖壩	188.777	3.318	0.547	8.926	27.226	0.209	0.040	0.050	0.000
CP27	觸口	84.462	5.711	0.659	13.007	161.603	0.509	0.123	0.054	0.075
CP28	曾文水庫	399.978	4.468	0.729	5.022	74.806	0.494	0.182	0.045	0.519
CP30	玉田	389.169	1.000	0.965	9.407	90.252	0.567	0.110	0.026	1.725
CP31	左鎮	357.581	1.017	0.935	5.708	43.009	0.456	0.261	0.061	0.469
CP32	南化水庫	319.425	1.000	0.296	2.316	110.461	0.551	0.301	0.048	0.635
CP33	甲仙攔河堰	316.859	4.593	0.633	7.371	91.298	0.279	0.128	0.040	0.000
CP34	高屏溪攔河堰	255.225	2.993	0.532	6.031	174.713	0.299	0.170	0.022	0.553
CP35	牡丹水庫	102.093	1.193	0.712	6.617	34.585	0.295	0.280	0.069	1.070

註：修正型 HBV 模式參數率定所採用水文資料年限為 1960 至 2018 年期間之日尺度雨量、溫度以及流量資料。



註：線段呈現係僅用於標示出各個重要控制點之評鑑指標，以方便快速辨識其差異，無法代表控制點間之趨勢。

圖 4-28 修正型 HBV 模式於淡水河等 10 條水系重要控制點之評鑑指標

表 4-6 淡水河等 10 條水系重要控制點之評鑑指標數值

編號	控制點	體積比 (-)	相關係數 (-)	均方根 誤差 (mm/day)	編號	控制點	體積比 (-)	相關係數 (-)	均方根 誤差 (mm/day)
CP01	五堵	0.80	0.84	11.61	CP18	雪山坑	0.98	0.57	10.13
CP02	介壽橋(1)	0.83	0.86	12.59	CP19	鯉魚潭水庫	0.66	0.81	9.60
CP03	寶橋	0.93	0.91	7.52	CP20	德基水庫	1.07	0.83	4.64
CP04	翡翠水庫	0.83	0.89	10.04	CP21	霧社水庫	0.89	0.86	8.93
CP05	橫溪	0.84	0.77	10.42	CP22	桶頭攔河堰	0.89	0.91	8.54
CP06	三峽堰	1.02	0.83	8.55	CP23	玉峰橋	1.04	0.88	4.88
CP07	石門水庫	1.09	0.86	7.91	CP24	內茅埔	0.99	0.84	6.06
CP08	霞雲	1.08	0.78	9.67	CP25	栗栖壩	0.95	0.78	5.52
CP09	稜角	0.87	0.72	8.50	CP27	觸口	1.09	0.81	12.27
CP10	玉峰(馬利哥灣)	1.03	0.83	6.83	CP28	曾文水庫	0.88	0.92	10.55
CP11	秀巒	1.10	0.74	11.03	CP30	玉田	0.82	0.78	15.80
CP12	內灣	1.05	0.64	13.39	CP31	左鎮	0.94	0.82	12.08
CP13	上坪	1.08	0.72	11.46	CP32	南化水庫	0.91	0.85	11.97
CP15	永興橋	1.05	0.83	8.40	CP33	甲仙攔河堰	0.91	0.83	11.03
CP16	象鼻(3)	1.03	0.71	7.36	CP34	高屏溪攔河堰	0.78	0.90	10.06
CP17	士林攔河堰	1.07	0.77	8.14	CP35	牡丹水庫	0.82	0.90	7.31

四、氣候變遷下臺灣可能情境之流量分析

氣候變遷下臺灣可能情境之流量分析流程如圖 4-29 所示，其流程為：(1)承接情境雨量分析資料，將基期與未來情境雨量資料作為降雨-逕流模式輸入，以模擬基期與未來流量資料；(2)比對基期觀測與基期模擬流量資料之統計特性，藉以檢核流量模擬資料是否具有偏差，在無偏

差情況下可進行後續分析，若具有偏差則需先加以處理¹⁶；(3)採用偏差檢核處理後流量資料進行特性分析，以瞭解氣候變遷對於流量資料造成之衝擊。

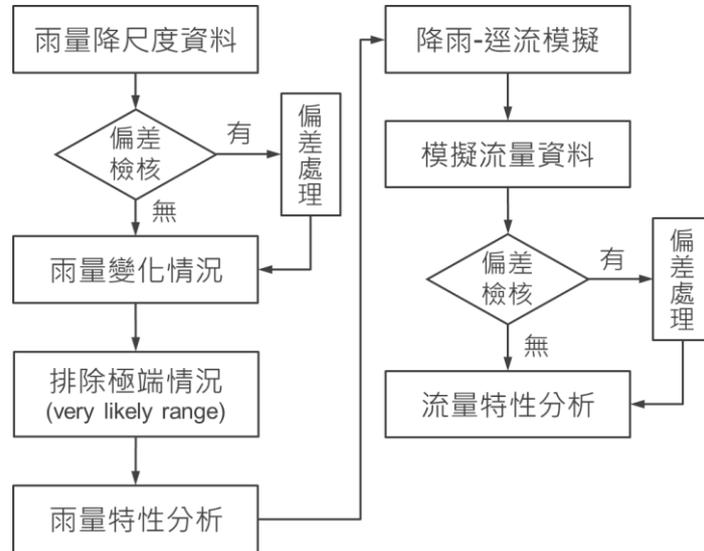


圖 4-29 氣候變遷下臺灣可能情境流量之分析流程

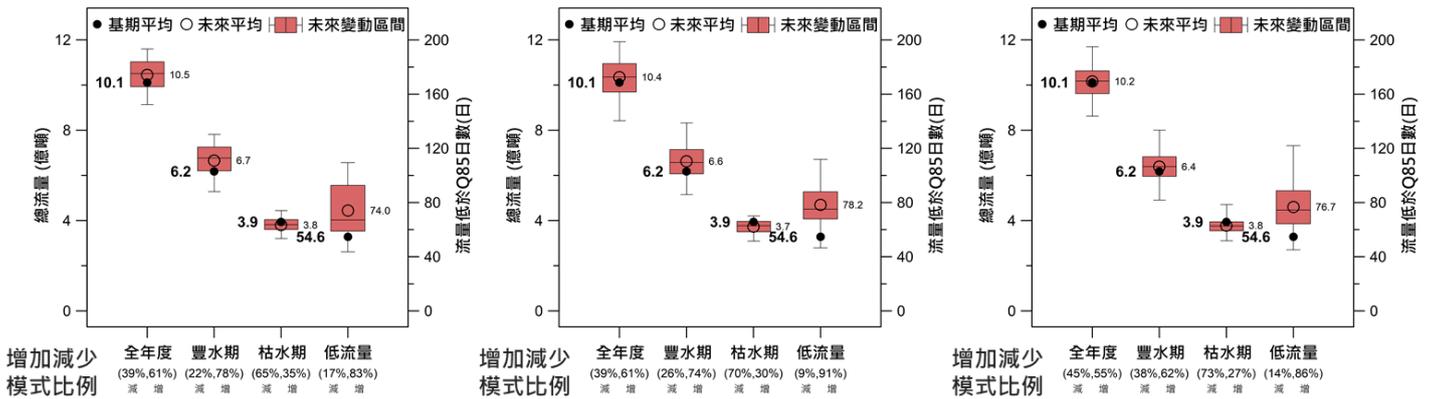
圖 4-30 至圖 4-34 分別為不同氣候變遷情境(未來中期 SSP2-4.5 情境、未來中期 SSP5-8.5 情境以及固定增溫 2°C 條件)下 5 處代表集水區之豐枯流量分布情況，圖中實心圓點代表基期時段歷史觀測雨量之平均值；空心圓點代表全部 ESM 未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個 ESM 未來推估平均值之變動區間，而未來推估結果相較於基期平均值之增減比例則標示於 X 軸下方。分析結果指出 5 處代表集水區未來情境豐枯流量：(1)未來氣候變遷情境下豐水期流量相較於基期豐水期流量多數有增加情況，未來枯水期流量相較於基期枯水期流量多數有減少情況，(2)未來氣候變遷情境下流量未達 Q85 日數相較於基期流量未達 Q85 日數有一致的增加情況，而(3)就情境雨量變異程度(盒狀圖範圍)而言，其變異程度與水文豐枯情況相關，豐水期流量變異程度較高，而枯水期流量變異程度則較小，其愈往南部變異程度有愈小之情況。其中，固定增溫 2°C 條件下豐水期流量之變異程度相較於未來中期 SSP2-4.5 與未來中期 SSP5-8.5 情境下豐水期流量之變異程度皆有明顯增加情況。

¹⁶偏差處理方法係採用 quantile delta mapping (Cannon, 2015)，其主要係考慮氣候變遷對於特定水文變量之特定百分位數所造成之衝擊，可有效保留 ESM 推估值之衝擊資訊。

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



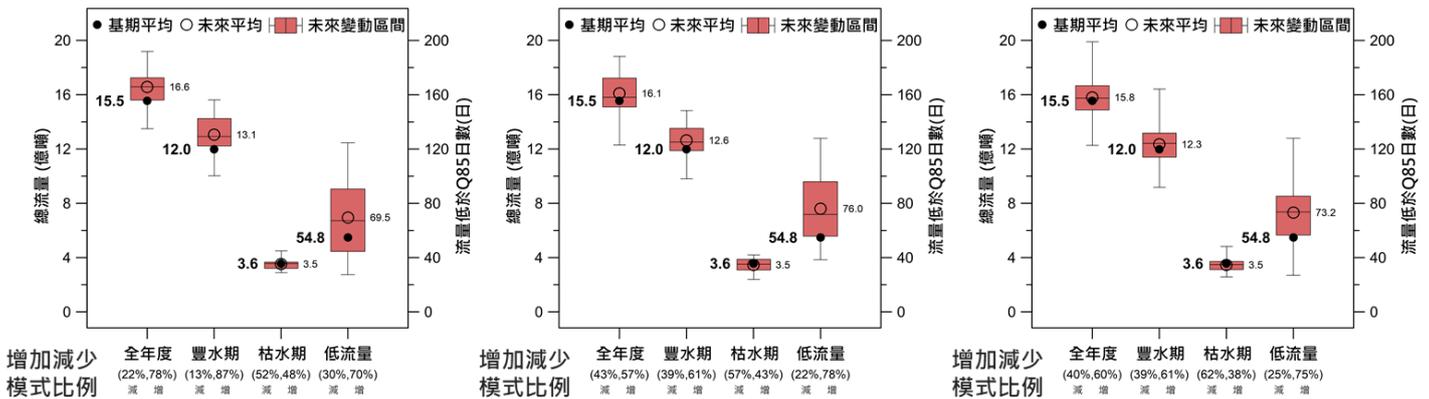
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測流量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境流量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-30 不同氣候變遷情境下翡翠水庫集水區豐枯流量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



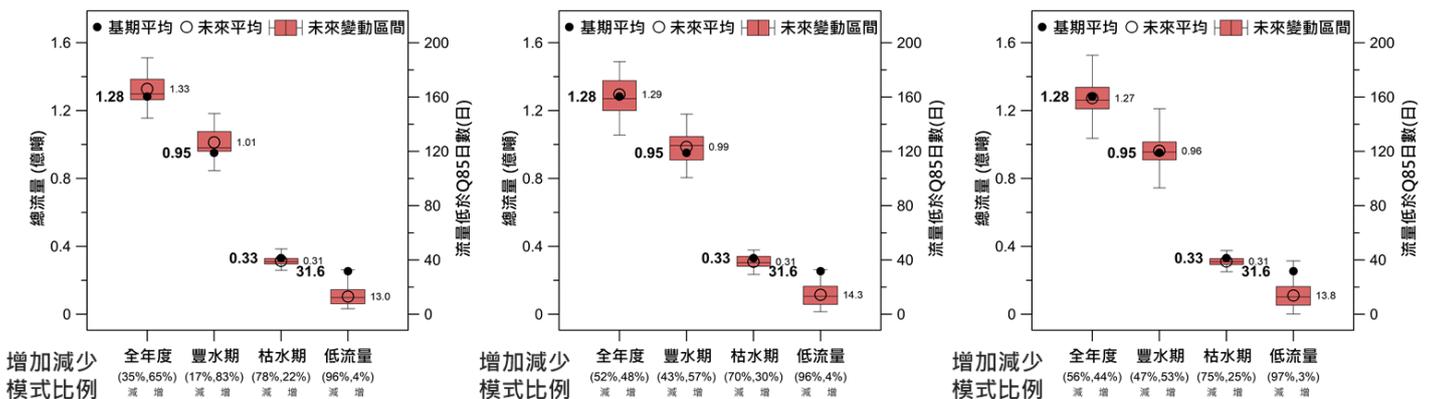
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測流量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境流量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-31 不同氣候變遷情境下石門水庫集水區豐枯流量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



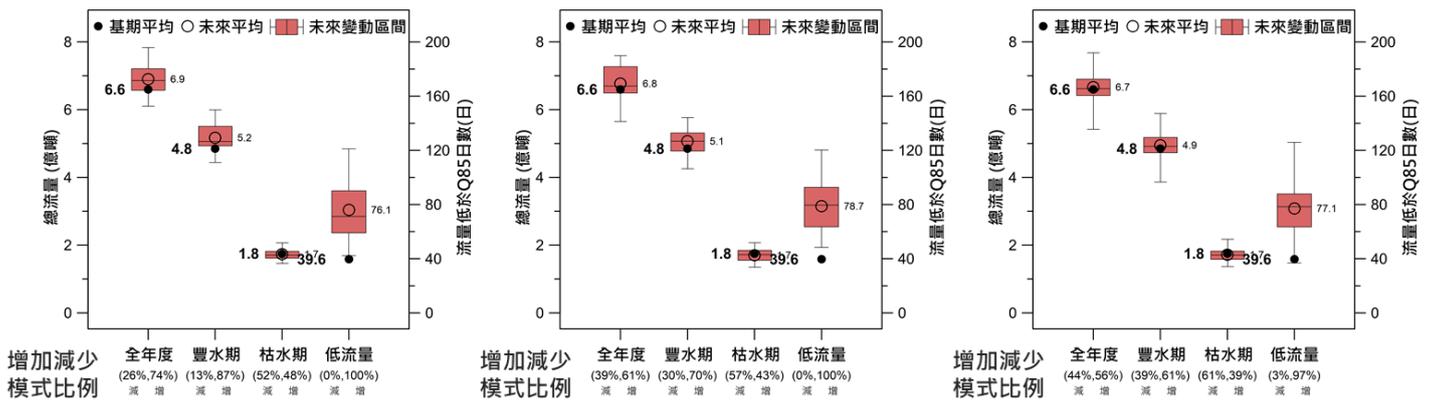
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測流量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境流量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-32 不同氣候變遷情境下士林堰集水區豐枯流量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



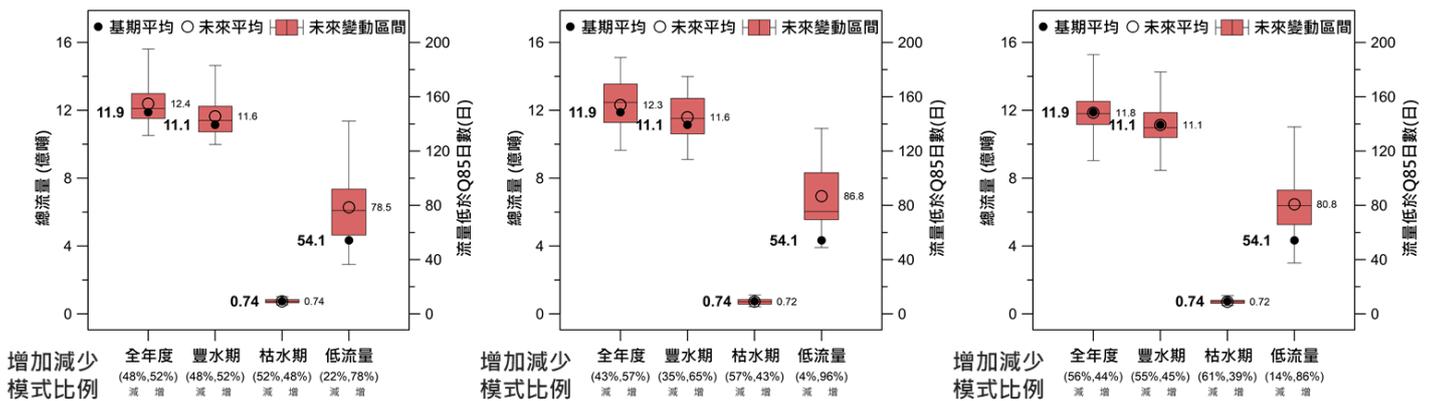
註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測流量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境流量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-33 不同氣候變遷情境下德基水庫集水區豐枯流量之變化情況

(a) 未來中期SSP2-4.5情境

(b) 未來中期SSP5-8.5情境

(c) 固定增溫2°C條件



註：實心圓點代表基期時段(1995至2014年)歷史觀測流量之平均值；空心圓點代表全部ESM未來推估結果之平均值；盒狀圖代表各個ESM未來推估平均值之變動區間，而未來情境流量增加減少之模式數量比例則標示於X軸下方。

圖 4-34 不同氣候變遷情境下曾文水庫集水區豐枯流量之變化情況

圖 4-35 至圖 4-37 為臺灣 10 條主要水系於未來中期不同氣候變遷情境下豐水期流量總體積、枯水期流量總體積以及低流量日數(流量未達基期 Q85 之日數)相較於基期流量資料之空間變化情況。分析結果顯示：(1)就整體增減情況而言，未來豐水期流量總體積相較於基期流量資料多數有增加情況(僅固定增溫 2°C 條件下南區豐水期流量總體積略微減少)、未來枯水期流量多數有減少情況(僅未來中期 SSP2-4.5 情境下中區與南區枯水期流量總體積略微增加)以及未來低流量日數則多數有增加情況。(2)就空間上變化情況而言，未來豐水期流量總體積相較於基期流量資料多數有增加情況，但空

間上增加幅度有所不同，以北區增加幅度較大，而南區增加幅度則較小；未來枯水期流量總體積多數有減少情況，但空間上增加幅度有所不同，以北區減少幅度最大；未來低流量日數多數有增加情況，其空間上增加幅度有所不同，以南區增加幅度最大，而北區與中區增加幅度則為次大。(3)上述比對分析係基於各區之豐枯增減幅度，若需瞭解氣候變遷影響下豐枯總量之定量衝擊，可依據基期豐枯總量搭配上上述增減幅度進行計算。

表 4-7 為不同氣候變遷情境下淡水河等 10 條水系之豐枯流量特性變化，分析結果顯示：就整體增減情況而言，淡水河等 10 條水系之未來豐水期流量相較於基期雨量資料多數有增加情況(僅固定增溫 2°C 條件下曾文溪與高屏溪有略微減少情況)、未來枯水期雨量則多數有減少情況(未來中期 SSP2-4.5 情境下 7 條水系有略微增加與持平情況)以及未來低流量日數(流量未達 Q85 之日數)有一致的增加情況。

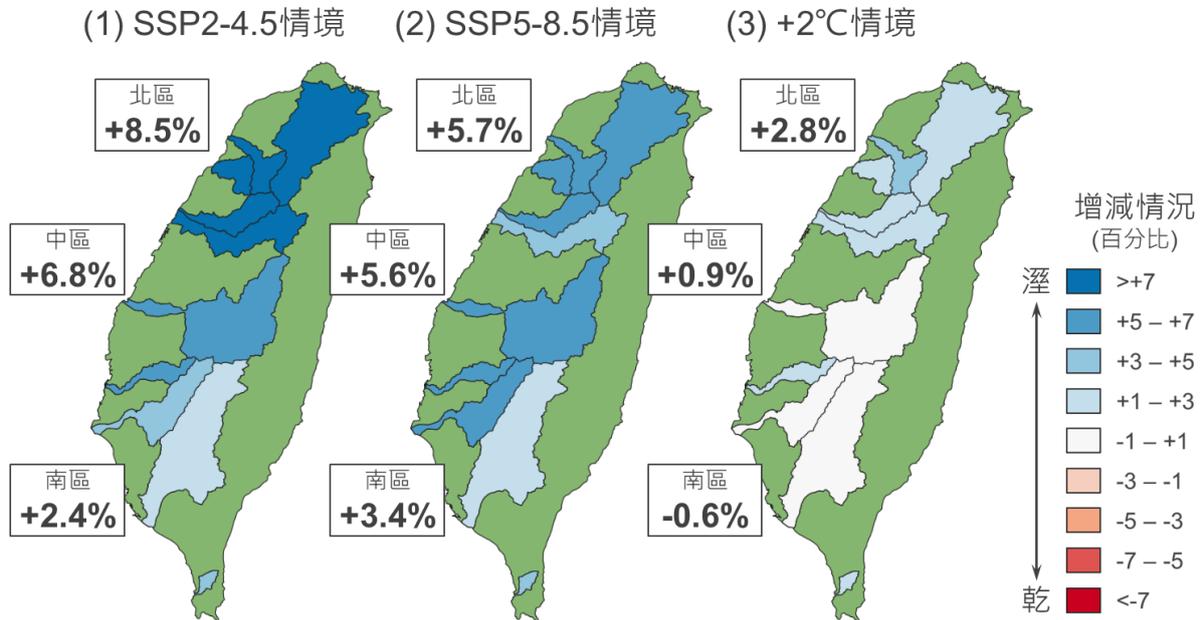


圖 4-35 未來中期不同氣候變遷情境下豐水期流量總體積增減情況

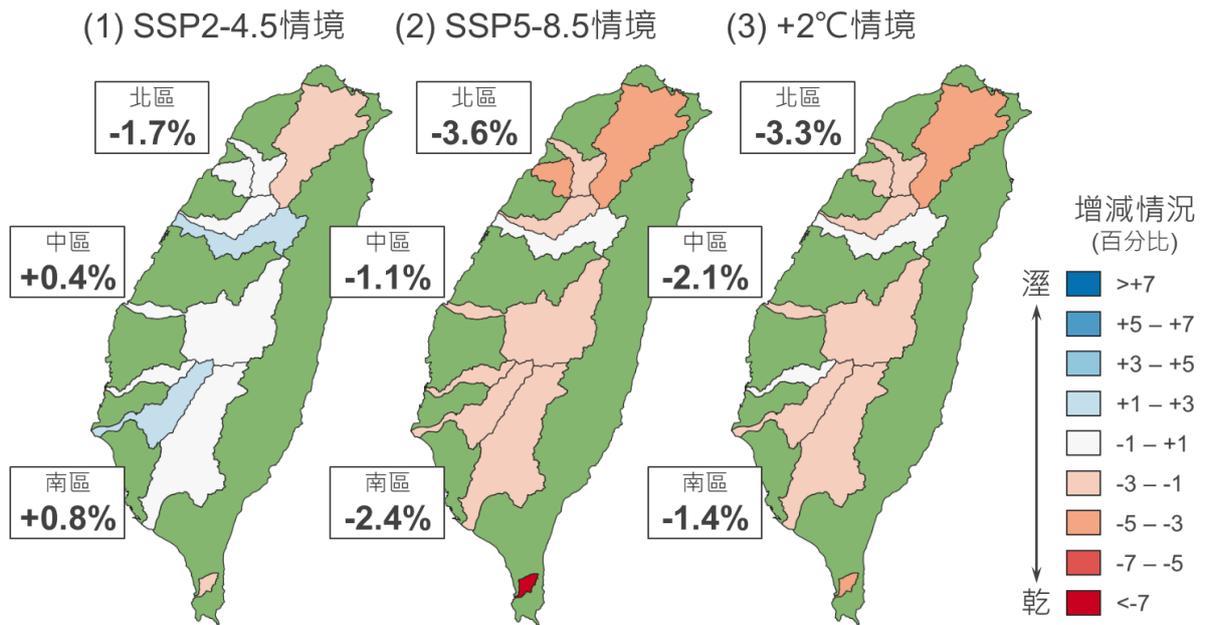


圖 4-36 未來中期不同氣候變遷情境下枯水期流量總體積增減情況

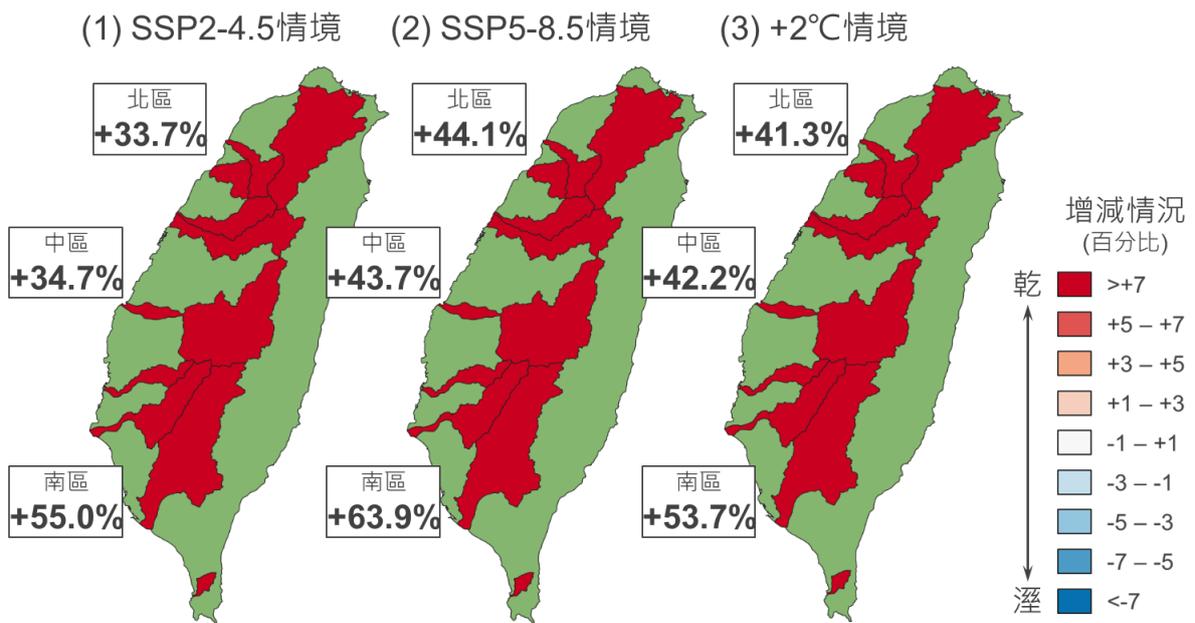


圖 4-37 未來中期不同氣候變遷情境下低流量日數增減情況

表 4-7 不同氣候變遷情境下臺灣 10 條主要水系之豐枯流量特性變化

水系	未來短期						未來中期						固定增溫 2°C 條件		
	SSP2-4.5			SSP5-8.5			SSP2-4.5			SSP5-8.5					
	豐	枯	低	豐	枯	低	豐	枯	低	豐	枯	低	豐	枯	低
淡水河	4.5	-1.4	35.2	0.9	-3.3	37.9	8.6	-1.9	33.0	5.6	-3.7	43.9	2.8	-3.4	40.8
頭前溪	4.2	-0.3	40.5	1.2	-3.7	38.6	7.3	0.0	39.1	6.4	-2.7	45.5	3.0	-2.5	44.9
中港溪	3.6	-0.8	28.2	0.4	-4.3	31.6	8.7	-0.9	29.0	5.5	-3.4	39.1	2.3	-2.7	34.0
大安溪	3.9	-0.3	30.2	-0.9	-3.0	36.4	9.2	0.3	29.2	6.6	-1.4	35.1	2.2	-1.7	35.0
大甲溪	3.6	2.7	31.5	-0.8	-1.3	36.0	8.0	2.6	29.8	5.0	-0.3	41.8	1.5	-0.1	36.1
濁水溪	2.0	-1.1	36.2	-2.5	-2.0	49.6	5.6	0.0	37.7	5.4	-1.0	47.2	0.3	-2.6	46.2
八掌溪	2.3	-0.6	34.3	-1.8	0.0	41.1	6.3	0.2	31.7	6.2	-1.1	46.0	1.2	-0.9	36.9
曾文溪	3.1	1.7	64.0	-1.1	1.0	77.2	4.1	2.4	76.2	5.0	-1.2	88.3	-0.2	-1.9	79.1
高屏溪	2.4	1.5	36.8	-0.2	0.5	43.4	1.9	0.4	50.6	2.9	-2.7	58.6	-0.8	-1.2	48.0
四重溪	5.3	5.2	20.5	1.4	2.6	28.7	4.9	-2.5	29.5	4.3	-7.2	33.6	2.4	-3.4	28.3
整體平均	3.1	0.0	37.3	-0.6	-1.5	44.8	5.7	0.0	41.6	4.9	-2.2	51.0	0.9	-2.2	46.1

註：¹單位為%；²「豐」代表豐水期流量總體積、「枯」代表枯水期流量總體積、「低」代表流量未達基期 Q85 之日數；³負值另外以灰底註記。

第五章 氣候變遷設定情境下各超越機率之地面水 可利用水量分析

聚焦臺灣 10 條主要水系進行歷史觀測流量與未來情境流量深入探討與細部比對分析，項目包含：(1)各月份各超越機率流量、(2)可利用水量以及(3)低流量特性，以瞭解氣候變遷對於不同程度流量(例如：高流量、中流量以及低流量情況)所造成之影響。其中，可利用水量(或者超越機率流量)為採用不同超越機率流量所對應而得之水量，其係指特定河川之流量，與水權法規中之剩餘水量定義不同，故毋須扣除下游已申請之水權量。

一、各月份各超越機率流量分析

各月份各超越機率流量之計算方法係先將各月份 N 筆流量資料由大至小排序，流量排序編號為 m ，最大流量資料 $m=1$ 。各排序 m 所對應流量之發生超越機率 $p\%$ 以韋伯法(Weibull)公式 $p = m/(N+1)$ 計算。再以流量為縱軸、超越機率(%)為橫軸，可繪製各月份流量超越機率曲線(exceedence probability curve)，建立流量與超越機率之關係(例如：超越機率 10% 對應之流量為 Q_{10})。而為探討氣候變遷對於各月份各超越機率流量(例如： Q_{10} 、 Q_{20} 、...、 Q_{80} 、 Q_{90})之衝擊，分別採用各月份基期與未來情境流量資料進行分析，推求基期與未來情境流量資料之各超越機率流量，再藉由兩者比對以瞭解氣候變遷對於不同程度流量(例如：高於 Q_{30} 之高流量、介於 Q_{30} 與 Q_{70} 之中流量以及低於 Q_{70} 之低流量情況)所造成之影響。

圖 5-1 至圖 5-5 為未來中期 SSP2-4.5 情境下 5 處代表集水區 3 月(左圖)與 8 月(右圖)流量延時曲線，圖中粗線為基期資料之流量延時曲線、細線為未來不同 ESM 推估資料之流量延時曲線以及虛線為未來流量延時曲線之平均值。氣候變遷對流量延時曲線影響分析結果顯示：(1)翡翠水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，而 8 月份各超越機率流量為高流量與中流量增加較為明顯，低流量增減情況則較不顯著；(2)石門水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q_{10} 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量與 Q_{85}

以下低流量增加較為明顯，而中流量增減情況則較不顯著；(3)士林堰未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量與 Q85 以下低流量增加較為明顯，中流量增減情況則較不顯著；(4)德基水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量高流量增加較為明顯，中流量與低流量增減情況較不顯著；(5)曾文水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量增加較為明顯，中流量與低流量增減情況則較不顯著。

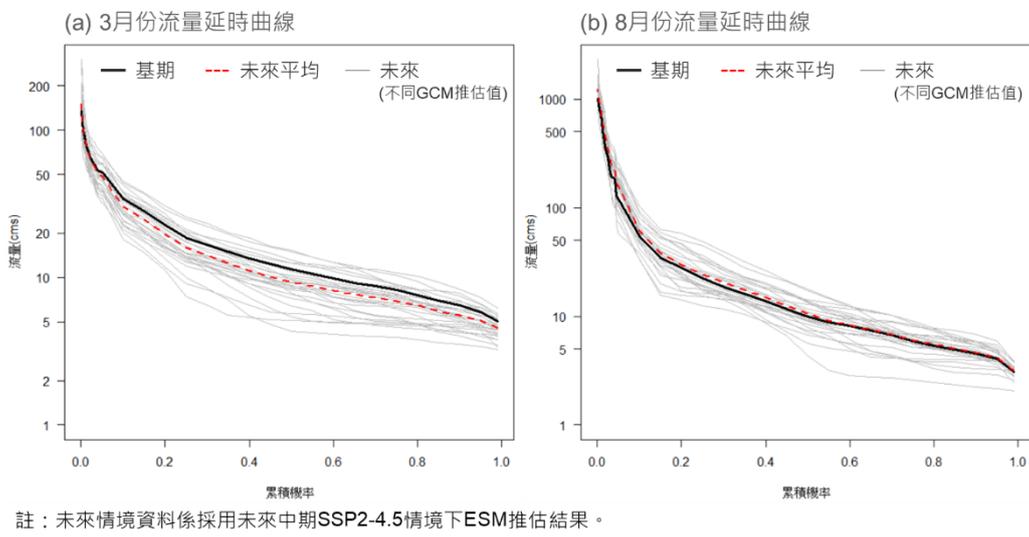


圖 5-1 未來中期 SSP2-4.5 情境下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線

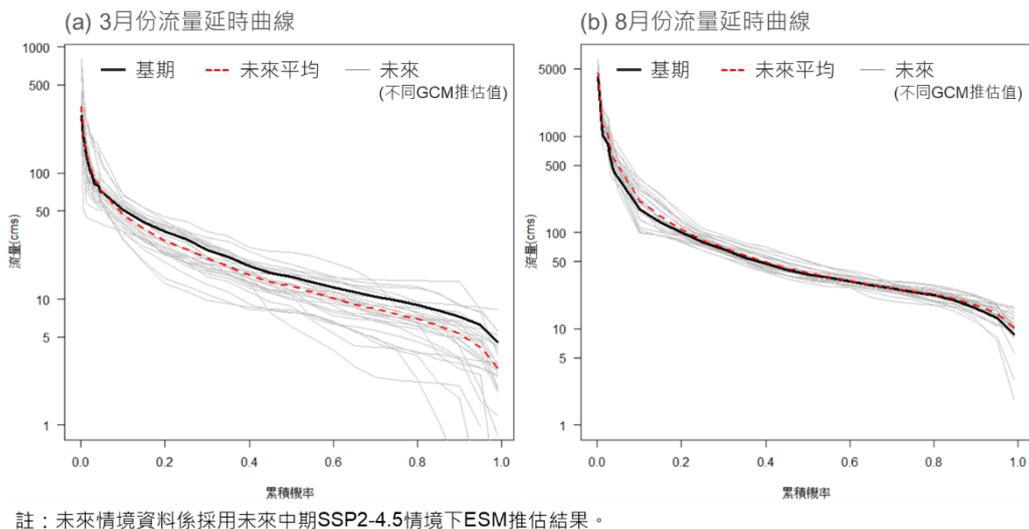
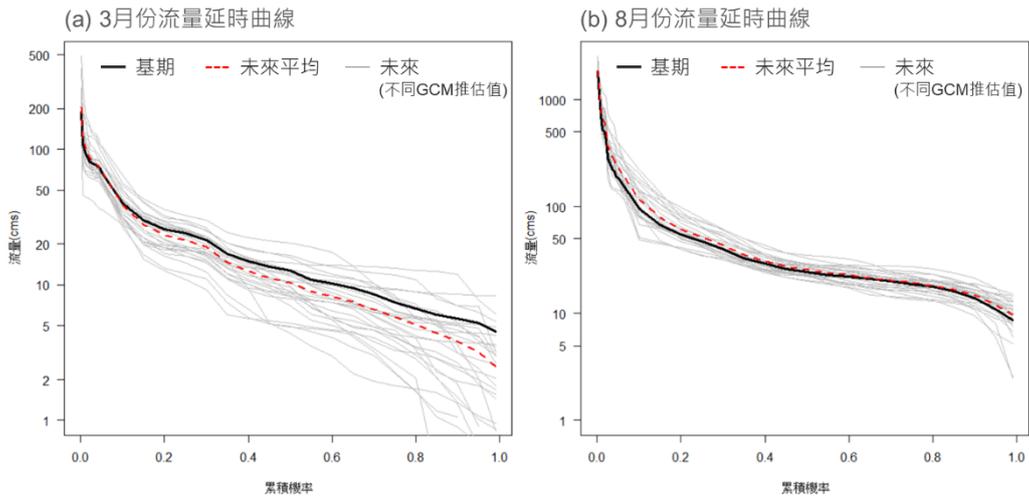
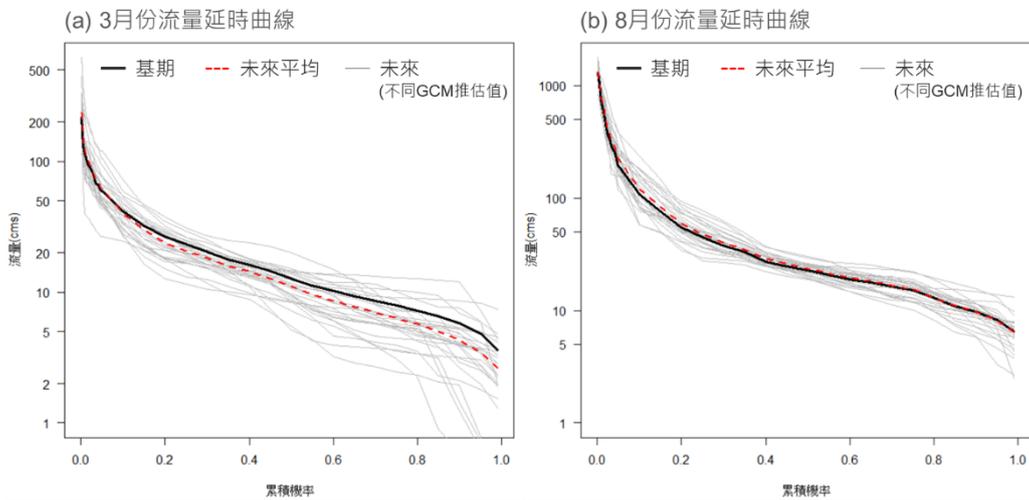


圖 5-2 未來中期 SSP2-4.5 情境下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



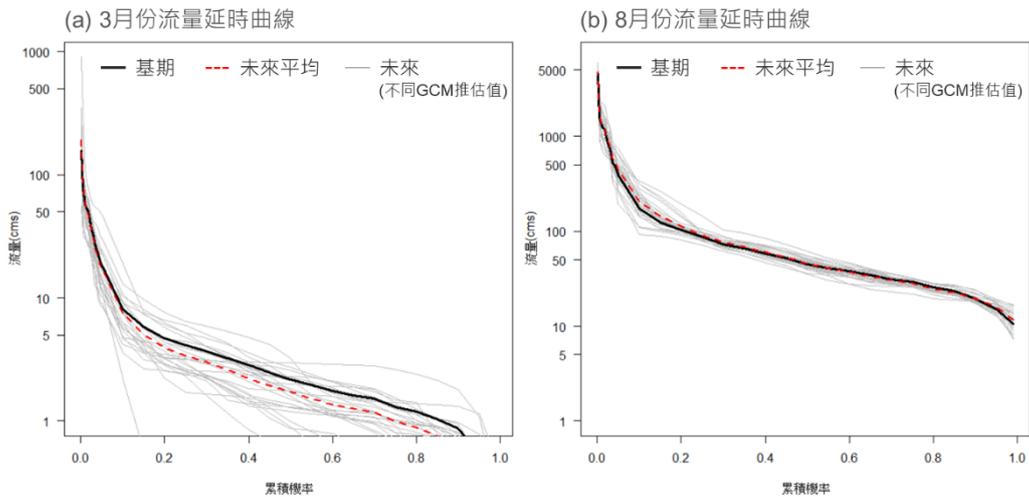
註：未來情境資料係採用未來中期SSP2-4.5情境下ESM推估結果。

圖 5-3 未來中期 SSP2-4.5 情境下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用未來中期SSP2-4.5情境下ESM推估結果。

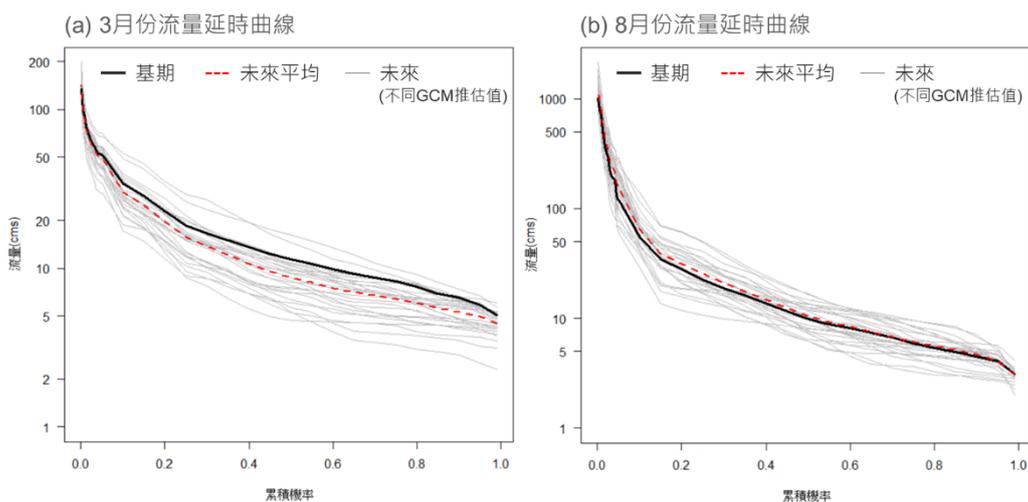
圖 5-4 未來中期 SSP2-4.5 情境下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用未來中期SSP2-4.5情境下ESM推估結果。

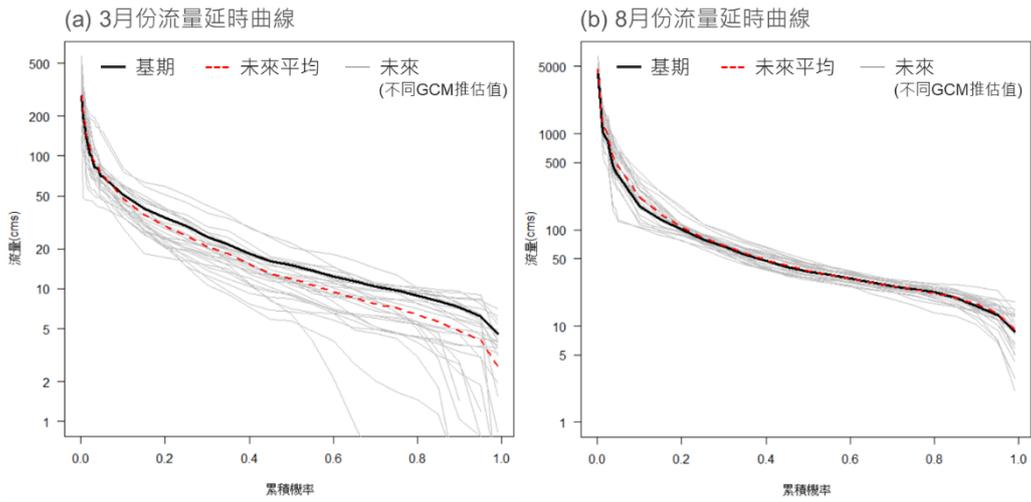
圖 5-5 未來中期 SSP2-4.5 情境下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線

圖 5-6 至圖 5-10 為未來中期 SSP5-8.5 情境下 5 處代表集水區 3 月(左圖)與 8 月(右圖)流量延時曲線，圖中粗線為基期資料之流量延時曲線、細線為未來不同 ESM 推估資料之流量延時曲線以及虛線為未來流量延時曲線之平均值。氣候變遷對流量延時曲線影響分析結果顯示：(1)翡翠水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量為高流量與中流量增加較為明顯，低流量增減情況則較不顯著；(2)石門水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量增加較為明顯，而中流量與低流量增減情況則較不顯著；(3)士林堰未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q20 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量增加較為明顯，中流量與低流量增減情況則較不顯著；(4)德基水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量皆無顯著增減情況；(5)曾文水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量增加較為明顯，中流量與低流量增減情況則較不顯著。



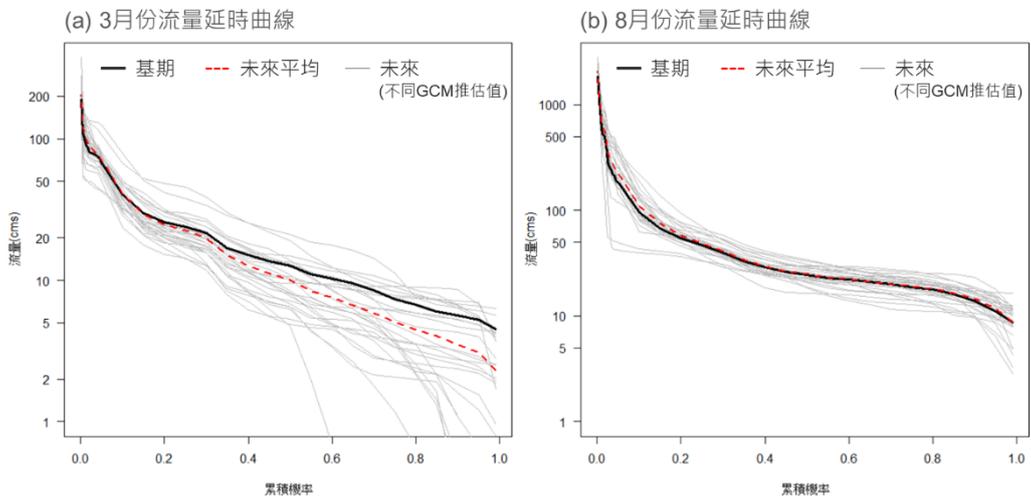
註：未來情境資料係採用未來中期SSP5-8.5情境下ESM推估結果。

圖 5-6 未來中期 SSP5-8.5 情境下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



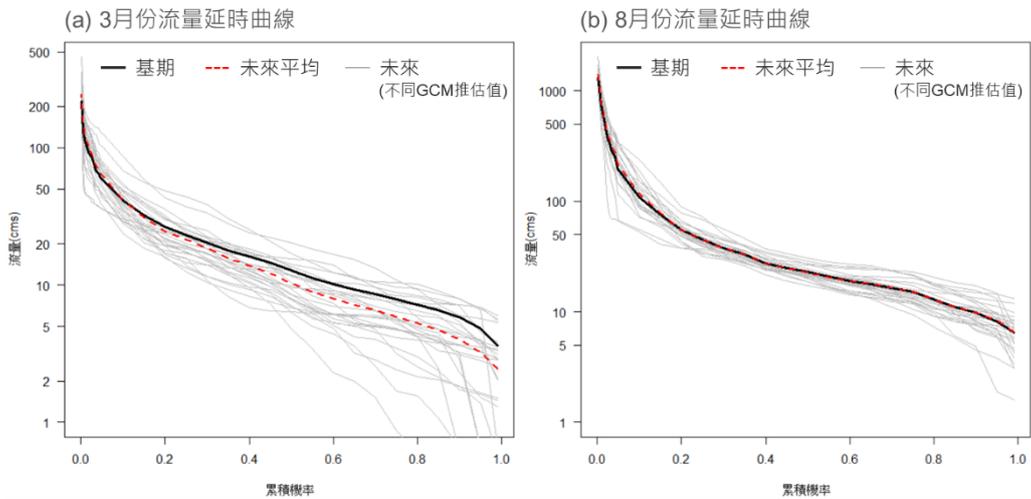
註：未來情境資料係採用未來中期SSP5-8.5情境下ESM推估結果。

圖 5-7 未來中期 SSP5-8.5 情境下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



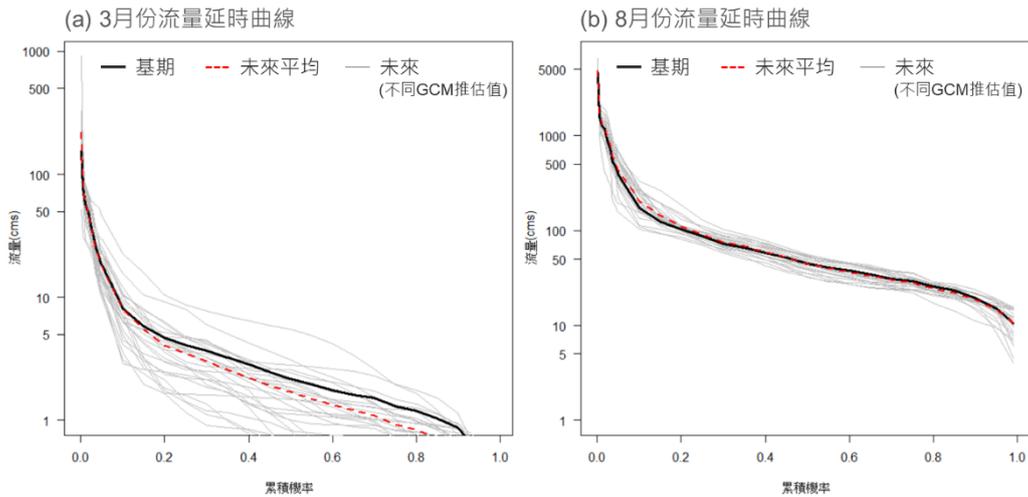
註：未來情境資料係採用未來中期SSP5-8.5情境下ESM推估結果。

圖 5-8 未來中期 SSP5-8.5 情境下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用未來中期SSP5-8.5情境下ESM推估結果。

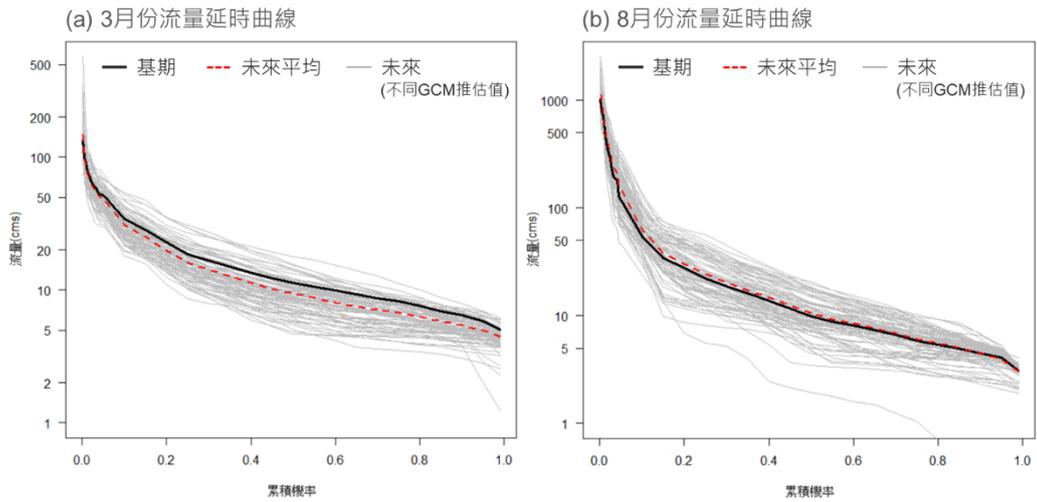
圖 5-9 未來中期 SSP5-8.5 情境下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用未來中期SSP5-8.5情境下ESM推估結果。

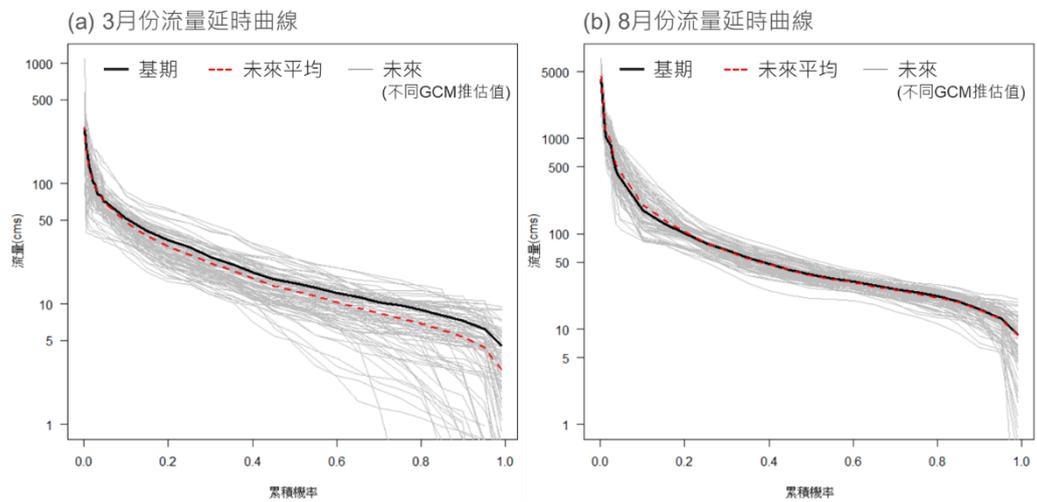
圖 5-10 未來中期 SSP5-8.5 情境下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線

圖 5-11 至圖 5-15 為固定增溫 2°C 條件下 5 處代表集水區 3 月(左圖)與 8 月(右圖)流量延時曲線，圖中粗線為基期資料之流量延時曲線、細線為未來不同 ESM 推估資料之流量延時曲線以及虛線為未來流量延時曲線之平均值。氣候變遷對流量延時曲線影響分析結果顯示：(1)翡翠水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，而 8 月份各超越機率流量為高流量與中流量增加較為明顯，低流量增減情況則較不顯著；(2)石門水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q10 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量僅高流量增加較為明顯，而中流量與低流量增減情況則較不顯著；(3)士林堰未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q20 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量皆無顯著增減情況；(4)德基水庫未來 3 月份各超越機率流量皆有降低之情況，但 Q20 以上高流量增減情況則較不顯著，而 8 月份各超越機率流量高流量與中流量皆無顯著增減情況，小於 Q80 以下低流量則有降低之情況；(5)曾文水庫未來 3 月份各超越機率流量為高流量有增加之情況，但中流量與低流量則有降低之情況，而 8 月份各超越機率流量為高流量有略微增加之情況，中流量與低流量則有略微降低之情況。



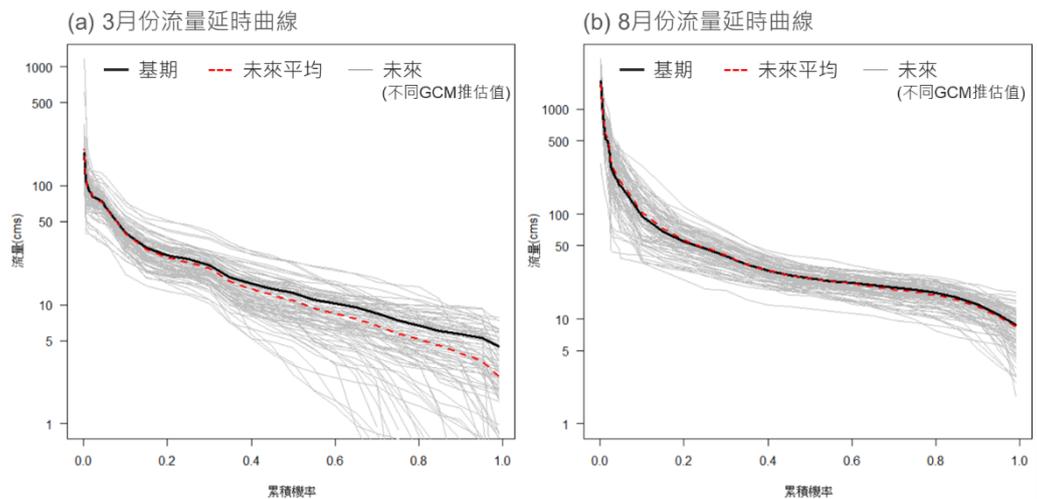
註：未來情境資料係採用固定增溫2°C條件下ESM推估結果。

圖 5-11 固定增溫 2°C條件下翡翠水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



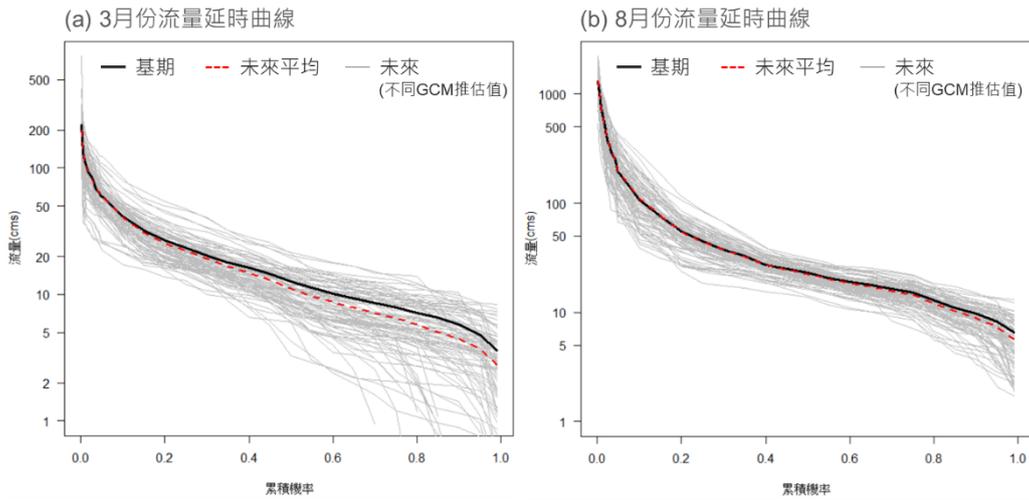
註：未來情境資料係採用固定增溫2°C條件下ESM推估結果。

圖 5-12 固定增溫 2°C條件下石門水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



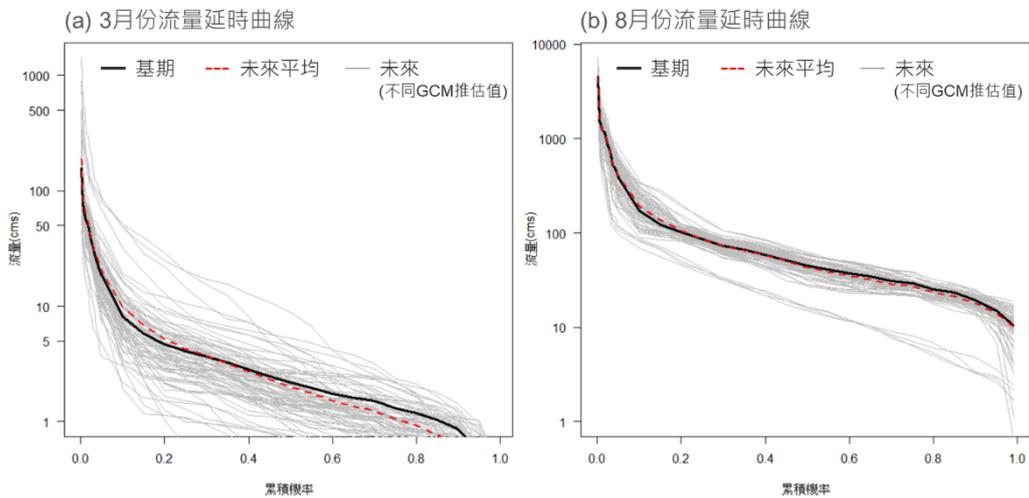
註：未來情境資料係採用固定增溫2°C條件下ESM推估結果。

圖 5-13 固定增溫 2°C條件下士林堰集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用固定增溫2°C條件下ESM推估結果。

圖 5-14 固定增溫 2°C條件下德基水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線



註：未來情境資料係採用固定增溫2°C條件下ESM推估結果。

圖 5-15 固定增溫 2°C條件下曾文水庫集水區 3 月與 8 月流量延時曲線

藉由以上各月份各超越機率流量分析，得以進一步探討流量在豐愈豐、枯愈枯之整體特性下各月流量細部特性(高中低流量情況)，多數分析成果指出：於未來不同氣候變遷情境下，3 月(枯水期代表月份)高流量增減情況較不顯著，而中低流量多有減少情況；8 月(豐水期代表月份)高流量多有增加情況，而中低流量則較不顯著。整體而言，在氣候變遷影響下枯水期低流量有愈低之情況，而豐水期高流量則有愈高之情況，其對於抗旱或者防汛而言皆會導致風險管理之難度增加，建議未來可以導入風險管理之安全係數觀念(例如：透過評估增加彈性管理強度 $\pm 10\%$)，以因應氣候變遷可能帶來之挑戰。

二、可利用水量分析

針對淡水河等 10 條水系內重要控制點之可利用水量分析，其評估上主要係基於各月份流量超越機率曲線，首先從各月份基期與未來情境流量超越機率曲線中挑選出 Q85 流量，再將各月份基期與未來情境 Q85 流量資訊繪製成圖，即可瞭解氣候變遷對於可利用水量造成之衝擊。

圖 5-16 至圖 5-20 為不同未來情境下臺灣 10 條主要水系之可利用水量分析成果，為方便釐清氣候變遷可能導致之衝擊程度，以相較於基期情境增減百分比之形式呈形不同未來情境下可利用水量之變化，並配合顏色深淺反映出衝擊程度之高低(衝擊較大顏色則較深)。以圖 5-16 為例，其為未來短期 SSP2-4.5 情境下可利用水量(各月份流量 Q85)之變化情況，分析結果在時間上涵蓋 1 至 12 月，可同時反映出氣候變遷與豐枯水期對於可利用水量所造成影響，而在空間上則由北至南同時呈現臺灣 10 條主要水系之可利用水量，以利檢視可利用水量變化之空間特性。分析結果顯示：整體而言，無論於何種氣候變遷情境下，臺灣 10 條主要水系之可利用水量(各月份流量 Q85)大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。此外，進一步比對第四章情境流量分析結果(圖 4-35 至圖 4-36)與可利用水量分析結果發現：在氣候變遷影響下，豐枯水期流量總體積具有豐愈豐、枯愈枯之特性，而可利用水量(各月份流量 Q85)卻大多呈現減少趨勢，僅少數豐水期月份例外。其顯示氣候變遷將導致豐水期流量變化更加劇烈，使得水資源經營管理更加不易。

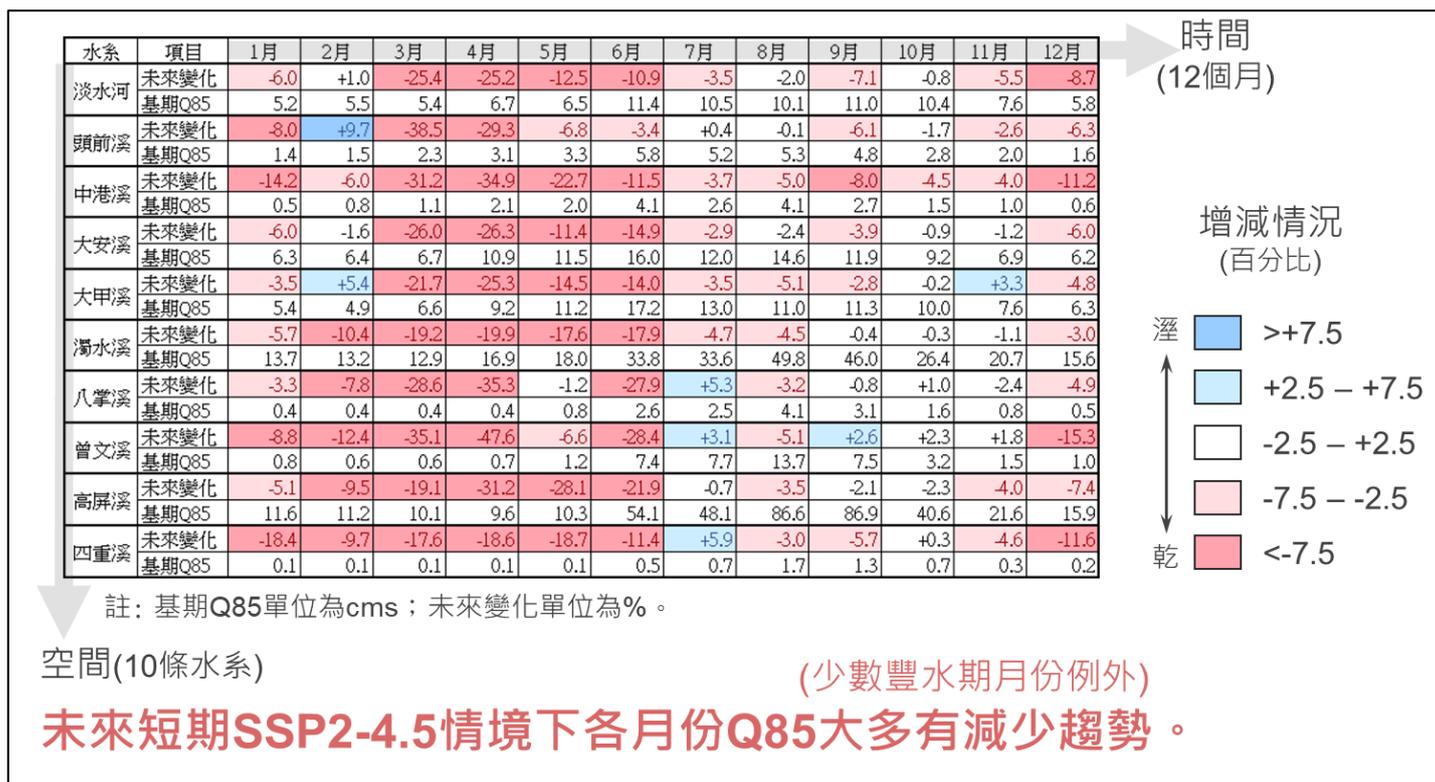


圖 5-16 未來短期 SSP2-4.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

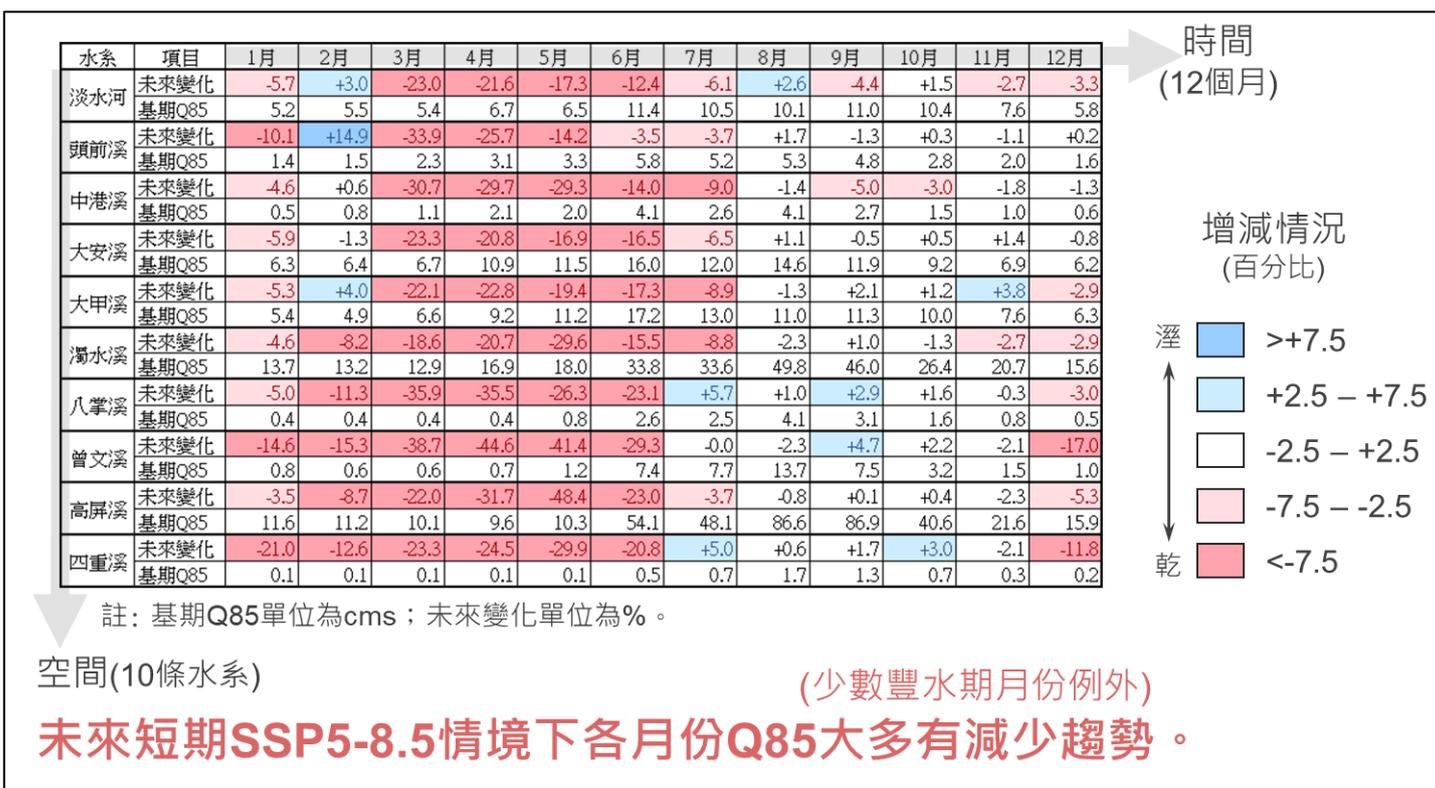


圖 5-17 未來短期 SSP5-8.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

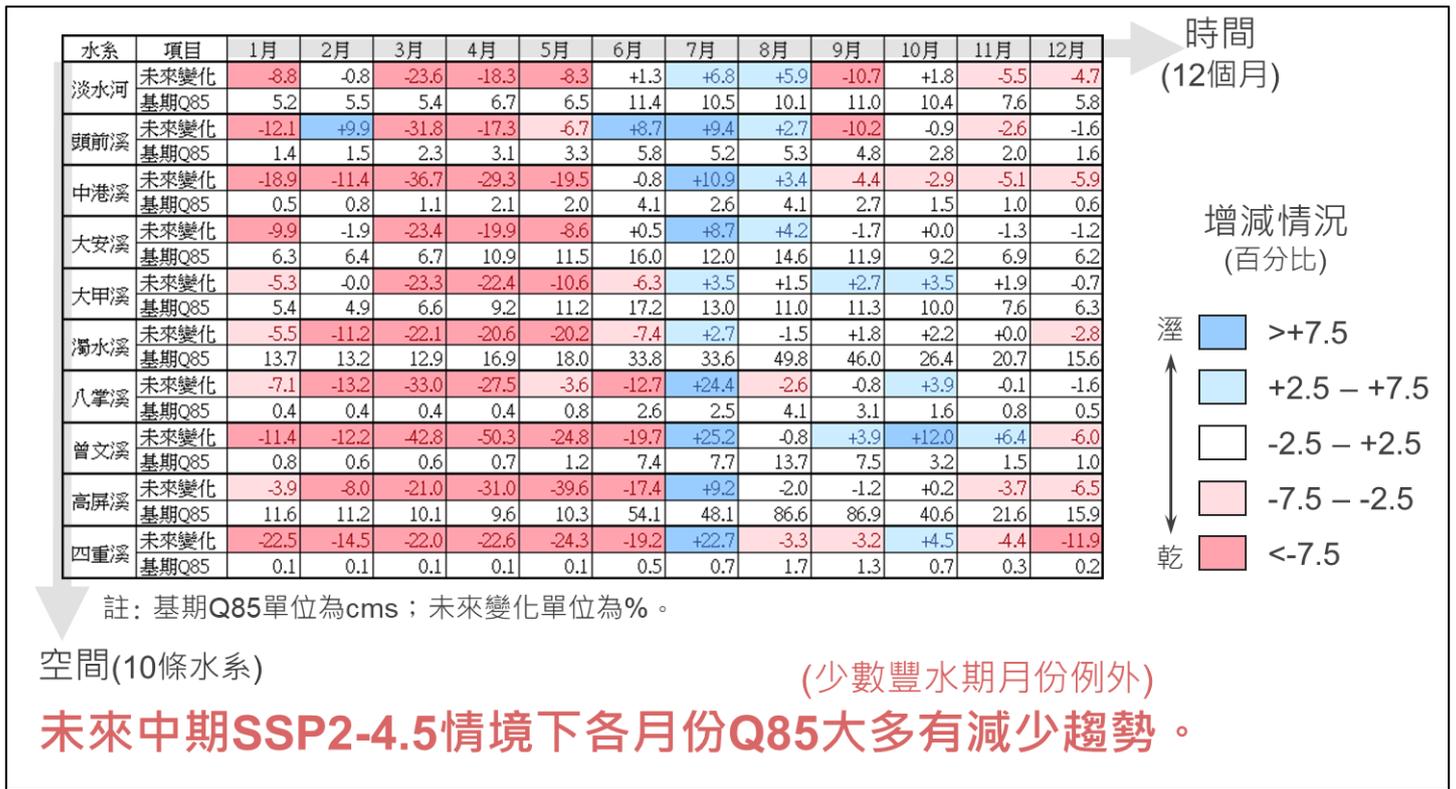


圖 5-18 未來中期 SSP2-4.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

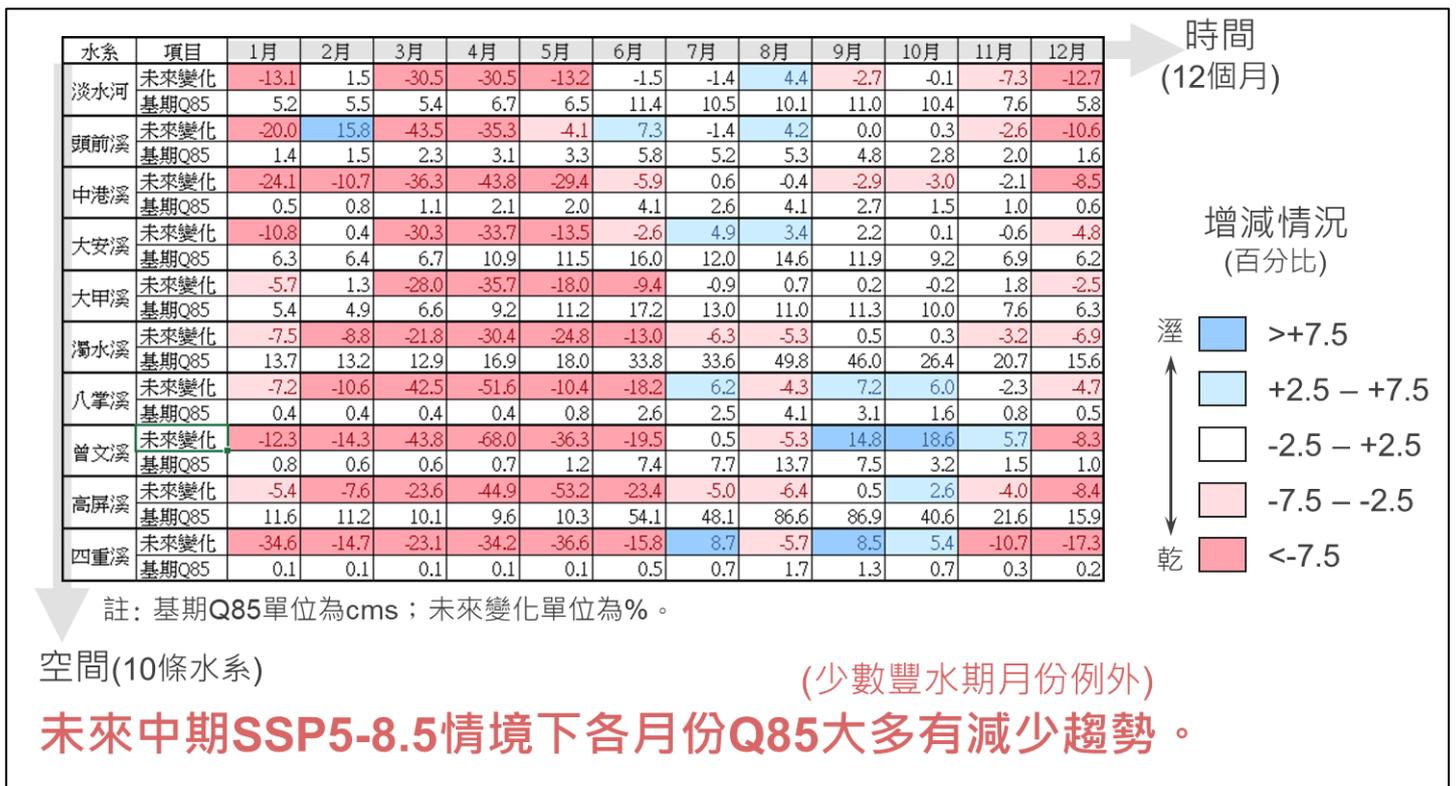


圖 5-19 未來中期 SSP5-8.5 情境下各月份流量 Q85 之增減情況

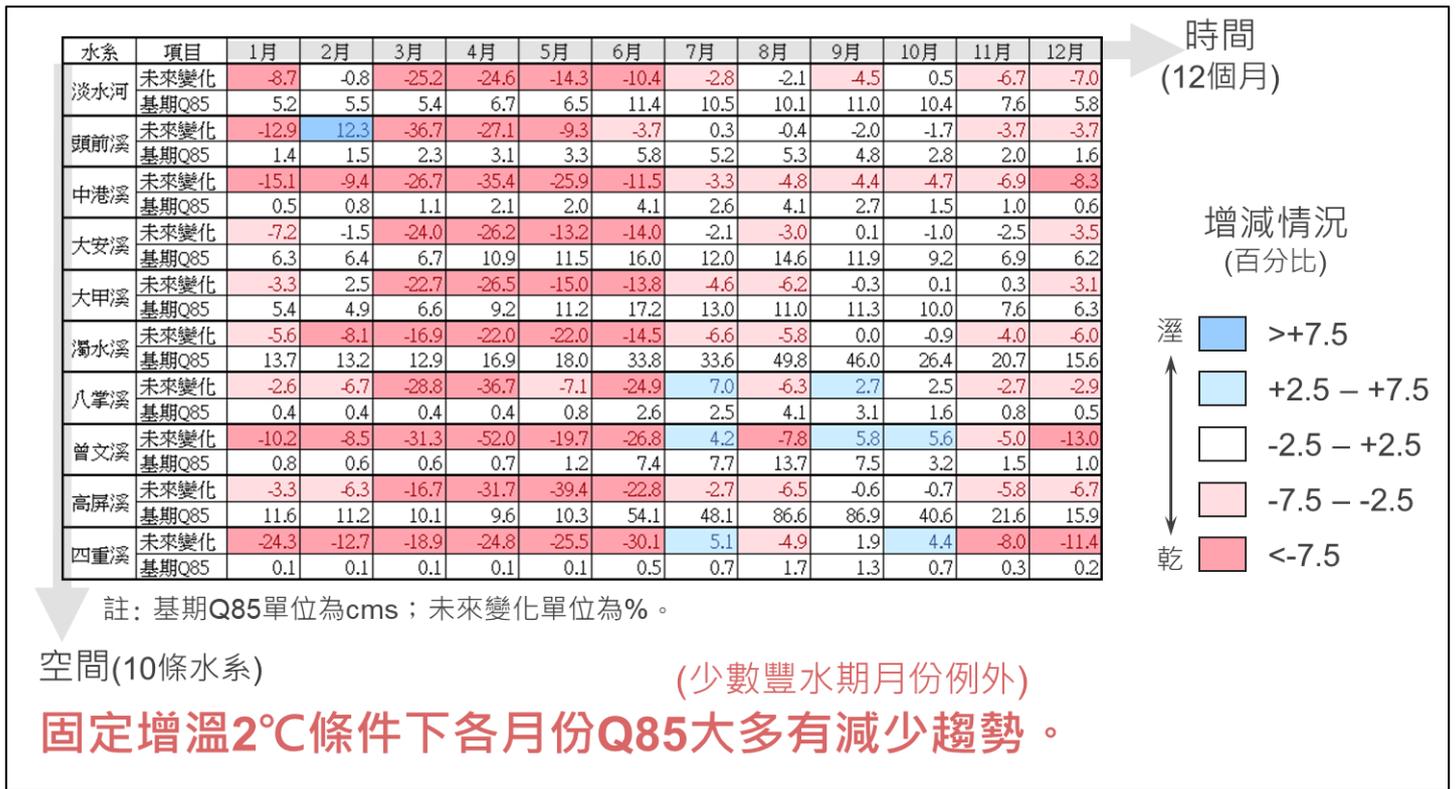


圖 5-20 固定增溫 2°C條件下各月份流量 Q85 之增減情況

三、低流量特性分析

低流量特性分析係指針對流量低於某一特定值之低流量事件進行分析，一般常用 Yevjevich (1967)所提出之門檻值法(threshold level method)定義低流量事件，示意圖請參考圖 5-21。低流量事件分析於門檻值選擇上彈性大，其可配合採用特定流量超越機率作為門檻值進行分析，例如：採用各月份 Q85 流量進行低流量事件分析，針對流量無法滿足地面水水源通常保持水量¹⁷之情況進行探討，評估其未達基期 Q85 之時間與水量。其中，未達 Q85 之時間在計算上係先統計日流量資料未達各月份 Q85 流量之日數，再將各月份統計日數累加成為全年之日數(單位：日)；而未達基期 Q85 之水量則係針對日流量資料未達各月份 Q85 流量之情況，計算兩者流量體積差值再累加其差值成為全年之流量體積差值(單位：萬噸)，其係以水文角度切入分析並無考慮水資源供需條件。

¹⁷水源通常保持之水量，為水利法第 21 條所指區域內某水源之水量，依據水利法施行細則第 15 條第 2 項補充，指流量超越機率百分之八十五之水量。

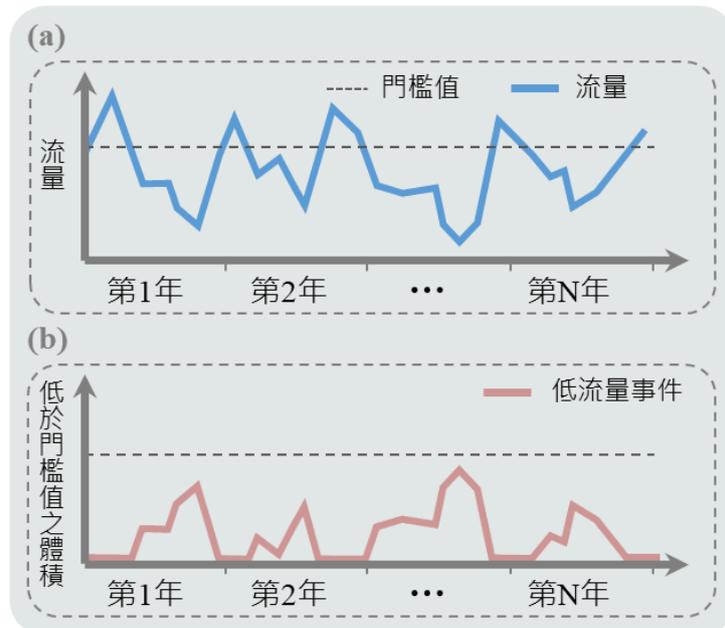


圖 5-21 低流量特性分析方法示意圖(a)門檻值法與(b)低流量事件

圖 5-22 為不同未來情境下臺灣 10 條主要水系之低流量特性，為釐清氣候變遷可能導致之衝擊程度，首先統計各條水系於基期情境下低流量特性(未達基期 Q85 之時間與水量)，再以相較於基期情境增減百分比之形式呈形不同未來情境下低流量特性變化，並配合顏色深淺反映出衝擊程度之高低(衝擊較大顏色則較深)。分析結果顯示：整體而言，無論於何種氣候變遷情境下，臺灣 10 條主要水系之低流量特性在時間與水量上有一致的增加趨勢(更乾)。就未達基期 Q85 之時間而言，衝擊較大之水系為曾文溪與高屏溪；就未達基期 Q85 之水量而言，衝擊最大之水系為大甲溪，而衝擊次大之水系為淡水河、大安溪、濁水溪、八掌溪以及曾文溪。若以川流水源為主之高屏溪水系為例(圖 5-23)，其未達基期 Q85 之時間約為 54.7 日，於不同未來情境下則會進一步增加 37%至 59%；其未達基期 Q85 之水量約為 5,473 萬噸，於不同未來情境下則會進一步增加 34%至 48%。其中，以 SSP 情境分析結果而言，未來短期 SSP5-8.5 情境與未來中期 SSP5-8.5 情境屬於較為惡劣(較乾)之氣候變遷情境。

因應氣候變遷對於低流量特性造成之潛在影響，建議因應方式如下：
 (1)可參考未達 Q85 之時間與水量配合適合規劃工具(例如：乾旱頻率分析)，進行替代水源規劃；(2)提供水權管理單位氣候變遷下水文衝擊資料(例如：流量 Q85 減少)作為參考。

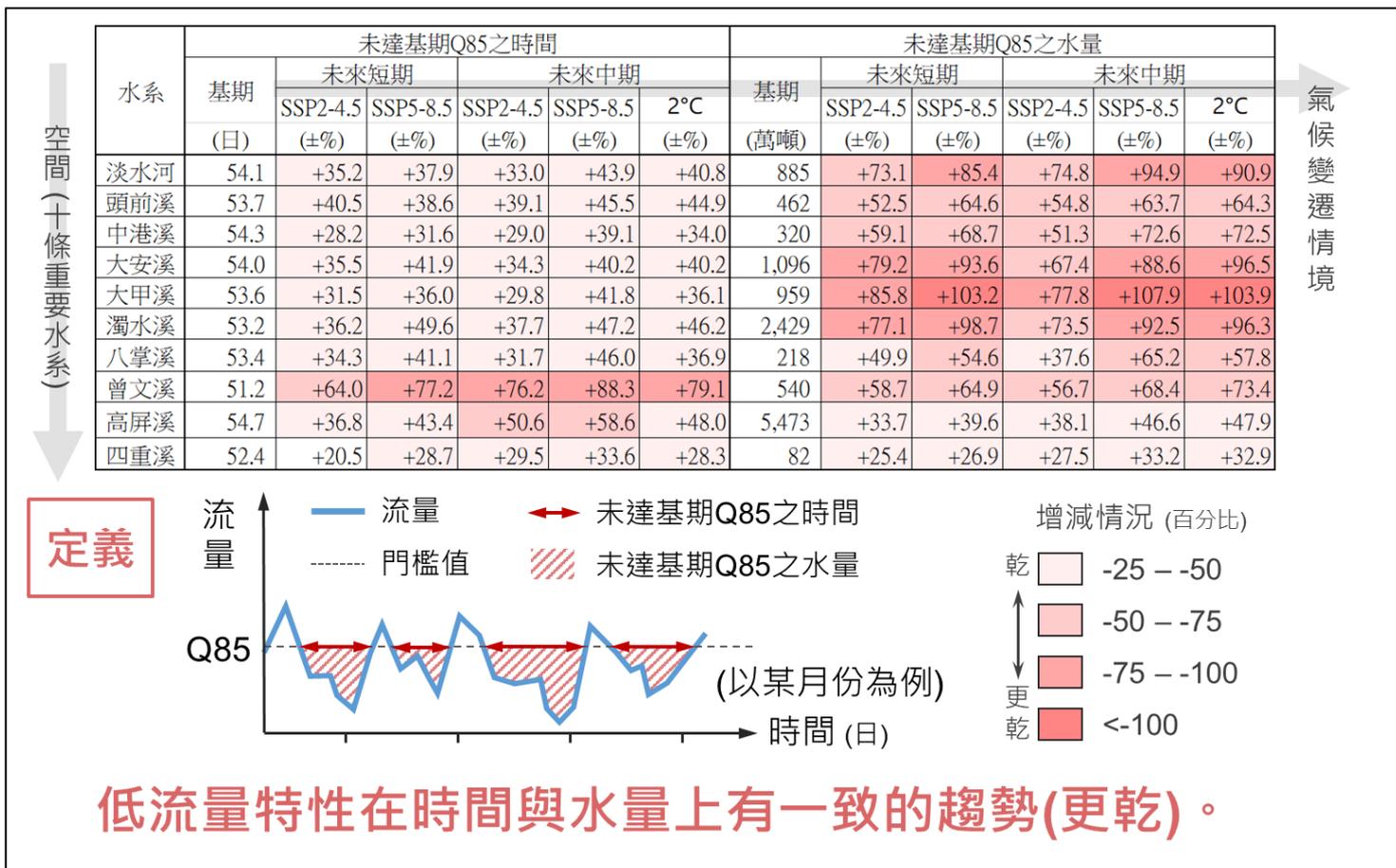


圖 5-22 不同未來情境下臺灣 10 條主要水系之低流量特性

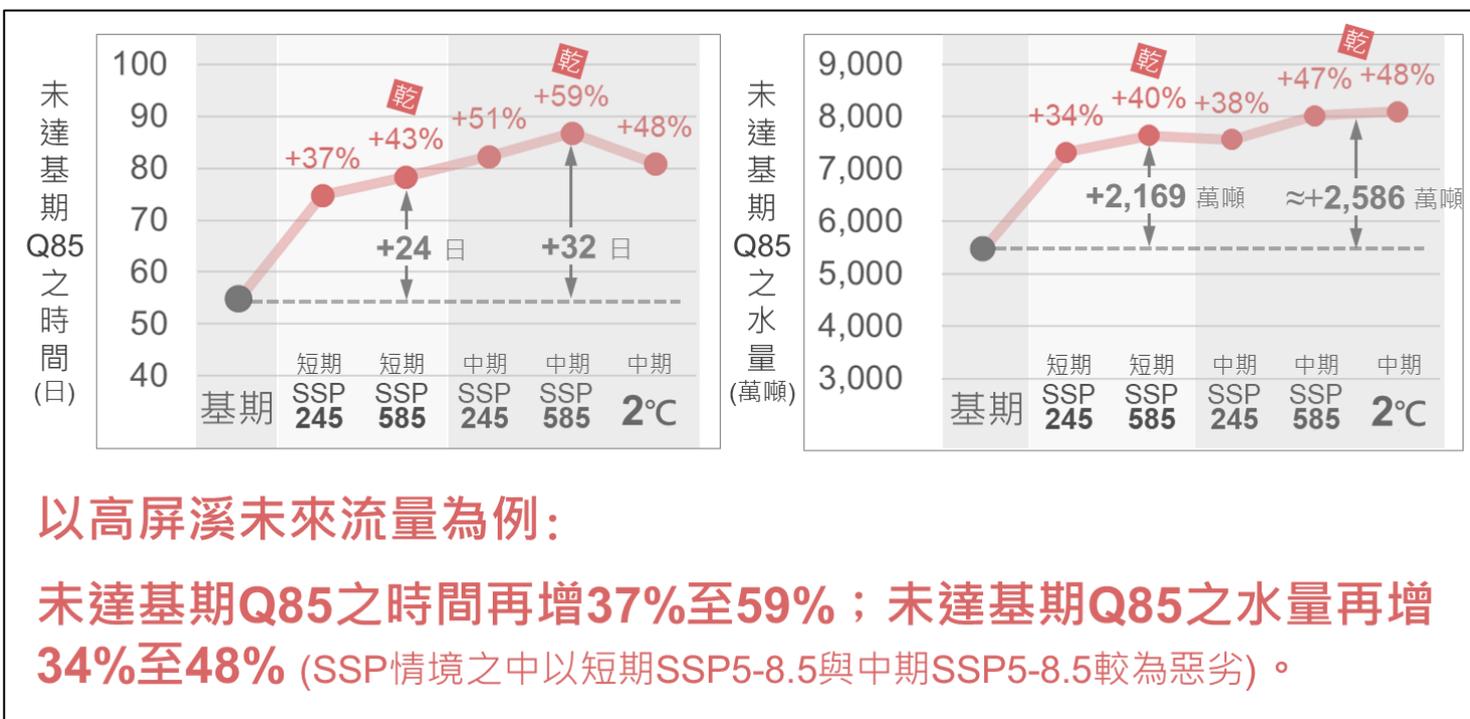


圖 5-23 不同未來情境下高屏溪水系之低流量特性

四、氣候變遷下流量衝擊總結

為瞭解氣候變遷對於臺灣整體流量特性之衝擊，綜合臺灣 10 條主要水系內重要控制點之流量衝擊資訊，提出氣候變遷影響下未來可能之流量特性總結(圖 5-24)。於未來短期(2021 至 2040 年)SSP 氣候變遷情境下，SSP2-4.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+3.1%、0.0%、+37.6%以及+62.0%，而 SSP5-8.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為-0.6%、-1.5%、+45.0%以及+74.6%。就整體流量特性而言，未來短期兩種 SSP 氣候變遷情境之中，SSP5-8.5 情境屬於相對惡劣(較乾)之情境，亦可能導致水資源系統面臨較大之供需風險；於未來中期(2041 至 2060 年)SSP 氣候變遷情境下，SSP2-4.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+5.7%、0.0%、+41.9%以及+61.1%，而 SSP5-8.5 情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+4.9%、-2.2%、+51.2%以及+77.4%。就整體流量特性而言，未來中期兩種 SSP 氣候變遷情境之中，SSP5-8.5 情境亦屬於相對惡劣(較乾)之情境，亦可能導致水資源系統面臨較大之供需風險；於固定增溫 2°C 條件下，情境流量之豐水期流量總體積、枯水期流量總體積、未達基期 Q85 之時間以及未達基期 Q85 之水量相較於基期流量之增加減少百分比分別為+0.9%、-2.2%、+46.3%以及+78.5%，雖然未來豐枯流量整體特性為豐愈豐、枯愈枯，但在低流量特性之時間與水量上則皆有增加(更乾)趨勢，其顯示出未來流量可能變動範圍將更大，增加水資源經營管理難度。

五、氣候變遷下情境流量資料之不確定性

氣候變遷資料具有高度不確定性，其不確定性主要來源包含：氣候變遷情境不確定性、氣候模式不確定性以及氣候變遷期程不確定性等。而針對氣候模式不確定性之處理方式，IPCC 主要係從全部模式推估值中保留模式 90%推估值所涵蓋之非常可能範圍(very likely range)，而排除較為極端 10%之模式推估值，以避免納入過於極端推估結果。為瞭解氣候變遷下不同 ESM 推估結果之變動所導致之情境流量不確定性，針對未來短期(SSP2-4.5 與 SSP5-8.5)、未來中期(SSP2-4.5 與 SSP5-8.5)以及固定增溫條件下不同 ESM 推估結果進行分析，探討豐水期與枯水期流量總體積可能變動範圍(圖 5-25)。以未來短期(2021 至 2040 年)SSP 氣候變遷情境為例，SSP2-4.5 情境流量之豐水期流量總體積相較於基期流量之增加減少百分比為+3.1%，若考慮不同 ESM 推估結果之變動，其增加減少百分比變動範圍為-7.9%~+20.4%，而枯水期流量總體積相較於基期流量之增加減少百分比為 0.0%，若考慮不同 ESM 推估結果之變動，其增加減少百分比變動範圍為-17.8%~+25.6%；SSP5-8.5 情境流量之豐水期流量總體積相較於基期流量之增加減少百分比為-0.6%，若考慮不同 ESM 推估結果之變動，其增加減少百分比變動範圍為-8.4%~+5.9%，而枯水期流量總體積相較於基期流量之增加減少百分比為-1.5%，若考慮不同 ESM 推估結果之變動，其增加減少百分比變動範圍為-16.3%~+16.8%。整體而言，受到氣候變遷下情境流量資料之不確定性影響(不同 ESM 推估結果之變動)，豐水期與枯水期流量總體積相較於基期流量之增加減少百分比變動程度大，建議可導入安全係數觀念作為因應(增加彈性管理強度)。

	未來短期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		未來中期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		固定增溫 +2°C	
豐水期 流量總體積	+3.1%	-0.6%	+5.7%	+4.9%	+0.9%	
枯水期 流量總體積	0.0%	-1.5%	0.0%	-2.2%	-2.2%	
低流量特性	未達基期 Q85之時間	+37.6%	+45.0%	+41.9%	+51.2%	+46.3%
	未達基期 Q85之水量	+62.0%	+74.6%	+61.1%	+77.4%	+78.5%

圖 5-24 氣候變遷影響下未來可能之流量特性總結

	未來短期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		未來中期 SSP2-4.5 SSP5-8.5		固定增溫 +2°C
豐水期 流量總體積	+3.1%	-0.6%	+5.7%	+4.9%	+0.9%
枯水期 流量總體積	0.0%	-1.5%	0.0%	-2.2%	-2.2%
ESM個數	23個	23個	23個	23個	77個

氣候變遷具有高度不確定性，建議可導入安全係數觀念作為因應(增加彈性管理強度)。

圖 5-25 氣候變遷下情境流量資料之不確定性(不同 ESM 推估結果之變動)

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. Cannon, A. J., Sobie, S. R., 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*, vol. 28, issue 17, pp. 6938-6959.
5. Collischonn, W., Tucci, C.E.M., Clarke, R.T. (2001) Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, 245, 218-238.
6. Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V.K. (1992) Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
7. Gilbert, R. O., (1987) *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 320 pp.
8. Haith, D.A., Mandel, R., Wu, R.S. (1992) *Generalized Watershed Loading Functions Version 2.0 User's Manual*.
9. 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
10. 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>.
11. IPCC (2019) *Summary for Policymakers*. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Pörtner et al.)
12. Kendall, M. G., (1975) Rank correlation measures. *Advances in Water Resources*, 23, 141-151.
13. 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>.
14. Kiely, G. (1999) Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations. *Advances in Water Resources*, 23, 141-151.

15. Mann H. B., (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
16. Ministry for the Environment, New Zealand (2018) Climate Change Projections for New Zealand: Atmosphere Projections Based on Simulations from the IPCC Fifth Assessment.
17. Mirza, M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J., Kenny, G.J. (1998) Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna River Basins. *Hydrological Sciences Journal*, 43(6), 845-858.
18. Pettitt, A. N., (1979), A Non-parametric Approach to the Change-point Problem, *Applied Statistic*, 28(2), 126-135.
19. Serrano, A., Mateos, V.L., Garcia, J.A. (1999) Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90.
20. Siirila-Woodburn, E.R., Rhoades, A.M., Hatchett, B.J. et al. A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States. *Nat Rev Earth Environ* 2, 800–819 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00219-y>
21. 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.
22. van den Dool, Huug (2007) *Empirical Methods in Short-Term Climate Prediction*. Oxford University Press.
23. Verner, D., Treguer, D., Redwood, J., Christensen, J., McDonnell, R., Elbert, C., Konishi, Y., Belghazi, S. (2018) Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector. World Bank Group
24. Yapo, P.O., Gupta, H.V., Soroshian, S. (1998) Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 83-97.
25. Yevjevich, V. (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, USA.
26. 吳雷根，民國 93 年，曾文水庫枯水期長期入流量預測之研究，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
27. 呂季蓉，民國 95 年，臺灣南部地區長期乾旱趨勢分析之研究，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
28. 李晏全，民國 95 年，石門水庫枯水期月與季入流量預報之研究，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
29. 陳昭銘，民國 97 年，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42 期，第 1-9 頁。
30. 陳憲宗、游保杉，民國 98 年，氣候變遷與臺灣極端降雨變異趨勢，水資源管理會刊，12 月號。

31. 游保杉，民國 98 年，臺灣地區乾旱變異趨勢與辨識研究(III)，國科會專題研究計畫。
32. 楊道昌，民國 88 年，區域連續型降雨-逕流模式之研究，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
33. 楊道昌、游保杉，民國 86 年，目標函數對連續型降雨-逕流模式之研究，台灣水利，第 45 卷，第 4 期，第 66-73 頁。
34. 楊道昌、游保杉，民國 86 年，目標函數對連續型降雨-逕流模式率定之影響，台灣水利，第 45 卷，第 4 期，第 66-73 頁。
35. 經濟部水利署，民國 100 年，氣候變遷對水旱災災害防救衝擊評估研究計畫(2/2)。
36. 經濟部水利署，民國 101 年，氣候變遷對中部地區水旱災災害防救衝擊評估及調適策略擬定(1/2)。
37. 經濟部水利署，民國 102 年，氣候變遷對中部地區水旱災災害防救衝擊評估及調適策略擬定(2/2)。
38. 經濟部水利署，民國 103 年，氣候變遷下臺灣九大地下水資源區地下水潛能變化之研究(1/2)。
39. 經濟部水利署，民國 104 年，氣候變遷下臺灣九大地下水資源區地下水潛能變化之研究(2/2)。
40. 經濟部水利署，民國 105，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(1/2)。
41. 經濟部水利署，民國 106，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)。
42. 經濟部水利署，民國 108 年，因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(1/2)。
43. 經濟部水利署，民國 109 年，因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)。
44. 經濟部水利署，民國 99 年，氣候變遷對水旱災災害防救衝擊評估研究計畫(1/2)。
45. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年，強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(2/2)。
46. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年，強化中部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究。
47. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年，強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究。
48. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年，強化東部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究。
49. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年，臺灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究。
50. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 106 年，因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估(1/2)。

51. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 107 年，因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估(2/2)。
52. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年，108 年北部區域水資源經理計畫滾動檢討。
53. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年，108 年南部區域水資源經理計畫滾動檢討。
54. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 99 年，強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(1/2)。
55. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年，強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(2/2)。
56. 經濟部水利署南區水資源局，民國 104 年，氣候變遷下曾文、烏山頭水庫系統供水潛能分析檢討。
57. 經濟部水利署南區水資源局，民國 104 年，高雄地區水資源供需風險及經濟面影響研究。
58. 經濟部水利署南區水資源局，民國 107 年，曾文溪及高屏溪水系之水資源風險管理計畫。
59. 錢滄海、楊孟叡、曹舜評、李汴軍，民國 99 年，臺北測站長時間降雨之趨勢檢定，水土保持學報，第 42 卷，第 3 期，第 285 至 304 頁。
60. 顏月珠，民國 75 年，實用無母數統計方法。

附錄一 氣候變遷情境說明

附錄一 氣候變遷情境說明

一、IPCC AR4 情境

IPCC 於 2007 年發布 AR4，並評估各種溫室氣體排放情境下氣候變遷對於雨量與溫度等變量之影響。其溫室氣體排放情境主要由 IPCC 排放情境特別報告(IPCC Special Report on Emissions Scenarios, SRES)所製定，藉由預測未來可能之經濟、人口、工業以及環境之發展趨勢，提出可能的溫室氣體排放情境，SRES 訂立四個情境來闡述未來不同發展可能導致之溫室氣體排放情境，假設未來可能致力於經濟發展，或是朝永續發展利用目標等可能情形，並考慮全球性或區域性不同發展對氣候所造成之影響，其主要分成 A1、A2、B1 以及 B2，共計四大項情境。針對各情境之詳細說明如下：

A1:描述全球經濟大幅成長，市場經濟導向，窮國與富國間之差距消失，人類大幅投資教育與提高生活水準，科技成長與資訊流通順暢，其包含以下幾個情境：

A1FI：人類仍大幅使用石化燃料。

A1T：再生能源進展迅速，人類不再使用石化燃料。

A1B：再生能源與石化燃料平衡使用。

A2:描述全球經濟成長幅度不等，而導致工業國家與開發國家之收入差異仍大，科技與人口流動較不通暢，強調家庭或族群生產力，其人口成長率係四個情境中最高者。

B1:描述全球環境與社會意識高漲，並結合全世界力量追求永續發展，經濟發展程度適中，科技發展扮演重要角色，世界各國貧富差距縮小。

B2:描述世界各國對於環境與社會之永續發展日趨重視，政府政策受到環境意識影響，全球化腳步減緩，而地域性之決策機制顯得更受重視。

二、IPCC AR5 情境

IPCC 於 2014 年公布 AR5，其係以代表濃度路徑(RCP)重新定義四組未來變遷情境，其情境分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 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指標性數值加以區分。以 RCP2.6 情境為例，2.6 意味著每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年相較於 1750 年會增加 2.6 瓦。針對各情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 以及 RCP8.5)之詳細說明如下：

RCP2.6：屬於相對樂觀之情境(輻射強迫力在 2100 年呈減少趨勢)，每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年增加 2.6 瓦，二氧化碳濃度相當於 421 ppm，溫室氣體增加情況相對較低之情境。

RCP4.5：屬於穩定之情境(輻射強迫力在 2100 年呈較為穩定之狀態)，每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年增加 4.5 瓦，二氧化碳濃度相當於 538 ppm，代表世界各國盡力達成溫室氣體減量之目標。

RCP6.0：屬於穩定之情境(輻射強迫力在 2100 年呈較為穩定之狀態)，每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年增加 6.0 瓦，二氧化碳濃度相當於 670 ppm，代表世界各國並未盡力達成溫室氣體減量之目標。

RCP8.5：屬於溫室氣體高度排放之情境(輻射強迫力在 2100 年呈持續增加趨勢)，每平方公尺之輻射強迫力在 2100 年增加 8.5 瓦，二氧化碳濃度相當於 936 ppm，代表世界各國並未執行任何溫室氣體減量之動作。

三、IPCC AR6 情境

聯合國政府間氣候變遷專門委員會第六次評估報告(IPCC AR6)主要採用之新版氣候變遷情境設定為 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5，其在設定上主要由社經發展情況與輻射強迫力數據兩部分組成，社經發展情況係藉由「共享社會經濟路徑」(SSP)假設未來全球社經發展可能採取之路線，而輻射強迫力數值則用以代表世紀末之

暖化程度高低，數值愈高代表暖化程度亦愈高，其與 AR5 代表濃度路徑(RCP)中輻射強迫力數值意義相同。此外，IPCC AR6 為能呼應巴黎協定所設定 1.5°C 與 2.0°C 目標，在未來氣候推估時亦採用各種固定增溫條件(1.5°C、2.0°C、3.0°C 以及 4.0°C)進行氣候變遷影響分析。針對各情境(SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5)之詳細說明如下：

(一)SSP1-1.9 (極低排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP1-1.9 為溫室氣體極低排放情境，SSP1 描述全球各國將氣候變遷視為重大議題，其社會經濟發展路徑屬於永續路線(sustainability)，而 1.9 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 1.9 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較低者。在此情境下，其逐漸減少碳排放量，大約於 2050 年達到淨零碳排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP1-1.9 情境世紀末暖化程度大概為 1.4°C，符合巴黎協定致力將全球增溫控制於 1.5°C 內之目標。

(二)SSP1-2.6 (低度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP1-2.6 為溫室氣體低度排放情境，SSP1 描述全球各國將氣候變遷視為重大議題，其社會經濟發展路徑屬於永續路線(sustainability)，而 2.6 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 2.6 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較低者，但仍略高於 SSP1-1.9。在此情境下，其逐漸減少碳排放量，大約於 2075 年達到淨零排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP1-2.6 情境世紀末暖化程度大概為 1.8°C，符合巴黎協定將全球增溫控制於 2.0°C 內之目標。

(三)SSP2-4.5 (中度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP2-4.5 為溫室氣體中度排放情境，SSP2 描述全球各國將依照現況持續發展，其社會經濟發展路徑屬於中間路線(middle of the road)，而 4.5 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 4.5 Wm^{-2} ，暖化影響為中等程度。在此情境下，

其將維持目前碳排放程度，大約至 2040 年碳排放達到高峰後開始才減少碳排放量，但至世紀末前都無法達到淨零碳排放目標。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP2-4.5 情境世紀末暖化程度大概為 2.7°C。

(四)SSP3-7.0 (高度排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP3-7.0 為溫室氣體高度排放情境，SSP3 描述全球各國因區域或民族意識高漲，以提高自身競爭力為主要目標，無視社經發展對於環境可能造成之負面影響，其社會經濟發展路徑屬於區域競爭路線(regional rivalry)，而 7.0 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 7.0 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較高者。在此情境下，因無推動額外氣候政策(no additional climate policy)，導致碳排放量不斷增加，尤其非碳溫室氣體(包含空氣中氣溶膠物質)排放量增加最為顯著，其碳排放量將於世紀末增加至目前兩倍。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP3-7.0 情境世紀末暖化程度大概為 3.6°C。

(五)SSP5-8.5 (極高排放情境)

就溫室氣體排放量而言，SSP5-8.5 為溫室氣體極高排放情境，SSP5 描述全球市場逐漸整合且經濟成長快速，因成功解決許多環境議題使各國相信即使全力發展化石燃料，仍然可邁向永續發展，其社會經濟發展路徑屬於石化燃料發展路線(fossil-fueled development)，而 8.5 則代表暖化效應於世紀末造成之輻射強迫力約為 8.5 Wm^{-2} ，暖化影響為 5 種主要情境中相對較高者。在此情境下，因無推動額外氣候政策(no additional climate policy)，導致碳排放量不斷增加，其碳排放量將約於 2050 年增加至目前兩倍，而約於 2075 年增加至目前三倍。相較於工業化前時段(1850 至 1900 年)之全球平均溫度，SSP5-8.5 情境世紀末暖化程度大概為 4.4°C。

附錄二 臺灣統計降尺度產品介紹

附錄二 臺灣統計降尺度產品介紹

一、IPCC AR4 降尺度產品

TCCIP 根據聯合國氣候變遷專門委員會(IPCC)第四次評估報告(AR4)所發布的 24 個 GCM 進行空間降尺度分析，並評估各種溫室氣體排放情境下氣候變遷對於月雨量以及月溫度的影響。目前國際上常採用之氣候變遷情境共有 6 種，即 A1FI、A1T、A1B、A2、B1 及 B2。IPCC 出版第三次評估報告(Third Assessment Report, TAR)(IPCC, 2001)時，當時國際間多採用 A2 與 B2 情境進行分析，而在 IPCC 於 2007 年提出 AR4 氣候變遷情境後，並於 2008 年在其網站上釋出較完整之情境資料供下載分析。雖然在 IPCC 的報告中一再提及上述 6 種氣候變遷情境在推估未來情況具同等重要性，然臺灣一般係探討 A1B、A2 及 B1 等 3 種情境，此 3 種情境分別代表持平、較悲觀以及較樂觀之溫室氣體排放情境。

TCCIP 使用之統計降尺度方法，是由高解析度觀測資料與低解析度 ESM 或者 GCM 資料兩者的累積函數(Cumulative Distribution Function, CDF)關係，透過偏差量的校正(bias correction)降尺度後，以獲得臺灣地區高解析度(5 公里×5 公里)之月平均氣候值之模式結果。觀測資料包含東亞降雨與臺灣降雨資料，分別採用 Aphrodite (Asia Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources)觀測月平均降雨資料與 TCCIP 計畫產製之 5 公里高解析平均降雨，藉由先將歷史資料降尺度後，進而推估未來氣候變遷情境下降尺度之月降雨與溫度資料。

TCCIP 主要提供近未來(2020 至 2039 年)及世紀末(2080 至 2099 年)兩個時段的降尺度結果。針對每一個未來期程皆有三種情境設定，分別為 A1B、A2 及 B1 情境。雨量降尺度結果以變化百分比的形式呈現，其意義為未來期程(近未來或世紀末兩個時段)雨量相對於基期(1980 至 1999 年)雨量的增減百分比；而溫度降尺度結果則是以增減度數的形式呈現。以雨量為例，若其變化百分比為 10.5%，則表示未來期程的月雨

量相對於基期月雨量會增加 10.5%；若變化百分比為-5.5%，表示未來期程的月雨量較於基期的月雨量減少 5.5%，以此類推。

二、IPCC AR5 降尺度產品

TCCIP 於 IPCC AR5 未來降尺度結果提供兩種推估時段，一種為四段推估時段，分別為 2021 至 2040 年、2041 至 2060 年、2061 至 2080 年及 2081 至 2100 年之降尺度結果。另一種為三段推估時段，分別為 2016 至 2035 年、2046 至 2065 年、2081 至 2100 年之降尺度結果，而 TCCIP 建議若未來需與國外研究結果進行比較，可採用三段時間；若需要完整不間斷的未來推估時間，則可採用四段時間。針對每一個未來期程皆有四種情境設定，分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 情境。月雨量與月溫度的降尺度結果其空間解析度為 5 公里x5 公里，而雨量降尺度結果以變化百分比的形式呈現，其意義為未來期程雨量相對於基期(1986 至 2005 年)雨量的增減百分比；而溫度降尺度結果則是以增減度數的形式呈現。

三、IPCC AR6 降尺度產品

TCCIP 於 IPCC AR6 未來降尺度結果提供兩種不同氣候變遷情境設定下推估結果，分別為共享社會經濟路徑(簡稱 SSP 情境)與固定增溫條件，而不同情境下模式推估資料清單如附表-1 所示。其中，共享社會經濟路徑包含 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 以及 SSP5-8.5 共計 5 種情境，針對每種情境皆包含 2015 至 2100 年之日雨量與日溫度降尺度結果；固定增溫條件則包含 1.5、2.0、3.0 以及 4.0°C 共計 4 種情境，針對每種情境皆包含資料長度為 20 年之日雨量與日溫度降尺度結果。日雨量與日溫度的降尺度結果其空間解析度為 5 公里x5 公里，日雨量降尺度結果單位為 mm/day，溫度降尺度結果單位為°C。

附表-1 不同情境下模式推估資料清單

模式名稱	研究中心	排放情境									
		historical		ssp126		ssp245		ssp370		ssp585	
		降雨	溫度	降雨	溫度	降雨	溫度	降雨	溫度	降雨	溫度
ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ACCESS-ESM1-5	CSIRO	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
AWI-CM-1-1-MR	AWI	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BCC-CSM2-MR	BCC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CanESM5	CCCma	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CESM2-WACCM	NCAR	●		●		●		●		●	
CMCC-CM2-SR5	CMCC	●		●		●		●		●	
CMCC-ESM2	CMCC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EC-Earth3-AerChem	EC-Earth-Consortium	●	●					●	●		
EC-Earth3-CC	EC-Earth-Consortium	●	●			●	●			●	●
EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth-Consortium	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FGOALS-g3	CAS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GFDL-CM4	NOAA-GFDL	●	●			●	●			●	●
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
IITM-ESM	CCCR-IITM	●	●	●	●	●		●		●	
INM-CM4-8	INM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
INM-CM5-0	INM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
IPSL-CM5A2-INCA	IPSL	●		●				●			
IPSL-CM6A-LR	IPSL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
KACE-1-0-G	NIMS-KMA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
KIOST-ESM	KIOST	●	●	●	●	●	●			●	●
MIROC6	MIROC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MPI-ESM1-2-HR	DKRZ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MPI-ESM1-2-LR	MPI-M	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MRI-ESM2-0	MRI	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
NESM3	NUIST	●	●	●	●	●	●			●	●
NotESM2-LM	NCC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
NotESM2-MM	NCC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
TaiESM1	AS-RCEC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
模式數量		31	28	28	25	29	26	27	23	29	26

附錄三 淡水河等 10 條水系內重要控制點

附錄三 淡水河等 10 條水系內重要控制點

各個水系重要控制點主要可分為水源設施與流量站兩種類型，其中水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)。依據上述篩選原則，篩選出淡水河等 10 條水系共計 35 處重要控制點(附表-2)，作為情境雨量與情境流量分析探討之主要對象。其中，針對各個水系內重要控制點空間分布圖如附圖-1 至附圖-10 所示。

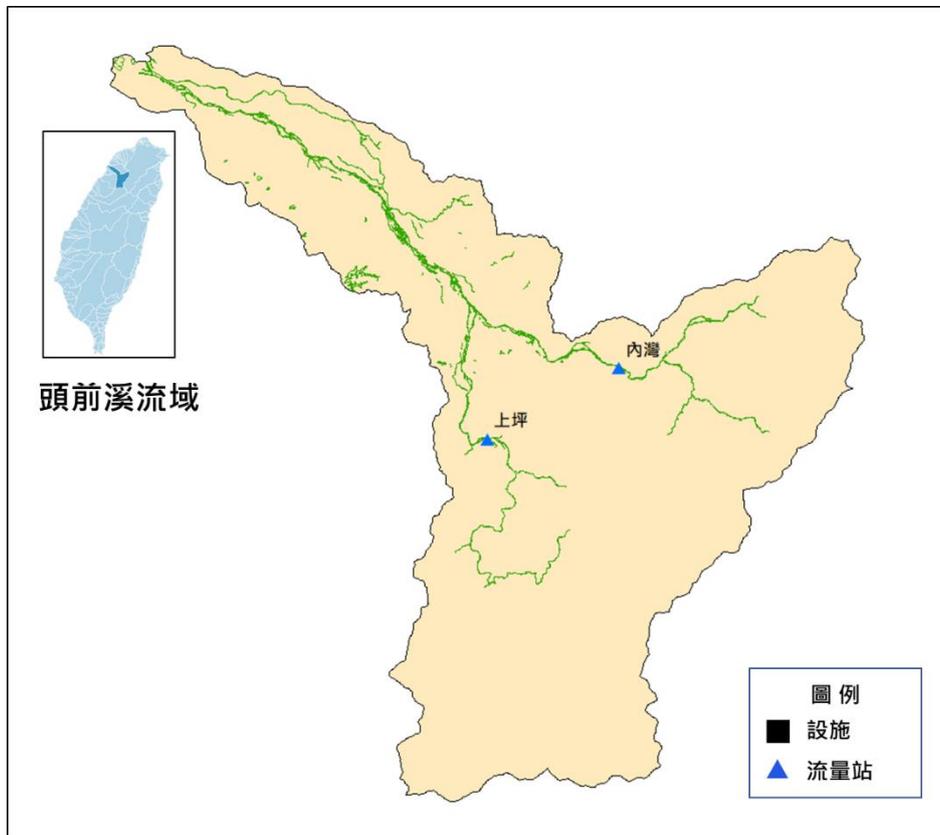
附表-2 淡水河等 10 條水系之重要控制點清單

控制點	流域	類型	控制點	控制點	流域	類型	控制點			
CP01	淡水河	流量站	橫溪	CP20	大甲溪	水源設施	德基水庫			
CP02		流量站	介壽橋(1)	CP21	濁水溪	水源設施	霧社水庫			
CP03		流量站	寶橋	CP22		流量站	水里			
CP04		流量站	五堵	CP23		水源設施	桶頭攔河堰			
CP05		水源設施	翡翠水庫	CP24		流量站	玉峰橋			
CP06		水源設施	三峽堰			CP25	流量站	內茅埔		
CP07		水源設施	石門水庫	CP26			水源設施	栗栖壩		
CP08		流量站	秀巒				CP27	八掌溪	流量站	觸口
CP09		流量站	稜角			CP28		曾文溪	水源設施	曾文水庫
CP10		流量站	霞雲						CP29	流量站	左鎮
CP11		流量站	玉峰(馬利哥灣)	CP30		水源設施	南化水庫			
CP12	頭前溪	流量站	內灣	CP31	流量站	玉田				
CP13		流量站	上坪	CP32	水源設施	玉峰堰				
CP14	中港溪	水源設施	田美攔河堰		CP33	高屏溪	水源設施	甲仙攔河堰		
CP15		流量站	永興橋	CP34			水源設施	高屏溪攔河堰		
CP16	大安溪	水源設施	鯉魚潭水庫	CP35	四重溪	水源設施	牡丹水庫			
CP17		流量站	象鼻(3)	CP33	高屏溪	水源設施	甲仙攔河堰			
CP18		流量站	雪山坑					CP34	水源設施	高屏溪攔河堰
CP19		水源設施	士林攔河堰	CP35	四重溪	水源設施	牡丹水庫			

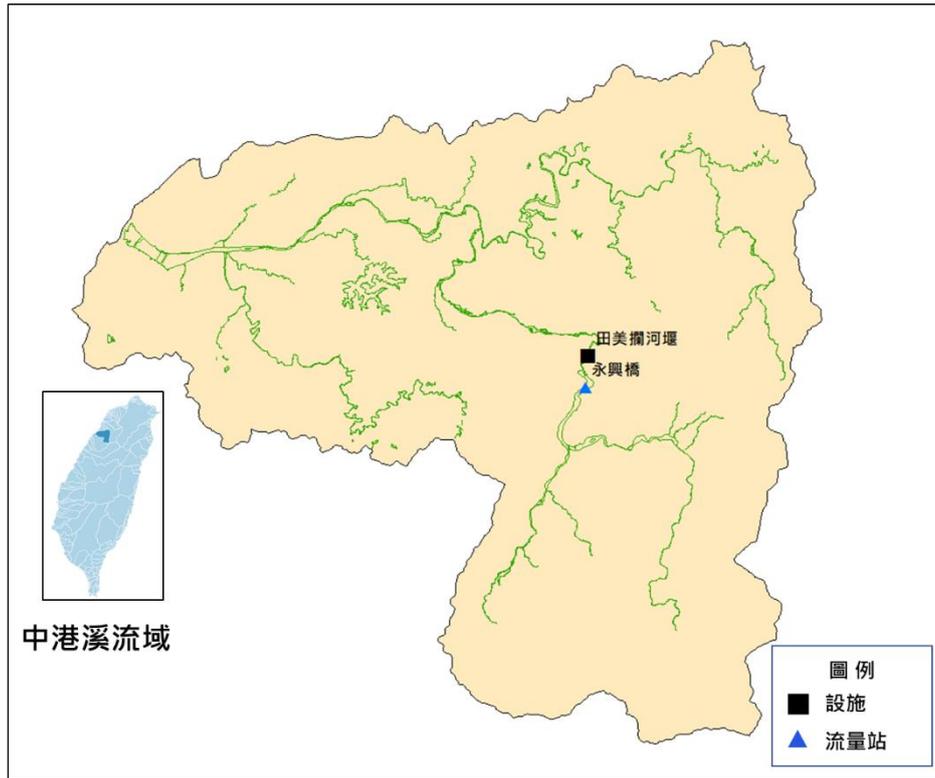
註：¹控制點類型可分為水源設施與流量站兩大類。其中，水源設施選擇上係以重要供水設施為主，且其流量資料無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)，而流量站選擇上則係參考資料長度(至少 20 年)、現存測站以及無人為取水影響(或者可排除人為取水影響)；²控制點編號原則大致上由北至南逐漸增加。



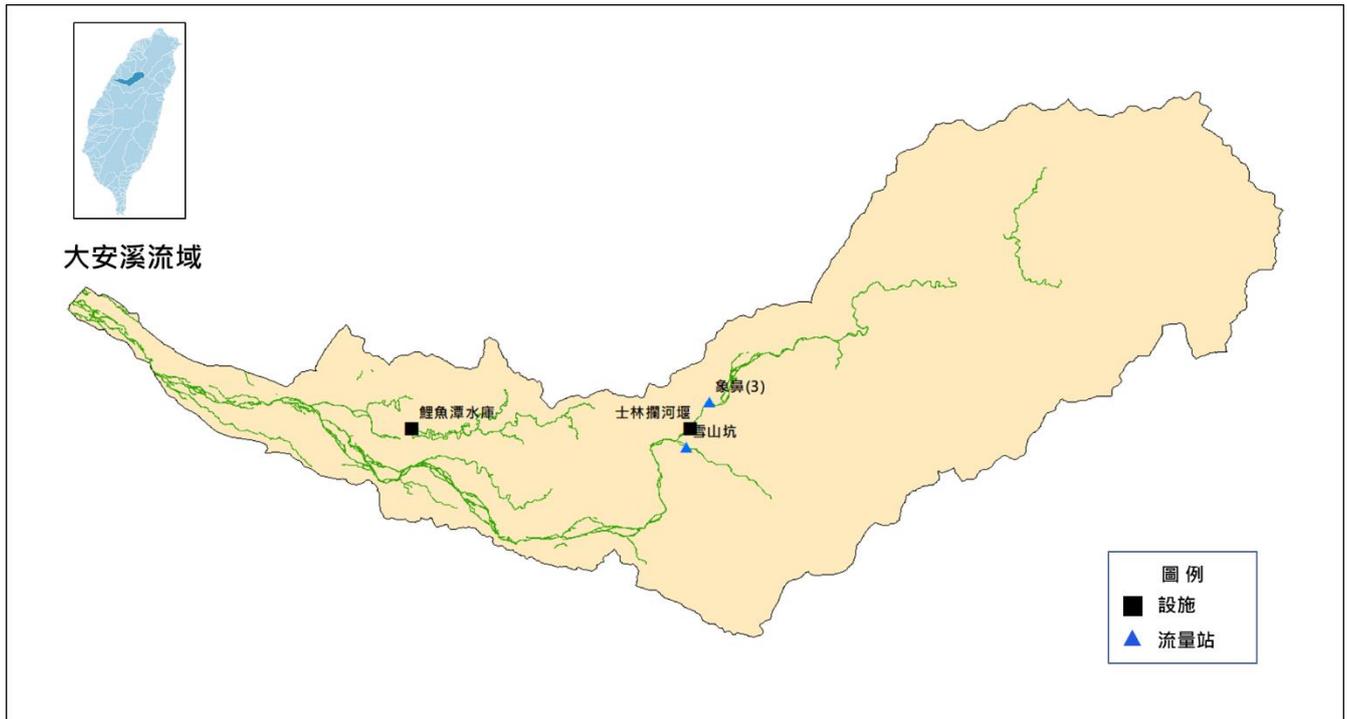
附圖-1 淡水河流域內重要控制點



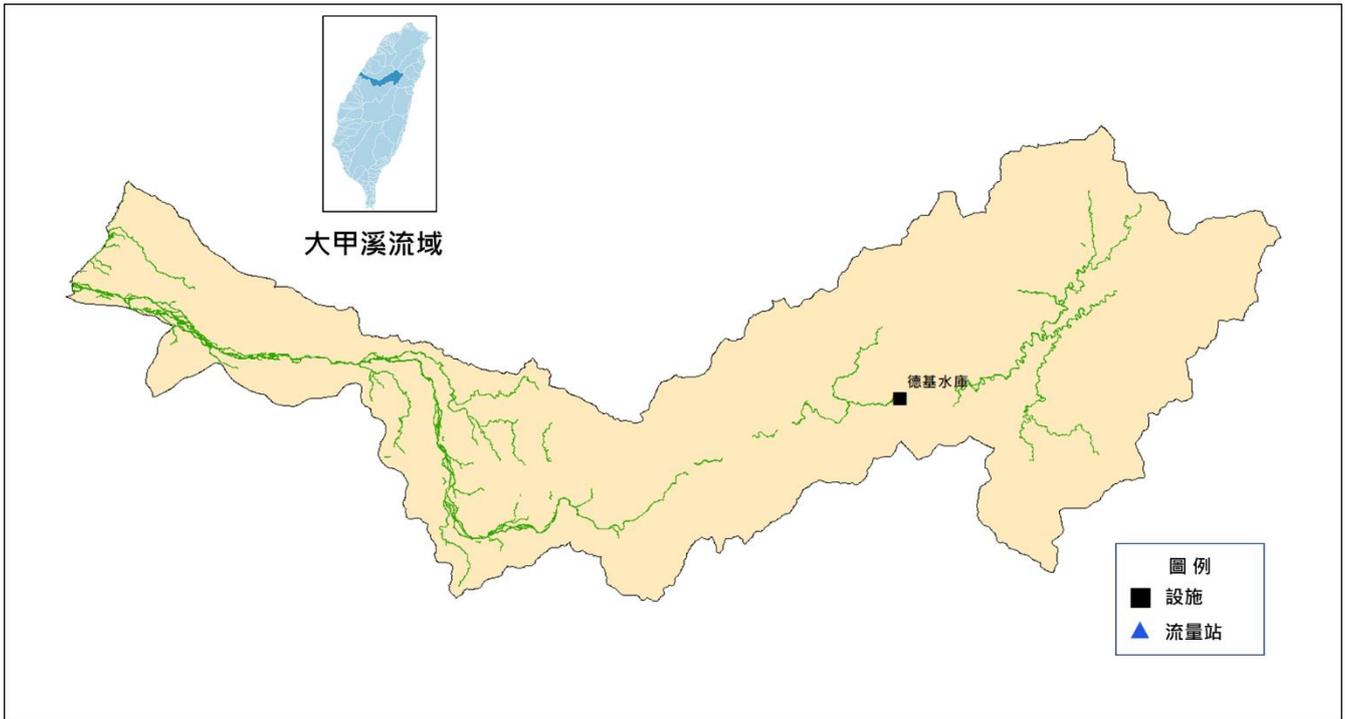
附圖-2 頭前溪流域內重要控制點



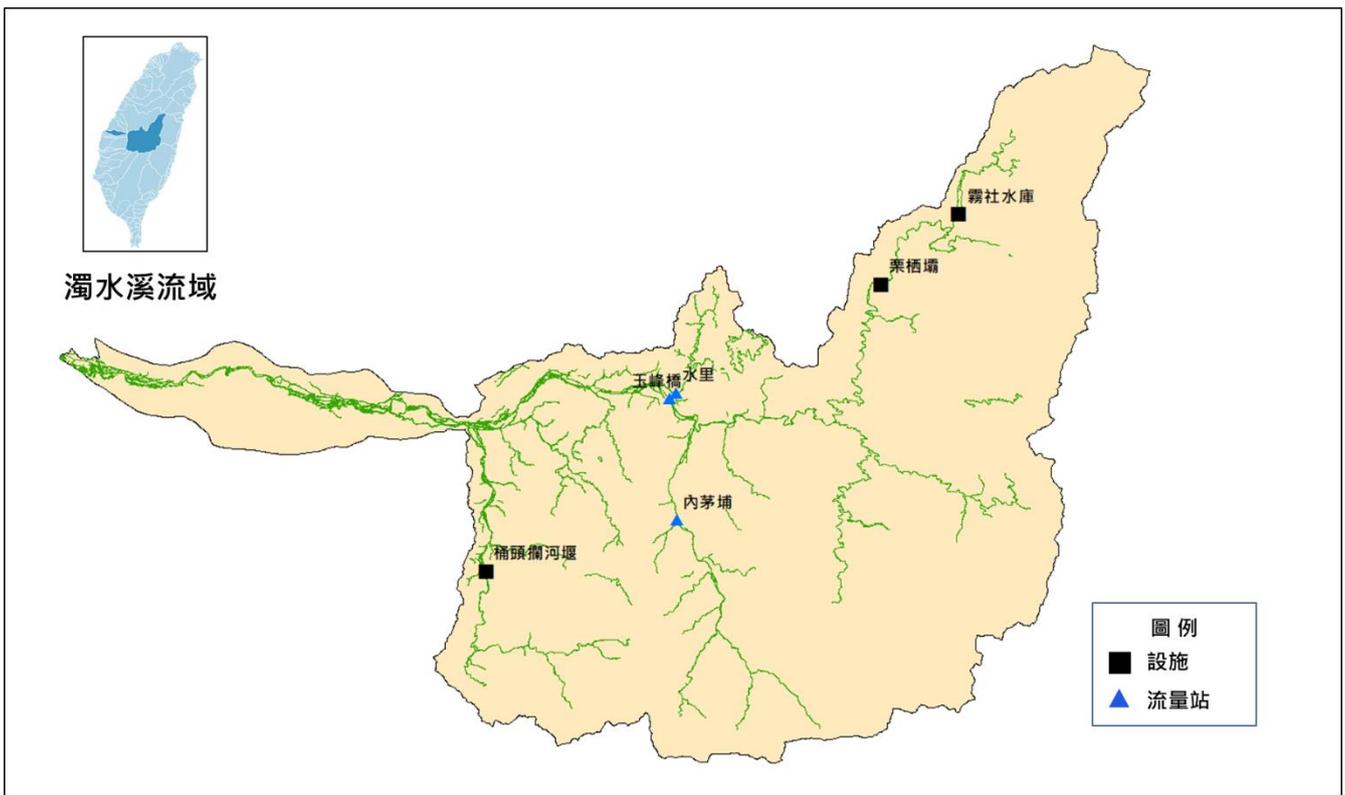
附圖-3 中港溪流域內重要控制點



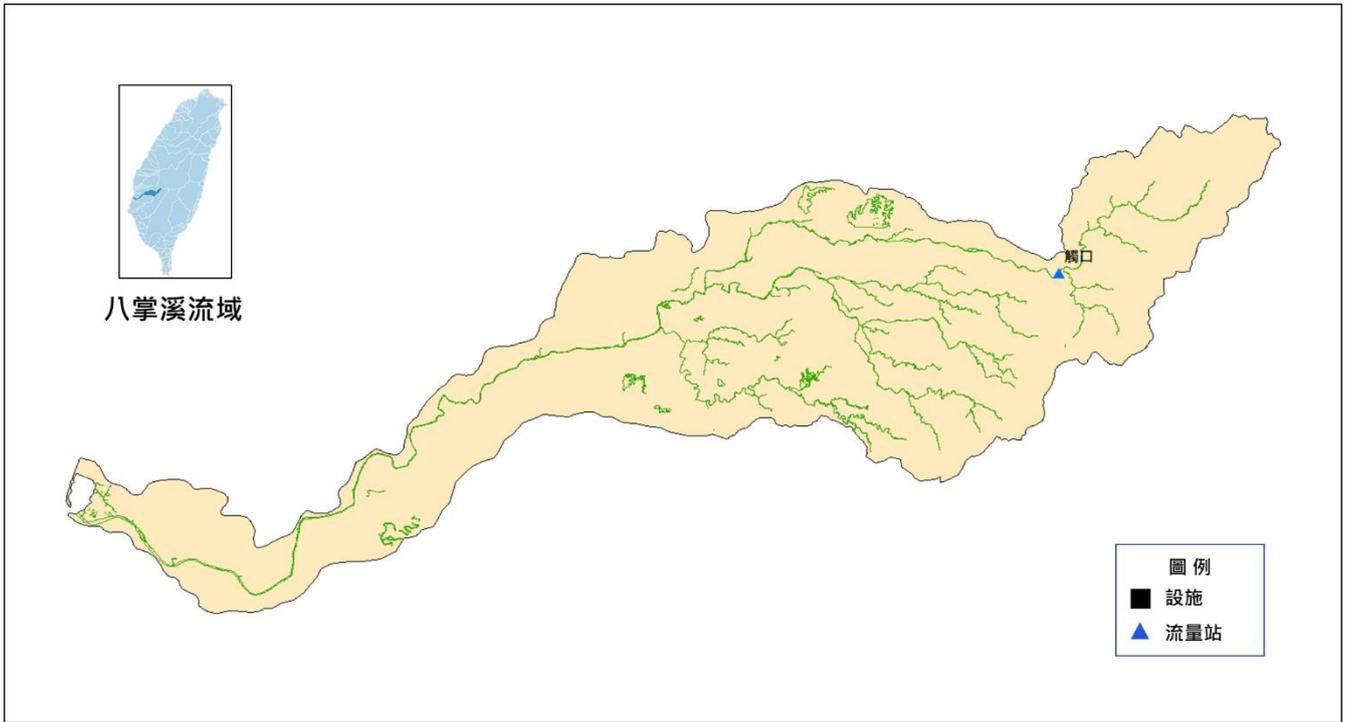
附圖-4 大安溪流域內重要控制點



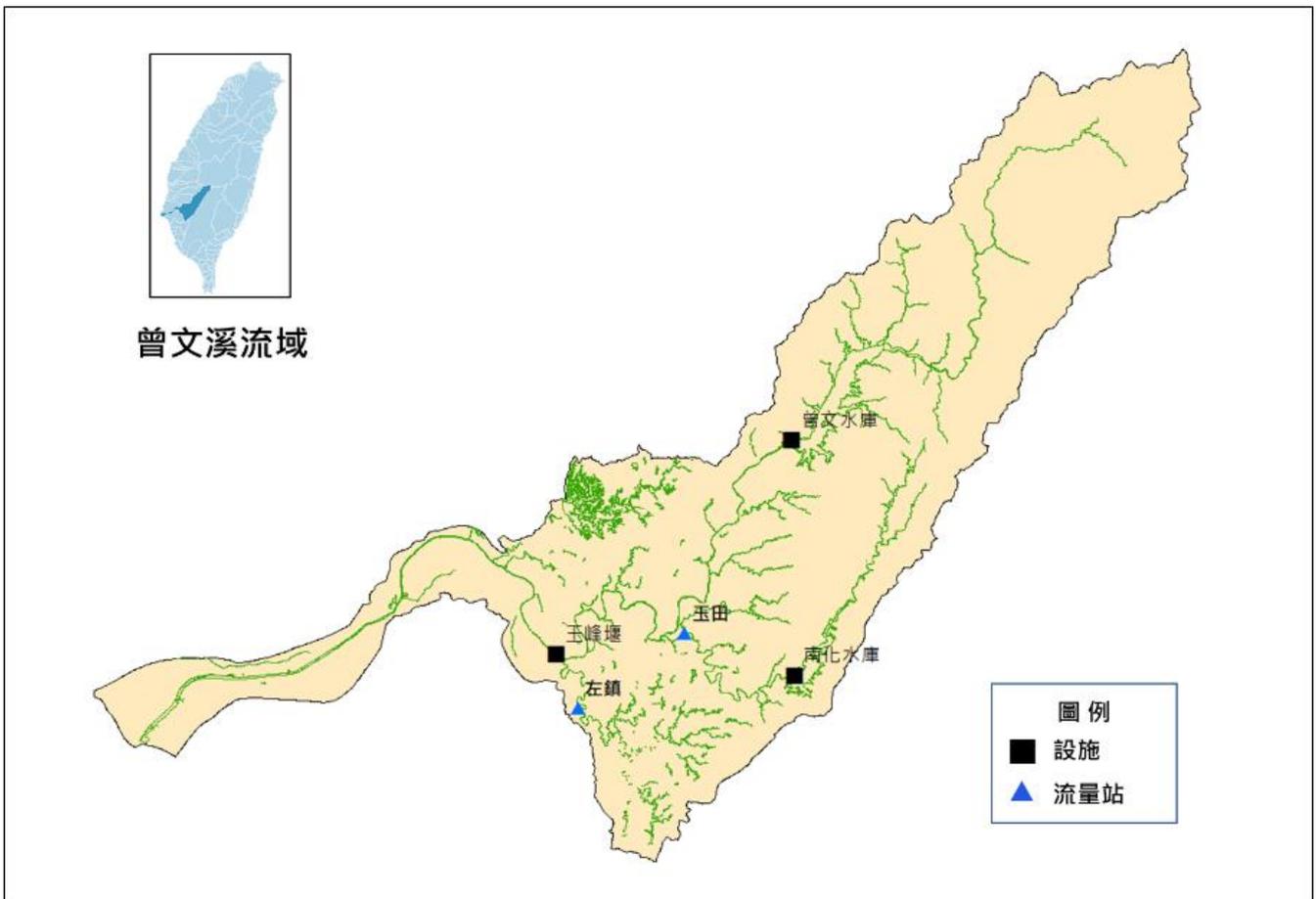
附圖-5 大甲溪流域內重要控制點



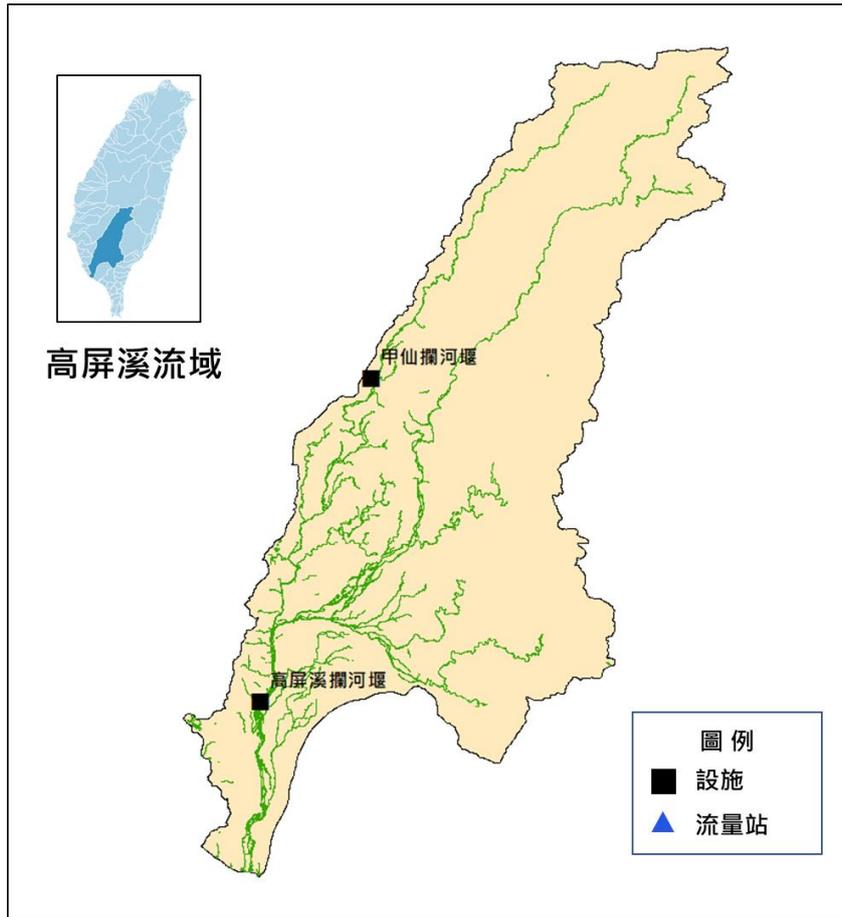
附圖-6 濁水溪流域內重要控制點



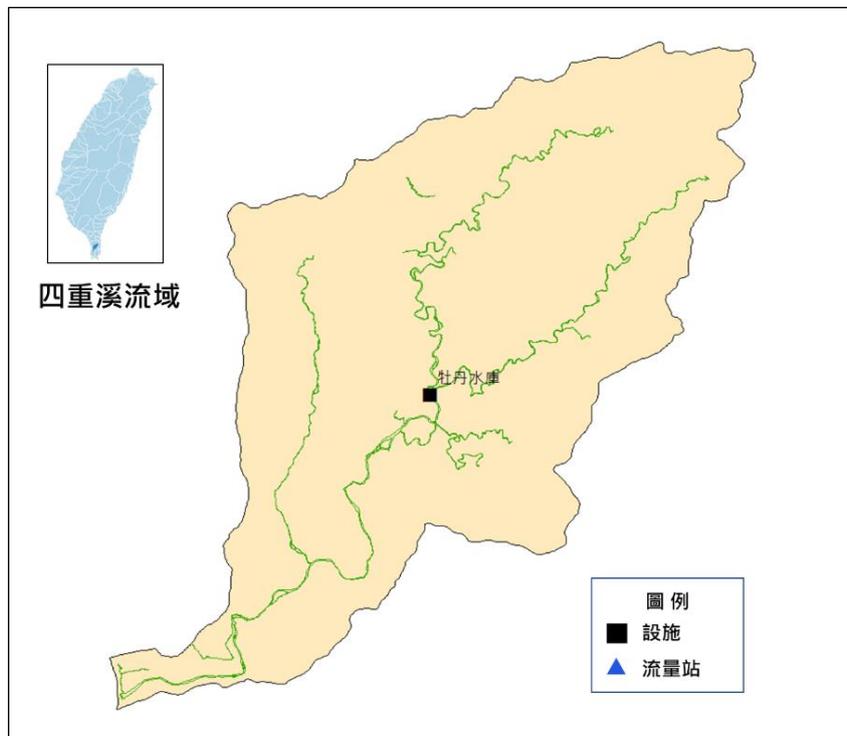
附圖-7 八掌溪流域內重要控制點



附圖-8 曾文溪流域內重要控制點



附圖-9 高屏溪流域內重要控制點



附圖-10 四重溪流域內重要控制點

附錄四 淡水河等 10 條水系內流量推估公式

附錄四 淡水河等 10 條水系內流量推估公式

附表-3 淡水河等 10 條水系內流量推估公式(1/4)

流域	控制點	期間	流量推估計算式	備註
淡水河	基隆河-基隆河抽水站	70 年~迄今	$Q_{\text{未控制1}} = Q_{\text{介壽橋}} \times \frac{A_{\text{基隆抽水站}} - A_{\text{介壽橋}}}{A_{\text{介壽橋}}}$ $Q_{\text{基隆河抽水站}} = Q_{\text{介壽橋}} + Q_{\text{未控制1}}$	1. $Q_{\text{未控制1}}$ 為員山子堰至基隆抽水站未控制流量 2. $Q_{\text{基隆河抽水站}}$ 為基隆河抽水站天然流量
	基隆河-東勢坑堰	70 年~迄今	$Q_{\text{東勢坑堰}} = Q_{\text{介壽橋}} \times \frac{A_{\text{東勢坑堰}}}{A_{\text{介壽橋}}} \times \frac{P_{\text{五堵}}}{P_{\text{瑞芬(2)}}}$	東勢坑堰天然入流量
	基隆河-西勢水庫	70 年~迄今	$Q_{\text{西勢水庫}} = Q_{\text{介壽橋}} \times \frac{A_{\text{西勢水庫}}}{A_{\text{介壽橋}}} \times \frac{P_{\text{五堵}}}{P_{\text{瑞芬(2)}}}$	西勢水庫入流量
	基隆河-八堵抽水站	70 年~迄今	$Q_{\text{未控制2}} = Q_{\text{介壽橋}} \times \frac{A_{\text{八堵抽水站}} - A_{\text{基隆抽水站}} - A_{\text{西勢水庫}} - A_{\text{東勢坑堰}}}{A_{\text{介壽橋}}} \times \frac{P_{\text{五堵}}}{P_{\text{瑞芬(2)}}}$ $Q_{\text{八堵抽水站}} = Q_{\text{介壽橋}} + Q_{\text{未控制1}} + Q_{\text{東勢坑堰}} + Q_{\text{西勢水庫}} + Q_{\text{未控制2}}$	1. $Q_{\text{未控制2}}$ 為基隆抽水站至八堵抽水站未控制流量 2. $Q_{\text{八堵抽水站}}$ 為八堵抽水站天然流量
	新店溪-翡翠水庫	47 年~72 年	$Q_{\text{翡翠水庫}} = 1.29 \times Q_{\text{乾溝站}}$	
		73 年~迄今	$Q_{\text{翡翠水庫}} = \text{翡翠水庫營運紀錄}$	
	新店溪-青潭堰	47 年~迄今	$Q_{\text{青潭堰}} = 1.45 \times Q_{\text{乾溝站}} + 1.10 \times Q_{\text{龜山}}$	
	新店溪-南勢溪	47 年~迄今	$Q_{\text{南勢溪}} = Q_{\text{桂山壩}}$	
	新店溪-青潭堰側流量	47 年~迄今	$Q_{\text{青潭堰側流量}} = 0.124 \times Q_{\text{翡翠水庫}} + 0.10 \times Q_{\text{桂山壩}}$	指青潭堰以上，桂山壩、翡翠水庫以下集水面積所產生之境流量
	大漢溪-石門水庫	47 年~53 年	$Q_{\text{石門水庫}} = 1.408 \times Q_{\text{高義站}}$	
		54 年~迄今	$Q_{\text{石門水庫}} = \text{石門水庫營運紀錄}$	
	大漢溪-三峽堰	47 年~87 年	$Q_{\text{三峽堰}} = 0.8984 \times Q_{\text{三峽(2)站}}$	
		88 年~迄今	$Q_{\text{三峽堰}} = 0.8984 \times (Q_{\text{三峽(2)站}} + Q_{\text{三峽堰引水量}})$	
	大漢溪-中庄堰側流量	47 年~迄今	$Q_{\text{中庄堰側流量}} = 0.689 \times 0.523 Q_{\text{三峽堰}}$	中庄堰側流量為石門水庫至中庄堰側流量
大漢溪-鳶山堰側流量	47 年~迄今	$Q_{\text{鳶山堰側流量}} = 0.689 \times 0.477 Q_{\text{三峽堰}}$	鳶山堰側流量為中庄堰至鳶山堰側流量	
頭前溪	上坪堰	60 年~迄今	$Q_{\text{上坪堰}} = 1.051 \times Q_{\text{上坪站}}$	$A_{\text{上坪站}} = 221.73 \text{ km}^2$ $A_{\text{上坪堰}} = 233.04 \text{ km}^2$
	隆恩堰	60 年~迄今	$Q_{\text{隆恩堰}} = 0.888 \times Q_{\text{內灣站}} + 1.221 \times Q_{\text{上坪站}}$	

註：整理自北部、中部以及南部區域水資源經理計畫滾動檢討(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)。

附表-3 淡水河等 10 條水系內流量推估公式(2/4)

流域	控制點	期間	流量推估計算式	備註
中港溪	田美堰	69 年~74 年	$Q_{\text{田美堰}}=1.86 \times Q_{\text{南庄(2)}}$	$Q_{\text{南庄(2)}}=$ 南庄(2)站流量(1340H007)
		75 年~迄今	$Q_{\text{田美堰}}=Q_{\text{永興橋}}$	$Q_{\text{永興橋}}=$ 永興橋站流量(1340H009)
	峨眉溪	69 年~迄今	$Q_{\text{大埔水庫}}=0.7821 \times Q_{\text{田美堰}}$	
	中港溪平安橋上游側流量	69 年~迄今	$Q_{\text{平安橋上游}}=0.2544 \times Q_{\text{田美堰}}$	
大安溪	景山溪入流量	69 年 1 月~77 年 12 月	$Q_{\text{鯉魚潭}}$	$Q_{\text{鯉魚潭}}=$ 鯉魚潭站流量(1400H010)
		78 年 1 月~80 年 12 月	$\frac{A_{\text{鯉魚潭水庫}}}{A_{\text{雪山坑}}} \times Q_{\text{雪山坑}}$ $=1.1794 \times Q_{\text{雪山坑}}$	$Q_{\text{雪山坑}}=$ 雪山坑流量(1400H012) $A_{\text{鯉魚潭水庫}}=$ 鯉魚潭水庫集水面積=53.45 km ² $A_{\text{雪山坑}}=$ 雪山坑集水面積=45.32 km ²
		81 年 1 月~84 年 12 月	$\frac{A_{\text{鯉魚潭水庫}}}{A_{\text{象鼻(3)}}} \times Q_{\text{象鼻(3)}}$ $=0.1221 \times Q_{\text{象鼻(3)}}$	$A_{\text{象鼻(3)}}=$ 象鼻(3)集水面積=437.58 km ² $Q_{\text{象鼻(3)}}=$ 象鼻(3)流量(1400H015)
		85 年 1 月~92 年 12 月	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}$	$Q_{\text{鯉魚潭水庫}}=$ 鯉魚潭水庫營運紀錄
		93 年 1 月~迄今	$Q_{\text{景山}}$	$Q_{\text{景山}}=$ 景山流量(1400H019)
	士林堰入流量	69 年 1 月~79 年 12 月	$2.855+0.814 \times Q_{\text{卓蘭}}$	$Q_{\text{卓蘭}}=$ 卓蘭流量(1400H020)
		80 年 1 月~92 年 6 月	$Q_{\text{象鼻(3)}}$	
		92 年 7 月~迄今	$Q_{\text{士林堰營運報表}}$	
	雪山坑溪入流量	69 年~109 年	$Q_{\text{雪山坑}}$	
		缺值部分	$\frac{A_{\text{雪山坑}}}{A_{\text{士林堰}}} \times Q_{\text{士林堰}}$ $=0.1014 \times Q_{\text{士林堰}}$	$A_{\text{士林堰}}=$ 士林堰集水面積=447.1 km ² $Q_{\text{士林堰}}=$ 士林堰營運紀錄

註：整理自北部、中部以及南部區域水資源經理計畫滾動檢討(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)。

附表-3 淡水河等 10 條水系內流量推估公式(3/4)

流域	控制點	期間	流量推估計算式	備註
大甲溪	德基水庫入流量	69 年~迄今	$Q_{\text{德基}}$	$Q_{\text{德基}}$ =德基水庫營運紀錄
	德基-青山側流	69 年~迄今	$\frac{A_{\text{青山壩}} - A_{\text{德基}}}{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{德基}}} \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$ $=0.0081 \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$	$Q_{\text{石岡壩}}$ =石岡壩營運紀錄 $Q_{\text{志樂溪}}$ =志樂溪流量(1420H022) $Q_{\text{松茂}}$ =松茂站流量 $A_{\text{青山壩}}$ =青山壩集水面積=595.8 km ²
	青山-谷關側流	69 年~迄今	$\frac{A_{\text{谷關壩}} - A_{\text{青山壩}} - A_{\text{志樂壩}}}{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{德基}}} \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$ $=0.1928 \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$	$A_{\text{石岡壩}}$ =石岡壩集水面積=1061 km ² $A_{\text{德基}}$ =德基水庫集水面積=592 km ²
	谷關-天輪側流	69 年~迄今	$\frac{A_{\text{天輪壩}} - A_{\text{谷關壩}}}{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{德基}}} \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$ $=0.1574 \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$	$A_{\text{谷關壩}}$ =谷關壩集水面積=686.2 km ²
	天輪-馬鞍側流	69 年~迄今	$\frac{A_{\text{馬鞍壩}} - A_{\text{天輪壩}}}{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{德基}}} \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$ $=0.3335 \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$	$A_{\text{志樂壩}}$ =志樂壩集水面積=77.45 km ²
	馬鞍-石岡側流	69 年~迄今	$\frac{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{馬鞍壩}}}{A_{\text{石岡壩}} - A_{\text{德基}}} \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$ $=0.3083 \times (Q_{\text{石岡壩進水}} - Q_{\text{德基放水}})$	$A_{\text{天輪壩}}$ =天輪壩集水面積=760 km ² $A_{\text{馬鞍壩}}$ =馬鞍壩集水面積=916.4 km ²
	食水料溪	69 年~迄今	$0.067 \times Q_{\text{德基入流}}$	$A_{\text{松茂}}$ =松茂集水面積=417.08 km ²
	志樂溪	69 年~88 年 8 月 88 年 9 月~迄今	$Q_{\text{志樂溪}}$ $\frac{A_{\text{志樂壩}}}{A_{\text{松茂}}} \times Q_{\text{松茂}} = 0.1857 \times Q_{\text{松茂}}$	
濁水溪	霧社溪-霧社水庫集水區	69 年~迄今	$Q_{\text{霧社溪}} = Q_{\text{霧社水庫入流量}}$	
	萬大溪-霧社水庫至武界壩間之集水區	69 年~迄今	$Q_{\text{萬大溪}} = Q_{\text{武界壩觀測入流量}} - Q_{\text{霧社水庫出流量}}$	
	陳有蘭溪及丹大溪-武界壩下游至集集站匯流口集水區	69 年~82 年	$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{集集站}} - Q_{\text{武界壩溢流量}} - Q_{\text{日月潭發電水量}} - Q_{\text{栗栖溪}}$	
		83 年~90 年	$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{玉峰站}} - Q_{\text{武界壩溢流量}} - Q_{\text{栗栖溪}}$	
		91 年~迄今	$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{集集堰入流量}} - Q_{\text{武界壩溢流量}} - Q_{\text{日月潭發電水量}} - Q_{\text{栗栖溪}}$	
	栗栖溪-栗栖壩集水區	69 年~102 年	$Q_{\text{栗栖溪}} = 0.063 \times Q_{\text{青雲站}}^{0.912}$	青雲站(1510H011)
		102 年~迄今	$Q_{\text{栗栖溪}} = 0.282 \times Q_{\text{霧社溪}}^{0.843}$	
	清水溪-桶頭堰集水區	69 年~98 年	$Q_{\text{桶頭堰}} = Q_{\text{桶頭(2)}}$	桶頭(2)(1510H024)
99 年~迄今		$Q_{\text{桶頭堰}} = 1.082 \times Q_{\text{龍門橋}}^{0.920}$	龍門橋(1510H079)	

註：整理自北部、中部以及南部區域水資源經理計畫滾動檢討(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)。

附表-3 淡水河等 10 條水系內流量推估公式(4/4)

流域	控制點	期間	流量推估計算式	備註
濁水溪	東埔蚋溪-東埔蚋溪集水區	69年~迄今	$Q_{東埔蚋溪} = \frac{A_{東埔蚋溪}}{A_{清水溪}} \times Q_{清水溪}$ $= 0.2429 \times Q_{清水溪}$	$A_{東埔蚋溪}$ = 東埔蚋溪集水面積 = 102.3 km ² $A_{清水溪}$ = 清水溪集水面積 = 421 km ²
	水里溪	69年~83年	$Q_{水里溪} = \frac{A_{水里溪}}{A_{霧社水庫}} \times Q_{霧社水庫}$ $= 0.2518 \times Q_{霧社水庫}$	$A_{水里溪}$ (1510H064) = 水里站集水面積 = 80.22 km ² $A_{水里溪}$ = 水里溪集水面積 = 55.16 km ²
		84年~107年	$Q_{水里溪} = \frac{A_{水里溪}}{A_{水里} - A_{日月潭水庫}} \times Q_{水里}$ $= 0.2518 \times Q_{霧社水庫}$	$A_{日月潭水庫}$ = 日月潭水庫集水面積 = 17 km ²
	加走寮溪-桶頭堰至斗六堰之集水區(含加走寮溪)	69年~迄今	$Q_{桶頭堰} = 1.082 \times Q^{0.920}_{龍門橋}$	
八掌溪	竹山堰	56年1月~迄今	$Q_{竹山堰} = 1.185 \times Q_{觸口站}$	
	蘭潭水庫	56年1月~迄今	$Q_{蘭潭水庫} = 0.0203 \times Q_{竹山堰}$	
	仁義潭水庫	56年1月~迄今	$Q_{仁義潭水庫} = 0.0372 \times Q_{竹山堰}$	
曾文溪	曾文水庫	48年1月~63年6月	$Q_{曾文水庫} = 0.980 \times Q_{照興站}$	
		63年7月~迄今	$Q_{曾文水庫} = \text{曾文水庫營運紀錄}$	
	烏山頭水庫	48年1月~迄今	$Q_{烏山頭水庫} = 0.09668 \times Q_{曾文水庫}$	
	南化水庫	48年1月~83年6月	$Q_{南化水庫} = 0.6479 \times Q_{玉田站}$	
		83年7月~88年12月	$Q_{南化水庫} = \text{南化水庫營運紀錄}$	
89年1月~迄今	$Q_{南化水庫} = \text{營運紀錄進水量扣除甲仙堰越引水量}$			
高屏溪	甲仙堰	48年1月~59年2月	$Q_{甲仙堰} = 1.1816 \times Q_{小林站}$	
		59年3月~63年12月	$\text{豐水期(6月~10月)} Q_{甲仙堰} = 1.2879 \times Q_{月眉站}^{0.940}$	
			$\text{枯水期(11月~翌年5月)} Q_{甲仙堰} = 1.2655 \times Q_{月眉站}^{0.895}$	
		64年1月~74年12月	$Q_{甲仙堰} = 1.3434 \times Q_{民族站}$	
		75年1月~81年12月	$Q_{甲仙堰} = 1.4473 \times Q_{民族站}$	
		82年1月~85年12月	$Q_{甲仙堰} = 1.3434 \times Q_{民族站}$	
		86年1月~88年12月	$Q_{甲仙堰} = 1.1513 \times Q_{楠梓橋}$	
		89年1月~98年7月	$Q_{甲仙堰} = \text{營運紀錄}$	
		98年8月~99年4月	$Q_{甲仙堰} = \text{水桶模式推估}$	
	99年5月~迄今	$Q_{甲仙堰} = \text{營運紀錄}$		
	高屏堰	48年1月~79年12月	$Q_{高屏堰} = Q_{九曲堂站}$	
		80年1月~88年12月	$Q_{高屏堰} = 1.0625 \times Q_{黑嶺大橋站}$	
		89年1月~89年6月	$Q_{高屏堰} = 1.0625 \times Q_{黑嶺大橋站} \text{加上甲仙堰越引水量}$	
89年7月~迄今		$Q_{高屏堰} = \text{營運紀錄加上甲仙堰越引水量}$		
四重溪	牡丹水庫	43年1月~84年12月	$Q_{牡丹水庫} = \text{水桶模式推估}$	
		85年12月~迄今	$Q_{牡丹水庫} = \text{牡丹水庫管理中心營運紀錄}$	

註：整理自北部、中部以及南部區域水資源經理計畫滾動檢討(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年)。

附錄五 水文趨勢延伸方法

附錄五 水文趨勢延伸方法

一、前言

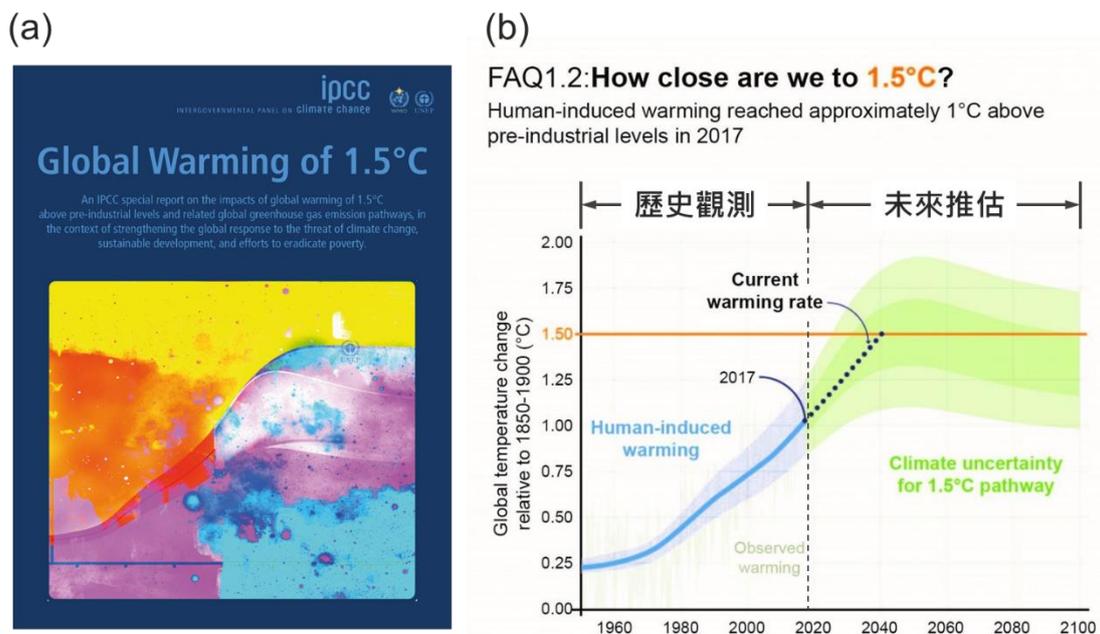
世界各國為呼應巴黎協定所設定 1.5°C 與 2.0°C 目標，陸續提出國家淨零排放目標，並且配合各種固定增溫條件(例如：1.5°C、2.0°C、3.0°C 以及 4.0°C)作為未來條件以進行氣候變遷影響分析，而未來氣候推估上大致可區分為四種方式：(1)第一種為目前國際上主流作法，即採用不同氣候變遷情境下全球環流模式之推估值作為未來氣候資料設定、(2)第二種為採用延伸歷史趨勢方式或直接假設特定水文衝擊量(例如：雨量減少 15%)作為未來氣候資料設定以及(3)其他方法，例如：採用空間上類比方式(例如：臺灣未來氣候將會與日本相似)，將周邊區域曾經或可能發生之事件作為未來氣候資料設定，或者採用時間上類比方式(例如：假設過去嚴重事件於未來可能重現)，將歷史上曾經發生之嚴重或極端事件作為未來氣候資料設定等。

以 IPCC 於 2018 年所發布全球暖化 1.5°C 特別報告為例(附圖-11)，其針對全球增溫 1.5°C 之發生時間即採用上述前兩種作法：(1)第一種為依據全球環流模式推估值，分析全球溫度符合增溫 1.5°C 之發生時間點與(2)第二種則係將全球溫度歷史觀測資料之趨勢加以延伸，假設目前增溫趨勢會延續至未來，再據以推算增溫 1.5°C 之發生時間點。

在臺灣未來氣候推估上，採用不同推估作法有其優缺點，針對前兩種作法分別說明如下：(1)針對採用全球環流模式推估值之作法，因全球環流模式演算過程遵守物理機制，故其推估值皆能合理反映出氣候變遷對於大氣與海洋之影響，惟其空間解析度較為粗糙，在應用前須再配合空間降尺度分析以提高空間解析度至符合臺灣集水區尺度。此外，由於全球環流模式與氣候變遷情境數量眾多，導致未來推估值之不確定性較高，造成衝擊影響評估結果變動範圍過大而提升決策困難度；(2)針對延伸歷史趨勢之作法，受益於水文觀測技術與空間密度提升，目前觀測資料相較於過去更加即時與可靠，藉由水文資料搭配基本統計分析與趨勢分析，可快速瞭解臺灣不同區域之本土水文特性與其水文趨勢持續發展

之可能情況，惟臺灣天氣主要係取決於周邊大氣環境，簡易水文趨勢延伸可能無法說明本土水文特性與周邊大氣環境之關係。此外，水文趨勢線性延伸若外推年限過長，亦可能導致雨量為負值等不合理情況發生。

以全球環流模式推估值進行未來氣候探討雖為國際上主流作法，但其資料取得與處理門檻較高，且臺灣在應用前仍須進行空間降尺度分析以提高其空間解析度至集水區尺度。因本土水文資料具有取得相對容易且更新速度快之特性，故嘗試發展臺灣水文趨勢延伸推估未來氣候，在本土水文趨勢將繼續延伸之前提下進行未來氣候推估，其分析結果可與國際上主流作法互相比對，有助於初步瞭解趨勢延伸之可行性與合理性，可提供未來自訂氣候情境作為參考。

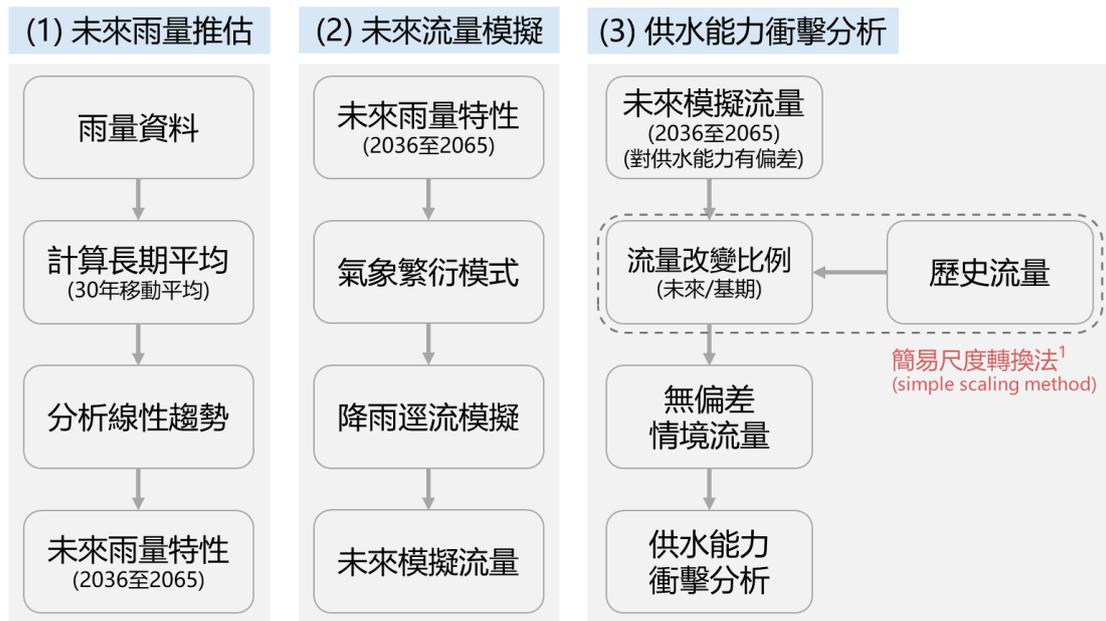


附圖-11 (a) IPCC 增溫 1.5°C特別報告與(b)增溫 1.5°C發生時間推估方法

二、分析流程與方法

為瞭解未來增溫 2.0°C條件下對應之水文特性與其對於供水能力可能造成之影響，採用本土雨量資料配合趨勢分析方法，將歷史雨量趨勢延伸至未來目標年以推估未來雨量特性，然後回饋所得雨量特性至氣象繁衍模式分別進行基期與未來日雨量資料繁衍，再應用降雨-逕流模式將基期與未來日雨量轉換為基期與未來日流量，最後導入簡易尺度轉換法產製無偏差未來日流量資料作為供水能力衝擊分析之依據，詳細流程

如附圖-12 所示。其中，針對氣候變遷時段設定上，以 1976 至 2005 年作為基期時段，而 2036 至 2065 年則作為未來時段(依據 IPCC AR6 全球增溫 2.0°C 條件最早可能於 2040 年左右發生，故選用能夠涵蓋 2040 年左右之未來時段)。針對分析流程中所採用氣象繁衍模式與降雨-逕流模式詳細內容說明如下：



註：¹簡易尺度轉換法: 歷史流量×流量改變比例 = 無偏差情境流量，國際上相關文獻包含: Bracho-Mujica et al., 2019; Lenderink and Attema, 2015; Liddicoat et al., 2012; Hayman and Wilhelm, 2010.

附圖-12 歷史趨勢延伸與供水能力衝擊分析流程

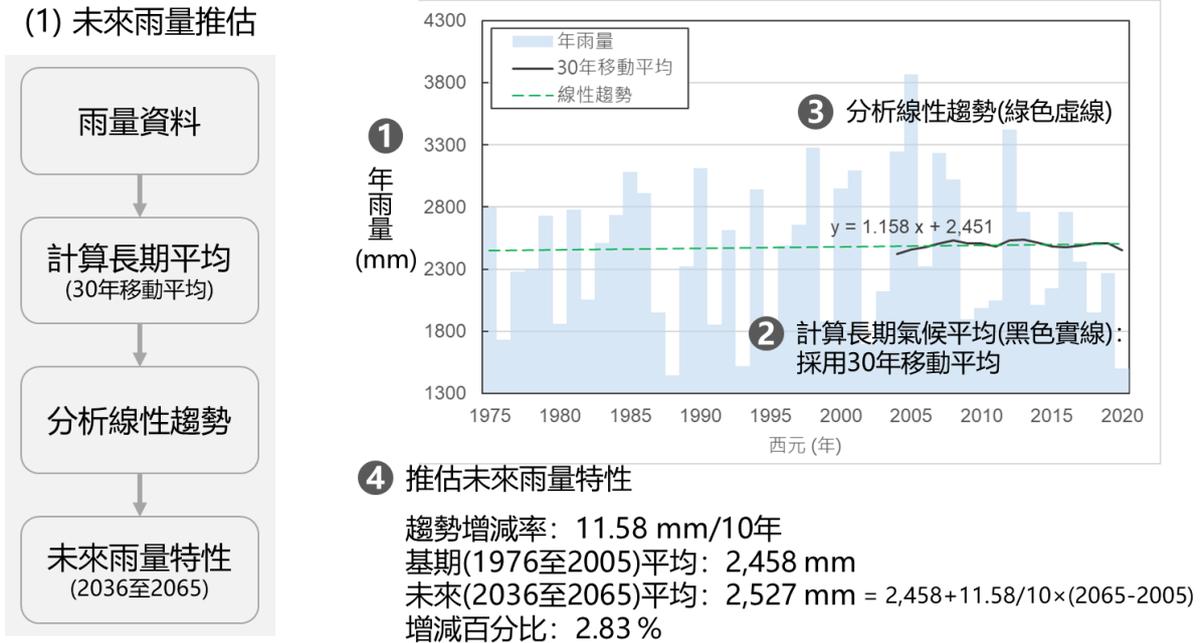
(一) 未來雨量推估方法

附圖-13 為未來雨量推估流程示意圖，針對各個步驟說明如下：

(1)雨量資料蒐集整理(例如：全年總量、豐枯水期總量、各月份總量以及連續不降雨日數等)，(2)計算 30 年移動平均以瞭解雨量資料之長期氣候平均值，(3)分析移動平均值之線性趨勢以估算其增減斜率以及(4)依據所得斜率推估未來雨量特性。若以石門水庫集水區年雨量資料為例，藉由計算 30 年移動平均可初步瞭解年雨量之長期氣候平均(黑色實線)，然後再配合線性趨勢分析估算其增減率(綠色虛線)，可求得其年雨量增減率為 11.58 mm/10yr，若基期時段(1976 至 2005 年)平均年雨量為 2,458 mm，則可應用年雨量增減率外推未來時段(2036 至 2065 年)平均年雨量可能增加至 2,527 mm，

增加幅度約為 2.83%

石門水庫年雨量長期氣候(30年)平均之趨勢分析示意圖



附圖-13 未來雨量推估流程示意圖

(二) 氣象繁衍模式

雨量繁衍可分為兩部分：(1)決定乾濕日與(2)降雨量生成。其中，決定乾濕日係指利用乾濕日移轉機率決定降雨與否，而降雨量模擬則係利用機率分布決定濕日降雨量之多寡，詳細說明如下：

1、決定乾濕日

降雨與否在決定上以歷史日雨量資料的移轉機率統計特性為演算依據，統計各月中第 $t-1$ 日降雨(wet)時，第 t 日降雨(wet)的機率，表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $t-1$ 日不降雨時(dry)，第 t 日降雨(wet)的機率，表示為 $P(W|D)$ 。當每月第一天，模擬產生 $(0,1)$ 間的隨機亂數，當亂數值小於或等於該月的降雨日發生機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；若該亂數值大於該月的降雨日發生機率 $P(W)$ 時，表示此日為非降雨日。每月除第一日外，其餘日數利用前日之降雨情形以序率方法決定為降雨或不降雨，方法如下：針對每日產生一筆隨機亂數值，若亂數值小於或等

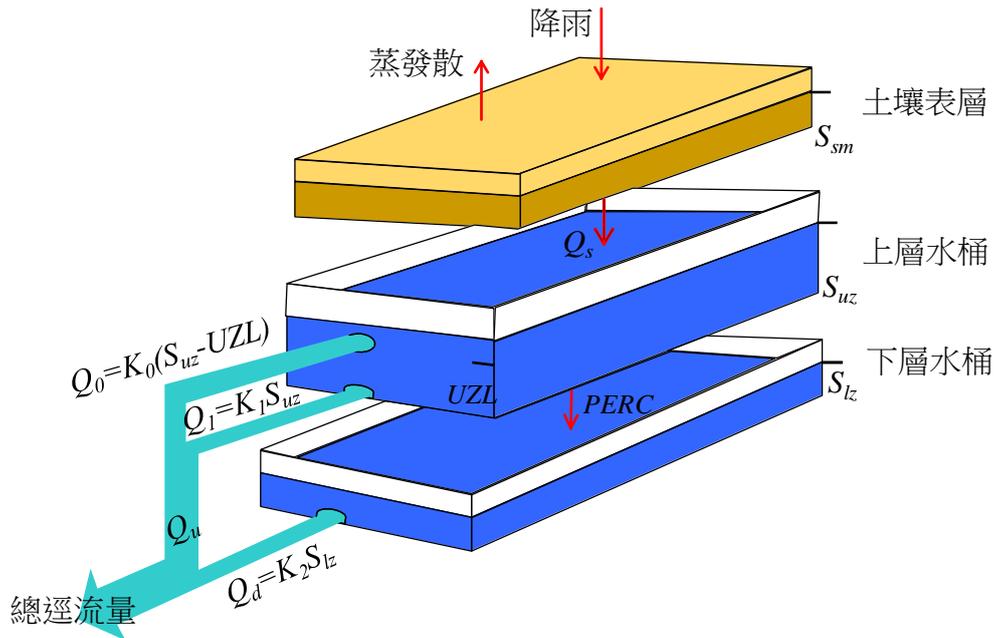
於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日；若亂數值大於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為非降雨日。

2、降雨量生成

降雨日的降雨量生成，可由機率觀念將雨量套配至合適的機率分布予以模擬。首先由歷史資料分析研究區域的日雨量機率分布，並求取該機率分布之參數，以建立該機率分布的累積分布函數；接著即可以機率觀點來模擬任一濕日的降雨量。參考吳至剛(2000)研究結果，以 Weibull 分布來套配研究區域的日雨量。模擬濕日降雨量時，先由隨機亂數產生器隨機產生一個介於 0 至 1 間的均勻分布亂數，此亂數即用來代表日雨量的累積機率值，再將此累積機率值代入日雨量的累積分布函數來推求日雨量值，即可模擬出日降雨量。對於氣候變遷情境下日雨量變化的考量，可利用歷史趨勢延伸推估雨量之統計特性，調整累積分布函數之參數(調整平均值)，即可用以模擬未來氣候變遷情境下的日雨量資料。

(三)降雨-逕流模式

修正型 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 模式為適用臺灣之降雨-逕流模式，已應用在臺灣許多集水區的流量模擬 (例如：楊道昌、游保杉，1997；楊道昌，1999；吳雷根，2004；李晏全，2006)，此模式可考慮氣候變遷情境下雨量及溫度的變化對於河川流量的影響，適合用於氣候變遷下的流量變化推估。修正型 HBV 模式將集水區降雨-逕流之機制概念化為上、下兩個水桶，模式架構包含三個主要部分：(1) 土壤含水量作用部分，(2) 逕流反應部分，(3) 土壤層與上、下水桶之水平衡方程式，架構如附圖-14 所示。



附圖-14 修正型 HBV 模式架構圖

三、情境雨量與流量推估成果

附圖-15 至附圖-17 分別為石門水庫、德基水庫以及曾文水庫之情境雨量與流量推估成果，圖中探討不同豐枯時段(包含：全年度、豐水期以及枯水期)下雨量與流量特性受氣候變遷之影響，此外亦將連續不降雨日數納入考量。其中，基期水文特性係以長條圖表示，而未來水文特性則採圖形符號搭配信賴區間(95%)加以表示。

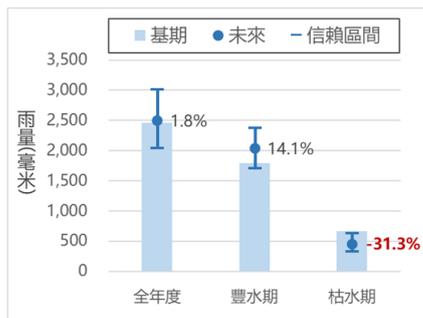
附圖-15 為石門水庫情境雨量與流量推估成果，分析結果顯示：以基期雨量作為比較基準，全年度情境雨量推估將增加 1.8%，豐水期情境雨量為增加 14.1%，枯水期情境雨量為減少 31.3%，而連續不降雨日數則為減少 25.1% (因連續不降雨日數之歷史趨勢為負值，故將其趨勢延伸至未來造成連續不降雨日數減少)。若以基期流量作為比較基準，全年度情境流量推估將增加 5.2%，豐水期情境流量為增加 12.9%，枯水期情境流量為減少 16.9%。整體而言，在氣候變遷持續影響下石門水庫情境雨量與流量具有相同增減趨勢，未來水文特性將呈現出豐愈豐、枯愈枯之特性。

附圖-16 為德基水庫情境雨量與流量推估成果，分析結果顯示：以基期雨量作為比較基準，全年度情境雨量推估將增加 7.1%，豐水期情

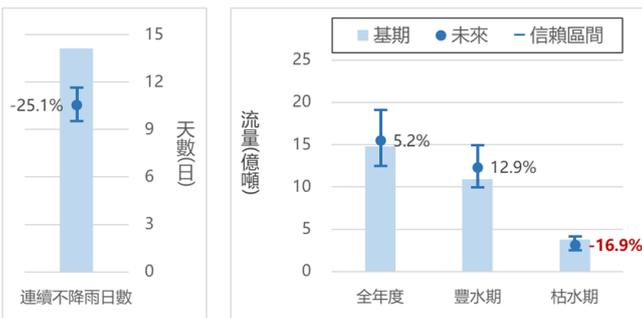
境雨量為增加 29.0%，枯水期情境雨量為減少 26.4%，而連續不降雨日數則為減少 8.8% (因連續不降雨日數之歷史趨勢為負值，故將其趨勢延伸至未來造成連續不降雨日數減少)。若以基期流量作為比較基準，全年度情境流量推估將增加 24.8%，豐水期情境流量為增加 38.3%，枯水期情境流量為減少 2.3%。整體而言，在氣候變遷持續影響下德基水庫情境雨量與流量具有相同增減趨勢，未來水文特性將呈現出豐愈豐、枯愈枯之特性。

附圖-17 為曾文水庫情境雨量與流量推估成果，分析結果顯示：以基期雨量作為比較基準，全年度情境雨量推估將增加 27.9%，豐水期情境雨量為增加 26.3%，枯水期情境雨量為增加 38.5%，而連續不降雨日數則為減少 47.0% (因連續不降雨日數之歷史趨勢為負值，故將其趨勢延伸至未來造成連續不降雨日數減少)。若以基期流量作為比較基準，全年度情境流量推估將增加 48.3%，豐水期情境流量為增加 44.0%，枯水期情境流量為增加 92.6%。整體而言，在氣候變遷持續影響下曾文水庫情境雨量與流量具有相同增減趨勢，未來水文特性將呈現出豐愈豐、枯亦愈豐之特性。

雨量特性:



流量特性:

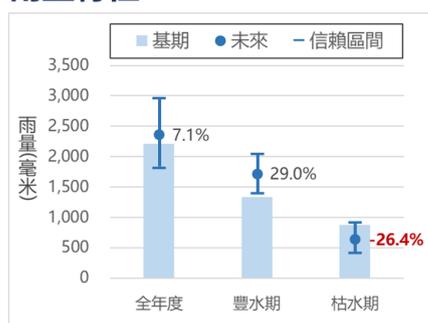


註: 不降雨日之定義為雨量<0.5mm。

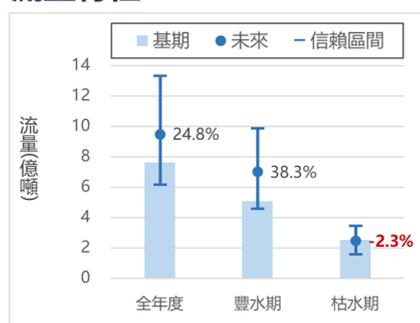
石門水庫之未來雨量與流量皆有豐愈豐、枯愈枯之特性。

附圖-15 石門水庫情境雨量與流量推估成果

雨量特性:



流量特性:

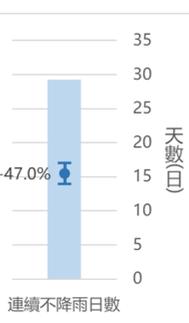
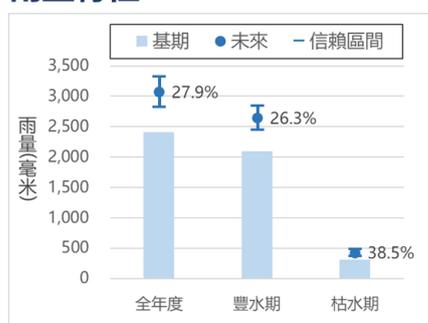


註: 不降雨日之定義為雨量<0.5mm。

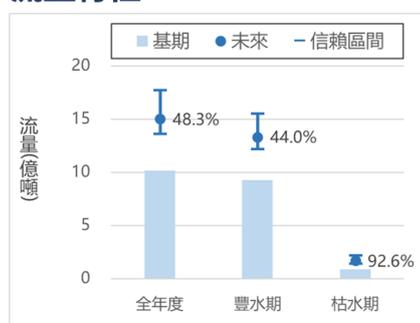
德基水庫之未來雨量與流量皆有豐愈豐、枯愈枯之特性。

附圖-16 德基水庫情境雨量與流量推估成果

雨量特性:



流量特性:



註: 不降雨日之定義為雨量<0.5mm。

曾文水庫之未來雨量與流量皆有豐愈豐、枯愈豐之特性。

附圖-17 曾文水庫情境雨量與流量推估成果

四、供水能力衝擊分析

石門水庫、德基水庫以及曾文水庫之供水能力衝擊分析結果顯示(附圖-18):石門水庫現況供水能力約為 150.4 萬 CMD,而情境供水能力則為 123.5 至 193.1 萬 CMD(相較於現況改變-17.9%至 28.4%);德基水庫現況供水能力約為 157.0 萬 CMD,而情境供水能力則為 151.0 至 166.6 萬 CMD(相較於現況改變-3.8%至 6.1%);曾文水庫現況供水能力約為 33.3 萬 CMD,而情境供水能力則為 34.5 至 34.9 萬 CMD(相較於現況改變 3.6%至 4.8%),若就農業用水部分,現況供水能力為 7.6 億噸/年,而情境供水能力則為 8.4 至 8.7 億噸/年(相較於現況改變 10.5%至 15.7%)。以氣候變遷對三座水庫情境供水能力造成之影響程度(變動範

圍)而言，石門水庫變動最大、德基水庫其次、曾文水庫最小。

附圖-19 為石門水庫、德基水庫以及曾文水庫系統之供水缺口與應對方案之增供水量，其供水缺口主要成因為用水成長與氣候變遷影響(包含增溫 2°C條件或 AR5 情境下結果)兩種。以曾文水庫系統為例，未來用水成長缺口約為-22.5 萬 CMD，而增溫 2°C條件與 AR5 情境對於供水能力造成之影響範圍分別為+1.2 至+1.6 萬 CMD 與-1.5 至+1.7 萬 CMD。若考量用水成長缺口 22.5 萬 CMD 與氣候變遷可能造成之最大供水缺口 1.5 萬 CMD，兩者總和約為 24 萬 CMD，而此缺口可藉由應對方案加以因應，其方案包含：再生水(8.3 萬 CMD)、臺南高雄水源聯合運用(10 萬 CMD)、南化水庫溢流堰加高(4.1 萬 CMD)、臺南海淡(10 萬 CMD)以及降低臺南漏水率至 1.13%。

	石門水庫	德基水庫	曾文水庫
現況供水能力 (單位: 萬CMD)	150.4¹	157.0²	33.3³ (農業:7.6 億噸/年) ⁴
情境供水能力 (單位: 萬CMD)	123.5~193.1	151.0~166.6	34.5~34.9 (農業: 8.4~8.7 億噸/年)
改變率 (單位: %)	-17.9%~28.4%	-3.8%~ 6.1%	3.6%~4.8% (農業: 10.5%~15.7%)

註：¹大漢溪水源設施聯合運用之供水能力、²鯉魚潭與石岡壩之供水能力(含支援彰化8萬CMD與支援苗栗7萬CMD)、³曾文-烏山頭水庫串聯運用之供水能力(考慮公共用水年基準分配水量1.2億噸與農業用水基準分配水量9億噸)、⁴括號內數據代表農業用水供水量。

附圖-18 現況與情境供水能力比較

現況供水能力基準	未來用水成長缺口	2度C情境		AR5情境		應對方案		
	(萬CMD)	變化量(萬CMD)	變化率(%)	變化量(萬CMD)	變化率(%)	近期完成或執行中	推動中	無悔措施 自來水減漏改善程度
石門水庫 (大漢溪系統) 150.4	- *	-26.9~42.7	-17.9~28.4	-20.8~4.5	-13.8~3.0	桃園再生水(4) 中壢再生水(4)	南勢溪引水至石門水庫(10) 桃園海淡(10)	0.43%(新北) 1.90%(桃)
德基水庫 (大安大甲系統) 157.0	-4	-6.0~9.6	-3.8~6.1	-21.6~16.7	-13.8~10.0	大安大甲聯通管工程(25)	再生水(水滴、福田、豐原)、 大安溪伏流水	5.78% (中、投)
曾文水庫 (曾文-烏山頭系統) 33.3	-22.5	1.2~1.6	3.6~4.8	-1.5~1.7	-4.3~4.7	再生水(8.3) 臺南高雄水源聯合運用(10) 南化水庫溢流堰加高(4.1)	台南海淡(10)	1.13%(台南)

註*：未來用水需求成長後供需缺口=現況供水能力-125年需求量，大於零，以「-」表示

附圖-19 石門水庫、德基水庫以及曾文水庫系統之供水缺口與應對方案

五、結論與建議

- (一)為瞭解增溫 2°C 條件對臺灣水文特性與供水能力衝擊，以歷史雨量線性迴歸方法延伸趨勢推估未來雨量特性，並合線性迴歸斜率估計之 95% 信賴區間瞭解其可能變動區間，再將雨量由氣象繁衍模式及降雨逕流模式轉換成流量，由簡易尺度轉換消除偏差，最後再藉由水源運用模擬求得氣候變遷情境對應之供水能力。
- (二)石門水庫、德基水庫以及曾文水庫之情境流量特性分析結果顯示：未來除曾文水庫為豐枯均增加外，其餘兩座水庫未來流量皆為豐愈豐、枯愈枯之情況。針對情境流量豐愈豐、枯愈枯之部分，石門水庫全年度情境流量推估將增加 5.2%，豐水期情境流量為增加 12.9%，枯水期情境流量為減少 16.9%；德基水庫全年度情境流量推估將增加 24.8%，豐水期情境流量為增加 38.3%，枯水期情境流量為減少 2.3%。而針對情境流量豐愈豐、枯愈豐之部分，曾文水庫全年度情境流量推估將增加 48.3%，豐水期情境流量為增加 44.0%，枯水期情境流量為增加 92.6%。
- (三)石門水庫、德基水庫以及曾文水庫之供水能力衝擊分析結果顯示：石門水庫情境供水能力之變動範圍為-17.9%至 28.4%，德基水庫情境供

水能力之變動範圍為-3.8%至 6.1%，而曾文水庫情境供水能力之變動範圍則為 3.6%至 4.8%。以氣候變遷對三座水庫情境供水能力造成之影響程度(變動範圍)而言，石門水庫變動最大、德基水庫其次、曾文水庫最小。

(四)近年極端天氣出現頻繁，為能瞭解近期水文資料趨勢對於水源供需可能造成之衝擊，建議基期時段或趨勢分析年限亦可進行即時滾動更新，採用近年資料作為分析基礎(例如：2010 年後之資料)，以即時反映近年極端天氣之特性。

(五)未來水文特性與供水能力探討上目前僅考慮氣候變遷對月雨量影響所導致之衝擊，考慮水源供需檢討分析需求，建議未來可針對雨量資料進行更細緻化分析，例如：各月份雨量資料之標準偏差、降雨日數以及乾溼移轉機率，並充分考量水文特性隨時間之可能變動。

(六)整體而言，歷史趨勢延伸可作為另一種探討增溫 2°C 情境之替代方案，惟其分析過程導入許多不確定性，例如：斜率估算方式、外推年限是否過長、氣象繁衍模式以及降雨-逕流模式等，需與國內專家學者進行更多討論，以釐清不同分析方法之優劣與適用性。

參考文獻

1. 吳至剛，2000，「氣候變遷對高屏河流域水資源衝擊之探討」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
2. 吳雷根，2004，「曾文水庫枯水期長期入流量預測之研究」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
3. 李晏全，2006，「石門水庫枯水期月與季入流量預報之研究」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文。
4. 楊道昌，1999，「區域連續型降雨-逕流模式之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
5. 楊道昌、游保杉，1997，「目標函數對連續型降雨-逕流模式之研究」，台灣水利，第 45 卷，第 4 期，第 66-73 頁。

經濟部水利署水利規劃試驗所出版品版權頁資料

氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析

出版機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：413210 臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

電話：(04)23304788

傳真：(04)23300282

網址：<http://www.wrap.gov.tw>

編著者：財團法人成大研究發展基金會

出版年月：111 年 12 月

版次：初版

定價：新臺幣 600 元

EBN：10111F0032

著作權利管理資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所保有所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，需徵求經濟部水利署水利規劃試驗所同意或書面授權。

電子出版：本書製有光碟片

聯絡資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所

電話(04)23304788



廉潔、效能、便民



經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

網址：<http://www.wrap.gov.tw/>

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282

EBN：10111F0032

定價：新臺幣 600 元