

# 國家氣候變遷科學報告2024： 現象、衝擊與調適

## 乾旱/水資源主題

國家災害防救科技中心 曾宏偉 專案助理研究員

計畫辦公室



行政法人國家災害防救科技中心  
National Science and Technology Center  
for Disaster Reduction

TCCIP 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

指導單位



NSTC 國家科學及技術委員會  
National Science and Technology Council

# 研究團隊

## ▶ 國家氣候變遷科學報告-乾旱/水資源 撰寫作者

- 中央大學水文與海洋科學研究所 李明旭 教授
- 成功大學水利及海洋工程學系 游保杉 名譽教授
- 成功大學水利及海洋工程學系 楊道昌 研究員
- 國家災害防救科技中心 劉子明 助理研究員
- 國家災害防救科技中心 林祺恒 佐理研究員
- 國家災害防救科技中心 曾宏偉 專案助理研究員

## ▶ 國科會TCCIP計畫-水資源領域 研究團隊

- 國家災害防救科技中心 李欣輯 研究員
- 國家災害防救科技中心 曾宏偉 專案助理研究員

# 大綱

---



1 乾旱/水資源  
科研成果



2 乾旱/水資源  
科研缺口



3 乾旱/水資源  
科研進展

# 1. 乾旱/水資源科研成果



## 科研成果

- ▶ 水資源: 氣候變遷下長期水文之改變
  - 水資源現況
  - 未來情境雨量
  - 未來情境流量
- ▶ 乾旱: 三個關鍵的影響因子
  - 季節雨量型態
  - 降雨型態
  - 低流量型態

# 水資源: 氣候變遷下長期水文之改變

---



## 水資源現況

水資源供需面臨之挑戰



## 未來情境雨量

不同情境下各分區雨量增減

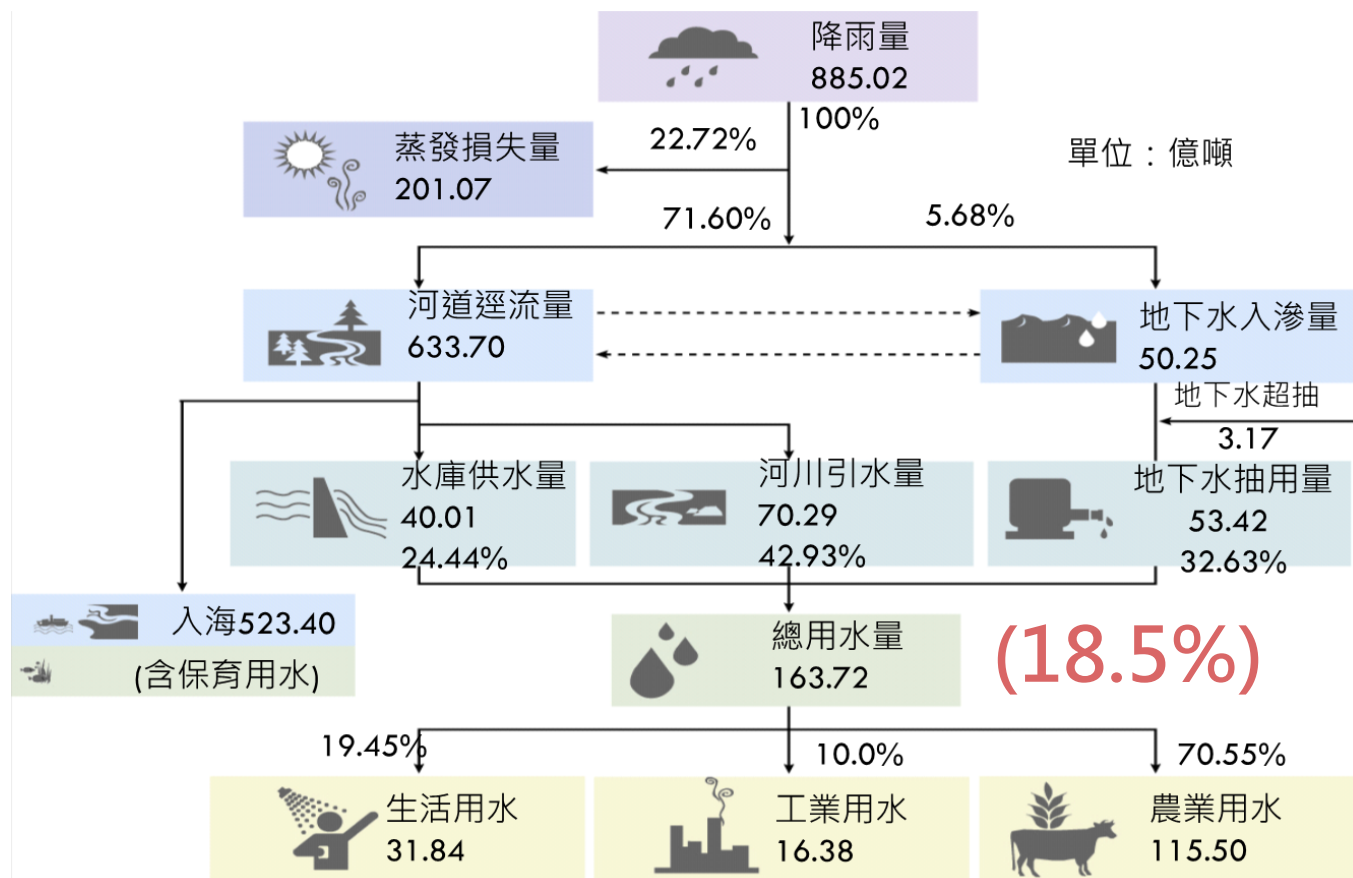


## 未來情境流量

不同情境下各分區流量增減

# 水資源現況: 水資源供需面臨之挑戰

## 臺灣水資源利用平均值(2013-2022)



### ▶ 豐枯懸殊

- 全臺豐枯比 78:22  
(水文年報1949-2022)

### ▶ 淤積嚴重

- 8.7億噸/29.3億噸(29.7%)  
(水利署公告95座水庫資料)

### ▶ 極端天氣頻傳

- 5年一小旱、10年一大旱
- 3年一小旱、5年一大旱

# 水資源: 氣候變遷下長期水文之改變

---



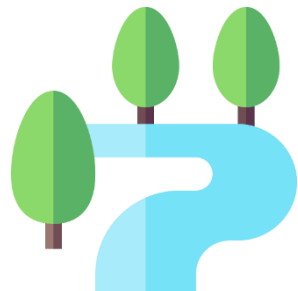
## 水資源現況

水資源供需面臨之挑戰



## 未來情境雨量

不同情境下各分區雨量增減



## 未來情境流量

不同情境下各分區流量增減

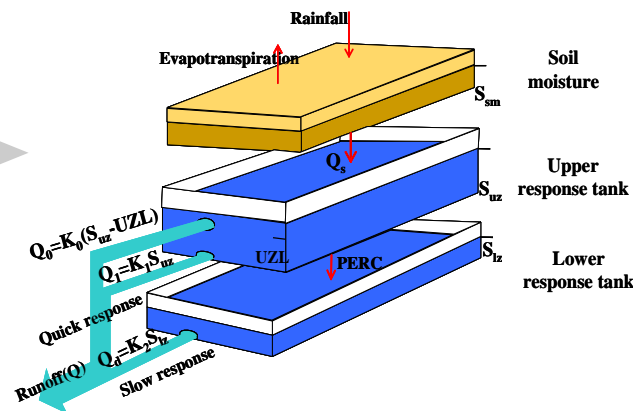
# 氣候變遷下臺灣水資源衝擊

## 回顧臺灣大規模分析文獻 (情境雨量與情境流量)

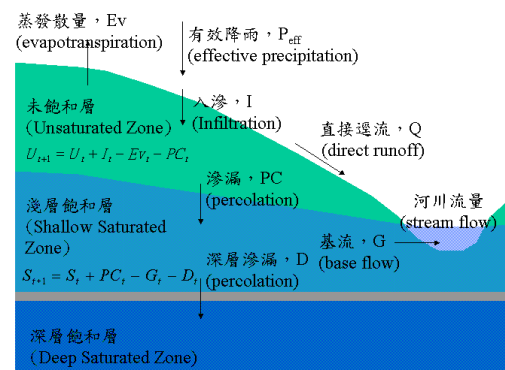
1臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(TCCIP)

2氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析  
(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2022)

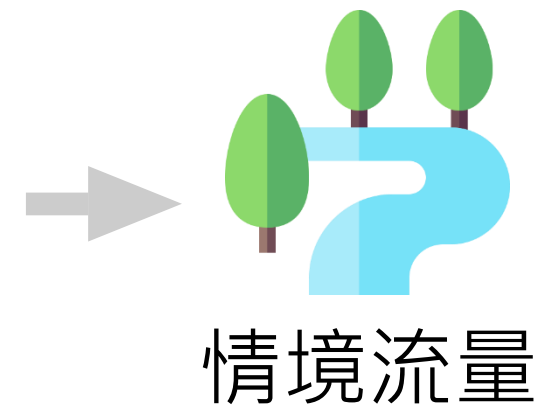
### 臺灣常用兩種降雨-逕流模式



HBV降雨-逕流模式



GWLF降雨-逕流模式



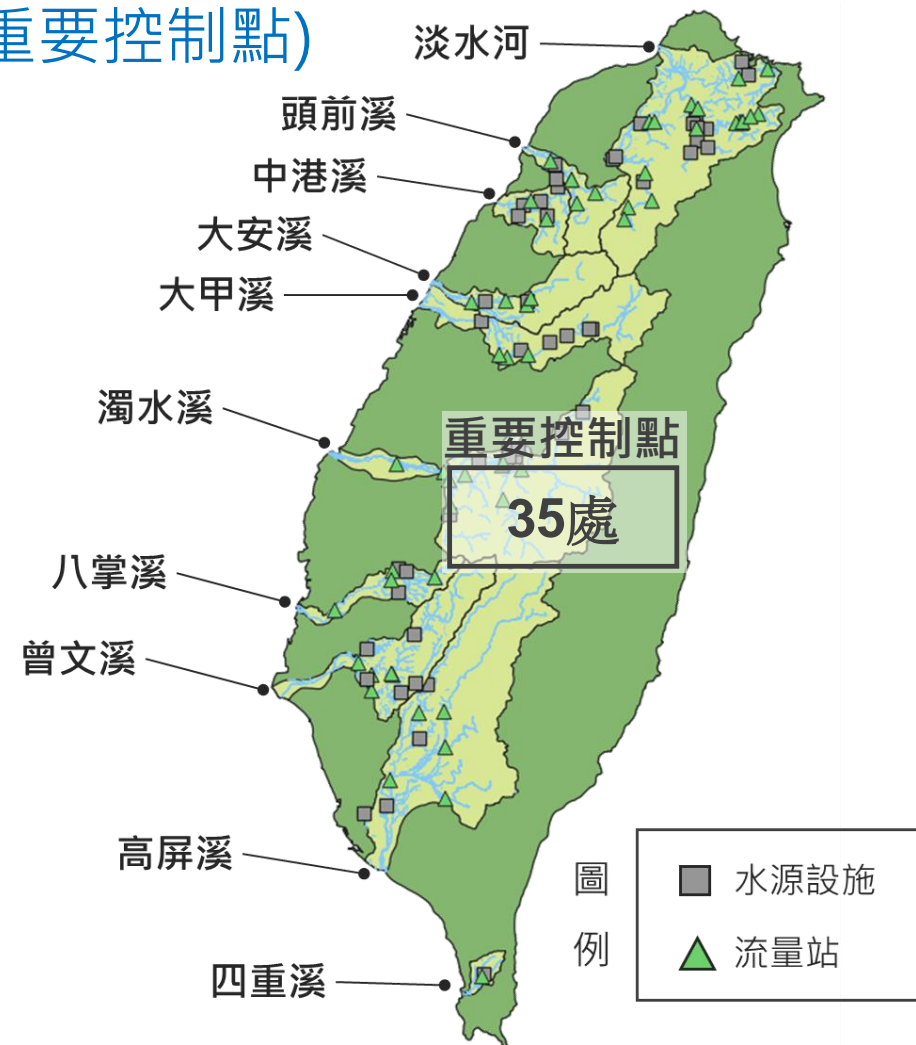


# 未來情境雨量

參考資料: (經濟部水利署水利規劃試驗所, 2022)

## 雨量分析流程說明 (淡水河等10條水系之重要控制點)

流域	類型	控制點	流域	類型	控制點
淡水河	水源設施	翡翠水庫	大甲溪	水源設施	德基水庫
		石門水庫			霧社水庫
		三峽堰			桶頭攔河堰
	流量站	橫溪	濁水溪	流量站	內茅埔
		五堵			玉峰橋
		寶橋			水里
		介壽橋(1)			觸口
		玉峰(馬利哥灣)			曾文水庫
		稜角			玉峰堰
		秀巒			南化水庫
霞雲	玉田				
頭前溪	流量站	內灣	曾文溪	水源設施	左鎮
上坪	田美攔河堰				
中港溪	水源設施	永興橋	高屏溪	水源設施	甲仙攔河堰
	流量站	士林攔河堰			高屏溪攔河堰
大安溪	水源設施	鯉魚潭水庫	四重溪	水源設施	牡丹水庫
		雪山坑			
	流量站	象鼻(3)			

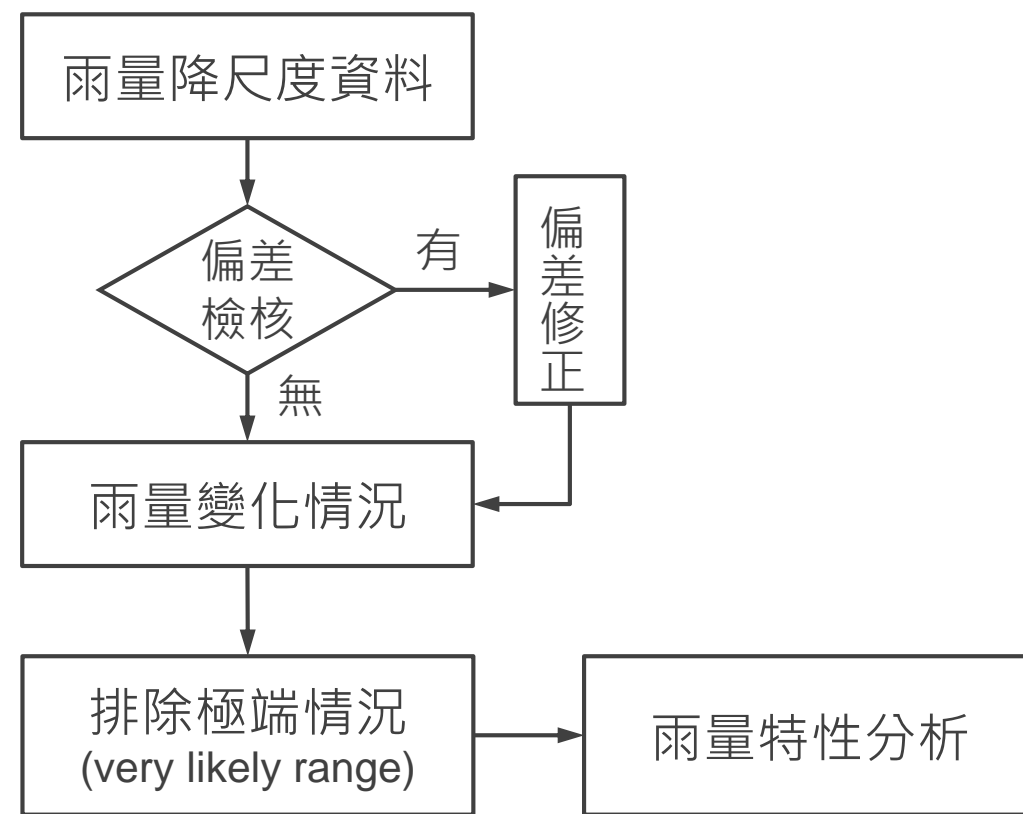
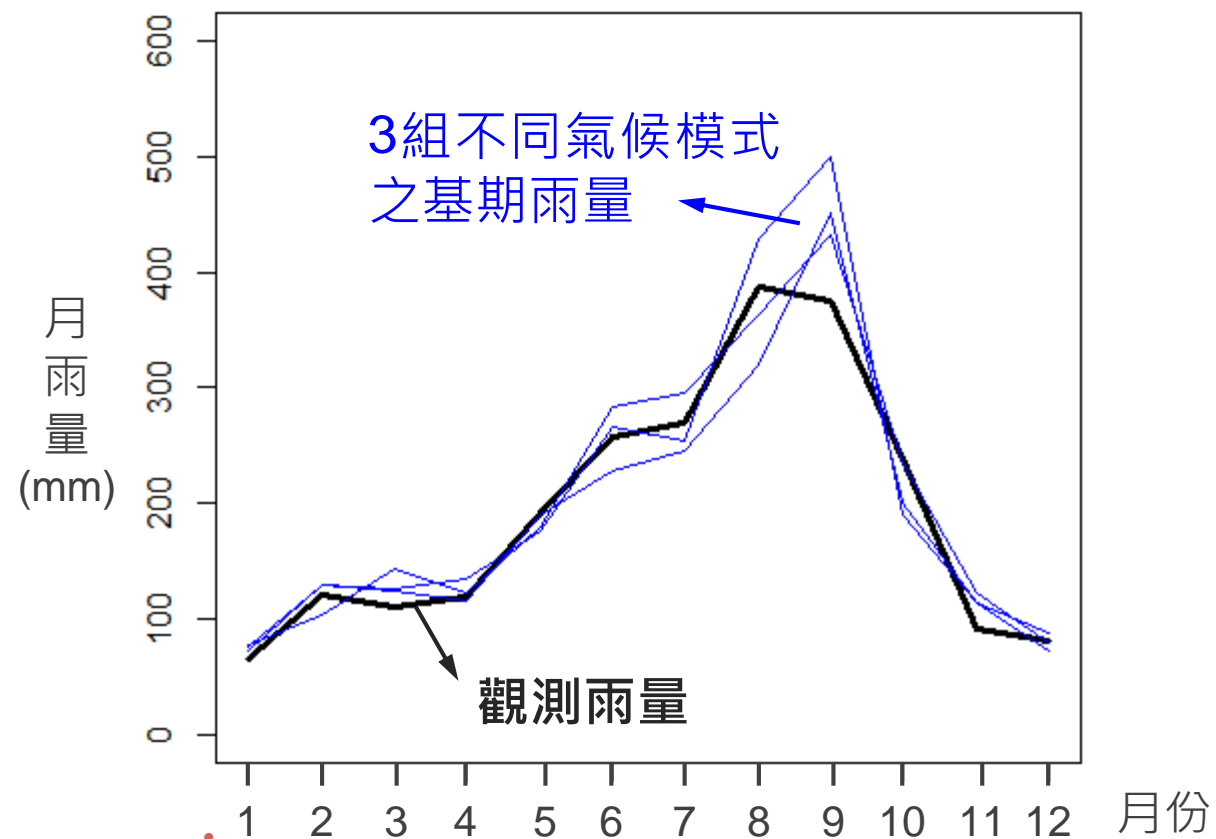


# 未來情境雨量

參考資料: (經濟部水利署水利規劃試驗所, 2022)

## 雨量分析流程說明 (淡水河等10條水系之重要控制點)

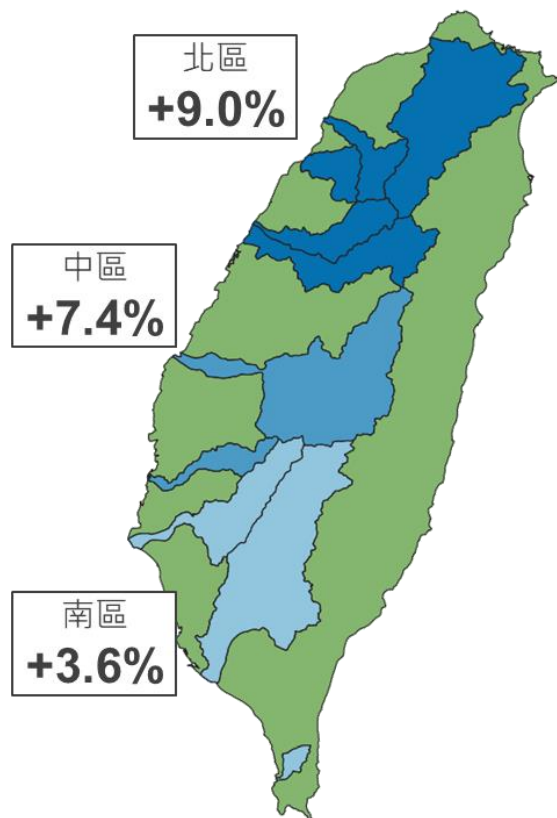
以石門水庫集水區觀測與基期雨量為例



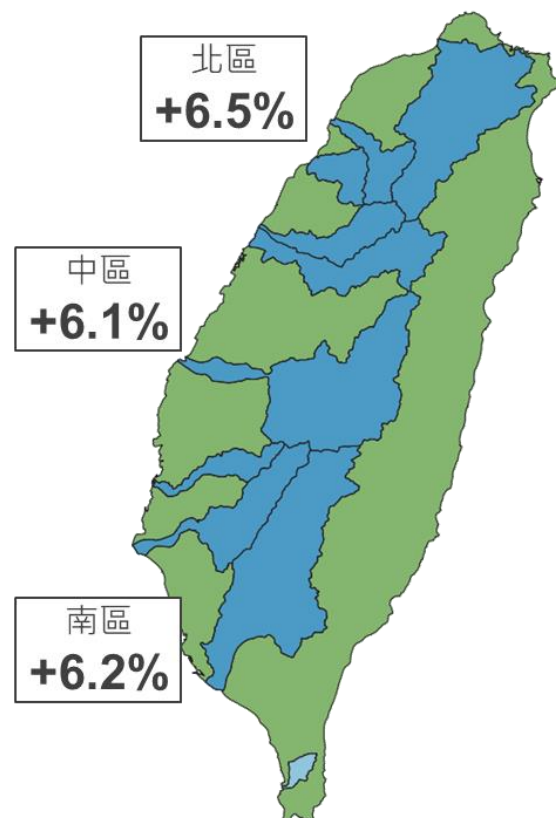
# 未來情境雨量

## 豐水期雨量增減: 未來中期(2041-2060)

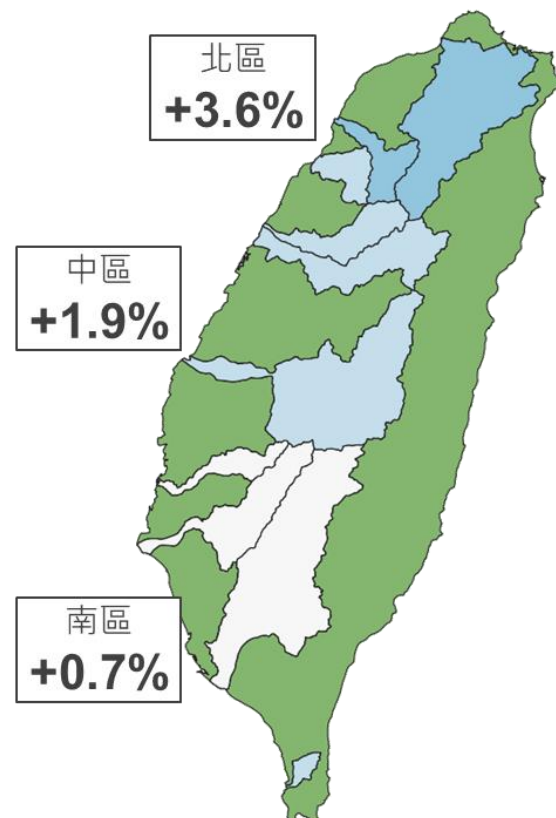
(1) SSP2-4.5情境



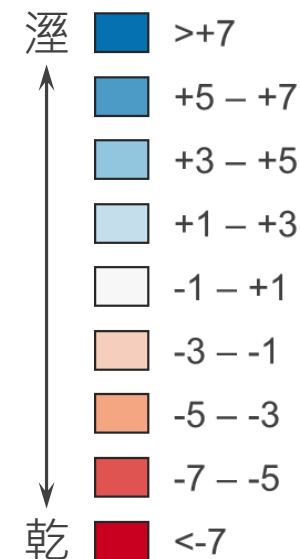
(2) SSP5-8.5情境



(3) GWL 2°C情境



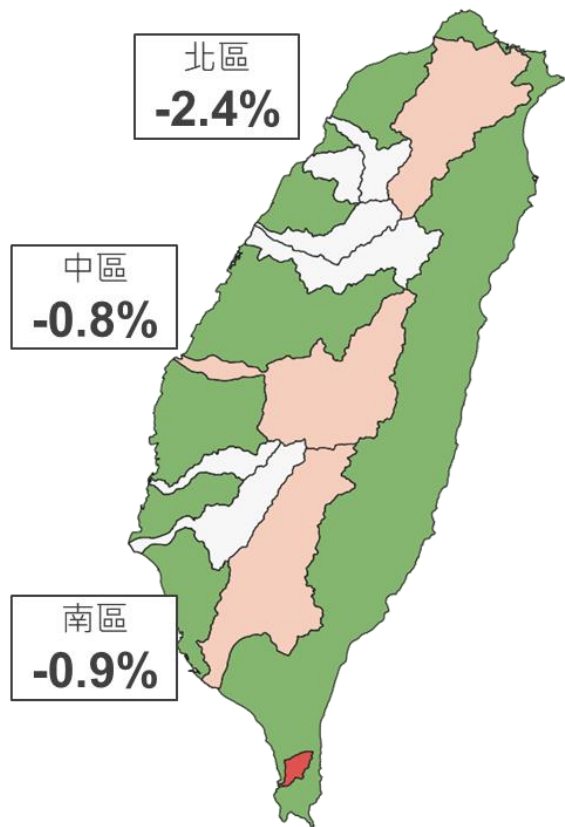
增減情況  
(百分比)



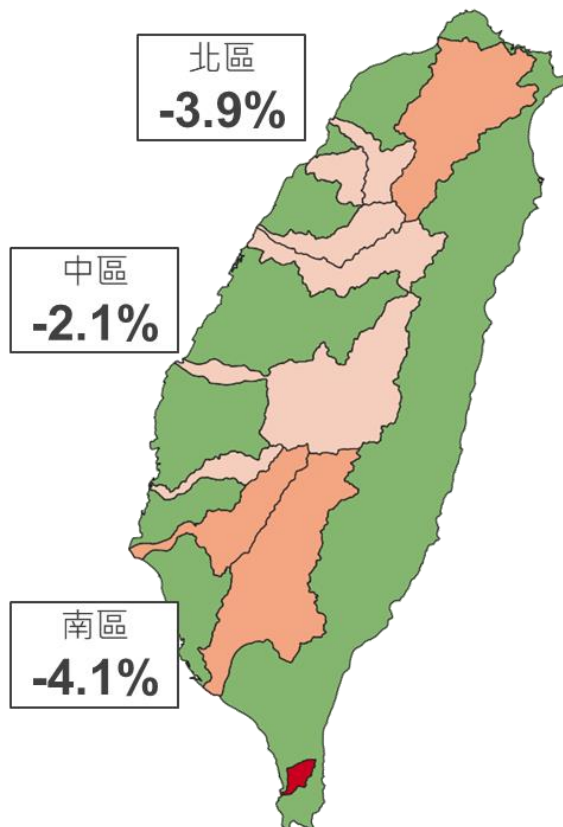
# 未來情境雨量

## 枯水期雨量增減: 未來中期(2041-2060)

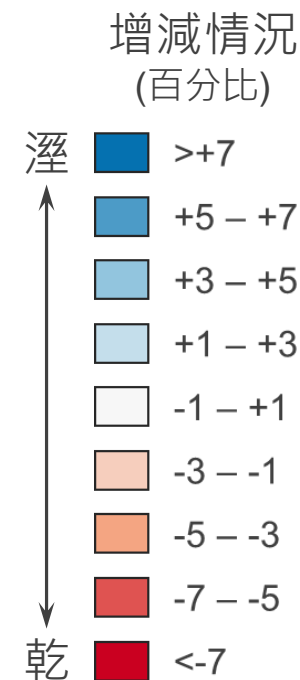
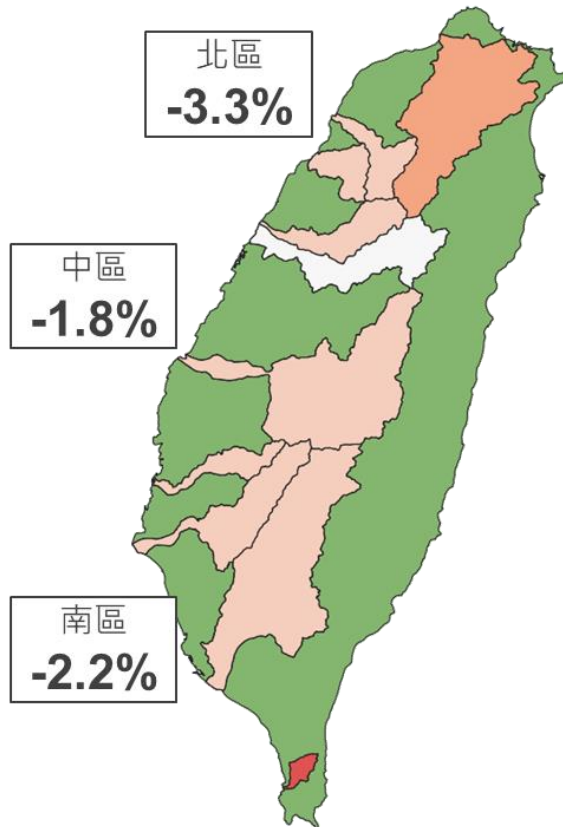
(1) SSP2-4.5情境



(2) SSP5-8.5情境

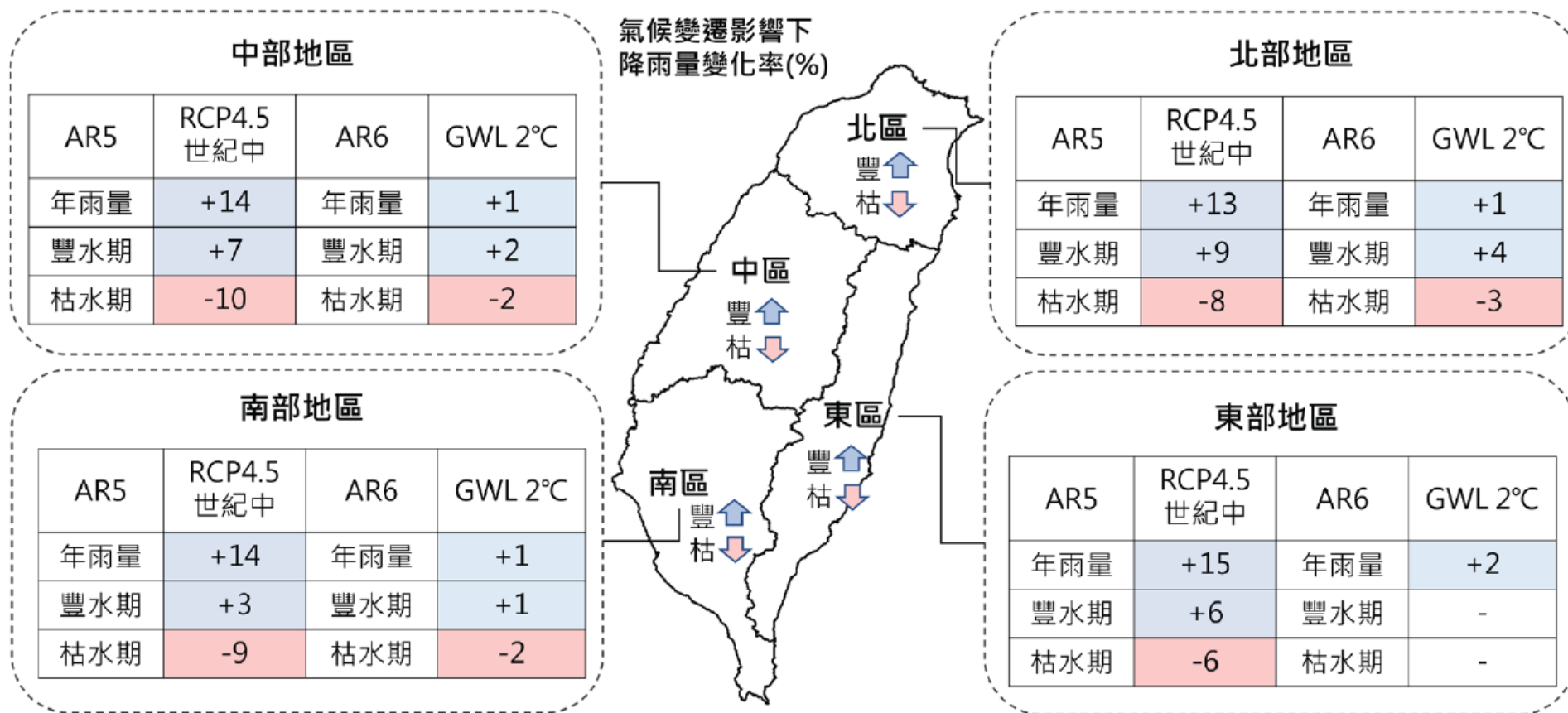


(3) GWL 2°C情境



# 未來情境雨量

## 氣候變遷影響下雨量變化率 (圖片來源: 科學報告圖4.1.3.2)



# 水資源: 氣候變遷下長期水文之改變



## 水資源現況

水資源供需面臨之挑戰



## 未來情境雨量

不同情境下各分區雨量增減



## 未來情境流量

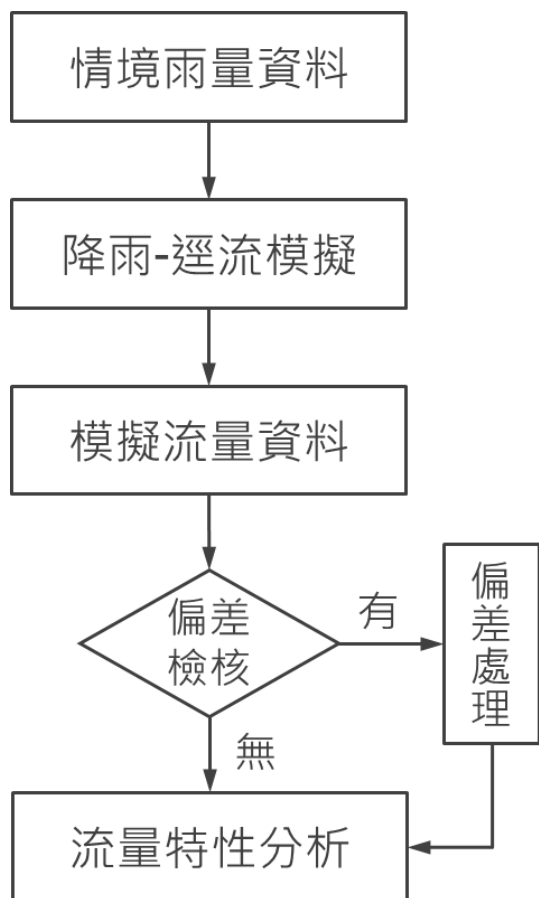
不同情境下各分區流量增減



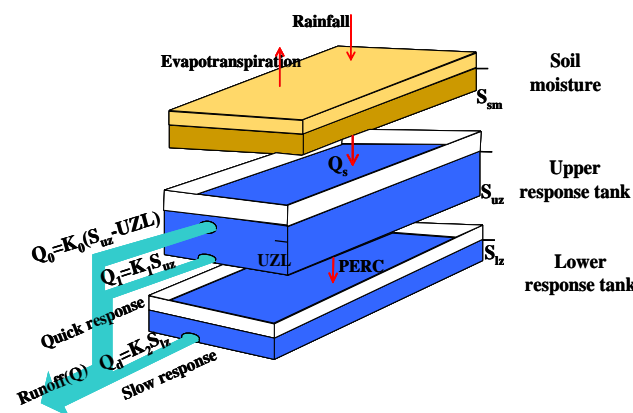
# 未來情境流量

參考資料: (經濟部水利署水利規劃試驗所, 2022)

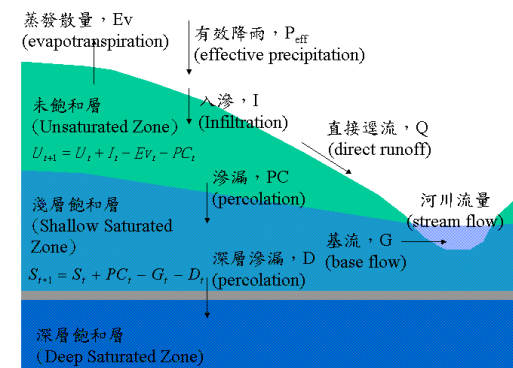
## 流量分析流程說明



### ▶ 臺灣常用兩種降雨-逕流模式



HBV降雨-逕流模式



GWLF降雨-逕流模式

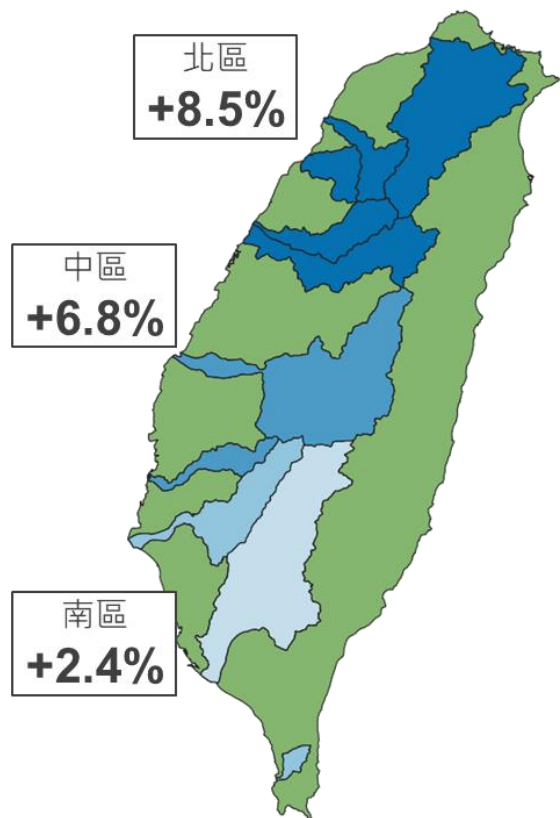
### ▶ 臺灣常用兩種降雨-逕流模式(35處集水區)

- 模式率定驗證
- 情境流量模擬

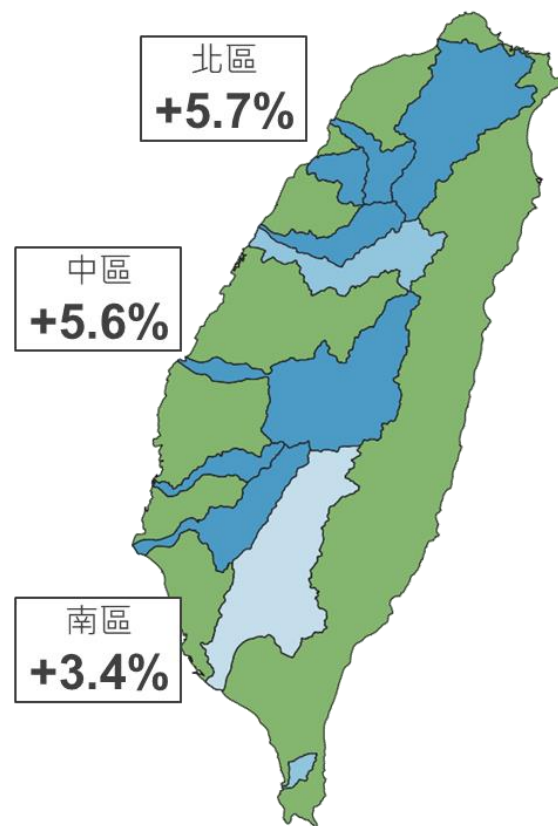
# 未來情境流量

## 豐水期流量增減: 未來中期(2041-2060)

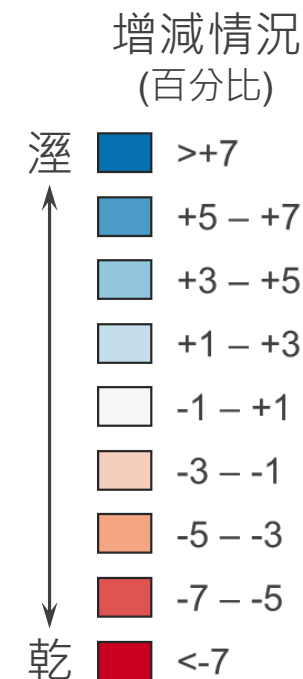
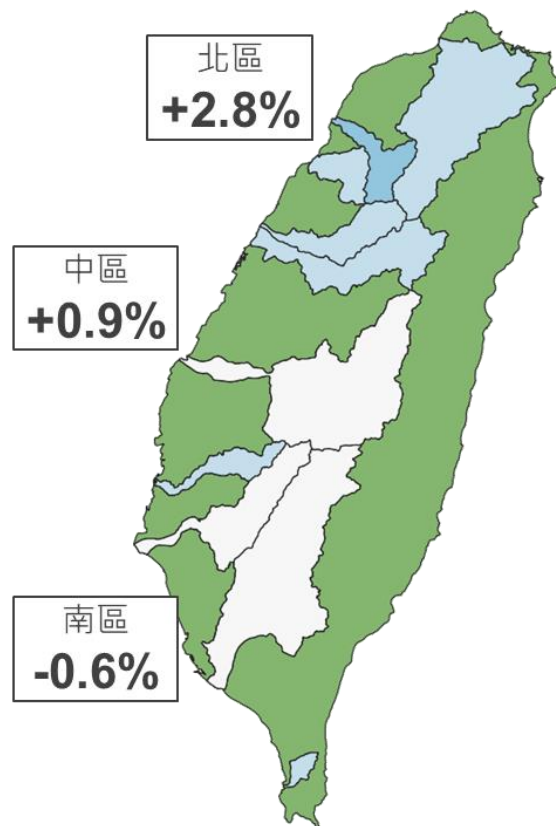
(1) SSP2-4.5情境



(2) SSP5-8.5情境



(3) GWL 2°C情境

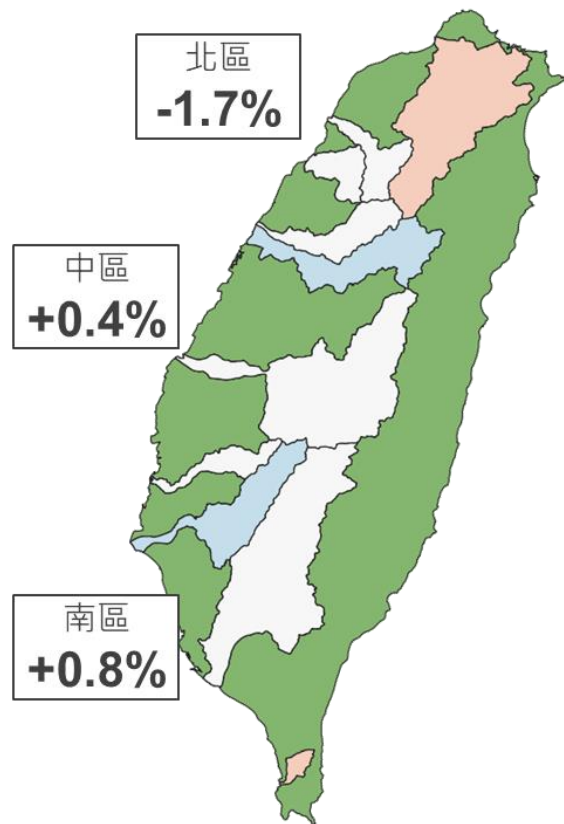




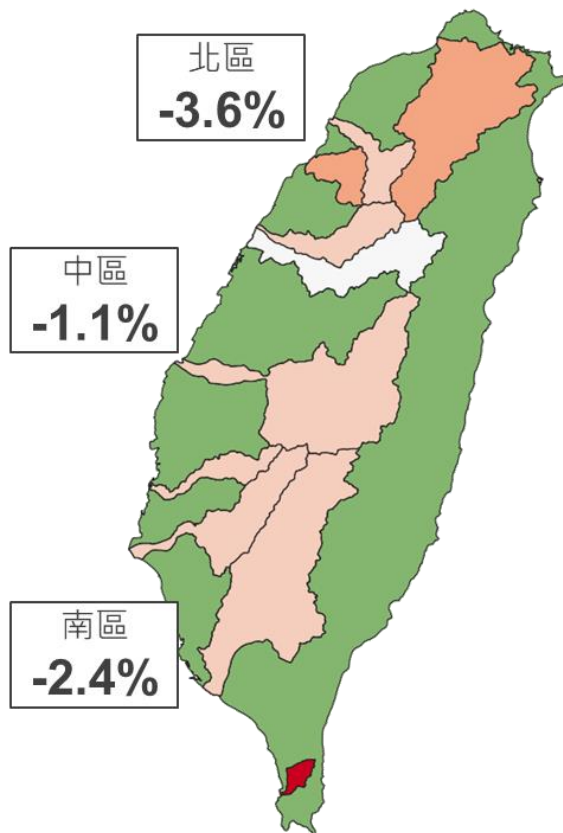
# 未來情境流量

## 枯水期流量增減: 未來中期(2041-2060)

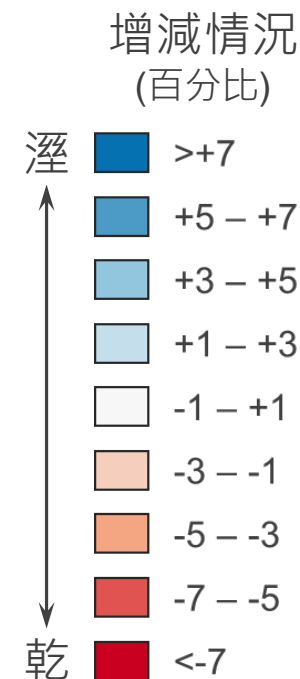
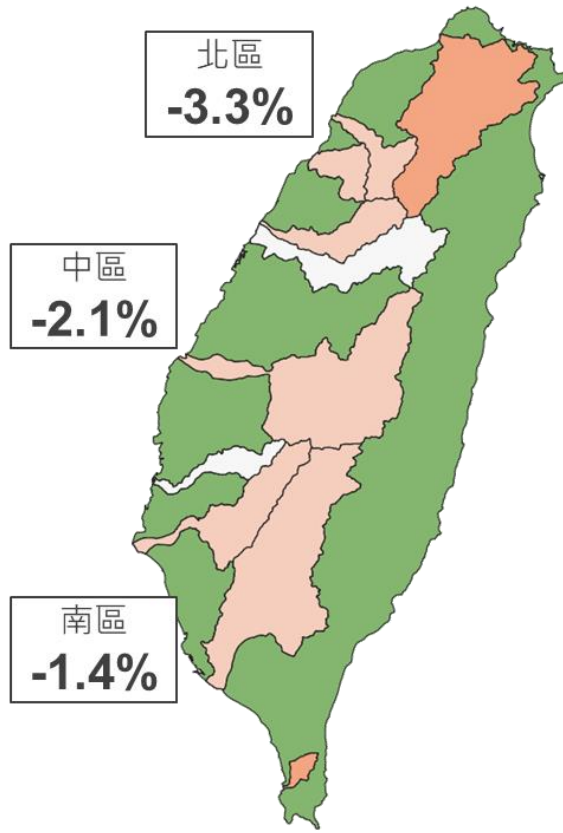
(1) SSP2-4.5情境



(2) SSP5-8.5情境

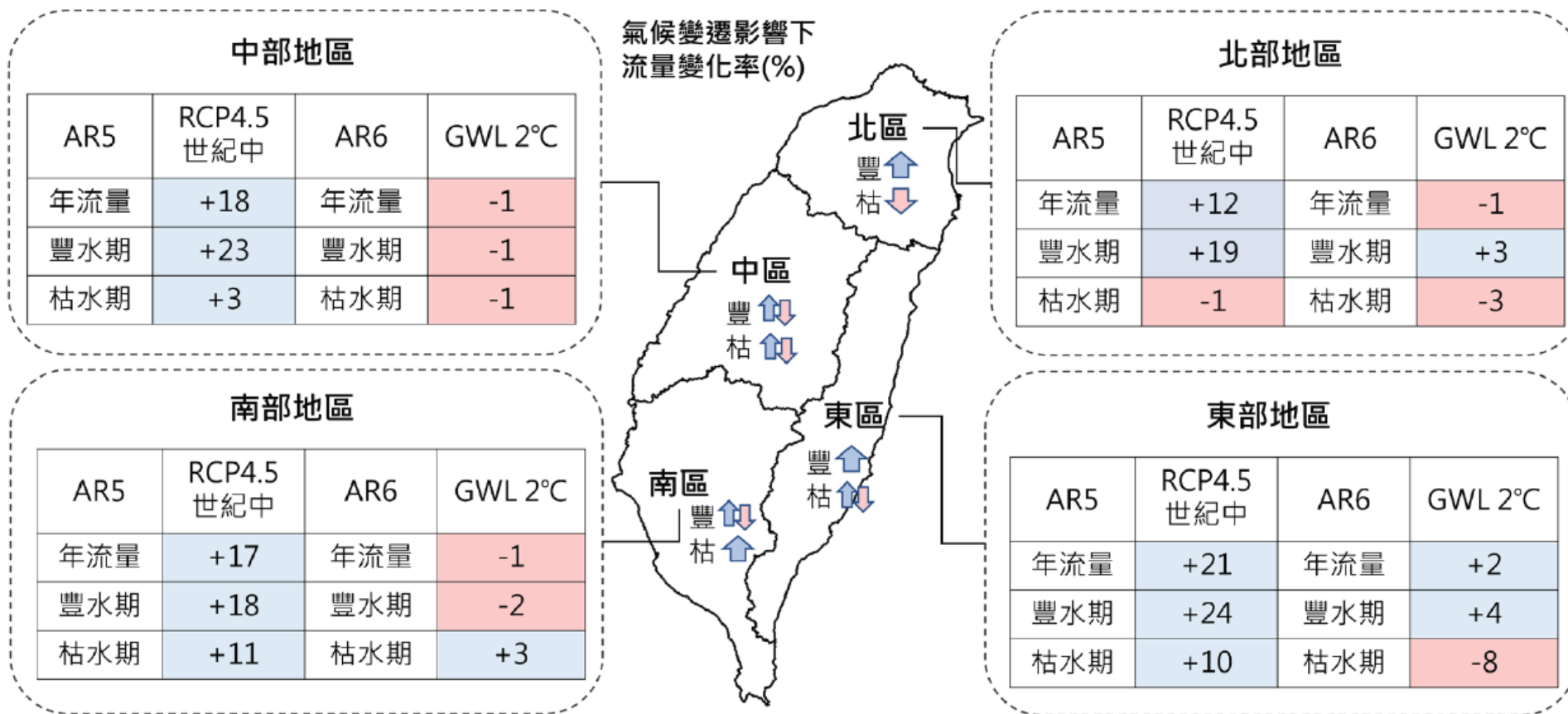


(3) GWL 2°C情境



# 未來情境流量

## 氣候變遷影響下流量變化率 (圖片來源: 科學報告圖4.1.3.3)



# 乾旱: 三個關鍵的影響因子

---



## 季節雨量型態

影響水庫「蓄豐濟枯」功能



## 降雨型態

未雨綢繆，乾旱發生前兆



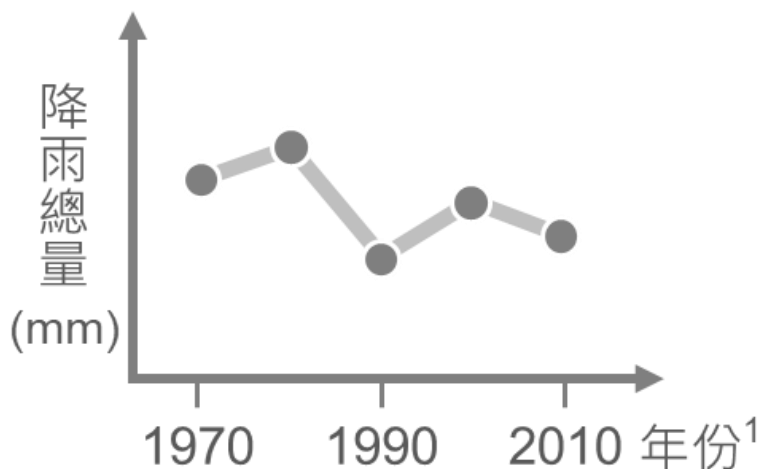
## 低流量型態

影響取水穩定性

# 季節雨量型態之變遷

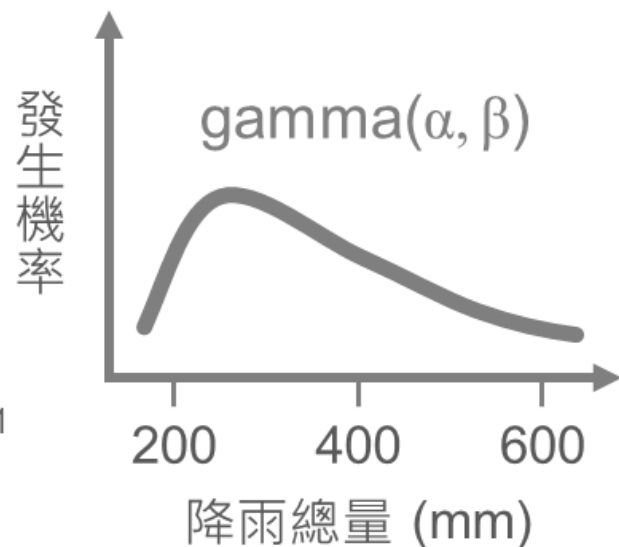
## 季節雨量型態之分析流程 (曾宏偉等人, 2022)

**1** 雨量時間序列資料  
(梅雨季與颱風季)

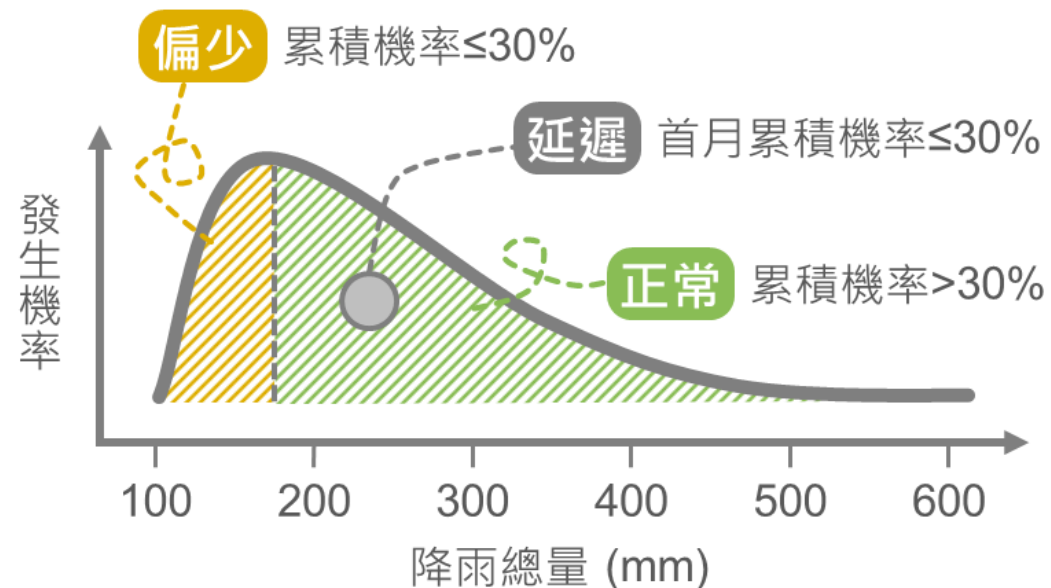


<sup>1</sup>本計畫分析資料年限為1960至2017年

**2** 推求機率分布函數



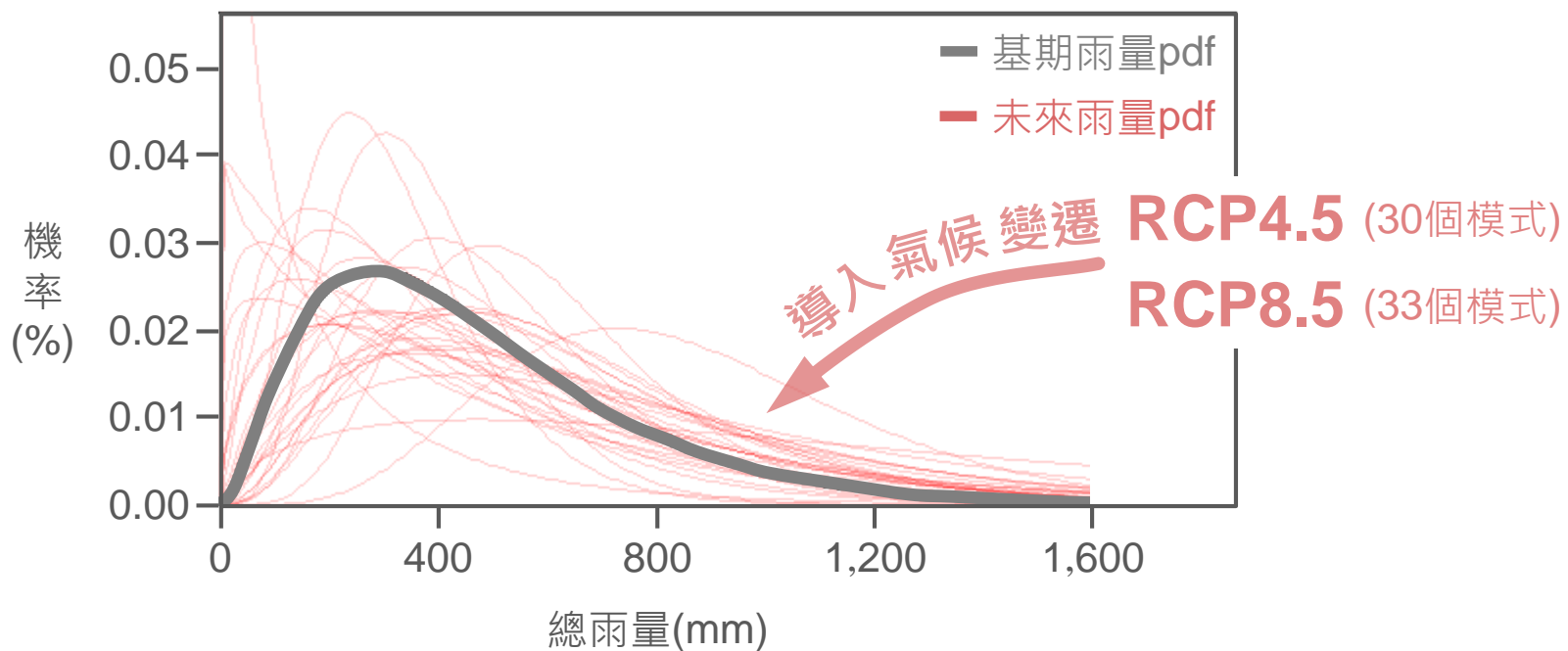
**3** 機率分布函數與定義水文情境之關係  
(參考並延伸氣象局季長期天氣展望作法)



# 季節雨量型態之變遷

## 季節雨量型態之分析流程 (曾宏偉等人, 2022)

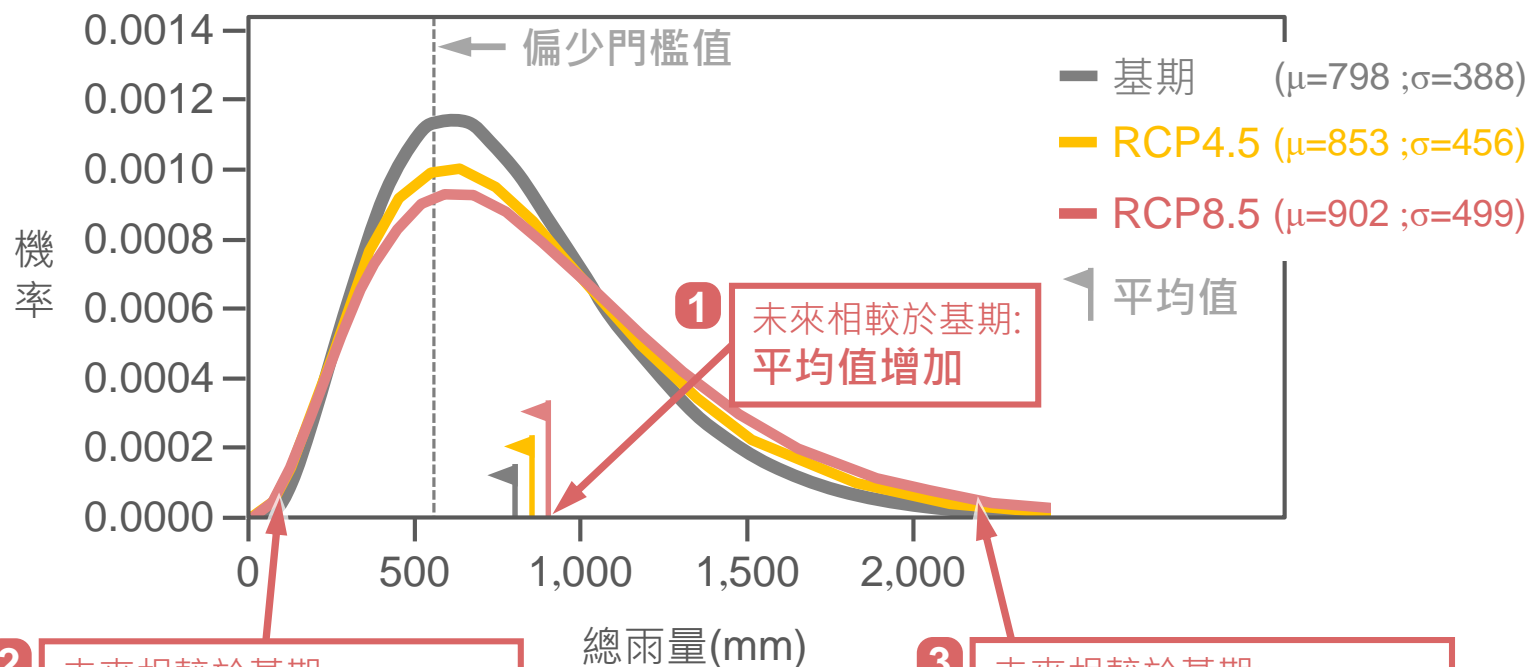
梅雨總量之機率密度函數(示意圖)



# 季節雨量型態之變遷

## 季節雨量型態之分析流程 (曾宏偉等人, 2022)

梅雨(5至6月)總量之機率密度函數(實際數據): 以臺南為例



2 未來相較於基期:  
極端小雨發生機率增加

3 未來相較於基期:  
極端大雨發生機率增加



# 季節雨量型態之變遷

## 基期與RCP4.5情境下梅雨與颱風降雨之聯合發生機率: 臺南

(圖片來源: 科學報告圖4.1.2.2)

基期下聯合發生機率

梅雨 \ 颱風	基期下聯合發生機率			加總
	偏少	延遲	正常	
偏少	10.7	4.3	19.5	<u>34.6</u>
延遲	4.2	1.7	7.6	<u>13.4</u>
正常	16.1	6.5	29.3	<u>52.0</u>
加總	<u>31.1</u>	<u>12.5</u>	<u>56.4</u>	

RCP4.5情境下聯合發生機率

梅雨 \ 颱風	RCP4.5情境下聯合發生機率			加總
	偏少	延遲	正常	
偏少	8.2	4.8	19.8	<u>32.8</u>
延遲	3.7	2.2	8.9	<u>14.7</u>
正常	13.2	7.7	31.6	<u>52.4</u>
加總	<u>25.1</u>	<u>14.6</u>	<u>60.3</u>	

↑ 機率增加

↑ 機率增加

# 乾旱: 三個關鍵的影響因子

---



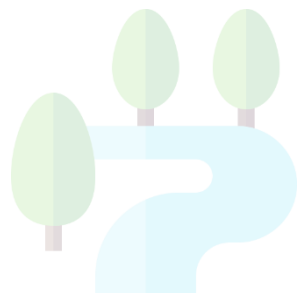
## 季節雨量型態

影響水庫「蓄豐濟枯」功能



## 降雨型態

未雨綢繆，乾旱發生前兆



## 低流量型態

影響取水穩定性



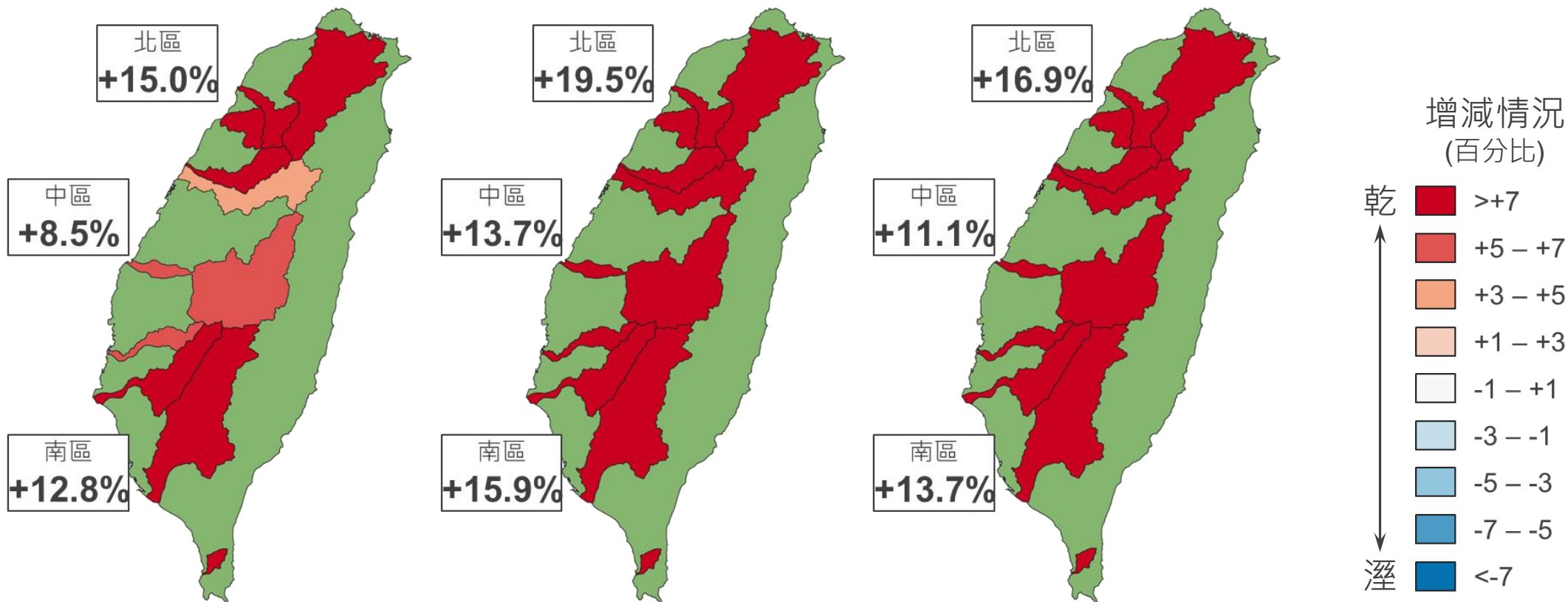
# 降雨型態之變遷

## 連續不降雨日數分析: 未來中期(2041-2060)日雨量低於1.0 mm日數

(1) SSP2-4.5情境

(2) SSP5-8.5情境

(3) GWL 2°C情境

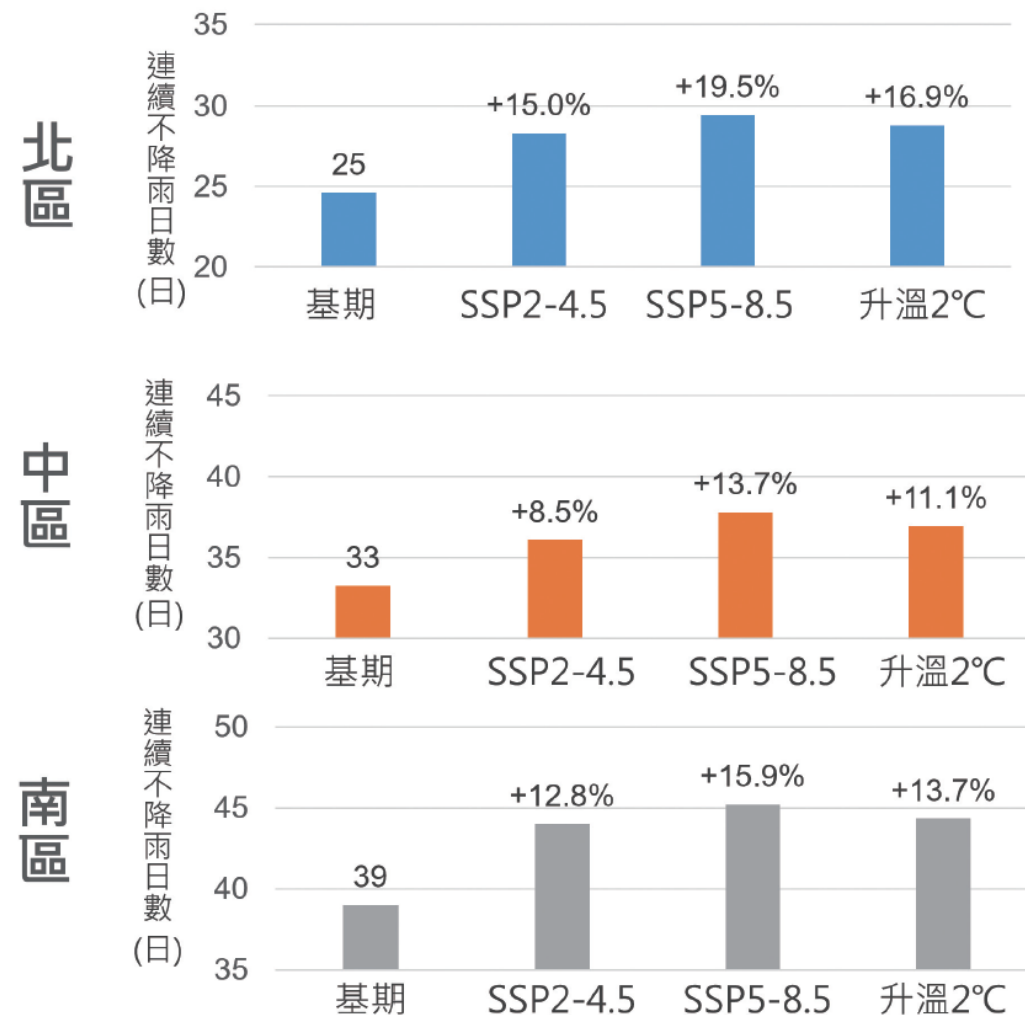


# 降雨型態之變遷

(圖片來源: 科學報告圖4.1.2.1)



## 氣候變遷下連續不降雨日數增減情況



# 乾旱: 三個關鍵的影響因子

---



## 季節雨量型態

影響水庫「蓄豐濟枯」功能



## 降雨型態

未雨綢繆，乾旱發生前兆



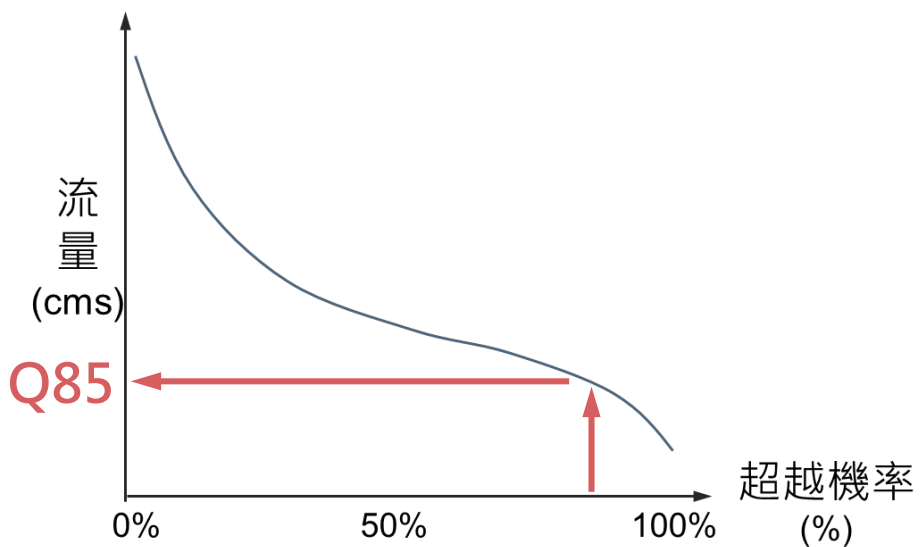
## 低流量型態

影響取水穩定性

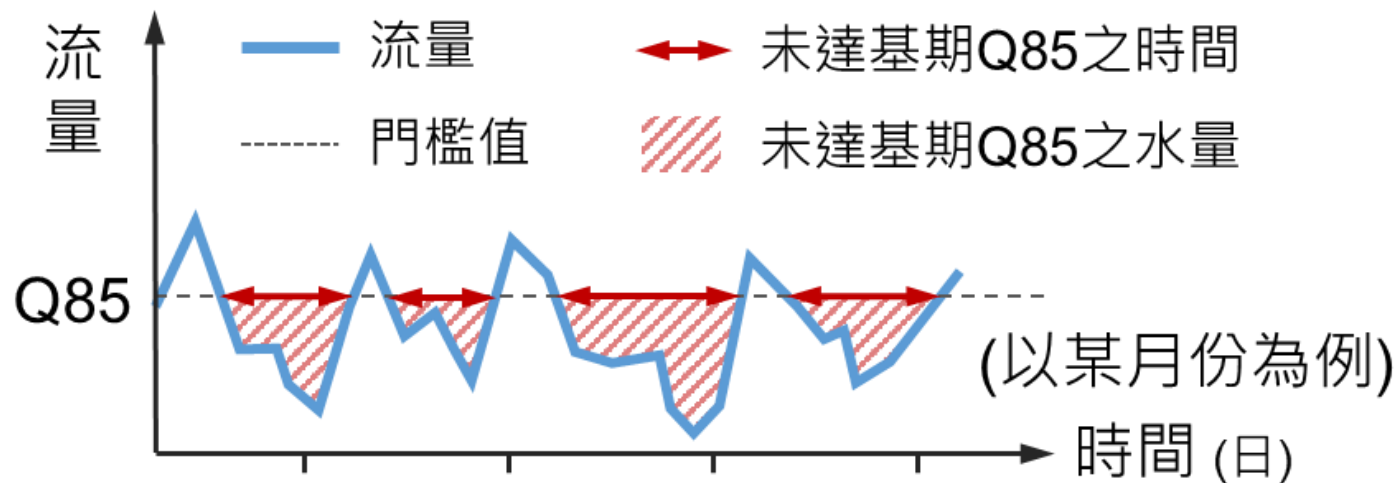
# 低流量型態之變遷

## 低流量型態之分析流程 (經濟部水利署水利規劃試驗所，2022)

### 1 流量延時曲線(觀測流量)



### 2 流量門檻值分析(辨識低流量事件)

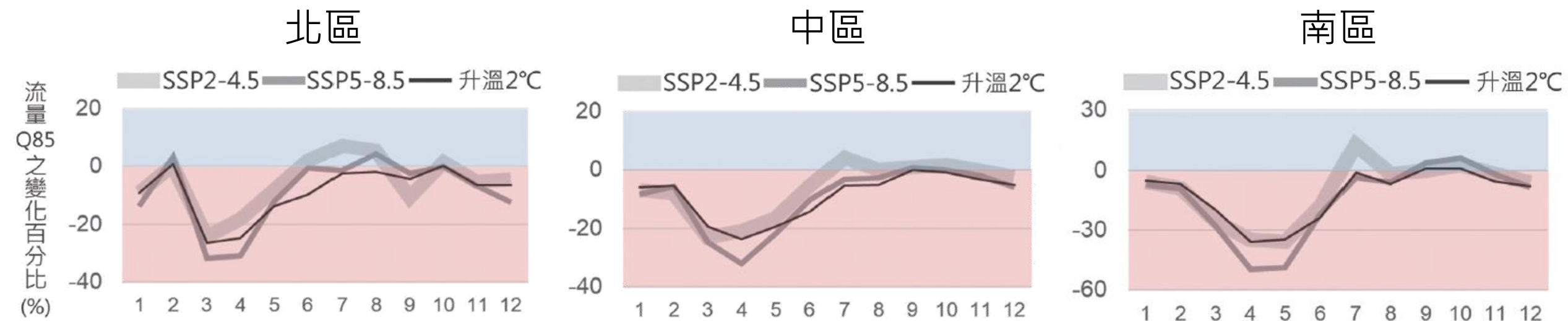




# 低流量型態之變遷

## 不同氣候變遷情境下各月份流量Q85之變化

(圖片來源: 科學報告圖4.1.2.4)



氣候變遷下各分區流量Q85有一致減少趨勢(少數月份除外)

# 低流量型態之變遷

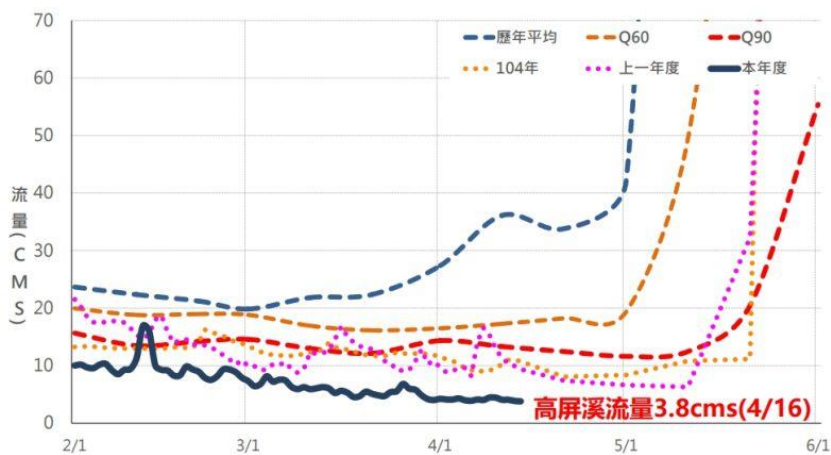
(圖片來源: 科學報告圖4.1.2.5)



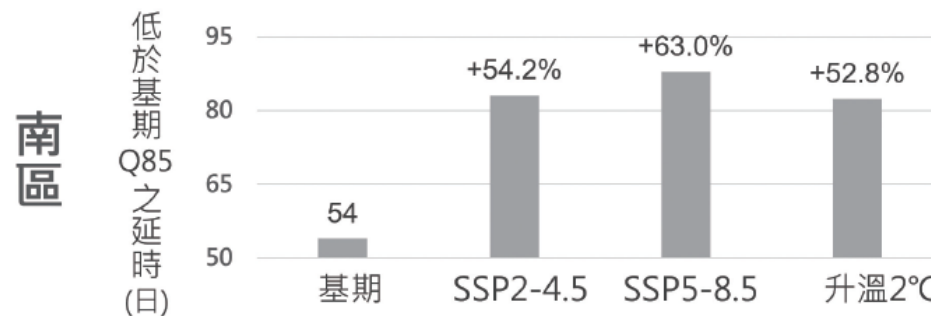
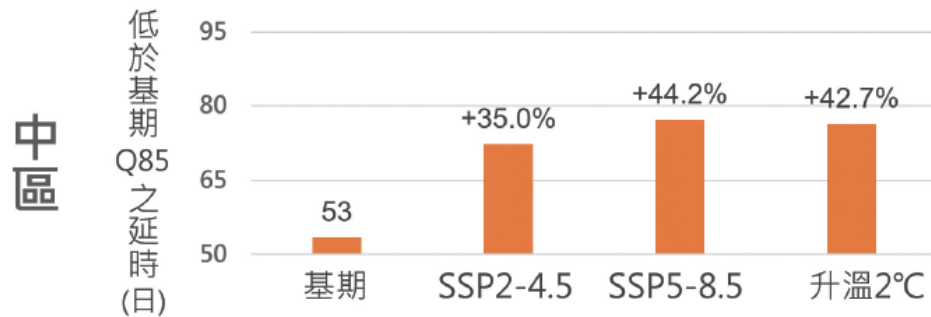
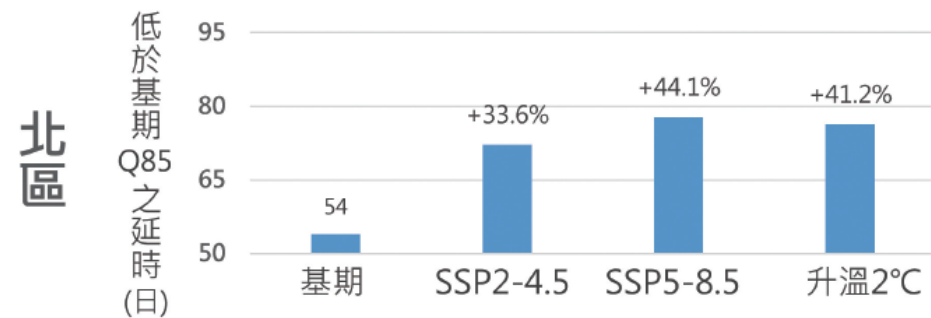
## 近年流量低點:

- 104/4/21  
8.05 cms
- 109/5/7  
6.20 cms
- 110/4/16  
3.80 cms

## 水情概要—高屏堰流量歷線



## 河川流量低於基期Q85之延時



# 大綱

---



1 乾旱/水資源  
科研成果



2 乾旱/水資源  
科研缺口



3 乾旱/水資源  
科研進展

## 2. 乾旱/水資源科研缺口



### 科研缺口

- ▶ 加強氣候變遷資料詮釋
  - 氣候變遷資料具有高度不確定性
  - 最劣、平均值、樂觀
  - 非常可能範圍(very likely range)
- ▶ 加強梅雨季與颱風季雨量之研究
  - 影響臺灣水庫「蓄豐濟枯」功能
  - 嘗試應用動力降尺度產品
- ▶ 加強極端氣候下的水資源管理策略
  - 英國水資源經營管理架構



# 加強氣候變遷資料詮釋

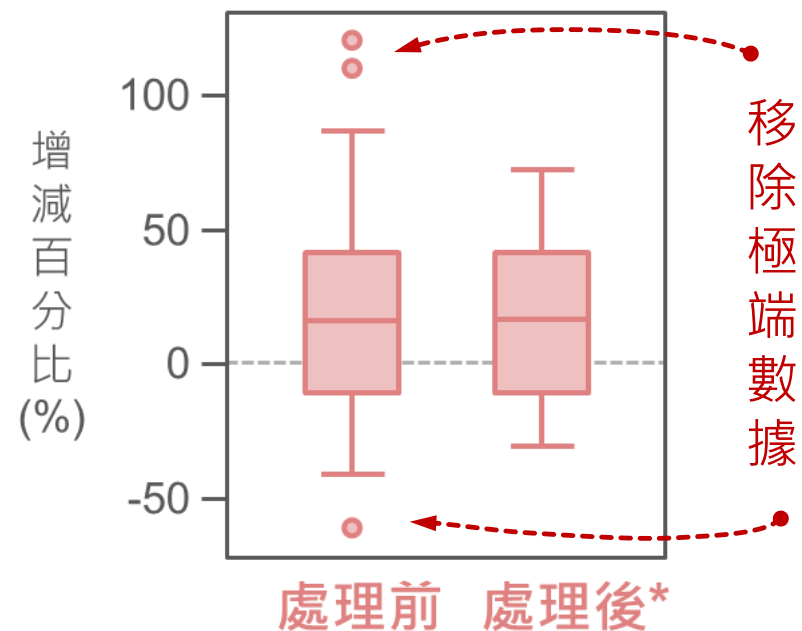
參考IPCC不確定性處理方式，取90%模式推估結果組成非常可能範圍(**very likely range**)，藉以移除較為極端之氣候模式推估結果。

例如：氣候模式推估值數量約為200個，移除推估值過於極端推估值後剩餘約180個。

採用篩選後氣候模式推估值組成**系集模式(ensemble models)**以盡可能反映出氣候變遷不確定性。

## 氣候模式推估值之選擇

五月份情境雨量增減情況(示意圖)



\*氣候模式推估值選擇係依據推估值之不確定性：取90%推估值之非常可能範圍(**very likely range**)。

# 加強梅雨季與颱風季雨量之研究

## 2022年東亞颱風路徑圖

共3個颱風發布警報 · 無颱風登陸臺灣



(圖片來源: 中央氣象署)

### ▶ 影響臺灣水庫「蓄豐濟枯」功能

- 梅雨遲到: 枯水期更長
- 颱風不來: 枯水期缺水

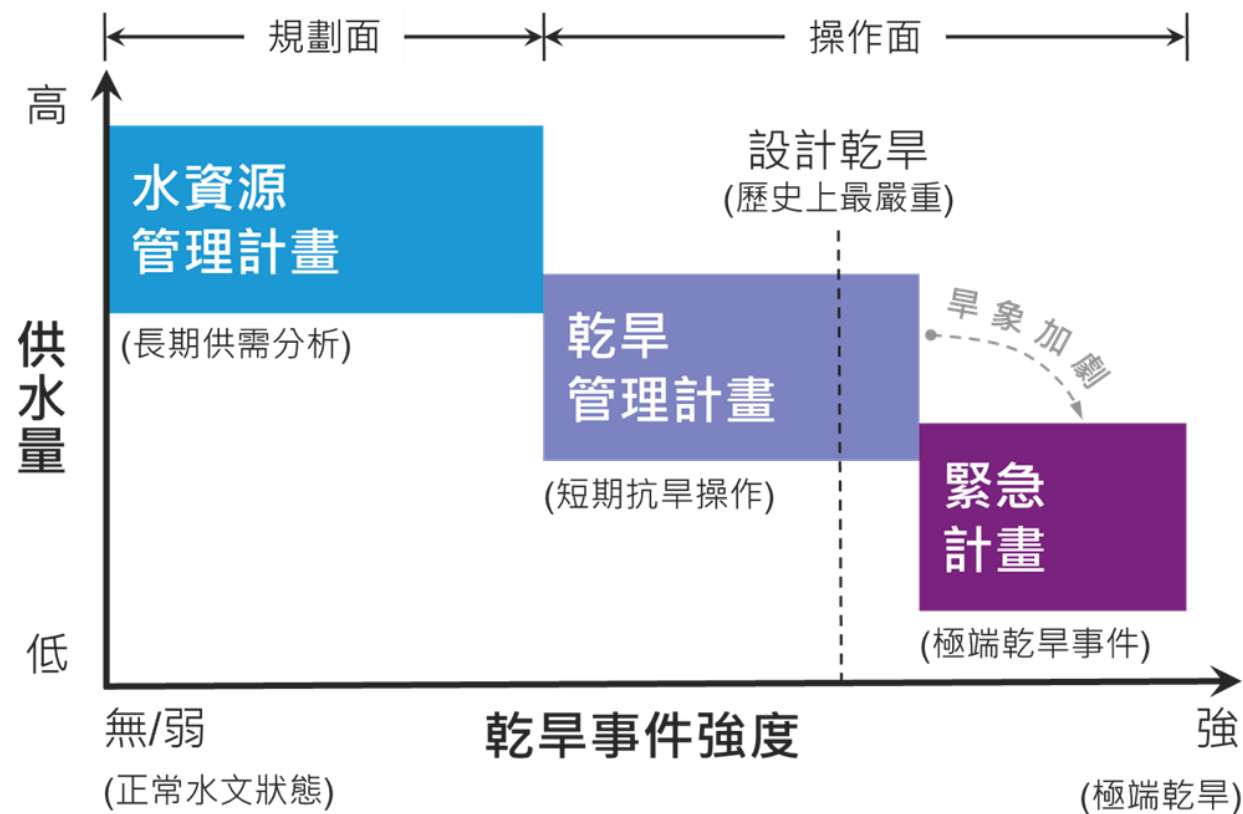
### ▶ 嘗試應用動力降尺度產品

- 梅雨事件: 發生時間
- 颱風事件: 發生頻率

# 加強極端氣候下的水資源管理策略

## 英國水資源經營管理架構

(圖片來源: 科學報告圖4.1.5.1)



### | 水資源管理計畫 |

針對未來長期之水資源供需規劃

### | 乾旱管理計畫 |

針對乾旱期間之抗旱操作計畫

### | 緊急計畫 |

針對極端乾旱所提出之因應框架

# 大綱

---



1 乾旱/水資源  
科研成果



2 乾旱/水資源  
科研缺口



3 乾旱/水資源  
科研進展

# 3. 乾旱/水資源科研進展



## 科研進展

- ▶ 呼應科研缺口: 美國國家氣候報告
  - 物理機制與水文循環角度
  - 不確定性分析與呈現
- ▶ 資料應用與未來規劃
  - 水資源風險評估
  - 圖資產製規劃

# 3. 乾旱/水資源科研進展



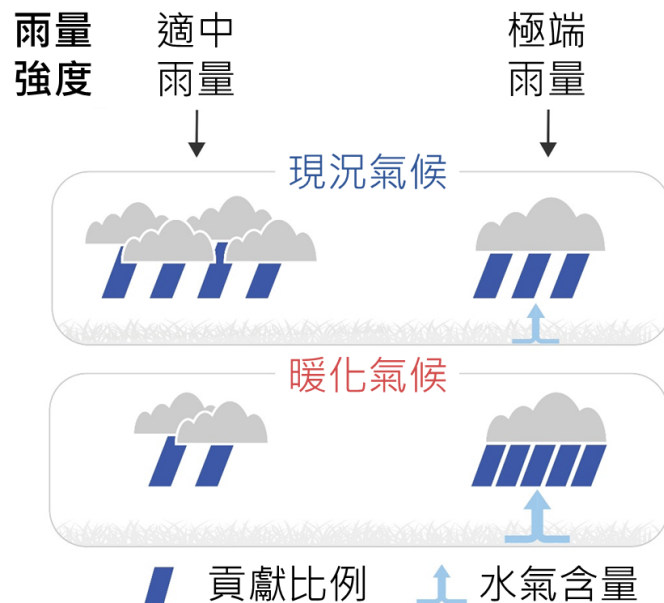
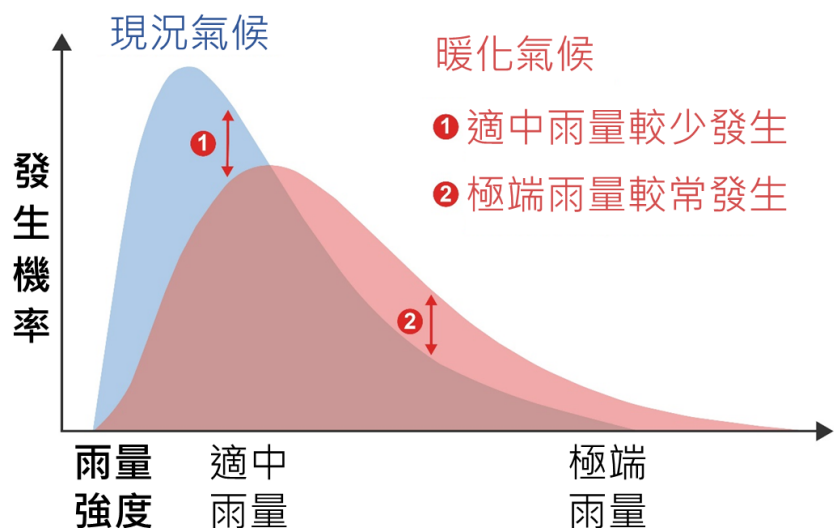
## 科研進展

- ▶ 呼應科研缺口: 美國國家氣候報告
  - 物理機制與水文循環角度
  - 不確定性分析與呈現
- ▶ 資料應用與未來規劃
  - 水資源風險評估
  - 圖資產製規劃

# 美國氣候科學報告

## 氣候模式分析結果<sup>1</sup>

氣候變遷下適中雨量與極端雨量相對於整體雨量之貢獻比例變化



- 暖化氣候條件使得大氣內水氣含量增加，導致劇烈天氣系統可挾帶更多水氣，使得降水更加極端，發生機率也有所增加。

- 水氣增加造成輻合作用強化，將周邊環境水氣大量匯集至劇烈天氣系統，使得特定區域內較小或者適中降水的發生機率降低。

<sup>1</sup>鞭尾效應(whiplash)：極端降雨與乾旱皆將變得更加常見；<sup>2</sup>圖片來源: 美國氣候科學報告(USGCRP, 2023)，第四章，圖4.9。

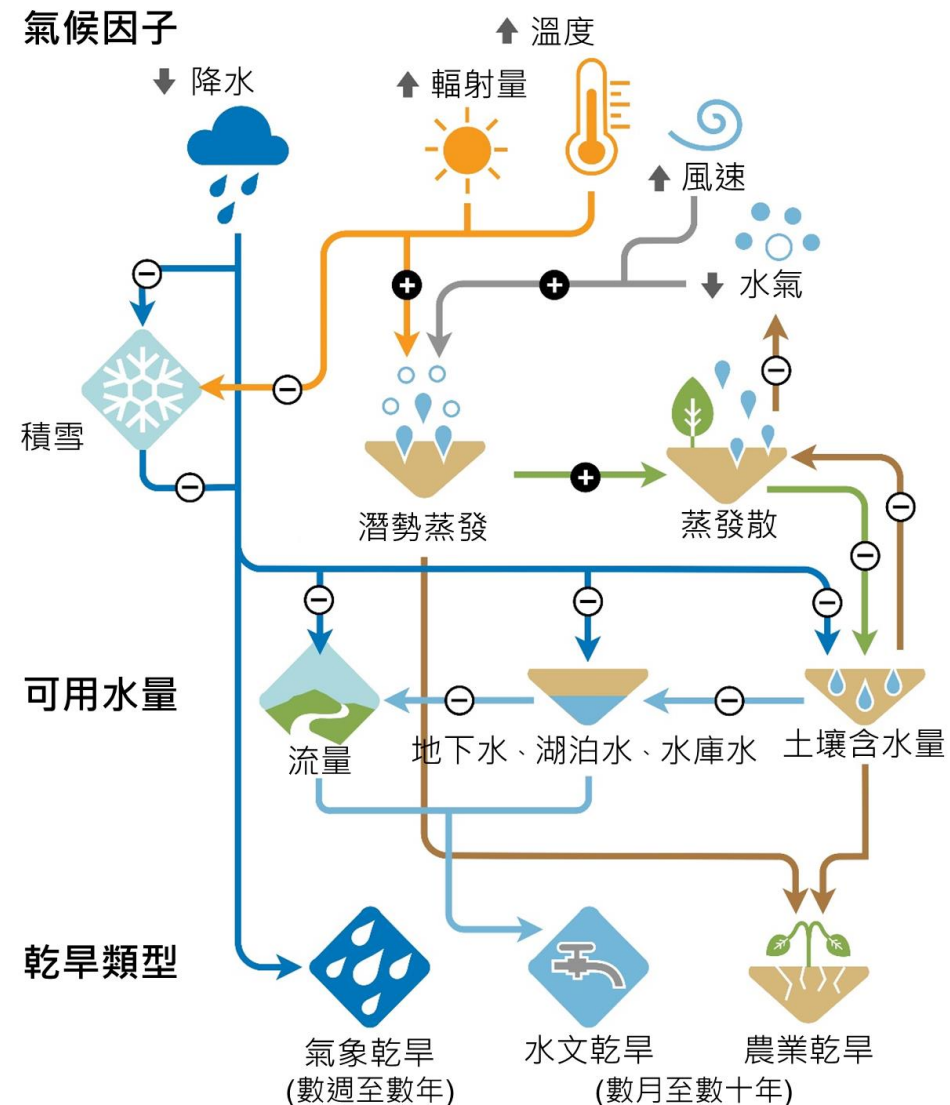


# 美國氣候科學報告

↑ 氣候因子自身增加      ⊕ 導致增加過程  
↓ 氣候因子自身減少      ⊖ 導致減少過程

## 氣候因子與乾旱類型之關係

- 若氣候變遷造成降水減少，將直接或間接導致積雪、流量、地下水、湖泊水、水庫水以及土壤含水量減少。
- 若氣候變遷造成溫度增加，將導致積雪減少連帶減少積雪對於各種可用水量的補注，且溫度增加亦將導致潛勢蒸發增加(水更容易蒸發)連帶增加蒸發散，造成土壤含水量減少而發生農業乾旱。

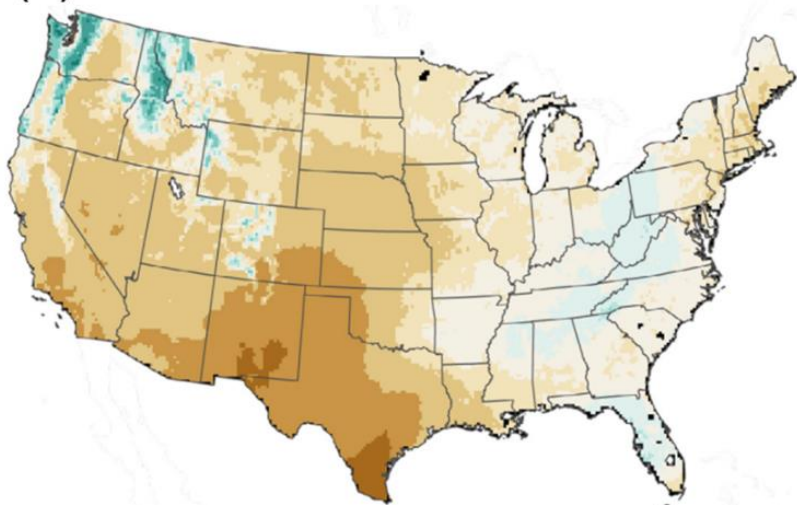




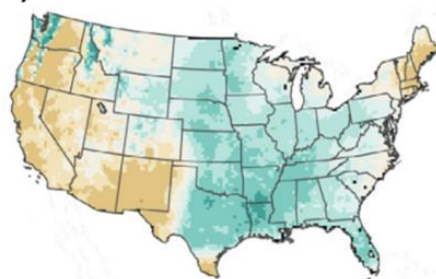
# 美國氣候科學報告

氣候變遷下年氣候缺水值之變化  
(2036至2065 相較於 1991至2020)

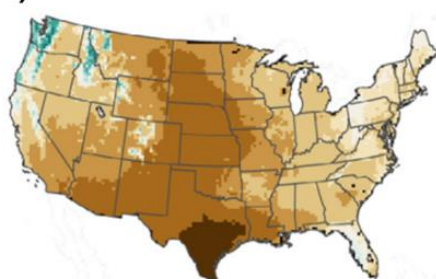
(a) 全部推估值之平均



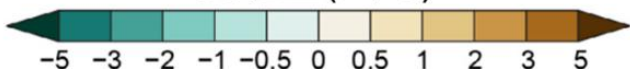
(b) 較濕20%推估值之平均



(c) 較乾20%推估值之平均



變化量(英吋)



- 氣候缺水值(climatic water deficit)在定義上為植物生長需水量與供水量之差值。
- 排放情境
  - 高度暖化情境(RCP8.5)
  - 中度暖化情境(RCP4.5)
- 32個CMIP5氣候模式資料
- 不確定性
  - 全部平均/較濕/較乾

圖片來源: 美國氣候科學報告(USGCRP, 2023), 第四章, 圖4.9。

# 3. 乾旱/水資源科研進展



## 科研進展

- ▶ 呼應科研缺口: 美國國家氣候報告
  - 物理機制與水文循環角度
  - 不確定性分析與呈現
- ▶ 資料應用與未來規劃
  - 水資源風險評估
  - 圖資產製規劃

# 資料應用與未來規劃



考量近年氣候變遷加劇、社經環境快速變化，滾動式盤點全臺水資源待改善問題並提出相關因應對策：


## ➤ 氣候變遷風險評估

- 強化臺灣水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(99-101年，參採AR4資料)
- **水資源經理基本計畫(109-110年，參採AR5資料)**
- 水資源經理基本計畫(113-114年，參採AR6資料)

## ➤ 氣候變遷風險調適

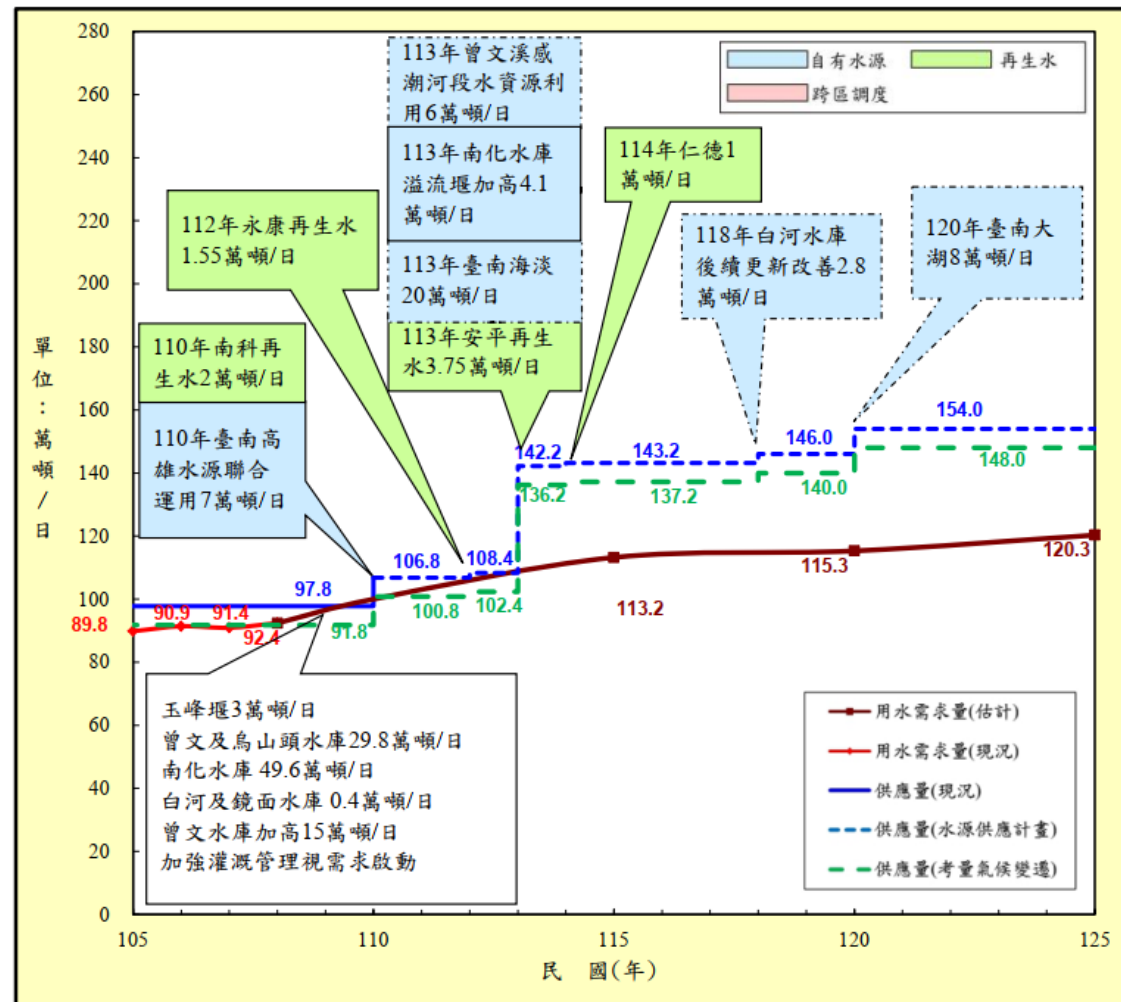
- 水資源領域行動方案(102-106年，參採AR4資料)
- 水資源領域行動方案(107-111年，參採AR5資料)
- 水資源領域行動方案(112-115年，參採AR6資料)

# 資料應用與未來規劃


**經濟部**  
 Ministry of Economic Affairs  
 臺灣各區  
 水資源經理基本計畫  
 (核定本)  
 110年8月

## ➤ AR5統計降尺度資料

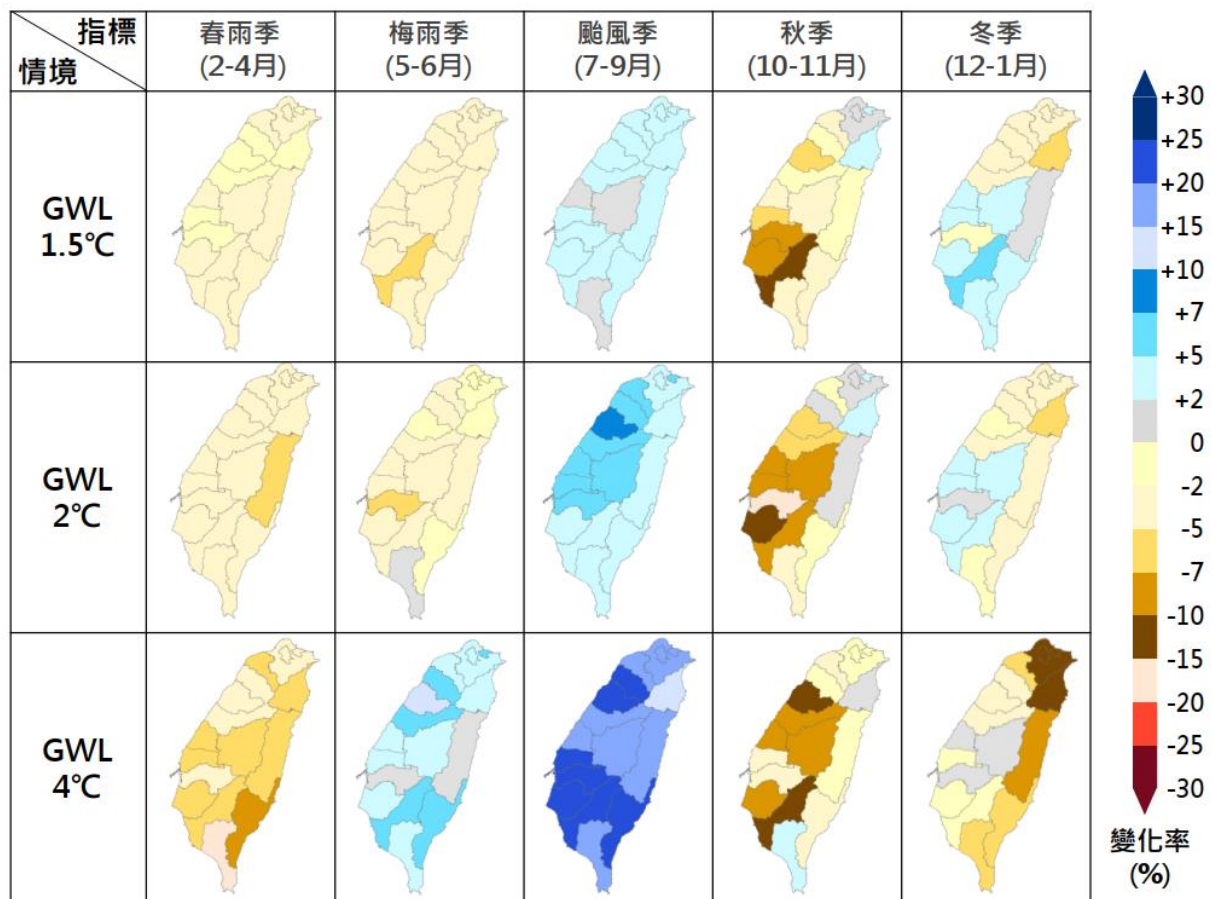
- 豐枯特性
- 模式表現
- 惡劣情境



臺南地區公共給水供需圖

# 資料應用與未來規劃

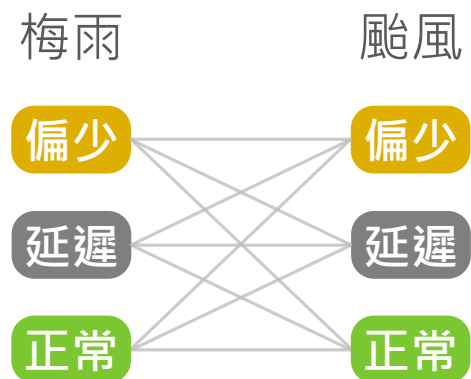
## 氣候變遷下各縣市之季節雨量變化率(中位數)



# 資料應用與未來規劃

- 梅雨與颱風之聯合發生機率

(a) 水文情境組合



共計09種情境組合

偏少

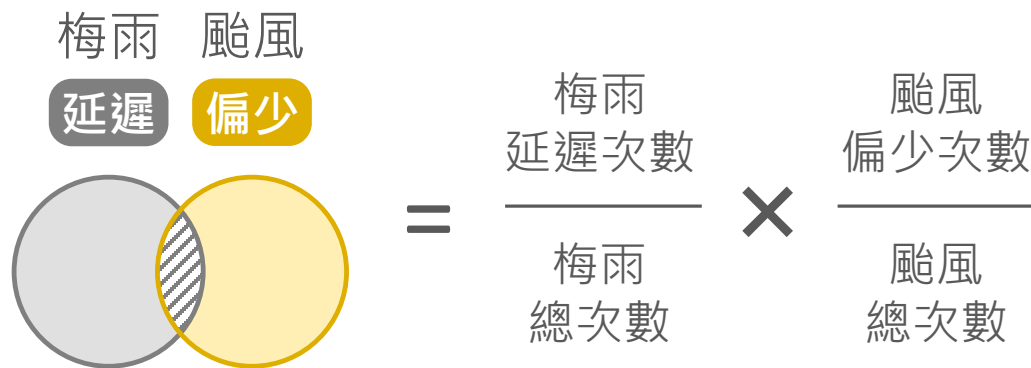
累積機率≤33%

正常

累積機率>33%

(b) 發生機率計算方式

$$P(\text{梅雨}_{延遲} \cap \text{颱風}_{偏少}) = P(\text{梅雨}_{延遲}) \times P(\text{颱風}_{偏少})$$



延遲

累積機率>33% 首月累積機率≤33%

# 謝謝聆聽 敬請指教

**TCCIP** 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

指導單位  **NSTC** 國家科學及技術委員會  
National Science and Technology Council

計畫辦公室  **NCDR** 行政法人國家災害防救科技中心  
National Science and Technology Center  
for Disaster Reduction