

臺灣氣候變遷 乾旱風險評估與調適

中央研究院永續科學研究計畫 (2016-2018年)

「台灣乾旱研究：變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫」

中央研究院環境變遷研究中心

國家災害防救科技中心

臺灣氣候變遷乾旱 風險評估與調適

01

認識氣候變遷

02

臺灣水環境大觀

03

臺灣氣候變遷
乾旱風險評估

04

臺灣氣候變遷
乾旱調適策略

01

認識 氣候變遷

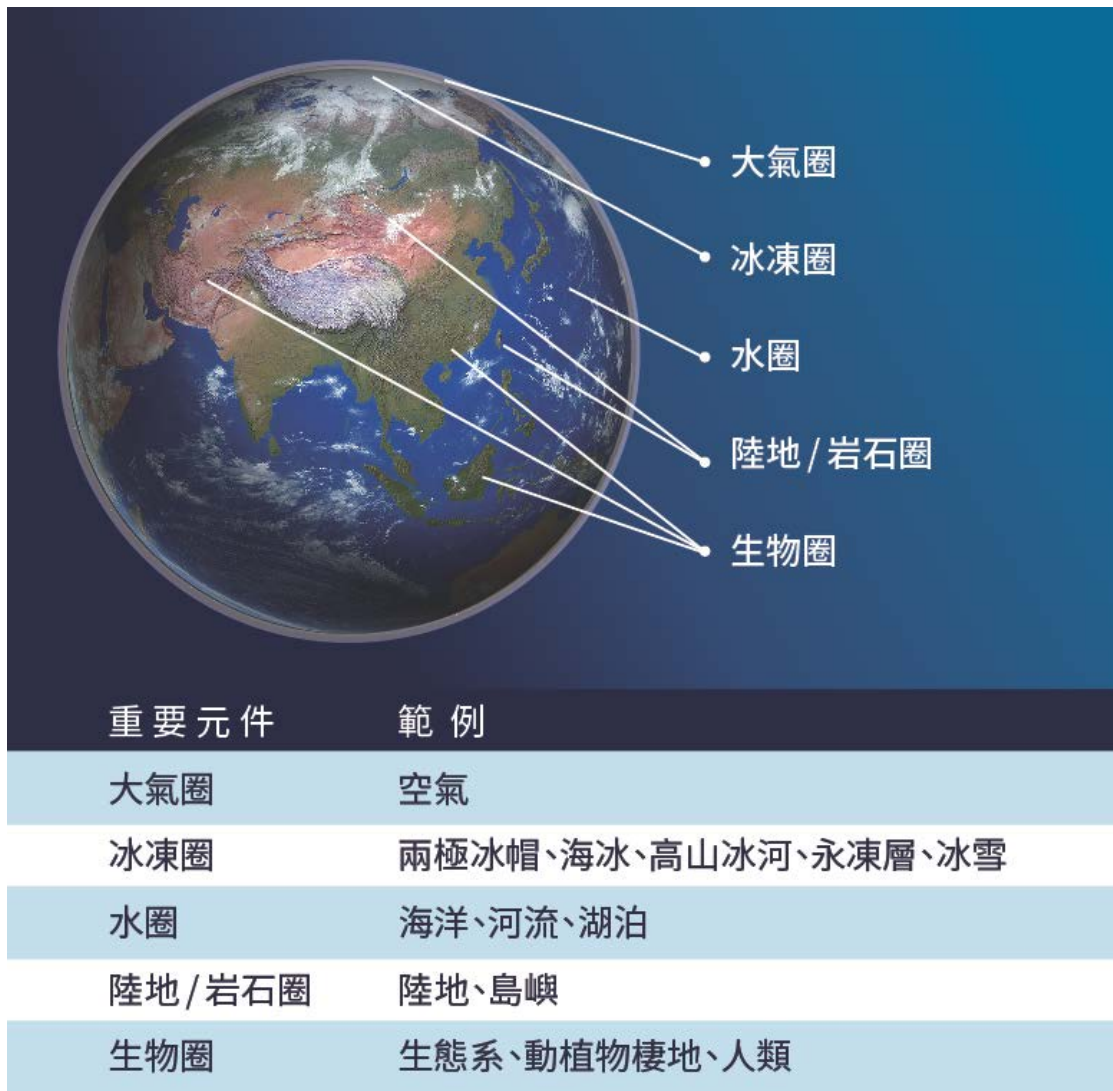
- 01 氣候科學的秘密
- 02 氣候變遷的肇因與證據
- 03 氣候變遷的後果與風險
- 04 氣候變遷的因應策略
- 05 科學知識產製過程與方法



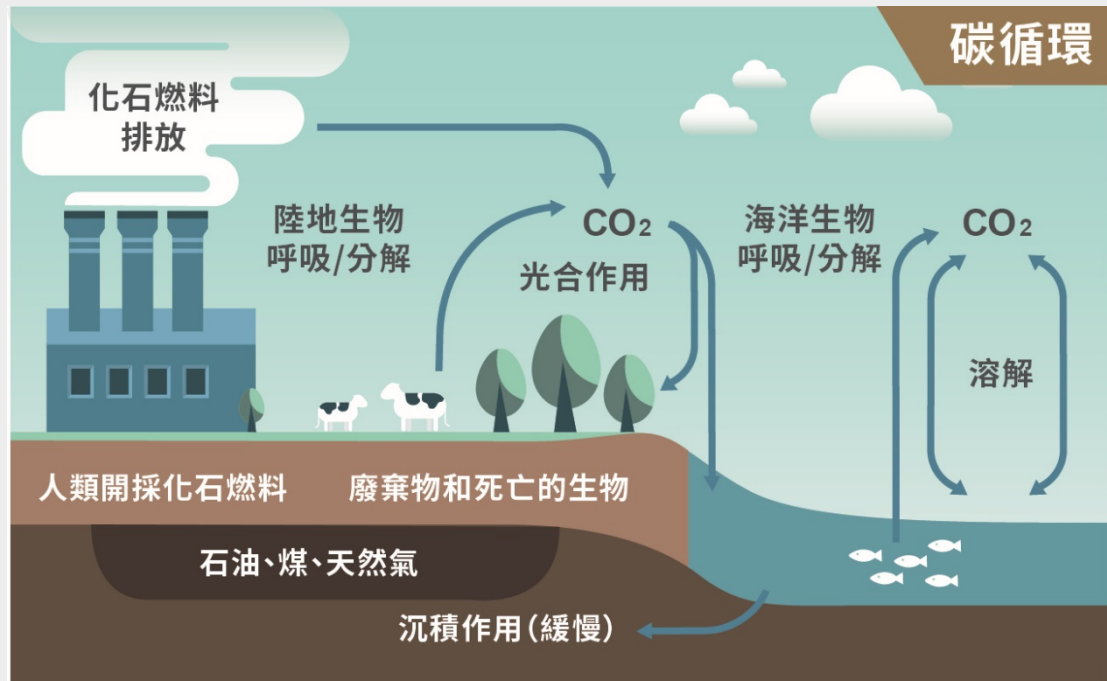
氣候科學的秘密

地球的氣候系統是什麼？

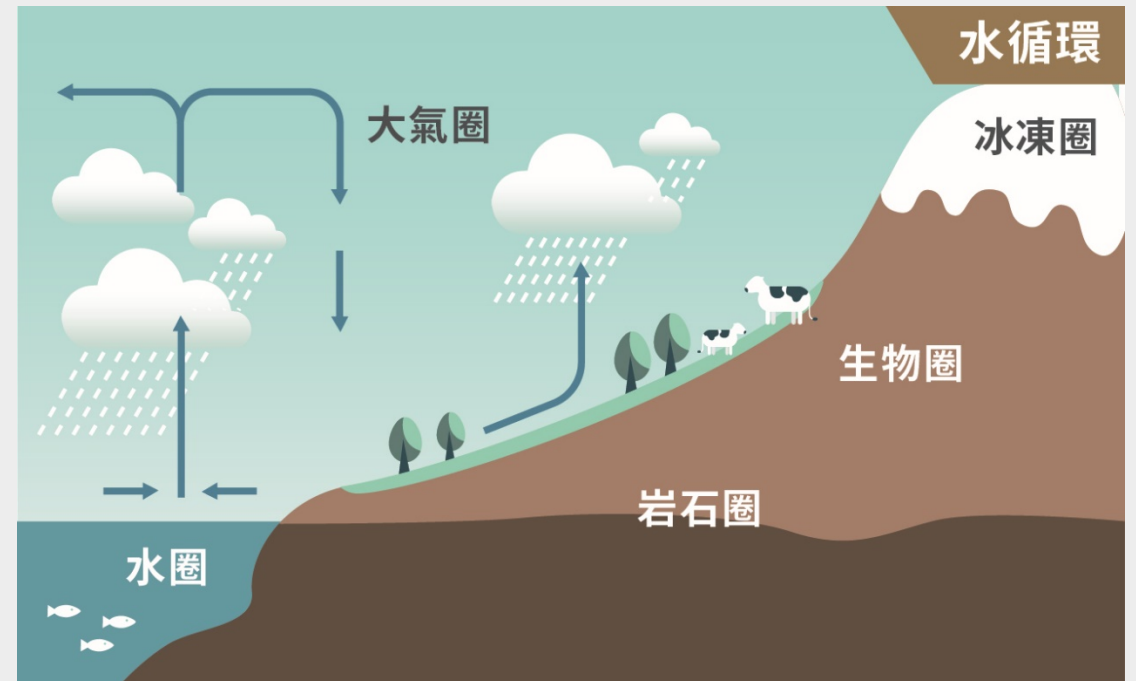
地球的氣候系統由大氣圈、冰凍圈、水圈、陸地/岩石圈、生物圈等五項主要元件所組成。這些元件會交互作用，也因此影響地球的氣候與天氣系統，例如：氣溫、降雨等。其中的交互作用包括碳循環、水循環等。



碳循環 與 **水循環** 是指「碳元素」與「水」在地球的大氣圈、冰凍圈、水圈、陸地/岩石圈、生物圈之間傳送、交換、轉變的過程。其中，因為溫室效應，大氣中二氧化碳(CO₂)濃度變化對地球溫度的變化有很大的影響。而因為水份蒸發過程中會吸熱，故有冷卻、降低溫度的作用。



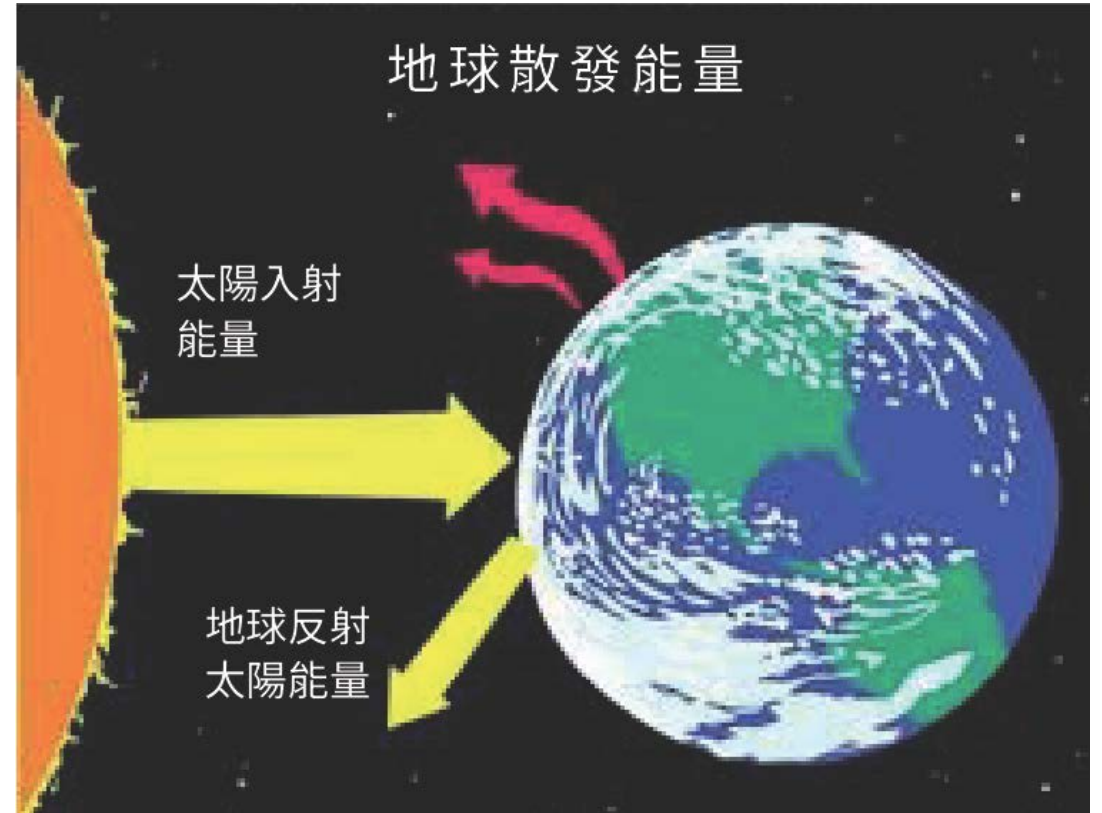
人類由陸地/岩石圈開採含碳的化石燃料，燃燒後成為CO₂排放至大氣中，可由植物行光合作用吸收(生物圈)，或溶解至海洋中(水圈)。



地面或海洋中的水份被太陽蒸發成為大氣中的水蒸氣，凝結成雲，可能降雨至山區(陸地)，流入河川湖泊，生物飲用後再排出，最後進入海洋

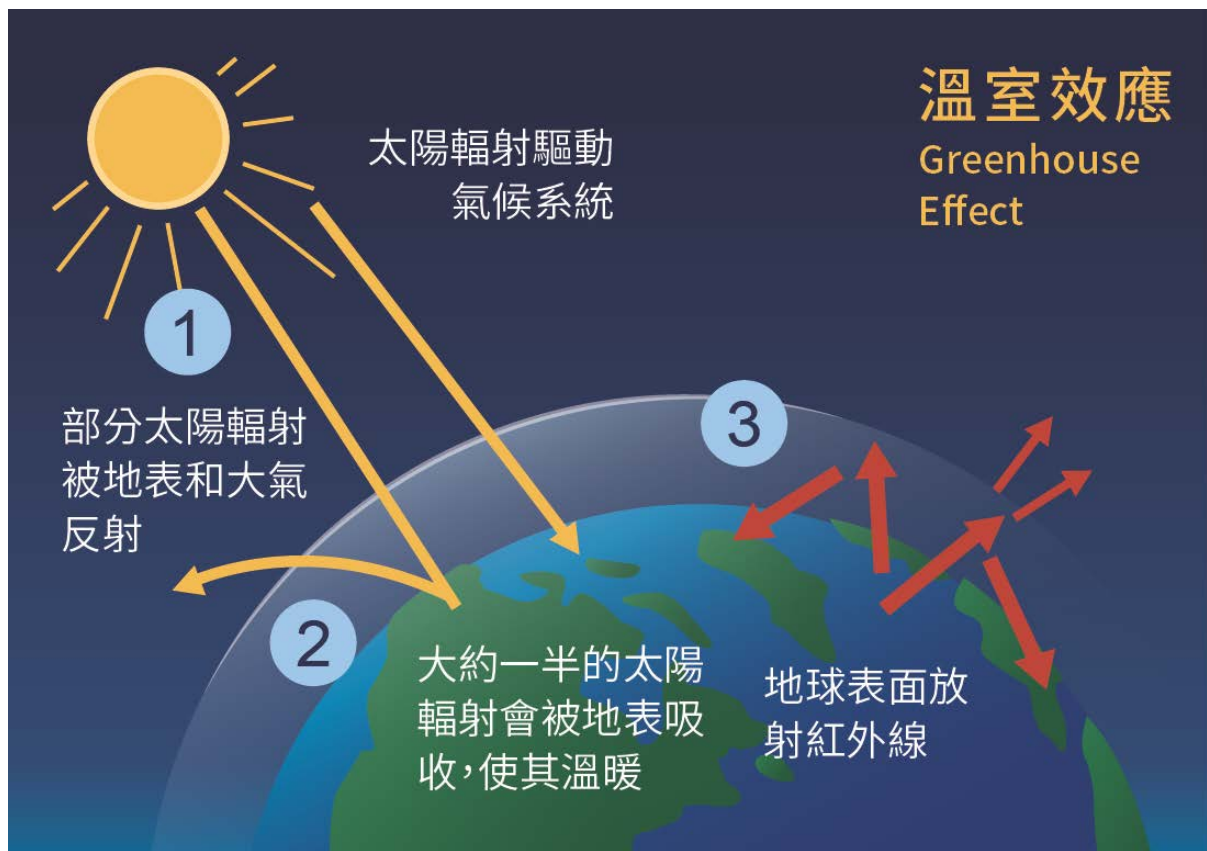
地球的能量平衡與溫室效應是什麼？

- 地球透過接收太陽輻射能量而增加熱能，同時，亦向太空發散紅外線能量，兩者若相等，即達到**能量平衡**。
- **溫室效應**是指大氣中的溫室氣體(如CO₂)會吸收部分地球發散的紅外線能量，並將此熱能保留在大氣中，使地表溫度上升，也因如此，地球的平均溫度才得以維持在適合居住的攝氏15度。



- 接收的輻射能量=發散的紅外線能量→能量平衡
- 接收的輻射能量>發散的紅外線能量→地球溫度就會上升

改變地球能量平衡的三種方式



- 1 地球接收的太陽輻射能量改變：**
例如：太陽輻射強度增強
- 2 地球地表與大氣反射太陽輻射的程度：**
例如：白色冰雪覆蓋面積增加或大氣中雲量的增加，會增加反射量，使留在地球的熱能減少
- 3 地球發散到太空的紅外線能量改變：**
例如：大氣層中的溫室氣體濃度越高，吸收的熱能會越多，發散的紅外線能量減少，地球增溫亦越趨顯著。

氣候與天氣有何不同？

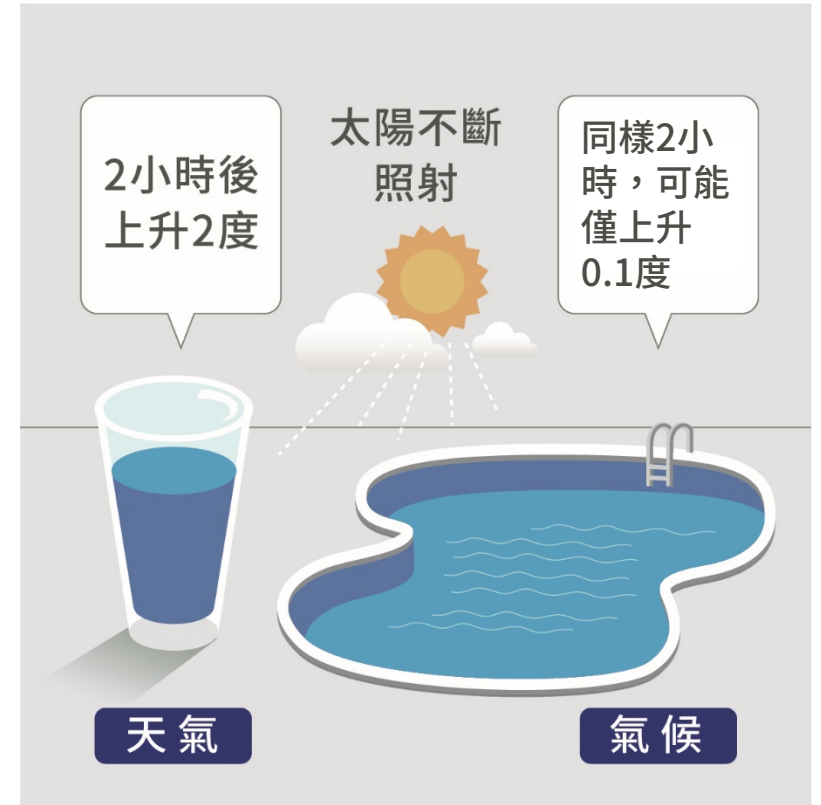
- 「天氣」為一個地方、一個時間點的大氣狀態，其持續時間可以從半小時到2周。例如：午後雷陣雨或夏天時期豔陽高照的晴天。
- 「氣候」為一個地方、一段長時間的天氣或氣象系統的特性(平均狀態)，通常需要使用超過20~30年的資料來統計。例如：臺灣的氣候屬於亞熱帶氣候區域或臺灣近20~30年的梅雨開始與結束日期。

	天氣	氣候
時間尺度	較短	較長
最小時間尺度	隨時	20~30年
最大時間尺度	兩個禮拜	上百年
空間尺度	區域性	範圍廣
最小空間尺度	數公里	數十公里
最大空間尺度	數十公里	全地球
影響範圍	較小	較大



為何地球的氣候很難改變？

- 天氣是較小範圍的空間、較短時間尺度，所以，天氣的改變通常瞬息萬變，一個地方1小時就可能變天，例如：北部地區下午會下雨。
- 但氣候是較大範圍的空間，又是長時間的天氣平均狀態，因此，通常需要很長的時間的觀察，我們才會看見一個區域明顯的氣候變化，例如：南北極區過去一百年溫度的改變。
- 「全球氣候變遷」討論的是全球的空間尺度，需要長時間的資料，才可以得知地球的氣候是否確實改變。



大空間範圍的系統(如氣候)較難改變

聖嬰現象—影響天氣的氣候現象

- 「聖嬰現象(El Niño)」是熱帶東太平洋海水每隔2到7年會發生異常變暖的現象。由於其最暖期常在聖誕節前後，故被秘魯漁夫以西班牙文命名為El Niño de Navidad，意指聖誕夜的小男孩。相反地，若當地海水變冷，則稱為反聖嬰現象(La Niña，意即女嬰)。
- 聖嬰現象發生時，會改變熱帶太平洋的風向及降雨區域，並造成全球性的溫度及降雨變化，例如：南美洲地區會出現暴雨，但東南亞、澳大利亞則出現乾旱。
對臺灣而言，其影響最大的即是造成暖冬、春雨增加，及颱風形成的位置偏東等天氣現象。

天氣和氣候系統之空間與時間尺度



天氣與氣候現象的時間與空間尺度，雷陣雨為空間小，時間短的天氣現象；全球氣候變遷則為空間範圍大，時間長的氣候現象；聖嬰現象則是介於兩者之間的氣候現象。



氣候變遷的肇因與證據

科學家找尋氣候變遷的證據

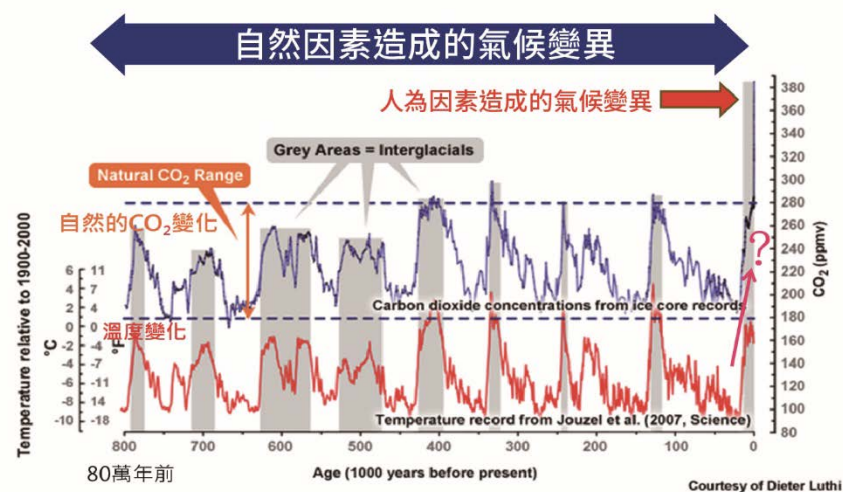
- 為了解地球氣候變化，世界氣象組織與聯合國環境署組成「政府間氣候變化專門委員會 (IPCC)」，組成三個工作小組，分別是基礎科學、衝擊與調適與減緩。
- 工作小組彙整全世界科學家對氣候變遷的發現與看法，並分別出版評估報告(Assessment Report)以及其他特別報告。



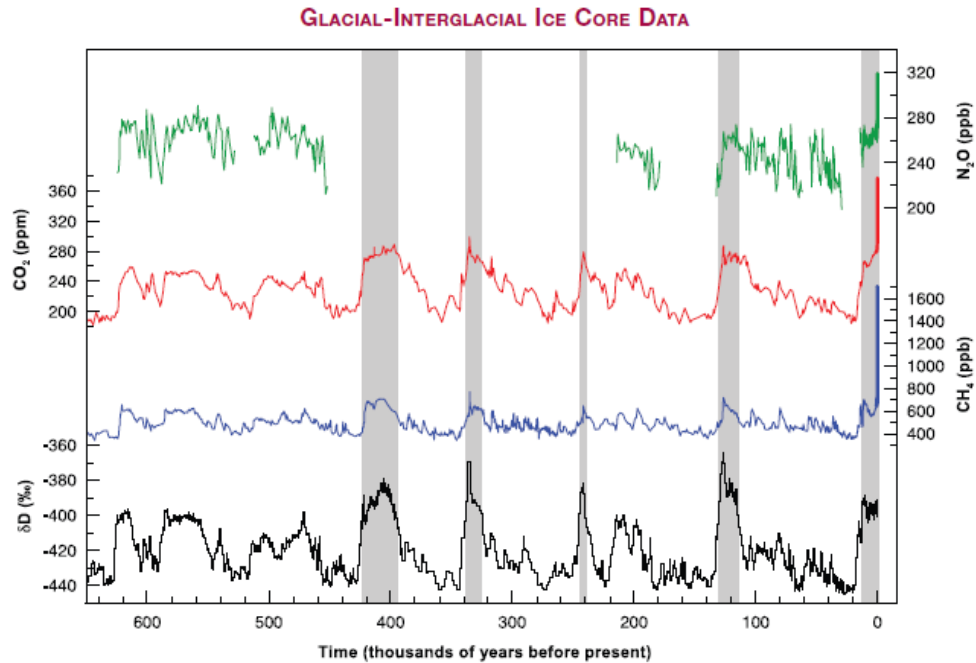
地球的溫度會受自然因素與人為因素影響

- 地球的溫度原本就有自然的變異，因此，在過去五億年的地球歷史上，有數次的冰河期與間冰期。科學家也發現地球的溫度變化與大氣層中的CO₂濃度變化十分契合，這證實了溫室效應。
- 但在20世紀中的工業革命後，人類使用化石燃料，過度排放溫室氣體，加劇了溫室效應，使得人類活動對地球溫度的影響更為劇烈。截至2018年，大氣中的溫室氣體濃度達到 407ppm，此數值亦超過地球歷史上的自然範圍。

自然因素	人為因素
<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽強度變化、日地關係、太陽黑子的長期變化 ● 板塊與造山運動、溫鹽環流、海洋大氣陸地交互作用 ● 火山爆發、白色冰雪覆蓋面積變化、大氣中雲量的變化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人為活動造成溫室氣體過度排放 ● 土地利用改變(大規模森林砍伐) ● 社會與自然環境的變遷等



大氣溫室氣體的來源與 濃度變化為何？



- 溫室氣體是在大氣層中引發溫室效應的氣體，主要的有：水氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、全氟碳化物(PFCs)、氫氟碳化物(HFCs)，以及六氟化硫(SF_6)。
- 除了水氣是自然存在在地球之外，這些溫室氣體的主要來源包括：大量使用化石燃料作為主要能源(燃煤、火力發電)排放的 CO_2 ；畜牧與垃圾掩埋場過程排放的 CH_4 ；農業活動使用氮肥排放的 N_2O ；以及化學製程中使用的含氟化合物。
- 科學家運用冰河中冰核資料，紀錄三種溫室氣體60萬年以來的大氣濃度的變化，發現在近一世紀有顯著增加的趨勢，主要原因是因工業革命後大量使用化石燃料而排放的 CO_2 。

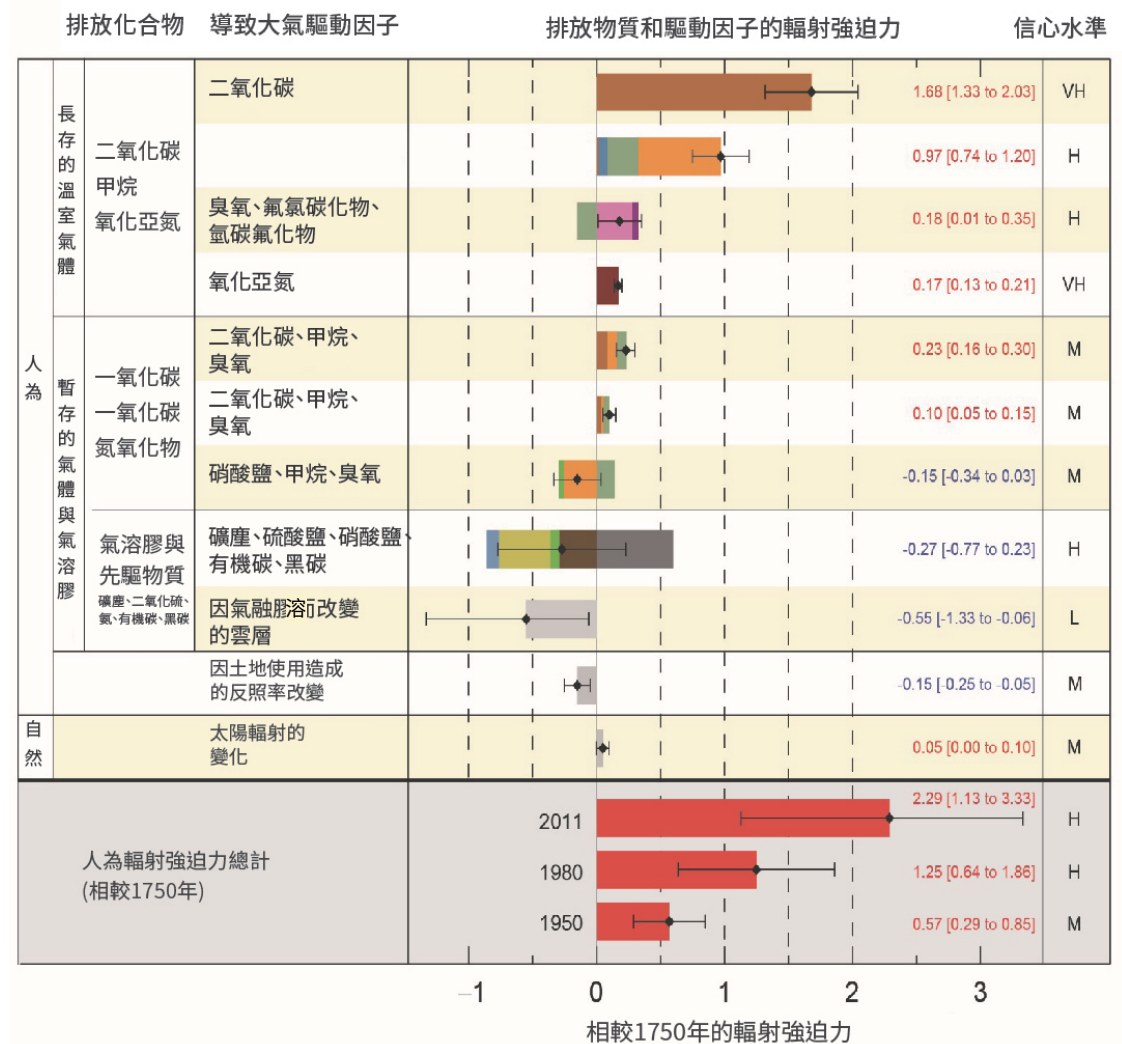
每一種溫室氣體的暖化效果一樣嗎？

每種溫室氣體對全球暖化的影響程度有所差異，以CO₂為標準，同樣濃度的氣體暖化效果稱為全球暖化潛勢(Global Warming Potential, GWP)，可以發現其他溫室氣體的暖化效果皆大於CO₂，例如：CH₄有比CO₂還高近23倍的暖化效果，而SF₆則有比CO₂還高超過22,200倍的暖化效果。但由於CO₂大氣濃度遠大於其他溫室氣體，因此二氧化碳的綜合影響力仍是所有溫室氣體之最。

溫室氣體種類	全球暖化潛勢 ^b
二氧化碳 (CO ₂)	1
甲烷 (CH ₄)	23
氧化亞氮 (N ₂ O)	296
氟氫碳化物 (HFCs)	12-12,000
全氟碳化物 (PFCs)	5,700-11,900
六氟化硫 (SF ₆)	22,200

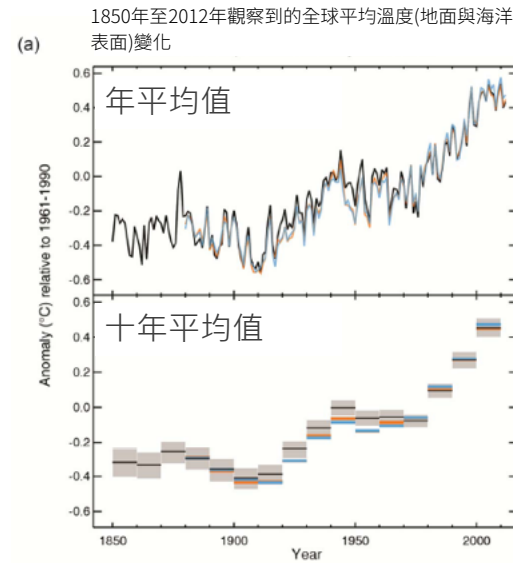
誰是暖化的主要貢獻者？

- 一般而言我們使用輻射效應(Radiative Forcing)來評估地球能量是否平衡，RF正值代表地球(或單一因素)吸收輻射能量大於發散的紅外線能量，故為暖化；負值則為冷化，例如：氣溶膠與懸浮粒子的雲反射有冷化效果，其RF值為-0.55 W/m²。
- 衡量單位是每平方公尺面積的淨熱能(W/m²)(許多氣體或物質造成的能量變化，又以二氧化碳最為顯著，其RF值達到1.68 W/m²)。
- 科學家們綜整各個自然及人為因素的暖化與冷化效應，發現相對於工業革命前(1750年以前)，人為因子的輻射效應直至2011年，已增至為2.29W/m²，代表人為因子造成暖化的證據已十分明確。



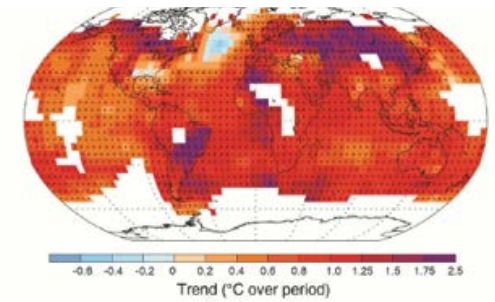
我們觀測到氣候的變化為何？

- 氣溫變化：全球平均溫度(地面與海洋表面)在1880-2012年區間，增溫 0.85°C [0.65 to 1.06]，且近30年增溫速度更加快速，在空間方面，呈現一致性的增溫變化。
- 降雨變化：在空間上較無一致性的改變，部分地區呈現降雨增加(美洲東部、歐洲及亞洲北部)，但是部分地區呈現降雨減少(非洲及亞洲南部)。

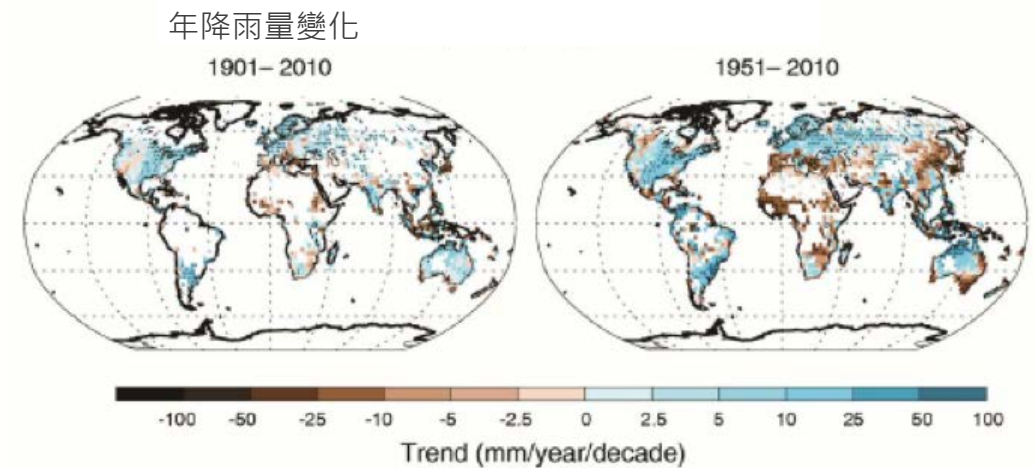


氣溫變化

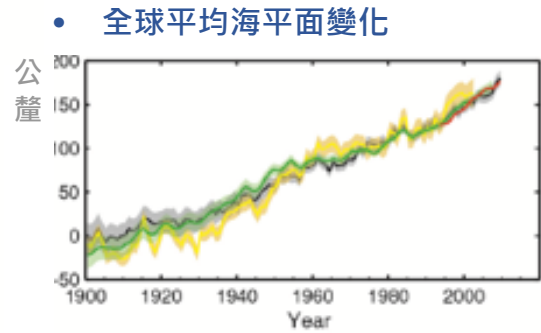
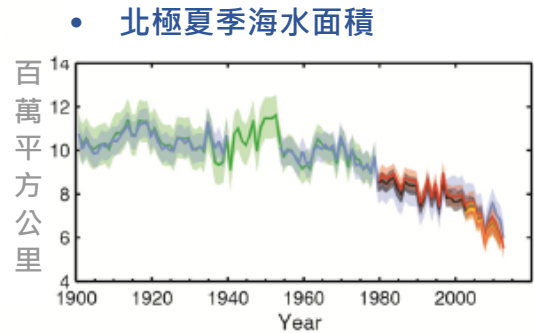
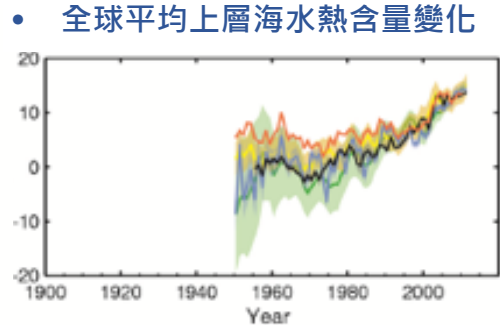
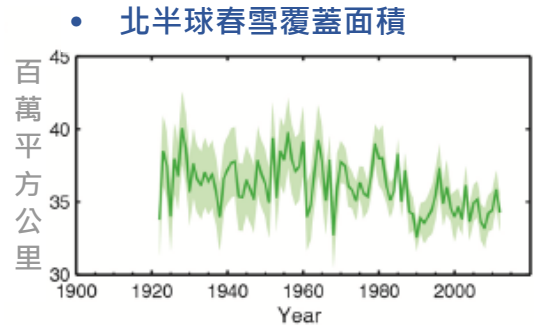
1901年至2012年觀察到的地表溫度變化



降雨



我們觀測到氣候的變化為何？



冰雪

海平面

- 北半球春雪覆蓋率下降及北極夏天海冰面積減少。
- 受地球兩極冰帽海冰融化的影響，海水位平均每年上升1.8毫米，近10年上升速度增加為每年3.1毫米。

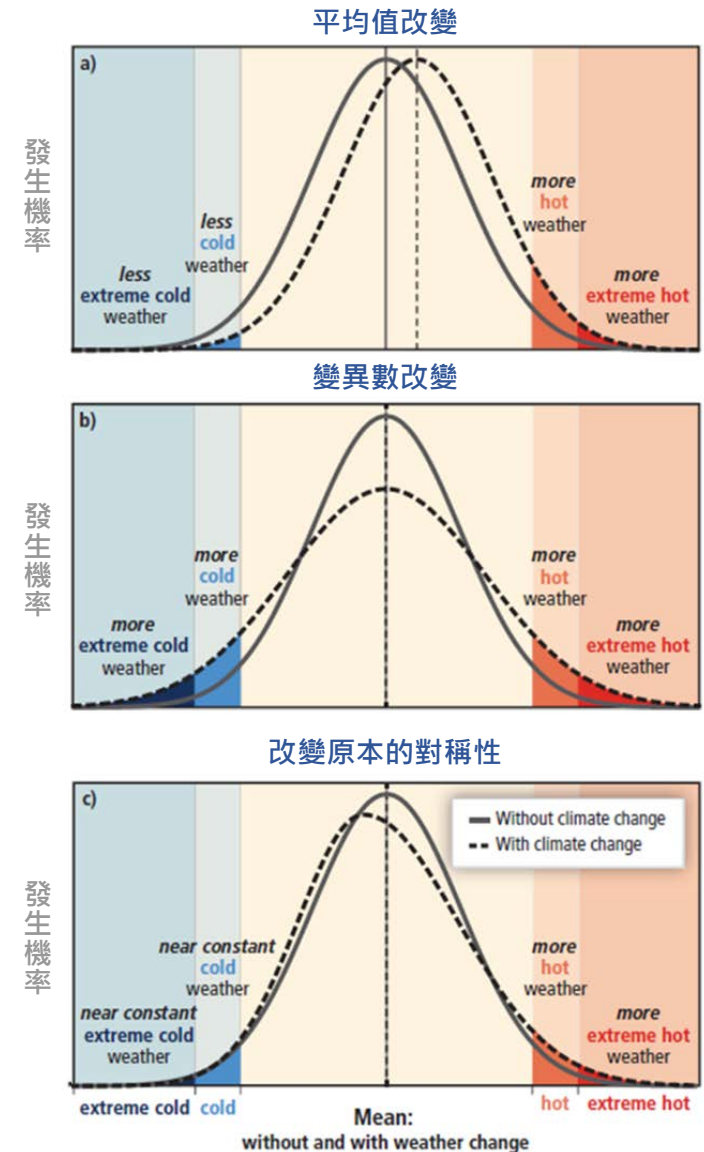
氣候變遷還包含極端事件的變化

- 氣候變遷包含極端事件的變化。所謂地「極端值」，意為當一個天氣或氣候變數的數值高於或低於門檻值(常態分佈的上限或下限之10, 5, 1%)，例如：30年來事件總降雨量前5%的颱風事件。
- 極端事件亦可為該變數之特定絕對數值(危險標準)，例如：高溫超過攝氏38度。或是以事件發生的可能性或頻率來定義極端事件，例如：100年重現期的洪水。
- 故當全球氣候改變後，不僅平均狀態會改變，極端值也可能改變，造成極端事件特性(強度與頻率)的改變。



氣候變遷如何改變極端值？

- 1 平均值的改變，例如平均氣溫增加（原本的常態分佈向右偏移），因而造成熱浪更強也更多，但是寒潮則變弱及減少。
- 2 變異數的改變，例如：平均氣溫未改變，但變異數變大（原本的常態分佈向左右更開展），因而造成熱浪更強更多，且寒潮也更強更多。
- 3 改變原本常態分佈的對稱性，例如：平均值與變異數皆可能改變（原本的常態分佈向單邊偏移，形成不對稱的分佈），因而造成熱浪更強更多，但寒潮特性可能不變。



全球極端事件 有何改變？

科學家發現過去50年間：

- 冷日與冷夜有變暖與變少的趨勢、
- 暖日與暖夜有增加且更熱的趨勢、
- 強降雨事件有增加的趨勢、
- 受乾旱影響的地區有增加的趨勢、
- 熱帶氣旋有增強與增長的趨勢、
- 海平面有升高的趨勢。

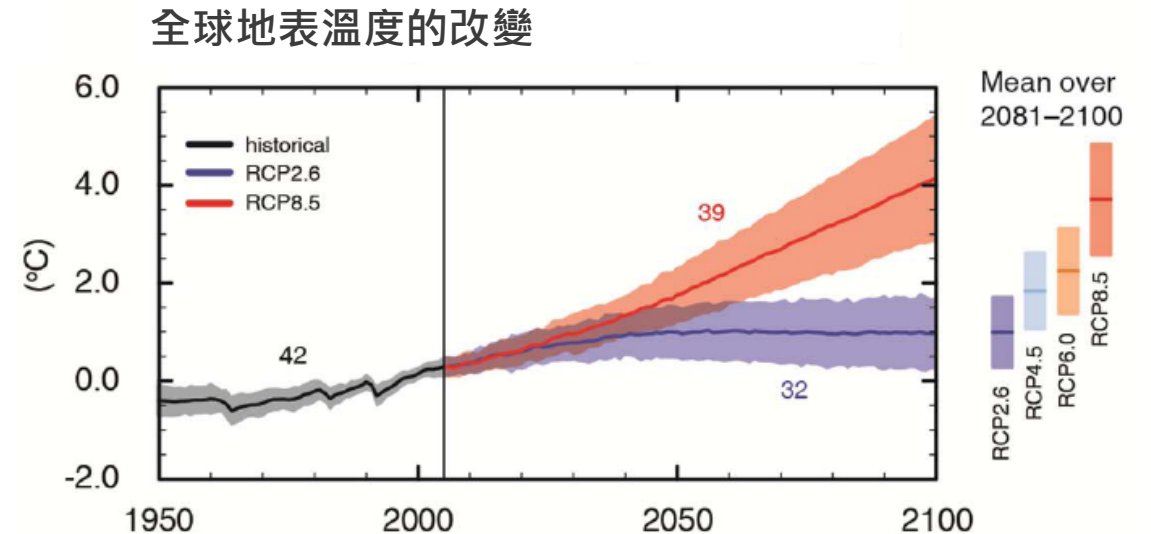
這些趨勢在未來亦可能繼續發生

現象和趨勢	發生在20世紀後期的可能性(1960年後)	屬於人為貢獻的可能性	發生在21世紀的可能性(運用SRES情境)
冷日與冷夜:在多數陸地地區更暖、更少	非常可能	可能	幾乎確定
冷日與冷夜:在多數陸地地區更暖、更多	非常可能	可能(夜晚)	幾乎確定
溫暖期及熱浪:在多數陸地地區次數增加	可能	多半可能	非常可能
大雨事件:在多數陸地地區次數(或大雨雨量佔總降雨量的比率)增加	可能	多半可能	非常可能
乾旱:受到影響的地區增加	可能發生在許多地區(自1970年代)	多半可能	可能
強熱帶氣旋活動增加	可能發生在許多地區(自1970年代)	多半可能	可能
極端海平面高度的發生率提高(排除海嘯)	可能	多半可能	可能

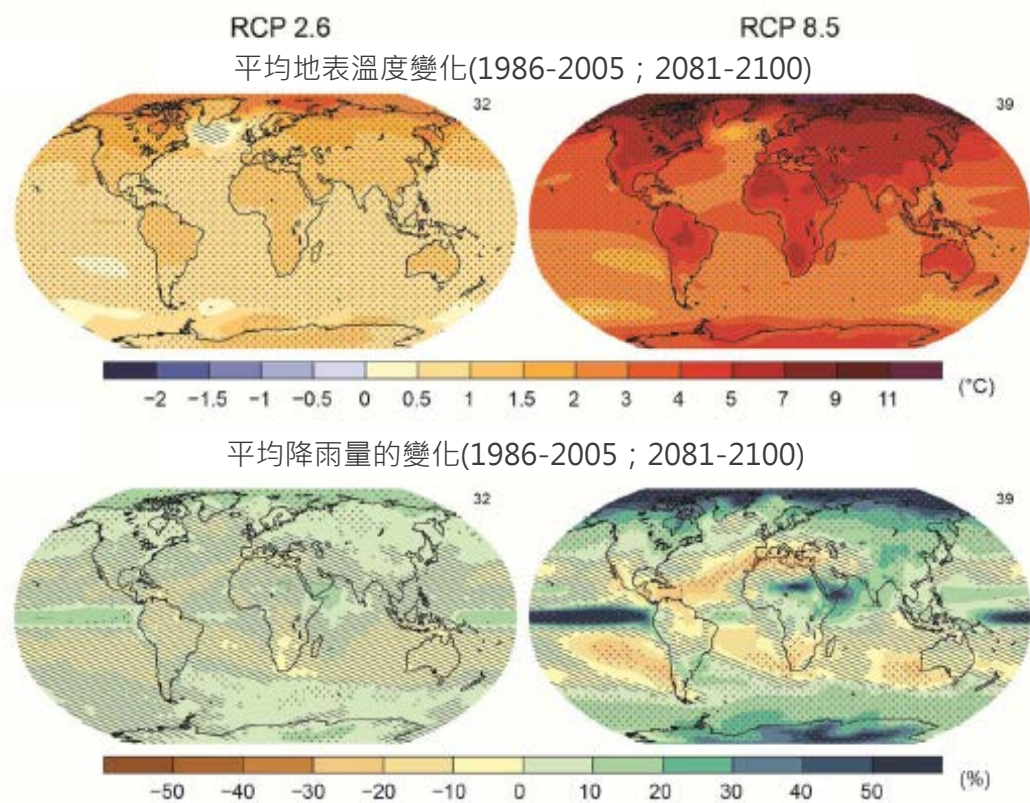
科學家如何知道未來的氣候改變狀況？

科學家們運用全球氣候模式及高速電腦，模擬推估未來不同情境下的氣候狀態。並以四種不同暖化情境代表「2100年的輻射效應會增加多少熱能」，並藉此反推得知大氣CO₂的濃度，此即為「代表濃度途徑 Representative Concentration Pathways，簡稱RCPs」，目前有最佳情境的RCP2.6，升溫較20世紀末約攝氏1.5度，最劣情境的RCP8.5，升溫較20世紀末約攝氏4度。


RCP情境	輻射效應(RF)	大氣CO ₂ 濃度(ppm)
RCP2.6	+2.6瓦	421
RCP4.5	+4.5	538
RCP6.0	+6.0	670
RCP8.5	+8.5	936



全球氣候已經改變了， 但未來的氣候會改變成如何呢？



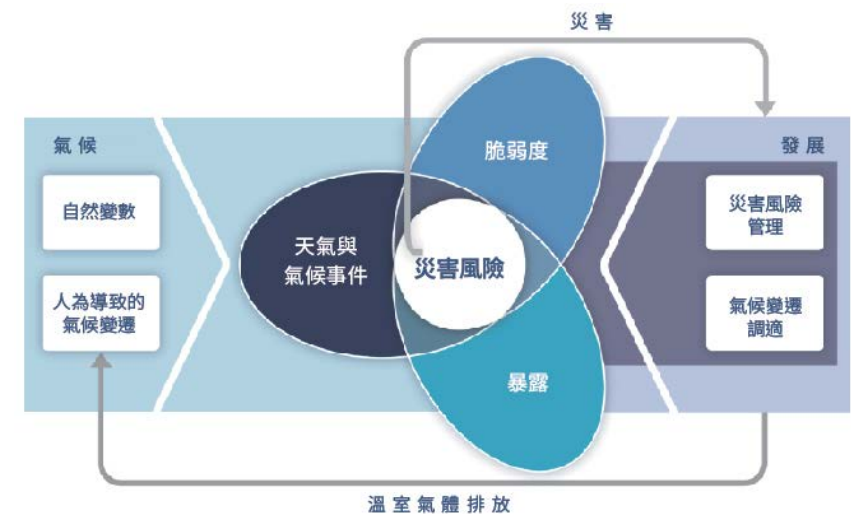
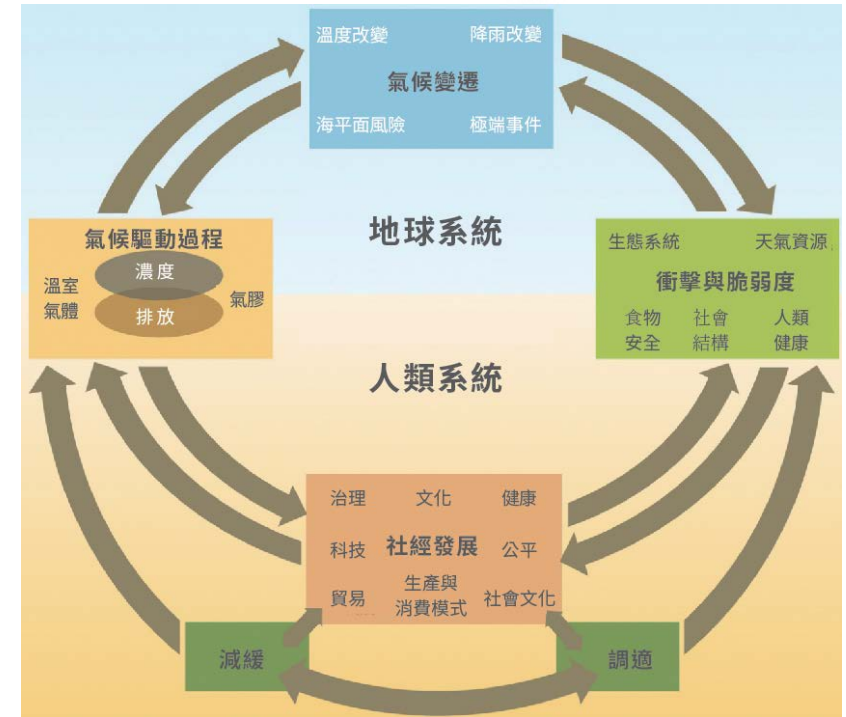
- 根據全球氣候模式結果顯示，到21世紀末全球都會暖化，特別是北半球陸地及極區的暖化更為明顯，暖化程度介於攝氏1度(輕微暖化)到5度(嚴重暖化)之間。
- 未來降雨型態也可能改變，世紀末的降雨，在極區及赤道太平洋會變多、副熱帶減少，大致呈現乾越乾、濕越濕的趨勢。另外，降雨在不同的地區，其對暖化的反應亦不盡相同，因此需要個別考量。
- 極端事件的強度也將可能增加。



氣候變遷的後果與風險

氣候變遷風險受哪些因素影響？

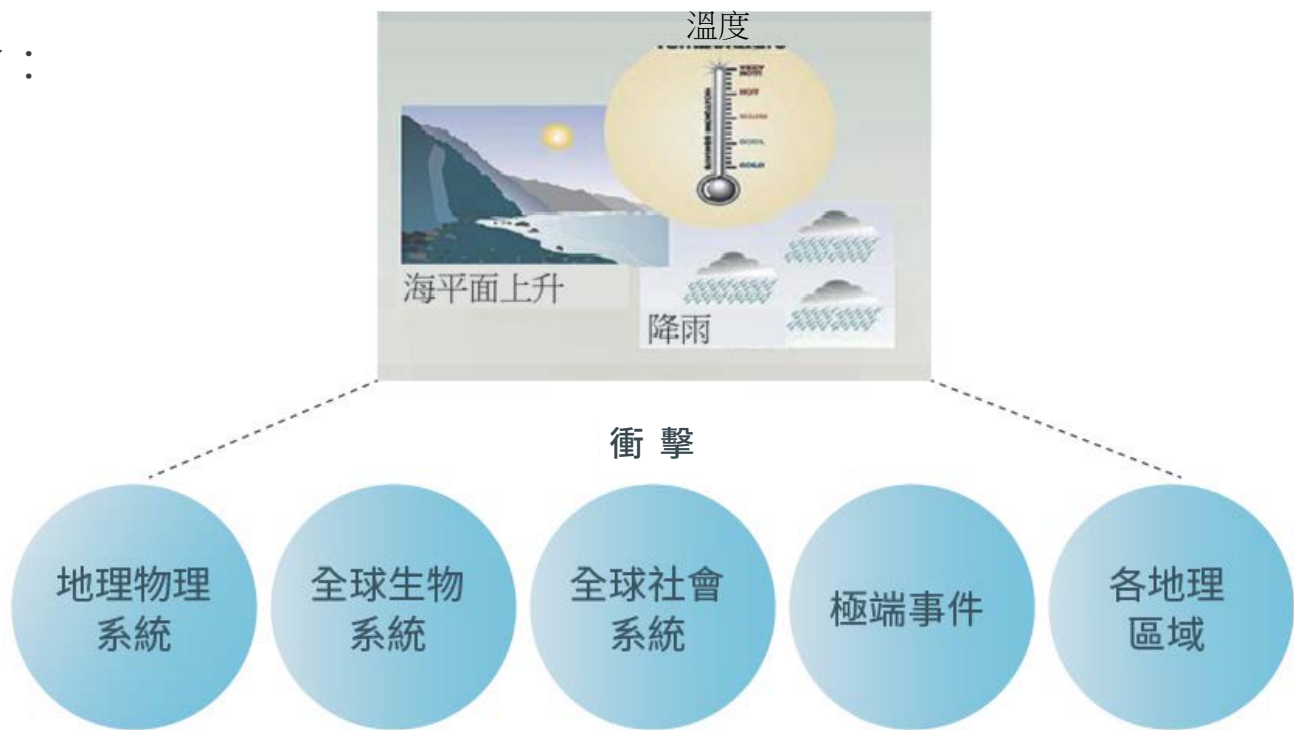
- 氣候變遷是人類與地球系統複雜的交互作用之下的產物，人類活動產生的溫室氣體驅使氣候變化，而氣候變遷的衝擊則會反過來影響人類社會。
- 發生這些衝擊的機率或可能性即為風險。
- 氣候變遷風險則受危害度、暴露量、脆弱度三大因素影響：
 - 危害度：也就是這些氣候變遷現象與極端事件之大小，例如颱風的強度。
 - 暴露量：一個系統是否會接觸在此危害之下，暴露程度大小為何？例如：颱風是否侵襲臺灣與登陸？
 - 脆弱度：此系統本身特性是否脆弱，或有能力因應此危害。例如：颱風路徑上鄉鎮的自然環境、社會經濟狀況是否脆弱？



氣候變遷的衝擊有哪些？

- 因氣候變遷(溫度、降雨、海平面等)所導致地球其他系統的任何可能有益或有害的改變，即為氣候變遷衝擊。IPCC列出關鍵系統與衝擊包含：
 - 地理物理系統
 - 全球生物系統
 - 全球社會系統
 - 極端事件
 - 各地理區域
- 這些衝擊又可以區分為「自然系統」及「人類社會系統」

全球暖化的潛在影響



氣候變遷在自然系統上的衝擊有哪些？

● 水資源衝擊：

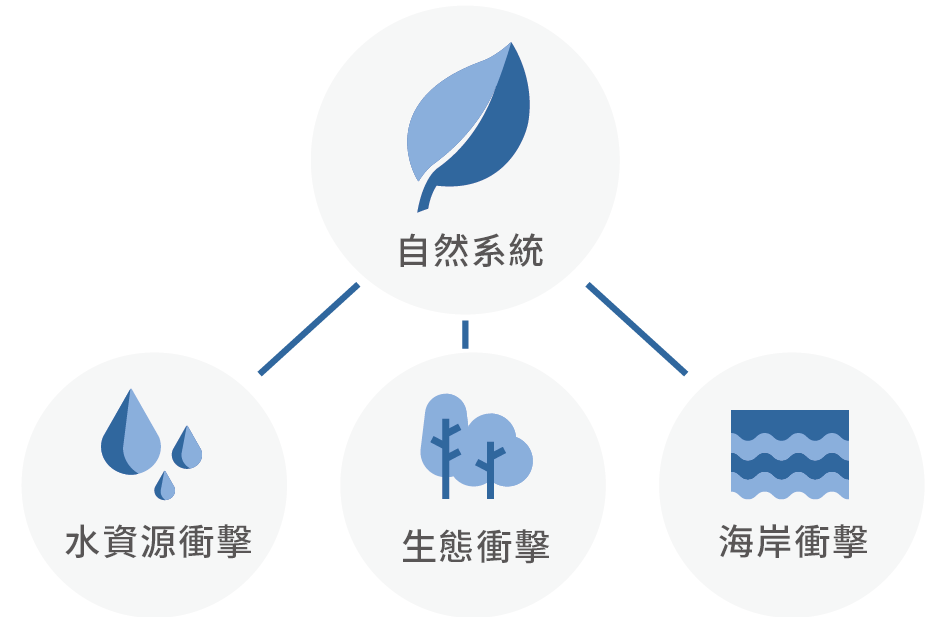
- 在降雨的部分：部分區域降雨增加、部分區域降雨減少、降雨強度有增加的趨勢。
- 在冰凍層的部分：冰雪覆蓋面積與冰川及永凍層皆有減少的趨勢。
- 在地表水的部分，溪河水部分增加、部分減少、蒸發量增加、湖水增溫。
- 部分區域旱災有更嚴重的趨勢。
- 水災、地下水、水質、沖刷尚未發現有明顯氣候相關性。

● 海岸衝擊：

- 因海平面上升及海岸淹水災害，受影響人口將增加
- 海岸侵蝕與退縮

● 生態衝擊：

- 陸域生態系統：苔原、寒帶林、高山生態系、地中海生態系；
- 沿海生態系統：紅樹林、沼澤；
- 海洋生態系統：珊瑚礁與海冰生物。



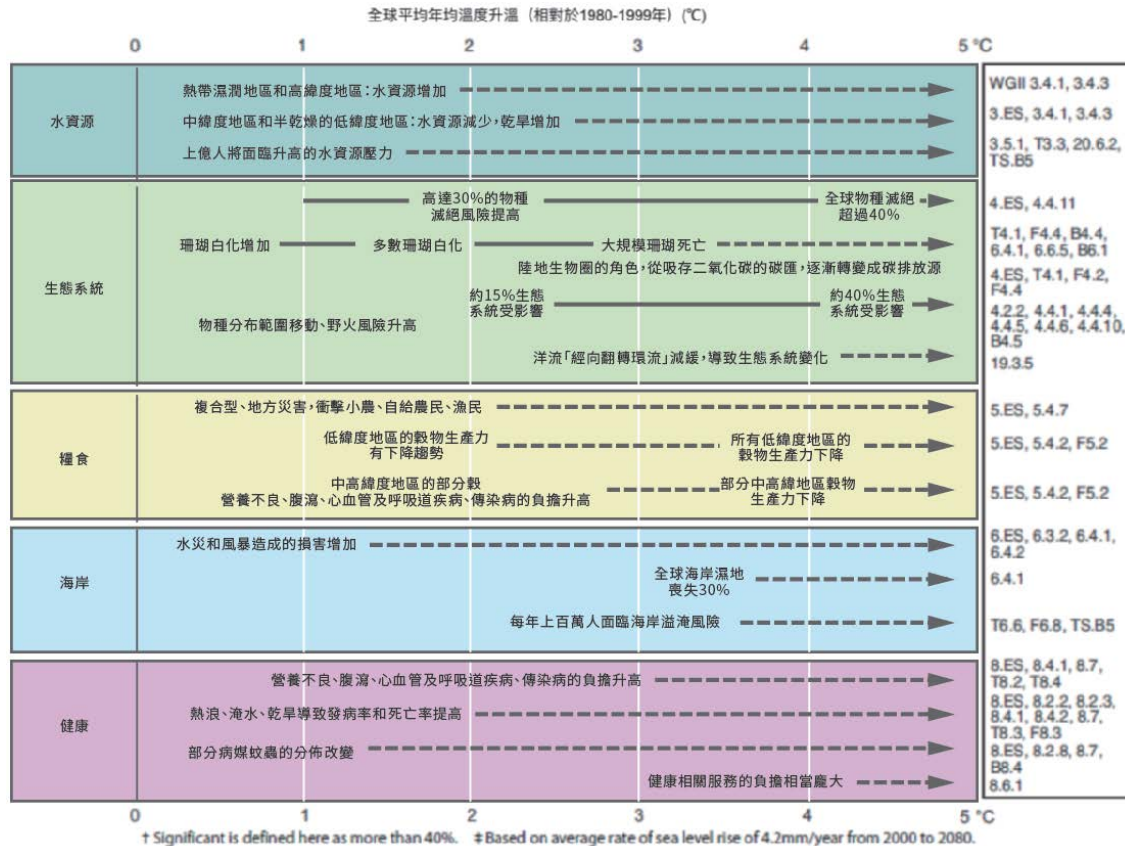
氣候變遷在人類社會系統上的衝擊有哪些？

- 農林漁業/糧食衝擊：受暖化及極端事件之影響，穀類產量將可能降低，甚而引發飢荒問題。林業發展將可能移轉至高緯度區域。
- 健康衝擊：溫度危害(熱浪與寒潮之相關疾病)、傳染疾病(登革熱等)
- 產業與社會衝擊：受影響之產業包含建築土木相關產業、基礎設施產業、自然資源產業。發展中國家因其高脆弱度的關係，受到氣候變遷風險相對高。



未來增溫越多，風險越大

針對全球未來不同增溫情境，各個系統可能的衝擊程度也不一，但是總體而言，增溫越多，可能的衝擊與風險越大。

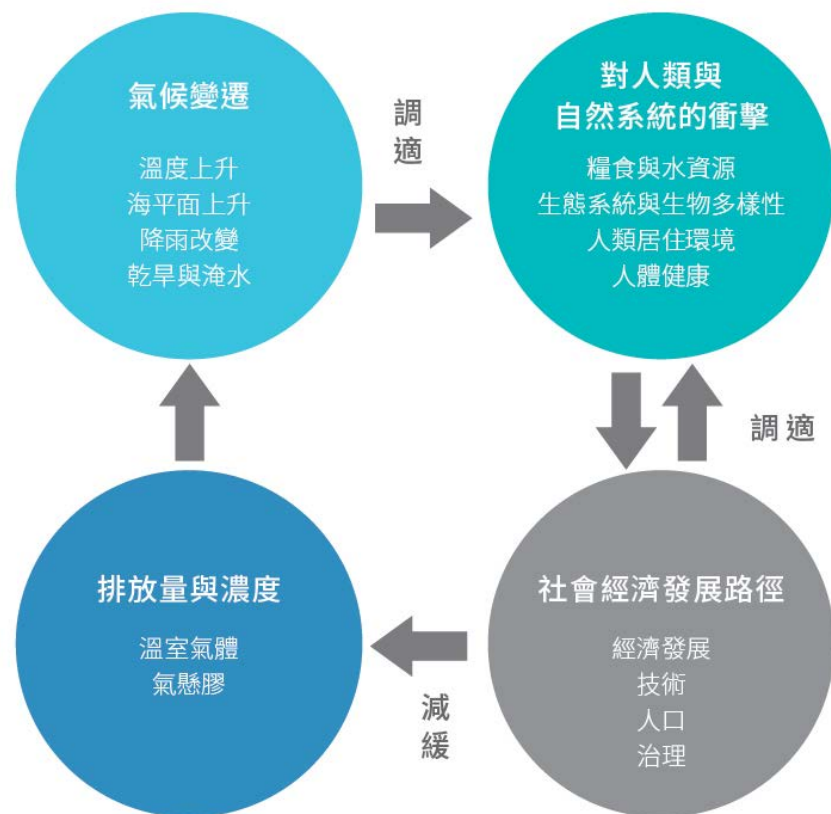


- 水資源系統：在增溫3~4度的情境之下，中高緯度地區有水資源減少的風險，超過百萬人口有水資源匱乏的風險
- 生態系統：在增溫攝氏2度的情境下，多數珊瑚有白化的風險，且約30%物種有滅絕的風險；在增溫攝氏4度的情境下，有大規模珊瑚死亡的風險，且有全球大規模物種滅絕的風險。
- 糧食系統：在增溫攝氏4度的情境下，低緯度穀物有減產的風險
- 海岸系統：在增溫攝氏4度的情境下，約30%全球濕地將有消失的風險，超過百萬的沿海人口會遭受到水災的風險
- 健康系統：在增溫攝氏2度的情境下，部分疾病媒介空間分佈有改變的風險；在增溫攝氏4度的情境下，健康風險將增加，例如：營養不良、傳染疾病、心血管疾病、災害死亡。



氣候變遷的因應策略

解決氣候變遷必須同時考量減緩與調適

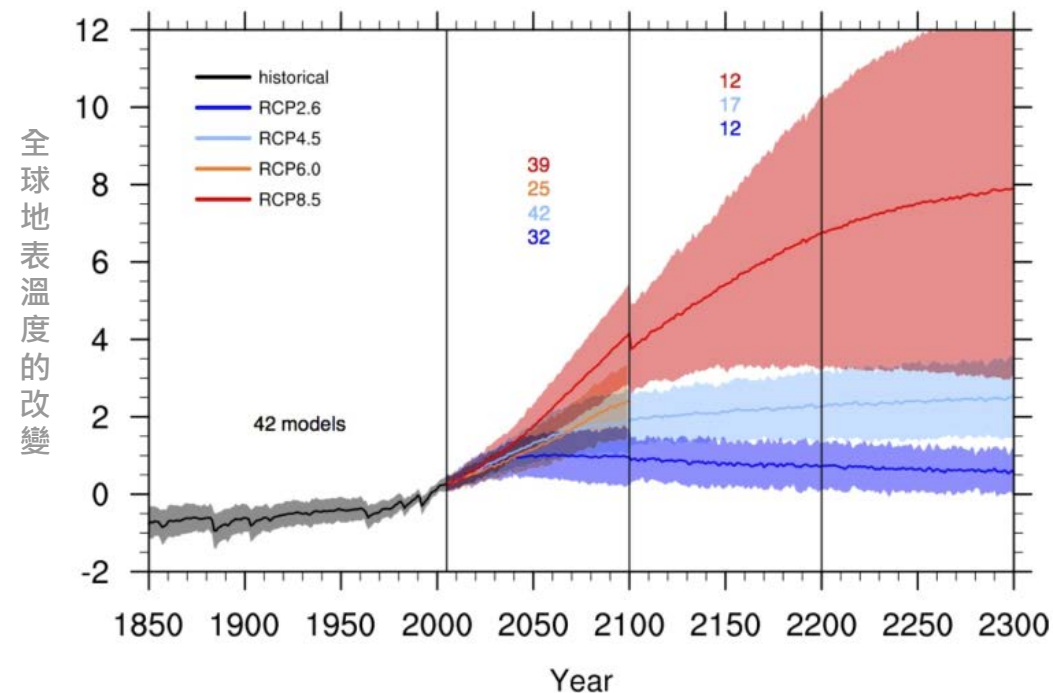


因應甚至解決氣候變遷必須從兩方面著手：

- 減緩：讓影響氣候變遷的人為因素(例如：溫室氣體排放)降低，使氣候變化速度減慢。
- 調適：面對氣候變遷的後果，受影響之系統應調整適應，以降低氣候變遷衝擊與風險。
- 部分作為可同時符合減緩與調適目標，因此整合兩者有其必要性。
- 在氣候衝擊評估尚未完善之前，許多國家皆推動無悔措施，此為簡單、無成本或成本很低、不會有誤的措施。

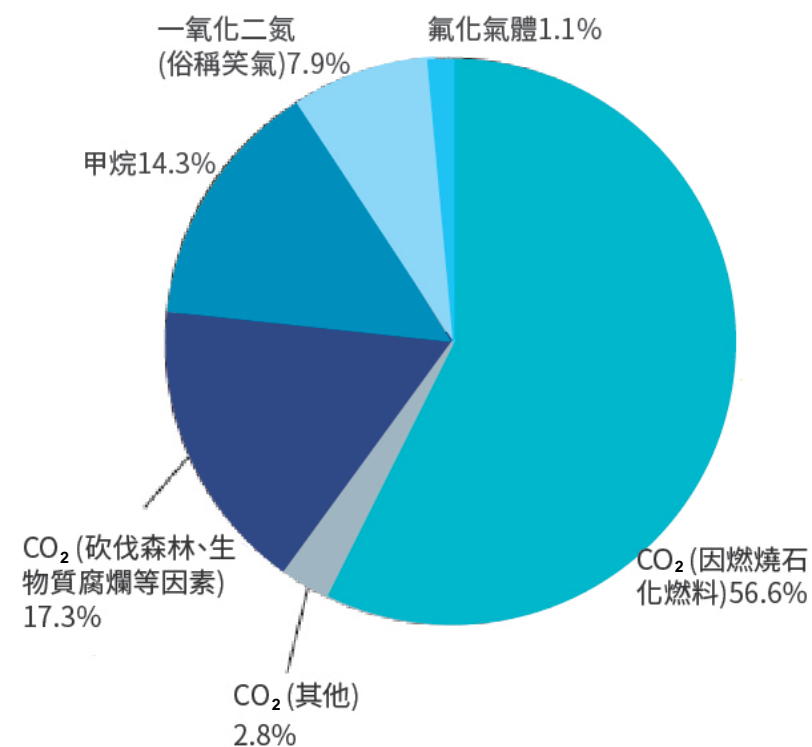
減緩非常重要，調適更是刻不容緩

- 目前國際上目標希望將全球增溫控制在攝氏2度甚至1.5度以下，此為RCP2.6之路徑，因此，積極的減緩作為非常重要，因為這將影響我們是否能避免毀滅性衝擊的情境，例如增溫4度的RCP8.5情境。
- 但是，即使我們做出積極減緩作為，甚至停止排放CO₂，但因為大氣中現有的CO₂濃度仍然很高，地球將持續暖化，氣候已經改變了，許多不可逆之後果也已開始發生，因此，調適作為也是刻不容緩。

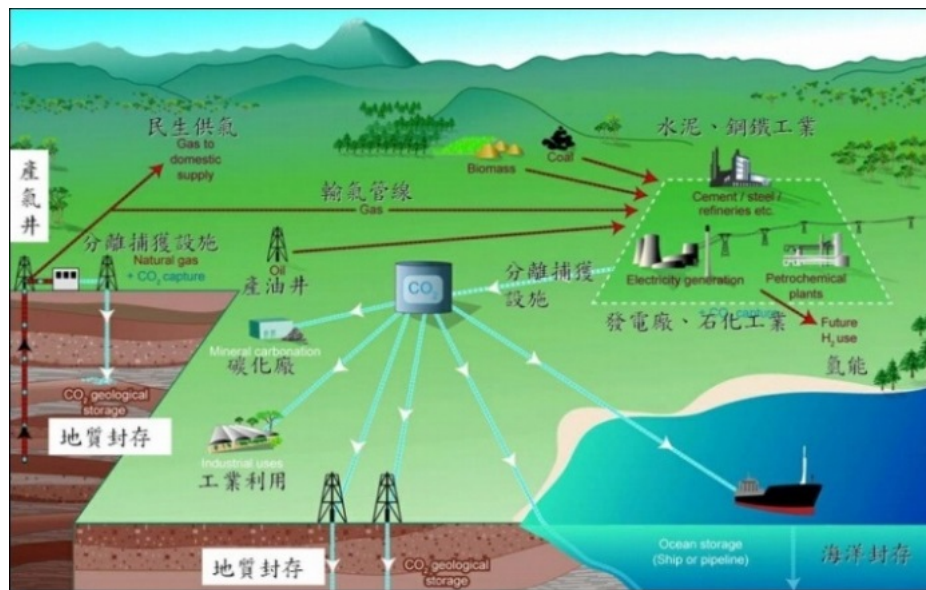


減緩作為包括哪些？

- 「減緩」為任何社會、經濟或科技的發展或作為，以降低溫室氣體排放量，或增加溫室氣體吸附量(碳匯)，例如增加森林面積。
- 主要的溫室氣體為CO₂，此為燃燒石化燃料作為能源的主要產物，因此減緩常常與能源議題掛勾，包括整體能源結構的調整。
- 減緩選項包括：
 - 提升能源效率
 - 能源轉換(例如：再生能源)
 - 增加碳匯與碳儲存
 - 市場與經濟手段：碳稅、碳交易
(產業必須進行溫室氣體盤查以計算其碳排量)等

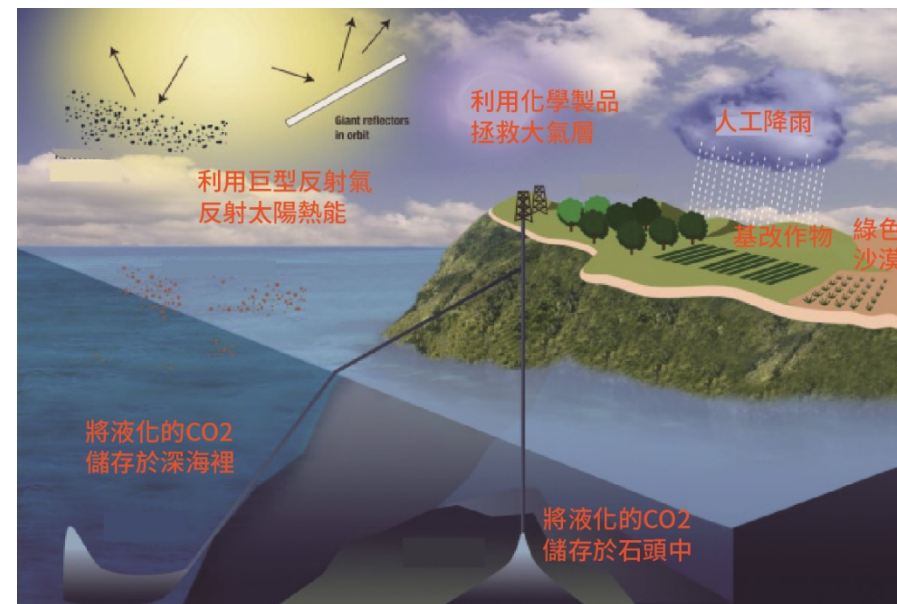


新興減緩作為包括哪些？



二氧化碳捕集及封存的整體概念模型(取自IPCC)

- 二氧化碳捕集及封存技術：將CO₂從大型發電廠、鋼鐵廠、化工廠等排放源分離收集起來，經由運輸方式運送捕集下來之CO₂到封存地點，長期將CO₂與大氣隔絕的一種技術。



- 地球工程技術：利用工程技術進行減緩，例如增加雲量，以增加輻射反射量

調適作為包括哪些？

- 「調適」為針對氣候變遷對自然系統或社會系統造成可能的衝擊，做出的任何調整、適應作為，以避免風險、降低損失、甚至創造利益。
- 針對不同衝擊的調適選項有：
 - 水資源調適：增加水資源儲存、海水淡化廠、增加雨水儲存、再生水使用、改變農作物耕作時間、水價調整。
 - 沿海地區調適：溼地復育、堤防、耐水災建物(漂浮房屋)、移居。
 - 農業調適：耕種時間調整、作物多元性、土地管理、研發耐災作物。
 - 產業與社會部門：堤防、移居、強化基礎建設，提升安全防護標準。
 - 健康部門：安全水源與衛生、緊急應變、監測與控制。
 - 生態：維持生物多樣性、建立生態廊道。

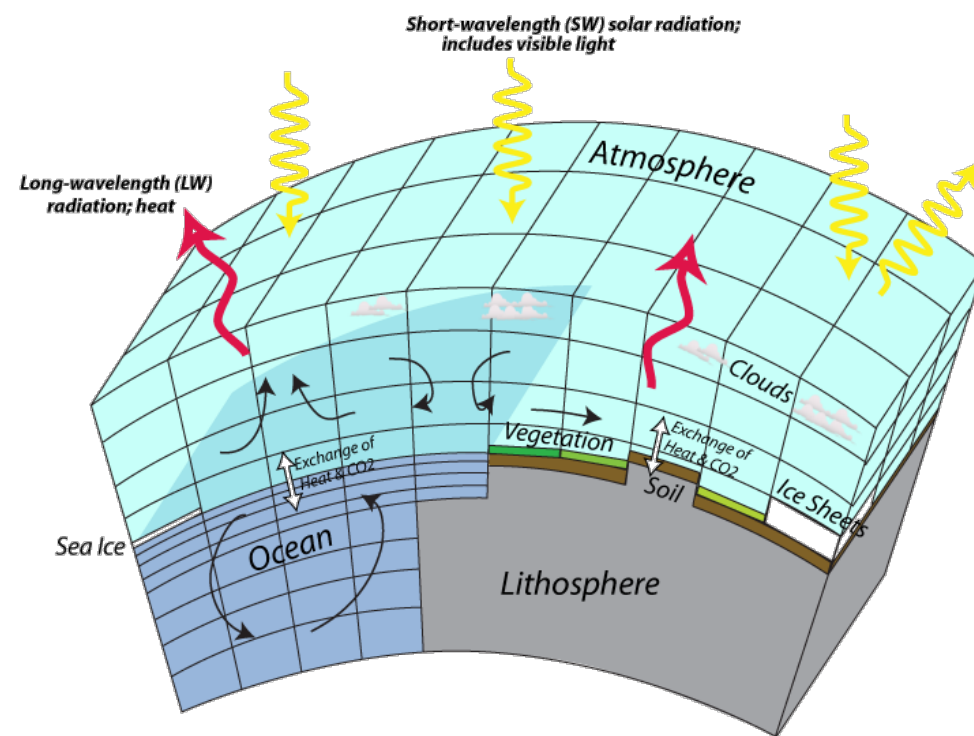




科學知識產製過程與方法

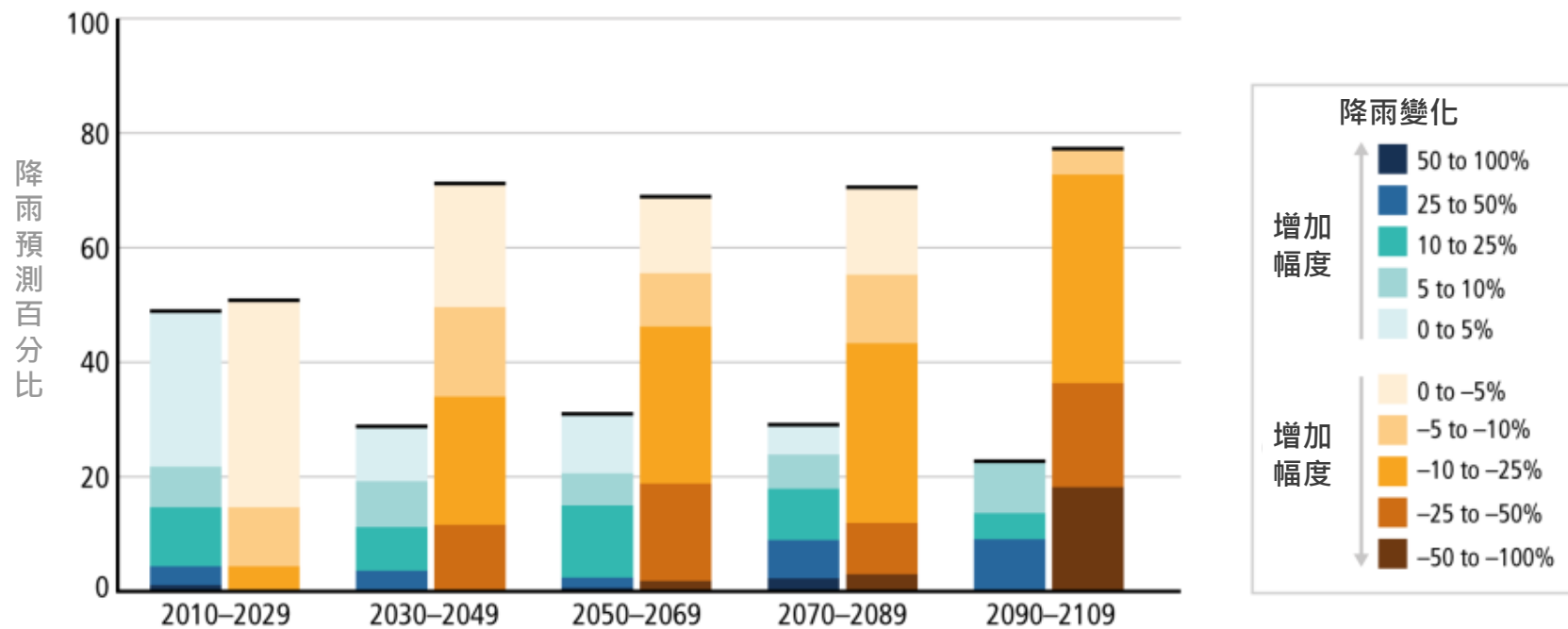
氣候變遷推估模擬方法

- 科學家們參考過去的觀測，推估未來溫室氣體的變化，並以「大氣海洋耦合模式」模擬未來氣候特性。
- 「大氣海洋耦合模式」是模擬大氣、海洋、陸地等區域狀態變化的電腦程式，可以透過各種條件的變化，計算對大氣、海洋等環境及氣候的影響。
- 未來氣候細節變化很大，科學家們會假設幾種最佳及最劣狀況，由世界各地的科學家們用不同的方法模擬每種狀況，每一種狀況代表著一個未來氣候的可能性，科學家會把結果拿來互相比較，找出接近及差很多的地方，綜合出比較確定的結果。

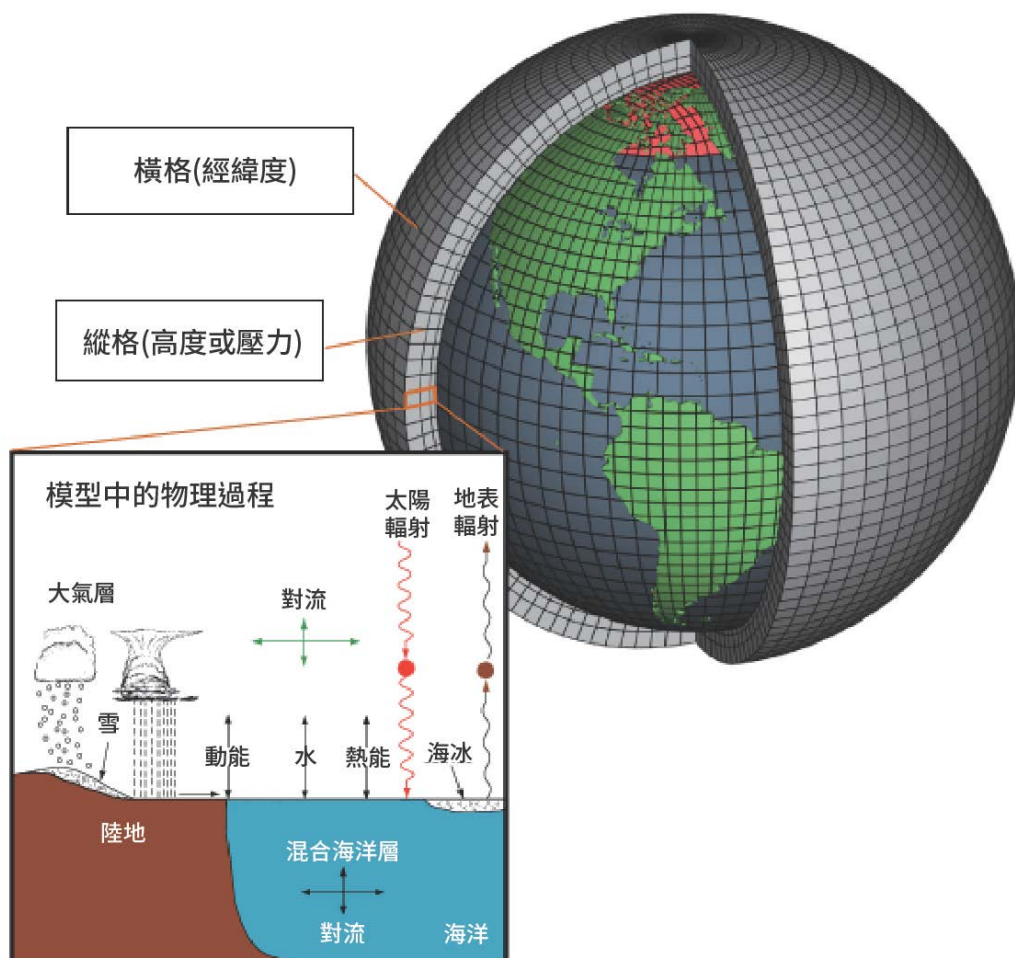


氣候模擬的時間尺度為何？

- 氣候變遷，探討的常是數十年間的氣象特性的改變，而不會分析單一年度的改變。如下圖，是每20年作為一個樣本，探討目前氣候到世紀末，雨量在地球上增加及減少的區域。



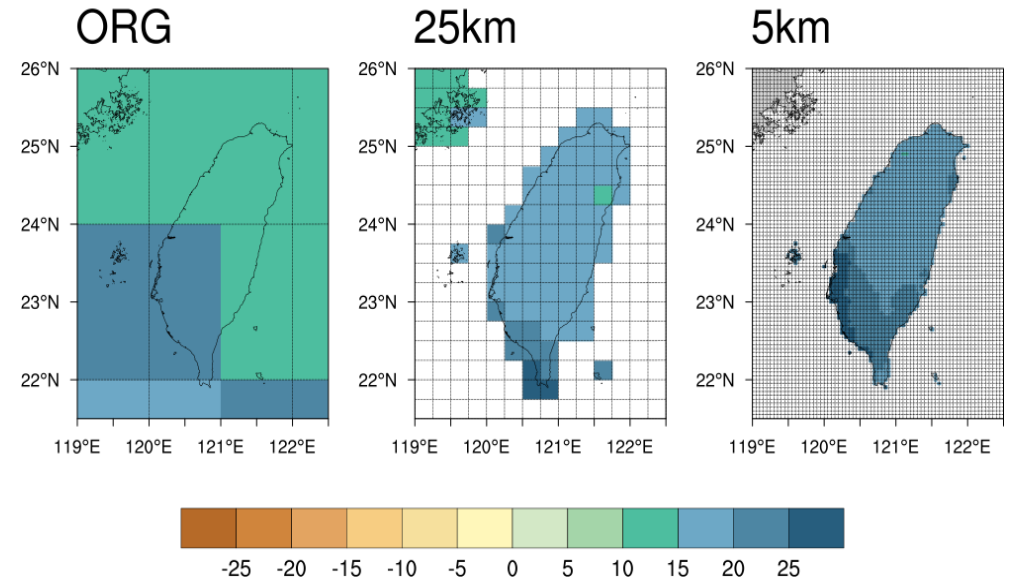
氣候模擬的空間尺度為何？



- 氣候模式常以「網格點」作為計算單位。主要是將地球分成許多網格，一個網格即代表一塊區域的大氣狀態，計算所有網格點下一個時間的大氣狀態，即可得知未來的氣象。而模式解析度，即是格點與格點間的距離，距離越小代表解析度越高，得到的氣候細節也越多。
- 受限於電腦的計算速度，在IPCC的第4次報告中，其所用的模式解析度多在200公里左右；而在第5次報告中，模式解析度已提升到100公里甚至是60公里。

臺灣需要的時間與空間尺度為何？

- 通常全球氣候模式中僅使用年平均數值或月平均數值，但為了衝擊模擬的需求(例如：極端降雨之淹水模擬)，我們需要提高時間解析度至日數值、甚至時數值。
- 此外，臺灣南北最大距離僅394公里，若就全球模式的解析度，全台也僅可切割為2~4個網格點，無法得知更區域性的資訊。因此，我們必須透過「降尺度」的方式，提高空間解析度，例如5公里的網格大小。降尺度指的是用統計或動力的方法，把原有的網格點轉換成更細的資料：
 - 統計方法是用目前氣候模擬算出模式與觀測資料間合適的轉換比例，套用到未知的未來氣候。
 - 動力方法則是把解析度較高的區域天氣預報模式當作放大鏡，用氣候模擬資料驅動天氣模式，以得到更詳細的天氣特性。



臺灣氣候變遷乾旱 風險評估與調適

01

認識氣候變遷

02

臺灣水環境大觀

03

臺灣氣候變遷
乾旱風險評估

04

臺灣氣候變遷
乾旱調適策略

02

臺灣

水環境大觀

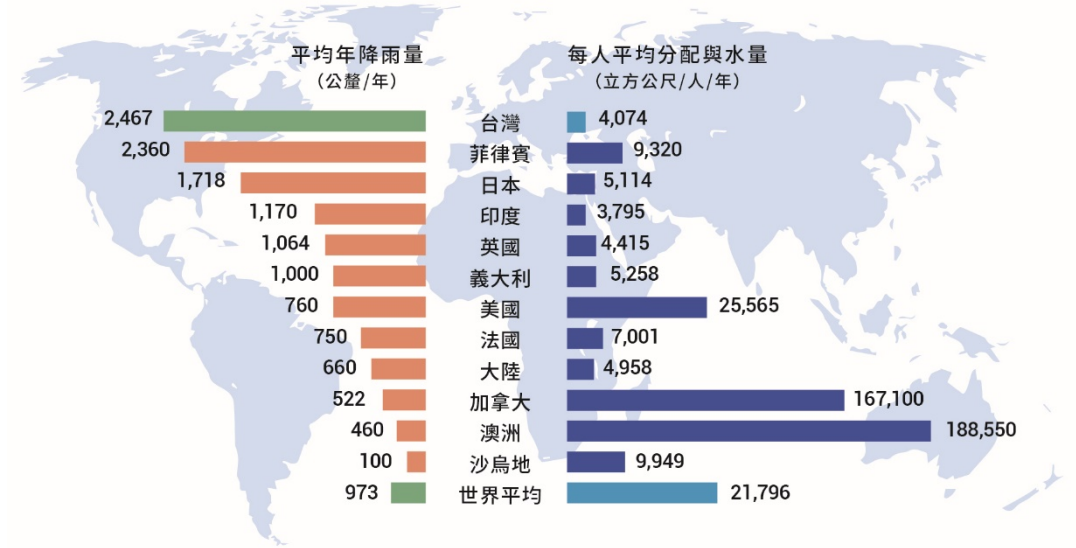
- 01 臺灣降雨條件與限制
- 02 臺灣水資源的供給與需求
- 03 臺灣水資源面臨之難題
- 04 臺灣未來之水資源課題



臺灣降雨條件與限制

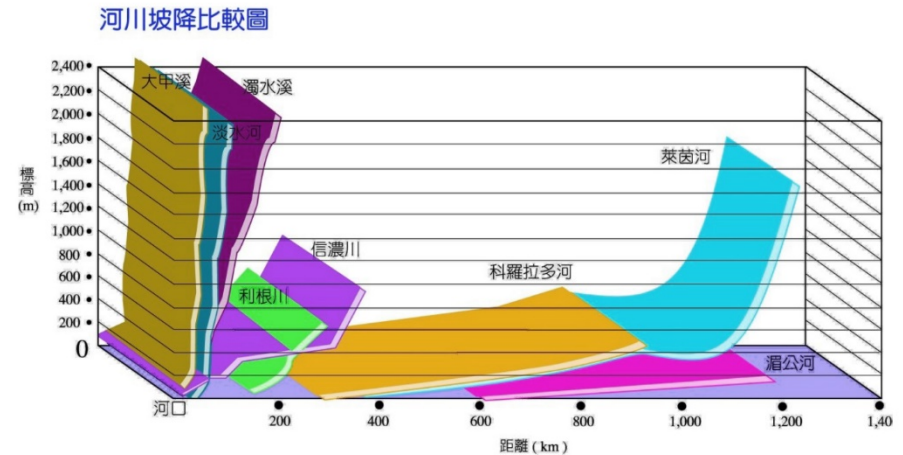
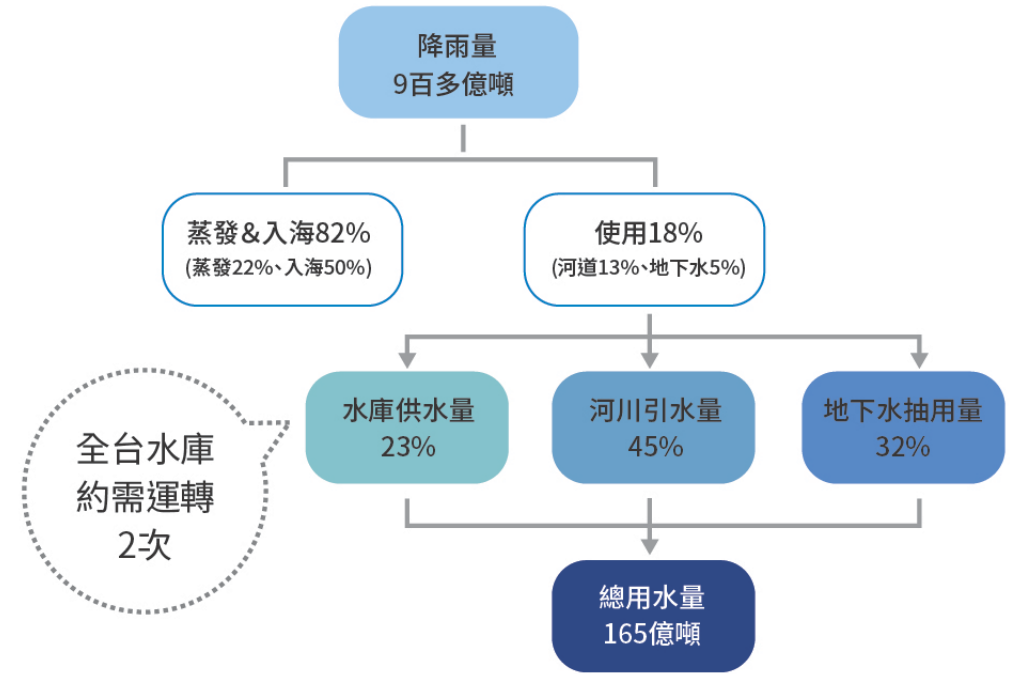
臺灣的降雨特性


- 降雨豐沛，然人均降雨量少
 - ✓ 臺灣每年平均降雨量約2,500公釐，為全球平均值的2.6倍
 - ✓ 臺灣地狹人稠，故每人每年可分配之降雨量約4,500立方公尺，是全球平均值的1/5
 - ✓ 臺灣是世界排名第18位的缺水國家
- 降雨時空分佈不均
 - ✓ 臺灣降雨集中於5~10月(梅雨、颱風季)，佔全年降雨量78%，顯示豐、枯水期雨量差異懸殊
 - ✓ 若分區觀之，北部的豐枯雨量比例約6:4；而南部之豐枯雨量比例則為9:1，顯示臺灣南北降雨極不對稱之現象



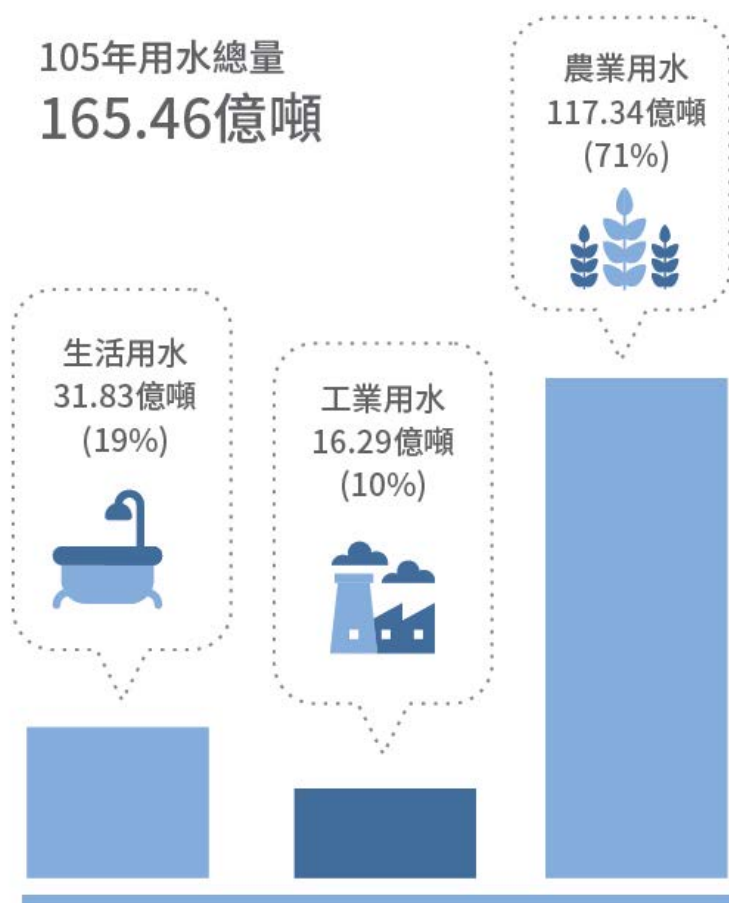
臺灣降雨儲存不易

- 地形陡峭、河川短促
 - ✓ 臺灣地形狹長，河川坡陡流急，降雨後逕流東西向迅速入海，甚難蓄存
- 水庫興建不易，現有庫容亦有限
 - ✓ 河谷狹窄，興建水庫不易，加上近年環境保育意識抬頭，水庫興造更是困難
 - ✓ 目前，全臺水庫庫容約計20.5億噸，而每年由水庫供水約41億噸，平均需運轉2次，才能滿足水庫供水需求
 - ✓ 水庫淤砂量高，導致有效蓄容量低





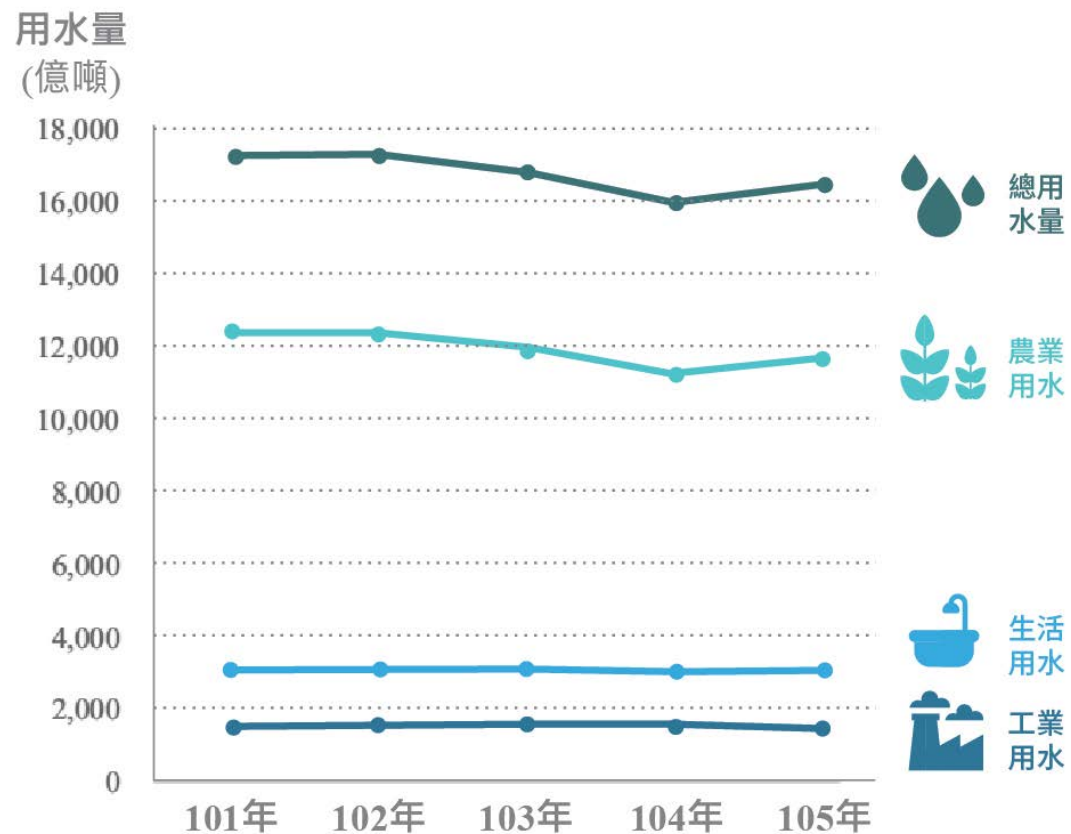
臺灣水資源的需求與供給



臺灣用水三大標的

- 臺灣用水的三大標地，包括生活用水、工業用水以及農業用水。
- 三者又以農業用水為最大宗，約佔7成，生活用水為其次，約佔2成，工業用水最低，僅佔1成左右。

三大標的用水量之趨勢



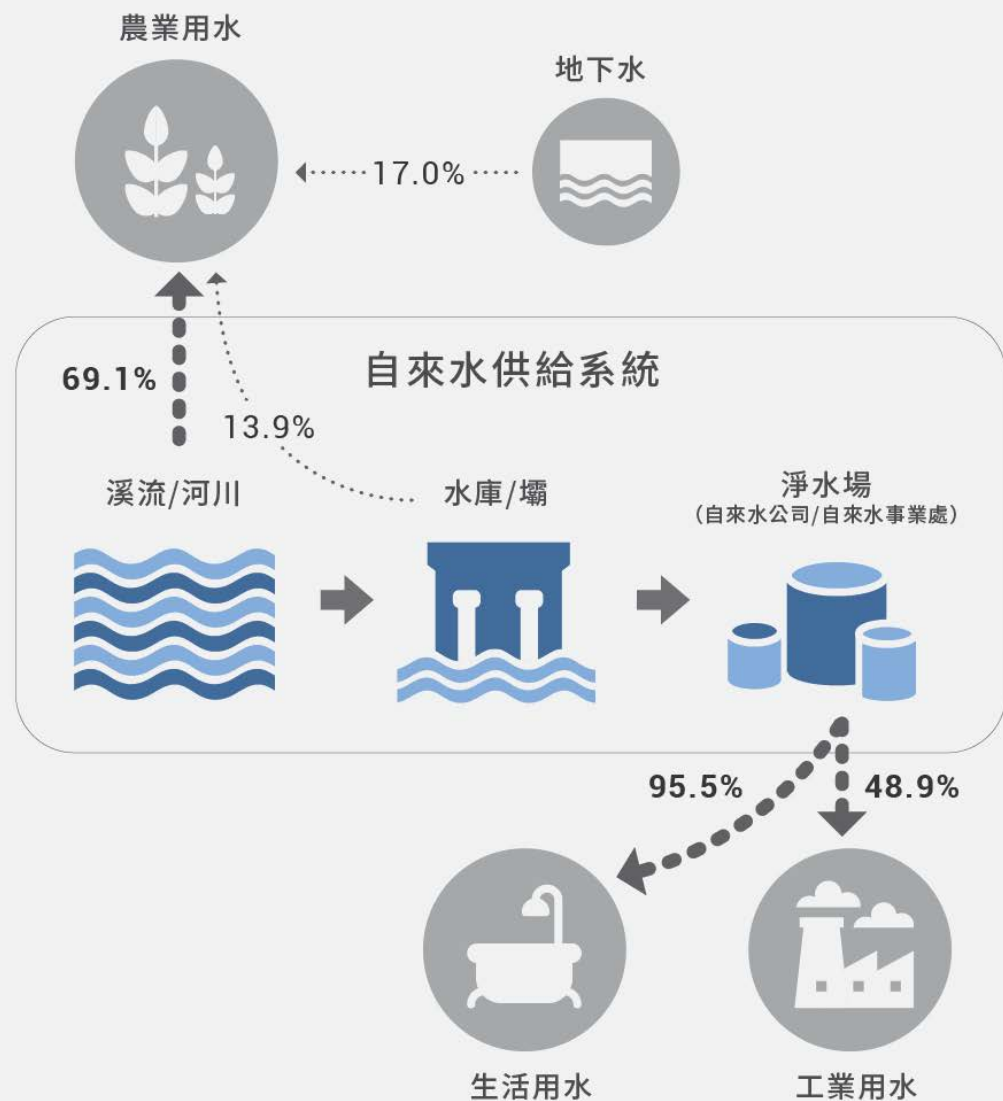
- 檢視過去5年(101年~105年)，生活用水與工業用水呈持平狀態；農業用水量易受水情豐枯影響而有較大之變化
- 臺灣之總用水量與農業用水量有密切相關，兩者呈現一致之趨勢

三大用水標的的水質要求

- **生活用水**：因涉及食用，因此「水質」是生活用水的最大考量。也因為現代家戶，多少備有儲水設施(如水塔)，故對缺水的容忍度稍微高些。
- **工業用水**：因產品製程之需求，故部分工業廠商對水質的要求甚高；此外，工業用水更在乎供水的穩定度，一旦完全停水，其損失金額將會不計其數。
- **農業用水**：對水質、供水穩定度的要求偏低，農業用水真正在意的，則是「供水的時機點」(如2~3月春耕)。



2 臺灣水資源的需求與供給

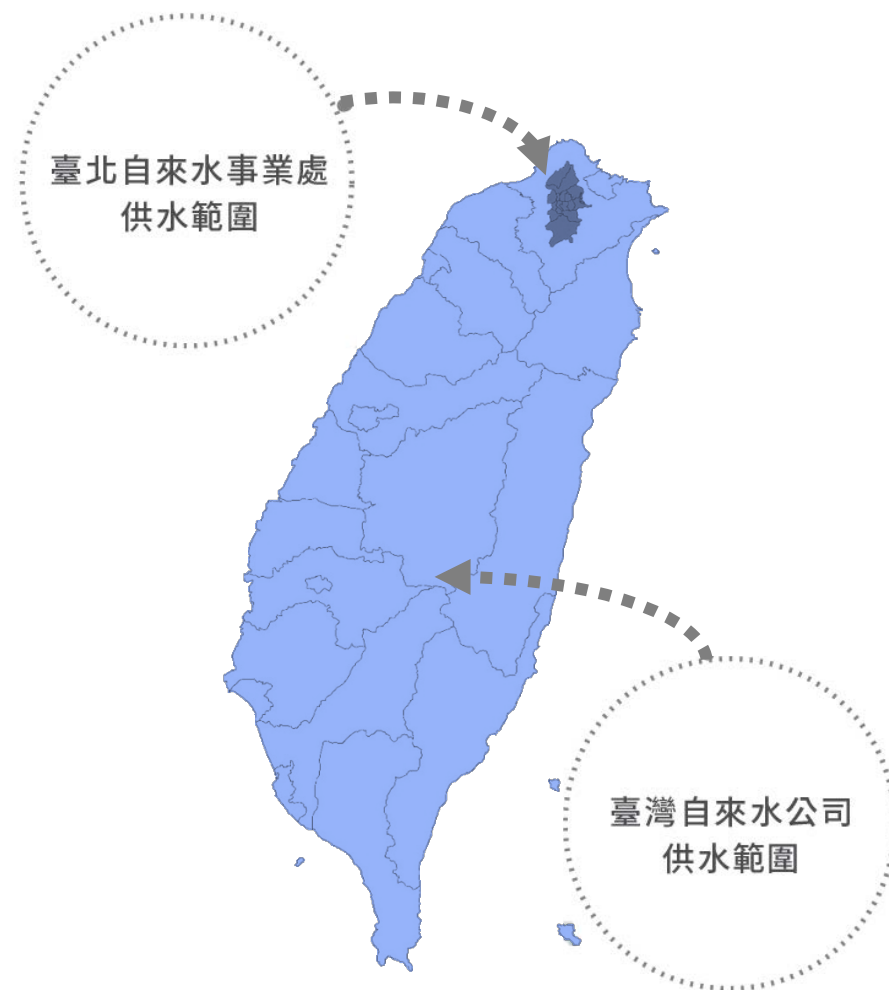


三大用水標的之供給來源

- 生活用水之供給來源，絕多數是來自於自來水(95.5%)；少數採自行取用地面水或地下水。
- 工業用水採用自來水(48.9%)與自行取水(地下水或回收水)(51.1%)的比例相當
- 農業用水有近7成是取自河川水及地面水，取自水庫及地下水者各僅占13.9%及17%

三大用水標的之供給單位

- 臺灣多半地區之生活用水以及工業用水，其供給單位為「臺灣自來水公司(簡稱臺水公司)」。
- 而臺北市全區、新北市之三重、新店、永和、中和及汐止區(北山里、橫科里、宜興里、福山里、東勢里、忠山里及環河里等7個里)，其供水單位則為「臺北自來水事業處(簡稱北水處)」。
- 農業用水的供水單位為 **農田水利會**



生活用水及工業用水供給單位範圍圖

水資源供給 < 需求 → 缺水(乾旱)

- 水資源的供給量 < 水資源的需求量
→ 導致缺水(乾旱)的情形發生

例如，2015年之乾旱

受2014年颱風季降雨不佳，導致各區水庫入庫流量偏低，加上2015年春雨降雨持續偏少，因而促成臺灣67年來最嚴重旱災。



資料來源：石振賢(2015年02月26日)·日月潭水位指標九蛙全都露·民報。2018年07月31日·取自：<https://ppt.cc/fJDC5x>



資料來源：中視新聞(2015年03月25日)·桃園缺水缺怕了 開放埤塘水過濾利用·中視新聞。2018年07月31日·取自：<https://ppt.cc/ftIuvx>



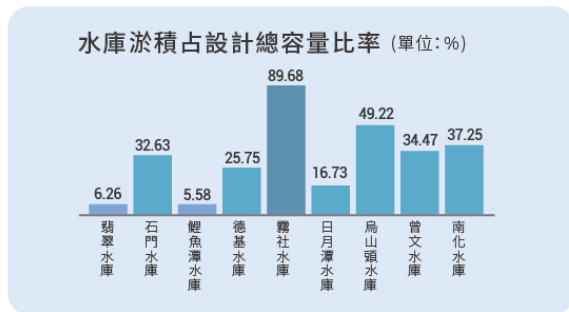
資料來源：曾增勳(2015年04月18日)·桃園市限水 龜山山泉水大排長龍·聯合影音網。2018年07月31日·取自：<https://ppt.cc/f7Kymx>



臺灣水資源面臨之難題

人為開發利用影響水資源

- 人口、經濟(特別是高耗水產業)導入，水資源需求大增至超過該地區可提供之供水
- 入滲量減少，致使地下水之補注、貯蓄量降低，同時，亦增加地層下陷之問題。其中，又以地下水超抽地區更為嚴重
- 逕流量大增，加劇表土之流失，亦增加洪災之風險
- 水庫等蓄水設備之淤砂量大增，導致有效續容量大幅下降



資料來源:水利署(2015)

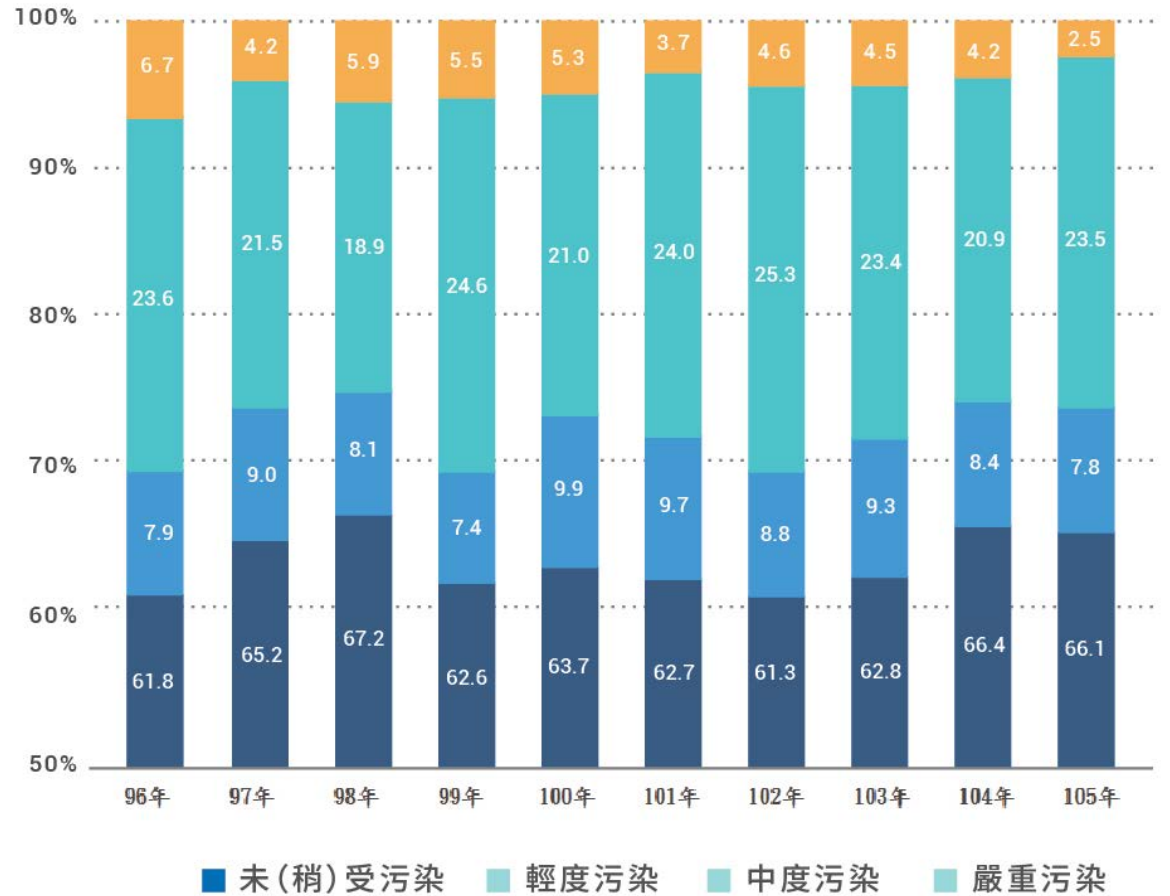
- ◎ 土地過度開發，加速地表泥沙沖刷 → 水庫淤沙更嚴重



- ◎ 因為開發導致水的入滲量減少 → 地下水補注量降低
- ◎ 高耗水產業的進駐 → 加重地區供水負擔

水質惡化導致可利用水量 日益降低

- 由於都市擴張及工商迅速發展，造成河川水體承受許多環境污染物，因而大大影響水體用途。
- 依據環保署資料，全臺50條主要河川中，有1/3的河段被認定屬於中度及重度汙染，不可飲用、亦不能拿作灌溉使用。

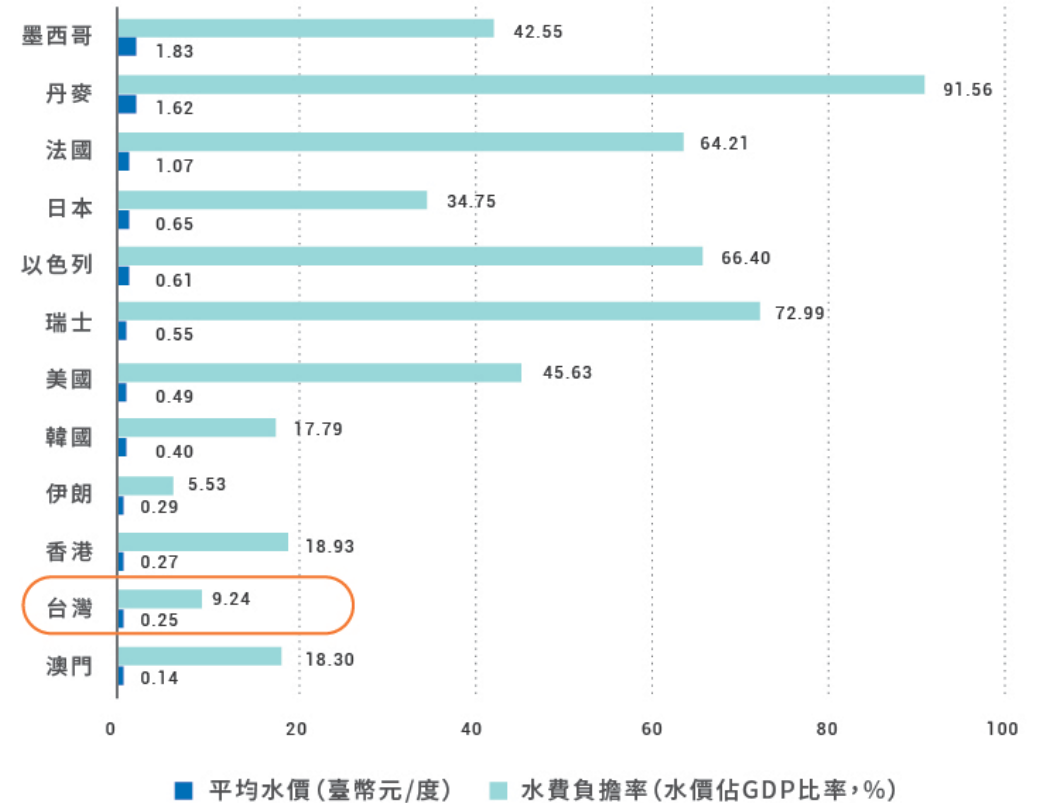


全國50條重要河川污染長度百分比分布圖

3 臺灣水資源面臨之難題

自來水水價偏低導致 節約用水不足

- 依據經濟部水利署統計，105年我國之每人每日生活用水量276公升，相較於國際標準值(250公升)還要高許多
- 臺灣的平均水價為9.24元/立方公尺(度)，鄰近之國家則為臺灣2~3倍左右，其他歐美等先進國家，其水價甚至是臺灣的7~10倍之多
- 若以人均GDP來看，臺灣之水費負擔率為0.25%，更是遠遠低於許多國家

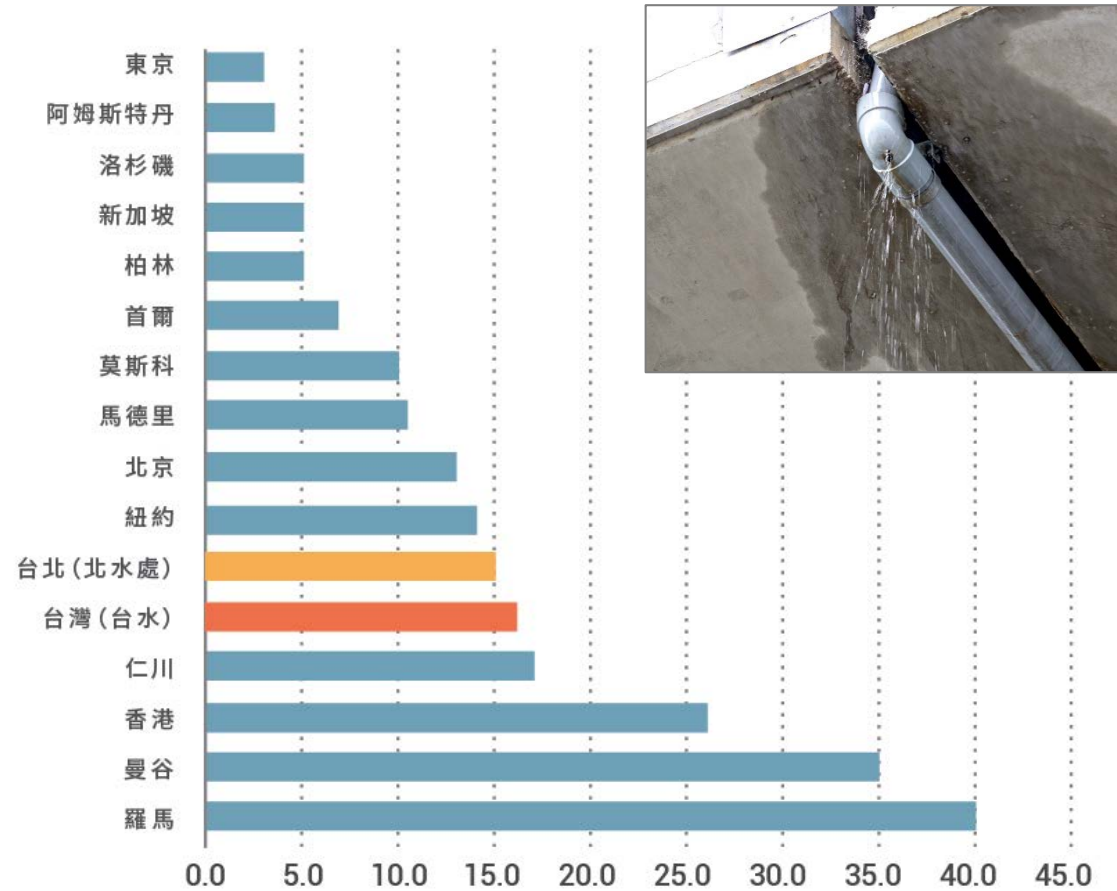


2016年水費負擔率暨平均水價比較圖

註：其中，伊朗、以色列、丹麥、墨西哥為2014年之資料

水資源輸配管線破漏 浪費水資源

- 臺灣之自來水普及率高(95%以上)，漏水率平均有15.6%，以2015年自來水供應量計算，漏水量多達4.97億噸(相當於2個石門水庫水量)。
- 另外，農田灌溉系統由於欠缺精緻化改善及效率化的精密輪灌，導致部分水源未流入農田而流入河川下游。總體而言，農業用水每年亦有高達20%以上的漏損率。



世界各大都市(含國家)漏水率(%)示意圖

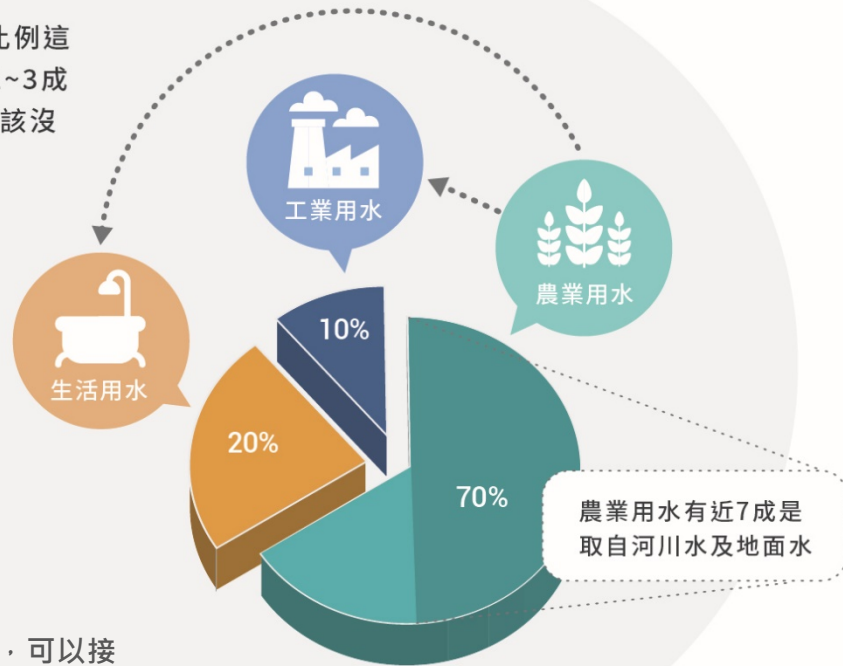
註：其中，臺北(北水處)、臺灣(省水)為2016年之資料

大家總說

農業用水佔總用水比例這麼高，乾旱時，分個2~3成給其他標的使用，應該沒問題吧！


But

工業與民生，可以接受河川水 / 地面水的「水質」嗎？



為因應旱象 所產生農業用水調度爭議

- 政府長期側重工業發展(經濟)，促成農業用水額度受到更多的擠壓
- 政府須支付相當高額的停灌休耕補貼費用，國庫負擔甚重。例如，2015年的休耕補助耗資近30億元
- 農業之灌溉用水是挹注地下水之重要來源，在國土開發已導致地下水補注量日益減少的情況下，若又經常性地、大規模施行停灌休耕，將更嚴重衝擊地下水補注



臺灣未來之水資源課題

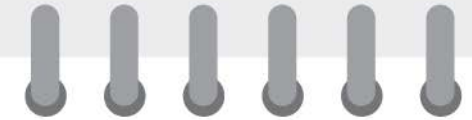
引發缺水之情境

情境1

- 一地區的雨量，相較於長期平均雨量，持續性地偏少，將導致供不應求
→ 常發生在春雨不足

情境2

- 豪雨沖刷表土，導致原水濁度過高，自來水淨水場不及處理或無法作用
→ 常發生在颱風、豪大雨過後

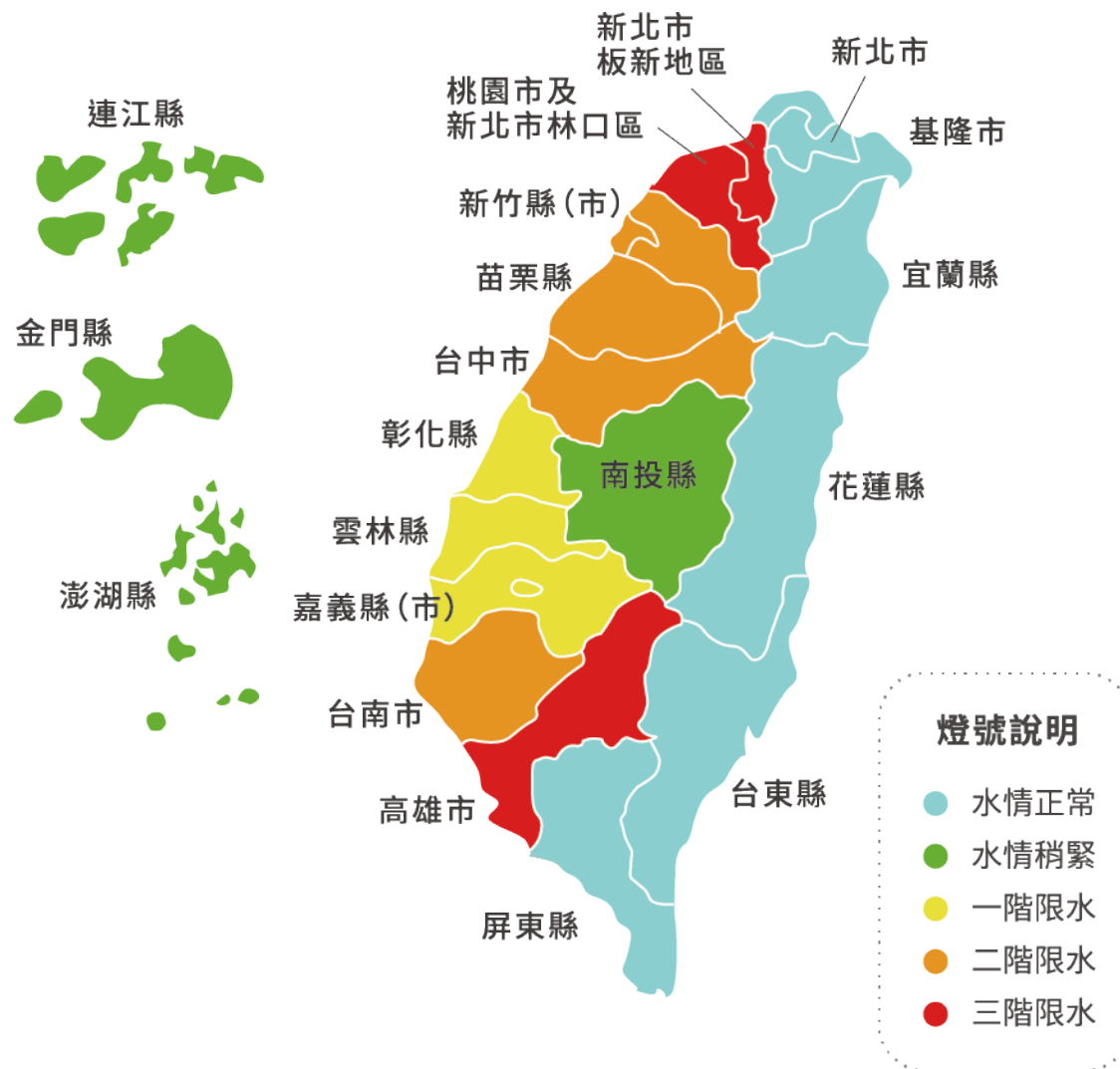


春雨常是缺水的關鍵

臺灣2月至4月的降雨稱為春雨，是上一年颱風季過後、到當年梅雨季來之前的重要水庫水量來源。同時，也是臺灣農業一期作的灌溉時節。因此，此時期的降雨量多寡攸關缺水與否。

如何掌握缺水資訊

為了使大眾了解各地區水情豐枯狀況，水利署平時會依據未來氣象發展、降雨量、河川流量、水庫進水量、水庫蓄水率，發布供需預警指標，以藍、綠、黃、橙、紅燈表示。

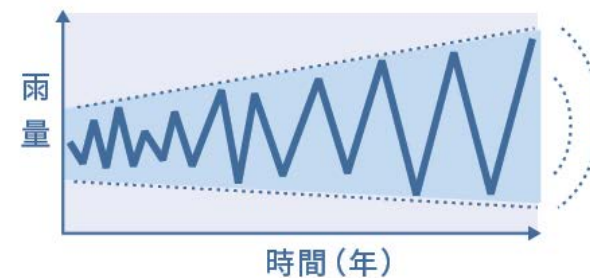


氣候變遷將威脅水資源供給

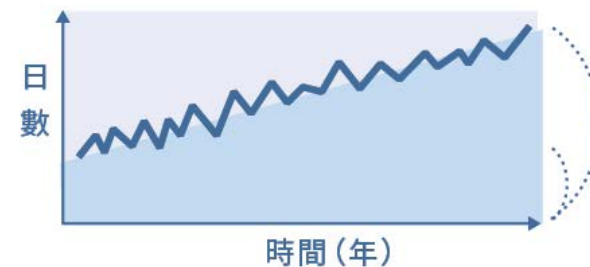
氣候變遷改變臺灣的降雨和溫度，進而影響水資源供給：

- 豐水期、枯水期降雨更極端，使得枯水期時河川流量減少
- 不降雨的天數增加使乾旱時間延長
- 豪雨或暴雨可能增加河川輸砂量和蓄水設施淤積量
- 溫度升高讓蒸發散量增加

豐水期
枯水期
更明顯



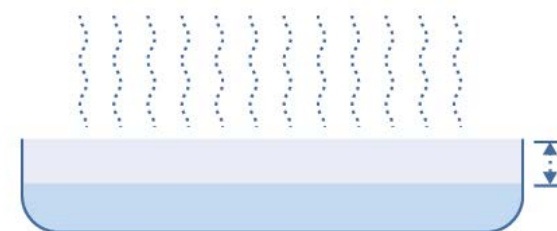
乾旱延長



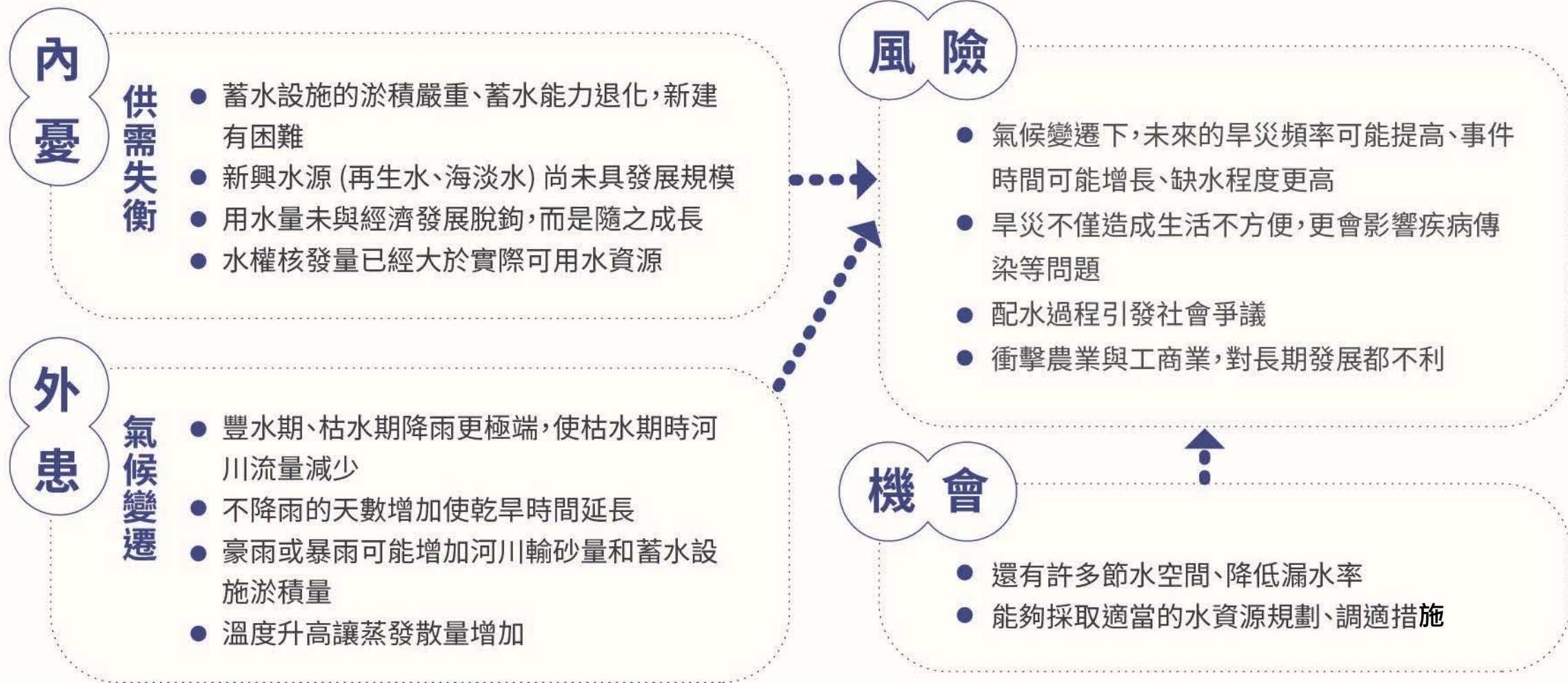
輸砂量
增加



蒸發增加



臺灣未來面臨之水資源風險



臺灣氣候變遷乾旱 風險評估與調適

01

認識氣候變遷

02

臺灣水環境大觀

03

臺灣氣候變遷
乾旱風險評估

04

臺灣氣候變遷
乾旱調適策略



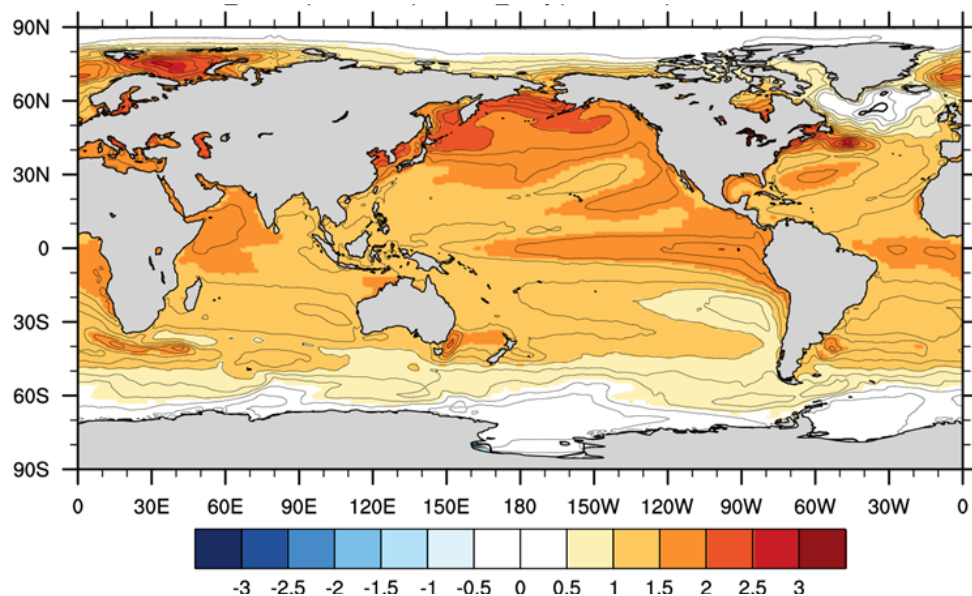
03

臺灣氣候變遷乾旱
風險評估

氣候推估模擬—模式與情境

- 使用27 個高時空解析度全球大氣模(CMIP5)，
模擬未來氣候變化
- HIRAM高解析度全球模式(25*25KM)
- 臺灣區域WRF動力降尺度(5*5KM)

海溫暖化程度 2040-2060



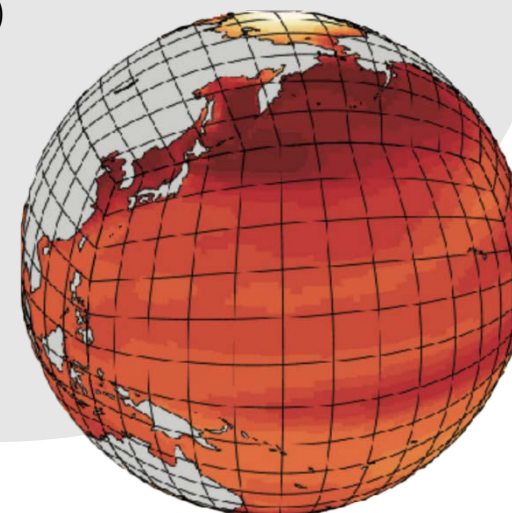
模擬情境設定

暖化情境：最劣情境(RCP8.5)

時間：世紀中(2040-2060)

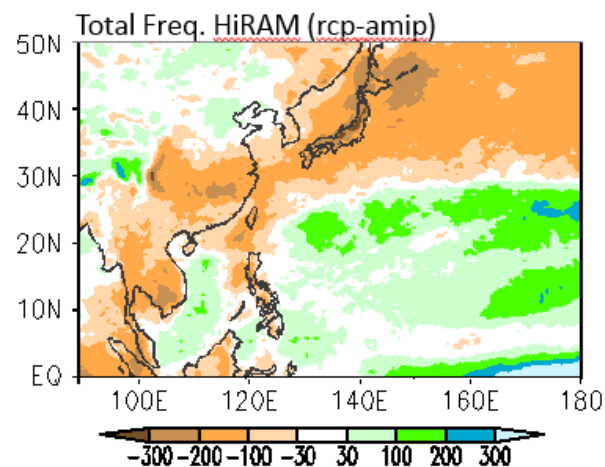
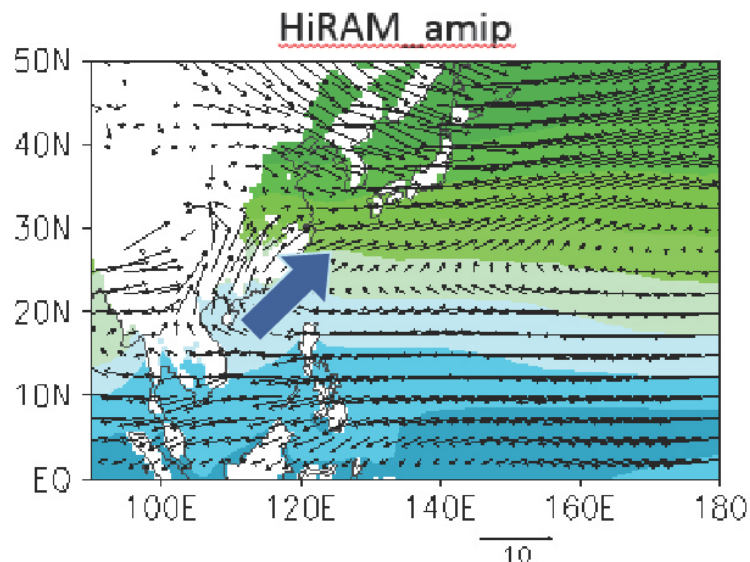
春季(2-4月)降雨觀察重點區域：

- 東亞地區鋒面系統（華南雲雨帶→
春雨主要機制)
- 臺灣附近系統



氣候推估模擬—世紀中東亞春雨變遷

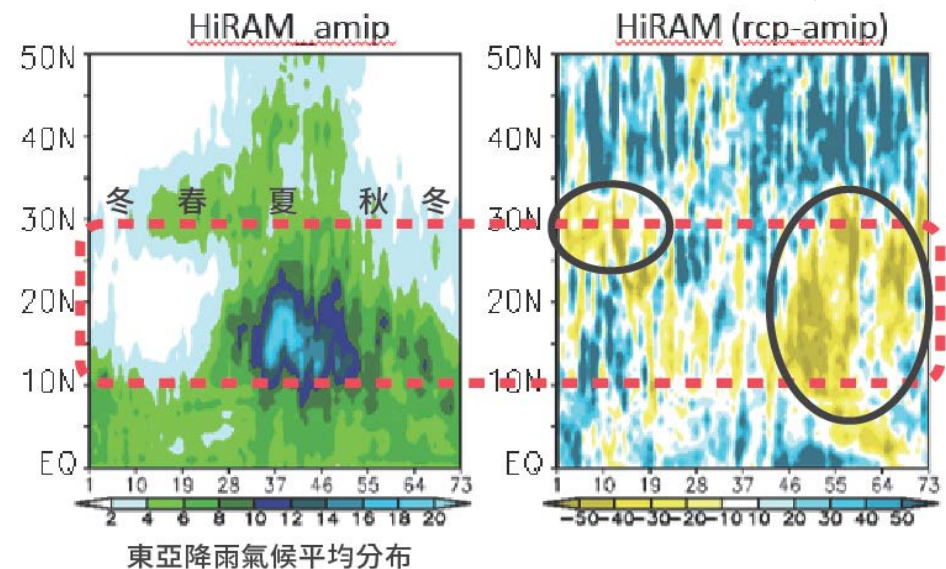
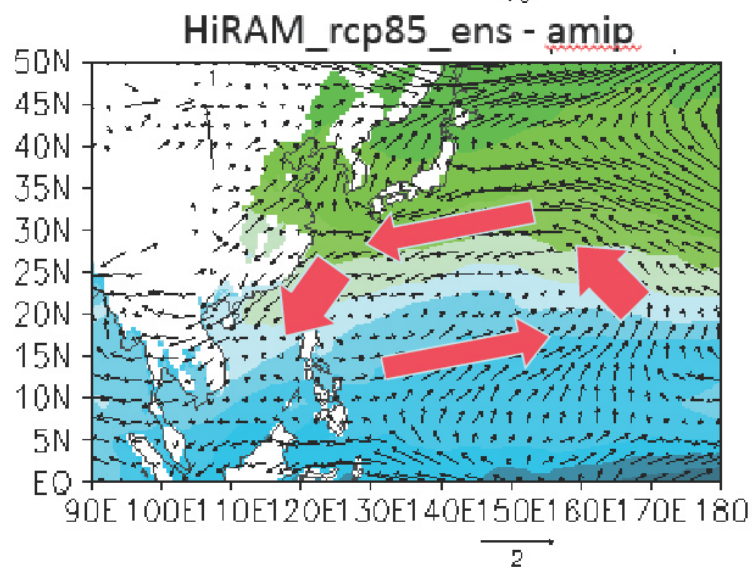
春季氣候平均
水氣與低層環
流場
→ 西南風



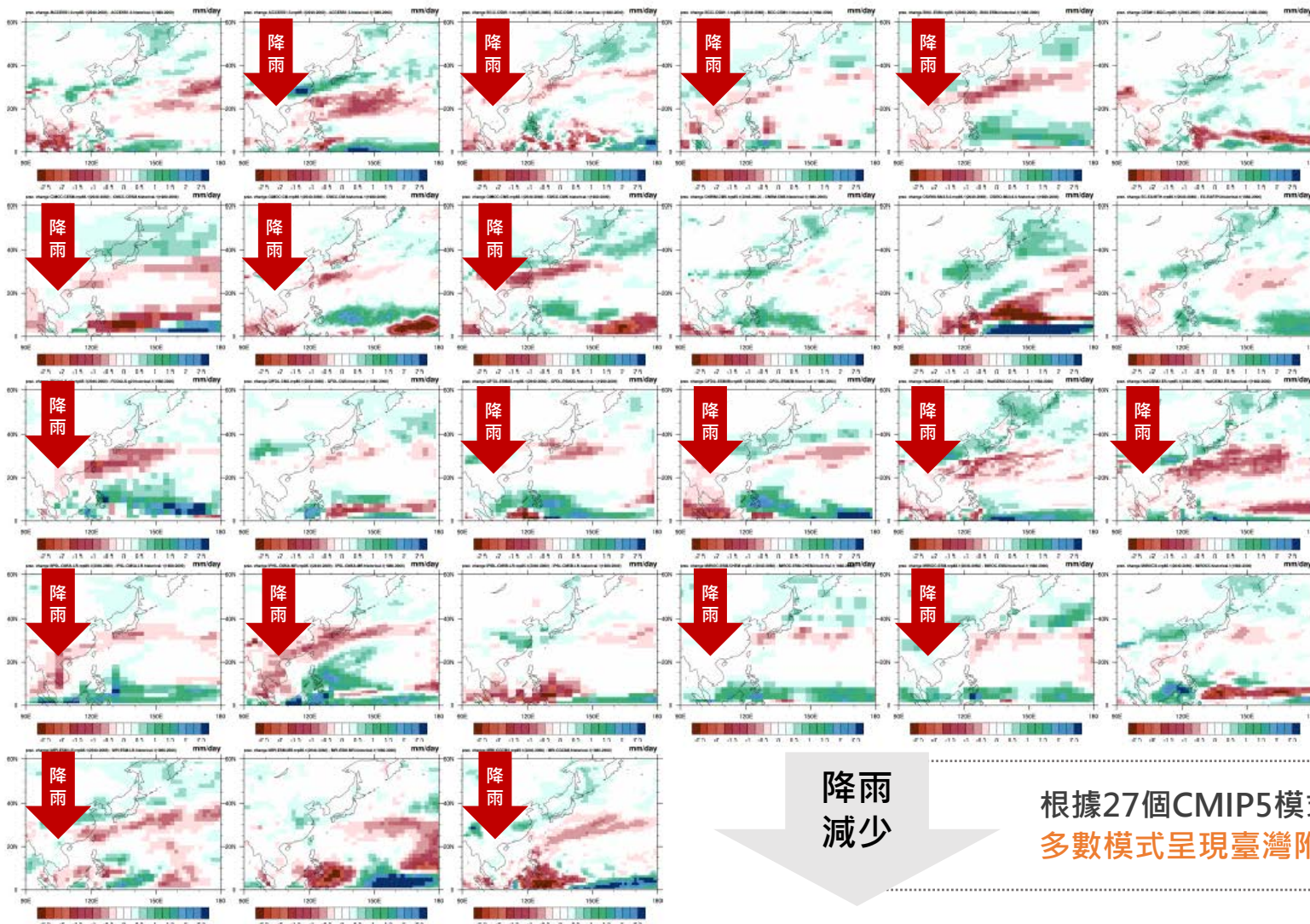
降雨頻率減少

東亞春夏季
雨量減少

暖化情境下
1. 水氣增加
2. 西南風減弱
(反氣旋式環流)



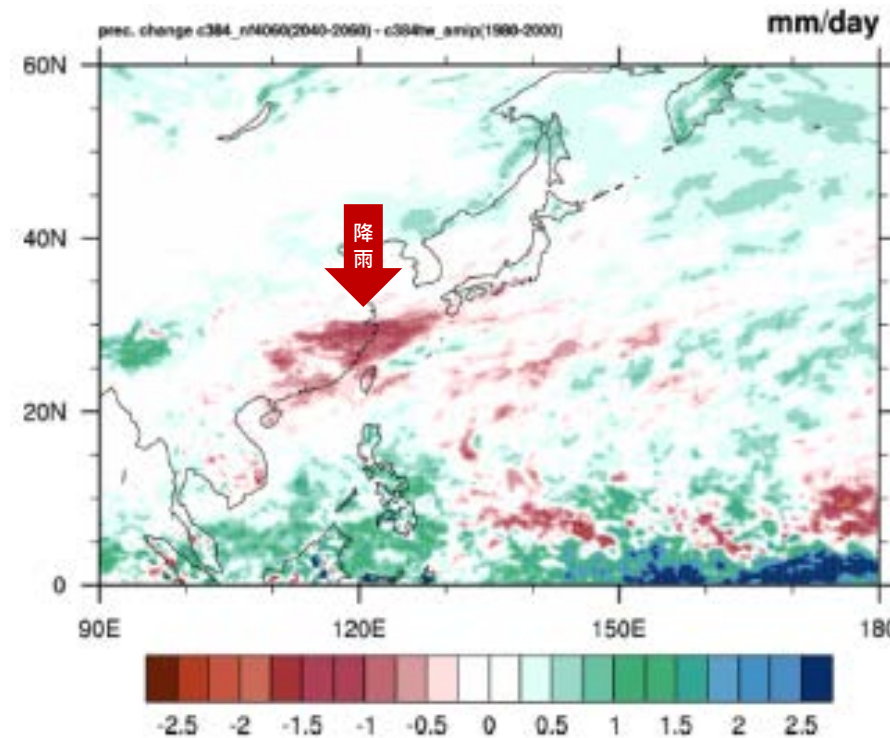
氣候推估模擬 – 世紀中東亞春季降雨變化



降雨減少

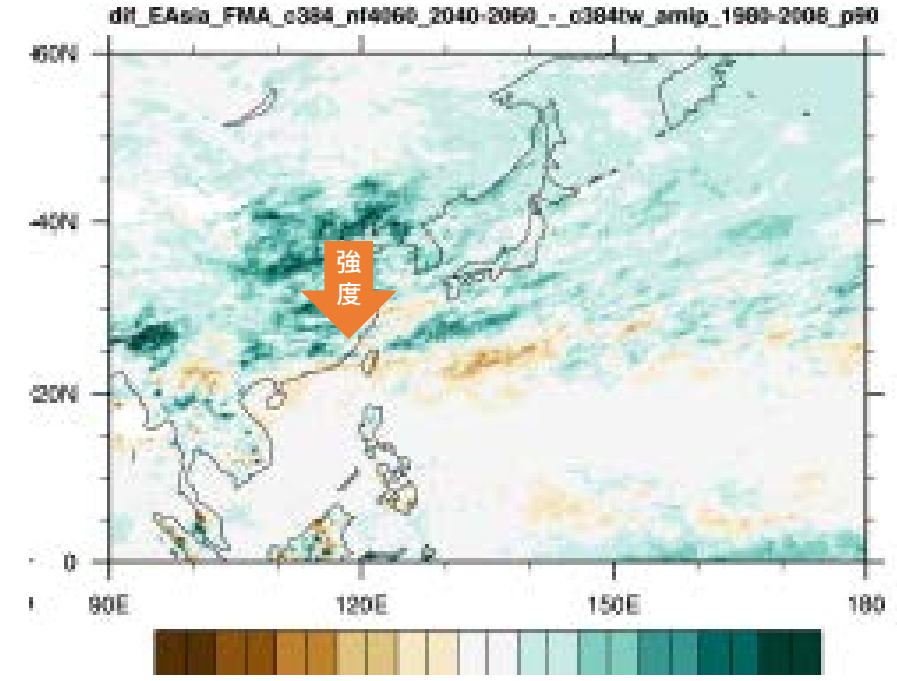
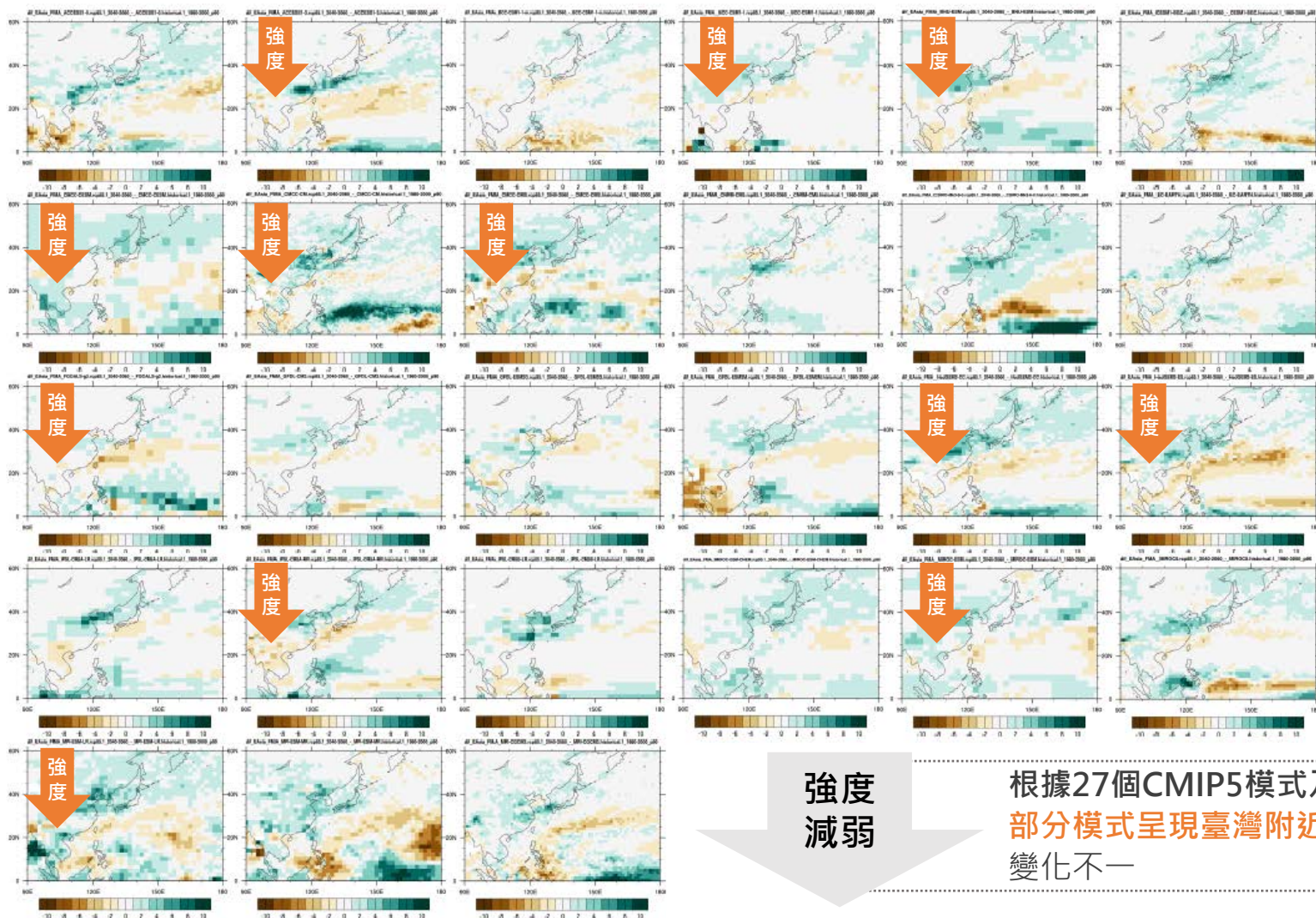
根據27個CMIP5模式及HiRAM模式模擬
多數模式呈現臺灣附近帶狀少雨，只是位置與強度不盡相同

HiRAM高解析模擬 臺灣附近帶狀少雨



氣候推估模擬 – 世紀中東亞春季極端降雨強度變化

HiRAM高解析模擬 臺灣附近強度減弱



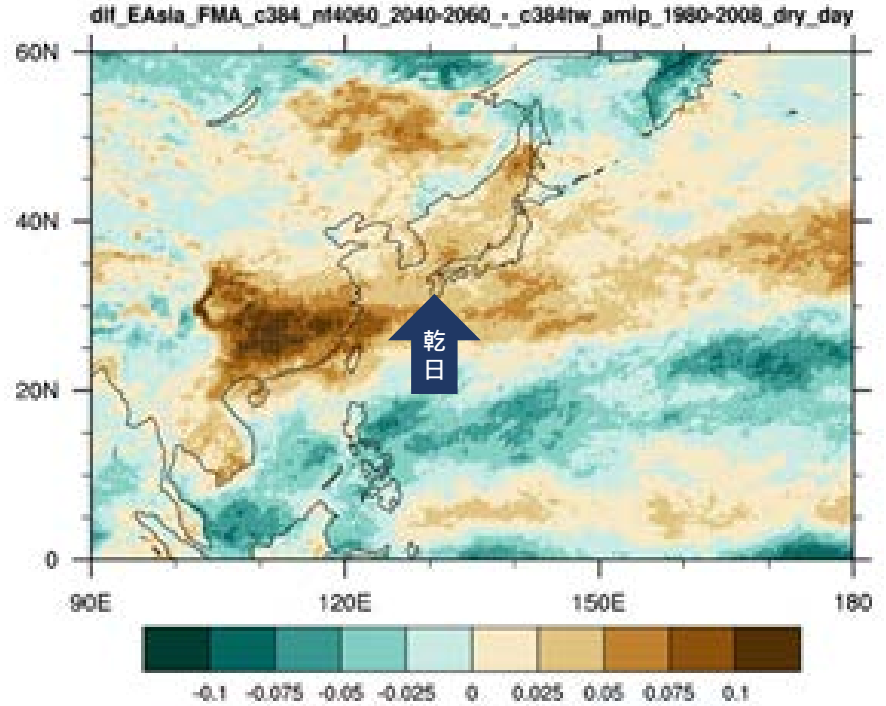
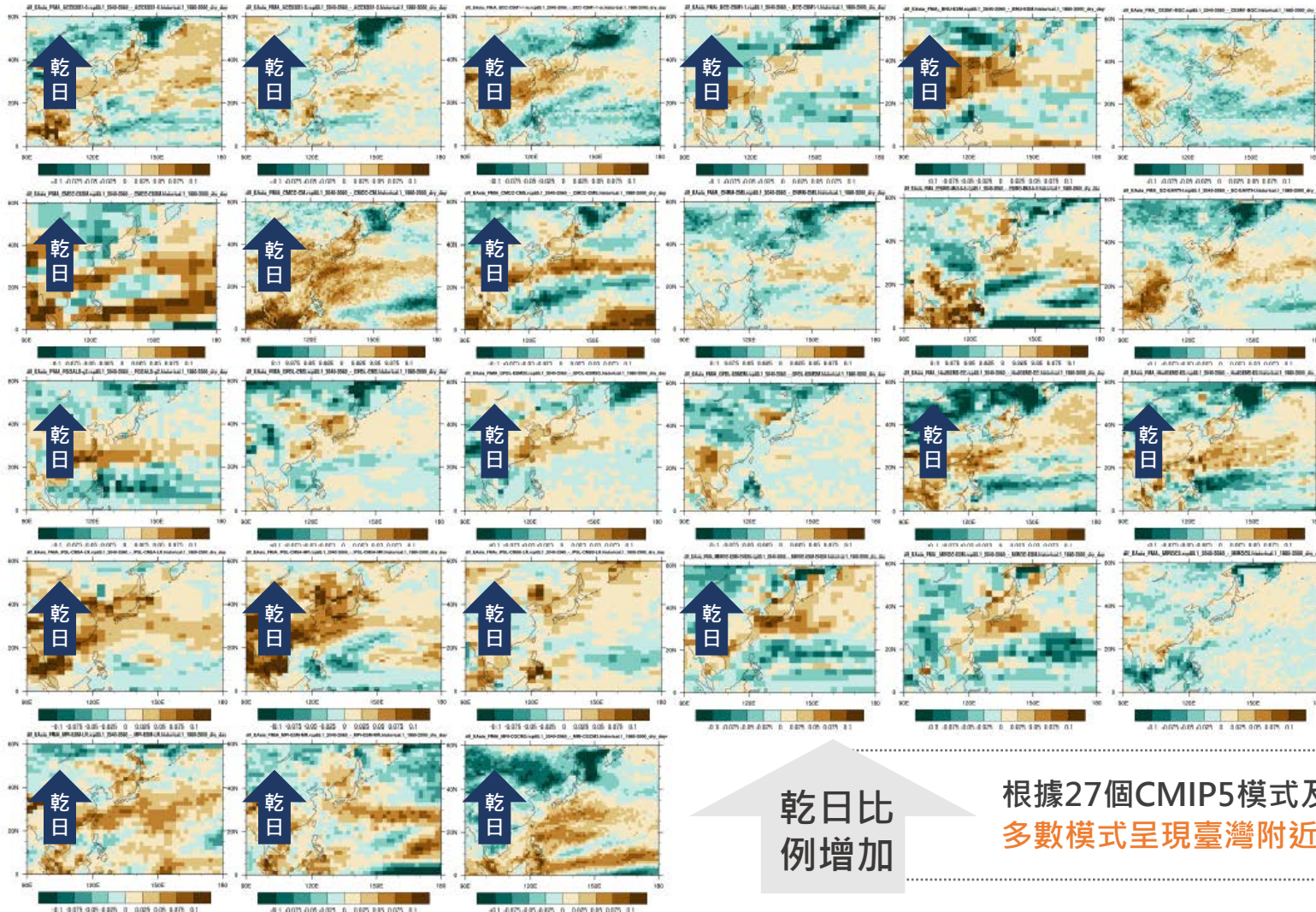
※極端降雨強度為90 Percentile 的降雨量

強度
減弱

根據27個CMIP5模式及HiRAM模式模擬
部分模式呈現臺灣附近(北緯25度)降雨強度有些微減弱的趨勢，強度
變化不一

氣候推估模擬 – 世紀中東亞春季乾日比例變化

HiRAM高解析模擬 臺灣附近乾日比例增加



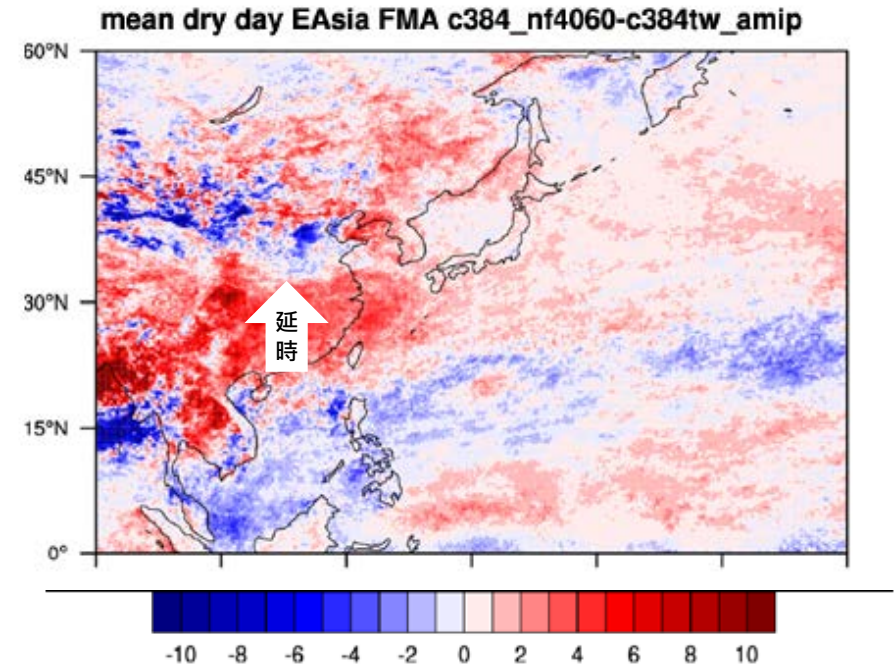
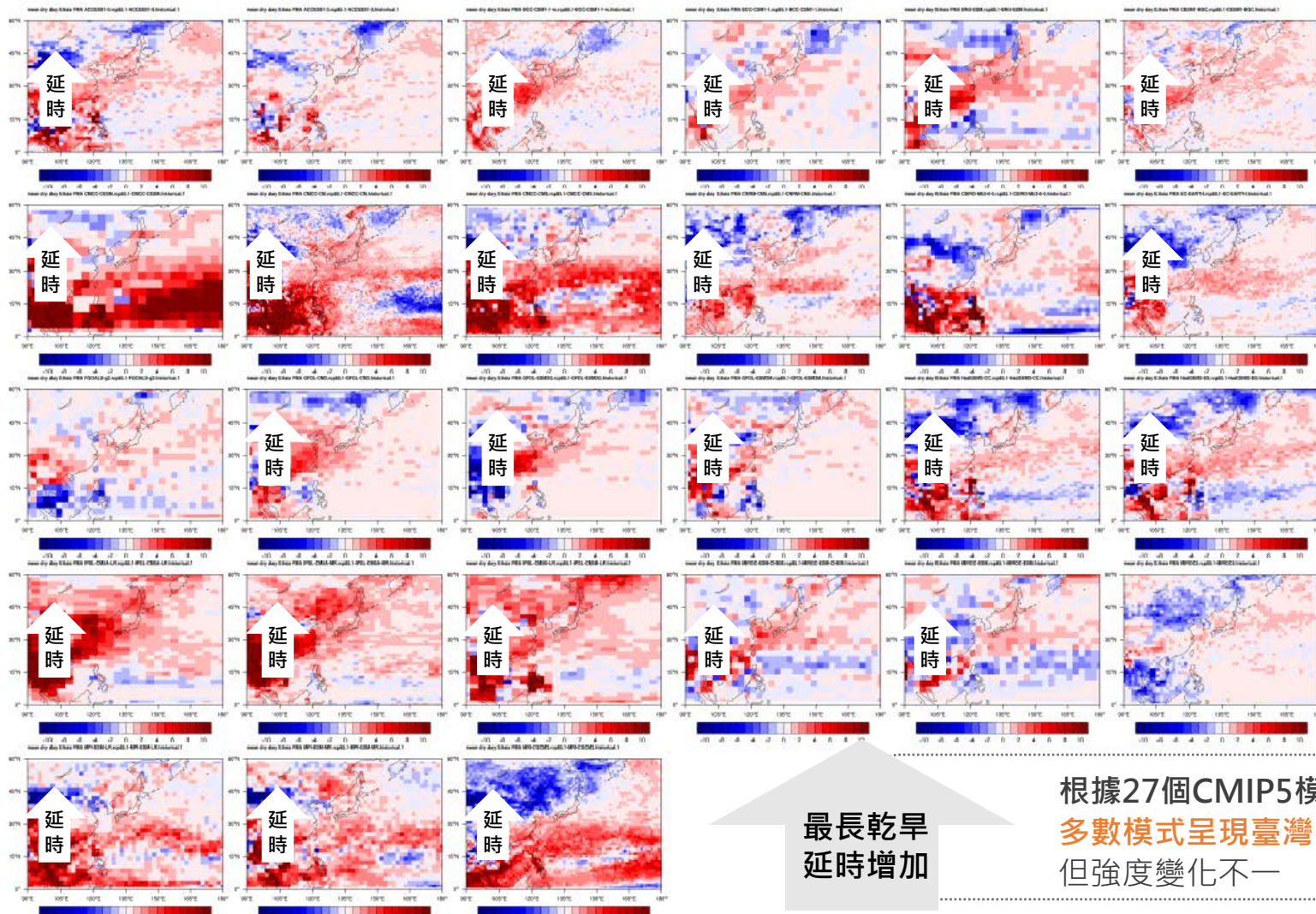
※雨量小於0.1 mm當日就定為乾日，乾日比例為乾日總數在2-4月的比例

乾日比例增加

根據27個CMIP5模式及HiRAM模式模擬
多數模式呈現臺灣附近（北緯25度）乾日比例有增加的趨勢

氣候推估模擬 – 世紀中東亞春季最長乾旱延時變化

HiRAM高解析模擬 臺灣附近乾旱延時增加



※最長乾旱延時為2~4月最長的連續乾日日數

最長乾旱
延時增加

根據27個CMIP5模式及HiRAM模式模擬
多數模式呈現臺灣春季附近最長乾日增加，顯示乾旱延時增加，
但強度變化不一

氣候推估模擬 – 東亞春季降雨變化(世紀中→世紀末)

東亞春季降雨量變化百分比

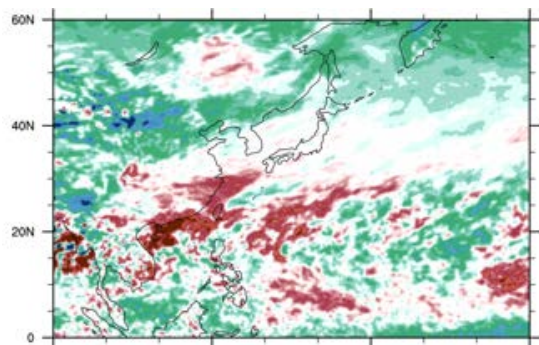
東亞春季乾日比例變化

東亞春季平均每年最長乾日變化

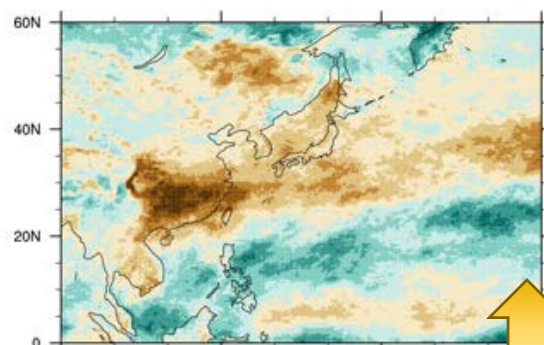
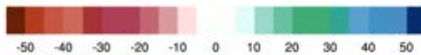
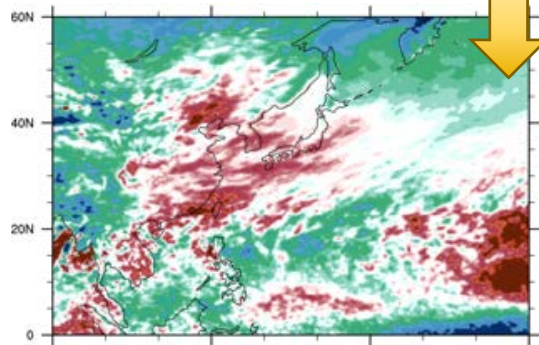
世紀中



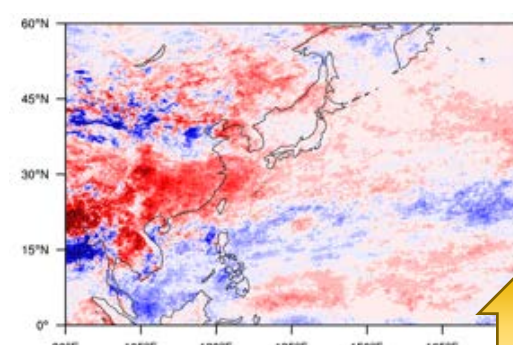
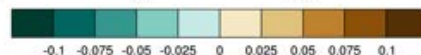
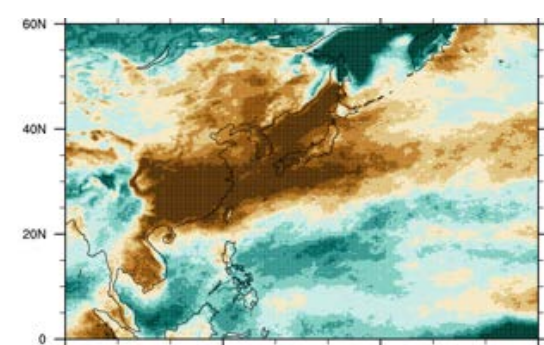
世紀末



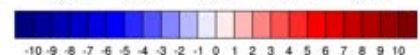
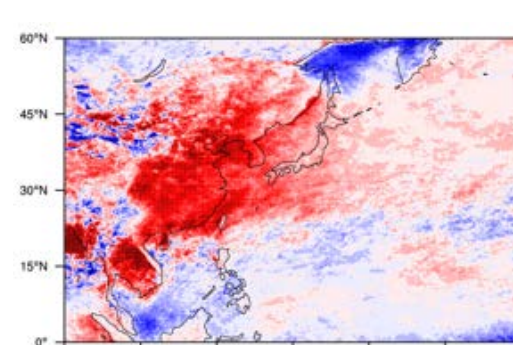
降雨減少



乾日比例增加

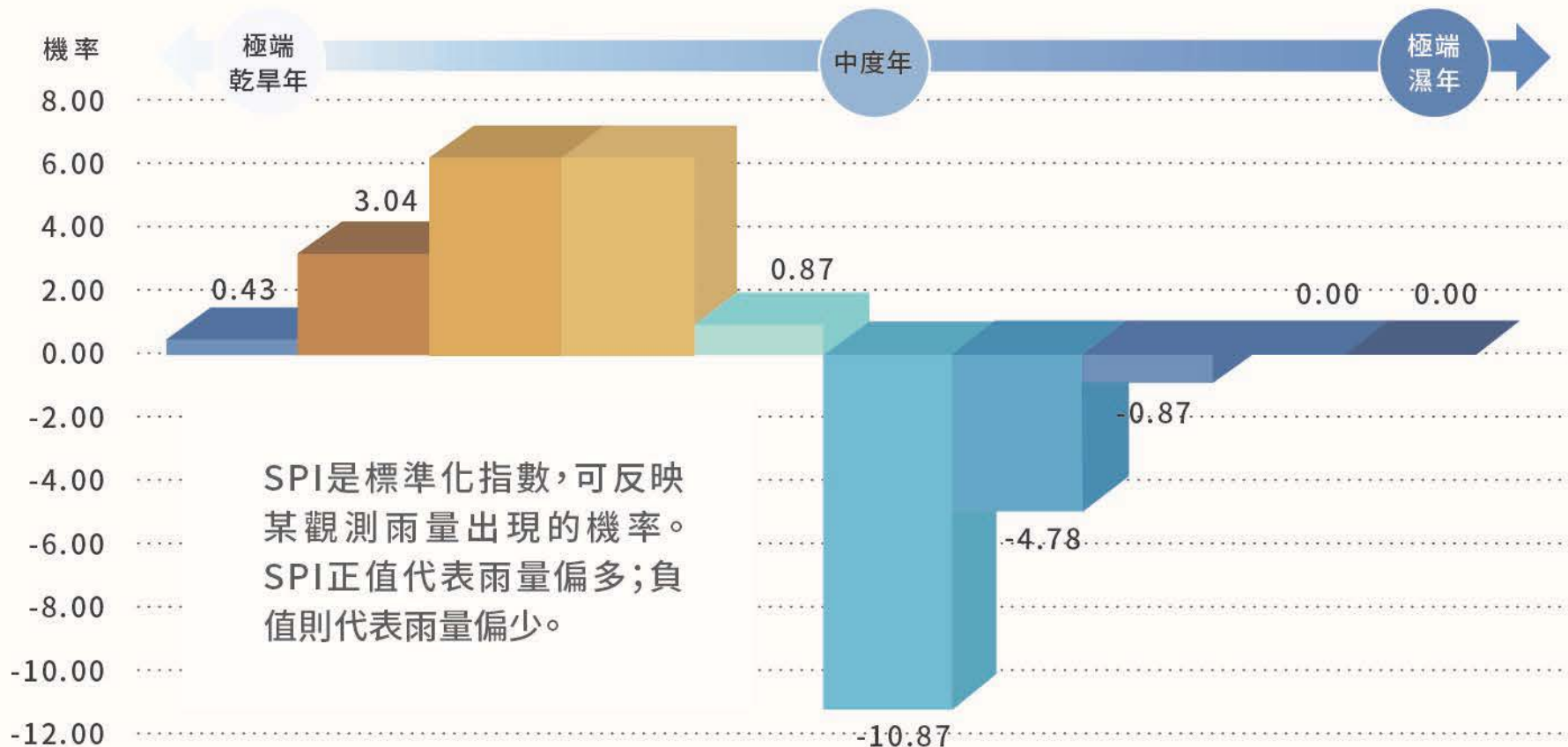


最長乾日增加



氣候推估模擬臺灣附近春季乾旱年機率變化

未來SPI3的趨勢與機率變化

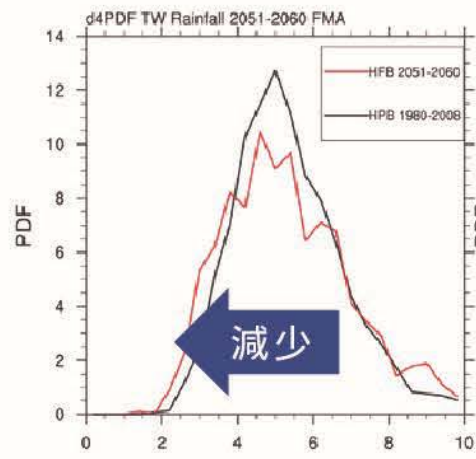


- 使用台灣與鄰近華南地區降水、大尺度環流、水氣通量場最佳的5個CMIP5模式
- 模擬未來RCP8.5情境(2028-2073年)春季SPI3，並與基期(1960-2005)年春季SPI3相比較
- 結果顯示未來春季濕年發生機率將減少，春季乾旱年發生機率將增加，尤其是SPI3<2的極端乾旱年機率將增加。

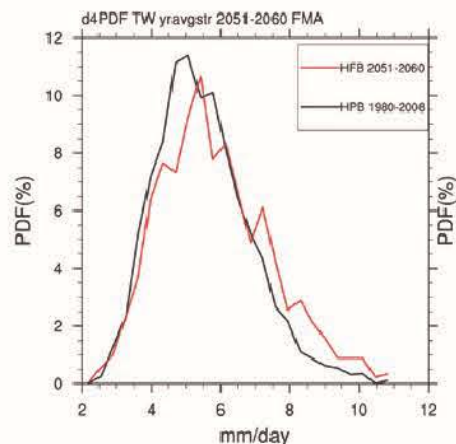
■ SPI3<-4 ■ -4<SPI3<-3 ■ -3<SPI3<-2 ■ -2<SPI3<-1 ■ -1<SPI3<0 ■ 0<SPI3<1 ■ 1<SPI3<2 ■ 2<SPI3<3 ■ 3<SPI3<4 ■ 4<SPI3

氣候推估模擬臺灣附近春季降雨機率分布變化

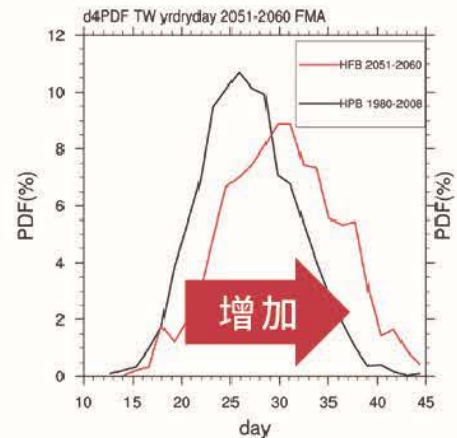
降雨



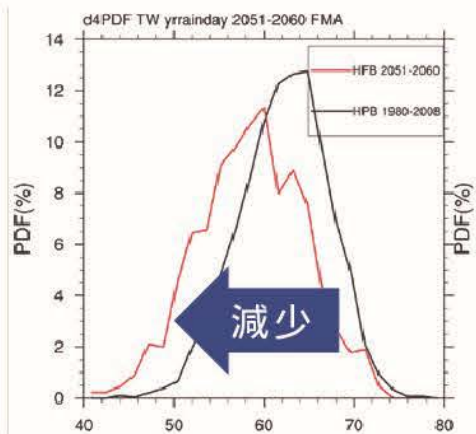
平均強度



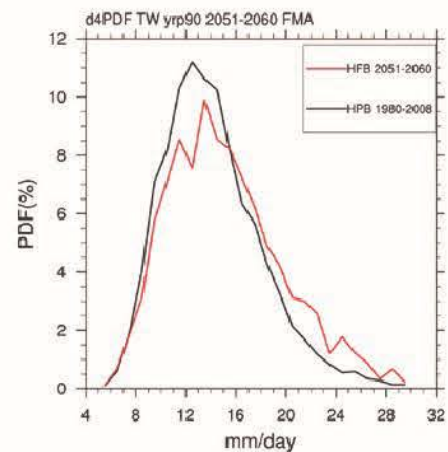
乾日



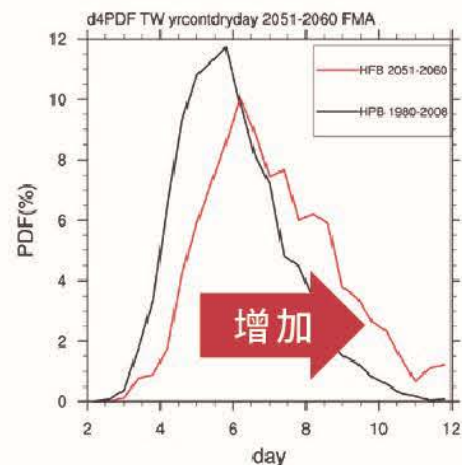
雨日



極端降雨強度



連續乾日



- d4PDF所有Member在臺灣附近的降雨PDF
- 目前氣候(1980-2008)的100個member及未來氣候(2051-2060)的90個member的降雨機率分布變化
- 結果顯示，降雨與雨日有減少的趨勢、乾日與連續乾日有增加的趨勢，降雨強度則無明顯變化

d4PDF:日本為了氣候變遷所產製的全球模式資料

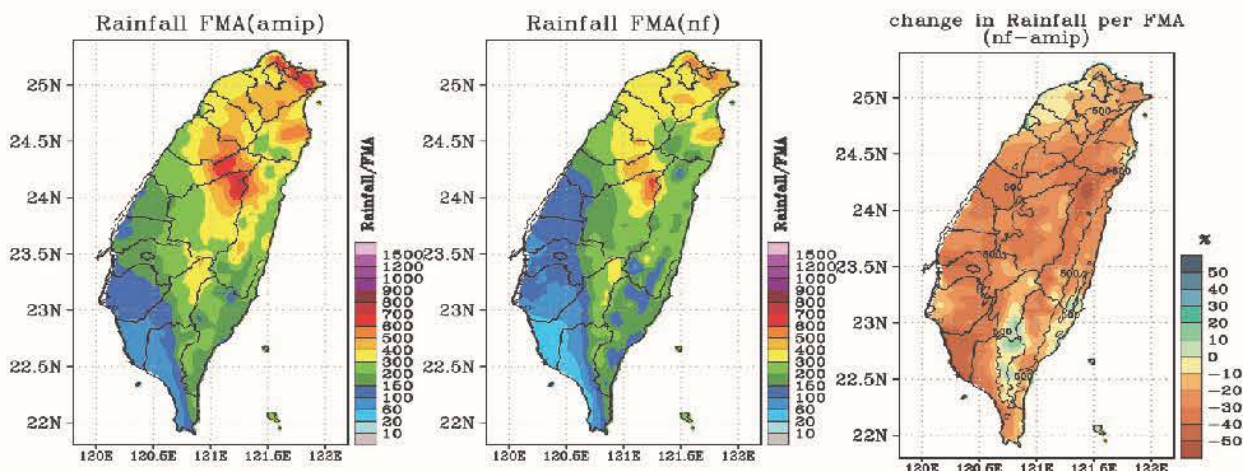
氣候推估模擬臺灣春季降雨變化

■ 基期 (1986-2005)

■ 世紀中

■ 變化比例

平均降雨量

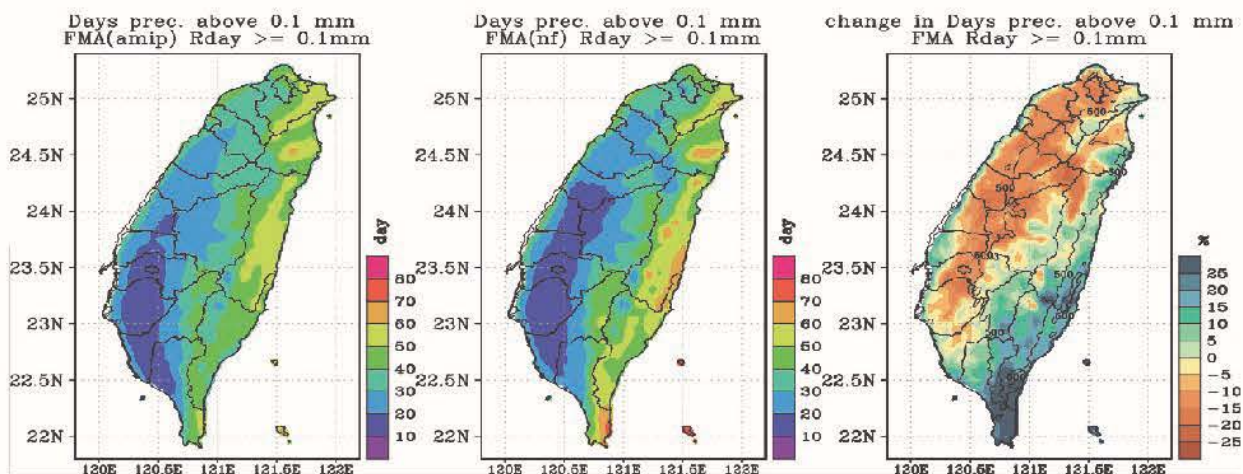


過去較大平均降雨由臺灣東北向西南延伸至新竹、台中、南投山區。

降雨變化量：全台大致上相較過去為負成長。

平均降雨日

(日降雨量大於 0.1 mm 的天數)



過去較大平均降雨由臺灣東北向西南延伸至新竹、台中、南投山區。

降雨日變化：大台北向西南延伸到台南相較於過去負成長，其他地方為正成長。

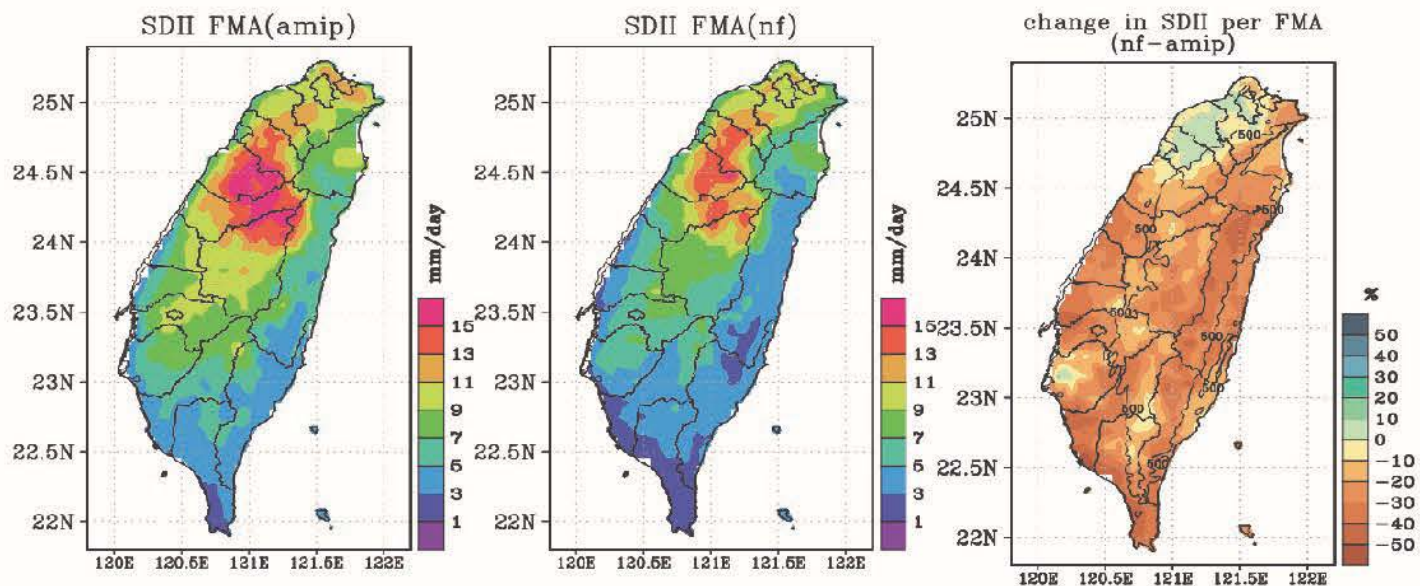
氣候推估模擬臺灣春季降雨強度變化

■ 基期(1986-2005)

■ 世紀中

■ 變化比例

平均降雨強度
(平均降雨量/雨日)



平均降雨強度變化：除台北、桃園、新竹外有些微增加，其他地區相較於過去皆為負成長。

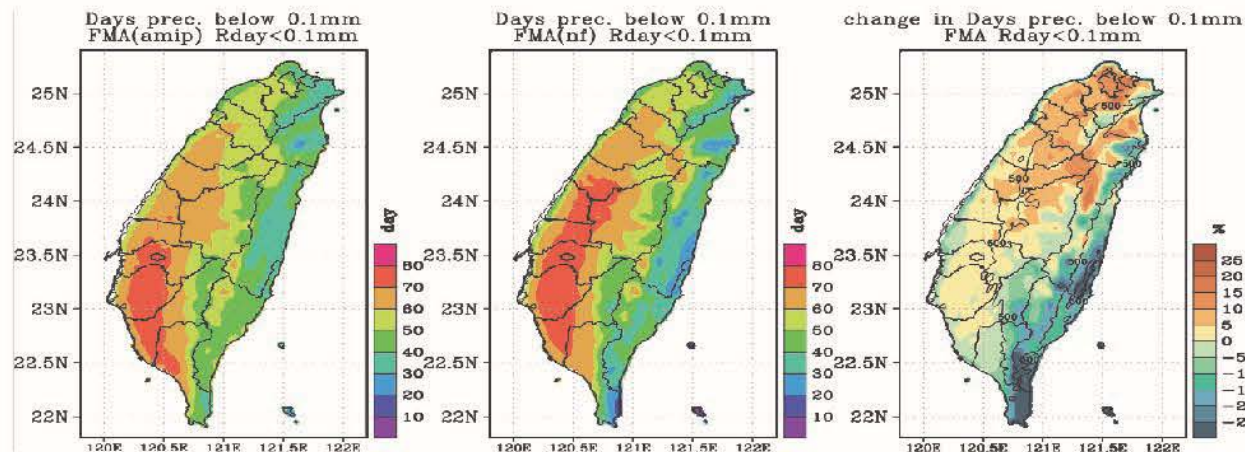
氣候推估模擬臺灣春季乾日與乾旱延時變化

■ 基期 (1986-2005)

■ 世紀中

■ 變化比例

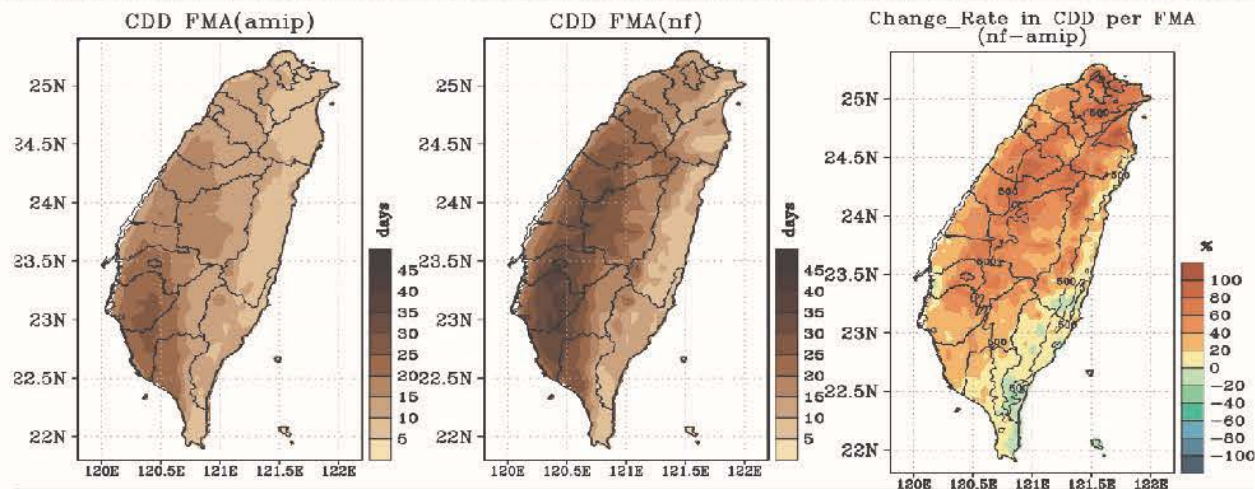
平均乾日
(日降雨量小於
0.1 mm的天數)



過去平均乾日70日以上的範圍從嘉義延伸至屏東。

平均乾日變化量：北部最明顯，由基隆經台北、桃園、新竹與苗栗山區，平均乾日的增加量在10%以上。

**連續最大
平均乾日**
(日降雨量小於
0.1 mm的最大
連續天數)



過去極大值在西部平原的台南高雄25日以上。連續最大平均乾日變化：全臺灣大部分的區域均增加。

乾旱/缺水熱點

根據過去經驗與未來氣候變遷推估模擬結果，臺灣乾旱/缺水熱點之一：

北部供水區 (石門水庫)

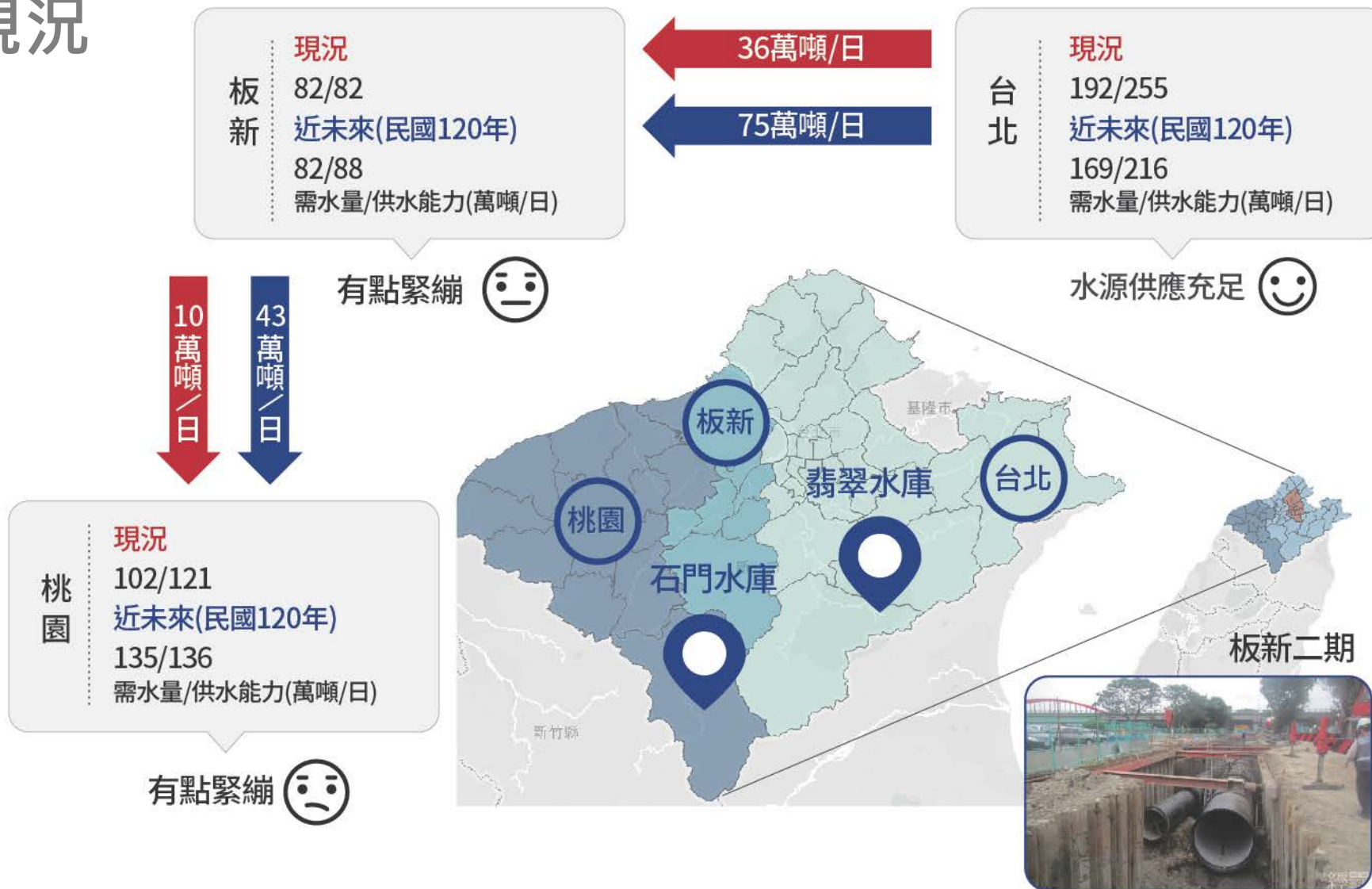


乾旱水資源風險評估 – 目前北部供水現況

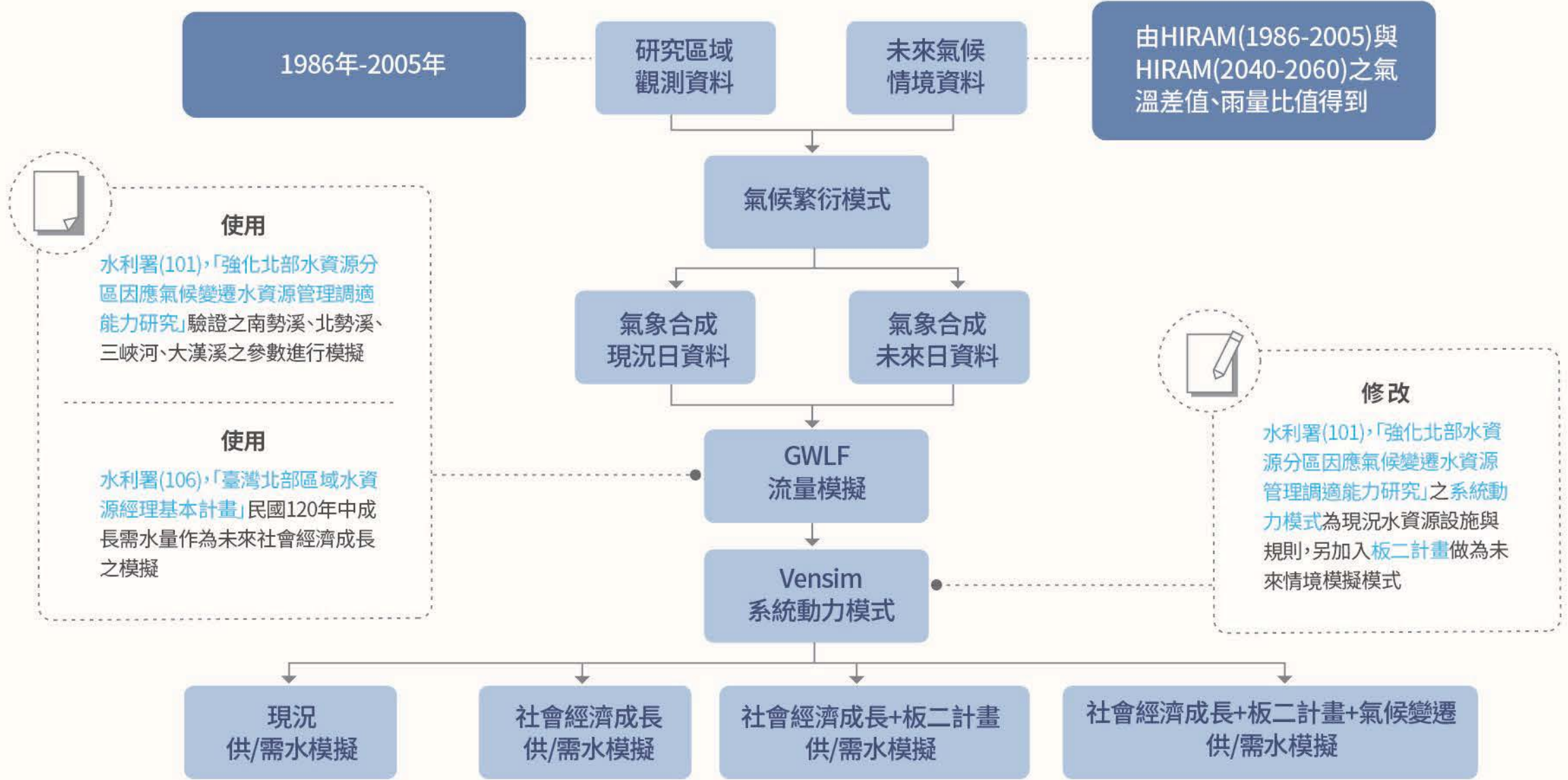
- 台北規劃缺水率最低，供水無虞

缺水率：(計畫需水量-供水量)/計畫需水量(%)

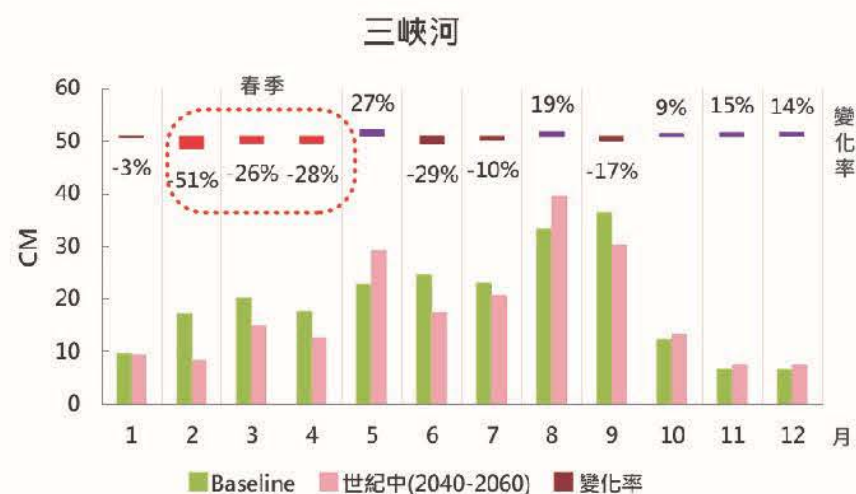
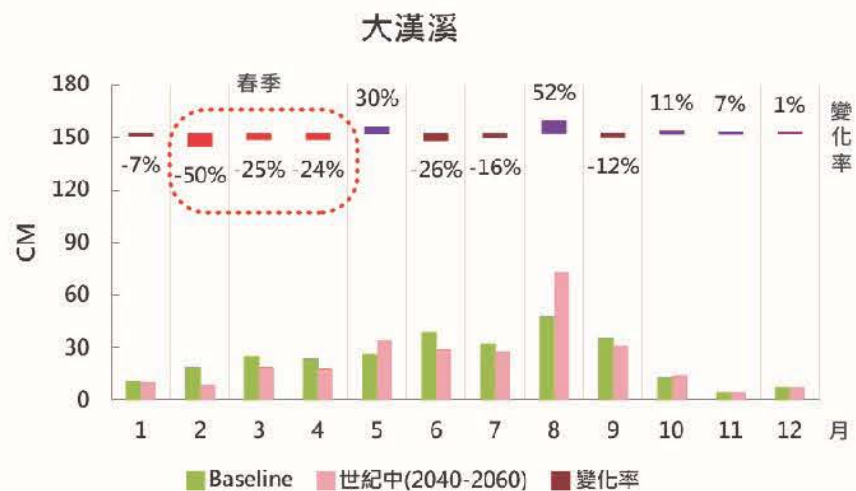
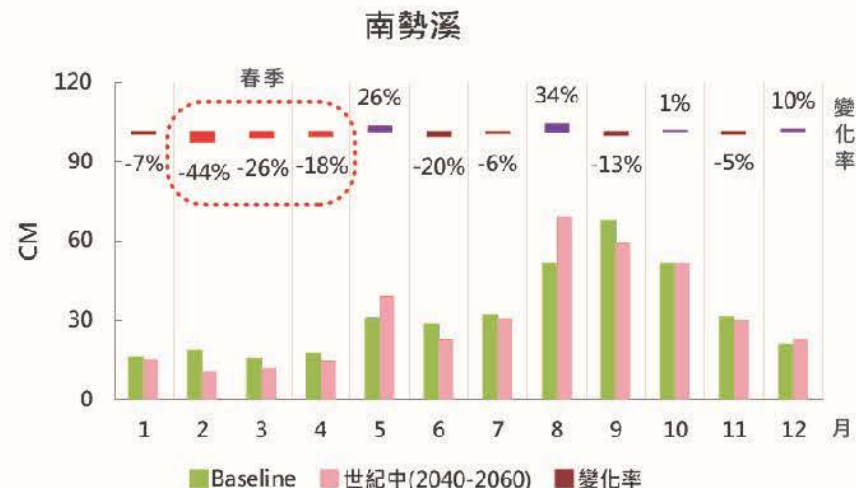
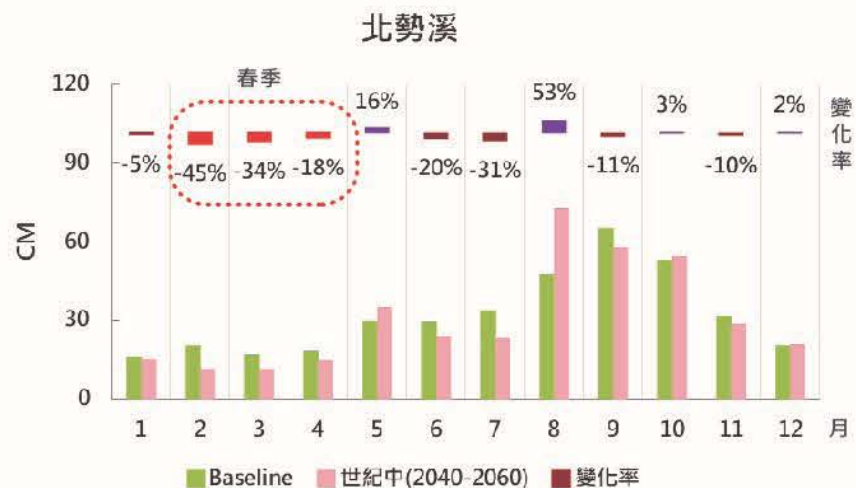
- 板新桃園地區供水緊繃
- 目前措施：板新二期工程 → 區域彈性調度(台北水供板新)



乾旱水資源風險評估水資源供需模擬流程



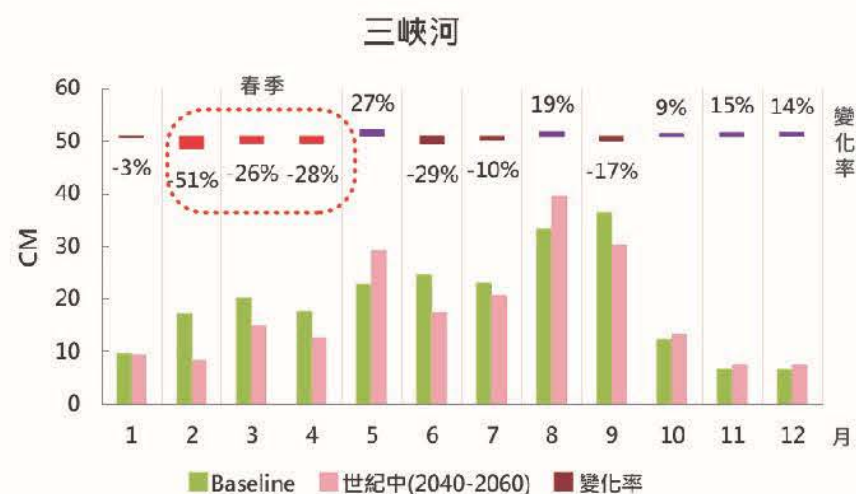
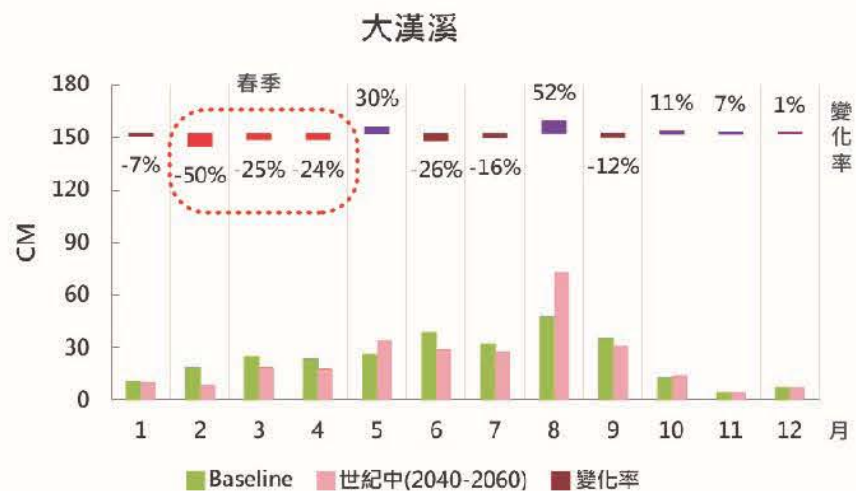
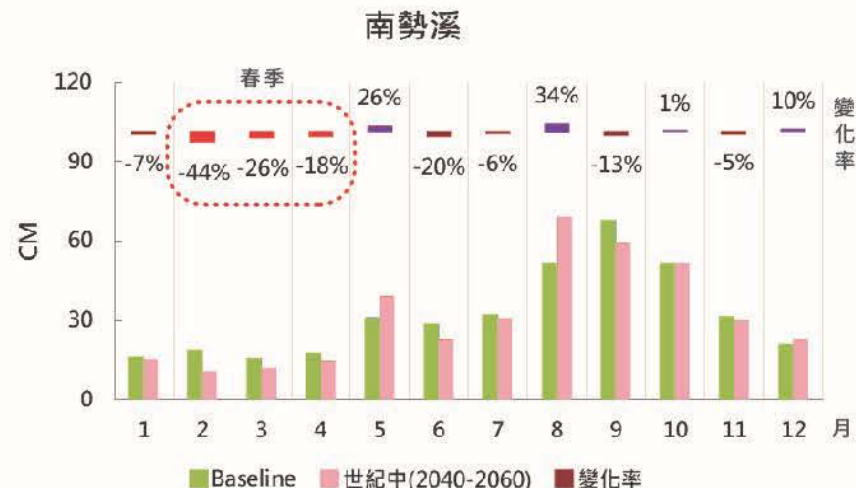
乾旱水資源風險評估北部河川未來雨量變化



北部主要河川集水區雨量除少數月份外，大致呈現減少趨勢，而於春季減少趨勢更為明顯

註：模擬情境為 HIRAM_RCP8.5

乾旱水資源風險評估北部河川未來流量變化



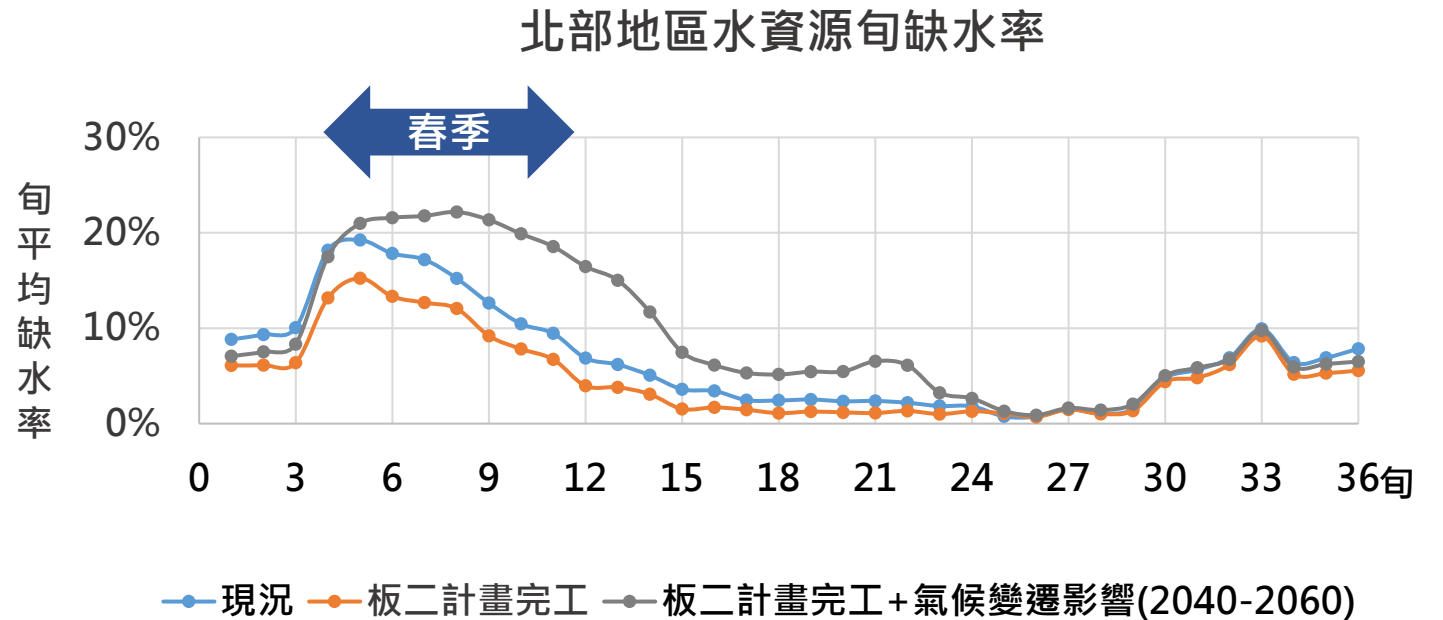
北部主要河川集水區
流量除少數月份外，
大致呈現減少趨勢，
而於春季減少趨勢更
為明顯

註：模擬情境為
HiRAM_RCP8.5

乾旱水資源風險評估北部總缺水率(公共+農業)

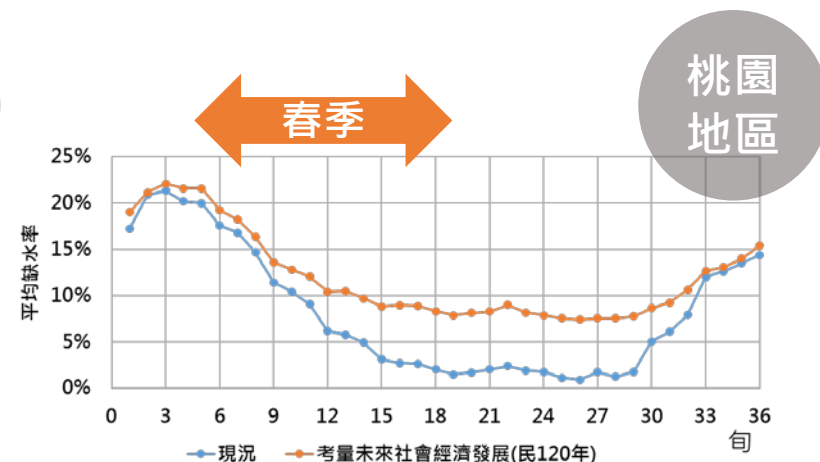
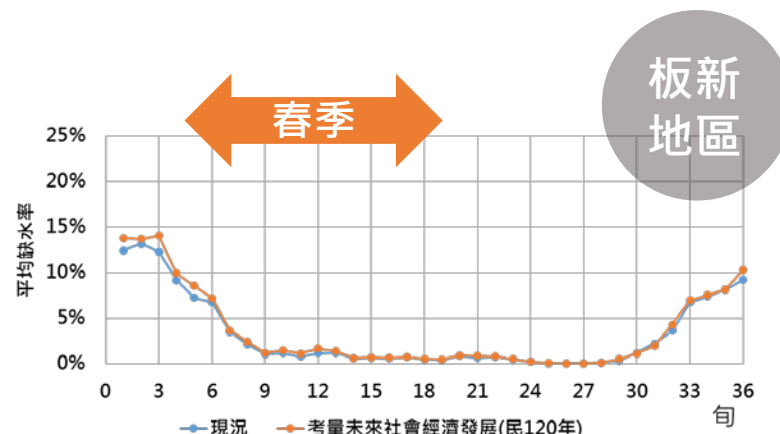
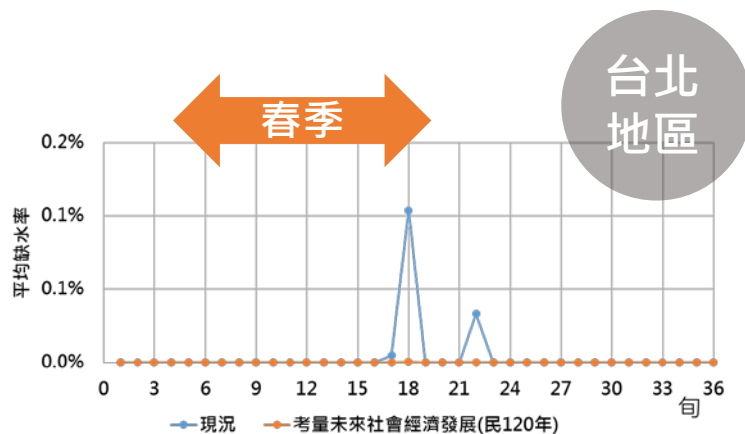
合併考量公共用水與農業用水之缺水率：

- 未來板二啟用後，可能稍微降低旬缺水事件嚴重程度
- 受氣候變遷影響，可能提高全年缺水率，春季缺水率更可能超過20%



乾旱水資源風險評估北部公共缺水率

社經發展情境(民國120年)



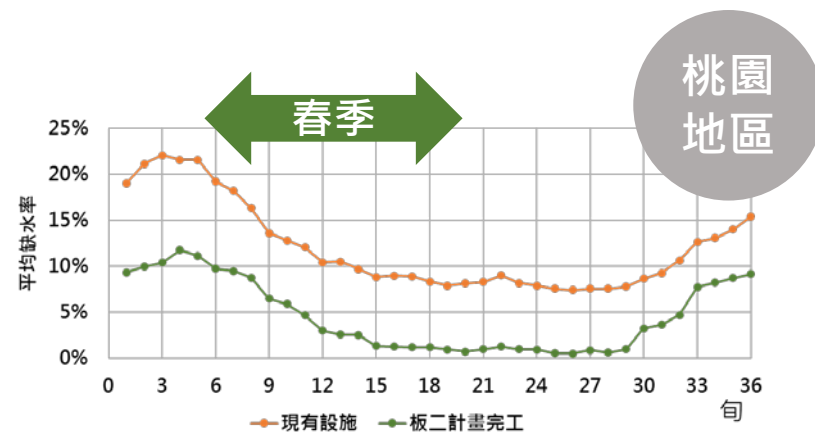
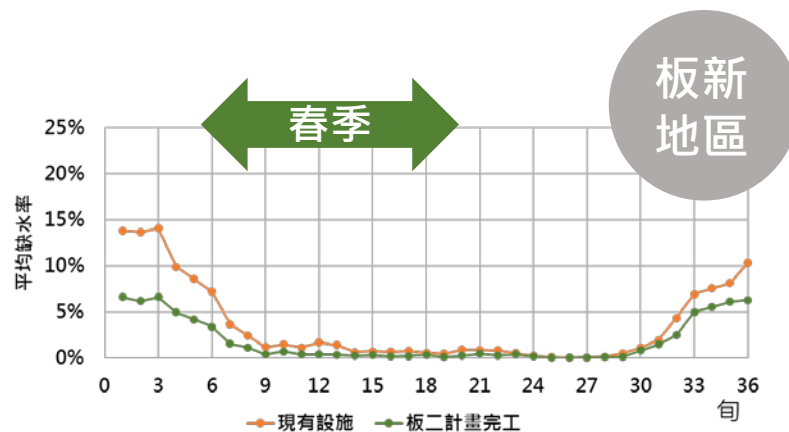
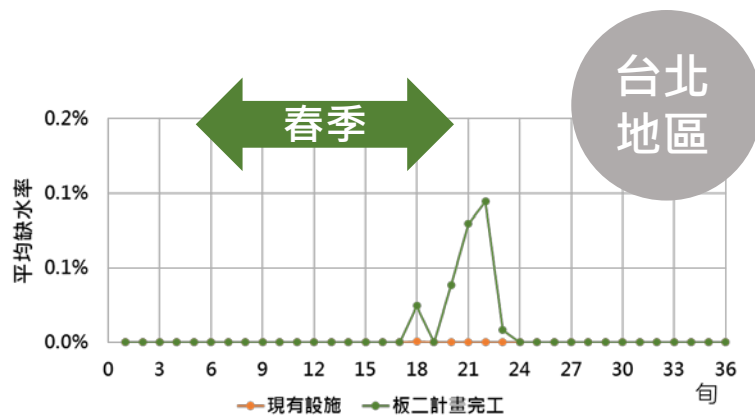
- 台北地區現況並無明顯缺水情形
- 考量未來經濟發展，需水量降低(因人口與工業均呈現負成長)，缺水情形更為減緩

- 板新地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 考量未來經濟發展，需水量上升(因人口與工業均呈現正成長)，春季、冬季缺水情形稍微上升

- 桃園地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 考量未來經濟發展，需水量上升(因人口與工業均呈現正成長)，全年缺水情形皆呈現上升

乾旱水資源風險評估北部公共缺水率

社經發展情境+板新二期完工效益



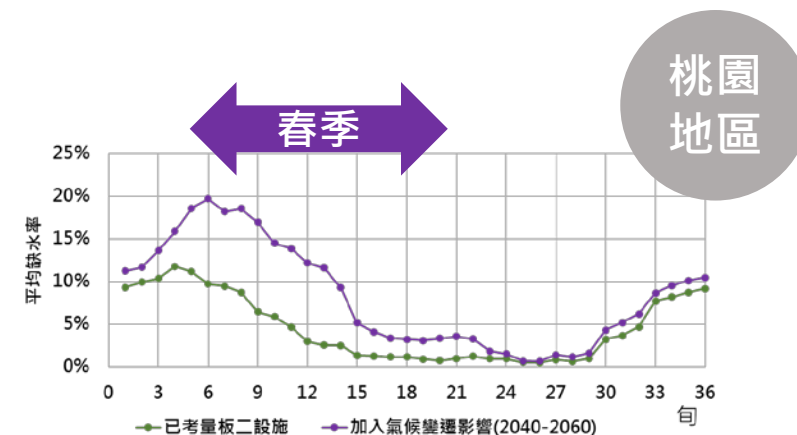
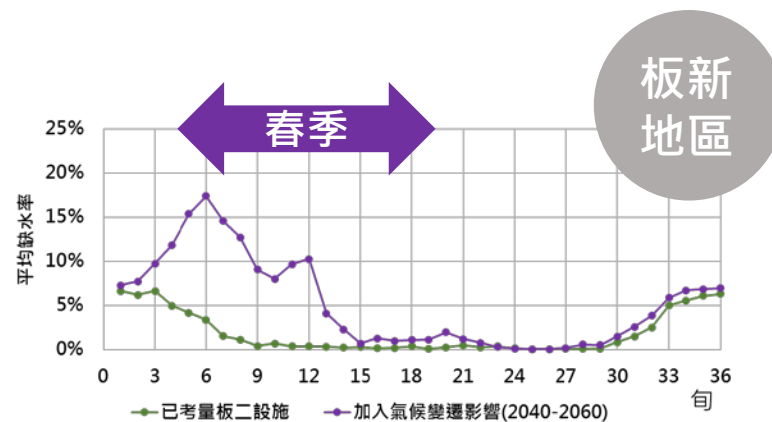
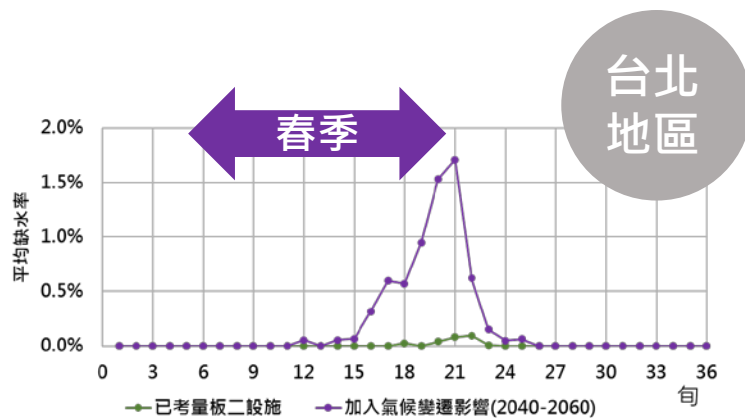
- 台北地區現況並無明顯缺水情形
- 加入板新二期方案後，因部分水量供給板新桃園地區，缺水情形些微上升

- 板新地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 加入板新二期方案後，因獲得部分來自台北地區之水量供給，春季、冬季缺水情形降低

- 桃園地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 加入板新二期方案後，因獲得部分來自台北地區之水量供給，全年缺水情形皆呈現降低

乾旱水資源風險評估北部公共缺水率

社經發展情境+板新二期完工效益+氣候變遷情境

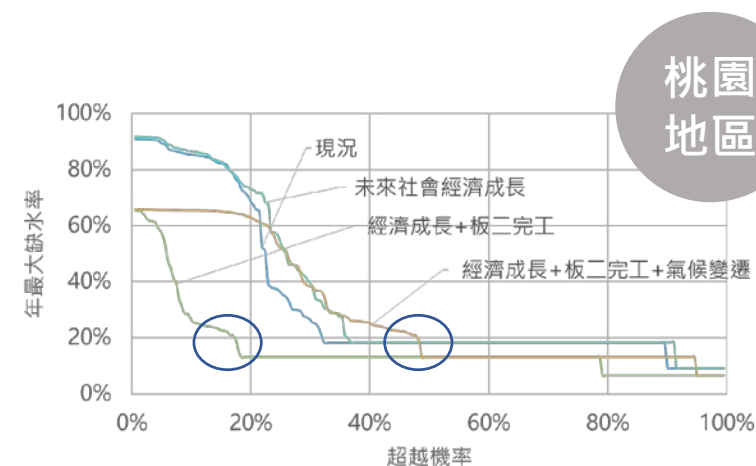
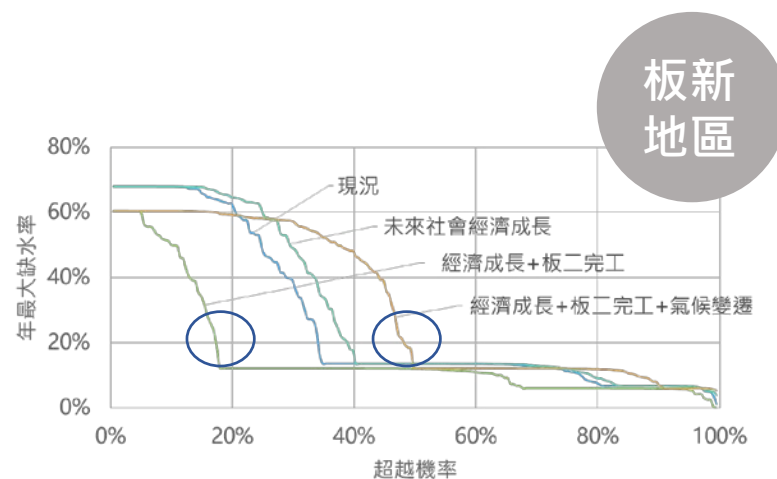
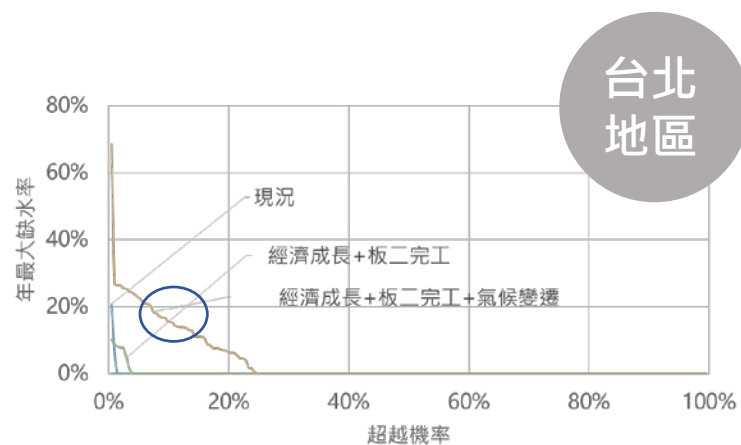


- 台北地區現況並無明顯缺水情形
- 考量氣候變遷影響後，缺水情形些微上升

- 板新地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 考量氣候變遷影響後，因乾季濕季雨量差距擴大，故於乾季(春季、冬季)缺水情形加劇，春季尤為明顯

- 桃園地區現況於春季、冬季呈現較高缺水情況
- 考量氣候變遷影響後，因乾季濕季雨量差距擴大，故於乾季(春季、冬季)缺水情形加劇，春季尤為明顯

乾旱水資源風險評估北部極端缺水機率



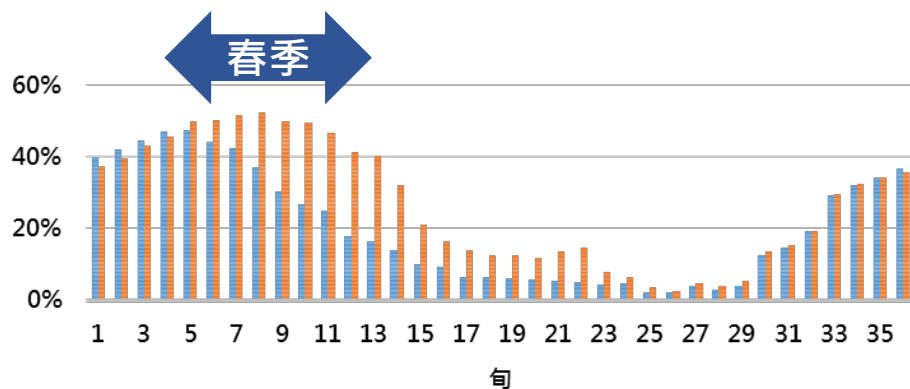
- 台北未來板二完工後，在氣候變遷影響下，每年發生超過20%缺水率的機率大約為7%

- 板新未來板二完工後，每年發生超過20%缺水率的機率大約為17%，氣候變遷影響下可能增為48%

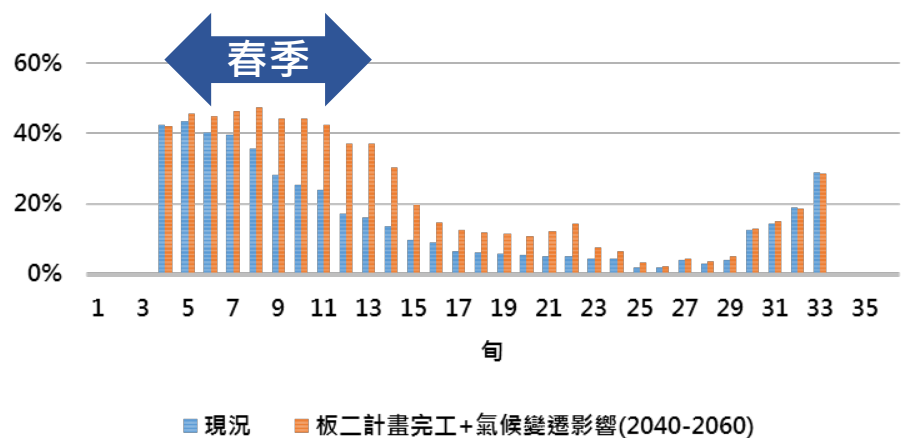
- 桃園未來板二完工後，每年發生超過20%缺水率的機率大約為17%，氣候變遷影響下可能增為48%

乾旱水資源風險評估北部農業缺水率

桃園灌區
旬平均
缺水率



石門灌區
旬平均
缺水率

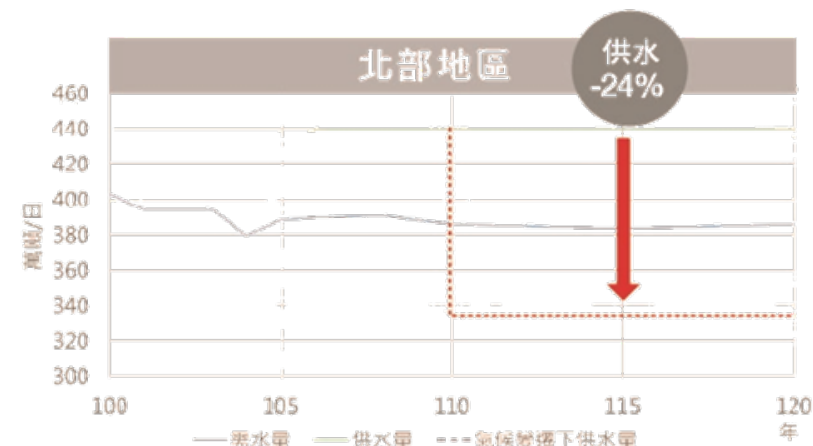
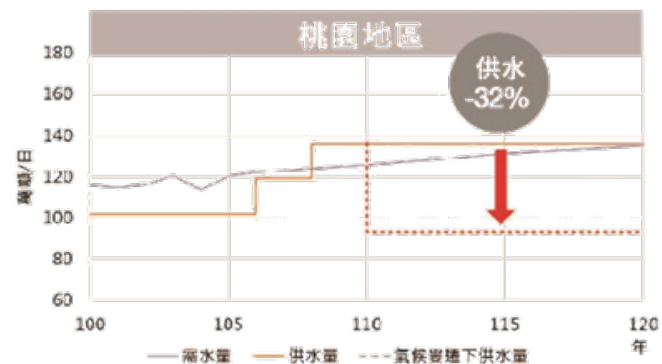
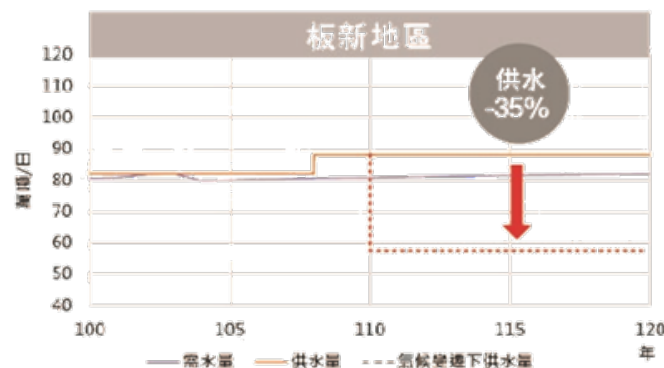
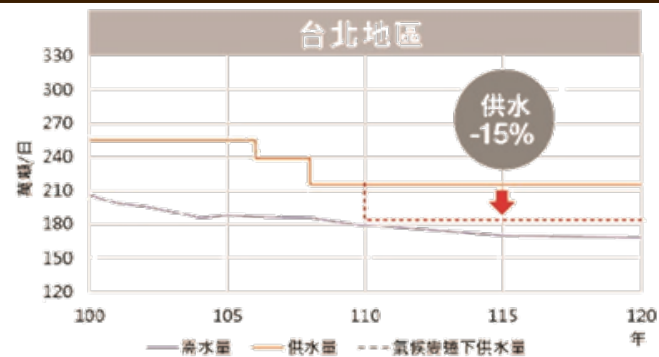
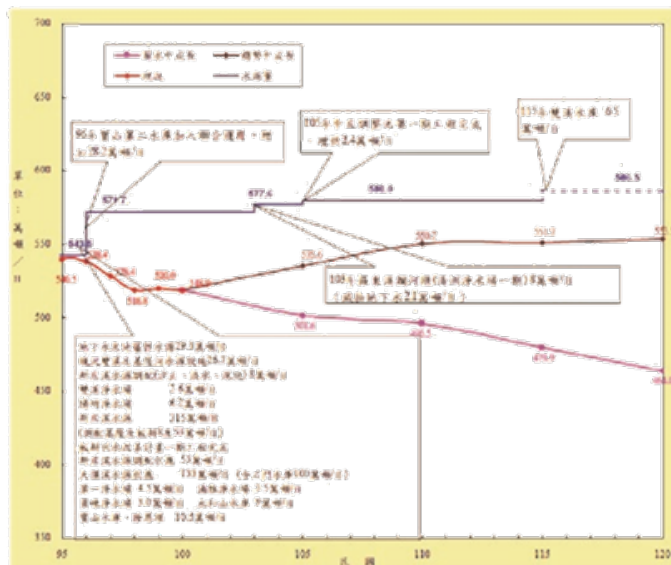


- 春季為枯水期水源較為不足，但卻是北部一期稻作灌溉需水量較高的時期，因此春季本就有較高缺水率。
- 板二計畫乃針對公共用水之調度，對農業灌溉用水受惠不大，受氣候變遷影響，農業灌溉缺水率亦提高，春季缺水率更可能超過40%。

乾旱水資源風險評估北部水資源供需能力

氣候變遷情境下

北部地區現有規劃



臺灣氣候變遷乾旱 風險評估與調適

01

認識氣候變遷

02

臺灣水環境大觀

03

臺灣氣候變遷
乾旱風險評估

04

臺灣氣候變遷
乾旱調適策略



04

臺灣氣候變遷乾旱
調適策略

政府主要的穩定供水④策略

-  中水回收系統
-  雨水回收系統
-  自來水管線維修、更新
-  自來水管線檢漏
-  合理水價，以價制量
-  使用節水標章商品
-  農業精密灌溉
-  鼓勵旱作



開源



- 現有水庫清淤、改善
- 加高增加庫容量 (如：曾文水庫)
- 興建新水庫
- 海水淡化廠
- 再生水廠 (如：臺南永康再生水廠)



節流



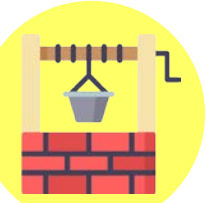
調度



- 透過自來水幹管工程
- 翡翠水庫水支援板新地區使用
 - 石門水庫水支援新竹縣市用水
 - 曾文水庫支援大高雄地區用水



備援



- 伏流水
- 備援井水
- 埤塘水

氣候變遷乾旱調適策略

對於那些氣候變遷旱災高風險區，或是隨著極端事件的強度、頻率增加，我們可以...

降低危害度

- 降低溫室氣體排放，例如：多搭乘大眾運輸工具
- 能源效率提升，例如：多使用節能產品
- 增加溫室氣體吸附儲存，例如：多種樹
- 其他，如人工增雨

降低暴露度

- 產業調整(農業、製造業、工業、服務業)，例如：改種植低用水作物(旱作、打破犁底層)
- 土地利用改變，例如：改變高用水作物的種植地區

降低脆弱度

- 開發水資源，例如：新興水源開發(海淡廠、再生水、回收水、地下水、深水井、水汽、伏流水、雨水儲集)
- 增加儲蓄空間，例如：水庫清淤
- 提高管線輸水效率，例如：改善自來水管線漏水率
- 調整農作物品種與種植方式，例如：栽種耐旱作物
- 降低用水量，例如：提升用水效率(省水技術、省水產品、省水裝置)

其他風險管理

- 系統轉型與韌性增加，如節水社區推廣
- 風險移轉與分擔，如乾旱災害保險（農業、產業）
- 整備應變，如強化水資源相關從業人員整備能力



THE END

Thank you very much!