

# 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

## Strengthening Water Supply System Adaptive Capacity to Climate Change in Northern Region

童慶斌<sup>1</sup>                      蘇明道<sup>1</sup>                      李明旭<sup>2</sup>                      李惠平<sup>3</sup>  
Tung, Ching-Pin              Su, Ming-Daw              Li, Ming-Hsu              Li, Hui-Pian

主管單位：經濟部水利署水利規劃試驗所

<sup>1</sup> 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所  
<sup>2</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所  
<sup>3</sup> 巨廷工程顧問股份有限公司

### 摘要

全球性的氣候變異使得極端事件發生機率頻繁，不論是乾旱或強降雨事件均會給供水系統帶來強大的破壞力，在相同極端事件下不同地區可能受到不同的災損程度，有些地區能夠應變且快速回復至原本狀態，而有些地區卻需花很長時間復原，表示環境系統中存在著不同程度的承載力，承載力可能受到調適策略、社經發展程度與各區域發展型態的差異而有所不同，並且每個地區有各自的特性，相同之調適策略不見得適用於不同的地區，爰此本研究目的在於評估北部水資源分區水資源脆弱度空間分布，並提出強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力之調適計畫。主要內容在於分析水資源相關水環境因子變動之趨勢，設定未來水資源需求情境以及可運用之水源，評估氣候變遷對河川流量以及各水資源設施之衝擊，推求各標用水缺水容忍度以及定義水資源風險度與分析方法，計算出未來氣候變遷影響下之缺水風險，將其繪製成風險地圖，並依據風險地圖擬定水資源調適策略以及計畫，以強化北部水資源系統。透過分析指出氣候變遷對宜蘭、臺北供水系統衝擊影響不大，仍可維持正常供水運作，而基隆、板新、桃園、以及新竹地區則是在容忍度 SI 為 0.5 之條件下供水能力雖可滿足需水量，可能發生缺水情況。水資源風險地圖評估結果亦顯示，宜蘭縣、臺北市在無氣候變遷影響之民國 120 年以及有氣候變遷影響之情況下，風險度皆無變化。基隆市、新北市、桃園縣與新竹縣市在氣候變遷衝擊下，水資源風險度部分行政區皆會提高。

**關鍵詞：**氣候變遷、脆弱度、回復力、風險地圖

## **Abstract**

Global climate changes led to the frequent occurrence of extreme events. Both drought and torrential rains will cause great impacts on water supply systems. Under the same extreme events, impacts and resilience on different regions may vary. This shows the different carrying capacity in the environmental systems. The carrying capacity will differ due to adaptation strategies, socio-economic developments, and development patterns. The purposes of this project are to evaluate the spatial distribution of water resources risk due to climate change and to suggest action plans to strengthen adaptive capacity for the northern region of Taiwan. The main tasks include water demand and supply analysis, trend analysis of hydrological components, estimate of future water demands for different sectors, assessment of climate change impacts on stream flow, evaluation of natural renewable water resources, estimates of carrying capacities, and resilience of water supply systems. According to the analysis of the vulnerability of water resources and hazard, the risk of different water sectors are projected and strengthening adaptation strategies to climate change are suggested. Results showed climate change brings little impacts on the water supply systems of Yilan and Taipei regions. Keelung, Banhsin, Taoyuan, and Hsinchu regions can still satisfy water demand under water shortage index (SI) scale 0.5 with risks of water shortage. Mapping of risk of water shortage showed no difference at 2031 either with or without climate change. However, risks of water shortage will increase at regions in Keelung, Xinpei, Taoyuan and Hsinchu under the impacts of climate change.

**Keywords : Climate change 、 Vulnerability 、 Resilience 、 Mapping of risk**

## 一、前言

由於氣候變遷對溫度及雨量造成影響，進而導致河川流量改變，可利用的水資源量變異加大，水資源管理與調度難度加高，揭露出強化彈性管理制度的重要性。故本計畫依循「分散型調適策略」的概念，針對分區內不同區域，其區域特性亦有所差異，若利用單一策略解決困境，難免會出現部分區域不適用之情形，若將整個大區域的系統拆成若干個相互連結之小系統，每個系統都針對其特性賦予適當的調適策略，便能在危機發生時藉由自身的援救系統解決危機。

系統本身的調適能力受到社會發展、決策發展以及經濟發展的影響，不同區域的供水能力會因供水系統的差異有區別，故供水脆弱度應具有空間分布之特性，只有進一步透過系統風險度分析結果，探討其空間分布情形，才能得知哪個區域具有較高的風險，進而根據問題提出水資源管理調適計畫。

## 二、文獻回顧

過去許多研究數據指出氣候變遷將影響溫度於長期趨勢分析呈上升趨勢、平均降雨量及降雨強度皆呈上升之勢、河川流量豐枯水期差異大(童慶斌(民國 86 年)、游保杉(民國 89 年)、Loukas(2002))，在在應證氣候變異問題已不容忽視，目前世界各國的思考重心由最初單純評估氣候影響轉變成以脆弱度及回復力等角度。Clark et al. (1998)指出脆弱度包含兩種特性：暴露度與調適能力；暴露度為災害事件之風險，調適能力則為發生災害時，系統維持正常運作與失效後復原之能力。脆弱度除與暴露度、調適能力有關外，可透過量化脆弱度參數來分析調適策略之可行性與適用性(Smit et al., 2006)。回復力概念源自力學，主要探討系統在受到毀損後之復原及承受能力，Hashimoto et al. (1982)定義在系統風險性概念下，供水能力操作指標可由可靠度、回復力及脆弱度作分析，其中可靠度為系統維持正常運作之機率，回復力為系統處於失敗後再恢復正常運作之機率，脆弱度則用來表示系統一旦失效後可能受到損害之程度。

瞭解水資源系統之災害脆弱度後，訂定適合之調適策略為一重要課題，以下研析了中國、日本、美國、德國、澳洲及印度等國家所擬定之調適策略，並將其整理為政策面、工程面、管理面與資訊面來呈現，目前各國研究多屬於資訊面的蒐集，用以制定對應政策及管理原則，而工程方面則因氣候變遷影響範圍甚廣，無法利用單一工程解決。

1. 政策面：強化應對海平面上升的調適策略、早期預警系統的引用、技術性或法治性或經濟性等層面的策略活用、開發替代水資源、改善水資源使用效率、風險管理及政策配合、藉由「用水效率計畫」協助高用水企業聰明用水、永續居住地任務以及永續農業任務。
2. 工程面：在保護生態基礎上永續開發水電、加強水利基礎設施的規劃建設、水資源保存技術、氣候變遷納入基礎設施主流發展及更新灌溉用水系統。
3. 管理面：強化水資源管理、加強水資源配置、節水和海水利用技術研發與推廣、水權分配及轉讓制度、飲用水設備處理過程評估、有效率的使用水資源、考量極端事件強度與頻率的變化進行水管理與資源管理之規劃、洪水風險管理、維持河川健康與保障水資源供給。
4. 資訊面：促進區域性脆弱度的評估、有效活用長期及短期的觀點、有效利用觀測結果、可用水資源預測、生質能源使用對於水資源的影響、監測、評估以及預測水資源之可得性與可用性、氣候變遷策略性知識平台任務。

### 三、水文因子情境設定與分析

研究中將宜蘭縣、基隆市、臺北市、新北市、桃園縣、新竹市及新竹縣等縣市以流域別分為蘭陽溪、淡水河、鳳山溪以及頭前河流域，並進行水資源相關水環境因子進行歷史趨勢分析，以做為後續研究分析之基礎，並針對可運用水源量探討流域歷史及未來氣候變遷情境下可更新水源量改變情境，最後將未來水資源需求情境進行分析，並同時考慮氣候變遷與社經發展的影響，設定未來需水情境，該項分析結果將做為後續研究水資源分區之需水量輸入資料。

#### 3.1 水資源相關水環境因子變動趨勢分析

變動趨勢分析目的在於了解水文過程反應與自然或人為的關聯性。流程為檢測時序資料中是否存在變異點以及當變異點存在時分別計算變異點前後變化趨勢或當變異點不存在時計算時間序列的變化趨勢。變異點檢測方法採無母數統計方法 M-W-P 檢定及 K-W 檢定進行變異點分析，並應用 M-K 檢定搭配 Sen's 斜率進行變異點前後期的時間序列之趨勢分析。分析資料包括年均溫度、皿蒸發年量、降雨特性及逕流特性。分析資料中氣象資料採氣象局之臺北、鞍部、竹子湖、基隆、淡水、新竹、宜蘭等 7 站資料；降雨特性分析資料採水利署所轄 47 雨量站以及前述 7 座氣象站；流量站資料採水利署提供之研究區域內流量站及水庫入流量資料。

分析結果顯示(表 1)，在溫度部分除淡水站呈下降趨勢外，其餘測站皆呈上升趨勢且具統計顯著意義，平地測站大多位於都市地區，溫度上升趨勢明顯高於山區測站，尤其是臺北站，變異點後溫度上升趨勢皆明顯高於變異點之前；在皿蒸發量部分，除臺北站之外，各站近 10 年的皿蒸發量呈現上升趨勢，且山區測站皿蒸發量小於平地測站，此外僅有臺北站檢測出變異點，其發生時間為民國 88 年，變異點前期呈下降趨勢，變異點後期呈上升趨勢。在降雨特性部分降雨特性的變異點發生時間較為分散及且並無明顯空間分佈特性，多數測站的降雨特性分析(總量、強度、平均連續不降雨日數)呈現上升趨勢，僅乾季降雨量呈上升趨勢測站略高於呈下降趨勢測站；而在逕流量部分，各集水區年常流量變化趨勢互有增減，除新店溪(屈尺)、南勢溪、翡翠水庫及鳳山溪(新埔(2))集水區呈現明顯上升趨勢，其餘集水區則呈變化趨勢不明顯或下降趨勢。年最大日流量除上坪溪(上坪)、鳳山溪(新埔(2))、基隆河(五堵)及新店溪(屈尺)集水區呈現下降趨勢，其餘集水區皆現上升趨勢。

表 1、水資源相關水環境因子變動趨勢分析結果說明

分析項目		各流域共同點	各流域差異點
溫度		皆呈上升趨勢，變異點後期的上升速率高於變異點前期。	無
皿蒸發量		無	皿蒸發年量與日照量呈正比與相對濕度及平均連續不降雨日數呈反比 皿蒸發年量新竹大於臺北大於宜蘭 皿蒸發年量上升率臺北高於宜蘭，新竹則為減少
雨量	年降雨量	多數測站呈上升趨勢。	北勢溪及南勢溪集水區上升趨勢較顯著。
	乾季及溼季降雨量	多數測站濕季降雨呈上升趨勢。	年降雨較高的區域，如陽明山山區及雪山山脈東北側迎風面，以及新竹地區測站乾季降雨呈減少趨勢
	降雨日降雨強度	多數測站呈上升趨勢。	無
	平均連續不降雨日數	多數測站呈上升趨勢(38/54)，其中近半數測站具統計顯著意義。	無
流量	年逕流量	無	無一致特性
	年常流量(Q <sub>90</sub> )	新店溪、南勢溪、翡翠水庫及鳳山溪呈現明顯上升趨勢	無一致特性
	年最大日流量	上坪溪、鳳山溪、基隆河及新店溪呈現下降趨勢	無一致特性

### 3.2 可運用水源分析

水資源供應量與時間分布都會受氣候變遷影響，故本小節分別討論天然年可更新水源量以及供水分區之供水能力，前者依據水規所(民國 100 年)提出之「天然年可更新水資源量」方法計算；供水分區之供水能力應用系統動力模式推估各供水系統之 SI 與 DPD 值，並以各系統之目標 SI 及兩年重現期之 DPD 推求供水系統之供水能力。

在天然年可更新水源量分析中，本研究之氣候變遷情境採用 NCDR 提供之 A2、A1B 及 B1 情境，並依據 GCM 之適用性挑選 CSMK35、MRCGCM、MIMR、GFCM21 及 MPEH5 模式進行分析。結果顯示在未來氣候變遷情境下，蘭陽溪、淡水河及頭前溪流流域在 A2、A1B 及 B1 情境中，多數的模式在未來天然年可更新水資源量呈現增加的情況是較多的；鳳山溪流流域在 3 個不同的情境下，大部分的模式皆顯示未來天然年可更新水資源量是呈現減少的情形。北部地區各流域之天然年可更新水源量改變情形整體而言，在 B1 情境天然年可更新水量是情形是增加的情況較多且增加的幅度較高，然而 B1 情境下，也可能發生減少幅度最高的情形，而 A2 與 A1B 情境下天然年可更新水資源量是呈現減少的情形較多。

各系統之需水量與供水能力(表 2)、SI 與最大 DPD 值分析(表 3)結果如下。宜蘭地區不論現況或未來水資源供給量充足；臺北地區在 SI 為 0.1 與板新地區於 SI 為 0.5 之條件下可滿足供水需求，而綜合 DPD 與 SI 值分析結果，板新地區以常態供水情形下 SI 為 0.3，DPD 為 769(%-days)，可得知缺水量小且缺水延時也短。桃園地區需水量為 97 萬噸/日(不包含自行取水量)，以 SI 為 0.5 之條件下目前供水能力尚可滿足需求。在正常供水 SI 為 0.007，DPD 為 438，兩者同時評估結果表示平日可能發生缺水量小且缺水延時短之情形。新竹地區現況 SI 值為 0.302，較該地區規劃時所採用之 SI=0.5 之準則低；而在 SI=0.5 時之供水能力為 54 萬噸/日，與新竹地區基期之需水量為 52 萬噸/日相比，可看出新竹供水系統在可容忍之缺水條件設定時其供水能力是可滿足該地區之用水。

表 2、各供水系統之需水量與供水能力

供水系統	目標 SI 值	需水量 (萬噸/日)	供水能力(萬噸/日)	
			以 SI 為基準	以 DPD 為基準
宜蘭	1.0	17	26	23
基隆	0.5	51	58	57
臺北	0.1	229	399	406
板新	0.5	88	92	114
桃園	0.5	97	116	112
新竹	0.5	52	54	56
備註	臺北地區供水能力除滿足臺北需水量外，還包含提供給臺灣自來水公司第一區管理處與支援板新地區之水量。			

表 3、各供水系統之 SI 與 DPD 值

供水系統	SI 值	MaxDPD
宜蘭	0	0
基隆	0.121	1362
臺北	0	0
板新	0.3	769
桃園	0.007	438
新竹	0.302	221

### 3.3 未來水資源需求情境設定

研究中針對不同標的用水研析其對供水脆弱度的影響，考慮社經發展對用水量之影響，並納入考慮溫度變化對用水量之影響，生活用水量之推估除人口增加造成之用水量增加因素外，亦以人均國民生產毛額(人均 GDP)代表社經情形的改變；工業用水部分，由於不同開發情境之工業用水量成長已隱含 GDP 成長在其中，故不另作社經條件之修正；農業用水量部分則考慮溫度增加對灌溉需水量之影響。各標的用水量對應不同的氣候變遷情境之說明如(表 4)。

表 4、標的用水量與氣候變遷情境對應關係

標的 情境	生活用水			工業用水	農業用水
	120 年用水量	GDP 成長 幅度	溫度		
A2	水利署推估 120 年生活用 水量	3.85%	依不同情境對 溫度的影響，配 合門檻值設 定，修正生活用 水量	高成長	依照不同情境 對溫度的影 響，修正農業 用水量。
A1B		2.13%		中成長	
B1		1.24%		低成長	

#### 四、氣候變遷之衝擊評估

透過氣象資料產生器合成符合現況統計特性以及氣候變遷下之氣象資料，代入 GWLF 水文模式進行模擬，模擬出現況之流量以及氣候變遷下之流量，評估氣候變遷下河川流量相對於現況之變化特性。河川流量模擬結果可代入系統動力模式，以分析氣候變遷對水資源設施供水能力之衝擊以及回復力之變化。本計畫考量 CSMK35、GFCM21 及 MIMR、MPEH5 及 MRCGCM 共 5 個模式之 A1B、A2 及 B1 短期情境(2020~2039) 下，探討氣候變遷對水資源之衝擊分析，針對河川流量、地下水補注量及供水系統供水能力等進行衝擊評估分析。

##### 4.1 氣候變遷對河川流量之衝擊評估

研究區域內有 4 個流域共 9 個流量站之上游河川流量受氣候變遷之影響，由豐枯水期降雨比值改變百分比與流量改變百分比可發現大部分情境下降雨增減與流量增減呈正相關，而由(圖 1)可發現類似之關係，且(圖 1)中之流量改變情況是透過不同 GCMs 溫度及雨量改變情境修正歷史氣象資料，透過氣象合成模式產生溫度雨量資料，利用水文模式進行模擬之河川流量，因此已隱含因溫度改變造成蒸發散量改變，間接造成河川流量改變的因子在內，故未來可藉由降雨比值改變百分比初步推估流量可能改變情形。

整體來說(圖 2)，未來北部地區豐水期河川流量是呈現增加的趨勢，整體增加幅度最大約為 7%，而在枯水期河川流量是呈現減少的趨勢，與現況河川流量比較，最多可能減少約 22%，而全年之河川平均流量在 A1B 情境由於豐水期增加幅度低，且枯水期流量減少，因此 A1B 情境之全年流量為減少的情況，而在 A2 情境，雖然枯水期減少了 22% 的流量，但由於枯水期流量本來就比較低，因此雖然減少的幅度大，但以全年的角度來看減少約 4.5%，在 B1 情境，枯水期及豐水期增減的百分比接近，但因為豐水期流量本來就較多，因此整體來說年流量的部分則增加了約 1.8%。

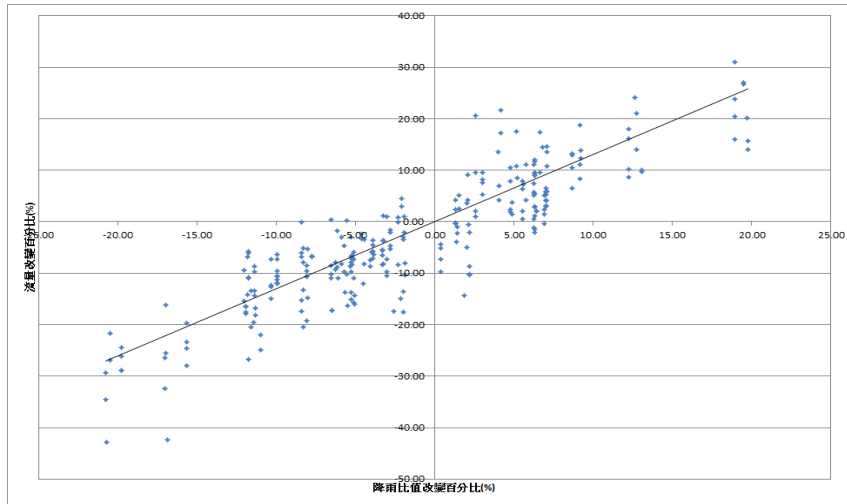


圖 1、流量改變與降雨比值改變關係

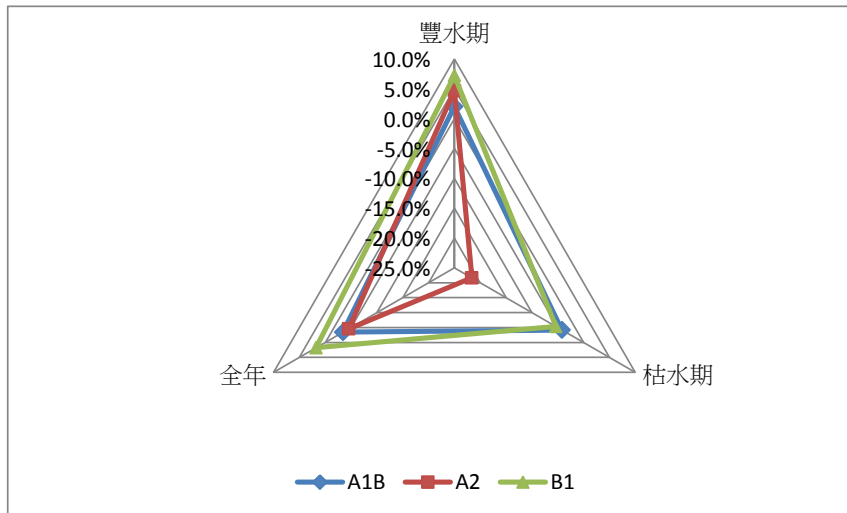


圖 2、北部地區豐枯水期及全年流量變化

#### 4.2 氣候變遷對地下水補注之衝擊評估

相較於基期所推估淡水河流域潛勢地下水補注量，短期氣候變遷情境下各 GCMs 氣候資料所推估潛勢補注量從減少 11.8%到增加 13.2%不等，蘭陽河流域潛勢地下水補注量，短期氣候變遷情境各 GCMs 所推估潛勢補注量由減少 10.8%到增加 15.3%不等；鳳山溪及頭前河流域潛勢地下水補注量，短期氣候變遷情境各 GCMs 所推估潛勢補注量(圖 3)幾乎皆呈上升趨勢(從減少 4.7%到增加 22.6%不等)。整體來說未來氣候變遷情境各 GCMs 所推估整個研究區域地下水潛勢補注量的特性大致與淡水河流域一致，減少 10.8%到增加 14.7%不等。補注量主要增加的貢獻來自於 7 月~10 月，各模式(Ensemble Mean)補注量，A1B、A2 及 B1 情境為 76.7、74.5 及 79.0 億噸/年。



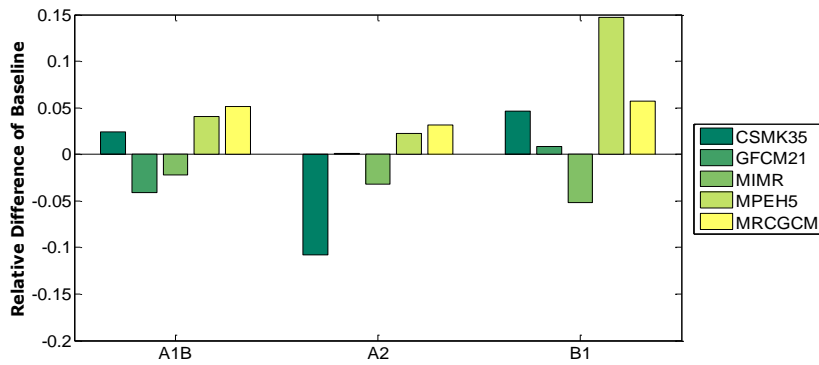


圖 3、全區地下水補注年量變化趨勢

#### 4.3 氣候變遷對各水資源設施之衝擊評估

氣候變遷對各水資源設施衝擊評估主要係以各供水分區為依據，探討在氣候變遷情境下可能之影響。在氣候變遷的情況下，除了分析評估不同氣候變遷對各水資源分區之 DPD、SI 值及系統供水能力之影響外，分析評估在氣候變遷情況下，各水資源系統之回復力，以綜合說明氣候變遷對各水資源分區之衝擊評估。根據本研究之推估，民國 120 年無氣候變遷影響下，宜蘭地區之水資源供水能力約為 26 萬噸/日，基隆地區約為 58 萬噸/日，臺北地區為 401 萬噸/日，板新地區為 91 萬噸/日，桃園地區為 110 萬噸/日，新竹地區約為 54 萬噸/日。本計畫將所推估之需水量與供水能力，與「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」(水利署，民國 98 年)之結果比較(表 5)，與過去研究推估結果相比各地區之需水量與供水能力皆相近。

表 5、需水量與供水能力檢核

(萬噸/日)	現況需水量		現況供水能力		120 年需水量		120 年供水能力	
	本計畫	水利署	本計畫	水利署	本計畫	水利署	本計畫	水利署
宜蘭	17	17	26	21	17	18	26	21
基隆	51	46	58	51	51	50	58	51
臺北	229	226	399*	324**	172	176	401*	324**
板新	88	84	92	86	90	89	91	86
桃園	97	112	116	100	137	146	110	100
新竹	52	54	54	61	64	68	54	61
備註	1. *:臺北供水能力包含供應汐止及板新地區之水量 2. **:臺北供水能力除包含供應汐止及板新地區之水量外，另外已扣除輸水損失 15%。							

表 6 為各供水系統 A1B 情境最劣之供水能力與回復力評估結果，可看出氣候變遷衝擊下，宜蘭、基隆、臺北及板新在各自可容忍 SI 值下皆可滿足用水需求，桃園與新竹則會產生缺水事件。從回復力指標方面探討，宜蘭與臺北供水系統可一直維持正常運作，基隆與板新之回復力接近 50%，表示若這供水系統失效，下旬約有一半的機會能恢復正常供水；新竹之回復力則偏低，桃園地區甚至為 0，可看出這兩個地區之系統回復

力不佳。失效最長延時結果顯示基隆有 6 旬，板新為 5 旬，新竹為 18 旬，桃園雖表上為 7196 旬，亦可表示桃園地區長時間處於缺水狀態中。因此，宜蘭與臺北之脆弱度為 1，系統回復力佳；基隆、板新及新竹皆很接近 1，系統回復力也不錯；桃園則為 0.001，系統回復力差，供水系統失效難恢復正常運作。

表 6、各供水系統 A1B 情境最劣之供水能力與回復力評估

分析項目		宜蘭	基隆	臺北	板新	桃園	新竹
需水量(萬噸/日)		17	51	148	79	131	64
供水能力 (萬噸/日)	SI 反推	26	54	395	89	114	50
	DPD 反推	23	44	406	98	112	52
回復力 (%)		-	46	-	42	0	17
失效最長延時(旬)		0	6	0	5	7196	18
平均失效時間(旬)		-	2	-	2	7196	6
平均運作時間(旬)		7200	55	7200	298	4	30
脆弱度		1	0.96	1	0.992	0.001	0.83

## 五、脆弱度及風險分析

考量北部區域於氣候變遷影響下用水需求變化與河川水源變化，根據現況水資源設施與未來可能的水資源開發計畫，分析各分區現況及因應氣候變遷的缺水潛勢，再根據各標的缺水風險分析成果，製作北部區域面臨缺水之風險地圖。風險地圖是由脆弱度及危害度地圖推求，危害度分為公共給水危害度與農業用水危害度(表 7)，依據前期研究，以 5 個等級的缺水災害危害度，為考慮此缺水危害為常態威脅，以 2 年重現期之 DPD(50% 超越機率)為公共給水危害度之劃分依據；農業用水則以 15%~20% 缺水率為影響產量之臨界點，訂為等級 2 之危害度，低於此缺水率仍可正常運作，高於則必須藉由管理與輪作來維持農業之耕作，而高於 40% 則視為相當嚴重等級。脆弱度部分，生活用水採用人口密度為脆弱度因子，工業用水採用工業生產產值，而農業用水則採用水稻面積為脆弱度因子(表 8)。風險度分級則如(表 9)，並以 A1B 之最劣情境為例，展示北部區域生活用水、工業用水及農業用水水資源風險地圖(圖 4 至圖 7)。

表 7、危害度分級表

危害度		1	2	3	4
公共給水	DPD	<100	100~600	600~3500	>3500
農業用水	缺水率(%)	<15	15~20	20~30	30~40

表 8、水脆弱度分級表

	脆弱度	1	2	3	4	5
生活用水	人口密度 (人/平方公里)	<174	174~468	468~967	967~2771	>2771
工業用水	產值(億元)	<6.2	6.2~23.0	23.0~89.4	89.4~254.6	>254.6
農業用水	水田面積(公頃)	<97	97~607	607~1387	1387~2221	>2221

表 9、風險度分級表

分險度	脆弱度					
	分級	1	2	3	4	5
危害度	1	1	1	1	1	2
	2	1	1	2	2	3
	3	1	2	2	3	4
	4	1	2	3	4	5
	5	2	3	4	5	5

(a)現況

(b)民國 120 年無氣候變遷

(c)A1B 情境最劣

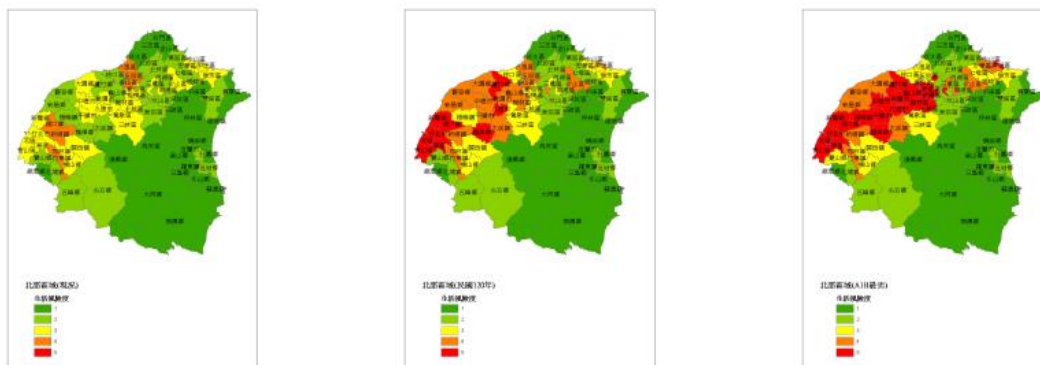


圖 4、北部區域各分區生活用水缺水風險地圖

(a)現況

(b)民國 120 年無氣候變遷

(c)A1B 情境最劣

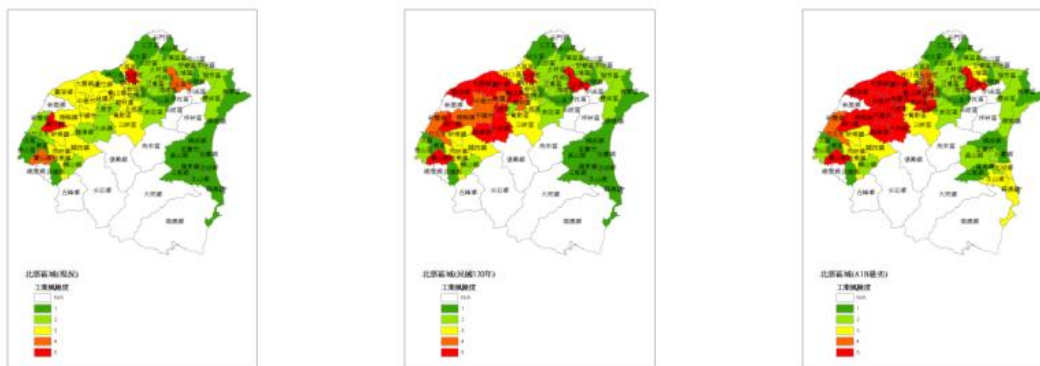


圖 5、北部區域各分區工業用水缺水風險地圖



圖 6、北部區域各分區農業用水缺水風險地圖



圖 7、北部區域水資源風險地圖

## 六、擬定及評估因應氣候變遷之水資源強化策略

依循「分散型調適策略」的概念，根據系統特性賦予適當的調適策略，期望在危機發生時能藉由自身的援救系統解決危機。根據分析北部風險主要問題有 9 項，分別為水源不足、需求成長、水資源設施不足、整合性管理彈性、氣候變遷調適決策能力不足、農業灌溉用水有效利用與生態用水競合、土地利用改變影響水資源供給壓力、社會大眾認知提升以及區域差異。

經建會(民國 101 年)在「國家氣候變遷調適政策綱領」報告中提出 6 項我國面對氣候變遷時水資源領域將面臨的挑戰，該報告提出之水文的衝擊、河川流量的衝擊、供水系統的衝擊及農業灌溉型態的衝擊，另水利署(民國 100 年)於「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」中建議之節約用水、有效管理、彈性調度以及多元化水源開發等 4 大策略，本計畫參考以上報告提出之觀點，並針對北部分區風險度提高之原因提出相對應之調適策略，如下：

1. 穩定供水能力：透過多元供水系統增加水資源供給來源，並藉由系統整合確保供水穩定度。
2. 確保合理用水需求負荷：以供水能力為限制有效的需求管理與合理調配水資源
3. 強化彈性管理能力：提高水資源預警與風險管理能力，降低水資源脆弱度與提高回復力。
4. 掌握水資源資訊與不確定性。

5. 集水區保育與合理土地利用規劃：提高非氣候因子可能帶來衝擊之調適能力。
6. 其他(社會經濟、產業與科技發展)：分擔風險、提高民眾認知與氣候變遷水利產業之發展。

## 七、訂定水資源調適計畫

為強化北部水資源因應氣候變的調適策略，提供安全的基礎用水及追求水資源永續利用之目標，本計畫所擬定之調適策略包含節約用水、有效管理、彈性調度、及多元化水源開發等 4 大調適方案。其中，調適計畫分別針對零方案及既有方案進行探討，而既有方案依據臺灣北區域水資源經理基本計畫報告所提出之既定調適策略，將其直接引用報告中分析；若既有方案仍無法滿足未來供需缺口，則輔以強化策略以提供可能之策略，則以效用指標進行分析評估。

### 7.1 水資源調適策略路線圖訂定

利用英國 UKCIP 調適精靈(圖 8)分析各水資源分析所遭遇之問題，分析可能之強化策略，接著透過多準則排序評估法，作為調適方案執行優先順序之參考，分析流程如(圖 9)。北部區域之強化策略說明如(表 10)，由於分析後宜蘭縣、基隆市以及臺北市地區水資源供需狀況良好，調適策略採取加強現有之環境監測系統即可，故僅列出新北市、桃園縣、新竹縣市強化策略，其中，節水方案最為有效而且執行效率高，再來是大型的水資源工程可供給的水量大但需耗費較長工程時間，加強管理行策略雖可長期執行，但對於供水能力或減輕供水負荷之影響較小。

加入調適策略後之北部區域水資源風險地圖如圖 10，以桃園地區為例，當板新地區供水改善計畫二期工程與板新大漢溪水源南調桃園計畫工程完工，且可順利提供桃園地區每日 31 萬噸之水量，則可提供桃園地區需水量，降低桃園地區之供需缺口，分析結果，並與圖 7-(c)比較，得知納入此方案考量後可有效降低桃園地區之風險度。



圖 8、 UKCIP 調適精靈評估流程





圖 9、調適方案評估流程圖



圖 10、A1B 情境最劣下加入調適策略後水資源風險地圖

表 10、各縣市既有方案與強化方案一覽表

縣市	既有方案	強化方案
新北市	板新供水改善計畫第二期 工業節約用水	非氣候因子之資料收集與分析 雨水儲集系統 汰換舊漏自來水管線
桃園縣	中庄調整池工程計畫 工業節約用水 板新地區供水改善計畫二期工程 與板新大漢溪水源南調桃園計畫工程	埤塘 水庫淤積清理 淨水場供水能力增加
新竹縣	海水淡化廠 生活節約用水 工業節約用水	建立水權轉讓制度 雨水儲集系統 跨區引水

## 7.2 水資源調適策略檢核機制與因應情境改變之方案檢討

在確保未來北部區域水資源供需平衡的目標下，在各項策略及方案執行時，須在適當的時機進行檢核，確定採取之策略是否達到預期目。由於氣候變遷具有不確定性，如何針對氣候變遷之不確定性考量適合之檢核機制亦為一重要課題，研究中參考英國 UKCIP 調適精靈提出之調適方案檢核及檢討流程，將檢核流程分為 3 階段檢討：

1. 調適策略或方案是否有效：UKCIP 建議決策者團隊可藉由回答關鍵問題，在回答問題並提出答案過程中，可協助確定調適策略或方案是否有效。
2. 檢核調適策略方案之頻率：建議 4 年檢核一次，而當區域遭受極端水文或氣象事件衝擊後，或是得到新的重要氣候變遷資訊時，都需立即再次檢核調適策略或方案。
3. 何時該改變或修正氣候變遷調適策略：當調適方案之效用不如決策者預期時或得到之資訊明確顯示與過往評估不同時，應修正或重新檢討調適策略或方案。

## 八、結論與建議

### 8.1 結論

受到氣候變遷的影響，北部地區河川流量在豐水期 A1B 情境下，僅蘭陽溪流域之蘭陽大橋及中山大橋與淡水河流域之五堵、屈尺及三峽站之流量減少，而 A2 及 B1 情境下，所有流域之流量都呈現增加的情形；枯水期在不同的情境中，河川流量皆呈現減少的情形；全年河川流量變化則僅在 B1 情境下，河川流量有增加的可能，但增加的幅度約只有 5%。

根據研究結果指出淡水河流域所蘊藏的天然年可更新水資源量最為豐富，其次為蘭陽溪流域。鳳山溪流域因平均高程較低，導致流域平均溫度較高，使得蒸發散量較高有關。頭前溪流域綜合評估結果看出，未來天然年可更新水資源量呈現增加之趨勢。地下水補注量之影響，單位面積地下水補注量以蘭陽溪流域較高，淡水河流域次之，鳳山溪及頭前溪流域最低。地下水補注總量則以淡水河流域最高，蘭陽溪流域次之，鳳山溪及頭前溪流域最低。總評氣候變遷對供水系統的衝擊，宜蘭、臺北供水系統衝擊影響不大，仍可維持正常供水運作，基隆、板新、桃園、以及新竹地區則是在容忍度 SI 為 0.5 之條件下供水能力雖可滿足需水量，但有缺水事件發生。

水資源風險地圖評估顯示宜蘭縣、基隆市與臺北市之供水能力皆可滿足需求。新北市在氣候變遷之 A1B 情境下，水資源風險度提高之區域有蘆洲、泰山、新莊、板橋及土城，其中以蘆洲風險度最高。桃園地區在民國 120 年無氣候變遷衝擊條件下，龜山鄉與龍潭鄉風險度最高。新竹地區水資源風險地圖結果在無氣候變遷影響下，竹北市、新豐鄉及新竹市之風險度增加 1 級；在加入氣候變遷的影響後，A1B 情境下新埔鎮、關西鎮及寶山鄉之風險度從等級 2 提升至等級 3。

由於宜蘭縣、基隆市以及臺北市地區水資源供需維持平衡狀態，在調適策略部分採取加強現有之環境監測系統即可，亦可針對非氣候因子資料加以蒐集降低評估風險時之不確定性。新北市可採行之調適策略除非氣候因子資料收集與加強供需情勢監測外，還有雨水儲集系統加強管線末端之地區之供水彈性，汰換舊漏管線提升可供給之水量。桃園地區之調適策略主要有埤塘、水庫淤積清理、增加淨水場供水能力、汰換舊漏管線等。新竹地區除加強管理類之調適方案外，為降低新竹地區之公共給水危害度可採取之措施有增加淨水場供水能力、新增管線、汰換舊漏管線。

## 8.2 建議

氣候變遷影響評估需使用龐大資料計算，工業用水量部分由於各鄉鎮市區不同月份的用水評估未能完全掌握，為正確評估未來工業用水需求量，建議未來應結合自來水事業單位，進一步評估各月份的用水量，以評估更細節的用水規劃。農業用水部分目前僅考慮水田，未來可將種植蔬菜、水果、或其他經濟作物之用水量納入考量。但在農業用水資料取得部分，執行上諸多困難，若能將所有水資源相關資料整合至一資料庫或供享平台，可提高計畫執行效率與降低評估結果之不確定性。

由於氣候變遷可能導致作物生長期或適合種植的作物改變，造成水資源需求的改變，故建議未來可結合農業政策，同時評估氣候變遷導致農作物制度調整對水資源需求之影響，並分析可供水量變化對糧食生產之影響。目前本研究對脆弱度評估僅使用單一因子做計算，未來可將與用水相關之因子納入考量。此外，於氣候變遷對地下水補注量之衝擊評估，僅使用水平衡之概念作估算，並未建構地下水含水層模式。為能確實了解地下水可使用量，未來可針對地下水豐富之地區建構地下水模式。

根據北部區域水資源脆弱度、危害度及風險地圖，可了解在未來氣候變遷下哪些區域會容易產生缺水事件，且造成缺水之因素可能為何，此類資訊可供相關單位盡早準備因應措施。然氣候變遷可能有不確定性產生，因此建議後續研究除針對氣候變遷對未來氣象條件之不確定性進行分析研究之外，對水文事件即可供水量等亦須進行不確定性分析，甚至在強化策略部分亦應考慮氣候變遷的不確定性可能對調適策略造成的影響。

## 參考文獻

1. 行政院經濟建設委員會(2012)，「國家氣候變遷調適政策綱領」。
2. 行政院國家科學委員會，童慶斌(1997)，「土地利用與氣候變遷對大甲溪上游流量之衝擊」。
3. 行政院國家科學委員會，游保杉(2000)，「高屏河流域區域日降雨-逕流之研究(III)」。
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2011)，「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計畫(2/2)」。
5. 經濟部水利署(2009)，「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」。
6. 經濟部水利署(2009)，「臺灣北部區域水資源經理基本計畫」。
7. 連宛渝、童慶斌、何宜昕、戴嘉慧、莊立昕，2013，建立環流模式推估能力評比之方法，農業工程學報，59(1)pp.1-14。
8. 英國 UKCIP (UK Climate Impacts Programme) 調適精靈(Adaptation Wizard)。  
<http://www.ukcip.org.uk/wizard/>
9. Barry Smit, Johanna Wandel (2006) Adaptation, adaptive capacity and vulnerability., Global Environmental Change 16, P. 282-292.
10. Hashimoto, T., J. R. Stedinger, D. P. Loucks, Reliability (1982) Resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, Vol. 18, P.14-20.
11. Loukas, A. Vasiliades, L., and Dalezios, N. R., 2002, "Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada." Hydrology and Earth System Sciences 6(2): 211-227.