

NCDR 107-T04

以IPCC風險定義探討氣候變遷下 水資源風險評估與調適應用

Study of climate change risk assessment and adaptation
application of water resources from IPCC risk definition



國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 108 年 01 月

NCDR 107-T04

以 IPCC 風險定義探討氣候變遷下 水資源風險評估與調適應用

Study of climate change risk assessment and adaptation
application of water resources from IPCC risk definition

劉子明、鄧澤宇



國家災害防救科技中心

中華民國 108 年 01 月

中文摘要

欲進行氣候變遷之管理與調適，其當務之急在於落實風險溝通，也就是氣候變遷風險評估結果能夠系統性的解讀與應用於政策。若要落實風險溝通，則必須遵循國際規範，使用國際相同定義。本研究將參考 IPCC 第五次評估報告對於風險的定義，探討氣候變遷風險評估與調適評估過程中，如何針對不同議題與層級訂定風險評估架構。本研究先以氣候調適六步驟做為風險評估步驟，以此說明 IPCC AR5 風險定義在風險評估過程中之水資源風險鑑別方法與架構，並以案例進行分析，同時將本研究之風險鑑別方法套用到水利署水資源風險評估結果，以說明差異以及應用性。

關鍵字： 氣候變遷、風險溝通、標準化、調適步驟

ABSTRACT

In order to manage and adapt to climate change risk, it is imperative to implement risk communication, that is, the results of climate change risk assessment can be systematically interpreted and applied to policies. To implement risk communication, you must follow international norms and use the same international definition. This study will refer to the definition of risk in the IPCC Fifth Assessment Report and explore how to design a risk assessment framework for different issues and levels in the climate change risk assessment and adaptation assessment process. This study first uses the six steps of climate adaptation as a risk assessment step to illustrate the IPCC AR5 risk definition method and structure for water risk identification in the risk assessment process. The risk identification method was also applied to the water resources risk assessment results of the Water Resources Department to illustrate the differences and applicability.

Keywords: climate change, risk communication, standardization, adaptation steps

目錄

第一章 前言.....	1
第二章 氣候變遷風險定義	3
2.1 IPCC 之氣候變遷風險定義	3
2.2 水資源氣候變遷風險定義	4
第三章 調適步驟與風險鑑別	9
3.1 調適步驟	9
3.2 風險模板	10
第四章 應用風險模板之風險評估	14
4.1 風險模板應用案例一-水資源風險評估應用	14
4.1.1 水資源風險模板之建立	14
4.1.2 風險評估方法	16
4.1.3 指標與分級	18
4.1.4 北部水資源風險評估	21
4.2 風險模板應用案例二-水資源既有圖資之應用	26
第五章 結果與討論	36

圖目錄

圖 1 IPCC-AR5 對於風險、脆弱度、暴露度與危害之核心概念	4
圖 2 本研究依照 IPCC AR5 風險定義初步擬定之水資源風險定義草稿.....	7
圖 3 TaiCCAT 氣候調適六步驟(童慶斌等，2015)	10
圖 4 氣候風險模板之因子關係圖（設計範本）	12
圖 5 氣候風險模板之指標產出圖（設計範本）	12
圖 6 水資源供水領域風險模板因子關係圖	15
圖 7 水資源供水領域風險模板指標產出圖	15
圖 8 DPD 指標危害度分級（水利署，2012）	19
圖 9 生活用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖	20
圖 10 工業用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖	20
圖 11 農業用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖	21
圖 12 生活用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境).....	22
圖 13 工業用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境).....	23
圖 14 農業用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境).....	23
圖 15 各用水類別暴露度圖	24
圖 16 各用水類別脆弱度圖	24
圖 17 公共用水危害度圖(現況/民國 120 年/最劣情境).....	25

圖 18 農業用水危害度圖(現況/民國 120 年/最劣情境).....	25
圖 19 本研究各用水類別暴露度圖	27
圖 20 水利署計畫及本研究全台生活用水脆弱度圖	28
圖 21 水利署計畫及本研究全台生活用水風險度圖(無氣候變遷情境)	29
圖 22 水利署計畫及本研究全台生活用水風險度圖(A2 情境)	29
圖 23 水利署計畫及本研究全台工業用水脆弱度圖	30
圖 24 水利署計畫及本研究全台工業用水風險度圖(無氣候變遷情境)	31
圖 25 水利署計畫及本研究全台工業用水風險度圖(A2 情境)	32
圖 26 水利署計畫及本研究全台農業用水脆弱度圖	33
圖 27 水利署計畫及本研究全台農業用水風險度圖(無氣候變遷情境)	34
圖 28 水利署計畫及本研究全台農業用水風險度圖(A2 情境)	34

表目錄

表 1 氣候風險模板之資料來源表（設計範本）	13
表 2 風險定義各因子與資料來源	16
表 3 各用水類別暴露度、脆弱度因子列表	19
表 4 選用模擬 RCP8.5 情境之 GCM 列表.....	21



第一章 前言

近年來，由於氣候變遷導致氣候異常與極端化，於全球各地誘發各式災害，隨著學界對於氣候變遷研究的逐漸深化，人類對於氣候變遷的態度亦由最初的懷疑開始轉向確信，各界除了了解研究氣候變遷的成因與影響，也進一步始著手研究如何面對氣候變遷與如何調適氣候變遷帶來的風險。相較於世界上的其他地區，臺灣於近年來已遭受多次極端天氣帶來之嚴重衝擊，國人累積了豐富的承災經驗後，也深刻體認到如果要因應未來可能出現的更大挑戰，勢必無法憑藉著傳統的管理方式，而需推動具有系統性、整合性的管理與調適方案。

氣候變遷許多方法與定義隨者研究進展不斷更新，也因此許多名詞在定義上模糊不清，造成應用與溝通困難。以「脆弱度」為例，該名詞是近幾十年來，最被科學社群廣泛應用與探討卻也最為模糊的概念之一。在氣候變遷領域，學界對於脆弱度的解釋往往會參考 IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）評估報告書裡的定義。然而 IPCC 對於脆弱度之定義也隨著歷代報告書的出版而有所演進與修正。

IPCC 第三次報告(McCarthy et al., 2001)對脆弱度的定義為「脆弱度乃系統易受或無法處理氣候變遷（包括氣候易變性與氣候極端事

件) 負面效應影響的程度，並脆弱度為定義為暴露度 (exposure)、敏感度 (sensitivity) 和調適能力 (adaptive capacity) 的函數來評估脆弱度。接續此版報告的定義，IPCC 第四次報告 (Parry et al., 2007) 進一步說明「氣候變遷脆弱度是指地球物理、生物和社會經濟系統容易受到且無法應對氣候變化的不利影響」。然而，到了 2014 年所出版的第五次報告 (Field et al., 2014)，IPCC 報告內容從過去以脆弱度評估為重心，轉移到以氣候變遷風險評估為重心，並對風險、脆弱度、暴露度重新加以解釋與定義，其內容與 AR4 以及之前的報告有所不同。

本研究之氣候變遷風險評估流程乃參考科技部所研究推出之氣候調適六步驟 (童慶斌等，2015)，該流程將由最初的問題界定為始，並逐步評估現況與未來可能遭受之風險，進而針對風險的種類與屬性界定出適合的調適選項，並由眾多調適選項中擬定出適合之調適路徑，進而透過後續的監測以了解調適方案之執行情況，並作為未來修正之參考。

第二章 氣候變遷風險定義

2.1 IPCC 之氣候變遷風險定義

IPCC 第五次評估報告，針對報告中所提及的風險(Risk)，也就是氣候變遷影響所帶來的風險做了定義，並成為氣候變遷風險與調適評估之風險定義與依據。其定義氣候變遷風險為脆弱度、暴露度以及危害的相互作用，如圖 1 所示。其中危害(Hazard)是指可能發生的自然或人為物理事件或趨勢，或物理影響。它可造成生命損失、傷害或其它健康影響，以及財產、基礎設施、生計、服務提供、生態系統以及環境資源的損害和損失。在 IPCC AR5 中，危害一詞通常是指與氣候相關的物理事件、趨勢或其物理影響；暴露(Exposure)是指對於人類生命、生計、物種或生態系統、環境服務與資源、基礎建設、經濟、社會與文化資產有可能遭受不利影響的位置與設置。脆弱度(Vulnerability)是指容易受到負面影響的傾向(propensity)與本質(predisposition)。脆弱度涵蓋多種概念，包括敏感性、容易受災特性、以及缺乏應付與適應的能力。

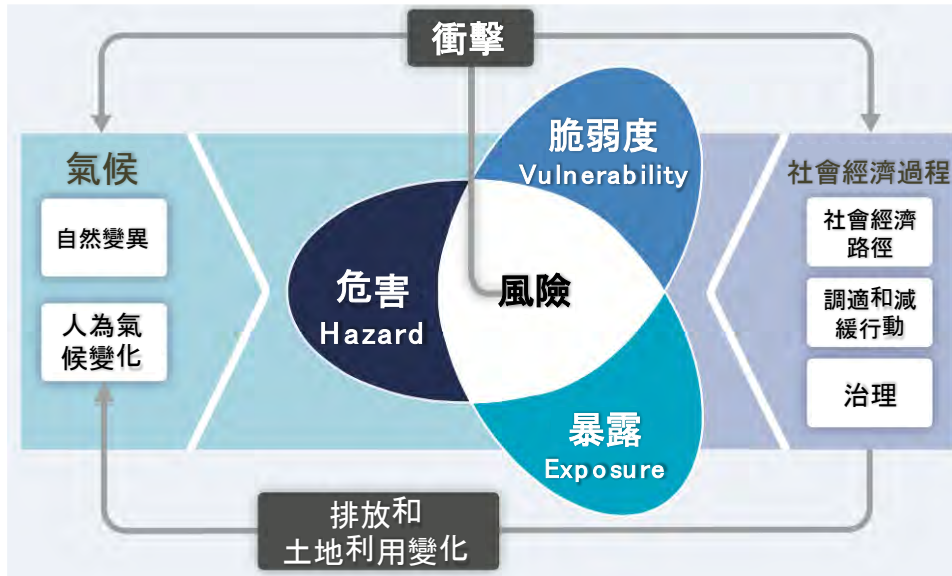


圖 1 IPCC-AR5 對於風險、脆弱度、暴露度與危害之核心概念

2.2 水資源氣候變遷風險定義

根據圖 1 IPCC-AR5 對於風險、脆弱度、暴露度與危害之核心概念，本研究從氣候變遷關鍵議題為起點，以供水系統為保全對象思考水資源風險於 IPCC 風險定義下之架構為何。

台灣水資源受未來氣候變遷影響，可能導致既有問題加劇，降雨型態與水文特性之變化，將可能提高河川豐枯之差異，進而增加河川污染以及複合型災害風險，茲依據不同面向探討氣候變遷對水資源之衝擊如下。

- (一) 水文衝擊：過去研究結果顯示，未來台灣降雨量、逕流量及蒸發散量受氣候變遷影響而有增加的趨勢，而逕流量與蒸發散量

增加的幅度大於降雨量增加幅度，因此地下水入滲量呈漸減的趨勢。

(二) 河川流量衝擊：氣候變遷的影響，將造成未來河川豐枯差異更加明顯。以數種 GCM 模式進行情境模擬結果顯示，豐水期(夏季)流量多為增加趨勢，枯水期(冬季與春季)流量多為減少趨勢(童慶斌等，2005)。

(三) 供水系統：因為豐枯差異的增加，水庫供水及減洪能力皆受到影響(童慶斌等，2008；童慶斌等，2009)。供水系統也因為氣候變遷造成豐枯差異增加，而影響供水能力，但會因為各區供水能力的不同以及需水層面的不同，使得氣候變遷對其影響不盡相同。北部供水系統中，板新地區因為豐枯差異的增加，使得供水承载力下降。而桃園地區除了氣候變遷影響，加上需水量成長的關係，面臨缺水的風險將會增加(童慶斌等，2007 與 2008；張良正，2009)。南部原本豐枯差異極大，氣候變遷下將使得豐枯差異更明顯，使得供水承载力降低，加上未來需水量增加，將使未來缺水風險提高(童慶斌等，2009；游保杉，2009)。

(四) 複合型災害風險提高：氣候變遷下，水工結構物遭受大洪水侵

襲之風險提高（張良正，2009），顯示水工結構物遭洪水破壞造成供水困難之風險亦將提高。未來颱風等極端氣候頻率有可能增加，洪水、土砂與浮木等結合產生的複合型災害風險將相對提高，進而提高缺水風險。

（五）農業灌溉型態衝擊：未來氣候變遷影響下導致氣溫及雨量的改變，因而影響灌溉需水量。模擬結果顯示氣候變遷影響下，水稻生長初期需水量有增加的趨勢，後期之需水量則是減少。而一期作初期恰逢枯水期，氣候變遷後枯水期流量可能減少，將使得水資源調配出現問題而帶來衝擊（周玫君，2004；童慶斌等，2009）。

由上述問題分析，可以了解氣候變遷可能直接與間接影響水資源供水系統，主要關鍵議題在於氣候變遷下的供需平衡，底下必須探討的是氣候變遷如何影響供水與需水，同時考量未來社會經濟的變化來進行水資源風險評估。參照 IPCC AR5 對於風險之定義，本研究初步擬定之水資源氣候變遷風險定義草稿如圖 2。

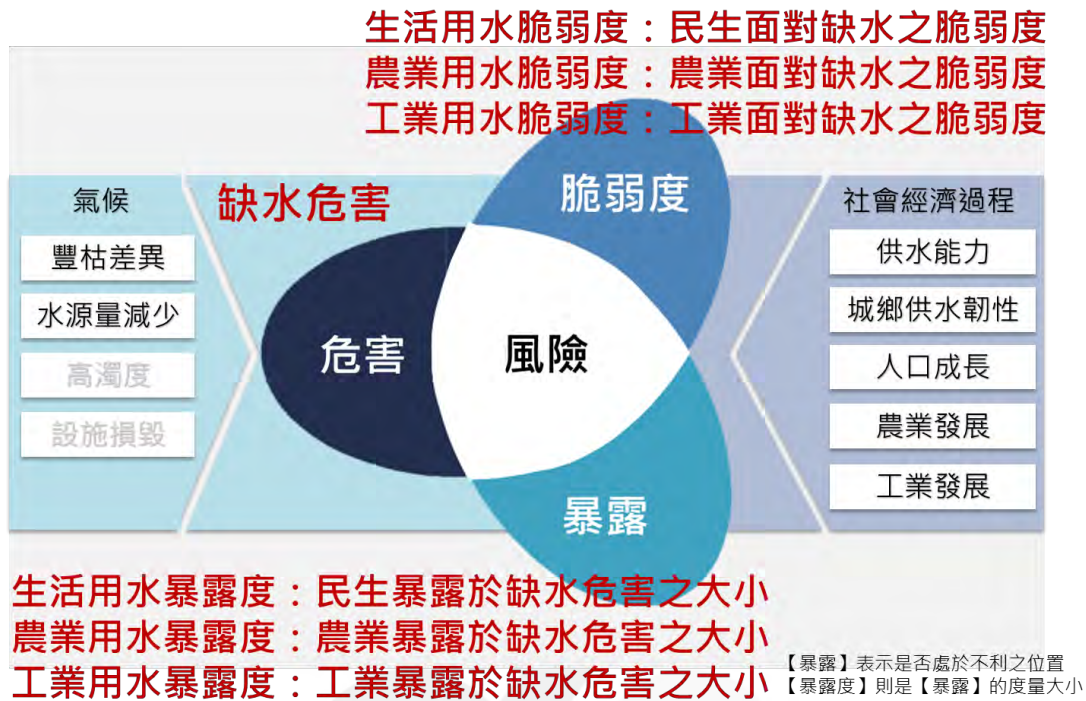


圖 2 本研究依照 IPCC AR5 風險定義初步擬定之水資源風險定義草稿

危害是指氣候相關的物理事件、趨勢或其物理影響，從關鍵議題來看，初步擬定豐枯差異、水源量減少、高濁度、設施損毀等物理事件、趨勢或其物理影響所引起的缺水為危害；而脆弱度則是指不同用水標的面對缺水之脆弱度；暴露度是指不同用水標的暴露於缺水危害之大小。脆弱度與暴露則同時受社會經濟過程所影響，包括供水能力、城鄉供水韌性、人口成長、農業發展、工業發展等。

然而，上述之風險定義草稿雖能涵蓋關鍵議題下所有的因子，但對於不同層級所面對之同樣的關鍵議題可能會有不同的解讀與關聯。主觀式的判定仍缺乏系統性的鑑識方法與流程，因此，本研究將以 IPCC AR5 風險定義為基礎，探討水資源風險鑑別方法，並以此探討

既有之水資源風險評估結果套用之可行性。

為此，本研究先以氣候調適六步驟做為風險評估步驟，以此說明 IPCC AR5 風險定義在風險評估過程中之水資源風險鑑別方法與架構，並以案例進行分析，同時將本研究之風險鑑別方法套用到水利署水資源風險評估結果，以說明差異以及應用性。



第三章 調適步驟與風險鑑別

3.1 調適步驟

科技部「氣候變遷調適科技整合研究計畫」(TaiCCAT)(童慶斌等, 2015)以 IPCC AR5 對於風險的定義為核心基礎，彙整國際間與國內氣候變遷調適步驟，包含聯合國氣候變遷調適政策綱領 (UNDP APF)、英國氣候衝擊計畫的調適精靈 (UKCIP Adaptation Wizard)、歐洲氣候調適平台的調適支援工具 (CLIMATE-ADAPT Adaptation Support Tool)，同時參考我國氣候變遷地方調適計畫，訂定氣候變遷調適能力建構之六大步驟(圖 1，以下簡稱「TaiCCAT 氣候調適六步驟」)，包括：(一) 界定問題與設定目標；(二) 評估與分析現況風險；(三) 評估與分析未來風險；(四) 界定與評估調適選項；(五) 規劃與執行調適路徑；(六) 監測與修正調適路徑。在評估資料分析工具的建立上，除了針對上述六大步驟的流程進行定義外，亦針對了上述步驟所包含的次步驟、細部工作項目進行分項，並對流程中所需使用的資料、工具以及各流程對應之產出設計了分析評估資料的檢核表，提供上述六大步驟調適流程詳細資訊，以利調適計畫之建構與執行；並作為滾動修正時，重新確認調適流程與資料、工具產出完整性之檢核用途。



圖 3 TaiCCAT 氣候調適六步驟(童慶斌等，2015)

3.2 風險模板

科技部「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫(Taiwan Climate Change projection Information and adaptation knowledge Platform，簡稱 TCCIP)(林李耀等，2018)為了讓不同研究領域與層級的能夠基於相同基準上進行氣候風險鑑別及達到風險溝通，以圖 1 IPCC-AR5 對於風險、脆弱度、暴露度與危害之核心概念為基礎發展氣候風險模板，而氣候風險模板之設計範本如圖 4、圖 5 及表 1 所示。圖 4 為氣候風險模板之因子關係圖，係依序分別從界定治理層級、保全對象、利害關係人、保全對象空間範圍、危害、暴露、脆弱度與風險評估，說明各因子之間前後相互關係。為能更完整理解危害

的定義，需清楚界定探討的關鍵議題，方能明確界定保全對象。關鍵議題係由治理層級與利害關係人所共同決定，藉由治理層級與利害關係人的共同討論，可列出欲保全之對象，並進而決定欲探討之關鍵議題。值得一提的是，此處的關鍵議題需為單一領域，較能深入討論此議題對於保全對象的影響，方能進一步量化危害，以利後續風險評估分析。另外，將關鍵議題定義為單一領域的議題亦有其他優點，當各治理層級完成操作各個單一關鍵議題的氣候風險鑑別後，即可以此模板再進一步跨層級與跨領域的分析。

為能更清楚說明危害、暴露與脆弱度之模式方法工具及各因子之資料來源，除了氣候風險模板之因子關係圖說明外，TCCIP 亦提出氣候風險模板之「指標產出圖」及「資料來源表」加以詳述各因子間之關係，讓使用者除了能理解各因子間因果關係外，亦可知道各工具所產出之指標及所需資料的來源，方便使用者一目了然。氣候風險模板之指標產出圖及資料來源表設計範本，分別如圖 5 及表 1 所示。其中，指標產出圖是根據因子間之關係，再將資料與工具的詳細情況加以詳述，以利未來後續發展跨領域或跨層級分析；而資料來源表則是協助使用者將危害、暴露及脆弱度之各因子資料來源進行說明，以利蒐集資料及建置模式使用。

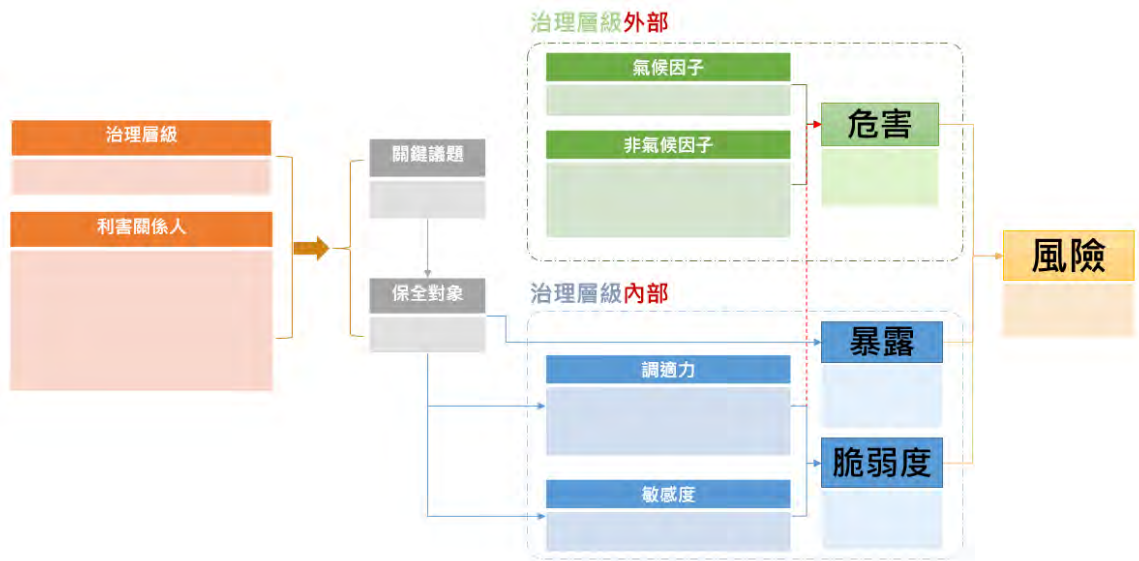


圖 4 氣候風險模板之因子關係圖 (設計範本)

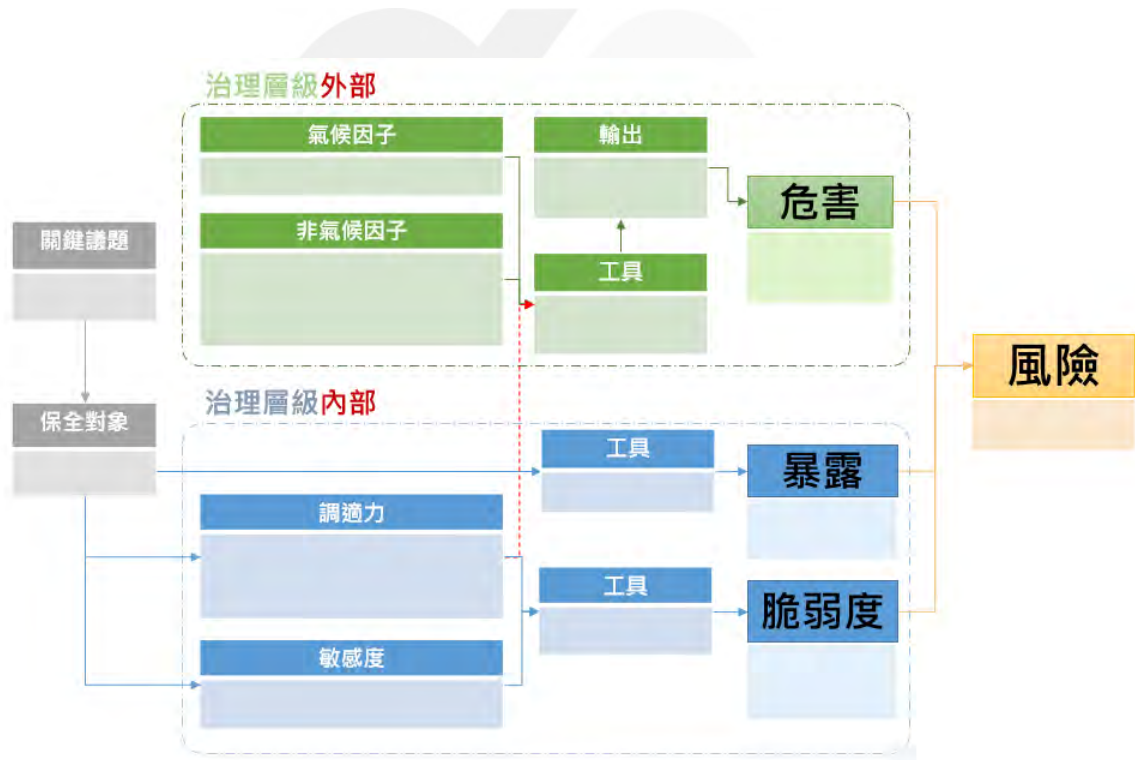


圖 5 氣候風險模板之指標產出圖 (設計範本)

表 1 氣候風險模板之資料來源表 (設計範本)

目標	要素	類別	因子	資料來源	
風險	危害				
	脆弱度				
	暴露				



第四章 應用風險模板之風險評估

4.1 風險模板應用案例一-水資源風險評估應用

本節主要目的在於以風險模板於水資源風險評估之示範操作，乃遵循 3.2 節之風險模板，建立水資源風險模板；並以水資源風險模板建立水資源風險評估方法與指標分級，再以北部分水區進行風險評估之應用。此案例乃以水利署(2012)之水資源系統動力模式為模擬模式，重新利用 AR5 情境進行模擬，產製水資源風險地圖，以說明風險模板之操作性與可應用性。

4.1.1 水資源風險模板之建立

水資源供水領域乃以水利署為上層主政與規劃單位，因此依照本研究所擬定之風險定義程序，乃以水利署為決策觀點，而利害關係人則包括地方政府、工業局、科技部、農委會、農田水利會以及自來水公司，如圖 6。由水利署與利害關係人共同決定水資源供水關鍵議題為-缺水，保全對象則為生活用水、工業用水以及農業用水使用對象-居民、產業以及農業，其脆弱度主要以本質敏感度做為量化因子，包括居民對於缺水的敏感度-年齡組成、產業對於缺水的敏感度-產業損失以及農業對於缺水的敏感度-水稻比例；而暴露則是指保全對象的分布，包括人口分布、產業分布以及農業分布；治理層級內部調適力則是跟水資源供水設施供水與輸水能力有關；危害因子可以區分為氣

候因子以及非氣候因子，氣候因子包括氣溫與降雨，非氣候因子包括集水區面積、集水區退水係數、集水區逕流曲線係數 CN、生活需水量、公業需水量以及農業需水量，各因子與資料來源如表 2 所示。

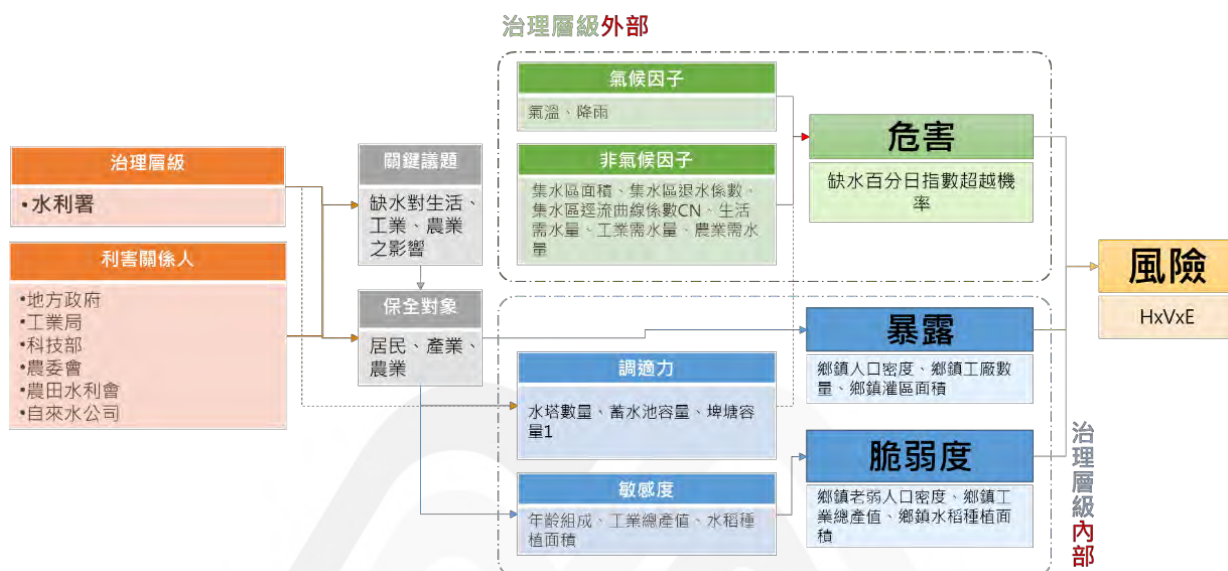


圖 6 水資源供水領域風險模板因子關係圖

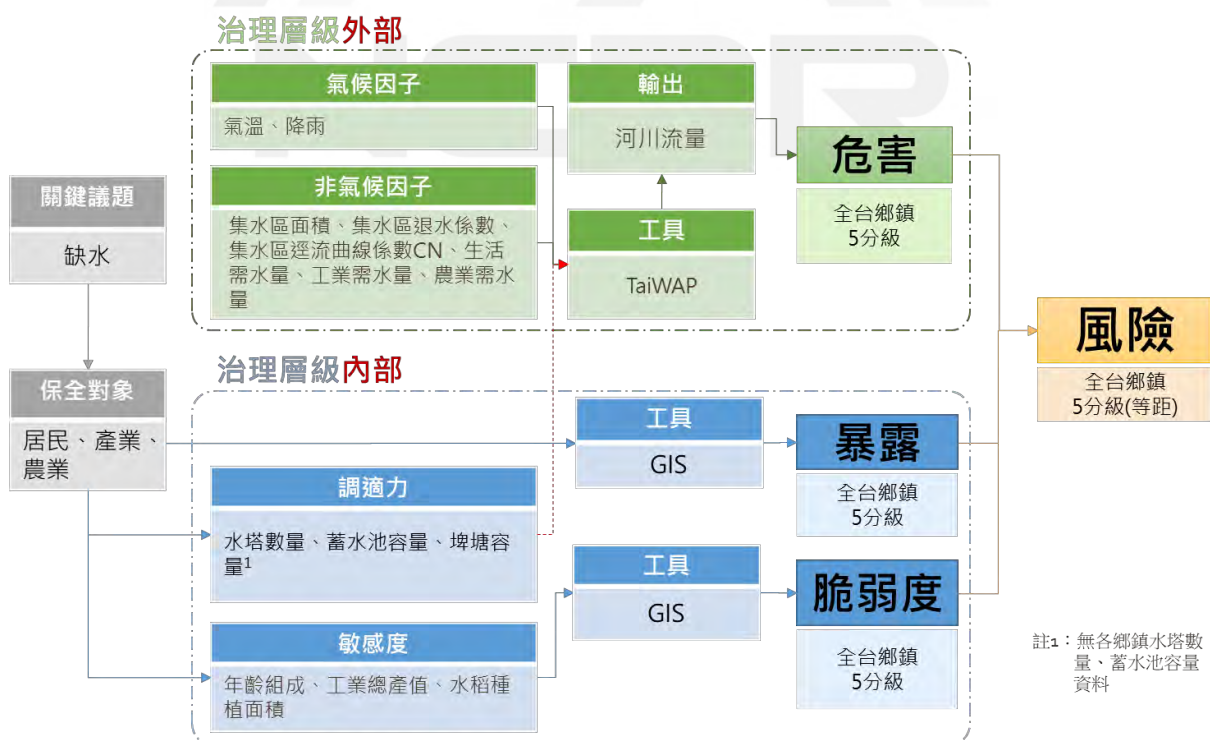


圖 7 水資源供水領域風險模板指標產出圖

表 2 風險定義各因子與資料來源

目標	要素	類別	因子	資料來源
風險	危害	氣候因子	氣溫	中央氣象局
			未來氣溫	TCCIP
			雨量	中央氣象局
			未來雨量	TCCIP
		非氣候因子	集水區面積	水利署
			集水區逕流曲線係數 CN	水利署
			集水區退水係數	水利署
			生活需水量	水利署
			工業需水量	水利署
			農業需水量	水利署
	脆弱度	調適力	水塔數量	尚無資料
			蓄水池容量	尚無資料
			埤塘容量	尚無資料
		敏感度	鄉鎮年齡組成	各縣市民政局(處)網站
			鄉鎮工業產值	100 年工商及服務業普查成果
鄉鎮水稻種植面積			農田水利會	
暴露度		鄉鎮人口密度	內政部地政司人口統計資料庫	
		鄉鎮工廠數量	100 年工商及服務業普查	
		鄉鎮灌區面積	農田水利會	

4.1.2 風險評估方法

風險評估方法乃搭配圖 6 之風險模板，先利用模式計算缺水危害度，再利用風險矩陣方式，與脆弱度與暴露因子計算出風險，流程如圖 7。分析過程乃先透過 GWLF(Haith et al. 1992)水文模式模擬出集水區流量，再將非氣候因子與治理層級內部調適力等因子建置於

VENSIM 水資源系統動力模式，透過模擬可以計算得到做為危害度的缺水百分日指數超越機率；再將暴露度與脆弱度分別無因次化後(以現況全國統計資料進行無因次化)，相乘得到 “暴露 x 脆弱度” 因子，再以危害度乘上 “暴露 x 脆弱度”，分別推求水資源供水區之生活用水、工業用水以及農業用水缺水風險，進而繪製與套疊得到水資源供水風險圖。本研究預計在二月底前完成北部供水區水資源風險圖，現階段則以旬缺水率與缺水指數進行缺水分析。

使用「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力」(水利署，2012)計畫經驗證之北部水資源系統動力模式進行評估模擬與分析，現況風險乃加入中庄調整池進行模擬分析，未來風險則加上板新二期計畫進行模擬，並使用旬平均缺水率以及缺水指數 SI 進行供水缺水分析評估，缺水百分日指標進行危害度分析評估。旬平均缺水率計算方式與缺水指數 SI 計算方式如下：

$$\text{旬平均缺水率} = \frac{\sum \frac{\text{旬缺水量}}{\text{旬需水量}}}{\text{模擬年數}} \dots\dots\dots (1)$$

$$SI = (100/N) \times \sum (D_i/S_i)^2 \dots\dots\dots (2)$$

其中，SI 為缺水指數，N 為模擬總年數，Di 與 Si 分別為第 i 年缺水量與計畫供水量。

缺水百分日指標(Deficit Percent Day Index, DPD Index)，乃考慮每年所發生的缺水強度與延時，可作為界定單一缺水事件忍受程度的依據。此指標是由日本的 Water Resources Development Public Corp. 於 1977 年提出(黃金山，1986)，用以表現連續缺水天數之影響，即針對單一缺水事件，利用每天之缺水率乘以連續缺水天數，其式如下：

$$DPD(\%) = \sum_{i=1}^N \frac{D_i - S_i}{D_i} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

其中

N：缺水事件之連續缺水日數

D_i ：第 i 日需水量

S_i ：第 i 日供水量

4.1.3 指標與分級

公共用水危害度(含生活與工業用水)，乃利用 4.1 節所提之缺水百分日指標作為危害度指標。參考水利署(2012)計算缺水風險時，乃以 2 年重現期之 DPD (50%超越機率) 進行分級，如圖 8 所示，本研究將依循其劃分標準，進行公共用水之危害度分級。

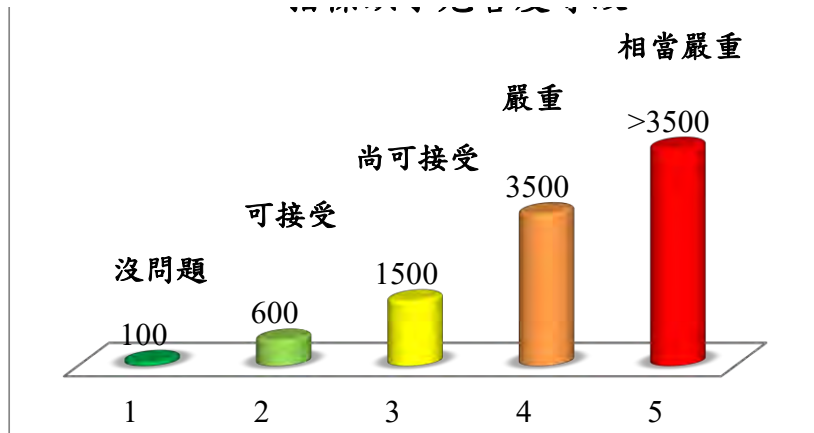


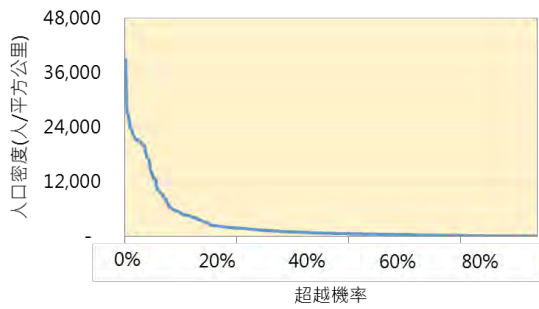
圖 8 DPD 指標危害度分級 (水利署, 2012)

生活、工業、農業用水之暴露度、脆弱度因子，乃經過風險分級方式進行資料標準化，以利不同資料間比較分析，各用水類別之暴露度、脆弱度因子如表 3 所示。

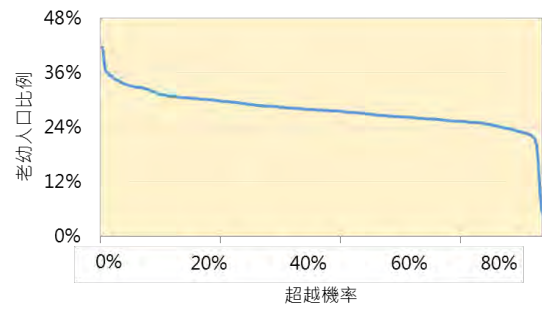
表 3 各用水類別暴露度、脆弱度因子列表

	暴露度	脆弱度	資料來源
生活用水	鄉鎮人口密度	鄉鎮老幼人口比例	內政部地政司人口統計資料庫(取 105 年底)
工業用水	鄉鎮工廠數	鄉鎮工業生產總額	工商及服務業普查報告(100 年度)
農業用水	水利會灌區面積	水稻種植面積	農田水利會 GIS 圖資

註：鄉鎮老幼人口比例=(鄉鎮 14 歲以下人口+鄉鎮 65 歲以上人口)/鄉鎮總人口



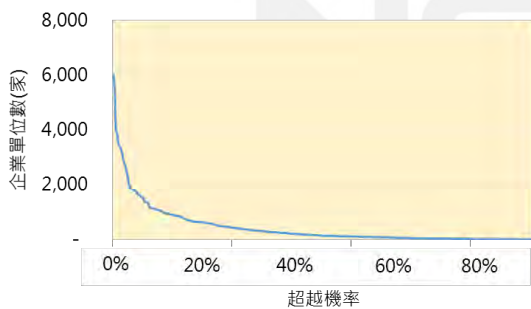
鄉鎮人口密度超越機率曲線(暴露度)



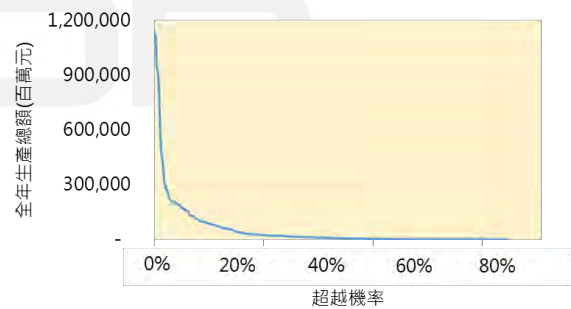
鄉鎮老幼人口比例超越機率曲線(脆弱度)

圖 9 生活用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖

風險分級方法乃利用資料本身製作其超越機率曲線，並以超越機率之百分之二十、四十、六十、八十為門檻值，將資料劃分為五級，而本研究生活用水、工業用水、農業用水之暴露度、脆弱度超越機率曲線則如圖 9~圖 11 所示：

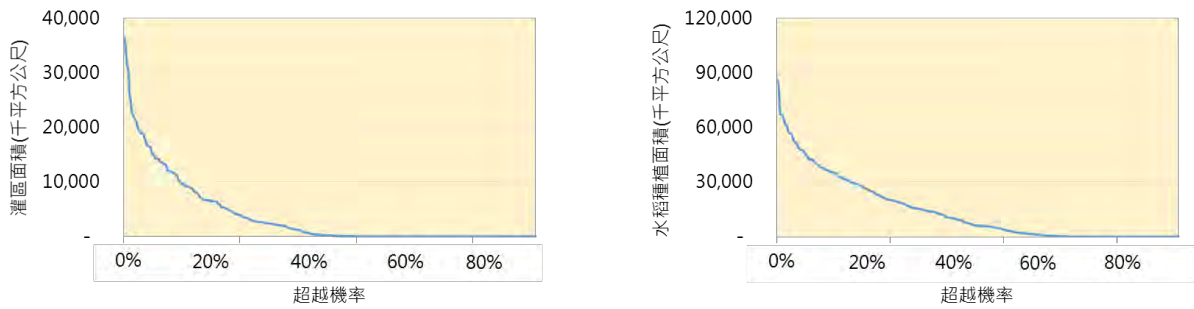


鄉鎮企業數超越機率曲線(暴露度)



鄉鎮工業生產總額超越機率曲線(脆弱度)

圖 10 工業用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖



鄉鎮灌區面積超越機率曲線(暴露度)

鄉鎮水稻種植超越機率曲線(脆弱度)

圖 11 農業用水暴露度與脆弱度超越機率曲線圖

4.1.4 北部水資源風險評估

參照 4.1.1~4.1.3 依照風險模板所建立之風險評估方法與指標計算，本案例利用水利署(2012)之北部水資源供水系統動力模式，重新以 IPCC-AR5 之 RCP8.5 情境進行水資源風險評估分析。風險評估乃使用由 TCCIP 計畫所評定之前五名 GCM 之情境資料進行評估分析，如表 4，包括 bcc-csm1-1、HadGEM2-CC、IPSL-CM5A-MR、MPI-ESM-LR、以及 NorESM1-M 等。

表 4 選用模擬 RCP8.5 情境之 GCM 列表

編號	GCM
1	bcc-csm1.1
2	HadGEM2-CC
3	IPSL-CM5A-MR
4	MPI-ESM-LR
5	NorESM1-M

本研究利用 4.1.1 所架構之風險評估方法，進行暴露度與脆弱度之資料蒐集，以建置北部水資源未來風險圖，其中包括現況風險圖

(baseline)、民國 120 年無氣候變遷情境之風險圖(Year_120)以及 RCP8.5 情境中，5 組 GCM(如表 4)模擬成果最惡劣情境之風險圖(最劣情境)，如下圖 12~圖 14 所示。過程中亦產出北部水資源各用水類別之暴露度圖、脆弱度圖以及危害度圖(現況、民國 120 年、RCP8.5 最劣情境)，其中生活用水危害度及工業用水危害度均以公共用水危害度代表，各成果如下圖 15~圖 18 所示。

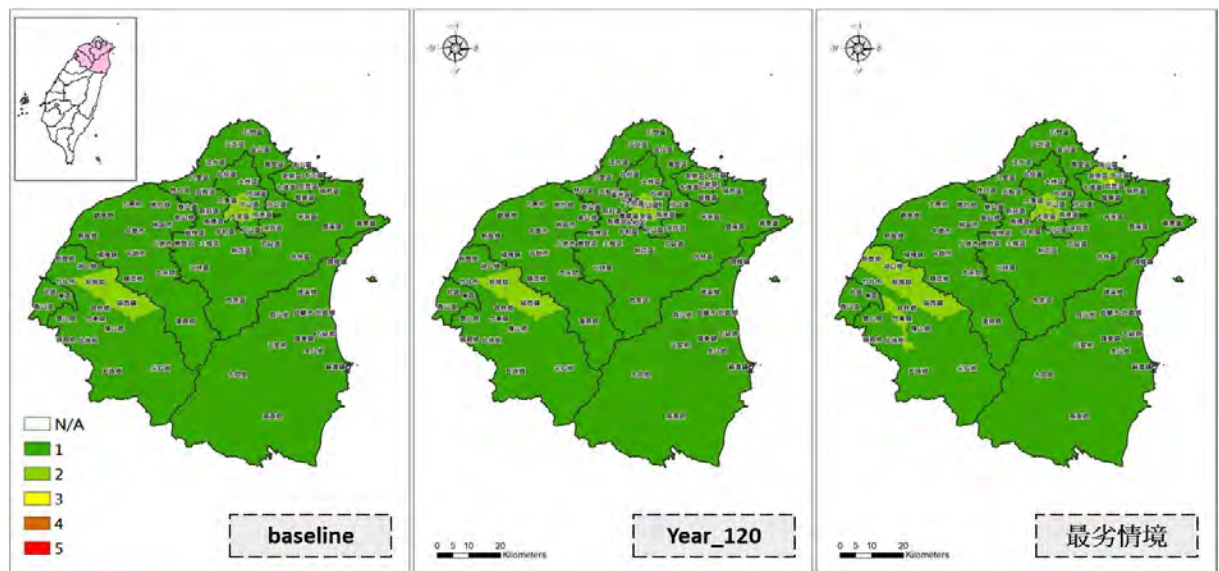


圖 12 生活用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境)

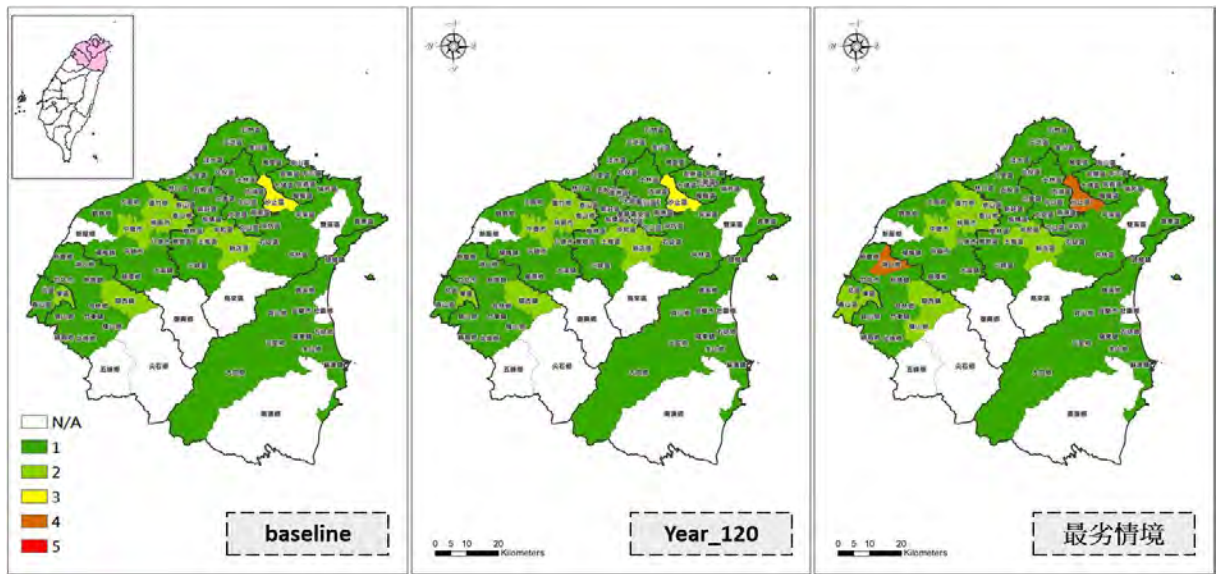


圖 13 工業用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境)

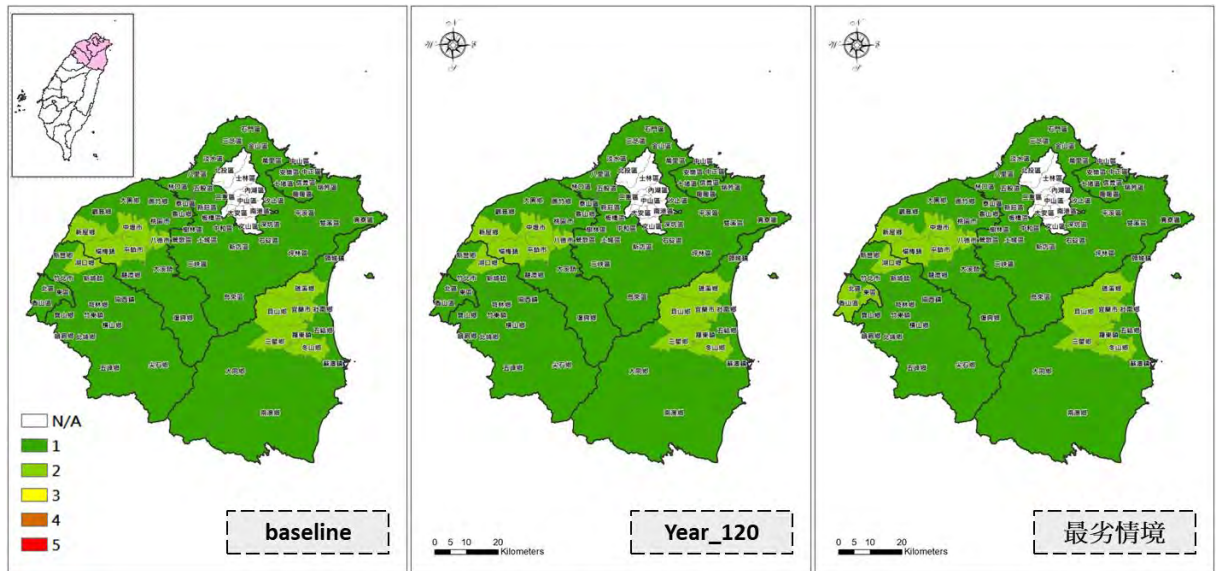


圖 14 農業用水風險圖(現況/民國 120 年/最劣情境)

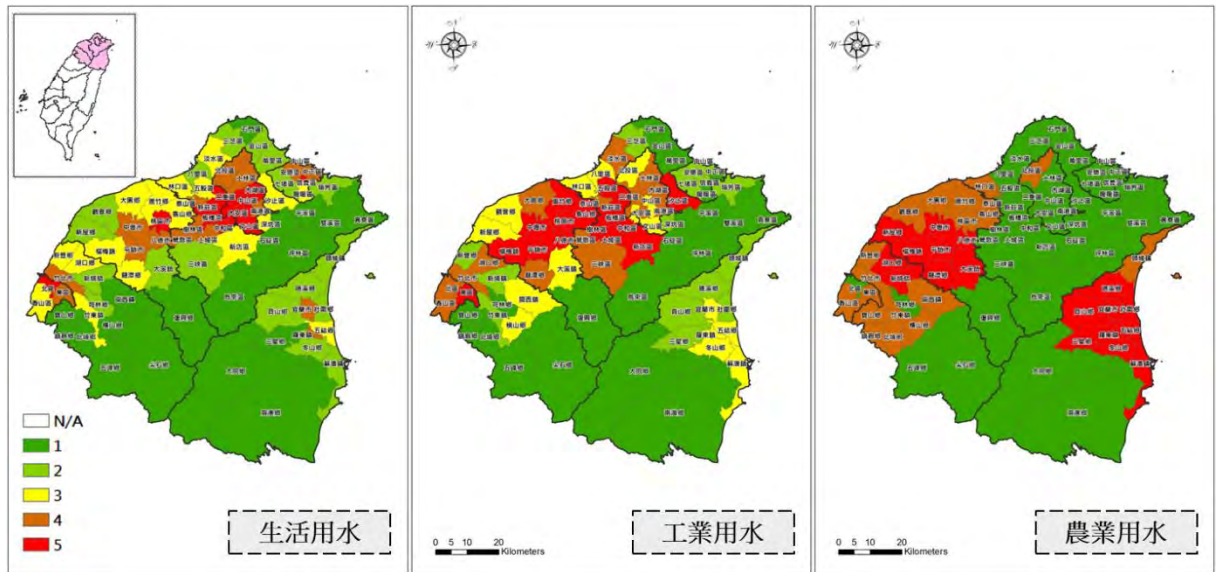


圖 15 各用水類別暴露度圖

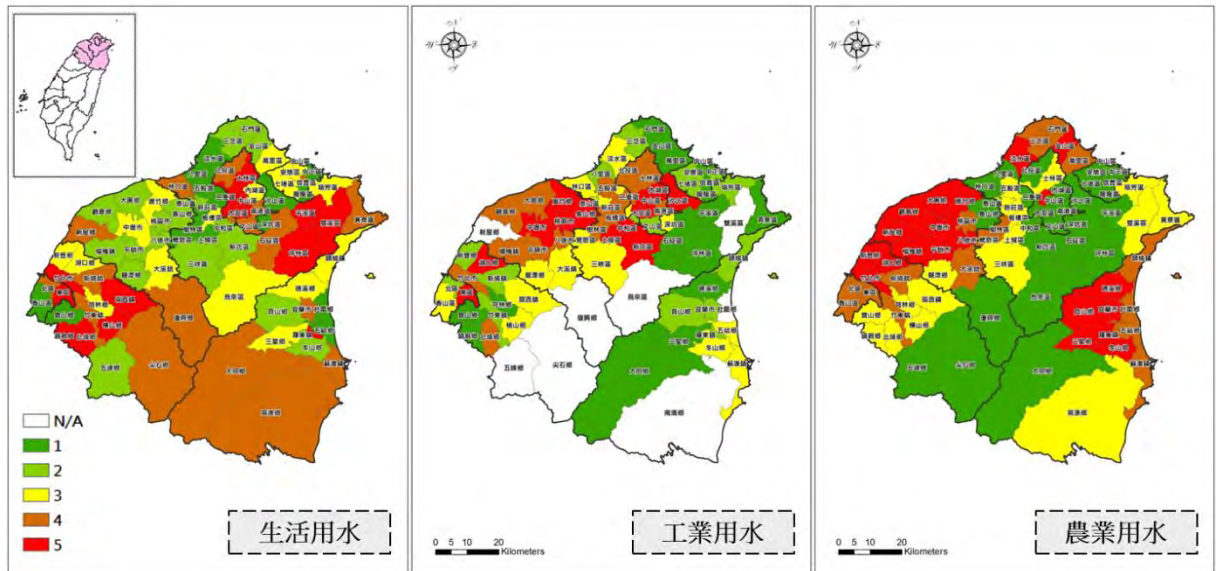


圖 16 各用水類別脆弱度圖

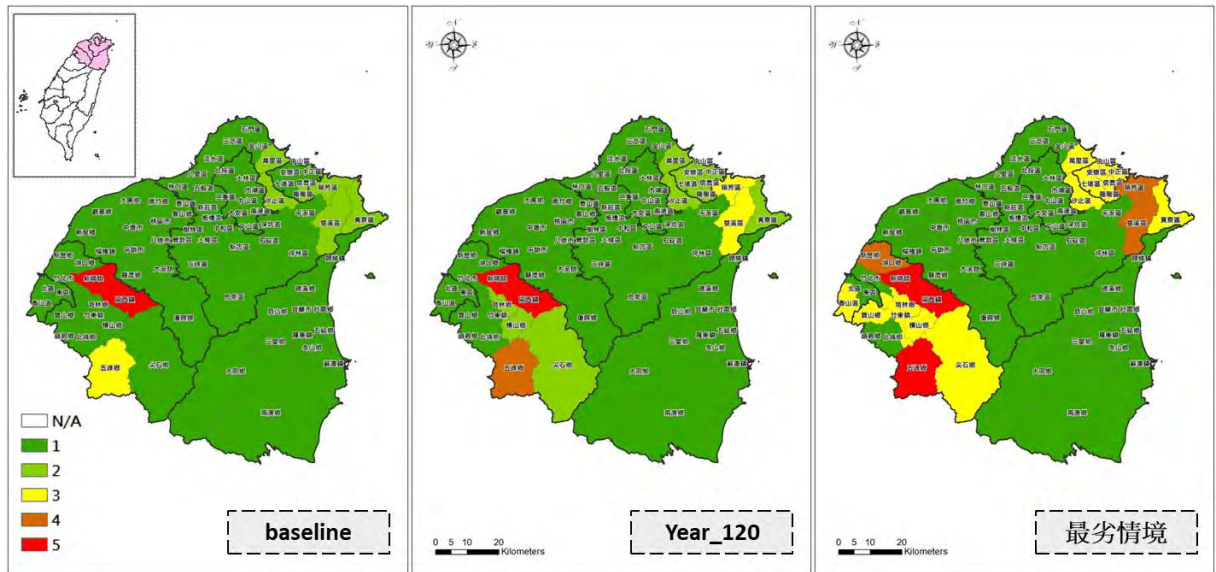


圖 17 公共用水危害度圖(現況/民國 120 年/最劣情境)

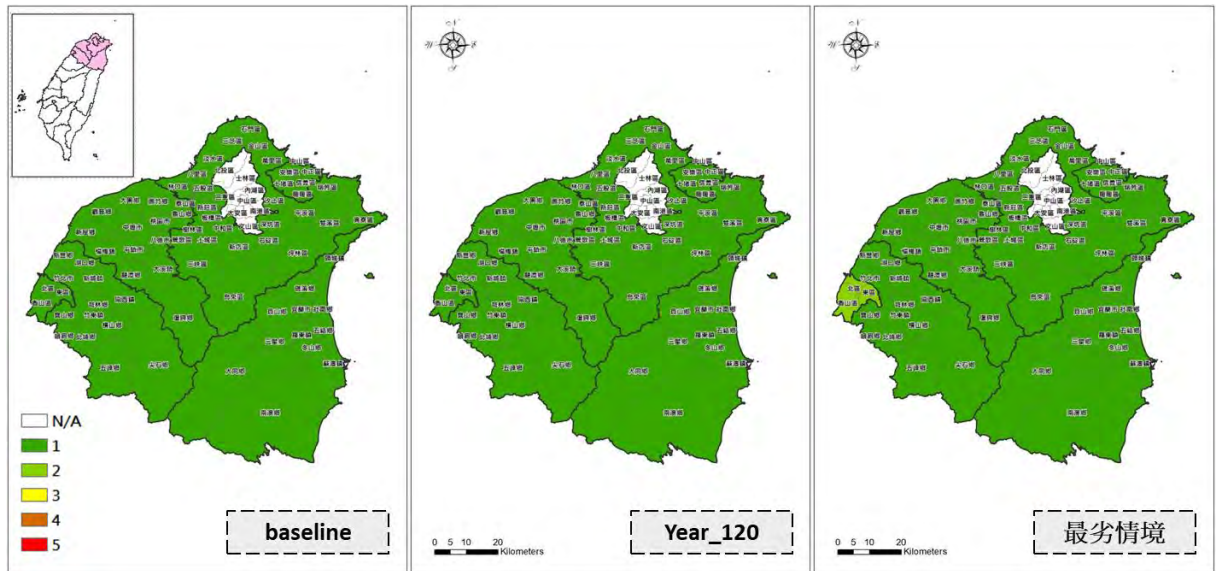


圖 18 農業用水危害度圖(現況/民國 120 年/最劣情境)

氣候變遷下供水風險以工業用水較高，其中以汐止、湖口工業用水較高，達到 4 級以上，而危害度部分相對較高之區域，公共用水危害度以新竹地區之新豐鄉、湖口鄉、新埔鎮、關西鄉、五峰鄉等危害度最高，達 4 級以上。

根據風險評估結果，調適方案可著重於新竹地區公共用水之危害

度的降低，可藉由區域調度用水(桃園調度新竹)以及新興水資源方案(新竹海淡廠)之方案，整體降低新竹地區之公共用水危害度。同時，應降低部分地區工業暴露度，以降低未來可能之水資源風險。

本案例乃以水資源為例進行風險模板之操作，從水資源風險模板之建立，到水資源風險評估，證明了風險模板之可操作性。藉由操作過程可了解調適步驟過程中，風險模板可以輔助問題之界定，釐清相關風險影響因子，並作為後續風險分析架構依據以及調適方案之擬訂參考。

4.2 風險模板應用案例二-水資源既有圖資之應用

前一節示範如何遵循風險模板之規則，建立水資源風險模板，並進行風險評估。本節乃延續 4.1 節所建立之水資源風險模板與指標，套用水利署之既有之水資源風險評估結果，以說明本研究之風險鑑別程序之應用回朔性。

水利署在民國 101 年度曾辦理「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」，進行台灣未來氣候變遷情境下水資源之風險評估。為比較本研究與上述水利署計畫在因子定義、資料選用以及所產出風險成果之差異，除暴露度以及脆弱度使用本研究架構外，危害度部分則使用水利署(2012)計畫之成果(使用 IPCC 第四

次評估報告的 SRES-A2 情境)，計算全臺於氣候變遷下之風險度，並與水利署(2012)計畫之風險地圖進行比較分析。

暴露度為本研究新增之評估因子，相對於水利署風險度計算方式(風險度=脆弱度*危害度)，本期計畫新增暴露度評估因子，故於風險度計算上有所不同(風險度=暴露度*脆弱度*危害度)，本期計畫全臺之暴露度圖如圖 19 所示。

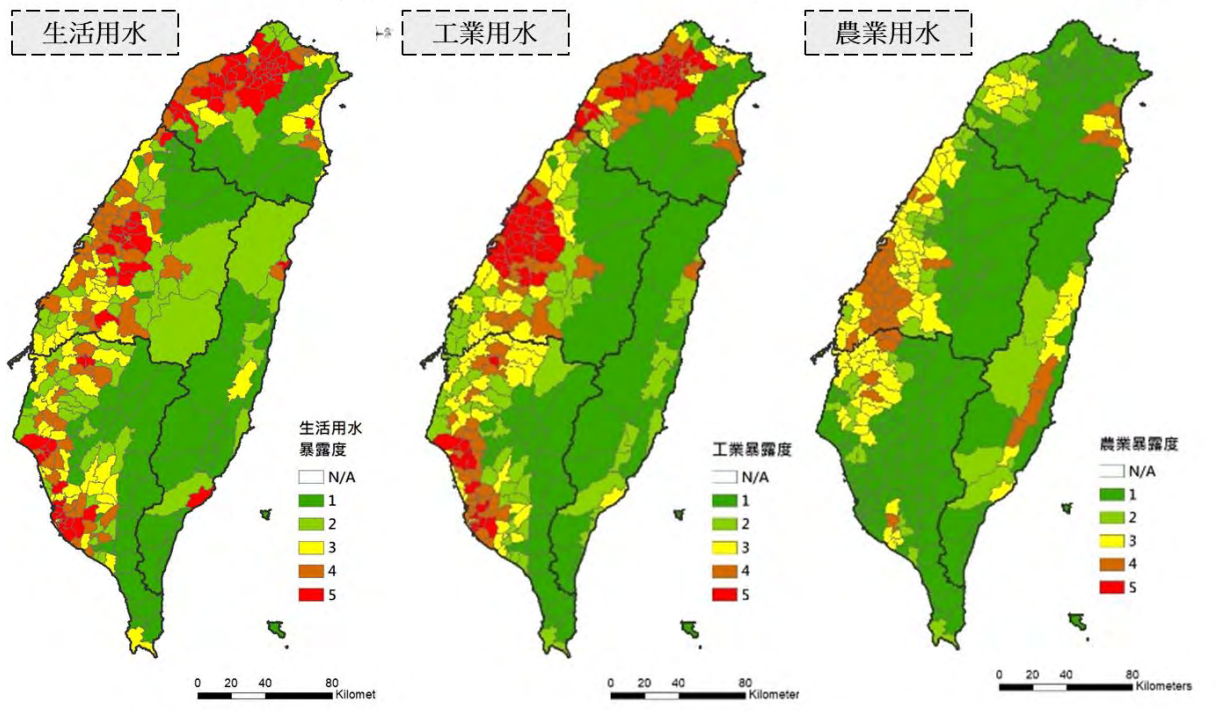


圖 19 本研究各用水類別暴露度圖

以生活用水而言，脆弱度差異部分主要來自因子定義不同，水利署計畫之生活用水脆弱度為鄉鎮市區人口密度，而本研生活用水脆弱度為鄉鎮市區老幼人口比例，下圖 20 為水利署計畫與本研生活用水脆弱度圖。

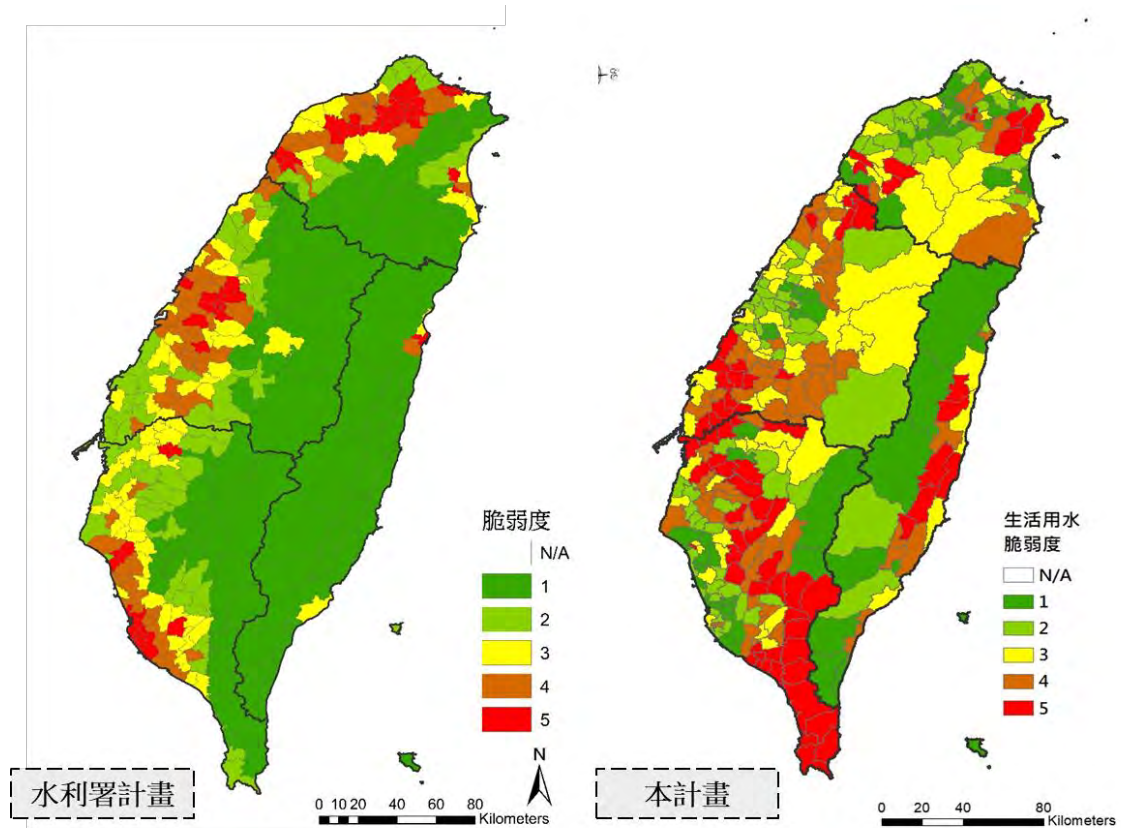


圖 20 水利署計畫及本研究全台生活用水脆弱度圖

生活用水風險度部分，因增加新評估因子之故，生活用水風險度計算成果多有不同，然風險度熱區部分趨勢大致雷同，呈現集中於西部地區之趨勢，而本期計畫新增老幼人口比例因子，故亦凸顯部分偏鄉地區之供水風險。生活用水風險度(無氣候變遷情境、A2 情境)成果如下圖 21、圖 22 所示。

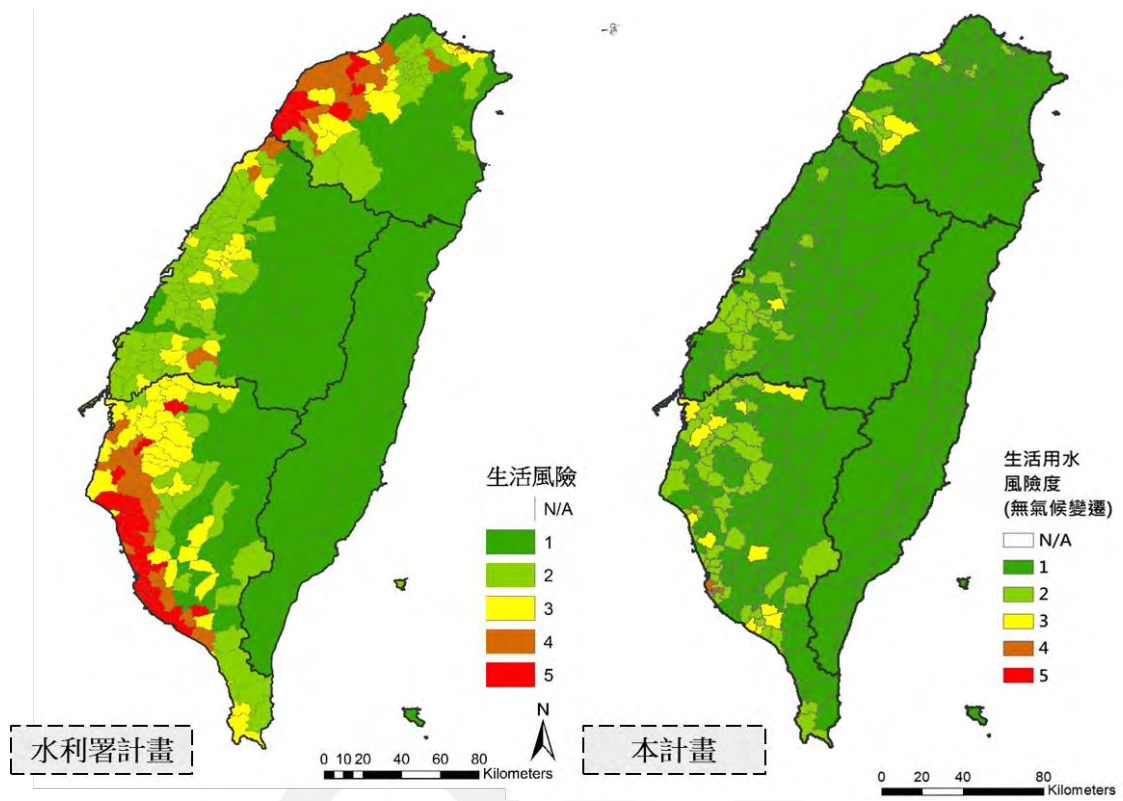


圖 21 水利署計畫及本研究全台生活用水風險度圖(無氣候變遷情境)

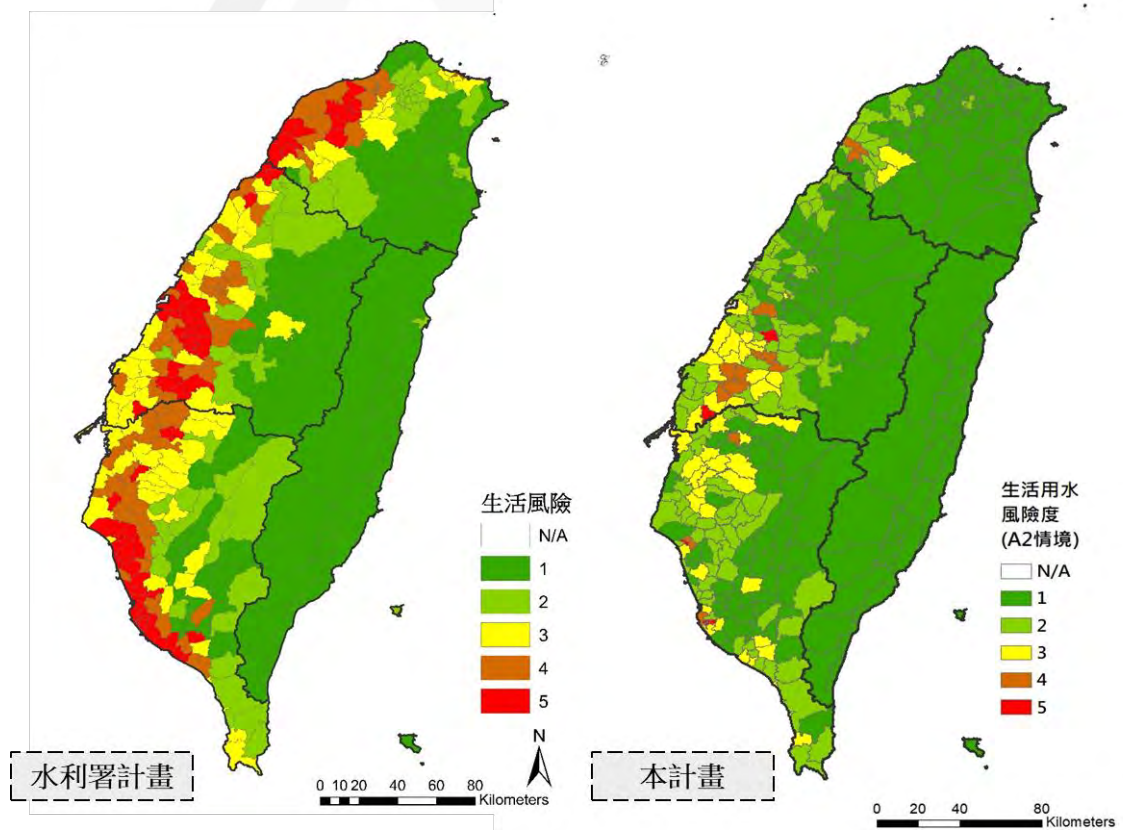


圖 22 水利署計畫及本研究全台生活用水風險度圖(A2 情境)

以工業用水而言，脆弱度差異部分主要來自因子資料來源不同，水利署計畫之工業用水脆弱度為 95 年度工商及服務業普查資料中之製造業生產毛額，而本研究工業用水脆弱度為 100 年度工商及服務業普查資料之製造業生產總額，故產生部分差異，然熱區趨勢大致相同，多集中在西部地區桃園、台中、台南以及高雄，下圖 23 為水利署計畫與本研究工業用水脆弱度圖。

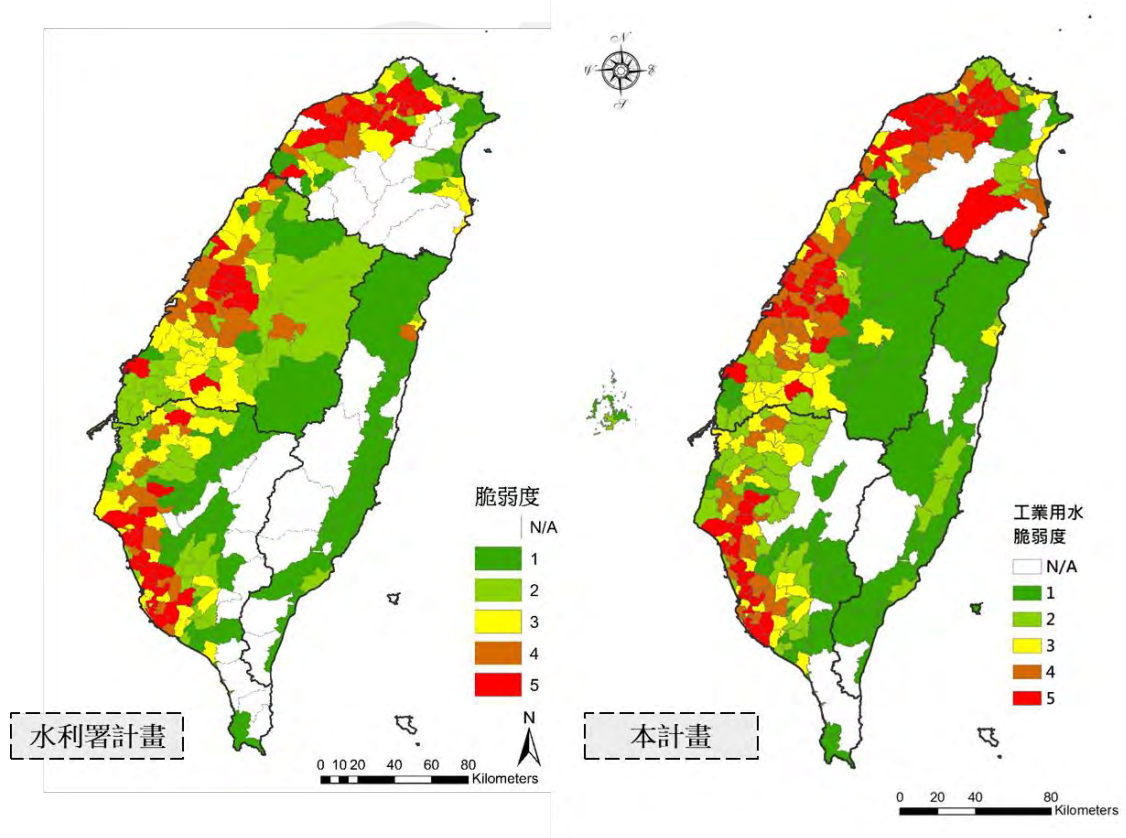


圖 23 水利署計畫及本研究全台工業用水脆弱度圖

工業用水風險度部分，因增加新評估因子之故，工業用水風險度計算成果略有不同，然風險度熱區部分趨勢大致雷同，呈現集中於西

部地區桃園、台中、台南以及高雄之趨勢。工業用水風險度(無氣候變遷情境、A2 情境)成果如下圖 24、圖 25 所示。

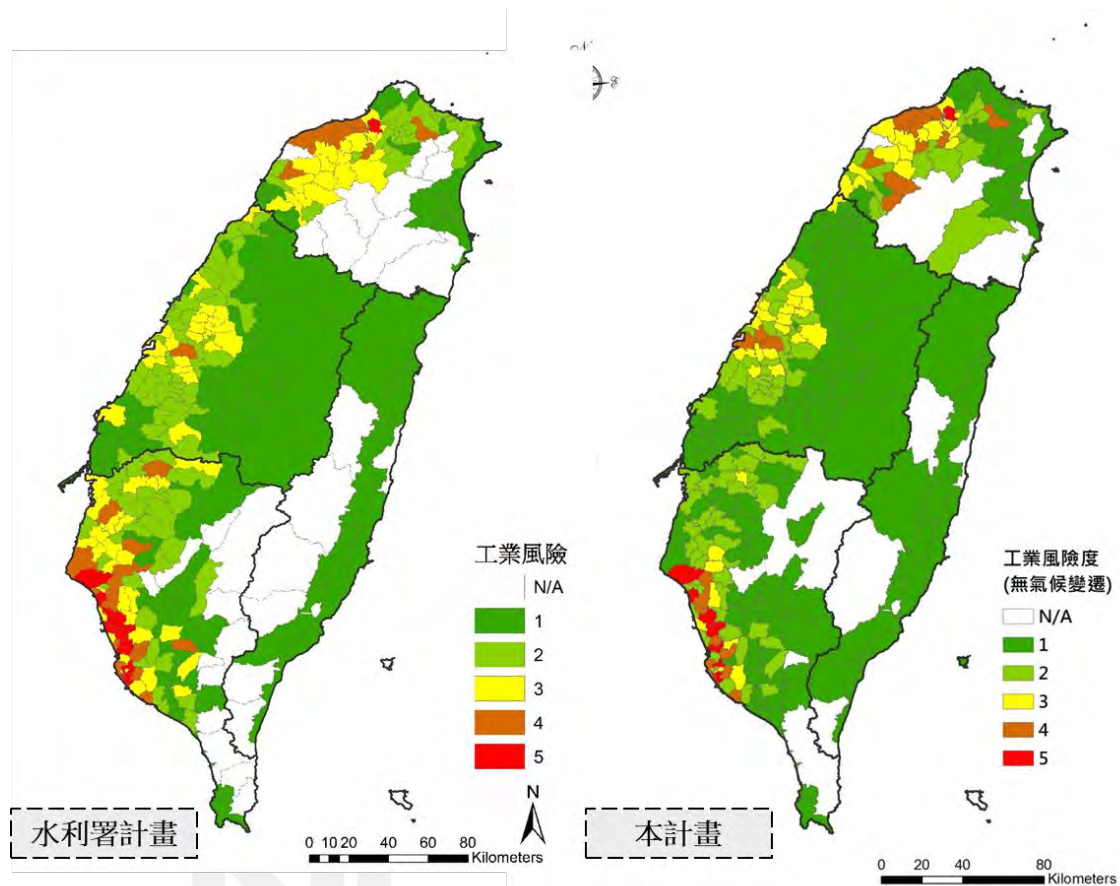


圖 24 水利署計畫及本研究全台工業用水風險度圖(無氣候變遷情境)

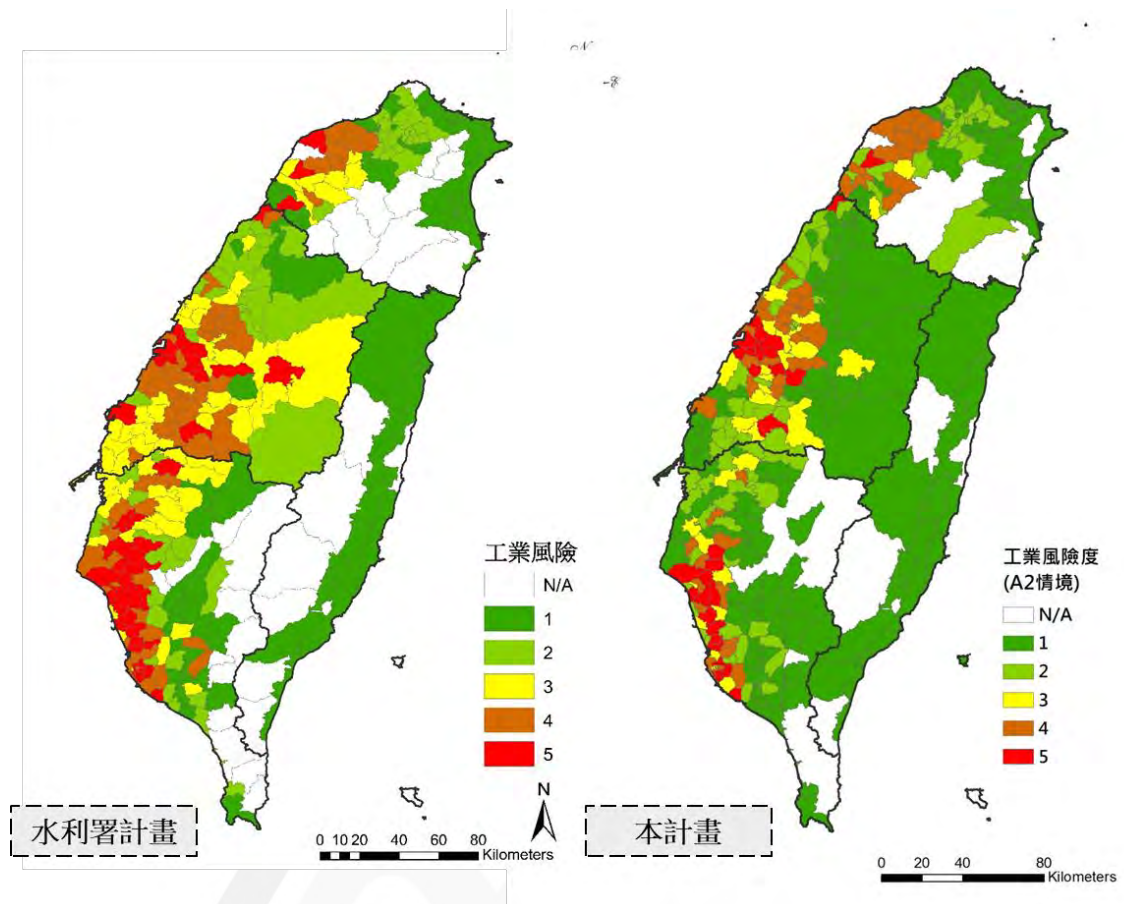


圖 25 水利署計畫及本研究全台工業用水風險度圖(A2 情境)

以農業用水而言，脆弱度差異部分主要來自因子資料來源不同，水利署計畫之農業用水脆弱度為行政院主計處公布之水稻種植面積，而本研究工業用水脆弱度採用農田水利會之 GIS 圖資，故產生部分差異，下圖 26 為水利署計畫與本研究農業用水脆弱度圖。

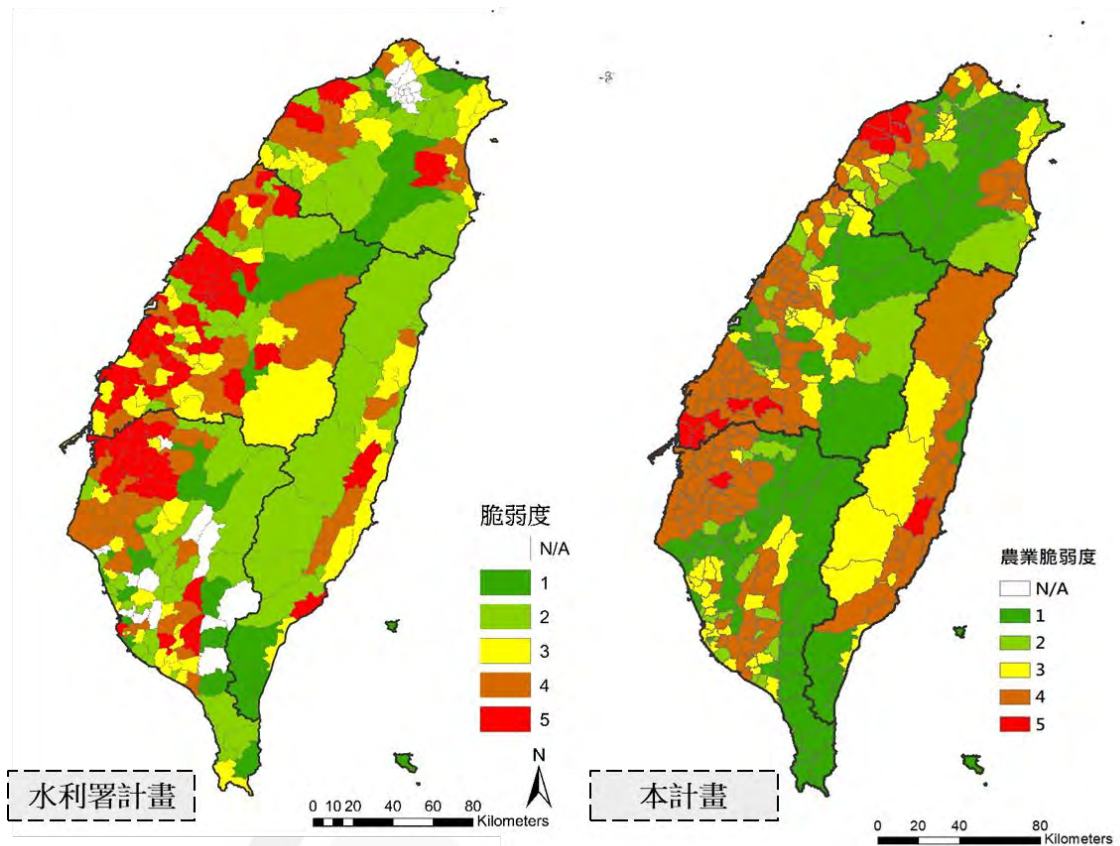


圖 26 水利署計畫及本研究全台農業用水脆弱度圖

農業用水風險度部分，因增加新評估因子之故，農業用水風險度計算成果略有不同，然風險度熱區部分趨勢大致雷同。工業用水風險度(無氣候變遷情境、A2 情境)成果如下圖 27、圖 28 所示。

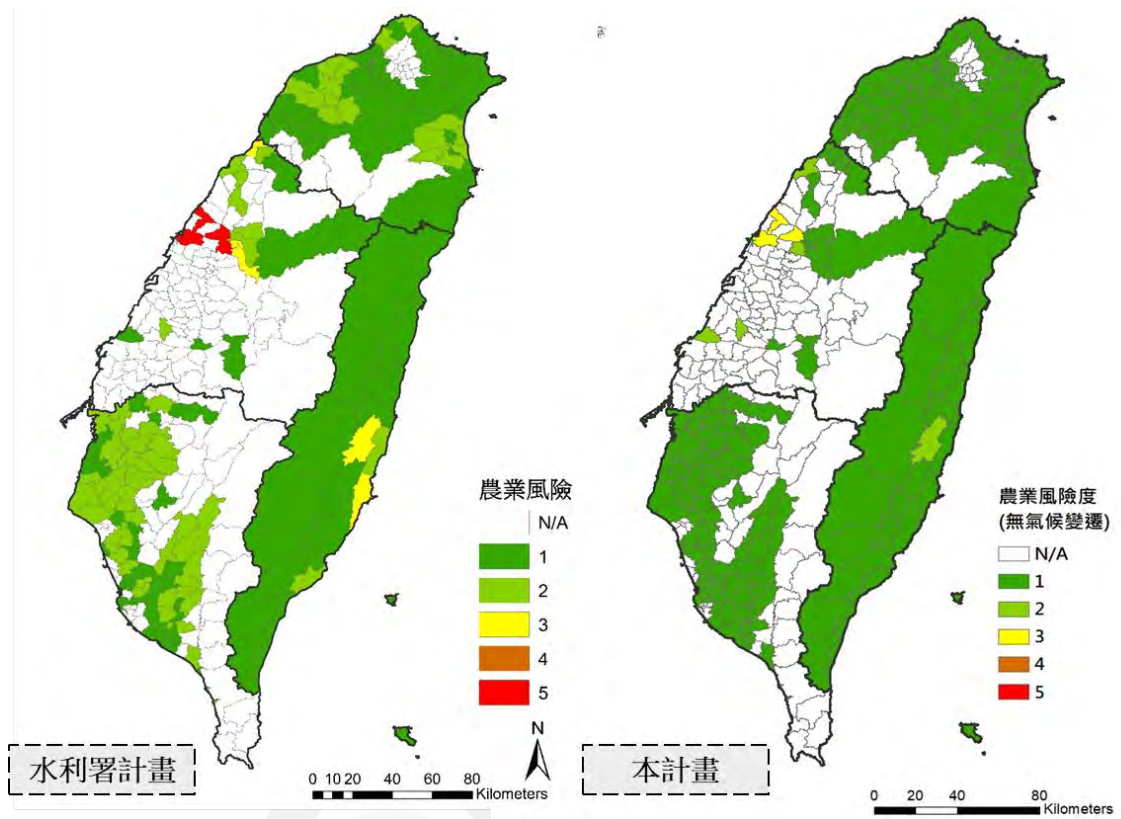


圖 27 水利署計畫及本研究全台農業用水風險度圖(無氣候變遷情境)

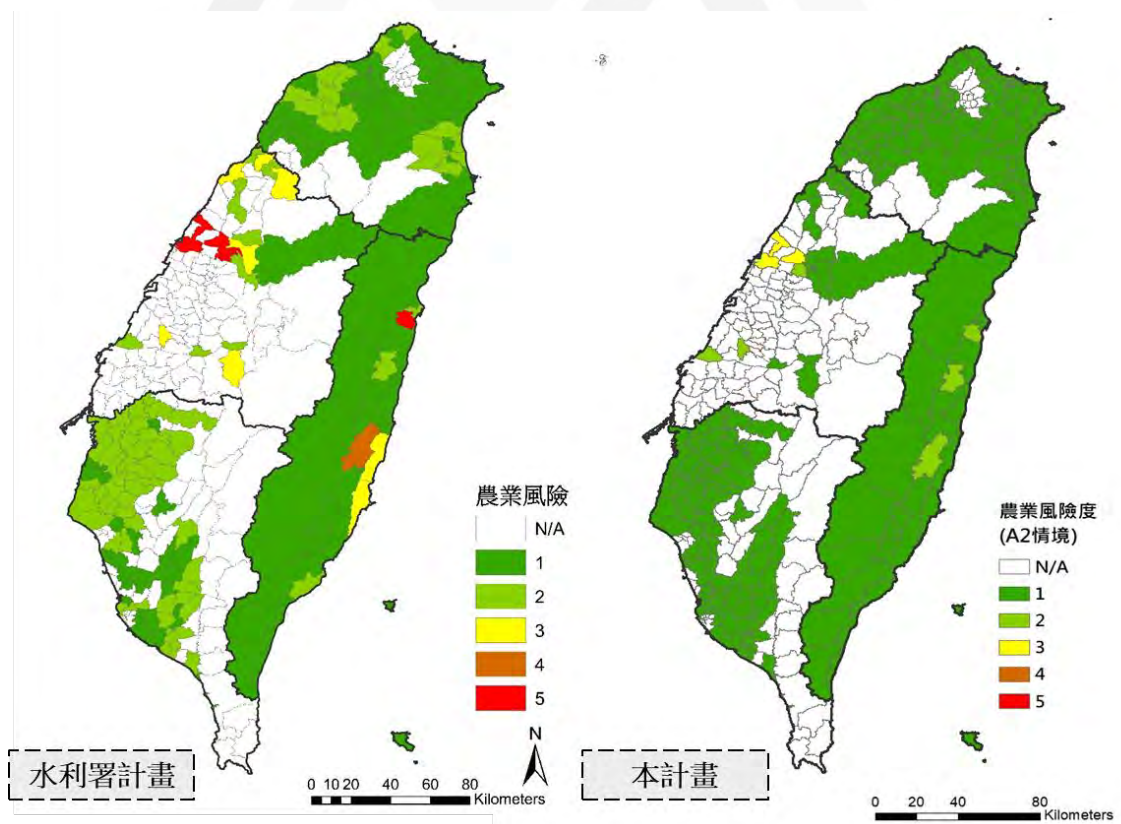


圖 28 水利署計畫及本研究全台農業用水風險度圖(A2 情境)

與水利署計畫成果之比較下，本研究風險度達到 4 級以上之數量相對減少許多，其並非風險降低之故，而是因子新增以及選用資料之差異造成。風險度計算架構由水利署計畫之二項因子(脆弱度、危害度)改為三項因子(暴露度、脆弱度、危害度)，而在分級方式(等距分級)不變之情況下，在本研究架構下能達到 4 級以上之條件相對嚴苛，需暴露度、脆弱度以及危害度三因子均在一定等級之上者，缺一不可。整體而言，本研究之成果相對保守，然計算出的高風險分級區域亦相對準確。



第五章 結果與討論

氣候變遷風險溝通過程中，往往缺少對於氣候變遷風險定義之了解，以至於缺乏系統性的風險評估架構，與風險溝通方法。本研究以 IPCC 第五版報告對於風險的定義為基礎，探討氣候變遷風險評估與調適評估過程中，如何針對不同議題與層級訂定風險評估架構，並以此作為風險溝通之架構與橋梁。

本研究以水資源關鍵議題為出發點，利用 IPCC AR5 之風險定義，訂定水資源風險架構草稿，發現定義出來的風險架構雖能涵蓋關鍵議題下所有的因子，但對於不同層級所面對之同樣的關鍵議題可能會有不同的解讀與關聯。

主觀式的風險因子判定缺乏系統性的鑑識方法與流程，因此，本研究以 IPCC AR5 風險定義為基礎，套用【臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台】計畫所發展之風險模板，探討水資源風險鑑別方法，並以此探討既有之水資源風險評估結果套用之可行性。此模板之執行關鍵點在於必須先制定好評估層級，以評估層級所關注對象為保全對象，再以此探討氣候變遷危害度以及關注對象之脆弱度與暴露度。

藉由風險模板所訂定出部會層級之水資源風險模板，保全對象包括居民、產業以及農業，危害度乃供水系統對於不同保全對象之缺水，

脆弱度跟鄉鎮老弱人口密度、鄉鎮工廠產值、鄉鎮水稻種植面積有關；暴露度則跟鄉鎮人口密度、鄉鎮工廠數量、鄉鎮灌區面積有關。藉此模板可充分讓決策者與利害關係人了解風險評估之結果、產出以及中間產出，並了解評估結果之風險來源與後續調適計畫之應用。

以北部水資源分區為例進行完整之風險模板操作，從水資源風險模板之建立，到水資源風險評估，證明了風險模板之可操作性。藉由操作過程可了解調適步驟過程中，風險模板可以輔助問題之界定，釐清相關風險影響因子，以作為風險分析與後續調適方案之擬訂參考。

藉由水資源風險模板，應用於水利署(102)之全臺水資源氣候變遷風險地圖，以證明此模板之回朔應用性。因風險使用因子不同，加上風險矩陣由原本兩個相乘(危害度 x 脆弱度)，改成三個相乘(危害度 x 脆弱度 x 暴露度)，結果較為樂觀。

本研究以水資源為例，進行水資源風險模板之研究，證明水資源風險模板之通用可行性。但風險指標的使用則因為以三個因子相乘之風險矩陣進行估算，除了結果較為樂觀保守，也顯示調適操作仍不夠直接，建議未來指標之選擇可再進一部評估。

致謝

本研究由科技部自然科學及永續研究發展司-「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫(編號：MOST 106-2621-M-865-001)補助完成，其中氣候變遷風險模板承蒙計畫共同主持人童慶斌教授以及計畫相關人員協助完成，特此感謝。



參考文獻

1. 林李耀等(2018)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫期末報告，科技部結案報告。
2. 黃金山(1986)，台灣水庫規劃缺水忍耐標準之探討，第三屆水利工程研討會論文集，pp.51-64
3. 水利署（2012），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委辦計畫報告。
4. 水利署（2013），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委辦計畫報告。
5. 水利署，2016，「臺灣北部區域水資源經理基本計畫」。
6. 周政君，2004，「氣候變遷及乾旱灌溉用水移用對水稻潛能產量影響」，台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文
7. 張良正，2009，「氣候變遷對石門水庫供水風險之影響分析」。經濟部水利署水利規劃試驗所
8. 游保杉，2009，「氣候變遷對乾旱期衝擊與調適研究」。行政院農業委員會

9. 童慶斌，吳明進，曾昭衡，李明旭，洪念民，2005，「氣候變遷對我國之衝擊影響與調適策略研究---總計畫暨子計畫一：氣候變遷對河川與空氣涵容能力衝擊與調適策略」，行政院國家科學委員會
10. 童慶斌，李明旭，游保杉，2007，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)」。經濟部水利署水利規劃試驗所
11. 童慶斌，李明旭，游保杉，2008，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)」。經濟部水利署水利規劃試驗所
12. 童慶斌，游保杉，李明旭，洪念民，2009，「強化高屏溪流域水資源供水系統因應氣候變遷之調適能力」。經濟部水利署水利規劃試驗所
13. 童慶斌，李明旭，2015，臺灣乾旱防災應變能力探討。水資源管理會刊，17(2)，51-57
14. 童慶斌，劉子明，林嘉佑，曹榮軒，李明旭，(2015)，氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討，中國土木水利工程學會會刊，第四十二卷，第四期

15. 童慶斌，林李耀，蘇慧貞，盧虎生，林幸助，李明旭(2015)，「氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域脆弱度評估與回復力建構科技發展計畫(III)」，科技部計畫。(MOST 104-2621-M-002 -002-)
16. Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Abdrabo, M. K., Adger, N., ... & Porter, J. R. (2014). Summary for policymakers. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part a: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1-32.
17. Haith, D. A., Mandel, R., & Wu, R. S. (1992). GWLF, generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual. Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
18. McCarthy, J. J. (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
19. Parry, M. L. (Ed.). (2007). Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 4). Cambridge University Press. Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M.

書名：以IPCC風險定義探討氣候變遷下水資源風險評估與調適應用

發行人：陳宏宇

出版機關：國家災害防救科技中心

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 107 年 12 月

出版年月：中華民國 108 年 01 月

版 次：第一版

非賣品



地址：23143新北市新店區北新路三段200號9樓

電話：++886-2-8195-8600

傳真：++886-2-8912-7766

網址：<http://www.ncdr.nat.gov.tw>