

支援地方氣候調適決策之氣候風險分析系統建構：以雲林農業水資源為例

A Climate Risk Analysis System to Support Local Adaptation Decision-Making in Taiwan: A Case Study of Agricultural Water Resources in Yunlin County

國立臺灣大學氣候變遷與永續發展國際學位學程

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

博士候選人	博士後研究員	教授
林孟慧	王琪芳	童慶斌
Meng-Hui Lin	Chi-Fang Wang	Ching-Pin Tung

摘要

氣候變遷所引發的多重衝擊，正加劇地方各部門系統的脆弱性，使縣市政府面臨日益複雜且交織的氣候風險挑戰。然而，現行調適規劃常因風險資訊不足、跨部門連結薄弱，以及分析技術門檻高等限制，導致調適方案難以有效回應真實風險情境與治理需求。為回應此一困境，本研究依循聯合國政府間氣候變遷委員會（IPCC）的氣候風險框架，以既有的氣候風險模板為核心工具，結合盤點我國氣候調適政策所建構的氣候風險因子關聯資料庫，建置出具模組化架構與互動操作介面的氣候風險分析系統——AdaptRisk。AdaptRisk 可讓使用者按照實際規劃需求，選擇特定治理層級與關鍵議題，系統便自動連結關聯資料庫、視覺化呈現相關的危害、暴露與脆弱度等風險因子的質性描述與關聯分析，輔助識別風險鏈結與潛在衝擊路徑，進而引導產製對應的調適選項組合，作為未來銜接量化模式之應用基礎。本研究並以雲林縣農業水資源之氣候風險為應用案例，測試本系統於地方治理層級進行風險辨識、調適規劃與決策支援之可用性與系統應變能力。整體而言，AdaptRisk 可有效降低氣候風險分析的知識與技術門檻，補足既有評估工具多偏重量化建模與單向指標應用的侷限，展現強化地方氣候行動科學基礎與支持多層級治理協調的潛力，具備跨區域與跨議題應用之推廣性。

關鍵詞：氣候調適治理、決策支援系統、氣候風險分析、調適規劃、氣候政策

Abstract

The multiple impacts of climate change have significantly exacerbated vulnerability across various governance domains, presenting local governments with increasingly complex and interwoven climate risk challenges. However, current adaptation planning is frequently constrained by limited risk information, weak cross-sectoral linkages, and high technical thresholds for analysis. These limitations hinder the effectiveness of adaptation strategies in addressing real-world risk scenarios and governance needs. In response, this study adopts the

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) climate risk framework, utilizes an established climate risk template as the core analytical tool, and integrates a comprehensive relational database of climate risk factors compiled from Taiwan's climate adaptation policy landscape. Together, these components support the development of AdaptRisk, a climate risk analysis system that features a modular structure and an interactive interface. AdaptRisk enables users to select specific governance levels and key issues according to actual planning objectives. The system automatically connects to the relevant database and visualizes qualitative descriptions and relational analyses of risks, including hazards, exposure, and vulnerability factors. This design facilitates the identification of risk linkages and potential impact pathways, subsequently guiding the generation of tailored combinations of adaptation options and serving as a basis for future integration with quantitative models. Adopting climate risks to agricultural water resources in Yunlin County as a case study, this research tests the system's usability and its capacity to support risk identification, adaptation planning, and decision-making at the local governance level. Overall, AdaptRisk effectively lowers the knowledge and technical barriers to climate risk analysis, addresses the limitations of existing assessment tools that overly emphasize quantitative modeling and one-way indicators, and demonstrates significant potential for strengthening the scientific foundation of local climate action, supporting multi-level governance coordination, and advancing cross-regional and cross-sectoral applications.

Keywords: climate adaptation governance, decision support systems, climate risk analysis, adaptation planning, climate policy

一、前言

氣候變遷引發的多重衝擊，正加劇地方社會—經濟—環境系統的脆弱性，使縣市政府在規劃調適行動時面臨高度不確定與跨部門交織的風險。然而，現有的調適規劃工具多偏重單一部門、單一風險的量化建模與指標評估，缺乏整合性氣候風險資訊與互動式決策支援系統。這不僅提高了地方政府進行風險辨識的技術門檻，也使調適策略與真實的治理需求存在落差。

這樣的缺口導致地方政府在氣候調適決策過程中，長期面臨三重困境：資訊不足，缺乏系統性風險鏈結資料，無法完整揭露跨部門效應；各單位掌握的資訊分散，缺乏共同框架與溝通語言，造成跨部門連結薄弱；技術門檻過高，既有方法多仰賴專業建模，非專業人員難以操作，使得非專業人員在取得與使用資訊方面持續不足，造成封閉循環。

本研究因此提出 AdaptRisk 系統，以模組化與互動式設計為核心，建構一套符合地方治理需求的氣候風險分析與調適規劃工具，期望補足既有評估方法的不足，並強化地方層級的調適決策能力。

為回應上述困境，本研究提出三大研究問題：

1. 現況風險資訊不足與部門資訊不對等，在現行氣候調適規劃中，如何突破資訊斷層，建立一套系統化、規格化的氣候風險分析架構，以支援地方政府決策？
2. 在高度交織的氣候、環境到社會互動中，如何透過模組化與互動式設計，有效揭露風險因子之間的互動，以回應複雜風險之間的資訊使用與跨部門治理需求？
3. 在地方治理情境下，如何確保系統能生成兼顧科學依據、公平性與治理可行性的調適措施組合，支援跨部門協作與落地實施？

故此，本研究建構依循 IPCC 氣候風險框架的模組化決策支援系統，並整合《國家氣候變遷調適行動計畫》、地方調適方案及相關科學研究，建立「關鍵議題—風險因子—調適措施」之關聯式資料庫，補足現行地方調適規劃中資訊不足與連結薄弱的缺口。系統設計具備互動式與視覺化介面，能協助使用者快速辨識危害、暴露與脆弱度因子間的鏈結，並提供對應的調適選項組合，降低專業門檻並提升決策效率。以雲林縣農業水資源為案例，本研究驗證了系統在地方治理情境下的實用性、擴展性與治理適配性，展現其作為跨部門調適決策支援工具的潛力。

二、研究方法

1. 系統設計

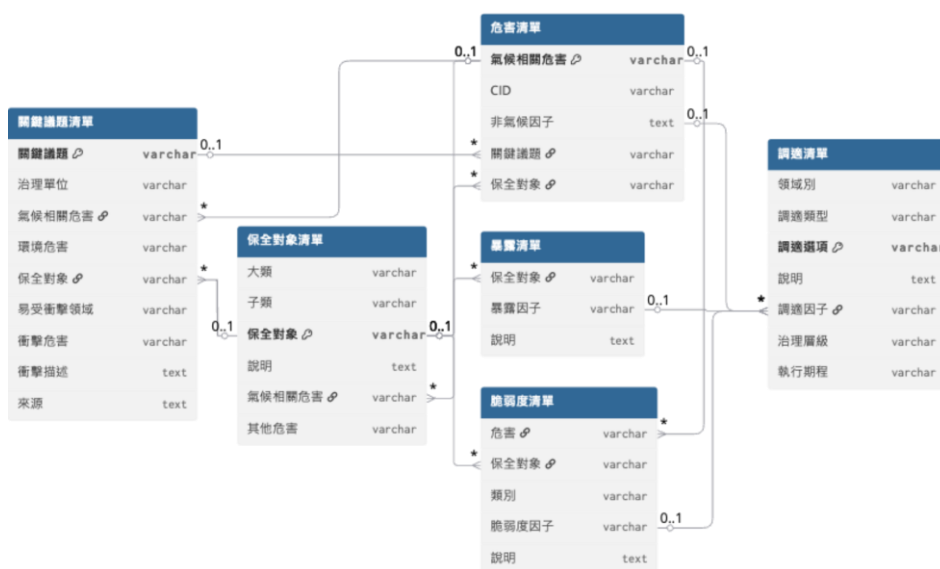


圖 1、AdaptRisk 資料庫結構。

IPCC 氣候風險框架，以危害、暴露、脆弱度三個向度來定義氣候風險，前人據此發展氣候風險模板以解構氣候風險因子組成，本研究參考其模板設計，調整模板結構作為氣候風險分析介面工具，與本研究重點發展的氣候風險因子關聯式資料庫，盤點整合我國氣候調適政策中的關鍵議題及相應之風險因子分析，建置出具模組化架構與互動操作介面的氣候風險分析系統——AdaptRisk。

AdaptRisk 資料庫包括六大資料表（如圖 1）：(1) 從政策文件如國家氣候變遷調

適行動計畫與地方調適執行方案盤點關鍵議題清單，承接政策文件與治理需求，串連治理單位與氣候風險因子；(2) 根據關鍵議題中常見的受衝擊主體，彙整成保全對象清單，並依據大類與子類進行分類；(3) 危害清單收錄氣候相關危害、氣候影響驅動因子（CID）與非氣候因子；(4) 暴露清單描述保全對象的時空分布與暴露因子；(5) 脆弱度清單整合敏感度因子與調適力因子資訊；(6) 調適清單對應治理層級、主管機關、執行期程與調適措施。

2. 氣候風險分析

AdaptRisk 系統以模組化的形式提供使用者依需求彈性使用，深入爬梳氣候風險的複雜組成，以評估選擇調適組合得到更多協同效益。首先是危害模組，利用聯合國防減災辦公室（UNDRR）危害資訊概況的大氣水文類別危害作為此模組的選單，將氣候風險中的危害限縮在受氣候變遷直接影響的危害，其餘間接危害則以多重危害的形式來呈現氣候變遷影響如何在不同危害之間傳遞，以了解跨風險之間的互動性；回到危害因子分析，以 IPCC AR6 裡提出的 CIDs 作為氣候因子的依據，同時也逐一分析各種危害所對應的非氣候因子，完成危害模組的氣候相關危害及其因子之組合，方便使用時依關鍵議題直接帶入資訊。

暴露模組依照保全對象活動的時空分布及條件進行分析，以評估保全對象是否與危害接觸，並以暴露因子來描述影響其暴露的組成。脆弱度模組較為複雜，根據定義可以簡述成保全對象在危害衝擊後的受損傾向，可以理解成脆弱度是多維度依保全對象及危害的組合，而對應不同的脆弱度，且脆弱度本身又以敏感度及調適力二者來進行描述，且在實務上可能難以切分二者，而需以綜合呈現方式，力求脆弱度的完整理解，避免以量化指標過度簡化，因此在資料庫的結構設計中，則以危害與保全對象的組合進行脆弱度分析。

3. 調適選項資料

在 AdaptRisk 系統中，調適選項是連結風險因子與決策行動的核心資料。每一項調適措施均依據所對應的風險構件分為三類：危害調適，如造林、防風林、土地覆蓋等等以減弱危害強度；暴露調適，如調整生產週期、居民搬遷、種植密度管理等作為以減少受體與危害接觸；以及脆弱度調適，降低敏感度、增強調適力，如健康補助、社區教育、社會安全網，以提升系統韌性。此外，資料庫中也為每項措施標註治理層級（地方、區域、中央）、主管機關（如農業局、環保局、衛生局等等）、執行期程（短、中、長期）與公平性影響，以確保在跨部門協作下，調適方案能兼顧科學依據、政策可行性與社會接受度。

三、研究結果

本研究並以雲林縣農業水資源之氣候風險為應用案例，測試本系統於地方治理層級進行風險辨識、調適規劃與決策支援之可用性與系統應變能力。整體而言，AdaptRisk 可有效降低氣候風險分析的知識與技術門檻，補足既有評估工具多偏重量化建模與單向

指標應用的侷限，展現強化地方氣候行動科學基礎與支持多層級治理協調的潛力，具備跨區域與跨議題應用之推廣性。依據 AdaptRisk 系統工作流程各階段成果如下：

1. 界定關鍵議題：從資料庫中提取雲林縣的農業水資源議題，經過初步分析取得淹水危害之農業氣候風險包括「暴雨導致牧場畜牧損失」及「暴雨導致魚塭溢堤，造成水產損失」；乾旱風險則是「長時間乾旱導致作物減產」。
2. 氣候風險分析：使用 AdaptRisk 系統工具，得到上述三個氣候風險事件的因子分析結果如圖 2。

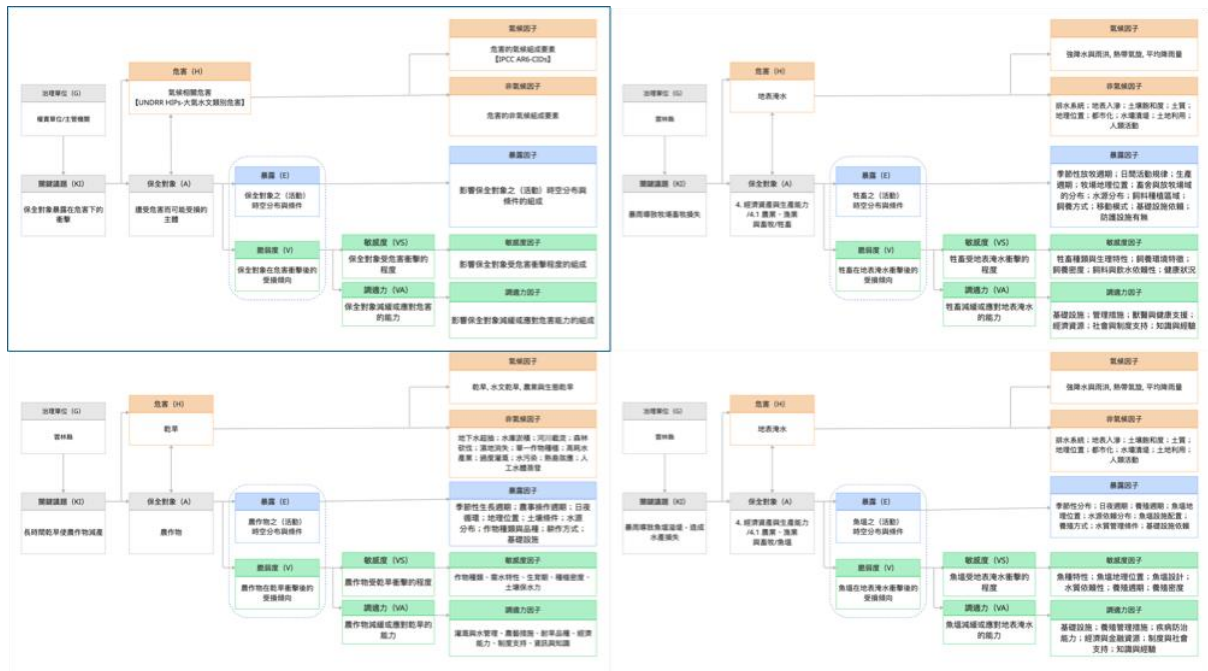


圖 2、雲林縣農業水資源關鍵議題之氣候風險模板分析風險因子：左上圖為本研究改編之氣候風險模版，另三圖分別對應雲林縣農業水資源關鍵議題分析結果。

從這三張農業水資源氣候風險模板中，可以清楚看出跨部門與跨尺度的風險資訊。在跨部門的層次上，三個關鍵議題分別涉及農作物、畜牧與魚塭等不同生產部門，卻共同暴露在相似的氣候危害之下，例如豪雨引發的地表淹水。這意味著同一場極端氣候事件，往往不會僅限於單一部門受損，而是同時導致農作物減產、牧場受災與魚塭潰堤，形成多部門共災的系統性衝擊，而放大整體糧食與生計安全風險。

在跨尺度的層次上，風險顯示出多重治理層級的交錯。雲林縣政府需直接面對災損與調適行動；部門層級則揭示不同產業的生產週期與空間分布如何影響其暴露與脆弱度；而更大尺度的區域與國家層級則透過地下水超抽、水庫調度、排水系統或土地利用規劃，影響各部門承受與調適風險的能力。因此，乾旱與洪水等極端水文事件，並非僅是單點風險，而是橫跨地方—部門—區域—國家等多層次的系統性風險。

這些風險模板呈現農業水資源議題下的關鍵挑戰：風險並非分散於個別部門或尺度，而是透過水資源極端化的過程緊密相連，必須以跨部門協作與跨尺度治理的整合方式，才能有效降低農業體系在氣候變遷下的系統性脆弱性。

3. 界定調適選項

透過了解前述氣候風險分析得到的各種風險因子，系統提供相應的調適選項，以確保調適作為確實能降低氣候風險。在雲林農漁牧的複雜風險當中，尋求調適選項的協同作用與評估權衡關係。基礎設施與土地利用措施，例如地下水補注、牧場高地化、魚塭堤壩加高或防洪畜舍等措施，能同時減輕農田、牧場與魚塭風險，呈現跨部門協同效益，但也可能導致下游排水惡化或生計受影響。在水資源管理與生產週期調整的方面，調整播種期、分批養殖與灌溉調度等，如可結合氣象預警與流域治理，或能同時降低旱澇風險，但亦可能引發農漁牧間用水競爭或市場風險。技術與生產方式上，耐旱作物、耐逆境魚種、低密度養殖與輪作制度可提升韌性並改善資源利用，但高成本與短期產值下降對中小農戶形成挑戰。在制度與金融支持策略上，跨部門氣象服務、保險與金融平台，為農業部門普遍可施行之調適措施，以強化社區調適力，但若設計偏向單一部門，則可能造成資源不均。整體而言，協同槓桿點包括基礎設施整合、水資源調度、技術多樣化與制度平台；權衡焦點則在於水資源競爭、土地規劃、技術成本與制度偏差。唯有跨部門協作與跨層級治理，才能放大協同效益並降低風險轉嫁的可能。

表 1、雲林縣農業水資源關鍵議題之氣候風險因子與相應調適選項。

關鍵議題	風險因子類別	風險因子	調適選項
暴雨導致牧場畜牧損失	非氣候因子	排水系統；地表入滲；土壤飽和度；土質；地理位置；都市化；水壩潰堤；土地利用；人類活動	土地分區管制；搬遷；提升地基高度；排水設備；防洪設施
	暴露因子	季節性放牧週期；日間活動規律；生產週期；牧場地理位置；畜舍與放牧場域的分佈；水源分佈；飼料種植區域；飼養方式；移動模式；基礎設施依賴；防護設施有無	土地分區管制；搬遷；強降雨前畜牧移置方案；飼養密度管理
	敏感度因子	牲畜種類與生理特性；飼養環境特徵；飼養密度；飼料與飲水依賴性；健康狀況	防洪畜舍；飼料儲備與多元供應鏈；家畜防疫與緊急醫療應變網絡
	調適力因子	基礎設施；管理措施；獸醫與健康支援；經濟資源；社會與制度支持；知識與經驗	
暴雨導致魚塭溢堤，造成水產損失	非氣候因子	排水系統；地表入滲；土壤飽和度；土質；地理位置；都市化；水壩潰堤；土地利用；人類活動	排水設備；防洪設施；水質監測；緊急換水設施
	暴露因子	季節性分佈；日夜週期；養殖週期；魚塭地理位置；水源依賴分佈；魚塭設施配置；養殖方式；水質管理條件；基礎設施依賴	調整養殖週期；推動分批養殖；規劃分區養殖
	敏感度因子	魚種特性；魚塭地理位置；魚塭設計；水質依賴性；養殖週期；養殖密度	低密度養殖；循環水養殖系統；氣象預警系統
	調適力因子	基礎設施；養殖管理措施；疾病防治能力；經濟與金融資源；制度與社會支持；知識與經驗	
長時間乾旱使農作物減產	非氣候因子	地下水超抽；水庫淤積；河川截流；森林砍伐；濕地消失；單一作物種植；高耗水產業；過度灌溉；水污染；熱島效應；人工水體蒸發	建立用水總量管制；推動地下水人工補注；推動休耕補貼；多元作物配置
	暴露因子	季節性生長週期；農事操作週期；日夜循環；地理位置；土壤條件；水源分佈；作物種類與品種；耕作方式；基礎設施	調整播種期；推動耐旱作物；發展區域化灌溉調度系統
	敏感度因子	作物種類、需水特性、生育期、種植密度、土壤保水力	發展節水灌溉技術；推動土壤保水措施；農業氣象諮詢與農民培訓計畫；農業保險
	調適力因子	灌溉與水管理、農藝措施、耐旱品種、經濟能力、制度支持、資訊與知識	

四、結論

本研究建構具模組化與互動特性的 AdaptRisk 氣候風險分析系統，並以雲林農業水資源為案例驗證其可行性。研究結果顯示，AdaptRisk 提供使用者快速取得氣候變遷下關鍵議題的氣候風險分析結果，並且辨識跨部門與跨尺度的風險鏈結，以盤點出兼顧科學依據與治理需求的調適選項。案例分析揭示農作物、畜牧與漁業部門雖面臨相似氣候危害，卻因暴露條件與脆弱度差異而形成多部門共災情境，進一步凸顯跨部門協作與跨層級治理的重要性。調適選項則呈現出明顯的雙重特徵：基礎設施整合、水資源調度、技術多樣化與制度平台能成為協同槓桿點；但水資源競爭、土地規劃、技術成本與制度偏差亦構成權衡焦點。整體而言，AdaptRisk 不僅補足現有評估工具偏重單一部門量化建模的不足，更展現推動地方調適決策透明化、系統化的潛力。