

氣候變遷下對地下水質管理與使用衝擊評估與調適策略之探討

Impact Assessment and Adaptation Strategies of Climate Change on Groundwater Quality and Utilization

國立台灣大學
生物環境系統工程系
博士候選人

黃雅甄
Ya-Zhen Huang

淡江大學
水資源及環境工程學系
助理教授

王聖璋
Sheng-Wei Wang

國立台灣大學
水工試驗所
副研究員

林文勝
Wen-Sheng Lin

國立台灣大學
生物環境系統工程系
助理教授

潘述元
Shu-Yuan Pan

國立台灣大學
生物環境系統工程系
教授

范致豪*
Chihhao Fan

摘 要

臺灣地區雖有豐沛年降雨量，但地理位置與氣候條件的因素，造成降雨豐枯分布差異顯著。近年來在全球溫暖化的影響下，極端氣候事件發生頻率與強度有增加的趨勢，也導致降雨豐枯差異情形更加顯著，增加我國水資源穩定供給的風險，若此分布不均的情形日趨劇烈，更可能增加澇旱災害所產生的損失。氣候變遷改變水文循環，直接衝擊水資源調配與地下水的利用，進而影響整體水資源供需平衡及可能衍生之用水安全等議題。考量前述的背景資訊，本研究的主要目的，為評估臺灣地下水資源未來可能面臨之衝擊，並針對可能受影響之區域，研擬可行調適策略。於受氣候變遷影響導致雨量增加之情境下，在代表濃度路徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 4.5 和 RCP 8.5 與近世紀 (西元 2016-2035 年) 及世紀末 (西元 2081-2100 年) 條件下，分析模擬結果後歸納出需要高度注意的優先關注區域，為苗栗、臺中、高雄、屏東及花東等部分區域；而在氣候變遷雨量減少之情境下，在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 近世紀及世紀末之模擬結果，歸納出需優先關注區域要為新北、桃園及宜蘭等部分區域。在氣候變遷趨勢下，臺灣極可能會面臨乾旱期延長、強降雨事件，地下水資源為我國的重要備用水源，未來其所扮演的腳色也將更為重要。根據研究成果顯示，雨量增多之情境，應有效針對源頭管制，加控管廢水的排放規範，減少地下水水質污染來源。而雨量減少之情境，應將地下水資源進行分級應用，規劃產業取用優先順序，避免區域地下水匱乏情形

惡化，並限制用水安全風險較高之區域取用地下水，並針對高污染風險事業進行水污染排放行為進行管控，得以保障用水單位之用水安全。本研究透過氣候變遷情境模擬，可有效掌握地下水資源造成衝擊的優先關注區域，掌握臺灣地下水資源之衝擊變化，並提出適當的調適策略。

關鍵詞：氣候變遷、地下水資源、衝擊評估、調適策略。

* 通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程系教授
106 台北市羅斯福路四段一號，chfan@ntu.edu.tw

Impact Assessment and Adaptation Strategies of Climate Change on Groundwater Quality and Utilization

Ya-Zhen Huang

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Sheng-Wei Wang

Tamkang University
Department of Water
Resources and Environmental
Engineering

Wen-Sheng Lin

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Shu-Yuan Pan

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Chih-Hao Fan*

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

ABSTRACT

The rainfall in Taiwan is considered abundant as compared to that of world average, but its distribution in time and space is uneven due to geographical and climatic factors, resulting in extreme variations in available water resource. Recently, the impact of climate change increases the occurring frequency and intensity of extreme events, which may unevenly re-distribute the rainfall to an even worse situation and enhance the damage from drought and flood. The climate change alters the hydrological cycle which subsequently impacts water supply/demand and groundwater resource management. As a result, the alteration of the hydrological cycle may eventually influence the overall balance of water supply/demand and security issues of water usage. Given such a prevailing background, the main objective of this study is to evaluate the potential impacts on Taiwan's groundwater resources in the future and propose possible adaptation strategies. In the scenarios with rainfall increase having the representative concentration pathway (RCP) 4.5 and 8.5 due to climate change at the near (the year 2016-2035) and end (the year 2081-2100) of the century, the areas of priority concern include the counties of Miaoli, Taichung, Kaohsiung, Pingtung, and portions of Hualien and Taitung counties. Conversely, in scenarios with rainfall decrease at RCP 4.5 and 8.5 having the near and end of the century, the areas of priority concern are the areas of New Taipei, Taoyuan, and certain parts of Yilan. Generally speaking, Taiwan is likely to face challenges of prolonged drought and intensified rainfall and groundwater resources shall play a crucial role as supplementary water sources. According to the research findings, in the scenario of increased rainfall, it is important to effectively control the pollution at the source by regulating the discharge of wastewater and reducing groundwater contamination. In the scenario of decreased rainfall, a graded application of groundwater resources should be implemented, prioritizing industrial water usage and avoiding further depletion of regional groundwater resources. It is also necessary to restrict the use of groundwater in areas with higher water security risks and control water pollution from industries with high pollution risks, in order to ensure the water security of water-consuming units. This study utilizes climate change scenario simulations to effectively identify the priority areas

impacted by groundwater resources, understand the changes in the impact of Taiwan's groundwater resources, and propose appropriate adaptation strategies.

Keywords: Climate change, Groundwater resources, Impact assessment, Adaptation strategies.

一、前言

水資源穩定供給為世界各國經濟發展之重要關鍵，臺灣長期受到水文、地理條件與產業發展的影響，造成地面水已不足以滿足國家整體發展的用水需求，地下水做為經常性的備用水源已無可避免。根據研究顯示，全球氣候變遷會使氣溫、降雨、蒸發、逕流與土壤含水量等，產生時間與空間上有別於過往的變化，在可預見在氣候變遷影響下，區域性水文循環將面臨改變，並將使得降雨豐枯之差異更加明顯。與地面水將較而言，因所涉及過程的時間尺度不同，地下水資源將面臨之衝擊相較於地表水而言，較不明顯且有所延遲，但可能會比造成其缺乏之原氣象乾旱時間更加延長，從而引發「記憶效應 (Memory Effect)」 (UN Water, 2020)。換言之，於氣候變遷反應上，地下水相對於地表水而言，其水文系統變化反應較不具立即性，然其受損後之回復也可能較緩慢。

根據臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 使用政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次評估報告 (Assessment Report 5, AR5) 中之資料，針對臺灣地區進行降尺度推估所發布之結果顯示，就臺灣年平均溫度而言，不同代表濃度路徑溫度變化差別不大。而不同情境與未來時段之總降雨量變化率，於暖化情境下呈現濕季越濕、乾季越乾之特徵，乾濕季之降雨量差距將更加顯著，表示臺灣未來對於水資源的調配將面臨更大的挑戰 (NCDR, 2017a)。氣候變遷可透過多種方式影響地下水資源，其主要可分為直接影響與間接影響。溫度上升與降水模式變化，將直接影響地下水之補給、出流，水位與存量。而植被變化、灌溉用水需求與海平面上升等可間接影響地下水之質與量 (Shahid *et al.*, 2017)。氣候變遷將導致地下水系統供需兩端之變化，為達地下水資源永續經營，須掌握氣候變遷對其系統中補注、流出、存量及水質之影響，並擬定相應之管理措施 (Margat and Van, 2013; Shahid *et al.*, 2017)。

根據 Amanambu *et al.* (2020) 發表的研究成果，地下水是水文循環途徑的重要組成，因此氣候變遷對於地下水補注之潛在影響值得更多關注。地下水補注為與氣候、區域地質、土壤、地勢、植被、地表水文、沿海洪水及土地利用相關之時間與空間上複雜且敏感的機制，氣候變遷與其變異性將可能對地下水之補注與機制產生長期影響。地下水補注量改變並非皆與降

雨改變趨勢相同，補注不僅受降雨量影響，也與其強度、季節性、頻率及型態相關。於高強度降雨事件中，由於快速達土壤入滲容量，導致逕流及河川流量增加，入滲至地下含水層之雨水相對較少。此外，乾旱發生更趨頻繁與延時加長，可能導致土壤結塊，增加疏水性，使得降雨期間地表逕流增加與地下水補注減少 (Clifton *et al.*, 2010)。從 Crosbie *et al.* (2010) 所發表氣候變遷對地下水的衝擊模擬的研究成果顯示，在澳洲 Murray – Darling 流域中，在氣候變遷條件下預計將增加 5 % 的地下水補注量。Samper *et al.* (2015) 評估氣候變遷對西班牙 Plana de La Galera 地區含水層年均補注量的影響，其結果顯示，相較於 1960 ~ 1990 年之基期水準，地下水補注將於 2020 ~ 2050 間減少 23 %，於 2069 ~ 2099 年間減少 27 %。而 Shahid *et al.* (2017) 研究顯示，在二氧化碳加倍的大氣組成條件下，可能會使澳大利亞熱帶地區的地下水淨補注量增加一倍以上。

地下水抽用量與開發行為對地下水資源的影響，通常需要許多年後才會顯現，因此直至問題出現前，會忽視地下水的妥善管理，於其間持續蒐集分析必要的數據 (Green *et al.*, 2011)；乾旱持續的時間和頻率增加 (由於溫度與降雨變異的增加) 可能會導致更嚴重的土壤水分缺乏，當土壤水分枯竭時，植被可能會越來越依賴地下水來生存 (如果地下水在根部附近)，這可能導致地下水的蒸散量增加，而土地利用也可能影響地下水的蒸散量 (Clifton *et al.*, 2010)。地下水蘊藏量反映於補注與出流的過程 (幾天到幾千年) 之間的差異上，受含水層的特性、大小與類型的影響，較深的含水層對於較長尺度的氣候變遷會有延遲反應，但對短時間尺度的氣候變遷則無。淺層地下水系統，特別是那些位於為固結沉積物或破碎基岩的地下水系統對氣候變異則有高度敏感度 (Clifton *et al.*, 2010)。

氣候變遷對水質之影響為涉及複合的自然與人為活動機制，包括補注、流出及土地利用等因子，故地下水水質也預期將受氣候變遷及人類活動有所影響。此外，地下水質之優劣亦為農業、工業或生態需求等標的使用地下水之限制因子 (Green *et al.*, 2016)。對依賴地下水之民生、農業等活動，地下水水質保護至關重要。對於淺層地下水而言，其溫度可能因氣溫增加而增加；於乾旱與半乾旱地區，蒸發量增加可能導致地下水鹽化，而於沿海地區，海水上升及暴潮可能導致海水入侵與地下水鹽化。地下水補注與流失間之變化，可能會改變含水層對非點源污染之涵容能力。於降雨強度預測將會提高之地區，隨土壤沖刷至水體之污染物 (農藥、有機質與重金屬等) 也會增加，通過地表

水補注，該區域地下水污染亦可能更為嚴重 (Clifton *et al.*, 2010)。地下水鹽化是沿海地區水資源永續經營的主要威脅，其成因包含地下水超抽、氣候變遷 (如暴潮事件) 及海平面上升所導致之海水入侵 (Gao and Luo, 2016; Han and Currell, 2022; Johnson *et al.*, 2015; IPCC, 2014a; 2014b; 2021)。

由前述可知，地下水資源開發與保育實為臺灣水資源管理與國家發展所需關注之重點。然而部分地區因產業發展、土地利用與水源供應等三者間未能平衡，導致在部分地區 (如西南沿海地區) 大量抽取地下水以發展耗水產業，地下水鹽化、地層下陷、長期淹水及國土流失等問題，且部分地區受到自然地質因素影響而導致地下水水質不佳，甚至受到農業、工業、民生排放廢污水之影響，污染地下水，影響臺灣水資源之永續利用。爰此，本研究針對氣候變遷對地下水資源可能造成影響之情境，結合潛在污染分布、經濟發展等因子，評估臺灣地下水資源未來可能面臨之衝擊區域，研擬可行調適策略。

二、研究方法

本研究以地下水水質變化潛勢為主要評估標的，參考 TCCIP 應用全球氣候模式 CMIP5 模擬結果之降尺度資料，將全臺灣以 5 公里 × 5 公里為網格的方式進行切割 (如圖 1)，並以圖層套疊之方式，建立地下

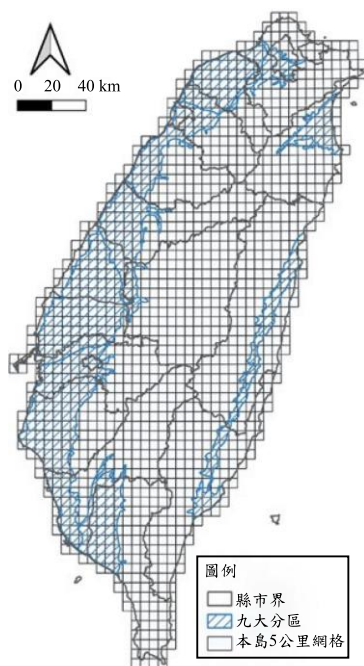


圖 1 本研究設定之網格範圍

水衝擊評估方法，探討在氣候變遷條件下對於臺灣地下水資源衝擊，並提出適當之調適策略。

2.1 設定氣候變遷情境與關鍵指標

為探討氣候變遷對地下水水質變化可能產生的影響，本研究設定兩種情境進行地下水衝擊評估。情境一為降雨量增加，因強降雨所導致之地表逕流量增加，沖刷地表污染物，進而提升污染物入滲機率；情境二為降雨量減少，因地表水資源面臨供應量不足之疑慮，地下水做為備援用水，除需求量提高，但亦須考量地下水質因此劣化而影響供給之可能。因此，本研究分別評估氣候變遷兩種情境下對地下水之衝擊，提出可能的影響區域，研析地下水資源管理面臨問題，並提出地下水資源管理之建議。

根據世界氣候組織 (WMO) 製定有極端氣候指標 (ETCCDI)，長期應用於評估全球極端氣候變化情況，排除不適用臺灣氣候特徵後，國內目前共計使用 22 個指標，其中歸屬於降雨與溫度二類之指標分別有 11 個。於本研究中，雨量增加及減少兩種情境，前者選定年總降雨量及降雨日降雨強度兩項氣候關鍵指標，後者則選定降雨量小於 10 mm 日數及年最大連續不降雨日數兩項，各指標之定義說明如下：

1. 年總量雨量 (prcpTOT)：所有降雨日中的累積降雨量，其單位為公厘 (mm)。
2. 降雨日降雨強度 (SDII)：評估所有降雨日中的平均降雨強度，將全年總降雨量除以降雨日 (降雨日定義：單日累積降雨量超過 1 公厘之日數)，便可得到該年的降雨日降雨強度，其單位為公厘/日 (mm/day)。
3. 降雨量小於 10 mm 日數：氣候關鍵指標為「降雨日 (以 10 mm 為區別門檻)」，其定義為日累積降雨量大於 10 公厘的總日數，單位為日數。本計畫轉換為降雨小於 10 公厘之總日數，以一年 365 天扣除「兩日 (10 mm)」得之。
4. 年最大連續不降雨日數 (CDD)：其定義為一年中連續最多單日累積雨量少於 1 公厘之日數，單位為日數。

2.2 關鍵指標氣候變率計算與分級

參考 TCCIP 應用全球氣候模式 CMIP5 模擬結果之降尺度資料，以 5 公里 × 5 公里為網格，計算各關鍵指標於 RCP 4.5 和 RCP 8.5 近世紀 (2016~2035 年) 及世紀末 (2081~2100 年) 兩種氣候變遷情境下，與

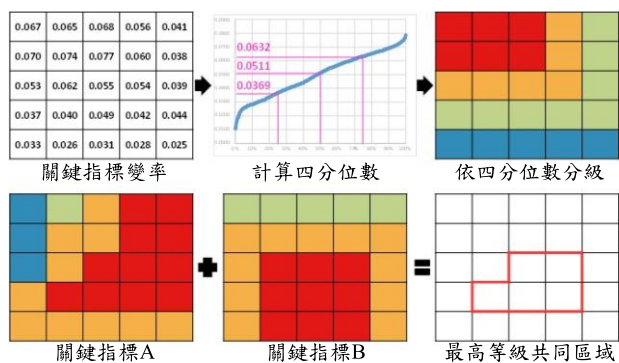


圖 2 本研究氣候變遷對地下水衝擊評估方法示意圖

歷史基期 (1986 ~ 2005 年) 之氣候變率 (Climatic Variability)，其指的是氣候從一種狀態變到另一種狀態的速度，即氣候變化的速度。並依四分位數將氣候變率區分為 4 個等級，由低至高依序分別定義為極低 (0 ~ 0.25)、低 (0.25 ~ 0.50)、中 (0.50 ~ 0.75) 及高 (0.75 ~ 1.00)，執行過程詳如圖 2 (a) 之示意。

2.3 優先關注區域篩選

雨量增加之情境依據情境中年總量雨量和降雨日降雨強度兩項氣候關鍵指標之分級結果相加，再結合根據水利署提供監測水井資料和經濟部中央地質調查所調查的評估報告，110 年「臺灣北段山區地下水資源調查與評估 (4/4)」、102 年「台灣中段山區地下水資源調查與評估 (4/4)」和 106 年「臺灣南段山區地下水資源調查與評估 (4/4)」，得到水力傳導係數 (Hydraulic conductivity, K) 進行比對，針對以水力傳導係數較高之區域作為優先關注區域。水力傳導係數控制地下水污染物移動傳輸的情形，係蒐集土壤及地下水資訊管理系統各類監測井設置時量測之數值，經正規化轉換成 0 ~ 1 之間，再經半變異元分析及克利金等地理統計方式，將點資料轉換成面資料，推估全台灣 (即每一網格) 之數值。而雨量減少之情境則是依據情境中降雨量小於 10 mm 日數和年最大連續不降雨日數兩項氣候關鍵指標之分級結果相加，歸納高等級重疊之網格，代表為關鍵指數 A 和關鍵指數 B 皆有較顯著的影響，為優先關

注區域，詳如圖 2 (b) 之示意。

2.4 地下水資源衝擊評析及調適策略建議

依據其情境設定所獲得之優先關注區域，因人為活動與環境條件之不同，地下水資源可能面臨之衝擊也有所差異。雨量增加情境因強降雨所致之污染物沖刷與入滲，將彙整關注區域內各類潛在人為活動污染源，包含民生、工業及農業等，如表 1 所示；雨量減少情境，因地表水資源面臨供需失衡之威脅，水資源供給更需仰賴水利設施之蓄存與調配能力，並需多元開發新水源以維持水源供應之穩定性 (NCDR, 2017b)。地下水為臺灣重要用水來源，亦可做為備援用水，維持優良地下水品質保障用水安全亦為重要課題，故將彙整關注區域內地表水資源現況及各類用水影響因子，包括高耗水產業、自來水普及率、灌區外農業行為等，如表 1 雨量增加情境人為潛在污染源資料蒐集清單

項目	資料原始型式	資料來源
事業	點資料(點位)	環保署座標資料
工業區污水處理廠	點資料(點位)	經濟部座標資料
民生污水處理廠	點資料(點位)	內政部營建署統計資料
土壤污染管制區	面資料(零星區域)	環保署圖層資料
地下水污染管制區	面資料(零星區域)	環保署圖層資料
污水處理率	面資料(縣市)	內政部營建署統計資料
工業區	面資料(零星區域)	經濟部圖層資料
水稻區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
旱田區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
果樹區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
養殖區	面資料(零星區域)	農委會圖層資料
畜牧區	面資料(零星區域)	農委會圖層資料

表 2 所示。考量優先關注區域所處在之地理區位，以及面臨之氣候條件、人為活動、土地利用等因子，評估可能產生的衝擊，提出可能的調適策略，做為未來地下水資源管理之依據。

表 1 雨量增加情境人為潛在污染源資料蒐集清單

項目	資料原始型式	資料來源
事業	點資料(點位)	環保署座標資料
工業區污水處理廠	點資料(點位)	經濟部座標資料
民生污水處理廠	點資料(點位)	內政部營建署統計資料

項目	資料原始型式	資料來源
土壤污染管制區	面資料(零星區域)	環保署圖層資料
地下水污染管制區	面資料(零星區域)	環保署圖層資料
污水處理率	面資料(縣市)	內政部營建署統計資料
工業區	面資料(零星區域)	經濟部圖層資料
水稻區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
旱田區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
果樹區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
養殖區	面資料(零星區域)	農委會圖層資料
畜牧區	面資料(零星區域)	農委會圖層資料

表 2 雨量減少情境各類潛在用水端及地表水資源資料蒐集清單

項目	資料原始型式	資料來源
高耗水產業	點資料(點位)	經濟部工業局統計資料
水稻區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
旱田區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
果樹區	面資料(零星區域)	內政部國土測繪中心圖層資料
水利會小組	面資料(零星區域)	農委會圖層資料
自來水普及率	面資料(鄉鎮市區)	臺北市政府主計處 台灣自來水公司統計資料
人口密度	面資料(村里)	社會經濟資料服務平臺
水資源回收中心	點資料(點位)	內政部營建署統計資料
公有單位抗旱井	點資料(點位)	經濟部水利署統計資料
河川	面資料(零星區域)	經濟部水利署圖層資料
水庫	面資料(零星區域)	經濟部水利署圖層資料
湖泊水池	面資料(零星區域)	經濟部水利署圖層資料

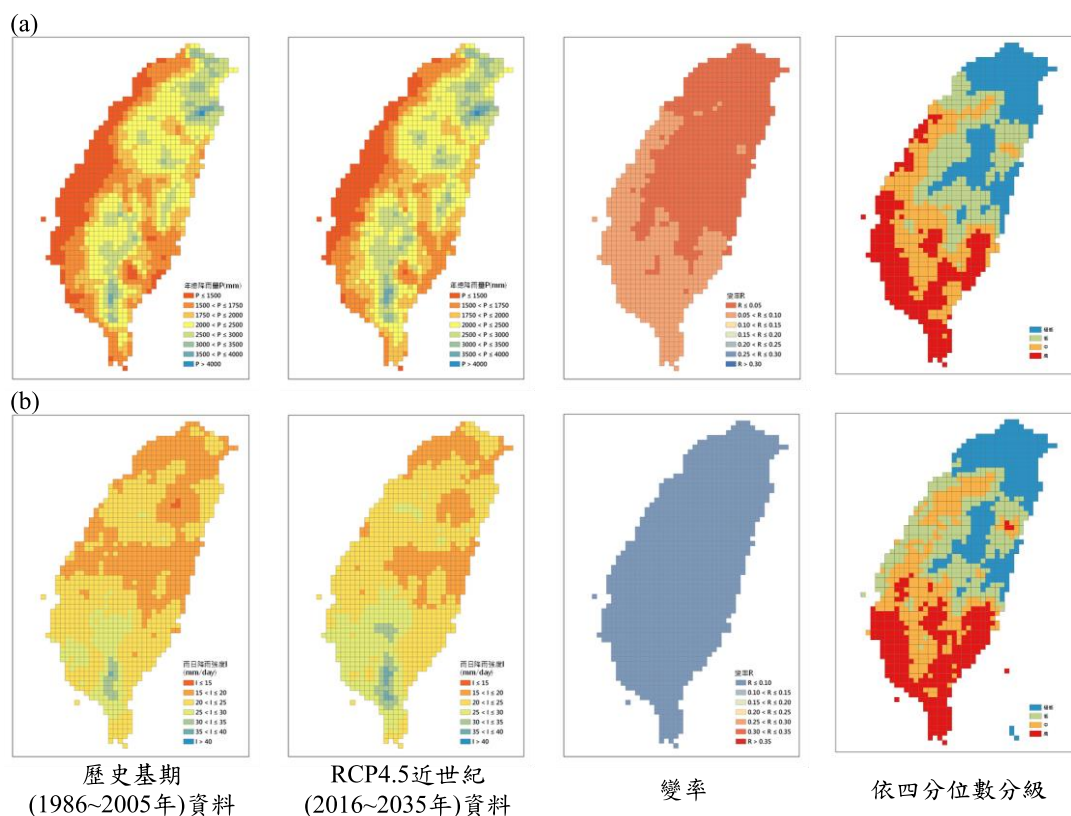


圖 3 雨量增加情境 RCP 4.5 近世紀之 (a) 年總降雨量與、(b) 降雨日降雨強度統計

三、結果與討論

3.1 氣候變遷雨量增加情境 RCP 4.5 之地下水衝擊評估

RCP 4.5 近世紀之「年總降雨量」及「降雨日降雨強度」氣候關鍵指標近世紀推估結果如圖 3 所示，世紀末推估結果如圖 4 所示。由分級結果可知，近世紀之「年總降雨量」氣候變率較大地區主要為西南沿海

及臺東區域，與「降雨日降雨強度」氣候變率較大地區相似。世紀末氣候變率較大地區除前述區域外，亦涵蓋新竹、苗栗、臺中、宜蘭及花蓮地區。

彙整「年總降雨量」及「降雨日降雨強度」兩項關鍵指標之「高」等級重疊區域，並比對水力傳導係數（水力傳導係數越大代表該區域土壤介質滲透性越強），進而限縮水力傳導係數較高之區域為優先關注區域，綜整近世紀及世紀末之雨量增加情境優先關注區域，歸納如圖 5 所示，近世紀分析獲得二個優先關注區域，世紀末獲得三個優先關注區域，主要為苗栗、臺中、高雄、屏東及花東部分區域。

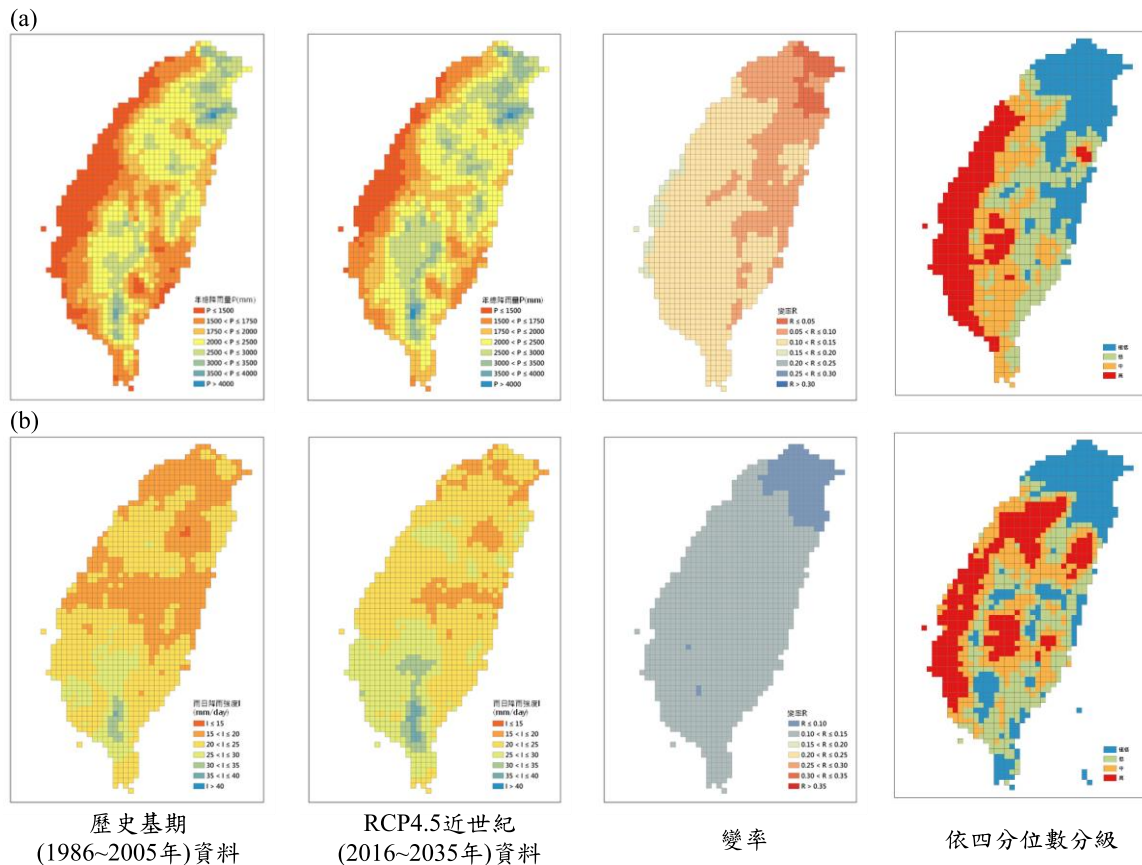


圖 4 雨量增加情境 RCP 4.5 世紀末之 (a) 年總降雨量與、(b) 降雨日降雨強度統計

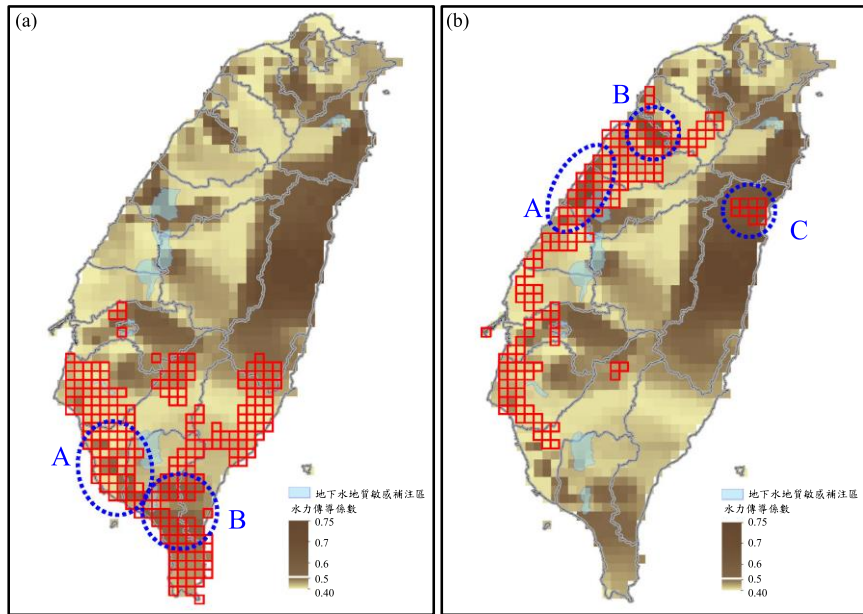


圖 5 雨量增加情境 RCP 4.5 之優先關注區域 (a) 近世紀、(b) 世紀末

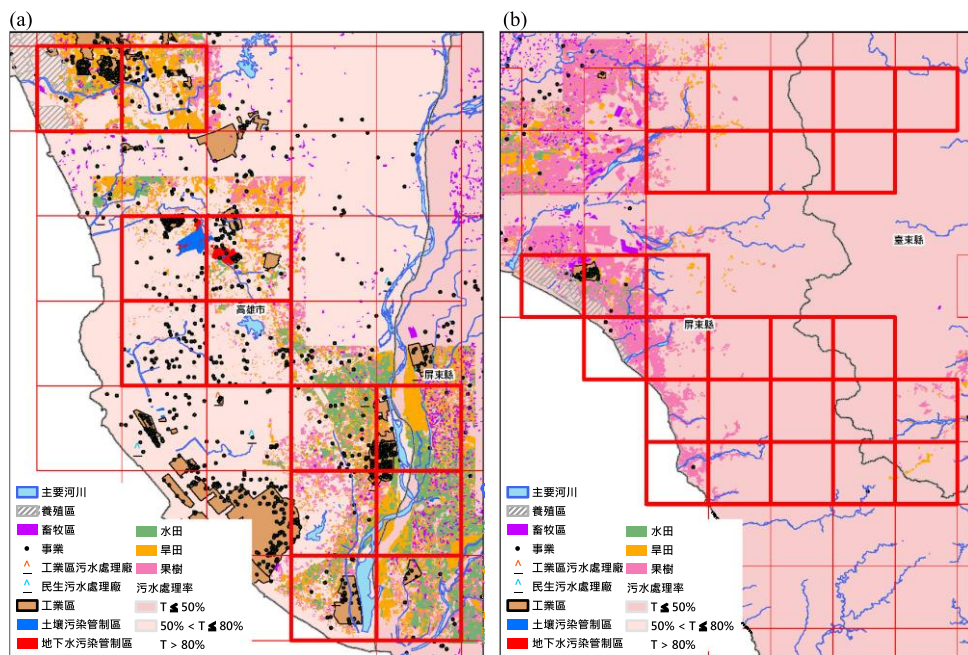


圖 6 雨量增加情境 RCP 4.5 近世紀人為潛在污染源套疊情形 (a) A 關切區域、(b) B 關切區域

(a)

(b)

(c)

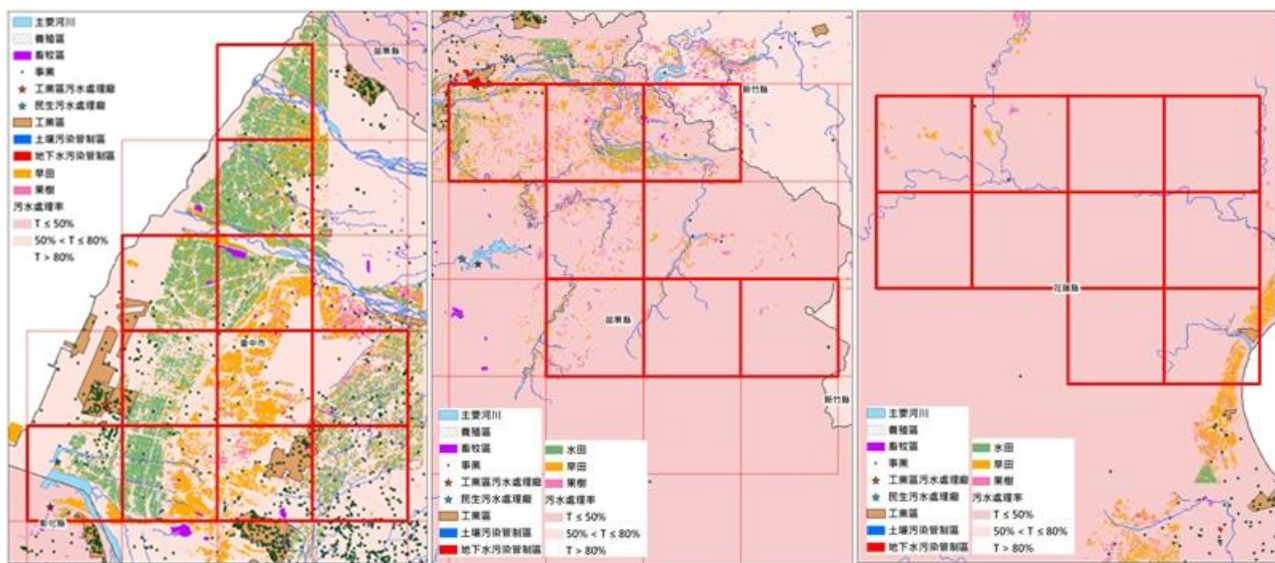


圖 7 雨量增加情境 RCP 4.5 世紀末人為潛在污染源套疊情形 (a) A 關切區域、(b) B 關切區域、(c) C 關切區域

考量氣候變遷下雨量增加時，因強降雨所致之逕流量增加，沖刷地表污染物導致污染入滲機率提升，對於優先關切域彙整各項類人為活動潛在污染源，近世紀及世紀末之潛在污染源相關圖層套疊結果如圖 6 及錯誤! 找不到參照來源。所示。根據近世紀關切區域 A 區域統計結果，涵蓋 12 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 6 處工業區污水處理廠、618 處事業、民生污水處理率約 60.8 %、畜牧區約 257.9 公頃、養殖區約 615.3 公頃、水稻區約 2,690.7 公頃、旱作區約 3,662.6 公頃、果樹區約 1,563.9 公頃、工業區約 1,824.9 公頃。已有污染事實之土壤污染管制區約 349.8 公頃，地下水污染管制區則約 433.4 公頃。而 B 區域則涵蓋 27 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 1 處工業區污水處理廠、45 處事業、民生污水處理率約 26.4 %、畜牧區約 107.9 公頃、養殖區約 1,381.0 公頃、水稻區約 201.9 公頃、旱作區約 437.7 公頃、果樹區約 4,102.6 公頃、工業區約 264.9 公頃。無已污染事實之土壤及地下水污染管制區。

根據世紀末關切區域 A 區域統計結果，涵蓋 11 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 2 處工業區污水處理廠、1 處民生污水處理廠、411 處事業、民生污水處理率約 66.4 %、畜牧區約 190.3 公頃、水稻區約 6,158.5 公頃、旱作區約 4,561.6 公頃、果樹區約 439.1 公頃、工業區約 820.2 公頃。已有污染事實之土壤污染管制區約 0.19 公頃，地下水污染管制區則約 0.16 公頃。B 區域則涵蓋 7 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 17 處事業、民生污水處理率約 50.1 %、畜牧區約 23.6 公頃、水稻區約 297.0 公頃、旱作區約 1,137.6 公頃、果樹區約 107.4 公頃、工業區約 13.7 公頃。已有

污染事實之土壤污染管制區約 5.1 公頃，地下水污染管制區則約 13.9 公頃。C 區域共涵蓋 10 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 2 處事業、民生污水處理率約 44.9 %、畜牧區約 0.82 公頃、旱作區約 236.4 公頃、果樹區約 43.6 公頃、工業區約 47.1 公頃。無已污染事實之土壤及地下水污染管制區。

3.2 氣候變遷雨量增加情境 RCP 8.5 之地下水衝擊評估

依據前述的分析方法，將代表濃度路徑增加為 8.5，近世紀之「年總降雨量」及「降雨日降雨強度」氣候關鍵指標推估結果圖 8 所示，世紀末推估結果如圖 9 所示。由分級結果可知，「年總降雨量」氣候變率較大地區主要為西南沿海及花蓮、臺東區域，與「降雨日降雨強度」氣候變率較大地區相似。

比較「年總降雨量」、「降雨日降雨強度」、與水力傳導係數間之關係，近世紀及世紀末之雨量增加情境優先關注區域如圖 10 所示，主要為高雄、屏東及花東部分區域。

將優先關切區域內各項人為活動潛在污染源，與近世紀及世紀末關切區域套疊進行統計，結果如圖 11 所示。根據圖 11(a) 所計算的 A 區域涵蓋 32 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 8 處工業區污水處理廠、5 處民生污水處理廠、969 處事業、民生污水處理率約 62.2 %、畜牧區約 222.2 公頃、養殖區約 1,883.4 公頃、水稻區約 4,671.8 公頃、旱作區約 7,981.4 公頃、果樹區約 7,653.1 公頃、工業區約 5,149.3 公頃。已有污染事實之土壤污染管制區約 342.9 公頃，地下水污染管

制區則約 447.3 公頃。圖 11 (b) 所計算的 B 區域涵蓋 44 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 1 處工業區污

水處理廠、45 處事業、民生污水處理率約 24.4 %、畜牧區約 493.5 公頃、養殖區約 3,368.5 公頃、水稻區約

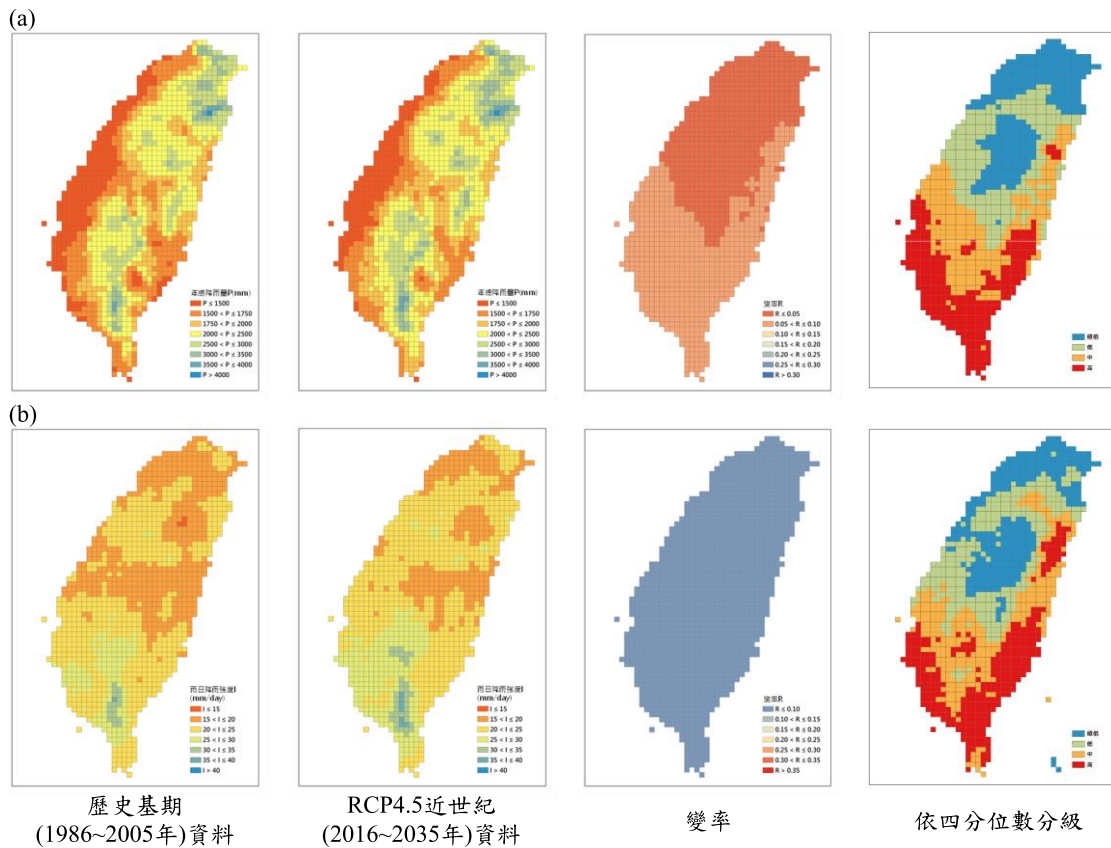


圖 8 雨量增加情境 RCP 8.5 近世紀之 (a) 年總降雨量與、(b) 降雨日降雨強度統計

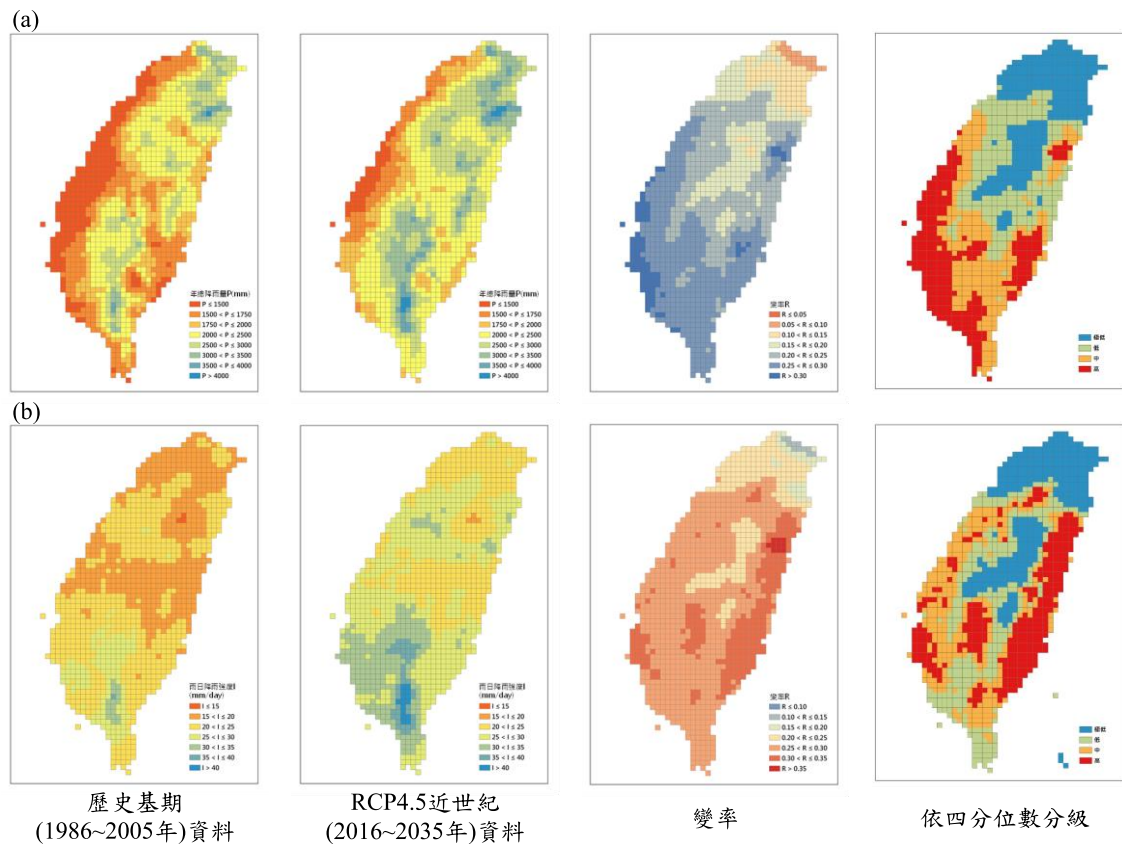


圖 9 雨量增加情境 RCP 8.5 世紀末之 (a) 年總降雨量與、(b) 降雨日降雨強度統計

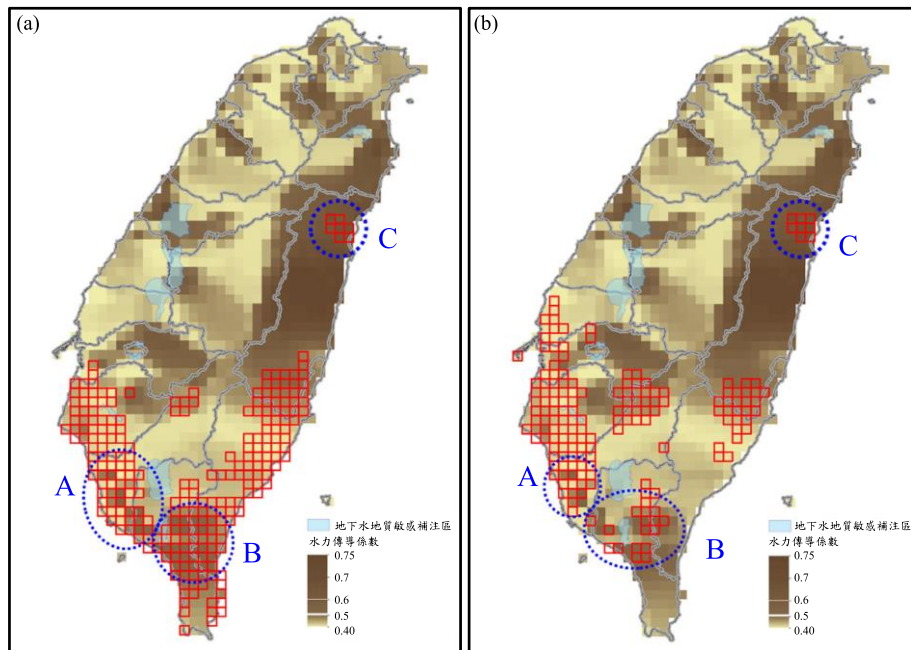


圖 10 雨量增加情境 RCP 8.5 之優先關注區域 (a) 近世紀、(b) 世紀末

223.5 公頃、旱作區約 1,020.4 公頃、果樹區約 6,104.885 公頃、工業區約 264.9 公頃。無已污染事實之土壤及地下水污染管制區。而圖 11 (c) 所計算的 C 區域，其涵蓋 7 個網格，範圍內潛在人為污染源包含 2 處事業、

民生污水處理率約 44.9 %、畜牧區約 0.82 公頃、旱作區約 198.4 公頃、果樹區約 58.2 公頃、工業區約 47.1 公頃。無已污染事實之土壤及地下水污染管制區。

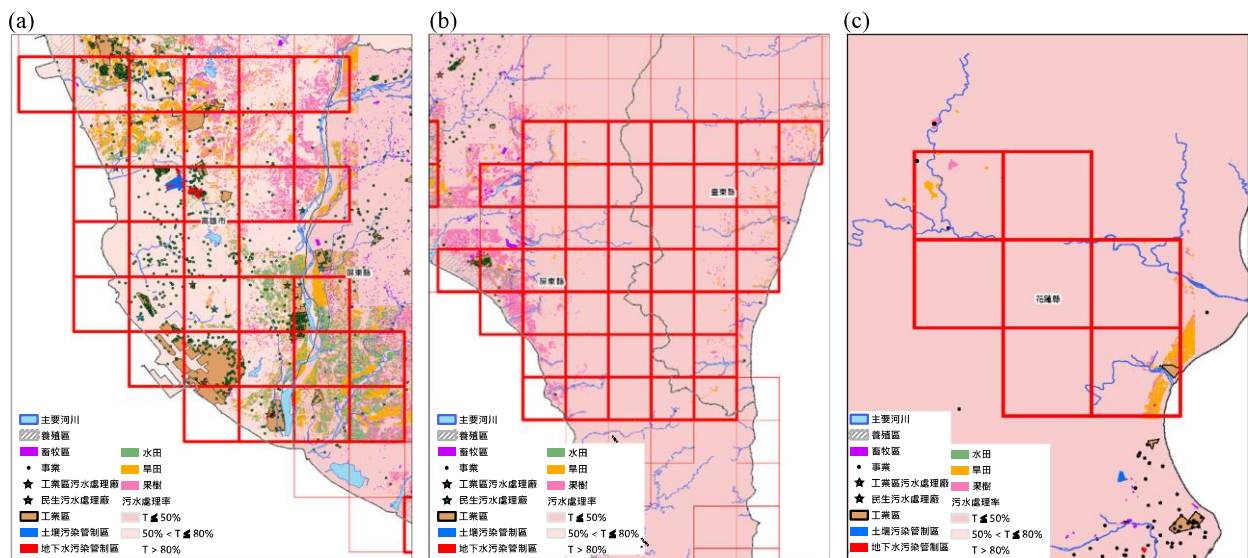


圖 11 雨量增加情境 RCP 8.5 近世紀與世紀末人為潛在污染源套疊情形 (a) A 關切區域、(b) B 關切區域、(c) C 關切區域

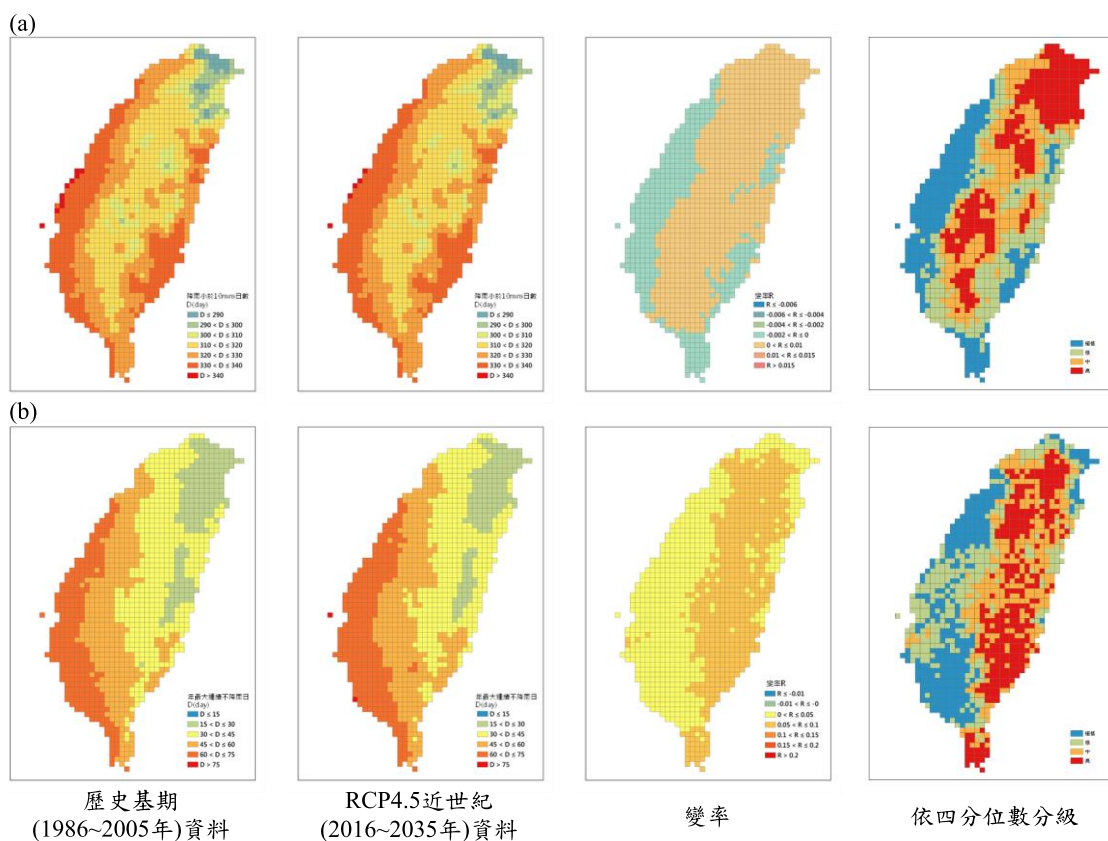


圖 12 雨量減少情境 RCP 4.5 近世紀之 (a) 降雨量小於 10 mm 日數與、(b) 最大連續不降雨日數統計

3.3 氣候變遷雨量減少情境 RCP 4.5 之地下水衝擊評估

RCP 4.5 近世紀之「降雨量小於 10 mm 日數」及

「年最大連續不降雨日數」氣候關鍵指標近世紀推估結果如圖 12 所示，世紀末推估結果如圖 13 所示。由分級結果可知，「降雨量小於 10mm 日數」及「年最大連續不降雨日數」受氣候變遷影響地區有些差異，將此兩項關鍵指標之「高」等級重疊區域，歸納近世

紀及世紀末之雨量減少情境優先關注區域如圖 14 所示，主要為新北、桃園及宜蘭部分區域。

考量氣候變遷下雨量減少，且豐枯水期時空變化顯著，水資源供給需仰賴水利設施之蓄存與調配能力，並需多元開發新水源以維持水源供應之穩定性

(NCDR, 2019)。地下水為臺灣水資源供應之備援用水，維持優良地下水品質保障用水安全亦為重要課題。針對研究區域進行分析，因近世紀及世紀末關切區域重疊，故以兩者疊加範圍最大區域作為關切區域，並彙整其各類潛在用水端及地表水資源資料，套疊結果如

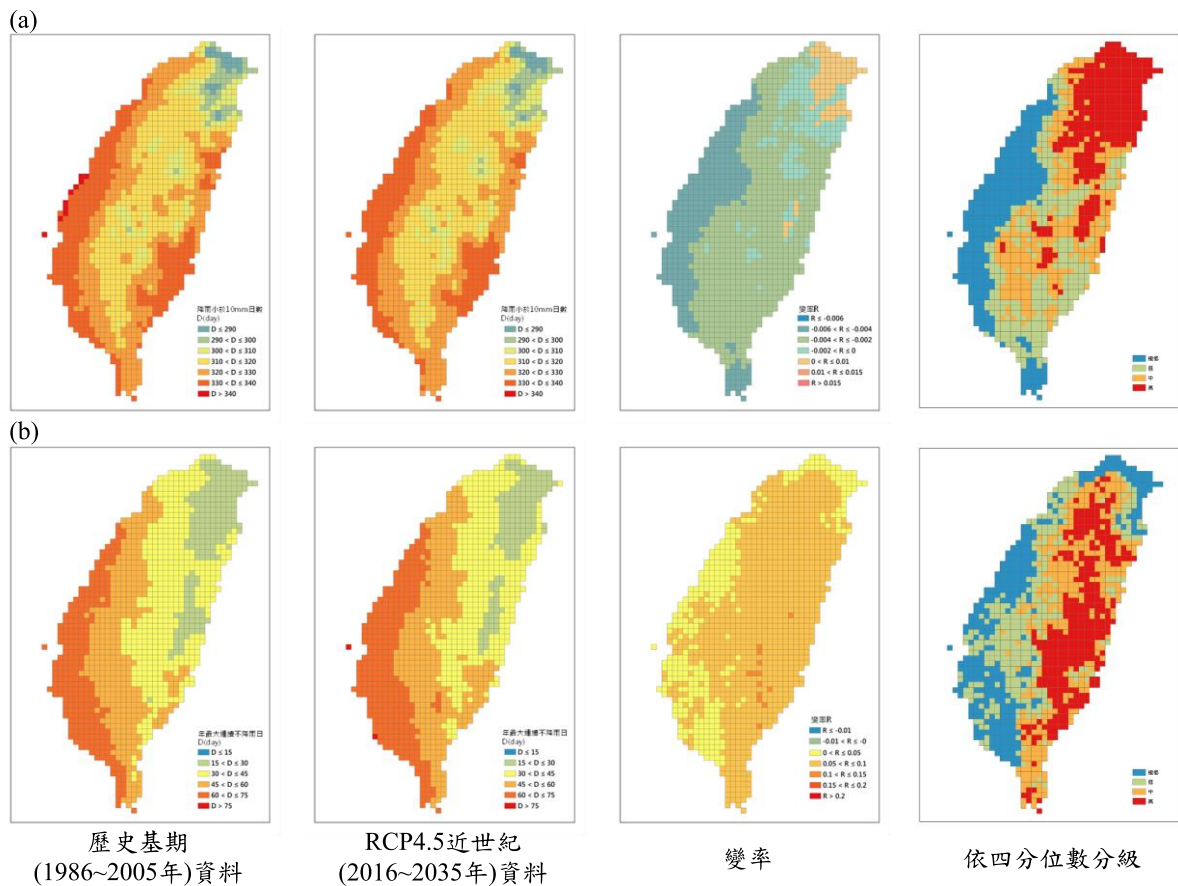


圖 13 雨量減少情境 RCP 4.5 世紀末之 (a) 降雨量小於 10 mm 日數與、(b) 最大連續不降雨日數統計

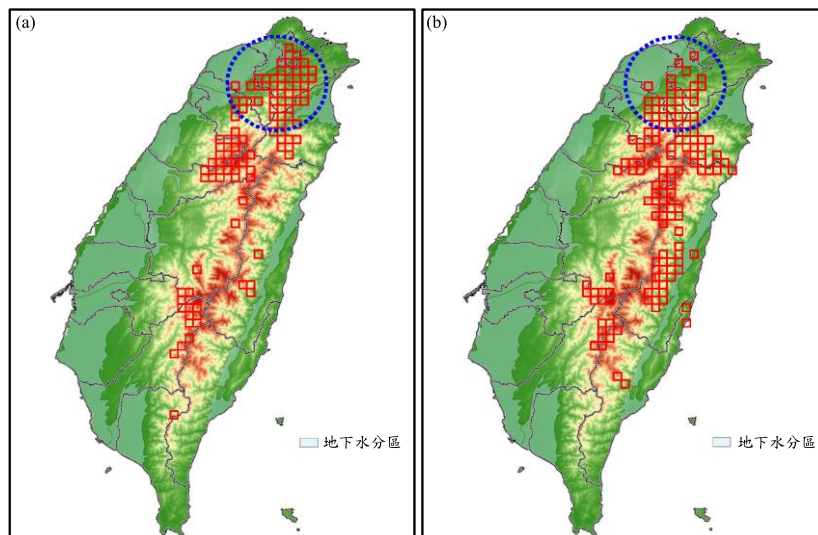


圖 14 雨量減少情境 RCP 4.5 之優先關注區域 (a) 近世紀、(b) 世紀末

圖 15 所示。其優先關注之 62 個網格範圍中，各類潛在用水端包含 12 處高耗水產業、水稻區約 653.1 公頃、旱作區約 4,932.4 公頃、果樹區約 2,575.1 公頃、自來水普及率約 9.5 ~ 100 % (平均約 62.1%)、人口密度約 8 ~ 38,185 人/平方公里。而目前地表水資源則包含 19 口抗旱井、1 處水資源回收中心、北勢溪、新店溪、景美溪與蘭陽河流域，及約 353.1 公頃湖泊水池，並涵蓋翡翠水庫集水區。

3.4 氣候變遷雨量減少情境 RCP 8.5 之地下水衝擊評估

依據前述的分析方法，將代表濃度路徑增加為 8.5，近世紀之「降雨量小於 10 mm 日數」及「年最大連續不降雨日數」氣候關鍵指標推估結果圖 16 所示，世紀末推估結果如圖 17 所示。由分級結果可知，「降雨量小於 10 mm 日數」氣候變率較大地區主要為北部

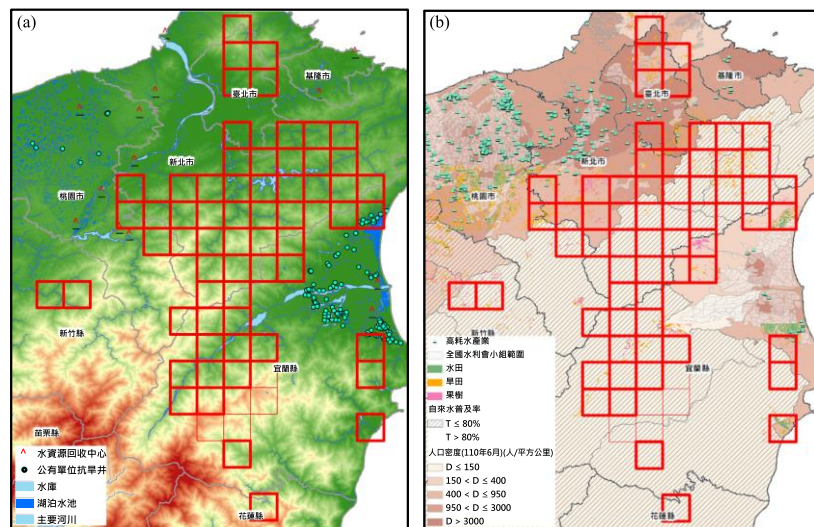


圖 15 雨量減少情境 RCP 4.5 近世紀與世紀末關切區域 (a) 地表水資源套疊情形、(b) 各類潛在用水端套疊情形

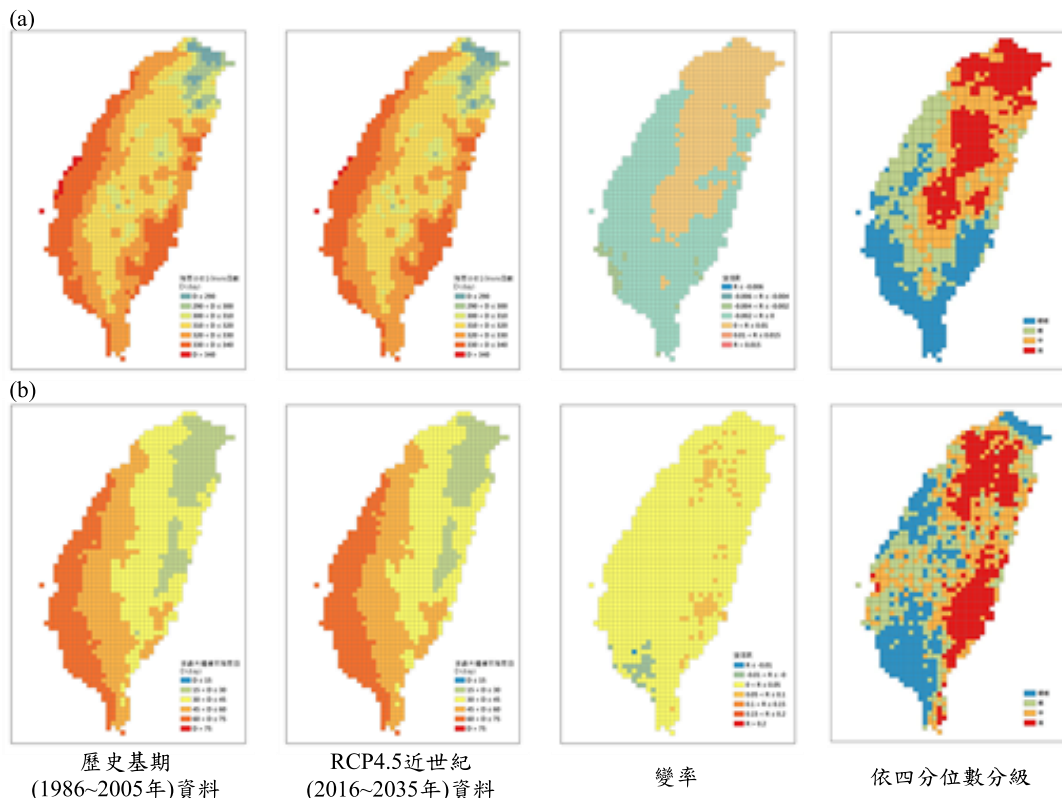


圖 16 雨量減少情境 RCP 8.5 近世紀之 (a) 降雨量小於 10 mm 日數統計、(b) 最大連續不降雨日數統計

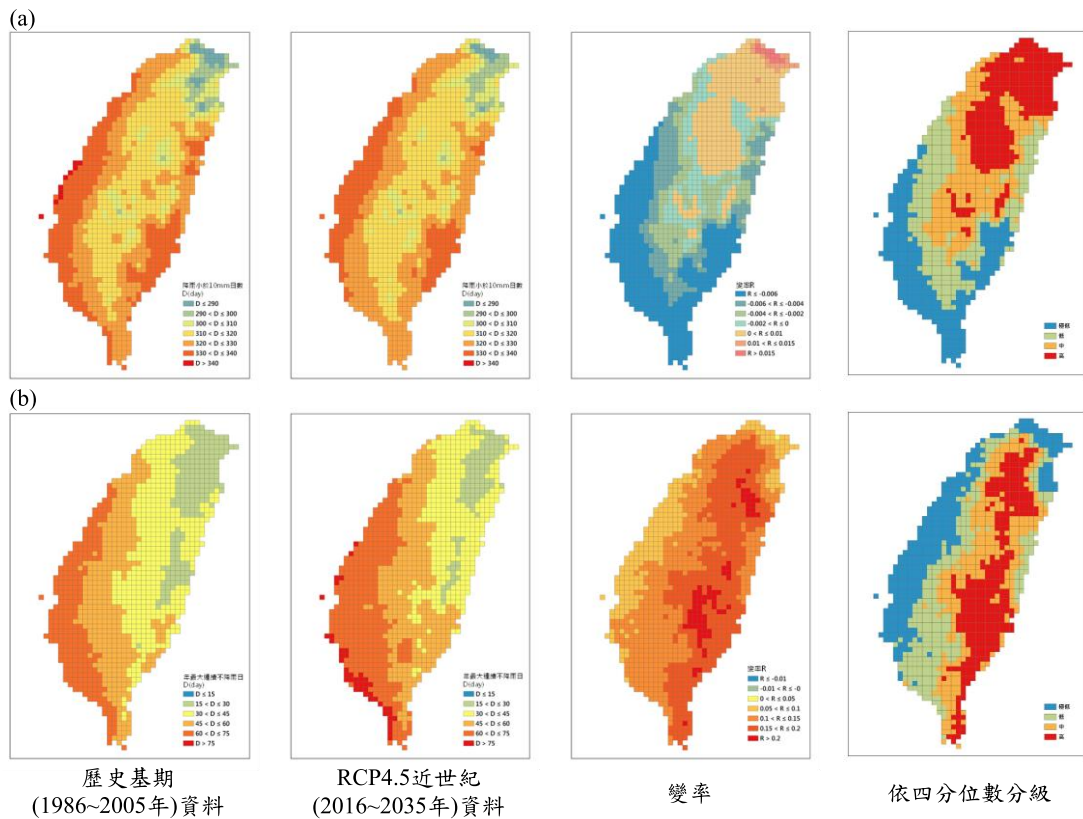


圖 17 雨量減少情境 RCP 8.5 世紀末之 (a) 降雨量小於 10 mm 日數與 (b) 最大連續不降雨日數統計

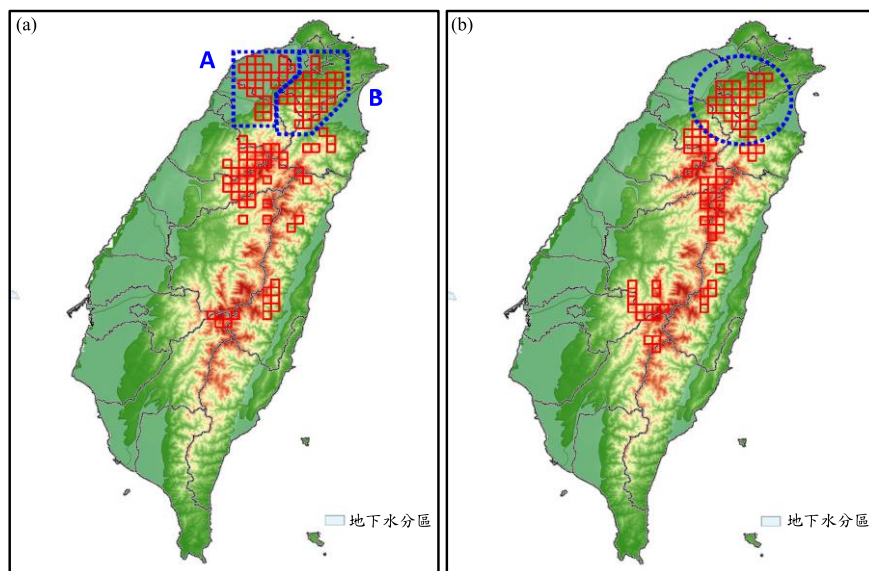


圖 18 雨量減少情境 RCP 8.5 之優先關注區域 (a) 近世紀、(b) 世紀末

區域如臺北、新北、桃園等，「年最大連續不降雨日數」氣候變率較大地區為北部與東部區域。

彙整「降雨量小於 10 mm 日數」及「年最大連續不降雨日數」兩項關鍵指標之「高」等級重疊區域，歸納近世紀及世紀末之雨量減少情境優先關注區域如圖 18 所示，主要為新北及桃園部分區域。

針對研究區域進行分析，因近世紀及世紀末關切區域重疊，故以兩者疊加範圍最大區域作為關切區域。因此，針對最大範圍關切區域進行分析，並彙整其各類潛在用水端及地表水資源資料，圖層套疊如圖 19 所示。

根據圖 19 所計算 A 區域優先關注之 25 個網格範圍中，各類潛在用水端包含 412 處高耗水產業、水稻

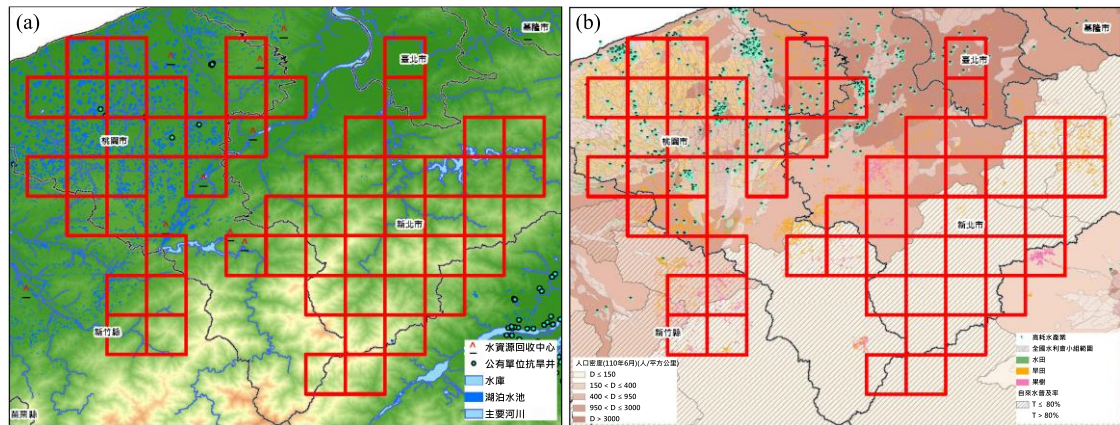


圖 19 雨量減少情境 RCP 8.5 近世紀與世紀末關切區域 (a) 地表水資源套疊情形、(b)各類潛在用水端套疊情形

區約 2,825.4 公頃、旱作區約 13,515.5 公頃、果樹區約 1,494.1 公頃、自來水普及率約 9.5 ~ 98.8 % (平均約 78.5 %)、人口密度約 18 ~ 13,315 人/平方公里。而目前地表水資源則包含 5 口抗旱井、3 處水資源回收中心、老街溪、新街溪、社子溪與大漢溪流域，及約 1,960.2 公頃湖泊水池，並涵蓋部分石門水庫集水區。

而 B 區域優先關注之 32 個網格範圍中，各類潛在用水端包含 12 處高耗水產業、水稻區約 0.82 公頃、旱作區約 1,607.7 公頃、果樹區約 1,315.4 公頃、自來水普及率約 19.5 ~ 99.8 % (平均約 51.2%)、人口密度約 14 ~ 19,248 人/平方公里。而目前地表水資源則包含 1 處水資源回收中心、新店溪流域，及約 16.2 公頃湖泊水池，並落於翡翠水庫集水區中。

3.5 地下水經營管理調適建議

在氣候變遷的威脅下，臺灣將面臨乾旱期延長、極端強降雨事件、降雨時空分布差異日趨惡化等問題，地下水資源我國為重要備援用水，於常態使用地下水之情況下，應避免過度開發利用，以確保地下水資源永續經營，然遇緊急狀況時，首要任務便為即時提供各類用水端所需無水質污染之安全用水，直至原供水系統恢復原有供應能力為止。而根據本研究評析氣候變遷雨量增加及雨量減少兩種情境下，對地下水水質與水量管理、水資源使用與調配等問題更加嚴峻。

綜整前述 3.1-3.4 節的成果，本研究將關切區域各項人為活動潛在污染源和各類潛在用水端等資料彙整如表 3 和表 4，在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 的雨量增加之情境，於評估獲得的優先關注區域 (苗栗、臺中、高雄、屏東及花東部分區域)，根據土地利用統計結果，發現苗栗、臺中及花東部分區域中，農業用地 (水稻區、旱作區和果樹區) 總面積高達 12,980 公頃；工業

用地總面積達 880 公頃。潛在污染源由人為活動所致之地下水污染來源，可能為農業活動引起的非點源污染。因此根據過去的研究經驗，有效針對源頭管制，改變農業活動的習慣，可以顯著減少農業非點源污染物的排放，進而減少地下水水質污染。且於苗栗和臺中關注區域中，已劃設土壤和地下水污染管制區，因此此兩個區域在未來需要加強污染場址管理，以免污染擴散。

表 3 氣候變遷雨量增加情境關切區域各項人為活動潛在污染源資料彙整

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	近世紀	世紀末	近世紀	世紀末
優先關注區域	高雄、屏東、苗栗、臺中及花東部分區域		高雄、屏東及花東部分區域	
工業區污水處理廠	9		9	
民生污水處理廠	1		5	
事業(處)	1,093		1,016	
民生污水處理率 (%)	26.4-66.4		24.4-62.2	
畜牧區(公頃)	580.52		716.52	
養殖區(公頃)	1,996.30		5,551.90	
水稻區(公頃)	9,348.10		4,895.30	
旱作區(公頃)	10,035.90		9,200.20	
果樹區(公頃)	6,256.60		13,816.18	
工業區(公頃)	2,970.20		5,461.30	
已有污染事實之土壤污染管制區(公頃)	355.09		342.9	
地下水污染管制區(公頃)	447.46		447.3	

表 4 候變遷雨量減少情境關切區域各類潛在用水端資料彙整

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	近世紀	世紀末	近世紀	世紀末
優先關注區域	新北、桃園及宜蘭部分區域		新北及桃園部分區域	
高耗水產業(處)	12		418	
水稻區(公頃)	653.10		2,825.4	
旱作區(公頃)	4,932.40		14,011.8	
果樹區(公頃)	2,575.10		1,494.1	
自來水普及率(%)	9.5~100 (平均約 62.1)		18.0-99.8 (平均約 65.9)	
人口密度(人/平方公里)	8~38,185		14~19,248	

而高雄與屏東地區的關注區域中，農業用地（水稻區、旱作區和果樹區）總面積高達 12,655 公頃；工業用地總面積達 2,100 公頃；畜牧和養殖用地總面積達 2,360 公頃。潛在污染源由人為活動所致之地下水污染來源可能為農業活動與工業排放。農業方面，因在農耕過程施用肥料與農藥，可能隨著降雨或灌溉水入滲至地下水中，畜牧業產生的糞尿廢水未妥善處理逕行排放，亦有污染地下水之疑慮；於工業方面，因農田、工廠與住宅錯雜，且灌溉與廢水排放渠道並未分離，造成農地與地下水受到間接污染。此外，產業製程化學品亦可能透過排入承受水體後入滲、於廠內因地表逕流、桶槽洩漏及經下水道管線破損而洩漏等三大途徑，入滲至地下水導致污染（環保署，2011）。且高雄地區附近，已劃設約 780 公頃的土壤和地下水污染管制區，多數範圍鄰近工業用地，因此未來需要多加控管工業廢水的排放規範，以減少污染來源。

在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 的雨量減少之情境，於經評估獲得的優先關注區域（新北、桃園及宜蘭部分區域），根據資料統計結果，發現新北、桃園及宜蘭部分區域中，潛在的用水端包含 424 處高耗水產業的工業用水、26,000 公頃的農業用水及自來水普及率 78% 的民生用水，而目前的地表水資源主要仰賴河川流域及約 2,300 公頃湖泊水池（涵蓋翡翠和石門水庫集水區）。根據此三個縣市的產業型態分布，於工業和農業在關注區域中比重差異不大，若在氣候變遷雨量減少，且豐枯水期可用水資源差異顯著時，將更需要水利設施之蓄存與調配能力，及新水源以維持水源供給之穩定，而多數會選擇使用地下水做為備援用水，因此下水資源的調配與品質極其重要，因若未來水資源需求大幅增加，大量抽用地下水，可能導致該些地區發生嚴重地層下陷問題，導致排洪能力降低，造成水

土資源永久性損害，使社會付出巨大成本（水利署，2017）。

為顧及民眾生計與產業發展，應將地下水資源進行分級應用。於地下水質良好的區域內，可能有補注量不足、地下水流失之情形，管理單位可依據水權資料、各單位取水量以及產業分布，限縮各用水單位之地下水取用量，並規劃產業取用優先順序，避免區域地下水匱乏情形惡化，針對區域內用水單位進行地下水資源調配，限制用水安全風險較高之區域取用地下水，並針對高污染風險事業進行污水排放加強管控，以保障用水安全。而於水質不佳之區域，可能導致該區域已發生地層下陷、地下水資源流失、鹽化或水質污染等情形，應盡速釐清水質惡化之原因，並防止地下水資源持續受到破壞，確保用水安全。於對此情境下，建議管理單位以不開發地下水資源使用為主，並可透過污染源頭管理或地下水回注等策略進行水質改善。

四、結論

本研究針對氣候變遷下對地下水資源衝擊之評估結果，氣候變遷雨量增加之情境，在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 近世紀及世紀末模擬中，歸納出優先關注區域主要為苗栗、臺中、高雄、屏東及花東部分區域；而氣候變遷雨量減少之情境，在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 近世紀及世紀末模擬中，歸納出優先關注區域主要為新北、桃園及宜蘭部分區域。在氣候變遷下雨量增加時，因強降雨所致之逕流量增加，沖刷地表污染物，進而導致污染物入滲機率提升，潛在污染源由人為活動所致之地下水污染來源可分民生、農業與工業，於民生方面，包含家庭廢污水、下水道或化糞池滲漏之污水、醫院潛在感染性污水、垃圾處置不當等，均可能入滲至地下水中；農業方面，因在農耕過程施用肥料與農藥，可能隨著降雨或灌溉水入滲至地下水中，畜牧業產生的糞尿廢水未妥善處理逕行排放，亦有污染地下水之疑慮；於工業方面，因農田、工廠與住宅錯雜，且灌溉與廢水排放渠道並未分離，造成農地與地下水受到間接污染。此外，產業製程化學品亦可能透過排入承受水體後入滲、於廠內因地表逕流、桶槽洩漏及經下水道管線破損而洩漏等三大途徑，入滲至地下水導致污染。

為能健全管理地下水水質，須有效使用地下水資源，規劃產業取用優先順序，並可透過污染源頭管理或地下水回注等策略進行水質改善。然氣候變遷對地

下水水質之衝擊，涉及複合的自然與人為活動機制，建議未來可持續關注國際間對氣候變遷的評估報告，並滾動式修正優先關注區域，掌握臺灣地下水資源之衝擊變化。

謝誌

本計畫部分工作之推動執行，對於行政院環境保護署的經費支持與專業指導（計畫名稱：地下水永續管理策略計畫；計畫執行期間：民國 109 年 11 月 13 日至 111 年 11 月 12 日），深表謝忱。

參考文獻

1. Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., and Ochege, F. U. "Groundwater System and Climate Change: Present Status and Future Considerations." *Journal of Hydrology*, 589, 125163, 2020.
2. Clifton, C., Evans, R., Hayes, S., Hirji, R., Puz, G., and Pizarro, C. "Water and Climate Change: Impacts on Groundwater Resources and Adaptation Options." World Bank. 2010.
3. Crosbie, R. S., McCallum, J. L., Walker, G. R., Francis, H., and Chiew, S. "Modelling Climate-change Impacts on Groundwater Recharge in the Murray-Darling Basin, Australia." *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1639, 2010.
4. Gao, M. S., and Luo, Y. M. "Change of Groundwater Resource and Prevention and Control of Seawater Intrusion in Coastal Zone." *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 31(10), 1197-1203, 2016.
5. Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., ... and Aureli, A. "Beneath the Surface of Global Change: Impacts of Climate Change on Groundwater." *Journal of Hydrology*, 405(3-4), 532-560, 2011.
6. Green, T. R. "Linking Climate Change and Groundwater." *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*, 97-141, 2016.
7. Han, D., and Currell, M. J. "Review of Drivers And Threats to Coastal Groundwater Quality in China." *Science of the Total Environment*, 806, 150913, 2022.
8. IPCC (2014a). AR5 Synthesis Report: Climate Change.
9. IPCC (2014b). Climate Change 2014- Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects.
10. IPCC (2021). AR6 Synthesis Report: Climate Change.
11. Johnson, J. M., Moore, L. J., Ells, K., Murray, A. B., Adams, P. N., MacKenzie III, R. A., and Jaeger, J. M. "Recent Shifts in Coastline Change and Shoreline Stabilization Linked to Storm Climate Change." *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(5), 569-585, 2015.
12. Margat, J., and Van der Gun, J. "Groundwater Around the World: A Geographic Synopsis." *Crc Press*. 2013.
13. Samper, J., Li, Y., and Pisani, B. "An Evaluation of Climate Change Impacts on Groundwater Flow in the Plana de La Galera and Tortosa Alluvial Aquifers (Spain)." *Environmental Earth Sciences*, 73, 2595-2608, 2015.
14. Shahid, S., Alamgir, M., Wang, X. J., and Eslamian, S. "Climate Change Impacts on and Adaptation to Groundwater." *Handbook of Drought and Water Scarcity: Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity*. 2017.
15. UN Water. Water and Climate Change. 2020.
16. 國家災害防救科技中心 (NCDR)，臺灣氣候變遷科學報告 (物理現象與機制)，2017a。
17. 國家災害防救科技中心 (NCDR)，台灣氣候變遷科學報告 (衝擊與調適面向)，2017b。
18. 國家災害防救科技中心(NCDR)，「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」，2019。
19. 蔡易繹、葉信富，「探討降雨強度趨勢與重現週期對未飽和邊坡穩定之影響」，農業工程學報第 65 卷第 2 期，2019。