

氣候變遷下台灣地區地下水資源補注之影響評估

Climate Change Impacts on Taiwan Groundwater Recharge

主管單位：經濟部水利署

余化龍 ¹	譚義績 ¹	徐年盛 ²
Yu, Hwa-Lung	Tan, Yih-Chi	Hsu, Nien-Sheng
王逸民 ³	林遠見 ¹	廖玲琬 ³
Wang, Yi-Min	Lin, Yuan-Chien	Liao, Ling-Wan
	李冠緯 ²	劉宏仁 ²
	Li, Guan-Wei	Liu, Hung-Jen

¹ 國立臺灣大學生物環境系統工程系

² 國立臺灣大學土木工程學系

³ 逸奇科技股份有限公司

摘要

近年來，溫室效應導致長期氣候變遷與短期天氣之變異性增加，依據研究報告顯示，氣候變遷導致臺灣地區氣候與水文現象有極端化之趨勢，暴雨與乾旱將更加頻繁。因此，氣候變遷對於生態環境、水資源與農業環境等影響將會顯著增加。

長期氣候特性改變，可能加劇短期天氣變異與極端水文事件頻率增加，造成氣溫與降雨發生變化，進一步影響河川流量，而降雨及河川流量為地下水補注主要來源，降雨特性的改變將直接或間接影響到地下水的補注量。因此，為了瞭解未來氣候變遷對於台灣地區地下水環境的影響為何，如地下水水位、地下水補注量的時間與空間分佈特性等，本計畫蒐集國內外相關文獻，並評估適合台灣地區地下水環境的理論及工具，研發國內外獨樹一幟的地下水分析方法，即透過經驗正交函數法結合訊號分析技術以及地下水歷線法進行屏東平原氣候變遷下地下水補注量之估算以及分析，以提供政府單位未來在地下水資源保育及運用之重要參考。

評估結果顯示，氣候變遷下，總無降雨日與平均連續無降雨日數在未來短期明顯增加，而連續無降雨事件次數則明顯減少，降雨型態愈趨集中導致持續性補注的缺乏，造成整體補注量明顯減少。為因應氣候變遷所造成之衝擊，我國應盡早擬訂調適策略，以防範未來地下水補注量之匱乏所造成一連串水資源管控之危機。

關鍵詞：氣候變遷、地下水、補注

Abstract

The greenhouse effect has led to climate change and increase in variability of short-term weather in these few decades. The researches show that global warming causes a trend that the climate and occurrence of flood and drought in Taiwan becomes extremer. Global warming and climate change will have more significant effects on ecological environment, water resources and agricultural environment.

The change of long-term climatic characteristics could probably enhance the variation of short-term weather and build up the frequency of extreme hydrological events. To understand how the climate change affects the groundwater environment in Taiwan, this project will include the following tasks and can be a reference for future conservation and usage of groundwater resources: (1) collecting domestic and foreign references about the impact of climate change on groundwater resources, (2) achieving the theories of how to assess the influence of climate change on recharging of groundwater and the corresponding tools, data and their sources, (3) investigating and recommending the theories that fits in terms of evaluating groundwater resources in Taiwan, (4) choosing one suitable groundwater region for analyzing the impact (for example, groundwater level, variation of recharging volume in space and time and corresponding strategies) of future climate change on recharging of groundwater. This project proposed a new method combining Empirical Orthogonal Function (EOF), signal analysis techniques, and groundwater hydrograph method to derive the recharge amount under climate change in the future. The results are very helpful to government to adapt the groundwater management for climate change.

The results show that the dry days become much more in the future, and causing the groundwater recharge amount will significantly decrease. To adapt the impact of climate change and avoid the crisis of groundwater management, the government should set up the strategy as earlier as possible.

Keywords : Climate Change, Groundwater, Recharge

一、前言

氣候變遷與全球暖化所造成的環境問題已是全人類所必須嚴正面對的挑戰；聯合國氣候變遷小組(IPCC)於2007年11月的評估報告中提出警告：「全球暖化的影響已經顯而易見，而且本世紀料將加劇，有可能無法逆轉」。面對如此嚴峻的挑戰，必須有更積極的態度與行動力；為能審慎評估全球氣候變遷可能造成之地下水環境衝擊及相關因應對策，詳予考慮我國國情、體制、資源、研發及實務工作之人力。本項研究為整合水文因子情境設定、地下水補注之衝擊評估及建議因應對策，以建立氣候變遷下台灣地區地下水資源補注之影響評估，並擇一合適地下水區進行分析。

本計畫旨在因應氣候變遷環境下，評估台灣地區地下水資源補注之影響。全球氣候變遷對於世界各國皆造成莫大的衝擊(圖1-1)，包含生態環境的改變、長時間的乾旱、暴雨事件造成洪澇、國土變遷、糧食短缺等。針對地下水資源補注的衝擊最直接的因子就是水文現象的改變，其中包含極端降雨事件之增加、降雨日數之減少、海平面與河口水位上升等。因此，為降低氣候變遷對於地下水資源補注所帶來之衝擊，本計畫針對氣候變遷之降雨變化影響，經由相關研究理論與工具，建置適合台灣地下水環境的理論及工具，以分析未來氣候變遷下地下水資源補注之影響，如地下水水位、補注量在時間、空間變化及建議因應對策。

本計畫將審慎評估全球氣候變遷對地下水資源補注可能造成之衝擊，詳細考慮國內外影響評估的研究理論與工具，奠定地下水資源補注因應氣候變遷近、中、遠程因應對策。



圖 1-1 全球氣候變遷的衝擊

二、研究方法

本團隊分別就統計分析、訊號分析、地下水模式等方向蒐集國內外地下水理論與工具，皆為近年來氣象水文、地下水相關研究領域最熱門最有發展潛力的理論工具，同時並評估應用於本計畫最佳之理論與整合方式，本章將介紹本計畫所採用之理論方法詳述於下。研究流程如圖 2-1 所示。

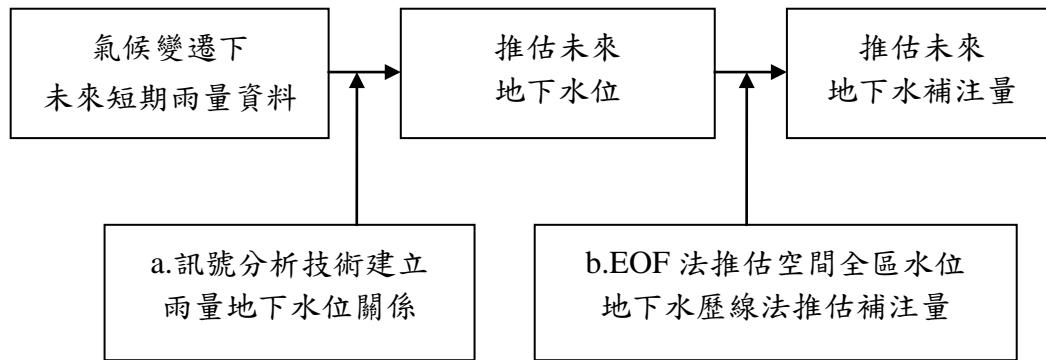


圖 2-1 氣候變遷下地下水補注量推估流程

2.1 經驗正交函數法

經驗正交函數(EOF)可將一個時空間變數拆解成多個時間與空間的變數，這些拆解出來的時空間變數經過乘積與線性疊加之後，可以還原成原本的時空間變數 (Hotelling 1933; Hannachi et al. 2007; Pearson 1901)，如式2.1.1

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (2.1.1)$$

$X(t, s)$ 代表時空間變數矩陣，矩陣維度包含空間座標以及時間序列， $u_k(s)$ 代表此時空間變數的第k個空間特徵，亦即第k個空間變數； $c_k(t)$ 代表此時空間變數的第k個時間特徵，可看作第k個空間變數所佔之權重(expansion coefficient)； k 由1至M按照此EOF在原始資料中所佔的解釋變異量大小排列，EOF1為原始資料中變異量最大的空間特徵，在本研究中最多僅使用前五個EOF即足以解釋原始資料中70~80%的變異量。

在原始的EOF方法中，首先將資料移除時間趨勢(trend)之後，排列成時間序列×空間座標的數值矩陣 X ，橫列為p個空間位置(由1到p)，直欄為該空間位置的n個時間序列(由1到n)

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & & & & \vdots \\ x_{31} & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

便可計算出共變異矩陣 $S = \frac{1}{n} X^T X$ ，EOF方法的目標即是找到一些互不相關的 (uncorrelated) 變數組合以解釋最多的原始變量，亦即找到共變異矩陣特徵向量 (eigenvector) $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_p)^T$ ，使得 X 在經過此單位向量投影轉換後得到的 $X\vec{u}$ 可以有最大的解釋變異量。

$$\max(\vec{u}^T S \vec{u}), \quad s.t., \quad \vec{u}^T \vec{u} = 1 \quad (2.1.3)$$

$$\vec{u}^T S \vec{u} = \lambda^2 \quad (2.1.4)$$

$$S \vec{u} = \lambda^2 \vec{u} \quad (2.1.5)$$

而第k個EOF即為此共變異矩陣的第k個特徵向量 \vec{u}_k ，其對應的特徵值(eigenvalue) 為 $\lambda_k^2, k = 1, 2, \dots, p$

$$\lambda_k^2 = \vec{u}_k^T S \vec{u}_k = \frac{1}{n} \vec{u}_k^T X^T X \vec{u}_k = \frac{1}{n} \|X \vec{u}_k\|^2 \quad (2.1.6)$$

此時的第k個特徵值 λ_k^2 即可代表在 \vec{u}_k 方向的投影所解釋的變異量，通常特徵值由大到小排列 $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_p^2$ ，而經由 \vec{u}_k 投影的解釋變異量百分比可以表示為：

$$\frac{100\lambda_k^2}{\sum_{k=1}^p \lambda_k^2} \% \quad (2.1.7)$$

將原始資料經由第k個EOF： $\vec{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kp})^T$ 投影後所得的 $\vec{a}_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})^T = X \vec{u}_k$ 即為第k個PC (principal component)，可將 \vec{a}_k 改寫為：

$$a_{tk} = \sum_{j=1}^p x_{tj} u_{kj} \quad (2.1.8)$$

至此可將式(2.1.8)與式(2.1.1)進行對照，在式(2.1.1)中的 $c_k(t)$ 與 $u_k(s)$ 即為式(2.1.8)

中的 x_{ij} 與 u_{kj} 。

然而在目前的實務應用上，當時空間變數的維度增加時，共變異矩陣的大小也就相應增加，一個過於龐大的共變異矩陣在計算特徵值的過程會變得過於複雜，因此我們利用奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 這個線性代數的工具來替我們解決特徵值的問題。SVD可以將一個 $n \times p$ 的資料矩陣 X 分解：

$$X = A\Lambda U^T \quad (2.1.9)$$

其中 A 與 U 分別為 $n \times r$ 與 $n \times p$ 的unitary atrices $A^T A = U^T U = I_r$ $r \leq \min(n, p)$

Λ 則為奇異值組成的對角矩陣 $\Lambda = \text{Diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$

此時把資料矩陣用 $\sqrt{n}X$ 代入：

$$\sqrt{n}X = A\Lambda U^T \quad (2.1.10)$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{n} nX^T X \\ &= (A\Lambda U^T)^T (A\Lambda U^T) \\ &= U\Lambda^T A^T A\Lambda U^T \\ &= U\Lambda^2 U^T \end{aligned} \quad (2.1.11)$$

$\Lambda^2 = \text{Diag}(\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_r^2)$ ，便可得到與式(2.1.5)類似的式子。

回到式(2-9)，利用SVD所解析出的 A 矩陣中之直欄 $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_r$ 即為EOF， U 矩陣中之欄 $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_r$ 則為PC，且EOF之間彼此垂直、PC之間彼此不相關。我們可以將式(3-9)改寫成如下形式：

$$X = \sum_{k=1}^r \lambda_k \vec{a}_k \vec{u}_k^T \quad (2.1.12)$$

$$\vec{x}_t = \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{tk} \vec{u}_k \quad (2.1.13)$$

此時可將式(2.1.13)看作式(2.1.8)的向量形式，再與式(2.1.1)進行對照：

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (2.1.1)$$

$$a_{ik} = \sum_{j=1}^p x_{ij} u_{kj} \quad (2.1.14)$$

$$\bar{x}_t = \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{ik} \bar{u}_k \quad (2.1.15)$$

$c_k(t) = x_{ij} = \lambda_k a_{ik}$ $u_k(s) = u_{kj} = \bar{u}_k$, $c_k(t)$ 即為此時空間變數的時間變量 (expansion coefficient, EC), 通常亦被稱為 EOF 振幅 (EOF amplitude)、PC 時間序列 (PC time series)、PC 得分 (PC score); 而 $u_k(s)$ 則為空間變量 EOF, 或是被稱為 PC 權重 (PC loading)。在本計畫中, 我們預期利用 EOF 將一個時空間變化之地下水位拆解成時間與空間的變數, 將地下水時空變動原本極為龐大的資料維度縮減到最重要的數個時空特徵, 並從中找出重要之地下水補注過程。

2.2 訊號分析法

地下水水位變動影響因子中, 多具有特定頻率, 如地潮、海水感潮及人為抽水等, 藉地下水水位紀錄之頻譜分析, 能偵測各因子之頻率及其強度變化, 並解析地下水水位變動之複雜現象。以訊號分析技術分析地下水變化, 可使用濾波工具及時頻轉換工具等, 並可應用訊號分析尋找雨量及地下水之關聯性, 並預測未來雨量變化對地下水位變動程度。包括 (1) 疊代式高斯濾波 (Iterative Gaussian Filter) (2) 交叉相關性分析 (3) 頻譜分析 (4) 時頻分析 (5) 獨立成份分析法 (Independent Component Analysis)。

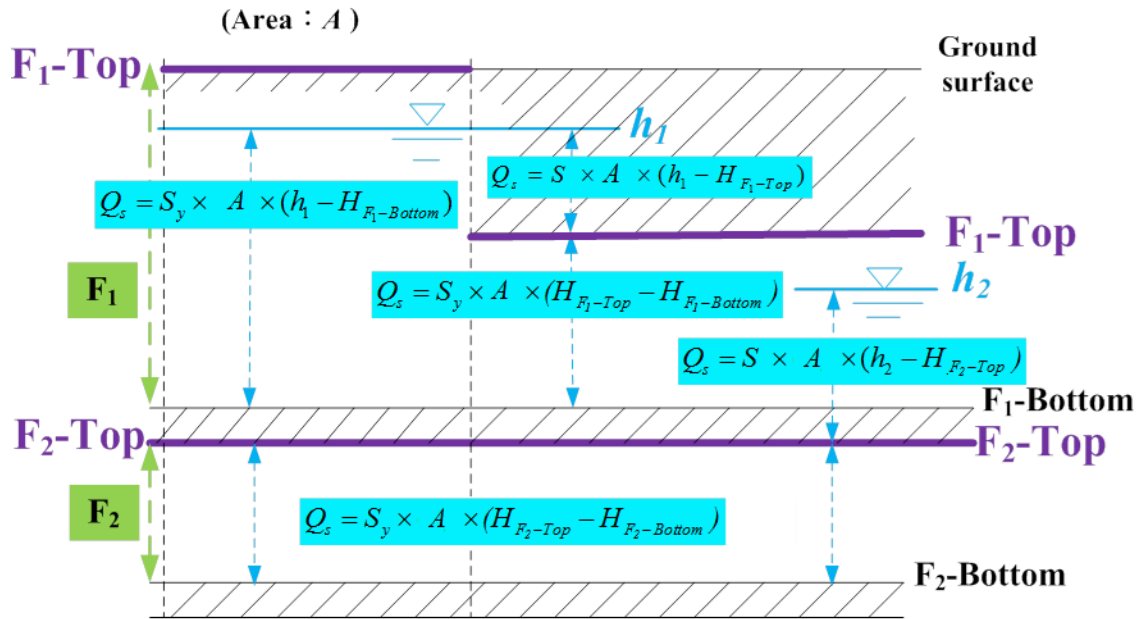
2.3 區域性地下水平衡分析法

水平衡分析的基本原理乃依據各個地下水分區範圍, 收集所有區域內可得的水文量觀測資料, 並以質量守恆原理評估各個水文量的多寡, 尤其是估計地下水之補注量, 此水文量一般難以實際量測得到, 且由不同評估方法估計所得之數據差異頗大, 數據所代表意義也不盡相同。此外, 觀察地下水水位隨時間變化情形, 發現地下水位變化與人為穩定抽水行為、區域性降雨補注效應等存在明顯的因果關係, 所以本計畫採用江崇榮等 (2004) 在研究濁水溪沖積扇地下水自然補注時所建立之地下水歷線分析方法, 以評估地下水補注量。其藉由觀察臺灣地區之地下水位隨時間變化歷線, 發現主要地下水區常年存在著人為穩定的抽水行為, 且區域性的降雨與河川入滲補注事件總能在該日內反應於地下水位變化上, 所以可以利用地下水歷線定量分析地下水補注量的多寡, 此方法業已應用於台灣西部七大地下水區之地下水補注量估計 (經濟部水利署, 2011)。

地下水歷線分析方法示意如圖 2-2, 圖中虛線為乾季退水線, 其斜率為年平均穩

定抽水率；總補注量 Q_r ；年抽水量 Q_p 。以下介紹地下水絕對蓄水量歷線分析方法的基本原理操作步驟：

1. 將各地下水觀測站的日水位，乘上控制面積與對應之貯水係數或比出水率，加總得地下水日相對蓄水量，並繪製一年的地下水相對蓄水量歷線圖。另外，將每年最後一天的蓄水量減去同年第一天的蓄水量，即得每年的蓄水變化量



Q_s 。絕對蓄水量計算方式如下：

圖 2-2 地下水絕對蓄水量計算示意圖

(1) 受壓含水層：

觀測井水位大於(等於)含水層上層高度(h_1 右側水位為例)

$$Q_s = S_1 \times A \times (h_1 - H_{F_1-TOP}) + S_{y1} \times A \times (H_{F_1-TOP} - H_{F_1-BOT}) + S_{y2} \times A \times (H_{F_2-TOP} - H_{F_2-BOT})$$

Q_s ：該測站之絕對蓄水量

A ：測站控制面積

S_1 ：第一含水層貯水係數

S_{y1} ：第一含水層比出水率

S_{y2} ：第二含水層比出水率

(2) 非受壓含水層：

觀測井水位小於含水層上層高度(h_1 左側水位為例)

$$Q_s = S_{y1} \times A \times (h_1 - H_{F_1-BOT}) + S_{y2} \times A \times (H_{F_2-TOP} - H_{F_2-BOT})$$

Q_s ：該測站之絕對蓄水量

A：測站控制面積

S_{y1} ：第一含水層比出水率

S_{y2} ：第二含水層比出水率

2. 每年乾季(前一年 11 月 1 日至今年 4 月 30 日)，因為抽取地下水，造成地下水位呈直線下降，稱為乾季退水線，其斜率表示全年穩定抽水率 S_L ，將 S_L 乘以時段長可得各時段抽水量 Q_p 。
3. 雨季降雨，雨水透過入滲補注地下水，而上游集水區的河水由河床入滲，以伏流水形式補注地下水，使得地下水位上升。日蓄水變化量若小於穩定抽水率，補注量即為兩者差值，若日蓄水變化量大於穩定抽水率即無補注水量，最後累積一年的補注量為總補注量 Q_r 。
4. 若當日有降雨，即視為該補注量為地面水補注量；若無降雨，則該補注量為區外地下水補注量。兩者加總即為總補注量。
5. 雨季高峰期，地下水位可能高於河川水位，造成地下水向河川流失或從地表蒸發，是為流失量 Q_l 。抽水量、補注量、流失量與地下水蓄水變化量需滿足質量守恆式(2.3.1)，經由(2.3.1)計算可得流失量 Q_l 。

$$Q_s = Q_r - Q_p - Q_l \quad (2.3.1)$$

6. 由於流失量為無法有效應用之水資源量，所以將其自補注量中扣除，得到淨補注量，此部分才是地下水系統中真正補注進入含水層中蓄存的水量。

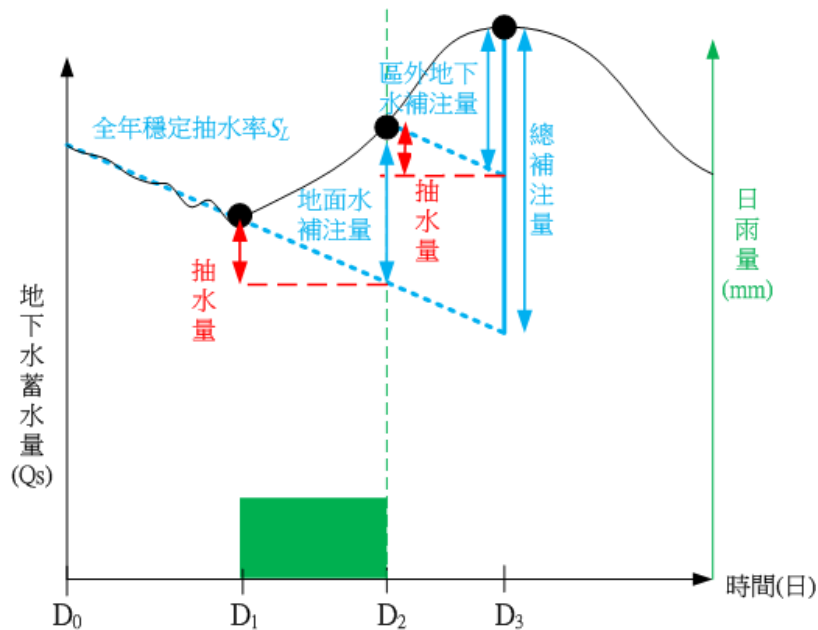


圖 2-3 地下水歷線分析方法示意圖

7. 地面水補注來源可再細分為雨水入滲補注及河水入滲補注，由於兩者皆是透過地表入滲，所以無法以地下水歷線法加以分離，於是本計畫再加入氫氧同位素分析法，以水中氫氧同位素的含量(類似濃度的概念)，進一步分析雨水及河水的補注比例，氫氧同位素分析法詳細介紹如第三節所述，最終可得雨水與河水的補注比例，即可算出兩補注量。

三、研究成果

3.1 氣候變遷下屏東平原補注量推估

表 3-1~表 3-2 顯示全域推估歷年補注量、依 EOF 權重計算之歷年補注量與折減係數以及折減過後之未來補注量。結果顯示，氣候變遷下未來短期補注量從基期平均約 16.99 億噸普遍減低至平均 7.36、11.31、12.74 不等，雖然依不同雨型有不同補注量，然而這三種雨型都顯示未來短期補注量的減少。

根據氣候變遷下資料之基本統計分析結果顯示，基期與未來短期不降雨日數及事件比較中，總無降雨日與平均連續無降雨日數在未來短期明顯增加，而連續無降雨事件次數則明顯減少，表示未來短期降雨型態的集中、缺乏持續性的補注造成整體補注量的減少。三種雨型之補注量較歷史平均值低，僅有新來義雨型於某些年份會超過歷史平均值。因三種雨型的降雨分布較為分散，且缺少持續性的降雨，而新來義雨型 2032、2034、2035 及 2036 年之所以大於歷史平均值，皆是因為該年之雨型有持續性的降雨之故，所以歷史雨型相較於未來雨型補注量較高，與降雨日數多及有無連續降雨有密切關係。

以 2021 年與 2036 年新來義雨型為例，由降雨日數來看，2021 年是相對少很多的，

故縱使有四場豪雨發生，但因前後降雨日數不多，故補注量僅集中於這4個區段，且豪雨可供給的補注量有一定限度，所以整體補注量偏低；2036年降雨日數相對較多，且由7月下旬起有連續降雨發生，蓄水量可長時間且持續地抬升，故補注效益較佳，而10月上旬發生一高強度降雨，但蓄水量提升有限，應是短時間內降雨，無法有效入滲致地下水，經由地表逕流流失之緣故。

單次高強度降雨雖能瞬間提升地下水蓄水量，但土壤含水一旦飽和，雨水便難以入滲至地下水，形成超滲降雨。多出來的雨量便會藉由地表逕流流失，故降雨日數少之高強度降雨相對於降雨日數較多的連續降雨，後者的補注效益較好，所以在氣候變遷下的極端降雨，豪雨增多、降雨日數減少的情況下，推估出來的補注量普遍較低。

表3-1 全域推估歷年補注量及依EOF權重計算之歷年補注量與折減係數

全域推估歷年補注量		EOF推估歷年補注量			
年份	補注量 (億噸)	年份	赤山(泰武) (億噸)	大嚮(南和) (億噸)	萬隆(新來義) (億噸)
2000	16.49	2000	21.69	47.85	35.29
2001	18.31	2001	23.10	54.19	38.15
2002	15.56	2002	25.52	48.09	29.51
2003	15.22	2003	22.54	46.53	28.99
2004	17.25	2004	22.18	53.30	32.95
2005	17.41	2005	17.29	48.84	31.28
2006	16.06	2006	20.06	49.45	31.28
2007	19.19	2007	19.33	58.08	35.55
2008	17.99	2008	18.04	58.25	35.46
2009	16.28	2009	20.98	61.63	28.66
2010	17.12	2010	19.92	42.84	27.29
平均值	16.99	平均值	20.97	51.73	32.22
		折減係數	0.81	0.33	0.53

表3-2 折減過後之未來補注量

未來補注量(折減後)			
年份	泰武雨型 (億噸)	南和雨型 (億噸)	新來義雨型 (億噸)
2020	7.30	9.39	7.92
2021	5.77	5.45	10.83
2022	12.75	11.29	16.88
2023	12.42	10.45	13.54
2024	4.24	16.93	14.69
2025	10.80	12.15	10.93
2026	10.97	12.51	9.13

2027	2.76	15.68	12.1
2028	10.70	13.61	9.99
2029	9.51	11.88	6.87
2030	9.83	9.10	14.24
2031	6.05	5.80	5.85
2032	6.45	7.57	20.57
2033	4.80	15.61	11.82
2034	6.28	16.40	19.03
2035	3.72	9.03	18.67
2036	4.02	9.40	23.15
2037	6.85	12.80	13.02
2038	7.15	7.51	9.74
2039	4.80	13.56	5.83
平均值	7.36	11.31	12.74

表3-3則顯示未來短期補注量之風險機率評估，結果顯示泰武兩型較其他兩者兩型有較高的風險使得未來有較低的補注量，約有0.65的機率發生補注量小於過去補注量平均的一半。其他兩種雨型也都顯示皆有極高的機率未來補注量會降低至0.75至0.25倍的過去平均補注量。泰武、南和兩型100%低於過去補注量平均，泰武兩型甚至有95%的機率會小於0.75倍過去平均，平均歸類為高補注量風險；而新來義兩型雖有20%會稍高於過去平均，但平均仍具有中度補注量風險。

表3-3 未來短期補注量風險機率評估(發生小於N倍過去平均之機率)

風險	發生補注量小於 N倍過去平均之機率	泰武兩型	南和兩型	新來義兩型
低	1.0倍	1.00	1.00	0.80
中	0.75倍	0.95	0.65	0.55
高	0.5倍	0.65	0.20	0.20
極高	0.25倍	0.00	0.00	0.00
平均風險		高	中	中

四、結論與建議

本計畫以屏東平原為例，評估氣候變遷下所推估的未來補注量的變化情形。本研究方法在資料充足的前提之下，適用於所有地下水分區，因此未來亦可應用在其他地區的地下水補注量評估。本計畫首先以歷史資料進行分析，建立理論工具的完整評估流程方法後，在此氣候變遷情境下進行補注量評估發現，總無降雨日與平均連續無降雨日數在未來短期明顯增加，而連續無降雨事件次數則明顯減少，降雨型態愈趨集中導致持續性補注的缺乏，造成整體補注量明顯減少。三種雨型幾乎 100%的機率補注

量會大幅減少。其中泰武兩型甚至有高達 95% 的機率補注量會小於 0.75 倍過去平均。屏東平原有此現象，未來全台灣地下水補注減少之風險也可能很高，對於地層下陷嚴重之區域更應嚴加防範。為因應氣候變遷所造成之衝擊，我國應盡早擬訂調適策略，以防範未來地下水補注量之匱乏所造成一連串水資源管控之危機。

本計畫研析並彙整多種理論工具，包括(一) 經驗正交函數法萃取地下水時空特徵(二) 訊號分析法建立雨量與地下水位關聯(三) 地下水歷線法推估地下水補注量以及(四) 地下水數值模式，並以嶄新的研究流程整合上述理論與工具，評估出氣候變遷下地下水補注量的變化情形。本研究流程有別於傳統補注量推估方式，而是考量地下水空間特徵之分布進而從雨量推求得地下水補注量。然而，本計畫執行上仍然有以下限制：(一) 氣候變遷資料則是使用水利署水文評估計畫所產出的未來雨量資料，評估情境為 A1B(再生能源與石化燃料並用，土地使用變遷速度適中)，然而若使用不同情境，本計畫補注量評估可能會有不一樣的結果。(二) 受到水文情境評估計畫產出資料時程限制，僅能提供本計畫有限的未來降雨測站資料。(三) 並且所產出之未來降雨資料中，每個測站的降雨為獨立事件，並不符合實際情形，因此本計畫必須要將三個測站視為三種雨型分別探討。

研究結果顯示，在此情境氣候變遷下，未來短期總無降雨日比從 0.6 上升至 0.9 左右。所推估的補注量從基期平均約 16.99 億噸普遍減低至平均 7.36、11.31、12.74 億噸不等，雖然依不同雨型有不同補注量，然而這三種雨型都顯示未來短期補注量減少。從地下水數值模式結果則顯示，因缺乏連續降雨，且降雨日數較歷年少了許多，未來短期 2020 年至 2039 年補注量相對所推估的歷史補注量普遍偏低，補注量平均值僅有 7.36 億噸，與歷年所推估的歷史補注量平均值 16.99 億噸相差甚遠，故由水位等值圖來看，水位上縮的情形相當明顯，以沿海地區最為嚴重，甚至到沖積扇扇央仍有明顯的退縮，而扇頂部分則上縮情形逐漸減緩。

針對氣候變遷所造成之衝擊，本計畫具體建議因應對策如下：(一) 加強人工補注，保育地下水水文地質環境。根據本計畫 EOF 結果，進一步以此了解地下水空間特性，針對地下水空間敏感區域進行人工湖等人工補注工程建置。(二) 預防地下水缺乏所造成之農漁業衝擊，開發替代水源、減抽地下水。(三) 防範地層下陷加劇之衝擊，增加植被覆蓋面積、涵養水源。(四) 避免地下水資源受到海水入侵並擬定地下水鹽化之對策。(五) 逐步改變居民用水型態。(六) 透過空間分析，劃定可抽水區域。(七) 水井管理效能提升，有效率使用地下水源。(八) 透過教育訓練，宣導氣候變遷對於地下水資源之影響。

除此之外，藉由本計畫之研究，歸納未來可擴展研究之方向包括：(一) 地下水補注對於極端降雨敏感度較低之空間分佈評估。(二) 相關水文因子、地質參數地表因子對於地下水補注的關係。(三) 抽水行為對於地下水補注的影響評估。(四) 透過 EOF 地下水時間空間分析法進一步與水文地質參數連結，作為物理模型之參數推估工具之一。(五) 詳細探討極端事件對於地下水補注的影響。(六) 在氣候變遷之下，現有抽水行為對於地層下陷之風險評估。

參考文獻

1. 丁澈士，1996，土壤水份收支法應用於地下水補注推估-屏東平原個案研究，第八屆水利工程研討會論文集，台北市，pp.665-672。
2. 丁澈士，1997，應用氫離子平衡法推估地下水補注量-屏東平原個案研究，第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集，台南市，成功大學，pp.703-714。
3. 台灣大學，2010，雲林內陸地層下陷地區地下水抽水機制之探討與評估，經濟部水利署委辦計畫。
4. 台灣大學，2011，台灣西部河川河槽作為地下水補注區可行性分析，經濟部水利署委辦計畫。
5. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，「濁水溪沖積扇地下水區之補注水源評估」，第二屆資源工程研討會，86-91 頁，2005。
6. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，「以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支」，經濟部中央地質調查所彙刊，第十九號，第 61-89 頁，2006。
7. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥、費立沅，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估，經濟部中央地質調查所會刊第十七號，pp.21-51，2004 年。
8. 汪中和、張慈君、林裕隆、劉文撤、李隆安、金紹興、張秉權、藍繁盛，「由碳氫氧同位素組成探討屏東平原地下水的補注」，中研院地科所研究報告，1996。
9. 徐年盛、汪中和、江崇榮、劉振宇、黃建霖、楊艾芸，「結合地下水平衡分析結果與氫氧同位素分析推估濁水溪沖積扇地下水各補注水源之水量」，第七屆地下水資源及水質保護研討會，F36-F45 頁，2009。
10. 徐年盛、江崇榮、汪中和、劉振宇、劉宏仁、黃建霖，「地下水系統水平衡分析與補注源水量推估之研究」，中國土木水利工程學刊(已接受)，2011。
11. 徐年盛、汪中和、江崇榮、劉振宇、黃建霖、楊艾芸，結合地下水平衡分析結果與氫氧同位素分析推估濁水溪沖積扇地下水各補注水源之水量，第七屆地下水資源及水質保護研討會，F36-F45 頁，2009。
12. 徐年盛、江崇榮、汪中和、劉振宇、劉宏仁、黃建霖，地下水系統水平衡分析與補注源水量推估之研究，中國土木水利工程學刊，23:4 P-347-357，2011。
13. 陳宗顯，2006，降雨引致地下水位變化之研究-以那菝、六甲與東和地下水. 位站為例，國立成功大學水利及海洋工程研究所，博士論文。
14. 陳宗顯、詹錢登、陳仲賢、曾鈞敏，2005。降雨和地下水位變化之相關性研究，台灣水利，53(4)，1-12 頁。
15. 陳宗顯、詹錢登，2006。降雨引致地下水位變化之研究-以那菝、六甲與東和地下水位站為例，國立中興大學土木工程研究所博士論文。
16. 陳奕棠，1997。降雨與地下水位變化關係建立之研究，國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
17. 陳忠偉、潘文健、李振誥，濁水溪沖積扇與屏東平原地下水合適出水量之研究，台灣水利，第 50 卷第 3 期，pp.70-82，2002 年。

18. 陳進發，未飽和層土壤水平衡模式解析及其應用之研究，國立成功大學資源工程學系博士論文，2000年。
19. 馮寶蓮，地下水井抽水量推估之研究-以台南縣後壁鄉、安定鄉及高雄縣大樹鄉、林園鄉為例，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系碩士論文，2006年。
20. 經濟部水利署，「地下水補注機制水力特性調查分析先驅研究」，2009。
21. 經濟部水利署，「台灣西部河川河槽作為地下水補注區可行性分析」，2011。
22. 經濟部水利署，地下水補注機制水力特性調查分析研究，2009年。
23. 經濟部水資源局、能邦科技顧問股份有限公司，台灣地區地下水補注量估算，2000年。
24. 潘文健、李振誥，屏東平原合適出水量分析之研究，國立成功大學資源工程學系碩士論文，2002年。
25. 鄭皆達、洪豪男、周良勳，2003。應用時間數列方法分析降雨及地下水位之關係，水土保持學報(中興大學)，35(1)，47-56頁。
26. 童慶斌，1997，氣候變遷對大甲溪上游河川流量之衝擊，台灣水利季刊，第45卷，第二期，64-70頁。
27. 童慶斌、李宗祐。2001。氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估。中國農業工程學報，第47卷，第一期，65-74
28. AnCAD, Inc.: Visual Signal Reference Guide, Version 1.4, AnCAD, Inc 2011
29. Chinarro, D., Cuchí, J. & Villarroya, J. Application of Wavelet Correlation Analysis to the Karst Spring of Fuenmayor. San Julian de Banzo, Huesca, Spain. *Advances in Research in Karst Media* 75–81, 2010.
30. Foufoula-Georgiou, E. and Kumar, P. *Wavelets in Geophysics*, Academic Press, 373, 1995.
31. Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva, Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566, 2004.
32. Gurdak JJ, Hanson RT, McMahon PB, Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, *High Plains Aquifer, USA. Vadose Zone J* 6:533–547, 2007.
33. Holman, IP, Rivas-Casado, M, Howden, NJK, Bloomfield JP, Williams AT. Linking North Atlantic ocean-atmosphere teleconnection patterns and hydrogeological responses in temperate groundwater systems. *Hydrol Proc* 23:3123–3126, 2009.
34. Holman, I.P., Rivas-Casado, M., Bloomfield, J.P. & Gurdak, J.J. Identifying non-stationary groundwater level response to North Atlantic ocean-atmosphere teleconnection patterns using wavelet coherence. *Hydrogeology Journal*, 19, 1269–1278, 2011.
35. Stephane Mallat, *a Wavelet Tour of Signal Processing* (2nd Ed), 1999.
36. Torrence, C., and G.P. Compo, A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78, 1998.

37. Yih Nen Jeng, "Diffusive and Fast Filter Using Iterative Gaussian Smoothing",
Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University