

氣候變化對台灣地下水文環境的 衝擊：回顧與前瞻

汪中和¹

摘要

全球暖化現象正在世界各地以加速的節拍在發展，而伴隨全球暖化的結果之一就是全球氣候及水文循環正在急遽的改變，各地降雨的強度及分佈型態因應氣溫的上升及氣候極端變化而有明顯的調整。本文回顧台灣地區百年來降雨型態的變化趨勢，以及氣候暖化對近五十年來台灣地下水文環境所造成的影響。尤其「南北降雨的差異性擴大，降雨型態朝極端化發展」的趨勢，已經對台灣水資源的調配與運用產生嚴重不利的影響；加上長期不當的人為管理及開發策略，台灣地下水文環境已經面臨前所未有的衝擊，不論水量或是水質都呈現深沉的危機。為台灣的永續發展考量，亟待籌謀有效的因應方案，劍及履及的施行，化危機為轉機。

關鍵詞：氣候暖化、台灣、地下水文環境

前言

工業革命後，溫室氣體（CO₂, NO_x, CH₄, CFCs）大量排放到大氣層，導致地球表面溫度持續暖化，北半球平均氣溫上升的幅度已接近攝氏1度（IPCC, 2001; IPCC, 2007），對地球生態環境產生深遠的影響。隨著京都議定書在2005年2月16日開始生效，宣示國際主流已經不再漠視地球環境惡化的事實，並且開始共同努力挽救地球脆弱的生態環境（United Nations, 1998）。因此，當前這個世紀是人類對抗全球氣候暖化衝擊的關鍵時刻，尤其氣候暖化對水文環境的影響，將直接衝擊水資源的運用及社會的穩定。

臺灣自1897年以後即開始有制度化的氣象觀測，中央氣象局迄今已設置了28個局屬觀測站（不含金馬地區），並累積了108年的記錄（中央氣象局，1897~2006），其中時間長且較完整的有：彭佳嶼、臺北、臺中、澎湖、臺南、恆春、花蓮、臺東等8個氣象站，其餘局屬測站大部分自1940年後也即設立完成。本文簡略的報告過去百年來，因自然氣候及人為開發的影響，臺灣降

¹ 中央研究院地球科學研究所

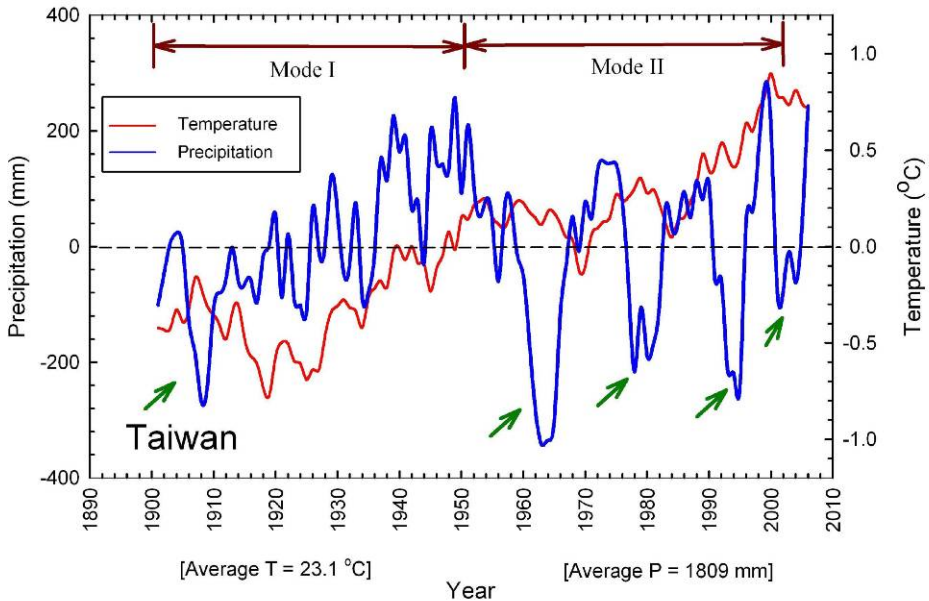
雨型態正演變中的一些長期趨勢，以及對地下水資源管理及調配的衝擊，並提出一些推展未來地下水文研究的建議。希望能藉現有的數據，掌握這些趨勢的可能演變，進而能採取適當的對策，以舒緩並扭轉當前及未來不利的情勢。

台灣的氣候變化

氣溫與降水的變化趨勢

降雨是臺灣最主要的維生命脈，它的豐枯及強度變化直接地影響著島上的生態環境及生活品質。臺灣位在歐亞大陸及太平洋的交界處，獨特的地理位置加上季風、颱風及周圍海流的交互影響，使臺灣的降雨一直有著複雜的變化型態（吳明進，1992；中央氣象局，1994；Wang *et al.*, 1994；Wang *et al.*, 1997；盧孟明、麥如俊，2003）。

由長期的氣象資料，可觀察在全球氣候暖化的影響下，台灣的降雨型態或是降雨強度所產生的重大改變。圖一是台灣百年來的年均溫及年雨量距平變化圖。這是利用中央氣象局有百年紀錄的八個氣象站（彭佳嶼、臺北、臺



圖一 臺灣自 1900 至 2006 年溫度（紅色）及降雨量（藍色）長期變化趨勢圖；1950 年之前為模型 I (Mode I；溫度與雨量趨勢平行)，1950 年以後為模型 II (Mode II；溫度與雨量趨勢分異)。黑色虛線代表基準值（1900-2006 平均值；溫度=23.1 度，雨量=1809 mm），綠色箭頭表示乾旱發生時期。資料來源：中央氣象局，1897-2006 氣候資料年報）

中、澎湖、臺南、恆春、花蓮、臺東)的年均溫及年雨量所合成繪製，並做了5年的滑動平均消除高頻信號，以表現台灣一個世紀來的溫度與雨量變化特性。圖一中的溫度(紅色曲線)及雨量(藍色曲線)都以百年平均值為基準(年限為1900-2006；溫度平均值是23.1度，雨量是1809 mm)，凡低於平均值的都是負值，位在黑色虛線的下方；而高於平均值的都是正值，位於黑色虛線的上方。

由圖一可以看出，台灣過去一百年的年均溫持續上升，已增加了攝氏1度以上(Hsu and Chen, 2002)，暖化現象相當明顯，主要原因是受到全球溫室效應及區域性人為開發的影響。然而台灣的降雨量在這段氣候暖化的過程中，卻呈現了二種型態完全不同模型變化。在二十世紀的前半期為模型I(1900~1950年；Mode I)，台灣的年均溫絕大部分低於百年平均值，這個時期台灣降雨變化幅度小，且呈穩步增加的趨勢，降雨大致與溫度的變化平行演變，也可以說是台灣風調雨順的年代。進入二十世紀的後半期為模型II(1951~2000年；Mode II)，台灣的年均溫跨過百年平均值的門檻且加速上升；這個時期台灣降雨變化已與溫度趨勢脫鉤，在二十世紀的前半期降雨量明顯增加的趨勢消失，所呈現的是上下大幅震盪。

另一項觀察是氣象乾早期的發生，在二十世紀前後期也有十分不同的頻率，如圖一綠色箭號所示。在1950年以前，只在1900年代後期發生一次低雨量的乾早期；然而在1950年以後，卻反覆發生了三次：1960年代中期，1980年前後，以及1990年代初期。臺灣地區氣象乾旱的發生，除了全球氣候暖化的影響外，東亞地區空氣污染惡化及太平洋周圍含硫量高的火山噴發活動都是可能的因素(Li *et al.*, 1997；Chang and Wang, 2003)。值得注意的是，2000年以後雖然發生一次氣象乾早期，但台灣的降雨量卻有增高情形，是否台灣的降雨變化型態進入另一個模型，需要後續密切注意。然而這些現象的觀察，都指出氣候暖化確實已對台灣的降雨造成顯著且不利的影響。

降水變化日趨極端化

中央氣象局在1940年代以後於台灣本島陸續增設的局屬氣象觀測站有21站記錄較完整，利用這些觀測站的資料，可以更仔細的觀察台灣降雨的時間及空間分佈趨勢。依據水利署的水資源分區，可以將21站區分為北區(基隆、鞍部、竹子湖、台北、淡水、宜蘭、蘇澳、新竹)、西南區(台中、梧棲、日月潭、阿里山、玉山、嘉義、台南、高雄、屏東)、及東南區(花蓮、

成功、台東、大武)三個部份觀察。

圖二是臺灣及各分區的降雨量(圖二a)、降雨日數(圖二b)及降雨強度(圖二c)自1940年以來的時序距平變化圖。各圖由上至下分別為台灣全區、北區、西南區及東南區。與圖一相仿,各圖均以該區的長期平均值為基準(如各圖中數字所示,年限為1940-2006),凡低於平均值的都是負值,位在基準線的下方;而高於平均值的都是正值,位於基準線的上方;長期趨勢以線性迴歸結果呈現(圖中紅色虛線),顯著程度由其斜率值表示。

以降雨量而言(圖二a),1940年代迄今臺灣整體平均年雨量的長期趨勢略有增加,但沒有明顯變化(斜率=0.39)。然而若分區來觀察,北區(斜率=10.42)長期的趨勢是明顯增加;西南區(斜率=-6.91)卻是顯著減少,臺灣東南部(斜率=-3.56)也呈現減少的態勢。大致而言,北區所增加的降雨量,恰好是西南區及東南區減少的總和;換言之,台灣南部的降雨帶正逐漸朝向北方遷移,台灣南北區域性的降雨差異亦正逐漸擴大中,應是氣候暖化造成北半球水文循環向北推移的結果。因此全球暖化情勢的向上持續發展,將是台灣水文環境未來最大的隱憂。

在降雨日數方面(圖二b),整個臺灣的平均降雨日數的長期變化(斜率=-0.42)是持續遞減,與降雨量的變化型態十分不同。以區域而言,西南區(斜率=-0.56)及東南區(斜率=-0.63)都是明顯且快速的減少中,北部地區(斜率=-0.13)則較和緩。一般而言,西南區降水的豐枯比值相對較大;但西南區豐雨期降雨日數減少的趨勢卻最嚴重。近數十年來由於火山活動、空氣污染及內蒙沙塵暴的影響,臺灣及東亞地區空氣微粒的大幅增加,導致區域性降雨機制改變,使得降雨日數持續減少(Li *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2002; Chang and Wang, 2003)。如對岸中國大陸華中的長江流域一帶,二十世紀後期也同樣觀測到平均年降雨日數在持續減少的現象。整個臺灣的降雨日數全面性的持續降低,對臺灣是非常不利的警訊,且有深遠的影響,尤以西南部及東部地區較嚴重。降雨日數的減少不但影響生態環境,更使得水資源的管理、運用及調配益增困難。

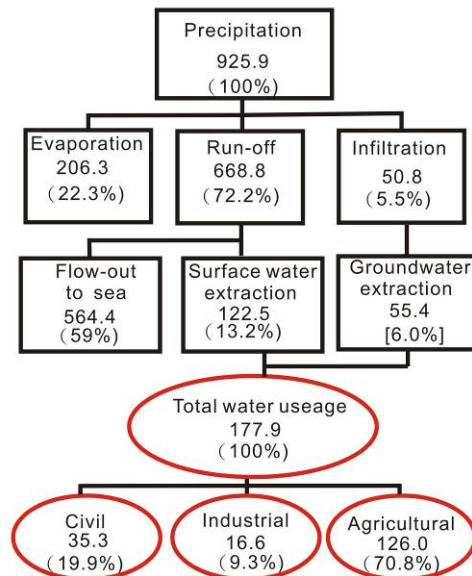
對水資源而言,降雨量與降雨日數是同等重要,而二者的比值(降雨量/降雨日數)則是降雨強度參數,也是衡量水文極端性的重要指標。整個臺灣的平均降雨強度自1940至2006年間的長期變化是明顯的持續遞增(斜率=0.05),與降雨日數的變化型態剛好相反。以區域而言,降雨強度在北區(斜率=0.07)及東南區(斜率=0.04)都是明顯且快速的增加中;西南地區(斜

率=0.02)則較無明顯趨勢，顯然西南區降雨量及降雨日數長期同步遞減抵消了降雨強度的增加。臺灣降雨強度不斷升高，表示發生洪澇的頻率變大，尤以北區及東南區在豐雨期的風險較大。另一方面，西南區雖然沒有觀察到顯著增加的趨勢，但其偏高的降雨強度平均值(=17.8)仍表示該區極容易發生水文極端事件，需要加以防範。

地下水文環境的危機

降雨是臺灣最主要的維生命脈，它的豐枯及強度變化直接地影響著島上的生態環境及生活品質。氣候暖化在臺灣已對降雨型態發生明顯且不利的改變趨勢，產生的直接衝擊是：整體用水結構逐漸失衡，長期水資源管理將面臨更大困境。

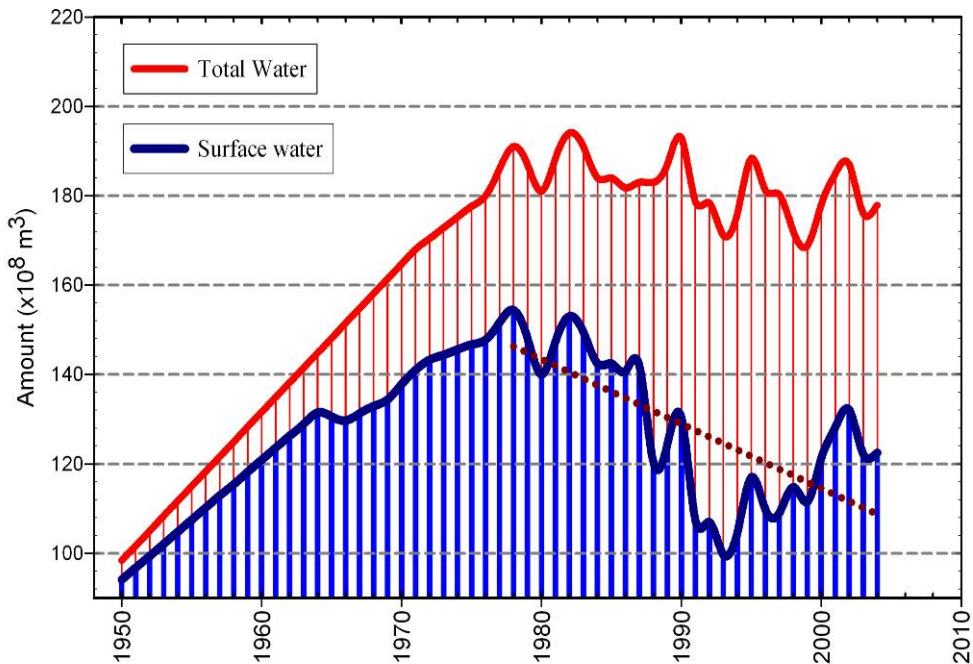
圖三是2004年台灣本島的水文收支及各項標的水資源運用狀況(資料取自經濟部水利署2005年水文年報及統計年報)，可觀察出台灣的水資源潛勢。整體而言，台灣2004年的總降雨量(925.9億立方公尺)在扣除蒸發散量(22.3%)、入滲量(5.5%)、入海量(59.0%)後，只能擷取13.2%(122.5



圖三 臺灣2004年水文收支(黑色方框)及各項標的水資源運用(紅色橢圓)。圖中數字的單位為x10⁸立方公尺，括弧內百分比分別以全年總降水量及總用水量為100%為基準。(資料來源：經濟部水利署，2005水文年報及統計年報)

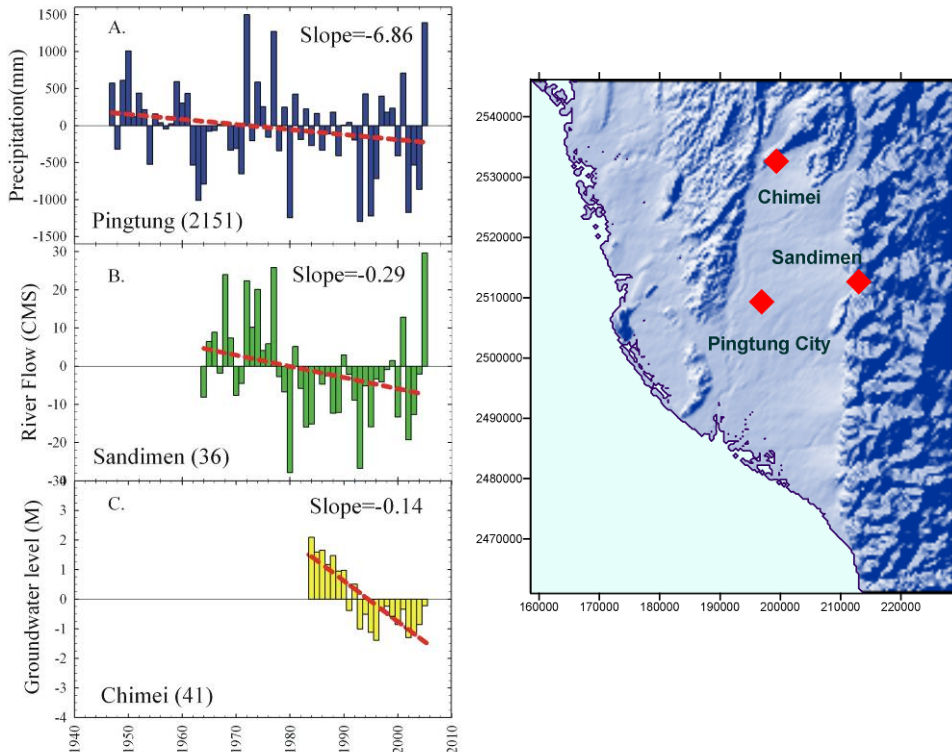
億立方公尺) 成爲地面引用水源。由於台灣地區2004年總用水量約177.9億立方公尺，地表水引用不足的部份(31%)就抽取地下水補充。

地下水對台灣水資源的貢獻當然很重要，然而地下水長期超量使用卻是台灣水資源管理方面非常嚴重的危機(經濟部水資源統一規劃委員會，1995；汪中和，1999；李友平等，2001；汪中和等，2004)；圖三即顯示單在2004年地下水用量就超支4.6億立方公尺。圖四爲台灣1950-2004年總用水量及地表引水量的趨勢圖，由經濟部水利署歷年水文年報及行政院主計處國情統計彙整而得。該圖清楚顯示，台灣總用水量自1950年的98億立方公尺一直持續成長到1980年代初期的最高峰(194億立方公尺)。約自1980年代中期開始，臺灣地下水每年的使用量就因地表水的引用量下降而逐漸增加，且超過自然補注量，尤以1990年代初期最嚴重；超限區域當然也都集中在地下水使用量最大的中南部農業地區(主計處，2006)。



圖四 臺灣自1950至2004年地表水及總用水量增長圖，縱座標90億立方公尺以下的部份略去，以放大地表水引用的長期趨勢。紅色實線代表總用水量，藍色實線是地表水引用的水量，點線表示地表水引用下降的趨勢，地下水的汲用量即紅色直線部份。(資料來源：經濟部水利署，1950-2004水文年報；主計處，1950-2004國情統計報告)

檢討地下水的長期超限問題根源自地表水供應不足；而地表水的供應不足，除了河川污染嚴重外（主計處，2006），自然降雨量的長期減少趨勢卻是主要的因素（汪中和等，1995）。圖五是屏東平原降雨（屏東市站）、河川流量（三地門站）、地下水位（旗美站）距平時序變化趨勢圖，三個站的線性迴歸斜率均呈負值。由圖五可以觀察屏東平原由於降雨長期趨勢的遞減，已對河川流量及地下水儲量造成負面的影響，尤其旗美站位於近山麓地下水補注區，地下水位的持續降低是山區側向補注減少的警訊。類似的情形在臺灣其他麓山帶及平原地區都可觀察到，尤其是臺灣的東南及西南地區（汪中和等，2004），顯示氣候暖化所造成的降雨型態改變，不但衝擊平原地區，也影響中央山脈的地下水儲量，是未來台灣追求永續發展必須正視的課題。



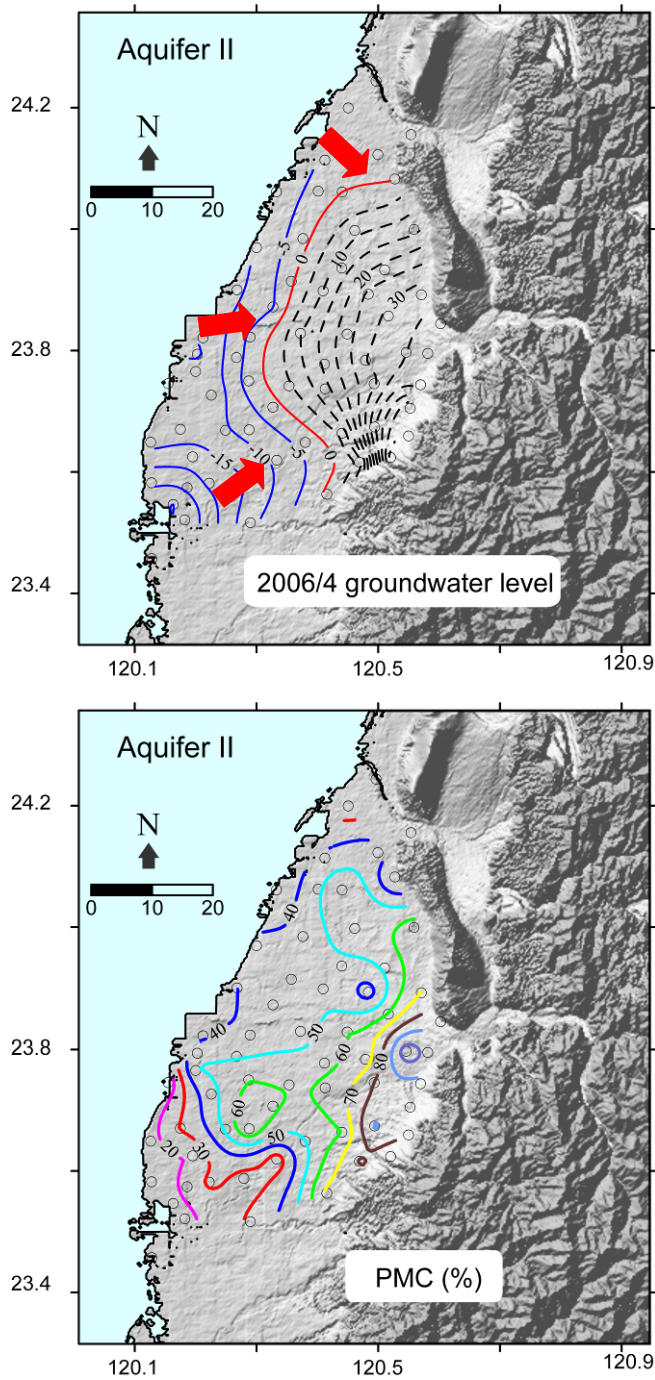
圖五 屏東平原降雨(A、屏東站，1938-2005)、河川流量(B、三地門站，1964-2005)、地下水位(C、旗美站，1983-2005)趨勢圖。各站的地理位置見右側分布圖。圖中數值係基準值（引用年數的平均值），各個年度均與基準值比較並以異常值顯示。紅色虛線係線性迴歸結果，代表長期趨勢，其顯著度由斜率表示。（資料來源：經濟部水利署網頁 www.wra.gov.tw）

地下水位就是台灣在陸域水資源裡的儲量指標，地下水位不斷的下降表示台灣的地下水儲量已經越來越少。因此台灣不得不面臨一個嚴肅的問題：地下水年年這樣透支下去，到底還可以持續多久？觀察台灣地下水資源長期透支情況，已經衍生出地下水位下降（經濟部水資源統一規劃委員會，1995）、沿海地區地層下陷（邵維克，1997）、海水入侵（Wang *et al.*, 1996；汪中和等，1996；Wang *et al.*, 1999；江崇榮，2000；陳文福等，2001）、地下水質惡化（何麗如等，1990；阮國棟，1999；陳文福等，2006）等一系列嚴重問題（汪中和等，2004）。

在諸多地下水超抽而產生的問題裡，地層下陷最為明顯，同時直接影響我們日常的生活。台灣地層下陷區域除了臺北盆地以外，其餘均是位於沿海地區，與地下水位大幅降低的區域是一致的。臺灣地區迄2004年底，地層下陷累積的面積總計2,667平方公里，其中以雲林地區的880平方公里最廣，而累積最大下陷量則以屏東沿海塹豐地區的3.2公尺最深（水利署，2005）。

圖六是濁水溪沖積扇第二含水層地下水位等值線（2006年4月，代表短期變動；數據取自水利署網頁www.wra.gov.tw）與碳十四含量（以Percentage of Modern Carbon表示，代表長期變化結果；數據來源：劉聰桂，1994；劉聰桂等，1996）的分布圖。由圖中可以清楚的觀察出地下水位「零水位線」從海岸線地區向內陸東移的態勢，目前第二含水層地下水位低於「零水位線」的面積約佔濁水溪沖積扇的58%，尤以烏溪口向東南、北港溪口向東北二個方位內移最嚴重；碳十四含量等值分布圖亦可觀察出類似情形。由於碳十四同位素的半衰期為5730年（Coleman and Fry, 1991），假定剛入滲的新鮮地下水的PMC值為100%，且入滲後沒有其他碳十四同位素組成的干擾，則低於50%PMC（一個半衰期）的地下水可作為識別是否有充沛現代水補注的參考指標（可參考汪中和等(2004)圖五）。圖六中可觀察到低於50%PMC（缺乏現代水補注）的地區均與地下水超限汲用區域大致重疊，佔了濁水溪沖積扇面積的56%。目前由於地下水位持續降低，雲林地區的地層下陷中心已經東移到土庫、元長一帶，恰好位於高速鐵路雲林段的路線附近，若不採取適當有效措施阻遏地層繼續下陷，未來將會嚴重衝擊高鐵營運的安全。

台灣的地下水是我們最寶貴且無法替代的天然資源，平時可以彌補地表水源的不足，緊急時則可以發揮救助的功能（經濟部水資源統一規劃委員會，1992）。例如1999年集集大地震發生後，中部地區的自來水系統遭到嚴



圖六 濁水溪沖積扇地下水水位等值線圖（上；以公尺為單位）及碳十四濃度圖（下；以 PMC% 值表示）。（資料來源：經濟部水利署網頁 www.wra.gov.tw；劉聰桂，1994；劉聰桂等，1996）

重損壞，地下水資源立即擔負了紓困救難的功能。但地下水資源卻因氣候變化及我們不當的開發與使用而面臨前所未見的危機，更將影響到台灣未來的永續發展（Hsu *et al.*, 2006）。

台灣地下水研究的重要方向

在全球暖化的威脅下，台灣地下水資源的重要性日益增高，且與未來的發展息息相關，是第四紀研究不能忽視的一環。對於台灣地下水研究的方向而言，下列是未來必須著重的課題：

一、臺灣降雨量的時空變遷，及在全球氣候變遷下的可能變化趨勢

五十多年來，臺灣北部與南部年雨量的差異性日漸增加，也即是北部雨量有增加情形，南部則有減少趨勢。除了降雨量的變化外，降雨日數也因區域性的環境變化而逐年減少。這種改變已對臺灣水資源的供需及調配產生嚴重影響，未來南北區域性差異若再擴大，水文環境危機將更惡化，也衝擊台灣未來的發展。因此這方面的研究應列為優先項目，深入探討造成這種變化的機制（全球氣候變化的影響，區域性效應，以及人為開發的干擾），並積極發展臺灣周圍區域性中尺度及小尺度氣候及降雨變化模式及預測的能力。

二、臺灣森林與水文間的關係及對水源涵養、地表水流及地下水補注的影響

臺灣森林所佔面積從明末以來不斷縮減，已減少到只佔全島面積52%，數十年來集水區及山坡地的過度開發與超限使用，不但減少水源的涵養，且造成表土大量沖蝕，泥沙淤積水庫，影響水庫的有效容量及使用年限。據水利署資料，臺灣地區主要水庫的有效容量每年平均減少約1,400萬立方公尺，相當於每年淤積掉一個中型的水庫（水利署，2005）。針對臺灣森林環境的改變對水文環境及區域氣候的衝擊，迄今仍缺乏一個完整且數量化的研究，以建立重要河川侵蝕的型態，並評估對水庫、中、下游的影響。未來地球科學界應結合生命科學及森林生態環境的相關同仁，共同推動此方面研究。

三、台灣各地下水區的補注源、補注率及補注量

經濟部水利署自1992年推動的「臺灣地下水觀測網計畫」(經濟部水利司, 1995; 經濟部水資源局, 1997; Hsu, 1998) 已進入結束階段, 15年來在台灣各地下水分區鑽鑿了694口的地下水分層觀測井及抽水試驗井, 取得了豐富的水文地質資料, 對台灣地下深度300公尺以上的水文地質架構建立了較完整的概念模型(經濟部水資源局, 1999; 經濟部中央地質調查所, 1999)。除了一般水文觀測資料外, 水質、地球物理、地球化學及同位素組成分析也持續累積中, 可謂數據十分充足, 需要立即推動數據整合的工作。因此, 地球科學相關研究單位應充分合作, 一方面根據現有的資料, 建立地下水區水文地質架構; 另一方面, 將各種水文、地球物理、地球化學及同位素數據整合, 進一步從事各種數學模式分析, 以充分了解各區地下水的補注與駐留時間、與地表水的交換作用、沿岸海水入侵的機制等問題。再者, 地下水自然補注率非常緩慢, 而人為的過度抽取使得臺灣西部沿海地區已經透支到萬年以前的老水, 應立即從嚴限制地下水資源的不當使用。同時設定地下水抽取安全界限, 並推動地下水人工補注計畫, 以保護珍貴的地下水資源能永續的妥善運用。

四、地震對地下水文變化的影響

集集地震是近百年來台灣最重要的地質事件之一, 對地球科學的研究工作有深遠的影響, 水文科學也不例外。1997年建置完成的濁水溪沖積扇地下水觀測網, 適時記錄了集集地震發生時地下水位變化的情形, 成為目前世界上第一個密集且完整的地震水位數據, 對於濁水溪沖積扇地下水文的變化、含水層的導水性、地震波在沖積平原的傳撥特性、土壤液化的機制等課題研究, 都產生重要的貢獻(賈儀平等, 2001; Chia *et al.*, 2001, 2002; Jean *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2001, 2003, 2004a, 2004b, 2005)。除此之外, 水利署正推動的「地震及地下水監測計畫」, 已在台灣建置了16口地下水監測井, 進行氣壓、氣溫、水溫及水位的即時觀測作業, 大幅提高了紀錄的品質及頻率(由1小時提升至每2分鐘紀錄一次), 是基礎科學及防災應用性均甚佳的研究計畫。在全球暖化的趨勢下, 氣溫的升高已傳遞至海洋及地殼(Huang, 2006), 在熱膨脹的效應下, 板塊間的動能增加, 預期地震活動也會提高, 類似「地震及地下水監測計畫」的研究應繼續推動與加強。

未來展望

聯合國世界氣象組織已經發出警訊：在全球暖化過程中，異常的高溫、乾旱、颱風、豪雨、寒潮、暴風雪等，都將在世界各地頻繁的出現（WMO, 2006; IPCC, 2007）。展望未來，全球氣候暖化的趨勢仍將持續升高，對臺灣是非常不利的警訊。由百年來降雨型態的變化趨勢觀察，預期未來臺灣「水資源的危機」一定會更形高昇，台灣的旱澇也將以更嚴重的頻率及尺度發生，地下水文環境也會連帶受到嚴重衝擊。

台灣生態環境問題的根源在於先天負荷太重，後天又管理失調所致。如今台灣外有全球氣候暖化所帶來的嚴重威脅，內有天然資源耗竭和環境管理不當的隱憂。在這樣一個雙重壓力的情況下，若缺乏更嚴謹的規範去管理，結果一定是處處失序進而全面崩潰。因此，台灣需要在立法與執行上強力積極的去改善。地下水資源的危機就是其中最明顯的一項。

除了水資源供需將面臨更大的困難，需要儘速加強地表水及地下水的管理與相關研究外，防災及救災的工作也勢必要迎接更大的挑戰。面對這些外在不利情勢的發展，不論是臺灣生態環境的保護，國土及水資源的管理規劃，防災工程設計的準則，實在需要加緊腳步，大刀闊斧的採取更有效的對策去因應，將氣候暖化所帶來的衝擊降到最低，進而扭轉劣勢，化危機為轉機。

本文期望政府、學界與民眾能夠清楚體認當前全球環境正加速變遷的本質，以及台灣在生態及水文環境所面臨的內外交困現狀，從而同心協力、腳踏實地的相互配合，在短期及長期的策略上齊心合力，以嶄新的思維來因應環境快速變化的嚴厲考驗，台灣的未來才能持續而健康的發展下去。

參考文獻

- 中央氣象局（1897-2006）氣候資料年報。交通部中央氣象局。
- 中央氣象局（1994）臺灣地區氣候變化之分析與評估。交通部中央氣象局，共65頁。
- 主計處（1950-2006）中華民國國情統計報告。行政院主計處。
- 主計處（2006）中華民國94年綠色國民所得帳編製報告。行政院主計處。
- 江崇榮（2000）屏東平原地下水之海水入侵。經濟部中央地質調查所彙刊，第13號，第25-50頁。
- 何麗如、汪中和、陳鎮東（1990）北港地區地下水之地球化學初探。中華民國環境保護學會會誌，第13卷第2期，第38-59頁。
- 李友平、張國強、劉萬里（2001）臺灣地區之地下水資源現況。第四屆地下水資源及水

- 質保護研討會論文集，第201-210頁。
- 阮國棟（1999）我國地下水污染防治之政策及作法。第三屆地下水資源及水質保護研討會論文集，第449-460頁。
- 吳明進（1992）臺灣的氣候變化。大氣科學，第20卷第4期，第295-318頁。
- 汪中和、李隆安、劉文徹、廖述宏、金紹興、張秉權、藍繁盛（1995）在全球暖化影響下嘉南地區的水資源問題。中央研究院臺灣西部環境變遷及資源管理之研究：（1）曾文溪流域，研究論文彙報（二），第65-76頁。
- 汪中和、張慈君、王麗文、李隆安、陳榮藏（1996）澎湖赤崁地下水庫的供水限制。八十五年農業工程研討會論文集，第633-639頁。
- 汪中和（1999）臺灣的地下水資源。臺灣史料研究，財團法人吳三連臺灣史料基金會，第14號，第106-118頁。
- 汪中和、郭欽慧、張鳳嬌（2004）臺灣地下水文環境的變遷。經濟部中央地質調查所彙刊，第17號，第175-196頁。
- 邵維克（1997）臺灣地區地層下陷之探討。第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集，第173-186頁。
- 陳文福、蔡克敏、張國強、黃顯凱、郭純蓉（2001）屏東地下水鹽化之監測。第四屆地下水資源及水質保護研討會論文集，第187-190頁。
- 陳文福、張承宗、李榮崇、官彥均（2006）高雄地區的地下水水質。經濟部中央地質調查所彙刊，第19號，第153-177頁。
- 盧孟明、麥如俊（2003）台灣與全球雨量長期變化研究（一）1920-1995變化趨勢。大氣科學，第31期，第199-220頁。
- 經濟部水利司（1995）臺灣地區地下水觀測網計畫，81-83年度技術成果彙編，共111頁。
- 經濟部水資源統一規劃委員會（1992）臺灣地區地下水資源，共45頁。
- 經濟部水資源統一規劃委員會（1995）臺灣地區之水資源，共334頁。
- 經濟部水資源局（1996）水資源政策白皮書，共133頁。
- 經濟部水資源局（1997）臺灣地區地下水觀測網整體計畫，81-84年度成果簡介，濁水溪沖積扇，共36頁。
- 經濟部水資源局（1999）臺灣地區地下水觀測網整體計畫第一期（81~87年度）成果彙編，共364頁。
- 經濟部水利署（1950-2005）臺灣水文年報。行政院經濟部水利署。
- 經濟部水利署（2005）臺灣水利統計年報。行政院經濟部水利署。
- 經濟部中央地質調查所（1999）績效彙編。臺灣地區地下水觀測網八十八年度水文地質調查研究計畫，共64頁。
- 賈儀平、王原賢、陳佳杏、吳雪蘋（2001）集集大地震後濁水溪沖積扇之地下水位變化。第四屆地下水資源及水質保護研討會論文集，第359-364頁。
- 劉聰桂（1994）由碳十四定年與氙示蹤探討濁水溪沖積扇地下水的流速與補注。地下水資源及水質保護研討會論文專輯，第1-24頁。
- 劉聰桂、田巧玲、邱等輝、張炎銘（1996）濁水溪沖積扇之地下水資源—碳十四與氙定年/示蹤研究。濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第145-164頁。
- Chang, F.C. and Wang, C.H. (2003) Did sulfur-rich volcanic eruptions affect drought episodes in Taiwan? In: Water Resources Systems - Hydrological Risk, Management and Development, International Association of Hydrological Sciences, Publ. no.281, 148-157.
- Chia, Y., Wang, Y.S., Chiu, J.J., Liu, C.W. (2001) Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan. Bull. Seism. Soc. Amer. 91(5), 1062-1068.
- Chia, Y.P., Wang, Y.S., Wu, H.P. & Huang, C.J. (2002) Coseismic Changes of groundwater level in response to the 1999 Chi-Chi Earthquake. Western Pacific Earth Sciences, 2, 261-272.
- Coleman, D.C. and Fry, B. (Editors) (1991) Carbon Isotope Techniques. Isotopic Techniques

- in *Plants, Soil, and Aquatic Biology Series*, Academia Press, San Diego, California, USA, 274pp.
- Hsu, H. H., and Chen, C. T. (2002) Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 79, 87-104.
- Hsu, K.C., Wang, C.H. and Ma, K.W. (2006) Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, doi:10.1007/s10040-006-0137-x.
- Hsu, S.K. (1998) Plan for a groundwater monitoring network in Taiwan. *Hydrogeology Journal*, 6, 405-415.
- Huang, S. (2006) Land warming as part of global warming. *EOS (Transactions of American Geophysical Union)*, 87(44), 477.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate Change 2001: Synthesis Report (Summary for Policymakers)*, 34pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability (Summary for Policymakers)*, 23pp.
- Jean, J.S., Liu, C.C., Jiang, W.T., Chow, J., Yu, T.-T., Lin, C.W. and Huang, S.W. (2002) Role of fluids in surface deformation caused by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(1), 1-10.
- Lee, M., Liu, T.K., Ma, K.F. & Chang, Y.M. (2002) Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1824, doi:10.1029/2002GL015116.
- Li, L.A., Wang, C.H., Liaw, S.H., Yung, Y.L., Li, Y.H., Chen, Y.C. and Li, P.C. (1997) The impact of worldwide volcanic activities on local precipitation - Taiwan as an example. *Jour. Geol. Soc. China*, 40(1), 299-311.
- Liu, S.C., Wang, C.H., Shiu, C.J., Chang, H.W., Hsiao, C.K. and Liaw, S.H. (2002) Reduction in sunshine duration over Taiwan: causes and implications. *TAO*, 13(4), 523-545.
- Song, S.R., Ku, W.Y., Chen, Y.L., Lin, Y.C., Liu, C.M., Kuo, L.W., Yang, T.F. and Lo, H.J. (2003) Groundwater chemical anomaly before and after the Chi-Chi earthquake in Taiwan. *TAO*, 14(3), 311-320.
- United Nations (1998) *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. 21pp.
- Wang, C.H., Li, L.A. and Liu, W.C. (1994) Some characteristics of the precipitation in Taiwan. In: C.I. Peng and C.H. Chou, Editors, *Biodiversity and Terrestrial Ecosystem*, Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series, No.14, 343-354.
- Wang, C.H., Peng, T.R. and Liu, T.K. (1996) The salinization of groundwater in the northern Lan-Yang Plain, Taiwan: stable isotope evidence. *Jour. Geol. Soc. China*, 39(4), 627-636.
- Wang, C.H., Li, L.A., Liaw, S.H., Yung, Y.L. and Li, Y.H. (1997) Taiwan's drought periods based on the precipitation records for the past 100 years. In: "The Changing Face of East Asia during the Tertiary and Quaternary", N.G. Jablonski, Editor, *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of the East Asian Environment*, Centre of Asian Studies, The University of Hong Kong, 336-351.
- Wang, C.H., Chiang, C.J., Peng, T.R. and Liu, W.C. (1999) Deterioration of groundwater quality in the coastal Pingtung Plain, southern Taiwan. In: *Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality*. J.B. Ellis, editor, International Association of Hydrological Sciences, Publ. no.259, 39-45.
- Wang, C.Y., Dreger, D.S., Wang, C.H., Mayeri, D. and Berryman, J.G. (2003) Field relations among coseismic ground motion, water level changes and liquefaction for the 1999 Chi-Chi (Mw=7.5) earthquake, Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 30 (17), 1890, doi:10.1029/2003GL017601.
- Wang, C.Y., Wang, C.H. and Manga, M. (2004a) Coseismic release of water from mountains - evidence from the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Geology*, 32(9), 769-772.
- Wang, C.Y., Wang, C.H., and Kuo, C.H. (2004b) Temporal change in groundwater level

- following the 1999 (Mw=7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geofluids*, 4(3), 210-220.
- Wang, C.H., Wang, C., Kuo, C.H. and Chen, W.F. (2005) Some Isotopic and Hydrological Changes associated with the 1999 (Mw=7.5) Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Island Arc*, 14(1), 37-54.
- Wang, C.Y., Cheng, L.H., Chin, C.V., Yu, S.B. (2001) Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geology*, 29, 831-834.
- World Meteorological Organization (WMO) (2006) Statement on the Status of the Global Climate in 2005. 12pp.

The Impacts of Climate Change on the Groundwater Environment of Taiwan: Retrospective and Prospective Views

Chung-Ho Wang²

ABSTRACT

Global warming has currently accelerating in the troposphere and one of the consequences that derived from climate change is the chaotic variations of weather and water cycle on the earth surface. Extreme weather events have been observed all over the world, particularly for the pattern and intensity of precipitation. This study takes Taiwan as a case to review its precipitation variations during the past century and discuss the impacts of global warming on the local groundwater environment. The salient features include: (1) the regional heterogeneity of precipitation becomes deteriorating between north and south regions; (2) the extremity of precipitation intensity is getting worse through time. These trends are very unfavorable for the long-term management and development of the groundwater resources in Taiwan. Some important research topics are proposed for the further pursue of a sustainable groundwater environment. Effective and feasible measures for the remediation of the current and future groundwater environment problems are urgently needed

Key words: global warming, Taiwan, groundwater environment

² Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

