



環境變遷與地下水之永續發展

葉信富／國立成功大學資源工程學系 副教授

黃嘉琦／國立成功大學資源工程學系 博士班研究生

地下水使用隨著社會經濟發展的共同演化，已成為我們生活至關重要的一環。然而，隨著環境不斷變遷，影響地下水的潛在因素與機制也變得更为複雜，無論在科學發展、政府機關或是社會大眾，對於地下水相關的环境議題也應該更加重視。本文透過彙整地下水與人類生活發展間的關係，嘗試傳達地下水對於我們的重要性與對地下水資源問題的重視，並藉由瞭解環境變遷如何影響地下水以及對地下水評估的需求。本文亦認為未來應以更廣泛的角度來考量應用地下水資源的利害關係，來建構更為健全的地下水資源永續架構，以長期永續規劃取代短期政策治理。

前言

在淡水資源中，地下水相較於地表水，為較穩定的水資源來源，也是地球最大的液態淡水水庫以及河川流量的主要來源之一，在陸地水文循環、生態系統甚至是人類的用水需求中扮演重要的角色^[1]。臺灣水資源來源以地表水為主，佔有 80%（包含河川取水與水庫蓄水），地下水則僅佔約 20%，且主要為農業所使用。雖然臺灣相較於全球之地下水使用量的比例較少，但氣候變遷對於地表水文過程的直接影響，以及人類活動造成水資源的匱乏與污染等，導致臺灣可用的地表水資源逐漸減少。近年環境變遷對於水資源的影響，或許將為往後水資源調配增添不少的未知數，因此進一步瞭解地下水資源狀況將有利於因應環境變遷進行調適與決策。本文主要探討地下水對於生活之重要性與發展及其如何受到環境變遷所影響，並期望以更廣泛的角度提供地下水資源永續的概念與思維。

地下水與生活之重要性

在淡水資源中，有高達 70% 儲存於極地的冰冠中，另外近 30% 是位於不易開發地底下之地下水，更僅有少於 1% 是可直接供給人類使用之地表水^[2]。儘管目前仍以地表水為主要使用來源，但若能夠適當且有效利用地下水資源，或許能夠解決現今許多地區所面臨的水資源缺

乏問題。當然，地下水利用早已遍布全球，不僅佔未凍結淡水資源的 99% 外，也是全球總用水量的三分之一，且半數運用於民生及灌溉用水^[3]，由此可見地下水資源對於人類活動的重要性。在環境變遷下，瑞典斯德哥爾摩大學研究團隊（Rockström *et al.*^[4]）將全球環境議題統整為九大地球限度（planetary boundaries），如表 1。地球限度被定義為引發不可逆、衝擊環境變化的臨界值，若超過這些臨界值時，將造成地球系統不穩定，形成對當前和未來社會的風險；換句話說，地球的忍耐是有限度的。2009 年該團隊提出之九大限度起初包含氣候變遷、生物多樣性損失、臭氧消耗、海洋酸化、氮／磷循環、森林砍伐與土地利用變遷、淡水利用、懸浮微粒汙染與化學汙染，其中已有三項超過限度。然而，2015 年又將土地系統變遷列為超出限度的項目，表示近乎一半的環境危機已經發生^[5]。剖析地球環境狀況有一定的難度，這些限度也僅能提供概略性的評估，因此更需要重視潛在的危機。本文彙整上述 2009 至 2015 年之地球限度項目，可發現「淡水利用」一直都在安全限度之內，但實際上水資源缺乏及管理問題卻時常出現在我們的生活中，此顯示地球限度在「淡水利用」項目上的評估可能有限制。Gleeson *et al.*^[6] 也提出認為須對「淡水利用」該項目的完整性進行調整，因為水在形態上主要會儲存在大氣、地表、地下以及冰山冰川之中，並經由

表 1 九大地球限度項目比較表

2009 年發佈之地球限度 (Rockström <i>et al.</i> [4])	2015 年發佈之地球限度 (Steffen <i>et al.</i> [5])
氣候變遷 *	氣候變遷 *
生物多樣性損失 *	生物圈完整性 (遺傳、功能多樣性) *
臭氧消耗	臭氧消耗
海洋酸化	海洋酸化
氮*、磷循環	生物地球化學物質流 (氮、磷循環) *
森林砍伐與土地利用變遷	土地系統變遷 *
淡水利用	淡水利用
懸浮微粒污染	氣溶膠負荷
化學污染	創新物料的採用

* 表示超過限度項目

水文循環交互作用，且與其它地球限度項目也有相互貢獻或牽制性，後來發現其實過去的研究中，在原本的淡水利用限度中僅考量地表水的部分，實際上，缺少考量對於同樣為淡水資源的地下水資源之評估。

從西元前人力驅動的傳統井，至十六世紀獸力驅動的水利設施，再到 18 世紀工業革命蒸汽引擎發明所帶來的機械式鑽井，人類為了取水便利不斷提高地下水的抽取技術，甚至增加了取水的深度，並將這些乾淨水資源應用在農業、工業及城市的發展上。特別值得注意的是，此期間歐洲面臨霍亂的爆發，霍亂主要透過進食受霍亂弧菌污染的食物或水傳播，因此地下水的開發、保護及管理也被認為與當時解決霍亂問題的根本有關。直至今日亦是如此，在開發程度相對不高的區域，就可能因為乾淨水資源的不足，而有疾病產生或醫療環境的問題，尤其在近年全球處於 COVID-19 疫情的當下，也凸顯乾淨水資源對於人類健康的重要性。隨著 1950 年代電力成為主要動力來源後，技術的提升帶動地下水的加速開採。如此無止境的開採也開始受到了科學家與利害關係人的關注，並建立國際水文地質學家協會 (International Association of Hydrogeologists, IAH) 以促進瞭解地下水資源狀況及提出解決地下水風險的方法。儘管地下水問題開始受到關注，卻還是免不了在主要都市 (例如墨西哥與日本等地)，出現因為地下水過度開採所造成的地層下陷現象。然而，產業發展速度相對於人為災害的認知總是特別快，1960 年代的綠色革命將農業技術藉由已開發國家轉移至開發中國家，全球農業產量大幅提升，也造成了將地下水使用於灌溉的普及性。到了 1980 年代，多數人口稠密區的都市化提高對於水資源的需求，甚至有地下水受到人為活動的污染，因此也造成了地下水資源的壓力。20 世紀後，地下水與社會已經

密不可分，近乎全球一半的人口仰賴地下水作為飲用水來源，且地下水對於農業擴張的貢獻，更使其對於經濟社會發展來說是關鍵驅動力 [3]。然而，這卻也衍生出許多當前的地下水問題，包含沿岸地下水開採導致海水倒灌，造成地下水與土壤鹽化影響原區域土地利用問題、過度抽水導致土壤結構變化而地層下陷，不可回溯的含水層縮減降低地下水的可蘊藏量，並增加地下水枯竭的可能性、農業灌溉與工業廠址所產生的化學或重金屬污染，亦隨著降雨入滲造成對地下水水質的污染威脅等。

環境變遷對地下水的衝擊

環境變遷主要可分為氣候變遷與人為活動兩個影響因素，評估氣候變遷對於陸地水循環的影響一直是世界各國的重點研究 [7,8]。在一個水文循環中，包含降雨、融雪及蒸發散等在氣候變遷下的變化都會導致地下水儲存量的變化 (如圖 1 所示)，而且每個地區主要改變的水循環因子各不相同，在濕潤地區為降雨，乾旱地區為蒸發散，高緯度及高山地區則仰賴融雪的補注。Wu *et al.* [9] 也發現特定區域因氣候變遷造成的降雨量增加反映於地下水補注量的增加，但因土地利用與農業發達而地下水抽取頻繁的地區，抽取量遠仍超過於自然補注量，因此我們無法輕易認定氣候變遷究竟對區域地下水儲存量的影響是好是壞，各個區域都需要依現地狀況進一步分析，才會知道如何應對水資源管理調配這項未來的巨大挑戰。氣候變遷對臺灣的水文影響主要包含豐枯水期交替越來越頻繁、降雨日數減少而乾旱時間延長、降雨強度增加導致河川輸砂量增加以及氣溫上升造成蒸發量增加等。經濟部水利署 [10] 依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告衍生 2020 ~ 2039 年的降雨情勢，降雨量整體而言呈現下降的趨勢，透過風險評估方法分析未來民生與工業用水的用水缺口，在人口較為稠密的臺灣西部沿岸區域多數被評估為中度或高度風險地區，降雨量的下降亦使得未來臺灣的地下水補注將逐漸減少。

在人類活動方面，以傳統農業與地下水間關係為例，全球多數地下水使用於灌溉農業，農業擴張在一定程度上可作為農作物貿易與經濟發展的指標，更有所謂的主要農業區域，臺灣西部沿岸也不例外。地下水抽取隨著產業擴張與開發程度越高越頻繁，因此也相對出現地下水枯竭的水資源議題。Dalin *et al.* [11] 研究

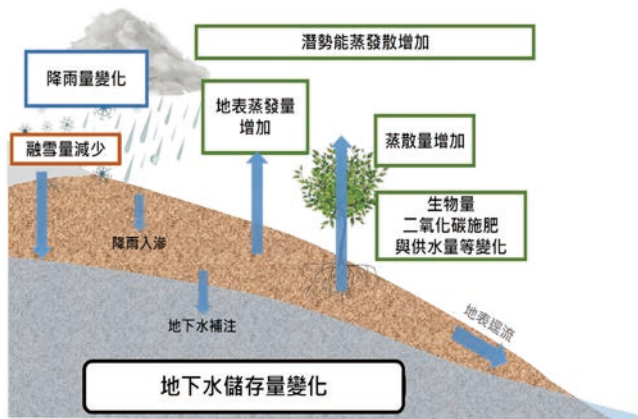


圖 1 陸地水文過程中不同控制因素對於地下水響應之示意圖。(修改自 Wu *et al.* [9])

結果顯示全球由灌溉所產生的地下水枯竭程度與地下水壓力指數 (groundwater stress index) 大於 1 的分布一致，其中也包含臺灣西部沿岸的主要農業灌溉區域，如圖 2 所示。地下水壓力指數大於 1 代表非永續的地下水消耗將影響地下水可用性及其仰賴地下水的地表水體及生態系統，也表示過度抽取地下水對於環境產生負面的影響。然而，在此僅僅為農業灌溉對於地下水的影響，若考量人口增加、工業抽水、都市化以及其他人為活動因素，地下水資源所受到的壓力可能遠超乎於想像。若再加上前述所提及的氣候變遷風險評估，臺灣西半部未來的水資源調配與管理勢在必行。

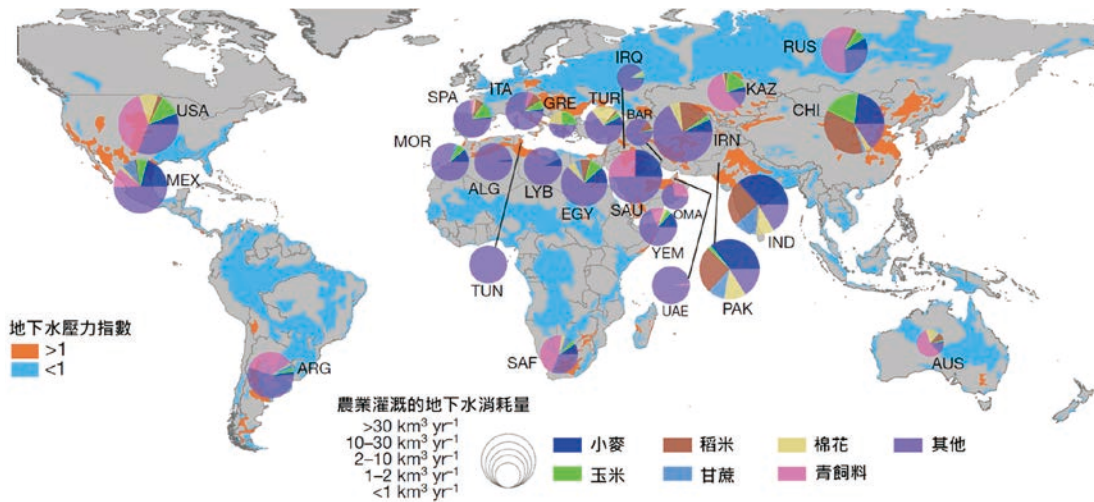


圖 2 2010 年全球特定作物對地下水枯竭的影響程度。圓餅圖顯示各國主要作物灌溉用水的比例，而其大小則表示總用水量。背景地圖顯示主要含水層的地下水壓力指數 (地下水壓力指數 = 區域面積「區域年平均地下水抽水量 / (補注量 - 地下水貢獻之環境流量)」/ 含水層面積)。部分國家過度開採地下水但無圓餅圖是因為其地下水利用主要與農業灌溉無關。(修改自 Dalin *et al.* [11])

臺灣中央研究院環境變遷研究中心在 2019 年重建臺灣地表覆蓋在 1904~1956、1956~1994 與 1994~2015 三個期間的變化 [12]，如圖 3 所示。由圖可見，臺灣早期致力於農業開發，農耕地一度達到全島總面積 35%，目前則降至約 25%。都市與其他用地隨著經濟發展則是快速上升至 10%，森林則是占據大部分山區與自然資源保護區在 55% 至 65% 之間變動。整體而言，臺灣土地利用起初以農業為主，隨著經濟發展轉變為建地與都市，森林則有稍微增加的傾向，後兩者的擴張則主要由農業用地轉變，其中土地覆蓋或利用變化對於地下水資源的影響包含區域人口密度增加導致用水量需求大增、部分基礎建設以不透水表面覆蓋原有地表，降雨難以入滲土壤補注地下水以及高耗水工業對於區域供水負擔的影響等等。

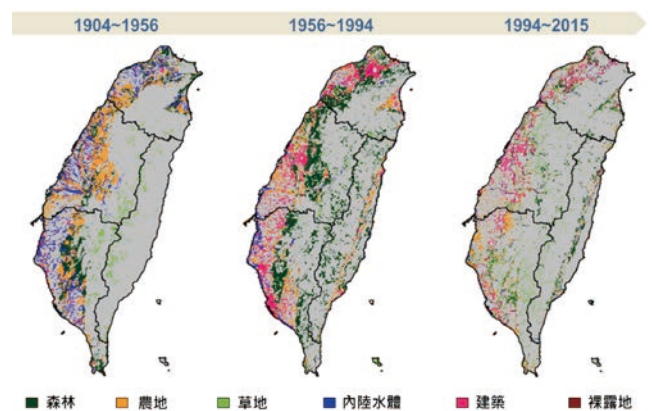


圖 3 臺灣早期 (1904~1956)、中期 (1956~1994) 與近期 (1994~2015) 的地表覆蓋變化圖，深綠色、黃色、淺綠色、藍色、粉紅色與紅褐色分別代表森林、農地、草地、內陸水體、建築以及裸露地，白色則為土地覆蓋未變動。(修改自 Chen *et al.* [12])

推估地下水儲存量的需求

取得地下水資源的資訊能夠幫助我們在環境變遷下更有效地解決相關的環境議題，但地下水的監測與調查通常受到其不可見性與地下結構的複雜性影響而難以執行。若單就一個水文系統來看，一個系統又可再切分成多個子系統，每個子系統的水文與地質特性不盡相同，包括含水層分布、斷層、褶皺影響等，我們難以細部剖析地下結構及地下水的分布狀況。此外，地下監測與調查通常為透過鑽井以了解岩芯與地下水位等的局部性單點測量，並配合既有或修正的空間內插方法建構整個區域的狀況，但井與井之間的實際狀況不得而知，儘管能夠藉由高密度鑽井來改善，但卻仍受到地區地文特徵以及調查成本所限制。

有鑒於此，科學家開始透過不同形式的方法來反推或衍生地下水的相關資訊。在水循環的基本水文變量中，可藉由河川流量與地下水儲存量間的連結為基礎，來定義不同分析方法所推估的地下水儲存量，因為在流域水文系統中，流域出口為整個水文過程的終點，無論降雨、入滲補注或蒸發散如何變化，水的流動終將匯集於河川，其中也包括地下水在含水層中流動並排水至河道所形成的部分流量（例如基流）。地下水與河川流量的關係主要可依水位高低分為三種：(1) 當地下水位高於河川水位時，地下水補注河川；(2) 當地下水位低於河川水位時，由河川補注地下水；(3) 當地下水位過低並與河川無直接連結時，主要由降雨形成的河川流量向地下水補注。Staudinger *et al.* [13] 以此為基礎來描述不同形式的地下水儲存量（如圖 4 所示），包含動態儲水量 S_D (dynamic storage)、擴展動態儲水量 S_E (extended dynamic storage)、移動儲水量 S_M (mobile storage) 以及固定儲水量 S_I (immobile storage)。 S_D 為在地下水與河川互相補注的階段，地下水儲存量與河川流量間有共同的動態變化關係； S_D 在經歷河川流量停止至下次降雨補注發生前的階段，由於蒸發散持續作用導致地下水儲存量下降，故此階段之儲水量為 S_E 。前述兩者皆為地下水有明顯增減的狀況，但地下水移動可能包含流域之間或是淺層與深層之間的交換，而這些涵蓋動態與交互流動的地下水則被稱為 S_M 。反之則存在不會移動並長期儲存於含水層中的 S_I ，其與移動儲水量的加總即為總儲水量 S_T 。

基於不同假設或理論的地下水儲存量推估方法則會獲取不同型態的儲水量，以下主要介紹五種常見的推估方法：

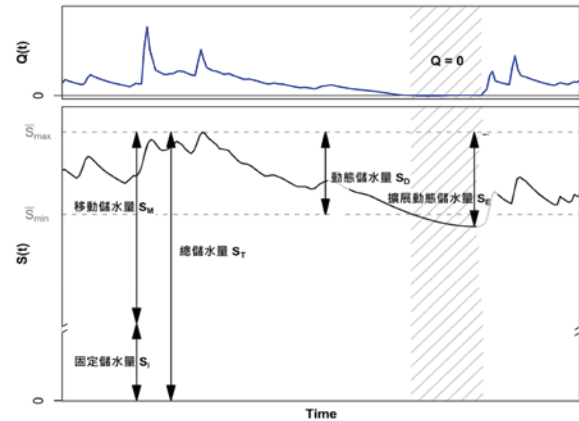


圖 4 以河川流量 Q 與地下水儲存量 S 之水文歷線描述不同形式之地下水儲存量。 t 為時間， \bar{S}_{\max} 及 \bar{S}_{\min} 分別為最大及最小動態儲水量。斜線區域則表示河川流量停止但儲水量持續減少的階段。

1. 水平衡：基於質量守恆，透過一水文系統中已知的輸入及輸出水文變量來計算 (Sayama *et al.* [14])。
2. 水文模擬：透過率定水桶模式將逕流機制，置換為數個儲水容器模型所組成，將開始降雨至地表土壤層視為第一個水桶裝水，一部分則往下流動至下一個水桶來代表滲入含水層，以此類推 [15]。
3. 示蹤計：當同位素或化學成分經由降雨補注到含水層地下水再到排放至河川的過程，會因為地下結構而產生不同的滯留時間，透過滯留時間與同位素及化學成分採樣的比例，反推該區域有多少地下水流動並探討流動過程可能存在得物理、化學或生物機制 [16]。
4. 重力測量：重力回溯及氣候實驗衛星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 在 2002 年由 NASA 與德國航太中心在俄羅斯發射，負責探測的兩具衛星相距約 220 公里，藉由衡量地表重力對於其在軌道上運行速度的微小影響，從而推估近地表水含量的變化 [17]。
5. 儲水－排水方法：假設在乾燥期間，水文系統中的降雨與蒸發散遠低於河川流量時，即可單純探討河川與地下水間關係，並以河川流量進行反推儲水量 [18,19]。

從上述推估方法的基本介紹，可以瞭解以水文過程為基礎的方法皆可推估 S_D ，基於水文平衡之方法則可推估 S_E ，示蹤劑則因涉及整體地下水流動過程而可推估 S_M ，僅有 S_I 與 S_T 目前無法有效估計，也是獲取地下水資訊最受限的部分，不同儲水形式所對應之推估方法如表 2 所示。由此可見，由於不同儲水量估計方法推估的儲水類型不同，我們應透過推估方法的組合來剖析及建立更全面的集水區地下水儲水狀況。

表 2 不同儲水形式所對應之推估方法

地下水儲水形式	推估方法
動態儲水量 S_D	儲水—排水方法 水文模擬 示蹤劑
擴展動態儲水量 S_E	水文模擬 水平衡 重力測量
移動儲水量 S_M	示蹤劑
固定儲水量 S_I	—
總儲水量 S_T	—

地下水資源與永續發展目標

建立地下水資源永續管理策略的重點在於如何建立有效的適應性管理，即以當地環境或利害關係人的生活及資源運用型態為主，訂定對利害關係人影響較小且能顧及當地資源與產業未來永續的管理決策。過去在地下水資源管理中，許多國家皆會應用不同量化分析及複雜的地下水流模型來建構當地的地下水管理機制 [20,21]。然而，有鑑於模型或複雜科學在交流上的困難，會限制利害關係人的參與，進而會影響策略評估未來的適應性管理的發展，因此 Thomas [22] 認為使用如地下水位所計算的簡易指標較能夠作為評估當地地下水適應性管理策略的客觀基準。過去許多研究也將相關的永續指標應用於水文系統中來解釋水資源的可用性問題 [23,24]。

地下水資源的利害關係人包含地下水開採者、私人與公共用戶、環境保護主義者、管理者以及政策制定者等，由於他們對於地下水運用的傾向與目標不同，因此涵蓋的立場相當廣泛。不同使用者在管理策略的充分參與有助於做出明智的決策並預防可能的衝突，進而提升社會、經濟以及技術效益。由此可見，有效的地下水資源管理需要考量許多不同層面的因素來進行綜合評估。Tirupathi *et al.* [25] 提出由社會層面的公眾參與、環境層面的地下水監測、經濟層面的管制干預、機構層面的機



圖 5 地下水永續基底架構的五個層面

構責任以及與利害關係人相互信任的知識建立與傳播所組成的地下水永續基底架構 (groundwater sustainability infrastructure framework)，如圖 5 所示。此架構有助於比較地下水在空間與時間上的永續性狀態，進而優先考慮資源分配和評估需要改進的層面，並進一步建立地下水資源永續管理策略建議。

此外，聯合國於 2015 年所提出的永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 反映出對國際發展的整合性方向，以達到充分考量人類福祉、社會正義以及環境永續的關聯性 [26]，來降低各項目標間相互作用下可能產生的衝突。SDGs 代表實現人類永續未來以及解決與貧困、不平等、氣候變遷、環境惡化及水有關之全球挑戰的展望藍圖 [27]。在 SDGs 的背景下，地下水與確保所有人都能享有水及衛生及其永續管理 (目標 6：Clean water and sanitation) 有著最明確的聯繫。然而，地下水亦可以有助於消除貧窮 (目標 1：No poverty)、消除飢餓 (目標 2：Zero hunger)、性別平等 (目標 5：Gender equality)、永續城鄉 (目標 11：Sustainable cities and communities)、氣候變遷對策 (目標 13：Climate action) 和陸域生態 (目標 15：Life on land) [28]，如圖 6 所示。地下水的角色對於成功執行 SDGs 至關重要，但地下水利用的永續發展面臨著在環境與社會經濟間取得平衡的挑戰，且其永續性受到不同水文與社會經濟因素



圖 6 地下水資源與各項永續發展目標間之關聯

的衝擊。期望未來能夠藉由自然與社會人文科學領域的結合來尋求具有具體行動價值的見解來縮小 SGDs 與資源永續管理或系統方法論之間的差距，由更廣泛的角度解決相關的地下水與環境問題，同時考量在政策治理上將短期目標解決轉變為長期永續規劃。

結語

地下水的使用隨人類社會經濟發展演化，已與我們生活息息相關，但對於地下水資源相關的環境或災害議題仍須更加重視。

氣候變遷與人類活動皆以不同形式影響著全球的地下水資源，不斷提高環境變遷的複雜性加上各區域所受到的影響因地而異，如何針對特定環境進行地下水資源的調配，或保護而不衝擊相關產業與生活儼然成為更具挑戰的議題。

對於地下水或地下結構資訊的獲取，可藉由不同地下水儲存量推估方法的組合來協助我們更全面地瞭解區域地下水儲存量的流動機制與狀況，以提供該區域實施地下水資源開採或保護的相關措施。

地下水資源永續概念應以利害關係人為基礎，並透過適應性管理逐步調整以降低相關管理決策對其所造成的影響，且須評析既有或欲實施之治理措施是否為長期永續規劃而非短期目標的治理。

參考文獻

- Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beaudoin, H.K., Landerer, F.W., and Lo, M.H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651-659.
- Awange, J. (2021). Global Freshwater Resources. In *Lake Victoria Monitored from Space* (pp. 3-19). Springer, Cham.
- Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice. (2019). Groundwater: critical for sustainable development. GRIPP infographic. International Water Management Institute (IWMI) and CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). 16p.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., and Foley, J.A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E. M., and Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., Zipper, S.C., Jaramillo, F., Gerten, D., and Famiglietti, J.S. (2020). Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR024957.
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., and van Ypersele, J.P. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R. Pachauri and L. Meyer (editors), Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., and Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, 547, 184-195.
- Wu, W.Y., Lo, M.H., Wada, Y., Famiglietti, J.S., Reager, J.T., Yeh, P.J.F., Ducharme, A., and Yang, Z.L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11, 3710.
- 經濟部水利署 (2016)。氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究第 3 階段管理計畫 (3/5)。臺北市：經濟部水利署。
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., and Puma, M.J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature* 543, 700-704.
- Chen, Y.Y., Huang, W., Wang, W.H., Juang, J.Y., Hong, J.S., Kato, T., and Luysaert, S. (2019). Reconstructing Taiwan's land cover changes between 1904 and 2015 from historical maps and satellite images. *Scientific Reports*, 9, 3643.
- Staudinger, M., Stoelzle, M., Seeger, S., Seibert, J., Weiler, M., and Stahl, K. (2017). Catchment water storage variation with elevation. *Hydrological Processes*, 31(11), 2000-2015.
- Sayama, T., McDonnell, J.J., Dhakal, A., and Sullivan, K. (2011). How much water can a watershed store?. *Hydrological Processes*, 25, 3899-3908.
- Seibert, J. and Vis, M.J. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315-3325.
- Cartwright, I., Cendón, D., Currell, M., and Meredith, K. (2017). A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*, 555, 797-811.
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., and Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358-369.
- Huang, C.C. and Yeh, H.F. (2019). Hydrogeological parameter determination in the southern catchments of Taiwan by flow recession method. *Water*, 11(1), 7.
- Yeh, H.F. and Huang, C.C. (2019). Evaluation of basin storage-discharge sensitivity in Taiwan using low-flow recession analysis. *Hydrological Processes*, 33(10), 1434-1447.
- Thomas, B.F., Caineta, J., and Nanteza, J. (2017). Global Assessment of Groundwater Sustainability Based on Storage Anomalies. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11445-11455.
- Alley, W.M., and Konikow, L.F. (2015). Bringing GRACE Down to Earth. *Groundwater*, 53(6), 826-829.
- Thomas, B.F. (2019). Sustainability indices to evaluate groundwater adaptive management: a case study in California (USA) for the Sustainable Groundwater Management Act. *Hydrogeology Journal*, 27, 239-248.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P., and van Beek, L.P.H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200.
- Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., Swenson, S., and Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7), 5217-5238.
- Tirupathi, C., Shashidhar, T., Pandey, V.P., and Shrestha, S. (2019). Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities. *Sustainable Cities and Society*, 44, 321-331.
- Gupta, J. and Vegelin, C. (2016). Sustainable development goals and inclusive development. *International environmental agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 433-448.
- Fukuda-Parr, S. (2016). From the Millennium Development Goals to the Sustainable Development Goals: shifts in purpose, concept, and politics of global goal setting for development. *Gender & Development*, 24(1), 43-52.
- Conti, K.I., Velis, M., Antoniou, A., and Nijsten, G.J. (2016). Groundwater in the context of the Sustainable Development Goals: Fundamental policy considerations. Brief for Global Sustainable Development Report (GSDR). Delft, Netherlands: International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC).