在地殼的縫隙中讀水：近代臺灣地下水研究的科學旅程

文・圖／劉聰桂

臺灣是一座多雨的島嶼，但同時也是全世界水資源分布最不均衡的地方之一。平均年雨量雖達2500毫米，相當於覆在島上「一層樓高的水柱」，但真正能留在地表或滲入地底被利用的比例卻不高。

水與島嶼的矛盾命題

這與臺灣的地質－地形－氣候三者的交互作用密不可分。這座島是新生代造山帶的一部分，板塊擠壓劇烈，使岩層破碎、斷層與褶皺密布，從而塑造了「山高、坡陡、河短」的地貌。雨水落地後，很快沿著陡峭的山坡與短促的河谷流向大海。再加上：

- 80%以上的降雨集中在每年5-10月的豐水期
- 11月到翌年4月的枯水期漫長且乾燥
- 水庫受坡地侵蝕造成淤積，儲水功能逐年下降

種種因素使得臺灣的地表水難以滿足需求。在農業、工業與都市高度發展的壓力下，地下水便逐漸成為不可或缺的備援水源。然而，地下水並非取之不盡，用之不竭。過度抽取會使地層壓縮下陷；沿海抽水過強則會吸引海水倒灌；含水層更新緩慢，更可能導致「抽到幾百年甚至上千年前的水」而不自知。要正確使用地下水，科學性的資料與研究必不可少。這正是近代臺灣地下水研究的起點。

島嶼地質的奧祕：地下水為何在臺灣如此關鍵？

1. 板塊交界的造山島

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，是世界上造山作用最劇烈的地區之一。中央山脈拔地而起，海岸山脈直立峻峭，東西地勢懸殊。第三紀地層岩性鬆軟，加上褶皺、斷層與節理發達，使地下岩層不均質，含水層分布複雜。這些地質特徵使臺灣的地下水系統呈現以下特點：

- 多層、多孔隙、多類型的混合含水系統
- 山區補注迅速、平原流動緩慢、沿海出流複雜
- 垂直與水平流向同時存在，且變化多端

要理解這樣的地下水系統，僅靠傳統地質調查並不足夠，還必須借助科技手段。

2. 氣候與地形造成的水資源壓力

臺灣雖雨量豐沛，但因地形陡峭與河川短促，雨水留存時間極短。大部分降雨快速匯流入海，使得每位居民可分配到的地表水量是全球平均的六分之一。這也導致地下水在天然環境與人為活動中扮演重要角色：

- 枯水期供應農業灌溉
- 工業區大量需要穩定水源
- 都市地區在乾旱時依賴地下水補充

地下水是臺灣的「隱形水庫」，但若管理不當，也可能成為災害的源頭。

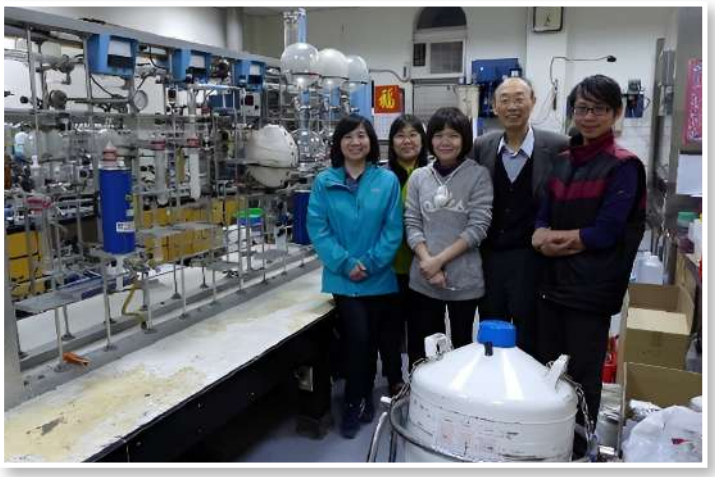
地下水科學的跨域性：從地質學到示蹤化學

地下水文學（groundwater hydrology）以地質學為基礎，但其研究與應用卻橫跨物理、化學、水文與工程科學。包括水位與壓力量測、抽水試驗（pumping test）分析含水層特性、水化學分析追蹤來源與混合、放射性同位素定年推算水齡與流動路徑，以及地球物理探測與地層資料交叉比對。這些技術使得科學家能從地底「讀出」水的故事：它從哪裡來？在地底滯留多久？往哪裡流？是否與海水混合？補注速度快或慢？臺灣在1990年代以前，對地下水的年代與示蹤研究仍十分有限。改變，始於科學定年的引進。

筆者的學習與回國：科學定年在臺灣生根

民國75年（1986），筆者獲國科會補助，利用休假機會赴美國多所大學與地質調查所學習碳十四定年技術，包括：華盛頓大學（University of Washington）、南美以美大學（Southern Methodist University, SMU）、亞利桑那大學（University of Arizona），以及伊利諾州地質調查所（Illinois State Geological Survey）。在此期間，筆者觀察到美國地質與水文研究 高度依賴放射性同位素技術，尤其是：

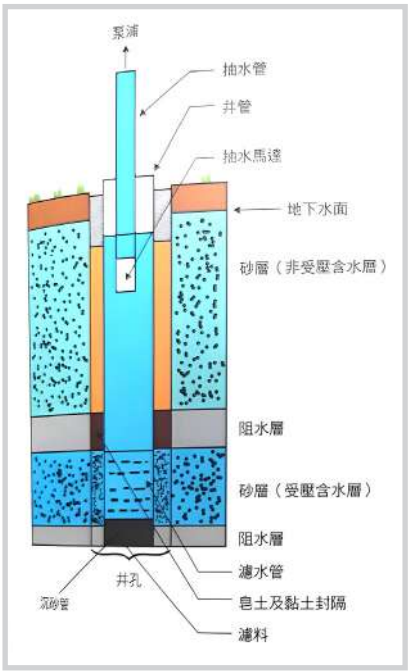
- 碳十四（^{14}C）：用於判斷深層地下水的「年齡」



臺大碳十四定年實驗室成員，左起：康素貞小姐、周春燕小姐、陳筱薇小姐、劉聰桂教授、吳承穎先生。

• 氚（^{3}H）：用於追蹤近數十年的「現代水」

相較之下，臺灣當時尚未具備自主進行地下水定年的完整能力。返國後，筆者建議由國科會邀請伊利諾州地調所的劉兆藜博士回臺，協助建立臺灣第一座完整的 ^{14}C 定年實驗室——臺大碳十四定年實驗室。這為日後臺灣大規模的地下水年齡研究奠定了關鍵基礎。



地下水井構造剖面圖。

670口觀測井：臺灣水文史上的大工程

民國81年（1992），經濟部正式啟動「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」。這是一項跨越20年的大型科學工程，至民國97年（2008）共鑽探約 670口地下水觀測井。這些深度介於數十至數百公尺的觀測井，使臺灣首次擁有：系統性的水位紀錄、完整的含水層地層剖面、抽水試驗資料、連續的水質監測資料，以及大規模的水樣採集與年代測定資料。筆者正是在此計畫中，以此龐大的觀測資料為基礎，採集水樣進行 ^{14}C 與 ^{3}H 定年。結果揭示：1、臺灣西部平原中淺層地下水年齡多為數十至數百年；2、深層含水層的水齡可能達千年以上甚至更久；3、山麓沖積扇區的水明顯較「年輕」，更新迅速；4、沿海若發生超抽，會導致壓力反轉與海水入侵。臺灣地下水的全貌，第一次被科學性地描繪出來。

地層下陷監測井，測量地面下不同深度的地層壓縮量設備。全名「磁環分層式地層下陷監測井」，將「磁性感應環」安裝於不同深度的地層，藉由定期觀測這些感應環的深度變化，即可了解地層壓縮情形。圖取自水利署網頁 https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/Mw/Index。

用科學看見地下水的生命史：年齡、補注與流向

透過年齡剖面與地層資料，可分析不同區域的地下水行為：

1.補注（Recharge）區：水的誕生地

主要位於山麓沖積扇、水源涵養林與河床滲透區。此處因為大量現代水入滲而顯示較高的氚含量，代表近 50 年的現代水進入含水層。

2.流動（Flow）區：水的旅程

水沿壓力梯度逐漸往下游與海岸平原移動。^{14}C 因為衰變含量降低，表示水在地底停留時間拉長。

3.出流（Discharge）區：水的出口

可能是河川與濕地、海岸地下水出流區或抽水井群密集的地方。研究顯示，部分沿海地區若人為抽水量大於天然出流量，便會造成海水倒灌，形成鹽化危機。

地下水與科技防災：從觀測到預警的科學化管理

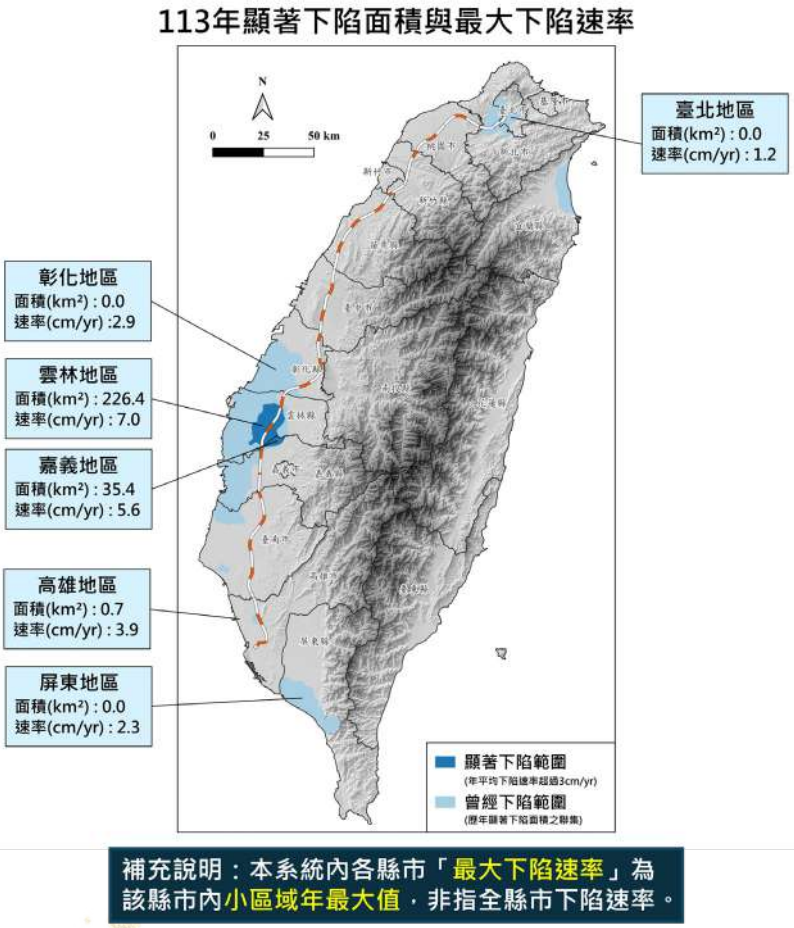
近年來，科技防災成為臺灣面對氣候變遷的必要策略。地下水系統與地層結構的動態變化，也被納入科學監測與預警範圍。

1.地層下陷的科技監測

超抽地下水會造成黏土層壓縮，導致地層下陷，並威脅道路、鐵道與建築安全。科技工具包括：(1)InSAR（衛星雷達干涉）：偵測毫米級沉降；(2)GPS 固定站：觀測地表高程變化；(3)地層下陷警戒井：記錄深部壓力與孔隙變化。結合水齡資料後，能辨識哪些含水層最脆弱，補注能力是否不足。

2.海水入侵與鹽化監控

沿海地下水若抽取過量，海水會沿著含水層入侵，形成「鹽水楔」。科技防災措



民國113年地層檢測概況。圖取自水利署網頁 https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/Index/all。

施包括：(1)電阻率探測（ERT）追蹤鹽分變化；(2)Cl/Br 比值判斷水的來源；(3)定年分析判別海水入侵是否影響深層古水。若結合模型預測，更能提前規畫抽水策略。

3.乾旱時期的水資源調度

在極端乾旱時，地下水成為重要的「戰略水源」。但不同含水層的更新速度差異極大：年輕水，可調度；古老水，需謹慎利用；海岸區水，需防止鹽化加劇。因此，定年資料與監測技術共同構成了科學調度的基礎。

結語：理解地底的水，才能守護地表的家園

臺灣的地下水研究在近三十年來迅速發展，從早期的零星調查，到擁有龐大的觀測網、完整的年代資料與科技化防災系統。我們對地下水的理解，也逐漸從「看不見的地下水量」提升到「能計算其年齡與流動的完整水文系統」。

筆者深信，當我們越能理解地下水的來源、生命史與脆弱性，便越有能力管理水資源，減少災害風險，並在氣候變遷中存續。地下水不再是地底深處的神祕水體，而是支撐臺灣社會的重要生命線。透過持續的研究、科技與跨域合作，這條生命線將更清晰，也更值得守護。

關於地下水的^{14}C年代

放射性^{14}C定年法，是一種利用碳的同位素^{14}C的放射性來對含有有機物質的物品進行年代測定的方法，1940年被美國化學家威拉德· 弗蘭克· 利比（Willard Frank Libby，1908-1980）發現，他也因此獲1960年諾貝爾化學獎。

基本上大氣CO_2的^{14}C濃度在過去5-6萬年保持恆定，定年法即是測定含碳物質停止與大氣圈發生碳交換之後「距今（Before Present，簡稱B.P.）的年代。

地下水中^{14}C有兩個主要來源：一是直接來自大氣層，一是源於土壤孔隙中。測定地下水年齡時，所用的測定年代物質是溶於水中的無機碳，它們在與土壤CO_2隔絕之後，便停止了與外界的交換。可透過加速器質譜儀（AMS），快速且準確的進行樣品放射性碳定年。圖取自水利署電子報第0253期106/11/17；
https://www.wra.gov.tw/epaper/Article_Detail.aspx?s=4232&n=30177。

參考文獻：

[1] Liu, T. K. (1995) Estimating flow and recharge rates of groundwater in western Taiwan using radiocarbon and tritium: Radiocarbon, vol.37, no.2, p531-542. NSC83-0202-M002-015. (SCI)

[2] Liu, T. K., Chen, C. H., Yang, T. Y., Lee, M., (2005) Tritium concentrations and radiocarbon ages of gushing groundwater from Hsuehshan tunnel, Northern Taiwan. TAO, 16(4), 909-917. (SCI)

[3]Liu, T. K., Chen, K. Y., Yang, T. F., Chen, Y. G., Chen, W. F., Kang, S. C., Lee, C. P. (2009) Origin of methane in high-arsenic groundwater of Taiwan – Evidence from stable isotope analyses and radiocarbon dating. Journal of Asian Earth Sciences., 36(4-5), 364-370. (SCI)

劉聰桂教授於臺北盆地開挖出的老牛樟樹。青田七六的老牛樟是台電在挖埋管線時所發現，由劉聰桂教授為其定年，確定為埋於地底2000年的巨木標本。

劉聰桂 小檔案

臺灣大學地質學系名譽教授。臺灣大學地質學研究所博士，美國華盛頓大學、南美以美大學、亞歷桑那大學及加拿大訪問研究。研究領域包括：地下水水文：碳十四與氚定年／示蹤；地下水環境地球化學；新構造運動：核飛跡定年；碳十四定年。

地下水與水文地質是劉教授最重要的研究之一。他重視「土地與水」的互動關係，從含水層構造、地下水補注到地層穩定等議題，都以務實與縝密的方法進行研究。他更將地下水知識推廣至科技防災，強調地層下陷、乾旱、水資源管理與災害風險評估皆須建立在正確地質調查的基礎上。

在擔任臺大地質系系主任期間，設立地質標本館及地質公園，用於教學、推廣與展示。在等身的研究報告之外，編著有《普通地質學》、《變臉的大地：921 集集大地震》和《岩石步道導覽》等書。