

近岸海底地下水滲流研究：天然放射性核種—氡氣及鐳同位素 之環境科學應用

許鳳心 國立臺灣大學海洋研究所博士

蘇志杰 國立臺灣大學海洋研究所副教授

1. 前言

地球總水量約為 13.9 億立方公里，其中 97.5 % 為鹹水，淡水僅占 2.5 %。淡水資源中約 68.9 % 分布於極地的冰帽及長年凍土、高山的永久積雪及冰川，無法被利用；30.8 % 為地下水體，但大部份處於地表 800 公尺以下，難以取得；僅 0.3 % 為表面逕流、湖泊系統。換言之，可供給人類利用的淡水資源其實並非充裕的。

臺灣本島總面積約 3.6 萬平方公里，海拔 1000 公尺以上的山區面積占全島 32%，山高坡陡，河道大都呈現源短流急，屬於島嶼型河川。降雨量雖然豐沛，年平均降雨量高達 2500 毫米以上，是全球平均值的 2.6 倍；卻不易涵養地表水及地下水，加上地狹人稠，水資源問題日益嚴重。臺灣於 1950 年代開始大量取用地下水，直到 1990 年代地下水使用量已占總用水量的 40%。目前雖已實施地下水抽取管理及管制，每年抽取量仍超過天然補注量；尤其是西部濱海地區，地下水嚴重超抽已造成地層下陷問題。同時，沿岸未封閉地下含水層與海域的相互連通，不僅可使海水入侵，導致地下水鹽化，亦可能使地下水連同汙染物輸入海域；此現象即為海底地下水滲流。

2. 海底地下水滲流及環境意義

受到陸域水頭壓力差異、潮汐往復運動或其他動力的驅動，沿岸未封閉地下含水層中地下水及海域沉積物中孔隙水會穿過海床進出海域水體，此過程稱為海底地下水滲流(Submarine Groundwater Discharge, SGD; 圖 1; Burnett et al., 2003)。

海底地下水滲流包含兩部分(Taniguchi et al., 2002)：鹽度接近零的陸域地下水輸出(Submarine Fresh Groundwater Discharge, SFGD)，以及再循環而流出地層的海水(Recirculated Saline Groundwater Discharge, RSGD)。前者驅動力主要為陸域水頭壓力差；後者則為潮汐、波浪、密度差…等。例如：漲潮時，海水會因壓力差進入海底沉積物或近岸含水層中，並與地下水混合；退潮時，經混合後的再循環海水又通過海床進入離岸水體。

由於海底地下水滲流不似表面徑流易於觀察，加上時空分布不均而難以測量，過去考慮水文收支平衡時往往被忽略。根據聯合國教科文組織(UNESCO)的 2004 年報告書，全球每年約有 2,400 立方公里的淡水以海底地下水滲流形式注入海洋，是全球河川入海通量的 6~10%，其中約 1,500 立方公里來自陸地，約 900 立方公里來自島嶼。現今，海底地下水滲流被視為水循環中不可忽視的一個環節，亦為海陸物質交換不可忽視的一環。地下水流動於地下含水層，與含水層介質發生水-岩溶解反應，釋出許多溶解性物質，且人類活動產生的污染物亦會滲入地下水層。在地下水入海的同時，挾帶這些物質進入近岸海域，極可能改變沿岸水體的化學組成。例如：地下水所含營養鹽通常遠高於地表逕流所含之濃度，具有海底

地下水滲流現象的近岸海域會因高營養鹽輸入，造成水體優養化，甚至爆發赤潮，破壞該區域的生態系統。這是顛覆一般傳統認為由表面逕流供給營養鹽令藻類叢生的觀念；由此可見海底地下水滲流研究的重要性。

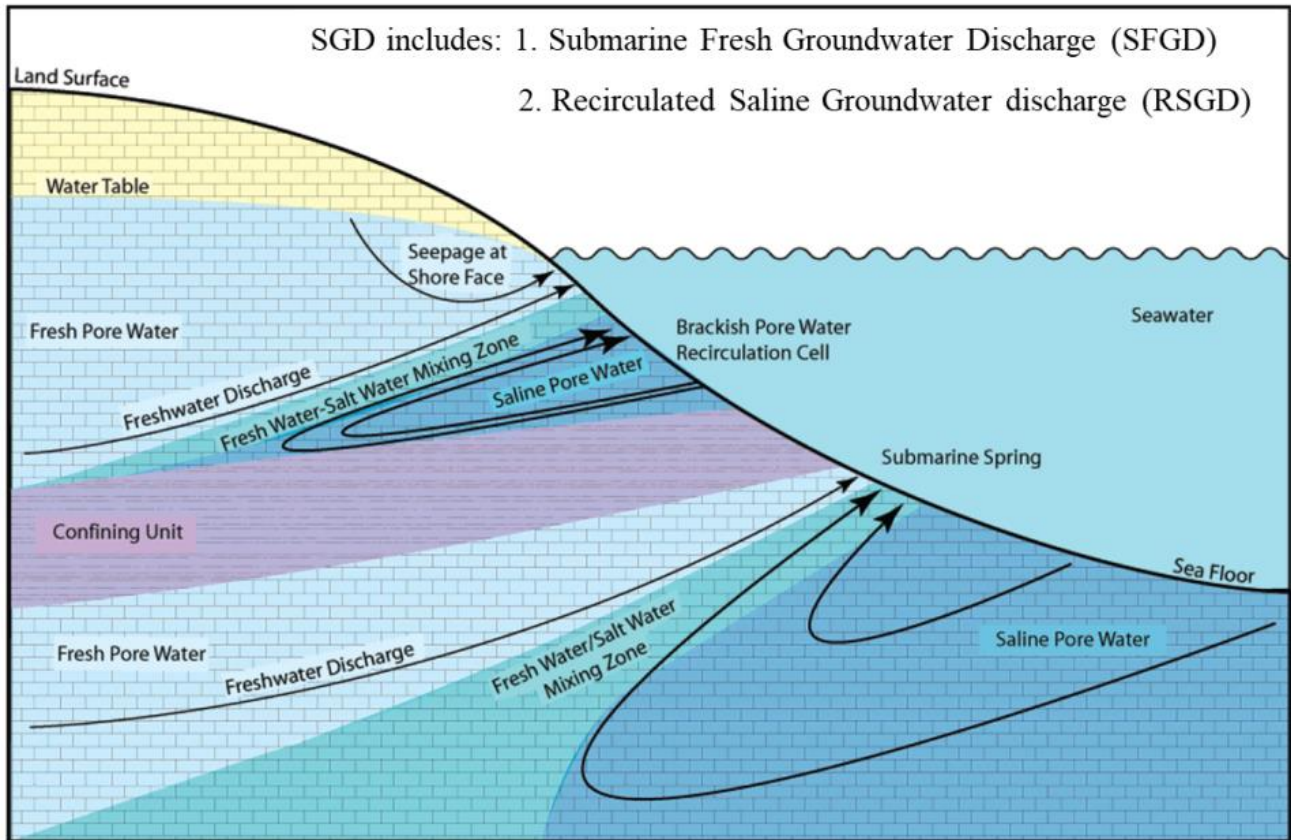


圖 1：海底地下水滲流示意圖(Swarzenski et al., 2007)。

3. 天然放射性核種：氡氣(Radon)、鐳同位素(Radium Isotopes)

國際原子能機構(IAEA)和聯合國教科文組織(UNESCO)於 2007 年共同發表在不同水文地質特徵的海岸區域進行海底地下水滲流研究的結果，指出海底地下水滲流在海岸區域雖是無所不在，但卻具有明顯的時間及空間變化。例如：海底

地下水滲流通量不僅隨著高低潮位變化，更受到大小潮的影響；通常在大潮低潮位時最高。此多變的物理特性提高全面性追蹤海底地下水滲流及估算通量的困難度；然而，天然放射性核種—氡氣及鐳同位素被視為目前最佳的示蹤劑。氡氣及鐳同位素與具有兩個重要地球化學特徵：第一、與海水及地表逕水體相比，氡氣及鐳同位素於地下水中富集程度相對較高。第二、化學性質保守，鐳同位素及氡氣於水中的活度僅受控於生產率、衰變率、及與不同水體之間的混合比例而改變。再者，與過往相比，現今水體中氡氣及鐳同位素的測量技術較為簡易且快速。

氡氣(^{222}Rn)是一種具有放射性的惰性氣體，屬於鈾-238 衰變序列中的一個核種(圖 2)。由於地層中各種含鈾礦物不斷衰變產生氡氣，使氡氣富集於地下水體中。封閉性良好的含水層，氡氣不易逸散，易於累積氡氣；反之，於地表水體，氡氣容易逸散至空氣，含量相對較低。再者，氡氣的半衰期僅 3.82 天，這時間尺度相當於沿岸地區水體的滯留時間($10^0\sim10^1$ 天)，故非常適合作為沿岸地下水滲流的示蹤劑。

自然界中存在四種鐳同位素： ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{224}Ra 和 ^{223}Ra ，半衰期分別為 1,602 年、5.75 年、3.64 天和 11.3 天。鐳同位素的來源為地層中鈾核種衰變產生(圖 2)，經由溶解、脫吸附的途徑進入地下水。在淡水環境，鐳同位素慣於附著於懸浮顆粒表面；進入淡水—海水混合環境，因為離子強度增加，鐳同位素則從懸浮顆粒表面脫附而進入水體，產生明顯的濃度梯度。此地球化學特性及廣泛的半衰期，使鐳同位素可運用在不同時間尺度及不同水團的混合與傳輸途徑之研究； ^{224}Ra

和 ^{223}Ra 因半衰甚短，適合用於水體滯留時間 $10^0 \sim 10^1$ 天的近岸海域； ^{228}Ra 是 1~30 年時間尺度的水平或垂直水體運動的最佳示蹤劑，特別是在陸棚、陸坡區域；而 ^{226}Ra 則適合用於長時間尺度之大洋水體運動過程研究。

透過質量守恒模式(Mass Balance Model)即可估算海底地下水滲流通量；此模式須先建立起研究區域水體中氡氣及鐳同位素儲量(inventory；圖 3)，再摒除非海底地下水滲流所帶來的儲存量，進而反推海底地下水滲流通量。然而，邊界條件(Boundary condition)的設定、水體於研究區域的滯留時間(residence time)，以及地下水端元值(end-member)的選擇皆是此方法的必要項目，亦皆會影響估算結果。目前為止，國際間已發表許多以氡氣及鐳同位素作為示蹤劑進行海底地下水滲流調查之研究報告，成果相當豐碩。例如：Moore(2007)在美國南大西洋海灣(South Atlantic Bight)沿岸所進行的海底地下水滲流調查研究，發現不僅其通量為周邊河川流量的 40%，更具季節性變化，冬季、春季較低，夏季較高。Burnett & Dulaiova(2003)利用 RAD7(Durridge Company, Inc.)搭配氣—水分離裝置，於美國墨西哥灣(Gulf of Mexico)沿岸監測水體中氡氣的長期連續變化，發現水氡活度不僅隨著高低潮位變化，亦受到大小潮的影響，呈現於大潮低潮位時最高，小潮高潮位時最低。後續以質量守恒模式估算海底地下水滲流通量，亦呈現相同趨勢；此現象證實該沿岸區域海底地下水滲流主要驅動力為潮汐運動。

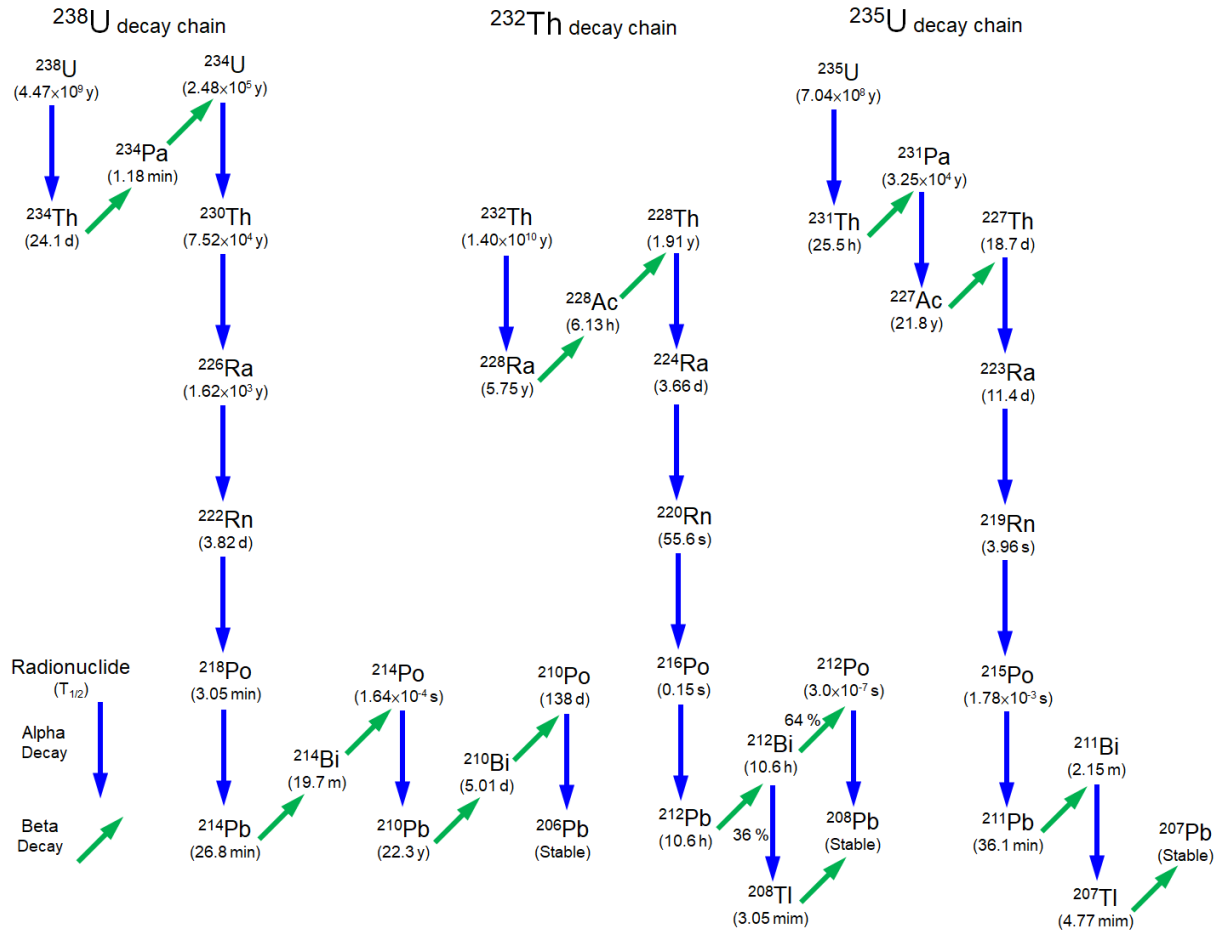


圖 2：鈾-238(^{238}U)、釷-232(^{232}Th)、鈾-235(^{235}U)衰變序列。

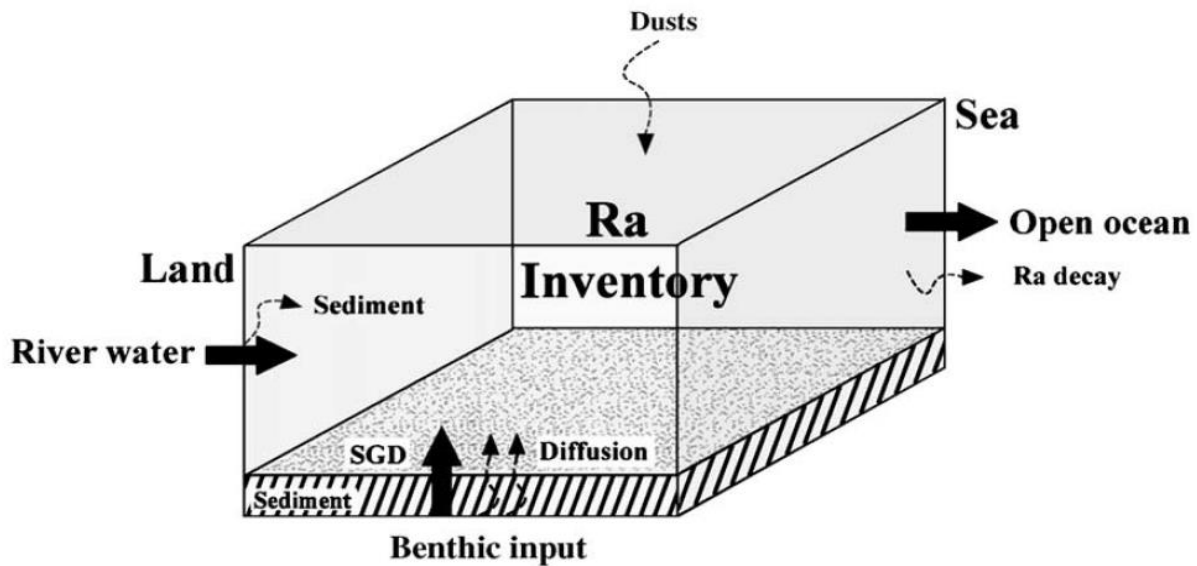


圖 3：以鐳同位素為例，建立質量守恆模式(Mass Balance Model)之概要圖。待研究水體中，鐳同位來源過程包括：A. 河水輸入。B. 脫附自河水挾帶的懸浮顆粒表面及大氣落塵而進入水體。C. 海底底床輸入，包括於沉積物中生成經由海床從間隙水擴散至水體以及脫附自再懸浮顆粒表面。D. 海底地下水滲流輸入。相反的，鐳同位素損失過程包括：E. 與外洋低含量的水體混合。F. 本身衰變。(Kim et al., 2005)

4. 臺灣海底地下水滲流研究

在臺灣，雖然嚴重超抽地下水導致地層下陷及地下水鹽化，水文數值模式推估結果仍顯示，在水頭壓力差的驅使之下，陸域地層中水體會往下游移動，注入沿岸海域(Peng et al., 2008)。臺灣最早的海底地下水滲流研究始於蘭嶼附近海域的長期水文化學觀測(陳鎮東等，2007)，當時常觀察到鹽度低值，且同時營養鹽

濃度較周圍海水高，顯示可能受到陸域水源輸入的影響，但附近並無河水輸入，因此合理推測是受到海底地下水滲流輸入影響。過去 15 年，國內陸續多篇關於海底地下水滲流的研究被報導(圖 4、表 1)，多數地點集中於西半部，特別是屏東平原；甚至發現有深層地下含水層中水體混合再循環海水之水體進入高屏海底峽谷區域(Lin et al., 2010, 2011)。臺灣環島海底地下水滲流每年總輸量估計有 10.7 億噸，相當於 14 %的全島河川輸出總量。

目前為止，臺灣的海底地下水滲流研究多著重於現象驗證與輸量估算，鮮少聚焦於時序性變化與驅動力。Hsu et al.(2020)應用天然放射性核種—氡(^{222}Rn)、鐳同位素(^{224}Ra 、 ^{228}Ra)作為示蹤劑，探究臺中地區高美濕地海底地下水滲流，同時藉由乾、濕季時序調查來瞭解海底地下水滲流的季節性變化與驅動力。近岸水體中氡氣活度隨著潮位變化，當潮位高時，活度則低；當潮位低時，活度則高。乾、濕季近岸水體中超量 ^{224}Ra 及 ^{228}Ra 活度的時序變化則呈現相反趨勢，顯示高超量 ^{224}Ra 活度可能為海底地下水滲流匯入所導致的結果。通過近岸水體中氡氣質量守恒模式(mass balance model)，推估濕季及乾季海底地下水滲流通量分別為 $0.1\sim 47$ 與 $0.2\sim 25\text{ cm d}^{-1}$ ，濕季通量略高，並隨著潮位變化(圖 5)。當高潮位時，海底地下水滲流通量較低；當低潮位時，海底地下水滲流通量較高，指示潮汐作用(tidal pumping)為高美濕地海底地下水滲流的主要驅動力。

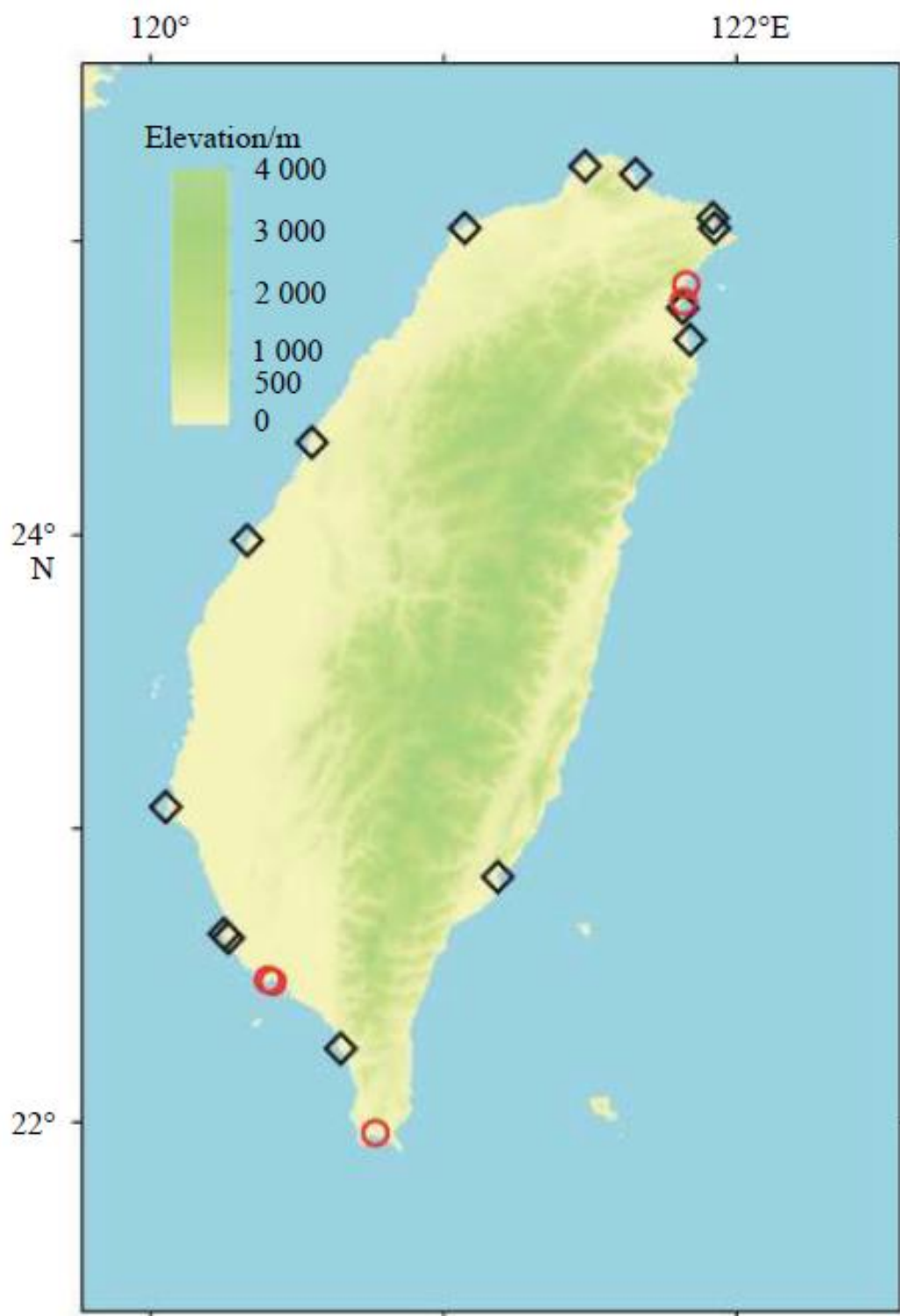


圖 4：臺灣具有海底地下水滲流現象之地點(Chen et al., 2018)。紅色圓圈所標地點僅發現帶有鹽份的海底地下水滲流。

表 1：臺灣海底地下水滲流輸出地點彙整。

地點	海底地下水滲流輸出量(cm d^{-1})	量測／估算方法
臺灣西部沿岸：		
桃園 觀音 ^[1]	1.05	滲流儀
臺中 高美濕地 ^[1, 2]	1.67	滲流儀
	0.1~47	質量守恒模式(^{222}Rn)
	1.20~86.4	達西定律
苗栗 芳苑 ^[1]	0.52	滲流儀
台南 七股 ^[1]	3.54	滲流儀
高雄 柴山 ^[1]	0.51~13.6	滲流儀
高雄 西子灣 ^[1]	0.30~14.0	滲流儀
屏東 大鵬灣 ^[3]	2.06~20.6	質量守恒模式(^{224}Ra 及 ^{228}Ra)
屏東 枋山 ^[1,4]	9.31~11.5	水文收支平衡模式
	0.86~12.5	滲流儀
臺灣西南海域：		
屏東平原外海 ^[5]	0.01~0.37	質量守恒模式(^{224}Ra 及 ^{228}Ra)
高屏海底峽谷 ^[6]	12.3	端源混合模式(δD 及 $\delta^{18}\text{O}$)

[1]林毅杰，2007；[2] Hsu et al., 2020；[3]黃浚宸，2018；[4] Peng et al., 2008(僅為陸域地下淡水輸出)；[5]張堯禮，2015；[6]Lin et al., 2011(僅為陸域地下淡水輸出)。本表摘錄並改編自許鳳心(2018)。

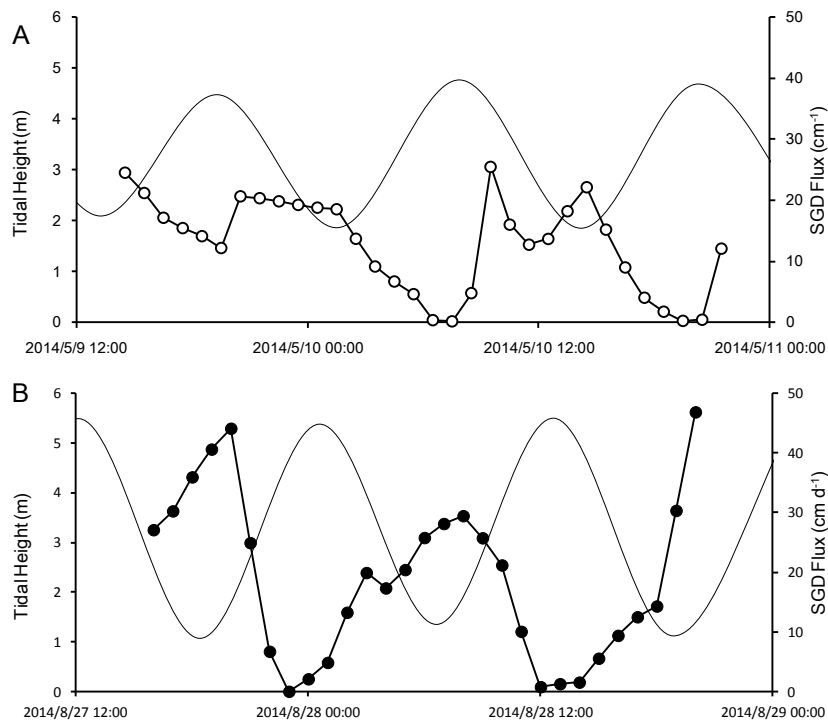


圖 5：臺中地區高美濕地乾季(A)濕季(B)的海底地下水滲流通量隨時間變化。

(Hsu et al., 2020)

5. 結語

由於天然放射性核種—氡氣及鐳同位素的量測技術簡易，以及地化示蹤劑模式發展的日新月異，國際間對於海底地下水滲流的研究早已伸入探討其環境意義，包括：釐清地層中地下淡水體與海水混合帶(即是所謂的地下河口)的生物地球化學反應過程，以及預測所挾帶的化學物質輸入沿岸海域後對生態環境影響。然而，國內對於海底地下水滲流研究的起步相對較晚，目前仍處於現象驗證及估算通量之階段。有鑑於我國對於地下水資源的仰賴，應鼓勵、推動國內海底地下水滲流調查研究，以補齊水循環的重要環節，並確實掌握地下水資源動向。

參考文獻

- 林毅杰，2007。臺灣地區地下水入海之化學性質初探。國立中山大學海洋地質及化學研究所，碩士論文，139 頁。
- 張堯禮，2015。利用水氡及鐳同位素建立高屏沿岸海底湧泉輸出及通量。國立臺灣大學海洋研究所，碩士論文，68 頁。
- 黃浚宸，2018。利用鐳同位素探討大鵬灣地區海底地下水滲流輸出。國立臺灣大學海洋研究所，碩士論文，62 頁。
- 許鳳心，2018。以水中鐳同位素之源匯傳輸探討臺灣海峽沿岸海底地下水滲流之現象。國立臺灣大學海洋研究所，博士論文，119 頁。
- 陳鎮東、林毅杰、王冰潔、鍾玉嘉、杜悅元及葉顯修，2007。蘭嶼地下水入海之初探。台電工程月刊，頁 85-91。
- Chen, C.-T.A., Zhang, J., Peng, T.R., Kandasamy, S., Wang, D., & Lin, Y.-J., 2018. Submarine groundwater discharge around Taiwan. *Acta Oceanologica Sinica* 37, 18-22.
- Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S., & Taniguchi, M., 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biochemistry* 66, 3-33.

- Burnett, W. C. & Dulaiova, H., 2003. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* 69, 21-35.
- Hsu, F.-H., Su, C.-C., Wang, P.-L., & Lin, I.-T., 2020. Temporal variations of submarine groundwater discharge into a tide-dominated coastal wetland (Gaomei Wetland, western Taiwan) indicated by radon and radium isotopes. *Water: Hydrology* 12, doi:10.3390/w12061806.
- IAEA & UNESCO, 2007. Nuclear and Isotopic Techniques for the Characterization of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Zones: Results of a Coordinated Research Project 2001–2006. IAEA-TECDOC-CD-1595. IAEA and UNESCO, Vienna, Austria.
- Kim, G., Ryu, J.W., Yang, H.S., & Yun, S.T., 2005. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by Ra-228 and Ra-226 isotopes: implications for global silicate fluxes. *Earth and Planetary Science Letters* 237, 156-166.
- Lin, I.-T., Wang, C.-H., You, C.-F., Lin, S., Huang, K.-F., & Chen, Y.-G., 2010. Deep submarine groundwater discharge indicated by tracers of oxygen, strontium isotopes and barium content in the Pingtung coastal zone, southern Taiwan. *Marine Chemistry* 122, 51-58.
- Lin, I.-T., Wang, C.-H., Lin, S., & Chen, Y.-G., 2011. Groundwater -seawater interactions off the coast of southern Taiwan: evidence from environmental isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences* 41, 250-262.
- Peng, T.-R., Chen, C.-T.A., Wang, C.-H., Zhang, J., & Lin, Y.-J. Assessment of terrestrial factors controlling the submarine groundwater discharge in water shortage and highly deformed Island of Taiwan, Western Pacific Ocean. *Journal of Oceanography* 64, 323-337.
- Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E., & Turner, J. V., 2002. Investigations of submarine groundwater discharge. *Hydrology process* 16, 2115-2129.
- UNESCO, 2004. Submarine groundwater discharge: management implications, measurements and effects. IHP-VI series on groundwater No. 5, IOC manuals and guides No. 44. UNESCO, Paris, France.