



海水入侵 回顧與調查分析

羅偉誠／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

李哲瑋／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士後研究

海水入侵是一個常見的水文及地質災害，因造成了沿海地區的土地鹽化，所以對國土的永續發展與水資源的利用規劃產生相當的影響。海水入侵常常也伴隨著地層下陷及沿海低地洪氾等災害而複合存在。本文簡介了有關影響海水入侵的可能因素及目前常應用來檢測海水入侵測的量測方法。我們也說明海水入侵在理論與數值預測的學理依據和待突破的地方。在文中我們也整理了目前最常被使用來模擬相關海水入侵的鹽分及水位時空分佈的數值軟體，簡述了這些軟體種類的背景、適用維度及演算法。最後以本島（濁水溪平原）及離島（澎湖群島）目前海水鹽化的現地調查及檢測結果，說明目前國內可能的海水鹽化分佈狀況。面對未來極端氣候的影響，將引起海平面的可能上升，更會加劇海水入侵對我們在經濟與社會發展上的威脅。因此有效的落實沿海地下水資源的管理及平衡土地開發的策略，將是我們重要國土永續經營的議題。

前言

海水入侵（seawater intrusion）是海水向陸地遷移流入海岸區域地下淡水含水層的現象，最常見引起的原因是由於從含水層系統中抽取了過多的淡水的地下水。由於海水俱有高濃度的總溶解固體和某些無機成分，因此會造成地下水鹽化，減少淡水的地下水儲存量，進而影響區域水資源的穩定供給。近世紀因為人為的過度開發，海水入侵已經成為一個常見的災害，對國土環境產生一定程度的影響。受到海平面上升、極端天氣事件、海岸侵蝕、降水模式改變以及淡水資源需求的增加都可能增加海水入侵的災害風險^[1]。

影響海水入侵的因素

影響海水入侵過程的變化主要決定在沿海含水層地質的封閉程度和含水層的水文（hydraulic）參數和動力（dynamic）特性，包括潮汐效應（tidal effect）、分散混合（dispersive mixing）、不穩定對流造成之密度效應（density effect due to unstable convection）、古水文地質條件（paleo-hydrogeological condition）、人為影響

（anthropogenic impact, e.g., groundwater pumping）和地質特徵（geological attributes）等^[2]。

海水入侵測的量測

海水入侵的測量，通常需要一定時間的觀察淡海水間移動介面間的鹽度變化。其他海水入侵的指標包括水力水頭趨勢和推斷歷史鹽分傳輸的相關水化學特徵。準確劃定地下水鹽化範圍在沿海含水層是非常不容易的工作，主要是由於缺乏在須要及特定尺度的鹽度測量。暫態海水入侵的測量更是困難，因為其過程在速度上通常非常緩慢，而且歷史測量數據很少甚至並不存在。目前主要以（1）地球物理方法（2）環境示踪劑，兩種方法的應用作為沿海含水層海水入侵測量的基礎。

地球物理方法（geophysical method）主要利用海水電阻率（ $0.2Xm$ ）和淡水電阻率（ $> 5Xm$ ）之間的反差，可以繪製出地下水鹽度分佈。其中直流（DC）－電阻率（direct current resistivity）和電磁（EM）（electromagnetics）方法已廣泛應用於沿海地區的海

水入侵測量。電阻率方法應用於沿海含水層海水入侵的量測已有八十多年的歷史，Swartz [3] 是第一位最早使用該方法的人之一來檢測海水入侵的界面深度。電阻率斷層掃描 (ERT) (electrical resistivity tomography) 可提供可視化的二維或三維中的地下電阻率分佈。電磁法已經用於繪製地下水鹽度圖並能成功地描述出沿海地區鹽份的變化。頻率域 (frequency domain) 的方法使用了幾十年 [4]，而最近的時間域 (time domain) 的方法變得更受學界及工程上的廣泛使用 [5]。

環境示踪劑 (environmental tracer) 的應用是透過量測沿海地下水的組成作為一種探測溶解鹽起源的方法。包括 Br/Cl 比率、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 ^3H 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率， $\delta^{11}\text{B}$ 和 ^{14}C 已經被利用來區分沿海含水層不同鹽度的來源 [6]。另外，量測氯化物與電導率的關係圖可以顯示正常地下水、鹽水入侵和介於兩者之間的混合的情況。利用派博水質 (piper) 菱形圖包含 (1) $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ，(2) Ca-Cl ，(3) mixed $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}$ ，(4) mixed $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ，(5) $\text{Na}^+\text{-Cl-SO}_4^{2-}$ ，(6) $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 形態，可以比對地下水水質分類來探討地下水鹽化之成因。

海水入侵測的理論預測

由於鹽度的變化造成海水的密度變化，雖然海水密度 (~ 1,020 to 1,029 kg/m^3) 大約只比淡水 (~ 1,000 kg/m^3) 高大約 2.5%，但是這個密度差異卻增加了海水入侵理論模擬與預測的複雜性。在研究海水入侵的解析方法，基本上假設淡水和鹽水為兩種不可混合 (immiscible) 的流體，其間存在一個界面，而這兩個流體間沿著這個界面上須要滿足壓力連續性。因此在數學學理上，這個物理條件暗示在淡水區流動和在鹽水中流動的區域，需要同時耦合 (coupled) 求解，使得壓力和法向流量在界面上是連續的。為了獲得解析解，常常會做簡化的假設，假設水流的流動僅存在淡水區，水流在鹽水區處於靜止狀態。而另一個常引用的假設是杜普特近似 (Dupuit approximation) 成立，也就是在垂直方向上的流動阻力可以忽略，使得壓力垂直分佈可視為靜水壓 [7,8]。不少學者根據以上之假設推求出不同邊條件下的解析解 [9]，例如 Bakker [10] 考慮了允許水流在淡水區和鹽水區同時流動的情況，推求出解析解描述該問題的流場。

海水入侵測的數值預測

然而因為解析解並無法正確描述出在淡水和鹽水之間俱有有限厚度及密度和水量不斷變化之過渡區實際的流場和壓水分佈。因此數值模式變成相當重要的工具。表 1 列出目前常被使用在海水入侵測的數值模式，其中有政府或商業發展的模式。表 1 說明各模式可以適用的流況 (飽和流或非飽和流)，其使用的數值演算法 (有限元素或有限差分)，及是否有圖形用戶界面。這十種目前已發展之海水入侵測的數值模式，以 SEAWAT 和 SUTRA 最被廣泛使用。

表 1 目前已發展海水入侵測的數值模式 [11]

軟體名稱	流況	數值演算法	圖形用戶界面
3DFEMFAT	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
FEFLOW	飽和流 / 非飽和流	有限元素	有
FEMWATER	飽和流 / 非飽和流	有限元素	有
HYDROGEOSPHERE	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
MARUN	飽和流 / 非飽和流	有限元素	
MOCSENS3D	飽和流	有限差分	有
MODHMS	飽和流 / 非飽和流	有限差分	有
SEAWAT	飽和流	有限差分	有
SUTRA	飽和流 / 非飽和流	有限元素 / 有限差分	有
SWI2	飽和流	有限差分	

台灣海水入侵案例的介紹

濁水溪平原 (本島)

根據經濟部水利署「109 年度地下水水質檢測分析與評估」報告指出，濁水溪沖積扇西南側過去即為地下水鹽化相對較顯著區域，過去水質資料顯示海園區域具顯著之鹽化狀況，然而本區同時也為深濃度較高區域，Liu *et al.* [12] 研究指出濁水溪沖積扇高砷含量之淺層地下水井，經由海相化石研究發現各井位 (箔子、金湖、瓊埔等) 之海相微體化石含量很高，即代表其海水入侵程度大，由於第四紀末期以來全球氣候變化及海水水準面變化，海岸地區會有明顯的區域性海侵和海退現象所造成，而本區之沈積物主要為晚更新世以來所堆積而成，且由海相沈積向上轉變為陸相沈積。濱岸至淺海環境沈積物，則分布於較靠海側之

監測井，直接覆蓋於沿岸沼澤環境沈積物之上，厚度以最靠海側之箔子監測井最厚達 60 公尺。其中於箔子、飛沙、瓊埔及大溝之監測井沼澤環境沈積物可延伸至地表，原本應為潟湖環境，但頂部現已被人工填土所覆蓋多已闢為魚塢。對於上部海相層之沿岸沼澤沈積物，經定年結果約在 8,500 ~ 9,500 年之間，推測其沈積年代為海水面快速上升時期。

根據貝殼碎片定年資料顯示，濁水河流域鑽井岩心之上部海相層約位於井下 10 ~ 50 公尺左右，沈積時間約在 3,000 ~ 9,000 年前^[13]。扇尾泥砂層漸厚，含水層分層明顯，細顆粒之泥沙沉積物中鐵與錳氧化物含量高，且沉積環境受最近一次冰河時期（約一萬年前）以來之海進海退作用較為明顯。上述文獻皆指出濁水溪沖積扇地下水之鹽化恐與地層沉積時期古海水有關。

地下水鹽化成因甚多，另外若鹽化成因為海水入侵，則可能與當地用水和地下水位變動有關。水質報告除了以水質資料分析鹽化區域外，並針對地下水鹽化變動趨勢加以分析。參考 Kelly^[14] 分析方法，利用派博 (Piper) 水質菱形圖繪製地下水鹽化的變化趨勢如圖 1 所示，一般新鮮的地下水樣本點繪之位置會落在菱形圖左方標記為「Fresh (淡水)」的區域附近，即派博菱形圖第 I 區；而純海水將積聚在「Sea (海水)」標記附近，即派博菱形圖第 IV 區；若淡水和海水之間發生保守混合（沒有離子交換反應的混合），所點繪出之位置將沿著標有「Mixing (混合)」的虛線積聚。當在含水層組成分子中存在發生混合時，離子交換反應經常在地下水和含水層組成分子之間發生，從而改變水的化學組成。這種化學成分的變化會導致派博水質菱形圖中保守的混合線偏離，偏離有兩種情況：(1) 在入侵 (Intrusion) 過程，觀測點向上移動到菱形圖形的頂部、(2) 在淡化 (Freshening) 過程，觀測點向下移動到菱形圖形的底部。

此種方法不僅可以推斷出地下水樣本是否受到海水入侵的影響，而且還可以推斷出隨著不同時間取樣時，海水入侵情況程度是否變得越來越高（入侵交換，Intrusion exchange），或更好（淡化交換，Freshening exchange）。

Kelly^[14] 亦依地下水鹽化的過程，可以藉由淡水到保守混合水的 7 種不同的分級標準來識別海水入侵之程度分別為：(1) 淡水 (Fresh)、(2) 微入侵 (slight

intrusion)、(3) 入侵 (intrusion)、(4) 微保守混合 (slight conservative mixing)、(5) 保守混合 (conservative mixing)、(6) 微淡化 (slight freshening) 與 (7) 淡化 (freshening)。成果顯示具有較明顯變化趨勢者僅有沿海地區 5 口站井，分別為沿海區域的觀測站包括：後安 (一)、海園 (二)、箔子 (二)、金湖 (二) 與宜梧 (三)，其中後安 (一) 與海園 (二) 之水質隨時間變化趨勢均為由淡化轉變為 (微) 保守混合，似有正在進行中的趨勢；而箔子 (二)、金湖 (二) 與宜梧 (三) 之地下水似乎曾受到少量海水之影響，但並未造成嚴重的入侵，如表 2 所示。

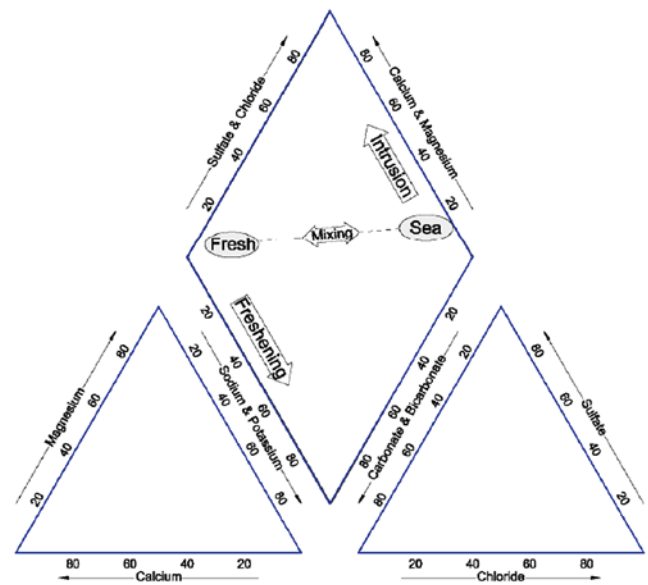


圖 1 派博圖 (Piper) 之特性分區說明

(資料來源：Kelly F.^[14])

表 2 既有鹽化地下水觀測井派博圖分析成果

站名	分層	資料期間	資料點數	水質圖變化趨勢
後安 (一)	1	96 ~ 108	3	淡化 → 微保守混合
海園 (二)	2	96 ~ 108	10	淡化 → 保守混合
箔子 (二)	2	96 ~ 108	9	微淡化 → 微保守混合 → 入侵 → 微淡化
金湖 (二)	3	96 ~ 108	7	淡水 → 微淡化 → 淡化
宜梧 (三)	3	96 ~ 108	10	淡化 → 保守混合 → 淡化

(資料來源：經濟部水利署^[15])

由於上述分析資料是以各年單點資料繪製，地下水為具周期性變化，正常而言豐枯水季地下水補注 - 流出特性有所差異，上表中測量時間不一，僅能表達長

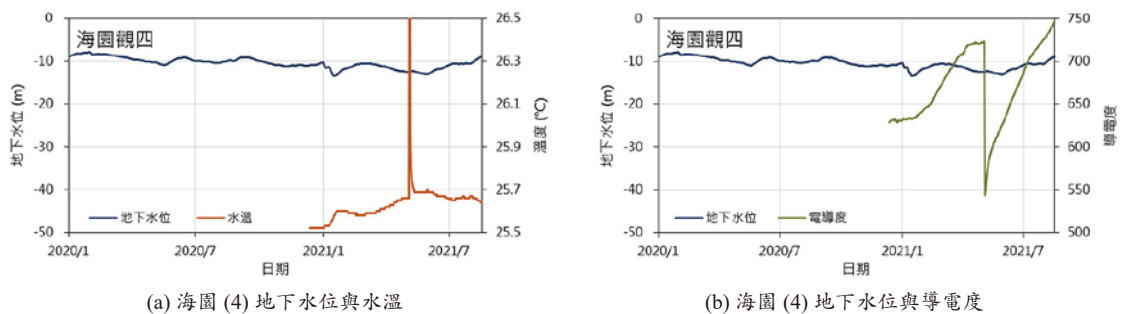
期可能趨勢，難以作為評估標準。故收集水利署即時地下水觀測網中地下水導電度即時觀測資料進行分析，將上述鹽化較嚴重之海園、宜梧、瓊埔三站地下水導電度與地下水位繪於圖 2 至圖 4 中。圖中可見海園站 EC 紀錄甚低，隨地下水位下降略有上升然仍處於合理地下水範圍中，而宜梧 (1) 觀測井 EC 紀錄高達 23,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，若單以此數據推測本處應為海水入侵最可能發生區域，而宜梧 (2) EC 較於上層相對甚低；瓊埔 (1) 與瓊埔 (2) EC 紀錄相對於地下水較高，皆可達 5,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，瓊埔 (1) 於七月更曾高達 11,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以上，同樣可能具海水入侵風險。

上述紀錄為各站單點資料，為瞭解整體海岸區域之地下水位與導電度變化，若以 2021/1/1、2021/3/1 與 2021/05/1 期間導電度、地下水位變化進行比較，如圖 5 和圖 6 所示。圖中水位變化顯示由於時值枯水季，故地下

水呈現消退情況，濁水溪以南區域地下水位下降明顯，西南側瓊埔站下降最多，而宜梧、瓊埔二站地下水導電度相對甚高，為沖積扇中鹽化最明顯區域，二林站導電度雖上升明顯，然數值皆穩定於地下水水質範圍內且位於較內陸區域，海水入侵風險極低。

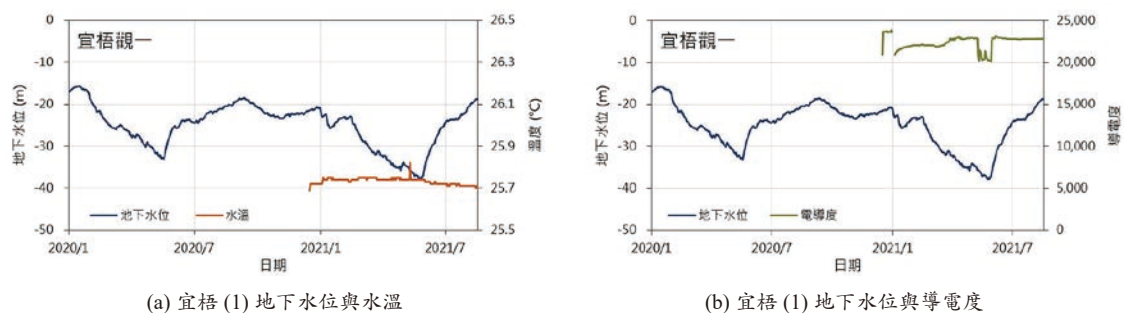
澎湖群島（離島）

由於澎湖地區年平均蒸發量大於年平均降雨量，可知其水文條件極不利地表水資源之利用。因此，地下水成為澎湖地區長期仰賴的水資源來源。然而地下水持續過度的開發，已造成澎湖地區海水入侵及地下水鹽化等問題。由以往相關研究成果顯示，澎湖本島海水入侵量約佔深層地下水儲存量之 2.8%，倘每一單位之入侵海水可鹽化 36 倍的地下水儲藏量，將嚴重影響澎湖地區水資源調配利用。

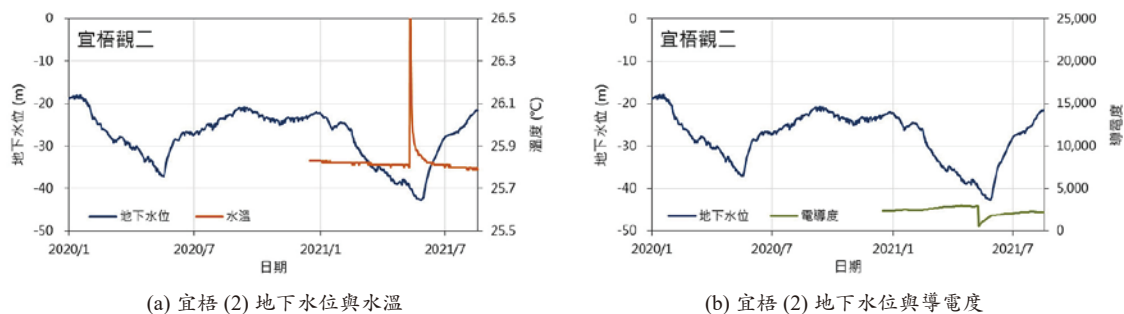


(a) 海園 (4) 地下水位與水溫 (b) 海園 (4) 地下水位與導電度

圖 2 海園 (4) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])



(a) 宜梧 (1) 地下水位與水溫 (b) 宜梧 (1) 地下水位與導電度



(a) 宜梧 (2) 地下水位與水溫 (b) 宜梧 (2) 地下水位與導電度

圖 3 宜梧 (1) 與宜梧 (2) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])

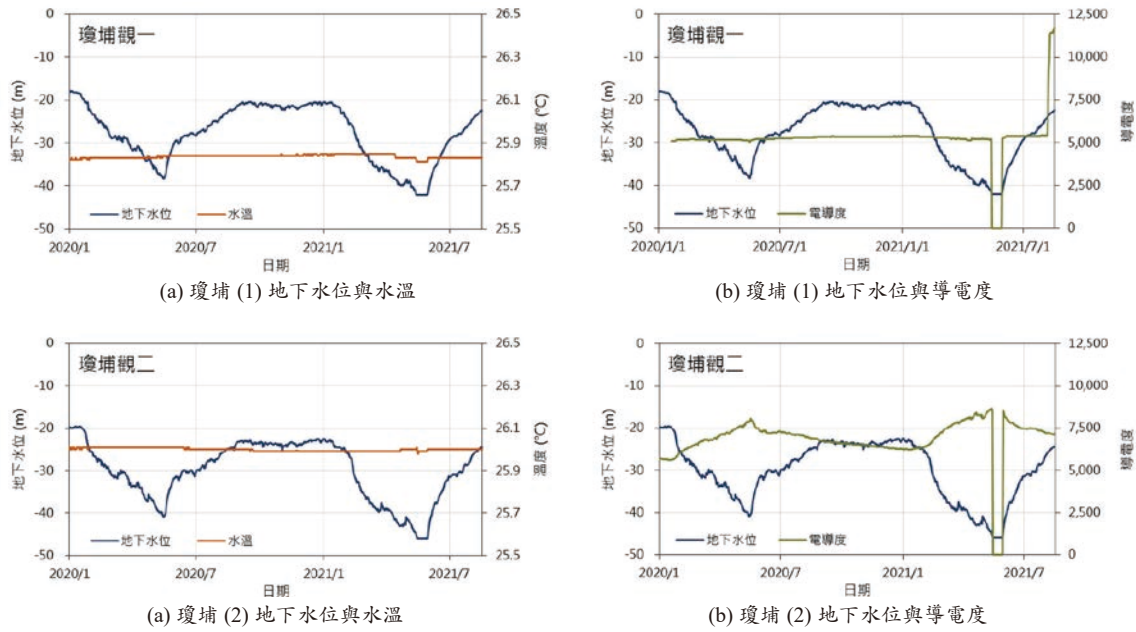


圖 4 瓊埔 (1) 與瓊埔 (2) 地下水觀測紀錄
(資料來源：水利署^[16])

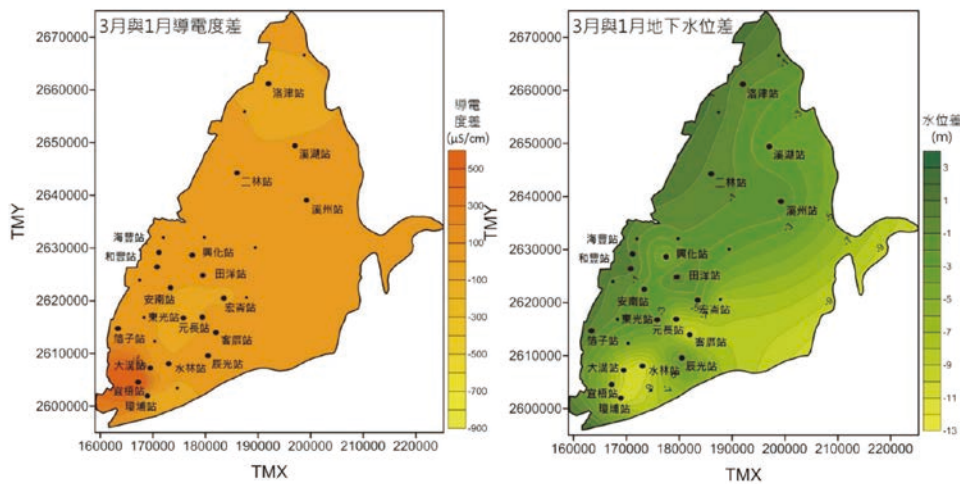


圖 5 2021/1/1~2021/3/1 導電度及地下水水位變化等值圖
(資料來源：水利署^[16])

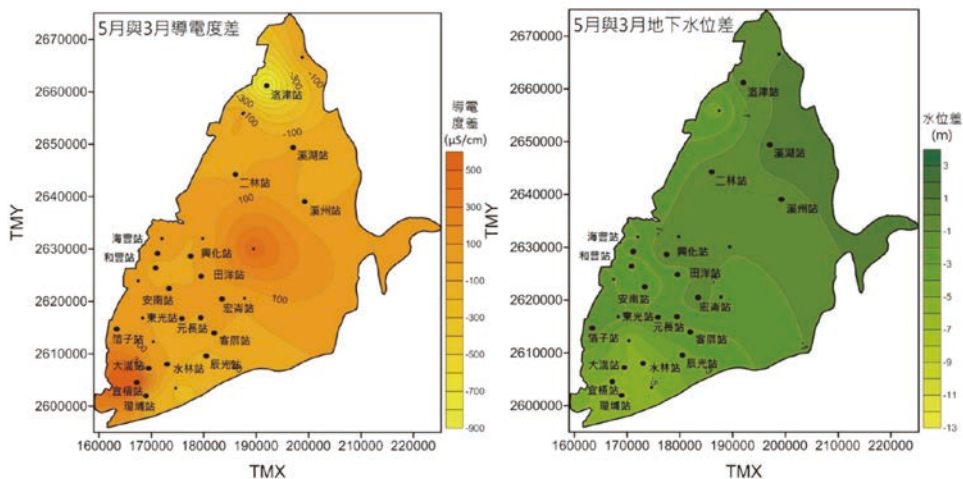


圖 6 2021/3/1~2021/5/1 導電度及地下水水位變化等值圖
(資料來源：水利署^[16])

澎湖地區深淺含水層地下水鹽化之原因與分佈情況不一，且深層含水層長期觀測資料較為缺乏，利用民國 95 年水井普查結果 [17]，將該年針對民井（1,784 口）、自來水公司取水井及公有井（95 口）之調查結果進行換算，分別將民井（淺層）所測得之鹽度轉換為氯鹽濃度；自來水公司及公井（深層）所測得之導電度透過導電度換算鹽度的轉換及鹽度換算氯鹽濃度，再透過空間內差的方法，即可得到澎湖地區淺層至深層的氯鹽濃度分布概況，詳圖 7 至圖 10。

圖 7 及圖 8 分別為淺層 (1) 及淺層 (2) 氯鹽濃度分布圖，深度分布由地表至地表下 8 公尺為淺層 (1)，地表下 8 公尺至地表下 75 公尺為淺層 (2)。可初步觀察淺層 (1) 由於馬公、湖西地區氯鹽濃度資料較充足，因此改區域氯鹽濃度內差的結果較為細緻。西嶼地區淺層 (1) 以赤馬濃度較高，淺層 (2) 內差的結果除了西嶼赤

馬的濃度較上層淡外，其餘濃度皆較淺層 (1) 高。圖 8 及圖 9 分別為深層 (1) 及深層 (2) 氯鹽濃度分布圖，深度分布由地表下 75 公尺至地表下 100 公尺為深層 (1)，地表下 100 公尺以下為深層 (2)，深層含水層以白沙地區濃度最高，其次為湖西及西嶼。

由過往水質分析結果，可知導電度、氯鹽及總溶解固體物三者間關係密切，因此先利用導電度、氯鹽及總溶解固體物作為地下水鹽化初步判定，再更進一步透過李梵藍氏圖及利用派博水質圖的落點逐一進行比對，歸納澎湖地區地下水鹽化原因與空間分布。最後透過鈉吸著率、殘餘碳酸鈉對澎湖地區地下水作為灌溉用水之可行性評估，並比對歷年水質檢驗結果判定地下水鹽化趨勢與範圍。

針對於澎湖地區水利署共 6 口地下水監測井進行採樣分析，編號依序分別為澎南、馬公 (1)、馬公 (2)、湖

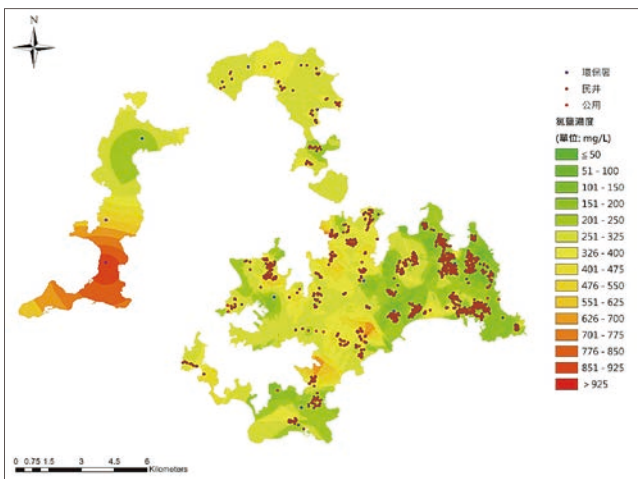


圖 7 澎湖地區淺層 (1) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

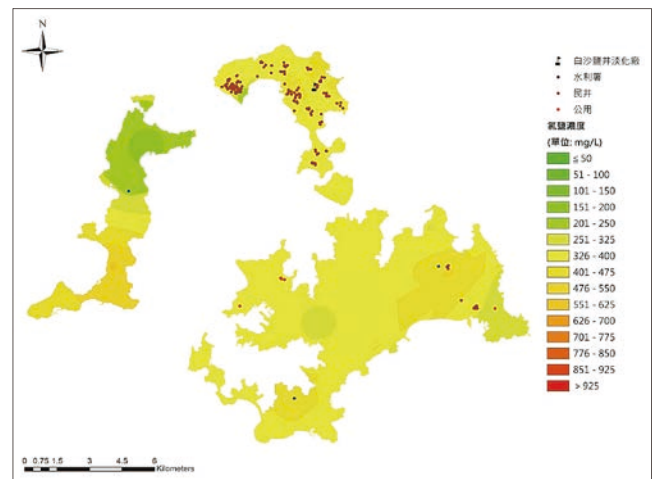


圖 8 澎湖地區淺層 (2) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

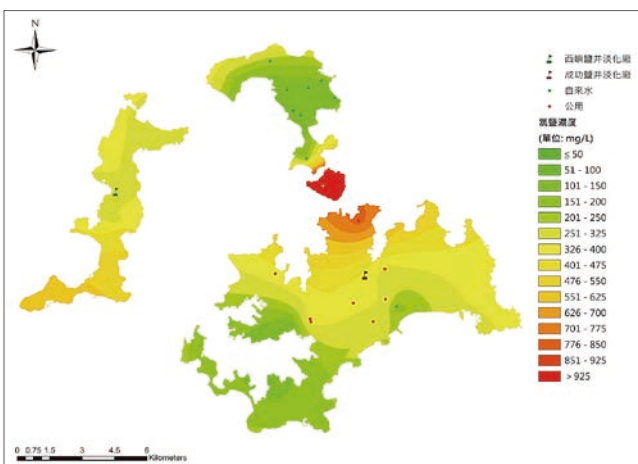


圖 9 澎湖地區深層 (1) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

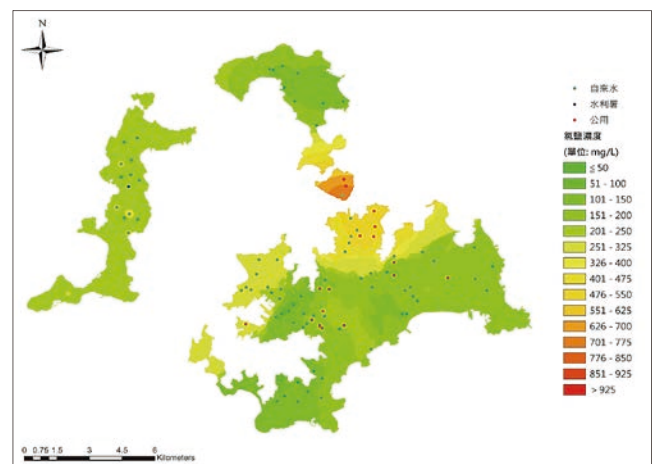


圖 10 澎湖地區深層 (2) 含水層氯鹽濃度空間分布圖
(資料來源：水利署 [18])

西、大池(1)、大池(2)。水利署所屬6口抽水井井深介於43 m~141 m間，馬公(2)與大池(2)屬於深井；澎南、馬公(1)、湖西及大池(1)則以淺層井進行評估(詳圖11所示)。

(1) 導電度、氯鹽、總溶解固體物

水利署地下水監測井 pH 介於 6.98 ~ 8.40，導電度介於 1,011 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ~ 1,808 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，總溶解固體物介於 509 ppm ~ 899 ppm，氯鹽介於 135 mg/L ~ 555 mg/L。水利署 6 口地下水監測井，總溶解固體物濃度皆超過飲用水水質標準 (500 mg/L)。水利署澎南地下水監測井氯鹽濃度超過飲用水水質標準 (250 mg/L)。

(2) 李梵藍氏圖

由圖 12 顯示，6 口水利署地下水監測井發現共有 2 口(馬公(1)及馬公(2))落在 A 區，屬於未受海水污染，有 3 口落在 B 區(湖西、大池(1)、大池(2))，屬於受輕度海水污染，有 1 口(澎南)落在 D 區屬於高度海水污染。

(3) 派博水質圖

由圖 13 顯示，6 口水利署地下水監測井共有 2 口(馬公(1)及馬公(2))落在派博水質圖第 II 區中，有 2 口(澎南及湖西)落在派博水質圖第 III 區中，有 2 口(大池(1)及大池(2))落在派博水質圖第 IV 區。在第 IV 區中為大池(1)與大池(2)屬於鈉與氯鹽污染形式，為海水導致鹽化情形。澎南站於派博水質圖陰離子落點屬於高氯鹽、低硫酸鹽，初步判定為受殘留於封閉地層之古海水鹽化的形式。湖西站地下水氯鹽濃度雖未超過可飲用水標準值，但其總溶解固體量卻稍微超標，且其由派博水質圖中可發現其地下水鈣、鎂含量偏高，因此，初步判定為受全新世現代堆積物影響，地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為。

(4) 鈉吸著率與殘餘碳酸鈉

由地下水鈉吸著率與殘餘碳酸鈉顯示，水利署 6 口地下水監測井中，共有 1 口(大池(2))鈉吸著率與殘餘碳酸鈉高於灌溉水水質標準。該口井不適合灌溉用水與可由派博水質圖中可知其鈉、鉀含量過高所導致。

同時針對於澎湖地區自來水公司共 9 口地下水抽水井進行採樣分析，編號依序分別為馬公 22、澎南 04、湖西 01、湖西 11、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 10、西嶼 13。自來水公司所屬 9 口地下水抽水井，井深介於 136 m ~ 150 m 間，皆屬於深井。

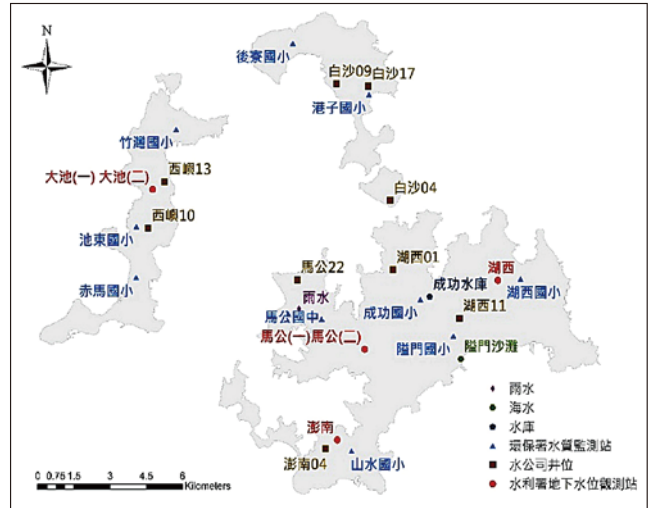


圖 11 地下水質補充調查點位分布圖

(資料來源：水利署 [18])

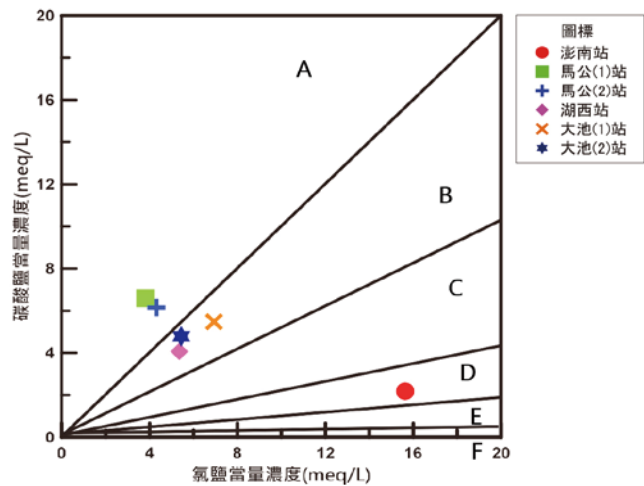


圖 12 水利署地下水監測井李梵藍氏圖

(資料來源：水利署 [18])

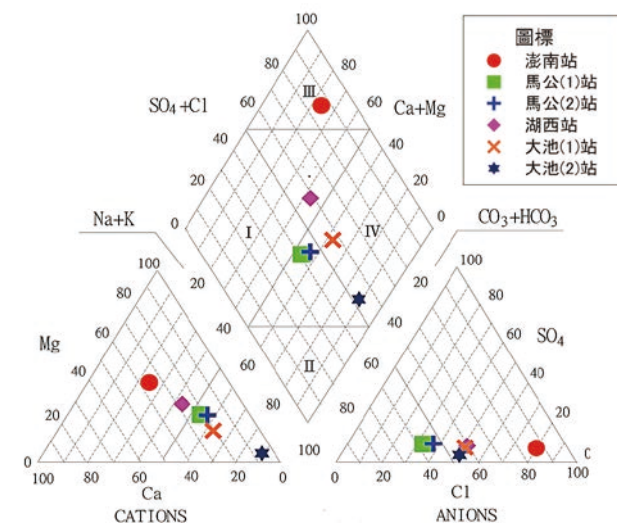


圖 13 水利署地下水監測井派博水質圖

(資料來源：水利署 [18])

(1) 導電度、氯鹽、總溶解固體物

自來水公司地下水抽水井中 pH 介於 7.53 ~ 8.65，導電度介於 498 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ~ 8,840 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，總溶解固體物介於 252 ppm ~ 8,810 ppm，其中白沙 04 總溶解固體物濃度超過手持儀器測定範圍，特地將水樣送實驗室檢測，氯鹽介於 76.7 mg/L ~ 3,320 mg/L。自來水公司 9 口地下水抽水井，共有 6 口總溶解固體物濃度超過飲用水水質標準 (500 mg/L)，分別為馬公 22、湖西 01、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 13。地下水抽水井中共有 4 口氯鹽濃度超過飲用水水質標準 (250 mg/L)，分別為馬公 22、湖西 01、白沙 04、西嶼 13。

(2) 李梵藍氏圖

由圖 14 顯示，9 口自來水公司抽水井有 3 口 (湖西 11、白沙 09 及白沙 17) 落在 A 區，有 2 口 (澎南 04 及西嶼 10) 落在 B 區，屬於輕度海水汙染，有 3 口 (馬公 22、湖西 01 及西嶼 13) 落在 C 區，屬於中度海水汙染，有 1 口 (白沙 04) 落於 F 區屬於海水汙染。

(3) 派博水質圖

圖 15 顯示，9 口自來水公司地下水抽水井共有 3 口 (湖西 11、白沙 09 及白沙 17) 落在派博水質圖第 II 區中，有 1 口 (湖西 01) 落在派博水質圖第 III 區中，有 5 口 (馬公 22、澎南 04、白沙 04、西嶼 10 及西嶼 13) 落在派博水質圖第 IV 區中，表示該地區地下水受到海水汙染，屬於鈉與氯鹽汙染形式，為海水導致鹽化情形。又澎南 04 同屬於高氯鹽、低硫酸鹽，初步判定為同時受殘留於封閉地層之古海水鹽化之形式。湖西

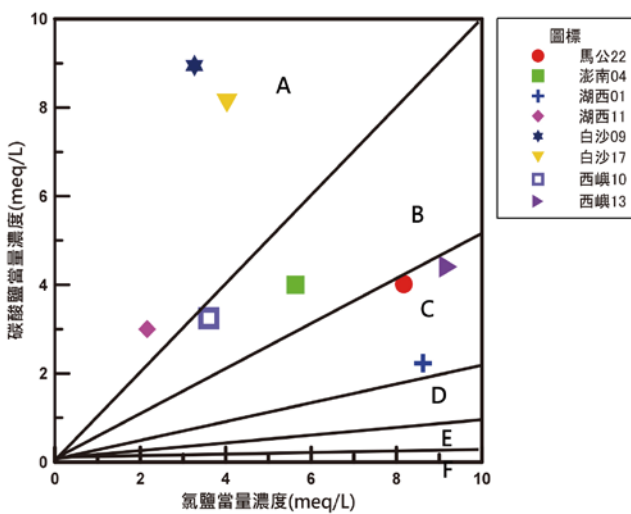


圖 14 自來水公司取水井李梵藍氏圖 (資料來源：水利署 [18])

01 及白沙 04 由派博水質圖中可發現其地下水鈣、鎂含量偏高，因此，初步判定為受全新世現代堆積物影響，地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為。

(4) 鈉吸著率與殘餘碳酸鈉

由澎湖地區地下水鈉吸著率與殘餘碳酸鈉顯示，自來水公司 9 口地下水抽水井，共有 6 口 (馬公 22、白沙 04、白沙 09、白沙 17、西嶼 10 及西嶼 13) 鈉吸著率高於灌溉用水水質標準 ($6\sqrt{\text{meq/L}}$)。其中 5 口 (馬公 22、白沙 09、白沙 17、西嶼 10、西嶼 13) 殘餘碳酸鈉高於灌溉用水水質標準 (2.5 meq/L)。

水質補充調查之目的除了增加澎湖地區地下水水質在時間及空間上的完整性及連續性外，並提供精確可靠之地下水水質環境資訊，可初步的得到澎湖地區地下水氯鹽濃度在時間上的分佈容易受到季節的枯豐水影響，產生枯水期濃度升高，豐水期濃度降低的變化趨勢。

透過導電度、氯鹽、總溶解固體物、李梵藍氏圖及派博水質圖分析判釋結果，將地下水鹽化的成因分為三個主要因素，分別為 (1) 海水入侵；(2) 受殘留於封閉地層之古海水鹽化之行為；(3) 地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為，其水井及鹽化成因對照表如表 3。

由表 3 水井及鹽化成因對照關係，將鹽化成因空間概念化 (詳圖 16)，可有助於三維地下水流溶質傳輸模式邊界之設定。

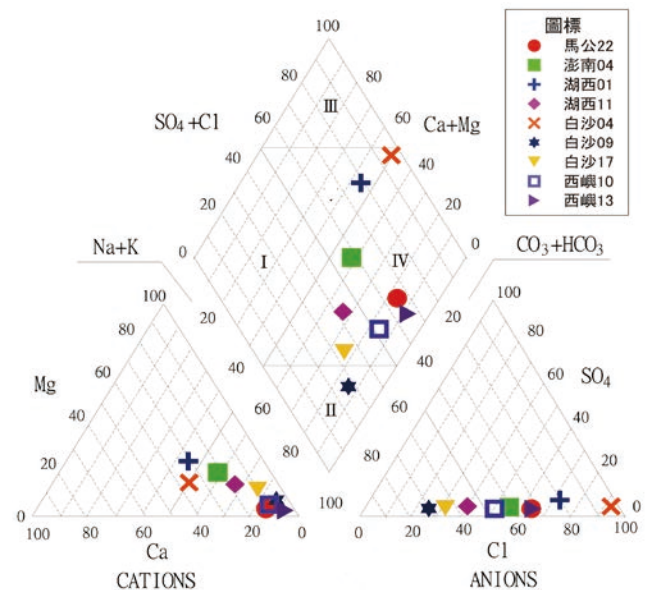


圖 15 自來水公司取水井派博水質圖 (資料來源：水利署 [18])

表 3 水井及鹽化成因對照表
(資料來源：水利署^[18])

鹽化成因分類	所屬單位		
	水利署	自來水公司	環保署
1 海水入侵	大池 (1) 大池 (2)	* 澎南 04 馬公 22 * 白沙 04 西嶼 10 西嶼 13	* 港子國小
2 受殘留於封閉地層之古海水鹽化之行為	澎南	* 澎南 04	* 赤馬國小
3 地層釋放鈣、鎂離子產生鹽性物質使地下水鹽化行為	湖西	湖西 01 * 白沙 04	* 赤馬國小

* 底線表示複合型鹽化成因

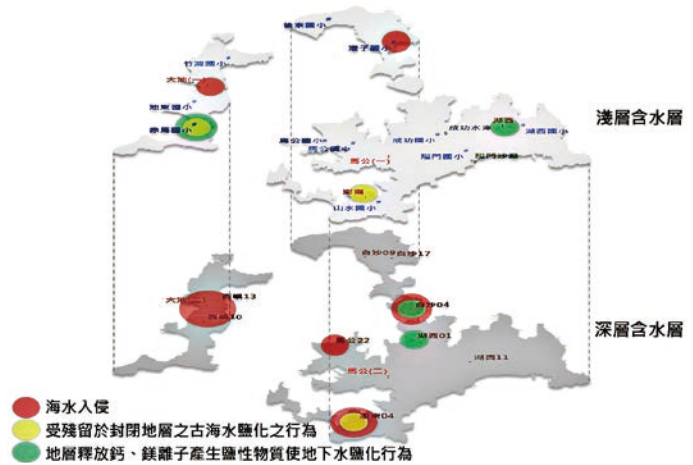


圖 16 地下水鹽化成因空間分布
(資料來源：水利署^[18])

結論

我們以本島濁水溪平原與離島澎湖群島為例，說明海水入侵在這兩個地區的量測分析與情況。然而，儘管過去幾十年的研究，但仍有許多海水入侵相關問題仍待更進一步的瞭解。這包含須要對海洋－含水層水力與物化相互作用，氣候變遷的影響，及人類對沿海含水層的作用等等，都要有更深入的掌握。除此之外，長期、高密度在淡水和鹽水之間過渡區的現地規模監測資料目前仍然不足。最重要的是須要將海水入侵相關水文地質物理與化學的科學上瞭解與現地調查結果整合，付諸於有效的管理策略與治理的實踐。這些都待我們更努力的落實，讓我們在海岸地區的國土資源的利用可以永續發展與經營。

參考文獻

1. Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T. (2016), Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology* 535, 235-255, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083>.
2. Custodio, E. (1987), Salt–fresh water interrelationships under natural conditions, Chap 3. In: Custodio E, Bruggeman GA, editors. *Studies and reports in hydrology: groundwater problems in coastal areas*. Paris, France: UNESCO; pp. 14-96; Effects of human activities on salt–fresh water relationships in coastal aquifers. In: Custodio E, Bruggeman GA, editors. *Studies and reports in hydrology: groundwater problems in coastal areas*. Paris, France: UNESCO; pp. 97-117.
3. Swartz, J.H. (1937), Resistivity studies of some salt water boundaries in the Hawaiian Islands. *Trans Am Geophys Union* 189, 387-93.
4. Stewart, M.T. (1982), Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers. *Ground Water* 20, 538-45.
5. Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A., and Melloul, A. (1991), Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time

- domain electromagnetic method. *Geoexploration* 28, 153-74.
6. Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., and Gaye, C.B. (2008), Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinisation, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest Morocco. *Journal of Hydrology* 352, 267-87.
7. Reilly, T.E. and Goodman, A.S. (1985), Quantitative-analysis of saltwater fresh-water relationships in groundwater systems – a historical perspective. *Journal of Hydrology* 80,125-60.
8. Bruggeman, G.A. (1999), Analytical solutions of geohydrological problems. *Developments in water science*, vol. 46. Amsterdam: Elsevier.
9. Dagan, G. and Zeitoun, D.G. (1998), Free-surface flow toward a well and interface upconing in stratified aquifers of random conductivity. *Water Resources Research* 34, 3191-3196
10. Bakker, M. (1998), Transient Dupuit interface flow with partially penetrating features. *Water Resources Research* 34, 2911-2918.
11. Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C.H., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., and Barry, D.A. (2013), Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* 51 (1), 3-26.
12. Liu, C.-W., Wang, S.-W., Jang, C.-S., and Lin, K.-H. (2006), Occurrence of arsenic in ground water in the Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Journal of Environmental Quality*, 35(1), 68-75.
13. 賴慈華 (1996)，濁水溪南岸平原之晚第四紀地質，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 79-100 頁。
14. Kelly F. (2005). *Seawater Intrusion Topic Paper: Island County Health Department*.
15. 經濟部水利署 (2020)，109 年度地下水水質檢測分析與評估。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2021)，濁水溪沖積扇海水入侵及地下水區邊界地下水觀測站井補充建置 (1/2) 期中報告。
17. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2006)，澎湖地區地下水資源規畫調查。
18. 經濟部水利署 (2016)，澎湖地區地下水海水入侵與防治措施評析