

地球物理探勘學簡介

— 並以電探法進行地下水測勘為例

陳可恭

省立宜蘭高級中學

摘要：本文配合國、高中地球科學課程，針對與「地球內部之研究」相關的教材內容，簡介地球物理探勘的種類與其應用之基本原理；並以電探結果剖析臨海地區地下淡、鹹水之界面型態，進而對海水入侵與環境保育的問題進行探討。

關鍵詞：地球物理，地球物理探勘學，電探法，地下水，海水入侵。

一、前言

「地理物理」，是應用物理原理以研究地球物質的科學。於現行國中與高中的地球科學課本裡，均曾出現「使用地球物理的方法，來研究地球內部構造」之概念（國立編譯館，85；師大科教中心，民85）；而在新訂的高中課程綱要之「物質科學－地球科學篇」中，更闢有以介紹地球物理探勘為主的單元——「礦產探勘」（教育部，民85）。然而，由於現行教材篇幅有限，新課程則尚未施行，加上通俗性的參考資料並不普遍，故有關地球物理的題材，在教與學時常會引發若干疑問。筆者任教中學物理與地球科學多年，並曾修習地球物理學，從事地電測勘和地下水的研究；在此，僅以地球物理探勘的種類與基本原理的介紹為起點，並配合國中地球科學「水圈」一章的內容，引「臨海地區的淡、鹹水界面型態之探測與剖析」的具體實例做為說明；期能提供教師同仁及同學們些許參考資料，也冀望對環境保育的推廣有所助益。

二、什麼是「地球物理探勘」？

「地球物理探勘」，簡稱「地物探勘」，是一門利用物理學的原理與方法，於地表量度來自地下之信號，以剖析地下狀況的技術與學問；其使用的能量源或場源，可以是天然的也可以是人為的，而依所應用的物理原理和藉以解析地層物質的物理參數之不同，大致可分為震測法、重磁法、地熱法、放射性法及地電法等（楊潔豪，民78）。亦曾有若干學者，將地物探勘與「果販敲西瓜以判斷瓜質的功夫」、或「醫生利用聽診器、超音波掃描以診視病患的技術」相比擬——都是以間接、非破壞性的方式，來求知受檢體內部狀況的方法與過程。至於其實際應用的範疇，則以礦產資源的探勘和地球內部構造的研究為主；近來，在隧道、水壩、橋樑等工程基址的調查，及土木設施與建物

結構之檢測，所扮的角色則漸趨重要。茲將常用的地物探勘法及其特性，列述於下：

1. 震測法—係在地表附近，以一人工震源（如重鎚敲擊、炸藥或空氣槍等）產生震波，使傳入地下或受檢物，由於此波場（*Wavefield*）經地層或受檢物結構（如速度不連續面）會或受影響，而震波速度又隨傳播介質的不同而異，故只要在地表接收此一從內部返回之具時序特性的信號，再加以分析處理，便能得一震測剖面。由接收到的震波信號，可研判地下構造之形貌、受檢物的材質結構（如建築物內之鋼筋或裂縫），甚至追蹤核武試爆地點等。震測之利用震波來偵測地下構造，就如利用光線來攝取物體之影像，二者所引用的物理原理之數學形式極為相似，均以波動方程式為主；而根據所擷取與引用的震波種類及信號的不同，震測可分為折射震測與反射震測兩種。
2. 重力法—乃依據萬有引力定律，在地表上量度因地下岩層之側向密度變化所造成的重力場變化，以研判地下礦體或岩層物質的測勘技術。實際工作時，係先將各觀測點之重力觀測值，經由偏移、緯度、自由空間、布蓋及地形等各項修正後，再取其與基準點的相對差值繪成等值線分佈圖。依此圖之型態，便可偵檢地下空洞，或辨識地下之異常構造、油氣、金屬礦等所在的位置。
3. 磁力法—有若干性質與重力測勘法相同，二者均以測定地下物質的物理性質之變化所引起的位場異常為主。然由於造成地面磁力異常之岩石或地下物質的磁化強度，同時兼具方向與大小之殊異性，所以其資料解釋較為繁瑣；但因為磁性體之邊界，約位於磁力梯度大的地帶，故由等磁力線圖，即可概略識別地下基盤岩之起伏、礦體之存在，及偵測被土石掩埋之車輛和金屬機具等。
4. 電探法—其研究方法，係使用人工或天然的場源，依電流或電磁場在地層中的變化來研判地層的電性，以辨析地層形貌、組成物質或特殊的地下構造；就以所解析的物理參數言，可分別利用地層物質間之電導率、磁導率、介電常數或感應極化特性等電性的差異，而使用不同的原理與方法進行測勘。目前常用的，則有電磁波法、透地雷達法和直流電阻法等。

三、地物測勘實例—以電探法進行地下水調查

1. 特性概述：

在應用地球物理學中，屬於電探類之直流電阻法（*DC Resistivity method*），是進行地下水調查與測勘最有效的方法之一，其藉以界定地層物質分佈的物理參數係電阻率（為電導率之倒數；單位：歐姆米，*Ohm-m*）。地層電阻率與其組成礦物的種類、岩理、膠結度及含水狀況等因素有關；而在沖積層中，一般而言又與組成物顆粒大小、含

水量及地層水鹽度之關係最為密切。以宜蘭平原為例，經實測的結果，其地層物質電阻率大致如下（陳可恭等，1996）：

(1) 大於 300 及 130-300 歐姆米—以礫石與粗砂為主，並分別與自由水位面之上、下的層段相對應。

(2) 50-130 歐姆米—位飽和含水帶，岩性為小礫至粗砂。

(3) 10-50 歐姆米—為細砂、粉砂與黏土的地層。

(4) 低於 10 歐姆米—為極細顆粒的物質或具高鹽度地層水之層次。

由此可知，若能求得電阻率的空間分佈，便可推估地下物質之分佈，並可追蹤異常的地下構造或描繪地下水之界面型態。

2. 直流電阻法基本原理

如圖一（A）所示，直流電阻法之工作原理，係經由一對電極（電流極 C_1 與 C_2 ）將直流或低頻交流電通入地層中，以建立一人為電場，並在地表利用另一對電極（電位極 P_1 與 P_2 ）量測其間的電位差；由於此電位差除與通入地層的電流強度有關之外，也與電極間的幾何關係（如間距大小）及地層的導電性相關，故藉由一系列的量測，便可獲取以不同深度的地層為主要響應來源的訊號，再加以適當的逆推演算（地球物理學常用的一種求解技巧；簡言之，即利用一定的物理原理以行順向計算，再使用數學的技巧，以觀測資料反推理論模型解以與真實地層匹配的過程。在此不作詳述。）便可推知地下介質的電性構造。

在一電性均質之半空間介質中，由點電流源通以強度為 I 的電流，則距離為 r 的任一點之電位為 $V = \rho I / 2\pi r$ ；因此，假設由 C_1 與 C_2 通入電流則由 P_1 與 P_2 所量測的電位差值 ΔV 應為

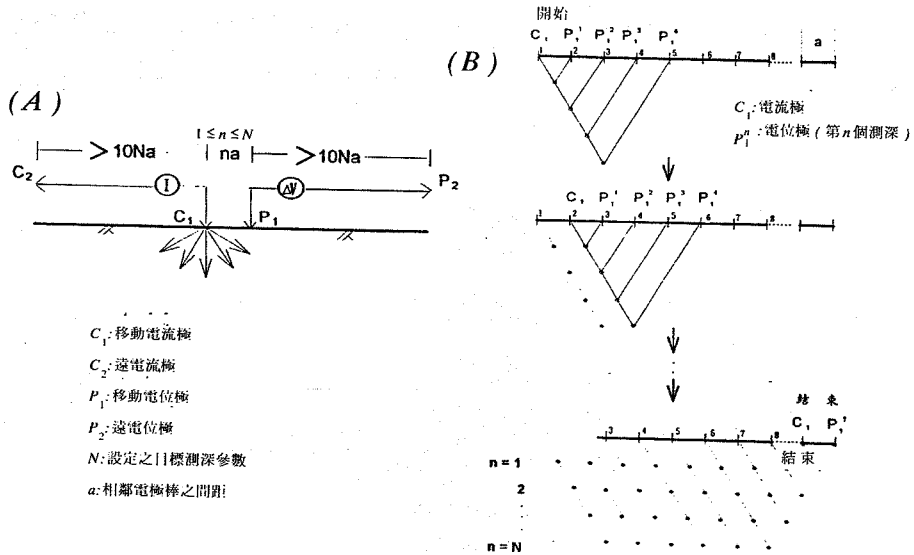
$$\Delta V = V_{(11)} - V_{(12)} - V_{(21)} + V_{(22)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{21}} \right) - \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \right] \quad (1)$$

式中： ΔV 為電位極間的電位差； ρ 為介質的電阻率； I 為通入地下的電流強度； r_{ij} 為 C_i 電流極與 P_j 電位極之間的距離。式(1)可縮寫成

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

其中 K 稱為幾何因子（*Geometric factor*），依電極間相對位置而定

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{21}} \right) - \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$



圖一 直流電阻法

(A) 電極配置 (雙極排列法)；(B) 施測流程

因此若測得 \$\Delta V\$、\$I\$ 及電流極與電位極的相對位置，即可算出均質半空間介質的電阻率。然而真實地層並非電性均質介質，所以由上列各式所算出的電阻率稱為「視電阻率」(*Apparent resistivity*)，此值通常並不是地下地層之實際電阻率，而是代表「對應於某一電極排列幾何下，所有電性地層的綜合效應」；至於實際電阻率的空間分佈，則須以此為基礎，再經適當的逆推處理及分析，方可求得。

本研究作逆推解釋時，在非均質空間中，電位和視電阻率理論值的順向計算，假設電阻率垂直於主構造的方向呈二維分佈，並採二維有限元素法進行計算 (*Coggon* , 1971)：當地表有一點電流源時，由歐姆定律知電流密度 \$J\$、電導率 \$\sigma\$ 與電場 \$E\$ 之間的關係為 \$J = \sigma E\$；而整個空間的總功率 \$\psi_T\$ 可分成場功率 \$\psi_F\$ 與電流源功率 \$\psi_J\$

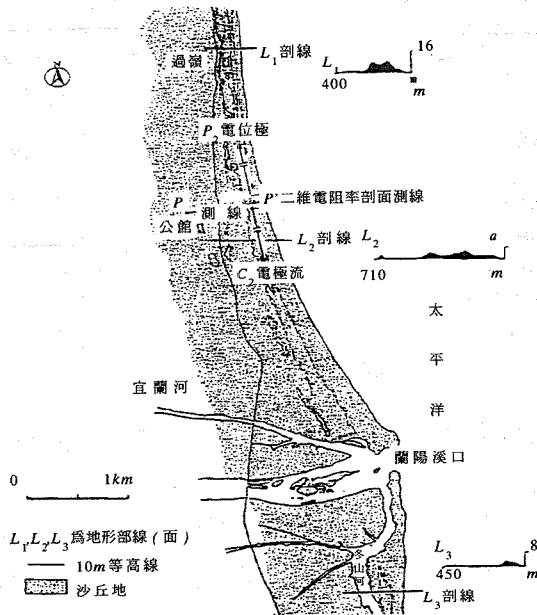
$$\psi_T = \psi_F + \psi_J = \int_V \sigma E^2 dv + \int_V 2J_S \cdot E dv \quad (4)$$

由此關係，將上式作傅式餘弦變換，再利用有限元素的原理將地下構造分割成有限個極小的元素，並使用逆推演算的技巧，便可求得與野外觀測資料匹配最佳的理論模型解。

3. 地下水調查之測勘實例

(1) 施測場址

為配合國中地球科學中有關地下水的教材內容，並進一步剖析臨海地區地下水的分佈形貌及海水入侵的問題，本研究於宜蘭縣蘭陽溪口北側，壯圍鄉公館附近南北向沿岸沙丘上，規畫兩條垂直於海岸線之雙極排列法 (Pole - Pole array) 的電探測線，並銜接成 PP' 剖面 (如圖二) 。



圖二 宜蘭壯圍鄉公館沿海二維地電阻率影像剖面位置圖

(2) 測線安排與施測流程

如圖一 (A) 所示，直流電阻法如將 C_2 電流極與 P_2 電位極，固定於離欲探測剖面甚遠的地方，則稱為「雙極排列法」。施測時，在欲探測剖面上以等間距 a 佈置多支電極，再行自動切換，則可較省工時且具效率。施測開始時，如圖一 (B) 所示，以第 1 支做 C_1 電流極，第 2 支、第 3 支..... 第 $N+1$ 支逐次做 P_1 電位極 (即 $C_1P_1 = na; n = 1, 2, 3 \dots, N; N$ 為設定之目標測深參數)，就可以測得由第一支做 C_1 電流極之由淺而深的地層訊號；接著，改以第 2 支做 C_1 電流極，第 3 支、第 4 支..... 第 $N+2$ 支，逐次做 P_1 電位極，如此可得第 2 支做 C_1 電流極的地層訊號。以此方式將 C_1 電流極依序更換，便能獲得整個剖面的地層電性響應。

在野外，由於所有電極棒均以一相同間距一次佈置，再用多頻道電纜接通，施測時並以掃描裝置 (Scanner) 自動切換工作電極棒，因此便可在同一地點控制整個施

測系統，快速而便捷地獲取大量的觀測資料。本研究施測時，電極間距均採 $a=6$ 公尺； P_1C_1 ($=na$) 由 6 公尺 ($a=6$) 逐次增加至 90 公尺 (即設定之目標測深參數 $N=15$ ； $Na=15 \times 6=90$)，如此探測深度約亦可達 90 公尺；經進行兩條測線之探勘，再將首尾銜接，可得一長 426 公尺之剖面 PP' (如圖二及圖三)。

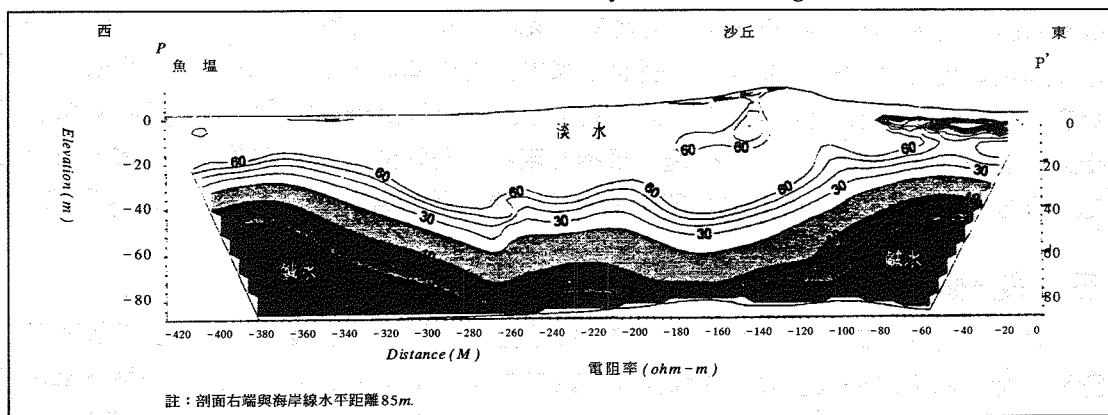
(3)資料處理與結果分析

兩測線的觀測結果，分別以二維有限元素法進行逆推解釋，各可得 798 及 496 個分佈於探測剖面上的電阻率計算值，將其合併並繪製等值線，便可得如圖三的二維地電阻率影像剖面 PP' 。由圖中可發現，在水平座標 $X=-240$ 至 $-282m$ 之二測線重疊銜接處，等值線的連貫仍十分良好，可見二測線個別逆推的結果均具相當可信度。由解釋剖面顯示：除接近地表因受局部乾濕和地形地物的影響，電阻率的變化較大外，大體而言電阻率乃隨深度之增加而遞減，在深約 80 公尺處可低至 3 歐姆米。較特別的是，電阻率低於 30 歐姆米的各等值線，幾成一向下之凹槽，與其上部整體視之，頗像一凸鏡體，推測應有相當多的淡水儲存在此沙丘構造及其後背區域。

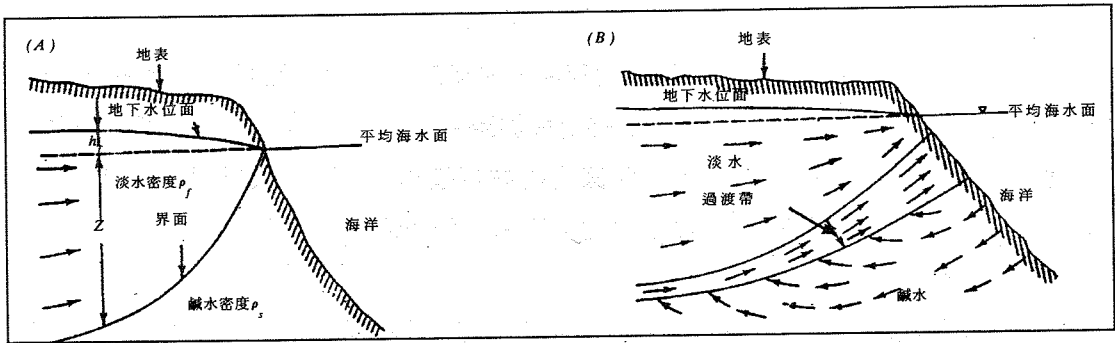
本剖面所在的位置，由宜蘭地區平均地下水流網圖視之，應有地下淡水在此地流入海洋，因而臨海下方的水體分佈形貌、淡鹹水間的交互作用型態及沿岸砂丘之於抑制海水入侵所扮角色，頗值探討。

四、臨海地區淡、鹹水界面型態之進一步探討

臨海地區淡、鹹水之理想分佈形貌，由流體靜力平衡原理 $\rho_s gz = \rho_f g(z+h_f)$ ，可獲如圖四 (A) 即國中地科課本第八章所示之 *Ghyben-Herzberg* 剖面 (國立編譯館，民



圖三 宜蘭壯園公館沿海沙丘之電阻率影像剖面探測
(以有限元素法做二維逆推解釋結果)



圖四 沿海地區未受壓含水型的淡、鹹水分佈形貌；

(A)理想化型態；(B)流動且具過渡帶型態

(摘自 Todd, D. K., 1980)

85)，式中 ρ_s 和 ρ_f 分別為鹹水和淡水密度； g 為重力場強度； h_f 為陸地上地下水面在海平面上的高度； Z 是淡、鹹水交界面的深度。由此關係可知，若 $\rho_s = 1.025g/cm^3$ ， $\rho_f = 1.000g/cm^3$ ，則 $Z = 40h_f$ ；亦即淡水體在平均海平面之上的高度和之下的深度，在任意地點均保持1:40的關係，故超抽一公尺之淡水將會使淡、鹹水的界面升高四十公尺。

但由於當淡水沿著淡水與鹹水之間的交界面向上移動時，受含水層產生垂直分流及潮汐等擾動因素的影響，如此清晰的界面不太可能真正出現，取而代之的，是淡水與鹹水間會有一如圖四(B)之過渡帶(Transition zone)產生(Todd, 1980)。

圖三之 $X=0$ 處與海岸線的水平距離為85公尺，從 $X=-40$ 至 $-360m$ 處電阻率低於30歐姆米的各等值線有下凹的現象，其上電阻率較高的部分略成凸鏡狀，推測可能由於沙丘物質透水性佳，在其後背區域可儲存相當多的淡水，而使 $X=-120$ 至 $-320m$ 處淡、鹹水界面較深—抑制海水入侵的「淡水障壁」(Fresh water barrier)現象可見；而目前，在沙丘後背濕地淺部仍可抽取淡水，據張智欽(1995)稱，其曾利用位於稍北沙丘上之過嶺國小舊址的觀測井連續抽水三小時，地下水導電度並無明顯上升，此與本研究的結果相當吻合；由於此處亦為宜蘭平原地下水集中出海的地方，故靠海側則形成如前述之具過渡帶的分佈型態。全剖面較深處其電阻率低至1.6歐姆米，無疑地，其所對應之深度的地層水，鹽度必然極高。5與10歐姆米等值線橫貫全剖面，可見與海水應相通，唯在 $X=-380$ 至 $-400m$ 處呈現抬升現象，研判係地下水位面較低所致，由於此處在測線垂直方向相距30公尺處即有大面積魚塢，是否與其有關，則有待深入研究。

五、結論

本文配合國、高中地科教本之內容，簡述地物探勘的種類與原理，期能提供讀者以認識「地球內部之研究」與「資源探勘」的參考資料；文中援以電探法調查地下水之實例，結果顯示成效良好，同時亦可看出沿岸沙丘之淡水，對海水入侵具抑制之效，此一天然屏障實有保育之必要。(下轉第55頁)