

# 溫泉探勘技術

■ 陳彥傑 · 孫思優 · 王愉晰 · 李孫榮

近年來泡湯風氣鼎盛，大眾對溫泉資源的需求日增，帶動了溫泉開發技術的精進。應用地質探測技術於溫泉資源的探勘，可降低開發的風險與成本，可說是溫泉業者的一大福音！

近來國內日式泡湯的嚮往者急速增加，提升了對溫泉的需求，也帶動了業者積極進行溫泉資源的開發與調查，而熟知地球物理探測的地質技師也紛紛把探測技術應用在這波「溫泉風」上。

對習於實作的鑿井業者而言，地球物理探勘技術的優點是可降低因地質的不確定性而引致的承攬風險。另一方面對溫泉開發業者來說，其工程時程的控管與發包費用也可因事前的評估而減少不必要的浪費。

再者，天然溫泉的質與量原本就很有有限，因此無論是休閒旅館業、遊樂區，或都市中的大樓社區，開發較深層的地熱溫泉都有其必要與迫切性。而透過地球物理探勘技術開發出質與量均佳的溫泉水，將成為溫泉觀光休憩事業的重要發展方向。

## 相關技術與其演進

成功的溫泉開發，應是在有限空間內，以最經濟的方式找出最適宜的溫泉井，以獲取高品質的泉溫、泉質與適度的水量。為達到這目標，除須有效掌握現地地質資料、水文資料與當地現有溫泉資料外，尚需配合有效的地球物理探勘，以間接且不具破壞的方式找出地表下較明確的資源訊號，才能開發出成功的溫泉井。

以往探測溫泉的方式，僅是在地表或有限的深度內作地溫探測、重力探測、地表地質調查、地質鑽探等。目前受惠於地球物理探測技術的精進與電腦性能的大幅提升，溫泉探勘已經能以過去無法想像的深度與可靠度來進行。

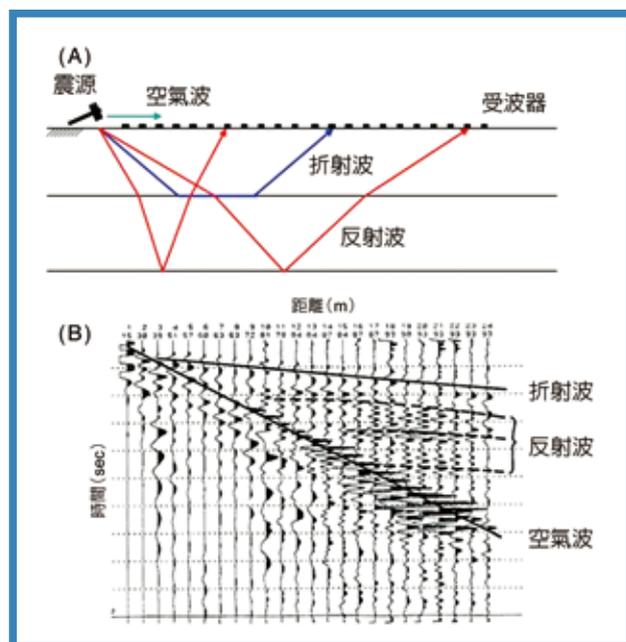
透過地球物理探勘技術開發出質與量均佳的溫泉水，將成為溫泉觀光休憩事業的重要發展方向。

受惠於地球物理探測技術的精進與電腦性能的大幅提升，目前溫泉探勘已經能以過去無法想像的深度與可靠度來進行。

## 溫泉探測的方法

現時應用於溫泉資源探測的方法涵蓋上天下地，例如衛星遙感探測、航空照片、地表地質調查、地表及地下地球物理探測等技術。本文介紹國內最流行方法的應用領域及適用性，以及實際的探查成果。

**地震波探測法** 這種探測技術已運用在水庫、大壩、隧道、崩塌地等公共工程的調查中。依探查深度的不同，可分為兩種：25公尺深度內的淺層地層與構造探測，利用的是「折射震測法」；較深部的地層與構造，則採用「反射震測法」。



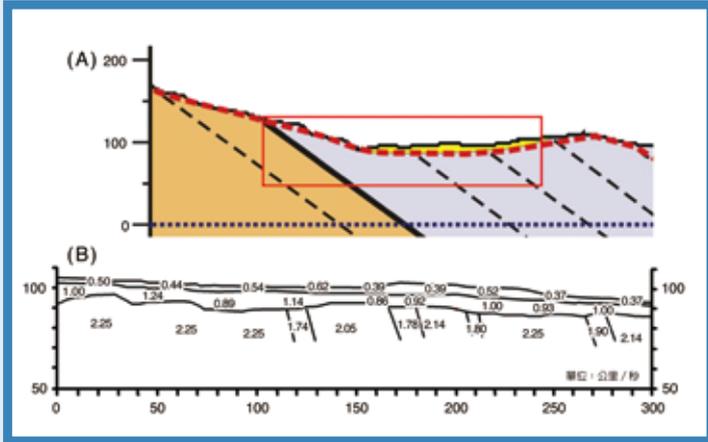
地震波探測法示意圖。(A) 人工震源所產生的震波信號在地層中傳播的情形。(B) 折射或反射的地震波經地表受波器接收處理後的訊號圖。

折射震測法是在地表以人工震源產生震波信號，信號進入地下在地層間傳播。由於震波在各地層的傳播速度不同，當震波從某地層進入另一地層時，會發生折射現象，若地層愈深，震波速度愈快，則震波會因折射甚至全反射而返回地表。地表的受波器接收震波後，再根據震波傳播的「時間與距離關係」，計算出各地層的厚度與低速度帶的界線位置，並據以推估各地層可能對應的岩性、構造情形、破碎帶或軟弱帶的分布、可挖性及風化情況，甚至灌漿效果等。

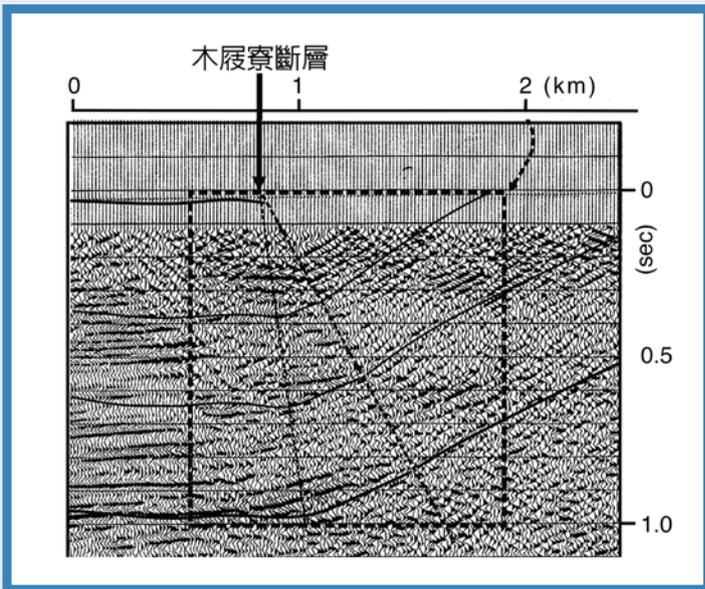
折射震測法一般是採用剖面炸測方式，也就是把人工震源與受波器安排在同一直線上進行炸測。這方式可求得震測線下地層的速度剖面，是一種經濟且快速的調查方式。此外，折射震測法不受地形起伏影響，對高傾角的地層也有良好的解析度。這方法的探測結果，可提供鑿井公司選擇挖掘機具，以及考量埋設鑿井套管的深度。然而，這方法也有些限制，例如低速度地層不能位於高速度地層下，以及地層厚度不能太薄等。

相較於上述方法，反射震測法適用於較深地層構造的探測。它的原理是在地表以人工震源產生震波信號，信號進入地下後，在傳播速度不連續的地層交界面產生反射，而這些震波在各地層交界面來回傳播的歷程，可利用埋設在地表的受波器加以記錄。反射震測法絕大部分採人工震源與震測線位於同一直線的排列方式，藉由人工震源與受波器的組合，以能在地層傳播的震波為媒介，攝取地下構造的影像，是一種相當有用的地下構造照相術。

反射震測法的震測結果，經電腦處理分析後，可看出地層沖積層的厚度與斷層破碎帶的分



以台灣北部某基地利用折射震測法進行地質探查的結果為例。(A)基地的地質剖面示意圖，紅色框內是實施折射震測的位置；(B)探查的結果，圖中縱座標與橫座標的單位都是公尺。由圖可釋出4個速度層：最上一層是表土層，厚度介於2~5公尺，震波速度是每秒0.37~0.62公里；之下是崩積層或風化岩層，厚度介於4~11公尺，震波速度是每秒0.86~1.24公里；最下層是砂岩層與低速帶交互出現，其中距測樁0~115公尺間，震波速度每秒2.25公里，是砂岩層，115~125公尺之間，震波速度每秒1.74公里，是低速帶，125~165公尺間，震波速度每秒2.05公里，是砂岩層，165~180公尺間，震波速度每秒1.78公里，是低速帶，180~205公尺間，震波速度每秒2.14公里，是砂岩層，205~210公尺間，震波速度每秒1.80公里，是低速帶，210~265公尺間，震波速度2.25公里，是砂岩層，265~275公尺間，震波速度每秒1.90公里，是低速帶，275~300公尺間，震波速度每秒2.14公里，是砂岩層。



反射震測法探測成果的範例

布，也可用於尋找斷層位置、不整合面、地層錯動、地層位態、岩盤位置等地層構造。由於反射震測法能直接看到地層影像，是一種可信度相當高的探測法，因此對於需要細部資料的地質調查，例如斷層偵測，這方法甚為可靠。值得一提的是，對於低速度地層位於高速度地層下的情況，反射震測法仍可解析出良好結果，但對於高傾角地層構造的解析則仍然不易。

**地電阻探測法** 地電阻探測法是一項已相當成熟的地球物理探測技術，在工程地質、地下水資源、地下水污染、地下地質調查等方面，成效相當卓著。依施測方式不同，可分為垂直地電阻探測法與剖面地電阻探測法兩種。前者主要在了解地層垂直方向的變化，後者則專長於探查地層水平剖面方向的變化。

應用在地層探測時，垂直地電阻探測因受限於測點分布，對於水平剖面方向構造的解析能力較弱；剖面地電阻探測方式則對於垂直方向的解析能力稍嫌不足。因此，若能綜合兩種探測方式，應能提高地層探測應用的可行性，而地電阻影像剖面法便是兼具垂直與剖面方向解析能力的探測方式。

地電阻影像剖面法施測原理與反射震測法類似，是沿著一條

現時應用於溫泉資源探測的方法涵蓋上天下地，例如衛星遙感探測、航空照片、地表地質調查、地表及地下地球物理探測等技術。

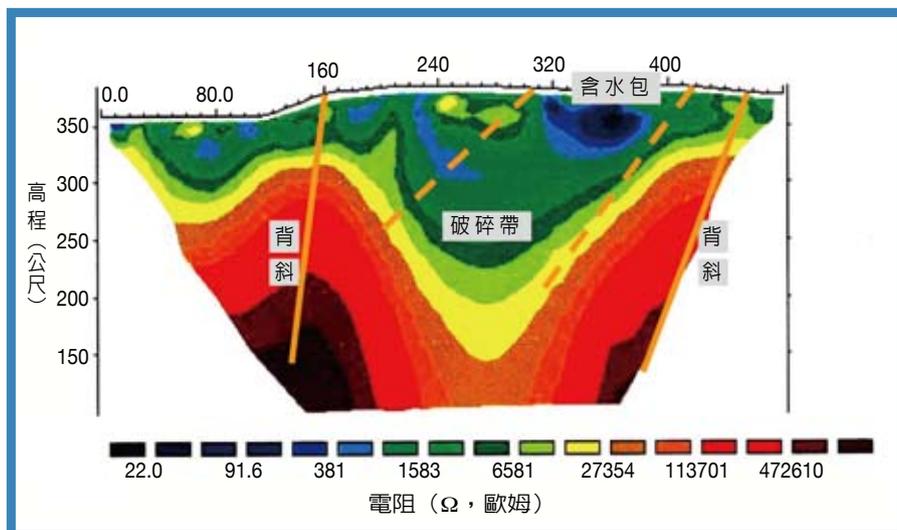
既定方向的測線配置電極，以人工輸入一固定電壓。由於地下地層電阻的影響，可測得電壓值的變化，然後依據歐姆定律求出地層的視電阻及電阻層構造。把視電阻換算為實際電阻後，與自然界不同土壤及岩石材料於特定條件下的實際電阻比較，就可推估地下不同深度各測點地層的岩性狀況，以及地層中因含有較高帶電離子而使得電阻較低的溫泉水位置。

這方法除能達到垂直地電阻探測的「測深」目的

外，由於沿測線方向的測點較密，因此也可反應出地層水平方向的變化情形。此外，地電阻影像剖面法對地下水及地層材料含水量極為敏感，在測線下的地層電阻分布可以用二維空間表示，若配合電極在空間中的排列方式，組合多條平行的測線，則可以建立地層電阻在三維空間的分布圖，對於地層構造、地下水位置和地層污染的探測非常有效。

由於地電阻探測法的探測深度，隨著電壓輸入端電極與接收端電極的間距增加而增加，因此為獲得不同深度地層的電阻，現場施測時必須不斷地改變接收端電極的位置。根據實測經驗，現場施測時，大部分的時間多花費在反覆移動電極的位置，嚴重延長實測所需的時間，而且地電阻影像剖面探勘量測的資料量又遠大於傳統的方式，因此如何有效縮短現場實測所需的時間，便顯得非常重要。

為提高現場實測的工作效率與對地層的解析能力，新竹的工研院能資所曾研發地電阻探測切換



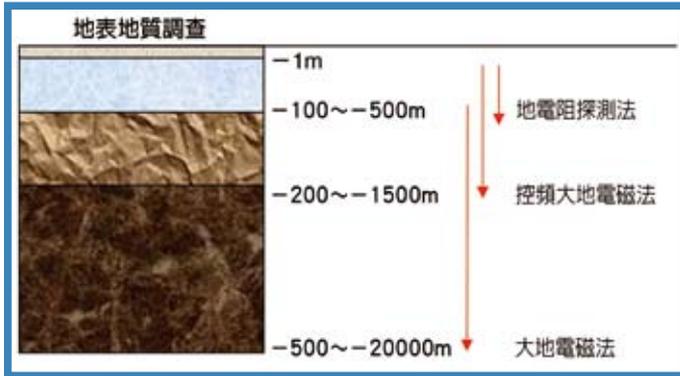
地電阻影像剖面法探測成果的範例。從電阻的分布形態，可大致判斷出背斜構造與破碎帶的位置，含水包則可能因含有較高帶電離子而表現出較低的電阻。

器。經試驗顯示，除能有效減少電極移動的次數，大幅提高施測的工作效率外，其地電阻影像剖面還可獲得較傳統方式更準確的地層資訊。

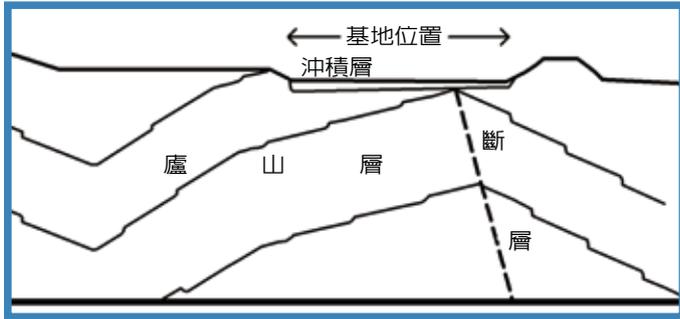
**電磁探測法** 電磁探測法是量取自然或人工的電磁場，利用電磁場會隨時間或電磁波頻率不同而改變的性質，求出地下地層的電性參數。這方法常用於尋找地下資源，例如礦床、油氣、地下水、地熱等，以及板塊邊界的描繪、較深部構造與地層的描繪等，其量測位置與方式可在地表、空中、海上或井下。以下介紹地電阻探測法運用於溫泉探測時效果較佳的兩種方法。

大地電磁法是目前用於探測較深部地層電阻值最快速的方法，它的原理是量測天然電磁場進入地層後所感應出的電場，再推求出地層的電阻。由於不同頻率的電磁場有不同的穿透深度，頻率越低穿入地層越深，因此量測不同頻率電磁場的感應電場，就可獲得不同深度的地下地層電阻分布情形。

這方法具有對較低電阻的地層仍能具有高解析



各種地球物理探勘技術的探勘深度



台灣東部某溫泉開發基地的地質剖面圖

度與較不受地形影響的優點，且探測深度可依所量測電磁場的頻率而定，因此探測深度可從數百公尺至數百公里。

由於含水地層或含泥質較高的地層是電流的良導體，易產生感應電場，並呈現較低的電阻，因而可用以推估地下含水層的位置。

控頻大地電磁法與上述方法的主要不同點，在於電磁場是由人工所發射。當天然電磁場進入地層後所感應出的電場過於微弱而影響探測時，就須以人工方式主動發射電磁場來進行探測。一般而言，由於人工發射的電磁場頻率較高（1千赫～69.5千赫），探測深度約在10至1,500公尺間，相對於大地電磁法而言，是較為淺層的探測方式。

### 應用案例

以下舉台灣東部某溫泉地質探查為例加以說明。這案例的基地地層可分為基盤的變質

岩，以及地表的階地堆積層與沖積層。基盤的變質岩主要由緻密的細粒變質砂岩夾中層至薄層板岩所組成；階地堆積層結構則大多是膠結不佳的礫石、砂、粉土等物質；沖積層則是未經膠結的礫石、砂、粉砂、黏土等物質。

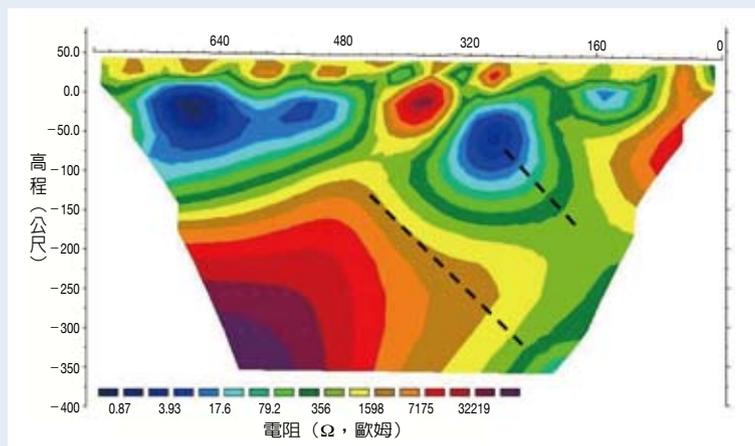
此外，另有一走向呈北偏西約20度的斷層，可能延伸至案例基地，然而因沖積層的覆蓋，缺乏露頭，因此它的正確延伸位置不明。不過，由於斷層兩側地層相同，岩層走向與傾斜也沒有大變化，因此推測其落差應不大。另案例基地的水位觀測紀錄也顯示，枯水季時，地下水位約在地表下20公尺左右，因此預估基地下方的廬山層，應是目標取水層。

案例基地經地電阻探測法與大地電磁法探測的結果分述如下。地電阻探測法的測線長800公尺；大地電磁法的測址gb1～5間約1,000公尺，其中測址gb3約位於地電阻探測測樁400公尺處。

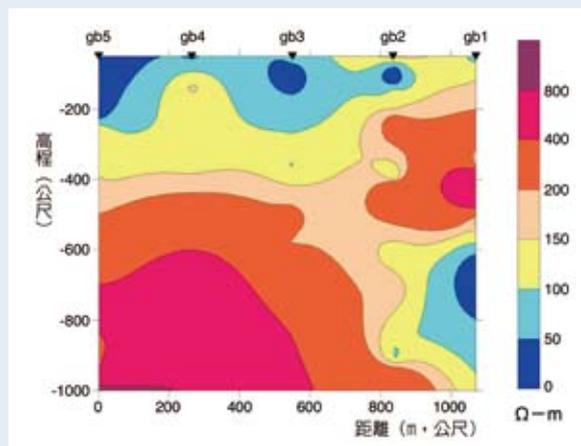
由地電阻影像剖面可看出，這案例基地大致可分為二種地層構造：上層電阻變化劇烈，且呈現小區塊分布，推測應是階地岩塊堆積層及風化沖積層，厚度約為20至60公尺；下層大部分呈現高電阻分布，推測應是以變質砂岩夾雜板岩為主的構造。此外，其中有二處破碎區域，一在距測樁160至400公尺間，另一在距測樁460至800公尺間，前者破碎帶寬幅近100公尺，以傾角約45度向東延伸，且有往深部延伸的趨勢。

大地電磁法探測成果則顯示，案例基地地層的電阻率介於10至1,200歐姆－公尺之間。一般而言，板岩的電阻常態範圍是200～800歐姆－公尺，若低於100歐姆－公尺，則可視為是低電阻的地層。此外，深度超過100公尺且電阻低於100歐姆－公尺的地層，較有可能是溫泉儲集的地層，而低於50歐姆－公尺的，更可能是良好的溫泉儲集地層。

地球物理探測是地下地層與溫泉探測的最佳利器，可以避免盲目的鑽鑿，並妥善規劃鑿井位置、深度及口徑，以獲得最佳的溫泉水量及適當的溫度。



台灣東部某溫泉開發基地的地電阻影像剖面圖



台灣東部某溫泉開發基地的大地電磁法探測成果

因此，由低電阻（0~50歐姆·公尺）影像的厚度比較可得知，測址gb5是最具溫泉儲集潛勢的位置，可能的溫泉儲集構造在100~480公尺深。其中130~200公尺是最佳的溫泉儲集深度，應可獲得較大的出水量。

測址gb1是次優的溫泉儲集潛勢位址，溫泉儲集構造的位置較深，約570~1,000公尺，其中600~890公尺是較佳的溫泉儲集深度。測址gb2至gb3也具溫泉儲集潛勢，但測址gb4由於低電阻影像的厚度幾乎是0，因此溫泉儲集潛勢較低。此外，由電阻影像圖也可看出，含水區段以傾角約45度由gb3至gb1漸深。

綜合上述兩種方法的探測結果，顯示這案例基地在接近測址gb5，即距地電阻影像剖面測樁600~720公尺處，最具溫泉儲集潛勢，深度則約為400~600公尺。

### 用對方法事半功倍

地球物理探測是地下地層與溫泉探測的最佳利器，可以避免盲目的鑽鑿，並妥善規劃鑿井位

置、深度及口徑，以獲得最佳的溫泉水量及適當的溫度。淺層溫泉探測建議採垂直電探及地電阻影像剖面法併用，至於較深層的溫泉探測，則以大地電磁法及控頻大地電磁法併用為佳。

地球物理探測的效果與成果解釋，有賴於正確的地質模型，以及對地球物理探測方法適用性與限制的了解。依據現地地形、地質與施作條件，選用適當的探測方法，並配合地質構造的模型加以驗證，才能得到良好的結果。

陳彥傑

嘉南藥理科技大學台灣溫泉研究發展中心

孫思優

嘉南藥理科技大學溫泉產業研究所

王愉晰

嘉南藥理科技大學觀光事業管理系

李孫榮

嘉南藥理科技大學台灣溫泉研究發展中心