

七星山西北麓地區 近地表熱液初步探查

Preliminary Study on Near-Surface Hydrothermal Characteristics in the Northwestern Qixing Mountain

受委託單位：中華民國地球物理學會

研究主持人：陳建志

研究期程：中華民國 112 年 04 月至 112 年 12 月

研究經費：新臺幣 118 萬 8,000 元整

內政部國家公園署陽明山國家公園管理處委託報告

中華民國 112 年 12 月

(本報告內容及建議純係研究小組觀點，不應引申為本機關之意見)

目錄

目錄	1
圖目錄	3
表目錄	5
中文摘要	6
ABSTRACT	7
第一章 計畫緣起與目的	9
第二章 文獻回顧	14
第三章 研究方法	17
(一) 地電阻影像法基本原理	17
(二) 逆推理論	18
(三) 逆推方法	19
(四) 原始資料處理	20
(五) 地電資料篩選	21
(六) 隨機分組	21
(七) 重複逆推	21
(八) 中位數地電阻剖面	21
(九) 四分位數變異係數剖面	22
第四章 採用儀器及規格	25
第五章 工作執行	29
(一) 地電阻測線配置	29
(二) 施測參數	29
(三) 執行步驟	29
(四) 野外工作情形	30
第六章 地電阻探勘結果	43
(一) YX1 資料處理與中位數地電阻剖面	43
(二) YX3 資料處理與中位數地電阻剖面	43
(三) YX4 資料處理與中位數地電阻剖面	44
(四) YX5 資料處理與中位數地電阻剖面	44
(五) YX6 資料處理與中位數地電阻剖面	44
(六) YX7 資料處理與中位數地電阻剖面	45
(七) 逆推模型交互驗證	45
第七章 綜合判釋	66
(一) 岩石電阻率影響因素	66
(二) 鑽井資料	66
(三) 七星池下方電阻率分布	67
(四) 小油坑噴氣口下方電阻率分布	68

第八章 討論與評估	83
第九章 結論	91
第十章 建議	93
參考文獻	95
附件一 地電阻影像法施測流程圖	98
附件二 地電阻影像法擬似剖面圖	99
附件三 野外工作照片	104
附件四 七星山西北麓地區近地表熱液初步探查 科普文章	114



圖目錄

圖 1，測線分布圖與探勘區域衛星地圖。.....	11
圖 2，測線分布圖與探勘區域地質圖。.....	12
圖 3，測線分布圖與探勘區域高程圖。.....	13
圖 4，大屯火山群之地震帶。.....	16
圖 5，大屯火山群東部低速區域。.....	16
圖 6，地電阻探測原理示意圖。.....	23
圖 7，電極陣列示意圖。.....	24
圖 8，儀器系統設備架構圖.....	27
圖 9，多波道電場記錄之地電阻儀器。.....	28
圖 10，簡易除草和障礙物清除工作。.....	38
圖 11，現地全站儀測量。.....	39
圖 12，現地 RTK 測量。.....	40
圖 13，佈置不鏽鋼電極棒並確保電極棒與地表材料接觸良好。.....	41
圖 14，使用三用電表確保纜線與電極通路。.....	42
圖 15，YX1 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	47
圖 16，YX1 測線之 QCV 剖面。.....	48
圖 17，YX3 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	49
圖 18，YX3 測線之 QCV 剖面。.....	50
圖 19，YX4 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	51
圖 20，YX4 測線之 QCV 剖面。.....	52
圖 21，YX5 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	53
圖 22，YX5 測線之 QCV 剖面。.....	54
圖 23，YX6 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	55
圖 24，YX6 測線之 QCV 剖面。.....	56
圖 25，YX7 測線之測線之中位數地電阻剖面。.....	57
圖 26，YX7 測線之 QCV 剖面.....	58
圖 27，YX3 與其他測線交錯位置。.....	59
圖 28，YX4 與其他測線交錯位置。.....	60
圖 29，YX5 與其他測線交錯位置。.....	61
圖 30，YX6 與其他測線交錯位置。.....	62
圖 31，YX7 與其他測線交錯位置。.....	63
圖 32，所有測線之三維柵狀圖與平面探勘區域衛星地圖。.....	64
圖 33，所有測線之三維柵狀圖與立體探勘區域衛星地圖。.....	65
圖 34，岩石電阻率分布圖，修改自 Palacky (1987)。.....	69
圖 35，測線及鑽井分布圖與探勘區域衛星地圖。.....	70

圖 36，七星池地區岩芯柱狀圖，資料來源：宋聖榮（2021）。.....	71
圖 37，測線及鑽井分布圖與探勘區域衛星地圖。.....	72
圖 38，小油坑一號井岩芯柱狀圖。.....	73
圖 39，YX1 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	74
圖 40，YX1 測線之中位數地電阻剖面與噴發通道示意圖。.....	75
圖 41，YX3 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	76
圖 42，YX4 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	77
圖 43，YX5 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	78
圖 44，YX6 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	79
圖 45，YX7 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。.....	80
圖 46，小油坑噴氣口區域之三維柵狀圖與平面探勘區域衛星地圖。.....	81
圖 47，火山活動的主要影響範圍圖（直徑 100 公尺）。.....	85
圖 48，火山活動的主要影響範圍圖（直徑 105 公尺）。.....	86
圖 49，火山活動的主要影響範圍圖（直徑 210 公尺）。.....	87
圖 50，熱液與噴發潛勢平面圖。.....	88
圖 51，熱液與噴發潛勢三維圖。.....	89

表目錄

表 1，地電阻調查基本資訊。.....	31
表 2，地電阻測線 YX1 詳細資訊。.....	32
表 3，地電阻測線 YX3 詳細資訊。.....	33
表 4，地電阻測線 YX4 詳細資訊。.....	34
表 5，地電阻測線 YX5 詳細資訊。.....	35
表 6，地電阻測線 YX6 詳細資訊。.....	36
表 7，地電阻測線 YX7 詳細資訊。.....	37
表 8，七星山西北麓地區岩石電阻率表.....	82
表 9，小油地區火山活動影響面積與地下流體的資源量估算。.....	90

中文摘要

陽明山國家公園是臺灣唯一擁有火山自然景觀的國家公園。自 1970 年代開始，陽明山地區進行了許多地球科學研究調查，以收集有關地質、礦物、熱液溫度等地下資訊。整合大屯火山群過去的地質、地球物理和地球化學的研究成果，大屯火山群已被認定為一座活火山，其明顯的火山相關活動和噴發潛勢，可能導致嚴重的地質災害。因此，進行勘查和監測熱液活動及潛在噴發路徑的工作是必要的。

根據前人研究指出，大屯火山群的後期噴發主要是以蒸氣噴發為主，七星山蒸氣型噴發是屬於地下有熱液儲集層、累積氣體壓力後噴發形成。這暗示其中從在幾項重要特徵：火山流體上升、存在地下水且被加熱、存在黏土質蓋層，當累積的壓力超過黏土質蓋層的強度就發生蒸氣型噴發。而地電探勘方法對於地層中的含水區域、導電物質和構造變化具有極高的敏感度，適用於探勘地下熱液活動與潛在噴發路徑。

本計畫之觀測結果，可用於配合不同的地球物理、地球化學、地質學等本計畫使用對於近地表探測能力佳的地電阻影像法（Electrical Resistivity Tomography, ERT）在地形條件許可的區域內進行探測，完成 6 條 ERT 測線，初步探查七星山西北麓地區的淺部地下電性構造，嘗試推估地下熱液、導電礦物（例如硫磺）與裂隙的分布情況。過去許多國外火山地區研究，已證實地電阻影像法之分析方法與解析能力，適用於火山地區近地表的探勘領域之分析數據交互驗證，並協助政府相關部門和學術機構進行火山活動評估與制定應對潛在災害的對策，保護周邊居民和遊客的生命財產安全。

從電性構造模型結果中判釋七星池地區可能存在古老的噴發通道，其位置主要在七星池上池與下池，推測至少向地下延伸超過 30 公尺。小油坑爆裂口也觀測到向地下延伸的低電阻異常區，應與噴發通道有關。在噴氣活動強烈的小油坑爆裂口附近，存在極低（低於 $1\Omega\text{m}$ ）的低電阻率異常區，此現象與過去大油坑研究結果一致。但在七星池地區並不存在低於 $10\Omega\text{m}$ 的電阻率異常。整理過去研究可發現，活動中的噴發通道附近常見存在大量的導電礦物，隨著噴氣活動度降低，導電礦物比例下降，電阻率也提升。七星山地區的極低電阻異常區主要成因是大量的導電礦物，而導電礦物的分布範圍必然與熱水、裂隙、噴發活動有密切的關係，從電性模型中判斷小油坑爆裂口下方地下流體資源量約為 75,766 立方公尺。本計畫建議短期內可進行小油坑地區噴氣孔移棲情形調查及觀測，以維護公共設施及遊客安全，並推廣本案研究成果，納入園區火山科普教育；中長期建議可於熱液與噴發高潛勢位置設立地電阻影像法監測站，作為火山防災基礎；另增加更多有效之地電阻探測，以深入了解地下構造。

關鍵字：近地表地球物理探勘，地電阻影像法，大屯火山群，七星山

ABSTRACT

Yangmingshan National Park is the only national park in Taiwan that possesses natural volcanic landscapes. Since the 1970s, the Yangmingshan region has been the subject of numerous earth science research investigations aimed at gathering information on geology, minerals, and hydrothermal temperatures. In recent years, a significant amount of geophysical and geochemical techniques has been applied to study the volcanic activity of the Datun Volcanic Group, indicating that it is a potentially reactivatable active volcano.

Regarding volcano investigation and monitoring, results from soil gas analysis, crustal deformation measurements, and seismic observations suggest the existence of a magma reservoir beneath northern Taiwan, and the Datun Volcanic Group exhibits clear volcanic activity and eruption potential, which could lead to severe geological hazards. Therefore, conducting surveys and monitoring of hydrothermal activity and potential eruption paths is necessary. The later eruptions of the Datun Volcanic Group are mainly characterized by steam explosions, where conditions include the ascent of volcanic fluids, a clay cap impermeable to water, and the accumulation of gas pressure reaching saturation and exceeding the strength of the overlying rocks. Electrical resistivity imaging methods have high sensitivity to water-bearing zones, conductive materials, and structural changes in geological formations, making them suitable for exploring underground hydrothermal activity and potential eruption paths. However, early studies were limited by instrument constraints, resulting in relatively coarse spatial resolution of the electrical resistivity data, which has prevented the exploration of fluid channels and hydrothermal eruption paths in shallow areas.

This project aims to utilize electrical resistivity tomography (ERT), a method with better shallow resolution capabilities, for more in-depth research. The project plans to design six ERT survey lines to initially investigate the shallow subsurface electrical structure in the northwest foothills of Qixing Mountain, attempting to determine the distribution of underground hydrothermal fluids, sulfides, and fractures to estimate the possible distribution of hydrothermal enrichment layers and channels. Many previous studies in volcanic areas abroad have demonstrated the suitability of the electrical resistivity imaging method and its analytical capabilities for near-surface exploration in volcanic regions. It can be used to explore underground hydrothermal enrichment layers and fracture distributions, as well as identify potential hotspots for hydrothermal or steam eruptions. The observational results of this project are expected to be cross-validated with analysis data from various fields such as geophysics, geochemistry, and geology, providing more accurate exploration results to assist government agencies and academic institutions in assessing volcanic activity and formulating strategies to

mitigate potential disasters, ensuring the safety of nearby residents and visitors.

Interpreting the electrical structure models, it is inferred that there may be ancient eruption conduits in the Qixing Pond area. Their location is primarily between the upper and lower ponds of Qixing Pond, extending at least 30 meters underground. Observations at the eruptive vent of Xiaoyoukeng also detected a low-resistance anomaly extending underground, which is likely associated with eruption conduits. Near the vigorously active vents of Xiaoyoukeng, extremely low-resistance anomalies (below 1 Ωm) were present, consistent with past research results in Dayoukeng. However, anomalies with resistance below 10 Ωm were not observed in the Qixing Pond area. Reviewing past studies reveals that there is often a significant presence of conductive minerals near active eruption conduits. As the intensity of gas activity decreases, it leads to a reduction in the proportion of conductive minerals and an increase in electrical resistance. The extremely low-resistance anomalies in the Qixing Mountain region are primarily attributed to the substantial presence of conductive minerals. The distribution of these minerals is inevitably closely linked to factors such as hot water, fractures, and eruptive activities. From the electrical models, it is inferred that the subsurface fluid volume beneath the eruptive vent of Xiaoyoukeng is approximately 75,766 cubic meters. This plan suggests that, in the short term, investigations and observations of fumarole migration in the Xiaoyoukeng area can be carried out to maintain the safety of public facilities and tourists. Also these investigations would promote the research results of this case and incorporate them into the park's volcano science education. In the medium and long term, it is recommended that the fumarole migration situation in the Xiaoyoukeng area be investigated and observed by ERT monitoring stations at high-potential locations as the basis for volcanic disaster prevention. More effective ERT survey lines will contribute to additional in-depth understanding of underground structures.

Keywords: near-surface geophysical exploration, electrical resistivity tomography, Tatun Volcano Group, Qixing Mountain

第一章 計畫緣起與目的

大屯火山群是由一群安山岩質的火山組成，共有火山及火山丘二十餘座，熔岩流 15 層以上，並夾有許多凝灰角礫岩層（陳肇夏等，1971）。根據先前研究顯示，大屯火山群的火山活動約始於 2.5 百萬年前上新世末期（Juang & Bellon, 1984; Wang & Chen, 1990）。該時期北呂宋島弧與歐亞大陸的碰撞仍持續，此時北臺灣也仍處於擠壓的環境，因此即使地底有岩漿生成，也不易上升至地表（Shaw, 1980）。大屯火山群到了約 80 萬年前，由於沖繩海槽向西南延伸且弧陸碰撞在臺灣北部有減緩或已停止，使得彈性體的板塊開始回彈（Wang et al., 2004）。故臺灣北部的區域地質構造環境由擠壓轉為張裂的環境，產生許多正斷層裂隙，使得滯留的岩漿容易沿著裂隙上升。此活動一直持續到約 20 萬年前結束，形成大屯火山群現今的模樣（Wang et al., 1999; Song et al., 2000; 宋聖榮等，2011）。然而，近期研究指出大屯火山主體形成的時間可能小於 80 萬年前（Chu et al., 2018）。最新研究也指出分布於七星山東西兩側的爆裂口是由蒸汽噴發所形成的（宋聖榮，2021）。

其中，七星山作為陽明山國家公園的第一高峰，其主峰標高約 1,120 公尺。過去因火山劇烈活動噴出大量岩漿，冷卻凝固後於火山口形成七個大小不一的火成岩山頭而得名。七星山西北麓地區主要存在小油坑噴氣口，至今仍有顯著地噴氣活動，一般認為與近地表熱液系統有關。雖然大屯火山地區過去曾有進行過許多大地電磁法（magnetotelluric method, MT）調查、研究深部（數公里）的電阻率構造（Dobson et al., 2018; Komori et al., 2014, 2017），但近地表淺層（數十至數百公尺）的裂隙構造、潛在的火山碎屑堆積、噴氣孔通道等，有賴以對於淺層解析能力更好的地電阻影像法（electrical resistivity tomography, ERT）進行更深入的研究。對於淺部熱液或蒸氣噴發機制，國外許多火山地區（瓜德羅普島、菲律賓、義大利等）研究，已成功使用地電阻影像法探查地下熱液富集層與裂隙分布，並發現熱液或蒸氣的噴發潛勢熱區（Brothelande et al., 2014; Fikos et al., 2012; Gresse et al., 2017）。而國內過去曾使用地電阻影像法於臺灣北部山區（新北市雙溪與福山地區）探測堆積層與地下含水層厚度。其研究成果推測福山區域河流堆積層厚度約為 30 至 40 公尺，並且隨地形向北緩降；雙溪地區深度 11.5 公尺以上為未固結之河流堆積層，以下岩層則相對新鮮且完整（李奕亨，2018）。這些研究皆顯示地電阻影像法對於地下流體有極高的敏感度，並且能有效探測地下流體分布與流通路徑。

本計畫的施測地區為七星山西北麓，位於台北市北投區，屬於大屯火山群的一部分。原規劃 3 條 ERT 測線，分別為 YX1、YX2、YX3，但依照 112 年 6 月 2 日期初審查會議之決議，建議執行單位嘗試調整 YX2 測線至小油坑爆裂口下方位置。執行過程中遭遇險惡地形，無法延伸測線至指定長度。因此，於 112 年 9 月 6 日辦理第一次工作會議，決議再次場勘並參酌委員意見進行測線修正。

最終本計畫共施測 6 條 ERT 測線，其中 1 條測線經過七星池，其餘 5 條的交點在小油坑爆裂口附近，如圖 1 所示。圖 1 為測線分布圖與探勘區域的衛星地圖，研究區域範圍為 TWD97 二度分帶座標 304884mE 至 305590mE，2785440mN 至 2784997mN。另外，圖 2 顯示測線分布與探勘區域的地質圖，而圖 3 則展示測線分布與探勘區域的高程圖。測線選擇主要針對過去的噴氣通道（七星池）、現在活躍的噴氣通道（小油坑爆裂口），建立地下電性構造模型，優先考量遊客安全、避開遊憩熱區，並選擇不影響生態保育之路徑，最後確認能安全完成簡易除草的地方（避開可能因除草而崩塌的地區）。本計畫完成 6 條 ERT 測線調查工作，初步探查七星山西北麓地區的淺部地下電性構造，嘗試判斷地下熱液、硫化物及裂隙分布，以推估地下熱液富集層及通道可能的分布，並評估熱液或蒸氣噴發潛勢熱區，作為陽管處後續研究推動及經營管理參考，並嘗試概估七星山西北麓的熱水資源量及分布範圍以增加園區基礎資料，同時作為火山教育推廣使用。

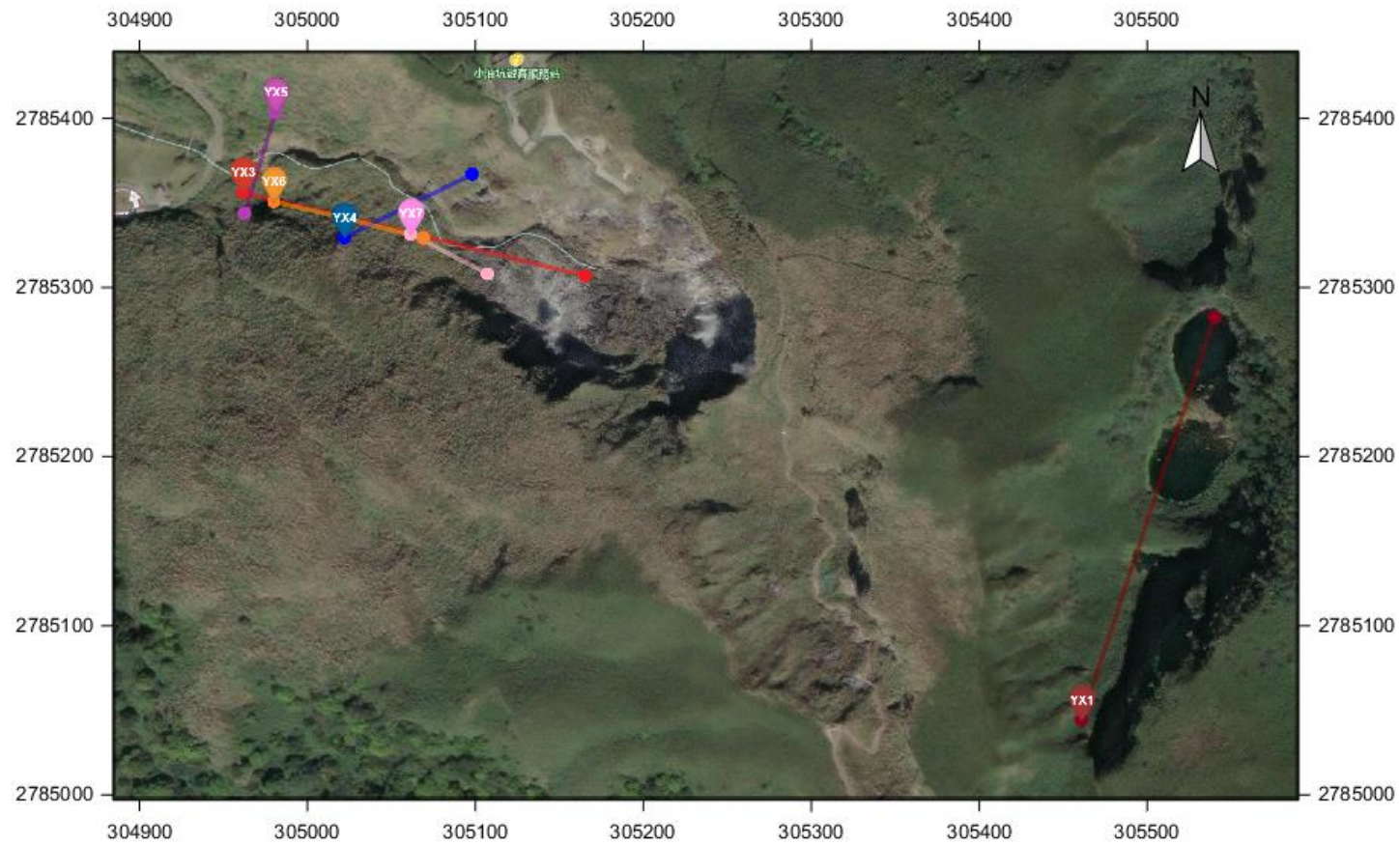


圖 1，測線分布圖與探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。區域內有 6 條地電阻率剖面調查，分別為 YX1、YX3、YX4、YX5、YX6、YX7 測線。其中大頭針所標示位置為測線起點。

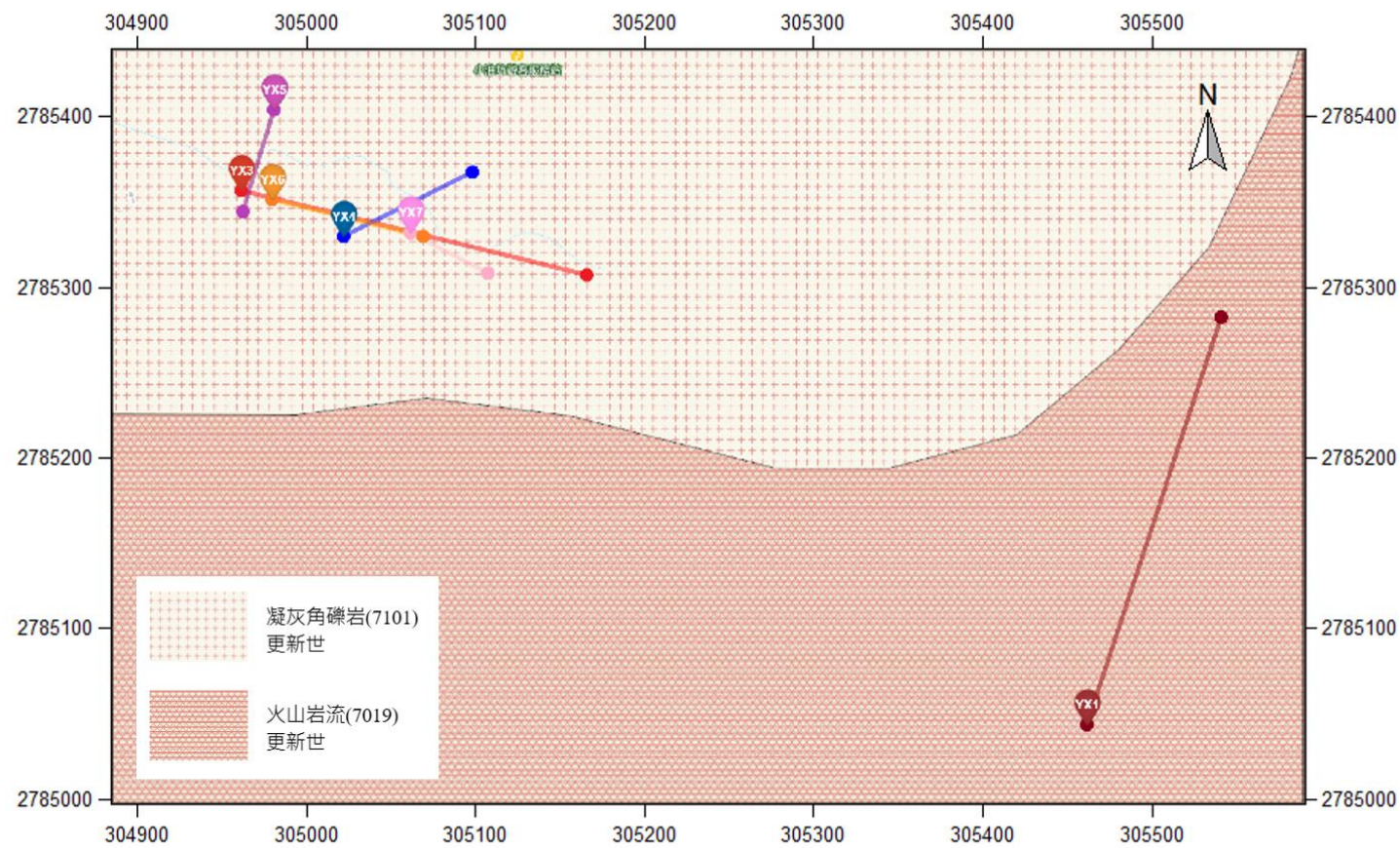


圖 2，測線分布圖與探勘區域地質圖（資料來源:經濟部地質調查及礦業管理中心）。區域內有 6 條地電阻率剖面調查，分別為 YX1、YX3、YX4、YX5、YX6、YX7 測線。其中大頭針所標示位置為測線起點。

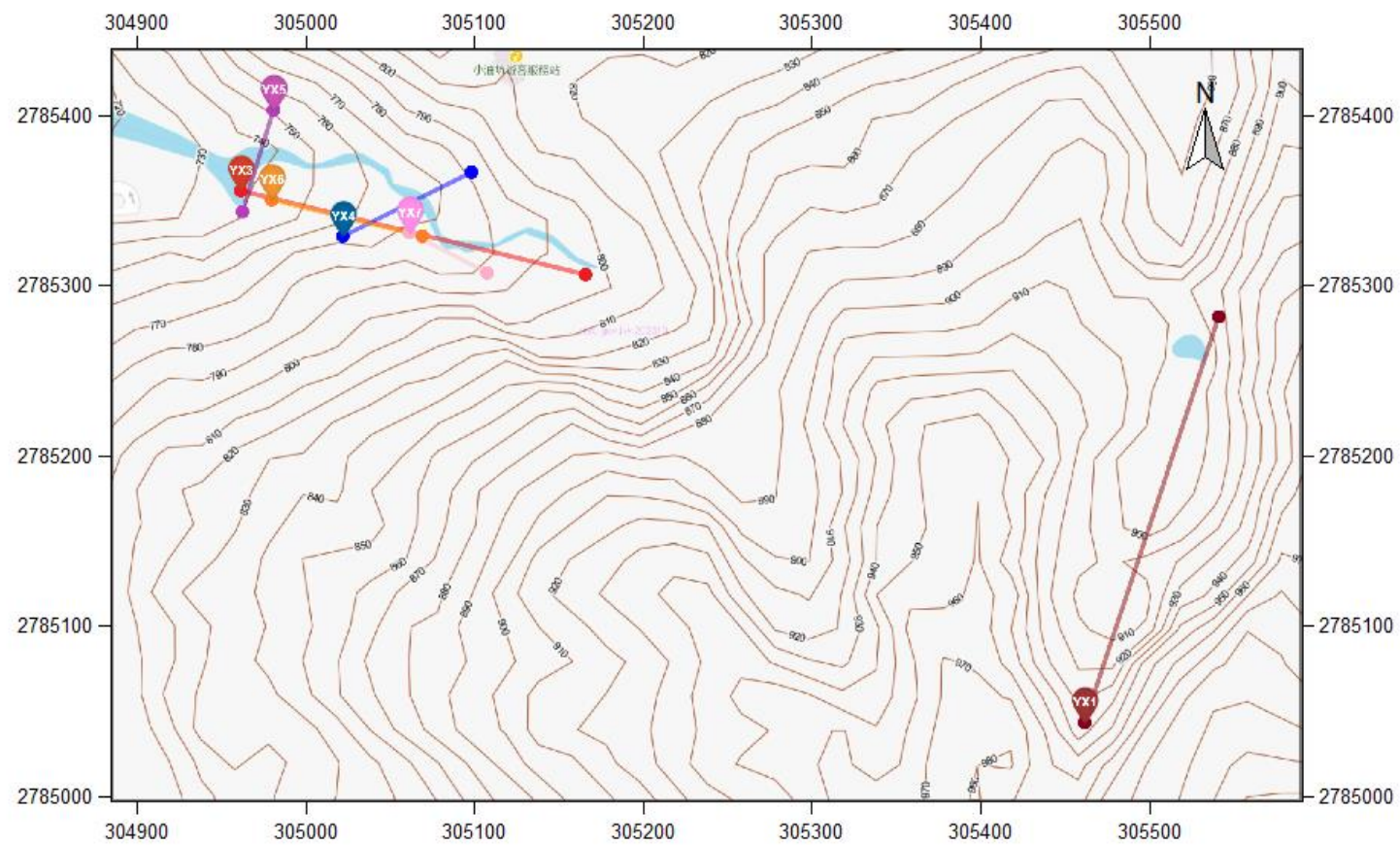


圖 3，測線分布圖與探勘區域高程圖（資料來源：內政部國土測繪中心）。區域內有 6 條地電阻率剖面調查，分別為 YX1、YX3、YX4、YX5、YX6、YX7 測線。其中大頭針所標示位置為測線起點。

第二章 文獻回顧

陽明山國家公園為臺灣唯一具有火山自然景觀之國家公園。依據過去地質、地球物理和地球化學的研究成果，以及活火山經驗定義或現象定義，皆顯示大屯火山群為一座活火山，具有再度活動的可能性。故大屯火山群之地下構造與資源分布情形，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。

自 1970 年代起，陽明山地區進行了許多地球科學研究之調查。在馬槽地區，早期曾鑽探 58 口深度介於 47 至 155 公尺之試驗井，以及 7 口深度介於 411 至 1005 公尺之探勘井，用以調查地熱能源開發之可行性 (Feng & Huang, 1970)。工業技術研究院與台灣中油股份有限公司更在大磺嘴、馬槽、四磺坪和金山地區鑽探共 62 口溫度梯度井 (深度介於 35 至 622 公尺) 與 20 口探勘井 (深度介於 622 至 2001 公尺)，用於收集關於地質、礦物、熱液溫度等地下資訊 (Lan et al., 1980)。近年來，大量的地球物理和地球化學技術用於研究大屯火山群之火山活動。在火山調查與監測的應用方面：小油坑監測站在 2008 至 2011 年期間分析了土壤氣體中的二氧化碳含量。連續三年的監測顯示，小油坑地區的二氧化碳濃度變化極大，範圍從 0.02% 到 48%。這樣變異性極大的二氧化碳濃度，暗示著本地區的地熱活動非常不穩定。同時利用在菁山、竹子湖、萬里、八煙和冷水坑的五個地殼變形監測站，獲知大屯火山群與臺灣北部地區每年大約以 2 到 3 公分左右之平均地殼變形速度向東南方向移動 (林正洪等人，2011 年)。除此之外，大屯山微震網所觀測之連續地震記錄，發現七星山及大油坑附近，有明顯的微震活動存在。並且在這些微震中發現有少許的群震現象，即有些微震在短時間內同時發生於很小的地區內。這現象與一般火山地熱區所觀測之群震現象相同 (林正洪，2004 年)。2014 至 2017 年，蒲等人使用雙差地震層析成像 (Double-Difference Seismic Tomographic Inversion, tomoDD) 技術，對北臺灣的大屯火山群超過 2,000 次微震的 P 波和 S 波到時進行逆推。其結果顯示大油坑與七星山下方為兩個主要的地震帶 (圖 4)，推測這兩個地震帶皆由深部岩漿儲存庫上升的大量火山氣體和流體所造成 (Pu et al., 2020)。2021 年，利用中央研究院地球科學研究所與大屯火山觀測站共同設置的臺灣陣列 (Formosa array, FMarray) 之地震波數據進行三維逆推，發現在大屯火山群東部下方 8 至 20 公里處，P 波速度降低 19%。推測為一岩漿庫，一路向北延伸到較淺的地層 (圖 5) (Lin et al., 2020; Huang et al., 2021)。氦同位素研究結果也顯示，陽明山地區的噴氣與溫泉氣有大於 60% 源於深部地函的氣體組成 (Yang et al., 1999; 楊燦堯，2000; 楊燦堯等人，2003)，暗示臺灣北部地底下非常有可能存在岩漿庫。這些證據皆指出大屯火山群具有明顯的火山活動與噴發潛勢，可能會造成嚴重的地質災害。因此勘查、監測熱液活動與潛在噴發路徑之工作具有其必要性。

從七星山兩側火山爆裂口之噴發產物、年輕的火山碎屑堆積物和土壤之石英顆粒來源，顯示大屯火山群後期的噴發是以蒸氣噴發為主（宋聖榮等人，2020 年）。發生蒸氣型噴發的條件包括火山流體的上升、不透氣水的黏土質蓋層，以及累積氣體壓力達飽和超過上覆岩石的強度。其中，電性探勘方法對於地層含水區域、導電物質和構造變化有極高的敏感度。過去在大磺嘴和馬槽地區曾經做過垂直電探法（Vertical Electric Sounding, VES）調查，利用電阻率測量找到含熱流體的低電阻區域。根據垂直電聲探測資料和實驗結果評估，在調查區域中各種岩石的電阻率如下：安山岩 1200-3000 Ωm 、火山碎屑物（包括火山碎屑、凝灰岩、角礫岩等）50-1000 Ωm 、中新世沉積岩 20-100 Ωm 、以及水熱改造岩和含熱流體的地層小於 20 Ωm （Cheng, 1970）。近年，則在大屯山地區使用音頻大地電磁法（Audio-Magnetotellurics, AMT）以及超低頻大地電磁法（Very Low Frequency Magnetotellurics, VLF-MT）進行深部電阻率剖面（深度約數公里到數十公里）的地球物理探勘（Komori et al., 2014, 2017）。然而，這些研究部分是受限於早年儀器，電阻率結果的空間解析相對粗糙；部分研究則是以深部岩漿庫為主要研究標的，呈現深度數公里以上的深部電阻率剖面。對於淺部場址尺度（例如小油坑及硫磺谷）之熱液噴發與潛勢尚未有相關調查，因此近地表的流體通道、熱液噴發路徑至今未能窺探。

本計畫使用地電阻影像法（Electrical Resistivity Tomography, ERT）探勘七星山西北麓地區淺部地下電性構造，並嘗試判斷地下熱液、硫化物及裂隙之空間分布。相較於過去的探勘方法，此方法之優勢在於：對於近地表之電性構造具有極高的解析能力、易於判釋地下流體分布範圍與流通路徑、施測快速且經濟等。本團隊過去曾於馬槽與大油坑地區設置共 6 條地電阻測線進行試驗，其結果顯示地下電阻率數值具有明顯之差異，可用以判釋不同地下材料的分布範圍。推測地電阻影像法之分析方法與解析能力，適用於火山地區近地表的探勘研究。同時擬在本計畫中配合不同的地球物理、地球化學、地質學等領域之分析數據交互驗證，提供更為準確的探勘結果，以利政府相關部門與學術單位進行火山活動評估與規劃可能災害之準備與應變對策。

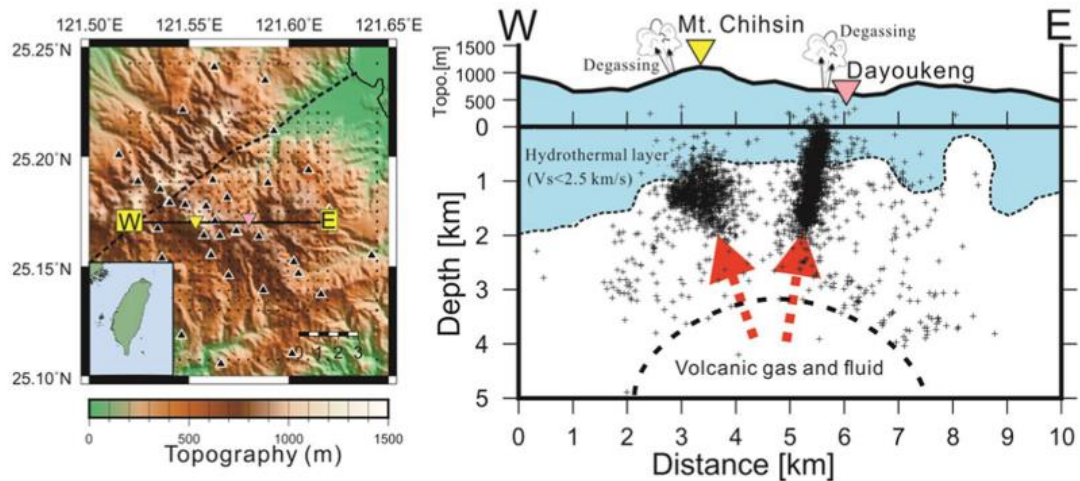


圖 4，大屯火山群之地震帶。大屯火山群地圖（左）。大油坑與七星山東西向剖面之地震活動投影和上升的火山氣體與流體示意圖（右），淺藍色區域為淺部的熱液層（ V_s 小於 2.5 公里/秒）（圖片取自 Pu et al., 2020）。

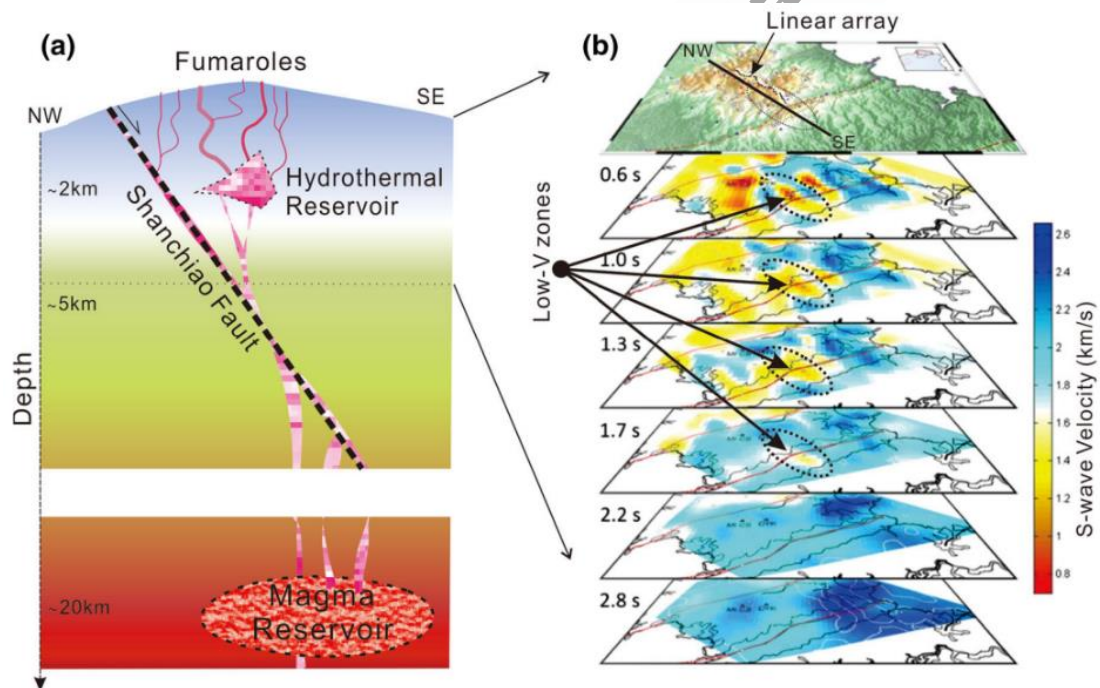


圖 5，大屯火山群東部低速區域。(a) 斷層帶、淺部熱液儲層與疑似岩漿儲層的示意模型。(b) 逆推後得到不同深度的速度分布（虛線圓圈內為低速區域）（圖片取自 Lin et al., 2021）。

第三章 研究方法

本章將對地電阻影像法基本原理、逆推理論與方法，以及本團隊所發展之地電阻逆推分析流程進行更進一步的說明。

(一) 地電阻影像法基本原理

地電阻影像法，簡稱地電阻法，為一非破壞性之地球物理探勘方法。其測勘原理是利用直流電或低頻交流電流經由一對電流供應電極（A、B）通入地下土層間，於地層間建立起一人工電場，同時利用另一對電位量測電極（M、N）測量在 M、N 間之電位差（圖 6），並根據幾何因子計算出地層的視電阻率（Apparent Resistivity）。

視電阻率值並非等於地下地層物質之真實電阻率（True Resistivity），而僅是表示在 A、B、M、N 電極排列下，對應於某一有效深度內，所有地質材料的綜合電性效應，可類比成電路上的等效電阻值。若要進一步求得地下地層之真實電阻率值，則要針對視電阻率資料進行逆推演計算，並繪出地層的真实電性構造剖面。

藉由改變上述的電極排列方式以及施測的位置與順序，即可測得不同解析度、不同測深範圍內的真實地層電阻率剖面。基本的電極排列法包括施蘭伯吉排列（Schlumberger Array）、溫奈排列（Wenner Array）、雙偶極排列（Dipole-dipole Array）以及雙極排列（Pole-pole Array）等（圖 7）。

對於中小深度範圍內的環境監測與地下測勘，目前常施作的地電阻測量方式，是在地表以一定間距佈設電極成一線形測線，再運用市售之地電阻儀器內建的自動調變頻道功能，依預先選定之順序，逐次選用不同位置之電極，分別作為電流與電位極，快速量測不同電極排列下的不同深度、不同位置之視電阻率分布，再經過逆推計算得到二維地電阻影像剖面。

假設一測線上任意四極排列，由 A、B 極通入電流 I，M、N 極測量電位差 ΔV ，此測量電位差可以公式表示為：

$$\begin{aligned}\Delta V &= V(\overline{AM}) - V(\overline{AN}) - V(\overline{BM}) + V(\overline{BN}) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}} \right) \right]\end{aligned}\quad (1)$$

其中， ρ 為電阻率； $\overline{AM}$ 、 $\overline{BM}$ 、 $\overline{AN}$ 、 $\overline{BN}$ 為兩電極間距。若定義 K 為電極幾何因子：

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}} \right) \right]^{-1}\quad (2)$$

則式 (1) 可改寫為：

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

其中幾何因子 K 依照電極相對位置而改變。然而，測線下地層普遍並非均勻、等向性介質，式 (3) 的電阻率 ρ 須以視電阻率 ρ_a 取代較為合適。

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

(二) 逆推理論

在地球物理模型求解問題中，包含順推 (Forward) 與逆推 (Inverse) 兩種過程。其中，由實際地層或模擬地層以地球物理理論基礎推估出各種期望觀測物理量的過程，先有模型後有其依循理論的物理響應，直觀上即稱為順推過程；而利用各種野外物理感測器實地量測響應物理量後，經過各種模型假設及數值方法等過程，估算並得到最佳模型解（或此模型的理論響應物理量最接近野外量測數據），則稱為逆推過程。

假設一含有 n 個元素的離散化模型參數 m ，經由順推過程後，可計算出一含有 m 個元素的理論觀測物理量 d ，則上述過程可以寫為：

$$F[m] = d \quad (5)$$

其中 F 為順推函數。地球物理逆推過程即是由觀測資料 d 反求模型 m 。然而，在現實世界中，由於隨機的物質運動、非理論上分析的能量等干擾、或儀器讀值及儲存數值精確度等因素，在野外量測過程中，觀測紀錄常會受到一定程度的干擾或偏差，受干擾的資料與真實地層間關係可寫為：

$$d = F[m_{true}] + \delta \quad (6)$$

其中 m_{true} 為真實參數， δ 為測量時產生的雜訊。一般情況下，假設 δ 符合常態分布。觀測資料因包含雜訊的問題，可能因每次觀測數據的些微差異而導致逆推出不同的最佳模型，因此，降低雜訊對於逆推模型的影響在逆推過程中實為一相當重要的工作。

透過定義擬合度 (goodness of fitting) 及限制模型崎嶇度 (roughness)，可以在一定程度內，有效降低雜訊及誤差對於逆推模型的影響。擬合度常由最小均方根法 (root mean square, rms) 定義為：

$$X^2 = \sum_{i=1}^n (d_i - F_i[m])^2 / \sigma_i^2 = \|Wd - WF[m]\|^2 \quad (7)$$

其中 i 為各元素編號； σ 為觀測誤差； $W = \text{diag}\{1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_m\}$ 為觀測誤差對角矩陣。在式 (7) 中，計算每一筆觀測資料與逆推模型期望資料的差，以觀測誤差進行各筆差量的加權，再將加權後的差量進行總和，誤差越大即表示該筆觀測資料對於擬合度的影響越小。而模型崎嶇度常被定義為：

$$R = Lm \quad (8)$$

其中 L 為崎嶇度矩陣，通常為一階或二階之有限差分矩陣，但也可為其他定義。

在嘗試透過逆推算過程以得到一響應函數擬合度最佳的模型時，仍需考慮野外觀測資料所記錄到而無可避免的誤差，因此，權衡最小化法（damped least square，或稱 Tikhonov Regularization）即是在最小化擬合度的同時，將模型崎嶇度一併加入欲最小化的目標函數（objective function）中：

$$\begin{aligned} \min \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - F_i[m])^2}{\sigma_i^2} \right] + \alpha^2 \left[\sum_{j=1}^n L_j m \right] \right\} \\ = \min \{ \|Wd - WF[m]\|^2 + \alpha^2 \|Lm\|^2 \} \end{aligned} \quad (9)$$

其中， α 為權衡參數（trade-off parameter），用以控制模型崎嶇度對整個最佳化運算的影響力大小，即 α 值越大則崎嶇度的影響力越大，使得最佳模型解的值越平滑（smooth）；反之， α 值越小則最小化過程中越重視資料擬合度，最佳模型則越崎嶇，過度重視資料擬合度將容易導致過度解釋的情形（Aster et al., 2018）。以權衡參數控制模型表現的概念依循拉格朗乘數法（Lagrange multiplier），在兩個變數（資料擬合度及模型崎嶇度）間找到極值，或表示在被另一個函數限制下求出一函數的極值，因而將權衡參數置於模型項，即是表示在給定加權 α 之模型崎嶇度 Lm 的約束條件下，盡可能地讓逆推模型的響應函數與觀測資料的差異最小化。

（三）逆推方法

由於多數地球物理逆推問題均涉及非線性問題，各資料點的響應範圍會隨著模型而改變。在此非線性問題下經常以迭代法使逆推模型的響應函數逐次逼近觀測資料，在每一次迭代過程應較上一次更加靠近野外觀測數據。因此，如何決定逆推過程中的模型變化方向即是逆推過程中最關鍵性的部份。依據迭代法的觀念，大部分非線性物理逆推均需要初始猜測的模型，以作為逆推過程的起始點，每一次迭代的模型解與上一次迭代模型的關係為：

$$m_i = m_{i-1} + \Delta \quad (10)$$

其中 i 為迭代次數； Δ 為前後兩次模型值的差異量，或可視為該次迭代過程中模型變化的方向。而每次迭代過程的模型響應函數則可透過式（5）及式（10）表示為：

$$F[m_i] = F[m_{i-1} + \Delta] = F[m_{i-1}] + J_{i-1}\Delta + \varepsilon \quad (11)$$

其中 J 為雅可比矩陣(Jacobian or gradient matrix)，用以計算數據域(data domain)的迭代方向； ε 為近似殘餘量。利用上述式（11）數據域的迭代關係，則可將目標函數式（9）改寫為：

$$\min\{\|W(d - F[m_{i-1}] + J_{i-1}m_{i-1}) - WJ_{i-1}m_i\|^2 + \alpha^2\|Lm\|^2\} \quad (12)$$

則此近似過程即可視為一線性問題（Constable et al., 1987），藉由計算每次迭代模型的雅可比矩陣，即可決定模型變化方向 Δ 。而根據不同的需求、假設及理論，已衍生出許多逆推的方法。目前 ERT 常用之二維逆推演算方法主要有三種，阻尼最小平方法（Damped least squares inversion）、平滑約束最小平方法（Smooth model inversion）以及迭代反覆加權最小平方法（Robust inversion）。本研究所使用的逆推演算方法為平滑約束最小平方法，其目標函數與式（9）類似，如式（13）所示。

$$S(m) = (d_{obs} - g(m))^T W_d (d_{obs} - g(m)) + \alpha \cdot m^T R m \quad (13)$$

其中， α 為拉格朗乘數（Lagrange multiplier），其意義與前述的權衡參數 α 概念相同。 R 為粗糙度因子（roughness operator），其意義與前述崎嶇度矩陣 L 概念相同。本計畫使用美國 AGI 公司研發的 EarthImager2D 軟體程式，進行逆推運算。

（四）原始資料處理

本計畫於野外資料收集所使用的儀器設備為 R2MS 系統，其規格詳見第六章。此儀器使用多重發射電流源，並藉由一對電位極（M、N）量測多重發射電流源通過不同電阻材料 R 時所對應的電位差 ΔV 。三者間的關係以式（14）表示（以兩組電流源為例）。

$$[\Delta V] = [I_{A_1B_1} \ I_{A_2B_2}] \begin{bmatrix} R_{A_1B_1} \\ R_{A_2B_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中， $I_{A_1B_1}$ 為由電流極 A_1 、 B_1 通入地層中的電流； $I_{A_2B_2}$ 為由電流極 A_2 、 B_2 通入地層中的電流； $R_{A_1B_1}$ 為電流 $I_{A_1B_1}$ 所通過的地下介質之電阻值； $R_{A_2B_2}$ 為電流 $I_{A_2B_2}$ 所通過的地下介質之電阻值。

然而，實際測量值常受雜訊、地下材料特性和異常的放電訊號等影響，使得原始資料包含誤差。因此，處理原始資料中所涵蓋的誤差有其必要性。處理

誤差之技術參考前人研究（吳秉昀，2017；朱侖蓁，2020；蔡武男，2021）。最後，根據式（14），利用反除法即可由量測的電壓值和設定的電流值得到對應的電阻值。進一步利用式（2）與式（4）求出期望觀測物理量，即視電阻率。

（五）地電資料篩選

在 R2MS 系統下，每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，該資料量超過 EarthImager2D 所能一次讀取並進行逆推之資料量。故需從原始資料抽取適量資料點以進行逆推。

本研究優先篩選地電觀測中測量品質較好之資料點。測量品質可藉由每一測線之重複施測各電極配對之穩定度判斷。透過於不同時間段收取之地電資料，進行阻抗解算後，計算其隨時間之變化率。假設鄰近時段且背景條件一致，阻抗變化率應該甚小。因此，倘若阻抗變化率在部分資料點顯示有明顯差異時，我們便判斷這些資料點為雜訊相對較大之電極配對。這些資料點在進行逆推電阻率模型前需先被去除。

假設在鄰近時段且背景條件一致的情況下，對於同組電極配對之重複施測所量測之阻抗變化率應該甚小。因此，本計畫藉由計算阻抗變化率，移除在穩定狀態下變化率過大之電極配對所量測之資料點。阻抗變化率公式如式（15）所示。

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left| \frac{Obs_i - Obs_j}{Obs_i} \right|}{C_2^N} \times 100\% \quad (15)$$

其中 Q 代表品質參數值； N 代表於每一測線重複施測的次數； Obs_i 和 Obs_j 分別代表不同的重複施測， C_2^N 則表示在組合數學中， N 取 2 的所有可能組合。

（六）隨機分組

因觀測資料量極為龐大，超過逆推軟體限制，故本研究將資料隨機抽樣後進行逆推運算。隨機抽樣工作進行多次，此時可得多組觀測資料集。每組觀測資料集可分別進行逆推運算。一般來說，我們會選擇至少 20 組以上資料集進行後續分析。

（七）重複逆推

本計畫因考量觀測資料量極為龐大，以致於逆推運算不易收斂，故利用前次逆推的觀測資料與理論資料殘差，移除殘差值過大的觀測資料，再次進行逆推，此作法稱作重複逆推。一般來說，我們會選擇 4 至 7 次重複逆推，每次刪除 5% 殘差大的資料。

（八）中位數地電阻剖面

傳統上，最佳模型是將所有可用觀測資料進行逆推運算後得到一個地電阻剖面，本計畫則將同一批觀測資料使用隨機抽樣分為多組觀測資料集。每組觀

測資料集使用相同逆推參數進行逆推運算後，我們可以得到多個地電阻剖面，之後再將同一位置的網格之電阻率值計算其中位數（quartile），形成一個中位數地電阻剖面。

（九）四分位數變異係數剖面

完成多組地電資料的逆推後，對於同一位置的網格之電阻率值，可以計算出該網格的四分位數變異係數（Quartile based coefficient of variation, QCV），形成一個四分位數變異係數剖面，以下簡稱「QCV 剖面」。

QCV 為一個小樣本、非常態機率分布離散程度的一種歸一化量度，可作為評估地電阻剖面誤差的有效參數。QCV 係以四分位數為基礎定義，其計算公式為四分位距與中位數之比值，如式（16）所示。

$$QCV = \frac{Q_3 - Q_1}{median} \times 100\% \quad (16)$$

其中 Q_1 代表數列中之第一四分位數； Q_3 代表數列中之第三四分位數； $median$ 代表數列中之中位數。假設某網格的地電阻值中位數為 $100 \Omega m$ ，QCV 值為 10%，那麼我們可以得知該網格的地電阻值有 50% 的機會是在 $90-110 \Omega m$ 的範圍。只要有中位數地電阻剖面與 QCV 剖面，那麼我們可以很好的了解不同格網的地電阻值範圍。

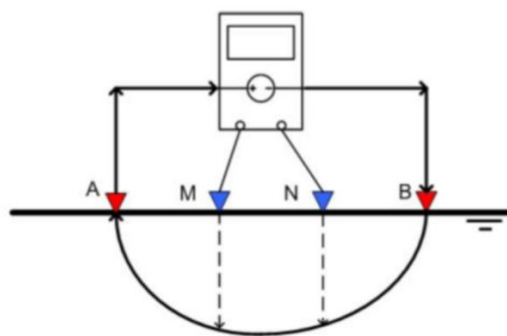


圖 6，地電阻探測原理示意圖。

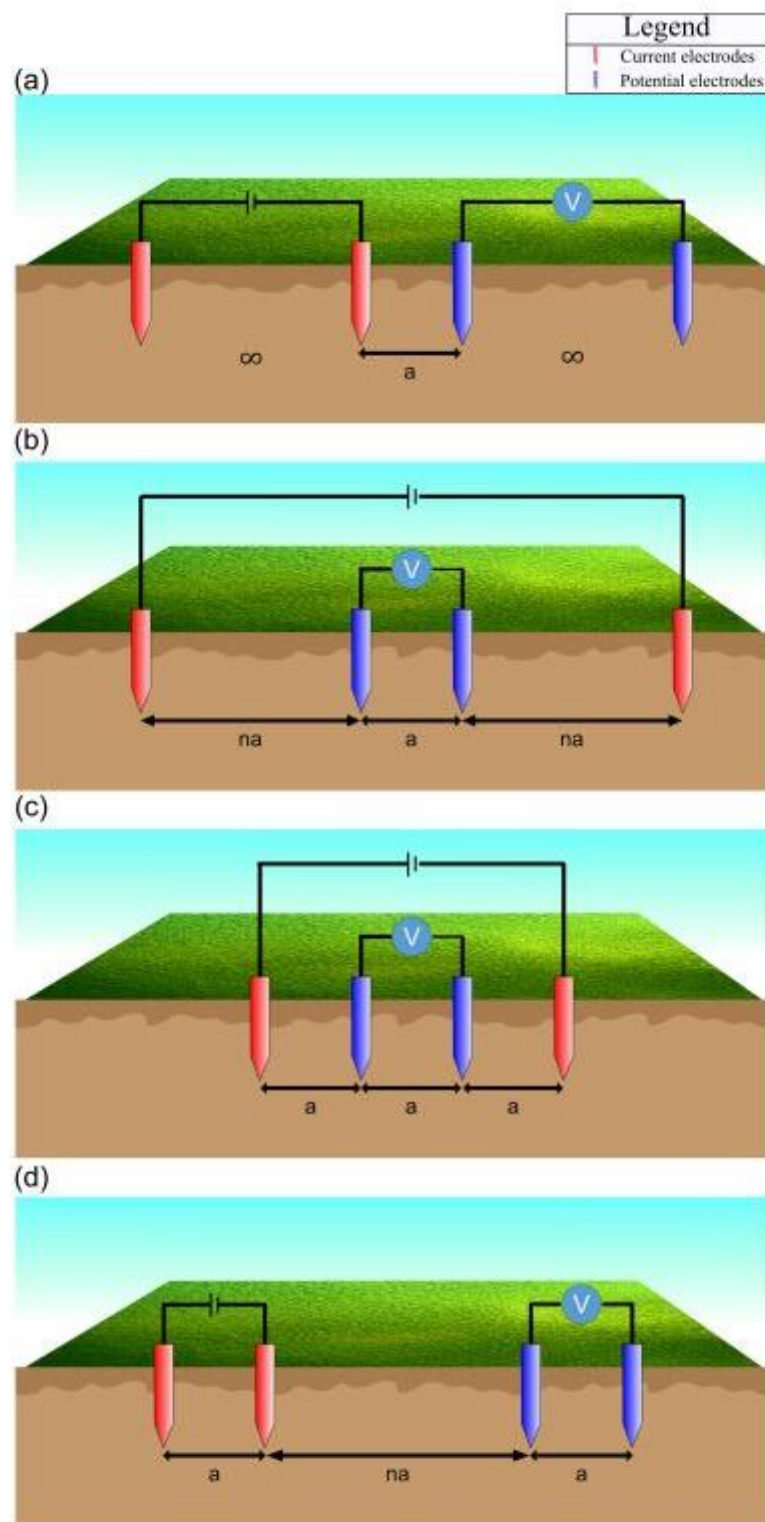


圖 7，電極陣列示意圖。(a) 雙極陣列。(b) 施蘭卜吉陣列。(c) 溫奈陣列。
(d) 雙偶極陣列（圖片取自蔡武男，2021）。

第四章 採用儀器及規格

本計畫基於本團隊過去的探勘經驗，採用了多波道電場記錄和配有自動調變頻道功能的地電阻儀器（圖 8、圖 9）。

該儀器完整名稱為「多波道直流電組法與自然電位法全自動監測系統（Remote Resistivity Monitoring System, R2MS）」，設備主要分為兩部分，分別是地電阻影像剖面自動探測儀與 Power Booster（200W 單組輸出可程式直流電源供應器），而地電阻影像剖面自動探測儀是一內建 64 波道的地電阻探測儀，其具有以下幾項特色：

- (1)可結合地電阻法與自然電位法量測。
- (2)單一或多重發射電流源。
- (3)三十二組以上的多重波道電位記錄。
- (4)即時雲端全自動化監測系統等。

所有設備共包含：

- (1)主機(Remote Resistivity Monitoring System，簡稱 R2MS)
- (2)電源供應器(Power Booster)
- (3)路由器(Router)
- (4)網路線
- (5)鋼棒電極
- (6)接地電極
- (7)同軸電纜線

儀器的規格內容及功能需求羅列如下：

- (1)地電阻影像剖面自動探測儀：

AC/DC 電源皆可使用

工作環境 $0 \sim +60^{\circ}\text{C}$

內建乙太網路(Ethernet)，提供資料傳輸與即時監控

具有 64 Channels (Current Electrode / Potential Electrode)

可控式電流極切換：1~8 channels

電流範圍： $\pm 1000\text{ mA}$ ， 0.2 mA resolution

電壓範圍： $\pm 10\text{V}$ ， 24bit resolution

防突波能力： 22 KA ， $8/20\mu\text{s}$

取樣能力：8ch: 800Hz ，16ch: 400Hz ，32ch: 200Hz ，64ch: 100Hz

可遠端連線(Remote Control)啟動資料收集軟體

可控制施測電壓,電流及電極放電模式並可設置排程，全面自動化

可即時展示電壓、電流值之波形紀錄

可設定記錄檔案大小並經由 FTP 存取檔案

(2)Power Booster, 200W 單組輸出可程式直流電源供應器：

最大電流 100V/2A 或最大電壓 200V/1A 輸出

可程式化調整電壓及電流輸出

解析度 10mV/0.1mA

USB 傳輸介面



系統設備

Making Connection

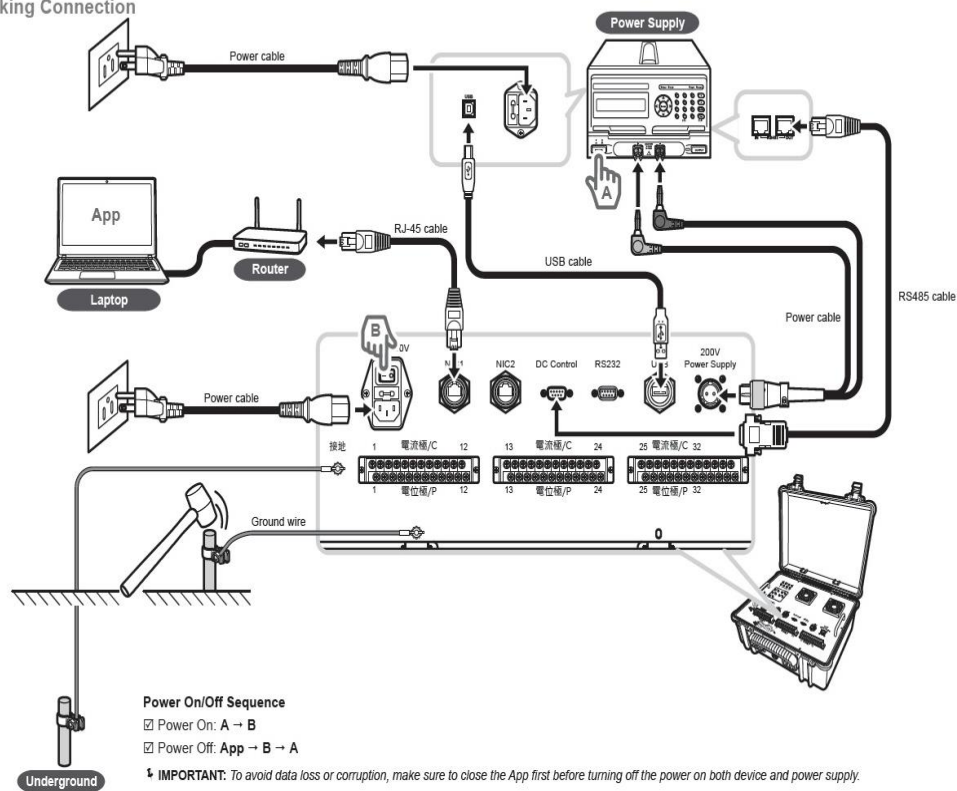


圖 8，儀器系統設備架構圖

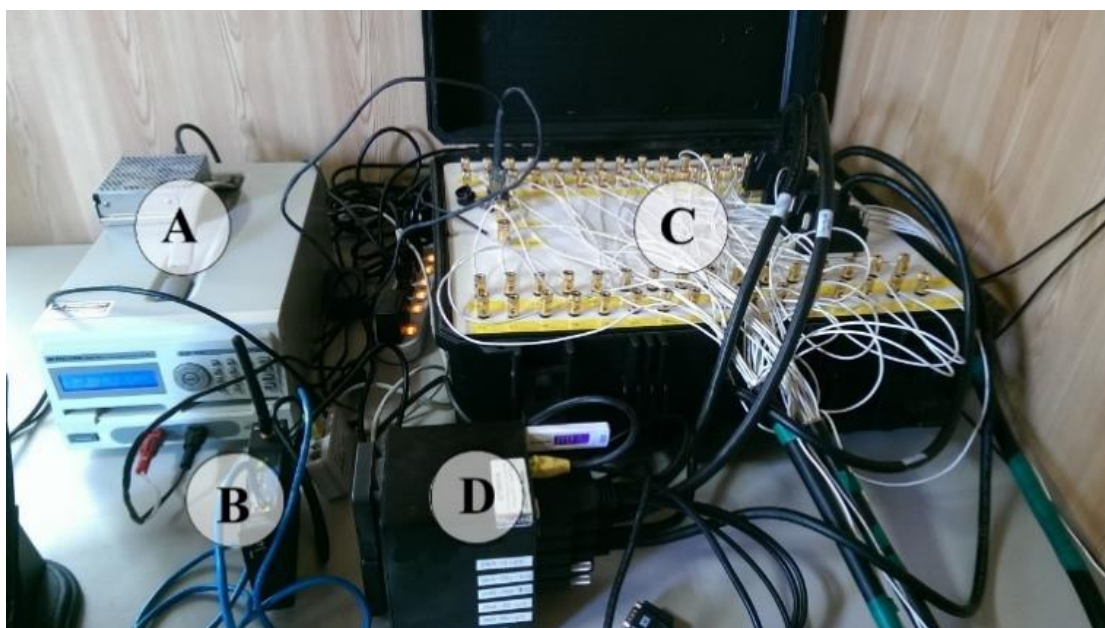


圖 9，多波道電場記錄之地電阻儀器。

A 為電流發射器。B 為網路數據機。C 為多波道電場紀錄盒。D 為配有自動調變
頻道功能的地電阻儀器主機。

第五章 工作執行

(一) 地電阻測線配置

本計畫在 2023 年 7 月 10 日起，執行內政部國家公園署陽明山國家公園管理處七星山西北麓地區地電阻影像剖面法調查，因地形變化劇烈，工作內容包含高程量測工作。如圖 1 到圖 3 所示，研究區域內共施作 6 條地電阻測線，分別命名為 YX1、YX3、YX4、YX5、YX6、YX7。6 條測線沿地表布置，總長度約 813 公尺。其中，YX1 測線沿地表距離約 274 公尺，電極間距約 4 公尺；YX3 測線沿地表距離約 227 公尺，電極間距約 3 公尺；YX4 測線沿地表距離約 97 公尺，電極間距約 2.5 公尺；YX5 測線沿地表距離約 66 公尺，電極間距約 1 公尺；YX6 測線沿地表距離約 100 公尺，電極間距約 2 公尺；YX7 測線沿地表距離約 49 公尺，電極間距約 2 至 4 公尺。

研究區域位於地形變化劇烈的山區，高程分布上最低約為海拔 710 公尺，最高約為海拔 1044 公尺，在短短數公尺內可能有超過 20 公尺的高程落差，屬於施測相當困難的環境。

(二) 施測參數

本研究採用「多波道直流電阻法與自然電位法全自動監測系統 (Remote Resistivity Monitoring System, R2MS)」進行地電阻調查。每個測線調查中，發射器使用多訊號源，電極使用不鏽鋼棒，電極數量含參考電極共 65 個。電極間距通常採用等間距，依照測線長度調整，有時少數電極可能因現場狀況需調整為不等間距。電極排列採用泛化排列(可任意變換為各種排列)，所蒐集的資料將不僅只包含傳統施蘭伯吉排列 (Schlumberger Array)、溫奈排列 (Wenner Array) (圖 4)、雙偶極排列 (Dipole-dipole Array)。

依照 112 年 9 月 6 日第一次工作會議進行測線修正，重新調整調查工作內容及資訊表。地電阻調查基本資訊請參見表 1，而地電阻測線詳細資訊請參見表 2 至表 7。

(三) 執行步驟

本團隊從過去累積的研究經驗中針對小油坑地區訂定 ERT 調查規範及步驟，如下：

(1) 室內資料檢視。進行地形圖、地質圖、登山客路徑等資料檢視，規劃主要測線位置及經費需求。

(2) 野外勘查。包含無人空拍機影像拍攝，登山步道、溪谷等無植被阻礙區域的野外觀察工作。相關工作均遵守內政部國家公園署陽明山國家公園管理處規範，不影響遊客安全的情形下進行。

(3) 簡易除草與測線路徑上障礙物清除工作。工作執行以安全性為優先考

量，並在不影響遊客安全及陽明山國家公園保育工作的情況下完成。

(4)測線高程量測。ERT 調查在地形起伏劇烈的地區需要精確的地形來進行數值模擬分析，一般採用 RTK 量測，可達公分級的精確度。高程量測之觀測點為 ERT 二維測線的電極位置，需盡可能維持筆直的測線方向。會在測線路徑上選擇一個參考點，並於路徑方向上找出指定水平間距的位置進行放樣（在地上插上帶編號之竹筷），接著紀錄其高程數值。一般來說，觀測點數量與電極數量一致，倘若地形有危險性，則依照現場狀況增減。

(5)電極安裝。依照放樣位置插入不鏽鋼電極棒（長度 60 公分）。規範電擊棒應插入 30 公分以上或接觸電阻可低於 1000 歐姆。一般而言，電擊棒插入土壤足夠深時，電擊棒與土壤的接觸良好且面積夠大，很容易達到低的接觸電阻。倘若安裝在砂礫為主的地區，應考慮添加鹽水來降低接觸電阻，實驗後務必清洗乾淨以免纜線與電擊棒氧化造成電阻上升。

(6)纜線連接及測試。將多波道電纜線與各電極依照編號連接，連接前確實清除電線末端的生鏽，必要時使用三用電表確保纜線通路。小油坑地區遊客眾多，電纜線應盡量避開遊客路徑並架設警示牌，或安裝必要之保護裝置。

(7)ERT 量測。本研究使用 R2MS 系統，每條測線每次施測耗時約半小時，預定每條測線至少重複施測 3 次。

(8)儀器撤收及場地恢復。

(9)室內數值模擬分析。包含原始資料解算、高程描述檔案建立、逆推運算等。

(10)室內模型展示與地質解釋。包含二維剖面圖及三維柵狀圖。

（四）野外工作情形

在各測線施測前，根據空拍資訊和現地勘查情況，對預定的施測路徑進行簡易除草和障礙物清除工作（圖 10）。同時，使用全站儀與 RTK 進行高程量測（圖 11、圖 12），以確保 ERT 測線方向為筆直的直線。所收集到的高程資料也將用於後續的逆推流程，增加電阻率模型的準確性。每條測線調查中，將不鏽鋼電極棒以等間距安裝於施測路徑上（圖 13），少數電極因現場狀況而加大電極間距，各測線電極數量、電極間距與測線長度詳見表 2 至表 7。

本研究採用「多波道直流電組法與自然電位法全自動監測系統（Remote Resistivity Monitoring System, R2MS）」進行地電阻調查。將先前安裝好的電極透過纜線連接至主機，並使用三用電表確保纜線通路（圖 14）。

項目	內容	說明
測站編號	[20230710a]	進場日(除草)
測站名稱	Taiwan-Taipei-XiaoYouKeng(XIYK)	
測站簡稱	台北市小油坑站(XIYK)	
經度	121.5469025	小油坑硫氣孔附近
緯度	25.1760827	小油坑硫氣孔附近
狀態	完成	
建站日期	2023-07-10	進場日(除草)
測站類型	移動站	
測線總長度	813[m]	地表測線長度
總電極數	390	
電極排列	泛化排列(可任意變換為各種排列)	
電極種類	不鏽鋼電極棒(長度 60 公分)	
執行單位	國立中央大學地球科學系計算地球物理研究室	中華民國地球物理學會會員
連絡電話	03-4227151#65609	

表 1，地電阻調查基本資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX1	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	252	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.551013, 25.175078	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.550223, 25.172924	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305540.6952, 2785283.349	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305462.1025, 2785044.406	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	東北-西南	
測線方位角	198	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	4	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 2，地電阻測線 YX1 詳細資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX3	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	210	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.545263, 25.175748	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.547288, 25.175303	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	304960.8291, 2785355.186	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305165.1063, 2785306.711	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	西北-東南	
測線方位角	104	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	3	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 3，地電阻測線 YX3 詳細資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX4	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	設置 65 隻，分析採用 37 隻
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	90	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.545864, 25.175504	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.546618, 25.175843	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305021.496, 2785328.44	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305097.323, 2785366.333	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	西南-東北	
測線方位角	64	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	2.5	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 4，地電阻測線 YX4 詳細資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX5	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	設置 65 隻，分析採用 37 隻
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	64	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.545454, 25.176173	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.545275, 25.175638	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	304979.8923, 2785402.366	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	304962.1136, 2785343.054	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	東北-西南	
測線方位角	197	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	1	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 5，地電阻測線 YX5 詳細資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX6	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	設置 65 隻，分析採用 49 隻
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	94	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.545446, 25.175697	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.546331, 25.175507	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	304979.3415, 2785349.629	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305068.5582, 2785328.937	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	西北-東南	
測線方位角	103	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	2	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 6，地電阻測線 YX6 詳細資訊。

項目	內容	說明
測線代號	YX7	
發射訊號類型	多訊號源	
電極數量(含參考電極)	65	設置 65 隻，分析採用 22 隻
智能施測次數	3	
智能施測事件數量	22	
單次發射事件時間長度	48	
測線長度	52	模型水平直線長度
測線起點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.546253, 25.175524	單位:[度]
測線終點經緯度座標 (WGS84 Long,WGS84 Lat)	121.546712, 25.175313	單位:[度]
測線起點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305060.6969, 2785330.76	單位:[m]
測線終點二度分帶座標 (TWD97 E,TWD97 N)	305107.1031, 2785307.637	單位:[m]
測線走向 (測線起點-測線終點)	西北-東南	
測線方位角	117	以十進位經緯度計算。 單位:[度]
電極間距	2-4	單位:[m]
間距計算	水平間距	水平間距:使用量測設備依投影面上兩個電極座標計算距離。 斜距:於地表直接使用捲尺量測兩個電極直線距離。
地形	不平坦	平坦、不平坦。 當地形平坦時，水平間距等於斜距。

表 7，地電阻測線 YX7 詳細資訊。



圖 10，簡易除草和障礙物清除工作。



圖 11，現地全站儀測量。



圖 12，現地 RTK 測量。



圖 13，佈置不鏽鋼電極棒並確保電極棒與地表材料接觸良好。



圖 14，使用三用電表確保纜線與電極通路。

第六章 地電阻探勘結果

本章描述 6 條測線之地電阻剖面電阻率分布，包含中位數地電阻剖面、QCV 剖面，並進一步檢驗各剖面的一致性。一致性高的狀況下，則可製作三維柵狀圖，從近似三維的方式展示研究成果。

（一）YX1 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX1 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，經資料篩選後，採用約 6 萬筆地電資料，以隨機方法對此 6 萬餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 12000 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 15）與 QCV 剖面（圖 16）。

YX1 的電極間距為 4 公尺。觀察 YX1 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX1 水平距離約 0 公尺至 60 公尺之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 600 至 1000 Ωm 以上。在 YX1 水平距離 64 至 84 公尺、104 至 120 公尺、136 至 168 公尺、208 至 240 公尺之近地表處出現電阻率相對較低的區域，電阻率數值約介於 50 至 200 Ωm 。在 YX1 水平距離 0 至 168 公尺、208 至 252 公尺，並且高程約 870 至 895 公尺處，顯示兩個橫向電阻率分布，電阻率數值約介於 300 至 500 Ωm 。在 YX1 水平距離 168 至 208 公尺且高程約 870 至 895 公尺處，電阻率略低於左右兩側相同高程的區域，電阻率數值約介於 175 至 250 Ωm 。在 YX1 高程 870 公尺以下的區域，電阻率數值約介於 40 至 300 Ωm 。觀察 YX1 測線之 QCV 剖面，整區主要都呈顯低於 5% 的數值。

（二）YX3 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX3 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，經資料篩選後，採用約 6 萬筆地電資料，以隨機方法對此 6 萬餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 12000 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 17）與 QCV 剖面（圖 18）。

YX3 的電極間距為 3 公尺，其中 YX3 水平距離 108 至 107 公尺、150 至 165 公尺處因現場條件不佳而放棄安裝電極，其下方網格尺寸會稍微受影響，視覺上常呈現不協調的形狀。觀察 YX3 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX3 水平距離約 10 公尺至 112 公尺之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 150 至 1500 Ωm 以上。在 YX3 水平距離 118 至 210 公尺之近地表處顯示一層狀極低電阻率分布，電阻率數值約介於 1 至 10 Ωm 。在 YX3 水平距離 112 至 118

公尺顯示一由地表至剖面最底部之垂直向低電阻率分布，電阻率數值約介於 1 以下至 $7\Omega\text{m}$ ，該區電阻率較低的位置，其 QCV 值大於 20%。在 YX3 水平距離 0 至 108 公尺且高程約 692 至 760 公尺處顯示一整塊相當均勻的中等電阻率分布，電阻率數值約介於 20 至 $150\Omega\text{m}$ 。在 YX3 水平距離 108 至 210 公尺且高程約 724 至 775 公尺處顯示較低的電阻率分布，電阻率數值約介於 1 至 $20\Omega\text{m}$ ，該區電阻率較低的位置，其 QCV 值大於 20%。

(三) YX4 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX4 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，經資料篩選後，採用約 8000 餘筆地電資料，以隨機方法對此 8000 餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 7000 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 19）與 QCV 剖面（圖 20）。

YX4 的電極間距為 2.5 公尺。觀察 YX4 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX4 水平距離約 0 公尺至 40 公尺、67 至 90 公尺之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 150 至 $2500\Omega\text{m}$ 以上。在 YX4 水平距離 24 至 36 公尺且高程 747 至 759 公尺，以及水平距離 38 至 54 公尺且高程 755 至 763 公尺兩區域顯示極低的電阻率分布，電阻率數值約介於 1 至 $15\Omega\text{m}$ 。在 YX4 水平距離 0 至 10 公尺且高程 753 至 763 公尺顯示偏高的 QCV 數值，其 QCV 值大於 20%。

(四) YX5 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX5 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，經資料篩選後，採用約 6 萬筆地電資料，以隨機方法對此 6 萬餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 12000 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 21）與 QCV 剖面（圖 22）。

YX5 的電極間距為 1 公尺。觀察 YX5 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX5 水平距離約 0 公尺至 18 公尺之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 150 至 $1100\Omega\text{m}$ ，厚度超過 5 公尺。在 YX5 水平距離 18 至 64 公尺之近地表顯示一層狀低電阻率分布，電阻率數值約介於 10 至 $25\Omega\text{m}$ ，厚度小於 3 公尺。在 YX5 水平距離 30 至 37 公尺且高程約 723 至 734 公尺處顯示明顯低於左右兩側相同高程區域的電阻率分布，電阻率數值約介於 10 至 $25\Omega\text{m}$ 。觀察 YX5 測線之 QCV 剖面，整區主要都呈顯低於 6% 的數值。

(五) YX6 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX6 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬

筆資料，經資料篩選後，採用約 17000 餘筆地電資料，以隨機方法對此 17000 餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 12000 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 23）與 QCV 剖面（圖 24）。

YX6 的電極間距為 2 公尺。觀察 YX6 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX6 整個剖面之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 150 至 1100 Ωm ，厚度超過 5 公尺。其下方則呈現一層中等電阻率分布，電阻率數值約介於 20 至 150 Ωm 。觀察 YX6 測線之 QCV 剖面，整區主要都呈顯低於 4% 的數值。

（六）YX7 資料處理與中位數地電阻剖面

ERT 測線 YX7 以相同設置重複 3 次施測。每次完整施測後均可獲得約 18 萬筆資料，經資料篩選後，採用約 800 餘筆地電資料，以隨機方法對此 800 餘筆資料進行抽樣。每次抽樣過程均抽出 600 筆資料作為一組逆推地電阻剖面所用之資料，共有 50 組。我們再對此 50 組資料集以相同逆推參數進行重複逆推後，可得 50 個逆推的地電阻剖面。最後，我們可以對此 50 個剖面資料計算中位數地電阻剖面（圖 25）與 QCV 剖面（圖 26）。

YX7 的電極間距為 2 公尺。觀察 YX7 測線之中位數地電阻剖面發現，於 YX7 水平距離約 0 公尺至 12 公尺之近地表顯示一層狀高電阻率分布，電阻率數值約介於 300 至 2500 Ωm 以上。在 YX7 水平距離 12 至 54 公尺處，地表以下主要均呈現低電阻率分布，電阻率數值約介於 1 至 30 Ωm ，該區電阻率較低的位置，其 QCV 值大於 20%。

（七）逆推模型交互驗證

本研究於小油坑噴氣孔附近探測 5 條地電阻測線，其中部分測線有交錯，例如 YX3 與 YX4、YX3 與 YX5、YX4 與 YX6，以及 YX6 與 YX7。若測線交錯位置的電阻率數值相近，表示不同測線所收集的資料應有反映出地下電阻率分布的真實情況，作為客觀的交互驗證之證據。

YX3 與 YX4 交錯情況如圖 27 與圖 28 所示，交會處由上至下均呈現「高→低」的電阻率變化，YX3 的電阻率數值由 800 Ωm 降至 50 Ωm ，而 YX4 的電阻率數值由 700 Ωm 降至 100 Ωm ，兩條測線呈現相似的電阻率分布。

YX3 與 YX5 交錯情況如圖 27 與圖 29 所示，交會處在近地表處皆呈現低電阻率分布，電阻率數值介於 7 至 20 Ωm 。並且隨著深度增加，YX3 與 YX5 的電阻率數值皆升至約 75 Ωm ，兩條測線呈現相似的電阻率分布。

YX4 與 YX6 交錯情況如圖 28 與圖 30 所示，交會處由上至下均呈現「高→低」的電阻率變化，YX4 的電阻率數值由 700 Ωm 降至 100 Ωm ，而 YX6 的電阻率數值由 500 Ωm 降至 50 Ωm ，兩條測線的電阻率數值稍有差異，但均顯示出相

同趨勢的電阻率分布。

YX6 與 YX7 交錯情況如圖 30 與圖 31 所示，交會處由上至下均呈現「高→低」的電阻率變化，電阻率數值皆由 $500\Omega\text{m}$ 降至 $30\Omega\text{m}$ ，兩條測線呈現相似的電阻率分布。

綜合上述結果，本區域的調查成果有高度的一致性，可進一步製作柵狀圖探討近似的三維電性構造，如圖 32、圖 33 所示。



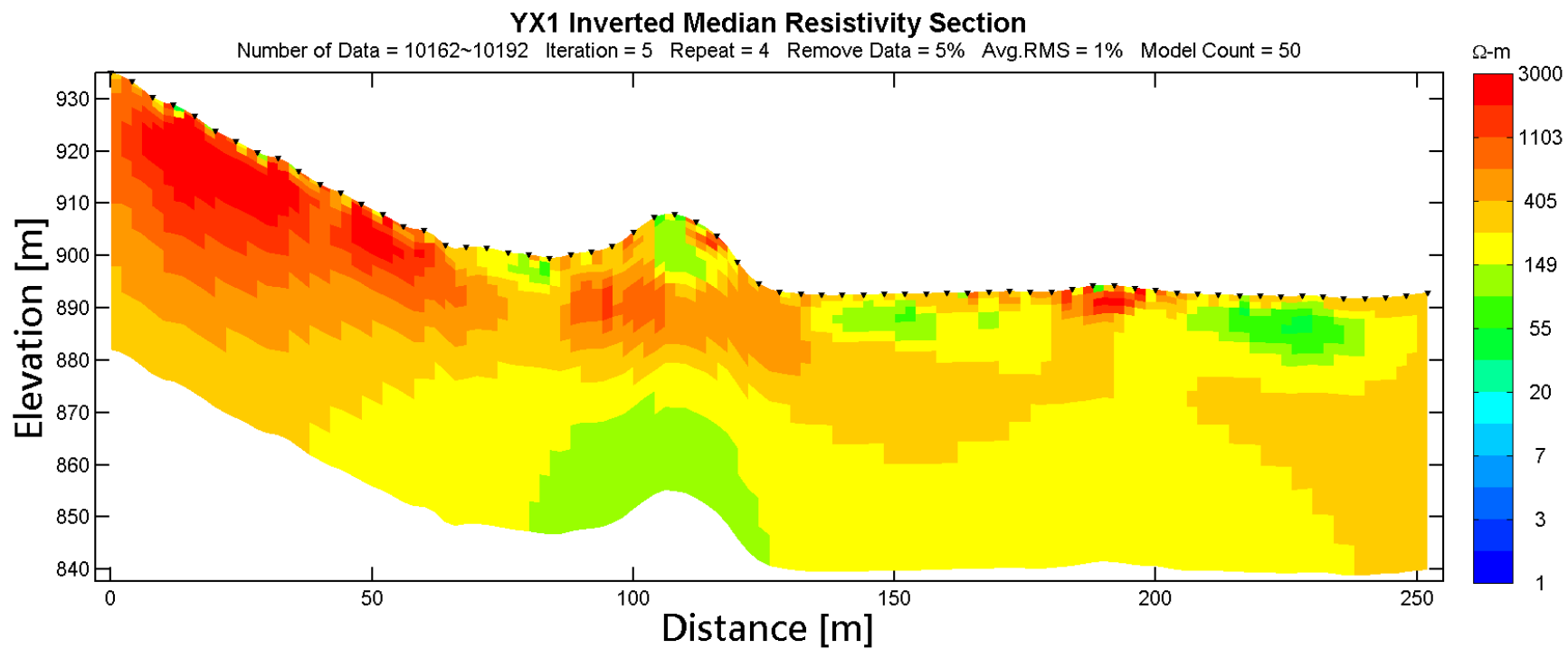


圖 15，YX1 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

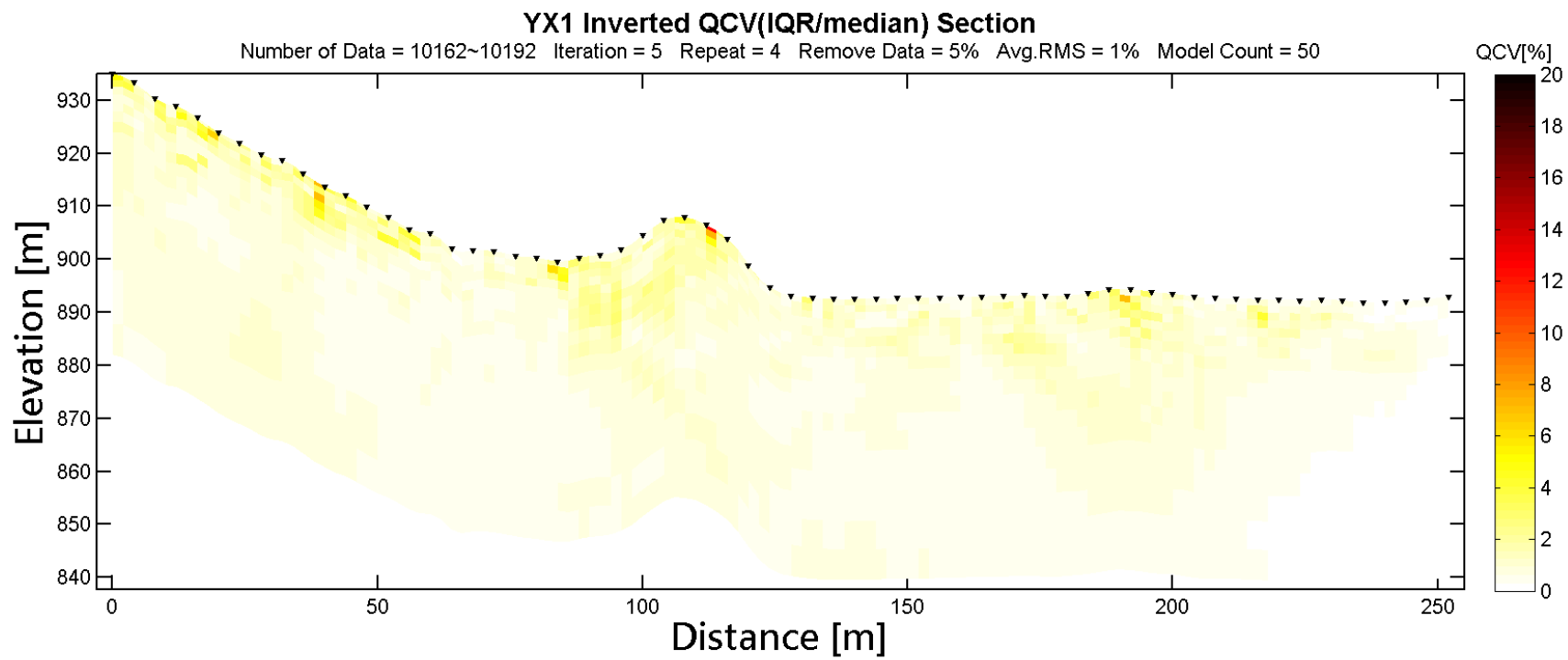


圖 16、YX1 測線之 QCV 剖面。

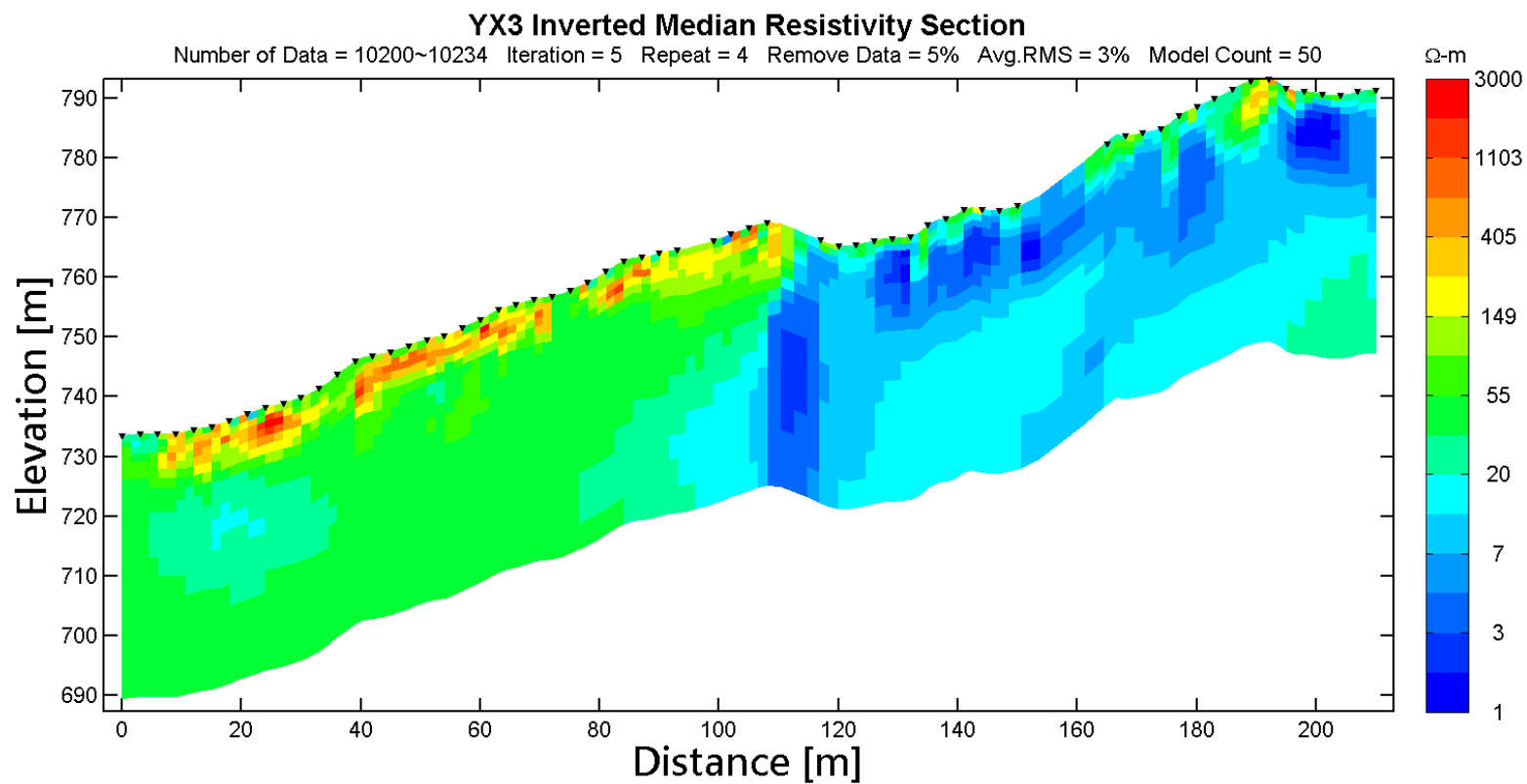


圖 17、YX3 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

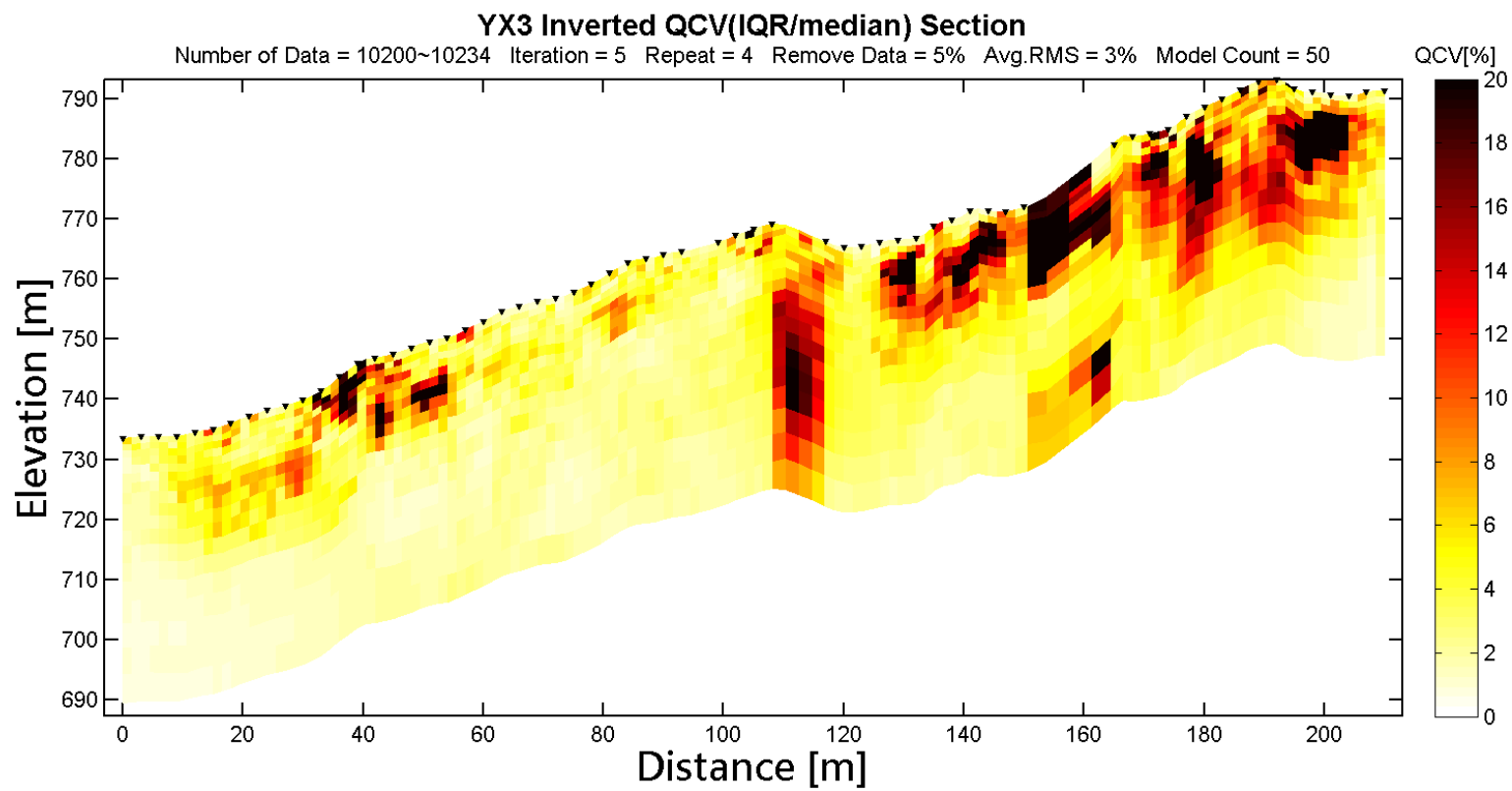


圖 18、YX3 測線之 QCV 剖面。

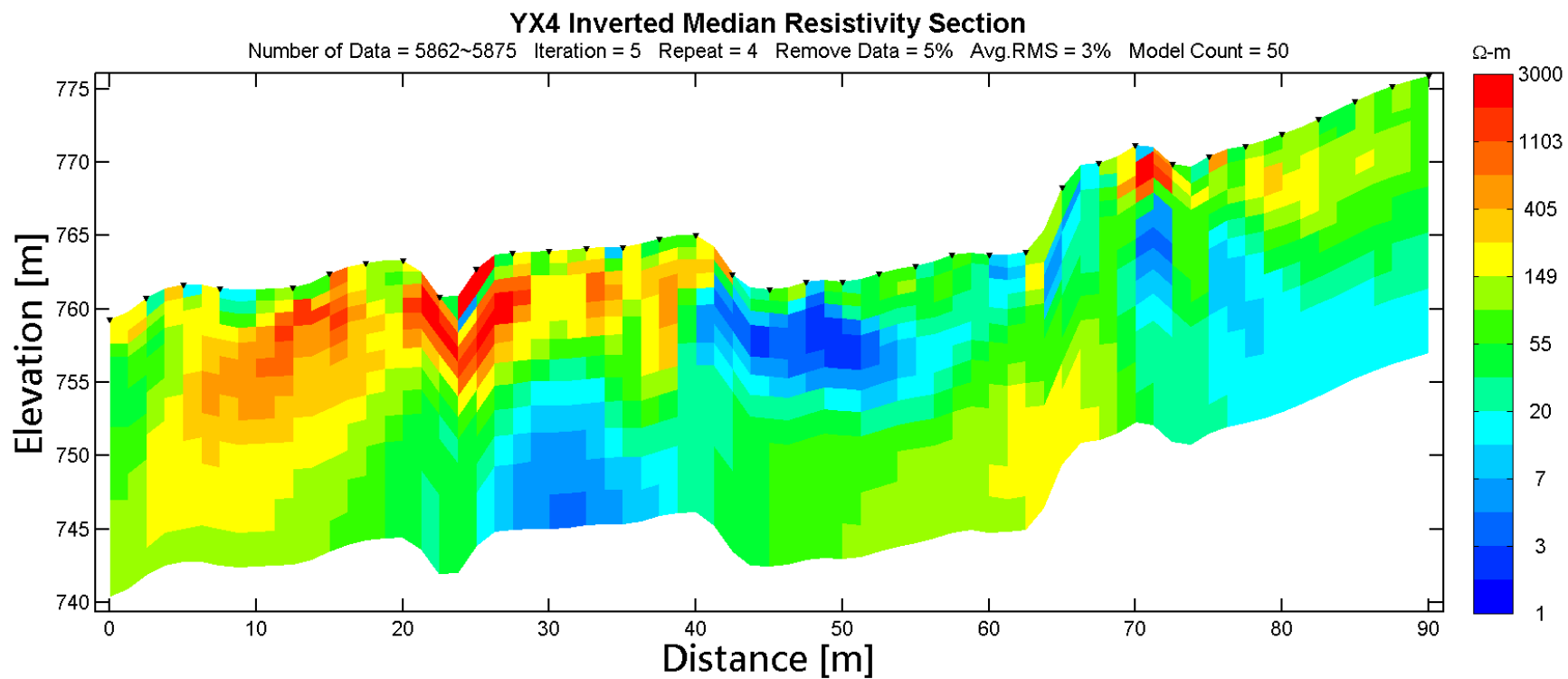


圖 19、YX4 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

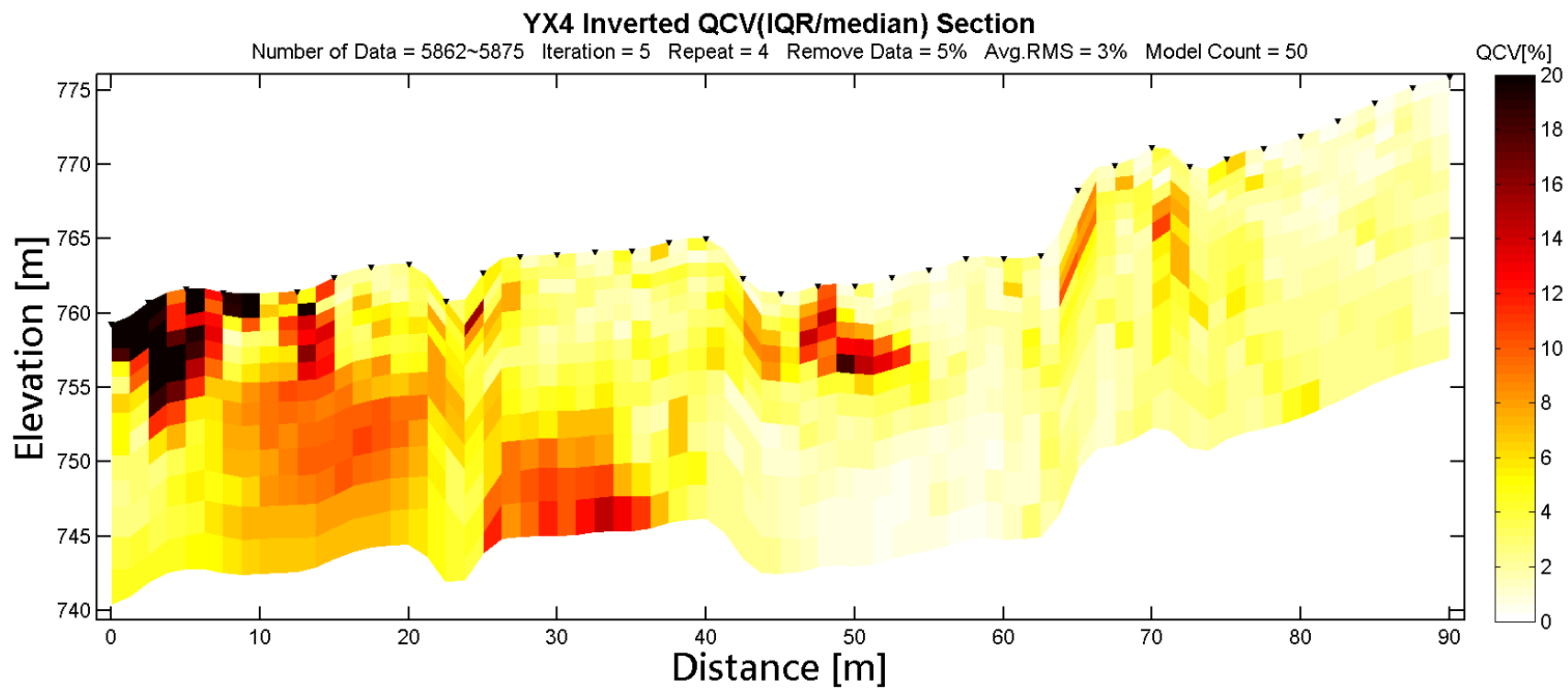


圖 20、YX4 測線之 QCV 剖面。

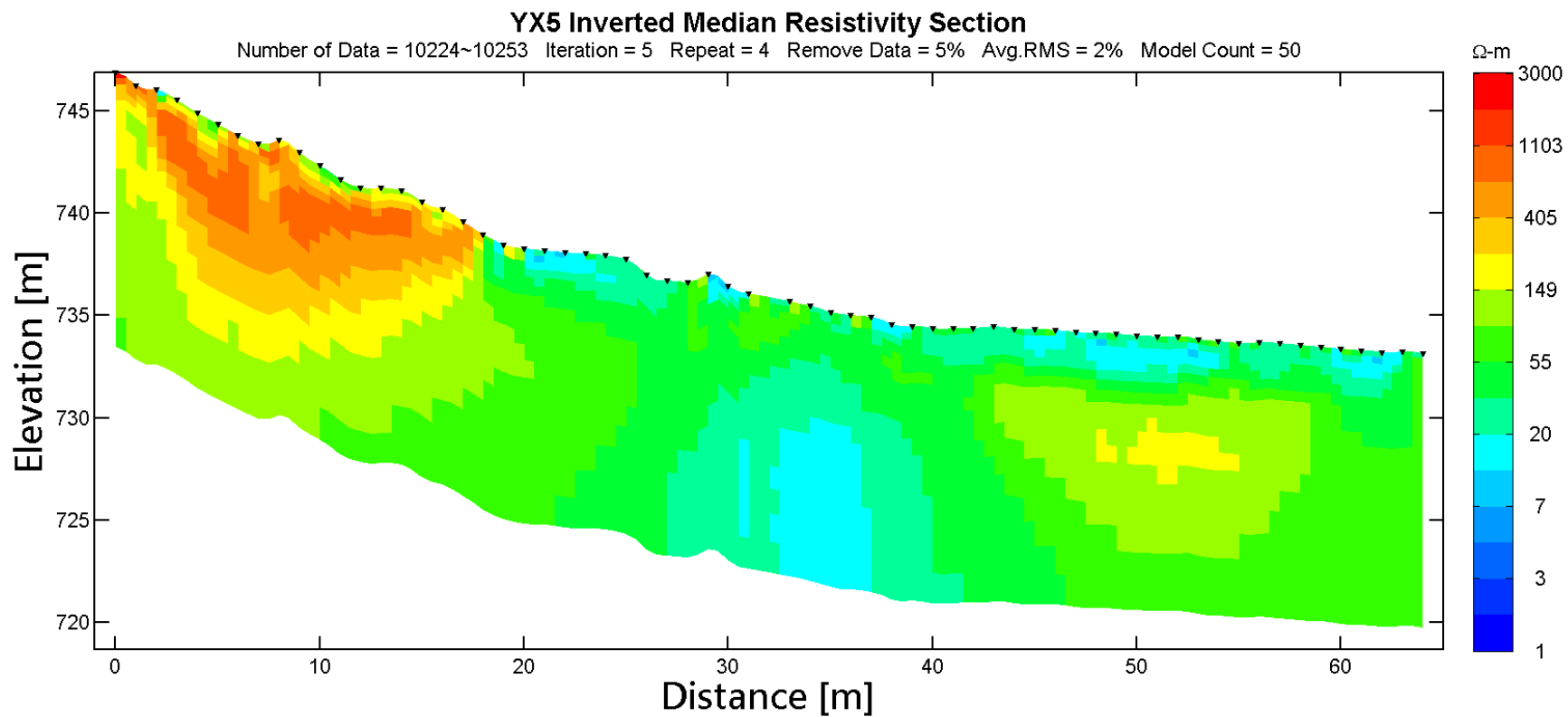


圖 21、YX5 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

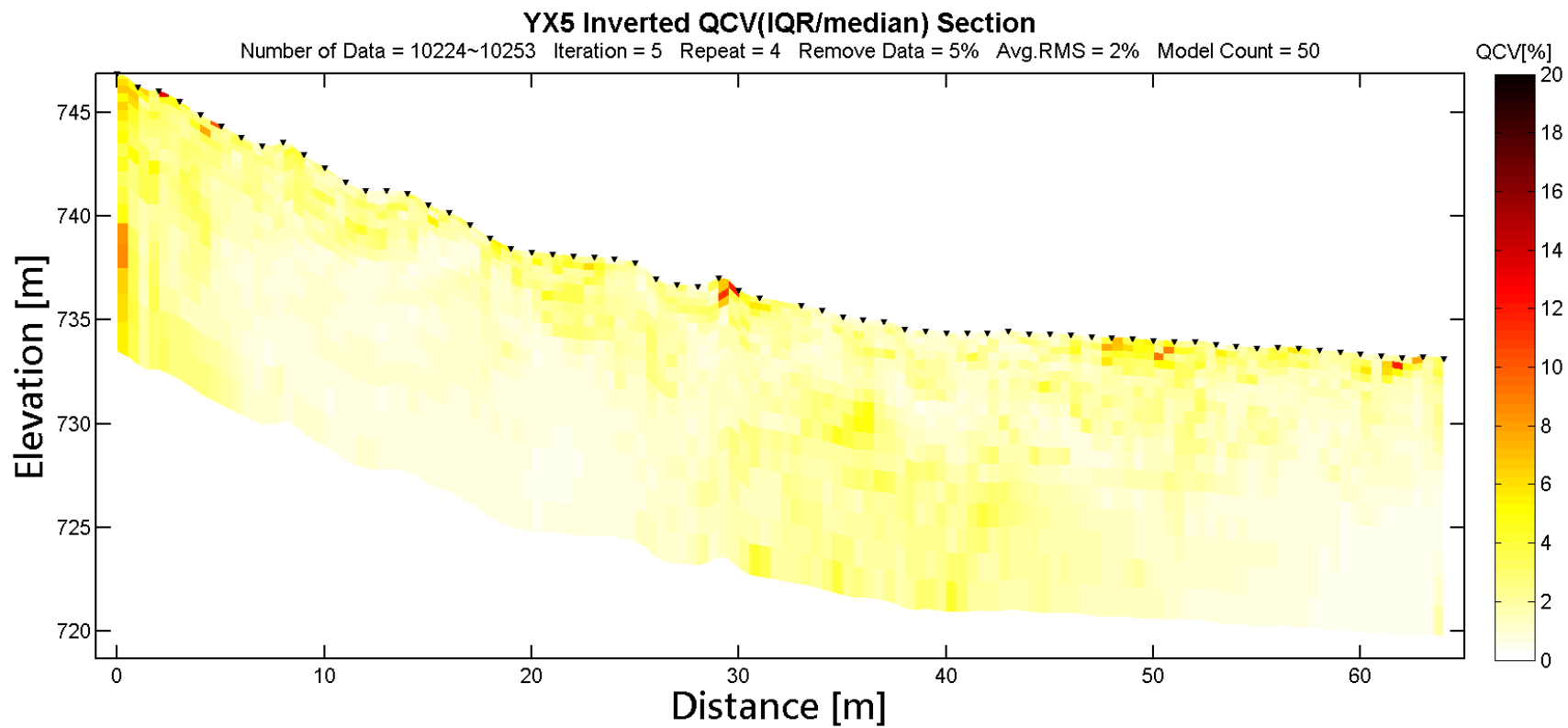


圖 22、YX5 測線之 QCV 剖面。

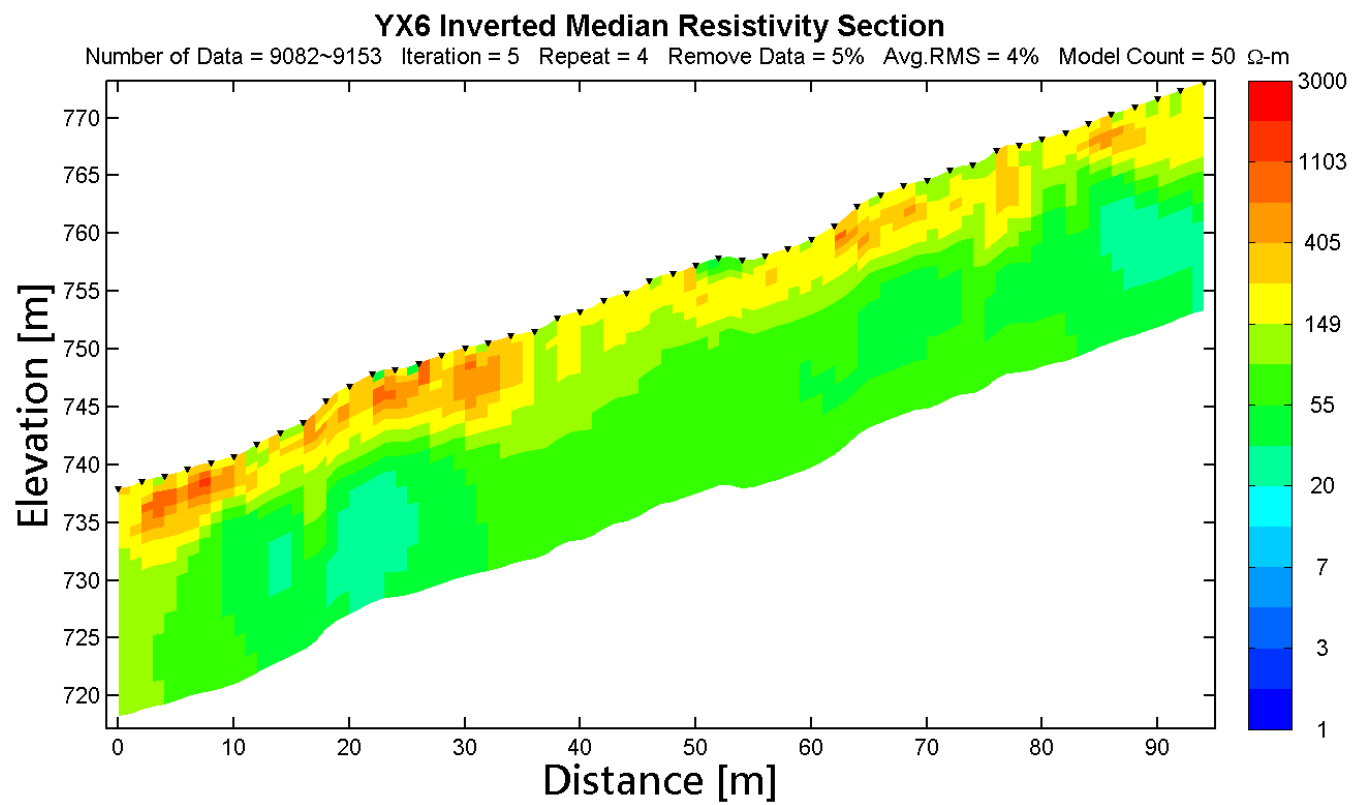


圖 23、YX6 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ ，與圖 34 一致。

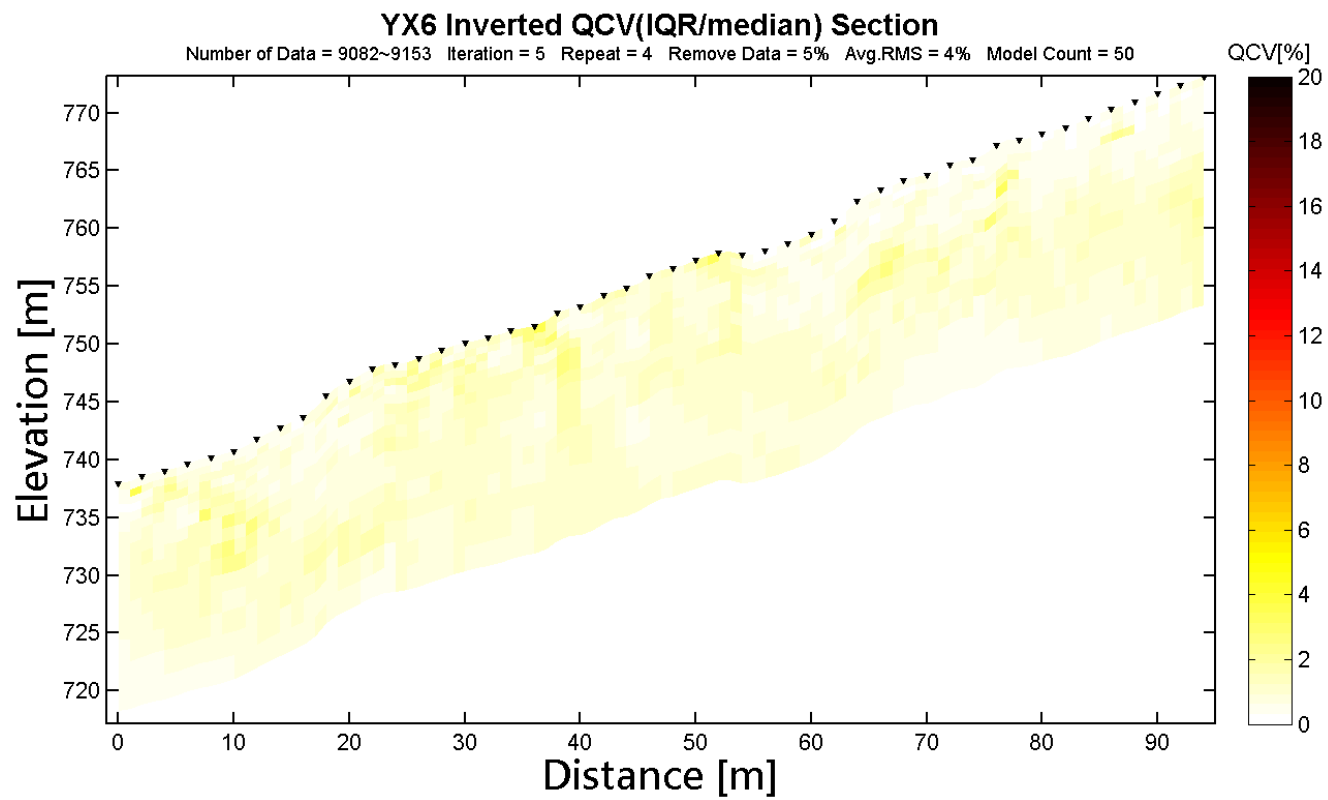


圖 24、YX6 測線之 QCV 剖面。

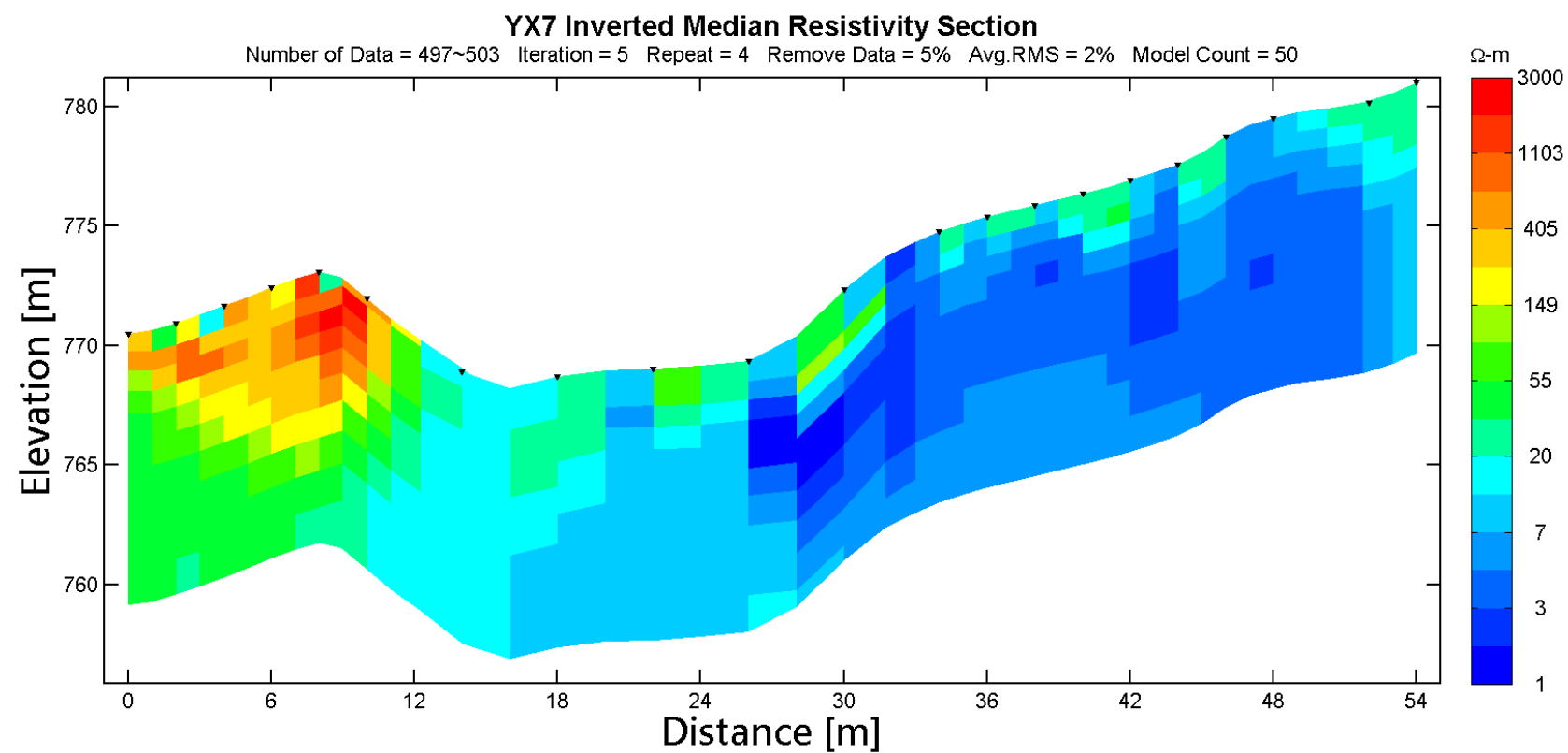


圖 25、YX7 測線之測線之中位數地電阻剖面。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

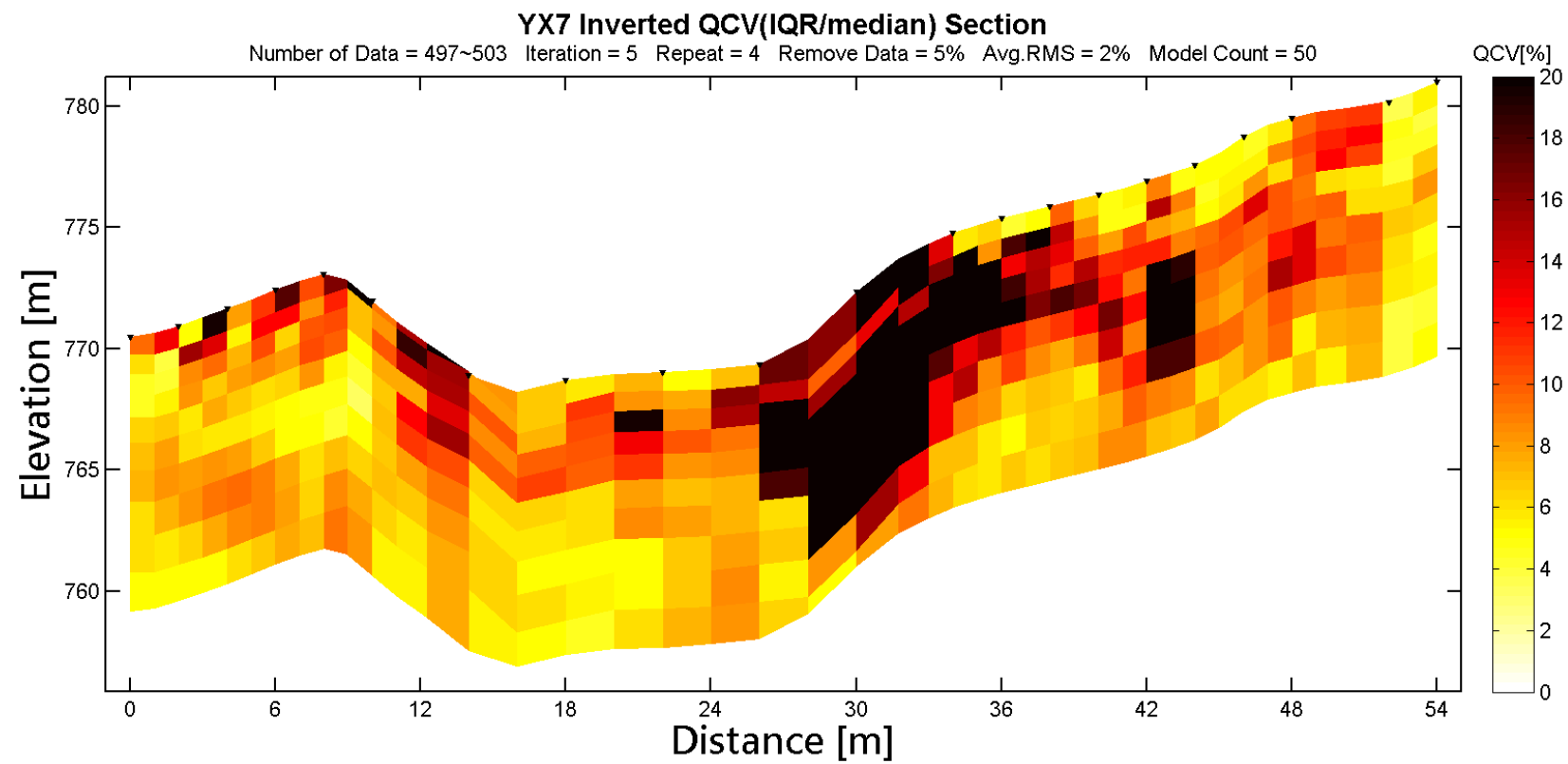


圖 26、YX7 測線之 QCV 剖面

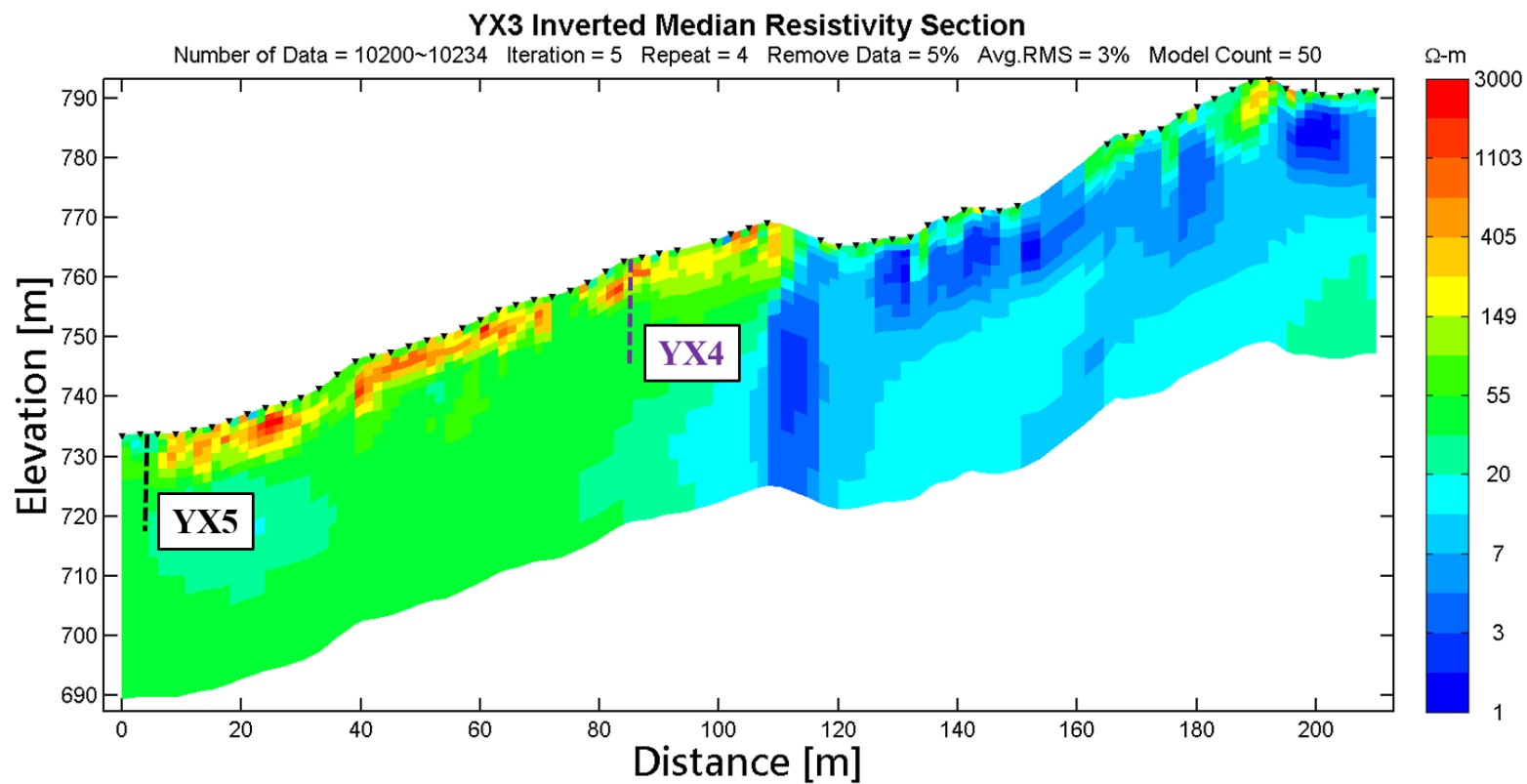


圖 27，YX3 與其他測線交錯位置。虛線長度對應其他測線交錯處的模型深度。色階為 1 至 3000 $\Omega\cdot m$ ，與圖 34 一致。

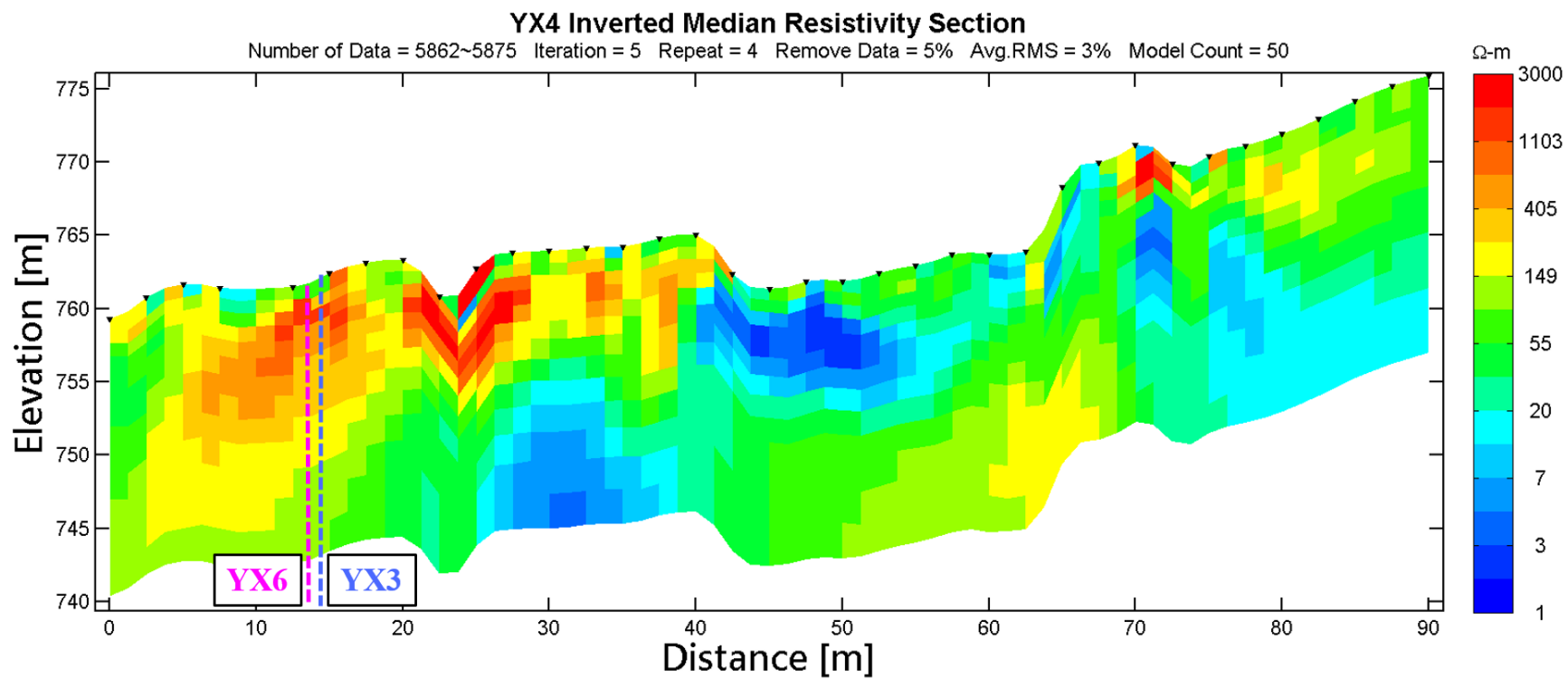


圖 28，YX4 與其他測線交錯位置。虛線長度對應其他測線交錯處的模型深度。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

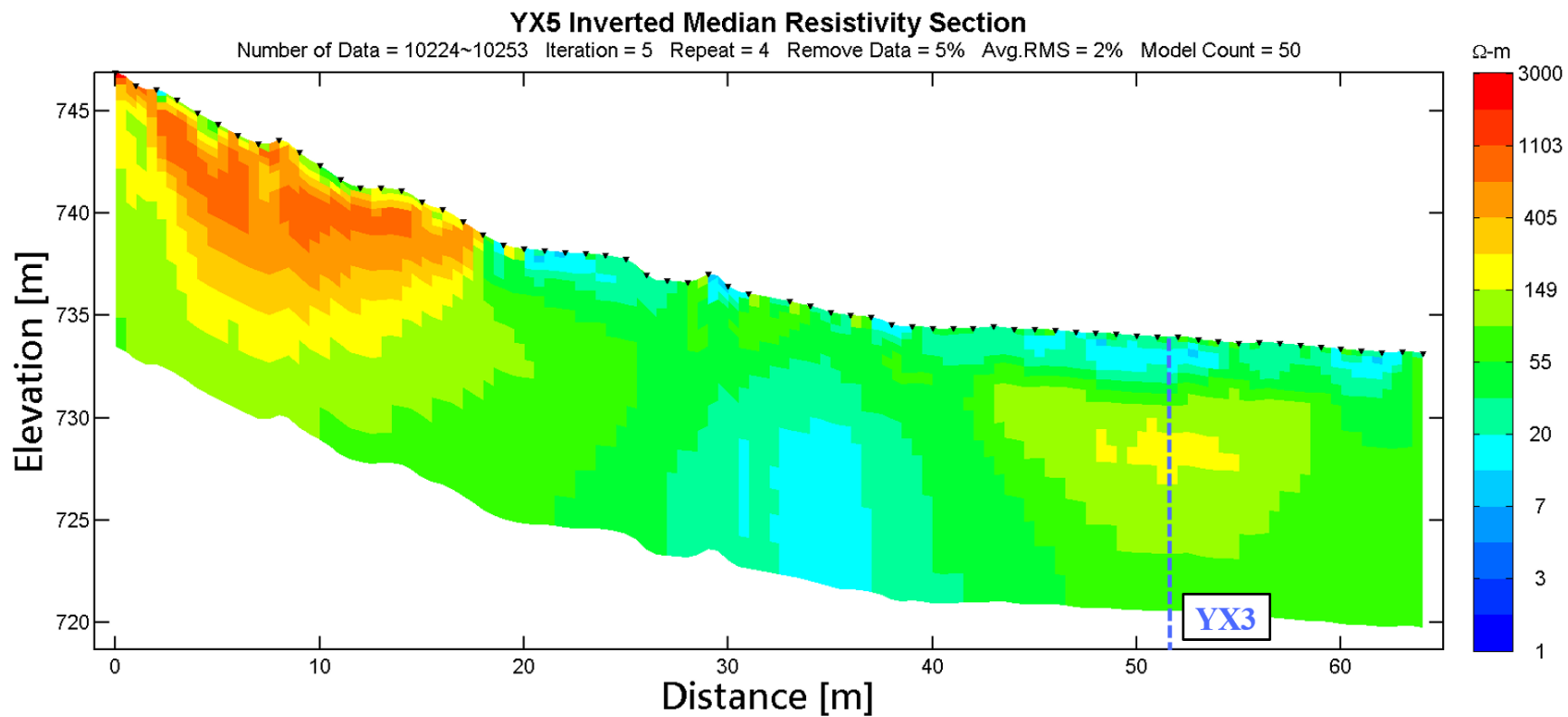


圖 29，YX5 與其他測線交錯位置。虛線長度對應其他測線交錯處的模型深度。色階為 1 至 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ ，與圖 34 一致。

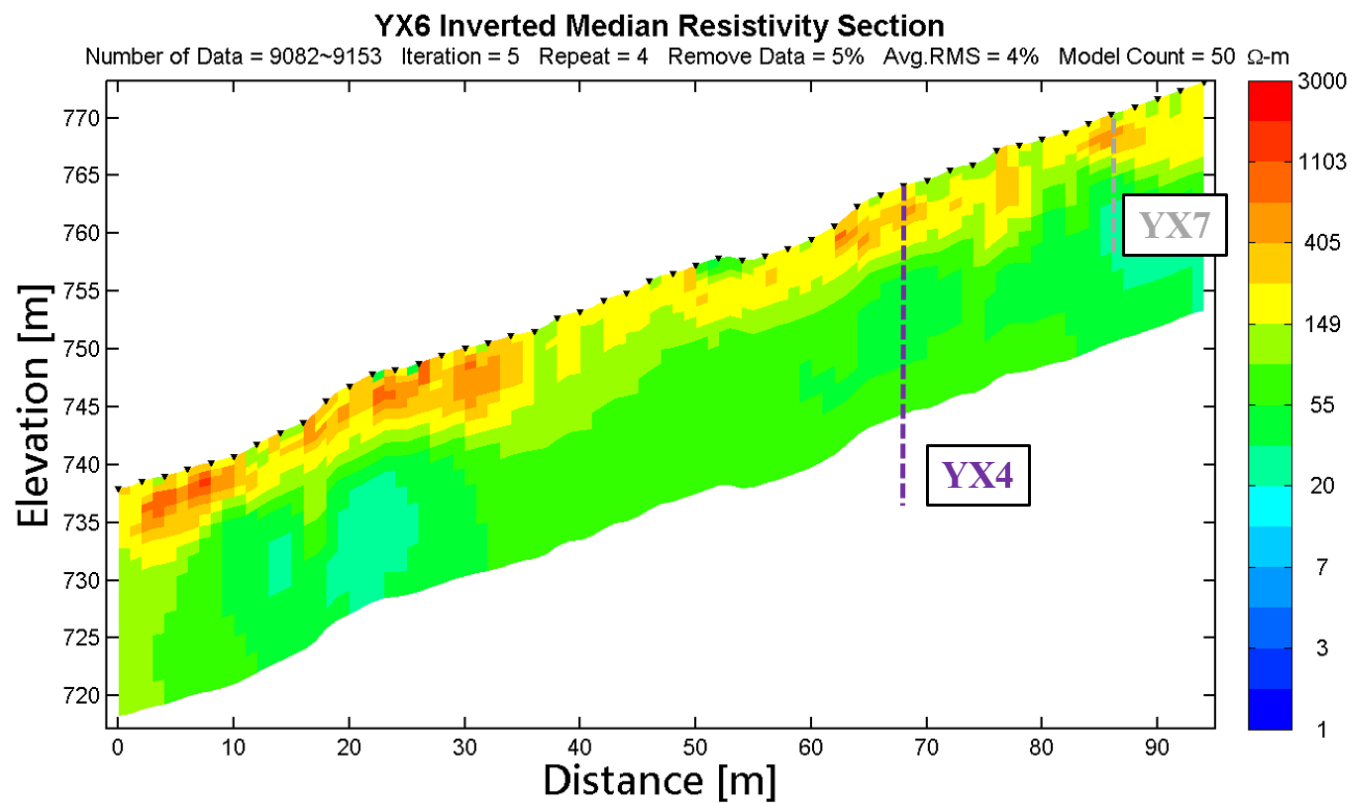


圖 30，YX6 與其他測線交錯位置。虛線長度對應其他測線交錯處的模型深度。色階為 1 至 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ ，與圖 34 一致。

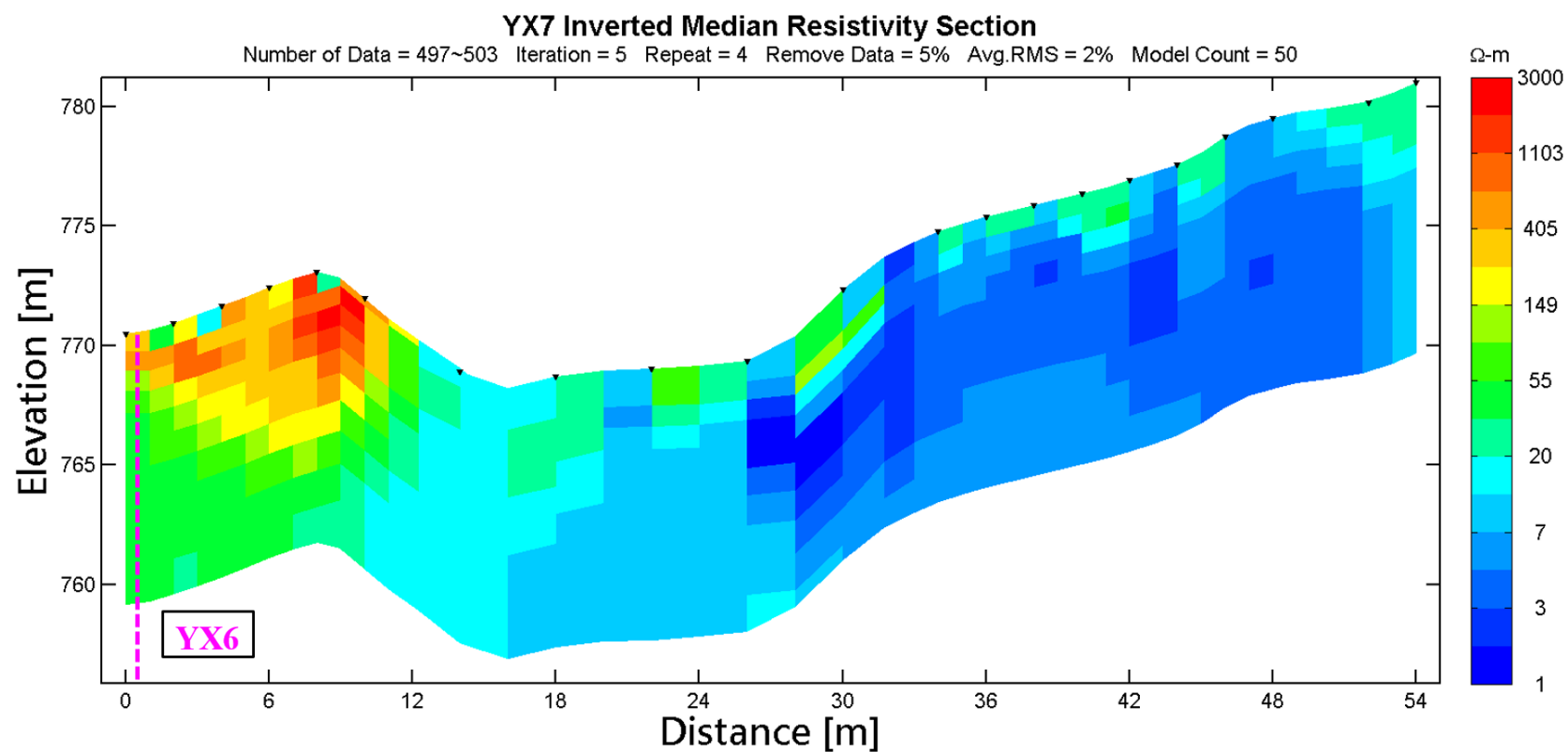


圖 31，YX7 與其他測線交錯位置。虛線長度對應其他測線交錯處的模型深度。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

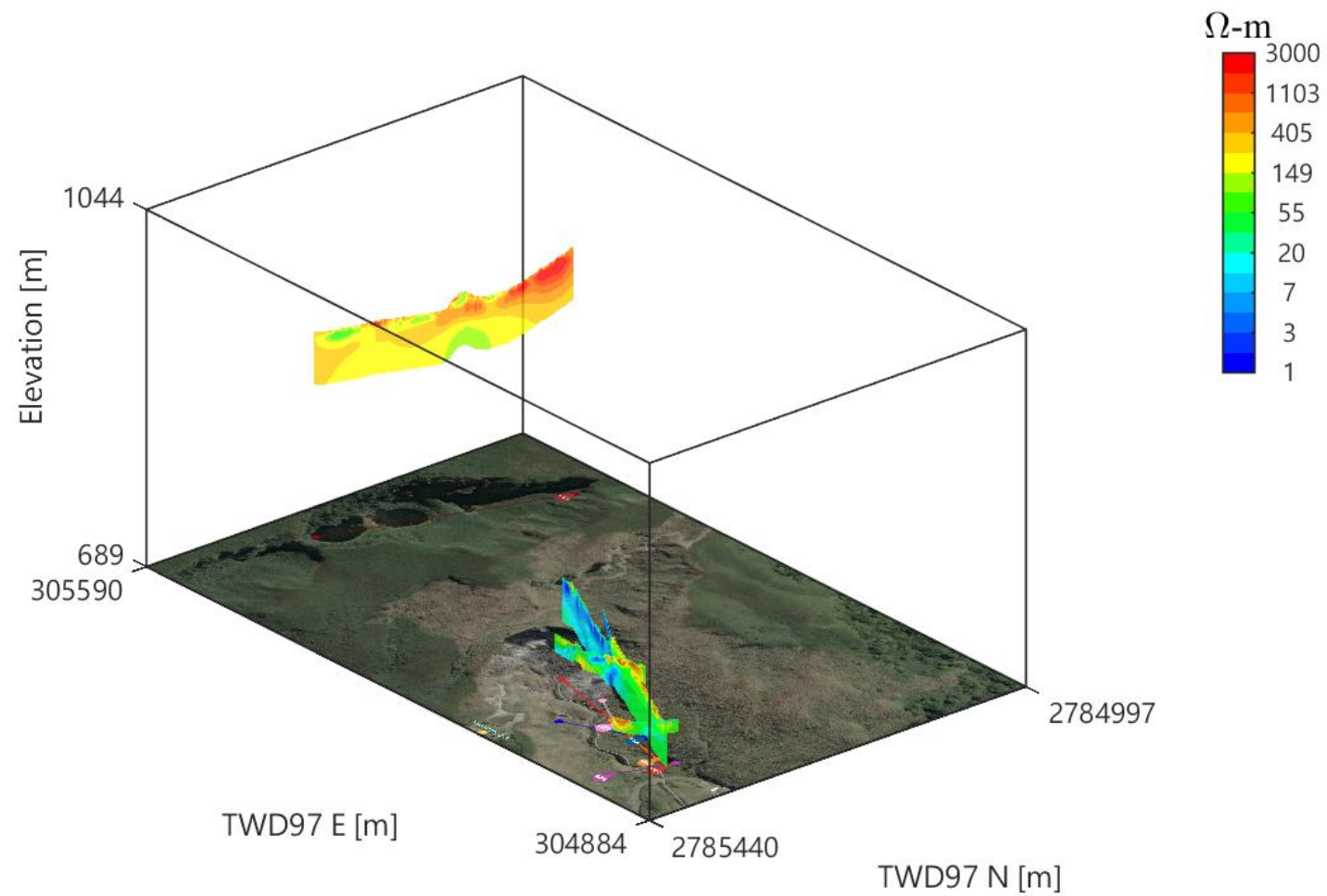


圖 32，所有測線之三維柵狀圖與平面探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

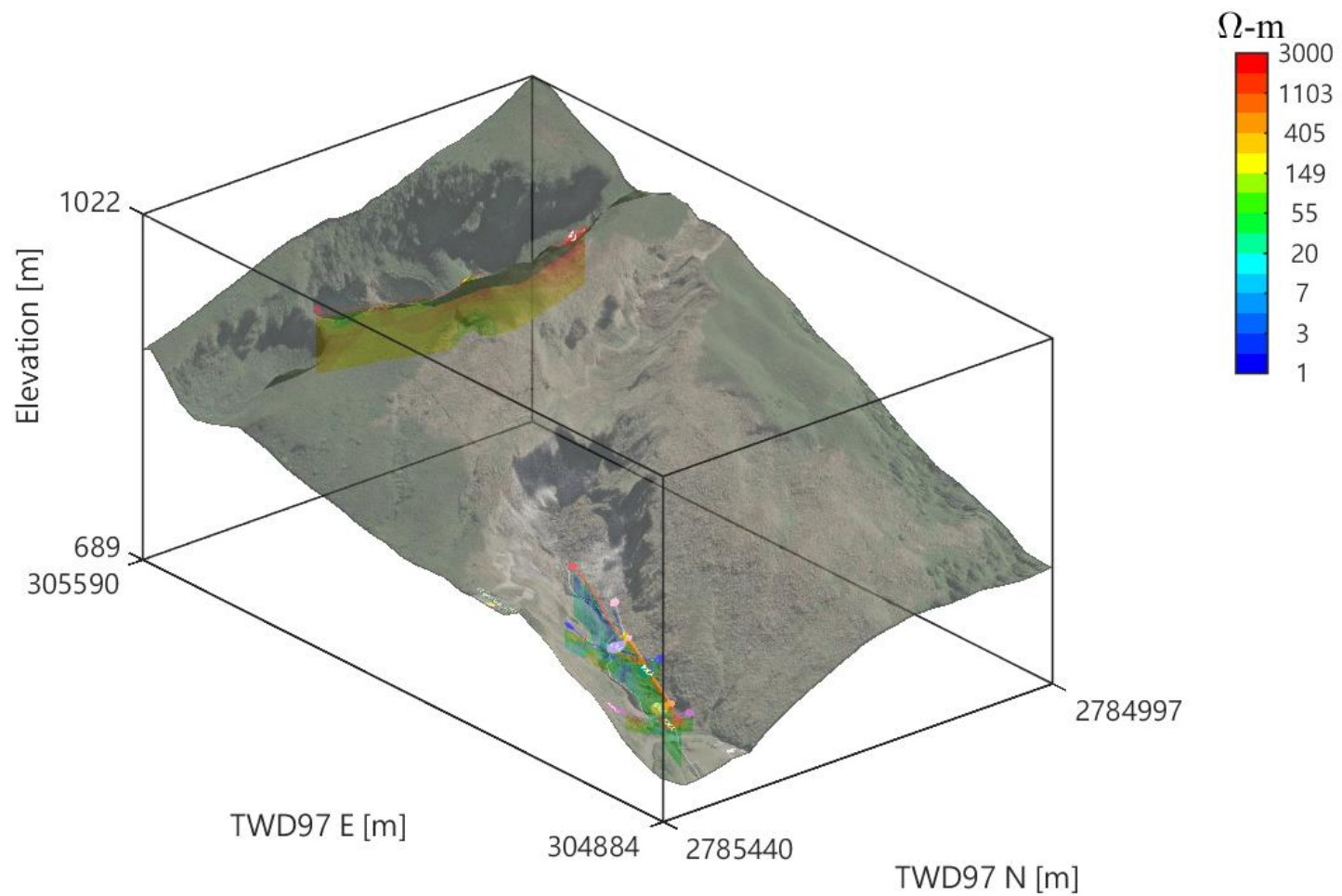


圖 33，所有測線之三維柵狀圖與立體探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

第七章 綜合判釋

本章描述 6 條測線之地電阻剖面電阻率分布，包含中位數地電阻剖面、QCV 剖面、三維的地電阻剖面柵狀圖，討論可能之地質構造、熱液與火山噴氣活動，研判電阻率剖面上可能之材料（岩體或硫化物）、地下水層（含熱液）、噴氣孔、熱液活動裂隙通道在地下的分布與特性，並嘗試討論空間關係與成因，以及概估地下熱水及其他（如硫磺礦）資源量。

（一）岩石電阻率影響因素

許多學者曾嘗試在實驗室進行岩石電性分析，試圖找出不同地層材料確切的電阻率數值。然而，影響地下岩層電阻率的因素，包含了溫度、壓力、礦物成分、岩石組構、流體含量、部份熔融等。難以同時考慮各種可能的因素的情況下，以至於無法對於地層測料提供確切的電阻率數值。Palacky 於 1987 年提出了一個主要地層材料的電阻率範圍，如圖 34 所示，可作為後續地質解釋之粗略參考的範圍，此參考範圍與過去 Cheng 等人在大屯山地區 VES 探測結果相當吻合。但在實際應用中，仍然需要考慮不同場址特性，例如地形和背景電阻率數值，以更好地解釋地下電阻率分布可能代表的地層材料。

大屯火山群的火山岩種類主要為安山岩，僅有少數火山由玄武質安山岩(玄武岩)所構成。大屯火山群之中的安山岩都具有明顯的斑狀組織特徵，岩石中這些較大的礦物晶體是鐵鎂礦物，並可常見角閃石與輝石類，橄欖石與黑雲母則較為稀少。部分區域因岩石長期接觸噴氣孔噴出的高溫蒸氣與硫磺，產生不同程度的化學變化，使外觀上呈現紅色、黃色。另外，岩石受噴氣口噴出含硫的強酸熱氣長期的作用下，使得岩體中原有的鈉、鈣、鐵、鎂和鉀等礦物被強酸熱氣溶解流失，只留下矽和鋁，此現象稱為「換質作用」。經換質作用後的岩石，顏色變淡，質量變輕，堆積鬆散，且易崩壞，電阻率通常較低，約 1 到 10 Ωm 。當地層中存在豐富的導電礦物（例如：塊狀硫化物），電阻率甚至小於 1 Ωm ，一般認為這種極低電阻率的分布與小油坑地區豐富的硫化物分布有關。

（二）鑽井資料

內政部國家公園署陽明山國家公園管理處 109-110 年度「七星山張裂帶爆裂口之研究」於七星池(舊名鴨池)執行 6 處鑽井工作。在上池處共鑽了兩口 10 公尺的岩芯，編號為 S-5-1 和 S-5-2，連續取岩芯各 10 公尺；在中池處共鑽了兩口 10 公尺的岩芯，編號為 S-6-1 和 S-6-2，連續取岩芯各 10 公尺；在下池處共鑽了兩口 10 公尺的岩芯，編號為 S-7-1 和 S-7-2，連續取岩芯各 10 公尺。鑽井位置如圖 35 所示。岩芯柱狀圖則如圖 36 所示。

經濟部地質調查及礦業管理中心(時為經濟部中央地質調查所)為了建立大屯火山群火山岩的層序與分析火山噴發之年代，於民國 105 年在小油坑地區鑽

探，採集小油坑 1 號井岩芯樣本共 352 公尺。岩芯 0 至 32 公尺由土壤與沉積物所組成；32 至 88 公尺為安山岩質熔岩流；88 至 93 公尺出露角礫凝灰岩；93 至 107 公尺為安山岩質熔岩流；107 至 117 公尺出露凝灰岩，夾約 1 公尺熔岩流；117 至 352 為安山岩質熔岩流。全段岩芯部分受熱液換質作用影響，約以深度 184 公尺為界，此深度以下岩芯受影響較不明顯。鑽井位置如圖 37 所示。岩芯柱狀圖則如圖 38 所示。

（三）七星池下方電阻率分布

七星池位於小油坑噴氣口附近，可根據海拔高度的不同分為上池、中池和下池三個部分。由於四季變化明顯，水位在不同時間有極大的變化。在乾季，池底可能會完全乾涸，而在雨季，水位則可能上升到 2 公尺以上。池底的周邊基本上被植被所覆蓋，只有在下池旁邊可以看到火山碎屑物夾雜安山岩塊。下池和中池皆分布著許多大型堅硬且厚實的安山岩塊，而中池和上池間存在著約 20 公尺高差。

如圖 39 所示，測線 YX1 位置為七星池上池至下池（中位數電阻率剖面由左至右），中間跨越 20 公尺的高差。在施測期間所有池水均為乾涸狀態，其背景電阻率數值約介於 150 至 400 Ωm 。在上池左側陡坡的近地表處，呈現高電阻率分布，電阻率數值約介於 600 至 3000 Ωm 以上。在 YX1 水平距離 64 至 84 公尺、104 至 120 公尺、136 至 168 公尺、208 至 240 公尺之近地表處出現電阻率相對較低的區域，電阻率數值約介於 50 至 200 Ωm ，可參考鑽井資料進一步確認該低電阻率材料。內政部國家公園署陽明山國家公園管理處 109-110 年度「七星山張裂帶爆裂口之研究」指出，七星池被認為是七星山西側張裂帶上的爆裂口之一，區域內 6 個鑽井主要組成為有機物、砂泥岩、安山岩，形成年代大於 7400 年前。綜合鑽井資料，可判釋在 YX1 剖面中，存在富有機質的泥岩，電阻率約 50 Ωm ，其深度範圍與鑽井結果一致，進一步可推估其側向範圍，於上池約達 8 公尺寬，於中池約達 30 公尺寬，於下池約達 36 公尺寬。其他電阻率數值漸漸增加的電性異常區，暗示七星池附近主要組成的材料比例的變化，在爆裂口中的材料以泥岩為主，而向外則堆積其他電阻率較高的泥砂岩（電阻率約 150 至 400 Ωm ）或安山岩塊（電阻率約 1000 Ωm 以上）。此外，於地表觀察可發現該區域存在崩落的安山岩岩塊、箭竹林或芒草等植被，其位置下方大致對應較背景值還高的電阻率異常區。

為了比較不同剖面，主要的剖面圖使用色階為 1 至 3000 Ωm 。但在 YX1 中，並不存在低於 10 Ωm 以下的電阻率異常，這表示 YX1 下方並不存在大量的導電礦物（例如：硫化物）。為了更有效利用色階顏色，將 YX1 重新調整色階為 50 至 3000 Ωm ，如圖 40 所示。此時，漸進變化的電阻率構造隱約提供一個模糊的爆裂口地下形貌，本團隊認為相對低電阻異常區是古老的噴發通道，其位置主要在七星池上池與下池，推測至少向地下延伸超過 30 公尺。

整理鄰近鑽井資料，列出地層材料與對應電阻率如表 8 所示。

(四) 小油坑噴氣口下方電阻率分布

小油坑噴氣口的發育可能與十餘萬年前大屯火山群邁入後火山活動期有關。隨著大屯火山群邁入後火山活動期，地底深部殘存的餘熱不僅使得地下蒸氣被加壓，也使得地層內部的地下水體被加熱。當地下蒸氣的壓力被加壓至地層無法承受時，氣體便可能順著地層中的弱帶（如節理）噴出地表。流體也可能藉由地層中的弱帶湧出地表。然而，除了壓力不均導致流體和火山噴氣噴出地表外，二者混合而形成的強腐蝕性熱液，其與岩層中礦物產生熱液換質作用，使得岩層中的岩石強度降低，最終也可能導致流體和火山噴氣由地層中噴出地表。

如圖 41 至圖 45 所示，小油坑噴氣口下方 5 條測線高程約為 690 至 790 公尺，參考位於小油坑遊客停車場的小油坑一號井，該深度範圍內的主要地層組成是以細顆粒膨潤石富集的黏土、粗顆粒的安山岩質熔岩流，背景電阻率約介於 20 至 200 Ωm 。根據本團隊過去在大屯山地區的調查經驗，這些顆粒度差異較大的地層，在孔隙中填充黏土或淡水的情況下，電阻率不會有明顯的差異，但是在熱水換質作用強烈的區域，常存在豐富的導電礦物，此時電阻率會明顯地下降，甚至低於 1 Ωm 。接近噴氣口的測線（YX3 與 YX7），呈現出明顯的低電阻率分布，其電阻率數值介於 1 到 8 Ωm 之間。與現地情況比對，該區域的岩石大多經歷了換質作用，呈現出結構鬆散的灰色岩石，多處岩石裂隙中呈現顯著的火山噴氣活動。因此，該區域低電阻率數值可能表明近地表區域分布著大量硫化物地層材料。值得注意的是，在西北方向的延伸區域，可觀察到 YX4 與 YX5 的深部均呈現明顯低電阻率分布，很可能是熱水換質作用強烈的區域在深部是連通的且向下延伸。而 YX3 與 YX7 所顯示的部分垂直向低電阻率分布，推測為潛在的熱液和火山噴氣（如水蒸氣、硫化氫和二氧化硫等氣體）流動通道。此外，電阻率較高的區域主要分布於近地表處，現地材料主要是由鬆散的土壤、崩落的安山岩塊、芒草植被等不易導電的材料所構成，其厚度小於 10 公尺。

小油坑噴氣口位於磺溪上游，該溪流自東南向西北流動。在施測期間，溪水流經 YX4 與 YX5。YX4 近地表區域呈現低電阻率分布，正好對應現地溪水流經的區域，其電阻率數值介於 3 至 10 Ωm 。溪流下方的 YX5 在中段近地表區域也可觀察到低電阻率分布，其電阻率數值介於 12 至 30 Ωm 。此現象符合經驗定律：阿爾奇定律（Archies law），岩層中的孔隙水將導致電阻率下降。然而，本研究目前並沒有其他證據能區別低電阻是由何種因素主導，或許是地層內導電礦物含量？或許是岩層膠結壓密程度？或許是地下水體填充？或是溫度？在不確定原因的情況下，我們可以假設低電阻為單一因素主導，進而利用低電阻的分布範圍初步推估導電礦物含量、熱水換質作用影響範圍、熱水資源存在範圍等。如圖 46 所示，在三維展示下可觀察到小油坑爆裂口處地下的低電阻延伸區域，大致可描繪出近似垂直的噴氣通道。

整理現場露頭觀測，列出地層材料與對應電阻率如表 8 所示。

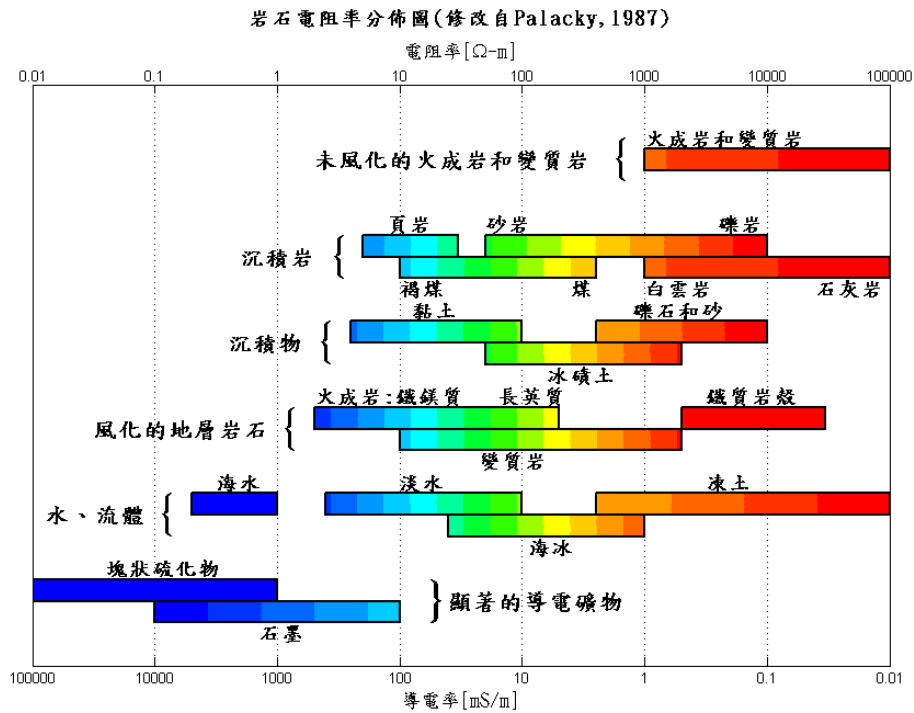


圖 34，岩石電阻率分布圖，修改自 Palacky (1987)。導體（低電阻率）地層的成因與岩性、溫度、孔隙水及鹽度有關，本圖為一般情況下的重要岩石的電阻率分布。色階為 1 至 3000 Ωm 。



圖 35，測線及鑽井分布圖與探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。區域內有 1 條地電阻率剖面調查，為 YX1 測線。其中大頭針所標示位置為測線起點。有 6 口鑽井，分為 S5-1、S5-2、S6-1、S6-2、S7-1、S7-2，資料來源：宋聖榮（2021）。

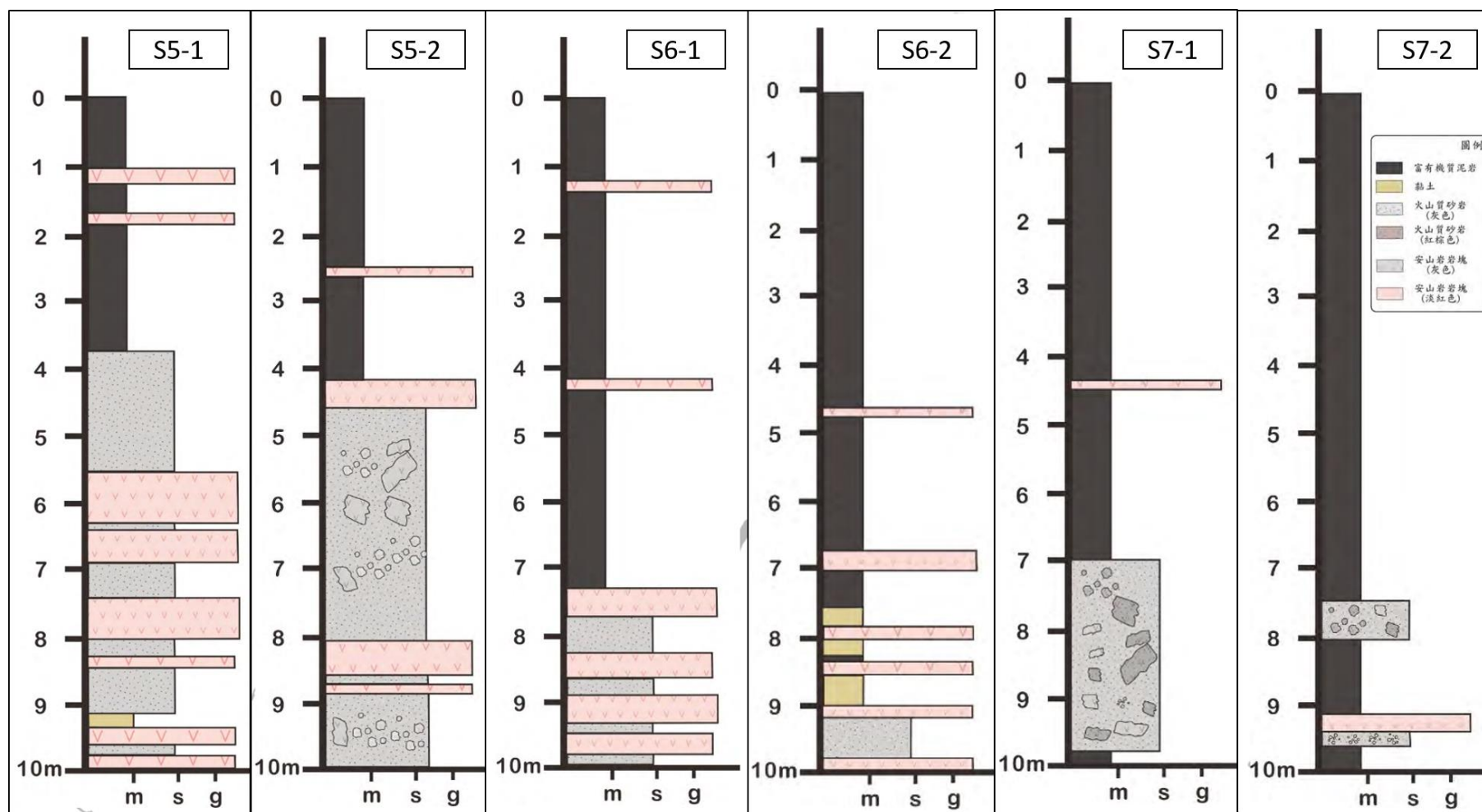


圖 36，七星池地區岩芯柱狀圖，資料來源：宋聖榮（2021）。

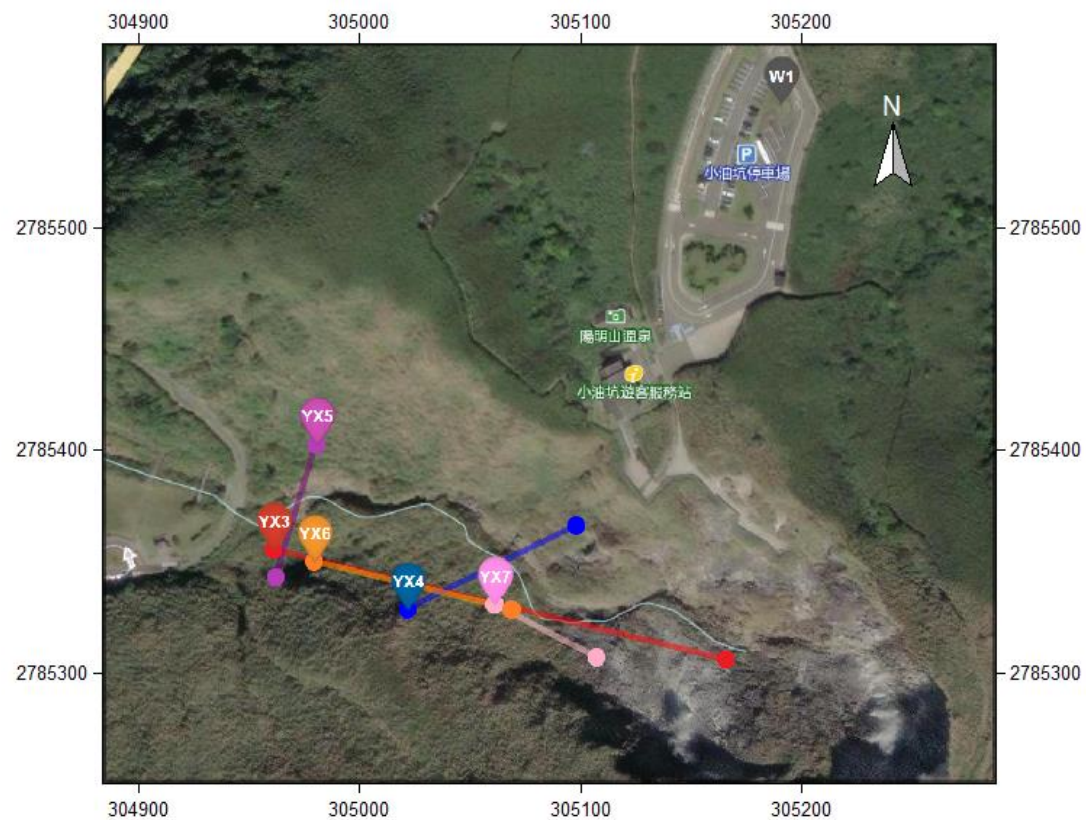


圖 37，測線及鑽井分布圖與探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。區域內有 5 條地電阻率剖面調查，為 YX3、YX4、YX5、YX6、YX7 測線。其中大頭針所標示位置為測線起點。有 1 口鑽井，為小油坑一號井，圖中標註為 W1，資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心洪國騰先生提供。

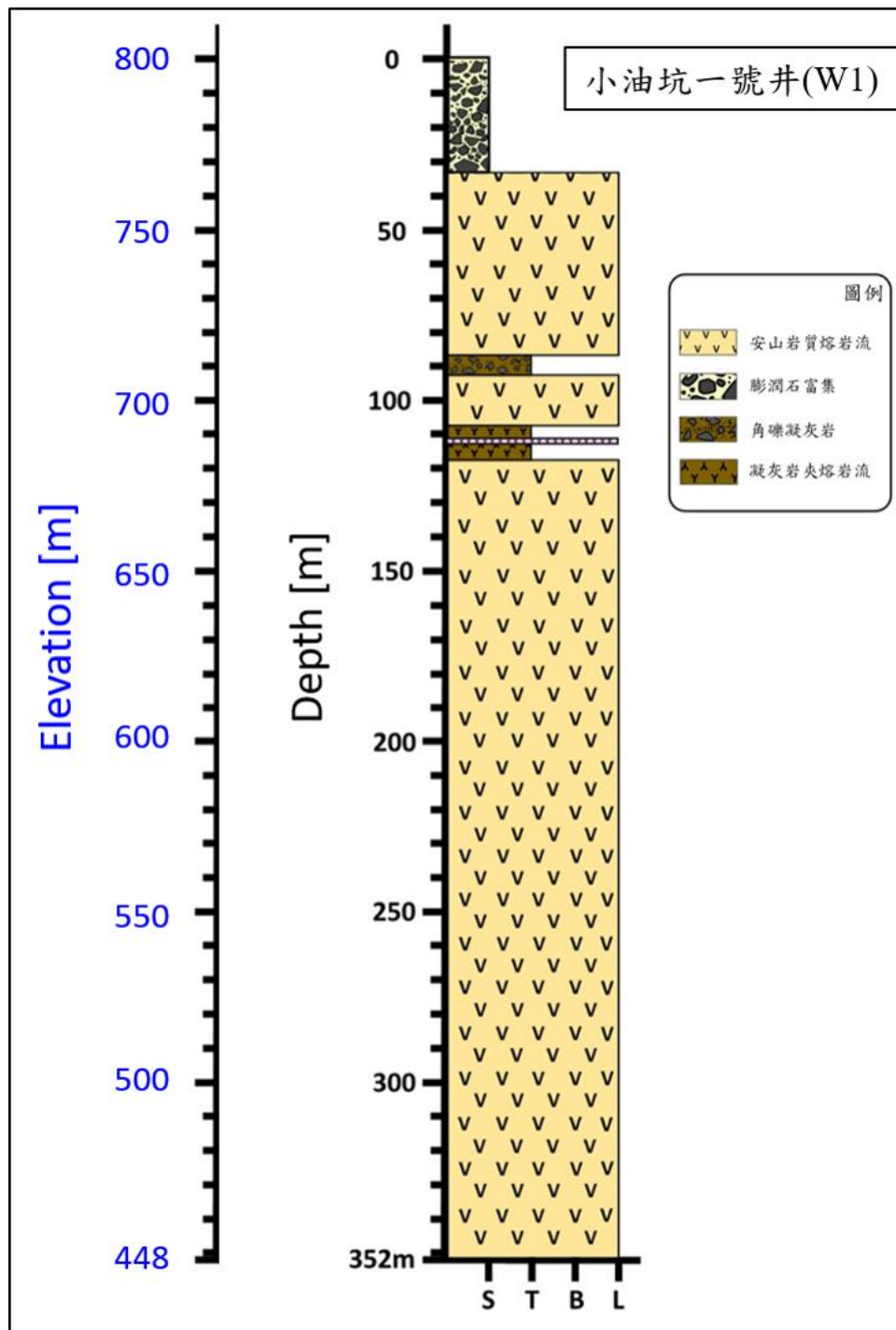


圖 38，小油坑一號井岩芯柱狀圖，資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心
洪國騰先生提供。

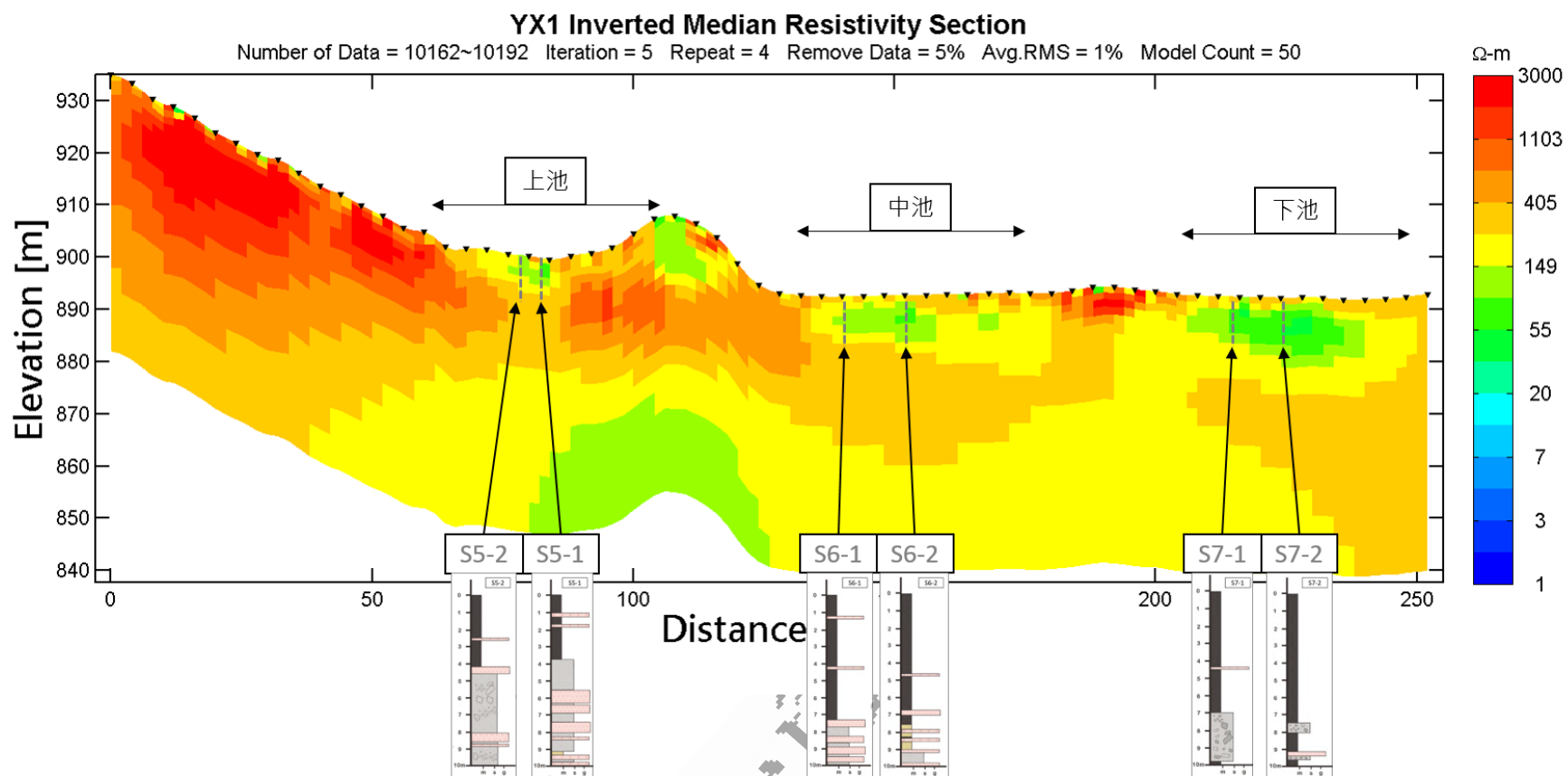


圖 39，YX1 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

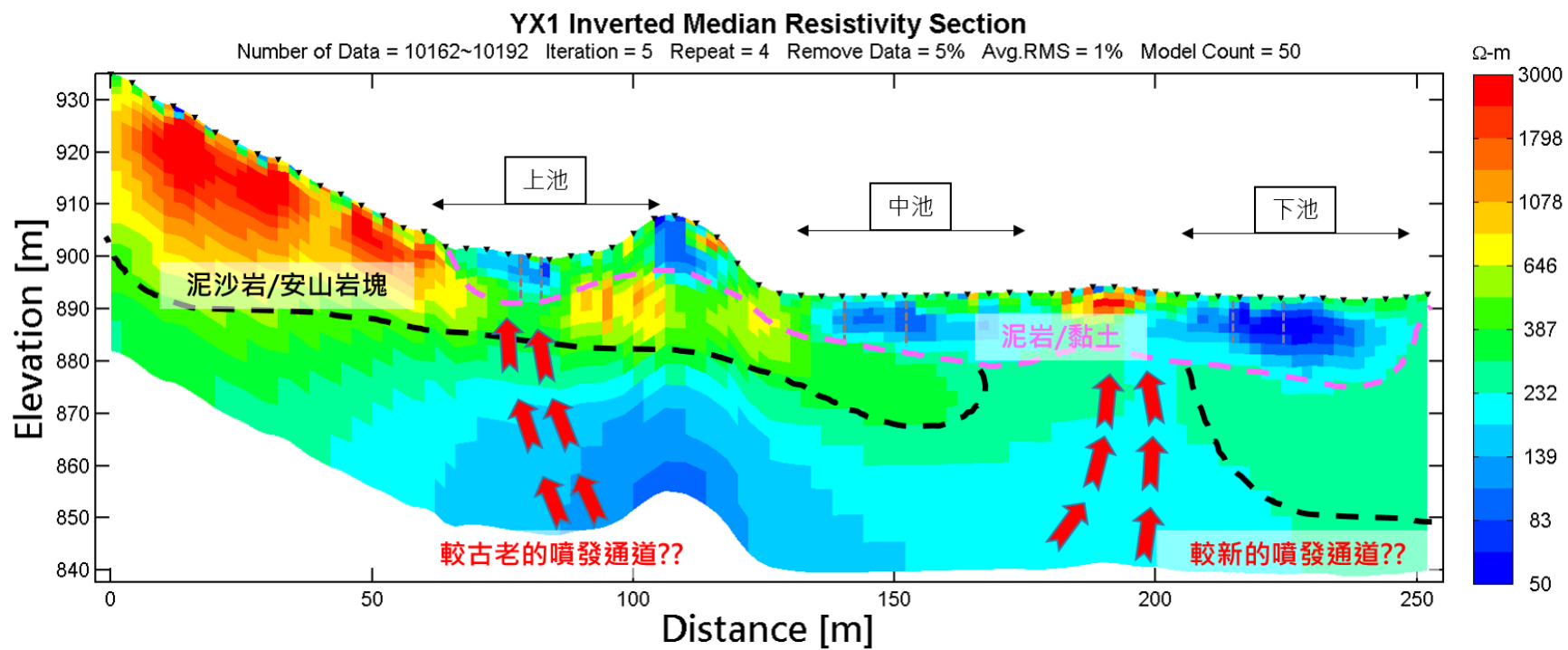


圖 40，YX1 測線之中位數地電阻剖面與噴發通道示意圖。色階為 50 至 3000 Ωm 。

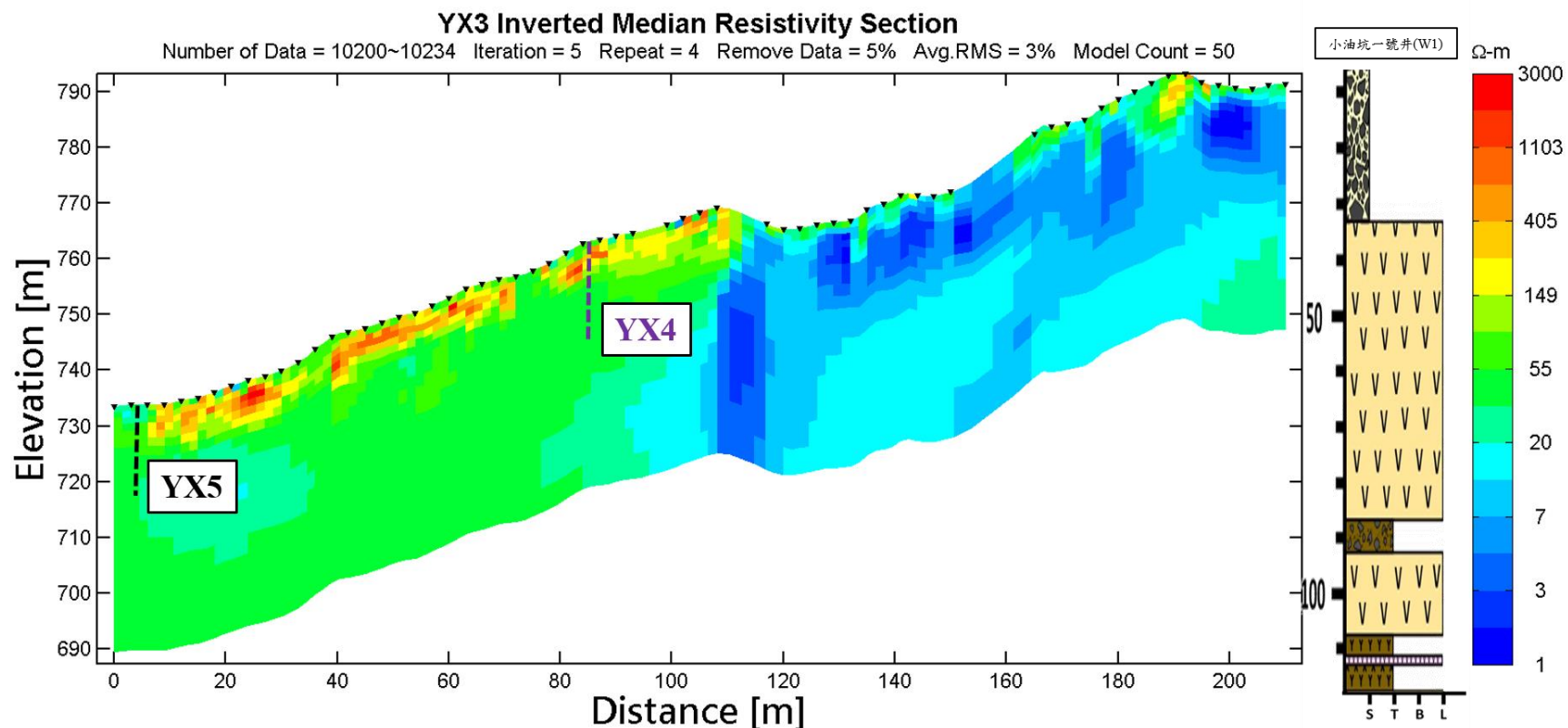


圖 41，YX3 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000Ωm，與圖 34 一致。小油坑一號井與測線有一定程度的距離，僅供粗略參考。

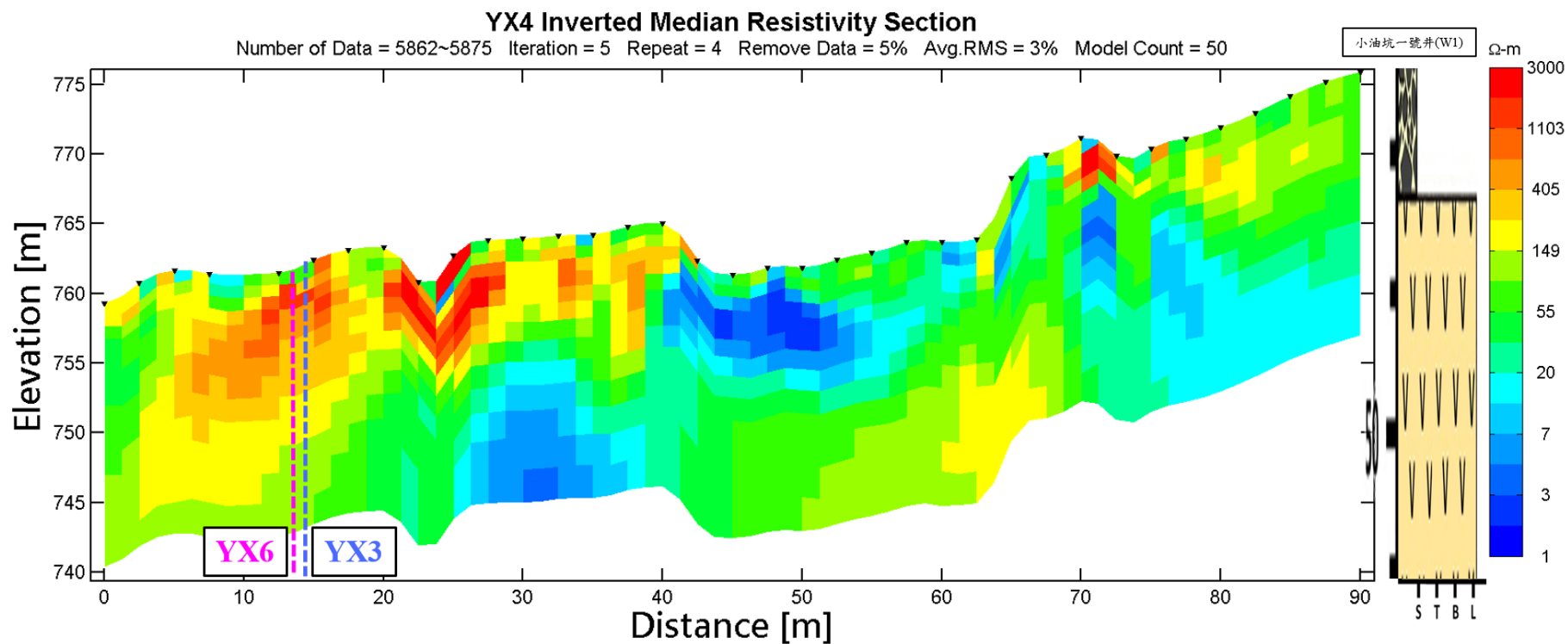


圖 42，YX4 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000Ωm，與圖 34 一致。小油坑一號井與測線有一定程度的距離，僅供粗略參考。

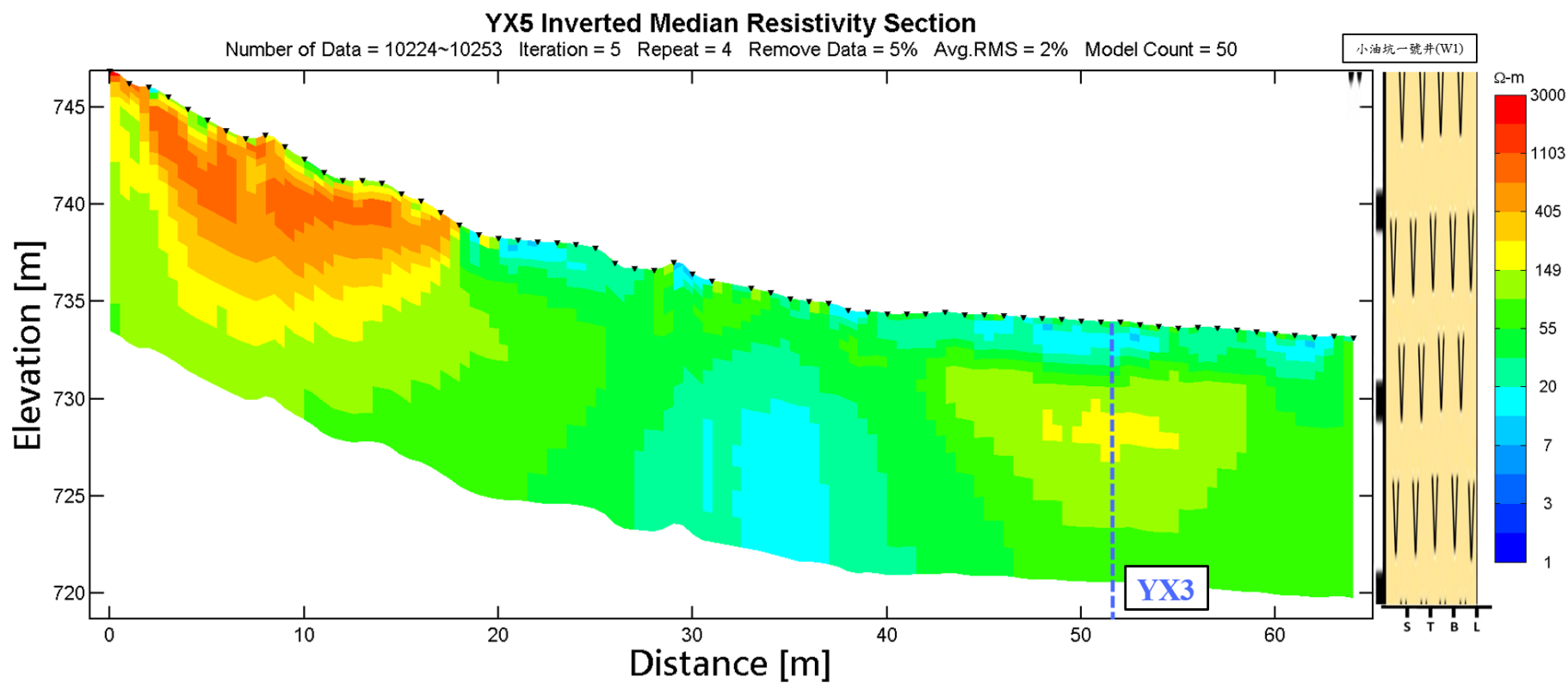


圖 43，YX5 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000Ωm，與圖 34 一致。小油坑一號井與測線有一定程度的距離，僅供粗略參考。

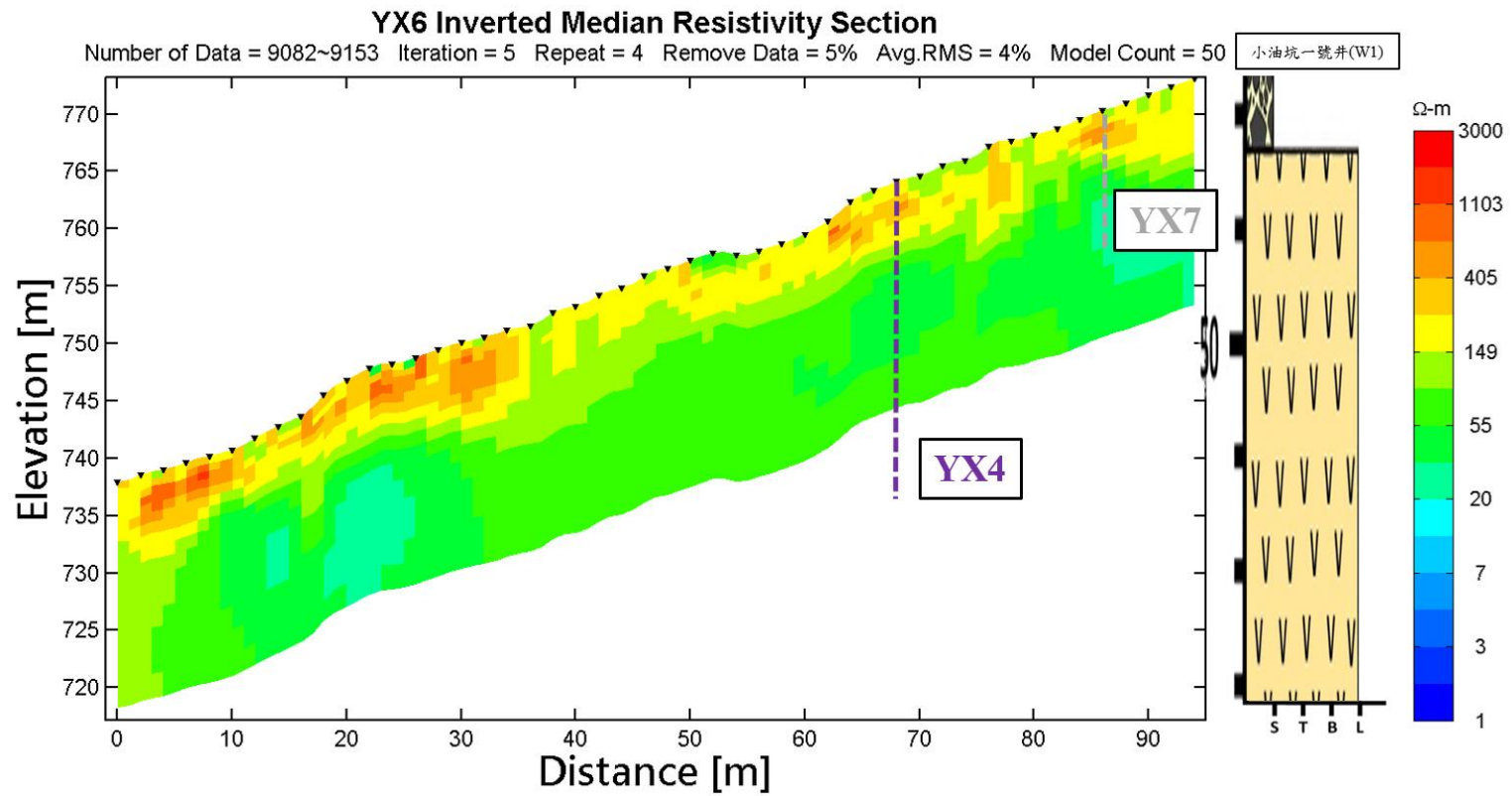


圖 44，YX6 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000 Ω m，與圖 34 一致。小油坑一號井與測線有一定程度的距離，僅供粗略參考。

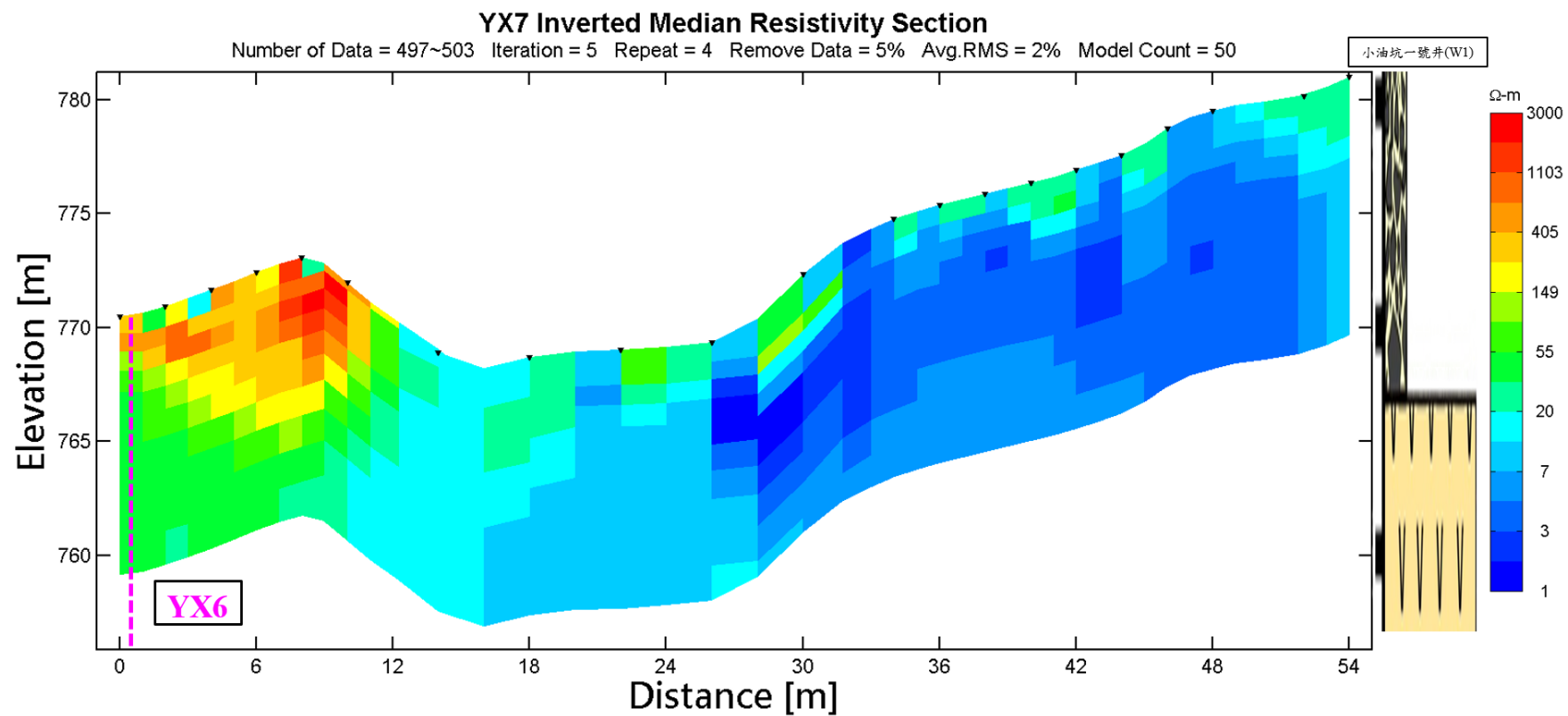


圖 45，YX7 測線之中位數地電阻剖面與岩芯柱狀圖。色階為 1 至 3000 $\Omega\cdot m$ ，與圖 34 一致。小油坑一號井與測線有一定程度的距離，僅供粗略參考。

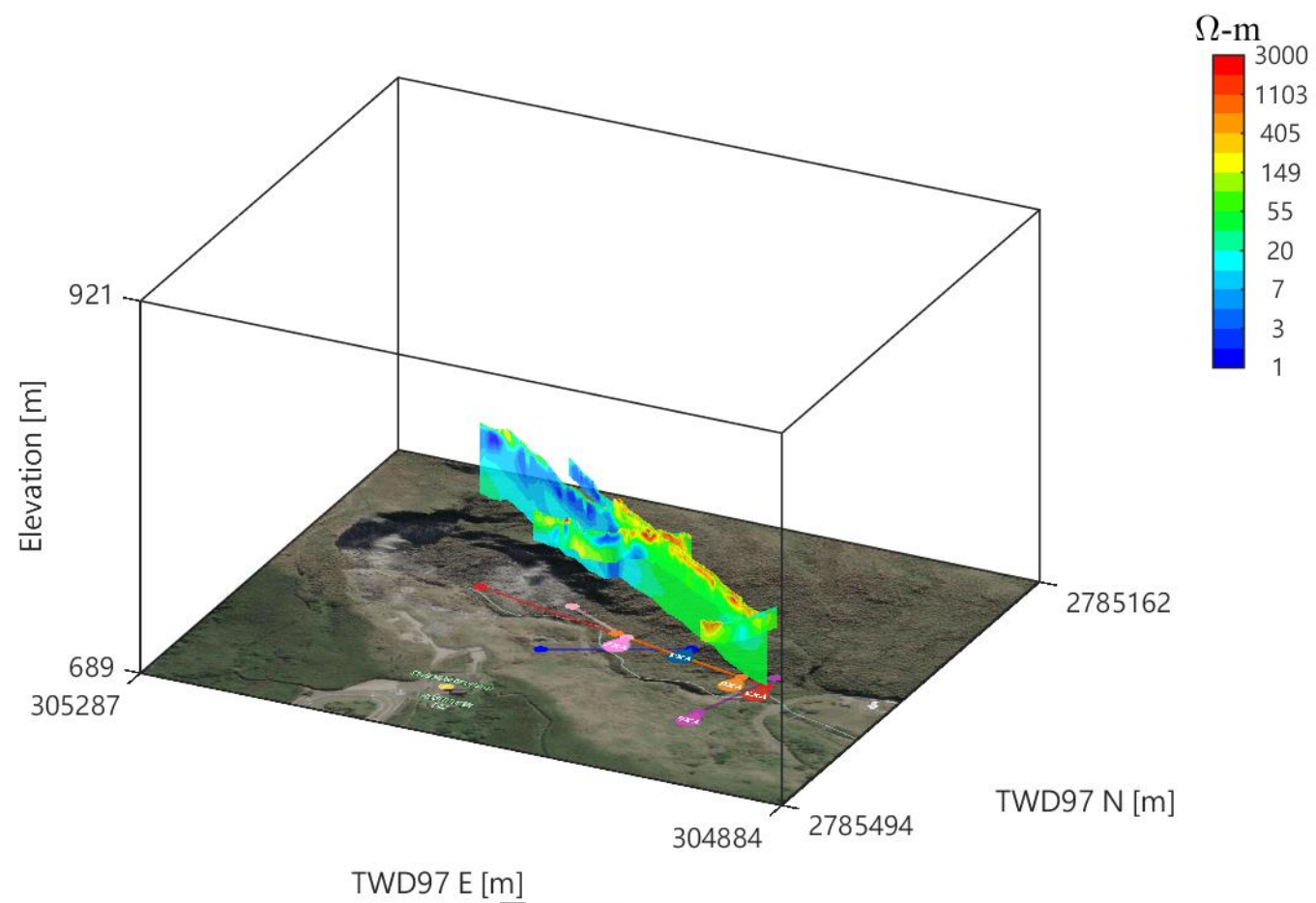


圖 46，小油坑噴氣口區域之三維柵狀圖與平面探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。色階為 1 至 3000 Ωm ，與圖 34 一致。

地點	岩層材料	電阻率[Ωm]	說明
七星池	富有機質泥岩	50-150	對照鑽井資料
七星池	火山質砂岩	150-300	對照鑽井資料
七星池	安山岩塊	300-500	對照鑽井資料
小油坑	噴氣通道	0.01-1	
小油坑	安山岩質熔岩流	30-150	明顯熱水換質

表 8，七星山西北麓地區岩石電阻率表

第八章 討論與評估

七星山區域的火山活動自約 250 萬年前開始迄今，並呈現長期的地質演化。透過對過去火山活動所留存之資訊的深入研究，有望深化對當前地質環境的認識。我們認為七星池作為過去活躍的火山爆裂口，其活動情況應與今日的小油坑相似。如圖 32 所示，我們觀察到七星池區域電阻率數值較高與小油坑噴氣口區域的低電阻率數值呈現明顯的區別。此現象顯示目前小油坑地下可能存在大量的硫化物、熱液或火山氣體通道。然而，在火山活動停止後，經過長時間的風化與堆積作用，其地下結構最終可能趨近於七星池區域的特性，僅留下少數火山活動的痕跡。

根據地電阻觀測，小油坑噴氣口背景電阻率約在 20 至 200 Ωm 之間，主要地層組成是以細顆粒膨潤石富集的黏土、粗顆粒的安山岩質熔岩流。噴氣口附近測線 (YX3 與 YX7) 顯示明顯的低電阻率分布，值介於 1 至 8 Ωm ，暗示該區域岩石經歷換質作用。特別是在 YX4 與 YX5 的深部區域，呈現顯著的低電阻率，可能指向富含硫化物的地層或裂隙向下延伸的情形。而 YX3 與 YX7 的部分垂直低電阻率分布則被推測為潛在的熱液和火山噴氣通道。高電阻率區域則主要分布在近地表處，由不易導電的土壤、風化材料和植被構成，顯示受風化和堆積等地質作用影響。而在七星池區域，根據前期研究，此處被視為七星山西側張裂帶上的爆裂口之一。鑽井結果指出上池和中池發現可能是由熱氧化作用形成的紅色安山岩，而在下池發現不同濃度的火山泥流崩積物。並且中位數電阻率剖面顯示三個池子下方有一接近背景電阻率的分層，但在池子下方周圍卻有不連續的低電阻率區域，推測是過去熱液通道，今日可能是地下水體裂隙，這強烈支持了這兩個地點在地質環境上的相似性。然而，七星池區域經過長時間的風化與堆積，火山活動已經停止，目前並未觀察到硫化物存在。

對於天然災害防護的研究，目前最迫切的問題之一是深入了解小油坑地表下方火山熱液活動的主要影響範圍。承前一章所述，假設低電阻為單一因素主導，本團隊假設 YX3 測線終點為主要影響範圍邊界之一，並以 YX3 與 YX4 觀測到的極低電阻率 (1 至 8 Ωm) 位置，以及 YX5 觀測到的低電阻率 (15 至 30 Ωm) 位置為熱液、火山噴氣活動影響範圍的邊界。YX3 測線終點至三處邊界的距離分別為 100、105 和 210 公尺。我們假設其影響範圍呈半圓形球體，同時考慮地下流體 (液體、氣體) 充滿均質的地下材料孔隙。根據半圓形球體體積的公式加入孔隙率 (ρ):

$$V_{fluid} = \frac{2}{3} \rho \pi \left(\frac{R}{2}\right)^3$$

其中， V_{fluid} 為流體蘊含量體積； ρ 為均質地下材料孔隙率； π 為圓周率； R 為直徑。我們可以計算出影響直徑下的影響面積，加上孔隙率在不同條件下，可進一步推算對於小油坑噴氣口地下流體的資源量，詳細數值如表 9 所

示，其分布範圍如圖所示。雖然在表中估算的蘊含量最高可達 727,357 立方公尺，然而仔細觀察 YX5 的電阻率數值，其電阻率值明顯高於 YX3 與 YX4 兩條測線的極低電阻率。我們推測 YX5 探測深度不足，顯示的證據較為薄弱，不排除該區的低電阻率數值可能並非由火山熱液活動所引起。同時，在表 9 中的數據僅根據中位數電阻率數值作為判斷，並且忽略了地下材料的異質性。因此，這些數值可能與真實的流體資源量存在一定的出入，在有限的證據下，本團隊保守推估地下流體資源量約為 75,766 立方公尺。

在小油坑區域，測線附近可明顯觀測到溪水，暗示地下存在豐富的地下水，根據地電阻影像剖面判釋，倘若地下水加熱，蒸氣噴發可能於低電阻異常區域發生，且其低電阻異常區常見有向下延伸之形貌。如圖 50、圖 51 所示，本團隊推測圖中黃色箭頭所指位置下方可能存在熱液，具較高噴發潛勢。

未來的研究可針對潛在熱液、火山氣體通道或富含硫化物區域（例如：YX3、YX4、YX5 出現明顯低電阻率的延伸方向），增設更多地電阻測線提供更為全面的資訊，或是進行小尺度的鑽探工作來確認地下的真實材料。

本案原先以山區工作水準規劃野外調查工作項目與經費，實際工作時才發現現在遊客眾多的國家公園地區進行調查必須更多考量遊客安全與自然景觀。小油坑爆裂口地區的地形變化劇烈，表層土壤鬆散，甚至有些被芒草覆蓋的地方隨時會塌陷，熱情的遊客也可能誤入工作區域，因此，所有調查工作必須隱蔽且一次成功完成障礙物清除與除草，現地沒有條件重複除草或大範圍除草。這表示實地勘察必須要非常完整，也意味著經費必須增加，甚至應該先獨立進行一個勘察計畫來評估是否可以執行，否則會如本案一樣，在現地允許的條件調整測線，導致部分測線之探測深度較淺。

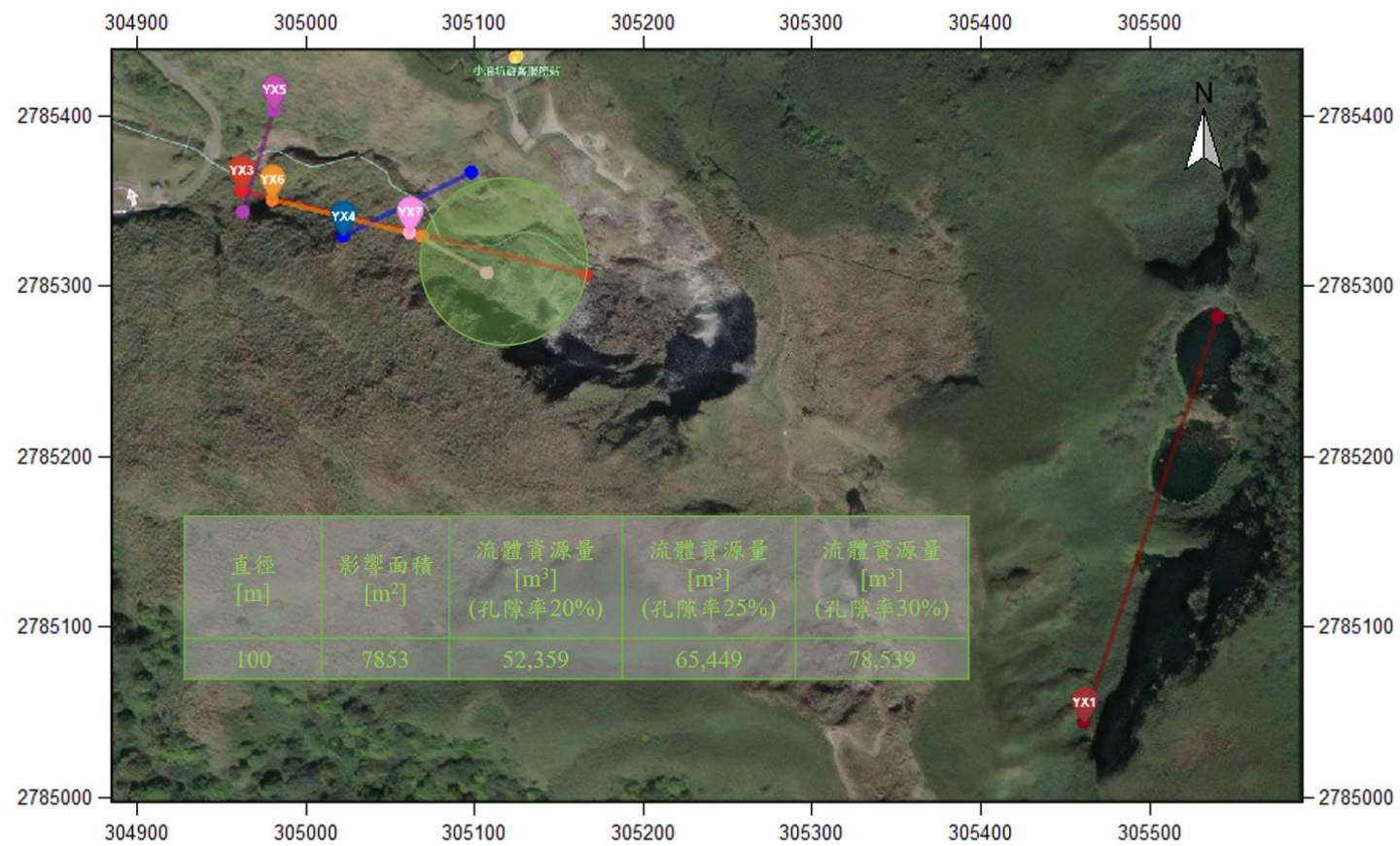


圖 47，火山熱液活動的主要影響範圍圖（直徑 100 公尺）。邊界訂於 YX3 測線最低電阻率出現的位置。

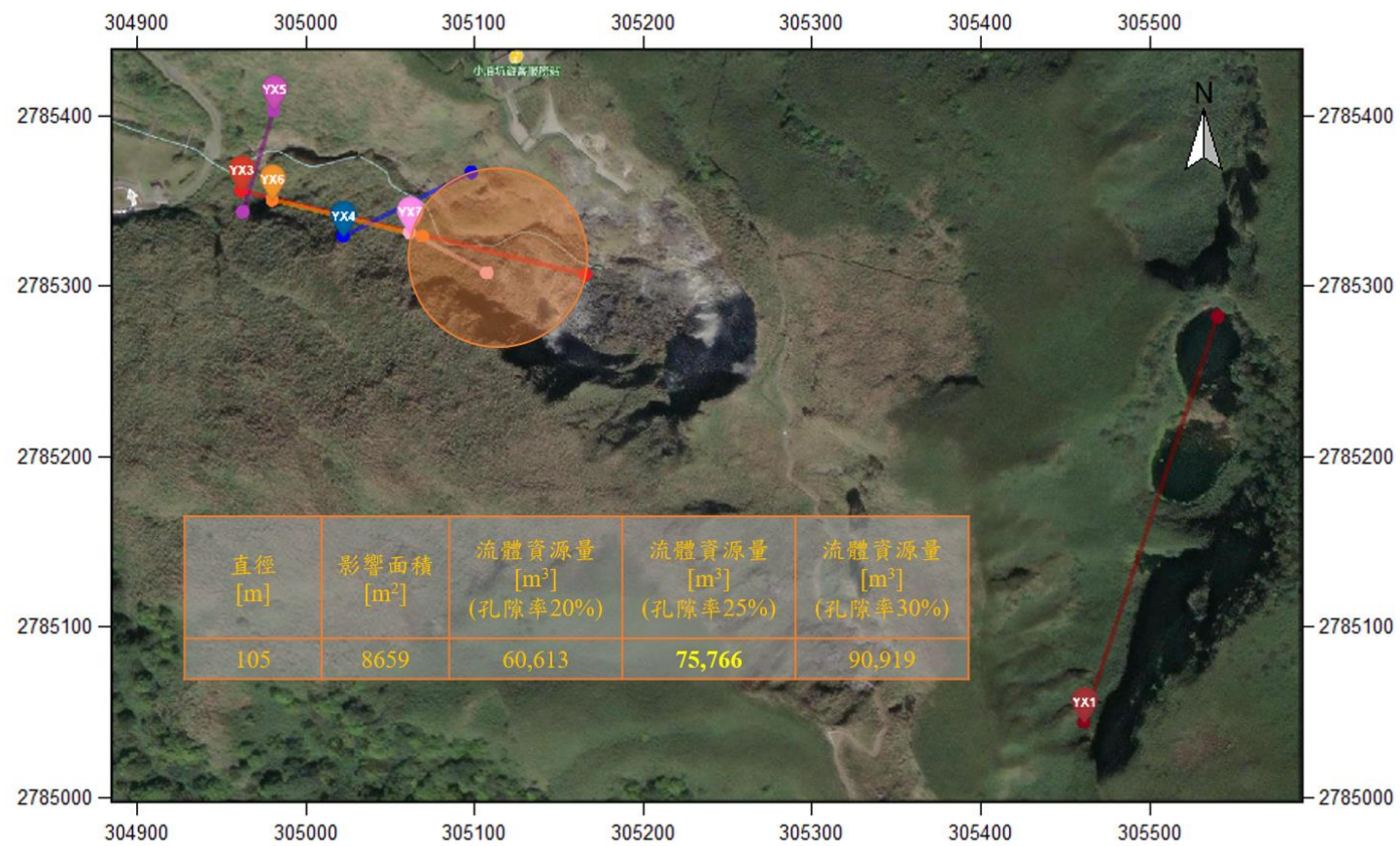


圖 48，火山熱液活動的主要影響範圍圖（直徑 105 公尺）。邊界訂於 YX4 測線最低電阻率出現的位置。本團隊保守推估地下流體資源量約為 75,766 立方公尺。

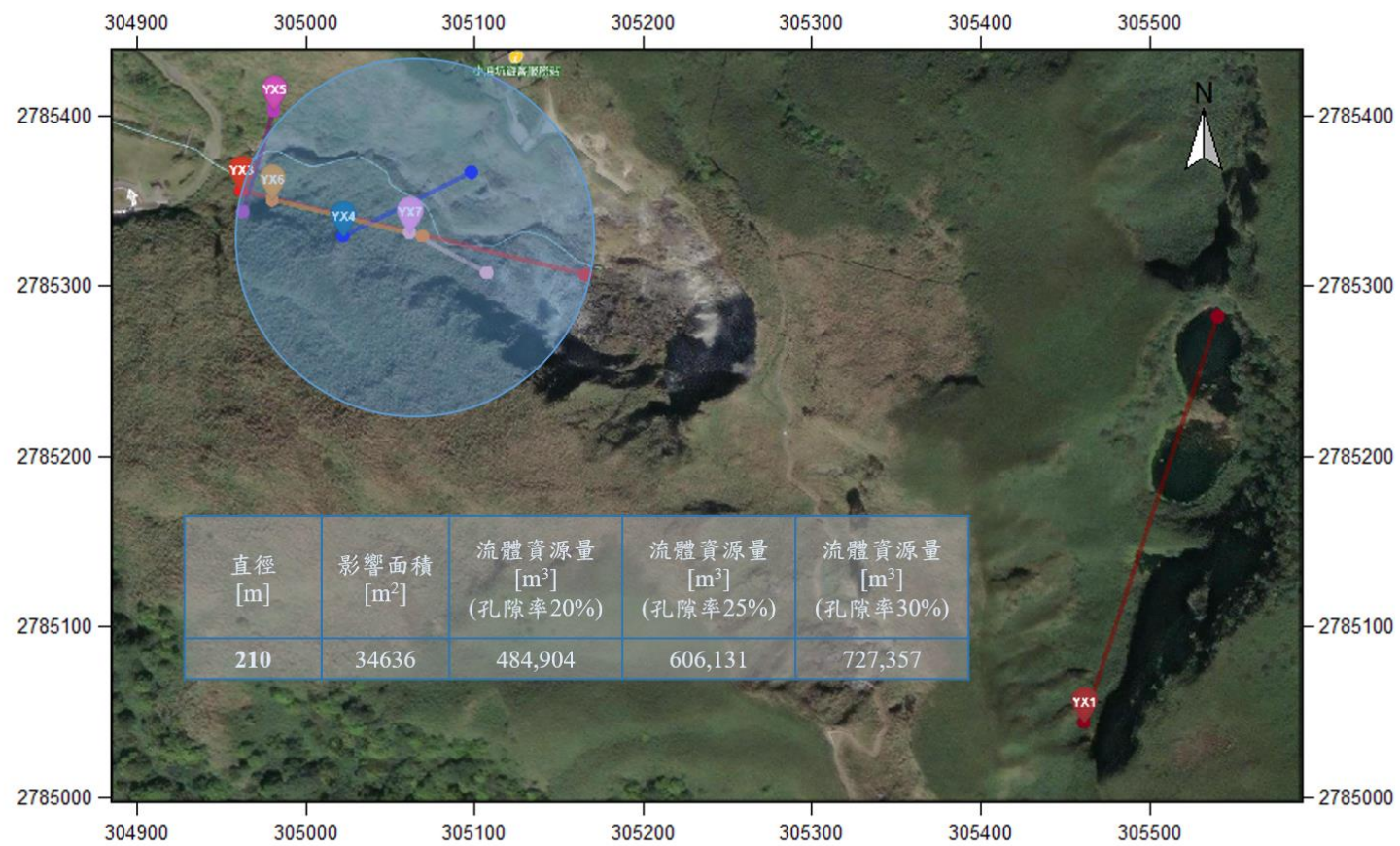


圖 49，火山熱液活動的主要影響範圍圖（直徑 210 公尺）。邊界訂於 YX5 測線最低電阻率出現的位置。

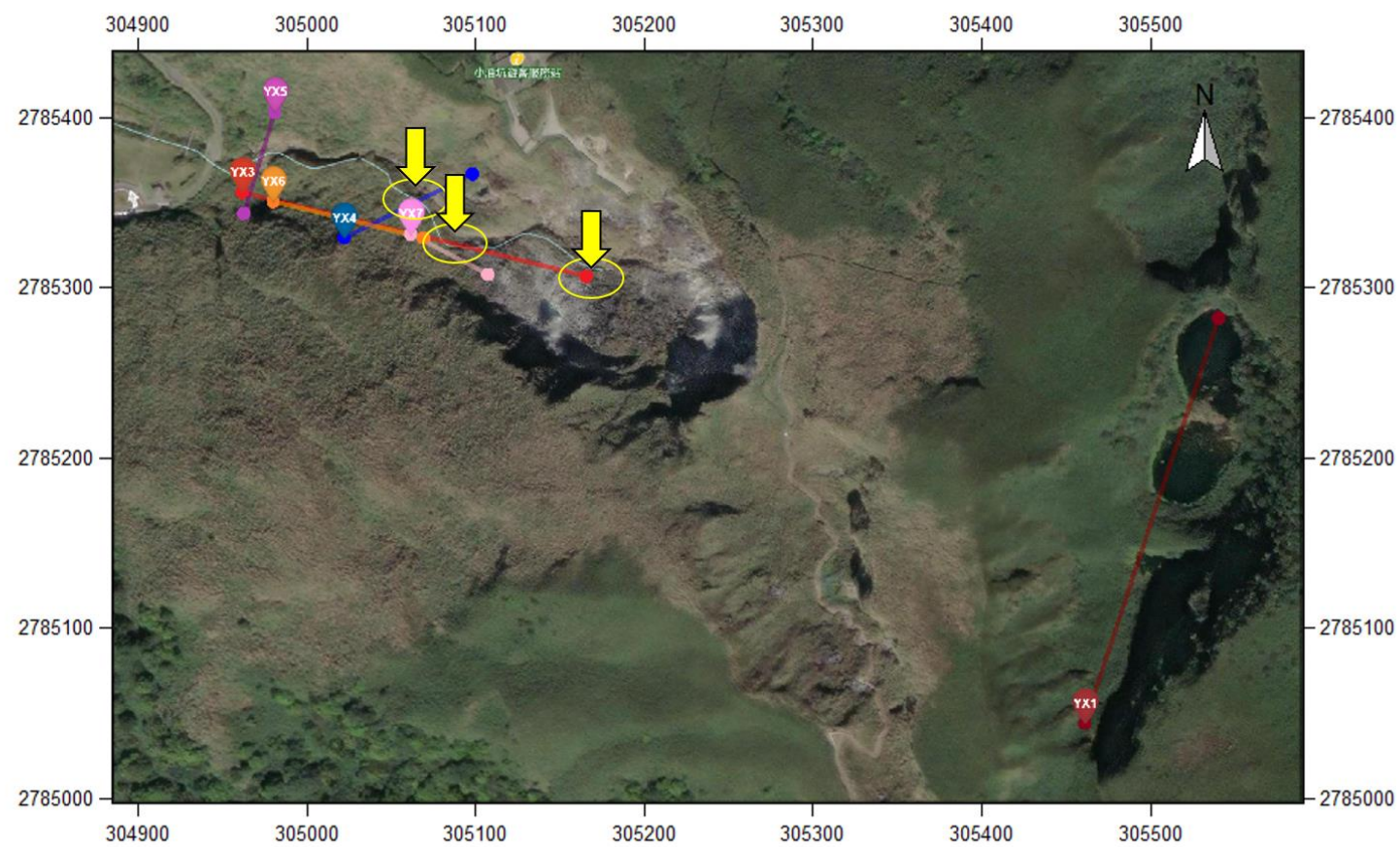


圖 50，熱液與噴發潛勢平面圖。黃色箭頭所指位置下方可能存在熱液，具較高噴發潛勢。

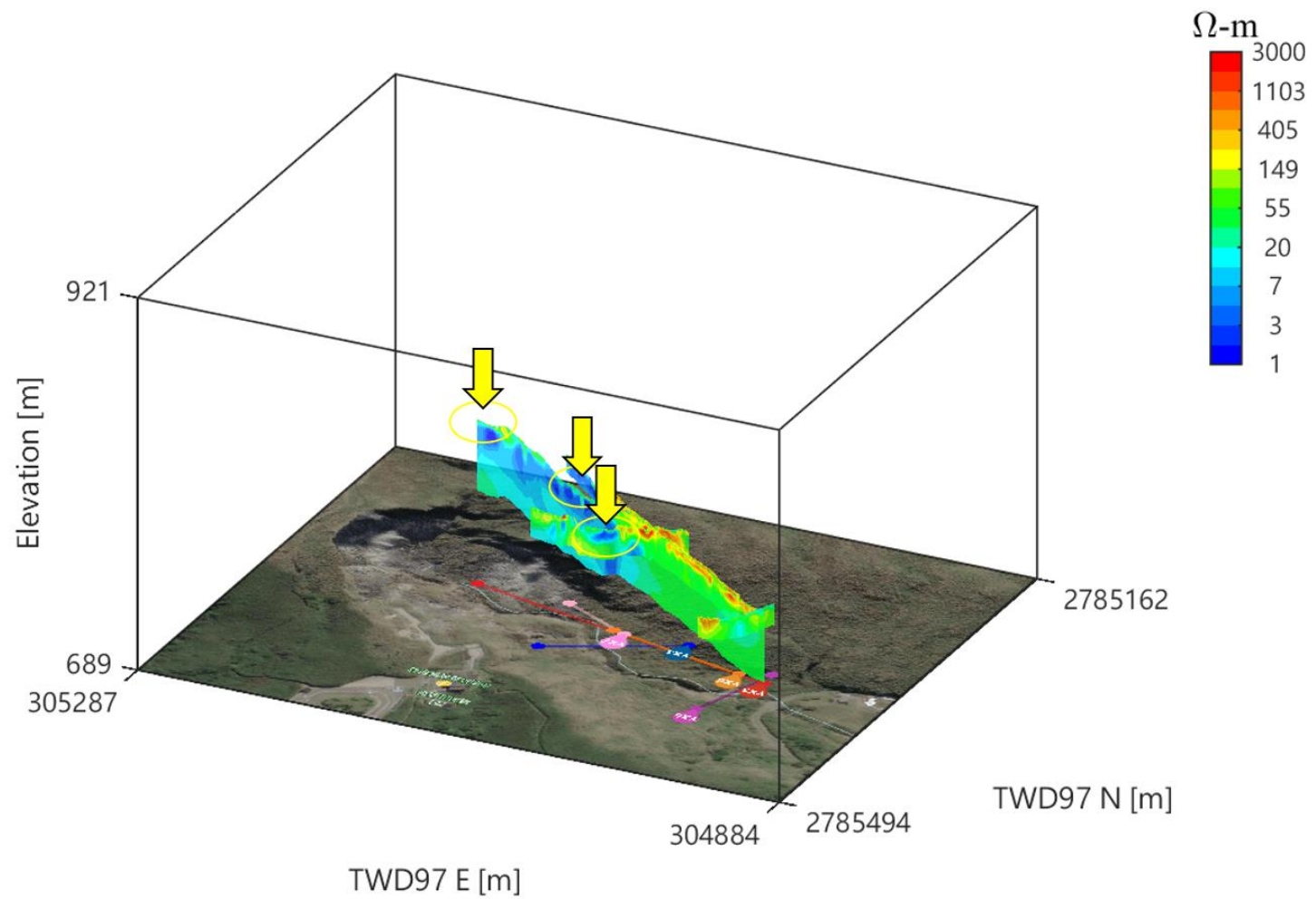


圖 51，熱液與噴發潛勢三維圖。黃色箭頭所指位置下方可能存在熱液，具較高噴發潛勢。

直徑 [m]	影響面積 [m ²]	流體資源量 [m ³] (孔隙率 20%)	流體資源量 [m ³] (孔隙率 25%)	流體資源量 [m ³] (孔隙率 30%)
100 (YX3)	7853	52,359	65,449	78,539
105 (YX4)	8659	60,613	75,766	90,919
210 (YX5)	34636	484,904	606,131	727,357

表 9，小油地區火山熱液活動影響面積與地下流體的資源量估算。本團隊保守推估地下流體資源量約為 75,766 立方公尺。

第九章 結論

本研究針對七星山西北麓地區進行電性地球物理探勘，以探討其地下結構和火山熱液活動的相關性，研究區域設置了 6 條地電阻測線，總長度約 813 公尺。歸納整理結論如下：

一、地電阻測線資料品質良好，電阻率模型可有效反應地下構造：

1. 依照研究區域內其中 5 條交錯測線的電阻率分布比較，加強了本團隊對於研究成果的信心。測線交錯區域的相似電阻率分布顯示，不同測線所收集的數據應真實反映地下電阻率的分布情況。
2. 電阻率模型與鑽井資料高度相關。

二、七星池地區電性構造特徵：

1. 根據地電阻觀測，七星池在施測期間所有池水均為乾涸狀態，其背景電阻率數值約介於 150 至 400 Ωm 。低電阻率異常區之電阻率數值約 50 Ωm 。
2. 七星池地區淺層電性構造與岩芯地層柱高度相關。
3. 從地電阻剖面模糊地描繪出可能的古老噴氣通道。

三、小油坑噴氣口地區電性構造特徵：

1. 小油坑噴氣口背景電阻率約在 20 至 200 Ωm 之間。低電阻率異常區之電阻率數值約小於 10 Ωm ，甚至低至 0.1 Ωm 以下。
2. 主要地層組成是以細顆粒膨潤石富集的黏土、粗顆粒的安山岩質熔岩流，該區域內顯著的低電阻率，可能指向富含硫化物的地層或裂隙向下延伸的情形，部分垂直低電阻率分布本團隊推測為潛在的熱液和火山噴氣通道。

四、火山熱液活動影響範圍：

1. 本研究對天然災害防護工作進行評估，針對小油坑噴氣口中心點周圍的地下可能存在的熱液活動影響範圍進行了初步估算。
2. 根據中位數電阻率數值作為判斷，我們初步估算地下流體潛在的資源量約為 75,766 立方公尺。然而，我們也指出了估算方法的一些假設和限制，包括地下材料的異質性和熱液活動影響範圍的不確定性，這些都可能導致估算結果與真實情況存在一定的差異。
3. 根據地電阻影像及現場地表觀測結果，推測熱液與噴發潛勢高的位置，作為園區經營管理之參考。

綜合而言，本研究所獲得的中位數電阻率剖面，為了解七星山西北麓地區

的地下結構和熱液活動提供了有價值的信息。未來的研究可針對潛在熱液、火山氣體通道或富含硫化物區域（例如：YX3、YX4、YX5 出現明顯低電阻率的延伸方向），增設更多地電阻測線提供更為全面的資訊，或是進行小尺度的鑽探工作來確認地下的真實材料。同時，期望本研究所提供的研究成果與地下電阻率資訊，對於小油坑噴氣口的天然災害風險評估和預警系統的建立提供實際應用價值。



第十章 建議

本研究初探了七星山西北麓地區近地表熱液之電阻率特性，未來仍建議針對未知領域持續進行研究與監測，並可將研究成果轉換為科普資訊，加強與民眾宣導活火山及蒸氣噴發之相關資訊。中長期建議整合其他地球物理、地質方法建立蒸氣噴發預警機制與防災體系，以減低災害與保障民眾安全。

一、短期可行建議

1. 推廣地電阻影像法應用於火山地區近地表熱液之研究成果，並納入火山科普教育

主辦單位：內政部國家公園署陽明山國家公園管理處

協辦單位：無

地電阻影像法應用於地表熱液研究對於大屯火山群屬於較新的科學研究方式，建議轉譯為科普知識，融入國家公園原有的火山教育內容並加以宣導，讓民眾進一步了解，目前地下熱液可能的分布及噴發潛勢，以提升民眾的火山知識與防災意識。

2. 進行小油坑地區噴氣孔移棲情形調查及觀測，以維護公共設施及遊客安全

主辦單位：內政部國家公園署陽明山國家公園管理處

協辦單位：無

112年初步探查結果發現目前高溫熱液影響範圍集中於小油坑崩塌地上游區段，近來亦發現噴氣孔有側向變化與移棲的情形，惟因其鄰近遊客往來之遊憩區景觀步道，如隱伏之噴氣孔或熱液移動至公共設施(如步道)下方，可能造成相關損壞，甚至影響遊憩安全。建議未來應著手調查噴氣孔隨時間變化的移棲情形，以維護公共設施及遊客安全。

二、中、長期可行建議

1. 為預防與減低七星山蒸氣噴發事件影響，建議於熱液與噴發高潛勢位置設立地電阻影像法監測站，作為未來預警機制、防災體系與逃生演練等火山防災之基礎

主辦單位：經濟部地質調查及礦業管理中心、國家科學及技術委員會

協辦單位：交通部中央氣象署、內政部國家公園署陽明山國家公園管理處

地電阻影像法可有效探查地下電阻率分布，儘管地下電性構造之低電阻率異常成因非常複雜，但熱液、蒸氣噴發、裂隙等因素都可能加成導致電阻率數值下降，因此建議透過設立長期地電阻影像法監測站，來監測地下電性構造之低電阻率異常，可能有助於了解噴發事件的過程以利未來預警機制、防災體系等工作之基礎。值得注意的是，七星山之噴發氣體成分含有大量的硫氣，多數的儀器設備將面臨嚴峻的鏽蝕問題，這意味著要能夠持續進行監測工作，未來也須要有妥善的維修保養計畫。

2. 進行更多地電阻探測，以更深入了解小油坑噴氣口之地下構造

主辦單位：內政部國家公園署陽明山國家公園管理處

協辦單位：經濟部地質調查及礦業管理中心、國家科學及技術委員會

本研究初步探查小油坑噴氣口至下坡處之地下電性構造，發現目前高溫熱液影響範圍集中於小油坑崩塌地上游區段，富有熱液及高溫，為具有熱液或蒸氣噴發條件的地點，值得更加注意。但因地電阻影像法屬於展距測深，建議可加大測線長度並跨越整個噴氣口，以探查更深處的地下構造。因小油坑噴氣口附近地形惡劣，且有崩塌之可能性，須審慎評估施作方案、安全措施及預算規模，以不影響遊客安全、不破壞自然景觀為原則。

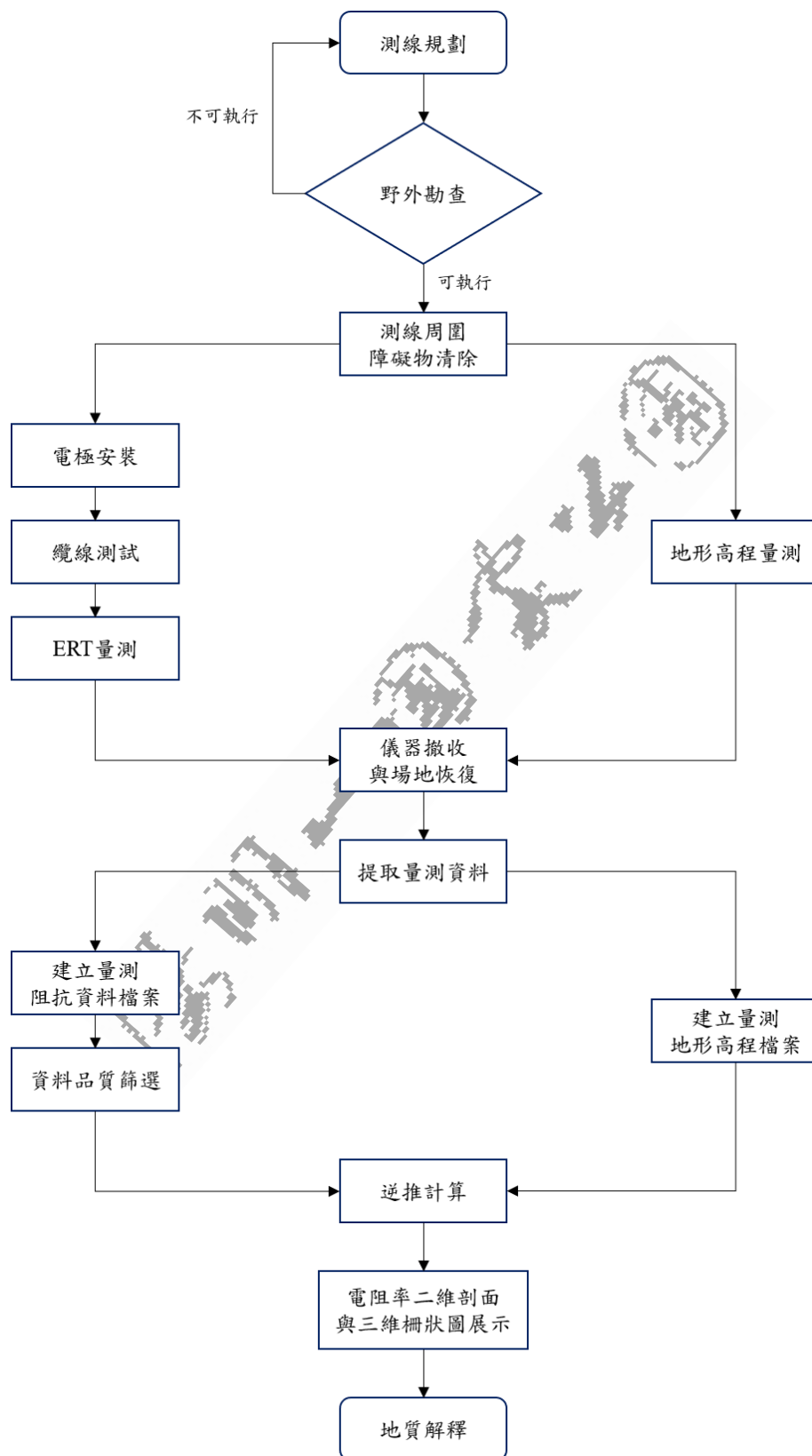
參考文獻

- 朱侑蓁 (2020)。利用地電阻影像法計算水文地質參數：以屏東平原為例 (碩士論文)。國立中央大學，桃園市。
- 李奕亨、蔣立為、彭宗仁、羅偉 (2018)。臺灣北段山區流域水文地質調查及圖幅繪編 (1/4) (第一年度) 期末報告。新北市，經濟部中央地質調查所。
- 吳秉昀 (2017)。地電阻影像法於海岸生物礁調查之研究—以桃園觀音區為例 (碩士論文)。國立中央大學，桃園市。
- 宋聖榮 (2021)。109-110 年度「七星山張裂帶爆裂口之研究」。台北市，內政部營建署陽明山國家公園管理處。
- 宋聖榮、楊燦堯 (2011)。大台北地區特殊地質災害調查與監測第二期—火山地質與火山活動調查與監測 (4/4) 成果報告書。新北市，經濟部中央地質調查所。
- 宋聖榮、盧乙嘉 (2020)。地熱運用對大屯火山群火山活動的影響評估。台北市，內政部營建署陽明山國家公園管理處。
- 林正洪 (2004)。陽明山國家公園大屯火山群潛在岩漿庫及微震觀測網長期監測計畫。台北市，內政部營建署陽明山國家公園管理處。
- 林正洪、楊燦堯、陳洲生、江協堂 (2011)。陽明山國家公園大屯火山群監測工作。台北市，內政部營建署陽明山國家公園管理處。
- 陳肇夏、吳永助 (1971)。大屯火山群地熱探勘工作報告。經濟部聯合礦業研究所。
- 楊燦堯 (2000)。陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究。國家公園學報，10(1), 73-94 頁。
- 楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏 (2003)。大屯火山群火山氣體成份與來源之探討。國家公園學報，13(1), 127-156 頁。
- 蔡武男 (2021)。電阻率變化與降雨間關係及其對於山崩的影響：以宜蘭太平山蘭台地區為例 (碩士論文)。國立中央大學，桃園市。
- Brothelande, E., Finizola, A., Peltier, A., Delcher, E., Komorowski, J. C., Di Gangi, F., & Legendre, Y. (2014). Fluid circulation pattern inside La Soufrière volcano (Guadeloupe) inferred from combined electrical resistivity tomography, self-potential, soil temperature and diffuse degassing measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 288, 105-122.
- Cheng, W. T. (1970). Geophysical exploration in the Tatun volcanic region, Taiwan. *Geothermics*, 2, 262-274.
- Chu, M. F., Lai, Y. M., Li, Q., Chen, W. S., Song, S. R., Lee, H. Y., & Lin, T. H. (2018). Magmatic pulses of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, revisited:

- Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 167, 209-217.
- Dobson, P., Gasperikova, E., Spycher, N., Lindsey, N. J., Guo, T. R., Chen, W. S., & Fowler, A. P. (2018). Conceptual model of the Tatun geothermal system, Taiwan. *Geothermics*, 74, 273-297.
- Feng, T. T., & Huang, K. K. (1970). Exploration of geothermal resources in the Tatun volcanic region, Taiwan, Republic of China. *Geothermics*, 2, 150-154.
- Fikos, I., Vargemezis, G., Zlotnicki, J., Puertollano, J. R., Alanis, P. B., Pigtain, R. C., & Sasai, Y. (2012). Electrical resistivity tomography study of Taal volcano hydrothermal system, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1821-1831.
- Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., Chiodini, G., Revil, A., Johnson, T. C., & Metral, L. (2017). Three-dimensional electrical resistivity tomography of the Solfatara crater (Italy): Implication for the multiphase flow structure of the shallow hydrothermal system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 8749-8768.
- Huang, H. H., Wu, E. S., Lin, C. H., Ko, J. T., Shih, M. H., & Koulakov, I. (2021). Unveiling Tatun volcanic plumbing structure induced by post-collisional extension of Taiwan mountain belt. *Scientific Reports*, 11(1), 5286.
- Juang, W. S., & Bellon, H. (1984). The potassium-argon dating of andesites from Taiwan. In *Proc. Geol. Soc. China* (Vol. 27, pp. 86-100).
- Komori, S., Utsugi, M., Kagiya, T., Inoue, H., Chen, C. H., Chiang, H. T., & Kanda, W. (2014). Hydrothermal system in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, inferred from crustal resistivity structure by audio-magnetotellurics. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1), 20.
- Komori, S., Utsugi, M., Kagiya, T., Yoshikawa, S., Chen, C. H., & Chao, B. F. (2017). Resistivity mapping in the Tatun Volcano Group, Northern Taiwan, revealed by VLF-MT surveys. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(6), 8.
- Lan, C. Y., Liou, J. G., Seki, Y., & Campbell, A. (1980). Investigation of drillhole core samples from Tatun geothermal area, Taiwan.
- Lin, C. H., Lai, Y. C., Shih, M. H., Lin, C. J., Ku, J. S., & Huang, Y. C. (2020). A major hydrothermal reservoir underneath the Tatun Volcano Group of Taiwan: Clues from a dense linear geophone array. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 2889-2902.
- Pu, H. C., Lin, C. H., Lai, Y. C., Shih, M. H., Chang, L. C., Lee, H. F., & Lo, C. H. (2020). Active volcanism revealed from a seismicity conduit in the long-resting Tatun Volcano Group of Northern Taiwan. *Scientific Reports*, 10(1), 6153.

- Song, S. R., Yang, T. F., Yeh, Y. H., Tsao, S., & Lo, H. J. (2000). The Tatun Volcano Group is active or extinct? *Journal of the Geological Society of China*, 43(3), 521-534.
- Shaw, H. R., & Hargraves, R. B. (1980). The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. *Physics of magmatic processes*, 64, 201-264.
- Wang, W. S. & Chen, C. H. (1990). The volcanology and fission track age dating of pyroclastic deposits in Tatun volcano group, northern Taiwan. *Science Reports of the National Taiwan University ACTA Geologica Taiwanica*, 28, 1-30.
- Wang, K. L., Chung, S. L., Chen, C. H., Shinjo, R., Yang, T. F., & Chen, C. H. (1999). Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 308(3), 363-376.
- Wang, K. L., Chung, S. L., O'REILLY, S. Y., Sun, S. S., Shinjo, R., & Chen, C. H. (2004). Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region. *Journal of Petrology*, 45(5), 975-1011.
- Yang, T. F., Sano, Y., & Song, S. R. (1999). $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of fumaroles and bubbling gases of hot springs in Tatun Volcano Group, North Taiwan. *Il Nuovo Cimento C*, 22(3-4), 281-286.

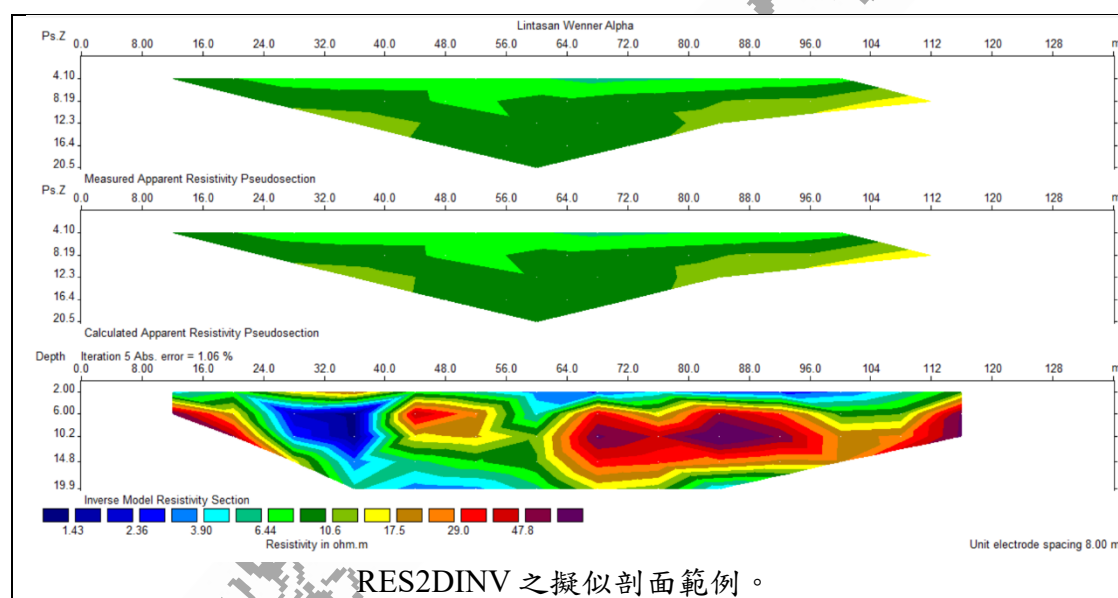
附件一 地電阻影像法施測流程圖



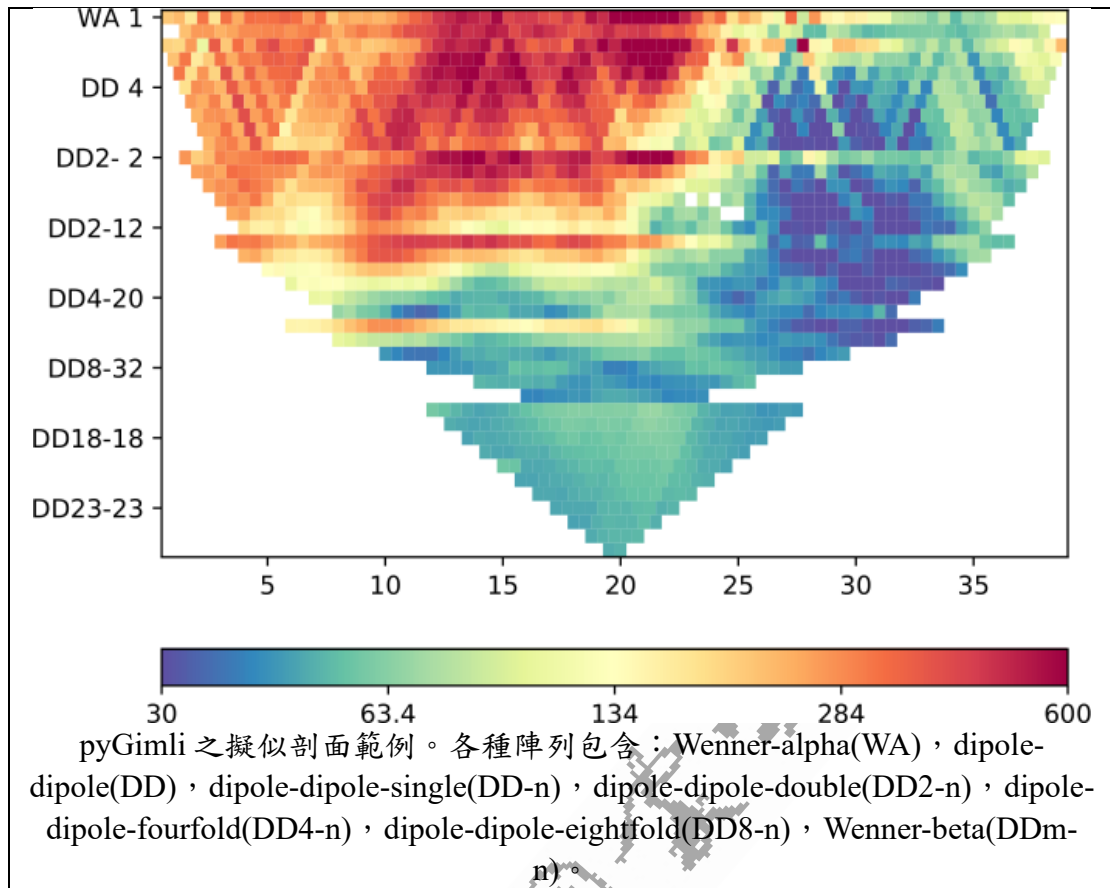
附件二 地電阻影像法擬似剖面圖

本計畫使用美國 AGI 公司研發的 EarthImager2D 軟體程式，進行逆推運算。傳統上進行逆推運算時，使用者會嘗試檢視擬似剖面（pseudo-section）與理論值，用視覺化的方式直觀地快速進行資料檢核及模型擬合評估。惟各家軟體對於擬似剖面製圖有不同的處理方法。

擬似剖面是一個彩色的二維圖片，通常 X 方向位置對應 ERT 方法的 MN 電極位置中點，或整個陣列的中點，Y 方向位置對應某種「深度估計」數值。在某些軟體中（例如，在 res2dinv 中），為 Y 方向計算所謂的「擬似深度（pseudo-depth）」，因此可將原始觀測資料呈現在 XY 平面的圖像上，得到許多觀測點，進一步地，軟體進行了某種插值使多個點重新繪製成一個色彩繽紛的面，其色彩為視電阻率。目前擬似深度並沒有明確的定義，甚至有些軟體並不採用擬似深度。

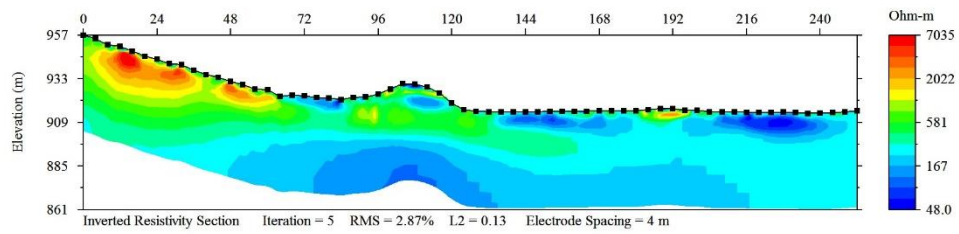
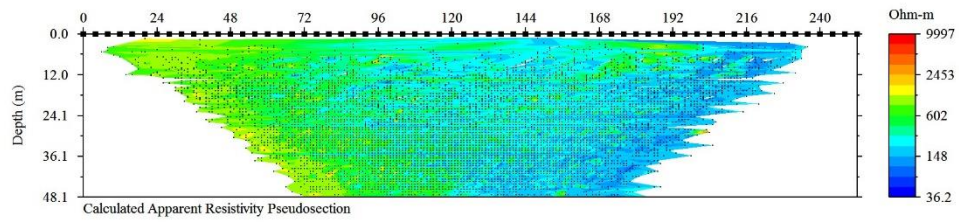
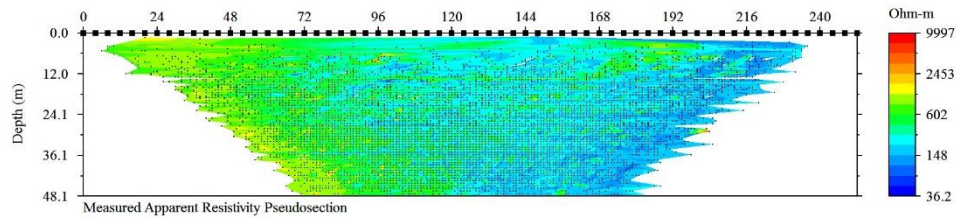


在這樣的做法中，擬似深度的計算與傳統陣列的類型有關。在相同的陣列類型中，擬似深度用相近的比例來決定 Y 方向的位置，蒐集的資料不容易重疊在相近的位置，此時進行插值繪圖是一個很好的選擇。然而，當混用不同陣列時，資料點有可能密集存在某些區域，在這樣的情況下，插值方法繪製的圖像往往在視覺上造成誤導。另外，在開源軟體 pyGimli 中，部分開發者採取了不同的陣列拆解為不同的擬似剖面再合併於同一張圖像中的做法，其中不採用擬似深度。這樣的變化也是因應越來越強大的資料蒐集方案（收集多種傳統電極陣列資料）下延伸的問題。

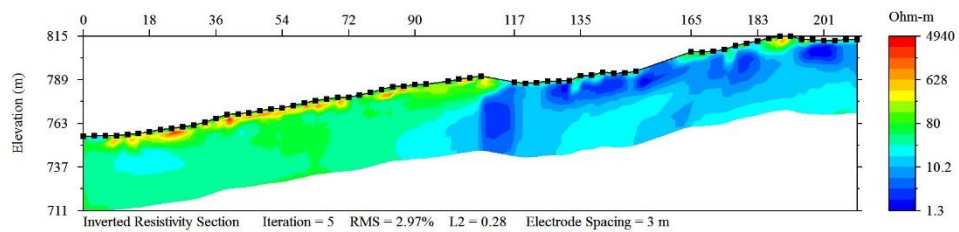
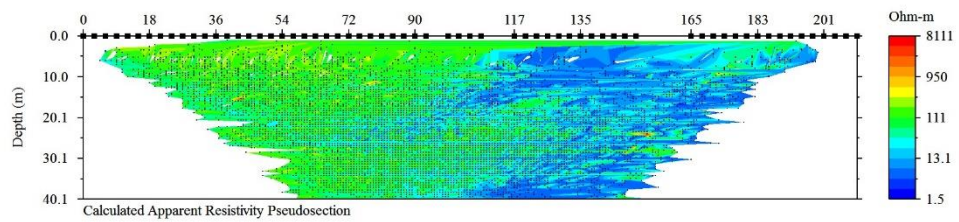
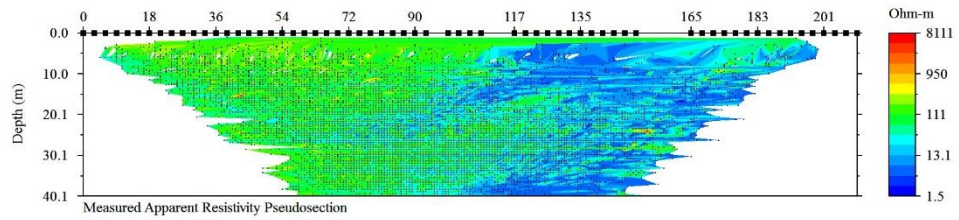


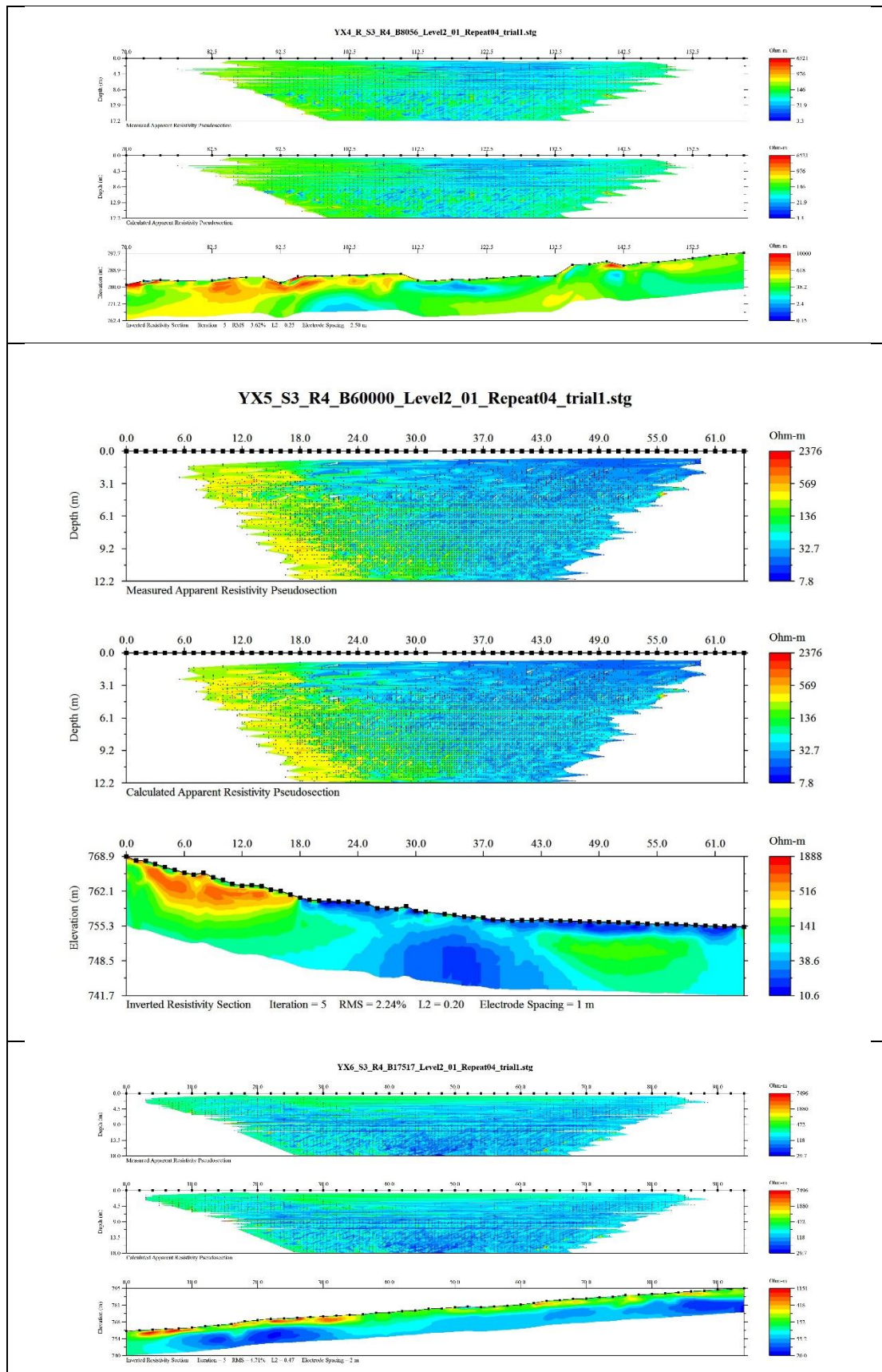
本計畫進行了大量次數的逆推運算，在此提供各測線利用 EarthImager2D 軟體原生產製之擬似剖面作為說明，但因為數量過大，各測線隨機抽取一張圖作範例。從範例中可以發現數量超過萬餘筆的情況下，內插繪圖的效果不佳，其原因可以由 pyGimli 之擬似剖面範例找到原因，當不同的陣列搭配「擬似深度」後疊在一起，就會呈現這樣的狀況。但 pyGimli 之擬似剖面範例沒有提供深度資訊，這也影響了傳統上對擬似剖面的檢視。

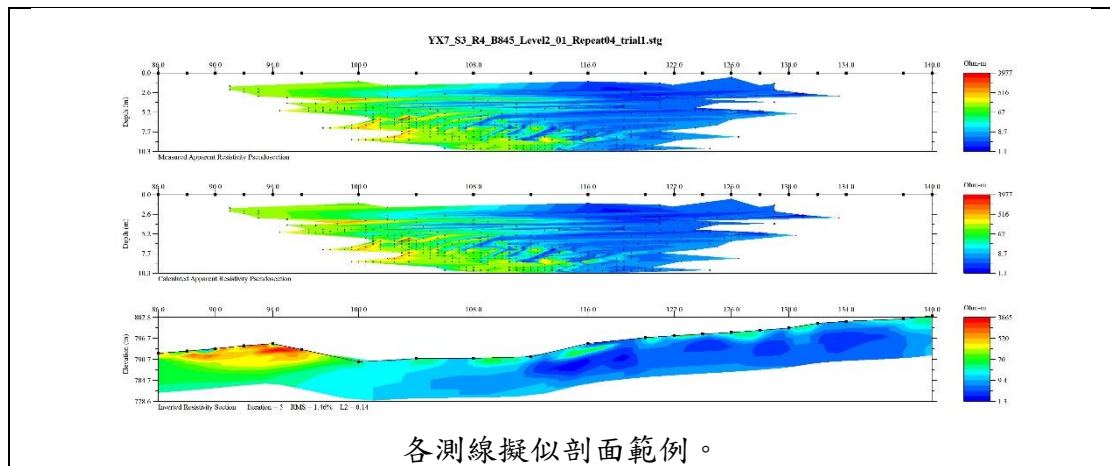
YX1_S3_R4_B60000_Level2_01_Repeat03_trial1.stg



YX3b_S3_R4_B60000_Level2_01_Repeat04_trial1.stg



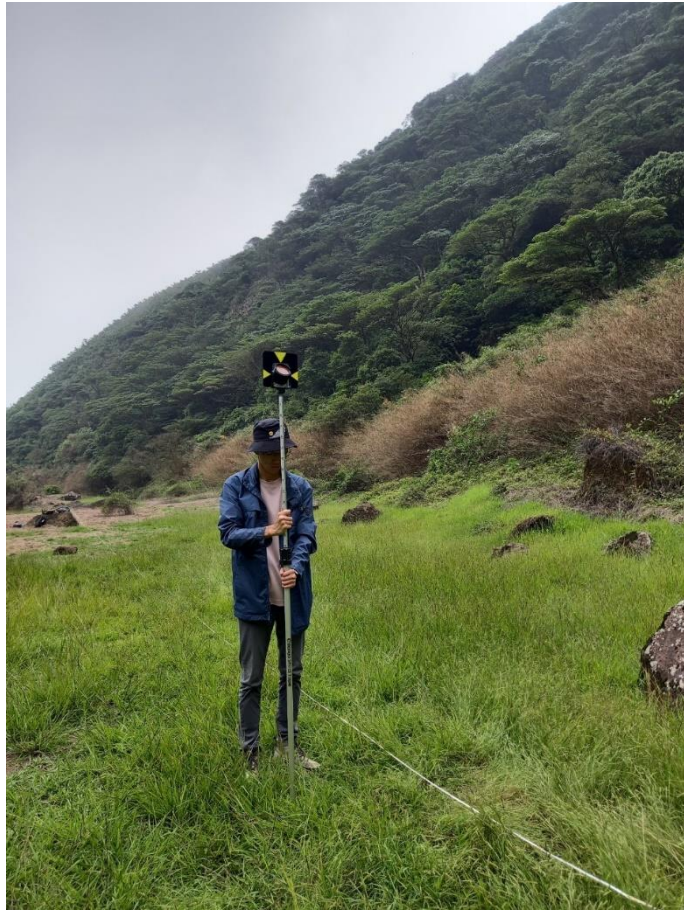




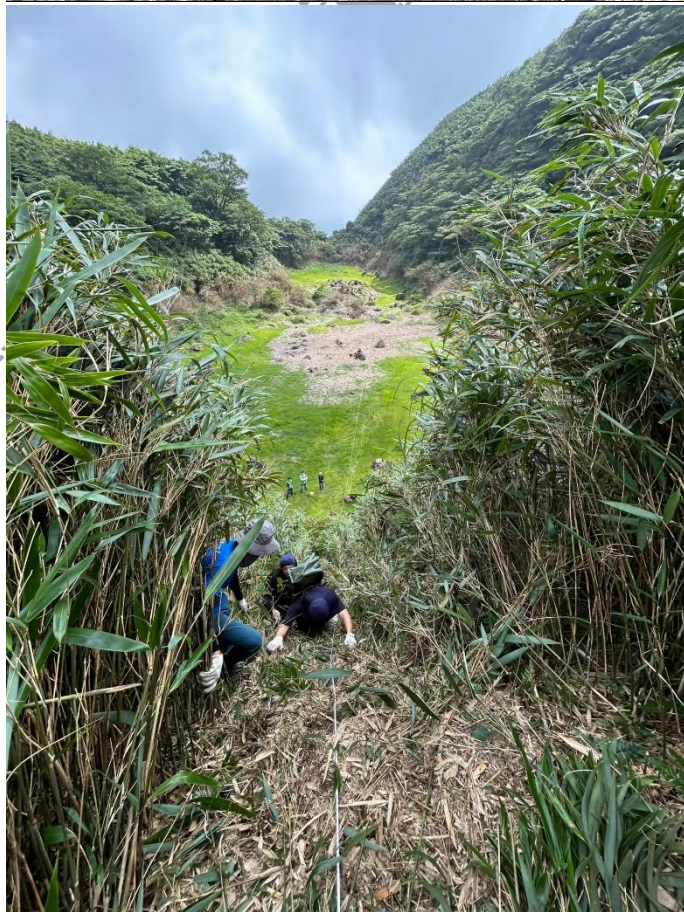
目前，蒐集大量 ERT 資料的狀況下，擬似剖面恐怕造成視覺上之誤導，本團隊認為不宜作為圖像呈現在報告書中，也不宜過多解釋。但本團隊在分析過程中仍會依照各家軟體提供的模式進行內部檢視，以歸納方法作為建立電性模型之重要參考項目之一。在不探討確切物理意義的情況下，此視覺化呈顯仍可有效輔助參數調整與異常檢核。

附件三 野外工作照片





















13-07-19

附件四 七星山西北麓地區近地表熱液初步探查

科普文章

探索小油坑的地下秘密

你曾經去過台北陽明山國家公園走走嗎？夏季時，這裡山明水秀、綠意盎然；冬季時，因為受東北季風影響，細雨紛飛、雲霧繚繞。然而，最特別且不受四季影響的景觀，莫過於不斷飄出縷縷白煙的噴氣孔，讓陽明山部分園區內瀰漫著刺鼻的硫磺味。噴氣孔是典型的火山熱液活動之一，在陽明山國家公園內，就矗立著 51 座火山，稱為大屯火山群。

大屯火山群擁有獨特的火山地質與地形景觀，以及豐富且多樣性的動植物生態，因此設立在陽明山國家公園內。根據定年研究，在大約 280 萬至 250 萬年前，北呂宋火山島弧與歐亞大陸碰撞活躍，使臺灣北部處在擠壓的環境之中，岩漿開始在地底生成；到了大約 80 萬年前，因為北臺灣應力由擠壓轉變為張裂環境，產生的正斷層裂隙，提供地底下岩漿上升的通道，於是大屯火山群開始進入噴發期，在不斷噴發與冷卻的循環中，塑造出一座座壯觀的火山地形；直到大約 20 萬年前，整個大屯火山群噴發活動才逐漸趨於靜止。

儘管目前的大屯火山群並未再次爆發，但在 2016 年，中央研究院證實大屯火山是一座活火山。活火山的定義需要滿足二個條件：第一，在 1 萬年內有火山噴發紀錄；第二，有科學證據證明地底存在活躍的岩漿庫。而二個條件已經皆被學者研究證實。因此，我們還是可以觀察到一些地熱造成後火山作用的現象，例如溫泉、火山噴氣孔活動等。像大油坑、小油坑就是典型的火山噴氣孔，也有非常活躍的噴氣活動，讓大家不禁好奇，在噴氣孔底下究竟有什麼？也十分關心在未來會不會發生更嚴重地噴發，釀成災害。於是，我們研究團隊利用地球物理探勘的方式，調查在小油坑周圍的地下構造。

小油坑位於陽明山國家公園最高峰的七星山西北方，海拔約 800 公尺。擁有後火山活動地質景觀，如噴氣孔、溫泉等。此外，小油坑鄰近山腳斷層，因此硫氣與高溫地下水容易沿著斷層裂隙跑到地表，形成硫氣孔。也因為高溫、強性的腐蝕，在東南側造成口寬約 120 公尺、長約 180 公尺、最大高度差 100 公尺的馬蹄形崩塌地形。

小油坑一帶的岩石組成主要由火山碎屑夾雜火山灰堆積，經過凝聚形成堅硬的火山碎屑岩。噴氣孔與硫氣孔則因為噴發的高溫蒸氣、二氧化硫、鹽酸和硫化氫等氣體。這些氣體及化合物會對周圍地區的地質和地下構造產生影響，我們藉由地電阻影像法，一窺小油坑區域的地下樣貌。

地電阻影像法，簡稱地電阻法，是將直流電藉由插入地表一對電流極通入地下，電流流經地層造成人工電場，由地表上之另一對電位極量測此電場之電位差，此電位差因地層之導電性及探測點間異常物質之不同而有異常不均之分布。蒐集大量地表不同位置的觀測資料，在透過逆推技術，最終可以建立一個電阻率影像，學術上稱之為電性構造模型。這樣的工作就像是骨折時看醫生，拍了一張 X 光檢查一樣，會得到一個視覺上可以觀察的彩色影像，這些色彩則對應不同的電阻率。

影響地下岩層電阻率的因素，包含了溫度、壓力、礦物成分、岩石組構、流體含量等諸多因素。由於地下岩石的組成及狀態相當複雜，較難同時考慮各種可能的因素，以至於無法提供非常精確的解釋。但能粗略的提供其在某些條件下的電阻率分布。(Palacky, 1988)提供一些岩石電導率及電阻率分布範圍的參考，我們可以將地層的重要岩石電阻率分布大致區分出來，如圖 1 所示。

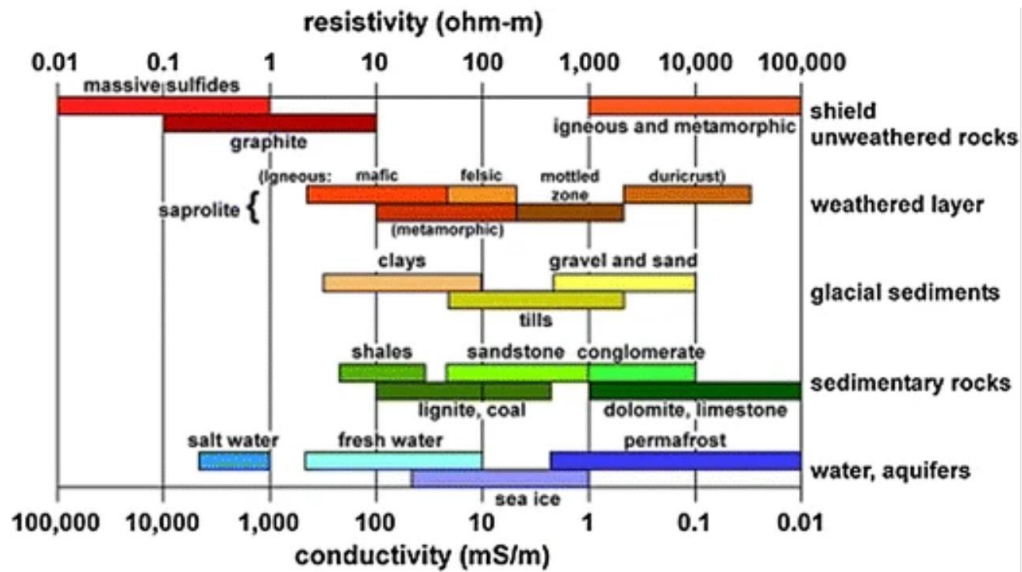


圖 1，岩石電導率(電阻率的倒數)、電阻率分布圖，Palacky(1988)

小油坑地區的地質組成主要是「安山岩」，外觀顏色多為灰色。由於部分區域因岩石長期接觸噴氣孔噴出的高溫蒸氣及硫磺，產生不同程度的化學變化，使外觀上呈現紅色、黃色。此外，安山岩會受噴氣口噴出含硫的強酸熱氣影響，長期的作用之下，使得岩石中原有的鈉、鈣、鐵、鎂和鉀等礦物被強酸熱氣溶解流失。岩石中只剩下矽和鋁，此現象稱為「換質作用(metasomatism)」。經換質作用後的岩石，顏色會變淡，質量變輕，堆積變得較鬆散。其電阻率通常較低，約 1 至 10 歐姆米。

於 2023 年 7 月 10 日起，內政部國家公園署陽明山國家公園管理處委託研究團隊進行約一個月的調查工作，建立了第一個七星山西北麓地區的近地表電性模型。綜合前人研究，我們確認了電性模型與鑽井資料的一致性，並進一步了解其他鑽井尚未達到的地下構造，如圖 2、圖 3 所示。儘管這個電性模型還有很多進步的空間，但是已經能幫助我們初步判斷七千年前噴發造成現在的七星池，可能在地下存在一個古老的噴氣通道。現在噴氣活動還很旺盛的小油坑噴氣口，可以透過地電阻影像描繪出正在活動的噴氣通道形貌。

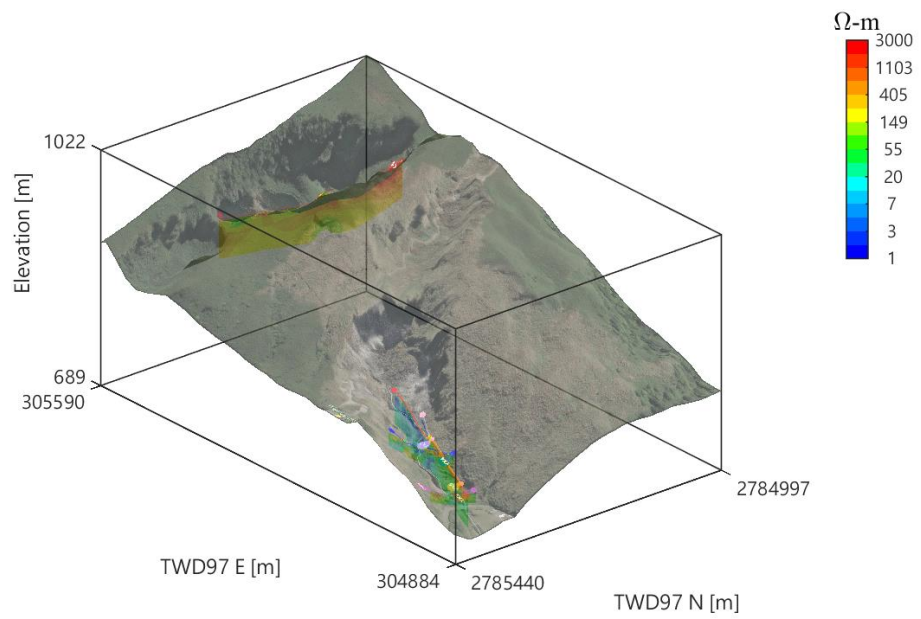


圖 2，三維柵狀圖與立體探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。

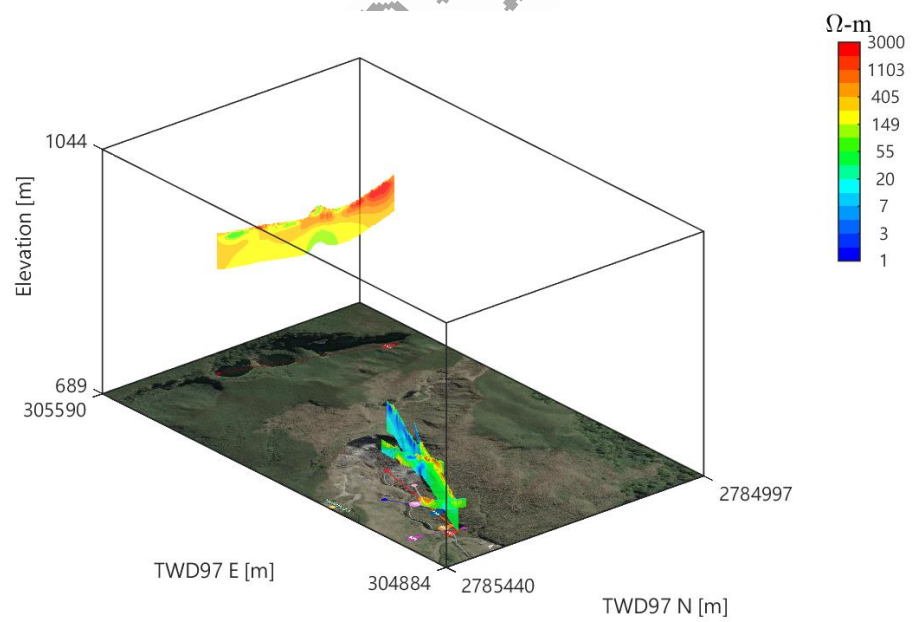


圖 2，三維柵狀圖與平面探勘區域衛星地圖（資料來源:ESRI）。