



目錄

第一章	前言	1
1.1	台灣土壤及地下水污染現況.....	1
1.2	高雄市列管場址類型彙整.....	2
1.3	國內現地土壤/地下水整治方法	3
第二章	研究目的	6
2.1	計畫目的.....	6
2.2	計畫重要性及優勢.....	7
2.2.1	計畫重要性	7
2.2.2	執行優勢	7
2.3	預期目標及成果.....	9
2.3.1	預期目標	9
2.3.2	預期成果	10
第三章	文獻探討	11
3.1	高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址	11
3.2	電化學地質氧化技術.....	12
3.3	電化學地質氧化技術之影響因子	13
3.4	複合金屬種類.....	15
3.5	電極排列之影響.....	16
3.6	電動力技術應用於實場尺度污染土壤之研究	18
3.7	實場尺度電極設計.....	20
3.8	本團隊實場整治經驗.....	20
第四章	研究方法與過程	21



4.1 研究架構.....	21
4.2 實驗設備及材料.....	26
4.2.1 儀器與設備	26
4.2.2 實驗材料	26
4.3 地質探測分析.....	26
4.4 土壤採樣及整治方法/規劃	27
4.5 土壤基本特性分析.....	27
4.5.1 土壤 pH 值分析試驗.....	27
4.5.2 土壤有機質含量	28
4.5.3 陽離子交換容量(CEC).....	28
4.5.4 土壤界達電位	29
4.6 重金屬分析方法.....	29
4.7 電力設備施工方法.....	30
4.8 設井作業.....	30
4.9 電力設備維護及數據抄寫.....	30
第五章 結果與討論	31
5.1 場址選定.....	31
5.2 實場尺度電極設計及製備.....	31
5.3 與捷博公司討論現地設井事宜	31
5.4 鼓山區清潔隊停車場現場勘查	31
5.5 地電阻量測.....	33
5.6 鑽探作業.....	34
5.7 整流器設計.....	35
5.8 設井作業.....	36



5.9 電力系統配置.....	38
5.10 電動力土壤重金屬整治作業.....	39
5.10.1 電位坡降對整治效率之影響	40
5.10.2 操作流質對整治效率之影響	57
5.10.3 Fe/Al 氧化電極對整治效率及土壤相態之影響	57
5.10.4 經濟效率分析	65
5.10.4.1 模場建置及相關材料購置費用	65
5.10.4.2 電極材料費用	66
5.10.4.3 操作流質藥劑費用	66
5.10.4.4 電力費用	66
5.11 結論、建議與後續工作項目	66
5.11.1 結論.....	66
5.11.2 建議.....	70
5.11.3 後續工作項目	70
第六章 參考文獻.....	72



圖目錄

圖 1 全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別[1](本研究繪製).....	1
圖 2 全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別[1](本研究繪製).....	1
圖 3 台灣污染場址類型數量[2]	2
圖 4 各縣市整治場址所佔數量之比例[2] (本研究繪製)	2
圖 5 高雄市污染場址類型數量[2] (本研究繪製)	3
圖 6 高雄市污染場址列管類型比例[2] (本研究繪製)	3
圖 7 高雄市土水污染場址列管數量與面積[2] (本研究繪製)	4
圖 8 高雄市列管場址污染物種類出現次數統計[2] (本研究繪製)	4
圖 9 高雄市污染場址改善工法使用次數.....	5
圖 10 計畫目的(本研究繪製).....	6
圖 11 計畫重要性說明(本研究繪製)	8
圖 12 本計畫預期目標(本研究繪製).....	9
圖 13 內惟段九小段 55 地號場址採樣點位圖[3]	12
圖 14 內惟段九小段 55 地號場址.....	12
圖 15 內惟段九小段 55 地號場址.....	12
圖 16 電化學地質氧化技術示意圖(本研究繪製).....	13
圖 17 水平電極陣列及採樣點位示意圖(Risco et al., 2016).....	17
圖 18 中央陽/陰極之六角形電極排列(Risco et al., 2016)	18
圖 19 鹽化農地模場試驗採樣點及電極配置示意圖(Kim et al., 2012).....	19
圖 20 實場電極之設計(本研究繪製).....	20
圖 21 固定電極之相關材料配置(本研究繪製).....	20
圖 22 傳輸試驗之電壓趨勢圖	20



圖 23 傳輸試驗之生物試劑濃度趨勢圖	20
圖 24 第一年(108 年)研究架構圖(本研究繪製)	21
圖 25 內惟九小段 55 地號場址電極井配置規劃(本研究繪製)	22
圖 26 第二年(109 年)研究架構圖(本研究繪製)	23
圖 27 實場尺度電極：(a)直徑：2.2 cm、長度：30 cm，(b)電極前端之公螺牙，(c) 電極後端之母螺牙	31
圖 28 計畫預定執行範圍(暫置廢棄腳踏車及雜物)	32
圖 29 電動力所需電源之斷路器	32
圖 30 地電阻量測：電極佈設	33
圖 31 地電阻量測：	33
圖 32 電極鑽孔	33
圖 33 地電阻量測：	33
圖 34 地電阻儀分析	34
圖 35 地電阻分析儀	34
圖 36 地電阻分析結果(藍色區域顯示電阻值較低，研判為地下水層)	34
圖 37 破地平	35
圖 38 清除路面柏油及級配	35
圖 39 土壤鑽探作業(手動採樣器)	35
圖 40 土壤鑽探作業(土鏟)	35
圖 41 漏電斷路器	36
圖 42 電表	36
圖 43 整流器之配線	36
圖 44 整流器之設置	36
圖 45 破地平	37



圖 46 鑿井機及人工挖掘	37
圖 47 鑿井機之作業(中空螺旋鑽)	37
圖 48 電極井之設置	37
圖 49 地下水井套筒安裝	38
圖 50 地下水井套筒安裝	38
圖 51 部分土壤裝袋保存	38
圖 52 完成設井作業	38
圖 53 電線保護管切割	38
圖 54 電線保護管固定工程	38
圖 55 電線配置	39
圖 56 電極井頭施作及固定	39
圖 57 電力系統設置完成	39
圖 58 電力系統設置完成	39
圖 59 重金屬銅(Cu)於電動力啟動後濃度變化趨勢，(a)2019/05/10(啟動前)； (b)2019/05/18(啟動後)	41
圖 60 重金屬鋅(Zn)於電動力啟動後濃度變化趨勢，(a)2019/05/10(啟動前)； (b)2019/05/18(啟動後)	42
圖 61 重金屬鉻(Cr)於電動力啟動後濃度變化趨勢，(a)2019/05/10(啟動前)； (b)2019/05/18(啟動後)	43
圖 62 重金屬鎳(Ni)於電動力啟動後濃度變化趨勢，(a)2019/05/10(啟動前)； (b)2019/05/18(啟動後)	44
圖 63 重金屬鉛(Pb)於電動力啟動後濃度變化趨勢，(a)2019/05/10(啟動前)； (b)2019/05/18(啟動後)	45
圖 64 重金屬銅(Cu)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)	46
圖 65 重金屬鋅(Zn)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，	



(a)2019/05/25(week 2) ; (b)2019/06/09(week 4)	47
圖 66 重金屬鉻(Cr)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/05/25(week 2) ; (b)2019/06/09(week 4)	48
圖 67 重金屬鎳(Ni)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/05/25(week 2) ; (b)2019/06/09(week 4)	49
圖 68 重金屬鉛(Pb)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/05/25(week 2) ; (b)2019/06/09(week 4)	50
圖 69 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/06/23(week 6) ; (b)2019/07/05(week 8)	52
圖 70 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/06/23(week 6) ; (b)2019/07/05(week 8)	53
圖 71 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/06/23(week 6) ; (b)2019/07/05(week 8)	54
圖 72 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/06/23(week 6) ; (b)2019/07/05(week 8)	55
圖 73 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢， (a)2019/06/23(week 6) ; (b)2019/07/05(week 8)	56
圖 74 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖(2019/09/17, week 14).....	58
圖 75 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖(2019/09/17, week 14).....	58
圖 76 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖(2019/09/17, week 14).....	59
圖 77 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖(2019/09/17, week 14).....	59
圖 78 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖(2019/09/17, week 14).....	60
圖 79 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極).....	60



圖 80 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極).....	61
圖 81 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)	61
圖 82 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)	62
圖 83 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)	62
圖 84 整治前各種金屬於土壤中相態比例	64
圖 85 整治後各種金屬於土壤中相態比例	64



表目錄

表 1 內惟段九小段 55 地號場址歷年污染濃度彙整表[3]	11
表 2 試驗參數及期程規劃表	27
表 3 土壤基本特性	40
表 4 單位土體於模場建置階段花費彙整表	65
表 5 電極材料成本	66
表 6 電極製備成本評估表	67
表 7 操作流質成本彙整表	67
表 8 電力花費彙整表	68
表 9 經濟效益評估總表	68





第一章 前言

1.1 台灣土壤及地下水污染現況

統計由 102 年 9 月 1 日至 107 年 8 月 31 日止，全國土壤及地下水執行中整治及控制場址共 4,377 處，依查證結果顯示，農地場址有 3,963 處佔比高達 90.5%，而事業場址為 401 處佔比為 9.2%，其中事業場址污染又可分為工廠 228 處(5.2%)、加油站 72 處(1.6%)及其他 79 處(1.8%)[1]，如圖 1 所示。

若考量污染類型，農地場址以土壤污染為主(100%)，而 401 處事業場址中，僅土壤污染有 167 處(42%)、僅地下水污染有 158 處(39%)，而土壤及地下水均有污染計 118 處(29%)；若統計列管場址達 10 年以上之 56 處事業場址，僅土壤污染為 25 處(44%)，僅地下水污染為 15 處(27%)，土壤及地下水均有污染計 16 處(29%)，分析前述 56 處事業場址污染統計，僅有機物污染為 46 處(82%)，僅重金屬污染為 9 處(16%)，有機物與重金屬共同污染有 1 處(2%)。

此外，若考量污染物種類，土壤中八大管制重金屬當中以銅污染出現次數最高達 1,091 處，佔比為 66.8%；有機物於地下水當中以三氯乙烯比例最高，為 37.5%(如圖 2 所示)，顯示土壤及地下水污染整治場址中，以重金屬銅及有機物三氯乙烯污染物為主。

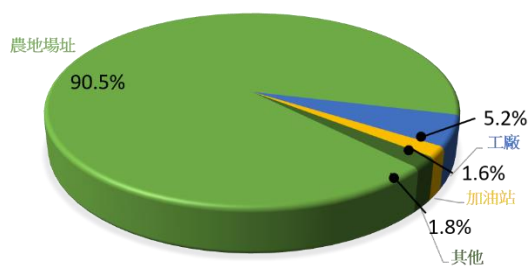


圖 1 全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別[1](本研究繪製)

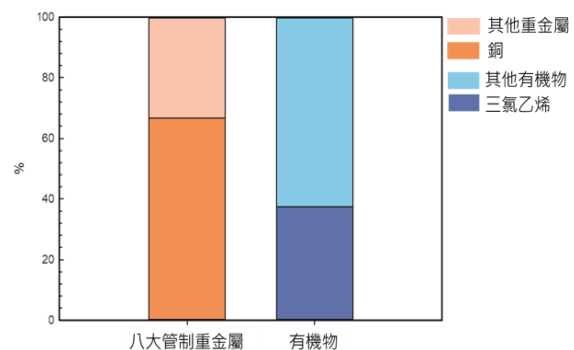


圖 2 全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別[1](本研究繪製)

由台灣土壤及地下水污染場址查詢平台[1]統計至 105 年 7 月，台灣早期未管制工廠廢水排放，使農地之灌溉水與工廠廢水共用渠道，造成含有重金屬之廢水排入農田中，造成農地重金屬污染，環保署於民國 91 年針對 319 公頃農地辦理污染查證工作，民國 92~98 年則由地方環保機關針對轄區內具高污染潛勢農地及個案污染陳情案件辦理土壤調查及監測，民國 99 年後則進入農地整體管制及永續經營期，主要是由環保署發動全國系統性農地土壤污染查證工作，台灣



農地污染調查縝密，故目前農地污染為居冠污染場址，再者為工廠土壤及地下水污染，而環保署也持續進行工廠、加油站及儲槽等污染查證，污染場址類型彙整如圖 3 所示，統計至民國 105 年 8 月仍在執行之整治場址共有 90 處，其各縣市所佔比例如圖 4 所示，其中以重工業與石化產業為主之高雄市佔 19 處，再者為台南市佔 16 處。

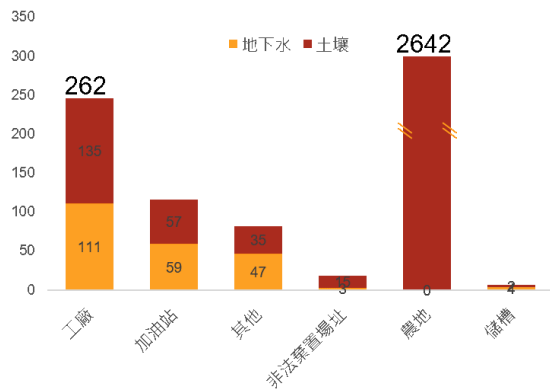


圖 3 台灣污染場址類型數量[2]
(本研究繪製)

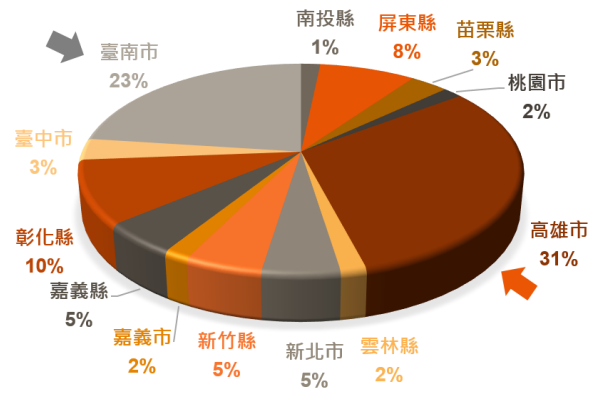


圖 4 各縣市整治場址所佔數量之比例
[2] (本研究繪製)

1.2 高雄市列管場址類型彙整

高雄市因重工業與石化產業發展，如中油、台塑等石油製品及化學製品產業、皮革業、基本金屬冶煉、及金屬製品鄉製造業、半導體產業、電子零件製造業、廢棄物處理業及加油站等，因此高雄市為整治場址數量最高之縣市主要以工廠類型為最大宗，其彙整如圖 5 所示[2]，工廠場址佔 104 處中 58 處為 55.8%。根據列管種類分類，統計彙整高雄市環保局列管場址資料，仍在執行整治場址共 104 處，其中七條五佔 21 處、控制場址佔 64 處與整治場址佔 19 處，污染面積也由控制場址佔最大宗，彙整如圖 6 所示。由列管場址資料中，主要為土壤污染為最大宗共 64 件；同時存在土壤及地下水污染佔 26 件為次之；接著為地下水污染佔 14 件，統計如圖 6 所示。

彙整高雄市列管場址之污染物種類，主要分為重金屬、油品及含氯有機物污染，土壤污染場址中主要為重金屬污染 40%，接著為油品污染佔 57%，地下水污染場址主要為油品污染佔 62%，接著為含氯有機物污染佔 35%。土壤污染場址中，油品污染場址佔 40%，但其污染面積為最大宗約 7,604,032 m² (71%)，而地下水則佔 3,975,563 m² (57%)，由統計結果顯示，高雄市主要以油品污染佔大宗，次者為含氯有機物污染，上述成果彙整如圖 7 所示，油品污染主要為加油站與儲槽，而含氯有機物主要污染源為工廠等，因其比重比水大，故較容易存在於地下岩盤區域致調查不易。

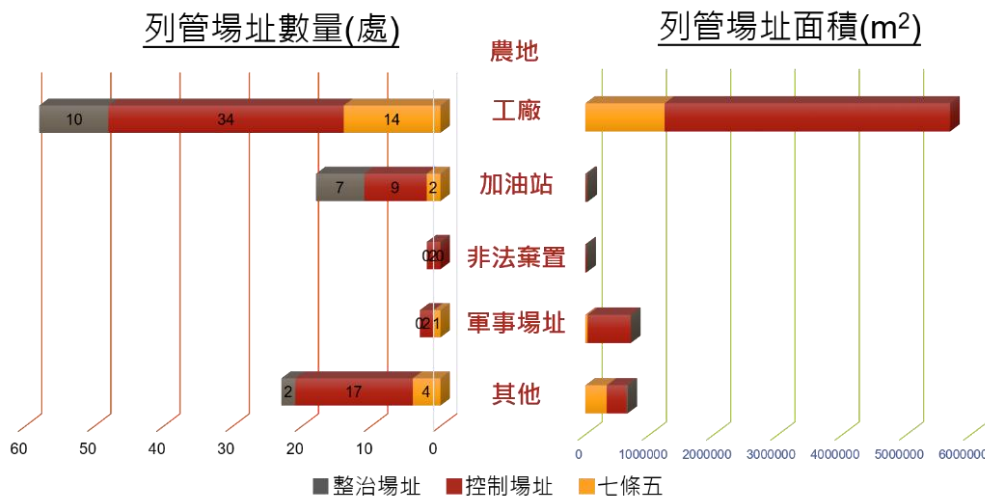


圖 5 高雄市污染場址類型數量[2] (本研究繪製)

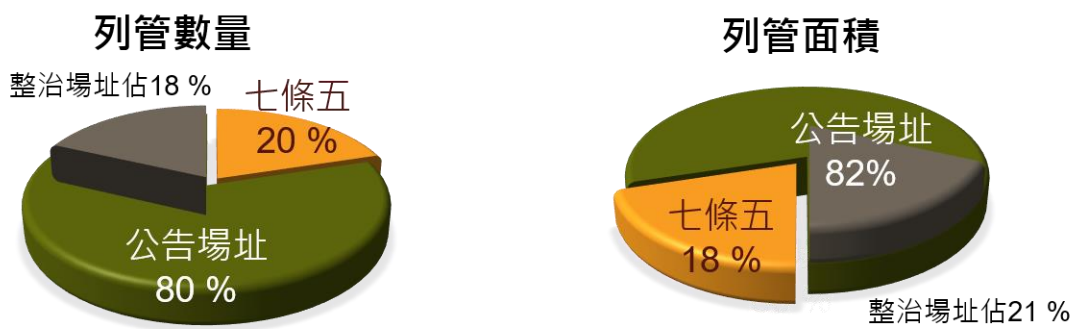


圖 6 高雄市污染場址列管類型比例[2] (本研究繪製)

統計高雄市列管場址之污染物種類，彙整如圖 8 所示，其中污染頻率最高之為油品污染其種類主要為總石油碳氫化合物(TPH)、總酚、苯、乙苯、甲苯、二甲苯及 MTBE 等，土壤污染中重金屬污染頻率最高，以銅、鋅污染為最大宗，次者為油品類有機物，又以測得苯污染為最大宗；而地下水污染主要為有機污染物，又以苯污染頻率最高，次者為含氯有機物；因其具有疏水特性，如於地下水測得污染濃度，則可推測該區域存在含氯有機物之污染團，因含氯有機物易沉積於地下岩盤上，使調查不易且無法掌握污染範圍，亦增加整治之困難性。

1.3 國內現地土壤/地下水整治方法

統計至 105 年高雄市地區土壤及地下水列管之污染場址[2]，針對其污染改善措施部分改善工法與技術進行分析，彙整如圖 9 所示，土壤污染場址改善工法主要以生物處理法、化學氧化法及排土客土法為主，而高雄市土壤污染主要以重金屬及含氯有機物為主，故主要以整治含氯有機物與重金屬之技術為主；地下水主要使用之改善工法為化學氧化法、SVE 及生物處理法為最多，而高雄

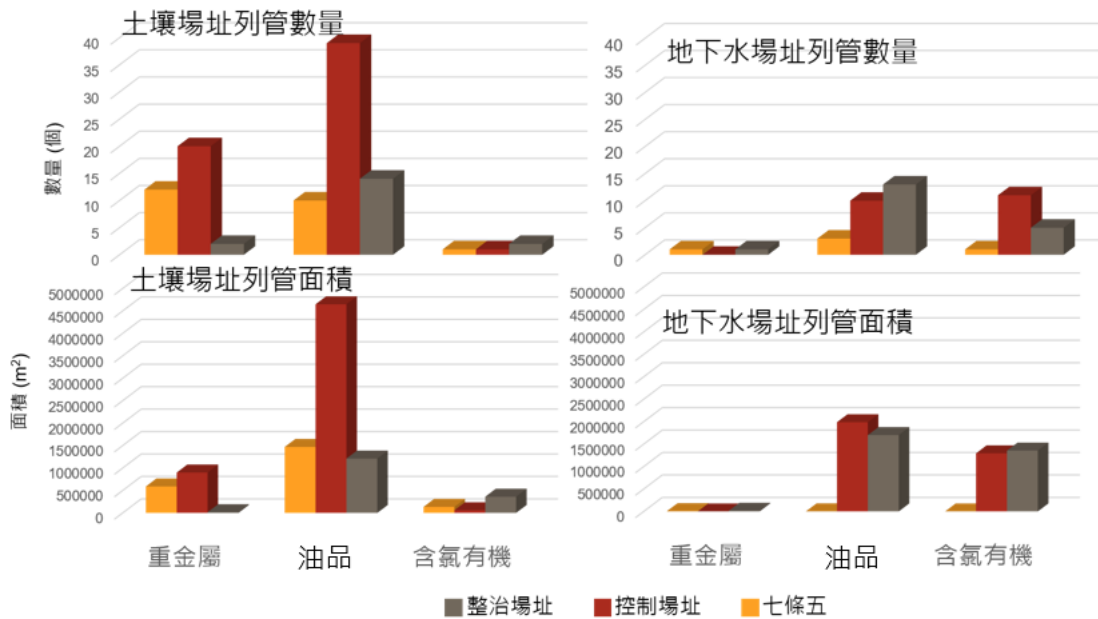


圖 7 高雄市土水污染場址列管數量與面積[2] (本研究繪製)

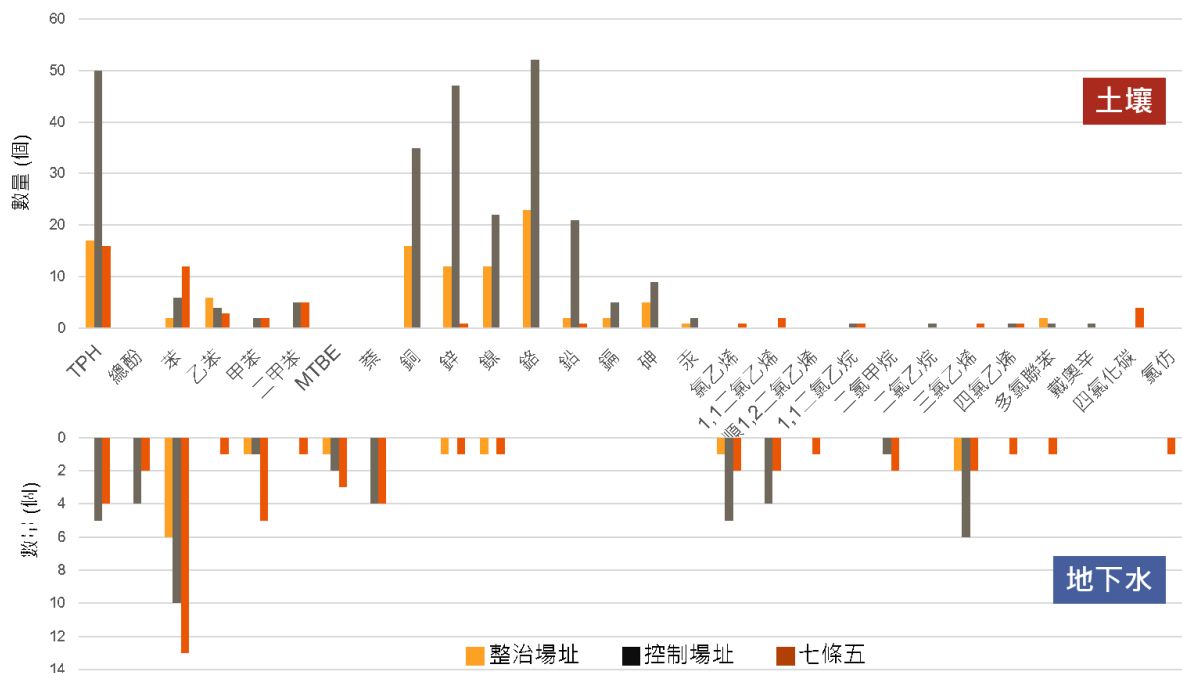


圖 8 高雄市列管場址污染物種類出現次數統計[2] (本研究繪製)

市地下水污染主要為油品有機類污染，次者為含氯有機物污染；而土壤及地下水污染場址多數採用化學氧化法、生物處理法及排土客土法等，而完成解除列管之場址主要以排土客土法為主，視污染土壤如廢棄物，而未進行整治。圖 9 又顯示，單一整治技術很難有效解決含氯有機物及油品污染之問題，故目前核定工法多為整治列車概念，同時串聯或並聯多種工法進行污染改善，如中油高煉廠、苓雅寮儲運所及加油站等油品類污染場址，多採用現地生物復育+化學氧

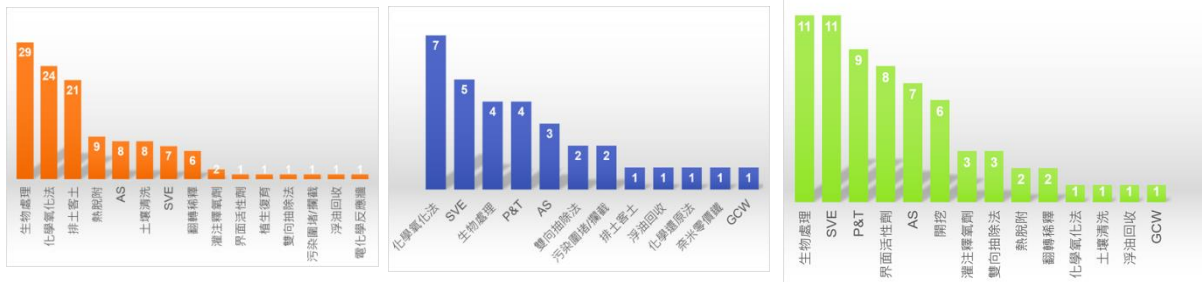


圖 9 高雄市污染場址改善工法使用次數
(a)土壤、(b)地下水、(c)土壤及地下水)[2] (本研究繪製)

化法，然因注入此類整治試劑皆無法病投藥灶，仍無法達成改善目標，應對生物試劑傳輸有效性再行探討。



第二章 研究目的

2.1 計畫目的

本計畫之目的有四(如圖 10 所示)，並彙整如下所示：



圖 10 計畫目的(本研究繪製)

(1) 電動力技術操作模組化

本團隊過去於實驗室尺度下完成許多科技部及環保署計劃，而實驗結果也充分顯示電動力技術對於重金屬及有機污染物都有不錯之處理效果，而本計畫預計使用 Fe/Al 複合金屬氧化電極整治含氯有機污染物或使用鈦棒(板)處理重金屬污染物，而實場之電極井設置需考慮地面建物、地下水流向及地下水高程等相關因素；重金屬其不可降解特性也必須透過先集中處理再由電極井移除，因此陰、陽極電極井井位配置設計便相形重要；藉本計畫應用電動力技術於實場整治之計畫，將建立電動力實場整治之模組化系統。

(2) 電動力模場系統配置優勢化

實場電極尺寸受到井口尺寸、地下水高程及相關配電設施所影響，為符合各現地之地下水高程，本計畫將設計一電極其具有螺牙(見 3.7 模場尺度 Fe/Al 氧化電極之設計所示)之續接性，透過電極之續接性使電極長度達到電動力之可作用範圍，電極頂端也需固定於井口以防滑落於井中(見 3.7 模場尺度 Fe/Al 氧化電極之設計所示)；因實場相關配電設施包含電源供應器之擺放位置及電線於地表下之配置易受到地面建物及地表人



為活動之影響皆需透過縝密之規劃。

(3) 模場配電設施規劃系統化

電動力技術透過電滲透流及電化學降解等特性可將重金屬污染物由土體往陰極端移動、而透過氧化電極自由基之生成，因而降解有機污染物，使其曠化為較無害之物質；透過電動力機制及電極井配置優勢化(W 型、菱型、蜂巢型及正方形)可將污染物之移除及降解更具效率化。

(4) 環境保護與經濟發展共榮化

國內現有土/水整治技術中，大多以離地及離場為主，除須額外花費挖除污染土壤之經費外，對於業者亦無法繼續其經濟活動而造成嚴重之影響，而本計畫所選用之技術為現地處理技術，即可在進行整治同時亦使業主持續進行地面上工廠之營運，以達到環境保護與經濟發展並存之願景。

2.2 計畫重要性及優勢

2.2.1 計畫重要性

本計畫之重要性彙整如圖 11 所示：

- (1) 建立電動力技術實場模組系統，透過電極改良及電極井之配置，將污染物去除更具效率。
- (2) 透過電滲透流之方向性，將污染物限縮於污染場址範圍內，降低危害至民眾及其生活區域之可能性。
- (3) 針對現地土壤/地下水污染問題進行共同整治，降低整治成本及縮短整治時間。
- (4) 透過電動力現地整治技術，兼顧環境保育及經濟發展。

2.2.2 執行優勢

本團隊根據過去多年於電化學地質氧化技術研究成果顯示，可有效處理土相及液相之重金屬及有機污染物，然研究場域都限於實驗室尺度，欲將電動力技術應用於實場整治，還須藉由模場試驗，以了解整治系統放大(scale up)後對技術操作、試驗參數及電極井排列之影響，因此今年著重於模場試驗，探討電

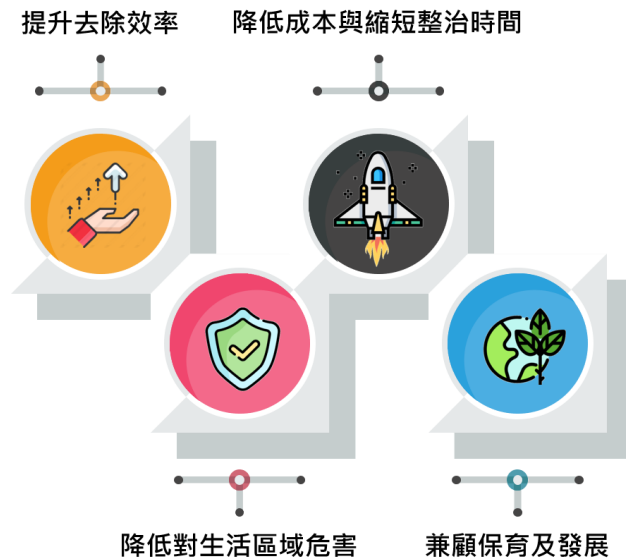


圖 11 計畫重要性說明(本研究繪製)

動力模場系統中電極井配置優化研究，同時邀請具豐富實場土水整治經驗之王凱中 技師(捷博公司)擔任協同主持人，以協助設井、佈點及地質水文資訊之提供，本研究團隊之執行優勢彙整如下：

1. 充分掌握電動力技術操作關鍵及複合金屬氧化電極製備核心技術

計畫主持人具有四項國內電動力技術專利(如下)，對本計畫具高掌握度。

- 袁菁、戴永惇，電動力法採用雙金屬氧化物電極之再生系統，中華民國專利證書發明第 I408258 號，2013 年 9 月 11 日~2029 年 11 月 24 日。
- 袁菁、蔡嘉仁，電動力三維現地模型土壤整治系統及其施作方法，中華民國專利證書發明第 I488696 號，2015 年 6 月 21 日~2033 年 5 月 22 日。
- 袁菁、張耿榕、蔡嘉仁、方彥程、吳宗翰，電動力土壤整治裝置，中華民國專利證書發明第 I568512 號，2017 年 2 月 1 日~2033 年 5 月 7 日。
- 袁菁、張詠荃、連興隆，複合金屬氧化電極構造及其製造方法，中華民國專利證書發明第 I571326 號，2017 年 2 月 21 日~2035 年 3 月 26 日。

2. 主持人具有豐富之實場整治審查經驗，充分了解整治盲點

計畫主持人擔任高雄市環保局、新北市環保局、苗栗縣環保局及環保署土基會多項實場整治案件審查委員，對於現今土水整治技術所面臨瓶頸及場址中整治盲點多所了解，眾多業者視污染土壤為廢棄物，採離場處理，將導致土壤資源枯竭，因此竭力推動現地整治技術。



3. 具備完善土水污染整治實場設立及操作技術

王凱中 技師（捷博公司）擔任本模場計畫協同主持人，其帶領之捷博公司執行國內多件大型土壤/地下水污染整治案，該團隊對於預定第一順位場址地下水文地質及污染現況相當了解；且捷博公司擁有設井器材及機電專業團隊，更可給予高雄大學團隊專業之建議及協助。本團隊與捷博公司曾共同執行計畫(民國 106 年高雄市 SBIR 計畫)已具有相當好之合作默契。

2.3 預期目標及成果

2.3.1 預期目標

本模場試驗計畫預期目標如圖 12 所示，以期達到建立本土現地整治技術操作規範，利於推廣應用。



圖 12 本計畫預期目標(本研究繪製)

第一年(108/1-108/11) 建置電動力三維模場系統之研究

- 建立實場尺度鋁電極（或 Fe/Al 氧化電極）之製備方式。
- 規劃及建置電動力模場配置系統。
- 建立電動力技術模場初步操作參數(電位坡降)。

第二年(109/1-109/11) 執行電動力模場優化試驗之研究

- 建立電動力技術三維多向性模場之優化系統。
- 建立重金屬（或含氯有機物）之三維多向性優化系統模場長期操



作參數。

- 建立電動力模場處理效能及經濟效益分析。

2.3.2 預期成果

第一年(108/1-108/11)預期產出成果如下：

- 完成實場尺度鋁電極（或 Fe/Al 氧化電極）製備技術建立。
- 完成電動力模場配置系統規劃及建置。
- 完成電動力技術模場初步操作參數(電位坡降)之執行。

第二年(109/1-109/11)預期產出成果如下：

- 完成新增區域(見四、研究方法與過程所示)之模場系統設立。
- 探討電極使用之經濟重複利用性。
- 完成電動力技術模場長期操作參數建立。
- 完成電動力模場處理效能及經濟效益分析。



第三章 文獻探討

3.1 高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址

高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為環保署土基會【土壤與地下水綠色整治技術發展計畫(105/11~107/8)】選定之示範場址[3]，民國 107 年 2 月檢測結果發現該場址土壤已遭受重金屬之污染。目前為高雄市環保局清潔隊停車場，污染行為人為早期廢棄工廠，環保署於民國 98/10 及 99/1 執行「廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢第四期調查計畫」，檢測結果發現，其土壤中重金屬含量鉻、銅及鎳均超出土壤管制標準，其濃度分別為 309 mg/kg、4,070 mg/kg 及 484 mg/kg，其各項土壤重金屬濃度表如表 1 所示，採樣點位如圖 13 所示。此場址未來將會由高雄市政府執行污染改善工作。此污染場址污染熱區無建物利於模場試驗進行，且為高雄市政府用地，已透過高市環保局土水科取得地主同意函。

表 1 內惟段九小段 55 地號場址歷年污染濃度彙整表[3]

年代	內惟段九小段 55 地號		鉛	鎘	鉻	銅	鋅	鎳	砷
98-99 年	S230020-15	1.0-2.0	564	3.19	309	4070	1020	484	44.5
	S230020-16	1.0-2.0	973	4.55	94.7	340	977	100	21.7
	S230020-17	2.0-3.0	114	1.73	108	111	371	48.3	10.9
106 年	A24-19-d3	1.0-1.5	546	1.82	76	1530	1420	71.2	69.7
	A24-20-d6	2.5-3.0	327	1.96	500	242	2680	50	<5
	A24-21-d2	0.5-1.0	435	2.27	125	674	1160	126	69
土壤污染監測標準			1000	10	175	220	1000	130	30
土壤污染管制標準			2000	20	250	400	2000	200	60

Unit : Concentration(mg/L)

※粗體字為超過土壤管制標準

本場址於民國 107 年 2 月由業興環境公司規劃以 225 平方公尺(15×15, m×m) 正方形網格規劃點位(如圖 14 所示)，採樣深度至少 4 公尺，採樣土壤每 50 公分執行 XRF 篩測，針對污染篩測高值分析全量土壤重金屬濃度，其檢出重金屬濃度超過污染管制標準者區分為超過 1 倍與 2 倍以上並依據顏色區分(如圖 15 所示)，如圖可發現東北側(03-05)及西南側(12 及 14)污染較為嚴重，其中 03 區塊之銅達監測基準以上；04 區塊之銅、鋅達污染監測基準以上，鎳達管制標準以上；第 12 區塊之鉛、鋅達污染監測基準以上，銅達管制標準以上；第 14 區塊之銅、



鉛、鋅達管制標準以上；以上四點之污染深度都位在 1.5-2.0 m 之間，其餘區域最深達 3 m，已掌握污染範圍。



圖 13 內惟段九小段 55 地號場址採樣點位圖[3]

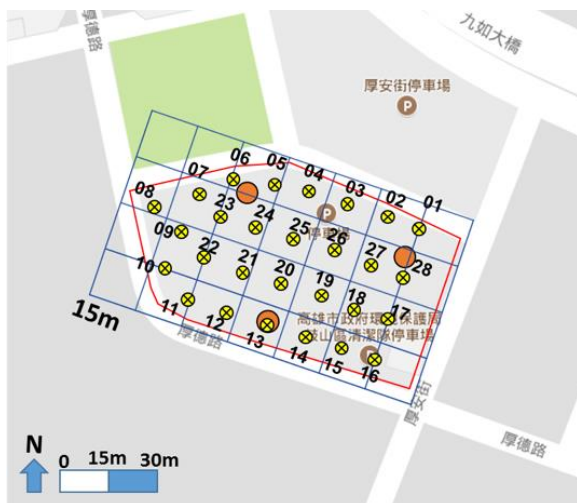


圖 14 內惟段九小段 55 地號場址土壤採樣點位圖[3]

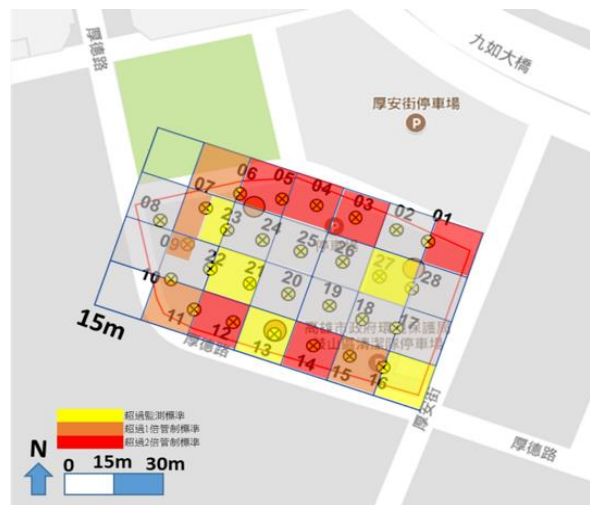


圖 15 內惟段九小段 55 地號場址土壤補充調查成果示意圖[3]

3.2 電化學地質氧化技術

電化學氧化廣泛應用於液相處理，係利用電極之電化學特性，將有機污染物破壞分解，快速且具高效率；電動力復育技術(如圖 16 所示)則應用於土壤之處理，係於受污染場址插入電極，並通以直流電，增加污染物於土相中之移動性，使污染物依照特性集中於陰極端或陽極端，再予以移除。電化學地質氧化技術係結合前述二技術之優勢，改以反應性電極應用於電動力技術，藉由電動力機制集



中移除至陽極槽，再由氧化性電極與污染物產生電化學降解，達到永續處理之目的，同時縮少污染面積，減少後續污染土之整治工程，達到土壤之復育，地質氧化技術主要藉由電動力技術四種機制，同時亦利用反應性電極產生電化學降解，於移除污染物同時進行污染物降解，提升處理技術之永續及便捷性。

電化學地質氧化技術是一種創新且經濟之現地土壤/地下水復育技術，主要優點為：

- (1) 電滲透流使污染物移動具方向性；
- (2) 具降解有機污染物之能力；
- (3) 污染場址處理多元化；
- (4) 易於結合其他技術提升處理成效；
- (5) 為一種高經濟效益之現地處理技術。

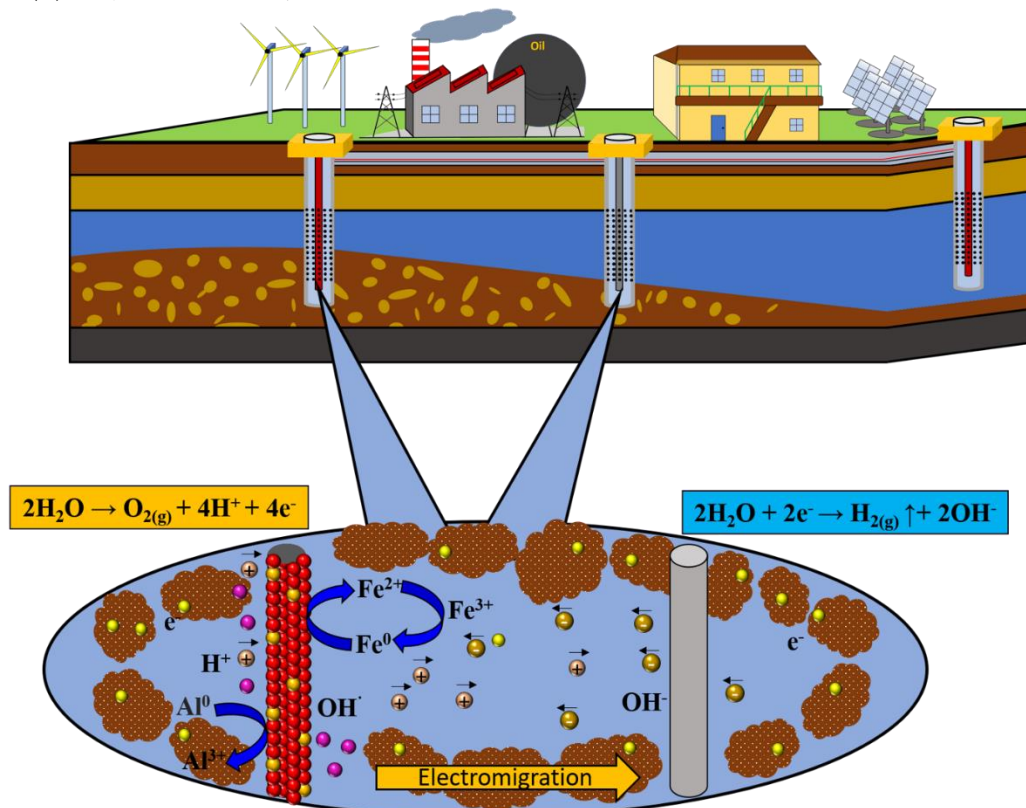


圖 16 電化學地質氧化技術示意圖(本研究繪製)

3.3 電化學地質氧化技術之影響因子

1. 操作流質

電動力技術處理之優勢係其於低滲透性土壤同樣可產生移除之效用，而對



於溶解度低及非離子性之有機物，則可藉由與界面活性劑及氧化性操作流質之配合增加其溶解度與土壤中之氧化反應。而電動力常用之操作流質為界面活性劑、EDTA、檸檬酸及乳酸等，對於疏水性有機污染物因具高親脂之特性，容易與土壤親合，以利電動力反應之進行，添加界面活性劑或共溶劑，可助於電動力處理過程中以提升疏水性有機污染物之水溶解度[4]。

2. 電壓及電流強度

電化學地質氧化技術中，電壓及電流均係一重要影響因子，其影響水電解之效率，使氫離子所造成之電滲透流流速改變，電觸媒、電極產生氧化或還原污染物之功能亦受電壓之影響，連帶影響整體處理效率([5]、[6])。

Tanaka et al. [7]應用 Pt/Ti 電極降解含有 1.0 mM BPA 之水體，電壓範圍為 0.75~1.05 V，1.05 V 與 0.75 V 之電壓達到 80 % 降解之時間分別為 30 min. 及 50 min.，同時 Kuramitz et al. [8]由碳棒電極處理 0.1 mM BPA，藉由使用不同電壓 0.75V~1.0V 進行試驗，結果顯示當使用 1.0 V 之電壓僅需 60 min. 即可完全降解 BPA，顯示出於電化學反應之過程，不同電位坡降可能會影響雙金屬氧化電極其對污染物之氧化能力。

在氧化過程中被發現在較高的電位坡降會有更好的效果。因此，為了增強過氧化氫的運輸，NaCl 和 Na₂SO₄ 被用作電動芬頓處理電解質([9]、[10]、[11])。提高電流強度，可以進一步增強系統的電滲透率，進而提高處理效率。除了使用較高之電位坡降及電解質之外，使用更高濃度過氧化氫的為提高處理效率的另一種方法。

3. 土壤組成

土壤於施加電場後會產生吸附、沉澱、溶解、氧化及還原等反應，因此，土壤的組成亦會影響到電動力的效果。電動力法復育技術常受到土壤性質的差異，而有不同處理成效，其中包括土壤質地、pH 值、風化程度、礦物型態等因素影響。

Polcaro et al. [12]研究中指出黏質土壤之滲透性低，電滲透流效應相對差，致較壤質砂土耗損較高之電力，於使用高嶺土以及黏土進行二氯酚之去除試驗，結果顯示出在相同條件下，高嶺土可達到 90 % 之去除效果，黏質土壤卻僅有 35 %，因此不同之土壤質地會影響污染物之移動性及後續實驗耗用之電量。

4. 電極基材



於電化學技術及電動力技術中會使用不同類型之電極做為反應施加電場之介質，依電極材料類型可分為三種類型，第一類為傳統電動力所使用之惰性電極，如石墨棒(藉由自由電子移動而導電)；第二類為金屬電極，如鈦棒、不鏽鋼、鐵網、泡沫鎳等；第三類為複合電極，由金屬塗佈另一種金屬或其氧化物，於通以電流時達到電催化之效果。

當在不考慮電極壽命及成本之情況下，其效率鐵電極>石墨電極>不鏽鋼電極。鐵電極的腐蝕產物作為催化劑的 Fenton 反應比石墨電極提供了更高的處理效率。

3.4 複合金屬種類

零價金屬已經利用探針式化合物(甲醇、甲酸)確認其氧化機制。也證實此技術是利用水中溶氧進行氧化反應能去除含氧類污染物。然而零價金屬在長時間的反應之下，會造成活性快速損失，限制其運用的價值。所以近年來零價金屬應用的研究重點是在於有效提高去除污染效率。因此，複合金屬是成效最顯著的技術，高活性之獲得與再生是突破瓶頸的關鍵。以下針對複合金屬做介紹，其中複合金屬種類大致可分為鈀鐵複合金屬(Pd/Fe)、銅鋁複合金屬(Cu/Al)及鐵鋁複合金 (Fe/Al)等。茲介紹如下：

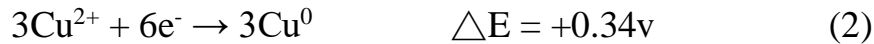
1.鈀鐵複合金屬

鈀金屬為在化學或環工上常用之催化劑，將其複合於零價鐵金屬上即為鈀鐵合金屬，經實驗證實可降低表面沉澱物的產生，並有效加強零價鐵金屬之能力，使反應速度加快，但鈀鐵複合金屬之缺點為對一些環境中不易分解污染物是無法處理的，尤其對含氯數較低之有機污染物不具處理效果([13]-[15])。

2.銅鋁複合金屬

銅為一惰性金屬，具有較低之還原電位(+0.34 V)，因此可能經由銅的覆蓋以保護內層的零價鋁金屬，使鋁金屬表面不易生成氧化鋁殼。此外銅也為一種具備催化功能之金屬([16]-[17])，因此銅鋁複合金屬可能藉由銅的催化能力以還原分解各種含氯污染物。銅鋁複合金屬乃是以鋁的還原能力將銅離子還原並附著於鋁之表面，零價鋁金屬放出電子，並形成三價鋁離子釋出水中(式(1))，二價銅離子接受電子還原形成零價銅金屬(式(2))，總反應如式(3)。





目前已確認藉由銅鋁複合金屬可有效去除數種含鹵素有機污染物，但缺點為其亦為土壤及地下水污染管制項目，將會增加土壤及水體負擔，降低土壤及水體品質[17]。

3.鐵鋁複合金屬

鐵鋁複合金屬之合成，乃是以零價鋁金屬釋出電子去還原鐵離子，使其形成零價鐵金屬，並附於鋁金屬之表面，如下式(4)-(6)所示：



鐵鋁複合金屬已被證實是良好的電子供應者，可透過還原脫氯反應降解多種之含氯有機污染物[18]。在零價鐵的氧化反應系統中，保持電子與亞鐵離子的持續供應，是維持零價鐵氧化能力的關鍵。以鋁金屬做為電子供應者之鐵鋁複合金屬具有使亞鐵離子持續高濃度與穩定電子提供之能力，為一種可以保有零價鐵金屬之優點，且可克服其表面生成沉澱物缺點的設計。零價鋁的氧化機制可由下列方程式表示，主要涉及到零價金屬與水中氧氣之間的電子轉移。先形成過氧化氫，再產生氫氧自由基，進而氧化降解污染物，式(7)-(10)所示。



3.5 電極排列之影響

近年來，許多文獻開始針對電極排列之配置作探討，乃因電極排列將影響電場分布，完善的電場分布將有助提升整治效能，相較於一般實驗室尺度之二維排列配置(2D configurations)，由於其主要針對電動力對污染土壤之水平流向作討論，所能觀察之電動力整治效果有限，為使將電動力技術有效應用到實場整治且達到經濟效益，電極排列方式之探討開始成為一項電動力技術操作之重要



參數。

1.水平並列

Risco et al. [19]利用電動力技術復育受到商業乙氧氟草酸試劑 (FLUOXIL 24 EC) 之污染土壤，並以模擬試驗裝置(pilot plant)評估線性排列電極對其處理效果之影響，反應器大小為 $175 \times 10^3 \text{ cm}^3$ (LWH: $70 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$)，陰陽極槽體分別為 $1 \times 1 \times 10 \text{ cm}^3$ ，如圖 17 所示，此研究所使用同方向之電極排列為具有相同極性的線性排列，相對於天然揮發在 34 天之後可增加 26.88 % 的乙氧氟草酸處理效果，而由於線性排列之結果沿著陰陽兩極會產生一土壤 pH 梯度，此梯度可能會影響土壤中污染物之流動性。

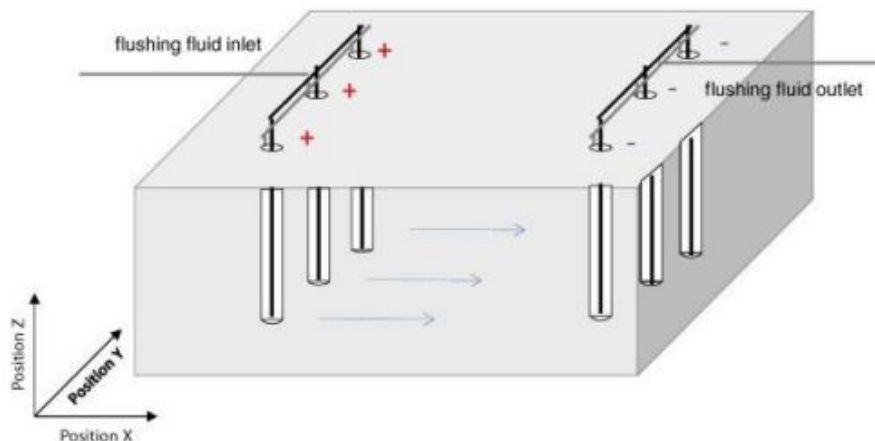


圖 17 水平電極陣列及採樣點位示意圖(Risco et al., 2016)

2.蜂巢狀排列

Cuevas and Herrada [20]研究指出，電動力技術可透過適當調整電極排列，並以直流電進行現地低透水性細顆粒土壤整治，且可有效控制其污染物之移動方向，且有能量耗用低之優勢，然而，在施行電動力技術時，其成效受到污染物之性質及系統中氧化還原之反應影響。

López-Vizcaíno [21]在體積為 32 m^3 ，含有乙氧氟草酸、2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-D) 污染土壤，以六角形電極排列方式擴大對污染場址之全面復育，並觀察其土體及電解質井平均溫度、殘留濃度，此研究之主要目的為擴大電動力技術之土體範圍，且發現高揮發性污染物使用較高電流密度會因電流熱效應產生較強揮發效果。

此外，Vocciante et al. [22]對於電動力之電極排列對於現地處理進行評估，同樣指出蜂巢狀排列情況下，污染物會因為其不同之特性而向陰極或陽極端蒐集，且不同污染物之性質各不相同，依照污染物在電動力系統之流動特性，而設計



電極之配置方式，此方法具有下列優點：(1)提高電滲透流及離子遷移之匯流效果，並減少提取出流液時所消耗之成本；(2)利用所使用之電解質的性質，幫助污染物進行有方向性之遷移，電極之電位坡降由 $0.07 \sim 0.4 \text{ V/cm}$ ，可看出線性排列可藉由施加較多組數之電場減少未受到電力效果之區域，而由中心電極排列之方式可以看出，同樣使用較多電極可以減少無電力效果之區域，然而電極增加意味其能量耗用量較高，為取其平衡，Vocciante et al. [22]採用單一中心電極，外圍擺放相異極性電極之六角形排列，在處理效能及電力耗用間衡量。

Risco et al. [19]同時指出，六角形之電極排列方式亦可以中央陰極(1C6A)或中央陽極(1A6C)，兩種不同之操作單元進行試驗，如圖 18 所示，此種電極排列方式主要包含以下優點：(1)可以控制污染物之移動方向以利於蒐集(取決於污染物之物理及化學特性) ([23])；(2)有效控制土壤之 pH 值、電場效應較一般線性排列均勻，並產生熱效應，對於揮發性有機物處理有所助益。

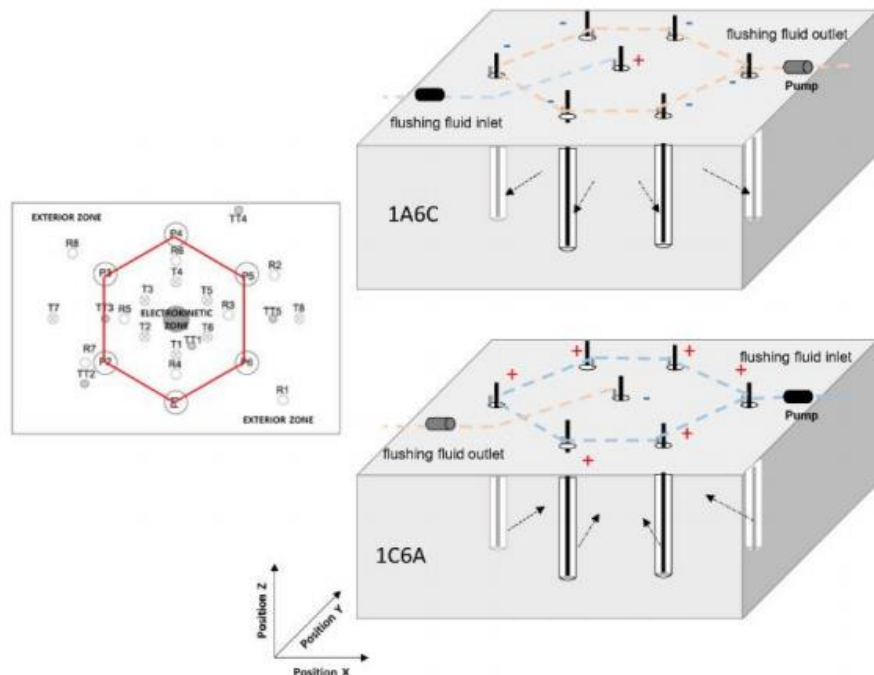


圖 18 中央陽/陰極之六角形電極排列(Risco et al., 2016)

3.6 電動力技術應用於實場尺度污染土壤之研究

電動力相較於其他現地土壤整治技術而言為一項新穎的技術，目前多數研究探討實驗室尺度系統對於污染物移除效果之影響，而在這些研究中，通常使用密封的管柱或菱形試體作為電動力反應裝置，在此尺度下進行電動力試驗可以大大減少處理過程中可能產生之變因，然而，將其作為現地實際應用之依據卻有待商榷，因此此技術之放大(Scale-up)於近年來亦開始受到重視。



Kim et al. [23]針對南韓鹽鹼化(salinization)之農地進行模場規模之電動力試驗，為改善土壤中氯化物、硝酸鹽、硫酸鹽之影響，以 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 之模場進行試驗，其實驗配置如圖 19 所示，研究結果顯示，在 1 V/cm 電位坡降下處理 14 天，氯化物之去除效率上層為-62.3%，中層為-32%，底層為 31.3%，集中於頂層及中層，由於操作流質使用自來水使氯化物濃度提高；硝酸鹽透過電子遷移由陰極傳輸至陽極，而上、中、下層處理效果分別為 21.5%、35.6%、44.7%，處理效果最佳，而硫酸鹽受到土壤中陽離子影響使傳輸效果下降，而六角形之電極排列則使電場無效之區域達最小化，對於放大規模具有一定優勢。

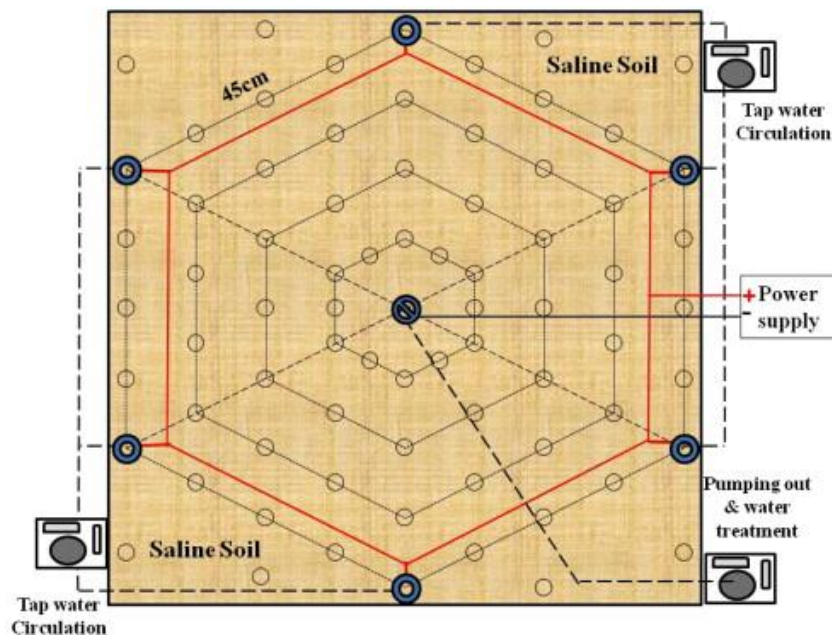


圖 19 鹽化農地模場試驗採樣點及電極配置示意圖(Kim et al., 2012)

Vieira dos Santos et al. [24]研究使用 1000 mg/dm^3 之 SDS 作為增溶劑，處理 30 mg/kg 之 Atrazine 及 oxyfluorfen，結果顯示 oxyfluorfen 之揮發性較高，會受到電動力技術之熱效應影響，若於電動力系統中結合活性炭反應牆藉此提高對於 oxyfluorfen 之吸附能力，則可以有效將揮發損失量由 60–65 % 降低至 45–50 %。

Risco et al. [25]選擇 $70\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 大小之試模尺寸進行電動力試驗，操作流質使用十二烷基苯磺酸鈣，電位坡降 1 V/cm ，反應時間 34 天，觀察電動力之影響，結果顯示經過 34 天處理，土體之殘留 oxyfluorfen 濃度從 20.0 mg/kg 下降至 7.4 mg/kg ，而由於 oxyfluorfen 污染物之揮發性較高，若污染土壤未經電動力處理之去除率約為 5.5%，而經由電動力系統處理後可增加 60.7% 之處理效果，可得知電動力對於此類揮發性較高之污染物之處理分為移除以及電場熱效應所造成之揮發效果。



3.7 實場尺度電極設計

過去本研究團隊都以實驗室尺度之電動力實驗為主，未來進入實場除增加現地配電材料等電動力相關設備外亦需製備實場尺寸之電極，本研究設計每段 30 公分之電極棒，前、後設有公、母之螺紋(如圖 20 所示)，可視污染物深度予以調整至最佳處理深度，電極棒亦可使用相關金屬材料固定於井口(如圖 21 所示)。

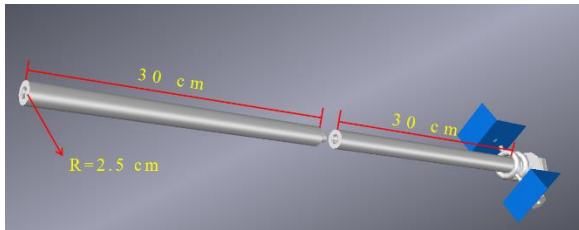


圖 20 實場電極之設計(本研究繪製)

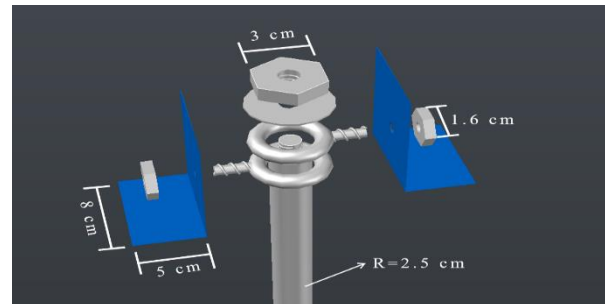


圖 21 固定電極之相關材料配置(本研究繪製)

3.8 本團隊實場整治經驗

本模場係位於高雄市某工業園區，此試驗總共分為南北兩側進行不同試驗，北側模場進行整治試驗，陽極端使用 Fe/Al 氧化電極結合電動力反應，利用氧化還原反應產生氫氧自由基降解有機污染物；南側模場為傳輸試驗，使用惰性金屬鈦(Ti)電極將生物試劑透過電滲透流傳輸至欲到達之位置，使生物試劑提供地下微生物更充足之營養源。

傳輸試驗組 T1 井到 T2 井為順地下水流，T2 到 T3 為逆地下水流；圖 22 為電壓隨時間之變化情形，如圖可看出通電初期為最高，隨後緩慢下降之原因可能為地電阻所導致；圖 23 為生物試劑 Eco-clean 傳輸試驗結果，如圖可看出於 12 天前 T2 井濃度為上升，12 天後則為下降，代表當電壓足夠時電滲透流是可以對抗地下水流，進而將生物試劑傳輸至指定地點。

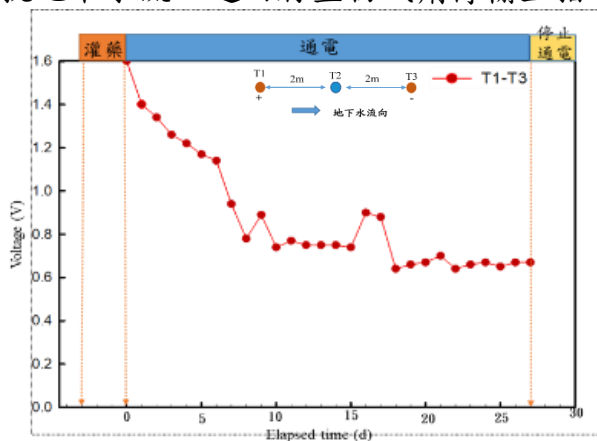


圖 22 傳輸試驗之電壓趨勢圖

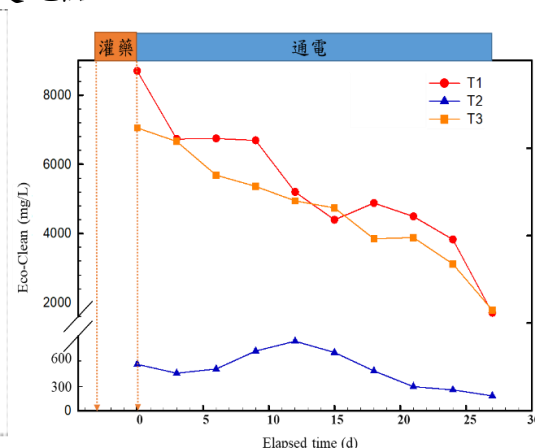


圖 23 傳輸試驗之生物試劑濃度趨勢圖



第四章 研究方法與過程

4.1 研究架構

本研究藉文獻彙整當前台灣土壤/地下水所遇之瓶頸，並統整過去多年於實驗室尺度之重大成果，提出一「建立三維多向性電動力模場系統之優化研究」計畫，將電動力技術實際應用於現地污染場址中。本計畫選定**高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址**為整治場址(依土污法 17-2 條所列之相關內容撰寫於附件)，將使用 Al 電極棒及 Fe/Al 氧化電極整治土壤中重金屬污染物，透過電滲透流將土壤中重金屬由陽極端往陰極端移動且集中，再由陰極端移除，達到整治之效果。

第一年(108 年)模場整治試驗階段詳細內容(如圖 24 所示)分述如下，計畫甘特圖如 p.25 頁所示：

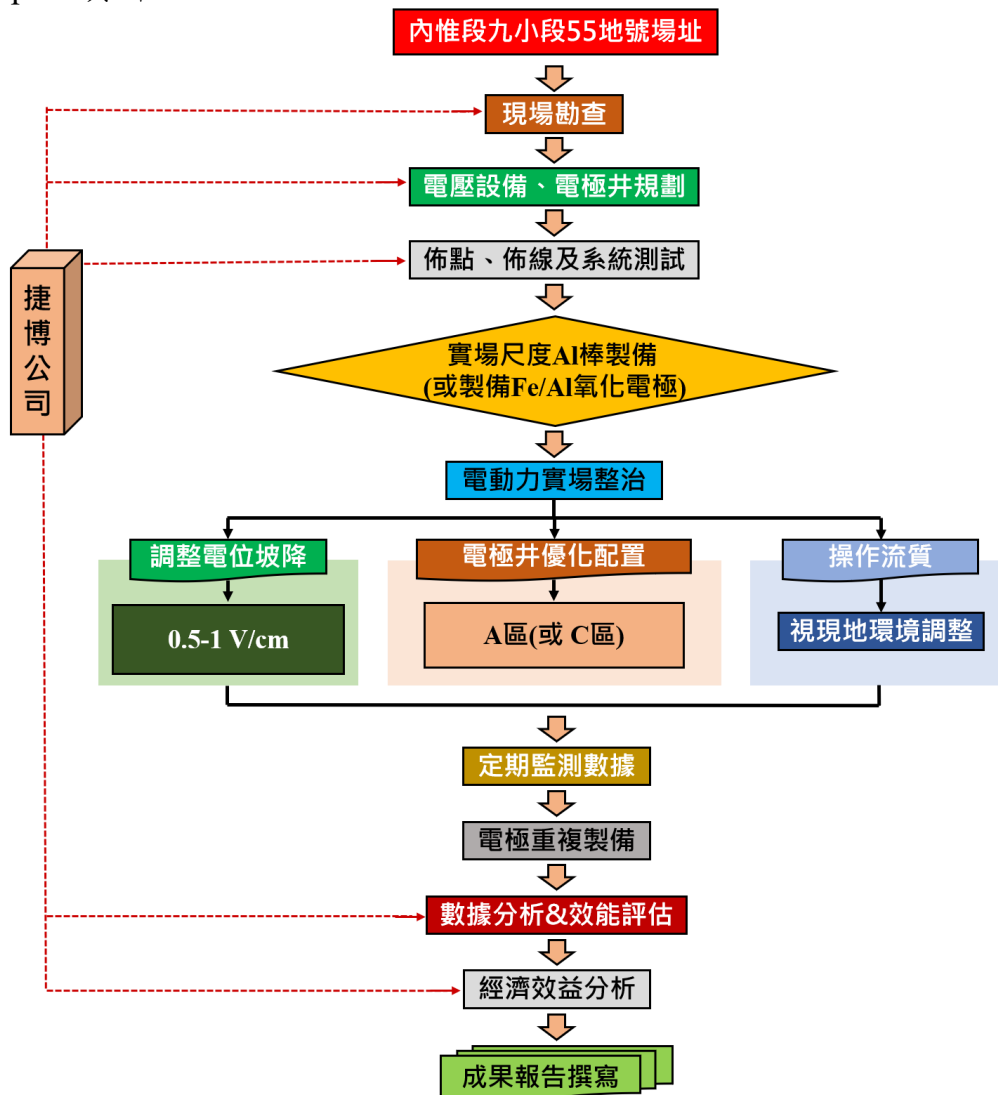


圖 24 第一年(108 年)研究架構圖(本研究繪製)



第一階段：第 1~6 個月。

設計具實場規模之 Al 電極及 Fe/Al 氧化電極，其須符合污染區域之污染深度，高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為重金屬污染場址，污染深度為 2.5 公尺。

現場勘查以了解現地地面上是否有相關建築或構造物，與捷博公司討論設井之位置及相關配電設施之規劃。

第二階段：第 7~9 個月。

蜂巢區域進場佈點、設井、裝設電壓設備控制系統、佈線及系統測試等。

第三階段：10~12 個月。

以電化學地質氧化技術(電動力技術)於水井當中放入具實場規模之 Al 電極及 Fe/Al 氧化電極進行整治作業，並定期監測電動力相關參數以確認其正常運行；其採樣方式進行高濃度污染土壤全量分析。

內惟段九小段 55 地號場址電極井規劃如圖 25 所示。

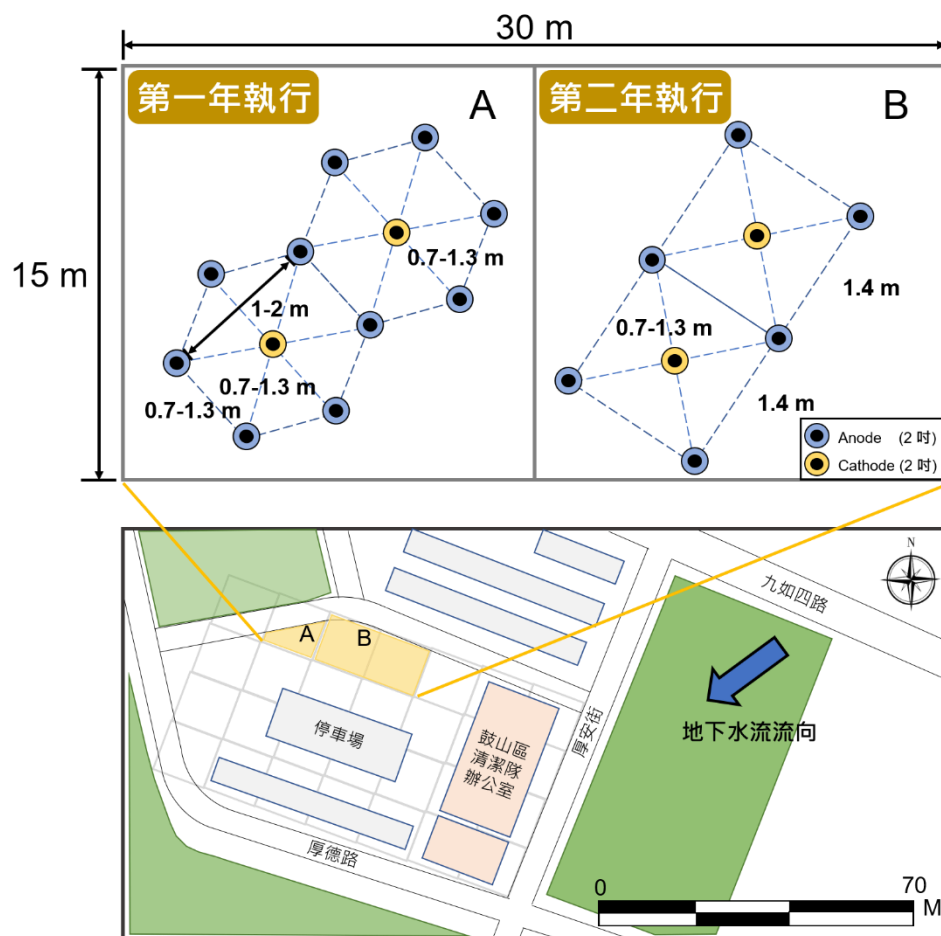


圖 25 內惟九小段 55 地號場址電極井配置規劃(本研究繪製)



第二年模場整治試驗階段詳細內容(如圖 26 所示)分述如下，計畫甘特圖如 p.26 頁所示：

第一階段：第 1~3 個月。

新增區域(方形區域)電壓設備規劃及裝設、電極井配置規劃、佈點、設井、佈線、系統測試等。

第二階段：第 4~9 個月。

進行電動力實驗，蜂巢區域操作參數以操作流質及陽、陰極位置調整(或結合現地化學氧化技術)等。方形區域整治試驗依蜂巢區域結果調整之。

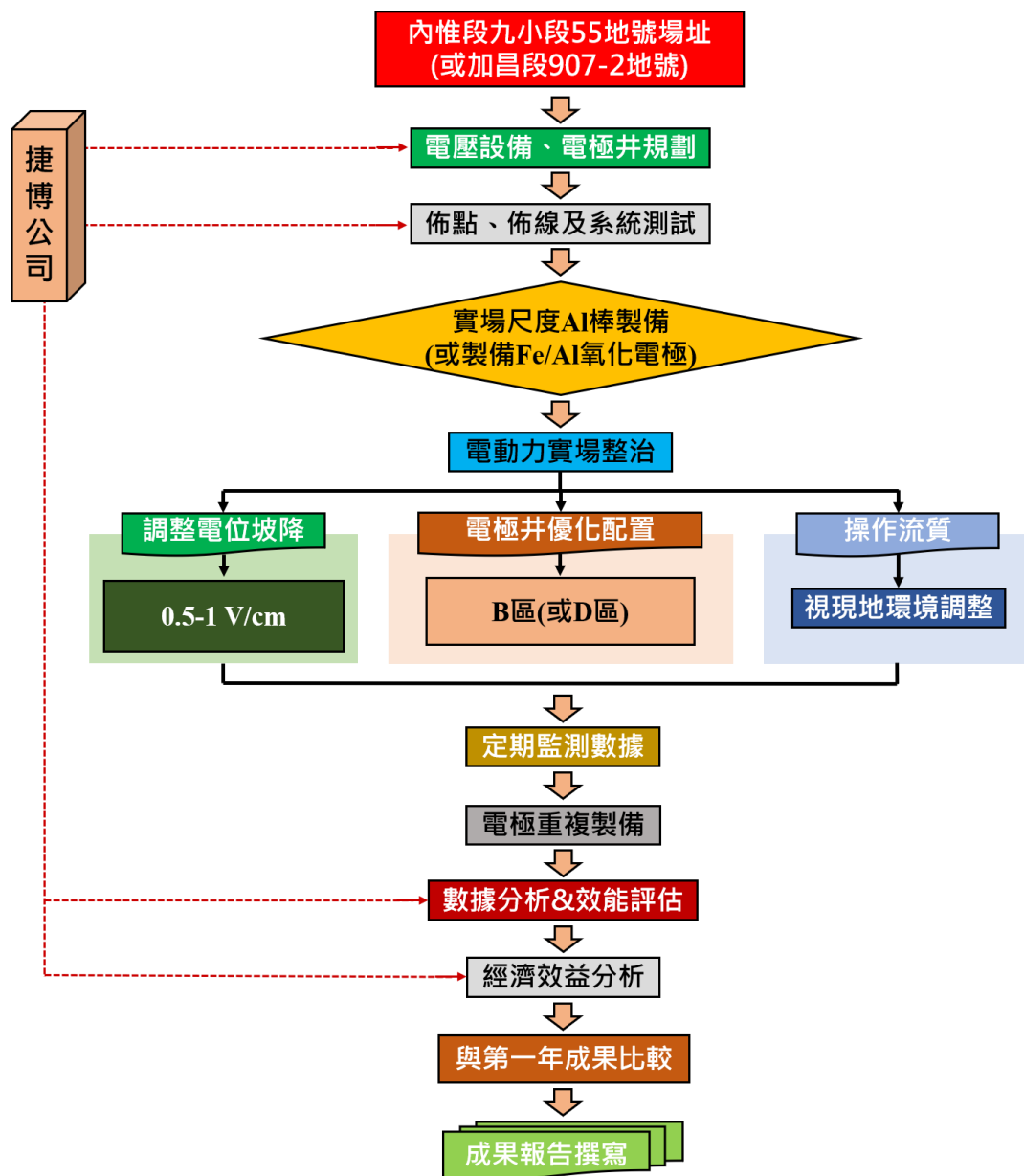


圖 26 第二年(109 年)研究架構圖(本研究繪製)



第三階段：10~12 個月。

數據彙整分析及報告撰寫。

108 年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目	108 年												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
製備 Al 電極、Fe/Al 氧化電極及實驗室測試													
現場勘查													
電壓設備規劃、電極井規劃													
進場佈點、設井、裝設電壓設備控制系統、系統測試等													
進行整治試驗													
定期監測重金屬濃度、電壓等(含背景值)													
數據彙整分析													
期中/期末報告						★					★		
工作進度估計百分比 (累 積 數 ， %)	8	16	24	32	40	50	56	64	72	75	88	100	
預定查核點	期中		1. 完成 Al 電極、Fe/Al 氧化電極製備及實驗室測試。 2. 完成 A 區域電壓設備及電極井佈點規劃。										
	期末		1. 完成進場佈點、設井、裝設電壓設備及系統測試等。 2. 執行 A 區域整治試驗。 3. 完成污染物濃度、電壓(電流)、水質參數等定期監測。 4. 經濟效益分析及第一年報告撰寫。										
說明：													
1、 工作項目請視專業性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。													
2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。													



109 年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

<div>109 年</div> <div>工作項目</div>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註	
新增區域電壓設備規劃、電極井規劃、佈點、設井、裝設電壓設備控制系統、系統測試等														
進行釐清試驗														
定期監測重金屬濃度、電壓等														
數據彙整分析及與第一年成果比較														
期中/期末報告						★					★			
工作進度估計百分比 (累 積 數 ， %)	8	16	24	32	40	50	56	64	70	75	88	100		
預定查核點	期中			1. 新增區域(B 區域)電壓設備規劃、電極井規劃、佈點、設井、裝設電壓設備控制系統及系統測試等。 2. 執行 B 區域釐清試驗(進度 50%)。 3. 完成定期監測重金屬(含氮)污染物濃度、電壓、水質參數等(進度 50%)。										
	期末			1. 執行 B 區域釐清試驗(進度 50%)。 2. 完成定期監測重金屬污染濃度、電壓等(進度 50%)。 3. 經濟效益分析及第二年報告撰寫。										
說明：														
1、 工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。														
2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。														



4.2 實驗設備及材料

4.2.1 儀器與設備

本研究所需設備與分析儀器如下所示：

1. 感應耦合電漿光譜儀(Inductively Coupled Plasma)：Optima 2000 DV，PerkinElmer，USA。
2. 精密電子天秤：AND GR-200，10 mg-210 g，Japan。
3. pH meter：G&B Instruments，PL-700PV，USA。
4. 高溫爐(實驗室電極製備)：CARBOLITE，CWF1300，UK。
5. 烘箱：MEMERT，UM 400-1，Germany。

4.2.2 實驗材料

1. 鹽酸(Hydrochloric Acid)：GR 級，Merck，Germany。
2. 硝酸(Nitric Acid)：GR 級，65%，Japan。
3. 氯化鐵(Iron Chloride)：GR 級，SHOWA，Japan。
4. 鋁棒(Φ ：0.63 cm，L：15 cm)：興貿鋁業，Taiwan。
5. 鋁棒(Φ ：2.2 cm，L：30 cm)：興貿鋁業，Taiwan。
6. 整流器(220 VDC，8 孔式)：文成工作室。
7. 整流器(220 VDC，6 孔式)：文成工作室。

4.3 地質探測分析

1. 地質鑽探分析：為了解其土壤特性，本計畫於此場址進行土染鑽探分析。
2. 地電阻量測：

電壓設備整流器之設計須透過地電阻量測始可得知電容設計之大小，本計畫特委託霖昌工程公司協助本專案進行鼓山區清潔隊地電阻量測事宜。地電阻分析儀之儀器特性，若需要量測至地下 4 米之深度，其地面上之距離應為地下深度之 5 倍長，即 20 米之長度，其量測步驟如下：

A. 以每 1 公尺為單位進行電極佈設；



- B. 於佈設後之電極周圍添加導電液使其較易被偵測；
- C. 架設地電阻電線並與儀器設備端相連接；
- D. 地電阻分析並進行繪製出圖。

4.4 土壤採樣及整治方法/規劃

本計畫之土壤採樣特訂製土壤採樣管，以敲擊方式採取地下土樣，再透過 ICP 進行全值分析；試驗參數之規劃以電動力技術重要參數：電位坡降、操作流質及電極種類為主，試驗規劃表如表 2 所示；土壤採樣規劃於每週固定採樣一次，若遇雨天或天氣不佳則予以調整。

表 2 試驗參數及期程規劃表

Test No.	Parameters			Duration (days)
	Potential gradient (V/cm)	Processing fluid	Electrode	
T1	0.6	Groundwater	Inert electrode	30
T2	1.0	Groundwater	Inert electrode	30
T3	1.0	Groundwater	Oxidation electrode	30
T4	1.0	Lactic acid	Inert electrode	30

4.5 土壤基本特性分析

4.5.1 土壤 pH 值分析試驗

土壤之 pH 值係參照環檢所 NIEA S410.62C 方法，步驟如下：

1. 土壤經風乾過篩後秤取 20 g 土壤放入燒杯內，加入 20 mL 實驗室去離子水(土：水=1：1)並蓋上錶玻璃，持續攪拌 5 分鐘。
2. 靜置 1 小時，使混合液大部分固體沉澱。
3. 取土壤沉澱後之水相層並測定其 pH 值及記錄溫度。



4.5.2 土壤有機質含量

土壤有機質測定參照環保署 Nelson and Sommers (1986)方法分析，其步驟如下：

1. 秤取經 105°C 烘乾 1 小時之土壤樣品 20 公克，置於乾燥器內。
2. 經秤重之坩鍋紀錄為 w_1 。
3. 將土樣置於坩鍋內秤重紀錄為 w_2 。
4. 置於高溫爐內以 430°C 加熱四小時。
5. 後置於乾燥箱內，待冷卻後秤重紀錄為 w_3 。

$$\text{有機質含量(\%)} = [(w_2 - w_3) / (w_2 - w_1)] \times 100\%$$

4.5.3 陽離子交換容量(CEC)

本土壤中陽離子交換容量係參照環檢所 NIEA S291.60T 方法，步驟如下：

1. 風乾之土壤經測定水分含量後，秤取 4.00 g(精秤至 0.01 g)中或細之風乾土壤或 6.00 g(精秤至 0.01 g)的粗土壤，放置於離心管中。
2. 加入 33 mL 1 M 醋酸鈉溶液，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心至溶液澄清為止。
3. 移出並丟棄上層液，重複步驟 2 三次。
4. 加入 33 mL 99% 異丙醇，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心至溶液澄清為止。
5. 移出並丟棄上層液，重複步驟 4 三次。
6. 加入 33 mL 中性 1 M 醋酸銨溶液，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心



至溶液澄清為止，將洗滌液體倒入 100 mL 定量瓶中定量，以感應耦合電漿光譜儀測定鈉離子濃度。

7. 陽離子交換容量之計算方法：

$$\text{陽離子交換容量}(\text{meq}/100\text{ g}) = (C \times V) / [W / (1/R)] \times 100$$

式中，C：鈉離子濃度(M)；

V：結合上澄液之稀釋後最終體積(mL)；

W：秤取之土壤重(g)；

R：風乾土壤之水分含量。

4.5.4 土壤界達電位

土壤界達電位之測定，其步驟如下：

1. 秤取 10.0 g 過篩後之土壤，後加入 250 mL 實驗室去離子水。
2. 將配製好之共溶液分配至各 50 mL 之採樣瓶中，並分別調整 pH 值至 2、3、4、5、6、7、8、9、10 及 11。
3. 使用界達電位儀量測不同(pH 值)環境下土壤顆粒表面帶電情形。
4. 當 pH 值間產生由正電轉為負電，即該 pH 區間為土壤之零電位點(pH_{zpc})。

4.6 重金屬分析方法

土壤重金屬分析方法參考環檢所 NIEA M103.02C 並稍作改良，其步驟如下：

1. 採樣完之土壤帶回實驗室烘乾並隨機採點。
2. 於精秤儀上秤重 0.1 g。
3. 將土壤置入微波消化管。
4. 後依序置入 9 毫升硝酸及 3 毫升氫氟酸，
5. 微波消化程式設定如下：



- (a) 由室溫上升至 120°C ，保溫 15 分；
- (b) 由 120°C 上升至 150°C ，保溫 15 分鐘；
- (c) 由 150°C 上升至 180°C ，保溫 30 分鐘；

6. 後再加入 15 mL (5%) 硼酸至消化管中，再次微波樣品(升溫程式如上)。

4.7 電力設備施工方法

本計畫特請捷博公司機電部門協助電纜之架設，包含總電源之牽線工程、斷路器及電錶之裝設。

4.8 設井作業

本計畫與協力廠商捷博公司一同進行現地設井工作，由本計畫兼任助理先就預設井之位置進行放樣，再由捷博公司實驗室團隊進行設井之工程。

4.9 電力設備維護及數據抄寫

執行整治工作期間，訂定每週至少兩次數據抄寫工作，抄寫工作包含整流器電流回測值及電錶，亦於期間觀察電動力是否正常運作。



第五章 結果與討論

本計畫按照原訂進度及實驗規劃敘述如下：

5.1 場址選定

本計畫選定高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為整治場址，其目前作為高雄市環保局清潔隊停車場所用，其為一土壤重金屬污染場址，目前並無相關整治作業。

5.2 實場尺度電極設計及製備

本計畫較以往最大不同為將實驗室尺度(Lab scale)之電動力試驗移往實場尺度進行現地模場測試，電動力技術所使用之電極亦須有所提升及改良，本計畫為此設計一直徑 2.2 公分，長度 30 公分為一段之電極(如圖 27 所示)，前後配有公、母螺牙，可依照地下環境欲整治深度予以調整，達到運送便利性及製備經濟性之目標。

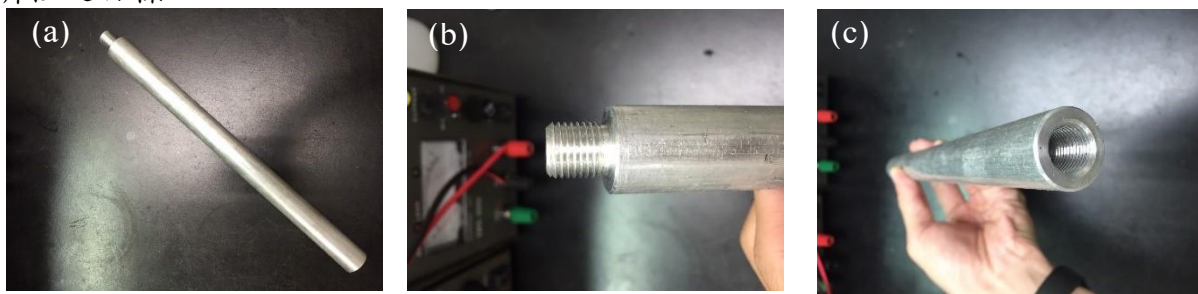


圖 27 實場尺度電極：(a)直徑：2.2 cm、長度：30 cm，(b)電極前端之公螺牙，(c)電極後端之母螺牙

5.3 與捷博公司討論現地設井事宜

捷博科技股份有限公司為本計畫之協力廠商，帶領其公司之王技師團隊亦具有豐富之土壤/地下水整治經驗，本次計畫邀請捷博公司團隊負責現地之設井及牽線事宜，亦於本年度 01/25 進行協商會議(如附件所示)，會議中討論現地設井及牽線工程之施作，其詳細內容亦參考附件所示。

5.4 鼓山區清潔隊停車場現場勘查

現場勘查為模場試驗一重要步驟，本團隊特與高雄市環保局土水科股長及其專員一同前往鼓山區清潔隊停車場進行現勘(如圖 28 至 29)，並與清潔隊隊長及班長協商土地借用事宜、電源之借用及後續相關規畫等事項。



圖 28 計畫預定執行範圍(暫置廢棄腳踏車及雜物)



圖 29 電動力所需電源之斷路器



5.5 地電阻量測

電動力技術整流器電容之設計需參考地電阻量測儀之數據結果，本計畫特請霖昌工程公司王博士團隊協助進行地電阻量測，地電阻量測步驟及結果如下：

- (a) 清除欲量測範圍路面障礙物；
- (b) 拉線並測繪距離；
- (c) 電極鑽孔；
- (d) 固定距離進行電極佈設；
- (e) 澆水(提升電極與地下土層導電性)；
- (f) 地電阻量測。



圖 31 地電阻量測：
清除欲量測範圍路面障礙物

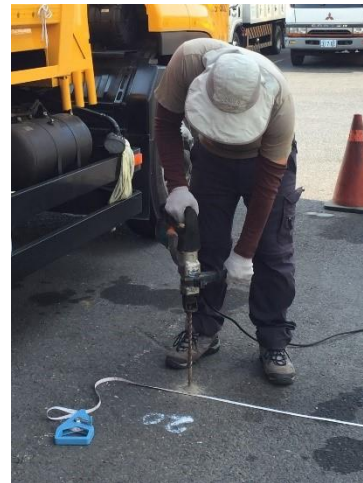


圖 32 電極鑽孔



圖 30 地電阻量測：電極佈設



圖 33 地電阻量測：
澆水(增加導電率)



圖 34 地電阻儀分析



圖 35 地電阻分析儀

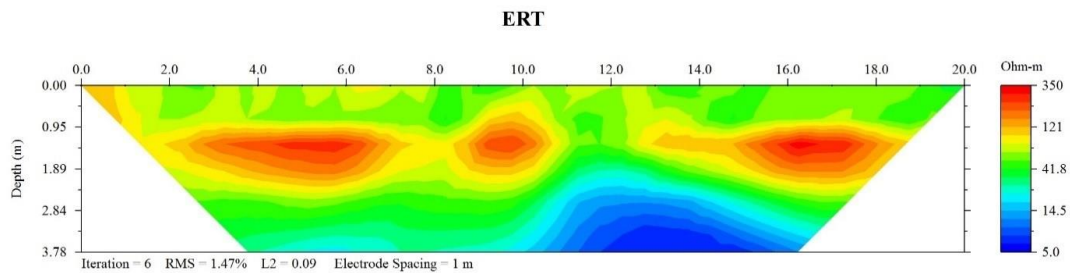


圖 36 地電阻分析結果(藍色區域顯示電阻值較低，研判為地下水層)

5.6 鑽探作業

為了解現地土壤質地及其特性，本計畫擇日進行土壤鑽探作業，由欲整治範圍內取一點進行土壤鑽探試驗，詳細步驟如下，如圖 37-40 所示：

- (a) 選取一鑽探點(以紅漆標記)；
- (b) 電鑽破地皮；
- (c) 清除路面柏油及級配；
- (d) 土壤鑽探試驗；
- (e) 土壤含水率及特性分析。

透過土壤含水率試驗得知其含水率約 12%，篩分析試驗結果對照土壤三相圖顯示其為砂土(Sand)地質。



圖 37 破地平



圖 38 清除路面柏油及級配



圖 39 土壤鑽探作業(手動採樣器)



圖 40 土壤鑽探作業(土鏟)

5.7 整流器設計

電動力技術所使用之整流器所需設計參數包含，如圖 41-44 所示：

- (1) 入電壓(直流電或交流電)：台灣目前可取得之電壓型式主要以 110 V 及 220 V 為主，而家用 110 V 交流電(DC)又更為常見，本計畫為符合清潔隊停車場總電源之電壓供給形式，致選用 220 V 作為整流器之入電壓。
- (2) 電容：電容之設計主要以整流器施予地下環境一電壓而造成回測之電流作為設計參考，包含地電阻資訊、電極佈置及電極深度等參數。
- (3) 出電壓：電位坡降(V/cm)為電動力技術之關鍵調整參數，相較於實驗室尺度試驗常使用較高之電位坡降於短時間內看到較佳的整治成效，電動力技術用於實場整治，考量安全性及經濟性，使用較低之電位坡降、延長整治時間為可達較佳之經濟性。



- (4) 表頭數量：整流器之表頭數量需以陽、陰電極井之配置作為設計參考，每一陽極井需配置一陽極電流表頭，陰極井電流表頭之設計傳輸需參考整體井位配置。



圖 41 漏電斷路器



圖 42 電表

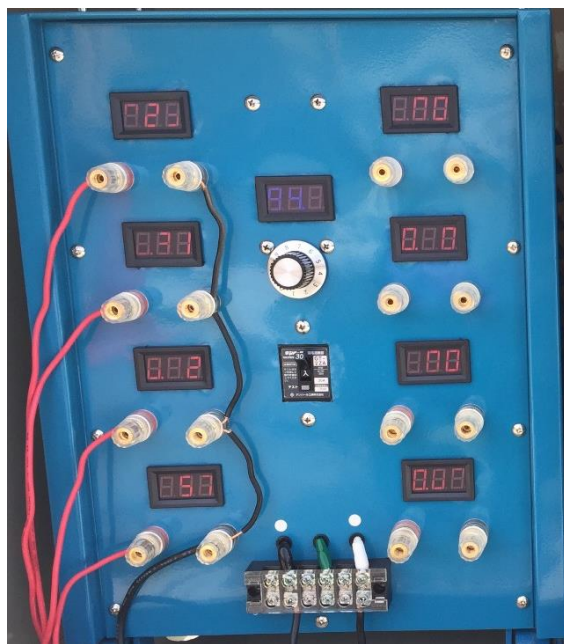


圖 43 整流器之配線

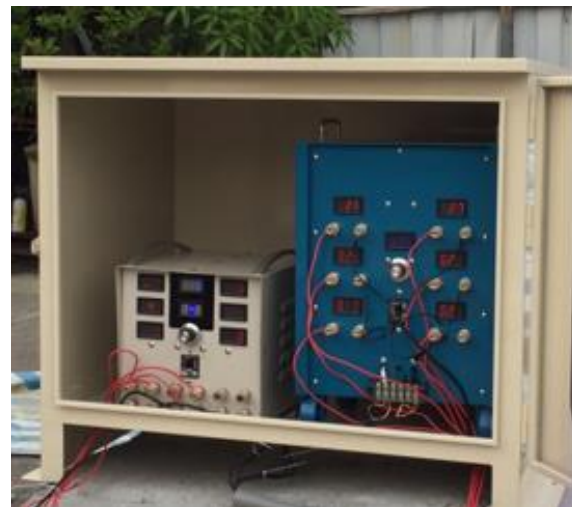


圖 44 整流器之設置

5.8 設井作業

本計畫邀請捷博公司團隊進行現地井位之施作，設井作業步驟如下，亦請參考圖 45-52 所示：

- (1) 刨除柏油路面及級配：利用怪手將路面柏油刨除以利設井作業。



- (2) 人工試挖：以土鏟進行人工試挖，將大顆粒石頭清除，較利鑽井儀器之運作；於人工試挖同時，發現土壤質地不均(部分廢輪胎、垃圾袋及鋼筋混凝土塊)及高濃度重金屬，初步判斷此回填層為一較不均質之土壤。
- (3) 鑽機鑽井：利用鑽機進行鑽井作業，規格為四吋井，本計畫以 2.0 米作為設井之預設深度。
- (4) 放置地下水井之塑膠井管：完成設井後，將地下水井管置於鑿井處。
- (5) 混凝土工作面之鋪設：為防止雨天積水及泥濘產生，澆灌混凝土將工作面與原始路面切齊。

於鑽探作業進行同時，發現地下土壤有大量廢棄物，顯示此污染土壤並非原生污染土，其土壤異質性及廢棄物回填情形皆會對後續整治作業造成影響。



圖 45 破地平



圖 46 鑿井機及人工挖掘



圖 47 鑿井機之作業(中空螺旋鑽)



圖 48 電極井之設置



圖 49 地下水井套筒安裝



圖 50 地下水井套筒安裝



圖 51 部分土壤裝袋保存



圖 52 完成設井作業

5.9 電力系統配置

完成電極井位施作後即進行現地配線工程，包含：牽線、安裝及電力系統測試。



圖 53 電線保護管切割



圖 54 電線保護管固定工程



圖 55 電線配置



圖 56 電極井頭施作及固定



圖 57 電力系統設置完成



圖 58 電力系統設置完成

5.10 電動力土壤重金屬整治作業

本試驗利用電動力技術配合陽、陰極電極排列於鼓山區清潔隊停車場整治受重金屬污染之土壤，本(108 年度)以蜂巢形土壤整治為主，明年度(109 年度)計畫為一方型區域整治；本年度試驗整治蜂巢形區域，共設置 12 口電極井，其土壤基本特性及重金屬初始污染濃度如表 3 所示，相關分析方法如 4.5 節所示。

電動力試驗參數之規劃於參考本實驗室歷年研究成果，電動力技術調整參數包含電位坡降、操作流質及電極種類，(1)電位坡降即施予電力之大小，較強之電位坡降可給予地下環境穩定之電滲透流，驅使土壤離子移動較不受土壤異質性所影響；(2)重金屬離子於酸性條件下遷移性較佳，本研究團隊選擇乳酸(T4)作為操作流質，乳酸具可食用性，其添加於地下環境除有效促使重金屬離子之遷移，亦不會對環境造成負擔；(3)電極種類之選擇及製備為電動力技術重要參數之一，本試驗選擇惰性電極(T1-T2 及 T4)及 Fe/Al 氧化電極(T3)分別進行試驗，惰性電極於通電後使其具有電滲透流之產生，Fe/Al 氧化電極因氧化還原之電子得失致其具有改變土壤重金屬相態之能力，本年度試驗規劃表如 4.4 節表 2 所



表 3 土壤基本特性

Characteristics	Values	管制標準	監測基準
Texture	Sand	-	-
Sand (%)	96%	-	-
Silt (%)	0%	-	-
Clay (%)	4%	-	-
Organic content (%)	4.04	-	-
Soil pH	7.77	-	-
pH _{zpc}	2.62	-	-
CEC (meq/100 g)	6.43	-	-
Moisture content (%)	12.5	-	-
Cu (mg/kg)	1,573±87	400	220
Zn (mg/kg)	1,825±121	2,000	1,000
Cr (mg/kg)	1,776±151	250	175
Ni (mg/kg)	569±33	200	130
Pb (mg/kg)	1,536±131	2,000	1,000

※網底：超過管制標準；粗體：超過監測基準

示。

5.10.1 電位坡降對整治效率之影響

本小節主要討論因電位坡降之改變(0.6-1 V/cm，T1-T2)造成土壤污染重金屬銅(Cu)、鋅(Zn)、鉻(Cr)、鎳(Ni)及鉛(Pb)於地下環境之遷移及濃度變化之關係；T1 及 T2 試驗組整治日期分別為 T1(0.6 V/cm)：2019/05/10-2019/06/09 及 T2(1.0 V/cm)：2019/06/10-2019/07/05。

圖 59 至圖 63 為電動力啟動前/後土壤各重金屬濃度變化趨勢圖，電動力配合蜂巢狀之陽、陰極電極排列，透過電滲透流將污染物由陽極端往陰極端匯集，圖中黑色十字為陽極端位置、黑色圓點為陰極端位置，趨勢圖共分為 4 層，由上而下分別為 Layer A：0.0-0.5 m、Layer B：0.5-1.0 m、Layer C：1.0-1.5 m 及 Layer D：1.5-2.0 m，圖中可明顯看出通電一週後濃度峰值較通電前有明顯差異(峰值波動較劇烈)，表示電動力技術確實使土壤重金屬離子於地下環境中遷移。

T1 試驗組(圖 64 至圖 68)操作參數以惰性電極 0.6 V/cm 電位坡降配合地下水作為操作流質進行土壤整治作業，整治試驗兩週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,573.0 mg/kg(超標 3.93 倍)→1,420.0 mg/kg(超標 3.55

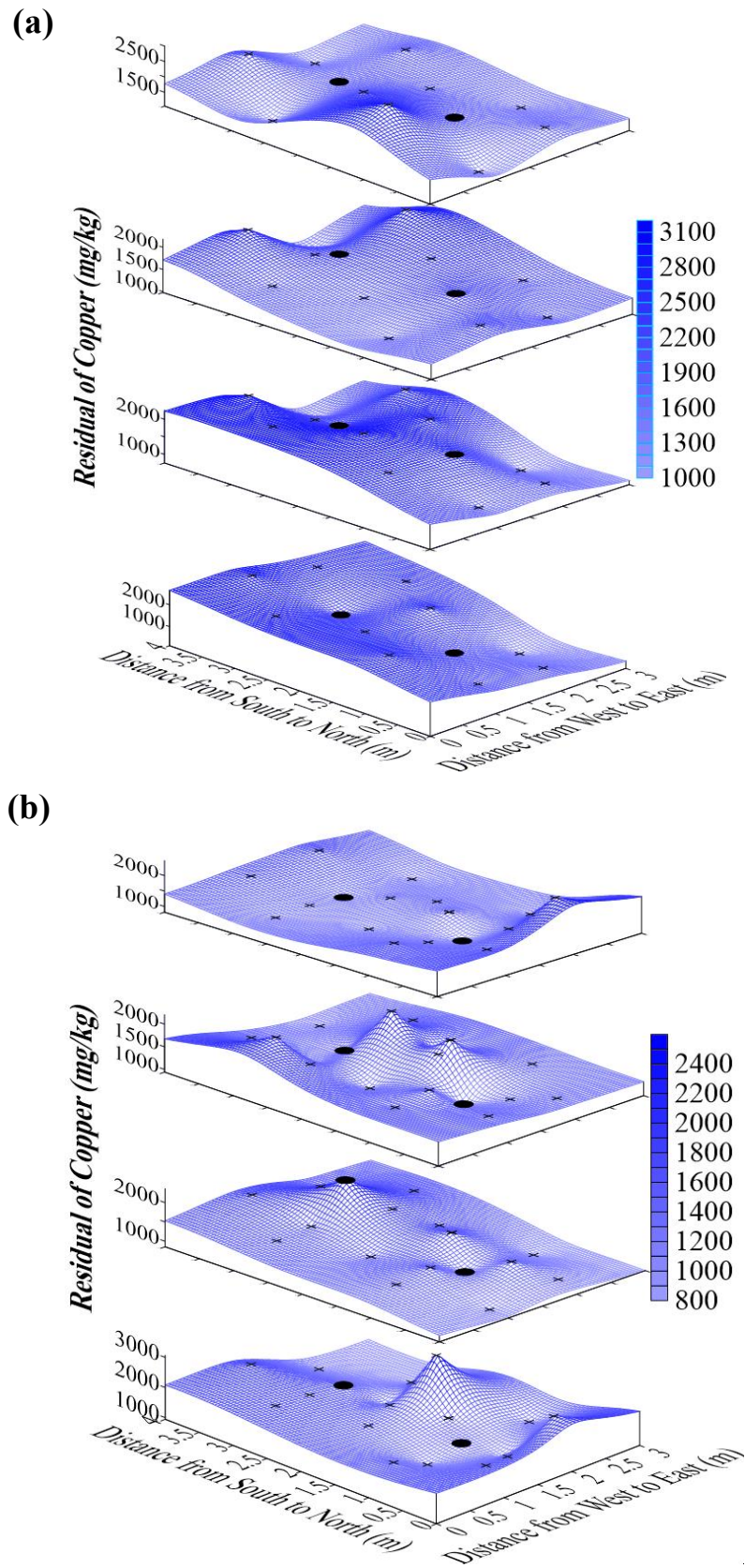


圖 59 重金屬銅(Cu)於電動力啟動後濃度變化趨勢，
(a)2019/05/10(啟動前)；(b)2019/05/18(啟動後)

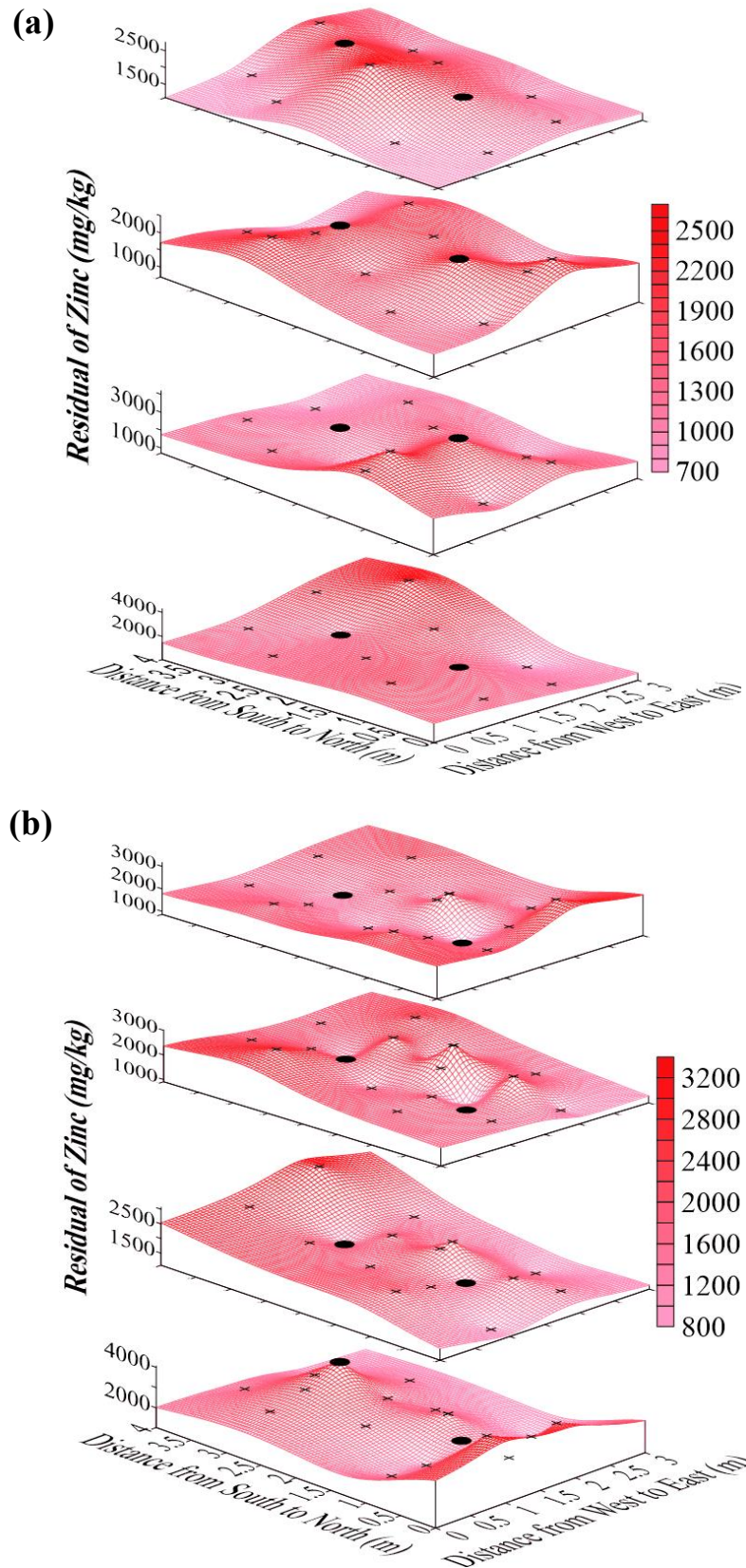


圖 60 重金屬鋅(Zn)於電動力啟動後濃度變化趨勢，
(a)2019/05/10(啟動前)；(b)2019/05/18(啟動後)

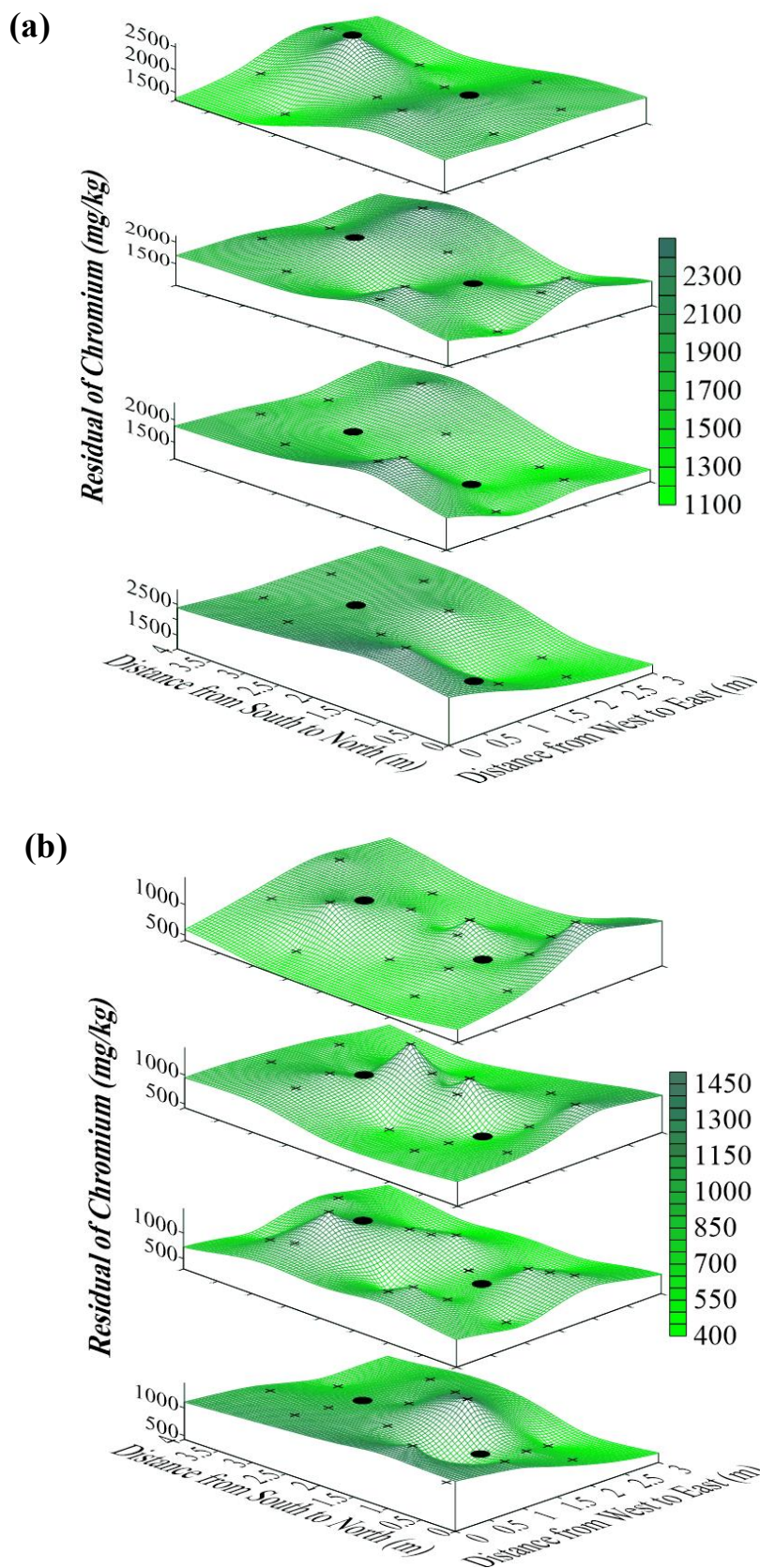


圖 61 重金屬鉻(Cr)於電動力啟動後濃度變化趨勢，
(a)2019/05/10(啟動前)；(b)2019/05/18(啟動後)

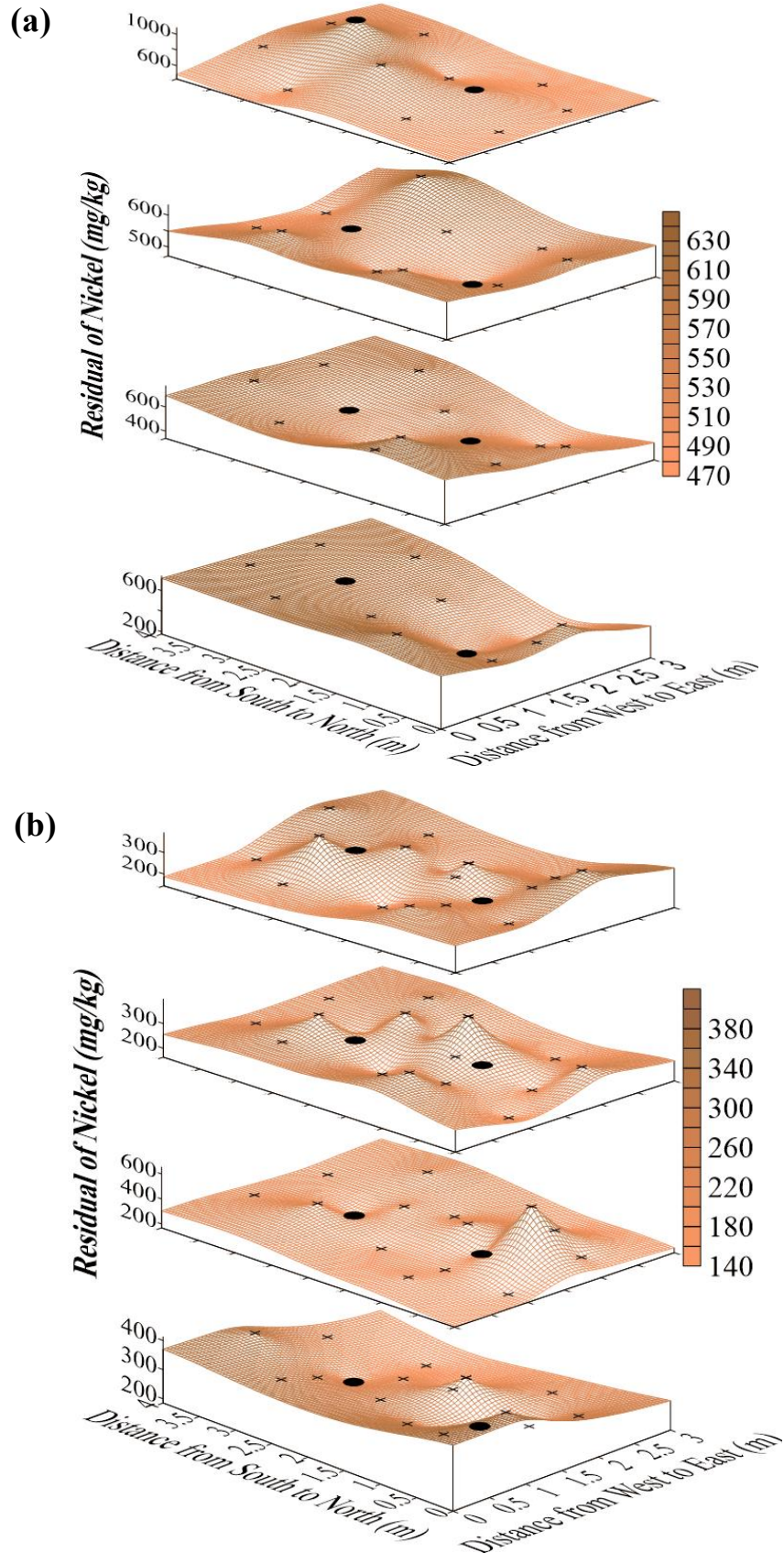


圖 62 重金屬鎳(Ni)於電動力啟動後濃度變化趨勢，
(a)2019/05/10(啟動前)；(b)2019/05/18(啟動後)

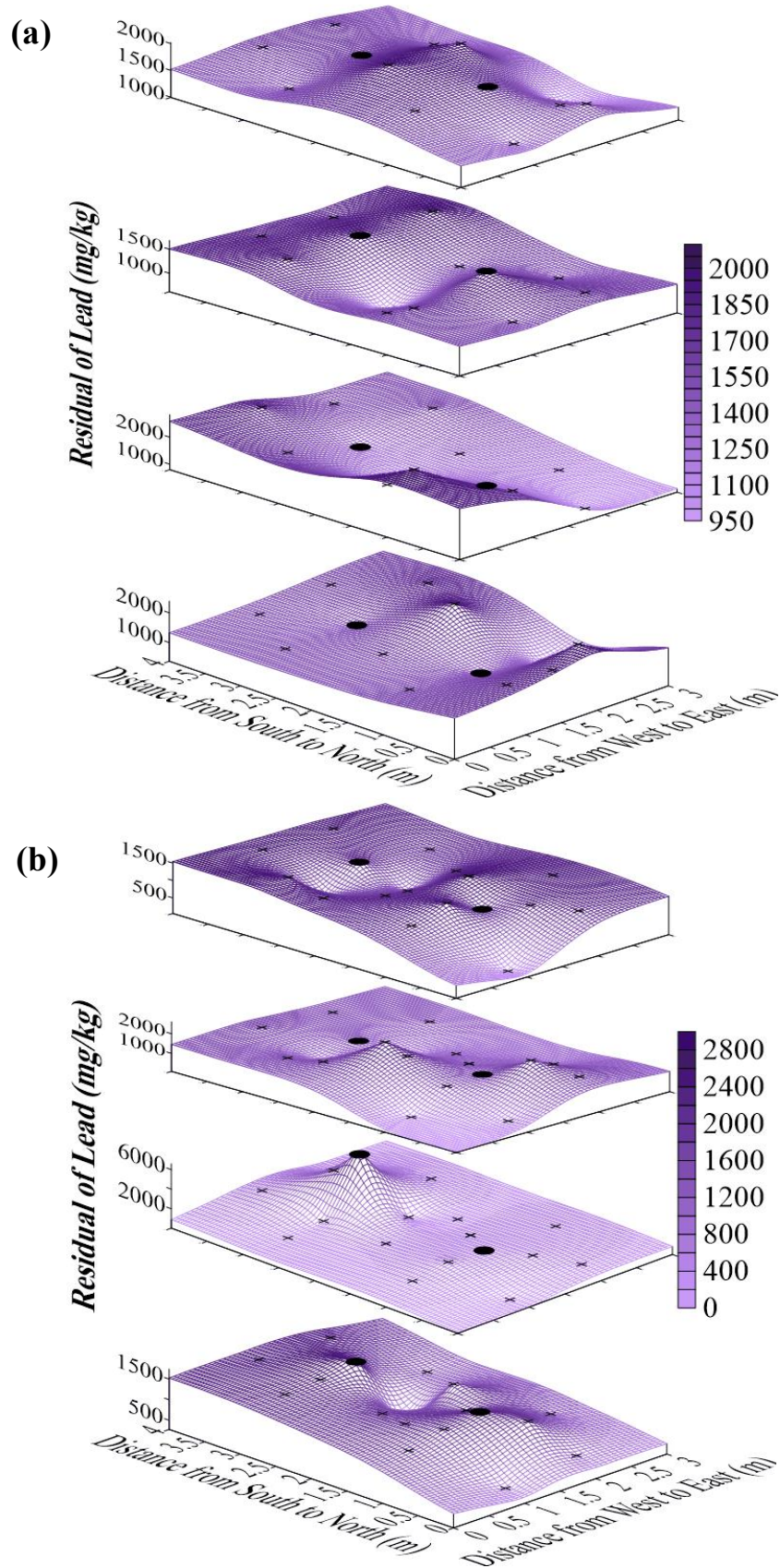


圖 63 重金屬鉛(Pb)於電動力啟動後濃度變化趨勢，
(a)2019/05/10(啟動前)；(b)2019/05/18(啟動後)

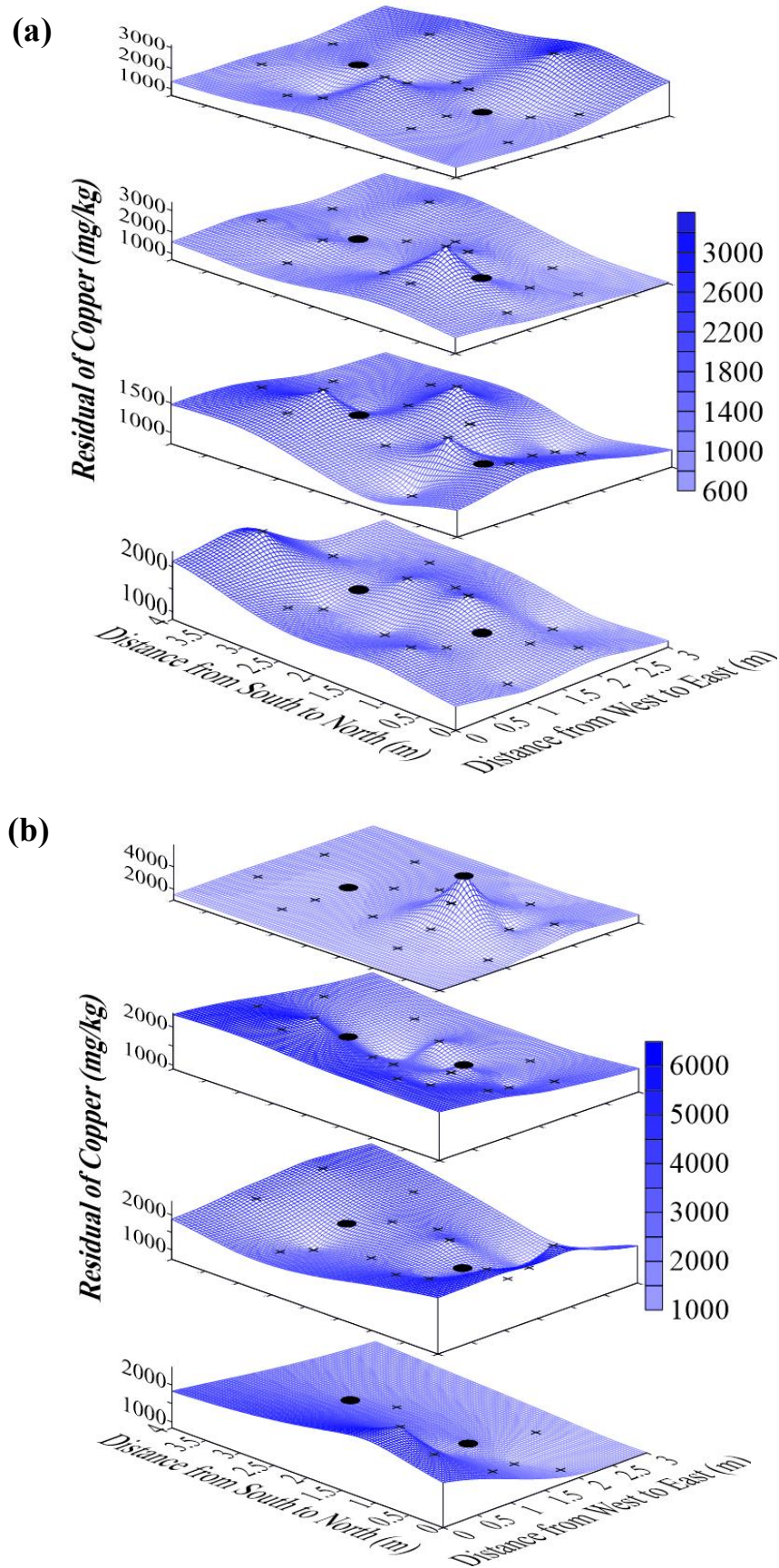


圖 64 重金屬銅(Cu)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)

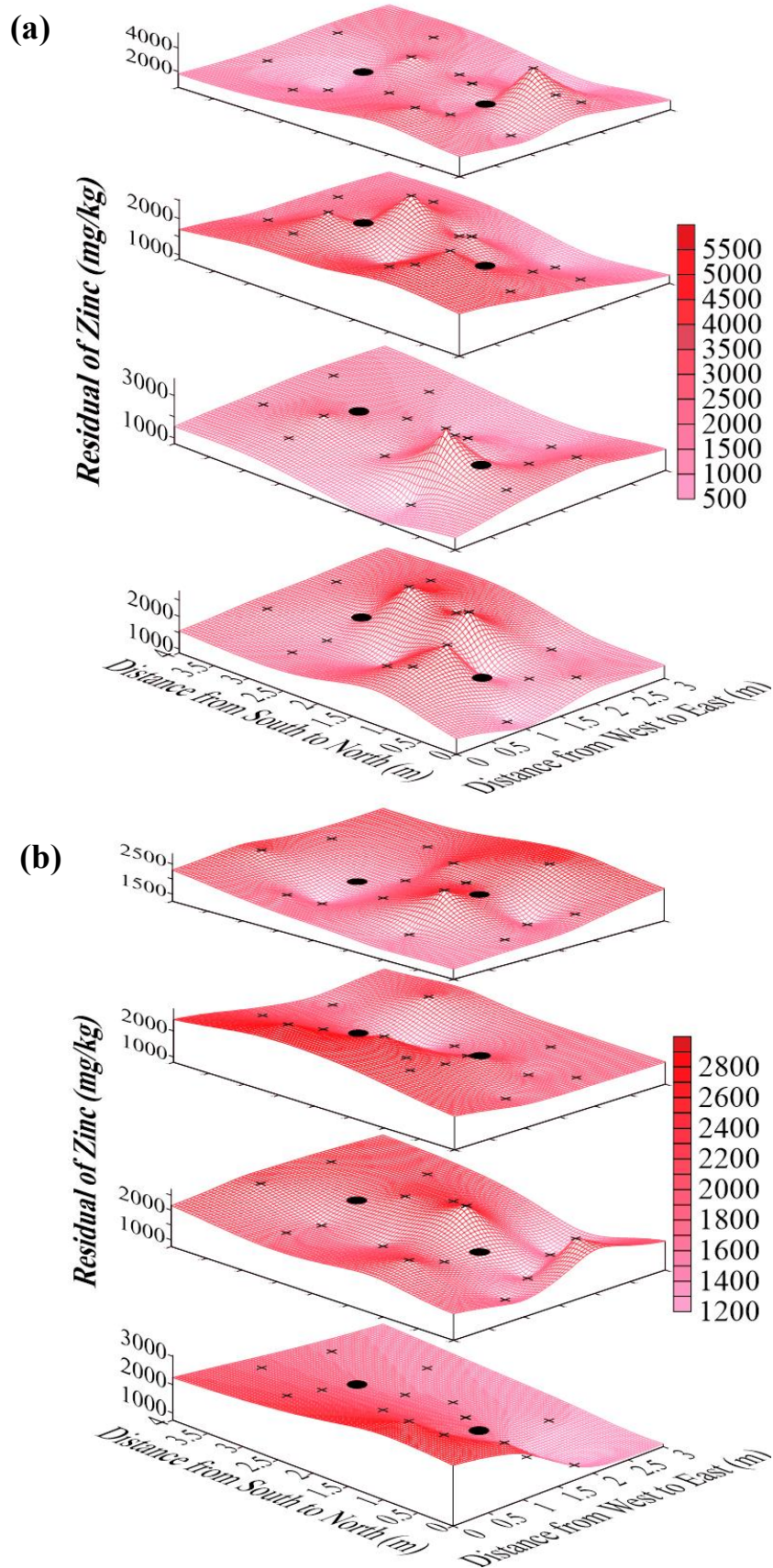


圖 65 重金屬鋅(Zn)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)

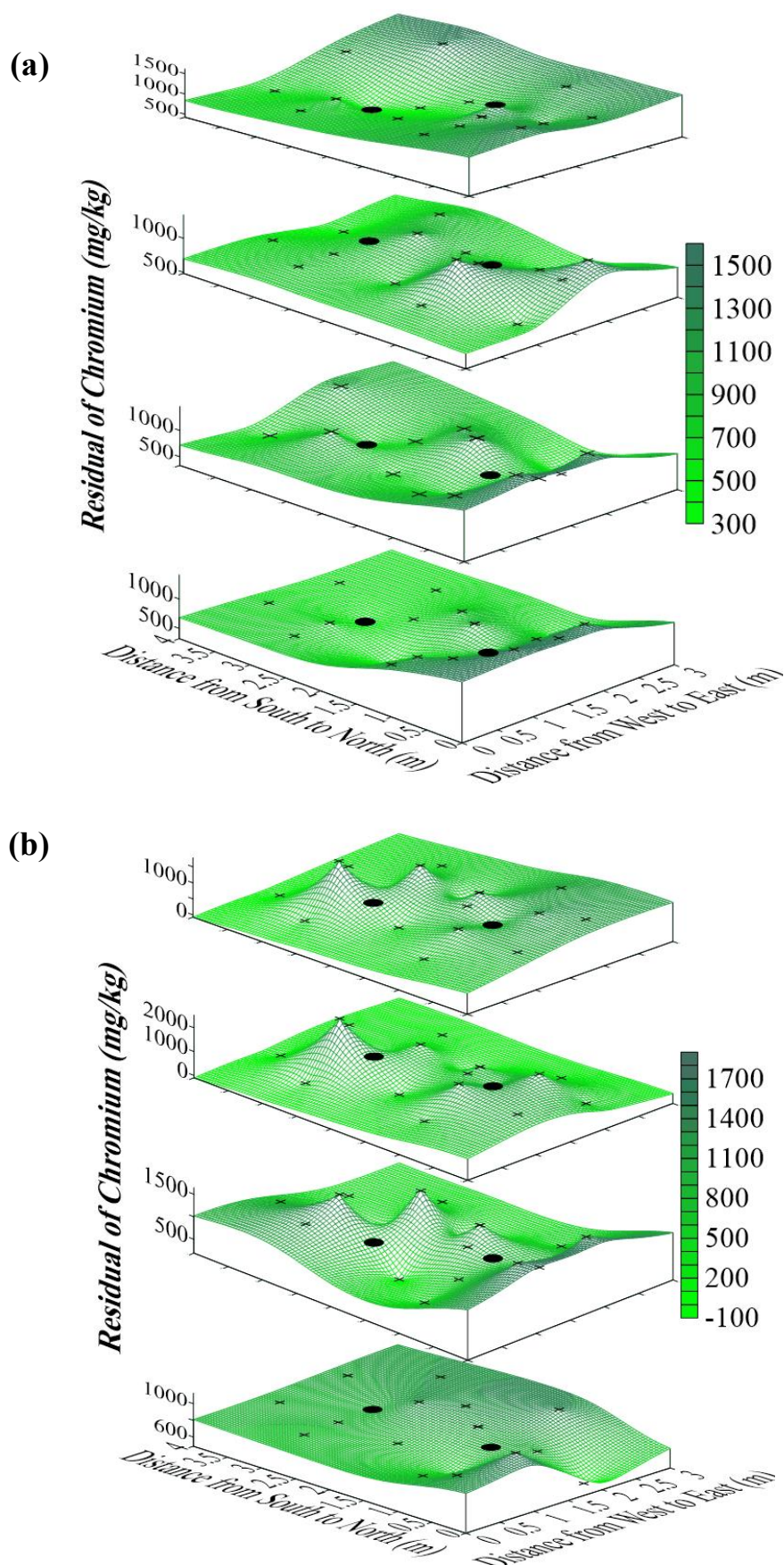


圖 66 重金屬鉻(Cr)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)

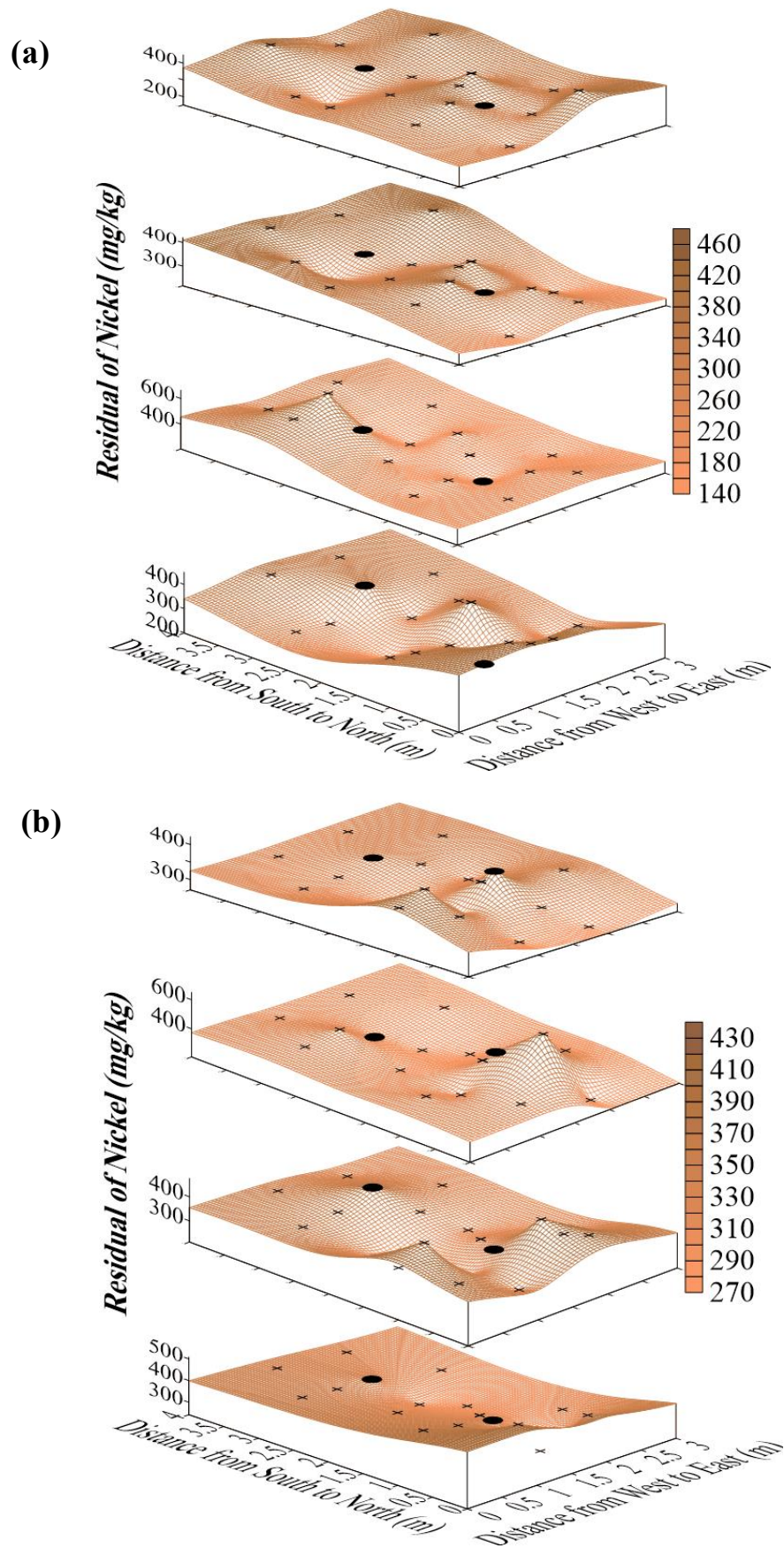


圖 67 重金屬鎳(Ni)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)

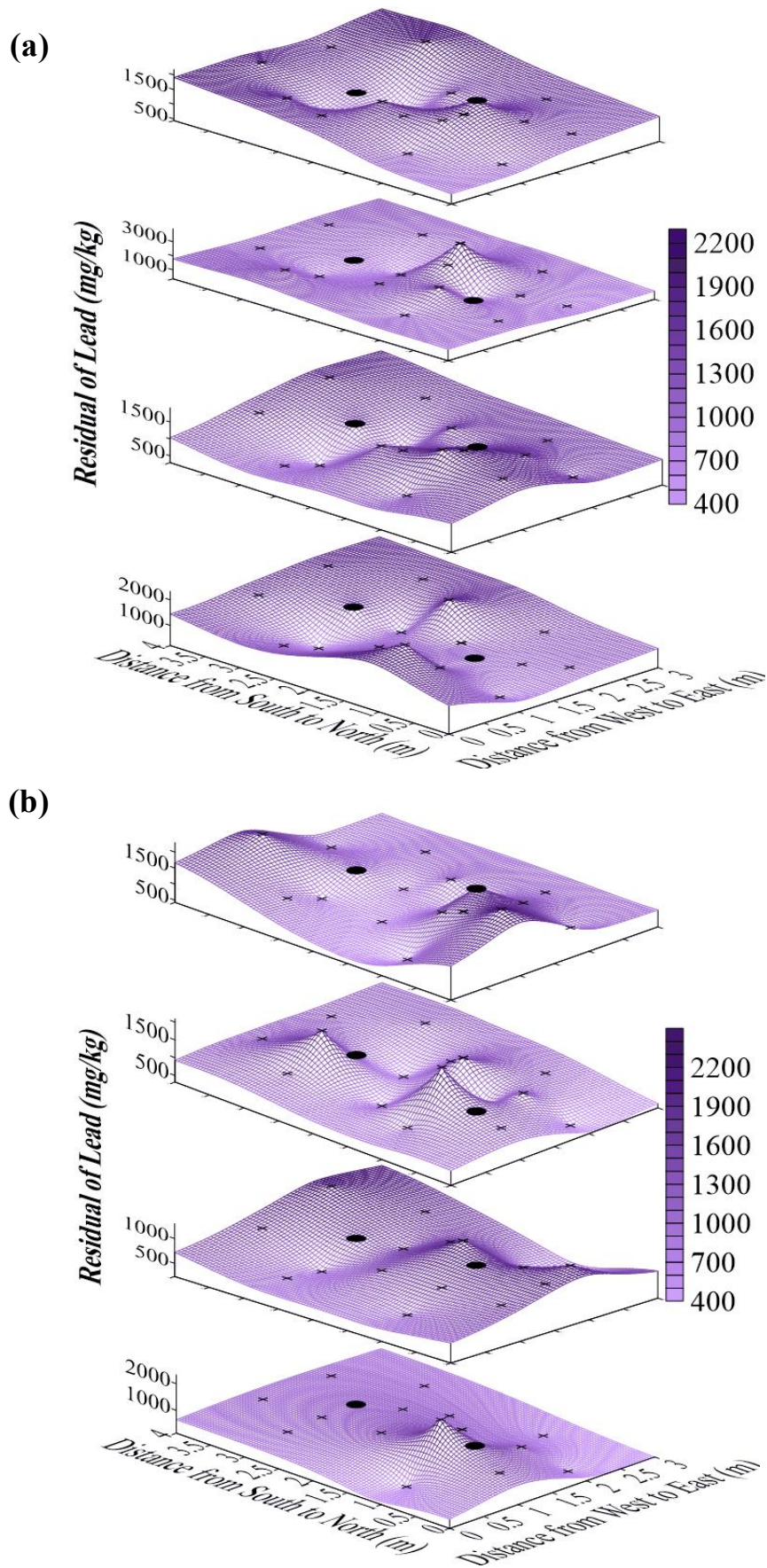


圖 68 重金屬鉛(Pb)於 0.6 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/05/25(week 2)；(b)2019/06/09(week 4)



倍)、1,749.7 mg/kg(超標 0.87 倍)→1,794.6 mg/kg(超標 0.90 倍)、1,775.8 mg/kg(超標 7.10 倍)→869.6 mg/kg(超標 3.48 倍)、569.0 mg/kg(超標 2.84 倍)→271.3 mg/kg(超標 1.36 倍)及 1,550.9 mg/kg(超標 0.78 倍)→1,312.8 mg/kg(超標 0.66 倍)，**電動力(0.6 V/cm)兩週整治成效分別為銅：9.73%、鋅：-2.57%、鉻：51.03%、鎳：52.32%及鉛：15.35%**；整治試驗四週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,573.0 mg/kg(超標 3.93 倍)→1,620.4 mg/kg(超標 4.05 倍)、1,749.7 mg/kg(超標 0.87 倍)→1,887.6 mg/kg(超標 0.94 倍)、1,775.8 mg/kg(超標 7.10 倍)→970.9 mg/kg(超標 3.88 倍)、569.0 mg/kg(超標 2.84 倍)→342.5 mg/kg(超標 1.71 倍)及 1,550.9 mg/kg(超標 0.78 倍)→1,034.5 mg/kg(超標 0.52 倍)，**電動力(0.6 V/cm)四週整治成效分別為銅：-3.01%、鋅：-7.88%、鉻：45.33%、鎳：39.81%及鉛：33.30%**，由整治兩週至四週殘留濃度變化發現，其濃度均有上升之情形，顯示此土壤污染場址具有較不均勻之土壤質地，致重金屬離子遷移不均。

T2 試驗組(圖 69 至圖 73)操作參數以惰性電極 1.0 V/cm 電位坡降配合地下水作為操作流質進行土壤整治作業，整治試驗兩週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,620.4 mg/kg(超標 4.05 倍)→1,075.8 mg/kg(超標 2.69 倍)、1,887.6 mg/kg(超標 0.94 倍)→1,678.6 mg/kg(超標 0.84 倍)、970.9 mg/kg(超標 3.88 倍)→688.1 mg/kg(超標 2.75 倍)、342.5 mg/kg(超標 1.71 倍)→374.4 mg/kg(超標 1.87 倍)及 1,034.5 mg/kg(超標 0.52 倍)→1,275.2 mg/kg(超標 0.64 倍)，**電動力(1.0 V/cm)兩週整治成效分別為銅：33.61%、鋅：11.07%、鉻：29.13%、鎳：-9.31%及鉛：-23.27%**；整治試驗四週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,620.4 mg/kg(超標 4.05 倍)→1,349.8 mg/kg(超標 3.37 倍)、1,887.6 mg/kg(超標 0.94 倍)→1,789.4 mg/kg(超標 0.89 倍)、970.9 mg/kg(超標 3.88 倍)→1,615.9 mg/kg(超標 6.46 倍)、342.5 mg/kg(超標 1.71 倍)→409.3 mg/kg(超標 2.05 倍)及 1,034.0 mg/kg(超標 0.52 倍)→1,429.0 mg/kg(超標 0.71 倍)，**電動力(1.0 V/cm)四週整治成效分別為銅：16.70%、鋅：5.20%、鉻：-66.43%、鎳：-19.50%及鉛：-38.13%**，由整治兩週至四週殘留濃度變化發現，各項重金屬濃度亦有上升之情形，與 T1 試驗組有相同狀況，推測可能原因為使用地下水做為操作流質，重金屬離子無法完全溶解於水中，於持續電流輸出情況下，重金屬離子移出陽極端有限，致累積於部分土體，如圖亦可看出濃度峰值有向上層遷移之趨勢，顯示電動力技術可將土壤底層重金屬離子往土壤表層遷移，更利於從土體中移除。

比較 T1(0.6 V/cm)及 T2(1.0 V/cm)試驗組發現，電動力技術於整治初期使地下環境重金屬離子遷移較為快速(整治效果明顯)，但因土壤異質性及初始含水率較低之故，導致整治成效無法持續提升，若改變其他操作參數，應會使整治成效較為明顯。

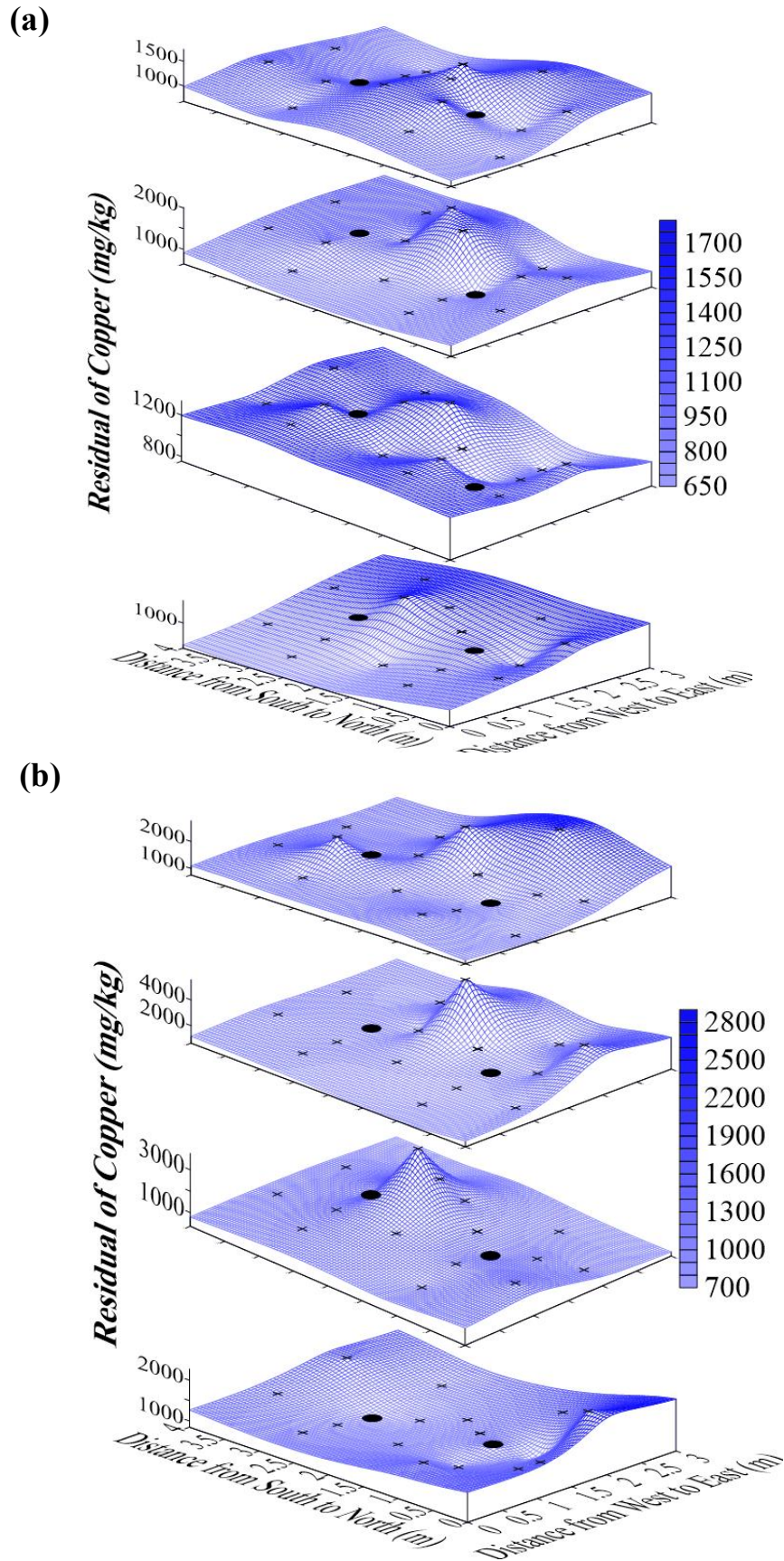


圖 69 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/06/23(week 6)；(b)2019/07/05(week 8)

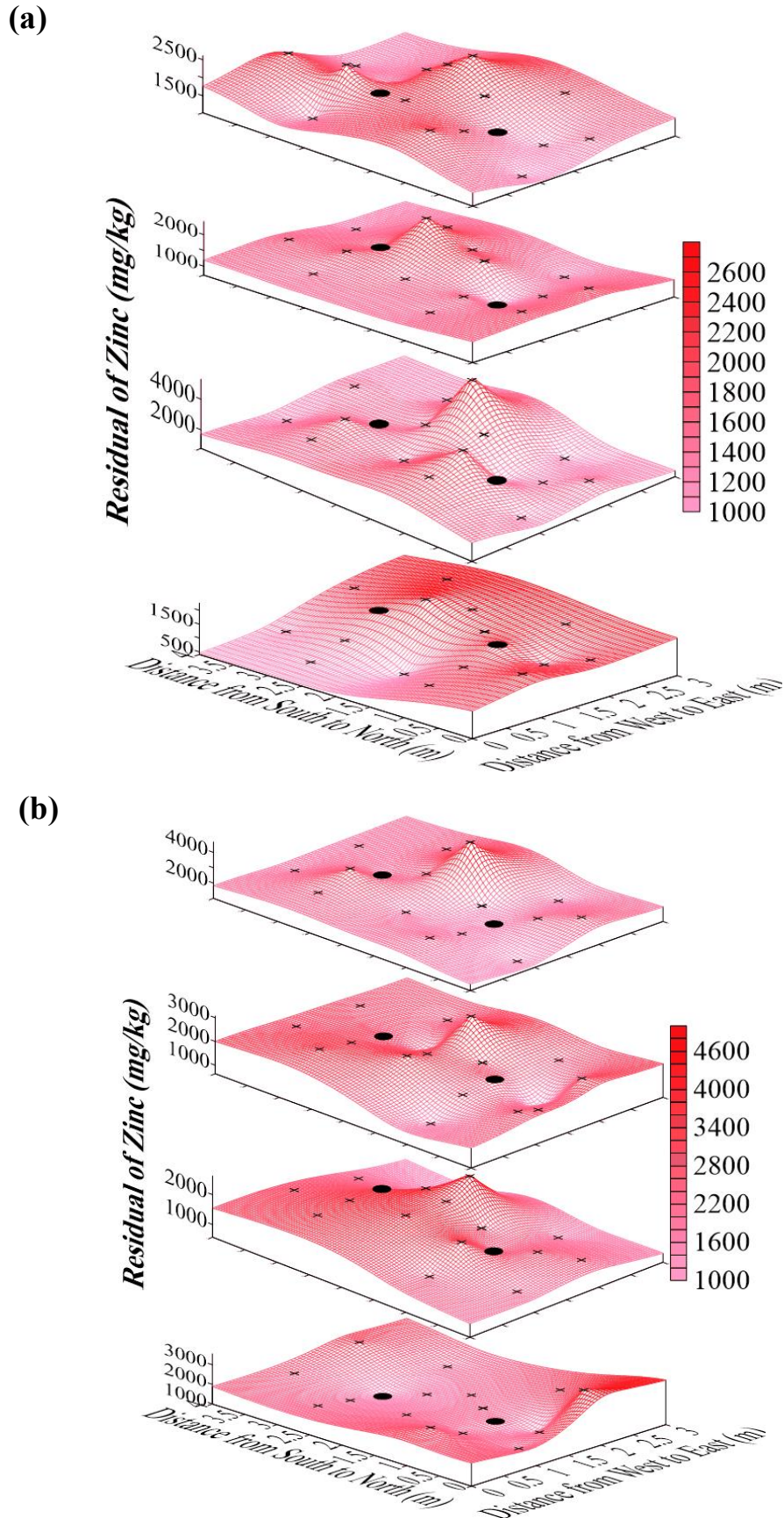


圖 70 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/06/23(week 6)；(b)2019/07/05(week 8)

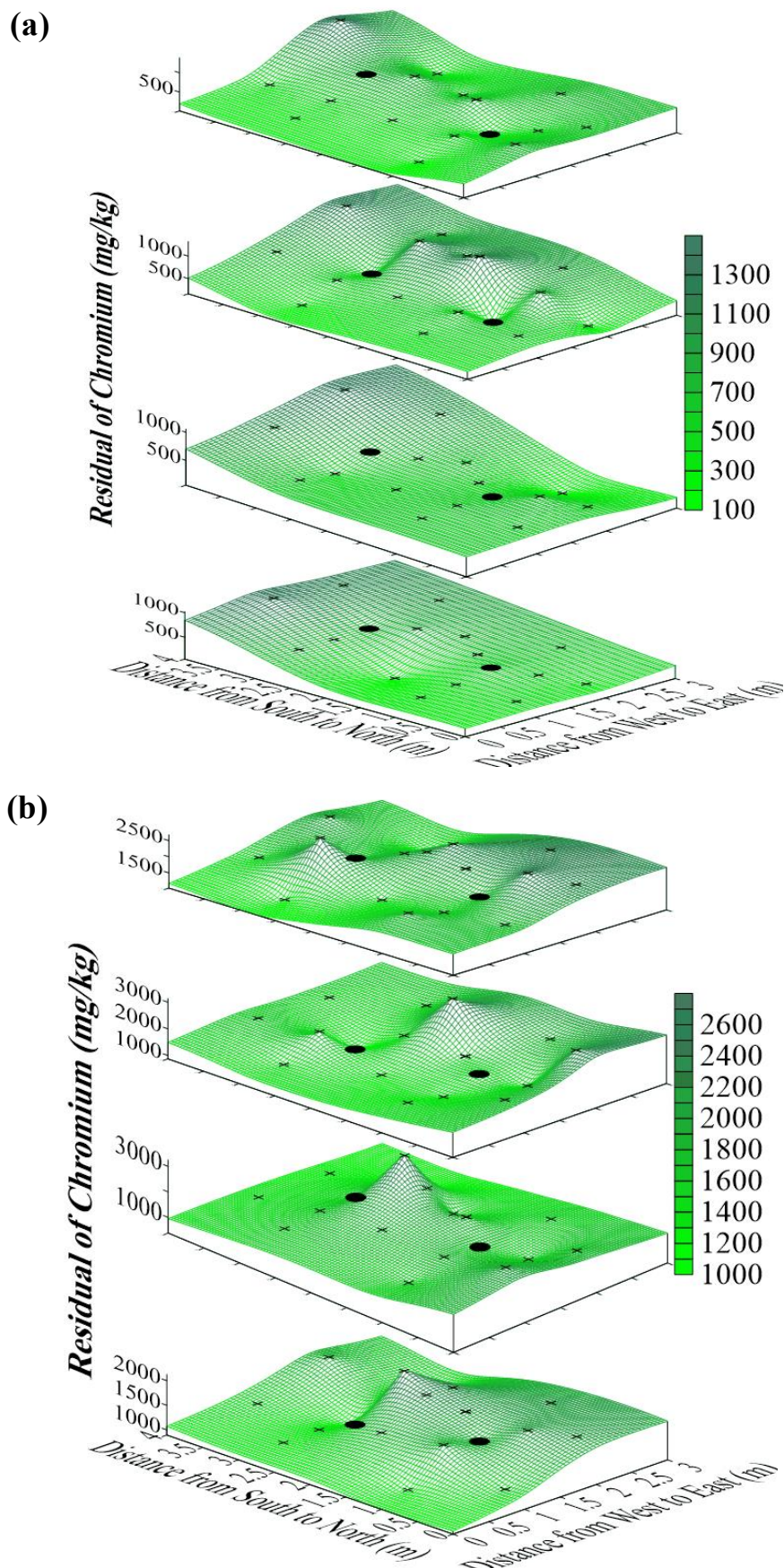


圖 71 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/06/23(week 6)；(b)2019/07/05(week 8)

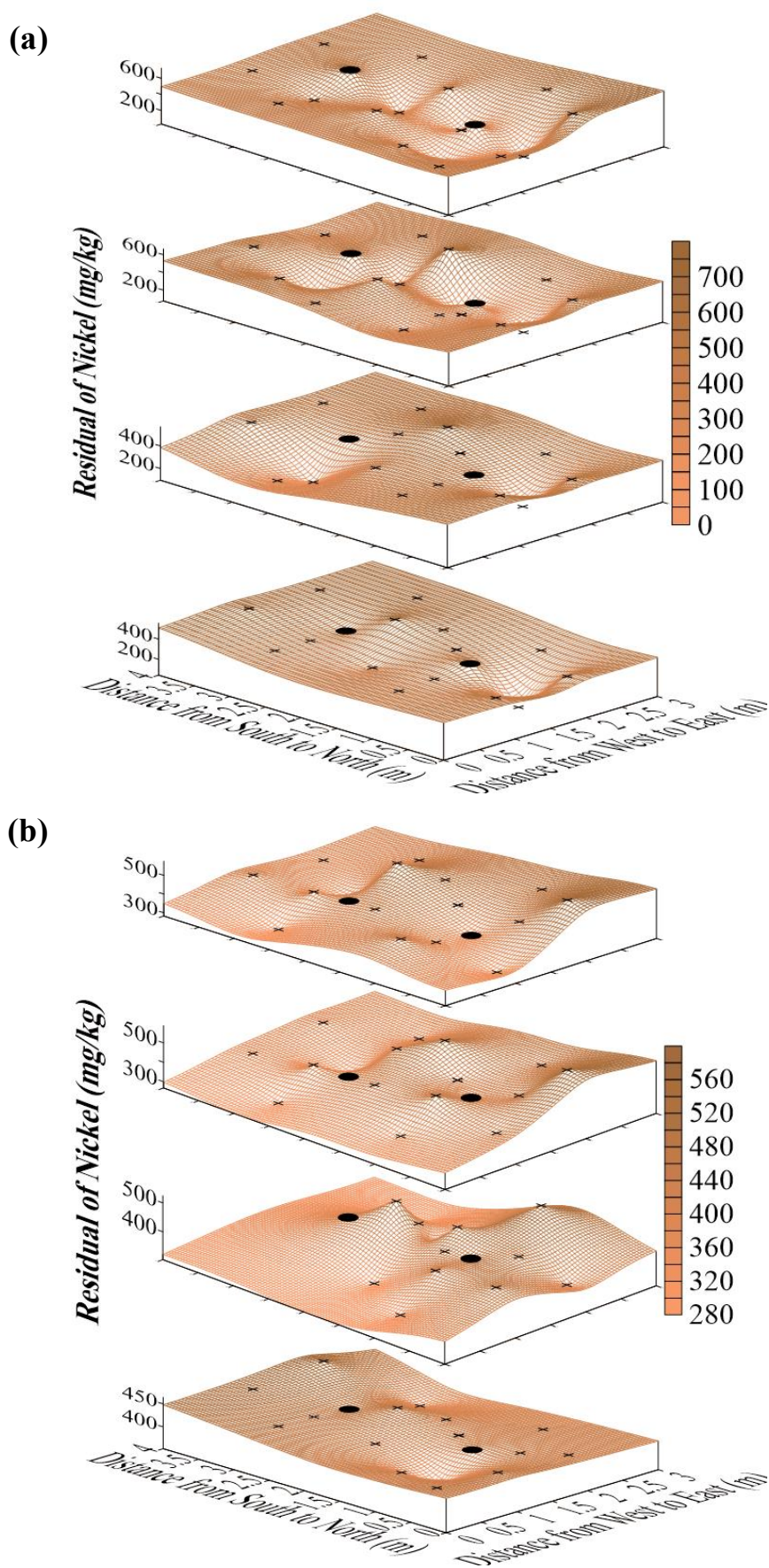


圖 72 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/06/23(week 6)；(b)2019/07/05(week 8)

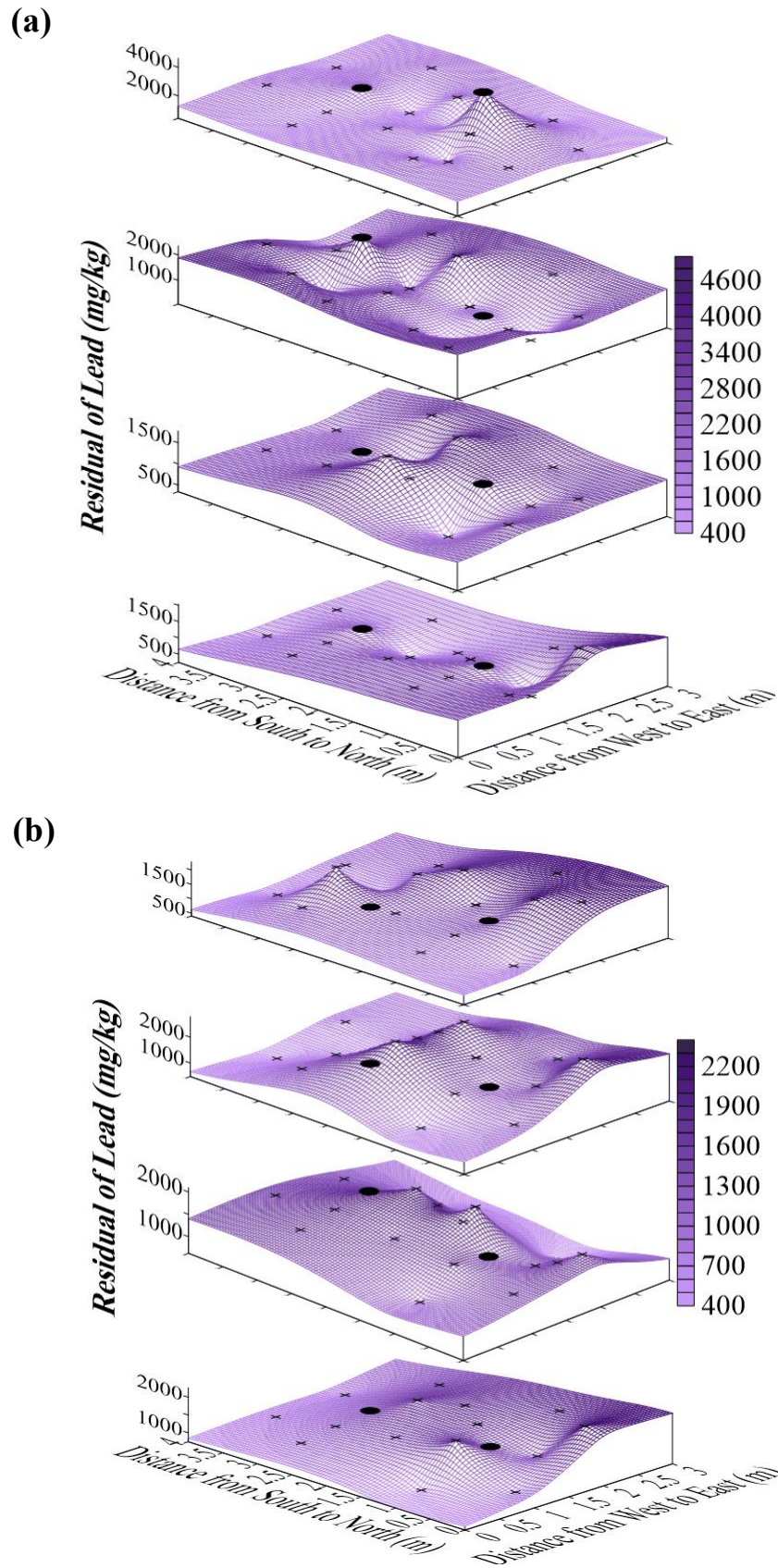


圖 73 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(地下水)濃度變化趨勢，
(a)2019/06/23(week 6)；(b)2019/07/05(week 8)



5.10.2 操作流質對整治效率之影響

本小節主要討論因操作流質之改變(乳酸，Lactic acid)造成土壤污染重金屬銅(Cu)、鋅(Zn)、鉻(Cr)、鎳(Ni)及鉛(Pb)於地下環境之遷移及濃度變化之關係；T4試驗組整治日期為：2019/08/30-2019/09/27。

T4 試驗組(圖 74 至圖 78)操作參數以惰性電極 1.0 V/cm 電位坡降配合乳酸作為操作流質進行土壤整治作業，整治試驗兩週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,307.4 mg/kg(超標 3.27 倍)→857.9 mg/kg(超標 2.14 倍)、1,641.9 mg/kg(超標 0.82 倍)→1,758.6 mg/kg(超標 0.88 倍)、1,282.4 mg/kg(超標 5.13 倍)→1,269.3 mg/kg(超標 5.08 倍)、393.9 mg/kg(超標 1.97 倍)→422.8 mg/kg(超標 2.11 倍)及 1,772.3 mg/kg(超標 0.89 倍)→1,820.9 mg/kg(超標 0.91 倍)，**電動力(乳酸作為操作流質)兩週整治成效分別為銅：34.38%、鋅：-7.11%、鉻：1.02%、鎳：-7.34%及鉛：-2.74%**；由此試驗組濃度變化發現，重金屬銅具有較好之整治成效，重金屬鉻及鉛濃度變化不大，而重金屬鋅及鎳去除效率較低；由 Park et al., 2010 文獻指出，電動力技術於有效分離銅及鉛時，對鋅及鎳之去除效率較低[27]。

5.10.3 Fe/Al 氧化電極對整治效率及土壤相態之影響

本小節主要討論因電極種類之改變(Fe/Al 氧化電極)造成土壤污染重金屬銅(Cu)、鋅(Zn)、鉻(Cr)、鎳(Ni)及鉛(Pb)於地下環境之遷移及濃度變化之關係；T3試驗組整治日期為：2019/07/12-2019/08/16。

T3 試驗組(圖 79 至圖 83)操作參數以氧化電極 1.0 V/cm 電位坡降配合地下水作為操作流質進行土壤整治作業，整治試驗兩週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,349.8 mg/kg(超標 3.37 倍)→1,040.5 mg/kg(超標 2.61 倍)、1,789.4 mg/kg(超標 0.82 倍)→1,476.3 mg/kg(超標 0.74 倍)、1,615.9 mg/kg(超標 6.46 倍)→1,170.2 mg/kg(超標 4.68 倍)、409.3 mg/kg(超標 2.05 倍)→468.8 mg/kg(超標 2.34 倍)及 1,429.0 mg/kg(超標 0.71 倍)→1,961.4 mg/kg(超標 0.98 倍)，**電動力(Fe/Al 氧化電極)兩週整治成效分別為銅：22.69%、鋅：17.50%、鉻：27.58%、鎳：-14.54%及鉛：-37.26%**；整治試驗四週後，土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛濃度變化分別為 1,349.8 mg/kg(超標 3.37 倍)→1,307.4 mg/kg(超標 3.27 倍)、1,789.4 mg/kg(超標 0.82 倍)→1,641.9 mg/kg(超標 0.82 倍)、1,615.9 mg/kg(超標 6.46 倍)→1,282.4 mg/kg(超標 5.13 倍)、409.3 mg/kg(超標 2.05 倍)→393.9 mg/kg(超標 1.97 倍)及 1,429.0 mg/kg(超標 0.71 倍)→1,772.3 mg/kg(超標 0.89 倍)，**電動力(Fe/Al 氧化電極)四週整治成效分別為銅：3.14%、鋅：**

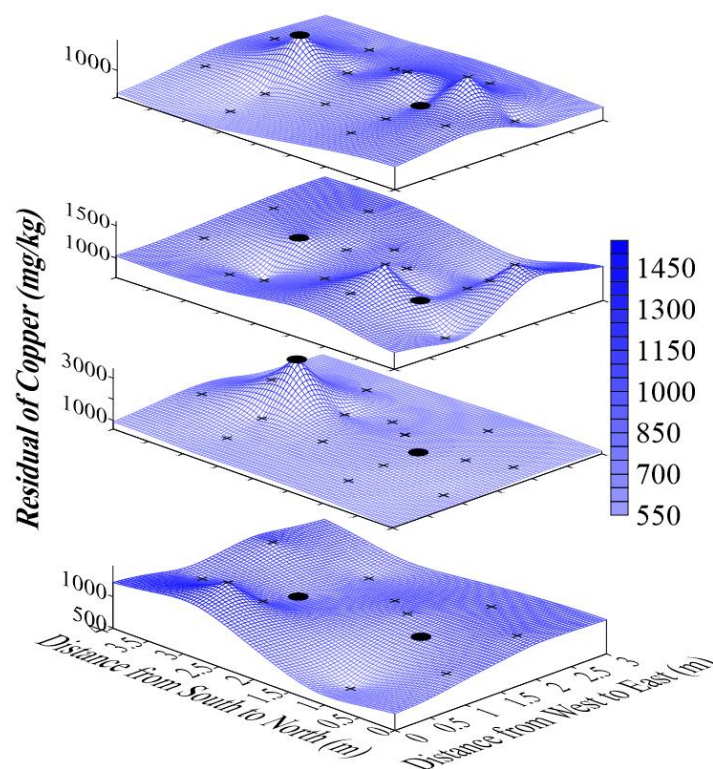


圖 74 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖
(2019/09/17，week 14)

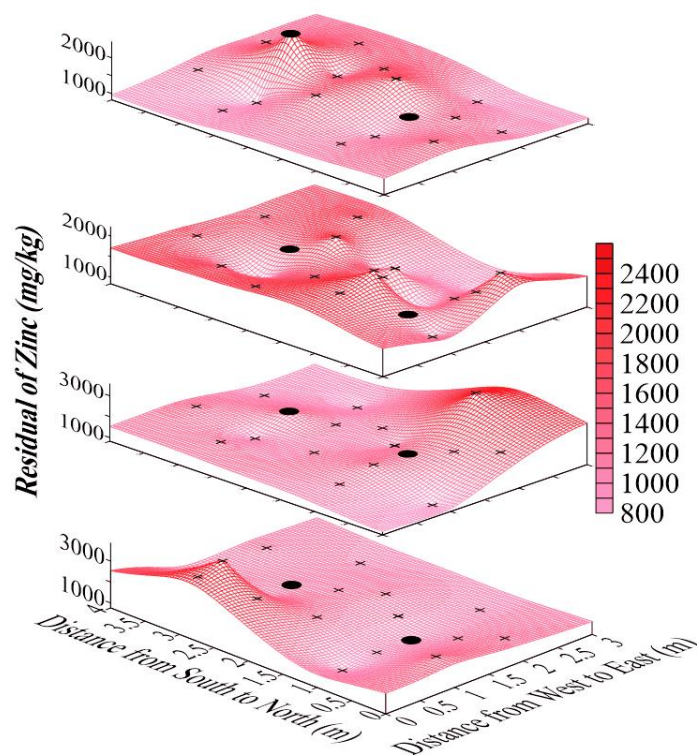


圖 75 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖
(2019/09/17，week 14)

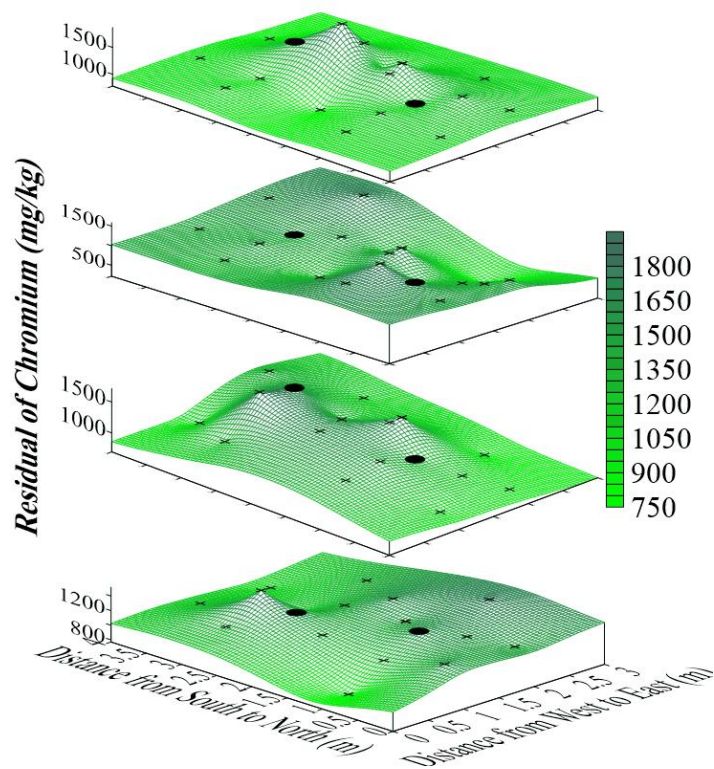


圖 76 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖
(2019/09/17，week 14)

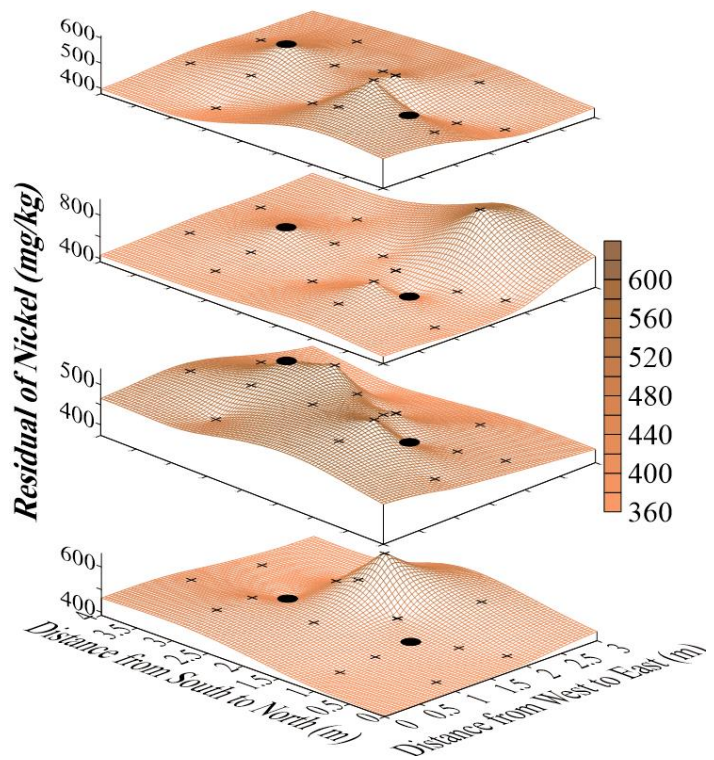


圖 77 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖
(2019/09/17，week 14)

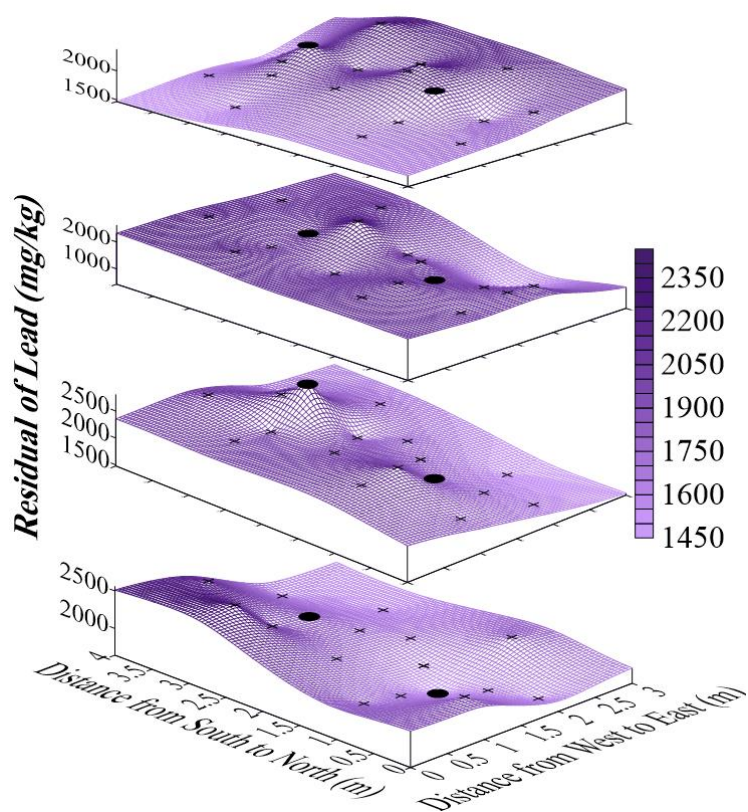


圖 78 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(乳酸)濃度變化趨勢圖
(2019/09/17，week 14)

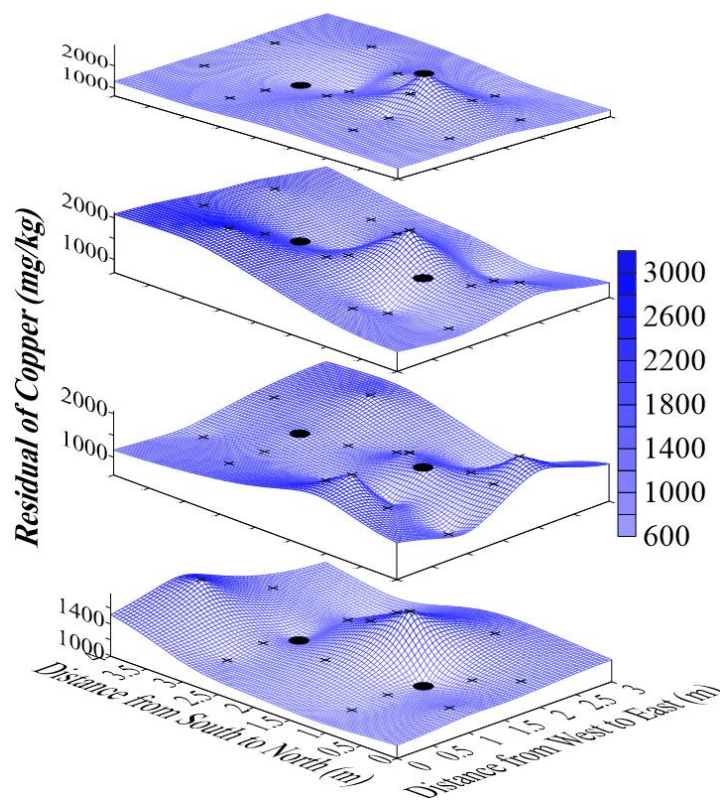


圖 79 重金屬銅(Cu)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)
濃度變化趨勢圖(2019/08/16，week 12)

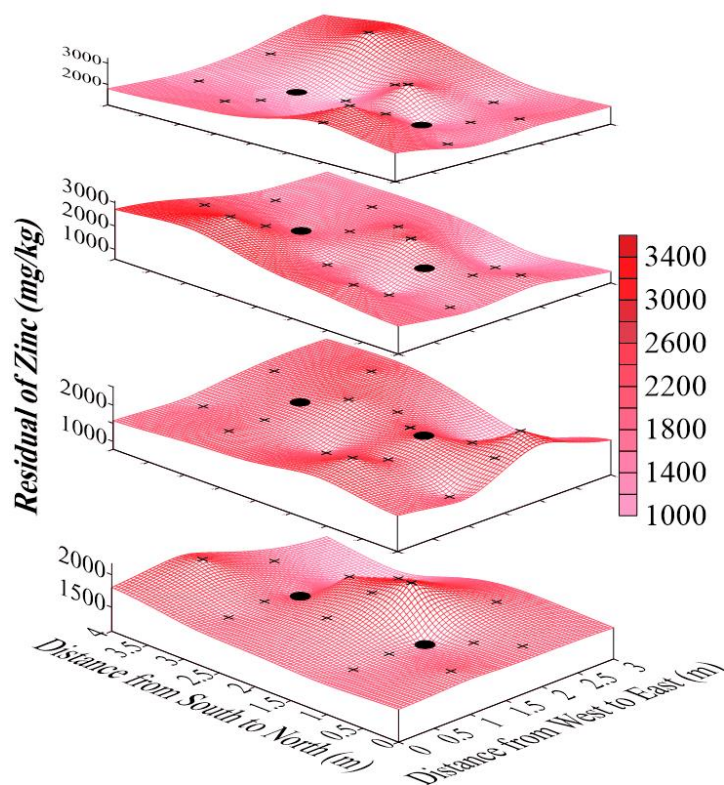


圖 80 重金屬鋅(Zn)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)
濃度變化趨勢圖(2019/08/16，week 12)

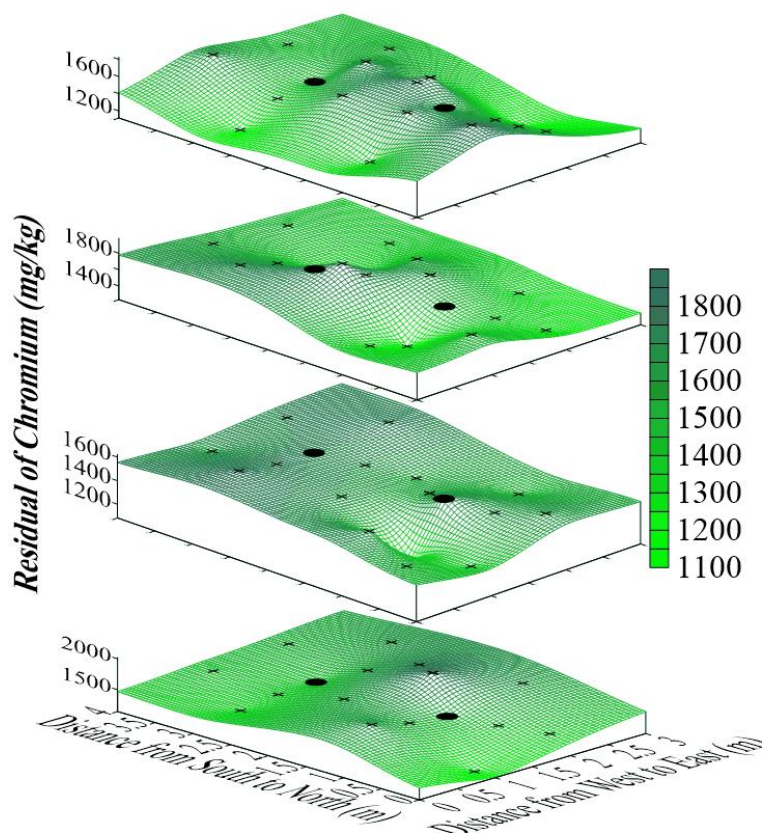


圖 81 重金屬鉻(Cr)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)
濃度變化趨勢圖(2019/08/16，week 12)

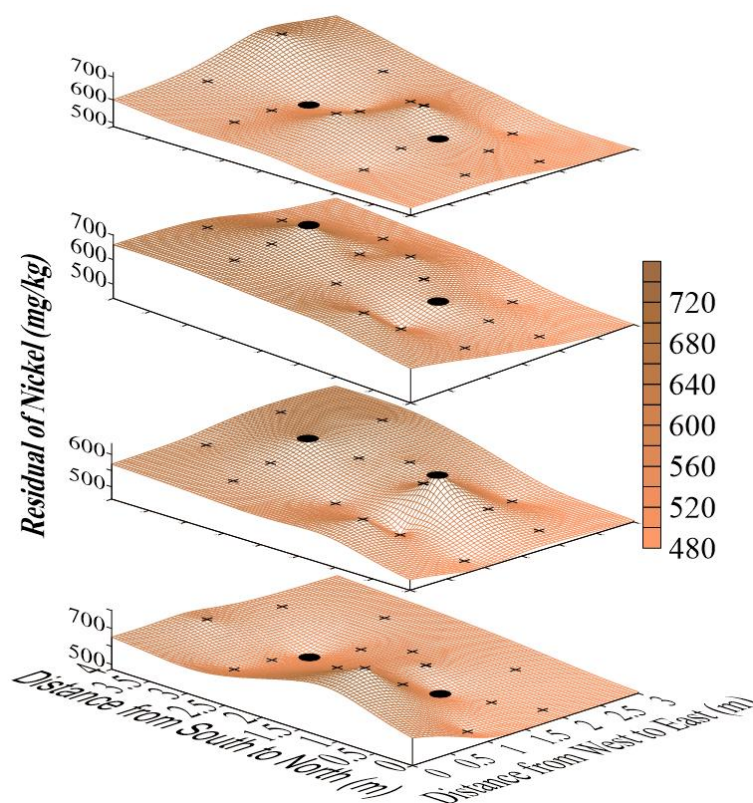


圖 82 重金屬鎳(Ni)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)
濃度變化趨勢圖(2019/08/16，week 12)

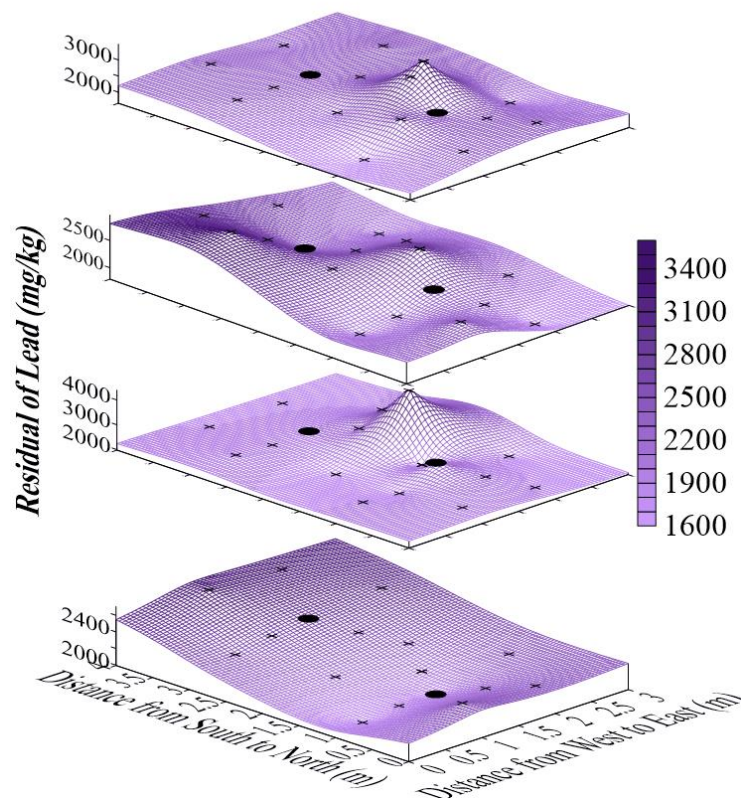


圖 83 重金屬鉛(Pb)於 1.0 V/cm 電位坡降(Fe/Al 氧化電極)
濃度變化趨勢圖(2019/08/16，week 12)



8.24%、鉻：20.64%、鎳：3.76%及鉛：-24.02%；由整治兩週至四週殘留濃度變化發現，與上述試驗組相同，均有濃度上升之情形，但相較於其他試驗組，週間濃度變化較不明顯，可看出以 Fe/Al 氧化電極進行整治成效較佳，推測可能原因為氧化電極所造成之電子轉移使土壤與重金屬離子間的相態轉換，而使其具有較佳的整治成效。

本研究 T3 試驗組以 Fe/Al 氧化電極作為陽極端電極，Al 電極作為陰極端電極，觀測土壤中重金屬離子於相態中之變化，一般重金屬經由序列萃取試驗可分為五種相態，分別為：可交換態(Exchangeable)、碳酸鹽結合態(Bound to Carbonates)、鐵錳氧化態(Bound to Iron and Manganese Oxides)、有機物結合態(Bound to Organic Matter)及殘渣態(Residual)，一般認為可交換態及碳酸鹽結合態移動性較高，而其他三態移動性較低，若透過 Fe/Al 氧化電極將重金屬離子轉移到前兩相態，即可透過電滲透流達到比較佳的遷移效果，整治效率也會有所提升。

如圖 84 至圖 85 為經 Fe/Al 氧化電極整治前/後重金屬相態比例圖，整治前銅、鋅、鉻、鎳及鉛前兩相態及後三相態分別為銅：23%及 77%、鋅：10%及 90%、鉻：84%及 16%、鎳：39%及 61%、鉛：36%及 64%；整治後前兩相態及後三相態分別為銅：26%及 74%、鋅：10%及 90%、鉻：62%及 38%、鎳：15%及 85%、鉛：30%及 70%，經觀察可發現整治後僅有重金屬銅前兩相態有增加之趨勢，其他種類重金屬除鋅(沒有變化)以外，皆往後三相態移動，推測是由於陽極端產生之氫離子(H⁺)進入到土壤中置換了重金屬離子，導致重金屬可氧化部份被去除，留下較難移除之相態[26]；觀察重金屬離子與土壤相態之關係，於整治前銅及鋅於前兩相態佔比為 23%及 10%，而鉻、鎳及鉛則有 84%39%及 36%，明顯高於前述二重金屬，推測可能由於其可移動性相態佔比較高，導致於土壤間移動較佳，較易受到電滲透流或操作流質之帶動而遷移，導致其於土壤中濃度趨勢變化較為明顯。

使用電動力技術整治現地銅、鋅、鉻、鎳及鉛重金屬污染土壤，透過改變電位坡降、電極種類及操作流質作為實驗參數，於四個月累計濃度變化銅：1,573.0 mg/kg(超標 3.93 倍)→857.93 mg/kg(超標 2.14 倍)、鋅：1,749.7 mg/kg (超標 0.87 倍)→1,758.6 mg/kg(超標 0.88 倍)、鉻：1,775.8 mg/kg(超標 7.10 倍)→1,269.3 mg/kg(超標 5.08 倍)、鎳：569.0 mg/kg(超標 2.84 倍)→422.8 mg/kg(超標 2.11 倍)及鉛：1,550.9 mg/kg(超標 0.78 倍)→1,820.9 mg/kg(超標 0.91 倍)，電動力四個月累積整治成效分別為銅：45.5%、鋅：-0.5%、鉻：28.6%、鎳：25.7%及鉛：-17.4%，後續會將實驗操作時間增長，有利提升整治成效。

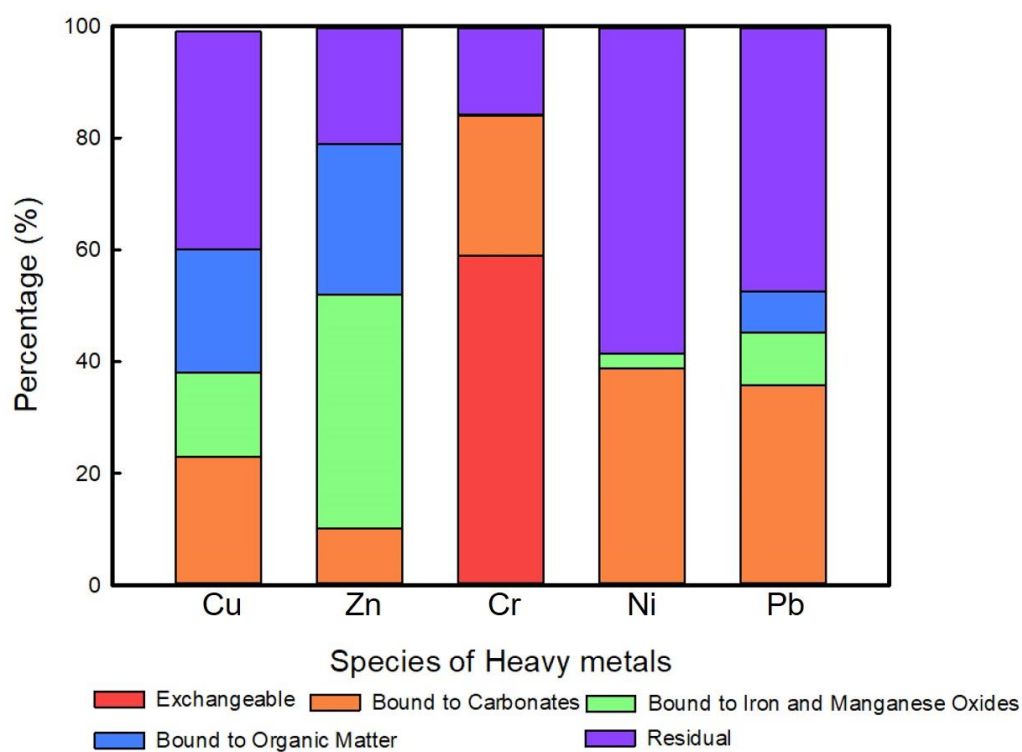


圖 84 整治前各種金屬於土壤中相態比例

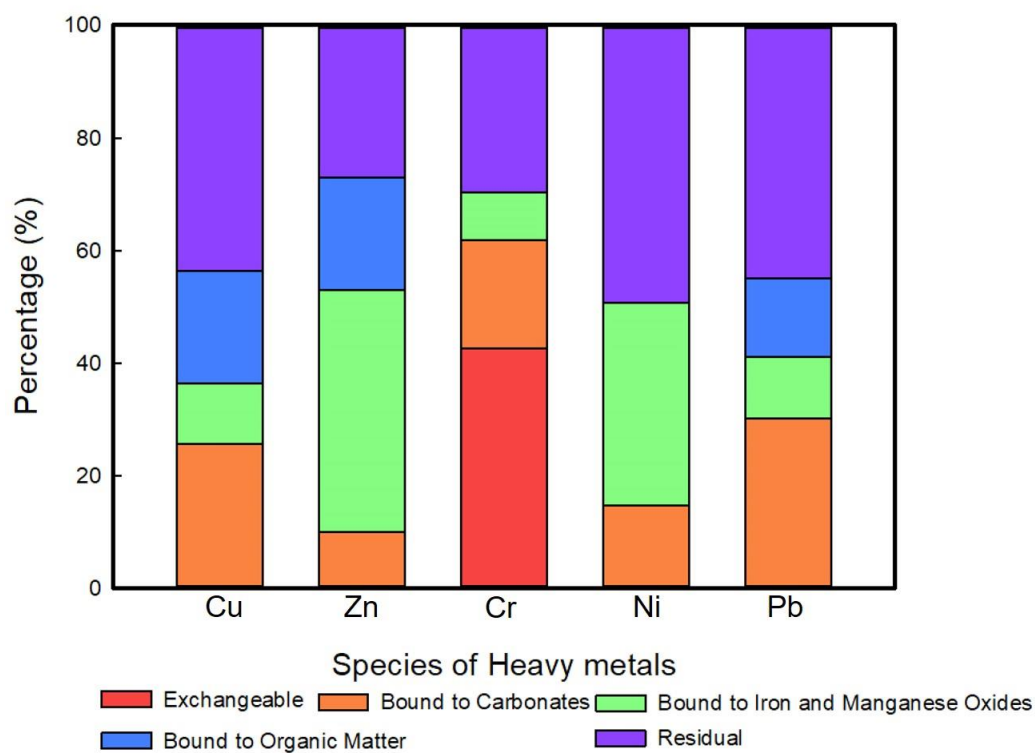


圖 85 整治後各種金屬於土壤中相態比例



5.10.4 經濟效率分析

經濟效益為處理效率外之重要考量，於電動力技術中，常因電極及其製備成本，使整治費用提高，故於本章節就電化學氧化試驗作經濟效益成本分析，如下所示。

電化學地質氧化技術試驗之成本來源包含：

- (1) 模場建置及相關材料購置費用
- (2) 電極材料費用
- (3) 操作流質藥劑費用
- (4) 電力費用

5.10.4.1 模場建置及相關材料購置費用

於實場之電動力整治試驗其成本主要分為 3 大部分，分別為前置準備階段、實驗階段及關場階段，本研究因與傑博公司合作，並將實驗準備階段(實場建置)及關場階段所需費用具體化，為自籌款新台幣 240,000 元整。

前置準備階段費用包含製作整流器、設井作業及牽線工程，本試驗於前置準備階段共製作 1 組變電箱、12 口電極井及電線牽線 1 次，而變電箱花費並不包含於自籌款當中，為 78,000 元整，致前置準備階段及關場階段共花費 318,000 元整；因此為兩年計畫，以 24 個月攤提此費用，致每個月花費為 13,250 元；若將其攤提至每試驗組整治單位土體所需要之花費，計算如表 4 所示。

表 4 單位土體於模場建置階段花費彙整表

Test No.	(1) Cost of preparation (NTD/month)	(2) Volume of soil (3×4×2, m×m×m, m ³)	(3) Cost of unit volume (NTD/unit soil)
T1	13,250	24	552
T2	13,250	24	552
T3	13,250	24	552
T4	13,250	24	552

$$(3)=(1)/(2)$$



5.10.4.2 電極材料費用

本計畫為實場尺度試驗，需製備實場尺度電極，電極種類分為惰性電極及 Fe/Al 氧化電極，兩種電極於購買後須進行公、母螺牙加工，惰性電極購買後可直接使用於實場進行整治，而 Fe/Al 氧化電極需進行電極製備，費用包含鹽酸、氯化鐵及鋁棒成本，其材料費用如表 5 所示，電極製備成本評估如表 6 所示。

表 5 電極材料成本

Item	Unit price (NTD)
Al rod/2.2 cm(d)×30 cm(L)	140/each
Electrode processing	85/each
38% Ferric chloride (FeCl ₃), Industrial grade	15/kg
32% hydrochloric acid, Industrial grade	13/kg

5.10.4.3 操作流質藥劑費用

本計畫實場尺度試驗使用操作流質分為地下水及乳酸，地下水使用現地土壤原有之水分，乳酸則需另外購置且請相關工程公司進行灌藥作業，其材料費用如表 7 所示。

5.10.4.4 電力費用

本計畫實場尺度試驗電力花費如表 8 所示。

模場試驗所需費用包含模場建置及相關材料購置費、電極材料費用、操作流質藥劑費用及電力費用等四項，後進行經濟效益評估，經濟分析評估總表如表 9 所示，由表中可看出電動力成本重點在於前期操作系統建置(T1 及 T2)，若未來使用已建置好之現地系統，可大幅降低建置成本；觀察使用 Fe/Al 氧化電極之試驗組(T3)，若使用氧化電極因須將其製備，使藥劑成本有所提升，但因 T3 試驗組僅規劃一個月之整治時程，使時間攤提成本後較不利其運作，若將整治時間延長，則可以大幅降低電極製備成本；後觀察使用乳酸試驗組(T4)整治成本，約 30% 花費來自於乳酸藥劑，其中約 50% 來自於灌藥成本，與 T3 試驗組相同，因時間因素不利於其整治成本之計算，延長整治時間即可降低操作成本。

5.11 結論、建議與後續工作項目

5.11.1 結論

本計畫以電動力技術於鼓山區清潔隊停車場整治一受重金屬銅、鋅、鉻、

表 6 電極製備成本評估表

Test No.	Processing fluid	Al electrode			Fe/Al oxidation electrode					(9)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Total
		Unit price (NTD/electrode)	Quantity of electrode	Subtotal (NTD)	Unit price (NTD/electrode)	Price of FeCl ₃ (NTD/ electrode)	Price of HCl (NTD/ electrode)	Quantity of electrode	Subtotal (NTD)	cost (NTD)
T1	Ground water									
T2	Ground water	225	72	16,200	-	-	-	-	-	16,200
T4	Lactic acid									
T3	Ground water	225	12	2,700	225	3.06	5.13	60	13,991	16,691

(3)=(1)*(2) ; (8)=(4+5+6)*(7) ; (9)=(3)+(8)

表 7 操作流質成本彙整表

Item	Unit price (NTD)
Underground water	0
Lactic acid	3,700/25 kg
Water wheel	3,500/time

表 8 電力花費彙整表

Test No.	(1) Remediation volume (m ³)	(2) Potential gradient (V/cm)	(3) Duration (days)	(4) Power consumption (kWh)	(5) Total power cost (NTD)	(6) Power cost (NTD/m ³)
T1	24	0.6	28	99	162	6.75
T2	24	1.0	28	164	300	12.5
T3	24	1.0	28	164	300	12.5
T4	24	1.0	28	164	300	12.5

(6)=(5)/(1)

表 9 經濟效益評估總表

Test No.	(1) Electrode	(2) Processing fluid	(3) Duration (days)	(4) Remediation volume (m ³)	(5) Cost of set up (NTD/m ³)	(6) Cost of electrode preparation (NTD/m ³)	(7) Cost of processing fluid (NTD/m ³)	(8) Cost of electric power (NTD/m ³)	(9) Total cost (NTD/m ³)
T1	Al	Ground	28	24	552	225	-	6.8	784
T2	Al	water	28	24	552	225	-	12.5	790
T3	Fe/Al	Ground water	28	24	552	695	-	12.5	1,260
T4	Al	Lactic Acid	28	24	552	225	300	12.5	1,090

(9)=(5)+(6)+(7)+(8)



鎳及鉛污染之土壤，結論如下：

1. 以實驗室尺度電極為樣本，設計且開發出一實場尺度電極，以每 30 公分為一段，前、後設有公、母螺牙以配合現地整治深度予以調整。
2. 完成整治場址電力系統規劃、地電阻量測及工程施作。
3. 完成整治場址蜂巢形區域電極井佈置。
4. 比較電動力 0.6 V/cm(T1)及 1.0 V/cm(T2)試驗組，整治成效分別為銅：-2.92%及 16.70%、鋅：-7.88%及 5.20%、鉻：45.33%及-66.43%、鎳：39.81%及-19.50%、鉛：33.33%及-38.20%，可看出重金屬銅及鋅整治效率有提升，但重金屬鉻、鎳及鉛卻大幅下降，可能由於土壤異質性及地下水土壤水分偏低，使重金屬離子傳輸不易，致其累積於部分土體。
5. 比較電動力以地下水(T2)及乳酸(T4)作為操作流質試驗組，整治成效分別為銅：16.70%及 34.35%、鋅：5.20%及-7.13%、鉻：-66.43%及 1.01%、鎳：-19.50%及-7.36%、鉛：-38.20%及-2.77%，各土壤污染重金屬中僅鋅整治效率微幅下降，其他重金屬整治效果皆有所提升，顯示添加乳酸作為操作流質可明顯提升整治成效。
6. 比較電動力惰性電極(T2)及氧化電極(T3)試驗組，整治成效分別為銅：16.70%及 3.10%、鋅：5.20%及 8.20%、鉻：-66.43%及 20.64%、鎳：-19.50%及 3.80、鉛：-38.20%及-24.00%，其中重金屬鋅於二整治試驗組成果變化較其他重金屬種類低，推測原因為其金屬相態 90%為不易移動之相態(鐵錳氧化態、有機物結合態及殘渣態)，導致金屬離子受環境傳輸不易，致整治成果差異不大，而重金屬銅、鉻、鎳及鉛於可交換態及碳酸鹽結合態佔比稍大，導致傳輸較易，容易遷移或累積。
7. 統計土壤污染重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛經 4 個月整治後累計處理成效為銅：45.5%、鋅：-0.5%、鉻：51.0%、鎳：25.7%及鉛：-17.4%，其中重金屬銅、鉻及鎳整治成效較佳，重金屬鋅可能因前兩相態佔比僅有 10%，與土壤鍵結較強，傳輸移動不易，導致處理成效不彰，重金屬鉛可能因移動較緩慢，累積作用下使其效果較不明顯，若延長整治時間，應可達到較高之處理成效。
8. 比較各試驗組之整治花費情形，使用 0.6 V/cm 電位坡降之惰性電極配合地下水試驗組(T1)，整治單位土體需花費 784 元；使用 1.0 V/cm 電位坡



降之惰性電極配合地下水試驗組(T2)，整治單位土體需花費 788 元；使用 1.0 V/cm 電位坡降之氧化電極配合地下水試驗組(T3)，整治單位土體需花費 1,258 元；使用 1.0 V/cm 電位坡降配合乳酸試驗組(T4)，整治單位土體需花費 1,088 元，其中可看出使用氧化電極試驗組(T3)及乳酸試驗組(T4)整治成本較高，因整治期限之因素，導致其氧化電極及乳酸試劑無法得到攤提，若延長整治時間，應可有效降低整治成本。

9. 本計畫於設井作業時發現地下環境有許多垃圾回填料，甚至有高濃度金屬殘渣，推測來自於過去煉鋼廠或其他垃圾回填料；地下環境之土壤異質性及砂土地質導致透水率過大，無法使土壤保有適當含水率，導致電動力技術於實場整治時效果不彰，來年計畫應作三項改變已提升整治成效，(1)增加電位坡降：因土壤異質性及重金屬離子與土壤結合較緊密(由金屬相態得知)，以致需適量調整電位坡降始提升重金屬離子於環境中移動性；(2)提升乳酸濃度：由 T4 試驗組得知，於地下環境添加乳酸可使重金屬離子於土壤中解離並透過電滲透流有效傳輸至陰極，未來應提升乳酸濃度使重金屬離子更易於傳輸；(3)縱線採點：於進行土壤採樣作業時，盡量於電動力軸線採點，使整治成果更容易彰顯出來。

10. 依申請計畫書之預期工項，已達到期末查核點之計畫進度。

5.11.2 建議

以電動力現地整治技術整治一受重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛污染土壤，經初步四個月整治期間，有以下 3 點建議，以利未來計畫實驗參考：

1. 於考量安全因素及整流器設計參數訂定，整流器設計前應進行地電阻量測，藉由其相關設計數值進行整流器設計。
2. 於電動力電極井設井工作時，若土壤過於鬆軟，應適時使用機具進行夯實作業，以利電極井之設置及後續實驗之進行。
3. 本年度試驗比較電位坡降、操作流質及電極種類等參數，土壤重金屬銅、鉻及鎳整治成效較佳，而重金屬鋅及鉛成效並不明顯，若將整治時間延長、加大電位坡降及提升乳酸濃度，應可將整治效率再提升。

5.11.3 後續工作項目

因本計畫為兩年計畫之第一年計畫，於撰寫期末報告後則繼續撰寫來年申請計畫書，後續工作項目為：



1. 持續執行第一年度(蜂巢形)整治試驗。
2. 撰寫 109 年度申請計畫書。
3. 若明年度計畫通過，則與合作顧問公司商討第二年方型區設井事宜。



第六章 參考文獻

- [1] 土壤及地下水整治網，網址：<https://sgw.epa.gov.tw/public>
- [2] 「105 年度高雄市土壤與地下水污染調查及查證工作計畫」期末報告，高雄市政府，105 年 12 月。
- [3] 「土壤與地下水綠色整治技術發展計畫(105/11~107/8)」期末報告初稿，環保署土基會，107 年 9 月。
- [4] Weng, C. H. and Yuan, C. (2001) Removal of Cr(III) from clay soils by electrokinetics. *Environ. Geochem. Hlth.* 23, 281-285.
- [5] Mendez, E., Perez, M., Romero, O., Beltan, E. D., Castro, S., Corona, J. L., Cuevas, M. C. and Bustos, E. (2012) Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process. *Electrochim. Acta* 30, 148-156.
- [6] Ottosen, L. M. and Christensen, I. V. (2012) Electrokinetic desalination of sandstones for NaCl removal-test of different clay poultices at the electrodes. *Electrochim. Acta* 86, 192-202.
- [7] Tanaka, S., Nakata, Y., Kimura, Yustiawati, T., Kawasaki, M., Kuramits, H. (2002) Electrochemical decomposition of bisphenol A using Pt/Ti and SnO₂/Ti anodes. *J. Appl. Electrochem.*, 32, 197-201.
- [8] Kuramitz, H., Matsushita, M. and Tanaka, S. (2004) Electrochemical removal of bisphenol A based on the anodic polymerization using a column type carbon fiber electrode. *Water Res.* 38, 2331–2338.
- [9] Park, J. Y., Kim, S. J., Lee, Y. J., Baek, K. and Yang, J. W. (2005) EK-Fenton process for removal of phenanthrene in a two dimensional soil system. *Eng. Geol.* 77,217-224.
- [10] Alcantara, T., Pazos, M., Gouveia, S., Cameselle, C., Sanroman, M. A. and Aaron J. J. (2008) Remediation of phenanthrene from contaminated kaolinite by electroremediation-Fenton technology. *J Environ. Sci. Health. A* 43,901-906.
- [11] Tsai, T. T., Sah, J. and Kao, C. M. (2010) Application of iron electrode corrosion



- enhanced electrokinetic-Fenton oxidation to remediate diesel contaminated soils: a laboratory feasibility study. *J. Hydrol.* 380, 4-13.
- [12] Polcaro, A. M., Vacca, A., Mascia, M. and Palmas, S. (2007) Electrokinetic removal of 2,6-dichlorophenol and diuron from kaolinite and humic acid-clay system. *J. Hazard Mater.* 148, 505-512.
- [13] Lien, H. L. and Zhang, W. (2005) Hydrodechlorination of Chlorinated Ethanes by Nanoscale Pd/Fe bimetallic Particles. *J. Environ. Eng.* 131, 4-10.
- [14] Yang, G. C. C. and Liu, C. Y. (2001) Remediation of TCE contaminated soils by in situ EK Fenton process. *J. Hazard Mater.* 85, 317-331.
- [15] Yang, C. C. and Chang, D. G. (2006) Degradation of Trichloroethylene in the Subsurface by Nanoscale Bimetallic Pd/Fe Slurry Under an Electric Field. *J. Environ. Sci. Heal. A*, 40-47.
- [16] Yang, M. X., Sarkar, S. and Bent, B. E. (1997) Degradation of multiply-chlorinated hydrocarbons on Cu(100). *Langmuir* 13, 229-242.
- [17] Lien, H. L. and Zhang, W. (2002) Enhanced dehalogenation of halogenated methanes by bimetallic Cu/Al. *Chemosphere* 49, 371-378.
- [18] Chen, L. H., Huang, C. C. and Lien, H. L. (2008) Bimetallic iron–aluminum particles for dechlorination of carbon tetrachloride. *Chemosphere* 73, 692-697.
- [19] Risco, C., Rodrigo, S., Vizcaíno, R. L., Yustres, A., Saez, C., Cañizares, P., Navarro, V. and Rodrigo, M. A. (2016) Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic soil flushing with linear rows of electrodes. *Chem. Eng. J.* 294, 65-72.
- [20] Cuevas, O., Herrada, R. A., Corona, J. L., Olvera, M. G., Sepúlveda-Guzmán, S., Siré, I. and Bustos, E. (2016) Assessment of IrO₂-Ta₂O₅/Ti electrodes for the electrokinetic treatment of hydrocarbon-contaminated soil using different electrode arrays. *Electrochim. Acta.* 208, 282-287.
- [21] López-Vizcaíno, R., Navarro, V., León, M. J., Risco, C., Rodrigo, M. A., Sáez, C. and Cañizares, P. (2016) Scale-up on electrokinetic remediation: Engineering and technological parameters. *J. Hazard. Mater.* 315, 135-143.



- [22]Vocciante, M., Caretta, A., Bua, L., Bagatin, R. and Ferro, S. (2016) Enhancements in ElectroKinetic Remediation Technology: Environmental assessment in comparison with other configurations and consolidated solutions. *Chem. Eng. J.* 289, 123-134.
- [23]Kim, D. H., Jo, S. U., Choi, J. H., Yang, J. and Baek, S.K. (2012) Hexagonal two dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study. *Chem. Eng. J.* 198-199, 110-121.
- [24]Vieira dos Santos, E., Souza, F., Saez, C., Canizares, P., Lanza, M. R. V., Martinez-Huitle, C. A. and Rodrigo, M. A. (2016) Application of electrokinetic soil flushing to four herbicides: A comparison. *Chemosphere*. 153 (2016) 205-211.
- [25]Risco, C., Rubí-Juárez, H., Rodrigo, S., Vizcaíno, R. L., Saez, C., Cañizares, P., Barrera-Díaz, C., Navarro, V. and Rodrigo, M. A. (2016) Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic fences. *Sep. Purif. Technol.* 167, 55-62.
- [26]Tang, J., He, J., Liu T., Xin, X. and Hu, H. (2017) Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment. *Chemosphere*. 189, 599-608.
- [27]Park, S., Park, G., Kim, D., Yang, J. and Baek, K. (2010) Electrokinetic separation of heavy metals from wastewater treatment sludge. *Sep. Sci. Technol* 45, 1,982-1,987.