

電動力處理重金屬污染土壤

Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil by Electrokinetic Treatment

國立台灣大學生物環境
系統工程研究所
博士生

張博文

Po-Wen Chang

國立台灣大學生物環境系統
工程系教授暨國立台灣大學
水工試驗所特約研究員

譚義績

Yih-Chi Tan

森康工程顧問股份有限公司
總工程師

王奕森

I-Sen Wang

中國石油公司探採研究所研究員

林舜隆

Shuen-Long Lin

蘭陽技術學院土木工程系講師

洪堅仁

Chien-Jen Hung

摘要

本現場模場試驗主要為應用電動力法移除土壤中之重金屬，並探討當土壤遭受多種重金屬的衝擊時，各重金屬在電場下之移除效率評估。本試驗結果發現重金屬之移除效率與該金屬之氧化電位，離子形態，土壤的吸附容量，處理液之酸度及電場強度有直接的關係。電動力法藉由電滲透、電泳及電解等作用配合土壤化性的改善，證實能對土壤中有毒重金屬，如鉛、鎘及鉻等之有效移除。本試驗結果指出鉛、鎘及鉻之移除率分別為 56.45%，21.89%及 14.95%，且在適當的操作環境下，電動力法處理可為受重金屬污染土壤全面復育時整治工作規劃與設計之依據。

關鍵詞：現場模場試驗，電動力，重金屬，整治。

ABSTRACT

This pilot test is to demonstrate the applicability of electrokinetic treatment on heavy metals removal, and also to evaluate the removal efficiency of individual metal when the impacted soil contains multiple species of heavy metals. As a result of the trial, it is found that the removal efficiency of heavy metals is affected by the redox potential, ionic form, sorption capacity to the soil, acidity of solution used in the treatment, and

electricity density. Use of electro-osmosis, electrophoresis and electrolysis induced by electrokinetic, the treatment is identified to be an effective method to remove toxic metals as lead (Pb), cadmium (Cd), and chromium (Cr) with a slight improvement on chemical properties of soil. This trial results in the removal rates of 56.45%, 21.89% and 14.95% for Pb, Cd and Cr, respectively. The trial result can be used as a base for remedial design and planning for a full-scale soil cleanup of heavy metals.

Keywords: Pilot test, Electrokinetic, Heavy metals, Remediation.

一、前言

工業的發展與經濟的發達，伴隨著各種環境污染源亦同時衍生，由於地下環境常常是各種污染物傳輸的歸宿，因此，在許多處置不當的廢水、廢棄物及空氣污染下，土壤及地下水終致成爲污染承受者；任何工業、農業等經濟行爲其生產製造過程中所產生之空氣、水、廢棄物、毒性物質的各類污染物均可能藉由環境媒介傳輸至土壤與地下水，造成土壤與地下水中流散各種污染物質。由於土壤與地下水具互相影響之特性，且其污染過程具有長期性、大規模性與不易察覺等特徵，一旦土壤或地下水遭受污染時，其任後復育工作便顯的相當棘手，且所需之花費亦極爲龐大且曠日耗時[1~4]。

土壤本身具有物理或化學性質的吸附能力，可緩衝污染物所造成的危害，由於土壤自身會進行氧化還原作用及微生物分解作用(統稱爲土壤自淨作用)，因此可降低自然生態系統被污染的風險。然而，當污染超過自淨作用負荷之時，即產生土壤污染之刻。某些電鍍工業廢水中所含的鉛、鎳等重金屬若進入到土壤中，則會沉積在作物上，並經由食物鏈(Food chain)進入動物體，等到累積一定限量後，就會產生中毒現象。在農作方面，若是使用被污染過的水灌溉，則會使土壤中的有機質和鉀增加，磷和 pH 值降低，而造成作物結實不佳，多病蟲害等問題；在農藥與肥料使用方面，若是採用含砷農藥而不當流進土壤，再經由生物鏈濃縮而進入動物體後，則會造成疾病等不良影響，再者，雖然肥料大部分爲無機鹽類，可溶於土壤中，但使用過多會造成土壤

酸化，並影響到農作物的生長。

對於國內土壤污染情形，可從土壤污染調查與曾發生之污染個案兩方面來瞭解。根據行政院環境保護署(Environmental Protection Administration, EPA)的資料顯示，台灣地區土壤因廢水而導致的污染約占 80%，因空氣落塵造成之污染約占 13%，其餘的污染源可能爲廢棄物、農藥、肥料、酸雨等。而在台灣地區農田土壤調查顯示台灣地區目前農田粗估約有超過五萬公頃以上遭受重金屬污染，主要污染途徑應爲工業廢水造成灌溉水污染；而重金屬含量偏高地區約占總調查面積的 5.7%。雖然如此，台灣的土壤污染問題並沒有受到大眾的注目，直到前幾年，在桃園縣內的工廠因排放含鎘廢水至灌溉渠道中而引發的鎘米事件，才喚起了民眾對土壤污染的一些重視。這個問題發生了許多年，由於未能立即處理這些被污染的土壤，不僅使當地的農民遭受極大的損失，也使當地民眾承擔了極大的環境風險。雖然地方政府有意將此區域更改爲工業住宅用地，但因污染問題尚未有效解決，而遭中央機關反對，卻引發當地農民強行復耕的行動。然而經過數年後，在此地區所種植出來的農作物其重金屬含量仍和數年前一樣，並沒有隨著時間而降低至標準含量。

然而，美日等先進國家早已針對上述各類型的土壤污染問題積極立法，例如日本於 1970 年針對農地訂定「農地土壤污染防治法」規範農地土壤污染的問題；又美國國會於 1980 年制定"全面環境對策、賠償暨責任法"(簡稱"CERCLA"或"Superfund"法案)，據以籌措資金供政府整治因工

業發展與化學生產所留下的有害廢棄物棄置場址，並對仍在運作之操作者所造成之土壤污染問題則依 1976 年通過“資源保育回收法”(RCRA)，要求業者擔負土壤整治之責。

藉此，政府基於國內土壤及地下水污染問題日益嚴重，且為了遏止土壤品質持續惡化，已於民國八十九年二月公布施行「土壤及地下水污染整治法」，冀望能規範出土壤污染預防、污染管制與污染整治等工作，以建立起國內環境保護的完整架構，使得我國的環境保護里程邁入一個新紀元，因而在未來，除了對土壤及地下水的污染行為加強約制防範之外，對於已遭受污染的土壤，開發尋求一個既經濟又有效的整治技術將是一個不容忽視的課題。

本研究將利用電動力整治技術(Electrokinetic remediation technology)針對已遭受多種重金屬污染的農地土壤進行現地模場試驗(Pilot test)，以瞭解各重金屬在電動力作用下之移除效率，冀求能建立一套適當的土壤污染現場整治技術，俾使爾後對相關的重金屬土壤整治技術有所助益。

二、電動力理論

應用電化學方式來處理土壤中重金屬為一極具潛力的去除方法。當土壤試體通電後，陰陽兩極會進行氧化還原反應而產生 H^+ 與 OH^- 。 H^+ 在電場作用下進入土壤試體，往陰極流動，在流經土壤的過程中，將吸附於土壤表面的鎘及鉛離子置換到孔隙流體中，再藉由電滲透效應流出土壤試體，達到去除土壤中重金屬的目的。電滲透流的流向主要決定於環境的 pH 值，pH 值較高的環境下產生的電滲透流為往陰極方向；在 pH 值較低的環境下則往陽極方向流動。

重金屬污染物一般多經由廢水、廢棄物、降雨、落塵以及農業生產資源之施用而進入土壤。其在土壤中之行為包括了與土壤中溶液之水解或錯合反應，土壤固液界面之吸附作用與離子交換、沉澱與溶解作用、氧化還原作用、在土壤中之移動及被植物吸收等，茲將分別概述之[1~5]：

(一) 水解或錯合作用



Me^{n+} ：為重金屬離子

重金屬水解反應之大小與其水解平衡常數之 pk 值有關，pk 值愈小其愈不易水解[1~4]。

(二) 離子交換與吸附作用

此乃因土壤之帶電膠體吸附重金屬，同時亦因重金屬本身之離子交換性強弱而產生離子間之互換作用。一般而言，土壤對金屬離子之吸附選擇性依土壤種類之不同而改變，例如，蒙特石對金屬之吸附選擇為 $Ca > Pb > Cu > Mg > Cd > Zn$ ，而伊萊石則 $Pb > Cu > Zn > Ca > Cd > Mg$ ；而較大、價數較高之金屬離子，對於土壤粒子有相對較強的吸附性，意即要將其自土壤中脫附愈困難[1~5]。

(三) 沉澱與溶解作用

重金屬污染物在原形態中可能是以離子態存在，當其進入土壤相系後成為土壤孔隙溶液之一部份，其可能和原存在於土壤溶液中之離子作用形成難溶性鹽之沉澱，而沉澱與溶解反應之發生，決定於難溶性離子之溶解度積和土壤溶液之離子積(Ksp)。當土壤中離子積大於溶解度積時，則難溶性鹽發生沉澱，反之發生溶解[1~4]。

(四) 氧化還原作用

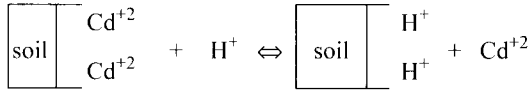
土壤之氧化還原電位將影響重金屬之存在狀態，一般而言，土壤為氧化條件時，則重金屬偏好以氧化狀態存在，反之偏好以還原狀態存在[1~4]。

本研究於台灣中部某個受鉛、鎘、鉻三種重金屬污染之農地場址進行現場移土的電動力整治模場試驗(pilot test)。研究試驗中，試圖藉電動力反應機制，由電場驅動均勻的淋洗作用，使吸附於土壤中的重金屬從土壤粒子表面脫附，並利用電場力量將脫附之游離態重金屬離子加速汲出；其中整治試驗主要的程序有：

(1) 重金屬之脫附 (Heavy metal desorption)

此步驟乃著重在將吸附於土壤中之重金屬

或沉澱之難溶性重金屬鹽予以溶解、脫附，使之成為游離狀態釋放於土壤孔隙流體中。一般而言，土壤之酸度與氧化還原電位直接影響重金屬脫附之行爲，而此行爲可稱為土壤交換作用(Soil Exchange)，亦即利用酸將土壤表面吸附之各種重金屬置換出來，其過程可由下列表示式之 [1~5]：



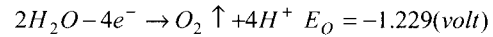
本試驗中以檸檬酸(Citric acid)為螯合劑，並配合胺基磺酸，以達到降低土壤 pH 值，俾利重金屬脫附並與螯合劑作用溶於土壤溶液中。

電動力土壤污染整治/復育技術是近年來所發展的一種有效且經濟的土壤污染整治/復育處理方法，此處理技術即是在土壤污染場址以電極對(Electrode pairs)建立化學電場，並藉由該電場作為孔隙中流體流動的驅動力。在處理過程中，此系統會產生若干反應，其中較主要者可分為二部分的反應：(1)因施加電位而產生的反應，例如：電滲透(Electroosmosis)、離子遷移(Ionic migration)、水的電解(Electrolysis of water)、電泳(Electrophoresis)、在陰極的電沈積反應(Electrodeposition at the cathode)；(2)不論施加電位與否均會產生的反應，例如：吸附/脫附(Sorption/ desorption)錯合/沉澱(Complexation/precipitation)、酸鹼反應(acid-base reactions)、擴散(diffusion) [5~11]。

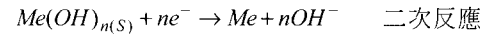
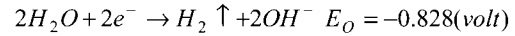
根據研究文獻，在一土壤多孔介質中，施加適當的直流電場，則在系統中將產生幾個重要的反應[6~31]：

1. 在電極處將由於電流的作用，發生水的電解反應；即在陽極失去電子、產生氧化反應生成氫離子，以致陽極區形成低 pH 層；陰極則獲得電子，產生還原反應生成氫氧根離子，以形成陰極區的高 pH 層；伴隨著持續的反應，該 pH 的差異變化將更加極端；而存在物種及其濃度的改變，系統亦將可能發生電極上的二次反應 [6~31]：

陽極：



陰極：



2. 在陽極區形成的酸鋒將藉由一些質傳機制越過土樣基質朝陰極區延伸擴展，其依恃的動力包括[6~31]：

- (1)由於電滲透流所引導的孔隙流體流動。
- (2)由於任何的水力位差所引導的孔隙流體流動。
- (3)化學物質濃度梯度所形成之擴散流。
- (4)因電位梯度所形成之離子遷移。

3. 電場中的離子遷移、擴散作用、液體傳流將造成陰離子與陽離子及其他化學物質在多孔介質中分別向兩電極區移動；該三個傳流作用亦是在系統中化學物質傳輸的主要質流動力 [6~31]。

(a)因電位梯度所形成之離子遷移：

$$J_{mig} = C_i \cdot \nabla(-E) \frac{D_i^* \cdot Z_i \cdot F}{RT} \dots\dots\dots(1)$$

上式中， C_i 是在土壤中 i 物質之濃度， $\nabla(-E)$ 為電位梯度， D_i^* 是有效擴散係數(Effective diffusion coefficient)， Z_i 為原子價數、 F 為法拉第常數、 R 為理想氣體常數、 T 為絕對溫度[6,7,10,11]。

(b)化學物質濃度梯度所形成之擴散流：

$$J_{diff} = D_i^* \cdot \nabla(-C_i) \dots\dots\dots(2)$$

式中， $\nabla(C_i)$ 是在土壤管柱中的 i 物質之濃度梯度[6,7,10,11]。

(c)電滲透流所引導的孔隙流體流動：

$$Q_e = \frac{\xi \cdot D \cdot q}{4\eta} \cdot \frac{E}{L} \cdot A \dots\dots\dots(3)$$

式中， ξ 表示 Zeta 電位(Zeta potential)、 D 為流體的介電常數、 L 為分析管柱長度， η 代表流體的黏滯係數、 E 為電位，土壤管柱截面積為 A ， q 為與孔隙度和流體流過孔隙

空間截面積相關的經驗因子[6,7]。

4. 酸鋒(Acid front)發展延伸進入土樣後，會和原本吸附在土壤粒子擴散雙層中的陽離子產生離子交換作用，以釋出陽離子，致使這些陽離子進入孔隙流體中，並藉擴散作用及流體傳流向陰極移動[6,7,26,30]。

三、材料與方法

(一) 試驗場址

行政院環境保護署為保證民眾食用農作物的安全，自今年開始針對過去既有污染紀錄及部分縣市其他有重金屬污染之虞的 319 公頃農地進行細部調查，調查結果顯示超過土壤污染管制標準遭受污染的農地約有 254.45 公頃，佔調查面積的 79.76%，共分布於全台 12 縣市，其中以彰化縣佔最多數，共約 184.14 公頃，佔總污染面積的 72.94%；其餘依次為新竹市、桃園縣、屏東縣、台中縣、高雄縣、台南縣、台南市、台北縣、苗栗縣、南投縣、台中市，由此可知台灣西部農地正飽受重金屬嚴重威脅，詳細農地污染面積如表 1 所示。

本研究乃於台灣中部之彰化縣選擇某一曾長期遭受重金屬污染之原種植稻米現已休耕之農地，進行現地移土的電動力整治模場試驗，研究階段之模場試驗共進行 20 天，操作上主要係以檸檬酸與生物可分解性界面活性劑調製成處理液，藉由電場驅動淋洗作用，使吸附於土壤中的重金屬從土壤顆粒表面脫附，並利用電場力量將脫附之游離重金屬離子加速汲出收集於處理槽底部側邊之滲漏液收集槽中。

(二) 處理槽設置

本研究於試驗場址現場設置電動力處理槽，設置前須先去除農地上原有之雜草及粗大雜質，並刮出自地表以下約 30 公分厚之表土及裡土（重金屬含量較高之土壤層），其總重量約 15~20 公噸，並將其堆置於處理槽旁之空地以塑膠布覆蓋。處理槽尺寸為長 3 公尺寬 3 公尺，並於處理槽底層鋪設高密度聚乙烯(HDPE)材質之不透水布，以隔絕處理滲漏液滲入下層土層，避

表 1 全國三一九公頃疑似重金屬污染農地調查結果表

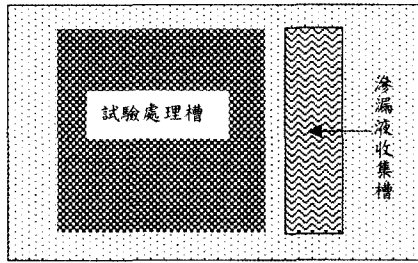
縣市別	污染面積(ha)	百分比(%)
彰化縣	184.14	72.94
新竹市	27.54	10.91
桃園縣	11.46	4.54
屏東縣	6.9	2.73
台中縣	6.34	2.51
高雄縣	6.02	2.39
台南縣	5.33	2.11
台南市	1.86	0.74
台北縣	1.62	0.64
苗栗縣	0.55	0.22
南投縣	0.39	0.15
台中市	0.3	0.12
總計	252.45	100.00

資料來源：行政院環境保護署(www.epa.gov.tw)

免深層土壤及地下水遭受二次污染，其上再鋪設約 10 公分之大理石碎石襯底以利導排，再等距放置六根陰極電極棒於大理石碎石襯底之上，此乃避免因陰極電極棒直接與不透水布接觸，然後再堆置待處理之污染土壤與六根陽極電極棒，六對陰陽極電極棒間隔約 50 公分，處理槽旁備有長 3 公尺寬 1 公尺專用滲漏液收集槽，收集處理槽處理後之滲漏液；另於處理槽之電極對分別連接一電源配置箱與電力供應器，以方便各種不同組合之控制與操作，待設置完成後於處理槽上鋪設塑膠布，以避免雨水滲入，處理槽之現場配置如圖 1 所示。

(三) 試驗操作條件

本試驗進行主要處理液以食品級檸檬酸為主，隨後將檸檬酸加自來水及生物可分解性界面活性劑配製成重量濃度約 5% 之處理溶液，其平均 pH 約在 2.94~4.2 之間，電導度約 3000 μ s/cm。每日分兩次各噴灑處理液約 50 公升於待處理土壤表面上，每日共添加 100 公升處理液於處理槽。初始操作電流控制在 10 安培上下，並於操作期程於 17 日後控制電流在 5 安培上下，觀察其電壓則隨著操作時間增加而不斷下降，直至 17



處理槽配置平面圖

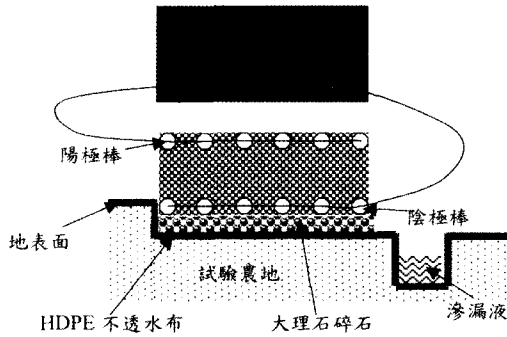


圖 1 現地處理槽配置圖

日後其電壓則保持在 8 伏特上下，操作過程之電流及電壓變化詳如圖 2 所示。

(四) 採樣方式與頻率

針對試驗槽土壤分別於上層(表面下 0~15 公分)、中層(表面下 15~35 公分)、下層(表面下 35~50 公分)等三處，以採樣管採集土壤樣品於實驗室進行化驗，以觀察不同深度重金屬之處理情形並瞭解重金屬離子之遷移方向；處理槽之每一深度採樣至少隨機採取 5~10 個點的土樣，並將之均勻混合成一個樣品送至實驗室進行檢驗，本試驗共採樣分析 3 次，其間採樣的週期頻率約間隔 10 日。

(五) 土壤性質

由採樣管採取土壤樣品於實驗室進行化驗，以瞭解試驗土壤之物化性質。土壤樣品經篩分析及比重計分析可得試驗土壤組成分別砂佔 25.5%、坩土佔 64.3%、黏土佔 10.2%，經比對美國農業部(U.S. Department of Agriculture,

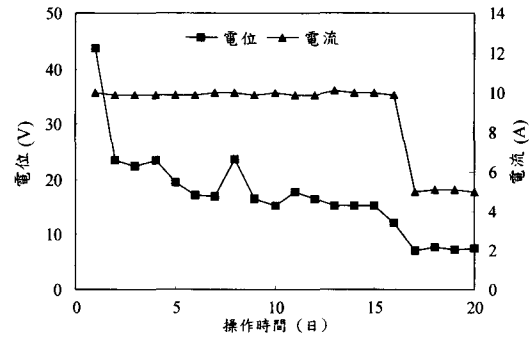


圖 2 操作過程電流及電位變化圖

表 2 試驗土壤基本性質

基本性質	試驗土壤
砂(sand)	25.5%
坩土(silt)	64.3%
黏土(clay)	10.2%
土壤分類	坩質壤土(silt loam)
pH	6.70
比重	2.59
電導度(EC)	0.48dS/m
陽離子交換容量(CEC)	18.0 C mol/kg
0.1M 鹽酸萃取法鉛含量	25.47mg/kg
0.1M 鹽酸萃取法鎘含量	2.36mg/kg
0.1M 鹽酸萃取法鉻含量	40.61mg/kg
王水消化法鉛含量	76.02mg/kg
王水消化法鎘含量	4.13mg/kg
王水消化法鉻含量	509.58mg/kg

USDA)土壤分類法結果試驗土樣屬坩質壤土(silt loam)，另經比重分析可得試驗土壤比重(specific gravity)為 2.59；在化學性質方面試驗土壤之酸鹼值為 6.7，屬微弱酸性土壤，其陽離子交換容量(CEC)為 18.0 C mol/kg。而試驗土壤經 0.1M 鹽酸萃取法分析重金屬含量可得鉛含量為 25.47mg/kg、鎘含量為 2.36mg/kg、鉻含量為 40.61mg/kg；再以王水消化法分析試驗土壤鉛、鎘、鉻含量，分別為 76.02mg/kg、4.13mg/kg、509.58mg/kg，試驗土壤基本性質詳如表 2 所示。

四、結果與討論

(一) 土壤酸鹼值

由於在試驗過程中每日皆噴灑約 100 公升

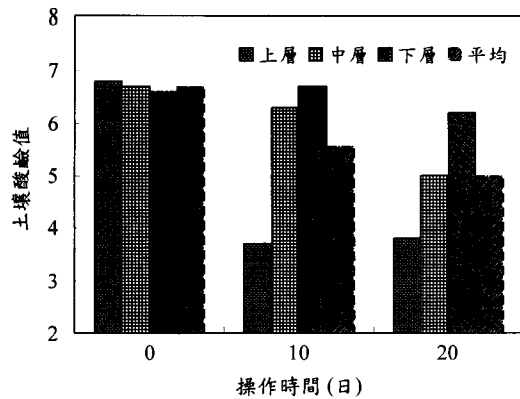


圖 3 土壤酸鹼值變化圖

之檸檬酸(pH 約 2.94~4.2、EC 約 3000 μ S/cm)與生物可分解性界面活性劑混合之處理液於待處理土壤表面上，經過 20 天電動力處理後，待處理土壤之酸鹼值已有了些許變化，而從試驗結果可觀察出，試驗土壤中之酸鹼值有逐漸降低的趨勢，亦即有酸化現象，此將有助於重金屬脫附於處理液中。而其中又以上層土壤之酸鹼值變化較為顯著，總計約減少了 44%；然中層土壤之酸鹼值變化亦有隨操作時間增加而逐漸降低，共約減少了 25%；下層土壤之酸鹼值變化可說是最小的，僅減少了 6%，此與處理液經重力及電動力作用從上層流至下層有關，且底層之大理石碎石襯底亦為鹼性物質，都可能影響下層土壤酸鹼值的降低程度。至於整體試驗結果顯示土壤平均酸鹼值略呈下降趨勢，其整體平均值降低了 1~2，土壤之酸鹼值約為 5~6，降低約 25%，土壤酸鹼值與操作時間變化情形詳如圖 3 所示。

(二) 鉛濃度

經由電動力法處理污染土壤 20 日後，重金屬可由土壤表面脫附而出，導致土壤重金屬含量減少，藉由採集現地試驗土壤於實驗室分別以 HCL 萃取法及王水消化法進行鉛濃度分析，圖 4 為以 HCL 萃取法分析土壤中鉛濃度與操作時間之變化情形，由圖中可得知，隨著操作時間的增加鉛濃度卻呈現遞減現象，表示電動力法確能脫附重金屬，以降低土壤重金屬含量。另各層鉛濃度變化則以上層之變化較大，中層次之，下層最

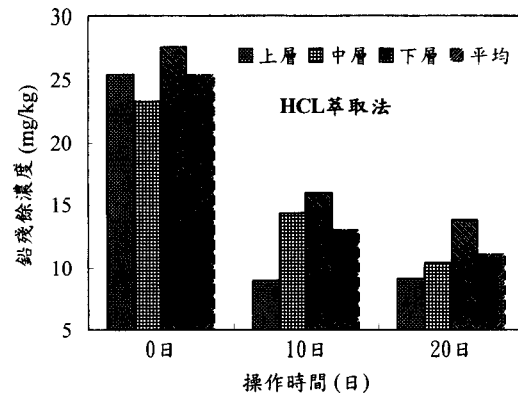


圖 4 鉛濃度變化圖(HCL 萃取法)

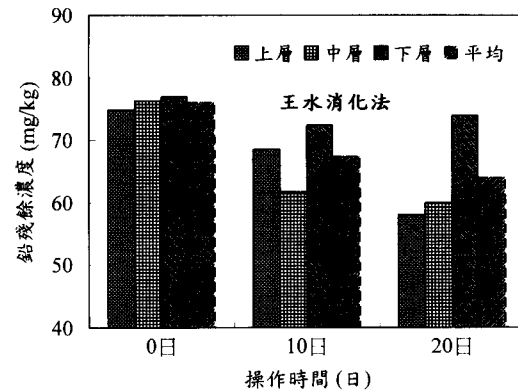


圖 5 鉛濃度變化圖(王水消化法)

小，此乃與鉛離子大部份以正價離子狀態往下層陰極遷移有關，其整體平均殘餘濃度由 25.47mg/kg 降至 11.09mg/kg，減少了 14.38 mg/kg，呈現明顯下降趨勢，而此與土壤中之酸鹼值亦有相同之變化趨勢。若以王水消化法進行鉛濃度分析不難發現其鉛濃度變化亦以上層之變化較大，中層次之，下層最小，且平均濃度由 76.02mg/kg 降至 63.99mg/kg，移除了 12.03 mg/kg，亦呈明顯下降趨勢，此與 HCL 萃取法分析相當，以王水消化法分析土壤中鉛濃度與操作時間之變化情形詳如圖 5 所示。

(三) 鎘濃度

圖 6 為以 HCL 萃取法分析土壤中鎘濃度與操作時間之變化情形，由圖中可得知，隨著操作時間的增加鎘濃度呈現遞減現象，表示電動力法

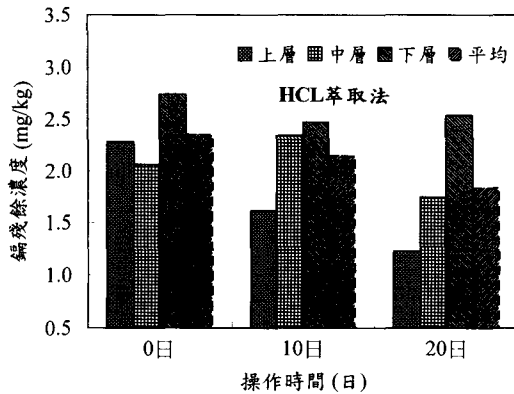


圖 6 鎘濃度變化圖(HCL 萃取法)

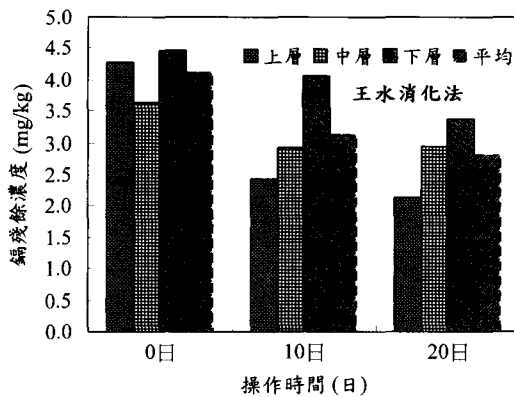


圖 7 鎘濃度變化圖(王水消化法)

確能脫附鎘，以降低土壤鎘含量，另各層鎘濃度變化則以上層之變化較大，中層次之，下層最小，此乃與鎘離子大部份以正價離子狀態往下層陰極遷移有關，其整體平均殘餘濃度由 2.36mg/kg 降至 1.84mg/kg，減少 0.52 mg/kg，呈現下降趨勢，此證明鎘可由土壤表面脫附而出，而此與鉛濃度有相同之變化趨勢。若以王水消化法進行鎘濃度分析不難發現其鎘濃度變化亦以上層之變化較大，中層次之，下層最小，且平均殘餘濃度由 4.13mg/kg 降至 2.82mg/kg，減少 1.31mg/kg，以王水消化法分析土壤中鎘濃度與操作時間之變化情形詳如圖 7 所示。

(四) 鉻濃度

圖 8 為以 HCL 萃取法分析土壤中鉻濃度與操作時間之變化情形，由圖中可得知，隨著操作

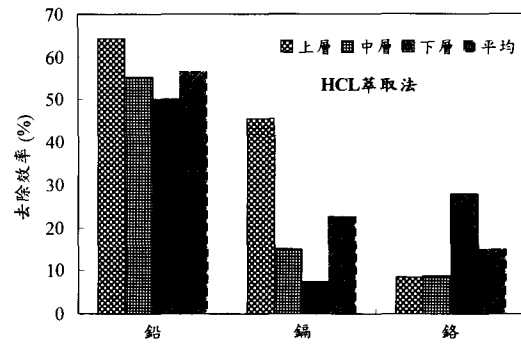


圖 8 鉻濃度變化圖(HCL 萃取法)

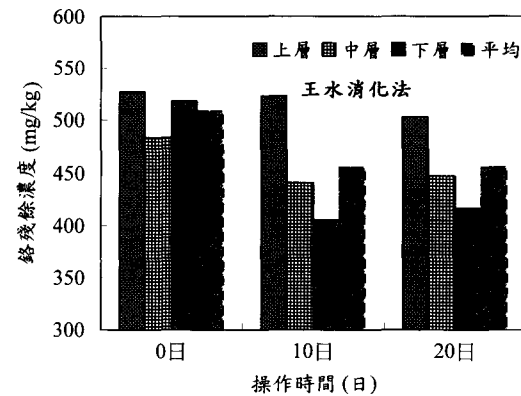


圖 9 鉻濃度變化圖(王水消化法)

時間的增加鉻濃度呈現遞減現象，各層鉻濃度變化則以下層之變化較大，中層次之，上層最小，此與鉛及鎘之濃度變化剛好相反，除了與鉻之氧化電位為此三種重金屬最低有關，另因鉻於土中形成重鉻酸根($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)與鉻酸根(CrO_4^{2-})型態存在，此陰離子多往陽極亦即土堆之表面聚集，較不易移除，其整體平均濃度由 40.61mg/kg 降至 34.73mg/kg，減少了 5.88 mg/kg。若以王水消化法進行鉻濃度分析可得其變化與 HCL 萃取法分析相同，亦以下層變化較大，中層變化次之，上層變化最小，且平均殘餘濃度 509.58mg/kg 降至 455.54mg/kg，減少了 54.04mg/kg，此與其以負離子型態存在有關，以王水消化法分析土壤中鉻濃度與操作時間之變化情形詳如圖 9 所示。

(五) 重金屬移除率

經由 20 日之電動力處理後各重金屬之移除

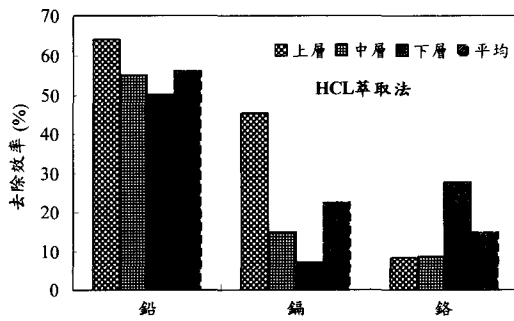


圖 10 重金屬去除效率分析圖(HCL 萃取法)

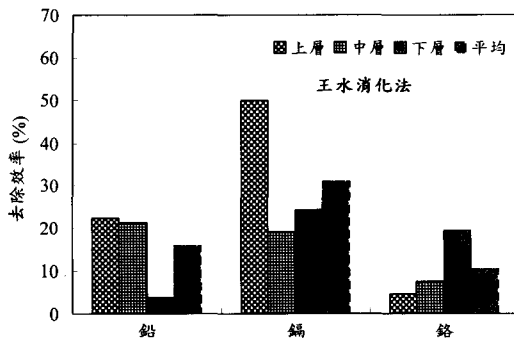


圖 11 重金屬去除效率分析圖(王水消化法)

率如圖 10 及圖 11 所示，由圖 10 中顯示在 HCL 萃取法分析中以鉛之平均移除率較高，鎘之平均移除率次之，而以鉻之平均移除率最低，分別為 56.6%、22.65%、14.95%，其中鉛與鎘之各層移除率皆以上層較高，分別達 64.32%、45.61%，均較其平均值高出許多，而鉻各層之移除率則以下層較高，為 27.7%，此與其離子帶負性有關。

而在王水消化法中以鎘之平均移除率較高，鉛之平均移除率次之，亦以鉻之平均移除率最低，分別為 31.17%、15.9%、10.57%，其中鎘與鉛之各層移除率皆以上層較高，分別為 49.88%、22.4%，而鉻各層之移除率則以下層較高，為 19.63%，此乃因鉻在電動力土壤整治系統中，部分之金屬結合型態多呈陰離子狀態所致。

探究其移除率偏低之原因，除與處理時間僅 20 日較為短暫有關外，並與該金屬之氧化電位、離子形態、土壤的吸附容量、處理液之酸度與添加量及電場強度有直接的關係。未來在處理時，

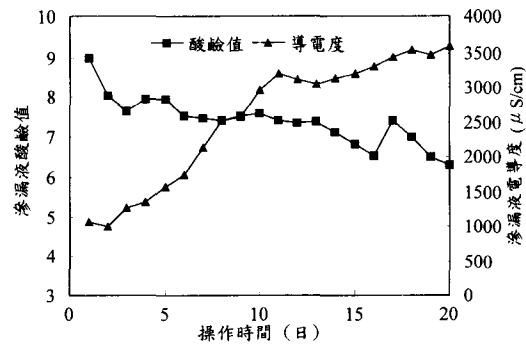


圖 12 滲漏液酸鹼值與電導度變化圖

應將處理時間加長、增加處理液之酸度與添加量及電場強度，並提昇其氧化還原電位。

(六) 滲漏液

經由電動力整治受重金屬污染土壤其利用電解反應、離子交換、氧化還原等作用後已能有效將污染土壤之重金屬脫附於處理液中，進而以滲漏液形態收集於滲漏液收集槽中，並以酸鹼度計及導電度計測定滲漏液之酸鹼值與電導度變化如圖 12 所示，在操作過程中酸鹼值呈現下降趨勢，由 9 降至 6.28，減少了 2.72，此與土壤中之酸鹼值變化一致，呈現逐漸酸化現象；而電導度由 1072μS/cm 增至 3590μS/cm，增加了 2518μS/cm，顯示在電場作用下電導度亦不斷提昇，此些現象皆有助於重金屬之移除。

五、結 論

1. 電動力土壤重金屬處理系統、操作方法及程序規劃，乃利用電動力法中之電泳、電滲透、電解及離子交換作用配合適當的電解液調製，將土壤中之重金屬脫附並回收。比較本研究中，由於土壤中所含重金屬種類繁多，且濃度不一，故其處理流程必須藉試驗中所發生的種種現象，經判斷後適時修正，以期尋找出一可行的處理流程，永久去除土壤中之有害重金屬。本試驗中，根據分析現場操作結果評估，該試驗區塊之重金屬處理流程乃應著重在酸度的控制，配合適當的脫附劑量添加及氧化電位補強。

2. 比較三種重金屬之移除率可發現，鉛去除率56.6%為最高，其次為鎘22.65%與鉻14.95%。此與污染物之遷移方向有關，若處理正電離子(鉛、鎘)可採陽極在上陰極在下之電極對處理，反之，處理負電離子(鉻)可採陰極在上陽極在下之電極對配置處理。另此結果與三種重金屬之氧化電位成一正比關係，此同時亦證實了氧化電位愈高愈易氧化，相對的愈易移除於土壤中。
3. 在本研究試驗場址中，鉻雖然是這三種重金屬初始質含量最高者，但移除率卻是最低，此除了與鉻之氧化電位為此三種重金屬最低有關，另外因鉻於土中形成重鉻酸根($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)與鉻酸根(CrO_4^{2-})型態存在，此陰離子多往正極亦即土堆之表面聚集，較不易移除。
4. 本試驗結果指出電動力法能同時處理受鎘、鉛及鉻污染土壤，尤其適合於低傳導係數之土壤，且在適當的操作環境下，電動力法處理可為全面整治時之整治工作規劃與設計依據。

參考文獻

1. 王一雄，「土壤環境污染與農藥」，明文書局，(1997)。
2. Donald L. Sparks 著，王明光譯，「環境土壤化學」，五南書局，(2000)。
3. Hinrich L. Bohn, Brian L. McNeal, George A. O'Connor 著；洪崑煌主譯；王明光等合譯，「土壤化學」，國立編譯館，(1996)。
4. Murray B. McBride 著；王明光譯，「土壤環境化學」，國立編譯館，(1997)。
5. 田福助，「電化學」，五洲書局，(1982)。
6. Acar Y.B., Gale R.J., Alshawabkeh A.N., Marks R.E., Puppala S, Bricka M. and Parker R., "Electrokinetic Remediation: Basics and Technology Status," Journal of Hazardous Material Vol.40 pp.117-137, (1995).
7. Acar Y.B., Gole, R.J., Putham G.A., Hamed J. and Wong R.L.. "Electrochemical Processing of Soils: Theory of pH Gradient Development by Diffusion, Migration, and Linen, Convection", J. Environ. Sci. Health, A25(6), pp.687-714, (1990).
8. Acar, Y.B. and Gale, R.J., "Pb (II) Removal from Kaolinite by EK," J. of Geotechnical Engineering, 117(2), pp.241-271, (1991).
9. Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., "Principles of Electrokinetic Remediation," Environ. Sci. Technol., Vol. 27, No. 13, pp.2638-2647 (1993).
10. Alshawabkeh, A.N. and Y.B. Acar "Removal of Contaminants from Soils by Electrokinetics: A Theoretical Treatise," J. Environ. Sci. Health, A27(7), pp.1835-1861, (1992).
11. Alshawabkeh, A.N., Yeung, A.T., and Bricka, M.R. "Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction." J. Environ. Eng., 125(1), 27-35, (1999b).
12. Ho, S. V., et al., "The Lasagna technology for in situ soil remediation. 1. Small field test." Environ. Sci. Technol., 33(7), 1086-1091, (1999a).
13. Ho, S. V., et al., "The Lasagna technology for in situ soil remediation. 2. Large field test." Environ. Sci. Technol., 33(7), 1092-1099, (1999b).
14. Hyun-Ho Lee and Ji-Won Yang, "A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation," Journal of Hazardous Materials, pp. 227-pp. 240, (2000) .
15. Gray, D.H. and Schlocker, J. "Electrochemical Alteration of Clay Soils," Clays and Clay Minerals, Vol.17, pp.309-322, (1969) .
16. Hamed, J.T., Acar, Y.B., and Gole, R.J., "Removal of Inorganic Contaminants from Soils by Electrokinetics," 環境規劃暨污染鑑定與復育技術研討會論文集，pp.B4(287)-B4 (305)，May 19，台北市 (1994)。
17. Li, Z., Yu, J.-W., and Neretnieks, I., "Removal of Cu(II) and Cr(III) from naturally contaminated loam by electromigration." J. Env. Sci.

- Health. A, 32, 1293-1308, (1997a).
18. Li, Z., Yu, J.-W., and Neretnieks, I., "Removal of Pb(II), Cd(II) and Cr(III) from sand by electromigration." *J. Haz. Mat.*, 55, 295-304, (1997b)
 19. Pamukcu, S. and Witfle, J.K., "Electrokinetic Removal of Selected heavy Metals from Soil," *Environmental Progress*, Vol. 11, No. 3, pp.241-250, (1992).
 20. Ray, C and Ramsey, R.H.. "Removal of Heavy Metals in astenater in a clay Soil Matrix Using Electro-Osmosis," *Environmental Progress*, Vol.6, No.3, pp.145-149, (1987).
 21. Reed, B.E. and Berg, M.T., "In-situ Electrokinetic Remediation of Lead Contaminated Soil: (I) A Theoretical Overview," *Proceedings of the 26th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, pp. 480-485, August 7-10, Newark, Delaware, U.S.A, (1994).
 22. Reed, B.E. and Berg, M.T., "In-situ Electrokinetic Remediation of a Lead Contaminated Soil: (II) Effect or Reservoir Conditioning," *Proceedings of the 26th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, pp.514-521, August 7-10, Newark, Delaware, U.S.A, (1994).
 23. Reddy, K. R., and Parupudi, U.S., "Removal of chromium, nickel and cadmium from clays by in-situ electrokinetic remediation." *J. Soil. Contaminat*, 6(4), 391-407, (1997).
 24. Reinout Lageman, "Electroredamation," *Environ Sci. Technol* Vol. 27 No. 13 pp.2648-2650, (1993).
 25. Sah, J. G., and Chen, J. Y., "Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils." *J. Haz. Mat.*, 58, 301-315, (1998).
 26. Segall, B.A. and Bruell, C.J., "Electro-osmotic Contamination Removal Process," *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 118(1), pp.84-100, (1992).
 27. Sliaplo, A.P. and Probsteln, R.F., "Removal of Contaminants from Saturated Clay be Electro-osmosis," *Environ. Sci. Tenchno.*, Vol. 27, No. 2, pp.283-291, (1993).
 28. Smith, L. A., et al., "Remedial Options for Metals-Contaminated Sites," CRC Press Inc., United States,(1995).
 29. Segall, B. A., and Bruell, C. J. "Electroosmotic contaminat-removal processes." *J. Environ. Eng.*, 118(1), 84-100, (1992).
 30. Trombly, J., "Electrochemical Remediation," *Environ. Sci. Technol.* Vol. 28, No. 6, pp. 289A-291A, (1994).
 31. Weng, C.H., Takiyama, L.R., and Huang, C.P., "Electro-osmosis for the In-situ Treatment of Chromium-contaminated Soil," *Proceedings of the 26th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, pp.496-505, (1994).
 32. Yang, G. C. C., and Lin, S., "Removal of lead from a silt loam by electrokinetic remediation." *J. Haz. Mat.*, 58, 285-299,(1998).

收稿日期：民國 91 年 10 月 28 日
 修正日期：民國 91 年 11 月 8 日
 接受日期：民國 91 年 11 月 14 日