

## 鎘污染農地復育暨土壤肥力提升

### Remediation of Cd-contaminated Farming and Fertility Enhancement

國立台灣大學生物  
環境系統工程研究所  
博士班研究生

蘭陽技術學院  
土木工程系  
講師

森康工程顧問  
股份有限公司  
總工程師

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

張博文

Po-Wen Chang

洪堅仁

Chien-Jen Hung

王奕森

I-Sen Wang

譚義績

Yih-Chi Tan

#### 摘 要

電動力復育技術為一極具潛力之土壤復育技術，尤其是對於低滲透性的土壤。本現場試驗主要為應用電動力復育技術現地移除矽質壤土農地之鎘污染物，並探討復育過程中鎘污染物之移除效率與土壤肥力之提升效果。本試驗以檸檬酸及界面活性劑為處理液，藉由施加直流電流，配合土壤化性的改善，證實能同時改善矽質壤土農地之鎘污染及提升土壤肥力。本試驗結果指出試驗過程最終土壤鎘之移除效率為 76.59%，而對於土壤中的有機質、全氮、Bray-1 磷、交換性鉀及交換性鎂亦皆有相對程度之提升，且在適當的操作環境下，電動力復育技術未來可作為全面土壤污染現地復育時整治工作之參考。

**關鍵詞：**現場試驗，電動力，鎘，復育，土壤肥力。

#### ABSTRACT

Electrokinetic (EK) treatment Process is of a useful remedial technology, particularly on the soil with low permeability. This pilot test implements EK technology to remove heavy metal Cd from the silty loam in rice field, and to evaluates the removal efficiency of Cd and the promotion of soil fertility enhancement during treatment process. The test uses citric acid-surfactant mixture as treatment solution under an implied electrical filed to enhance the removal of Cd and the fertility of silty farm soil simultaneously. The test results revealed that EK process gained in a Cd removal efficiency of 76.59%; also the content total nitrogen, Bray-1 phosphorus, and

exchangeable potassium and magnesium were relatively elevated after 92 days of treatment duration. It concludes that EK treatment technology may be capable of mitigating soil contaminated with not only heavy metals but also organic compounds in the future.

**Keywords:** Pilot test, Electrokinetic, Cadmium, Remediation, Soil fertility.

## 一、前言

土壤為地球陸地表面具肥力且能生長植物的疏鬆表層，其乃是經由岩石風化和母質成土兩種過程綜合作用下形成，它由礦物質、動植物殘體分解產生的有機物質以及水分、空氣等固、液、氣三相組成。土壤因自然及人為因素作用，不斷演變發展成不同類型的土壤，此乃為農業生產的根基。

土壤因具有物理或化學性的吸附能力、氧化還原作用及微生物分解作用，可緩衝污染物所造成的危害，以上統稱為土壤自淨能力，並可降低污染物進入自然生態循環系統的風險，但如果超過自淨能力的負荷即成為土壤污染。土壤污染是土壤生態系受到外來物質、生物或能量的介入，而使其原先有利的物理、化學及生物特性等遭受破壞而減低或失去正常功能。土壤污染至少可由下列幾個跡象看出：一是土壤中物理、化學或生物性質的變化，使植物受到傷害而致產量減少或死亡，此時可認為此土壤已遭受污染。二是土壤中生、物、化性質已經改變，雖然植物仍能生長，但是有毒物質可由農作物吸收後進而累積，使得農作物中有害成分含量過高，人畜食用之後恐會引發中毒及各項疾病，這種情況也可證明土壤已受到污染了。三是土壤之性質改變，而使原先所具備之土壤生物死亡，甚至已直接可由土壤顏色及生物之屍體等看到土壤的惡化。四是土壤中因為污染物含量過高，而間接地污染了空氣或將污染物滲漏到地下水等，並進一步影響飲用者之健康(王一雄，1997)。

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%，其餘的污染源可能為廢棄物、農藥、肥料、酸雨等。而在台灣地區農田土壤中，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(台灣省環境保護處，1989)，主要污染途徑應為工業廢水造成灌溉水污染，再經引灌至農田當中所致，如桃園之基力化工與高銀化工之鎘污染、雲林虎尾台灣色料鎘污染、彰化東西二圳鎘米事件都是因農田附近工廠排放含鎘廢水至灌溉渠道中所引發，然而，此些過去發生鎘米之地區，農民多已先行休耕；近年來又有工業用地因早年操作滲漏或廢棄物不當掩埋，造成土壤污染的案件，例如桃園 RCA 含氯有機溶劑污染土壤及地下水案、彰化裕台化工之農藥污染案等。有鑑於此，環保單位已著手進行土壤污染防治工作，將食用農作物生長之農田土壤重金屬污染列為優先防治重點，據環保單位之調查資料顯示，台灣地區之土壤不論是重金屬抑或毒性有機物均陸續發現其中污染物以鎘、鉻、銅、鋅、鉛為主，污染結果亦以造成鎘米事件為最為嚴重，亟需正視土壤污染的問題。

鎘經常是提煉鋅的附產品，它常用於鎘鎘電池、染料、塗料色素及製造塑膠之穩定劑。台灣鎘米事件，乃是工廠排放廢水至灌溉渠道污染農田所致，經由食物鏈嚴重影響人類健康。而農作物吸收重金屬之程度常因重金屬的種類與濃度、植物的種類、土壤 pH 值及氣候等因素而不同，不同植物在不同土壤中對重金屬離子有不同的吸收與積聚作業，一般而言，農作物在土壤中吸收重金屬的程度分為：鎘>鋅>汞>銅>鉛>砷>鉻，其中鎘、鋅、汞、銅、鉛等五類重金屬較可能被植物吸收且易積聚於植物體內。在鎘中毒中，急性鎘中毒則容易發生在鎘合金或鍍鎘金

屬之焊接工人身上，易導致毒性肺水腫、呼吸困難及急性腎臟衰竭發生；慢性鎘中毒則容易發生在鎘米污染區，因長期食用鎘污染的蔬菜、稻米、地下水而導致腎小管傷害、軟骨症及痛痛病 (Itai-itai disease) 前期症狀的產生、肝功能障礙、流產、畸形兒及前列腺癌等。然而，呼吸所吸入的鎘約 50% 被吸收，食入的鎘約 6% 被吸收，大部分的鎘被貯存在腎臟中，其半衰期至少 20 年以上，對人類健康構成極大的威脅 (Alloway, 1995)。

污染土壤復育方式，依施作地點可分為現地 (in situ) 復育及離場 (off site) 復育兩種。現地復育處理污染土壤是在其發現的所在地進行，離場復育的處理方法則是在處理前需要先挖出污染土壤帶離所在地做處理。現地技術不需要將土壤挖出，所以比起離場復育較為節省經費且造成較少塵污及污染物釋出，它可一次處理較大量的土壤，不過現地復育比離場復育較為費時且技術較困難。台灣地區過去土壤污染復育個案有限，針對農地重金屬污染之復育多採深耕翻轉混合稀釋法，針對油料有機物採生物處理，針對農藥則採熱解法 (張尊國, 2002)。

雖然電動力復育技術已經在實驗室試驗與理論模式上有相當的成果，但是對於現場試驗 (field trial) 仍相當匱乏。1987 年於尼德蘭 (Netherlands) 一家模型塗料工廠成功復育受銅及鉛污染土壤，此乃第一個應用電動力於現場復育土壤之重要突破，其平均移除率約 74% (Lageman et al., 1989; Lageman 1993)。往後也有一些對於 Zn、As、Cd、Pb 等重金屬污染之復育實例。而另一成功使用電動力現場復育案例為美國新墨西哥州一處化學廢棄掩埋場之 Cr 污染場址 (Lindgren et al., 1998)。而電動力亦能有效於現場移除 TCE (Ho et al., 1999)。因此，電動力復育技術為一極具潛力之土壤復育技術，其具有無地域性限制、可現場處理、適用於飽合/非飽合土壤、可處理有機/無機污染物、非均質土壤、成本低廉等優點，尤其是對於低滲透性的土壤 (Jurate et al., 2002)，未來應建立更多現地復育成果資料，以供後續研究。

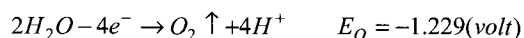
就土壤整治復育技術而言，未來土壤污染整治復育應著重於現地復育 (In-situ remediation) 為主。本研究乃利用電動力復育技術 (Electrokinetic remediation technology) 針對已遭受鎘污染的農地土壤進行現場試驗 (pilot test)，以瞭解鎘在電動力作用下自污染土壤之移除效率，並同時探討受污染土壤肥力之變化情形，冀求能建立一套既能移除鎘污染又能同時提升土壤肥力的土壤污染現場復育技術，俾使爾後對相關的農地鎘污染土壤復育技術有所助益。

## 二、電動力機制

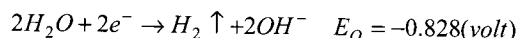
當表面帶電的固體與電解質溶液互相接觸，固體表面會被電量相等但電性相反之離子雲 (Cloud of ions) 所包覆，此種涵蓋固體表面電荷及可移動離子雲的結構稱為電雙層 (Electric double layer)。若固液界面之電雙層受到外力作用，則會影響電雙層中之電荷分佈，並在剪力面處產生固體與溶液相對運動的各種物理現象，通稱為電動力現象 (Electrokinetic phenomena)，而研究各種電動力現象的學說，叫做電動力學 (田福助, 1988)。

近十年來，利用電動力法復育污染土壤，在歐美各國之土壤復育發展技術領域中頗受重視，目前該法已被美國環保署認可為整治地層下有關金屬污染土壤場址之可行技術。其係在污染土壤中通以直流電壓，陰陽極會進行氧化還原反應而產生 OH<sup>-</sup> 與 H<sup>+</sup>。H<sup>+</sup> 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。其主要優點為：(1) 產生均勻之電滲透流於異質且低滲透性之土壤介質中移動 (2) 可有效控制電滲透之流向 (3) 高移除效率且具安全性。

陽極：



陰極：



電動力技術即為土壤物理和化學結合的例子，該類技術應用在環工上已持續了近五十年，但應用在土壤污染的復育上目前僅有一些商業化的案例，此乃因為其中仍有許多機制及現象未明。電動力技術的原理是利用一對電極使土壤中產生電場，電位梯度形成驅動力使污染物向陰極集中。由於目前的土壤復育技術尚難以對水力傳導係數小於  $1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$  的土壤作處理，而電動力技術對這種細小粒徑的土壤處理效果卻很好，因此它的發展潛力不錯。此外，電動力技術不但能處理重金屬，對非離子性的有機污染物也能處理。利用電動力技術處理受污染土壤時，施加直流電於此多孔隙介質時，系統電極處將發生水解反應，使得陽極處形成酸層，陰極處形成鹼層。因此系統需不斷地補充電解液使系統保持濕潤狀態。在整個電動力處理系統中，電極之離子遷移(ion migration)、電解(electrolysis)及電滲透(electroosmotic)構成了電動力技術清除土壤污染物主要的機制(葉琮裕，2000)。

一般常見的四種電動力現象如下：(1)電滲透流(electroosmosis)：在外加電場下，電解質溶液相對於不動的帶電固體表面之運動現象。在帶負電的固體表面電雙層內之電解質溶液，存在有過剩的正離子，這些正離子受到外加電場的作用而朝負極方向運動，此種因離子運動而牽引流體流動的現象均稱為電滲透流。(2)流動電位(streaming potential)：當電解質溶液受壓力沿一不動的帶電固體表面流動時，所產生的誘導電場。在管壁帶負電的毛細管內之電解質溶液，受壓力梯度的作用而流動，在毛細管下游處有帶正電的離子累積(accumulation)，因此會產生一誘導電場，此誘導電場就稱為流動電位。(3)電泳(electrophoresis)：帶電膠體粒子受到外加電場的影響，其相對於固定不動之電解質溶液的移動現象。帶正電的膠體粒子存在於電解質溶液中，受到外加電場的作用而朝帶負電的極板運動，此種膠體粒子的運動稱之為電泳運動。(4)沈降電位

(sedimentation potential)帶電粒子受重力作用相對於電解質溶液運動所產生的誘導電場。當帶正電的粒子受到重力場的作用而運動時，在電雙層內的負離子受到流體流動的作用，於粒子運動的反方向處有較密的分佈，此會形成一微小的電偶極(dipole)，這些存在於懸浮液中的微小電偶極排列後將會產生一誘導電場，此種誘導電場稱為沈降電位。

上述四種電動力現象中應用最廣泛的是電泳，如今，以電泳作為粒子檢定與分離以及其他的應用，已廣為運用於諸多膠體系統中，如蛋白質之純化與分離、血清分離、電著塗裝、陶瓷材料製備等。電滲透流和流動電位則應用在土壤污染處理的問題上，例如：處理土壤中化學肥料、重金屬的污染等，此外又可用於藥物傳送(drug delivery)、薄膜過濾以及海水的淡化處理等。而沈降電位對於粒子沈降速率的影響，亦有相當重要的應用價值。

而當金屬匯集於陰極端後，可利用抽出處理技術將其抽出，再用電化學方法將金屬回收，受鎘、鉛、銅、鎳等重金屬污染土壤或污泥之處理效果均已得到證實。近期該法亦結合氧化技術，如 Fe(0)反應牆，將價數及毒性較高之重金屬離子藉由電動力之驅動力使其向陰極移動，因而使該金屬離子與 Fe(0)降解成毒性較低之低價金屬離子，不僅達到移除亦達到破壞之目的，如受六價鉻污染之土壤，已有研究顯示結合電動力技術及 Fe(0)反應牆可獲致良好之整治成效。近期電動力法亦應用於廢水處理場之污泥脫水，主要藉由施加電場下，水之電解反應持續發生，因而達到脫水之目的，研究結果顯示約可節省 25-50% 之運輸費及場地儲存費用(葉琮裕，2000)。

然該法對於厭水性有機污染物之處理效果不佳，因其低溶解度之特性，該物質與土壤之親和性較液相為佳，僅單獨以電動力技術處理並無法達到移除之目的，因此需以提升厭水性有機污染物之水溶解度為優先考量。由於界面活性劑(Surfactant)對於厭水性有機物具有高溶解度特性，部份研究將其作為電動力技術之操作流質應用於有機物之移除，處理效果明顯提升。目前已

應用於受含氯有機物及苯環有機物(BTEX)污染土壤之整治(葉琮裕, 2000)。

### 三、材料與方法

#### (一) 試驗場址

試驗場址位於台灣中部彰化縣和美鎮一原栽種稻米之農地, 也就是台灣受重金屬污染農地最嚴重的地方, 由於長期不當引灌含鎘重金屬之灌溉水, 導致土壤遭受重金屬鎘強烈衝擊, 目前已遭有關單位勒令休耕多年, 任其荒蕪廢置, 亟待進行土壤整治(彰化縣環保局, 1996、1997)。因此, 我們乃於受污染農地現地進行移土的電動力復育現場試驗, 研究階段之現場試驗共進行 92 天, 操作上主要係以檸檬酸( $C_6H_8O_7$ )與生物可分解之界面活性劑( $H_2NSO_3H$ )調製成處理液, 藉由電場驅動淋洗作用, 使吸附於土壤中的鎘重金屬從土壤顆粒表面脫附於孔隙流體中, 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

試驗場址於進行試驗前必須先行進行前置處理。首先去除農地上之雜草及粗大雜質, 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。將待處理土壤均分成 A、B 兩個長 3 公尺, 寬 3 公尺, 高約 0.5 公尺的土堆槽, 分別堆於長約 11 公尺, 寬約 4 公尺的處理槽內, 並於處理槽底層鋪設 2mm 厚高密度聚乙烯(High density polyethylene, HDPE)材質之不透水布, 以阻絕處理滲漏液滲入下層土層, 避免造成深層土壤及地下水遭受二次污染, 其上再鋪設約 10 公分之粗砂襯底以利導排, 再放置陰極電極棒於粗砂襯底之上, 此乃避免因陰極電極棒發熱直接與不透水布接觸, 然後再堆置待處理之污染土壤與陽極電極棒, 陰、陽極電極棒間隔約 50 公分, 並於其上覆蓋帆布, 避免雨水或其他物質進入試驗槽而影響處理效果; 每一處理槽旁並備有各自專用之滲漏液收集槽, 收集各槽處理之滲漏液, 以避免滲漏液混合而影響評估各槽之處理效果; 另於各

處理槽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, 處理槽之現地配置如圖 1 所示。

#### (三) 試驗操作條件

本試驗進行處理液主要以食品級檸檬酸為主, 隨後將檸檬酸( $C_6H_8O_7$ )加自來水及生物可分解性界面活性劑( $H_2NSO_3H$ )配製成重量濃度約 5%之處理溶液, 其平均 pH 約在 1.73~1.94 之間, 電導度約  $3500\mu S/cm$ 。每日分兩次各噴灑處理液約 50 公升於 A、B 二槽待處理土壤表面上, 每日共添加 100 公升處理液於處理槽。另於 B 槽多添加含生物可分解配方、無毒、不會引起腐蝕現象、不易燃、含非離子界面活性劑之食品級脫附劑於處理液中, 以期增加重金屬鎘去除效果及提升土壤肥力。

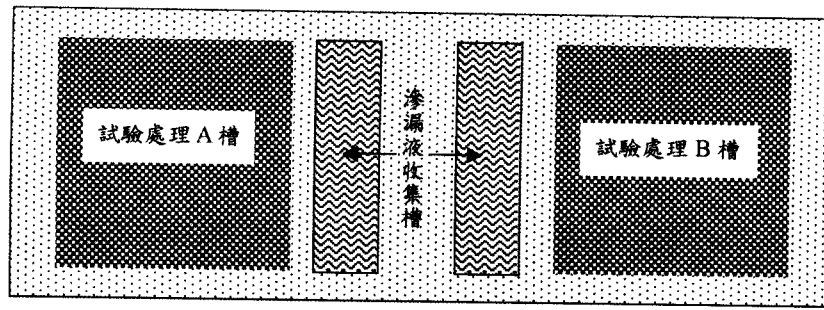
初始操作電流則控制在 5 安培上下, 並於操作時程達 35 日後控制電流在 8 安培上下, 進而觀察其電壓變化, 不難發覺其電壓變化隨著操作時間增加而不斷下降, 直至電壓保持在 4 伏特上下, 其電壓變化已不再顯著, A、B 二槽操作過程之電流及電壓變化詳如圖 2 所示。

#### (四) 採樣方式與頻率

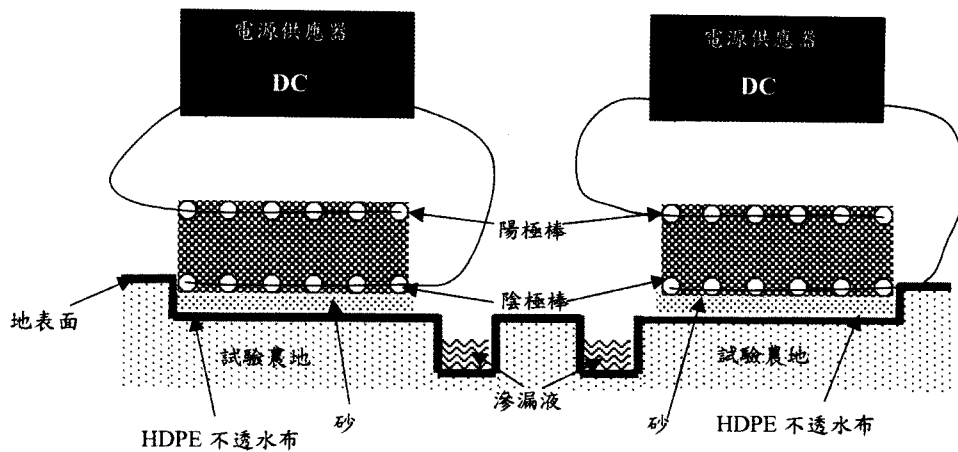
在電動力復育過程中分別對 A、B 二處理槽於處理前及處理後 7、23、35、45、55、76、92 日以採樣管採集各槽上層(表面下 0~15 公分)、中層(表面下 15~35 公分)、下層(表面下 35~50 公分)三處土壤樣品, 而處理槽之每一深度採樣至少隨機採取 5~10 個點的土樣, 並將之均勻混合成一個樣品送至實驗室進行土壤 pH 及鎘濃度檢驗, 以觀察不同時間不同深度鎘之移除及遷移情形。

#### (五) 土壤性質

在進行現場試驗之前, 場址調查與前置作業的工作是不可輕忽的, 尤其像土壤的性質及污染物的特性與分布等調查工作益顯重要(Lindgren et al. 1998)。為瞭解試驗土壤性質及污染物的分布情形, 乃由採樣管採取試驗土壤樣品於實驗室



處理槽配置平面圖



處理槽配置剖面圖

圖 1 電動力處理槽現地配置圖

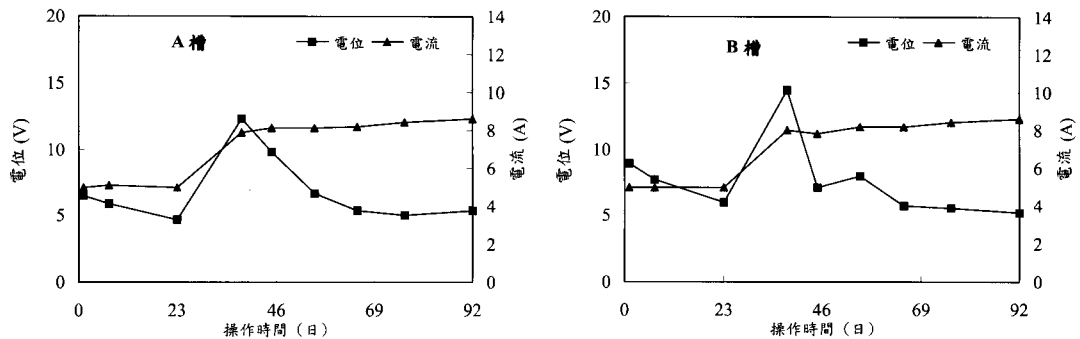


圖 2 操作過程電流及電位變化圖

進行化驗，以瞭解試驗土壤之物化性質。土壤樣品經粒徑分析可得 A 槽試驗土壤砂佔 25.5%、坩土佔 64.3%、黏土佔 10.2%，B 槽試驗土壤砂佔 24.9%、坩土佔 64.7%、黏土佔 10.4%，經比對美國農業部(U.S. Department of Agriculture,

USDA)土壤分類可得 A、B 二槽試驗土壤均屬坩質壤土(silt loam)，另經比重分析可得 A 槽試驗土壤比重為 2.59，B 槽試驗土壤比重為 2.61；在化學性質方面 A 槽試驗土壤之 pH 為 5.79，B 槽試驗土壤之 pH 為 6.03，皆屬微弱酸性土壤；A

表 1 試驗土壤基本性質

基本性質	A 槽試驗土壤	B 槽試驗土壤	測定方法	方法來源
砂(sand)	25.5%	24.9%	篩分析&比重計法	Gee and Bauder, 1986
粉土(silt)	64.3%	64.7%		
黏土(clay)	10.2%	10.4%		
土壤分類	粉質壤土(silt loam)	粉質壤土(silt loam)	土壤分類表	USDA
pH	5.79	6.03	比重法	ASTM D854-92
比重	2.59	2.61	酸鹼測定計	McLean, 1982
有機質	4.40 %	5.00 %	重鉻酸鉀氧化法	Nelson and Sommer, 1982
全氮	0.24 %	0.25 %	Kjeldahl 法	Bremner and Mulvaney, 1982
陽離子交換容量(CEC)	18.0 C mol/kg	19.4 C mol/kg	醋酸銨法	Rhoades, 1982
Bray-I 磷	42.30 mg/kg	49.77 mg/kg	鉬藍法	Olsen and Dean, 1965
交換性鉀	51.47 mg/kg	61.90 mg/kg	醋酸銨法	Thomas, 1982
交換性鎂	354.00 mg/kg	323.33 mg/kg	醋酸銨法	Thomas, 1982
0.1M 鹽酸萃取法鎘含量	1.95mg/kg	2.15mg/kg	0.1M 鹽酸萃取法	行政院環保署, 1994

槽試驗土壤電導度為 0.48 dS/m，B 槽試驗電導度為 0.57 dS/m；另 A 槽試驗土壤陽離子交換容量(cation exchange capacity, CEC) 為 18.0 C mol/kg，B 槽試驗土壤陽離子交換容量為 19.4 C mol/kg；而 A、B 二槽試驗土壤經 0.1M 鹽酸萃取法分析重金屬鎘含量分別為 1.95mg/kg 及 2.15mg/kg。茲將試驗土壤之基本性質列於表 1。

#### 四、結果與討論

##### (一) 土壤 pH

重金屬污染物在土壤中主要是以非溶解態鹽類或溶解態離子形式存在，在鹼性條件下，鎘在土壤中可能以氫氧化物( $Cd(OH)_2$ )或碳酸化物( $CdCO_3$ )存在，此為沉積態物質容易造成孔隙阻塞降低傳導係數；而在酸性條件下，鎘在土壤中常以離子態( $Cd^{2+}$ )存在，此為較易流動之溶解性離子(Sah and Chen, 1998)。在電動力復育過程中，土壤 pH 是一個相當重要的指標，也是復育成果良窳的重要關鍵(Mary and Christopher, 2002)。因此，在電動力復育過程量測土壤 pH 隨時間的變化是一極重要的工作(Sah and Chen, 1998)。

本試驗在試驗過程中每日皆噴灑約 100 公升之檸檬酸(pH 約 1.73~1.94、EC 約 3500 $\mu$ 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 92 天電動力處理後，待處理土壤之 pH 已有了明顯變化，從試驗結果可觀察出，試驗土壤之 pH 有顯著降低的趨勢，亦即有明顯酸化現象，此將有助於鎘脫附土壤進而以離子態存在於孔隙流體中。A 槽各層土壤 pH 變化以上層變化較為顯著，總計約減少了 4.41，然中層土壤之 pH 變化亦有隨操作時間增加而逐漸降低，共約減少了 3.19，下層土壤之 pH 變化較小，約減少了 3.16，此與處理液經重力及電動力作用自上層流至下層有關；B 槽各層土壤 pH 變化亦與 A 槽一致，以上層較顯著，中層次之，下層最低，其上、中、下層土壤 pH 分別減少 4.48、4.5、3.83，且各層酸化程度皆較 A 槽為佳。至於整體試驗結果顯示 A 槽土壤平均 pH 由 5.79 減少至 2.20，其整體平均值降低了 3.59；B 槽土壤平均 pH 由 6.03 減少至 1.76，其整體平均值降低了 4.27，此乃說明於處理液中多添加食品級脫附劑有助於土壤酸度增加，A、B 二處理槽土壤 pH 與操作時間變化情形詳如圖 3 所示。

##### (二) 鎘濃度

經由現場 92 日之電動力復育污染土壤，鎘可由土壤表面脫附而出，導致土壤鎘含量減少，

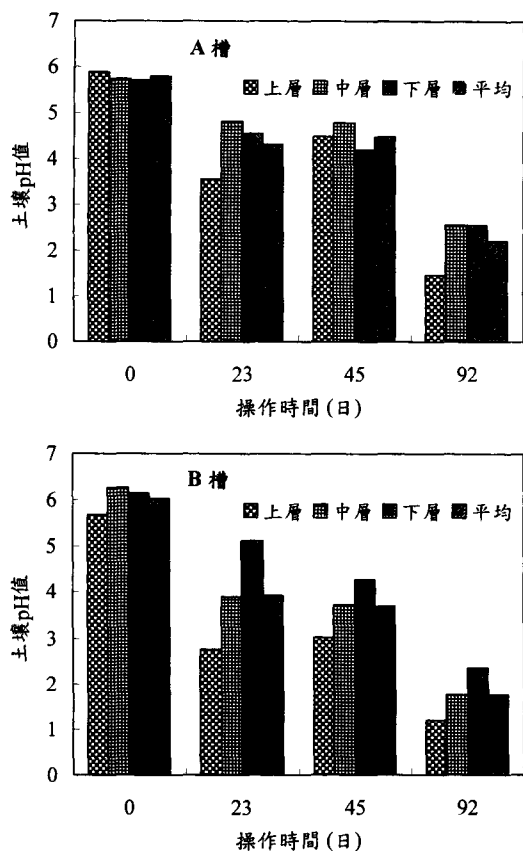


圖 3 各層土壤 pH 變化圖

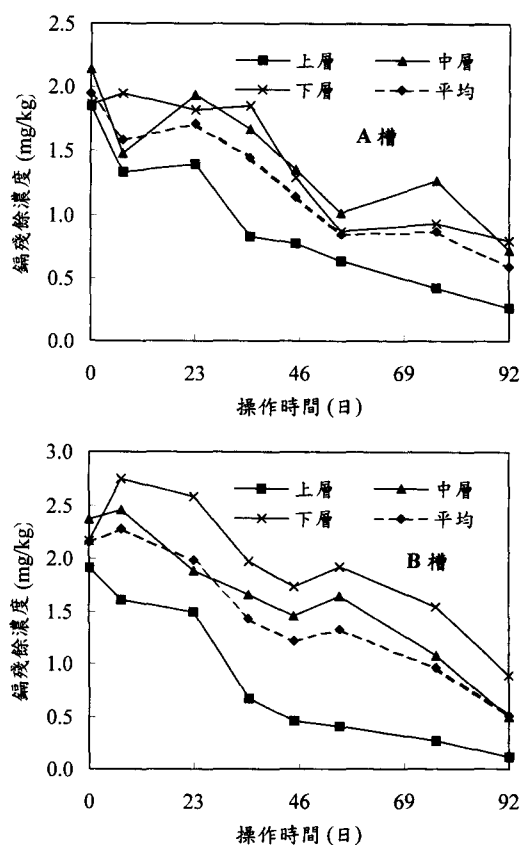


圖 4 各層土壤鎘濃度變化圖

藉由採集現場試驗土壤於實驗室以 0.1M 鹽酸萃取法進行鎘殘餘濃度分析，圖 4 為兩槽土壤中鎘殘餘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殘餘濃度已呈現遞減現象，表示電動力法確能脫附鎘，以降低土壤鎘含量。而上、中、下層土壤鎘濃度分別降至 0.26mg/kg、0.72mg/kg、0.76mg/kg，皆已較台灣地區食用作物農地之監測基準值 2 mg/kg 為低，尤其以上層土壤鎘含量更符合台灣地區土壤重金屬含量標準第三級(0.05~0.39mg/kg)之背景值，顯示復育成效相當良好，另各層鎘殘餘濃度變化則以上層之變化較大，減少 1.59mg/kg，中層次之，減少 1.42mg/kg，下層最小，減少 1.07mg/kg，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 1.95mg/kg 降至 0.59mg/kg，減少了 1.36mg/kg，

呈現明顯下降趨勢，此與土壤中之 pH 亦有相同之變化趨勢。

然而 B 槽經 92 日電動力復育污染後，其上、中、下層土壤鎘濃度分別降至 0.12mg/kg、0.50mg/kg、0.89mg/kg，亦低於台灣地區食用作物農地之監測基準值，且上層土壤鎘含量更符合台灣地區土壤重金屬含量標準第三級標準，其復育成果亦較 A 槽更佳，另各層鎘殘餘濃度變化則以中層之變化較大，減少 1.87mg/kg，上層次之，減少 1.79mg/kg，下層最小，減少 1.28mg/kg，減少量亦比未添加食品級脫附劑之 A 槽較多，且平均殘餘濃度 2.15mg/kg 降至 0.59mg/kg，減少了 1.65mg/kg，亦呈明顯下降趨勢，減少量亦比未添加食品級脫附劑之 A 槽較多，此亦說明適量添加食品級脫附劑更有助於去除土壤中之鎘，以降低鎘污染之衝擊。



### (三) 鎘移除效率

本試驗經由電動力處理後 A、B 二槽鎘的移除效率如圖 5 所示，由圖 5 中顯示在處理 35 日及 92 日後 A 槽中皆以上層土壤移除效率較高，中層土壤移除效率次之，而以下層土壤移除效率最低，分別為 55.14%、21.96%、0.54% 與 85.95%、66.36%、57.53%，其平均移除效率分別達 25.64% 與 69.74%；而在處理 35 日及 92 日後 B 槽中亦皆以上層土壤移除效率較高，中層土壤移除效率次之，而以下層土壤移除效率最低，分別為 64.92%、29.96%、9.22% 與 93.72%、78.90%、58.99%，其平均移除效率分別達 33.33% 與 76.59%，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。

另分析操作電流在 5 安培及 8 安培條件下鎘平均每日之移除效率，當電流控制在 5 安培時 B 槽以平均每日 0.95% 之移除效率較 A 槽平均每日 0.73% 之移除效率為佳，而電流在 8 安培時 B 槽以平均每日 1.38% 之移除效率較 A 槽平均每日 1.26% 之移除效率為佳，此亦顯示本試驗電流控制在 8 安培比 5 安培之鎘移除效率較佳。

由此可知，無論在 A 槽或 B 槽其鎘的移除效率約在七成左右，顯示電動力復育技術確實能有效去除坭質壤土中之鎘，且於處理液中添加適量食品級脫附劑及操作電流控制，將有助於提升坭質壤土鎘之移除效率。

### (四) 土壤肥力

爲了在有限的土地上打造出更多的糧食，人類一方面在優化良種上下工夫，另一方面則在提高地力上下工夫。如此，化肥便扮演了重要角色。現在，全世界每年施用的化肥總量在 1.5 億噸左右。由於人們盲目追求產量，糧食確實增加了，但不可迴避的另外一個事實是：由於長期大量地施用化肥，綠肥和農家肥減少了，使土壤肥力下降，鹼化、板結，導致土壤的物理性質改變。因此，若能於土壤復育過程中即能有效增加土壤肥力，如此將可減少日後農藥及肥料之使用，並創造清新自然的地球環境。

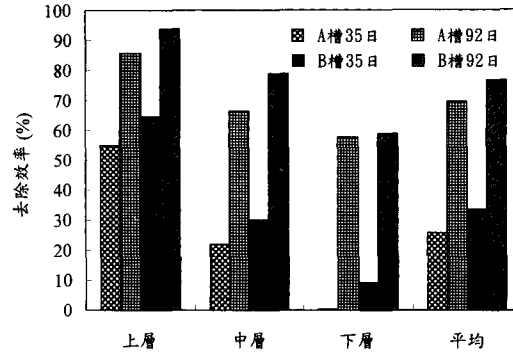


圖 5 各層土壤鎘去除效率分析圖

本試驗分別於試驗前後分析土壤中肥力之情形，以瞭解電動力復育試驗對土壤肥力之影響程度，並以 pH、有機質(Organic)、全氮(Total Nitrogen)、Bray-1 磷(Bray-1 Phosphorus)、交換性鉀 (Exchangeable Potassium)、交換性鎂 (Exchangeable Magnesium) 六項爲土壤肥力指標。由圖 6 顯示，在 A 槽中經電動力復育後 pH 降低了 4.50 (減少 67.16%)、有機質亦降低 0.30% (減少 6.82%)、全氮增加 0.18% (增加 75%)、在 Bray-1 磷方面降低 31.70mg/kg (減少 74.94%)、另交換性鉀提升 10.03mg/kg (增加 19.49%)、交換性鎂卻減少 32mg/kg (減少 9.04%)；而在 B 槽中經電動力法整後除了土壤 pH 降低了 5.01 (減少 74.00%) 外、其餘各項指標卻有顯著提升現象，如有機質增加 0.10% (增加 2.00%)、全氮增加 0.50% (增加 200%)、在 Bray-1 磷方面提升 16.43mg/kg (增加 33.01%)、另交換性鉀提升 1.30mg/kg (增加 2.10%)、交換性鎂亦提升 61.67mg/kg (增加 19.07%)。

由此顯示經電動力復育之污染土壤不但能有效去除土壤鎘之外，若能於整治過程中添加適當的食品級脫附劑於處理液中，則可同時有效提升土壤自身肥力，以避免日後進行作物栽種時使用大量化學肥料而造成另一次的污染，因此，考量復育完成後土地之最終使用目的，未來若需繼續栽種作物時，僅須將復育後之土壤 pH 調整即可供作物耕作，並減少化肥之施用，避免環境造成二次污染。

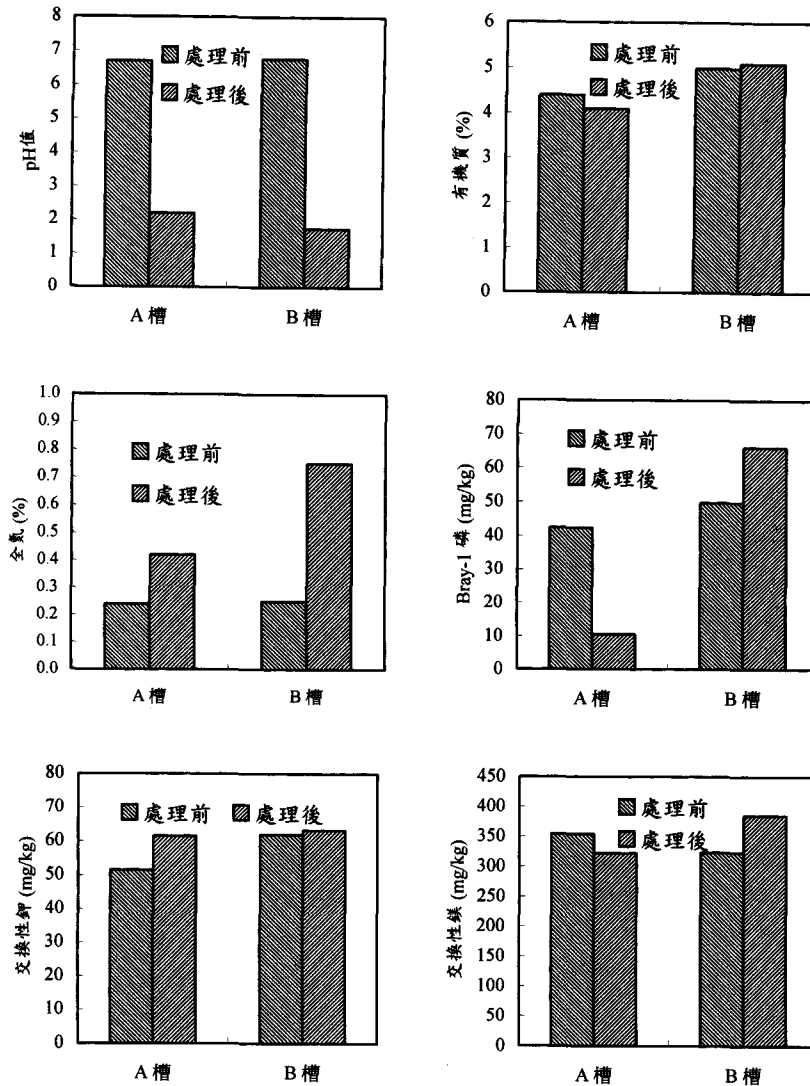


圖 6 處理前後土壤肥力變化圖

## 五、結論

電動力復育技術處理土壤重金屬鎘系統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，將土壤中之鎘脫附並回收處理。根據本現場模場試驗經過 92 日處理結果顯示，電動力復育技術已能有效移除坵質壤土之鎘污染農地。

在鎘移除效率方面，於處理液中多添加適量食品級脫附劑，其最終移除效率可達 76.59%，而

未添加食品級脫附劑者僅有 69.74%，顯示電動力復育技術確能有效現地復育鎘污染農地，若能添加適量食品級脫附劑於處理液中對鎘之移除將更有幫助。另在電流控制方面，本試驗結果顯示電流控制在 8 安培比 5 安培之鎘移除效率較佳。

在土壤肥力方面，於處理過程中多添加適量食品級脫附劑於處理液，對於土壤中之有機質、全氮、Bray-1 磷、交換性鉀及交換性鎂皆有相對提升，此對未來栽種作物是相當重要的。

本試驗結果指出電動力復育技術能有效處理受鎘污染之粉質壤土農地並能同時提升土壤肥力，且在適當的操作環境下，其未來可為全面土壤污染現地復育時之整治工作規劃與設計參考。

### 參考文獻

- 王一雄，「土壤環境污染與農藥」，明文書局，(1997)。
- Donald L. Sparks 著；王明光譯，「環境土壤化學」，五南書局，(2000)。
- 台灣省環境保護處，台灣地區土壤重金屬含量調查總報告第一~四冊，(1989)。
- 田福助，「電化學基本理論與應用」，五洲書局，(1988)。
- 行政院環境保護署網站，[www.epa.gov.tw](http://www.epa.gov.tw)。
- 葉琮裕，「美國土壤及地下水污染整治技術」，環保訓練園地，50 期，(2000)。
- 張尊國，「台灣地區土壤污染現況與整治政策分析」，國政分析，(2002)。
- 彰化縣環保局，「八十五年彰化縣土壤污染防治工作計畫成果報告」，(1996)。
- 彰化縣環保局，「東西二圳重金屬污染農地後續管理工作推動計畫」，(1997)。
- Acar YB, Gale RJ, Alshwabkeh AN, Marks RE, Puppala S, Bricka M, Parker R (1995) Electrokinetic remediation: basics and technology status. *Journal of Hazardous Material* 40: 117-137.
- Acar YB, Alshwabkeh AN (1993) Principles of electrokinetic remediation. *Environmental Science Technology* 27 : 2638-2647.
- Alloway, B.J (1995) *Heavy metals in soils*, Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Alshwabkeh AN, Yeung AT, Bricka MR (1999) Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction. *Journal of Environmental Engineering* 125 : 27-35.
- Bremner JM, Mulvaney CS (1982) Nitrogen-total. In A. L. Page et al(eds). *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd. ed. Agronomy* : 595- 624.
- Gee GW, Bauder JW (1986) Particles size analysis. In A. Klute (ed).*Method of soil analysis : Part 1. 2nd ed. Agronomy* 9 : 283-409.
- Ho SV, et al (1999a) The Lasagna technology for in situ soil remediation. 1. Small field test. *Environmental Science Technology* 33 : 1086-1091.
- Ho SV, et al (1999b) The Lasagna technology for in situ soil remediation. 2. Large field test. *Environmental Science Technology* 33 : 1092-1099.
- Lageman R (1993) Electro-reclamation (applications in the Netherlands). *Environmental Science Technology* 27 : 2648-2650.
- Lageman R, Pool W, Seffinga G (1989). "Electro-reclamation : theory and practice. *Chemistry Industry* 18 : 585-590.
- Lindgren ER, Mattson ED, Kozak MW (1994) Electrokinetic remediation of unsaturated soils. *ACS Symp. Ser* 554 : 33-50.
- Mary M., Chistopher L (2002) Electroremediation of Contaminated Soils. *Journal of Environmental engineering* 128 : 208-219.
- McLean EO (1982) Soil pH and lime requirment. In A.L. Page et al.(ed). *Method of soil analysis (2nd ed) , Part 2:Chemical and microbiological properties. Agronomy monograph No. 9.ASA and SSSA* : 199-224.
- Nelson DW, Sommers LE (1982) Total carbon ,organic carbon,and organic matter. In A.L. Page et al.(ed).*Method of soil analysis (2nd ed),Part 2: Chemical and microbiological properties.Agronomy monograph No. 9.ASA and SSSA*: 539-580.
- Olsen SR, Sommers LE (1982) Phosphorus. p.403-430. In A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Academic Press, Inc. New York.*
- Ray C, Ramsey RH (1987) Removal of heavy

- metals in wastewater in a clay Soil Matrix Using Electro-Osmosis. *Environmental Progress* 6: 145-149.
- Reddy KR, Parupudi US (1997) Removal of chromium, nickel and cadmium from clays by in-situ electrokinetic remediation. *Journal of Soil Contaminate* 6 : 391-407.
- Sah JG, Chen JY (1998) Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils. *Journal of Hazard. Material* 58 : 301-315.
- Segall BA, Bruell CJ (1992) Electroosmotic contaminant removal process. *Journal of Environmental engineering* 118 : 84-100.
- Sliaplo AP, Probsteln RF (1993) Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis. *Environmental Science Technology* 27 : 283-291.
- Thomas GW (1982) Exchangeable cations. In A. L. Page et al. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. Madison, WI, Agronomy 9: 159-166.
- Trombly J (1994) Electrochemical remediation. *Environmental Science Technology* 28: 289-291.
- Jurate V, Mike S, Petri L (2002) Electrokinetic soil remediation-critical overview. *The science of Total Environmental* 289 : 97-121.

收稿日期：民國 91 年 12 月 10 日

修正日期：民國 92 年 1 月 27 日

接受日期：民國 92 年 2 月 19 日