

行政院環境保護署

「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

以綠能作物復育重金屬污染土壤之可行性研究(第一期)

期末報告

主辦單位： 行政院環境保護署

計畫執行單位：朝陽科技大學／環境工程與管理系所

計畫主持人：程淑芬副教授

計畫執行期間：100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中華民國 101年10 月 印製

第一章 計畫緣起與目的

1-1 計畫緣起

近年來國內積極推動土壤污染的預防與整治工作，目前國內對於農地重金屬污染整治多以翻轉稀釋法為主，有些高濃度污染土壤則佐以酸洗法或固化法。雖然整治成效卓越，但從整治經驗中也逐漸感受到發展綠色整治技術的重要性。雖然目前翻轉稀釋法所需經費相對較低，但國內有相當多的污染農地地處偏遠，原本土地利用率就不高，且其污染對週遭環境之影響風險亦不大，投入經費積極整治，其必要性實屬不高。此外，目前國內對於食用作物農地土壤重金屬管制標準(如表 1)，在鎘方面為 5 mg/kg；鉛為 500 mg/kg，但近年台灣有相當多的案例發現，土壤中重金屬含量符合管制標準，但其所生產之作物如稻米、花生，其重金屬含量卻有無法符合蔬果植物重金屬限量標準(如表 2)的情形。

表 1-1. 食用作物農地土壤管制標準

重金屬項目	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn	As	Cr	Ni
管制標準	5	200	5	500	600	60	250	200

單位：mg/kg

表 1-2. 蔬果植物重金屬限量標準

類 別	項 目	鎘	鉛
稻米		0.4	0.2
小葉菜類		0.2	0.3
結球及花菜類蔬菜		0.1	0.3
根莖菜類 (不含)		0.05	0.1
鱗莖類		0.05	0.1
瓜菜及果菜類		0.05	0.1
豆類及豆菜類		0.2	0.2

單位：ppm (鮮/濕重)

依據農業試驗所郭鴻裕博士(2011)研究預測結果如表 3 及表 4 所示，當土壤 pH 為 6.5 時，種植梗稻及秈稻，土壤中鎘濃度分別為 3.0 mg/kg 及 1.0 mg/kg，其所生產之糙米其鎘含量都已經超過食用限量標準；若土壤 pH 為 4.5 時，土壤中鎘濃度為 1.0 mg/kg 時，所產出之梗米其糙米中鎘含量可能高達 0.52 mg/kg；若種植秈稻其糙米中鎘含量更可能高達 1.28 mg/kg。張尊國教授執行土基會營運中含鉛製程事業之土壤污染潛勢調查計畫(2011)，針對台中市烏日區所種植之稻米研究結果顯示(表 5)，當表土中鉛含量為 98.10 mg/kg；裡土含量為 64.90 mg/kg 時，所生產的稻米糙米中鉛含量可高達 1.19 mg/kg。另外研究者採集台中市霧峰區農地土壤種植小白菜結果如表 6 所示，土壤中鎘、鉛濃度都遠低於農地管制標準，但所生產之小白菜食用部位之鉛、鎘含量也都有超過蔬果限量標準的情形。從以上資料顯示，台灣目前有相當多的農地雖然土壤重金屬含量仍符合管制標準，但已無法生產符合食用安全衛生之作物，未來將面臨更多農地不適合種植食用作物情形，這些農地將如何處理?如何應用?此外，未來農地土壤污染管制標準可能有再下修的必要，重金屬污染農地若要整治到符合作物之食用限量標準，無論現行的翻轉稀釋法或是其它物化整治技術，都將面臨相當大的挑戰，整治經費勢必要再增加更多。面對這些問題，必須儘早研擬可行策略。

表 1-3. 梗稻品系土壤與糙米鎘含量關係預測

Soil Cd (mg/kg)	soil pH					
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.5						
1.0	0.52					
1.5	0.71	0.57				
2.0	0.88	0.71	0.58			
2.5	1.04	0.84	0.68	0.55		
3.0	1.19	0.96	0.78	0.63	0.51	
3.5	1.33	1.08	0.87	0.71	0.57	
4.0	1.47	1.19	0.96	0.78	0.63	0.51
4.5	1.6	1.30	1.05	0.85	0.69	0.56
5.0	1.73	1.40	1.14	0.92	0.75	0.60

單位：mg/kg；資料來源：郭鴻裕，2011

表 1-4. 秈稻品系土壤與糙米鎘含量關係預測

Soil Cd (mg/kg)	soil pH						
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
0.5	0.76	0.62	0.51				
1.0	1.28	1.05	0.86	0.71	0.58		
1.5	1.74	1.43	1.17	0.96	0.79	0.65	0.53
2.0	2.16	1.78	1.46	1.20	0.98	0.81	0.66
2.5	2.56	2.10	1.73	1.42	1.16	0.95	0.78
3.0	2.94	2.42	1.98	1.63	1.34	1.10	0.90
3.5	3.31	2.71	2.23	1.83	1.50	1.23	1.01
4.0	3.66	3.00	2.47	2.02	1.66	1.36	1.12
4.5	4.00	3.28	2.70	2.21	1.82	1.49	1.22
5.0	4.33	3.56	2.92	2.40	1.67	1.61	1.33

單位：mg/kg；資料來源：郭鴻裕，2011

表 1-5. 台中市烏日區同安段土壤及稻米鉛含量調查結果

表土鉛含量 (mg/kg)	裡土鉛含量 (mg/kg)	稻米鉛含量 (mg/kg)
98.10	64.90	1.19
90.80	41.10	0.92

資料來源：環保署土基會，營運中含鉛製程事業之土壤
污染潛勢調查計畫，期末報告。

表 1-6. 台中市霧峰區土壤栽種小白菜含鎘、鉛檢測結果

類別	Cd	Pb
土壤	0.80	33.0
小白菜食用部位	0.33	0.62

資料來源：程淑芬，2011。

隨著石化原料的日漸耗竭，新能源的開發是全世界共同努力的目標，隨著日本福島核災事故的慘痛教訓，世界各國之能源政策不再以發展核能為目標。開發安全、綠色及環境友善的再生能源將是未來的發展重點。台灣能資源短缺，大多仰賴進口，面對全球性的石化能源枯竭問題，必須更積極開拓新的替代能源。綠

能作物所提供之生質能源是一種綠色、環境友善的再生能源，目前世界已有相當多的國家積極投入開發。台灣早期以農立國，近年在行政院農委會的推動下也開始著手進行能源作物的栽種試驗。台灣可耕地資源有限，綠能作物的推動發展未來勢必將會對糧食作物的生產、需求及價格帶來相當大的衝擊。因此針對不適合栽種食用作物之高重金屬含量農地若能結合綠能作物推動植生復育技術不僅可提供更多綠能作物產量，也可以以更經濟有效率的綠色整治方法達到污染土壤整治的目標。

1-2 計畫目的

本研究選擇適合台灣氣候條件生長之七種富含生質能源之作物包括：玉米、甘藷、甘蔗、大豆、花生、油菜及向日葵進行重金屬鉛污染土壤現地植生復育試驗，研究重點與目的包括：(1).七種能源作物對重金屬鉛污染土壤之適應能力以及各部位對重金屬鉛之累積吸收能力，評估適合鉛污染土壤之最適植生復育能源作物；(2).植生季節及植生次數對作物吸收重金屬能力之影響，做為評估植生復育整治所需時間以及整治成效之依據。

第二章 研究方法與過程

2-1 研究方法概述

本計畫選擇富含生質能源的七種本土常見作物，包括玉米、甘藷、甘蔗、大豆、花生、油菜及向日葵進行植生試驗，其中向日葵、大豆及油菜三種能源作物為目前行政院農委會配合我國發展生質柴油政策鼓勵南部休耕、種植綠肥作物之農地進行栽種試驗所選擇之能源作物(賴，2007)。此外依前一年度執行研究發現，鬼針草為相當具有發展植生復育潛力之植物，因此本計畫額外再增加鬼針草之栽種試驗。現地試驗場址經實地現勘測量後，確定可供植生栽種試驗面積大約在 300 平方公尺左右，規劃每種作物栽種試驗面積約 6~10 平方公尺。因植生復育整治成效非在短時間內能立即見效，且重金屬與土壤之間有不同之鍵結型態，植物對不同鍵結型態重金屬的吸收效率會有差異，以短短一、二輪栽種試驗結果來推估植物對重金屬吸收能力，藉以評估植生復育所需時間及成效難以具有代表性。因此本研究計畫將藉由長期的現地植生試驗，分析不同季節、不同栽種梯次之植物對重金屬的吸收能力變化，並分析土壤中重金屬鉛之全量及鍵結型態變化，釐清植生復育整治之效率模式，做為植生復育整治成效評估及後續應用推動之參考。本計畫為第一年植生試驗，執行工作內容包括：[1].整地及土壤物理、化學特性及鉛含量量測；[2].能源作物植生整治栽種試驗；[3].植生整治成效測定及評估；[4].重金屬鉛在生質能源原料中之含量分析，以及對環境污染潛勢評估。各部份之研究執行方法與步驟詳述於後續各節中。

2-2 場址概況

本現地試驗計畫場址位於南投市牛運堀段 28-15 地號，土地所有人為張國展先生，依地籍謄本記載 28-15 地號土地面積 675 平方公尺。場址主要污染源自鄰近的陶瓷工廠，過去因廢棄之含鉛釉料處理不當造成土壤鉛污染。於民國 91 年

7 月 31 日本場址已被環保署公告為土壤污染控制場址。場址栽種試驗前情況如圖 2-1 照片所示，左上方照片為站立於相鄰之 28-1 地號邊界，由南往北方向所看到的 28-15 地號場址全景，北方地勢突起處地面為水泥鋪面，因此能提供本計畫使用之土地為前面區塊，面積約 300 平方公尺；右上方照面為站立於 28-14 地號往西方向所看到的試驗場地全景，目前現地地面長滿雜草，無任何建物，西方檳榔園為相鄰的 32-6 地號；下方兩張照片為本團隊於民國 100 年 9 月 8 日前往現地進行土壤鉛污染調查採樣情形，照片中背景方向為 28-14 地號，與場址距離約 10 公尺左右有一排民宅。



圖 2-1. 現地試驗場址現況照片(拍攝日期：民國 100 年 9 月 8 日)。左上方照片為站立於相鄰之 28-1 地號邊界往北所看到的 28-15 地號場址全景；右上方照面為站立於 28-14 地號往西所看到的試驗場地全景；下方兩張照片為本團隊於 9 月 8 日前往現地進行土壤鉛污染調查採樣情形，距離本場址約 10 公尺左右有一排民

宅。

本研究團隊在 100 年 9 月 8 日進行試驗場址現勘時針對本計畫擬使用之場址區塊，以 2 × 2 公尺網格進行土壤採樣，佈點位置如圖 2-2 所示，採樣深度在 0~10 公分左右，樣品經風乾、磨碎後以 XRF 篩測結果如表 2-1 所示，試驗區塊 Pb 濃度分布大約在 5000~8000 mg/kg 之間，濃度分布由西北朝東南往 28-1 地號方向有稍微略減情形，不過大致看來仍屬相當均勻。

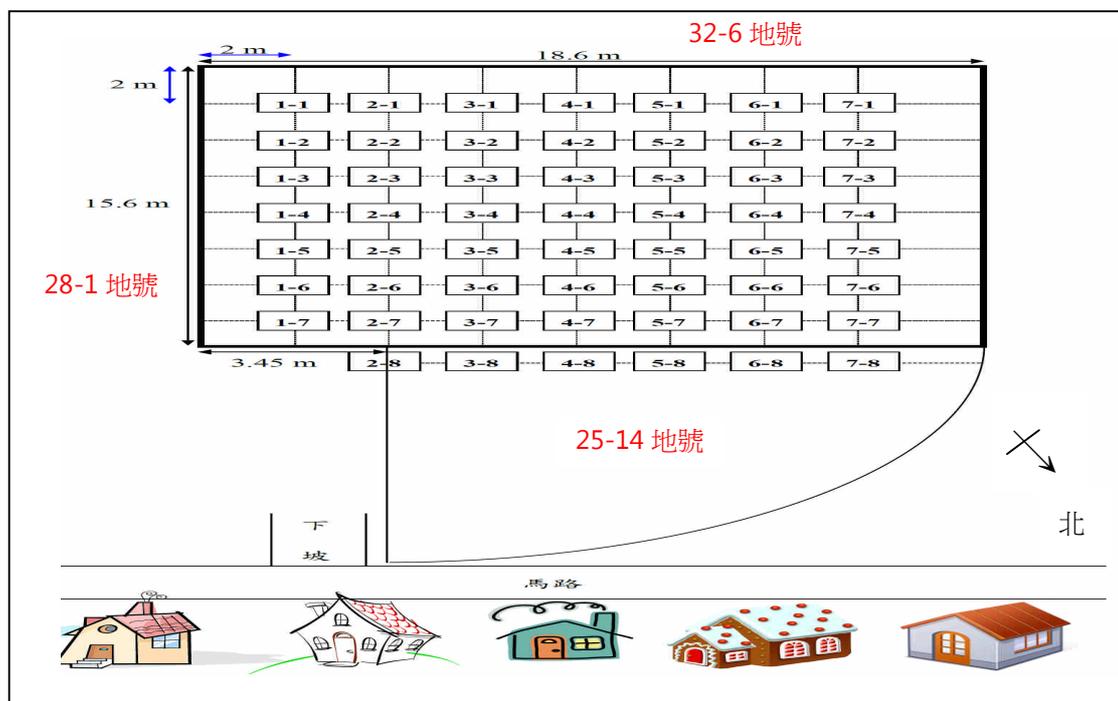


圖 2-2. 現地試驗場址現況配置及土壤採樣佈點位置圖

表 2-1. 現地試驗場對應圖 2-2 採樣點之鉛含量以 XRF 測定結果

採樣點	1	2	3	4	5	6	7
1	6017	6004	6551	6616	6754	7015	7289
2	5822	6118	6579	6420	7197	7009	7213
3	6045	5966	6222	6645	6607	7107	7604
4	5376	5985	6013	6309	6875	7007	7238
5	5753	5678	6024	6466	6811	6990	7539
6	5604	5512	6071	6766	7106	7379	7687

7	5525	5664	6001	6969	7206	7492	8351
8	-	5609	5931	6912	7465	7616	7756

單位：mg/kg

2-3 整地方法

現地試驗場址栽種前雜草叢生，因此首先必須進行雜草清除及整地工作，本計畫以人工方式先清除地面所有雜草，從先前調查概略得知場址內鉛之濃度分布(如表 2-1 所示)還算相當均勻，鉛濃度有稍微從西北朝東南往 28-1 地號方向稍微略減情形，因此整地後將試驗場址切分成八塊，每一區塊種植一種作物，場地配置如圖 2-3 所示。

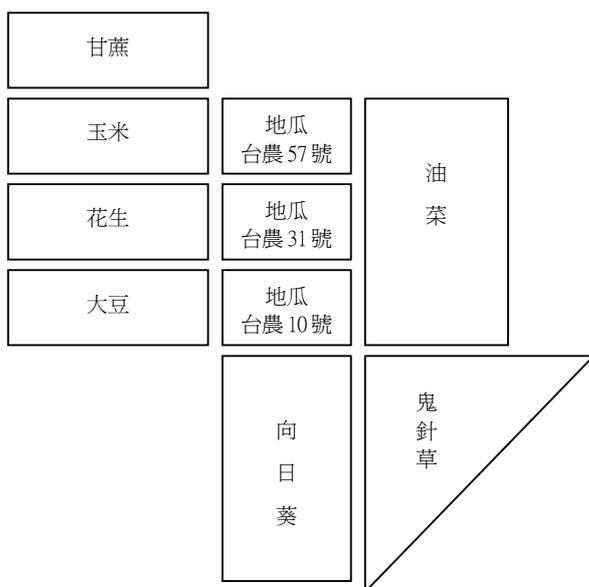


圖 2-3 植物栽種區塊配置圖

2-4 土壤物理、化學特性測定採樣與分析方法

完成整地與栽種區塊分隔後，接續進行土壤物理、化學特性量測，土壤物理特性主要分析土壤粒徑分布，藉以了解土壤質地；化學特性包括土壤 pH、CEC、有機質含量分析。土壤物理、化學特性分析每一區塊分析 2~3 個土壤樣品，採樣位置取區塊中心線分左、中、右平均分配採樣。粒徑分析方法採用濕式篩分搭配重力沉降方法；土壤 pH 量測依照 NIEA S410.62C 方法取 20 克土壤樣品加入 20 mL 試劑水攪拌混合後，測定水相層之 pH 值。土壤 CEC 測定參照 NIEA S202.60A 醋酸鈉方法，取 4 克土壤樣品先與 1M 醋酸鈉混合，使鈉離子和土壤中可交換的陽離子產生交換後，再以銨離子取代已被吸附的鈉離子。最後以原子吸收光譜儀測定被取代的鈉離子濃度計算出土壤中陽離子交換容量。土壤有機質含量分析採用重鉻酸鉀氧化法(李芳胤，陳士賢，2007)，取 0.5~1.0 克土壤樣品加入過量之重鉻酸鉀與土壤有機質反應，盛餘之重鉻酸鉀再以硫酸亞鐵銨溶液定量，以計算重鉻酸鉀消耗量，並推算土壤有機質含量。

土壤鉛含量測定，先以 XRF 進行篩測，甘蔗、玉米、花生及大豆栽種區塊每一種作物栽種區塊採取 6~18 個樣品，地瓜共種植三種品種，每一品種栽種區採六個點；油菜及向日葵採集 18 個點；鬼針草採 16 個點，採樣位置分配如圖 2-4 所示，採樣深度以表土 0~15 公分為主。另外每一區塊再採取兩個樣品，依照 NIEA S321.63B 王水消化法進行萃取，搭配原子吸收光譜儀進行鉛含量分析。另外，也進行鉛之鍵結型態分析，分析方法參考 Tessier *et al.* (1979)及歐盟 BCR (Communities Bureau of Reference)萃取方法，將土壤中的鉛分為五種型態，分別為可交換態(Exchangeable)、碳酸鹽鍵結態(Bound to Carbonates)、鐵錳氧化物鍵結態(Bound to Iron and Manganese Oxides)、有機物鍵結態(Bound to Organic Matter)及殘留態(Residual)。可交換態以 $MgCl_2$ 萃取；碳酸鹽鍵結態以 NaOAc 萃

取；鐵錳氧化物鍵結態以 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 萃取；有機物鍵結態以 HNO_3 、 H_2O_2 及 NH_4OAc 萃取；殘留態則以王水消化萃取。各萃取液同樣以原子吸收光譜儀進行定量分析。

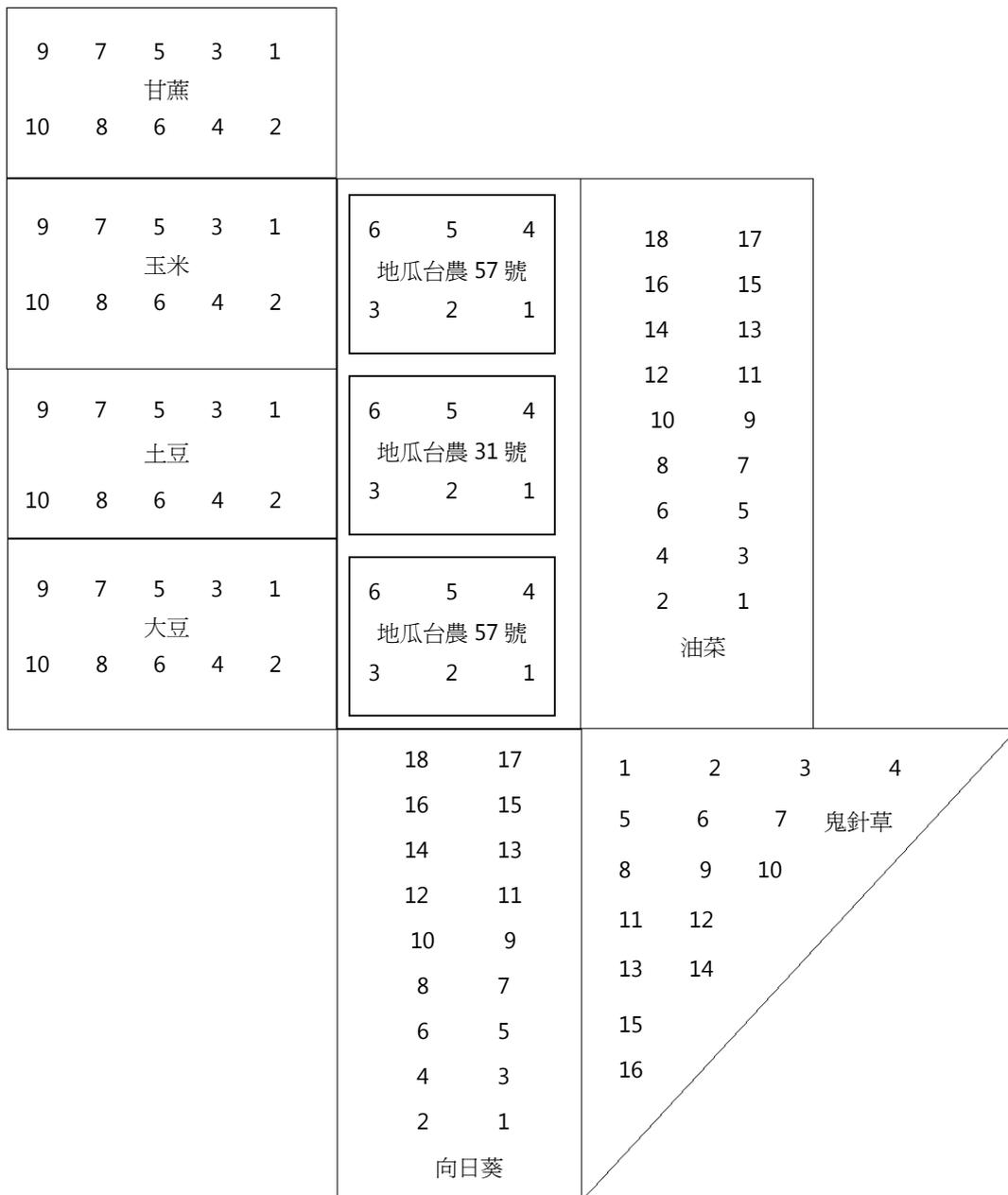


圖 2-4 土壤分析採樣位置圖

2-5 能源作物植生整治栽種試驗

本研究第一年選擇七種能源作物進行植生栽種試驗，七種作物之生長條件及種植方式不同，茲將七種作物之現地栽種試驗方法描述如下：

2-5.1 向日葵 (sunflower)

向日葵以播種方式種植，品種可分為榨油用、食用及觀賞用。本研究主要選擇榨油用品種，榨油用品種植株比較高，生命力很強健，幾乎全年都可以播種，全年都能開花，相當容易生長照顧。向日葵之種子選用農友牌之品種(*Helianthus annuus L.*)，種植之行株間距以 30x15 公分，規劃種植 5 行，每行可以種植約 20 株左右，總計每輪約栽種 100 株。向日葵從播種至成熟整個過程，可分為五個生育期，從播種至發芽大約為 8~11 天，發芽至花蕾出現大約為 33~35 天，花蕾出現至始花期大約為 17~27 天，第一朵花開花至最後一朵花開花大約為 6~8 天，最後一朵花至成熟期大約為 30~36 天，合計全生育期大約為 94~117 天。本研究於計畫執行期限內共成功完成二輪向日葵栽種試驗，第一輪播種時間為 100 年 12 月 23 日，於四月底完成第一輪栽種試驗；第二輪於 6 月 9 日進行栽種，但 8 月初因颱風暴雨淹水枯萎，於 8 月 13 日重新種植，至期末報告撰寫(10 月 15 日)時，向日葵正值開花時期，後續將待其種子成熟後採收分析。向日葵施肥依建議分二次施肥，選用農友牌台肥硝酸基特 4 號複合肥料進行施肥。第一次施用於種植前做為基肥，第二次於花蕾形成初期作追肥施用，本計畫將參照建議量施肥。雖然向日葵為相當抗旱植物，但適當水分澆灌有助於其生長，在沒有下雨情況下，本研究規劃每 2-3 天澆灌一次水分。

2-5.2 玉米 (corn)

國內目前種植玉米品種繁多，主要可分為穗粒黃色蜜珍品種及穗粒淡黃色華珍品種，蜜珍品種含糖份較高；但華珍品種生長強健，特別耐熱、耐濕及抗倒伏，也較具抗病毒病、葉斑病及螟蟲等較易栽種，因此本研究選擇先以穗粒淡黃色華珍品種進行栽種試驗。玉米以播種方式栽種，依據台灣中部氣候，玉米以春、秋兩季為最適播種期，春作以 2~3 月；秋作以八月中、下旬間播種最佳，從播種至成熟所需生長時間大約在 70~90 天之間。本研於執行期間一年內，順利完成二輪玉米栽種試驗，第一輪播種時間為 100 年 12 月 23 日，於五月底前完成第一輪栽種試驗；第二輪於 6 月 9 日進行播種，於 8 月底前已完成第二輪栽種試驗。玉米根係深廣，種植前土壤需加以翻耕、碎土、整平地面。玉米栽種方式，行距約 30 公分左右，株距約 20 公分，本研究規劃每輪種植玉米 5 行，每行可以種植約 12 株左右，總計每輪約栽種 60 株。玉米生育期間，適當灌水可促進生育，提高產量及品質。一般建議灌溉是在播種後 15 天後舉行，後每隔 15 天灌溉一次，吐絲期至乳熟期，則每隔 12~15 天灌溉一次，共灌溉 4~5 次，若下雨可視情況酌減灌溉次數，並注意田間排水。玉米在栽種期間以農友牌台肥硝磷基特 4 號複合肥料進行施肥，依建議量施用。

2-5.3 甘蔗 (sugar cane)

台灣甘蔗品種變遷繁多，依栽培用途可分為加工用俗稱「白甘蔗」及生食用俗稱「紅甘蔗」。白甘蔗蔗莖一般較紅甘蔗為細小，莖皮硬成清白或乳褐色，內皮維管素淡黃色，水分少而糖度高。紅甘蔗主要為生食用，水分多糖度較低。本研究同時進行紅、白兩種品種甘蔗進行栽種試驗。甘蔗全年均能種植，但以春、秋季為佳，春植在十二月至翌年五月間種植；秋植為在七月至十二月間栽種，秋植所需生長時間需時較長。甘蔗成熟需 12~18 個月，以 12 月到 3 月為成熟期品質最佳。本研究在 1 月初進行甘蔗之種植，預計在 12 月底前完成栽種試驗。甘蔗種植方式採用扦插法，取未經削皮而莖節帶有包芽的甘蔗，選切尾段每 3~4 節為 1 小段作插穗，土壤整地鬆碎後，將插穗淺埋入土，甘蔗包芽生長點每節左

右交復長出，種植時要將包芽擺左右兩側以利生長。種植行距約 60 公分，平均株距約 5~10 公分，此次共種植 5 行，約可種植 100 株。栽種後充分澆水，保持土壤濕潤，大約經 2 週即能萌芽成活。甘蔗幼蔗少灌溉，厚植根系；中蔗後應多灌溉，尤其旱季高溫時更需要；成熟期就要停止灌溉如需水過多，會降低其糖分。一般在幼蔗不施肥，於幼蔗萌芽整齊後才施肥。第二次施肥在培土之前，培土後使肥料埋於根部土壤中。本計畫選用農友牌台肥硝磷基特 4 號複合肥料進行施肥，依建議量施用。

2-5.4 甘藷 (sweet potato)

台灣種植之甘藷種類繁多，有些為葉菜甘藷以採收葉食用主為如台農 71 號；有些則以採收甘藷為主，如台農 57 號、72 號等。本研究接受嘉義農業試驗所之推薦選擇台農 10 號、31 號及 57 號三種品種進行栽種試驗，因場址原有台農 71 號品種地瓜生長，計畫栽種期間自行又再長出，因此第二輪栽種試驗增加台農 71 號。台農 57 號適合台灣春、秋作栽培，春作種植期為 1~4 月，收穫期約 6~10 月；秋作種植期為 8~11 月，收穫期為翌年 1~2。本研究擬於計畫期間一年內種植二輪，第一輪於 1 月 10 日栽種，已於五月 23 日採收；隨即於 5 月 23 日進行第二輪種植，預計在 10 月底進行採收分析工作。土壤鬆散有助於扦插種植以及甘藷塊根成長，插植前將土地耕犁 1~2 次，再用刈耙碎土整平後開溝作畦，以利排水。甘藷種植方式採扦插方法，插苗取自嘉義農業試驗所，取健壯藷苗長約 25~30 公分，以水平淺植法種植，插植行株距約 40x25 公分，每輪每一品種種植 4 行，約 20 株。肥料施用避免流失，分為二個時期施用：第一次在整地作畦時，選用農友牌台肥硝磷基特 43 號複合肥料進行施肥。第二次在插植後 30~40 天，選用農友牌台肥硝磷基特 4 號複合肥料，依建議量施用。田間管理包括中耕除草、翻蔓、灌溉等參考甘藷栽種方法進行(侯金日)。

2-5.5 花生 (peanut)

落花生又叫花生，開花後子房柄伸長入土中，發育成莢果一般又稱為土豆。為熱帶性作物，生育期間需要高溫，多日照及適當的降雨。台灣花生一年可分春、秋二作，春植時間在每年 1 月下旬至 3 月上旬；秋植時間在 7 月下旬至 8 月下旬。本研究於計畫執行期間內共種植二輪，第一輪在 12 月 30 日種植，可能受氣候因素或栽種技術影響未達成熟階段即枯死；第二輪在 6 月 9 日種植，生長情況良好，已於 9 月 20 日全部採收，完成栽種。花生所需生長時間春作約 120~140 天；秋作約 105~120 天。本研究選擇台南 11 號品種，以播種花生方式栽種，整地後即行開溝作畦播種，每畦寬 30 公分種植 1 行，每輪種植五行，種植株距約為 20 公分，每穴播種一粒花生，總計每輪約可種植 70 株左右。本研究依照建議方式施肥，選用農友牌台肥硝磷基特 4 號複合肥料，當基肥於整地前撒施，並予耕犁使與土壤充分混合。灌溉及排水影響落花生產量及品質，在始花期及盛花期間為最需要水份時期，若遇乾旱應灌溉 1~2 次；在大雨時注意田區積水排除。

2-5.6 大豆 (soybean)

大豆種植可分為春、夏、秋作，春作播種時間約 2 月中旬~3 月中旬；夏作為 6 月下旬~7 月下旬；秋作為 9 月中旬~10 月中旬。本研究於計畫執行期間內規劃種植二輪。本研究選擇台南 4 號品種，以播種方式種植，當葉片及葉柄枯黃脫落，莢果乾燥呈褐色或黃褐色時為收穫期。本研究第一輪在 12 月 23 日播種，期間陸續採樣，於 5 月 23 日全數採收完畢；第二輪在 6 月 9 日播種，於 8 月 13 日全數採收。大豆種植前須先將土壤犁鬆，然後開溝作畦播種，種植行株距約 30x20 公分，每輪約可種植 5 行，大約為 80 株。大豆是喜光、喜溫及需水較多作物，較適宜在雨量充沛、土壤濕潤地區栽培。大豆有根瘤菌可固定空氣中氮素，但適度適時施肥，有助於其生育及提高產量。本計畫選用農友牌台肥硝磷基特 43 號複合肥料進行施肥，依建議量酌予施用。

2-5.7 油菜 (*rape, Brassicae campestris*)

油菜品種從植株外形大致分為小油菜及大油菜 2 種，小油菜適應環境能力很強，具耐鹽、耐濕及耐旱特性，是本土的老品種。本研究以阿茵(F1)品種作為植生栽種試驗，種植面積約 10 平方公尺。以播種方式種植，因油菜種子細小，播種時可與適量的砂或堆肥混合，以利均勻播灑，播種後土壤應保持濕潤，以利種子發芽，油菜喜濕潤但忌浸水，宜有適當之水分以利生長。油菜一般栽種時間在 10~11 月間，對於較貧瘠土壤，依建議可施用含氮肥較高配方複合肥料，以促進生長，本計畫選用農友牌台肥硝磷基特 43 號複合肥料，酌量進行施肥。油菜全株黃熟時成熟，其角果會裂莢而將種子彈出。將收穫之油菜植株充分乾燥後用棍棒拍打即可使莢果裂開收取種子。在台灣一般油菜多在冬季開花結籽，本研究在 100 年 12 月 23 日進行第一輪播種，陸續採樣，於 4 月 13 日全數採收；第二輪油菜於 6 月 9 日進行栽種，但因 8 月颱風淹水影響而枯萎。後續因氣候過熱，不適油菜生長，將於 11 月再進行下一批次種植。

2-5.8 鬼針草 (*Bidens maximowicziana*)

鬼針草為一年生之草本植物，本計畫採集鬼針草種子進行栽種，在 12 月 23 日進行第一輪栽種，於 6 月 28 日全數採收；並同時進行第二輪種子播灑，於 10 月初完成採樣。鬼針草屬雜草，一般種植過程不需特別施肥照顧，一般環境下也不需特別補充水分，僅在初期種子播灑時進行澆水。

2-6 植體採樣與分析方法

每種作物於栽種前先於栽種區域採取土壤樣品進行重金屬鉛全量及鉛之鍵結型態分析，採樣佈點及分析方法如 2.1.4 節所述。各種作物於開花期或每隔 2~3 個月進行植體的採樣，每次以亂數隨機方式採取樣品數 3 個以上，分析植體各部

位之重金屬鉛含量情形。每種作物每一輪次栽種結束前，以亂數隨機方式採取樣品 3 組以上，將植體區分為根、莖、葉、種子等各部位，乾燥後量測其水分及重金屬鉛含量。另外也採取根圈土壤，分析重金屬鉛含量以及鉛之鍵結型態。透過統計分析，了解各種作物根圈土壤與植體各部位間重金屬之含量關係，並比較重金屬鉛鍵結型態的變化。每一輪植物採收後經翻拌整地，於第二輪植物栽種前，依 2.1.4 節方法佈點與採樣，再次進行重金屬鉛全量及鉛之鍵結型態測定，比較鉛全量及各種型態濃度變化情形。剩餘作物全部採收，取植體可供提煉生質能源部位，包括花生、大豆、向日葵子、油菜籽、甘藷塊根、玉米粒、玉米軸、玉米葉及甘蔗等，烘乾儲存，做為後續生質能源應用對環境品質影響研究材料。

第三章 主要發現與結論

3-1 現地土壤重金屬鉛含量與鉛鍵結型態分佈

本計畫針對場址進行土壤中鉛含量及鉛之鍵結型態分布情形調查。首先先以 XRF 進行篩測，佈點位置如圖 3-1 所示，其中甘蔗、玉米、花生及大豆分別採取 10 個點位；地瓜每一個品種栽種區塊採取六個點位，共 18 點位；油菜及向日葵栽種區塊分別採取 18 個點位；鬼針草區塊採取 16 個點位。測定結果如表 3-1 所示，場址鉛含量 XRF 篩測結果大致平均分布在 5500~6500 mg/kg 之間，以靠近東南側種植甘蔗、玉米、花生及大豆區塊濃度稍低，平均在 5500 mg/kg 左右；靠近西北側種植油菜及鬼針草之濃度稍高，平均在 6500 mg/kg 左右。整體而言，整個試驗場址之鉛濃度分布差異不算大，分布相當均勻。針對 XRF 測定樣品，每一區塊選取二個樣品以王水消化進行鉛含量分析，分析結果如表 3-2 所示，整體結果鉛的濃度分布與 XRF 篩測結果相當接近，以靠近東南側種植甘蔗、玉米、花生及大豆區塊濃度稍低；靠近西北側種植油菜及鬼針草之濃度稍高，整體看來王水消化分析濃度有稍微低於 XRF 測定結果。

各種植區塊鉛鍵結型態分析結果如圖 3-2 至圖 3-11 所示，種植甘蔗、玉米、花生及大豆區塊之鍵結型態分佈彼此間較接近，如圖 3-6 玉米區塊鉛之型態分佈情形，可交換態及碳酸鹽態之含量較平均分佈；其它種植油菜、地瓜、向日葵及鬼針草區塊之鍵結型態分佈較接近，如圖 3-7 向日葵區塊鉛之型態分佈情形，碳酸鹽態含量分佈明顯高出可交換態。整體而言，場址內所有區塊土壤鉛之鍵結型態分佈差異不大，都是以鐵錳氧化物鍵結態含量最多，佔 35~40 % 左右；其次為

有機物鍵結態，佔 24.2~28.2 % 左右；碳酸鹽鍵結態及可交換態分布差異稍大，分別在 12.0~21.1 % 與 7.5~16.1 % 之間；殘留態差異較小為 8.4~10.7 % 之間。

<table border="1"> <tr><td>9</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5">甘蔗</td></tr> <tr><td>10</td><td>8</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	9	7	5	3	1	甘蔗					10	8	6	4	2																																			
9	7	5	3	1																																														
甘蔗																																																		
10	8	6	4	2																																														
<table border="1"> <tr><td>9</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5">玉米</td></tr> <tr><td>10</td><td>8</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	9	7	5	3	1	玉米					10	8	6	4	2	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>5</td><td>4</td></tr> <tr><td colspan="3">地瓜台農 57 號</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	6	5	4	地瓜台農 57 號			3	2	1	<table border="1"> <tr><td>18</td><td>17</td></tr> <tr><td>16</td><td>15</td></tr> <tr><td>14</td><td>油</td><td>13</td></tr> <tr><td>12</td><td>11</td></tr> <tr><td>10</td><td>9</td></tr> <tr><td>8</td><td>菜</td><td>7</td></tr> <tr><td>6</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	18	17	16	15	14	油	13	12	11	10	9	8	菜	7	6	5	4	3	2	1				
9	7	5	3	1																																														
玉米																																																		
10	8	6	4	2																																														
6	5	4																																																
地瓜台農 57 號																																																		
3	2	1																																																
18	17																																																	
16	15																																																	
14	油	13																																																
12	11																																																	
10	9																																																	
8	菜	7																																																
6	5																																																	
4	3																																																	
2	1																																																	
<table border="1"> <tr><td>9</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5">花生</td></tr> <tr><td>10</td><td>8</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	9	7	5	3	1	花生					10	8	6	4	2	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>5</td><td>4</td></tr> <tr><td colspan="3">地瓜台農 31 號</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	6	5	4	地瓜台農 31 號			3	2	1																									
9	7	5	3	1																																														
花生																																																		
10	8	6	4	2																																														
6	5	4																																																
地瓜台農 31 號																																																		
3	2	1																																																
<table border="1"> <tr><td>9</td><td>7</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5">大豆</td></tr> <tr><td>10</td><td>8</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	9	7	5	3	1	大豆					10	8	6	4	2	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>5</td><td>4</td></tr> <tr><td colspan="3">地瓜台農 57 號</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	6	5	4	地瓜台農 57 號			3	2	1																									
9	7	5	3	1																																														
大豆																																																		
10	8	6	4	2																																														
6	5	4																																																
地瓜台農 57 號																																																		
3	2	1																																																
	<table border="1"> <tr><td>18</td><td>17</td></tr> <tr><td>16</td><td>15</td></tr> <tr><td>14</td><td>向日</td><td>13</td></tr> <tr><td>12</td><td>葵</td><td>11</td></tr> <tr><td>10</td><td>9</td></tr> <tr><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td>6</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	18	17	16	15	14	向日	13	12	葵	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>鬼針草</td></tr> <tr><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td>14</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	鬼針草	8	9	10		11	12			13	14			15				16			
18	17																																																	
16	15																																																	
14	向日	13																																																
12	葵	11																																																
10	9																																																	
8	7																																																	
6	5																																																	
4	3																																																	
2	1																																																	
1	2	3	4																																															
5	6	7	鬼針草																																															
8	9	10																																																
11	12																																																	
13	14																																																	
15																																																		
16																																																		



圖 3-1. 現地各種作物種植區位及重金屬鉛含量檢測採樣點位分佈圖

表 3-1. 現地栽種區土壤鉛含量 XRF 篩測結果

採樣點位	甘蔗	玉米	土豆	大豆	油菜	向日葵	鬼針草	地瓜(台農)		
								10 號	31 號	57 號
1	5779	5562	5524	5544	6329	6063	6220	5830	6012	6054
2	6161	5662	5466	5679	6517	5837	6590	6025	5762	5971
3	5632	5696	5635	5495	6411	6032	6787	5860	5697	5786
4	6017	5626	5463	5586	6628	6184	6793	5959	5954	6057
5	5587	5581	5439	5482	6444	6171	6269	6067	5953	5930
6	6002	5535	5436	5606	6513	6316	6777	5853	5704	5994
7	5564	5543	5518	5376	6305	5920	6825			
8	6056	5550	5420	5424	6274	6281	6874			
9	5684	5161	5260	5448	6598	6209	6534			
10	5695	5490	5630	5616	6385	6324	6629			
11					6432	6043	6789			
12					6411	6242	6461			
13					6395	6197	6570			
14					6507	6339	6871			
15					6460	6150	6696			
16					6498	6241	6463			
17					6465	6079				
18					6830	6169				
平均	5818	5541	5479	5525	6467	6155	6634	5932	5847	5965

單位：mg/kg

表 3-2. 現地栽種區土壤鉛含量王水硝化分析結果

植物區塊	採樣點位				平均	
甘蔗	2	6102.4 ± 44.7	7	5407.4 ± 82.4	5754.9 ± 353.8	
玉米	2	4959.2 ± 86.3	7	4715.7 ± 102.8	4837.4 ± 154.4	
花生	2	4885.6 ± 37.6	7	4408.4 ± 72.3	4647.0 ± 245.4	
大豆	2	5522.4 ± 176.8	7	4979.4 ± 147.7	5250.9 ± 316.6	
油菜	6	6381.7 ± 109.4	13	5757.8 ± 36.5	6069.8 ± 322.4	
向日葵	6	5628.8 ± 204.7	13	5847.5 ± 104.5	5738.2 ± 195.9	
鬼針草	7	6129.8 ± 267.9	13	6629.8 ± 88.6	6379.8 ± 319.8	
地瓜	台農 10 號	2	5971.4 ± 72.7	5	5910.4 ± 77.8	5940.9 ± 81.2
	台農 31 號	2	5905.8 ± 55.7	5	5962.2 ± 97.8	5934.0 ± 84.4
	台農 57 號	2	6050.7 ± 77.8	5	6118.6 ± 25.6	6084.6 ± 67.1

單位：mg/kg

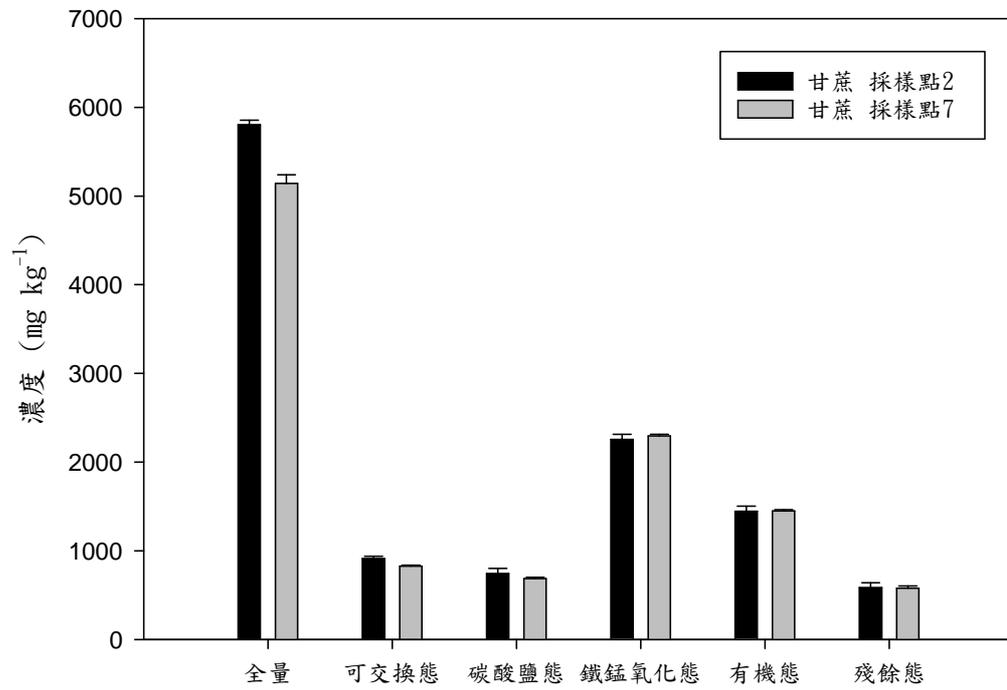


圖 3-2. 甘蔗種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

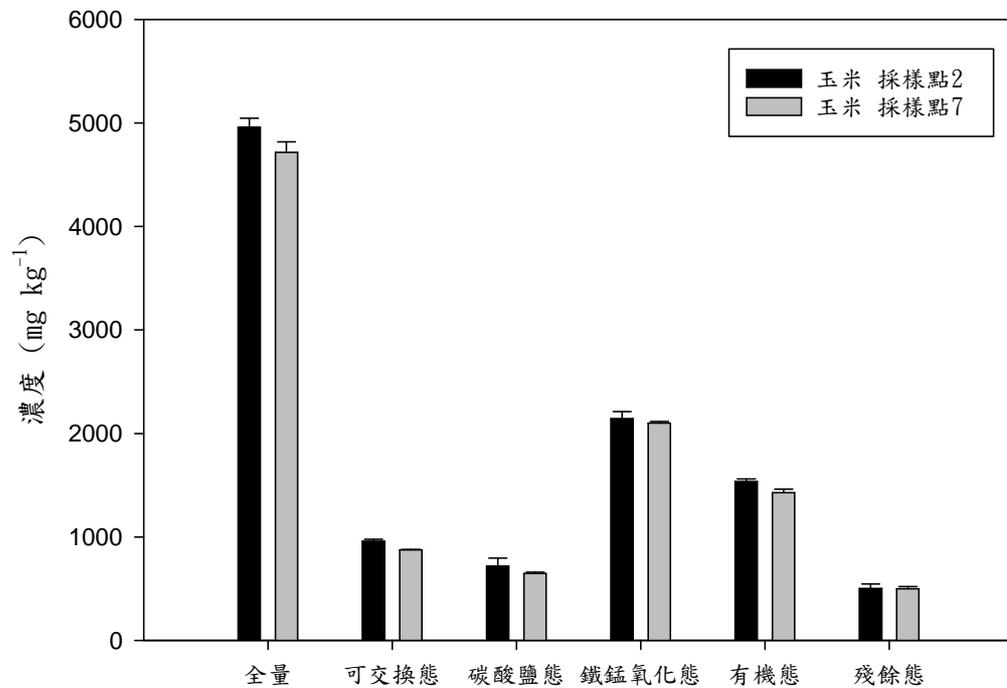


圖 3-3. 玉米種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

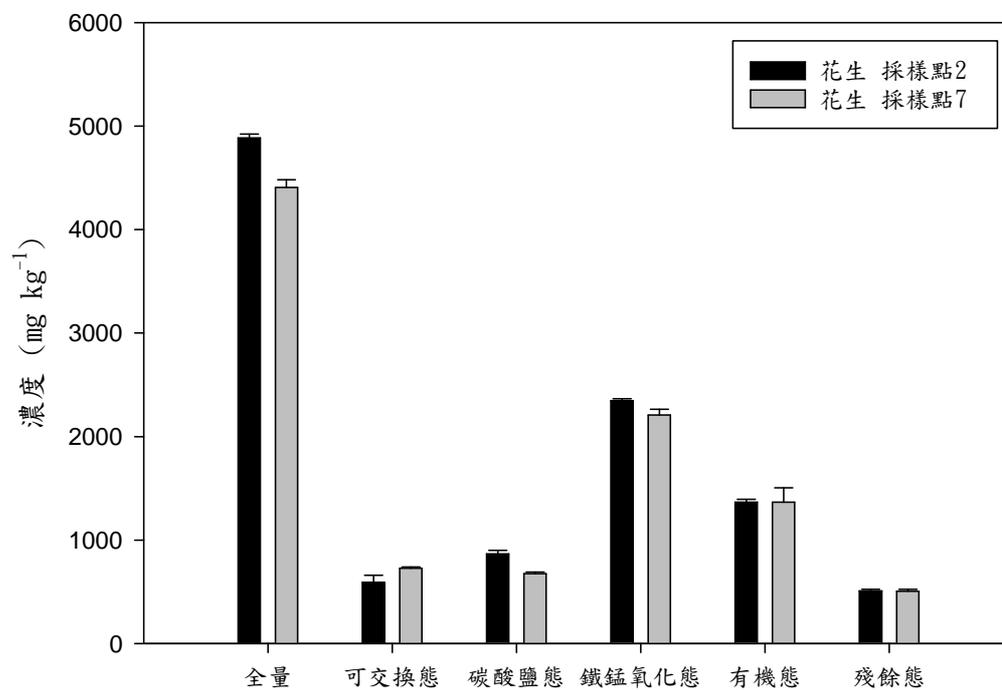


圖 3-4. 花生種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

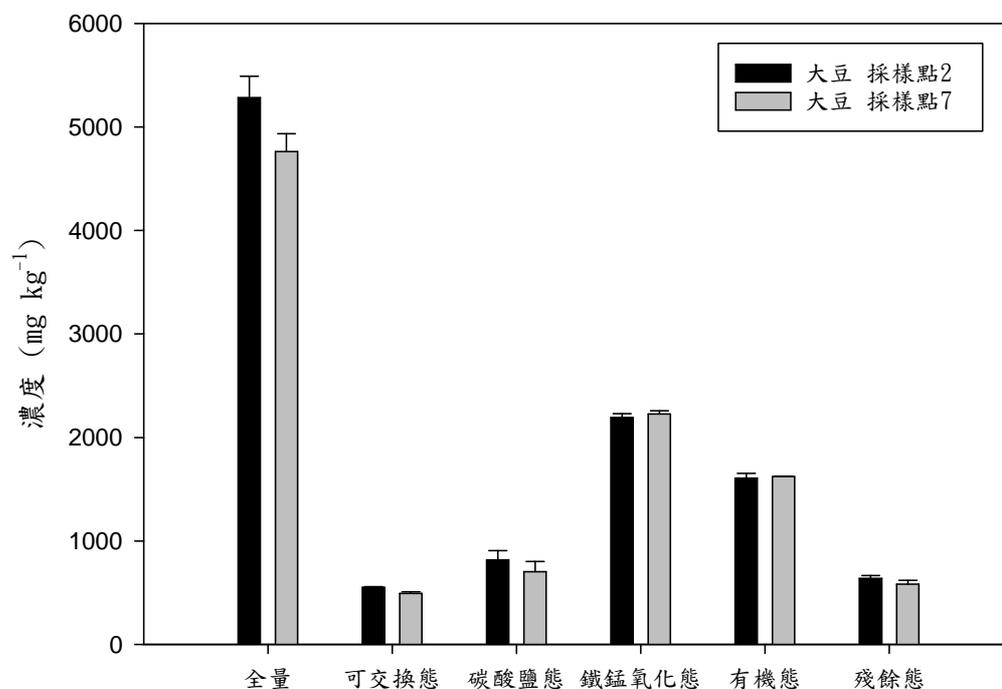


圖 3-5. 大豆種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

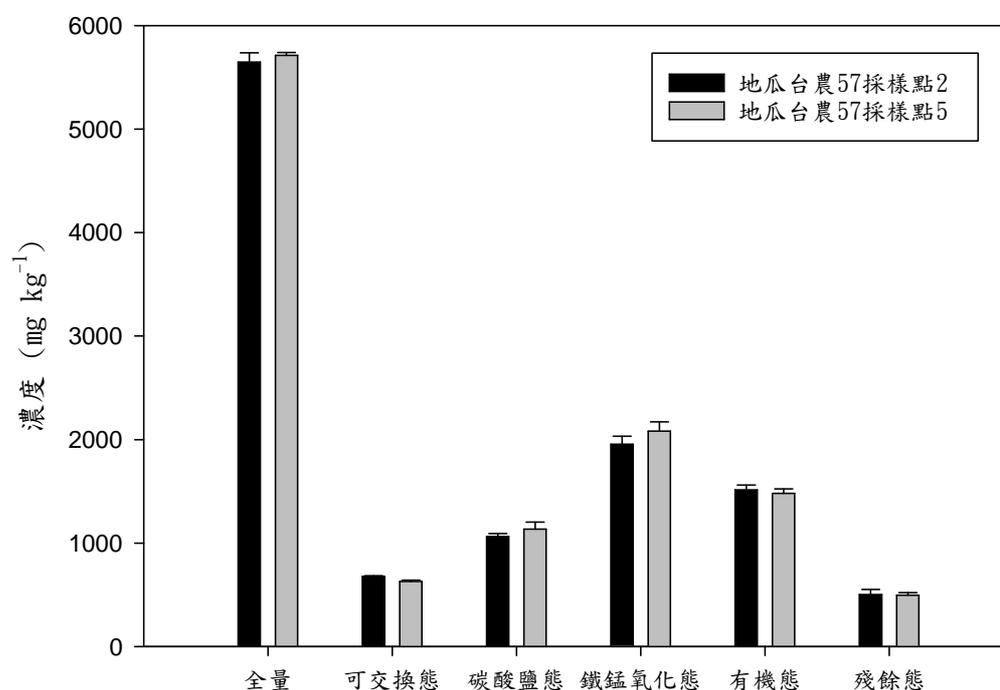


圖 3-6. 地瓜(台農 57 號)種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

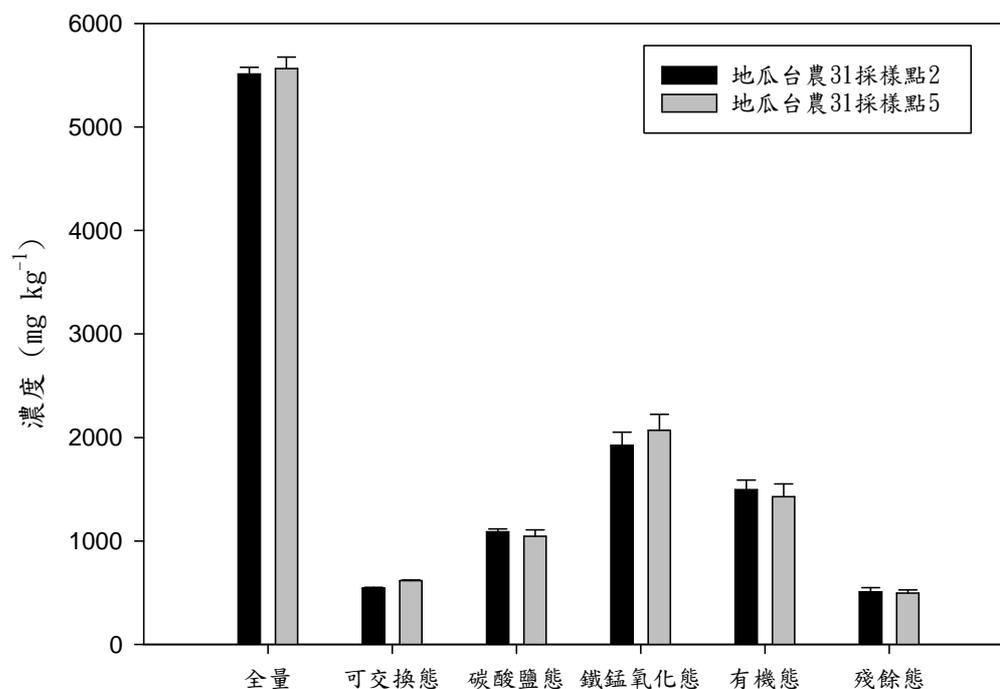


圖 3-7. 地瓜(台農 31 號)種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

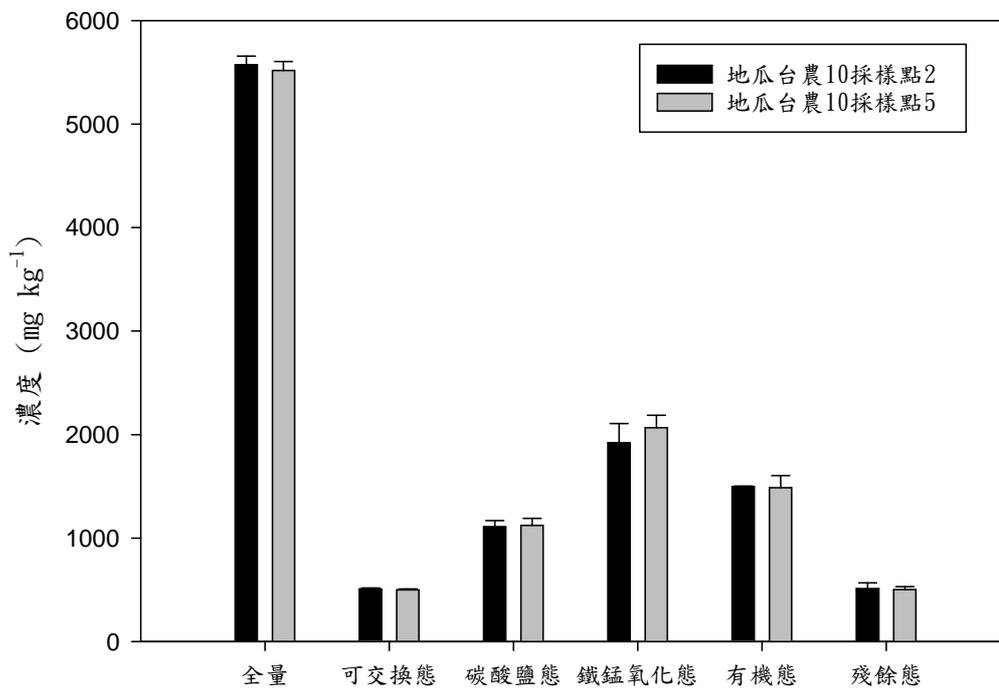


圖 3-8. 地瓜(台農 10 號)種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

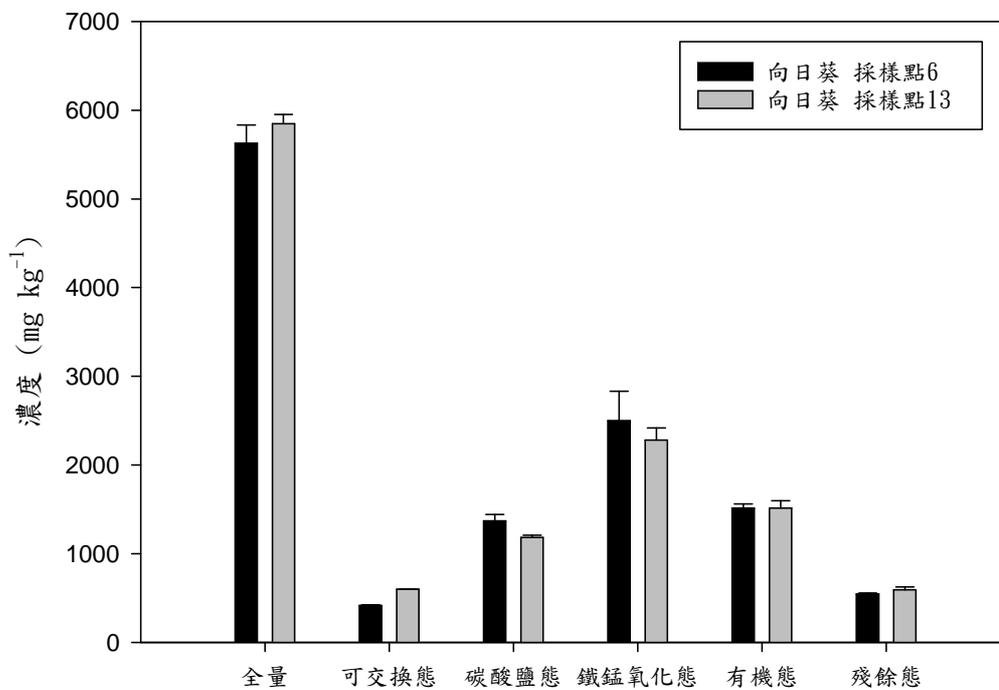


圖 3-9. 向日葵種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

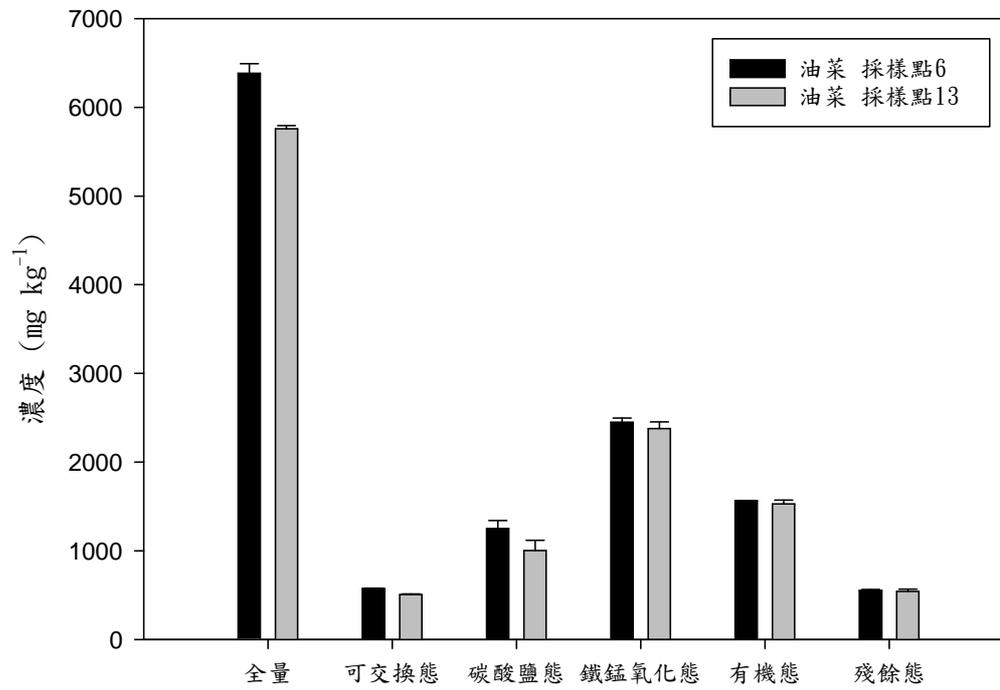


圖 3-10. 油菜種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

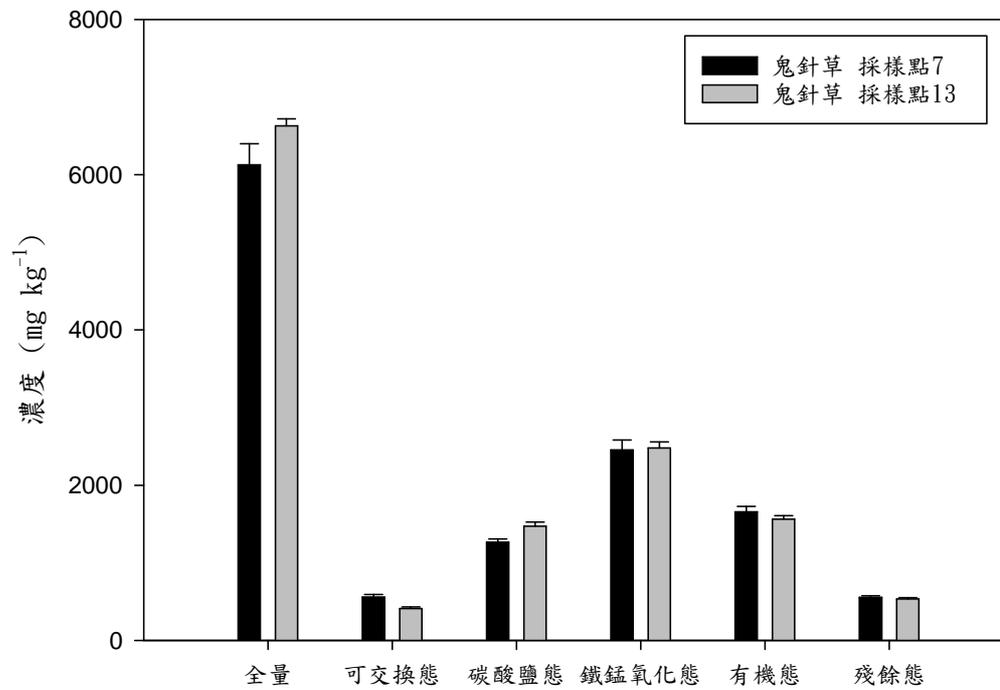


圖 3-11. 鬼針草種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

3-2 各種作物生長及對重金屬鉛蓄積情形

本計畫於整地後開始進行各種植物的栽種，第一輪於 100 年 12 月 23 日種植向日葵、油菜、玉米、大豆及鬼針草；12 月 30 日種植花生；101 年 1 月 6 日種植甘蔗；101 年 1 月 10 日種植地瓜。第二輪陸續於 100 年 5 月 23 日進行地瓜栽種；6 月 9 日進行玉米、大豆、花生、油菜及向日葵栽種，各種植物栽種過程之田間管理工作詳如附錄之工作日誌，各種植物之生長過程及植體採樣分析結果說明如下：

3-2.1 向日葵

向日葵第一輪於 100 年 12 月 23 日進行播種，圖 3-12 為向日葵栽種過程之現地情況。於 101 年 4 月 24 日進行採樣，栽種時間共約 120 天左右。共採集六個樣品，每個樣品由 3 株植株混合而成。將植體分為根、莖、葉、花、種子殼、種子部位，重金屬鉛含量分析結果如表 3-3 所示。各部位之鉛平均含量以鮮重計算，根部為 562.75 mg/kg；莖部為 68.36 mg/kg；葉部為 155.66 mg/kg；花瓣部位為 11.27 mg/kg；種子殼為 4.79 mg/kg，對於可提煉生質能的種子內部為 2.02 mg/kg。以根部累積的濃度最高，其次依序為葉 > 莖 > 花 > 種子殼 > 種子內部。植株間對鉛累積的差異性，根部的標準偏差達 292.89 mg/kg；葉部為 59.69 mg/kg；莖部為 21.20 mg/kg。

從栽種過程發現，向日葵在本污染場址中之生長情況相當良好，應可做為本場址的植生植物。部分植株生長情況特別好，所開出的花直徑大約可接近 30 公分左右；也有部分植株特別矮小但卻可同時開出五朵花。向日葵怕潮濕環境，第二輪栽種過程適逢八月初的颱風大雨，經過泡水後都枯萎，因此建議對於低窪易淹水區域不適合以向日葵進行植生復育。



圖 3-12. 向日葵栽種過程情景

表 3-3.向日葵植體(鮮重)鉛含量分析結果

樣品編號	根	莖	葉	花	種子殼	種子
1	533.32	86.79	180.50	21.52	9.44	2.45
	489.77	86.86	180.68	20.71	7.23	1
2	311.70	85.68	244.68	10.42	7.82	1.22
	320.36	82.55	269.60	9.73	5.56	1.22
3	214.12	36.57	77.96	6.88	5.39	4.78
	209.97	34.79	78.09	6.8	3.43	2.05
4	750.21	46.60	151.96	14.93	4.85	0.88
	748.23	44.09	152.97	14.69	5.09	2.87
5	1003.83	72.09	105.95	5.9	3.93	4.01
	1113.46	76.61	106.01	6.51	4.74	3.71
6	533.62	83.22	159.68	6.75	ND	ND
	524.43	84.44	159.85	10.41	ND	ND
平均	562.75	68.36	155.66	11.27	4.79	2.02
標準偏差	292.89	21.20	59.69	5.51	2.80	1.57

100 年 12 月 23 日栽種，101 年 4 月 24 日採樣。

單位：mg/kg，鮮重

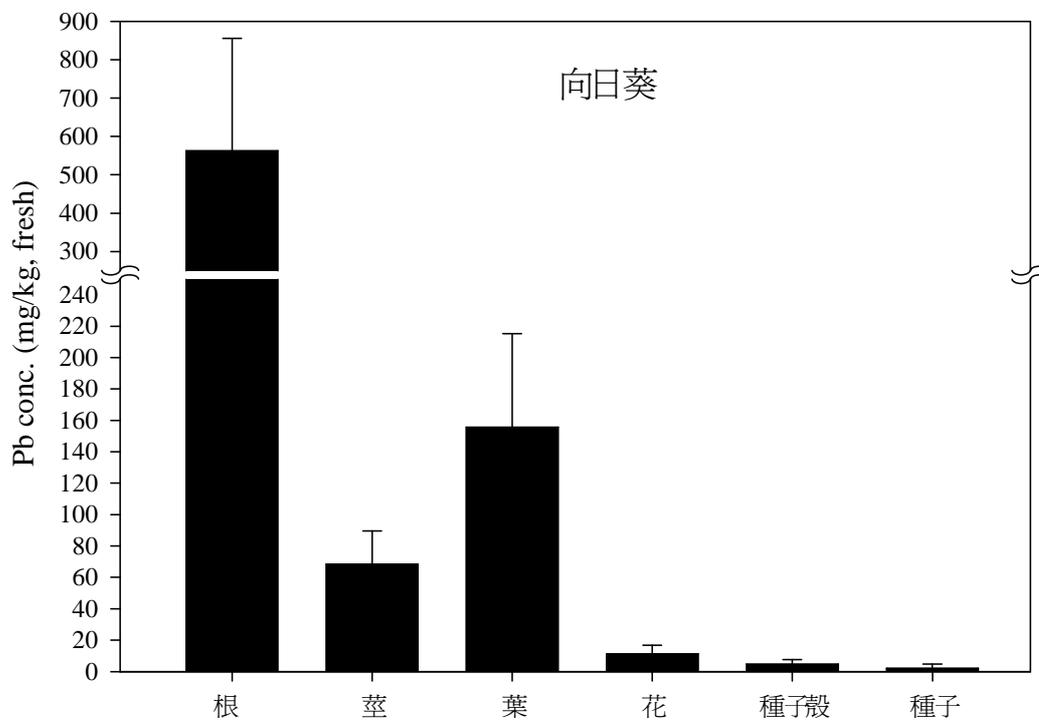


圖 3-13. 向日葵植體鉛含量分布情形。栽種時間 100 年 12 月 23 日，採樣時間 101 年 4 月 24 日。

3-2.2 玉米

本計畫所栽種的各種作物，以玉米的生長情況為最佳，雖經歷 8 月初的颱風淹水情形，仍能持續生長，不僅容易栽種管理，並且玉米的收成情況也相當豐碩。不僅植株外觀相當的壯碩，長出的玉米，玉米粒也非常飽滿。圖 3-14 為現地玉米栽種情景。玉米的栽種第一輪於 100 年 12 月 23 日進行播種；到 5 月初已達到生長極限，後續開始枯萎，栽種時間約 4 個多月。第二輪於 101 年 6 月 9 日進行播種，因夏季氣溫較高，生長較快，在 8 月底已達生長極限，栽種時間約不到 2 個半月左右。表 3-4 為現地栽種玉米植體鮮重各部位鉛含量分析結果，分析時每次採集 2 個樣品，每個樣品由 3 株植株混合而成，每個樣品分析二重覆。圖 3-15 為植體各部位鉛含量的分佈情形，鉛濃度依序以根高於葉、莖、玉米包葉、玉米軸及玉米粒。其中玉米粒鉛含量平均在初成熟階段約為 2.4~2.5 mg/kg 之間，有高於食用限量標準情形，但在更成熟時有濃度降低的情形出現，此情況後續可在持續觀察。

玉米在本場址生長狀況極佳且收成相當豐碩，唯一的困擾為疑似有老鼠會偷食成熟的玉米(如圖 3-14 所示)，此為本場址須要克服的問題。而此一現象也反映出，土壤污染的問題不僅僅影響人類的食用作物安全問題，也會影響生態系間其它生物的食物安全。從生態平衡的角度來看，土壤污染的生態風險也需審慎考量。



圖 3-14. 玉米栽種過程情景

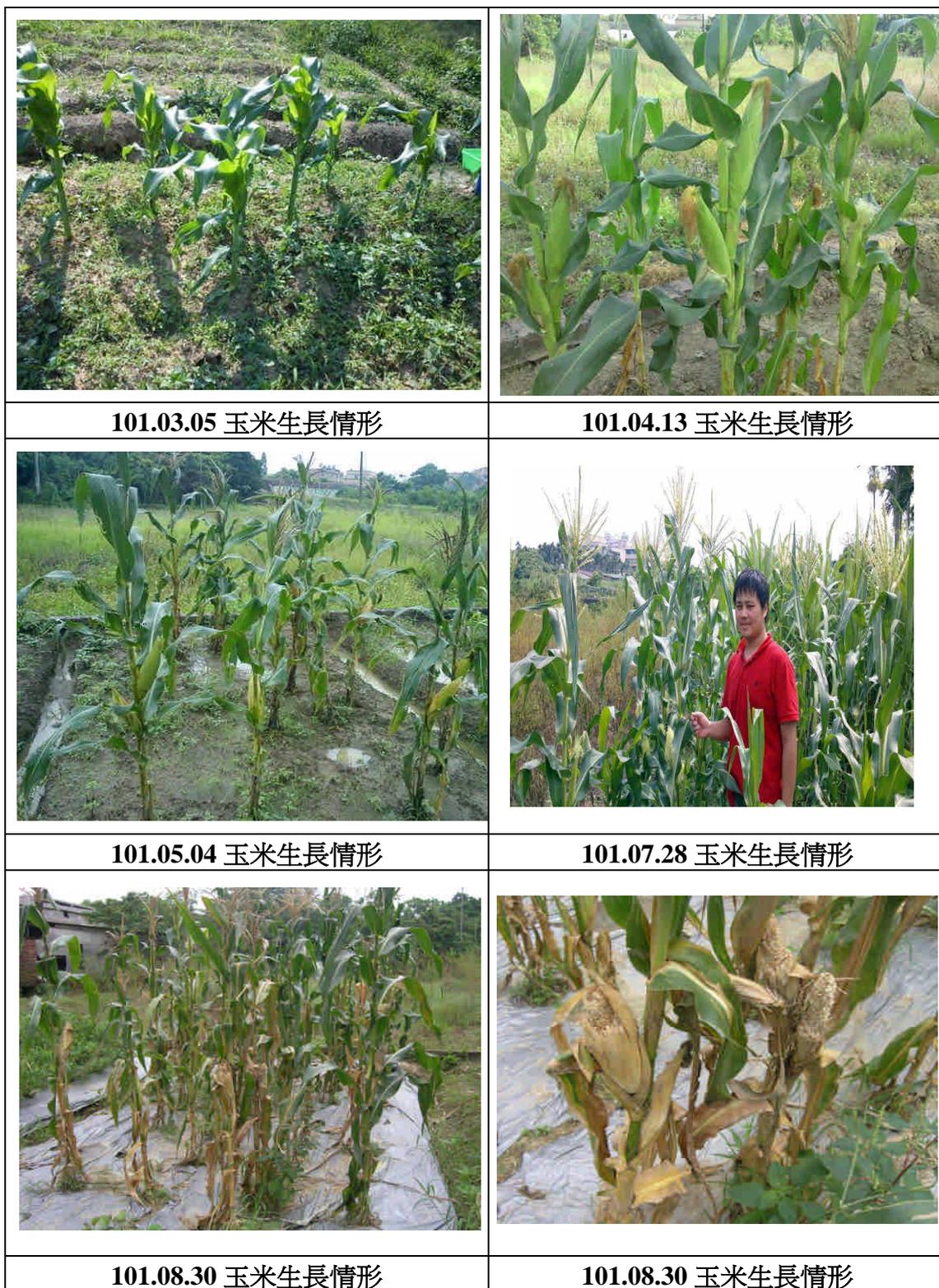


圖 3-14. 玉米栽種過程情景(續)

表 3-4. 現地栽種玉米植體(鮮重)鉛含量分析結果

栽種植物	玉米			
	第一輪(100.12.23 日)		第二輪(101 年 6 月 9 日)	
栽種時間	4/13	5/9	8/21	8/31
玉米-根	275.3±24.7	144.0±3.7	196.4±22.0	153.4±48.6
玉米-莖	31.3±10.3	39.8±2.2	47.9±2.7	47.2±1.0
玉米-葉	115.0±29.2	116.2±8.8	118.0±8.6	97.9±15.4
玉米-包葉	6.6±1.6	16.0±6.6	18.6±2.4	15.4±4.2
玉米-軸	5.0±1.1	4.8±1.1	8.2±0.0	4.8±1.5
玉米-粒	2.4±0.2	0.0±0.0	2.5±0.6	0.0±0.0

單位：mg/kg，鮮重

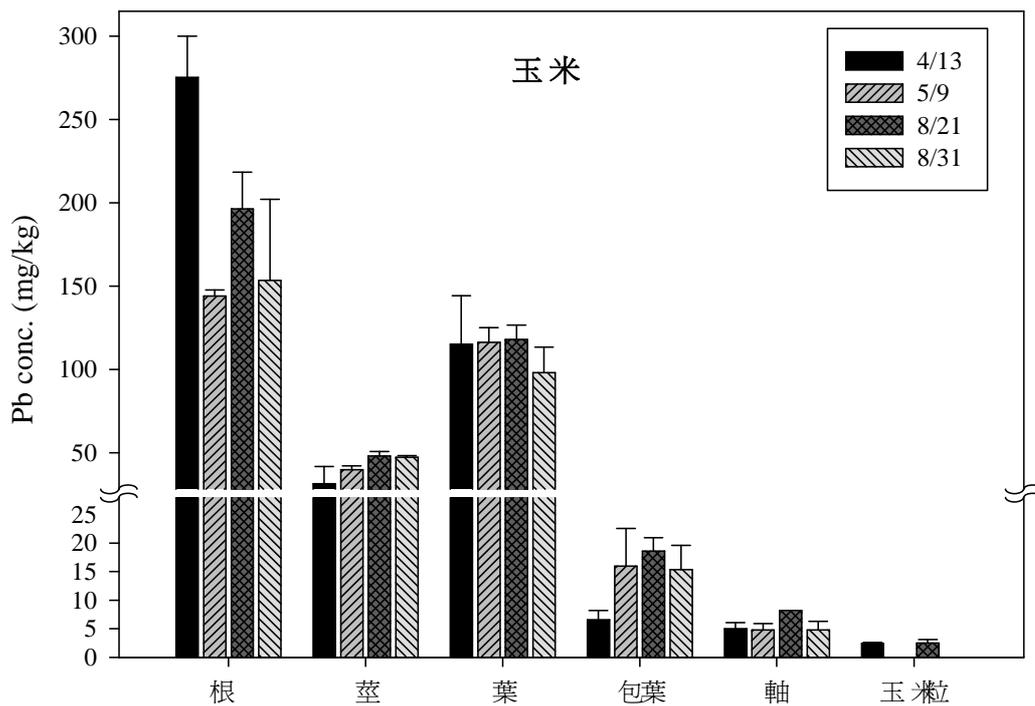


圖 3-15. 玉米植體鉛含量分布情形

3-2.3 甘蔗

甘蔗生長期非常的長，約需 1~1.5 年左右。本計畫於 101 年 1 月 06 日開始進行甘蔗種植，栽種過程之現地情況如圖 3-17 所示。甘蔗栽種情形相當順利，生長情況良好。本計畫分別在 8 月採集 3 個樣品、10 月份採集 2 個樣品進行分析，每個樣品分析 2 重覆，結果如表 3-5 及圖 3-16 所示。甘蔗目前仍持續穩定成長中，後續會持續分析植體的鉛含量變化。

表 3-5.甘蔗植體(鮮重)鉛含量分析結果(101 年 1 月 6 日栽種)

栽種植物	甘蔗	
	8/21	10/11
採樣日期	8/21	10/11
甘蔗-根	934.7±270.0	235.9±145.9
甘蔗-葉	55.4±27.1	31.1±13.1
甘蔗-皮	10.5±6.0	5.7±1.6
甘蔗-上段	17.0±1.1	2.2±0.5
甘蔗-中段	7.5±4.4	1.5±1.1
甘蔗-下段	10.7±1.4	2.9±0.9

101 年 1 月 06 日種植；

單位：mg/kg，鮮重

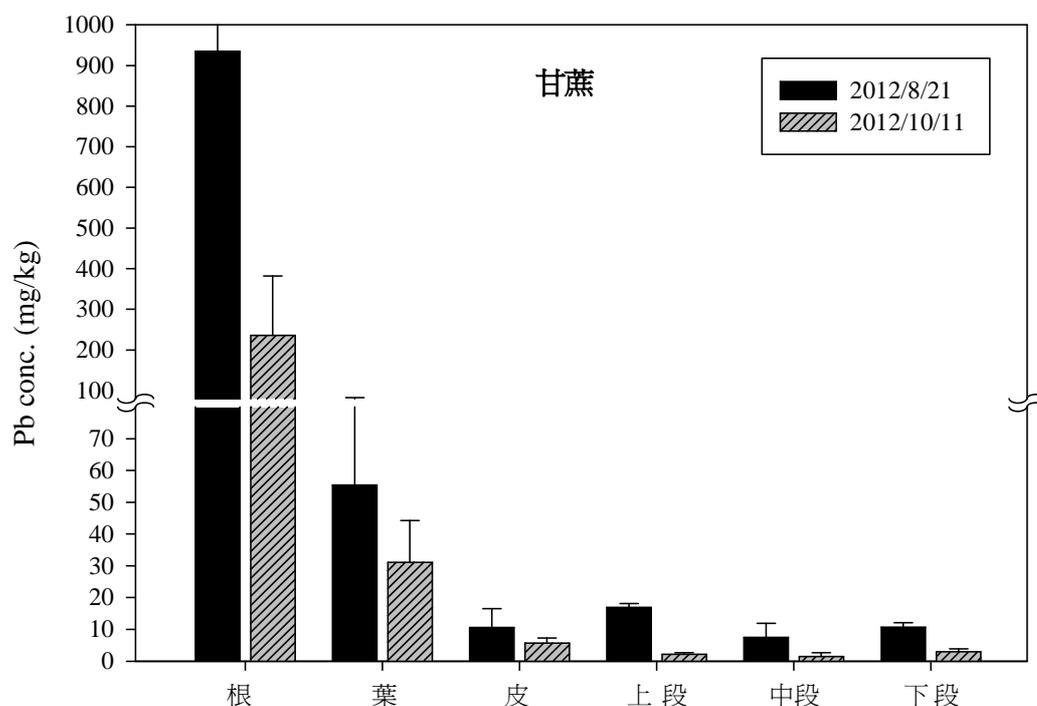


圖 3-16. 甘蔗植體鉛含量分布情形

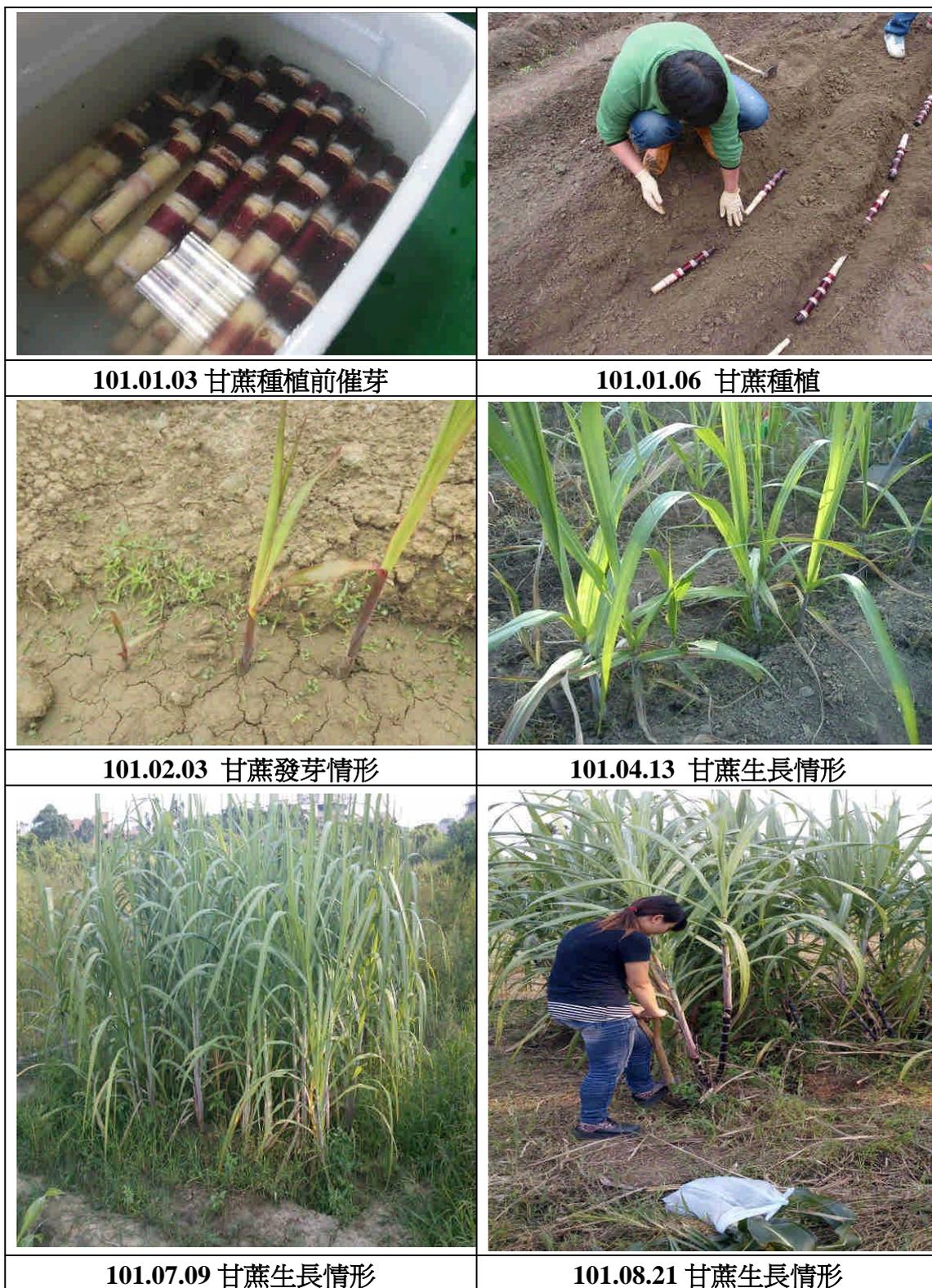


圖 3-17. 甘蔗栽種過程情景

3-2.4 甘藷

本計畫參考嘉義農業試驗所賴所長的建議選擇台農 10 號、31 號及 57 號地瓜進行栽種試驗，於 101 年 1 月 10 日進行扦插，扦插枝苗取自嘉義農業試驗所如圖 3-17 所示。圖 3-18 為各品種地瓜植株的生長情形，從照片可以很明顯的看出，在 4 月 20 日時以台農 31 號植株之生長狀況最好，台農 10 號及 57 號成長不多；在 5 月 23 日時，每種植株都可採集到地瓜。整體看來以台農 31 號不僅在植株及地瓜的產量上都較其它二種生長情況佳。各品種對鉛之累積吸收能力分析結果如表 3-6、3-7 及圖 3-20 所示。



圖 3-18. 台農 10 號、31 號、57 號及台農 71 號地瓜扦插植株



圖 3-19. 現地地瓜栽種情景

	
<p>101.05.23 台農 31 號生長情形</p>	<p>101.05.23 台農 31 號生長情形</p>
	
<p>101.05.23 台農 10 號</p>	<p>101.05.23 台農 10 號</p>
	
<p>101.05.23 台農 57 號</p>	<p>101.05.23 台農 57 號</p>

圖 3-19. 現地地瓜栽種情景(續)

表 3-6. 地瓜植體(鮮重)鉛含量分析結果(101 年 1 月 10 日栽種，5 月 23 日採樣)

地瓜品種	台農 10 號	台農 31 號	台農 57 號
根	832.3±209.0	620.9±79.7	670.4±170.1
地上部	123.8±28.2	142.9±11.4	185.6±8.8
地瓜	28.5±5.4	10.6±3.0	21.9±10.1

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

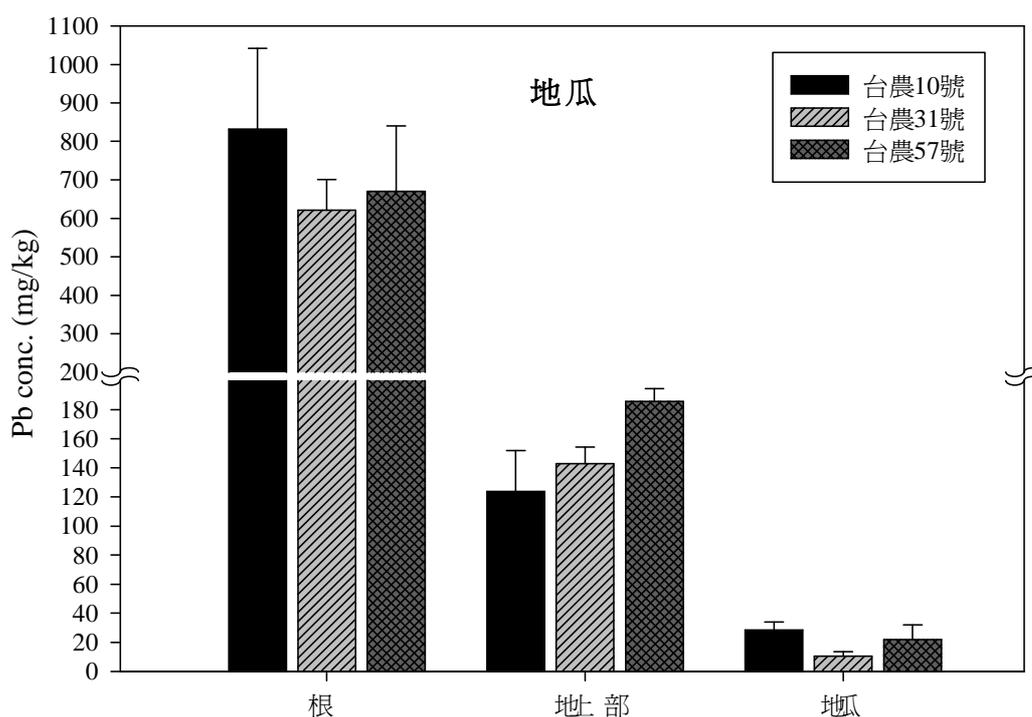


圖 3-20.地瓜各品種植體鉛含量分布情形

表 3-7.地瓜植體(鮮重)鉛含量分析結果(101 年 5 月 23 日栽種，8 月 21 日採樣)

地瓜品種	台農 10 號	台農 31 號	台農 57 號	台農 71 號
根	437.6±4.7	334.7±3.4	164.6±1.8	176.8 ±0.9
地上部	52.3±0.5	39.7±0.4	48.7±6.0	45.2±0.6
地瓜	-	-	-	-

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

3-2.5 花生

花生第一輪於 100 年 12 月 30 日進行播種。第一輪所栽種的花花生長狀況不佳，至 3 月份時幾乎所有植株都已枯死。於 101 年 6 月 9 日進行第二輪的播種，此次花生生長相當茂密旺盛如圖 3-22 所示。雖歷經 8 月初的颱風淹水情形，亦順利開花、結果。第二輪花生在生長期間共分析 3 次植體重金屬鉛含量，每次採集 3 個樣品，分析結果如表 3-8 及圖 3-21 所示。花生各部位重金屬鉛含量隨栽

表 3-8. 101 年 6 月 9 日栽種花生植體(鮮重)鉛含量分析結果

栽種植物	花生		
採樣日期	7/19	8/21	9/20
根	1342.6±330.4	1349.1±580.5	2100.4±794.9
地上部	121.6 ±14.8	139.8±98.4	249.6±45.0
花生殼	-	114.5±37.2	181.5±5.1
花生仁	-	2.2±0.9	3.6±1.9

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

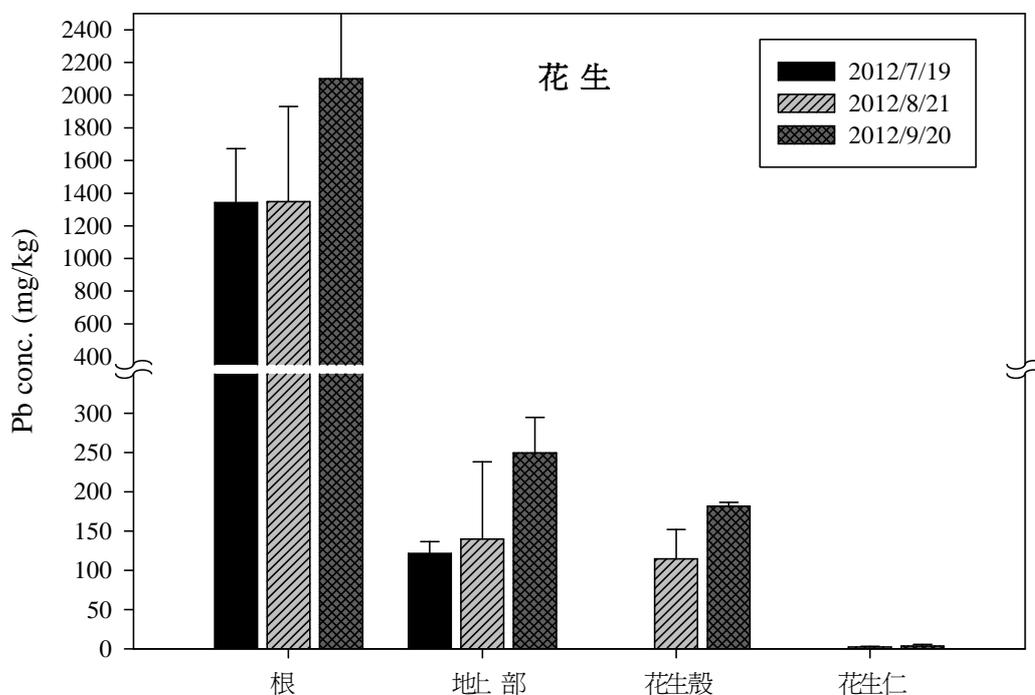


圖 3-21.花生植體鉛含量分布情形

種時間之增加有較高的累積濃度。至 9 月 20 日時累積栽種時間約 100 天左右，花生根部對鉛的累積濃度達 2100 mg/kg；地上部約 250 mg/kg；花生殼為 181.5 mg/kg；花生仁為 3.6 mg/kg，相較於非豆科植物有較高的情形。



圖 3-22.花生現地栽種情景

3-2.6 大豆

大豆第一輪於 100 年 12 月 23 日進行播種，第二輪於 6/9 日栽種。二輪植株



圖 3-23.大豆現地栽種情景

的生長情形都不是相當茂密，如圖 3-23 所示。第一輪分別於 4/13 及 5/9 日進行採樣分析；第二輪分別於 7/19 及 8/13 日進行採樣分析。二輪植體對鉛的累積濃度分析結果如表 3-9 及圖 3-24 所示。大豆植體鉛含量沒有隨栽種時間而增加的趨勢。各部位之鉛含量與同為豆科的花生都有較其它作物稍高的情形。根部之鉛含量最高可達 2052 mg/kg；地上莖葉部位最高為 689 mg/kg；豆莢為 690.1mg/kg；豆仁為 53.4 mg/kg。

表 3-9. 大豆植體(鮮重)鉛含量分析結果

栽種植物	大豆			
	第一輪		第二輪	
植物部位	4/13	5/9	7/19	8/13
採樣日期	4/13	5/9	7/19	8/13
根	2052.9±288.3	1049.2±3.1	1759.9±359.0	1177.9±818.9
地上部	688.9±0.4	566.6±1.3	283.6±80.2	277.1±107.8
豆莢	124.7±78	690.1±27.6	40.4±3.3	125.1±101.0
豆仁	31.8±2.8	53.4±2.9	-	8.5±6.8

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

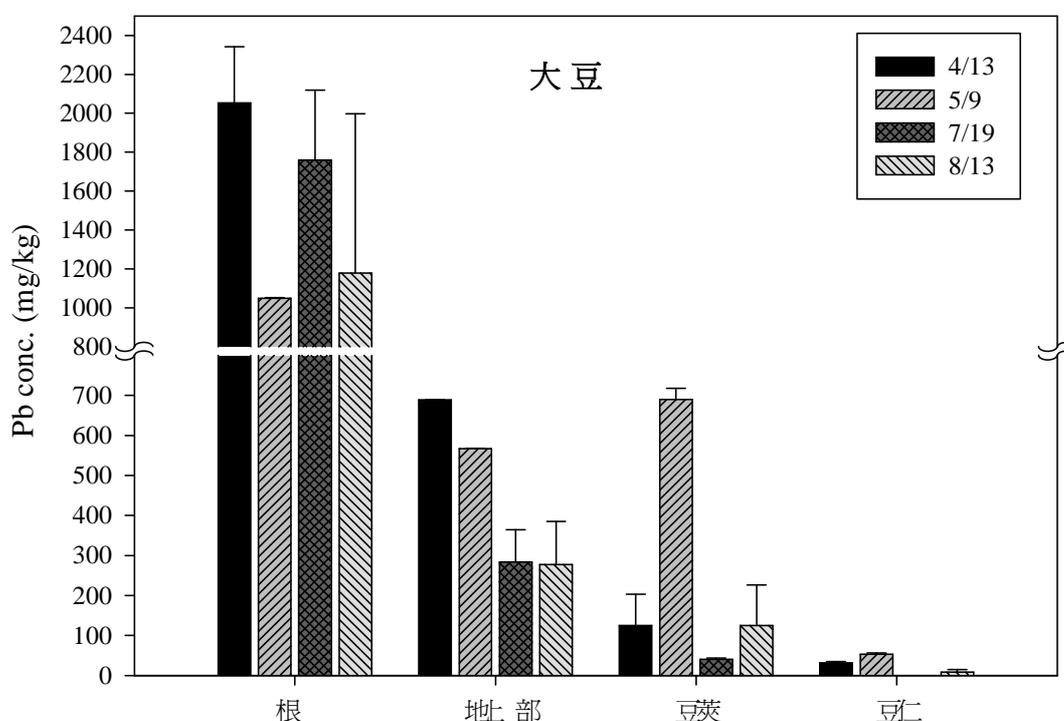


圖 3-24. 大豆植體鉛含量分布情形

3-2.7 油菜

油菜魚 100 年 12 月 23 日播種，2 月初開花，3 月初豆莢成形，4 月時油菜乾枯，油菜籽成熟，各階段情形如圖 3-26 所示。本計畫分別於 2/9 日、3/5 日及 4/13 日進行各階段的採樣分析，分析結果如表 3-10 及圖 3-25 所示。油菜生長情況良好，但地上部位對重金屬鉛的累積濃度不高，從 2/9 日到 3/5 日，各部位鉛的濃度下降，4/13 日時鉛濃度回升，其主要原因可能因油菜乾枯含水量低所造成。

表 3-10. 油菜植體(鮮重)鉛含量分析結果

栽種植物	油菜		
採樣日期	2/9	3/5	4/13
根	317.3±111.1	238.5±86.5	745.3±30.0
地上部	47.7±15.4	18.6±3.4	44.9±0.0
豆莢	-	3.4±8.5	30.4±0.3
種子	-	-	3.6±0.8

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

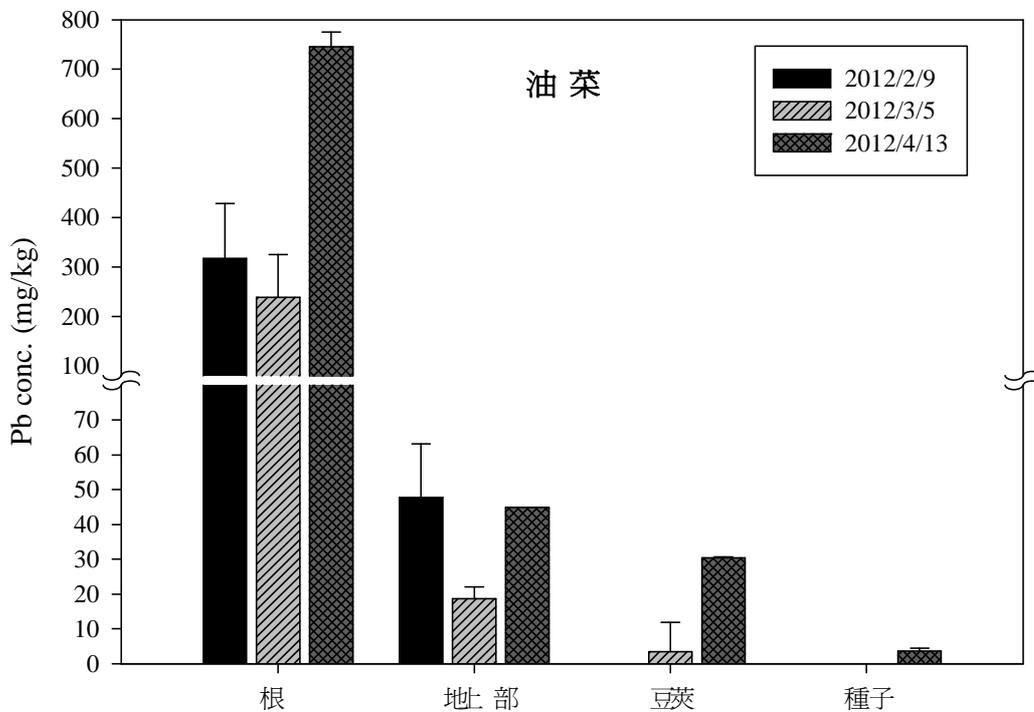


圖 3-25. 油菜植體鉛含量分布情形



圖 3-26.油菜現地栽種情景

3-2.8 鬼針草

鬼針草第一輪於 100 年 12 月 23 日進行播種，至 3/9 日時已開始開花，栽種情形如圖 3-27 所示。本計畫分別於 5/4 日及 5/24 日進行採樣分析，分析結果如表 3-11 所示。鬼針草地下部之鉛含量約在 625~780 mg/kg 之間；地上部約在 91.2~115.6 mg/kg 之間。鬼針草生長期間不需特別管理照顧，生命力旺盛。



圖 3-27.鬼針草現地栽種情景

表 3-11. 鬼針草植體(鮮重)鉛含量分析結果

栽種植物	鬼針草	
採樣日期	5/4	5/24
根部	625.4±50.4	779.2±419.3
地上部	115.6±3.0	91.8±2.7

單位：mg/kg，鮮重(n=3)

3-3 結論與建議

本研究選擇七種富含生質能源之作物包括：甘蔗、玉米、花生、大豆、地瓜、向日葵、油菜及鬼針草進行栽種試驗。從目前研究結果顯示，各種作物都能在本場址中順利的生長，除了大豆植株生長情況較矮小稀疏外，其它各種植物生長情況都相當壯碩、茂密，似乎都能克服鉛污染的問題。八種作物中，大豆與花生植體各部位對鉛的累積濃度有較其它植物高的情形，是否豆科植物對鉛有較高的蓄積能力，後續可持續觀察。

從目前初步的栽種試驗結果顯示，玉米、花生、地瓜、向日葵等幾種高能源作物在本場址之生長情況都相當良好，有做為污染場址植生作物的潛力，未來可朝向作為重金屬鉛污染土壤之生產作物發展，發揮污染土壤再利用的價值，除可生產生質能外，亦同步達到重金屬污染土壤植生復育的目的。

植生復育之成效非在短時間內可見效，本計畫確認各種能源作物在本場址之生長能力，未來須繼續了解植生過程中，各種植物吸收重金屬能力之變化趨勢，以了解植生復育之長期整治成效。後續也將嘗試以各種方式來促進各種作物對重金屬之吸收能力，以及提升作物之生質能產量，提升整治效率及污染土地再利用之經濟價值。

第四章 參考文獻

- 郭鴻裕，2011，台灣農田土壤重金屬管理與水稻安全，農地土壤重金屬污染整治策略講習會，農業試驗所。
- 環保署土基會，2011，營運中含鉛製程事業之土壤污染潛勢調查計畫，期末報告。
- 賴清意，2007，台灣地區生質柴油潛在供給量之研究-以台南縣學甲鎮種植能源作物為例，中興大學應用經濟學系所碩士論文。
- 曾啓清，光合細菌及菌根菌對植物修復技術處理土壤中重金屬(鎘、銅、鉛及鋅)影響性之研究，博士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系，2009。
- 張雅筑，以生質燃料及能源作物對遭受重油污染土壤進行植物修復之研究，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系，2007。
- 程淑芬、黃金源、陳盈伊、陳建銘，都市生活污水污泥再利用於土壤之風險討，第二十三屆中華民國環境工程年會土壤及地下水研討會，2011。
- Adriano, D.C., Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York, 2001.
- Alkorta, I., Hernandez-Allica, J., Becerril, J.M., Amezaga, I., Albizu, I., Onaindia, M., Garbisu, C., Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Rev. Environ. Sci. Biot.* 3, 55–70, 2004.
- Baker, A.J.M., Brooks, R.R., Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1, 81–126, 1989.
- Barocsi, A., Csintalan, Z., Kacsanyi, L., Dushenkov, S., Kuperberg, J.M., Kucharski, R., Richter, P.I., Optimizing phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by exploring plants' stress adaptation. *Int. J. Phytoremed.* 5, 13–23, 2003.
- Begonia, G.B., Comparative lead uptake and responses of some plants grown on lead contaminated soils, *J Miss Acad Sci* 42, 101–106, 1997.
- Blaylock, M.J., Salt, D.E., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B.D., Raskin, I., Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by

-
- soil-applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.* 31, 860–865, 1997.
- Brown, D.H., Slingsby D R, The cellular location of lead and potassium in the lichen *Cladonia rangiformis* (L.), *NewPhytol* 71, 297–305, 1972.
- Chen Y.X., Lin Q., Luo Y.M., He Y.F., Zhen S.J., Yu Y.L., Tian G.M., Wong M.H., The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere* 50, 807-811, 2003.
- Chen, Y., Li, X., Shen, Z., Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. *Chemosphere* 57, 187–196, 2004.
- Dirilgen, N., Effects of pH and chelator EDTA on Cr toxicity and accumulation in *LEMNA minor*. *Chemosphere* 37, 771–783, 1998.
- Davies, F.T., Puryear, J.D., Newton, R.J., Egilla, J.N., and Grossi, J.A.S., Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus*), *J. of Plant Physiology*, 158, 777-786, 2001.
- Duarte, B., Delgado, M. and Cacador, I., The role of citric acid in cadmium and nickel uptake and translocation, in *Halimione portulacoides*, *Chemosphere*, 69, 836-840, 2007.
- Grc̃man, H., Velinkonja-Bolta, Š., Vodnik, D., Leštan, D., EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity. *Plant Soil* 235, 105–114, 2001.
- Evanko, C.R. and Dzombak, D.A., Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Technology Evaluation Report, TE-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, pp. 23-24, 1997.
- Hashimoto, Y., Matsufuru, H., Sato, T., Attenuation of lead leachability in shooting range soils using poultry waste amendments in combination with indigenous plant species, *Chemosphere* 73, 643–649, 2008.
- Hong, P.K.A., Li, C., Banerji, S.K., Regmi, T., Extraction, recovery and biostability of EDTA for remediation of heavy metal-contaminated soil. *J. Soil Contam.* 8, 81–103, 1999.
- Hong, P.K.A., Li, C., Banerji, S.K., Regmi, T., Extraction, recovery and biostability of EDTA for remediation of heavy metal-contaminated soil. *J. Soil Contam.* 8, 81–103,
-

1999.

Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.R., Cunningham, S.D., Phytoremediation of lead contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ. Sci. Technol.* 3, 800–805, 1997.

Israr, M., Sahi, S.V., Promising role of plant hormones in translocation of lead in *Sesbania drummondii* shoots, *Environmental Pollution* 153, 29-36, 2008.

Jung, M.C., Thornton, I., Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead–zinc mine, Korea. *Appl Geochem* 11, 53-59, 1996.

Kos, B., Leštan, D., Influence of a biodegradable ([S,S]-EDDS) and nondegradable (EDTA) chelate and hydrogel modified soil water sorption capacity on Pb phytoextraction and leaching. *Plant Soil* 253, 403–411, 2003.

Li, H., Wang, Q., Cui, Y., Dong, Y., Christie, P., Slow release chelate enhancement of lead phytoextraction by corn (*Zea mays* L.) from contaminated soil-a preliminary study. *Sci. Total Environ.* 339, 179–187, 2005.

Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., A fern that hyperaccumulates arsenic, *Nature*, 409-579, 2001.

Madison, WI. Huang P.M. and Schnitzer M. (ed.), Soil Science Society of America, 1994.

Madrid, F., Liphadzi, M.S., Kirkham, M.B., Heavy metal displacement in chelate-irrigated soil during phytoremediation. *J. Hydrol.* 272, 107–119, 2003.

McBride, M.B., *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, USA, 1994.

Meers, E., Hopgood, M., Lesage, E., Vervaeke, P., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., Enhanced phytoextraction: in search of EDTA alternatives. *Int. J. Phytoremediat.* 6, 95–109, 2004.

Meers, E., Lesage, E., Lamsal, S., Hopgood, M., Vervaeke, P., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., Enhanced phytoextraction: I. Effect of EDTA and citric acid on heavy metal mobility in a calcareous soil. *Int. J. Phytoremediat.* 7, 129–142, 2005.

Mench M. and Martin E., Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea may*. L., *Nicotiana tabbacum* L., and *Nicotiana rustica* L.. *Plant and soil*, 137, 187-196, 1991.

-
- Miller, R.R., Phytoremediation. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. (GWRTAC)-Technology Overview Report TO-96-03, GWRTACO- series, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 1996.
- Mun, H. W., Hoe, A. L., Koo, L. D., Assessment of Pb uptake, translocation and immobilization in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) for phytoremediation of sand tailings, *Journal of Environmental Sciences* 20, 1341–1347, 2008.
- Nascimento, C.W.A., Amarasiriwardena, D., Xing, B., Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. *Environ. Pollut.* 140, 114–123, 2006.
- Niu Z X, Sun L N, Sun T H, Li Y S, Wong H., Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. *J Environ Sci*, 19(8): 961–967, 2007.
- Nortemann, B., Biodegradation of EDTA. *Appl. Microbiol. Biot.* 51, 751–759, 1999.
- Nowack, B., Environmental chemistry of aminopolycarboxylate chelating agents. *Environ. Sci. Technol.* 36, 4009–4016, 2002.
- Pulford, I.D., Watson, C., Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review, *Environment International* 29, 529– 540, 2003.
- Raskin I, Smith R D, Salt D E, Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Curr Opin Biotechnol*, 8, 221–226, 1997.
- Raskin, I., Smith, R.D., Salt, D.E., Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Curr. Opin. Biot.* 8, 221–226, 1997.
- Romkens, P., Bouwman, L., Japenga, J., Draaisma, C., Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils. *Environ. Pollut.* 116, 109–121, 2002.
- Rosselli, W., Keller, C., Boschi, K., Phytoextraction capacity of trees growing on metal contaminated soil. *Plant Soil* 256, 265–272, 2003.
- Saifullah, E. Meers, M. Qadir, P. de Caritat, F.M.G. Tack, G. Du Laing, M.H. Zia, EDTA-assisted Pb phytoextraction, *Chemosphere* 74, 1279–1291, 2009.
- Santos, F.S., Hernandez-Allica, J., Becerril, J.M., Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N., Garbisu, C., Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. *Chemosphere* 65, 43–50, 2006.
- Sharma, P., Dubey, R.S., Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*
-

17, 35-52, 2005.

Shen, Z.G., Li, X.D., Wang, C.C., Chen, H.M., Chua, H., Lead phytoextraction from contaminated soil with high biomass plant species. *J. Environ. Qual.* 31, 1893–1900, 2002.

Shibata, M., Konno, T., Akaike, R., Xu, Y., Shen, R., Ma, J.F., Phyto remediation of Pb contaminated soil with polymer-coated EDTA. *Plant Soil* 290, 201–208, 2007.

Sillanpaa, M., Oikari, A., Assessing the impact of complexation by EDTA and DTPA on heavy metal toxicity using Microtox bioassay. *Chemosphere* 32, 1485–1497, 1996.

Stevenson F.J. and Fitch A., Chemistry of complexation of metal ions with soil solution organics. In: *Interaction of Soil Minerals with Natural Organic and Microbes*, Madison, WI. Huang P.M. and Schnitzer M. (ed.), Soil Science Society of America, 1994.

Taiz L. and Zeiger E., *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Massachusetts, pp. 68-86, 2002.

Wang, H. Q., Lu, S. J., Li, H., Yao, Z.H., EDTA-enhanced phyto remediation of lead contaminated soil by *Bidens maximowicziana*, *Journal of Environmental Sciences* 19, 1496–1499, 2007.

Wenzel, W.W., Unterbrunner, R., Sommer, P., Sacco, P., Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. *Plant Soil* 249, 83–96, 2003.

Yang, X., Feng, Y., He, Z. and Stoffella, P.J., Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phyto remediation, *J. of Trace Elements in Medicibe and Biology*, 339-353, 2005.

Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, Ma L Q, 2006. Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Sci Total Environ*, 368: 456–464.

Yukselen, M.A., Gokyay, O., Leachability of metals from soil contaminated by mining activities. *Environ. Eng. Sci.* 23, 125–132, 2006.