

行政院環境保護署

102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

以綠能作物復育重金屬污染土壤之可行性研究（第二期）

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

計 畫 主 持 人 ： 程淑芬 副教授

計 畫 執 行 期 間 ： 101年12月10日起至

102年12月09日

中 華 民 國 102 年 12 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 1-1)，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 1-2)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)研究預測結果顯示，當土壤 pH 為 6.5，種植梗稻，土壤中鎘濃度為 3.0 mg/kg；種植秈稻，土壤中鎘濃度為 1.0 mg/kg，所生產出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 1-3)，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，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(程，2011)。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. 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。

隨著化石原料的日漸耗竭，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(賴，2007)。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達褐地再利用，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的。

1-2 計畫目的

本研究為 100 年度以綠能作物復育重金屬污染土壤之可行性研究 (第一期) 之延續計畫。100 年度本計畫以南投市牛運堀段 28-15 地號進行綠能作物植生復育模場試驗研究，選擇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、向日葵及一般植物鬼針草進行重金屬鉛污染土壤現地植生試驗，各種作物在本場址栽種成功，但以大豆生長情況較不佳。102 年度本計畫持續以南投市牛運堀段 28-15 地號進行現地植生復育研究，持續針對各種作物包括玉米、甘藷、甘蔗、花生、油菜及向日葵進行現地栽種試驗。另外新增芒草，研究顯示芒草具有相當高的生質能，具有容易生長、抗病力強、高固碳能力等特性。嘉義農業試驗所目前已成功培育台灣本土品種芒草(*Miscanthus floridulus*)，提供給本研究進行鉛污染土壤之植生復育試驗。本研究目的希望了解各種作物隨栽種時間對土壤中鉛之吸收能力變化；建立各項作物之栽種程序；了解各種作物對鉛吸收能力之變異性；量化各種作物之產能及經濟效益；研究促進各種作物吸收重金屬或提高產能的方法。評估各項作物做為重金屬鉛污染土壤之植生復育植物及產能之潛力。

2-1 場址概況

本研究針對計畫所使用之場址區塊，以 2 × 2 公尺網格進行土壤採樣，佈點位置如圖 2-1 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。

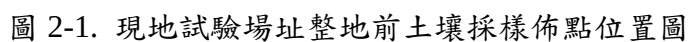


表 2-1. 現地試驗場址整地前對應圖 2-1 採樣點之鉛含量 XRF 測定結果

採樣點	1	2	3	4	5	6	7
1	6020	6000	6550	6620	6750	7020	7290
2	5820	6120	6580	6420	7200	7010	7210
3	6050	5970	6220	6650	6610	7110	7600
4	5380	5990	6010	6310	6880	7010	7240
5	5750	5680	6020	6470	6810	6990	7540
6	5600	5510	6070	6770	7110	7380	7690
7	5530	5660	6000	6970	7210	7490	8350
8	-	5610	5930	6910	7470	7620	7760

單位：mg/kg

表 2-2. 整地後各種植區塊鉛含量 XRF 測定結果

採樣點位	甘蔗	玉米 1	玉米 2	花生	油菜	向日葵	鬼針草	地瓜(台農)	
								10 號	31 號
1	5770	5560	5520	5540	6330	6060	6220	5830	6010
2	6160	5660	5470	5680	6520	5840	6590	6030	5760
3	5630	5700	5640	5500	6410	6030	6790	5860	5700
4	602	5630	5460	5590	6630	6180	6790	5600	5950
5	5590	5580	5440	5480	6440	6170	6270	6070	5950
6	6000	5540	5440	5610	6510	6320	6780	5850	5700
7	5560	5540	5520	5380	6310	5920	6830		
8	6060	5550	5420	5420	6270	6280	6870		
9	5680	5160	5260	5450	6600	6210	6530		
10	5700	5490	5630	5620	6390	6320	6630		
11					6430	6040	6790		
12					6410	6240	6460		
13					6400	6200	6570		
14					6510	6340	6870		
15					6460	6150	6700		
16					6500	6240	6460		
17					6470	6080			
18					6830	6170			
平均	5820	5540	5480	5530	6470	6160	6630	5930	5850

單位：mg/kg

表 2-3. 現地各作物栽種區土壤鉛含量王水消化分析結果

植物區塊		採樣點位				平均
甘蔗		2	6100 ± 44.7	7	5410 ± 82.4	5750 ± 354
玉米 1		2	4960 ± 86.3	7	4720 ± 103	4840 ± 154
玉米 2		2	4890 ± 37.6	7	4408.4 ± 72.3	4650 ± 245
花生		2	5520 ± 177	7	4980 ± 148	5250 ± 317
油菜		6	6380 ± 109	13	5760 ± 36.5	6070 ± 322
向日葵		6	5630 ± 205	13	5850 ± 105	5740 ± 196
鬼針草		7	6130 ± 268	13	6630 ± 88.6	6380 ± 320
地 瓜	台農 10 號	2	5970 ± 72.7	5	5910 ± 77.8	5940 ± 81.2
	台農 31 號	2	5910 ± 55.7	5	5960 ± 97.8	5930 ± 84.4

單位：mg/kg

2-2 整地方法

本計畫於 101 年 12 月 25 日進行現地整地工作，場址栽種規劃如圖 2-2 所示。整地過程及整地後之情況如圖 2-3 所示。先以小鐵牛進行表土破碎及翻攪，佐以人工整理將現地劃分為各種作物栽種區塊。整理後之區塊先以塑膠帆布進行覆蓋，一方面可避免雜草快速生長；另一方面可以防止污染土壤隨風飄散或隨降雨逕流擴散，達到場址污染控制目的。

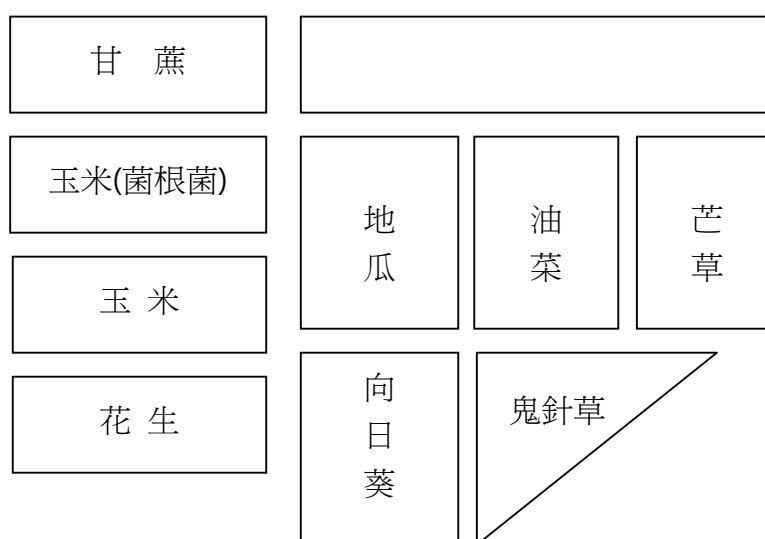


圖 2-2 植物栽種區塊配置圖



小鐵牛進行土壤破碎、翻拌



人工進行坵塊整理

整地後灑水



整地後現地情形

整地後進行表面覆蓋

圖 2-3. 現地整地情形

2-3 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，每一種作物栽種區塊採取 6 個樣品，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 $NH_2OH \cdot HCl$ 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。

2-4 能源作物植生整治栽種試驗

本研究選擇甘蔗、玉米、花生、地瓜、向日葵、油菜及芒草進行植生栽種試驗，各種作物之生長條件及種植方式不同，茲將各種作物之現地栽種試驗方法描述如下：

2-4.1 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。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。本年度選擇二個品種進行栽種，一個品種選用農友牌之品種(*Helianthus annuus* L.)，植株較矮小；另一品種取自霧峰農業試驗所，為高莖品種。種植之行株間距以 15x15 公分。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擬完成二輪向日葵栽種試驗。第一輪播種時間為 102 年 1 月 15 日，矮莖於四月完成第一輪栽種試驗，高莖在 5 月完成摘種試驗。第二輪於 7 月 16 日進行栽種，但因 8 月間高溫，又受到颱風多雨等氣候影響，向日葵在大雨過後很快都枯萎死亡。於 9 月 3 日再重新種植向日葵，但 9 月間多次颱風降雨向日葵都枯萎腐爛。本計畫目前（10 月底）正準備進行第四次栽種試驗。向日葵施肥依建議分二次施肥，選用農友牌台肥硝磷基特 4 號複合肥料進行施肥。第一次施用於種植前做為基肥，每平方公尺約施用 40 克。第二次於花蕾形成初期作追肥施用，施肥於兩株間每處約 5 克。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。

2-4.2 玉米 (corn)

國內目前種植玉米品種繁多，以華珍品種生長強健，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，因此本研究優先選擇以華珍 7 號品種進行栽種試驗。另增加長青 1 號栽種進行比較。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。本研究擬於執行期間內，完成二輪玉米栽種試驗。第一輪播種時間為 102 年 2 月 26 日，於六月完成第一輪栽種試驗；第二輪於 7 月 16 日進行播種，於 10 月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。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，施用於兩植株間，一處約 5 克。

2-4.3 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。本研究因前一年度之甘蔗還未達到成熟時間，在本年度年 4 月完成前一年度甘蔗採收後，隨即在 4 月 16 日進行甘蔗種植。預計在明年七月左右可完成栽種試驗。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。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，以每平方公尺 40 克之施用量。

2-4.4 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 號二種品種進行栽種試驗。地瓜適合台灣春、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 3 月 21 日栽種，於 9 月 10 日採收；經整地後第二輪於 10 月 3 日進行種植，預計在明年 2~3 月進行採收工作。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，插植密度為每平方公尺 4 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 4 號複合肥料進行施肥，用量為每平方公尺 20 克。第二次在插植後 2 個月時，選用農友牌台肥 4 號複合肥料，用量為每平方公尺 20 克，並再加上氯化鉀，用量亦為每平方公尺 20 克。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)。

2-4.5 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。本研究擬於計畫執行期間內種植二輪，第一輪已在 2 月 26 日種植，在 7 月 30 日採收；第二輪在 10 月 7 日種植，預估在明年 1~2 月間採收。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 2 粒花生。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，用量為每平方公尺 40 克。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。

2-4.6 油菜 (rape, *Brissicae 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 8 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，用量為每平方公尺 40 克。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，本研究因計畫執行期程，在 102 年 1 月 18 日進行第一輪油菜播種，後因蟲害問題，於 2 月 26 日再行種植第二批。第一批存活下來的，於 4 月 9 日已結莢成熟，採取樣品進行分析。本計畫擬於 11 月氣候轉涼時，再進行一次油菜的栽種試驗，再評估其效益。

2-4.7 芒草 (*Miscanthus floridulus*)

芒草源始於亞洲，具有生長容易、抗病能力強、高光合作用效率高固碳的能力。被認為是一個新發現的具有高生質能潛力的作物(Huang et al., 2011)。近年歐洲許多國家使用芒草生質能來取代煤炭進行發電，顯示芒草具有相當好的潛力(Chou, 2009; Clifton-Brown, 2004)。研究顯示，20 公噸芒草的生質熱能相當於 12 公噸的煤炭，且燃燒芒草只有排放 2.2 公噸的 CO₂，而燃煤會排放 34 公噸的 CO₂。在美國，科學家也嘗試研究將芒草轉換成生質酒精作為石化燃料的替代品(Lewandowski, 2003)。

在台灣，芒草是一種廣泛分佈生長的植物，可以生長在河岸邊、海岸區域、農田、甚至高山。嘉義農業試驗所賴永昌博士研究團隊近年從事台灣芒草的研究，發現台灣本土品種芒草 *Miscanthus floridulus* 具有最高的生質能，且從低海拔到高海拔區域都適合生長，因此推薦本研究可以探討其做為污染場址復育植物之可行性。賴博士已成功培育繁殖大量的 *Miscanthus floridulus* 品種芒草，並提供給本研究進行試驗。本研究於 101 年 7 月 25 日獲賴博士贈送芒草植株，並隨即先行將其種植在本試驗場址，目前植株生長適應良好，本研究在 102 年 3 月時收割部分芒草地上部進行分析，並於 102 年 6 月 25 日採收所有地上部芒草，並於次日重新移植根部種植新的芒草，預計於明年 103 年 4 月進行地上部採收分析。

2-5 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 2.3 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、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。

2-6 菌根菌促進作物吸收重金屬鉛能力之研究

菌根菌是一種與植物根部共生極為廣泛的真菌，主要的菌根菌包括內生、外生及內外生三大類，一般農田作物以內生菌根菌為最多，尤其以叢枝菌根菌最普遍受到重視。菌根菌有增進根系營養吸收與生長的菌類，增加根系吸收能力及表面積，即可減少化學肥料的施用，提高土壤中的營養供應效率，叢枝菌根菌可以在高濃度重金屬污染土壤中存活，也有助於植物在污染土壤中存活。本研究今年度先選擇華珍 7 號玉米進行試驗，探討玉米根部感染菌根菌對植物生長以及吸收重金屬鉛效率之影響。叢枝菌根菌購自市售商品如圖 2-6.1 所示，分為每株添加 3 克、6 克及 9 克，探討不同添加量下，玉米植株生長及吸收重金屬鉛的差異。



圖 2-4 所使用之市售菌根菌 1 號，主要成分為內生菌根菌屬 *Glomus* 三菌系。

2-7 計畫執行過程

計畫執行過程請參見附錄一之工作日誌。

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

本計畫場址土壤中鉛含量分析結果如表 3-1.1 及 3-1.2 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、玉米及花生區塊濃度稍低，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 3-1.2 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、玉米及花生區塊濃度稍低；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，兩測值之相關性如圖 3-1.1 所示。

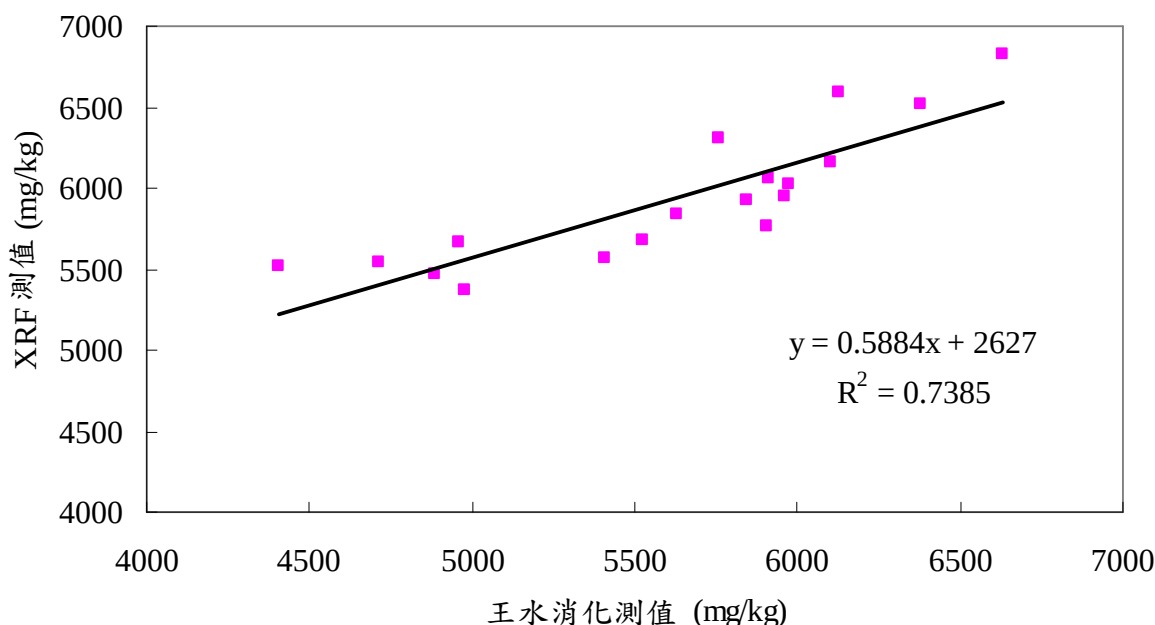


圖 3-1.1 土壤鉛含量王水消化分析與 XRF 測定結果之相關性

各種植區塊鉛鍵結型態分析結果種植甘蔗、玉米及花生區塊之鍵結型態分佈彼此間較接近，如圖 3-1.2 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 3-1.3 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佈差異稍大，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。

表 3-1.1 現地栽種區土壤鉛含量 XRF 篩測結果

採樣 點位	甘蔗	玉米 1	玉米 2	花生	油菜	向日葵	鬼針草	地瓜(台農)	
								10 號	31 號
1	5770	5560	5520	5540	6330	6060	6220	5830	6010
2	6160	5660	5470	5680	6520	5840	6590	6030	5760
3	5630	5700	5640	5500	6410	6030	6790	5860	5700
4	602	5630	5460	5590	6630	6180	6790	5600	5950
5	5590	5580	5440	5480	6440	6170	6270	6070	5950
6	6000	5540	5440	5610	6510	6320	6780	5850	5700
7	5560	5540	5520	5380	6310	5920	6830		
8	6060	5550	5420	5420	6270	6280	6870		
9	5680	5160	5260	5450	6600	6210	6530		
10	5700	5490	5630	5620	6390	6320	6630		
11					6430	6040	6790		
12					6410	6240	6460		
13					6400	6200	6570		
14					6510	6340	6870		
15					6460	6150	6700		
16					6500	6240	6460		
17					6470	6080			
18					6830	6170			
平均	5820	5540	5480	5530	6470	6160	6630	5930	5850

單位：mg/kg

表 3-1.2 現地栽種區土壤鉛含量王水消化分析結果

植物區塊		採樣點位				平均
甘蔗		2	6100 ± 44.7	7	5410 ± 82.4	5750 ± 354
玉米 1		2	4960 ± 86.3	7	4720 ± 103	4840 ± 154
玉米 2		2	4890 ± 37.6	7	4408.4 ± 72.3	4650 ± 245
花生		2	5520 ± 177	7	4980 ± 148	5250 ± 317
油菜		6	6380 ± 109	13	5760 ± 36.5	6070 ± 322
向日葵		6	5630 ± 205	13	5850 ± 105	5740 ± 196
鬼針草		7	6130 ± 268	13	6630 ± 88.6	6380 ± 320
地 瓜	台農 10 號	2	5970 ± 72.7	5	5910 ± 77.8	5940 ± 81.2
	台農 31 號	2	5910 ± 55.7	5	5960 ± 97.8	5930 ± 84.4

單位：mg/kg

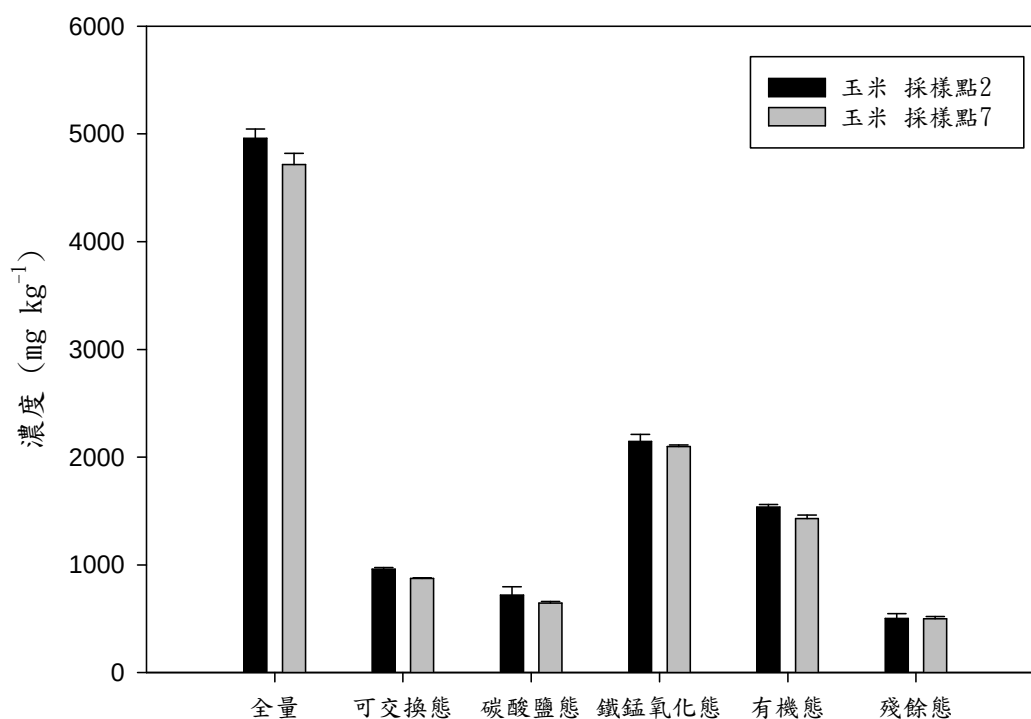


圖 3-1.2 玉米種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

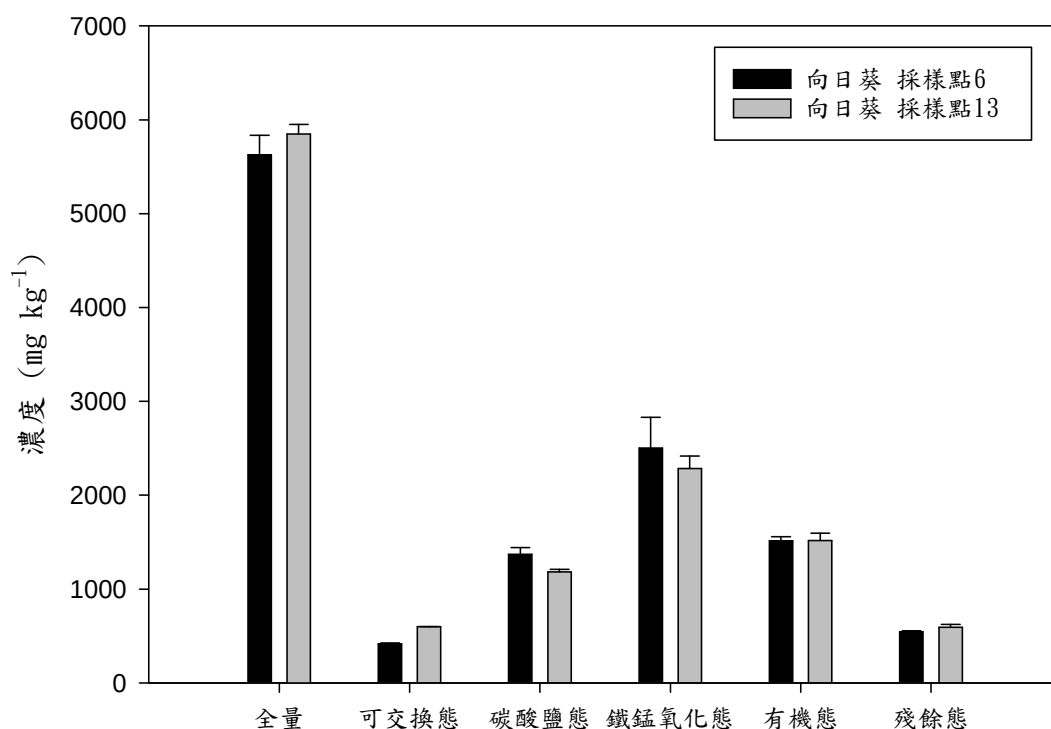


圖 3-1.3 向日葵種植區塊土壤中鉛各種鍵結型態分布圖

本場址之土壤之粒徑分佈，砂粒部分平均約佔 24 %；粉粒 70 %；黏粒部分佔 6 %，屬於粉壤土(silt loam)。土壤 pH 值平均約為 6.0，以種植甘蔗、玉米及花生區塊有較低情形。土壤 CEC 值平均為 33.0。各區塊土壤特性分析結果如表 3-1.3 所示。

表 3-1.3 各種植區塊土壤特性分析結果

		甘蔗	玉米	花生	大豆	地瓜	向日葵	油菜	鬼針草
有機質(%)		4.96	5.29	5.26	5.6	5.58	5.25	5.47	-
pH		5.7	5.31	5.83	5.93	6.16	6.35	6.35	6.40
CEC		26.6		42.3	32.6	29.3	25.9	41.2	27.0
土壤質地		silt loam							
粒徑分布	Sand %	-	-	25	22	26	-	26	20
	Silt %	-	-	68	71	68	-	68	74
	Clay %	-	-	7	7	6	-	5	7

3-2 各種作物栽種情形及對重金屬鉛吸收情形

3-2.1 向日葵

向日葵於 102 年 1 月 18 日進行栽種，分為二個品種，一個品種植株較矮小，購自農友公司；另一植株較高大，取自霧峰農試所。從農試所得知，因目前國內並未有向日葵的品系育種，因此無法取得純種向日葵，亦無從鑑識向日葵品系，僅能依圖鑑分類。向日葵栽種情形如下列照片所示。向日葵開花時植株高度如表 3-2.1.1 所示，矮莖之平均高度為 61.5 公分；高莖為 176.5 公分。向日葵開花時植株生質量如表 3-2.1.2 所示，高莖平均每株為 760 克、矮莖為 510 克。101 年及 102 年所栽種之向日葵各部位鉛吸收情形如圖 3-2.1.1 所示。



102.1.18 向日葵種植情形



102.1.18 向日葵種區域



102.2.21 向日葵種植情形



102.3.7 向日葵種植情形



102.3.12 矮莖向日葵開花情形



102.3.12 高莖向日葵生長情形



102.3.21 矮莖向日葵皆已盛開



102.3.21 高莖向日葵植株高度



102.3.28 矮莖向日葵開始枯萎



受 3.27 日南投大地震影響高莖向日葵傾倒



102.3.28 高莖向日葵扶正後



102.4.9 矮莖向日葵已枯萎接近成熟



102.4.9 高莖向日葵盛開情形



102.4.23 高莖向日葵生長情形

表 3-2.1.1 向日葵植株高度變化情形 102 年 1 月 18 日栽種

採 樣 時 間		102.2.1	102.2.21	102.3.7	102.4.16
矮莖	平均植高	5.10	22.4	61.5	-
	標準偏差	1.20	4.30	8.90	-
	樣品數	32	32	32	-
高莖	平均植高	3.90	25.0	66.2	177
	標準偏差	1.00	7.90	21.0	26.8
	樣品數	30	30	30	24

單位：公分/棵

表 3-2.1.2 向日葵植株生質量

		濕基重	乾基重
矮莖	平均植株重(克/株)	510 g	80.0 g
	標準偏差	13.0 g	10.0 g
	樣品數	4	
高莖	平均植株重(克/株)	760 g	110 g
	標準偏差	490 g	70.0 g
	樣品數	4	

102 年 1 月 18 日栽種，矮莖 4 月 13 日(86 天)，高莖 4 月 30 日採樣(103 天)

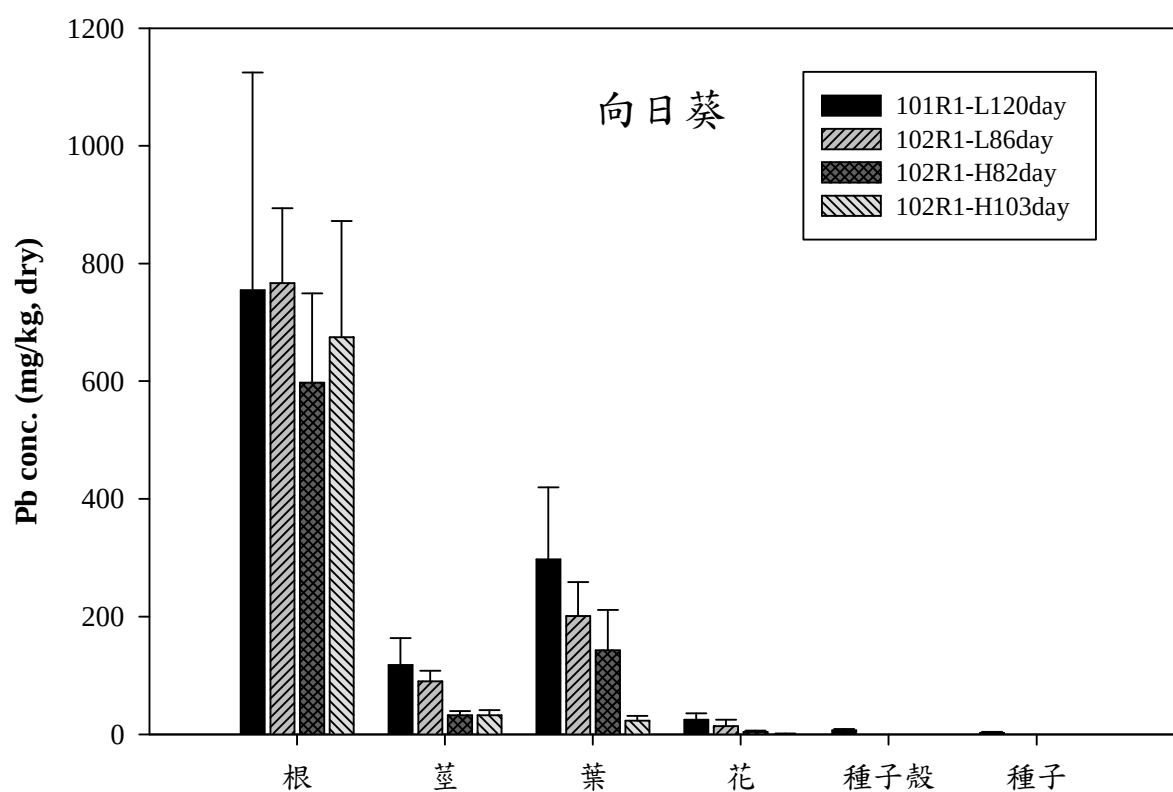


圖 3-2.1.1 向日葵各部位乾基鉛吸收濃度。第一期(101 年)向日葵植株各部位鉛含量濃度(乾基)。第一輪(R1)栽種時間為 100 年 12 月 23 日，於 101 年 4 月 24 日(120 天)採樣檢測。第二期(102) 第一輪(R1)栽種時間為 102 年 1 月 18 日，矮莖於 102 年 4 月 13 日(82 天)；高莖於 102 年 4 月 30 日(103 天)採樣檢測。

3-2.2 玉米

本計畫第一期計畫選擇華珍 7 號作為主要栽種品系，總共進行春、夏二輪栽種，春作生長較慢，在播種後第 111 天及 137 天採樣分析；夏作生長較快，分別在播種後第 74 天及 84 天時採樣分析。玉米各部位生質量及鉛含量濃度分析結果分別如表及圖 3-2.2-1 所示。以根含量最高，其次依序為葉、莖、玉米包葉、玉米軸，可食用部位玉米粒之含量最低。本計畫為第二期計畫，本期計畫選擇華珍 7 號及長青 1 號兩個品系進行試驗。另外並以華珍 7 號進行菌根菌施用對玉米生長及吸收重金屬鉛之影響進行研究，菌根菌施用濃度分為三組，每組施用量分別為每株添加 3 克、6 克及 9 克。第一輪玉米於 102 年 2 月 26 日栽種，第二輪於 102 年 7 月 16 日栽種，玉米栽種情形如下列照片所示。



102.2.26 華珍 7 號種植情形



102.2.26 長青 1 號種植情形



102.2.26 菌根菌施用情形



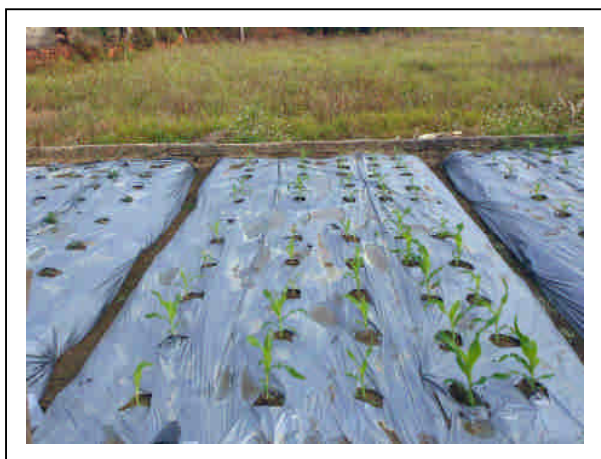
102.3.7 長青 1 號生長情形



102.3.12 長青 1 號玉米生長情形



102.3.12 華珍 7 號號玉米生長情形



102.3.21 玉米栽種情形



102.3.28 受前一日地震影響植株略傾斜



102.4.9 玉米生長情形(前)長青/(後)華珍



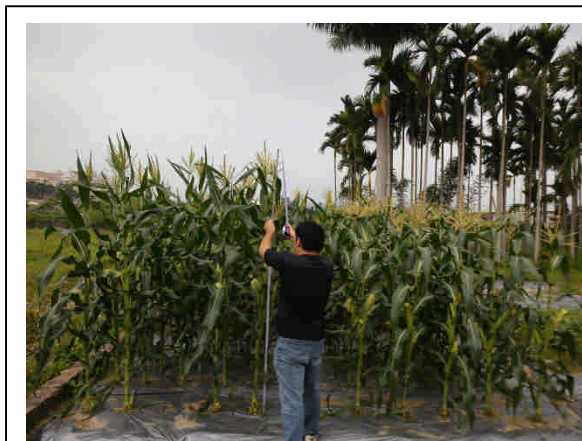
不同菌根菌添加量玉米生長情形，由後向前
添加量分別為 3g、6g、9g/株



102.4.16 玉米生長情形(前)長青(後)華珍



102.4.23 不同菌根菌施用量玉米生長情形



102.5.7 量測玉米生長高度



102.8.15 第二輪玉米生長情形



102.9.6 第二輪玉米生長情形不佳



102.9.6 第二輪玉米生長情形

表 3-2.2-1 玉米植體各部位生質量及含水率

	鮮重(克/株)	SD	乾重(克/株)	SD	含水率%
根	159.4	14.5	21.8	2.0	86.3
莖	433.5	2.8	83.6	0.5	80.7
葉	175.6	38.6	45.9	10.1	73.8
玉米皮	131.8	21.1	40.3	6.4	69.4
玉米軸	83.5	39.2	29.6	13.9	64.6
玉米粒	306.7	133.9	81.1	35.4	73.6
總量	1290.4	221.0	302.3	64.4	76.6

101 年 6 月 9 日栽種，8 月 31 日採樣，栽種時間 84 天

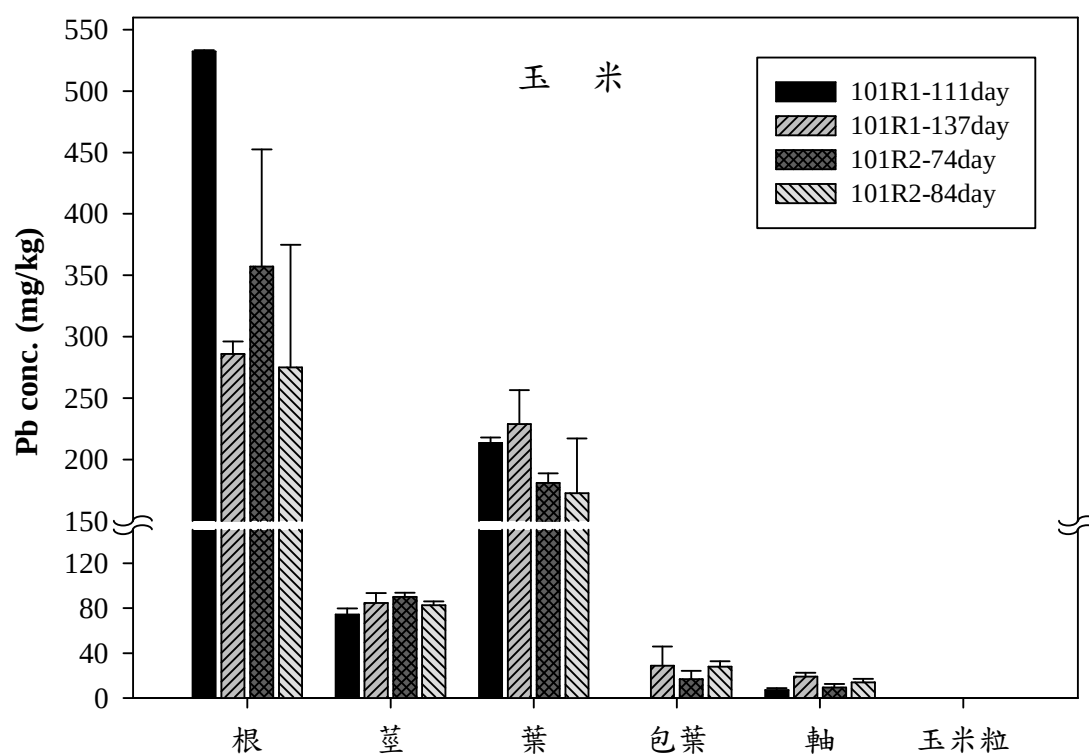


圖 3-2.2-1 第一期(101 年)玉米植體各部位鉛含量濃度(乾基)。第一輪(R1)栽種時間為 100 年 12 月 23 日，分別於 101 年 4 月 13 日(111 天)及 101 年 5 月 9 日(137 天)採樣檢測。第二輪(R2)栽種時間為 101 年 6 月 9 日，分別於 101 年 8 月 21 日(74 天)及 101 年 8 月 31 日(84 天)採樣檢測。

表 3-2.2-2 第二期(102 年)第一輪(R1)不同栽種條件玉米植株高度與生質量

	第二期(102)第一輪(R1)				
	長青	華珍	華菌(3g)	華菌(6g)	華菌(9g)
採樣植株數(株)	25	24	15	15	15
平均高度(cm)	205.6	218.7	214.1	209.9	184.2
STDV (cm)	19.1	27.9	19.9	19.7	30.0
平均生質量(克/株)	993	1008	1025	1080	1200
STDV (g)	195	211	250	72	251

102 年 2 月 26 日栽種，102 年 6 月 8 日採樣，栽種時間 103 天

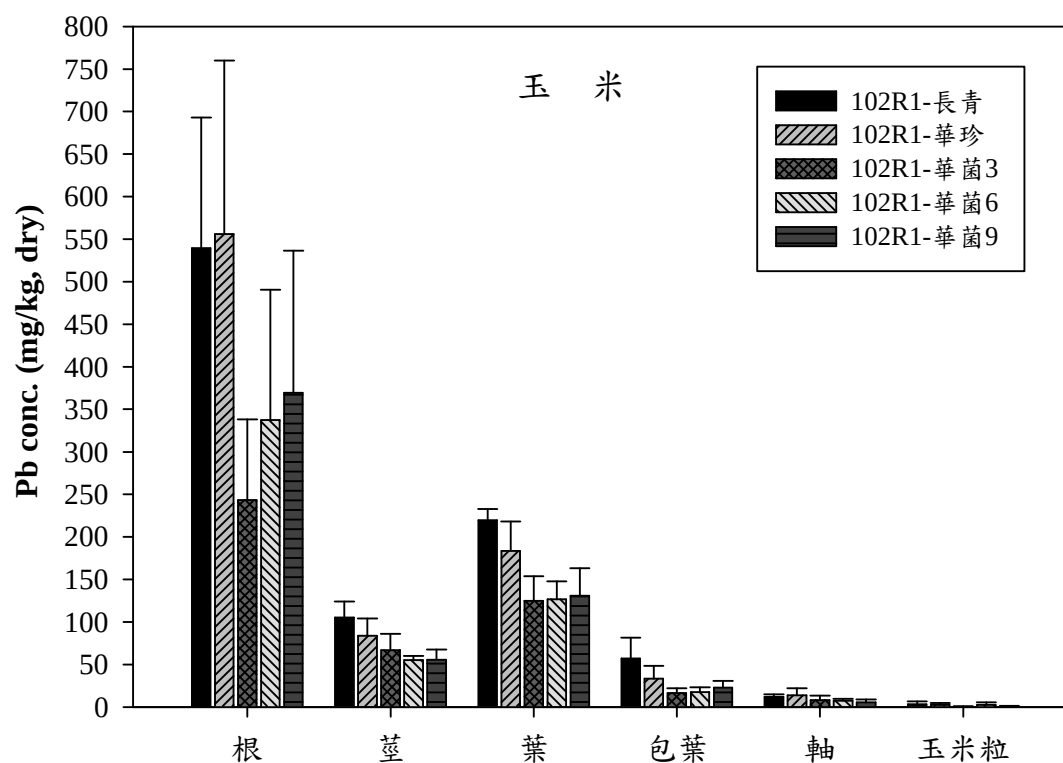


圖 3-2.2-2 第二期(102 年)第一輪(R1)玉米植株各部位鉛含量濃度(乾基)。第一輪(R1)栽種時間為 102 年 2 月 26 日，於 102 年 6 月 8 日(103 天)採樣檢測。

表 3-2.2-3 第二期(102 年)第二輪(R2)不同栽種條件玉米植株高度與生質量

	第二期(102)第二輪(R2)				
	長青	華珍	華菌(3g)	華菌(6g)	華菌(9g)
採樣植株數(株)	21	22	12	11	10
平均高度(cm)	146.4	179.1	178.2	176.5	176.7
STDV (cm)	30.3	34.9	293.5	28.5	28.4
平均生質量(克/株)	430	582	485	347	414
STDV (g)	140	175	189	137	170

102 年 7 月 16 日栽種，102 年 10 月 7 日採樣，栽種時間 84 天

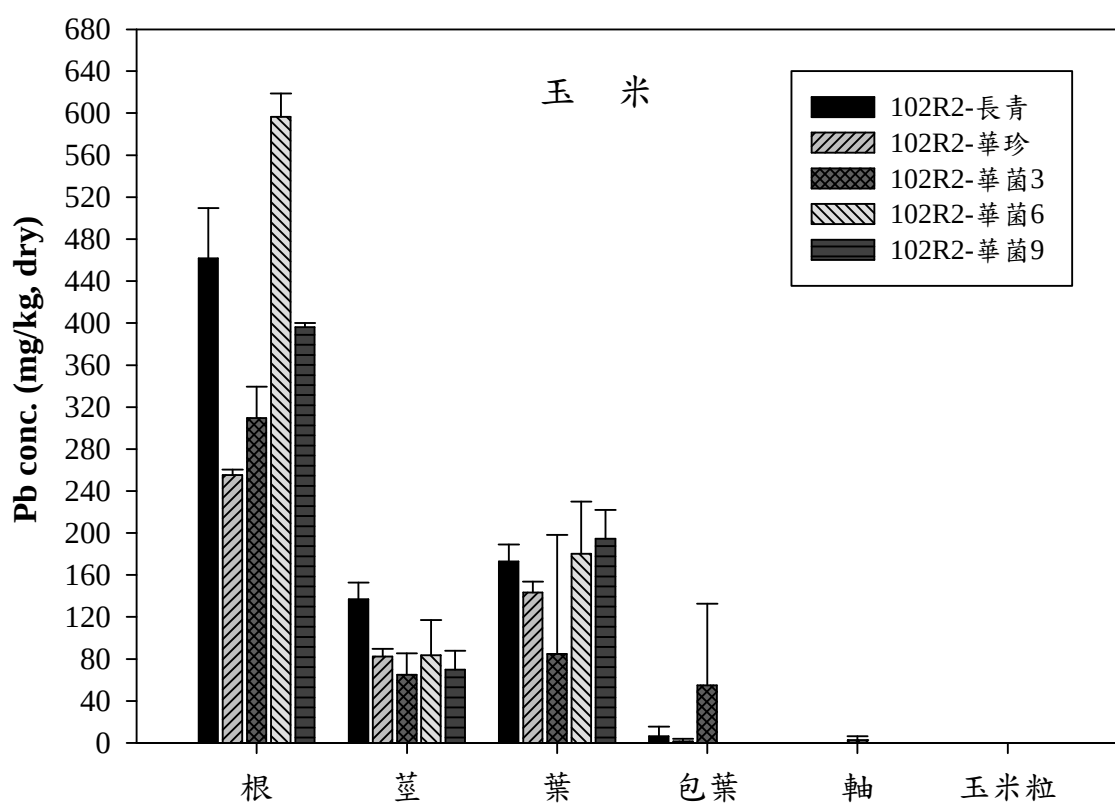


圖 3-2.2-2 第二期(102 年)第二輪(R2)玉米植株各部位鉛含量濃度(乾基)。第二輪(R2)栽種時間為 102 年 7 月 16 日，於 102 年 10 月 7 日(84 天)採樣檢測。

表 3-2.2-3 玉米燃燒熱值量測結果

	乾重(克/株)	燃燒熱(kJ/g)	燃燒熱(kJ/株)	燃燒熱(kcal/株)
根	21.8	15.76	343.6	82.1
莖	83.6	15.94	1332.6	318.5
葉	45.9	14.87	682.5	163.1
玉米皮	40.3	15.85	638.8	152.7
玉米軸	29.6	16.04	474.8	113.5
玉米粒	81.1	18.87	1530.4	365.8
總量	302.3	-	5002.6	1195.6

表 3-2.2-1 為 101 年所栽種玉米平均植體及各部位之生質量情形，圖 3-2.2-1 為 101 年所種植兩期華珍玉米植體各部位之鉛含量。表 3-2.2-2 為 102 年第一輪各種栽種試驗情況下玉米之生長高度及植株平均生質量，顯示添加菌根菌有增加生質量的趨勢。圖 3-2.2-2 為第一輪各種栽種試驗情況下玉米各部位吸收鉛之情況，顯示長青玉米對鉛有較佳吸收情形。但本次華珍品種未添加菌根菌組，其根部對鉛之吸收濃度也有增加情況，因此沒有顯示出菌根菌對鉛吸收能力之增強效果。表 3-2.2-3 為 102 年第二輪各種栽種試驗情況下玉米之生長高度及植株平均生質量，本輪栽種期間可能受氣候條件影響，玉米植株生長情況較往常不佳，添加菌根菌沒有增加生質量的現象，但從圖 3-2.2-3 為第二輪各種栽種試驗情況下玉米各部位吸收鉛之情況，除顯示長青玉米對鉛有較佳吸收情形外，本次華珍品種添加菌根菌組，其相當多部位對鉛之吸收濃度都有顯著增加情況。

表 3-2.2-3 為本研究量測玉米各部位之燃燒熱值，平均每株玉米約可產出 5000 Kj 的熱能，且經計算平均每株玉米約可吸收 40 mg 的鉛。

種植玉米後土壤中鉛含量及鉛鍵結型態之變化情形如圖 3-2.2-4 所示。

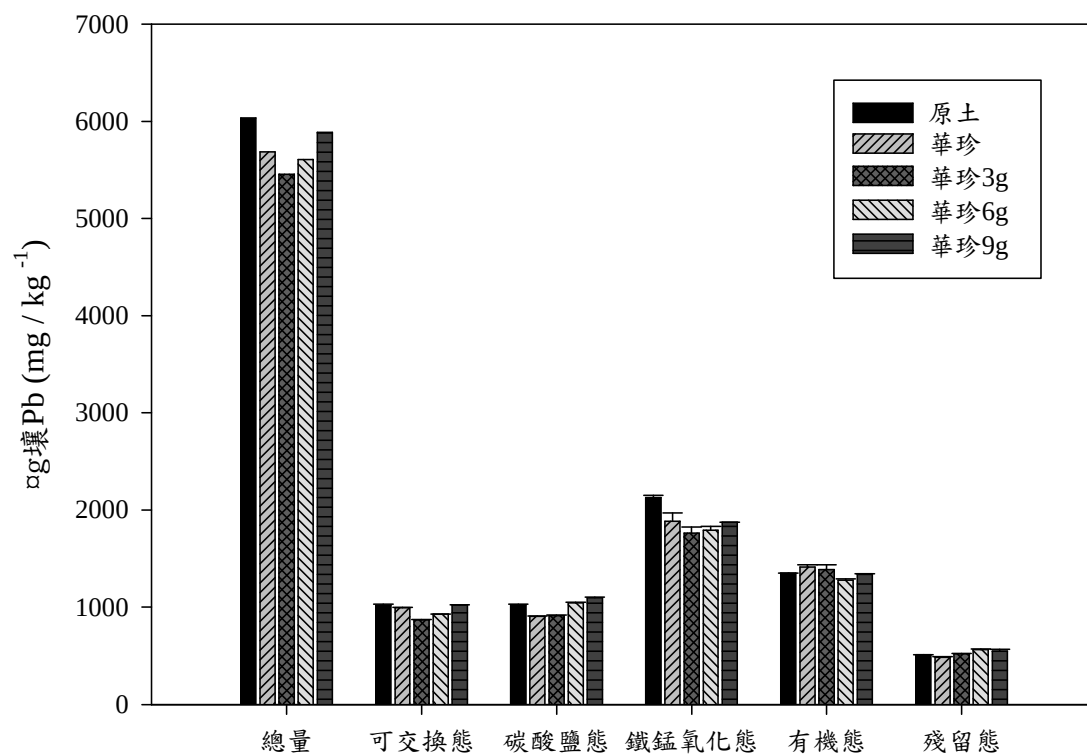


圖 3-2.2-4 種植玉米後土壤中鉛含量及鉛鍵結型態之變化情形

3-2.3 甘蔗

甘蔗生長期非常的長，約需 1~1.5 年左右。本場址第一期計畫所栽種之甘蔗於今年 102 年 4 月才達採收期，甘蔗種植情形如下列照片所示，甘蔗植株平均濕基重量約為 1000 克，乾基約為 242 克。第二期計畫之甘蔗，於 102 年 4 月 16 日進行種植，預計至明年 103 年 10 月左右可採收。第一期栽種甘蔗植體鉛含量分析結果如圖 3-2.3-1 所示，總共栽種時間約 461 天。



102.1.21 前年度種植甘蔗生長情形



102.4.16 經催芽後要種植的甘蔗段



102.4.16 甘蔗種植前整地情形



102.4.16 甘蔗種植情形

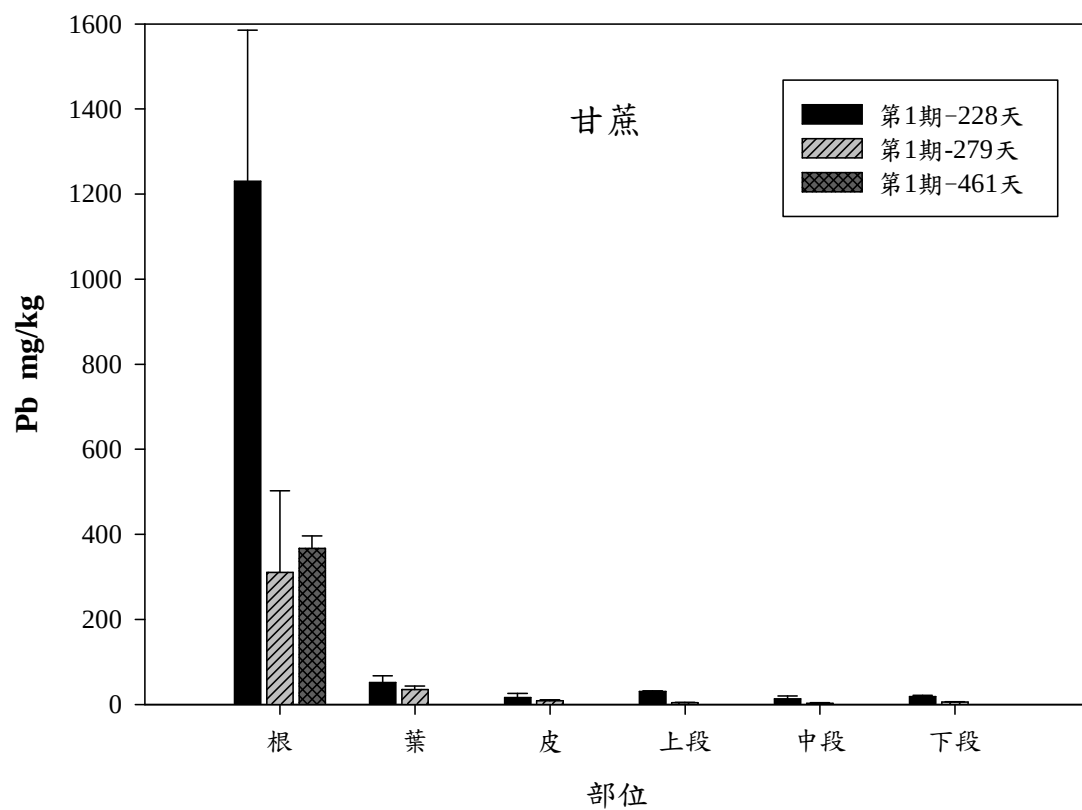


圖 3-2.3-1 第一期(101 年)甘蔗植體各部位鉛含量濃度(乾基)。栽種時間為 101 年 1 月 6 日，採樣時間分別為 101 年 8 月 21 日、10 月 11 日及 102 年 4 月 16 日。

3-2.4 甘藷

本場址於 100 年度時依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，前期試驗結果發現台農 57 號在本場址生長狀況不佳，因此本計畫 102 年度選擇台農 10 號及 31 號進行栽種試驗。本計畫於 102 年 3 月 20 日自嘉義農業試驗所取得台農 10 號及 31 號植株，於 3 月 21 日進行植株扦插種植，甘藷栽種情形如下列照片所示。101 年、102 年植體各部位鉛含量如圖 3-2.4-1 及 3-2.4-2 所示。



102.3.21 地瓜種植前整地情形



102.3.21 台肥 4 號施用情形



102.3.21 地瓜台農 10 號種植情形



102.3.21 地瓜台農 31 號種植情形



102.4.13 台農 10 號地瓜生長情形



102.4.13 台農 31 號地瓜生長情形



102.4.23 台農 10 號地瓜生長情形



102.4.13 台農 31 號地瓜生長情形



102.4.23 台農 31 號地瓜生長情形



102.9.10 台農 10 號地瓜生長情形

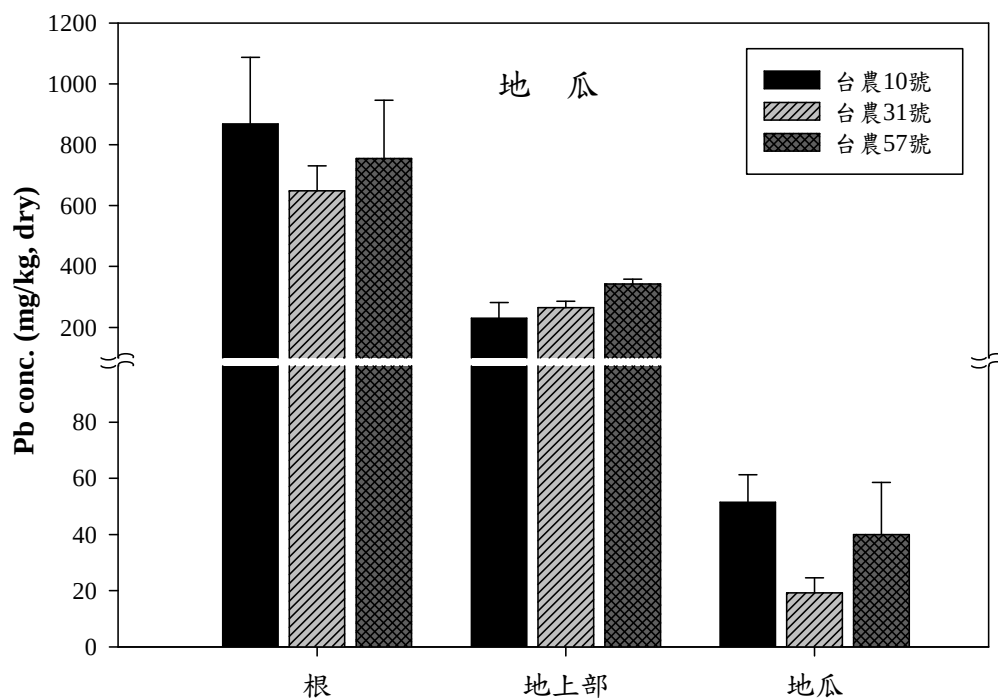


圖 3-2.4-1 第一期(101 年)甘藷植體各部位鉛含量濃度(乾基)。栽種時間為 101 年 1 月 10 日，採樣時間分別為 101 年 5 月 23 日。

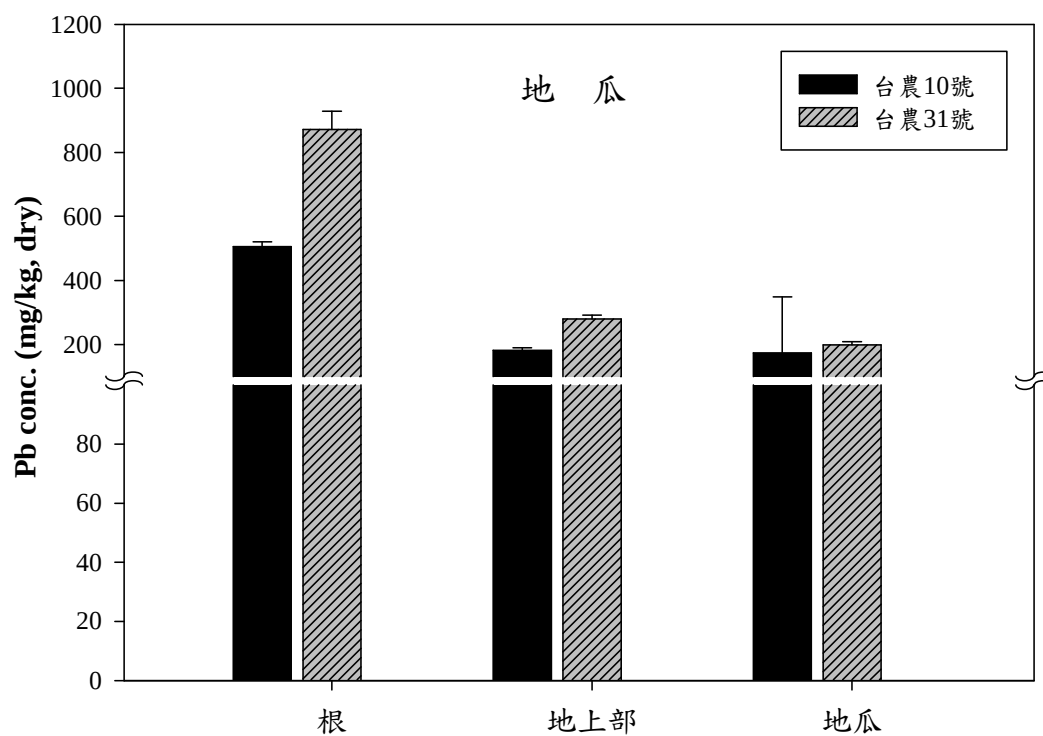


圖 3-2.4-2 第二期(102 年)甘藷植體各部位鉛含量濃度(乾基)。

3-2.5 花生

本計畫在第一期(101 年)即開始種植花生。花生在本場址生長情況良好，種植情形如下面照片所示。



102.2.26 花生栽種情形



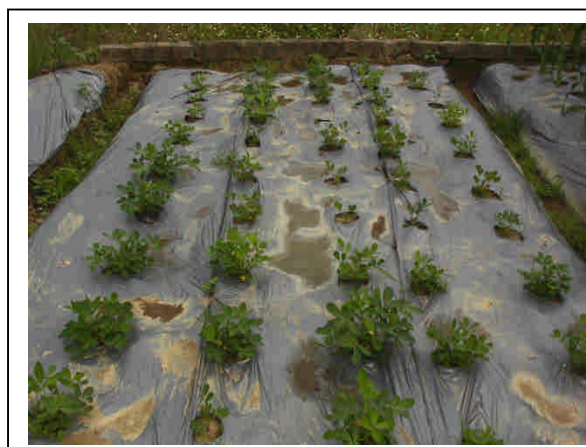
102.3.12



102.3.21 花生生長情形



102.4.9 花生生長



102.4.18 花生生長情形



102.6.04 花生生長情形



102.7.30 花生採收情形



102.7.30 花生採收情形



102.7.30 花生成熟採收情形

本計畫第一期(101)於 101 年 6 月 9 日栽種的花生，於 9 月 20 日採收，共栽種 104 天左右，植體各部位之平均生質量如表 3-2.5.1 所示。植體各部位鉛含量如圖 3-2.5.1 所示。第二期的花生於 102 年 2 月 26 日栽種，7 月 30 日採收檢測，栽種時間約 155 天。

表 3-2.5.1 第一期(101)花生植株生質量

104 天	根	莖	葉	花生殼	花生仁	單株總重
鮮重(克/株)	13.1	248.8	100.9	57.0	50.4	470.2
SD (g)	5.9	130.0	50.0	28.0	24.2	210.3
乾重(克/株)	4.9	59.4	24.1	12.5	19.0	119.8
SD (g)	2.2	31.0	11.9	6.2	9.1	52.4
含水率	62.8	76.1	76.1	78.0	62.3	74.5

101 年 6 月 9 日栽種，101 年 9 月 20 日採收檢測植

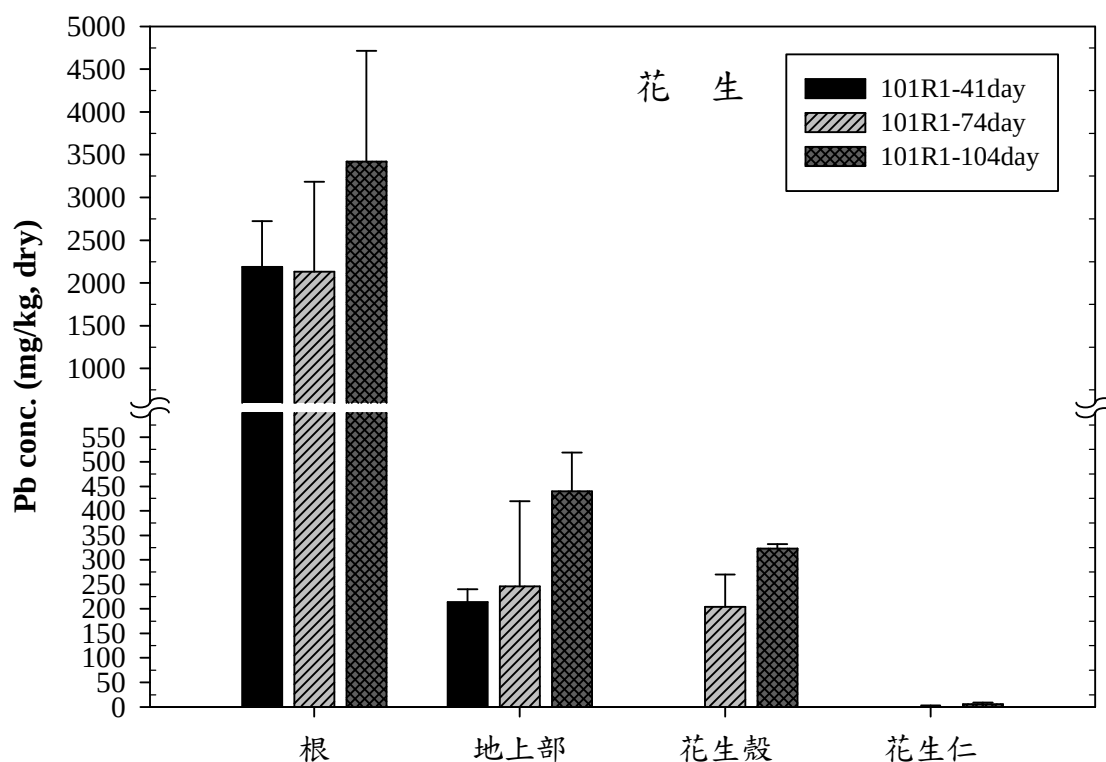


圖 3-2.5.1 第一期(101 年)花生乾基各部位鉛含量濃度。101 年 6 月 9 日栽種，分別於 7 月 19 日(41 天)、8 月 21 日(74 天)及 9 月 20 日(104 天)採樣分析值。

表 3-2.5.2 第二期(102)花生植株生質量

	鮮重(克/株)	SD	乾重(克/株)	SD	含水率%
根	15.5	14.7	4.1	3.9	73.5
地上部	392.1	212.6	96	52.1	75.5
花生殼	50	27.6	12.9	7.1	74.2
花生仁	55.4	19.8	22.7	8.1	59.0
總重	513	234	122.4	57.6	76.1

102 年 2 月 26 日栽種，7 月 30 日(155 天)採收檢測

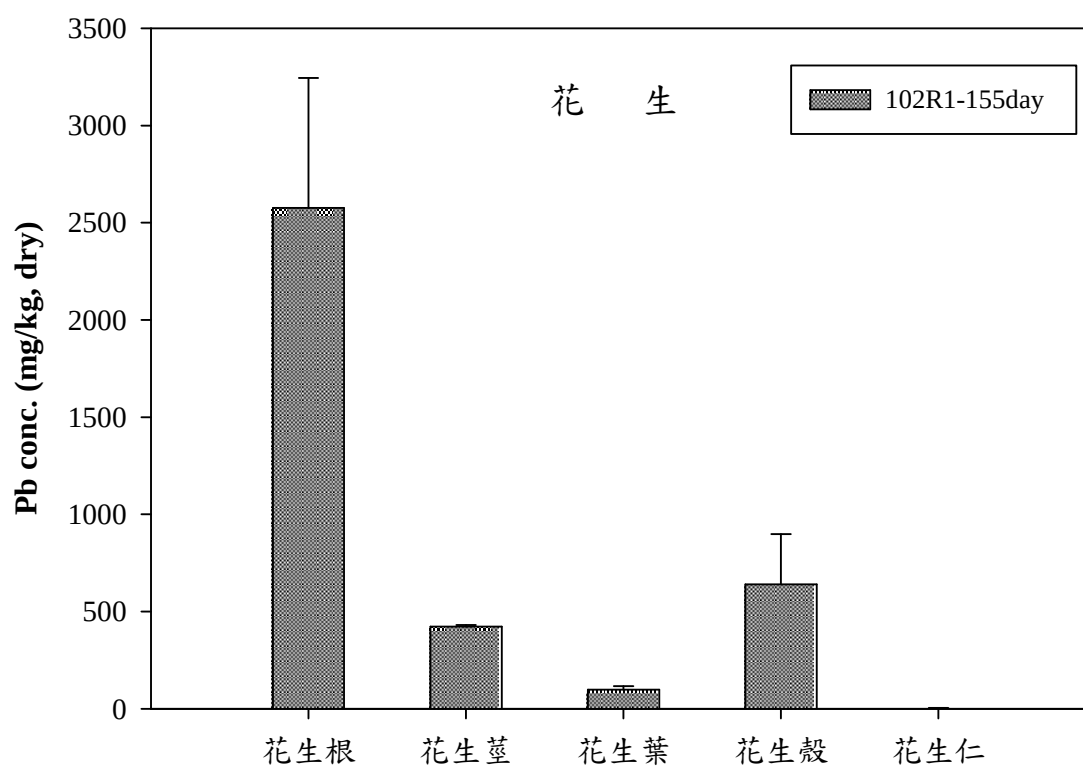


圖 3-2.5.2 第二期花生乾基各部位鉛含量濃度。於 102 年 2 月 26 日栽種，7 月 30 日(155 天)採收檢測。

依花生現地栽種試驗分析結果，平均每株花生之生質量乾基約為 120 克，花生根部所含的鉛濃度平均將近 2600 mg/kg；莖部分約為 420 mg/kg；葉部分約為 100 mg/kg；花生殼約為 650 mg/kg；花生仁約為 2.5 mg/kg。依據圖 3-2.5.1 之各部位 Pb 含量濃度計

算，平均每株花生可吸收之鉛濃度約為 57.6 mg。

3-2.6 油菜

油菜於 102 年 1 月 18 日播種，1 月 21 日已見其發芽，但在 2 月初即發現有蟲害問題，在 2 月 25 日進行噴藥除蟲外，於 2 月 26 日再行播種第二批，相關種植過程如下列照片所示。油菜於 102 年 4 月 19 日採收，植體各部位重金屬鉛含量濃度分析結果如圖 3-2.6-1 所示。



102.1.18 油菜種植



102.1.18 油菜種植區



102.1.21 油菜籽發芽



102.1.26 油菜嫩芽



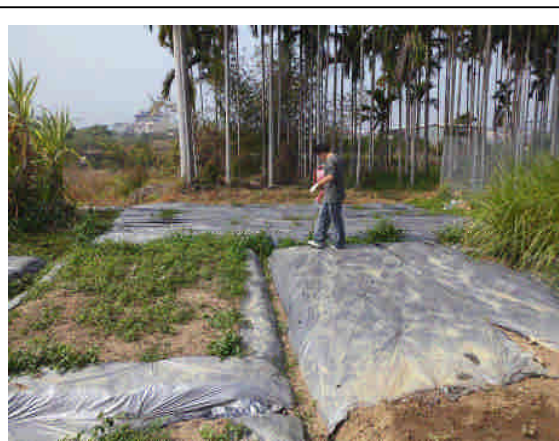
102.1.31 油菜生長情形



102.2.6 油菜有蟲害問題



102.2.25 油菜受蟲害情形幾乎被吃光



102.2.25 噴灑殺蟲劑



102.3.14 第 2 次播種油菜生長情形



102.3.14 第 1 次播種油菜生長、開花情形

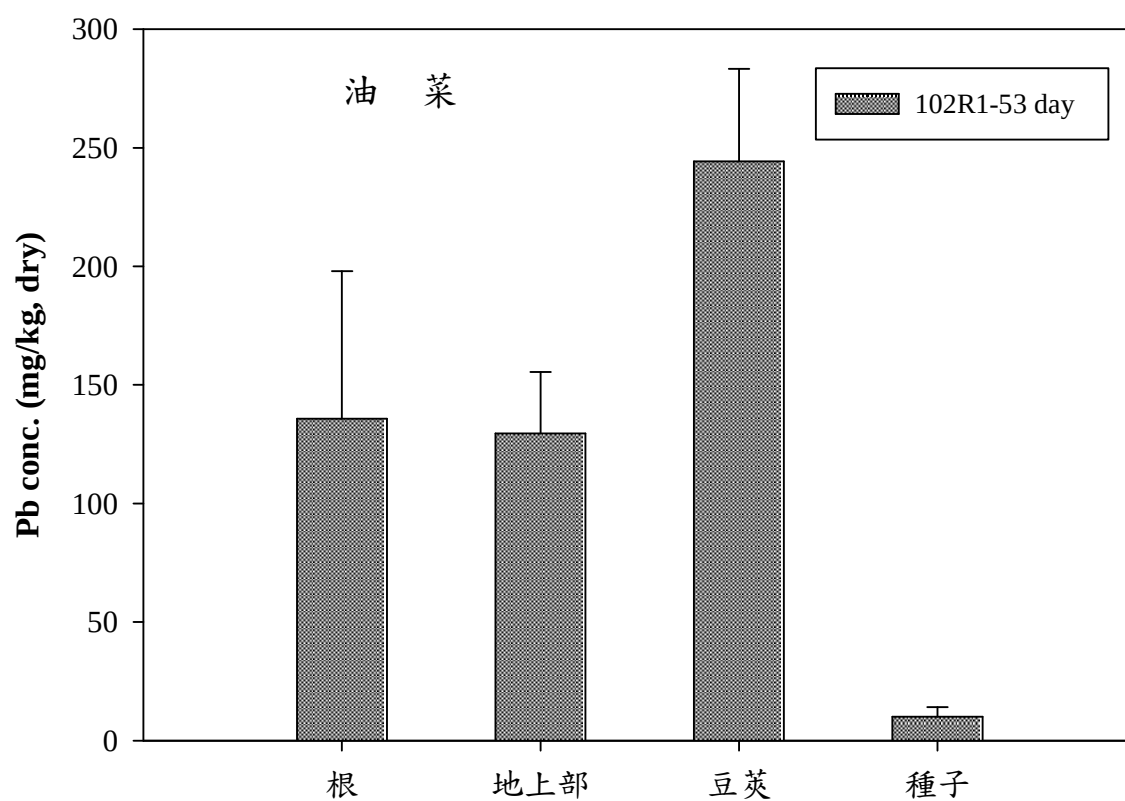
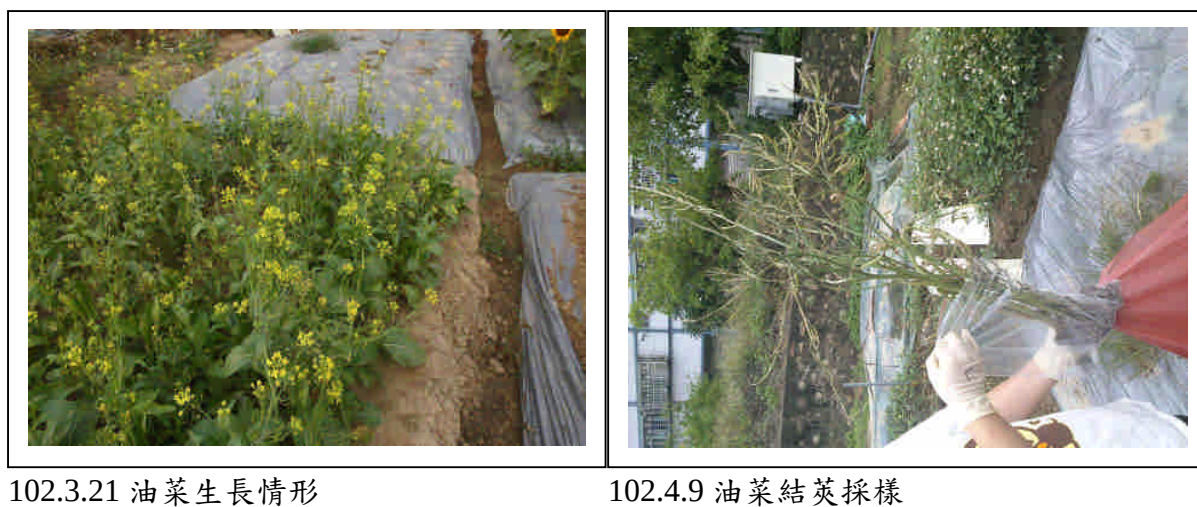


圖 3-2.6.1 第二期油菜乾基各部位鉛含量濃度。於 102 年 2 月 26 日栽種，4 月 19 日(53 天)採收檢測。

油菜很容易遭受蟲害，需要較多的除蟲與管理。根部所含的鉛濃度約 135 mg/kg；地上莖葉部分約為 130 mg/kg；豆莢約為 245 mg/kg；油菜籽的部分約為 10 mg/kg。

3-2.7 芒草

芒草於 101 年 7 月自嘉義農業試驗所取得植株開始栽種，本研究在 102 年 3 月時收割部分芒進行分析，並移植部分植株重新種植。芒草之種植情形如下面照片所示。芒草採樣分析結果如表 3-2.8.1 所示。



102.1.28 芒草生長情形



102.3.12 量測芒草植株高度



102.4.18 芒草生長情形



102.4.23 芒草生長情形

表 3-2.8.1 芒草植株高、生質量及鉛含量

	植株高	鮮植重	乾植重	地上部鉛含量	
單位	cm	(kg/叢)	(kg/叢)	(mg/kg, dry base)	
採樣日期	102.3.12			101.10.25	102.3.12
平均	191	1.40	0.50	80.3	41.8
標準偏差	9.50	0.53	0.39	12.0	12.4
樣品數(株)	5	3	3	3	3

註：植株重為收割 1 叢地上部生質量，種植密度為 1 叢/平方公尺。

芒草於 101 年 7 月種植，經過 3 個多月後於 101 年 10 月 25 日採樣分析結果，地上部之鉛含量平均約為 80.3 ± 12.0 mg/kg。經過 8 個多月後於 102 年 3 月 12 日採樣分析結果，地上部之鉛含量平均約為 41.8 ± 12.4 mg/kg，每叢芒草之生質量濕基約為 1.5 公斤左右，乾基約為 0.5 公斤，計算結果平均每叢所吸收之鉛量約為 20.9 mg。

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、地瓜、向日葵、油菜及芒草進行栽種試驗。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。其中油菜很容易遭受蟲害，需要較多的除蟲與管理，不建議作為篩選作物。高莖向日葵具有較高的生質量，但其植體中各部位對鉛的吸收濃度有低於矮莖的情形。此外高莖向日葵植株高度達將近 180 公分，容易受風吹而傾倒，需要給予固定。向日葵不適合生長於潮濕的環境，本場址 7~9 月間高溫又經常有大雨，向日葵很容易就腐爛枯萎，建議在此期間可以改種其他較適合的作物。長青 1 號玉米植株對鉛的吸收有較華珍 7 號佳的現象，值得後續再試驗確認。添加菌根菌從第一輪的試驗結果顯示，有促進玉米生質量增加的情形；但第二輪則沒有相同現象，有待後續研究確認。但從第二輪的玉米栽種試驗可以發現，添加 6 克菌根菌的玉米，所吸收的重金屬有較高的現象。經實際測試玉米的燃燒熱值，每株玉米約可產生 5000 千焦的燃燒熱值；每株玉米約可吸收 40 mg 左右的鉛。花生每株平均乾基生質量約 120 克，約可吸收 57.6 mg 的鉛。

甘蔗各部位之鉛吸收濃度會隨栽種時間減少，成熟時地上部之鉛含量幾乎都低於偵測極限。甘蔗種植管理容易，可做為褐地再利用之產能作物。地瓜地上部生長良好，但地瓜採收不易且產量不豐，地瓜各部位對鉛之吸收能力都可達 200 mg/kg 以上，但地瓜之種植及採收過程管理維護工作較多，且接觸土壤的機會較高，對栽種者之健康風險影響較大，較不建議使用。

3-4 未來工作重點

鉛在土壤中有不同的鍵結型態，植物對不同鍵結型態鉛的吸收能力不同，一般認為植物以可交換態及碳酸鹽鍵結型態的鉛較容易吸收。因此隨著植生的進行，土壤中可交

換態及碳酸鹽鍵結型態的鉛被吸收後，後續栽種的作物對鉛的吸收能力是否會有變化？還是隨著植物栽種過程，植物根圈的生物化學作用，鉛的鍵結型態是否也會逐漸轉變，轉變為植物容易吸收的型態？因目前國內外尚未有長期植生的監測資料，未能了解植生後期植物對重金屬鉛的吸收能力變化情形，也因此無法評估植生復育的成效。本研究後續的工作重點主要包括下列幾個方面：

- 1.針對所篩選出的作物持續進行現地栽種試驗，得到植生過程植體吸收重金屬鉛的效率變化線。
- 2.監測長期植生過程，土壤中重金屬鍵結型態的變化情形。
- 3.持續研究提升作物吸收重金屬鉛及提升作物產能的方法。