

重金屬污染土壤以本土植物復育之探討

林浩潭* 陳素文 沈季蓉 翁愷慎

臺中縣霧峰鄉 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所

(接受日期：2005 年 8 月 16 日)

摘 要

林浩潭*、陳素文、沈季蓉、翁愷慎 2005 重金屬污染土壤以本土植物復育之探討 植保會刊 47：241 – 250

利用盆栽試驗，以採自彰化縣花壇鄉白沙村及彰化、和美東西二圳二污染區鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅含量偏高，且鉻、銅、鎳及鋅含量達作物毒害級土壤，篩選可吸收較高量重金屬之本地植物，用於以植物吸收法整治受重金屬污染土壤農田，促進土地資源有效利用。結果顯示紅莧、白莧、野莧、油菜、高麗芝及腎蕨等六種植物皆可生長於高重金屬含量之土壤並吸收重金屬，除高麗芝及腎蕨外，其他植物之生長會受土中重金屬之影響，但紅莧、白莧及野莧具較大生植量。生長於高重金屬含量土壤之植物體中重金屬含量較高者，鎘為：紅莧、野莧及白莧，鉻與銅皆為：野莧、高麗芝及腎蕨，鎳為：紅莧、野莧、白莧及油菜，鉛為：紅莧及油菜，鋅為：紅莧、野莧、白莧、油菜及高麗芝。如依據生質量及重金屬之吸收量選擇重金屬吸收植物，去除土壤重金屬，以進行土壤復育，則紅莧、野莧、白莧及油菜之可行性較高。

(關鍵詞：重金屬、植生復育法、高吸收植物、莧菜)

緒 言

土壤污染整治方法大略可分為物理、化學及生物三種主要方法；植物整治 (phytoremediation) 屬生物整治法之一，為利用植物吸收土壤中之污染物後，經由植物之吸收與移去除除污染物⁽¹²⁾。近年來因具重金屬高吸收能力植物 (hyperaccumulators)

之陸續被發現及植物整治法具有較少破壞土壤之物理及化學性質，較低之整治費用及可降低整治所產生之廢棄物與防止二次污染等優點，而逐漸受到重視^(9, 10, 11, 14, 19)。重金屬高吸收植物之吸收重金屬量被定義為可吸收 > 0.1 至 1% 以乾重為基準之重金屬量⁽¹⁷⁾；依據文獻所載，重金屬高吸收植物有：*Thlaspi caerulescens* (可吸收 > 3% 乾

* 通訊作者。E-mail: htlin@tactri.gov.tw

重為基準之鋅，0.1% 鎘，0.8% 鉛)^(9, 21)、*Alyssum tenium* (可吸收 > 2% 鎘)⁽²⁰⁾、*Polygonum sachalinense* (可吸收 1.4% 鉛，1.3% 鋅，0.12% 鎘)⁽¹⁸⁾，其它如十字花科植物之印度芥菜 (Indian mustard) 及草類之豬草^(13, 17)等皆被用作為土壤中鋅、鎘、鎳、銅及鉛等之吸收植物。上述吸收植物大部份為外地植物，必須考量其引進後對生態之影響及適應本地環境等問題，較可行之方法為採用本地植物，但有關本地高吸收重金屬植物之研究極少，有必要進行探討。本計畫經由盆栽試驗，利用污染區土壤篩選可吸收較高量重金屬之本地植物，用於整治受重金屬污染土壤農田，促進土地資源有效利用。

材料與方法

供試土壤

盆栽試驗用土壤為採自彰化縣花壇鄉白沙村 (24°03'13.8" N, 120°32'02.9" E) 及彰化、和美東西二圳 (24°04'54.0" N, 120°01'06.1" E) 電鍍廢水污染之農田表土 (0-15 cm 深，作為處理土壤) 及裏土 (50-70 cm 深，作為對照土壤)。

土壤中重金屬分析

土壤樣品以 0.1 M 鹽酸萃取後，以感應耦合電漿放射光譜儀 (JY-138 ULTRACE ICP-AES) 檢測萃取液中鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅含量 (NIEA S320.60T)⁽²⁾；另以王水消化法萃取土壤後，以感應耦合電漿放射光譜儀檢測萃取液中鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅含量 (NIEA S321.63B)⁽⁶⁾。以砷化氫原子吸收光譜法 (NIEA S310.62C) 檢測土壤中砷含量⁽⁵⁾。以冷蒸氣無焰式原子吸收光譜法 (NIEA M317.01C) 檢測土壤中汞含量⁽⁴⁾。

盆栽試驗

取昭和草 (*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore) (Fire weed)、野萵

(*Amaranthus viridis* L.) (Green amaranth)、紅萵 (*Amaranthus caudatus* L.) (Red amaranth)、白萵 (*Amaranthus mangostanus* L.) (Edible amaranth)、光果龍葵 (*Solanum nigrum* L.) (Black nightshade) 及油菜 (*Brassica campestris* L.) (Rape) 等種子 (20 顆) 植入直徑 15 cm 裝有 1200 g 土壤 (每盆施用 5 g 臺肥 42 號複合肥料 (N 23%, P₂O₅ 5%, K₂O 5%)) 之塑膠盆中，觀察其發芽率，俟長成小苗後，每盆保留 1 株，繼續進行盆栽試驗；高麗芝 (臺北草) (*Zoysia tenuifolia* Willd.) (*Zoysia grass*) (直徑 5 cm 之草皮)、腎蕨 (*Nephrolepis auriculata* (L.) Trimen) (Sword fern) (約 10 cm 高) 等植株，植入與上述種子發芽試驗相同處理之直徑 15 cm 含 1200 g 不同土壤之塑膠盆中。每一處理種植 5 盆。腎蕨及高麗芝分別於種植前測定植株重量 (種植日數見表五)；俟植株採收後，測定水分含量、植株重量及重金屬含量，其它植物則於採收後測定水分含量、植株重量及重金屬含量，以推算生質量變化及重金屬吸收率。

植體樣品前處理

植體採收後以自來水沖洗乾淨，再以去離子水沖洗二次，入烘箱中以 75°C 乾燥 24 小時後，磨碎過篩 (40 mesh)，裝入樣品瓶中，以便分析。植體於烘乾過程中，同時進行水分含量測定。

植體中重金屬分析方法⁽¹⁶⁾

植體樣品 0.5 g，入消化瓶中以 10 ml 濃硝酸及 5 ml 濃過氯酸消化後，以去離子水定量至 25 ml，以 Whatman GFA 濾紙過濾，再以感應耦合電漿放射光譜儀檢測萃取液中鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅含量。

結 果

供試土壤理化性質

供試土壤為採自彰化縣花壇鄉白沙村及彰化、和美東西二圳受電鍍廢水污染之農田表土（0-15 cm 深，作為處理土壤）及裏土（50-70 cm 深，作為對照土壤），白沙村土壤屬酸性砂頁岩沖積土，東西二圳灌區土壤為鹼性黏板岩沖積土⁽⁸⁾，二土壤之

理化性質分別示之於表一，白沙村表土質地為壤質砂土，裏土質地為砂質壤土；東西二圳灌區表土與裏土質地皆為砂質壤土。四種土壤之有機碳含量皆低於 2%；比較二地土壤陽離子交換容量，可看出東西二圳灌區土壤高於白沙村土壤。

表一、供試土壤理化性質

Table 1. Physical and chemical properties of the soils used in the pot experiments

Soil	pH	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture	Organic carbon (%)	Cation exchange capacity (cmole ₍₊₎ /kg)
Surface soil ¹⁾ (Baisa)	6.16	85	7	8	LS	1.68	10.4
Subsoil ²⁾ (Baisa)	6.83	33	59	8	SL	1.65	5.16
Surface soil (Changhua)	7.06	61	9	30	SL	1.52	16.2
Subsoil (Changhua)	6.82	59	11	30	SL	1.35	17.3

¹⁾ 0-15 cm in depth.

²⁾ 50-70 cm in depth.

表二、臺灣地區土壤重金屬含量標準與等級區分表

Table 2. Standardization and rank groups of soil heavy metal contents in Taiwan (µg/g)

Heavy metal	Shortage	Low	Medium	High	Toxic
As ²⁾		<4	4-15	16-60	>60
Cd ¹⁾		<0.05	0.05-0.39	0.1-10	>10
Cr ¹⁾		<0.1	0.1-10	11-16	>16
Cu ¹⁾	<1	1-11	12-20	21-100	>100
Hg ²⁾		<0.1	0.1-0.39	0.4-20	>20
Ni ¹⁾		<2	2-10	11-100	>100
Pb ¹⁾		<1	1-15	16-120	>120
Zn ¹⁾	<1.5	1.6-10	11-25	26-80	>80

¹⁾ 0.1 M HCl extractable.

²⁾ As and Hg are total contents.

行政院環保署所公佈之土壤中重金屬含量標準與等級區分表（如表二），0.1 M HCl 可萃取重金屬量屬土壤中植物可能吸收者⁽¹⁾，表三為不同土壤中重金屬含量，如依表二中之等級判斷，白沙村表土中 0.1 M HCl 可萃取鉻、銅、鎳、鉛及鋅皆屬偏高，

東西二圳灌區表土中 0.1 M HCl 可萃取鉻、鉻、銅、鎳及鋅不僅偏高，且其含量遠超過白沙村土壤，鉻含量為白砂村者之 21 倍，銅為 3.3 倍，鎳為 3.6 倍，鋅為 6.7 倍；東西二圳灌區裏土中之鉻、銅、鎳及鋅亦屬偏高。王水可萃取（*Aqua Reia* extractable）

之重金屬量接近土壤重金屬之全量，供試土壤中王水可萃取之重金屬量見表三，土壤中可影響植物生長之鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅含量分別為：3-8，75-100，60-125，100，100-400 及 250-400 $\mu\text{g/g}$ ⁽¹⁵⁾，依此判斷，白沙村表土之鉻（647 $\mu\text{g/g}$ ）、銅（314 $\mu\text{g/g}$ ）、鎳（199 $\mu\text{g/g}$ ）、及鋅含量（271 $\mu\text{g/g}$ ）；東西二圳灌區表土中鎘（4.25 $\mu\text{g/g}$ ）、鉻（857

$\mu\text{g/g}$ ）、銅（963 $\mu\text{g/g}$ ）、鎳（622 $\mu\text{g/g}$ ）及鋅（995 $\mu\text{g/g}$ ）；裏土中鉻（641 $\mu\text{g/g}$ ）、銅（199 $\mu\text{g/g}$ ）及鎳（209 $\mu\text{g/g}$ ）皆足以影響植物生長。如依表四環保署所公告之土壤重金屬污染管制標準判斷⁽³⁾，白沙村表土中鉻及銅超過農作物生長之土壤污染管制標準；東西二圳灌區表土中鉻、銅、鎳及鋅皆超過農作物生長之土壤污染管制標準。

表三、供試土壤中重金屬含量

Table 3. Heavy metal contents of soils used in the experiments

Soil	Heavy metal ($\mu\text{g/g}$)							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Baisa (surface soil) ¹⁾	3.58	<0.10	23.5	222	0.16	51.2	49.5	79.5
Baisa (subsoil) ¹⁾	11.3	<0.10	<0.50	1.25	0.08	0.75	3.85	14.8
Changhua (surface soil) ¹⁾	10	3.91	503	737	0.58	186	32	535
Changhua (subsoil) ¹⁾	9.95	<0.10	234	122	0.37	62	21	72
Baisa (surface soil) ²⁾	--	0.70	647	314	--	199	67	271
Baisa (subsoil) ²⁾	--	0.50	3.20	4.55	--	1.40	8.05	34.3
Changhua (surface soil) ²⁾	--	4.25	857	963	--	622	98.3	995
Changhua (subsoil) ²⁾	--	0.85	641	199	--	209	31	119

¹⁾ Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn are 0.1 M HCl extractable, As and Hg are total contents.

²⁾ Aqua Regia extractable.

表四、環保署公告之土壤重金屬污染管制標準⁽³⁾

Table 4. Standardization for pollution control of soil heavy metals from an EPA publication⁽³⁾

Heavy metal	Pollution control standard ($\mu\text{g/g}$)
As	60
Cd	20 (5 for growing edible crops)
Cr	250
Cu	400 (200 for growing edible crops)
Hg	20 (5 for growing edible crops)
Ni	200
Pb	2000 (500 for growing edible crops)
Zn	2000 (600 for growing edible crops)

植物發芽率及植物生質量

不同植物在污染表土上之發芽率顯

示，莧科之紅莧、白莧及野莧，十字花科之油菜發芽率皆不受高量重金屬之影響，

發芽率達 100%，而其它二種植物如昭和草及光果龍葵等皆無法發芽。

生質量與重金屬吸收量、植體水份含量與土壤中重金屬之去除效率有密切關係，乾物量高、生長速度快且重金屬吸收量高者，經由植物吸收與植體之移除而降低土中重金屬含量之可行性較高，因此去除效率好之植物應具備生質量大、重金屬吸收量高及植體水份含量低等要件。種植於白沙村土壤之不同植物之生質量示於表五，比較處理與對照之生質量可發現除高麗芝、野萵及腎蕨外，其餘生長於處理土壤之植物的生質量皆因土中含較高量重金屬而比對照者低，證明此類植物之生長會受重金屬之影響。六種植物中以萵科之紅萵、白萵及野萵之生質量較大（見表五）。東西二圳土壤中重金屬含量雖遠超過毒害量，但因土壤 pH 值偏高，土中重金屬之溶解度較低，可降低其毒害，植物得以生長。表六為種植於東西二圳土壤之不同植物之生質量，臺北草、白萵與腎蕨在處理與對照之生質量無差異，其餘紅萵、野萵及油

菜皆受較高量重金屬之影響而使生長受到抑制。大部份種植於東西二圳土壤植物之生質量亦因土中重金屬含量較高生長受到抑制，致使其生質量小於種植於白沙村土壤者。六種植物中以萵科之紅萵及油菜之生質量較大。供試作物中以油菜之水份含量較高，含量範圍在 95 至 96%；其餘植物水份含量含量範圍為 81 至 90%。

植物對重金屬之吸收

種植於白沙村土壤之不同植物中重金屬含量示於表七，比較生長於裏土與表土之植物體中重金屬含量，可發現植體中六種重金屬含量皆為表土者高於裏土者，顯示供試植物可吸收土壤中之重金屬，且植體中鉻、銅、鎳、鉛重金屬因土壤中重金屬含量之增高而增高。因土壤中鎘含量較低，以致除白萵及野萵外，生長於表土與裏土之植物體中鎘含量並無差異。種植於表土之植體中鉻含量以高麗芝之 27.1 $\mu\text{g/g}$ 為最高，其次依序為：油菜=腎蕨>白萵>野萵=紅萵。林浩潭等之試驗結果亦指出高

表五、種植於白沙村土壤之不同植物之生質量及水份含量

Table 5. Biomass and water contents of plants grown on soil from Baisa

Plant	Surface soil		Subsoil		Growth period (days)
	Biomass ¹⁾ (g/day)	H ₂ O ²⁾ (%)	Biomass (g/day)	H ₂ O (%)	
Zoysia grass	0.06±0e ³⁾	84±5	0.07±0.01e	80±4	70
Red amaranth	0.54±0.29bc	90±6	1.25±0.33a	88±4	48
Edible amaranth	0.62±0.21bc	86±9	1.55±0.22a	80±5	48
Green amaranth	0.74±0.07b	82±5	0.82±0.07b	82±1	48
Rape	0.15±0.06d	97±2	0.25±0.02c	96±2	50
Sword fern	0.01±0f	83±2	0.01±0.01f	84±2	90

¹⁾ The biomass of sword fern and Zoysia grass was calculated as: (weight of the plant after harvesting – weight of the plant before planting) ÷ growth period (days). The biomass of the other plants was calculated as: weight of the plant after harvesting /growth period (days).

²⁾ H₂O (%) = (fresh weight of the plant – dry weight of the plant) ÷ fresh weight of the plant.

³⁾ Data are the mean ± standard deviations of 5 replicates; values in the same column followed by different letters significantly differ (p < 0.05) by Duncan's multiple range test.

表六、種植於東西二圳土壤之不同植物之生植量及水份含量

Table 6. Biomass and water contents of plants grown on soil from Changhua

Plant	Surface soil		Subsoil		Growth period (days)
	Biomass ¹⁾ (g/day)	H ₂ O ²⁾ (%)	Biomass (g/day)	H ₂ O (%)	
Zoysia grass	0.02±0e ³⁾	81±2	0.02±0e	81±1	70
Red amaranth	0.12±0.06d	88±3	0.28±0.06bc	90±1	38
Edible amaranth	0.08±0.01d	86±2	0.09±0.03d	88±2	48
Green amaranth	0.06±0.03de	86±2	0.33±0.07b	85±4	48
Rape	0.28±0.12bc	96±1	0.46±0.09a	95±2	50
Sword fern	0.02±0.01e	82±3	0.02±0e	84±2	90

¹⁾ The biomass of sword fern and Zoysia grass was calculated as: (weight of the plant after harvesting – weight of plant before planting) ÷ growth period (days). The biomass of the other plants was calculated as: weight of plant after harvesting / growth period (days).

²⁾ H₂O (%) = (fresh weight of the plant – dry weight of the plant) ÷ fresh weight of the plant.

³⁾ Data are the mean ± standard deviations of 5 replicates; values in the same column followed by different letters significantly differ ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

麗芝為高吸收鎘之植物⁽⁷⁾。銅含量以油菜 (30.1 µg/g)、高麗芝 (31.5 µg/g) 及腎蕨 (28.9 µg/g) 為最高，其次依序為：野萵=紅萵>綠萵。鎳含量以油菜 (81.0 µg/g) 及野萵 (78.2 µg/g) 為最高，其次依序為：白萵=紅萵=腎蕨>高麗芝。鉛含量以油菜 (5.40 µg/g) 為最高，其次依序為：白萵=高麗芝=紅萵>野萵=腎蕨。鋅含量以野萵 (88.5 µg/g)、白萵 (82.5 µg/g)、高麗芝 (80.5 µg/g)、油菜 (79.2 µg/g) 及紅萵 (78.0 µg/g) 含量較高，腎蕨含量最低。

在本試驗之情形下，植物吸收重金屬量與土壤中重金屬含量成正比，東西二圳土壤中重金屬含量因高於白沙村者，故生長於上之植體中含較高量之重金屬（見表八），所有生長於表土之供試植物中鎘、銅、鎳、鉛及鋅等金屬含量皆顯著高於生長於裏土者。就植物體中之鎘而言，生長於表土之紅萵、白萵、野萵植體中鎘含量皆顯著高於生長於裏土者，植體中鎘含量以紅萵之 5.96 µg/g 為最高，其次為野萵=白萵> 油菜>高麗芝>腎蕨。鎘含量以高麗

芝 (80.0 µg/g) 為最高，其次依序為：腎蕨=野萵>油菜>紅萵=白萵。銅含量以野萵 (263 µg/g) 為最高，其次依序為：高麗芝=腎蕨>油菜=紅萵=白萵。鎳含量以紅萵 (252 µg/g)、野萵 (245 µg/g) 及白萵 (233 µg/g) 為最高，其次依序為：油菜>腎蕨=高麗芝。鉛含量以紅萵 (14.5 µg/g) 為最高，其次依序為：高麗芝>腎蕨=油菜=野萵>白萵。鋅含量以白萵 (288 µg/g)、油菜 (268 µg/g)、野萵 (254 µg/g) 及紅萵 (244 µg/g) 含量較高，腎蕨與高麗芝含量最低，皆為 123 µg/g。

討 論

種子發芽試驗之供試植物如：野萵、昭和草、光果龍葵及油菜等皆屬污染區常見之植物，十字花科之油菜在國外被作為吸收鉛之植物⁽¹⁸⁾，試驗結果顯示萵科之紅萵、白萵及野萵，十字花科之油菜等種子皆可於重金屬含量達毒害量之土壤上發芽，且發芽率達 100%；植物之生植量與重

金屬吸收量、植體水份含量等與土壤中重金屬之去除效率有密切關係，乾物量高、生長速度快且重金屬吸收量高者可經由植物吸收與植體之移除而降低土中重金屬之含量，因此去除效率好之植物應具備生植量大、重金屬吸收量高及植體水份含量低等要件。紅莧、白莧、野莧、油菜、高麗芝及腎蕨等六種供試植物皆可生長於重金屬含量達毒害濃度之土壤並吸收重金屬，植體中重金屬量與土壤中重金屬含量成正

比，除高麗芝、野莧及腎蕨外，其他植物之生長會受土中重金屬之影響，紅莧、白莧及野莧之生植量較大。生長於高重金屬含量土壤植物植體中重金屬含量較高者，鎳為：紅莧、野莧及白莧，鉻與銅皆為：野莧、高麗芝及腎蕨，鎘為：紅莧、野莧、白莧及油菜，鉛為：紅莧及油菜，鋅為：紅莧、野莧、白莧、油菜及高麗芝。如依據生植量及對重金屬之吸收量選擇重金屬吸收植物，以進行生物整治，則紅莧、野莧、白

表七、種植於白沙村土壤之不同植物中重金屬含量 (µg/g, 以乾重為基準)

Table 7. Heavy metal content of plants grown on soil from Baisa (µg/g on the dry weight basis)

Plant	Cd		Cr		Cu	
	S ¹⁾	Sb ²⁾	S	Sb	S	Sb
Zoysia grass	0.56±0.22bcd ³⁾	0.50±0.13cd	27.1±2.9a	5.75±1.07de	31.5±5.3a	8.67±1.76cd
Red amaranth	0.70±0.13ab	0.56±0.04bcd	7.45±1.63cd	3.64±2.49ef	15.6±3.5b	3.08±0.74e
Edible amaranth	0.77±0.04a	0.43±0.07de	9.04±3.35c	1.60±0.47f	12.0±2.7c	3.53±0.66e
Green amaranth	0.76±0.08a	0.28±0.16ef	7.93±0.43cd	6.05±1.08de	18.2±1.4b	4.08±0.55e
Rape	0.63±0.19abc	0.58±0.14bcd	16.7±2.7b	6.01±1.40de	30.1±4.5a	11.9±3.0c
Sword fern	0.16±0.04fg	0.05±0.01g	16.8±3.1b	14.9±0.8b	28.9±4.0a	5.44±0.42de
	Ni		Pb		Zn	
	S	Sb	S	Sb	S	Sb
Zoysia grass	31.2±7.1c	4.75±1.29d	4.28±1.58b	2.82±0.66c	78.0±9.0c	17.4±4.1d
Red amaranth	59.1±15.5b	2.59±0.40d	4.24±0.72b	1.23±0.15d	78.0±9.0b	17.4±4.1e
Edible amaranth	50.2±28.5b	3.84±0.70d	4.43±0.77b	0.99±0.15d	82.5±4.8ab	16.4±1.2e
Green amaranth	78.2±11.6a	3.26±0.19d	3.18±0.72c	1.41±0.44d	88.5±10.5a	16.1±2.12e
Rape	81.0±7.6a	6.19±1.07d	5.40±0.47a	3.16±0.38c	79.2±2.8ab	24.3±4.4de
Sword fern	46.6±7.4b	6.37±0.80d	3.29±0.65c	2.49±0.28c	58.5±7.2c	33.1±7.1d

¹⁾ Surface soil.

²⁾ Subsoil.

³⁾ Data are the mean ± standard deviations of 5 replicates; values in the same column followed by different letters significantly differ (p < 0.05) by Duncan's multiple range test.

表八、種植於東西二圳土壤之不同植物中重金屬含量 ($\mu\text{g/g}$, 以乾重為基準)Table 8. The heavy metal content of plants grown on the soil from Changhua ($\mu\text{g/g}$ on the dry weight basis)

Plant	Cd		Cr		Cu	
	S ¹⁾	Sb ²⁾	S	Sb	S	Sb
Zoysia grass	1.25±0.22def ²⁾	0.87±0.15efg	80.0±5.6a	35.0±3.3cd	114±8b	26.9±4.1e
Red amaranth	5.96±1.09a	1.72±0.30c	39.5±3.8c	14.6±2.0e	68.0±5.7c	26.1±2.6e
Edible amaranth	3.80±0.08b	1.68±0.25c	37.3±2.0c	5.40±0.38f	66.0±6.2c	17.3±1.9e
Green amaranth	3.44±0.74b	1.45±0.56cde	47.3±9.5b	13.1±1.1e	263±41a	49.9±6.6d
Rape	1.68±0.28cd	0.98±0.18def	30.7±4.6d	7.73±0.79f	68.7±6.0c	29.5±6.2e
Sword fern	0.63±0.08f	0.36±0.04g	49.5±3.2b	15.4±2.2e	98.6±6.7b	24.5±2.3e
	Ni		Pb		Zn	
	S	Sb	S	Sb	S	Sb
Zoysia grass	80.2±2.0bc	27.5±6.5g	10.8±0.7c	7.91±1.80d	123±11b	51.0±8.7d
Red amaranth	252±35a	70.0±9.0cde	14.5±1.5a	12.8±1.2b	244±122a	76.9±3.5bcd
Edible amaranth	233±13e	56.3±8.7def	3.84±0.48f	1.39±0.42g	288±36a	86.2±5.3bcd
Green amaranth	245±46a	46.4±2.2efg	8.04±1.47d	1.52±0.26g	254±13a	65.4±7.7cd
Rape	104±10b	44.9±8.4fg	7.61±1.15d	5.47±1.61e	268±34e	108±20bc
Sword fern	90.1±11.1bc	40.5±6.0fg	8.81±0.58d	5.44±0.48e	123±18b	55.8±9.0cd

¹⁾ Surface soil.

²⁾ Subsoil.

³⁾ Data are the mean \pm standard deviations of 5 replicates; values in the same column followed by different letters significantly differ ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

莧及油菜之可行性較高。為落實利用植物吸收以整治受重金屬污染土壤，植物吸收重金屬之最盛期，利用肥培管理或添加適當之物質增進重金屬之吸收，具高吸收潛能植物之篩選等皆值得再進一步探討。

謝 辭

本研究承行政院農委會計畫 90 農科-1.5.3-藥 P1(1) 經費補助，試驗期間承石杏

華小姐在實驗上之協助，謹此誌謝。

引用文獻

1. 日本土壤標準分析、測定法委員會。1986。土壤標準分析測定法。日本土壤肥料學會。博友社。東京。354 頁。
2. 行政院環保署。1991。土壤中水分及砷、鉻、銅、汞、鎳、鎳、鉛、鋅暫行檢測方法 (NIEA S320.60T)。環署

- 檢字第 27038 號公告。
3. 行政院環保署。2001。土壤污染管制標準。環署水字第 0073684 號公告。
 4. 行政院環保署。2002。土壤、固體或半固體廢棄物中總汞檢測方法-冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317.01C)環署檢字第 0910041566 號公告。
 5. 行政院環保署。2002。土壤中砷檢測方法-砷化氫原子吸收光譜法(NIEA S310.62C)環署檢字第 0910041985 號公告。
 6. 行政院環保署。2003。土壤中重金屬檢測方法-王水消化法(NIEA S321.63B)環署檢字第 0920047102 號公告。
 7. 林浩潭、林景和、李國欽。1997。重金屬含量偏高休耕區種植非食用性作物與換土之評估。第五屆土壤污染防治研討會論文集：污染土壤之整治復育技術，第 235-252 頁。
 8. 陳尊賢。1991。認識臺灣土壤。土壤管理手冊，第 41-123 頁。國立中興大學土壤調查試驗中心編印。台中。
 9. Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Sidoli, C. M. D., and Reeves, R. D. 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soil using crops of metal-accumulating plants. *Resour. Conserv. Recycl.* 11: 41-49.
 10. Brooks, R. R. 1998. Plants that hyperaccumulate heavy metals. CAB International, New York. 380 pp.
 11. Bañuelos, G. S., and Ajwa, H. A. 1999. Trace elements in soils and plants: an overview. *J. Environ. Sci. Health A34*: 951-974.
 12. Comis, D. 1996. Green remediation: Using plants to clean the soil. *J. Soil Water Conserv.* May-June: 184-186.
 13. Harvey, B. 1995. Absorbing possibilities: Phytoremediation. *Environ. Health Persp.* 103: 1106-1108.
 14. Khan, A. G., Kuek, C., Chaudhry, T. M., Khoo, C. S., and Hayes W. J. 2000. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere* 41: 197-207.
 15. Leep, N. W. 1981. Effect of heavy metal pollution on plants. Vol. 1. Effects of trace metals on plant function. Dekker, New York. 352 pp.
 16. Li, G. C., Lin, H. T., and Lai, C. S. 1994. Uptake of heavy metals by plants in Taiwan. *Environ. Geochem. Health* 16: 153-160.
 17. Meagher, R. B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biotechnol.* 3: 153-162.
 18. Overcash, M. 1996. European soil remediation research: 1992-1994. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 26: 337-368.
 19. Terry, M., and Lewis, G. M. 1997. The advancement of phytoremediation as an innovative environmental technology for stabilization, remediation, or restoration of contaminated sites in Canada: A decision paper. *J. Soil Contam.* 6: 227-241.
 20. Yang, X., Baligar, V. C., Martens, D. C., and Clark, R. B. 1996. Plant tolerance to nickel toxicity: I. Influx, transport, and accumulation of nickel in four species. *J. Plant Nutr.* 19: 73-85.
 21. Watanabe, M. E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environ. Sci. Technol.* 31: 182-186.

ABSTRACT

Lin, H. T.*, Chen, S. W., Shen, C. J., and Wong, S. S. 2005. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil with local plants. Plant Prot. Bull. 47: 241-250. (Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute, Wufeng, Taichung 41358, Taiwan (ROC))

Eight plants that commonly grow in the heavy metal-polluted fields including, fireweed (*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore), black nightshade (*Solanum nigrum* L.), sword fern (*Nephrolepis auriculata* (L.) Trimen), Zoysia grass (*Zoysia tenuifolia* Willd.), rape (*Brassica campestris* L.), green amaranth (*Amaranthus viridis* L.), red amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) and edible amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.), were studied to evaluate their phytoremediation potential by seed germination and growth experiments with heavy metal-polluted soils. The results indicated that sword fern, Zoysia grass, rape, green amaranth, red amaranth and edible amaranth survived on high polluted soil with high concentrations of Cd (4.25 µg/g), Cr (857 µg/g), Cu (963 µg/g), Ni (622 µg/g) and Zn (995 µg/g). Furthermore, these plants can concentrate the heavy metals in the soil. Zoysia grass contained 80 µg/g of Cr and green amaranth contained 263 µg/g of Cu in the dry matter. The Ni contents of green amaranth, red amaranth and edible amaranth were 245, 252 and 233 µg/g, respectively. Red amaranth, green amaranth, edible amaranth, and rape contained as high as >200 µg/g Zn in the dry matter. Based on the high biomass and the ability to accumulate heavy metals, red amaranth, green amaranth, edible amaranth, and rape have the potential as hyperaccumulation plants.

(Key words: heavy metal, phytoremediation, hyperaccumulation plants, amaranth)

*Corresponding author. E-mail: htlin@tactri.gov.tw