

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 99-00-5-10

以植生復育法移除  
平地造林地土壤重金屬污染

Removed metal-contaminated soil in farmland  
afforestation by phytoremediation



成果報告

委託機關：行政院農委會林務局

執行機關：國立中興大學森林學系

中華民國一〇〇年三月

## 研究團隊說明

### (一)計畫主持人

姓名：顏江河

所屬機關：國立中興大學森林系

職稱：副教授

聯絡電話：04-22840346 轉 117

傳真：04-22873628

電子信箱：chyen@nchu.edu.tw

### (二)其他研究人員

研 究 人 員	所 屬 機 關	職 稱
李苑瑋	國立中興大學森林系	博士生
呂政芳	國立中興大學森林系	碩士生
藍星宇	國立中興大學森林系	碩士生
黃家瑩	國立中興大學森林系	碩士生
張競元	國立中興大學森林系	碩士生
劉怡君	國立中興大學森林系	碩士生
陳庭筠	國立中興大學森林系	碩士生
曾璿融	國立中興大學森林系	碩士生
宋芳儒	國立中興大學森林系	碩士生
郭晉維	國立中興大學森林系	碩士生
吳依縈	國立中興大學森林系	碩士生

## 摘要

隨著礦業、工業、農業的發展，重金屬汙染問題已成為現今最嚴重的環境問題之一。改善土壤重金屬汙染的方法包括物理、化學或生物等三類，生物方法就是所謂的植生復育。植生復育是一項對於環境較為友善、不具侵略性、費用較便宜之技術。本研究之目的為評估與測試平地造林樹種植生復育之潛能，以移除土壤重金屬汙染。試驗地為鎘汙染地(32.73 mg/kg)，研究結果顯示，苗木栽植前後，植體中鈣下降，重金屬濃度有增加的趨勢，其他養分則無明顯變化；而土壤全氮及陽離子交換容量(CEC)並無太大差異，僅有效磷有增加之現象。試驗樹種中，以烏柏(6.86 mg/株)、苦楝(6.10 mg/株)、台灣欖(5.99 mg/株)、黃連木(5.09 mg/株)及光臘樹(3.06 mg/株)復育鎘之效果為佳。植生復育之效率受許多因素影響，例如植物吸收重金屬的能力、土壤重金屬濃度、土壤物化性質等。植生復育需要長期的復育才能展現其復成果。若藉一些方法改善植生復育之效率，例如接種菌根。

**【關鍵字】** 植生復育

## Abstract

With the developments of mining, industry, agriculture, heavy metal pollution have become one of the most serious environmental problem nowadays. The way of improving soil heavy metal pollution includes physical, chemical and biological methods. Biological method is so called phytoremediation. Phytoremediation is a eco-friendly, not invasive and low-cost technology. This study aims to assess and test the potential of the afforestation species for the phytoremediation to remove heavy metal pollution in soil. The experimental field was contaminated by cadmium (32.73 mg/kg). The results showed that before, after planting seeding, the calcium in the tissue decreased and heavy metal concentration increased. However, other nutrient in tissue did not significantly change. The soil nitrogen and cation exchange capacity (CEC) did not have much differences but phosphorus increased. Among experimental species which had the better performances of phytoremediation for cadmium is *Sapium sebiferum* (6.86 mg/tree), *Melia azedarach* (6.10 mg/tree), *Zelkova formosana* (5.99 mg/tree), *Pistacia chinensis* (5.09 mg/tree) and *Fraxinus formosana* (3.06 mg/tree). Phytoremediation efficiency is influenced by many factors, such as the ability of the plant to absorb heavy metal, soil heavy metal concentration, the soil physical and chemical characteristics. Hence, Phytoremediation requires a long time period to be effective. It would improve phytoremediation efficiency by some methods, for example incubation mycorrhiza.

【關鍵字】 phytoremediation

## 壹、前言

隨著礦業、工業、農業和城市活動的發展，世界各地的土壤污染問題日益嚴重，除了破壞土壤的各種功能、危害生態系的生物外，亦污染水源，此污染問題已成為現今最嚴重的環境問題之一，並且有迫切改善之需要，因此，許多改善污染問題之技術因應而生。

土壤污染物的種類眾多，包括重金屬、農藥、可溶性鹽類、酸鹼物質及人為合成有機物質等，在台灣地區，土壤污染物的種類主要分為重金屬、加油站有機污染及不明廢棄物污染等三大類。台灣土壤受重金屬污染的主因為工廠排放未經妥善處理的廢水，再經由灌溉渠道進入農田，造成重金屬污染(陳尊賢，1995)。

依據行政院環保署 91 年度農地土壤重金屬調查與場址列管計畫，已完成全國 319 公頃農地及個案農地之污染調查，並結合環保署歷年調查計畫及各地方環保局歷年相關計畫調查結果顯示，達土壤污染管制標準農地有 1,755 筆(約 408.78 公頃)，其中以彰化縣公告之 936 筆(約 230.80 公頃)為最多，其次為桃園縣 291 筆(約 66.92 公頃)，新竹市 200 筆(約 35.93 公頃)次之。

改善土壤重金屬污染的方法可分成物理、化學或生物等三類。依據環保署公告列管之農地污染改善方式，主要是利用物理或化學的方式，例如土壤翻土混和稀釋法、排土法、客土法及土壤酸洗法。但是，

物理及化學方法不但費用昂貴，亦會造成土壤結構的破壞、降低土壤中的生物活性及肥力。而生物的方式，也就是所謂的植生復育(phytoremediation)，它是一項對於環境較為友善、不具侵略性、費用較便宜且有效的技術，因此，在過去十幾年間廣泛地受到重視與應用(Wang and Jia, 2010)。此外，近幾年來綠色造林及減能減碳之概念興起，植生復育除了能夠移除土壤之污染物外，亦可實踐碳吸存(carbon sequestration)、碳儲存(carbon conservation)，因此，植生復育技術可望為一可行的重金屬污染復育技術。本計畫之目的為評估與測試平地造林樹種中，何種植物具有較佳植生復育法的功能，並達成移除土壤重金屬污染源的目標。

## 貳、前人研究

近十年來，一種結合陽光、植物及自然界微生物特性，成本低廉、兼顧自然景觀與環境污染整治，大眾接受度高的污染整治技術，在歐美地區掀起一陣熱潮，歐美各國稱此技術為 phytoremediation，就其字義與功能特性則是以“綠色植生污染整治技術”或“植生復育法”稱之(侯善麟，2010)。

### 一、植生復育法移除重金屬之機制

利用植物移除、固定或降低重金屬污染，以達污染整治目的之作用機制可以分成下列幾項：

### (一) 植物萃取作用(phytoextraction)

植物萃取作用是針對重金屬汙染整治而言，植物可以自土壤中吸收並傳送、儲存金屬成分於植物各部分的組織。植物對土壤重金屬的萃取能力因植物種類有所不同，不同種類的植物對重金屬吸收與累積能力有極大的差異性(侯善麟，2010)。適用於植生萃取的植物應該具有下列特性：1. 對金屬具有高度耐性 2. 對金屬的累積能力佳 3. 高生物量 4. 生長快速 5. 具有良好的根系 (Jabeen *et al.*, 2009)。但這些特性很難同時出現於一種植物上，所以植生萃取常是使用超積累植物或是生物量大的植物 (Vamerali *et al.*, 2010)。

### (二) 植生穩定化作用(phytostabilization)

穩定化作用是利用植物根系分泌物改變土壤的生物化學、物理性質，使有毒的汙染物轉變成較低毒性的型式（例如沉澱），藉根系的吸收及化學固定，避免汙染物因水及風的侵蝕而流入地下水中 (Jabeen *et al.*, 2009)。

### (三) 植物過濾/根過濾(phytofiltration/ rhizofiltration)

植物過濾是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱等作用來處理受污染之水質(李芷儀，2009)。理想的植生過濾植物應該具有金屬耐性大、能累積大量金屬及根系表面積、生物量大的特性 (Jabeen *et al.*, 2009)。一般使用水栽陸生植物，因為陸生植物的根系具

有長而纖細、表面積大的特性（李芷儀，2009）。

在植生復育的過程中，上述機制常彼此結合，且其效率常受到土壤物化性質、植物與微生物分泌物、植物對金屬吸收累積及耐性、金屬的生物有效性等因素所影響（Jabeen *et al.*, 2009）。

## 二、重金屬之累積

Nouri 等 (2009) 於伊朗哈瑪丹省 Hame kasi 礦區附近採取當地主要優勢組成的植物，及其土壤樣本做重金屬分析。結果顯示生長於礦區附近的某些植物於體內累積的重金屬濃度高於重金屬對一般植物的毒害濃度，卻不影響其生長情況。此外，植物對重金屬累積的部位因植物及重金屬種類而有所差異，且植物地下部金屬濃度維持較低者，可能是因為具有金屬排斥 (exclusion) 的能力；某些植物的金屬含量高於毒害濃度，顯示其可能具有金屬解毒之耐性機制。

根據 Wang 和 Jia (2010) 的實驗結果顯示，在相同鎘、銅的處理下，加拿大白楊 (*Populus canadensis*) 的生物量、植體重金屬濃度皆高於黃花落葉松 (*Larix olgensis*)，加拿大白楊能夠吸收  $56.2 \text{ g ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  的鎘及  $196 \text{ g ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  的銅，黃花落葉松吸收  $14.9 \text{ g ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  的鎘及  $109.5 \text{ g ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  的銅(此處的 y 為年)，因此，加拿大白楊較適於做為植生復育的樹種。此外，這篇研究估計了此兩種植物在復育這種污染程度所需要的時間，加拿大白楊對於鎘及銅的復育各需要 56 年及

803 年，而黃花落葉松則需要 211 年及 1,440.7 年來復育鎘及銅。

### 三、養分與植生復育之關係

Leblebici 和 Aksoy (2011) 研究小葉浮萍(*Lemna minor*)及水萍(*Spirodela polyrhiza*) 鉛累積量與養分交互作用之關係，結果顯示磷及氮養分的添加將會增加重金屬之移除量，這是由於養分添加促進其生物量，進而提升其重金屬累積量。

戴佳如 (2004) 探討不同氮肥形態對七種蔬菜重金屬吸收之影響，結果顯示施用硫酸銨處理者，地上部鋅、鎘和鎳的濃度皆較其他處理高，但以重金屬總吸收量而言，以施用硝酸態氮的處理最高。因此，除了依據植物生質量及重金屬吸收量選擇植物種類外，若能配合適當的肥培管理則能夠增進重金屬之吸收。

吳哲宇 (2010) 選用培地茅與狼尾草兩種大型禾草植物，以三種植栽密度及施用兩種不同肥料量進行植生復育效果之評估。結果顯示培地茅於高密度高肥量處理，具有最佳的移除效果；狼尾草最佳表現出現於低密度高肥量之處理。

Shams 等 (2010) 分別以 200 mg/l 及 500 mg/l 鉻處理 *Urtica dioica*，結果顯示其葉部的鉀濃度隨著鉻濃度之增加有下降的現象，但地下部鉀濃度卻隨鉻濃度增加而上升。此外，其地下部磷濃度與鉻處理濃度之變化有相同的趨勢，但葉部則否，指出其地下部鉀與磷濃

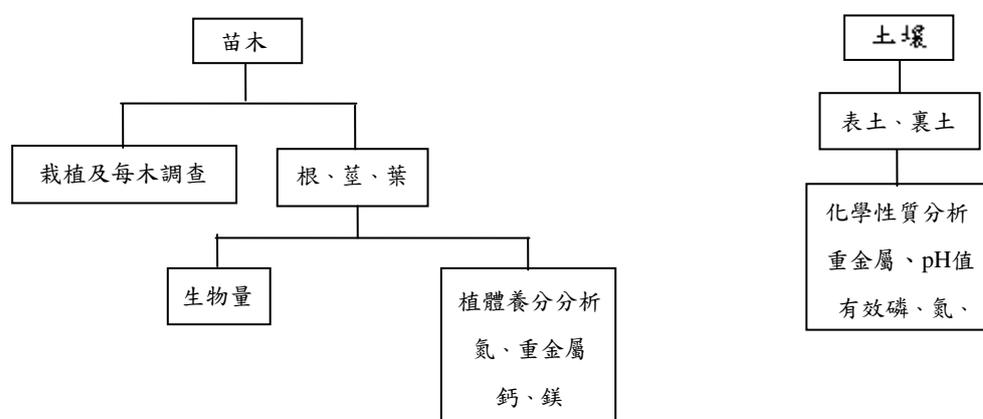
度之增加是此植物在500 mg/l 鉻處理下存活的主要原因。

Siddiqui (2010) 在研究中提到在重金屬解毒機制中，鈣扮演著重要的角色。因為鈣能夠促進抗氧化酵素的活性、減少細胞膜的脂質過氧化物 (lipid peroxidation) 穩定細胞膜避免細胞值滲漏之現象發生。

## 參、材料方法

本研究試驗地為被彰化縣政府列為重金屬汙染地之農田，地號為彰興段 163，座標為北緯 24°07' 52.64"，東經 120°50' 50.10"，面積約 1.4 分(圖 1)，經承租手續後，將進行 19 種平地造林常用樹種栽植之，其中包括光臘樹(*Fraxinus formosana*)、大葉桃花心木(*Swietenia macrophylla*)、烏心石(*Michelia compressa*)、台灣肖楠(*Calocedrus formosana*)、台灣欒(*Zelkova formosana*)、無患子(*Sapindus mukorossii*)、樟樹(*Cinnamomum camphora*)、印度紫檀(*Pterocarpus indicus*)、台灣欒樹(*Koelreuteria formosana*)、烏柏(*Sapium sebiferum*)、毛柿(*Diospyros discolor*)、楓香(*Liquidambar formosana*)、黃連木(*Pistacia chinensis*)、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、棟樹(*Melia azedarach*)、茄苳(*Bischofia jabanica*)、青剛櫟(*Cyclobalanopsis glauca*)、臺灣相思樹(*Acacia confusa*)、羅漢松(*Podocarpus macrophyllus*)等 19 種樹種。其試驗流程如圖，可分為苗木與土壤試驗兩部分，在苗木方面，包括苗木的栽植及每木調查，將苗木做三個

等級的區分，為客觀的判定不同樹種的吸收重金屬能力，以相同生長勢的苗木進行相互比較，並將未栽植於試驗地的苗木根、莖、葉進行重金屬及養分分析做為背景數據。當苗木栽植五個月後，為免破壞性取樣，故採取各樹種三個等級之葉子進行重金屬分析。栽植八個月後，挖取各樹種三個等級之苗木，並分為根、莖、葉等三個部位之重金屬及養分分析，配合生物量的數據以推算重金屬的累積量；在土壤方面，包括栽植苗木前、後土壤之表土及裏土化學性質分析。藉此探討各樹種三個等級苗木重金屬累積量、植體養分與土壤重金屬量之關係。



### 一、苗木之培育栽植、每木調查與分級

苗木先在 4 吋美質袋中培育，再栽植於彰化試驗地(圖 1)，苗木栽植間距為 0.8 公尺，以 16 株苗木為一單位，並挖掘 1 公尺寬的排水溝(圖 2)。苗木栽植後 1、3、5、6 個月分別進行每木調查，亦定期施行刈草作業，此外，為減少刈草次數及面積，鋪設刈草蓆。以栽植

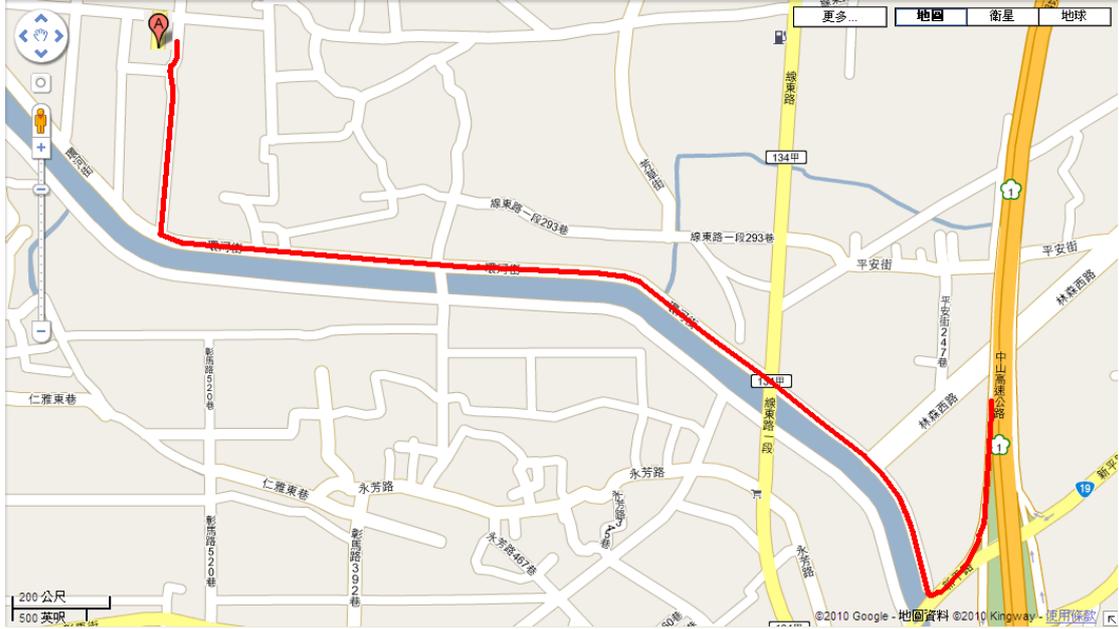


圖 1.試驗地地點路線圖。

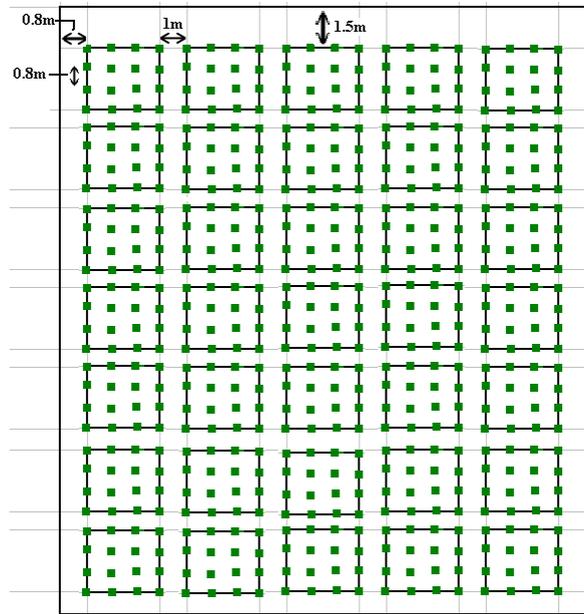


圖 2.苗木栽植示意圖。

六個月的苗木地徑及樹高之乘積做為分級標準，一至三級分別為生長較佳至較差者。

## 二、植體分析

植體分根、莖、葉三部分進行重金屬及養分分析，並在收穫後，將植株洗淨，以紙巾吸去表面水分後，將其分為根、莖、葉三部份，各放入牛皮紙袋中，置於溫度 60 °C 烘乾，分別稱重取得其生物量，以計算植體所含重金屬之總量。秤取 0.4 克植體於消化管，並加入植體分解液，將樣本置於分解爐中消化。消化完畢，以洗瓶將樣本洗入 100 ml 定積瓶中，定積至 100 ml，取 50 ml 樣液進行凱氏氮分析含氮量，另外 50 ml 以濾紙過濾於 Vioa 瓶中，以感應耦合電漿光譜分析儀測定鉛(Pb)、鎘(Cd)、鋅(Zn)、銅(Cu)、鐵(Fe)、錳(Mn)、鎳(Ni)等七種重金屬及磷、鉀、鈣、鎂之濃度。

## 三、土壤化學性質之分析

在苗木栽植前後皆進行土壤化學性質之分析，分析項目如下：

### (一)土壤重金屬分析

採取苗木土球之土壤進行重金屬分析，確定苗木土球是否含有重金屬。苗木栽植前試驗地土壤則分為表土(0~15 cm)、裏土(15~30 cm)隨機採取 5 個樣點做重金屬分析，以了解試驗地土壤的重金屬含量現況。重金屬的分析包括 Pb、Cd、Zn、Cu、Fe、Mn、Ni 等七種重金

屬。測定方式為取風乾土 10 克於 250 ml 角錐瓶，加入 100 ml 0.1 N HCl，振盪 1 小時(120~180 rpm)，再以 whatman42 濾紙過濾，以感應耦合電漿光譜分析儀測定重金屬濃度。

## (二)土壤 pH 值測定

對苗木土球及試驗地土壤做pH值測定。取5克土壤與12.5 ml 去離子水混合成懸浮液，攪拌後靜置24小時後以玻璃電極測定。

## (三)土壤有效磷測定

對苗木土球及試驗地土壤進行有效磷之測定。取 1 克土壤，置於 50 ml 角錐瓶中，加入 7 ml 抽出液，震盪 1 分鐘後，以 whatman 42 濾紙過濾，取此樣液 2 ml 加入 5 ml 去離子水，2 ml 鉬酸銨液，及 1 ml 氯化亞錫稀釋液，混合均勻後，以分光光度計於波長 660 nm 下測定吸光值，利用標準曲線得出樣液之磷濃度。

## (四)土壤全氮

取 0.5 克土壤置於消化管中，加入催化劑及濃硫酸後，放入分解爐中進行消化。消化完畢，以洗瓶將樣本洗入 100 ml 定積瓶中，並積至 100 ml。取出 50 ml 樣本置凱氏氮蒸餾裝置進行蒸餾，以 0.05 N 硫酸進行滴定，並計算含氮量。

## (五)土壤陽離子交換容量(CEC)

用中性醋酸法(Rhoades, 1982)測之，取 5 g 風乾土以 250 ml 去離

子水清洗後，以每次 25~30 ml 的 1 N 醋酸銨淋洗 5~6 次，再以 1 N 醋酸銨定積至 200 ml，以 Whatman No. 42 濾紙過濾，濾液以感應耦合電漿光譜分析儀測可置換性陽離子鉀、鈉、鈣、鎂。

## 肆、結果與討論

### 一、苗木

#### (一) 生長量

表 1 為 19 種樹種栽植於試驗地後，1、3、5、6 個月時每木調查之資料。表 1 顯示出平均月生長量最大者為苦楝，其每月地徑可生長 3.13 mm，樹高可生長 14.20 cm，地徑生長依次為烏柏、樟樹、大葉桃花心木、光臘樹、印度紫檀、無患子，最緩慢者為青剛櫟，樹高生長依序為黃連木、台灣欒、印度紫檀、光臘樹、大葉桃花心木、無患子，最少者為烏心石。

#### (二) 生物量及重金屬濃度

在重金屬含量高的生育地中，植物會受到毒害作用，導致生長衰退甚至死亡，不過有許多研究指出有些植物卻能夠在重金屬污染地存活並且無任何毒害的病徵。Pb、Cd、Zn、Cu、Mn、Ni 對一般植物之毒害濃度分別為 10-20 mg kg<sup>-1</sup>dw、5-10 mg kg<sup>-1</sup>dw、150-200 mg kg<sup>-1</sup>dw、15-20 mg kg<sup>-1</sup>dw、170-2,000 mg kg<sup>-1</sup>dw、20-30 mg kg<sup>-1</sup>dw (Vamerali *et al.*, 2010)。表 2 為 19 種平地造林樹種體根、莖、葉之

生物量及重金屬濃度。由表 2 中可知，生物量排名前十分別為苦楝、樟樹、烏柏、台灣檫、光臘樹、茄苳、印度紫檀、黃連木、無患子、肖楠。植物根部 Pb 濃度最高者為相思樹(37.57 ppm)，Cd 濃度最高者為茄苳(42.80 ppm)，Zn 濃度最高者為烏心石(60.87 ppm)、Cu 濃度最高者為杜英(118.28 ppm)，Fe 濃度最高者為茄苳(140.98 ppm)、Mn 濃度最高者為肖楠(95.98 ppm)，Ni 濃度最高者為杜英(34.23 ppm)；植物莖部 Pb 濃度最高者為烏柏(79.68 ppm)，Cd 濃度最高者為烏柏(57.05 ppm)，Zn 濃度最高者為楓香(147.71 ppm)，Cu 濃度最高者為台灣檫(261.51 ppm)，Fe 濃度最高者為烏柏(150.69 ppm)，Mn 濃度最高者為楓香(224.74 ppm)，Ni 濃度最高者為楓香(36.33 ppm)；植物葉部 Pb 濃度最高者為黃連木(106.73 ppm)，Cd 濃度最高者為黃連木(69.72 ppm)、Zn 濃度最高者為台灣欒(137.35 ppm)，Cu 濃度最高者為毛柿(393.29 ppm)，Fe 濃度最高者為台灣欒(264.12 ppm)，Mn 濃度最高者為楓香(1656.92 ppm)，Ni 濃度最高者為烏柏(103.23 ppm)。

由表 2 結果顯示 19 種平地造林樹種中，無任何一種屬於重金屬超積累植物，不過大部分累積最高重金屬濃度之值都已達到一般植物所能忍受的耐性範圍，僅有毛柿葉子出現黑斑，其餘植物外表還看不出有毒害現象，推測植物中存在有重金屬耐性機制。

表 1. 苗木地徑與樹高之調查資料

樹種	栽植 1 個月		3 個月		5 個月		6 個月		平均月生長量	
	地徑 (mm)	樹高 (cm)								
苦楝	6.47	38.38	10.18	57.28	24.63	84.15	30.08	132.55	3.13	14.20
烏柏	7.56	69.48	10.72	73.87	17.88	75.05	19.73	75.41	1.63	0.92
樟樹	3.39	18.00	4.55	28.96	12.39	41.18	15.67	49.00	1.61	4.49
大葉桃花心木	4.18	23.22	7.85	42.07	14.48	51.01	15.49	54.59	1.52	4.73
光臘樹	3.91	41.80	5.27	51.78	12.18	65.51	15.10	81.82	1.48	5.91
印度紫檀	7.58	62.51	11.41	88.49	17.63	104.28	18.43	110.49	1.46	7.12
無患子	5.13	35.61	5.78	38.33	13.55	52.64	16.01	64.45	1.38	4.01
台灣欒	5.37	58.88	6.56	73.13	12.11	89.91	15.04	112.12	1.30	7.94
茄苳	8.93	36.54	11.27	43.91	16.20	48.83	18.34	52.42	1.29	2.37
黃連木	4.96	32.69	5.96	44.59	11.73	64.29	14.35	89.06	1.24	8.30
台灣欒	4.79	32.94	6.03	36.67	9.26	38.09	11.32	42.84	0.91	1.57
楓香	5.46	37.68	7.09	47.71	10.60	53.97	11.51	54.31	0.81	2.42
相思樹	4.91	28.12	5.51	34.28	8.38	38.98	10.64	47.88	0.80	3.03
烏心石	8.65	95.63	9.62	96.72	10.64	96.90	12.59	97.18	0.60	0.25
杜英	5.83	36.71	6.95	42.10	9.32	45.19	10.14	52.16	0.59	2.40
肖楠	8.91	107.05	9.68	108.49	10.40	109.15	11.68	110.89	0.42	0.72
毛柿	3.29	15.18	4.16	19.45	5.37	21.99	5.85	24.13	0.36	1.35
羅漢松	5.12	24.24	5.54	24.88	6.55	26.38	7.42	28.50	0.33	0.63
青剛櫟	4.45	27.14	5.06	30.13	5.89	36.13	6.12	37.72	0.23	1.43

表 2.各樹種生物量(g)及植體重金屬濃度(ppm)

樹種	部位	生物量	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni
苦楝	根	189.40	18.77	15.69	37.22	0.00	83.12	6.78	18.48
	莖	171.62	6.10	0.00	28.02	0.00	104.58	0.00	26.08
	葉	172.58	24.15	17.03	118.33	2.29	177.78	10.91	9.67
烏柏	根	66.81	7.11	40.62	45.90	0.00	76.21	25.26	18.17
	莖	70.56	79.68	57.05	60.82	28.11	150.69	43.91	33.87
	葉	15.98	79.16	43.82	101.67	33.16	98.66	101.33	103.23
台灣檫	根	34.01	13.81	29.20	13.53	27.94	47.44	8.23	18.56
	莖	79.81	48.94	44.80	92.20	261.51	93.30	0.00	19.44
	葉	34.34	43.35	45.59	75.74	119.77	65.07	12.79	17.94
黃連木	根	13.29	13.72	20.20	14.09	0.00	79.92	0.00	12.10
	莖	41.38	21.24	23.80	35.77	0.00	79.63	0.00	5.16
	葉	38.77	106.73	69.72	70.74	40.76	111.43	18.64	0.00
印度紫檀	根	36.38	5.79	14.57	13.94	0.00	84.95	0.00	11.26
	莖	65.42	29.00	11.68	66.36	4.56	124.35	0.00	4.31
	葉	1.38	72.77	68.09	90.64	52.84	141.57	25.14	17.20
樟樹	根	54.69	28.00	30.03	30.01	6.64	70.77	1.74	16.26
	莖	45.82	1.49	0.00	119.25	0.00	106.45	0.00	9.89
	葉	64.51	20.81	0.00	61.82	7.31	171.27	68.47	42.34
光臘樹	根	39.19	15.96	22.71	11.13	81.44	0.00	0.25	10.07
	莖	61.04	11.69	10.96	14.24	2.58	7.03	0.00	4.08
	葉	43.86	23.80	27.55	53.32	55.26	11.33	0.82	15.39
茄苳	根	31.09	13.48	42.80	40.06	18.10	140.98	20.78	30.14
	莖	33.04	1.15	20.86	63.17	4.21	93.62	16.08	30.19
	葉	55.59	20.40	24.99	120.10	5.61	118.14	36.93	70.99
肖楠	根	12.65	8.58	2.61	20.30	8.74	88.71	95.98	5.64
	莖	23.77	0.00	13.98	20.85	3.90	52.54	0.00	0.00
	葉	19.68	41.80	39.33	50.22	25.03	136.17	0.00	2.52
大葉桃花心木	根	10.78	0.00	23.44	4.45	0.00	47.93	0.00	8.06
	莖	23.19	30.57	17.12	33.63	4.30	119.31	0.00	4.39
	葉	15.77	32.71	35.81	67.63	30.22	87.56	11.70	7.66

表 2.各樹種生物量(g)及植體重金屬濃度(ppm)(續)

樹種	部位	生物量	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni
楓香	根	21.70	10.00	3.14	27.76	0.00	74.91	42.88	10.45
	莖	10.05	37.28	30.31	147.71	102.43	57.35	224.74	36.33
	葉	4.65	36.69	52.14	106.00	34.87	74.30	1656.92	81.49
杜英	根	9.56	29.35	18.16	17.59	118.28	16.37	3.97	34.23
	莖	13.22	15.38	11.82	3.22	6.89	2.69	0.00	11.08
	葉	19.02	11.06	18.23	53.97	19.28	167.00	51.58	14.19
台灣欒	根	11.75	7.72	0.62	33.96	0.00	70.86	3.98	31.27
	莖	12.05	23.13	8.80	36.18	0.00	94.89	0.00	29.31
	葉	15.98	47.90	5.55	137.35	0.00	264.12	1.55	33.40
相思樹	根	4.92	37.57	36.53	57.19	0.91	85.12	8.68	0.41
	莖	5.75	19.64	44.07	44.00	6.28	75.41	0.00	0.00
	葉	3.39	45.47	34.17	52.11	11.75	147.98	19.10	0.00
無患子	根	28.65	0.62	7.48	1.96	0.00	0.00	0.00	15.12
	莖	32.74	6.78	5.96	2.47	0.00	1.95	0.00	14.43
	葉	20.40	20.92	16.82	74.27	15.00	14.82	26.63	12.22
羅漢松	根	4.49	23.56	42.17	56.87	5.81	44.84	38.62	10.69
	莖	4.37	46.14	48.39	34.35	32.88	0.00	9.60	10.01
	葉	13.79	23.24	4.96	21.96	3.14	44.00	18.73	6.29
青剛櫟	根	3.99	21.21	23.44	13.75	0.00	99.38	42.77	4.38
	莖	3.75	12.51	53.79	71.74	0.00	122.69	106.09	0.00
	葉	5.12	32.60	49.29	101.64	4.63	132.69	119.09	0.33
毛柿	根	1.70	1.74	41.69	34.88	1.65	87.10	27.68	11.62
	莖	1.89	11.27	28.79	53.94	0.58	80.48	0.00	6.26
	葉	3.52	33.69	34.42	55.72	393.29	65.00	9.83	8.18
烏心石	根	9.48	31.24	37.69	60.87	15.61	24.76	30.15	24.39
	莖	12.47	21.21	5.87	42.65	3.91	0.79	0.00	24.82
	葉	0.55	77.55	0.00	111.97	0.00	101.91	9.53	48.39

### (三) 重金屬之累積量

植體所吸收的重金屬含量為植體重金屬濃度與植體生物量之乘積，因此，在比較植體重金屬累積量時須考量植體重金屬之濃度以及生物量。圖 3 為各樹種重金屬之累積量。由圖 3 可得知，苦楝的 Pb、Zn、Fe、Ni 累積量為最高，Cd 累積量為最高者為烏桕，Cu 累積量為最高者為台灣欒，Mn 累積量為最高者為楓香。

### (四) 重金屬累積之位置

植物藉根系吸收重金屬後，將重金屬累積於植物體中，而其累積位置依樹種及金屬種類而有所差異(Nouri *et al.*, 2009)。

#### (1) Pb

以 Pb 而言，根、莖、葉部累積量最多者分別為苦楝(3.55 mg/株)、烏桕(5.62 mg/株)、苦楝(4.17 mg/株)(圖 4)。

#### (2) Cd

以 Cd 而言，根、莖、葉部累積量最多者分別為苦楝(2.97 mg/株)、烏桕(4.03 mg/株)、苦楝(2.94 mg/株) (圖 5)。

#### (3) Zn

苦楝根部及葉部所含之 Zn 量分別為 7.05 mg/株及 20.42 mg/株，葉部則以台灣欒 7.36 mg/株為最大量(圖 6)。

#### (4) Cu

以 Cu 而言，光臘樹根部所累積的 Cu 3.19 mg/株為最多，台灣檫莖部及葉部所累積之 Cu 為最多，分別為 20.87 mg/株，4.11 mg/株(圖 7)。

#### (5) Fe

以 Fe 而言，苦楝之根、莖、葉部累積量為最多，分別為 15.74 mg/株、17.95 mg/株、30.68 mg/株(圖 8)。

#### (6) Mn

根部及莖部 Mn 之累積量以烏柏為最多，含量分別為 1.69 mg/株及 3.10 mg/株，葉部則為楓香 7.71 mg/株為最多(圖 9)。

#### (7) Ni

根部及莖部之累積量以 Ni 苦楝 3.50 mg/株及 4.48 mg/株為最多，葉部則以茄苳 3.95 mg/株位居首位(圖 10)。

由樹種累積之重金屬濃度及累積量兩方面來看，可發現這兩種名單之前幾名樹種都不一樣，這是因為累積量之多寡牽涉到生物量之大小，而重金屬濃度累積高者，都為生物量較小者，因此，其他生物量較大之樹種便具有較高的累積量。

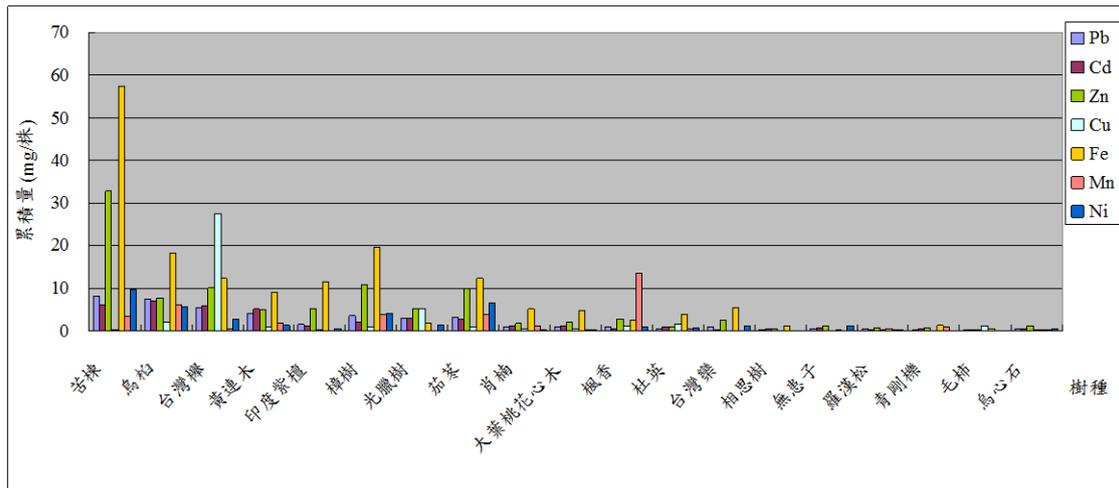


圖 3.各樹種重金屬之累積量。

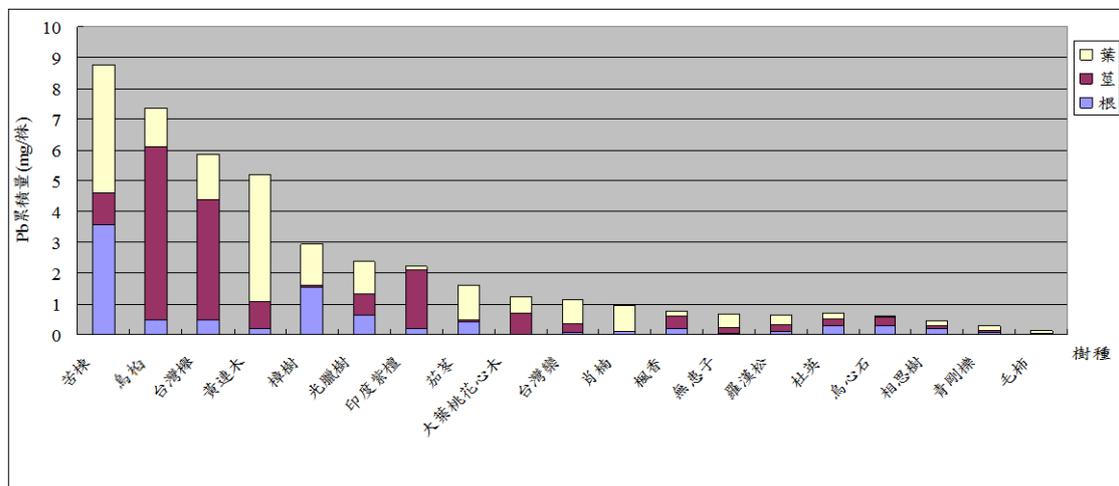


圖 4.各樹種根、莖、葉之 Pb 累積量。

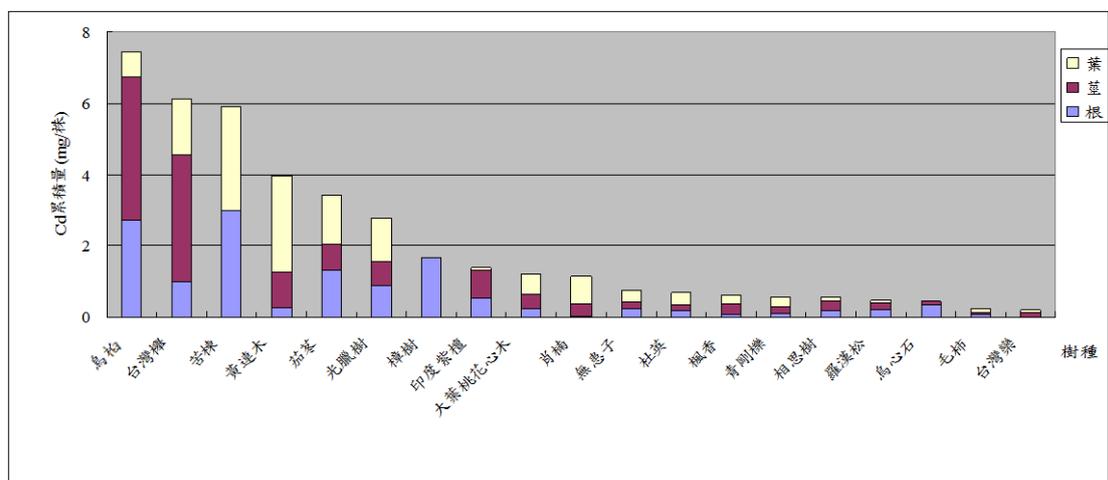


圖 5.各樹種根、莖、葉之 Cd 累積量。

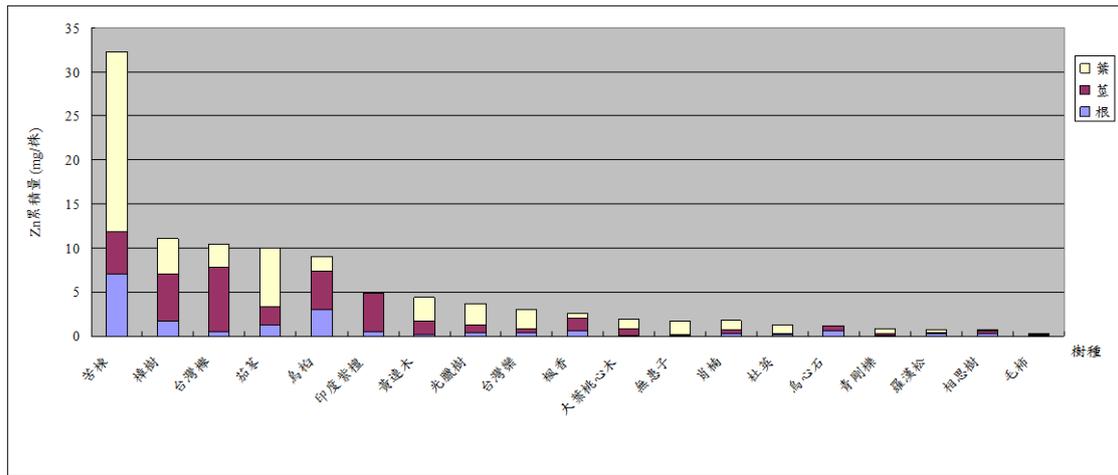


圖 6.各樹種根、莖、葉之 Zn 累積量。

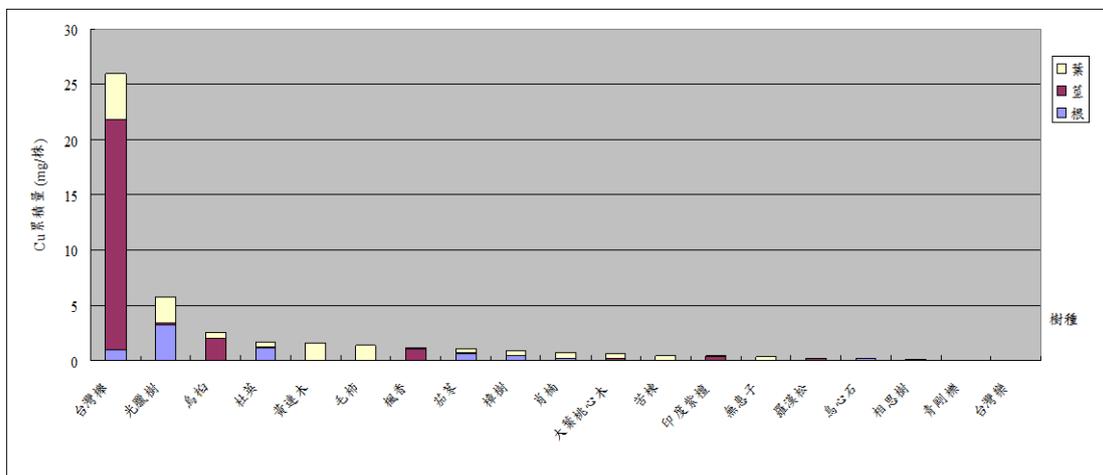


圖 7.各樹種根、莖、葉之 Cu 累積量。

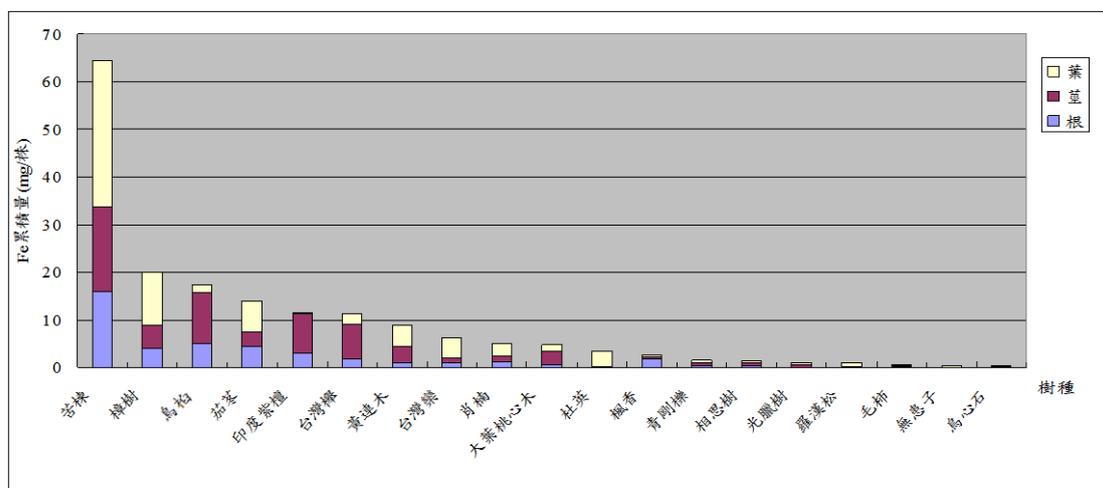


圖 8.各樹種根、莖、葉之 Fe 累積量。

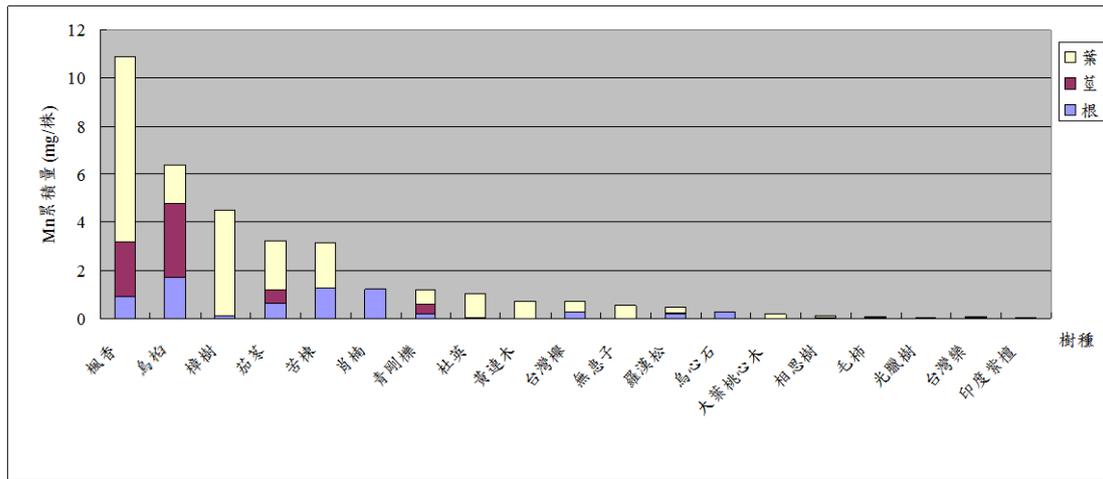


圖 9.各樹種根、莖、葉之 Mn 累積量。

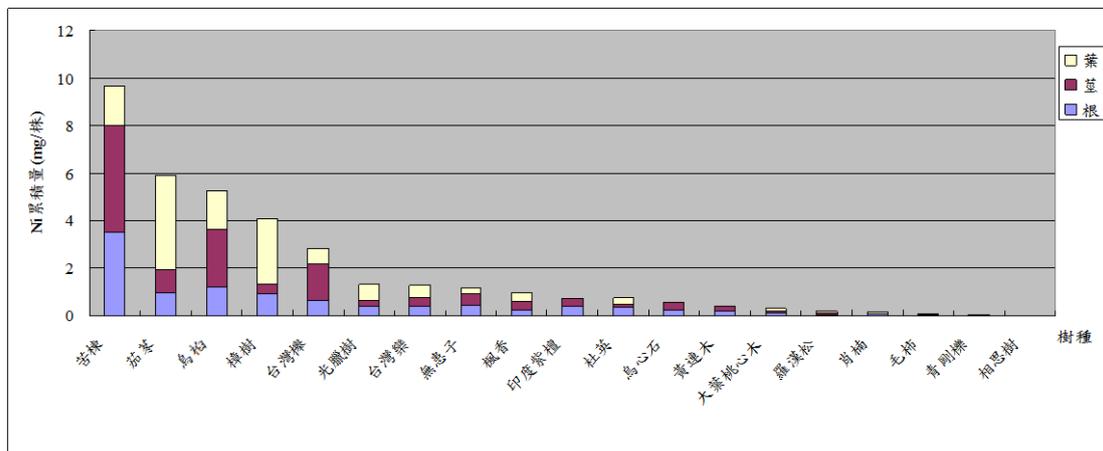


圖 10.各樹種根、莖、葉之 Ni 累積量。

### (五)三種等級樹種重金屬累積量之比較

為客觀判定不同樹種的吸收重金屬能力，將以相同生長勢的苗木進行相互比較。

#### (1) 第一級

第一級樹種為生長相對較佳之植株，圖為第三級苗木之重金屬累積量，在第三級苗木中，烏柏累積 Pb 15.19 mg/株、Cd 12.89 mg/株，苦楝累積 Zn 36.52 mg/株、Fe 64.82 mg/株，台灣欒 Cu 26.61 mg/株，楓香 Mn 32.66 mg/株，茄苳 Ni 16.13 mg/株為最多(圖 11)。

#### (2) 第二級

第二級樹種為生長相對中庸之植株，圖為第二級苗木之重金屬累積量，由圖中可知，累積量最多者為，苦楝所累積之 Pb 19.1mg/株、Zn 44.7 mg/株、Fe 70.42 mg/株、Ni 10.80 mg/株，台灣欒 Cd 7.73 mg/株、44.00 Cu mg/株，樟樹 Mn 4.75 mg/株(圖 12)。

#### (3) 第三級

第三級樹種為生長相對較差之植株，圖為 19 種平地造林樹種各種重金屬之累積量。在第三級苗木中，以苦楝所累積之 Cd 10.99 mg/株、Zn 17.18 mg/株、Fe 37.46 mg/株、Mn 2.85 mg/株、Ni 5.28 mg/株為最大量，台灣欒累積 Pb 3.37 mg/株及 Cu 12.00 mg/株位居首位(圖 13)。

由圖 11.12.13 中可判定，苦楝、台灣欒、黃連木、烏柏及光臘樹等五種樹種具有較佳之植生復育功能。

#### (六)時間與重金屬之累積

表 3 為苗木栽植前及栽植後五個月，葉子重金屬濃度之變化。表 3 顯示出植物栽植於重金屬污染地上將葉於中累積重金屬，而某些樹種在栽植五個月後葉中金屬濃度卻下降，這可能是因為其葉子在這段時期有落葉的現象。

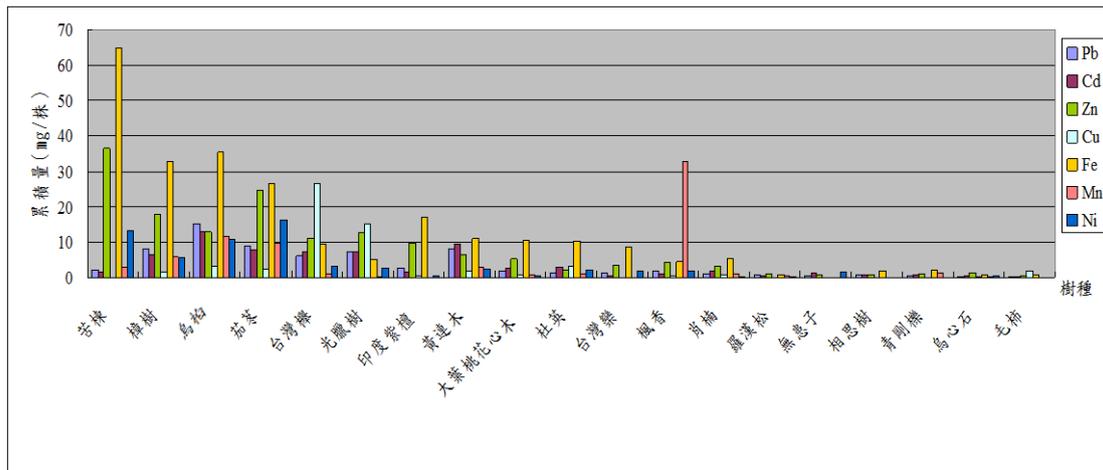


圖 11.第一級各樹種重金屬之累積。

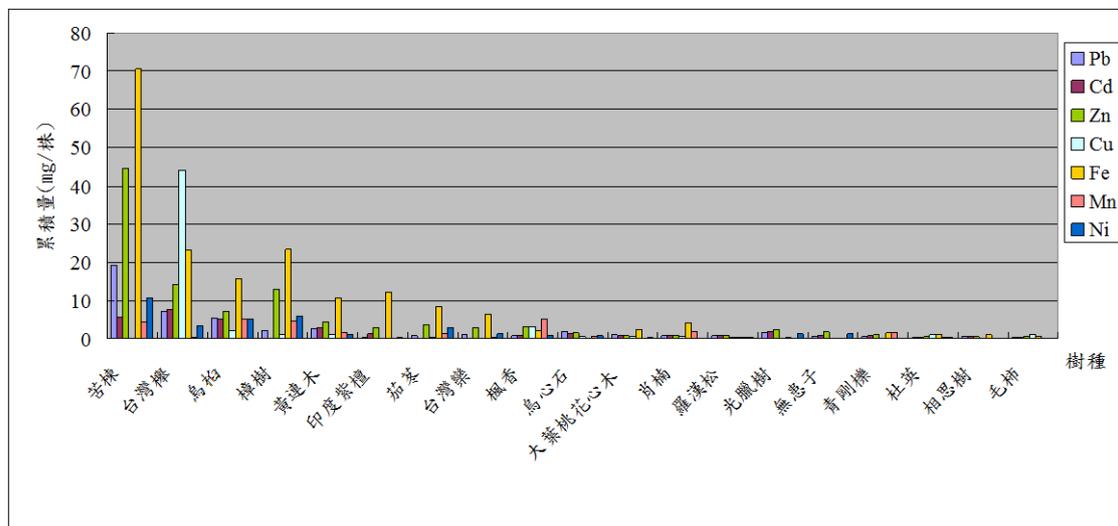


圖 12.第二級各樹種重金屬之累積。

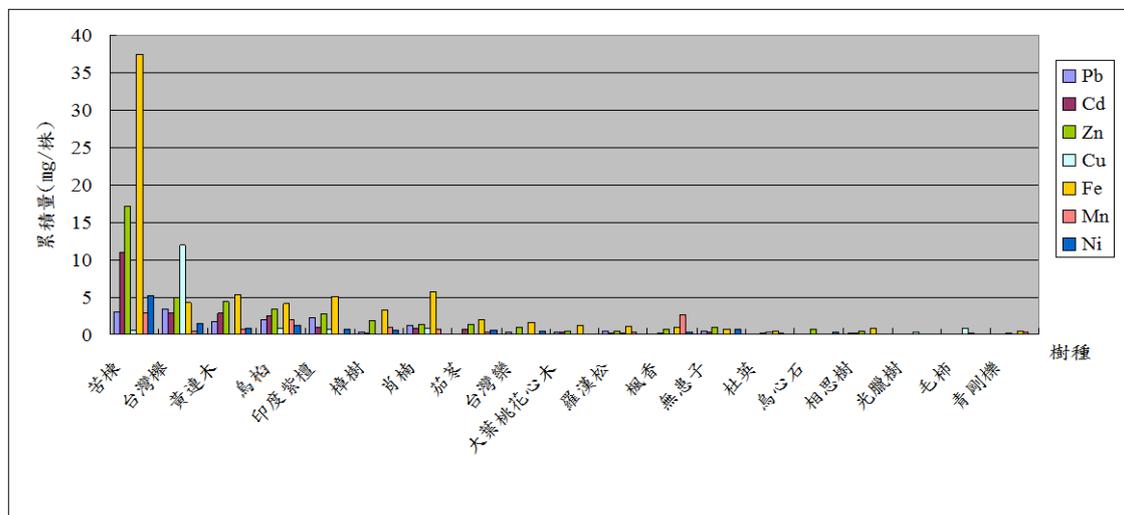


圖 13.第三級各樹種重金屬之累積。

表 3. 苗木栽植前及栽植後五個月，葉部重金屬濃度(ppm)之變化

樹種	等級	Pb		Cd		Zn		Cu		Fe		Mn		Ni	
		栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月
烏柏	1	15.34	41.1	0.33	40.75	42.55	49.77	3.73	11.54	15.35	161.42	70.03	106.22	2.65	83.15
	2		52.85		66.83		155.21		37.72		210.13		101.33		103.82
	3		43.59		44.21		69.8		22.01		122.15		49.51		45.78
黃連木	1	19.03	40.54	12.42	40.54	40.49	74.03	16.02	56.05	103.44	186.01	8.43	23.93	4.05	8.55
	2		31.59		31.59		39.27		50.05		164.27		20.94		6.69
	3		13.55		13.55		43.14		0		116.73		0		13.43
相思樹	1	63.16	9.55	43.27	9.55	37.36	50.54	50.27	0	142.45	105.63	22.45	34.76	2.65	9.43
	2		17.72		17.72		36.55		0		93.28		18.46		17.6
	3		1.37		1.37		54.09		0		98.23		39.92		1.24
大桃	1	17.83	14.14	21.64	15.51	24.22	34.37	19.53	5.45	114.94	92.82	4.23	22.71	3.65	12.79
	2		10.89		12.13		0		7.06		94.19		2.6		0
	3		10.92		18.37		4.09		8.81		111.83		4.47		0
苦楝	1	11.48	23.39	24.43	32.42	88.79	94.65	12.73	0	91.17	168.4	1.49	51.47	3.73	21.03
	2		22.62		24.86		88.34		0		186.03		39.45		22.2
	3		32.85		40.92		163.29		7.31		215.48		15.25		7.81
印度紫檀	1	14.53	133.18	24.45	131.7	45.24	42.23	17.18	128.47	39.19	162.97	0	30.84	3.23	12.26
	2		34.87		59.81		67.87		27.3		174.96		44.55		8.81
	3		21.98		31.91		14.68		11.06		140.42		34.39		6.33
台灣欒	1	0	49.34	0	49.47	3.73	97.94	0	45.5	181.44	96.7	22.22	10.54	0	3.72
	2		65.67		58.62		110.07		36.85		147.79		0		13.85
	3		57.71		61.81		88.81		37.19		185.7		0		12.44
烏心石	1	0	57.38	0	63.78	0	62.25	0	41.24	76.01	212.68	0	15.36	0	9.96
	2		50.16		57.48		44.69		30.42		304.54		14.9		8.07
	3		44.38		61.09		57.09		35.37		255.07		14.99		8.77
樟樹	1	5.43	52.5	1.45	52.89	20.14	47.42	8.91	22.1	208.85	214.77	43.49	18.12	0	20.61
	2		46.62		43.65		38.32		17.86		150.41		9.05		16.37
	3		60.65		53.46		55.7		27.05		193.66		32.38		15.54
楓香	1	0	56.16	0	56.16	9.08	91.86	0	29.26	85.86	78.59	16.43	800.8	0	56.03
	2		45.4		45.4		67.86		11.53		80.51		958.93		45.28
	3		31.99		31.99		85.68		18.35		89.27		766.27		31.87

表 3. 苗木栽植前及栽植後五個月，葉子重金屬濃度(ppm)之變化(續)

樹種	等級	Pb		Cd		Zn		Cu		Fe		Mn		Ni	
		栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月	栽植前	五個月
杜英	1	10	20.04	3.72	14.96	28.57	1.24	3.42	10.14	69.37	100.2	13.88	8.66	1.24	0
	2		29.57		27.09		6.31		20.78		149.72		97.99		0
	3		16.01		17.74		0		11.67		114.81		70.48		0
茄苳	1	14.62	34.99	15.07	43.89	29.79	83.95	11.97	9.02	214.51	130.68	31.36	38.94	6.19	59.1
	2		26.97		33.53		90.73		4.64		84.41		44.27		69.83
	3		31.49		39.91		86.36		3.72		112.89		34.7		74.11
毛柿	1	0	15.09	0	9.03	3.47	0	0	6.8	96.03	97.11	0	0	0	0
	2		21.34		21.83		0		16.99		107.54		0		0
	3		7.29		8.53		0		4.7		95.66		0		0
青剛櫟	1	0	23.83	0	18.12	0	36.36	0	40.96	72.23	156.26	205.48	227.99	0	2.73
	2		21.05		21.79		38.38		39		122.94		269.91		3.96
	3		19.35		5.2		37.19		31.12		130.31		162.9		3.22
無患子	1	0.91	29.44	0	29.44	23.09	66.19	0	0.5	93.43	211.55	13.4	63.23	0	14.04
	2		17.57		17.57		50.11		0		123.98		10.76		17.44
	3		23.25		23.25		61.88		0		163.15		28.45		23.12
羅漢松	1	3.79	21.81	0	21.81	0	12.38	0	0	83.88	69.67	48.4	15.25	0	9.67
	2		21.07		21.07		21.23		0		86.22		15.61		8.92
	3		18.73		18.73		3.16		0		62.9		8.19		7.81
台灣欒	1	0	37.93	0	48.23	18.92	56.52	0	21.82	78.83	169.95	5.7	45.62	0	17.1
	2		56.83		65.87		62.9		34.92		113.55		28.48		17.71
	3		45.39		54.6		204.58		32.61		206.7		31.43		30.1
光臘樹	1	9.97	64.01	14.09	50.96	15.24	66.07	0	24.1	107.53	148.27	37.41	33.78	3.13	28.81
	2		68.47		76.67		53.59		31.45		171.62		38.39		29.6
	3		42.37		78.53		77.63		61.16		116.85		20.57		12.64
肖楠	1	5.47	48.14	7.14	48.14	19.57	62.69	0	9.68	118.26	133.68	0	1.99	0	9.18
	2		41.16		41.16		31.93		55.58		164.18		14.68		2.61
	3		40.85		40.85		124.41		56.49		278.93		35.11		2.48

## (七)植體養分

雖然植物在高濃度重金屬情況下會受到毒害，但養分的可利用性卻是主要限制生長的因子(Walker *et al.*, 2007)，因此，養分分析有其必要性。表為 19 種樹種栽植於重金屬污染地前之根、莖、葉部之 N、Ca、Mg 養分分析。表 5 為苗木栽植八個月後，一、二、三級苗木全株收穫之養分分析。由表 4 和表 5 可看出苗木栽植於重金屬污染地後，各樹種的 Ca 含量皆有普遍下降之現象，而有些樹種之 N 及 Mg 含量在栽植前後無太大變化，但有些則略微上升或降低。

表 4.栽植前各樹種根、莖、葉部之 N、Ca、Mg 養分分析

樹種	根			莖			葉		
	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)
烏柏	0.53	29.37	0.85	0.53	4.48	1.24	1.36	66.38	2.32
黃連木	0.94	55.61	1.36	0.78	6.16	0.97	1.57	108.41	2.48
相思樹	1.34	52.65	1.75	0.64	6.61	0.96	1.89	48.7	1.65
大桃	0.74	42.02	1.16	0.44	4.51	1.31	1.39	95.46	1.97
苦楝	0.88	45.99	1.02	0.55	52.85	0.57	2.76	161.64	4.18
印度紫檀	2.48	47.58	2.28	1.35	83.79	2.18	3.22	114.23	3.92
台灣欒	0.72	52.34	1.18	0.49	5.42	0.78	1.25	91.66	2.18
烏心石	1.09	52.58	6.63	0.45	4.01	1.82	1.4	105.24	4.54
樟樹	1.03	42.25	1.88	0.73	5.48	2.31	1.52	80.8	3.27
楓香	0.69	71.29	1.82	0.5	8.24	1.72	1.46	80.39	3.46
杜英	0.79	50.11	2.11	0.58	7.61	2.83	1.29	66.23	2.98
茄苳	0.9	55.43	5.44	0.52	5.42	5.56	1.25	92.99	3.94
毛柿	0.88	58	3.12	0.52	55.02	0.98	1.04	90.43	1.9
青剛櫟	0.52	52.05	1.08	0.36	72.73	0.89	0.95	80.32	2.22
無患子	0.86	47.69	1.99	0.71	8.86	1.14	1.89	120.31	4.21
羅漢松	1.1	65.22	1.06	0.52	67.96	0.56	0.89	83.54	1.44
台灣欒	0.82	36.43	1.31	0.6	4.99	0.75	1.51	112.5	2.15
光臘樹	0.81	54.02	2.2	0.56	7.23	1.55	1.21	88.73	4.05
肖楠	1.23	112.89	1.78	0.36	59.31	0.64	1.4	95.36	2.64

表 5. 苗木栽植八個月後，一、二、三級苗木全株收穫之養分分析

樹種	級數	根			莖			葉		
		N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)
青剛櫟	1	0.83	8.55	1.65	1.03	14.92	2.23	1.79	9.75	2.47
	2	0.92	7.39	1.61	1.02	10.66	2.51	1.56	9.51	2.94
	3	0.82	6.03	1.56	0.92	7.72	1.59	1.96	8.24	2.65
黃連木	1	1.44	6.49	1.98	1.33	6.88	1.85	2.97	8.90	2.97
	2	1.31	4.86	1.53	1.08	6.22	1.35	2.06	8.25	2.07
	3	0.75	6.18	1.79	0.82	5.49	1.64	2.31	8.76	2.94
相思樹	1	0.92	6.40	1.19	0.68	8.39	1.33	1.82	4.52	2.04
	2	1.16	4.39	1.13	0.83	7.56	1.71	1.91	7.68	2.91
	3	1.16	5.16	1.56	0.76	6.13	2.03	2.21	10.03	3.02
毛柿	1	0.69	6.41	2.09	0.96	10.99	2.14	1.41	0.19	0.04
	2	0.56	5.03	1.60	0.64	8.68	1.38	1.25	0.17	0.03
	3	0.58	5.53	1.60	0.66	7.07	1.32	1.24	0.19	0.03
無患子	1	2.73	3.88	2.06	2.16	8.77	1.58	2.01	11.03	4.39
	2	1.39	4.41	1.81	1.52	7.34	1.38	3.41	12.31	3.96
	3	1.73	4.20	1.88	1.56	7.58	1.46	2.45	11.49	3.74
光臘樹	1	0.86	3.18	1.61	1.01	7.33	2.05	2.72	8.59	3.41
	2	0.96	3.91	1.69	0.79	6.65	1.32	2.55	8.49	2.55
	3	0.76	4.77	2.07	0.62	4.95	1.43	2.25	9.13	3.28
楓香	1	1.18	9.15	1.64	1.58	0.98	0.21	1.92	11.27	4.23
	2	1.32	4.76	1.49	1.50	0.58	0.15	1.06	4.68	1.29
	3	1.11	9.68	1.93	1.48	1.10	0.26	1.41	9.08	3.83
烏柏	1	1.33	4.74	1.20	1.10	7.89	2.19	2.61	12.98	3.52
	2	1.07	3.65	1.38	0.86	4.43	1.60	2.20	11.72	1.69
	3	1.29	3.88	1.65	0.88	5.40	2.00	2.77	12.71	1.68
大葉桃花心木	1	0.62	5.10	0.65	0.89	7.04	0.97	1.80	19.41	2.32
	2	0.64	4.25	0.68	0.37	5.30	1.04	1.72	12.60	1.79
	3	0.61	4.77	1.14	0.77	7.10	1.44	1.70	13.92	1.64
羅漢松	1	1.04	7.02	1.04	0.49	6.33	0.40	1.15	8.23	1.19
	2	1.04	6.70	1.72	0.50	6.00	0.53	0.90	5.97	1.27
	3	0.98	6.80	1.13	0.66	7.64	0.76	1.35	8.25	1.13

表 5. 苗木栽植八個月後，一、二、三級苗木全株收穫之養分分析(續)

樹種	級數	根			莖			葉		
		N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	N(%)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)
印度紫檀	1	1.75	5.01	1.55	2.06	10.64	2.28	3.02	17.23	3.13
	2	1.37	3.86	1.48	1.41	8.32	1.65	2.42	24.49	5.42
	3	1.78	7.26	1.92	1.57	9.65	1.40	3.26	15.87	2.50
肖楠	1	0.94	9.66	1.40	0.34	5.40	0.55	1.69	7.01	2.41
	2	0.72	8.32	1.69	0.29	6.05	0.80	1.21	7.59	3.11
	3	0.55	6.21	0.96	0.34	4.54	0.52	1.44	8.04	2.79
樟樹	1	1.19	2.04	1.52	1.09	4.76	2.48	2.78	11.83	2.54
	2	1.58	3.31	1.81	1.15	5.44	2.55	2.71	13.47	2.64
	3	1.23	1.74	1.45	1.04	4.05	2.61	2.58	10.71	2.34
台灣欒	1	1.11	5.72	1.40	1.22	6.53	1.28	2.44	9.68	2.55
	2	1.38	5.73	1.26	1.47	7.36	1.07	2.50	9.95	3.45
	3	1.01	5.54	1.35	1.23	6.06	1.44	2.55	10.64	2.81
苦楝	1	1.97	5.81	1.60	1.67	6.14	1.87	3.53	13.52	3.83
	2	1.31	4.64	1.24	0.96	3.65	1.00	3.62	13.06	5.06
	3	2.16	4.72	1.51	2.54	11.26	2.47	4.35	12.63	3.63
台灣檫	1	1.23	5.19	1.32	1.17	0.32	0.07	2.52	13.64	2.94
	2	1.34	8.27	1.36	1.35	9.27	1.81	3.16	14.34	3.54
	3	1.30	5.30	1.40	1.73	11.73	2.46	3.10	13.42	2.89
杜英	1	0.86	0.14	0.10	1.21	11.22	5.23	2.78	8.43	3.31
	2	0.77	6.54	1.50	0.91	12.02	2.41	3.42	8.69	3.50
	3	0.76	6.25	1.79	0.75	3.41	1.33	2.88	9.56	4.35
茄苳	1	0.87	4.08	6.71	1.07	12.39	8.32	1.85	9.38	7.23
	2	0.67	4.52	4.72	0.87	8.75	7.35	1.82	12.43	5.49
	3	0.91	4.28	6.41	1.15	9.76	10.45	2.11	10.97	4.51
烏心石	1	0.77	2.72	2.45	0.52	3.45	1.19	2.69	12.93	2.57
	2	1.08	3.73	4.12	0.49	3.80	1.68	3.34	7.36	2.69
	3	0.49	2.96	3.43	0.42	3.73	1.50	N	N	N

註:烏心石一級無葉，故無葉數據。

## 二、土壤

以植生復育移除土壤重金屬之機制中，較普遍使用者為植物萃取作用，植物萃取作用通常是以植體所能夠累積的重金屬量做為評估標準，野外試驗中鮮少探究土壤中重金屬減少之量，事實上，分析土壤重金屬之濃度有其必要性。

### (一)土壤重金屬

土壤或水之重金屬汙染常對生態環境造成影響，甚至對人類健康造成威脅，因此，對於汙染濃度必須加以規定。土壤重金屬汙染濃度之標準可依土地類型分為兩種，分別為一般土地管制標準及食用作物農地管制標準，一般土地對於 Pb、Cd、Zn、Cu、Ni 等五種重金屬之管制標準濃度分別為 2,000 mg/kg、20 mg/kg、1,000 mg/kg、400 mg/kg、200 mg/kg；食用作物農地對於 Pb、Cd、Zn、Cu 等四種重金屬之管制標準濃度分別為 500 mg/kg、5 mg/kg、600 mg/kg、200 mg/kg (吳敏煌，2001)。

表 6 為苗木栽植前後土壤重金屬之濃度變化。表 6 可得知，在栽植苗木前，試驗地土壤 Cd 濃度高於一般土地及食用作物農地管制標準。在栽植苗木後，大部分樹種土壤重金屬濃度皆有降低的現象，而某些樹種之土壤重金屬濃度卻有些微上升，這可能是因為植物根分泌物，增加土壤中金屬之生物有效性。

表 6. 苗木栽植前後土壤重金屬之濃度(mg/kg)

土壤深度	Pb		Cd		Zn		Cu		Fe		Mn		Ni	
	0~15 (cm)	15~30 (cm)												
栽植前	33.34	28.69	32.73	27.35	23.10	17.70	31.52	26.01	668.59	564.08	27.51	55.30	20.87	16.29
栽植後														
光臘樹	28.80	24.21	29.86	25.77	17.15	16.93	26.80	22.51	642.47	516.03	35.18	60.97	16.69	15.56
台灣檫	32.66	22.18	33.42	22.32	19.49	15.71	29.44	19.56	722.80	457.10	45.04	98.16	17.61	11.40
苦楝	29.92	9.78	31.18	10.74	16.95	11.85	27.20	8.66	666.87	301.63	22.78	67.77	18.01	5.67
黃連木	33.78	9.88	34.03	10.13	18.06	11.95	31.88	8.29	622.14	269.12	19.42	71.13	19.23	5.96
杜英	34.39	15.88	35.15	16.63	18.06	14.09	31.27	13.27	743.14	349.39	32.94	71.43	18.83	7.67
烏桕	31.04	24.72	29.76	25.47	23.66	15.10	27.61	22.61	718.73	505.87	33.96	49.38	17.50	15.16
烏心石	22.50	23.70	23.15	24.15	17.96	17.75	19.99	22.00	468.60	512.98	100.87	91.14	12.73	13.73
羅漢松	31.75	15.37	30.57	16.32	19.69	13.88	28.12	13.37	581.46	294.52	39.25	59.75	16.18	10.48
無患子	29.82	16.59	29.35	16.83	15.32	12.97	26.80	14.48	716.70	404.26	31.42	76.41	15.57	8.89
毛柿	24.33	28.98	24.27	29.94	24.27	17.54	24.46	26.47	486.90	521.11	49.52	29.67	12.22	16.37
大葉桃花心木	26.97	25.73	26.60	25.77	15.22	15.00	23.54	24.54	640.44	453.03	35.79	54.97	15.17	13.53
樟樹	29.77	13.29	28.06	14.32	16.45	12.47	30.35	12.75	637.05	384.62	32.44	90.03	16.79	9.40
肖楠	28.14	10.54	27.04	10.87	13.90	11.96	26.79	9.05	489.62	341.94	28.98	64.22	14.45	8.93
相思樹	29.87	27.92	30.40	28.55	15.94	15.72	27.30	27.28	716.36	566.50	42.30	53.55	16.58	16.27
茄苳	26.51	19.59	30.30	19.61	13.70	13.69	27.09	18.54	581.13	402.91	30.81	67.47	14.75	12.00
楓香	25.50	25.48	26.53	26.31	16.45	14.50	25.77	25.24	572.99	520.78	42.40	54.46	16.99	15.96
印度紫檀	30.28	12.88	30.40	12.90	20.82	13.39	29.53	11.32	580.11	370.39	24.81	60.86	15.36	6.10
台灣欒	30.89	31.27	32.02	30.48	16.45	18.37	29.13	29.41	584.18	538.05	29.69	36.58	17.30	17.69
青剛櫟	28.75	19.89	29.48	20.93	17.16	17.45	27.40	18.44	592.31	482.16	27.96	60.76	15.26	12.10

## (二) 土壤化學性質分析

### (1) 土壤 pH 值、全氮、有效磷及陽離子交換容量(CEC)

表 7. 為試驗地土壤 pH 值，結果顯示表土與裏土的 pH 值差異不大，不過表土的 pH 值略低於裏土。

表 8. 為苗木栽植前後試驗地不同土壤深度全氮、有效磷及陽離子交換容量之分析，由表中可發現大部分樹種之表土(0~15cm)全氮略高於裏土(15~30cm)，僅有少數樹種表土全氮略低於裏土，在栽植前後土壤全氮並無太大之差異；土壤有效磷部分，表土大於裏土，在苗木栽植後表土及裏土之有效磷皆有增加的現象；在苗木栽植前後，土壤陽離子交換容量無太大之變化，僅少數樹種之土壤陽離子交換容量有提升之現象，苗木栽植前後皆為表土高於裏土。

表 7. 試驗地不同深度土壤 pH 值(H<sub>2</sub>O)

土壤深度	0~15cm	15~30cm
pH 值	5.24	5.69

表 8.試驗地不同土壤深度全氮、有效磷及陽離子交換容量之方析

土壤深度	N(%)		P(ppm)		CEC(m.e./100g)	
	0~15 (cm)	15~30 (cm)	0~15 (cm)	15~30 (cm)	0~15 (cm)	15~30 (cm)
栽植前	0.17	0.14	4.07	2.82	6.9	5.74
栽植後						
光臘樹	0.09	0.12	10.33	5.86	7.09	6.32
台灣欖	0.16	0.13	9.07	8.02	8.02	6.27
苦楝	0.15	0.09	7.70	3.87	7.52	5.17
黃連木	0.16	0.09	8.48	4.01	6.63	4.12
杜英	0.16	0.12	7.81	6.29	6.43	5.33
烏柏	0.18	0.15	10.97	5.08	8.34	6.63
烏心石	0.15	0.12	26.26	5.44	7.06	5.87
羅漢松	0.15	0.09	10.59	2.70	7.72	4.36
無患子	0.18	0.09	6.03	4.65	7.53	5.83
毛柿	0.11	0.11	12.90	6.01	7.32	6.49
大葉桃花心木	0.14	0.13	12.11	4.30	6.34	4.17
樟樹	0.13	0.08	8.99	3.66	6.22	4.06
肖楠	0.13	0.06	9.45	3.95	3.51	3.63
相思樹	0.14	0.11	8.28	4.65	4.52	6.52
茄苳	0.14	0.10	8.46	3.62	6.56	4.13
楓香	0.14	0.13	10.76	6.43	5.34	5.26
印度紫檀	0.10	0.07	6.90	5.37	5.72	6.85
台灣欖	0.07	0.08	8.63	7.50	6.36	5.80
青剛櫟	0.09	0.06	8.59	6.96	7.19	5.76

## 伍、結論

本研究之目的為評估與測試平地造林樹種中，何種植物具有較的佳植生復育功能，並達成移除土壤重金屬污染源之目標。

本研究試驗地為彰化縣政府列為重金屬汙染地之農田。試驗地土壤 Cd 濃度(32.73 mg/kg)高於一般土地管制標準(20 ppm)及食用作物農地管制標準(5 ppm)，於 19 種平地造林樹種中，以下列 5 種樹種 Cd 累積量較佳，烏桕(6.86 mg/株)、苦楝(6.10 mg/株)、台灣欒(5.99 mg/株)、黃連木(5.09 mg/株)及光臘樹(3.06 mg/株)，其中烏桕(4.03 mg/株)及台灣欒(3.58 mg/株)以莖部累積較多，苦楝(3.00 mg/株)以根部累積為多，光臘樹(1.21 mg/株)及黃連木(2.70 mg/株)以葉部累積較多。

苗木栽植於重金屬汙染地後，各樹種的 Ca 含量皆有普遍下降之現象，而有些樹種之 N 及 Mg 含量在栽植前後無太大變化，但有些則略微上升或降低。

栽植前後試驗地不同土壤深度全氮及土壤陽離子交換容量並無太大之差異，而苗木栽植後，表土及裏土之有效磷皆有增加的現象。

試驗中 19 種平地造林樹種之植生復育功能並無特別卓越，但若能施加其他促進植生復育之方法，例如接種菌根，則能改善植生復育時程較長之缺點。雖然植生復育之時間通常需要數十年以上，但相較

於物理、化學方法，植生復育法是一項對於環境較為友善、不具侵略性、費用較便宜的技術，若無時間急迫性之需求，植生復育法不但能夠響應植樹造林、節能減碳之風潮，更可溫和復育重金屬污染地，因此，植生復育技術可望為一可行的重金屬污染復育技術。

## 陸、參考文獻

- 李芷儀 (2009) 以植生復育技術處理重金屬銅鉻與鎳污染土壤之研究。嘉南藥理科技大學環境工程與科學系碩士論文。
- 吳敏煌 (2001) 土壤污染管制標準之研訂。台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊 1: 9-14。
- 吳哲宇 (2010) 培地茅與狼尾草應用於關渡平原身污染地之植生復育。國立台灣大學農藝學系碩士論文。
- 侯善麟 (2010) 結合太陽能、植物及微生物的污染整治技術-Phytoremediation。台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊 34: 14-21。
- 陳尊賢 (1995) 台灣農家要覽-農作篇(一) 577-581。
- 戴佳如 (2004) 蔬菜在重金屬污染地復育的角色。國立中興大學土壤環境科學系碩士論文。
- Blaylock M. J, D. E. Salt, S. Dushenkov, O. Zakharova, C. Gussman, Y. Kapulnik, B. D. Ensley and I. Raskin (1997) Enhanced accumulation of Pb in *Indian mustard* by soil-applied chelating agents. *Environment Science Technology* 31: 860-865.
- Jabeen, R., A. Ahmad and M. Iqbal (2009) Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms. *Botanical Review* 75: 339-364.

- Leblebici, Z. and A. Aksoy (2011) Growth and lead accumulation capacity of *Lemna minor* and *Spirodela polyrhiza* (*Lemnaceae*): interactions with nutrient enrichment. *Water Air and Soil Pollution* 214: 175-184.
- Nouri, J., N. Khorasani, B. Lorestani, M. Karami, A. H. Hassani and N. Yousefi (2009) Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environmental Earth Sciences* 59 (2): 315-323.
- Salt D. E. and U. Kramer (2000) Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In: Raskin I, Ensley B (eds) *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. Wiley, New York. 231-246.
- Shams, K. M., T. Gottfried, F. Axel, S. Manfred, P. Thomas, B. Ashtar and F. Kristina (2010) Aspects of phytoremediation for chromium contaminated sites using common plants *Urtica dioica*, *Brassica napus* and *Zea mays*. *Plant and Soil* 328: 175-189.
- Vamerali, T., M. Bandiera and G. Mosca (2010) Field crops for phytoremediation of metal- contaminated land. *Environmental Chemistry Letters* 8: 1-17.
- Walker, D. J., M. P. Bernal and E. Correal (2007) The Influence of heavy metals and mineral nutrient supply on *bituminaria bituminosa*. *Water Air and Soil Pollution* 184: 335-345.

Yoon, J., X. Cao and O. Zhou (2006) Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science Total Environment* 368: 456-464.

## 附錄



苗圃中培育之苗木



苗木裝袋出栽於試驗地



栽植苗木前(紅色框線中)



苗木栽植於試驗地



栽植苗木後



進行每木調查作業

## 99 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：99-00-5-10

計畫名稱：以植生復育法移除平地造林地土壤重金屬汙染

審查委員意見	辦理情形
臺灣大學森林環境暨資源學系郭教授幸榮: 1.試驗地的座標請寫明以備後續研究之參改。	已附於期末報告。謝謝委員建議。
2.植栽是否採區集配置?林木是否繼續留存?	試驗地經常翻耕，汙染情形均質，故未採用區集配置。本研究計畫是向農民承租為期一年，租約到期後，仍續租一年做觀察。
3.土壤汙染程度在試驗前是否有資料?栽植後的樣本如何採取?位置?取樣時如何避免上下土壤之相互汙染?	在試驗前有做土壤重金屬之檢測，檢測結果在表 6 中呈現。栽植後樣本之採取是將苗木依地徑及樹高之乘積分為三級，於各等級中隨機挖取苗木三株及其位置土壤。採取表土時，採取寬度不可太狹窄，以避免表土崩落，並以尺量測挖取深度是否已達採土界限。
4.移除汙染物的終極目標是汙染物減低，如何評估是緣於植物效果?或是雨水淋洗的結果?	由於苗木皆栽植於同一塊土地中，故各區集間汙染物受與水淋洗之程度應大致相同，所以對於汙染物之減低可由植體所累積汙染物的總量及土壤汙染物濃度之降低來評估。
5.以造林方式移除汙染物，應重視不同部位的累積量及林木生長量，是否有規劃進行較長期的研究?表 9 的估算值其估算式參數尚有不足，請補強。	表 9 復育時程之估算已移除。謝謝委員建議。
6.研究方法敘述不足者請補強。	已附於期末報告。謝謝委員建議。
林業試驗所陳研究員財輝: 1.苦楝葉吸收的鉛、鎘等重金屬，藉落葉回歸土壤後，是否會造成危害?	枯枝落葉中的重金屬屬於有機態並不會造成危害。
2.栽植樣本的外表有否呈現病害癥候?	僅毛柿的葉子有黑斑之現象，其餘樹種則無。
3.試驗地鎘汙染來源為何?	試驗地鎘汙染源為附近電鍍工廠所排放之廢水。

## 99 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：99-00-5-10

計畫名稱：以植生復育法移除平地造林地土壤重金屬汙染

審查委員意見	辦理情形
4.第 16 頁第 3 段第 2 段杜英、第 9 段臺灣欒之敘述為何?第 39 頁表 5 敘述：烏心石一級無葉?	已附於期末報告，謝謝委員建議。表 5 中烏心石無葉是由於在收穫時烏心石的葉子皆掉光了。
中興大學森林學系廖副教授天賜： 1.已完成基本資料之建置。	謝謝委員建議。
2.用造林移除土壤重金屬之構想很好，但以一年的成果去推斷造林木對重金屬移除效率，似顯草率。	謝謝委員建議。
3.栽植密度高與一般造林差異大，是否意味經營期短或未來如何撫育經營，以符實際造林之規範。	由於根域土壤之汙染濃度可能會因根系吸收而使汙染濃度下降，為充分吸收汙染物，避免根域與非根域部分土壤自然差異過大，故栽植密度高。
4.表 2 之結果是否為最後分析之結果?與圖 3-10 有很大差異，建議再詳細校對。	表 2 為植體重金屬濃度，圖 3-10 為植體重金屬累積量，亦即植體重金屬濃度與生物量之乘積。圖 3 為各樹種各種金屬之累積量，而圖 4-10 分別是七種重金屬於根、莖、葉之累積量。
5.土壤分析只有 0-30 公分，與造林木生長所須厚度或作物之需求是否相符，需要充分考量。	由於彰化地區之土壤重金屬主要分佈於土層 0-30 cm，故土壤分析以此範圍為主。謝謝委員建議。
6.林木生長不良是管理不良或品質問題?並未充分說明。	由於全部苗木管理皆相同，故生長較矮小者可能為苗木品質差異所致。
7.重金屬汙染土地若用造林來改善，未來之經營管理及其產物之去處應予以考慮。	謝謝委員建議。