行政院國家科學委員會專題研究計畫　成果報告

以植物萃取法去除受污染土壤及底泥環境中之重金屬

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC91-2211-E-041-002-
執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日
執行單位：嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

計畫主持人：張錦松
共同主持人：余光昌，何先聰
計畫參與人員：黃政賢　　柯鴻慶

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中　華　民　國 92 年 10 月 27 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以植物萃取法去除受污染土壤及底泥環境中之重金屬

Phytoextraction of heavy metals from polluted soils and sediments

計畫編號：NSC- 91-2211-E-041-002

執行期限：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

主持人：張錦松　嘉南藥理科技大學環境工程與科學系 教授

共同主持人：余光昌[1] 何先聰[2] 嘉南藥理科技大學[1]環境工程工程與科學系[2]職業安全衛生系 教授

協同研究人員: 黃政賢　嘉南藥理科技大學環境工程工程與科學系 講師

研究助理: 柯鴻慶　嘉南藥理科技大學環境工程工程與科學系碩士班　研究生

1、 中文摘要

本研究以現有文獻中所知具有高萃取重金屬潛力、高生物質量的產率及高鉛蓄積量之芥菜（*Brassica juncea*）針對受污染土壤中之重金屬鎘、銅及鉛進行植物萃取。另外，也添加螯合劑 EDTA 來評估是否能增加上述植物對重金屬之萃取量。此外，也探討重金屬在植物萃取過程中土壤各鍵結型態之變化情形。

原始土壤樣品經重金屬添加配製前後，除了銅以外，配製後之重金屬鍵結型態與原始土壤樣品中重金屬鍵結型態分佈相近。

以培育四週之芥菜對原始未受污染之土壤進行重金屬之植物萃取時發現芥菜對銅與鉛之吸收蓄積量比對鎘高，主要可能與原始土壤樣品中三種重金屬含量高低有很大關係。

在幾乎相同之生物質量下，添加愈多之螯合劑將愈增加對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量。芥菜對銅之萃取吸收能力遠超過對鎘及鉛之能力。添加螯合劑對提升芥菜吸收土壤中鉛之效果明顯較低。

隨著螯合劑添加之劑量增加，土壤中易吸附性與易交換性重金屬隨之增加，而其它鍵結型態之含量則逐漸減少，顯示螯合劑易將重金屬釋出至孔隙水或形成易釋出之易交換性重金屬，非常有利於芥菜對鎘、銅及鉛之萃取吸收。

關鍵詞: 土壤，芥菜，植物萃取，重金屬，生物質量，螯合劑，鍵結型態。

Abstract

The aim of this study is to use Indian mustard (*Brassica juncea*), known as metal hyperaccumulator, to extract cadmium, copper and lead from contaminated soil. Also, we wan to find how the effect of synthetic chelate on the enhancement of the uptake of these metals from soil. In addition, the binding variation of metals in soil during phytoextraction was explored.

Results show that uptake of copper and lead by soil-growth *Brassica juncea* (four-weeks shoot) from raw soil was more than that of cadmium, which might be due to the level difference of these metals contained in raw soil. Based on the same biomass, it can be found that the uptake of these metals by *Brassica juncea* increased with the increase of the dose of chelate as well as the accumulation ability of *Brassica juncea* on copper was higher than on cadmium and lead. The enhancing effect of chelate on the uptake of lead by *Brassica juncea* was significantly lower than that of other metals.

The exchangeable percentages of these metals in soil significantly increased as the dose of chelate increased from 0 to 2.0 g/Kg-soil. However, the percentages of the rest binding fractions all decreased. This result indicates that the transformation of metal binding forms after the addition of chelate was beneficial to *Brassica juncea* for the uptake of metals from soil.

Keywords: soil, Indian mustard, phytoextraction, heavy metals, biomass, chelate, binding fractions.

2、緣由與目的 (Introduction)

植物復育定義為利用綠色植物將污染物從土壤環境中去除或阻滯這些污染物使其不致於對環境或生物造成危害。植物復育可應用於去除土壤、水體或空氣中之有機或無機之污染物。

植物復育技術可分為植物除污（phytodecontamination）及植物穩定化（phytostabilization）兩大類。植物除污法又可分為（1）植物萃取（phytoextraction）--- 即利用植物從土壤中去除污染物；（2）植物過濾（phytofiltration）--- 即利用植物的根或幼苗從

水或污水中吸收或吸附污染物，主要為金屬；（3）植物揮發（phytovolatilization）--- 即把土壤中可揮發的污染物（如 Se, Hg）萃取並輸送至葉子，再將其揮發至空氣中；(4）植物分解（phytodegradation）--- 植物根部或莖部微生物分解土壤中之有機污染物。此法並不是植物直接處理污染物，而是一種植物協助復育之方法（plant-assisted bioremediation)。而植物穩定化即是利用植物來降低土壤污染物之生物可利用性（bioavailability)，以減少土壤污染物對生態之危害。

最早提出利用植物萃取來後育土壤的觀念, 在 1980 年由 Utsunomiya[1]提出以植物萃取土壤中之鎘。此後，有關這方面之研究並不多。但最近幾年則發展迅速。植物萃取法的流程主要分幾個步驟：

- mobilization： 污染物從土壤固相釋出移至土壤固相
- adsorption and transport： 污染物從土壤液相吸附至並進入植物根部
- translocation： 污染物從植物的根部運送至植物的莖及葉部
- accumulation：累積在葉部
- harvesting： 收割地面以上之植物
- drying and ashing： 乾燥、灰化
- reclamation： 回收有價值的成分
- disposal： 最終處置

植物萃取法成功與否之關鍵在於: (a) 污染物如何大量從與土壤固相之結合態釋出進入土壤液相 (b) 植物的特性。理想的萃取植物需具備下列特性：

- 需能忍受高濃度污染物之毒性
- 必需能蓄積大量污染物在可收割的組織中
- 能有高的生長速率
- 生物質量產能大
- 根部綿密易接觸吸收

重金屬污染之復育, 文獻中 [2,3,4] 所常使用的一些理想萃取植物包括芥菜（Indian mustard)、向日葵 (sunflower)、大麥草 (barley)、燕麥草（oat）等。

另一個關係到污染物能否有效地自土壤中被萃取出來的關鍵是污染物自固相移至液相。文獻中 [2,3,5,6] 發現一些有效的螯合劑（如 EDTA, EGTA , NTA 及 DTPA 等）及生物性界面活性劑可協助植物將一些有機及無機之污染物自固相釋出進入液相，接著進入植物中。

以植物萃取法復育遭受重金屬污染之土壤時，若欲達到可接受的程度，一般需時甚長（數年至數十年)。一般而言，若復育期長達 20 年，每年每英畝重金屬之去除率須達 200~1000kg。以一高生物質量(biomass)之植物而言，金屬在植物中之蓄積量(w/w，乾重)須達到 1~2%。基本上，金屬在植物中之蓄積上達到 1%以上時，已可算是高蓄積量（hyperaccumulation)。有些植物如 *Sebertia accuminata* ，可以蓄積 25%的 Ni（w/w，乾重）[3]； *Thlaspi caerulescens* 可蓄積 4%的 Zn（w/w，乾重)，而沒有顯現出傷害。然而，有些金屬如 Pb , Cr 及 Cd 之毒性較大，植物對其之蓄積量則顯著降低。因此，為增進植物萃取之效果，低毒性螯合劑如 EDTA，就被使用來增進重金屬被植物萃取可能性。Salt *et al.* [7] 指出在 Cd 污染量為 0.9 mmol/Kg-soil 之土壤中加入 1mmol/Kg-soil 之 EDTA，可將 Cd 之植物萃取量由 164μ gCd /g-dried plant 提高到 875μ g Cd/g-dried plant。Ebbs and Kochian [4]也指出加入 EDTA 可提高 Zn 在各種植物萃取時之蓄積量。Huang *et al.* [2] 及 Blaylock *et al.* [3]也指出 EDTA 之添加對 Pb 從土壤中由植物萃取之效果可大量提高。Kulli *et al.* [5]也指出 NTA 雖可增加 Lettuce 及 Ryegrass 對 Cd, Cu 及 Zn 之萃取量, 但是, Lettuce 及 Ryegrass 之生物質量也將隨之降低。另外，Chen *et al.*[6]也指出 EDTA 可大量提高 *Helianthus annuus* 對 Cd 及 Ni 之萃取量，但也降低了植物的生物質量，進而使金屬之總萃取蓄積量減少。

台灣地區受重金屬污染之環境包括受工業廢水污染的土壤、河川底泥、含重金屬之污泥及廢棄物污染之土壤。探討這些受污染之本土環境以植物萃取法進行復育之可能性及成效，是本計畫之目的。在本年度計畫中將以現有文獻中[3，4]所知具有高萃取重金屬潛力、高生物

質量的產率及高鉛蓄積量之芥菜(Indian mustard（*Brassica juncea*）)針對受污染土壤中之重金屬進行植物萃取。另外，也將加入合成化學螯合劑 EDTA 來評估是否能增加芥菜對上述重金屬之萃取量。此外，也將探討重金屬在土壤中各鍵結型態(包括易吸附性與易交換性(exchangeable)、與碳酸鹽鍵結態(bound to carbonates)、與錳氧化物鍵結態(bound to Mn-oxides)、與鐵氧化物鍵結態(bound to Fe-oxides)、與有機物鍵結態(bound to organics)及殘餘態(residue))之變化情形。

3、材料與方法 (Materials and Methods)

一、土壤基本性質之分析

採集之原始土壤先置於通風處風乾，經研磨、過篩（2mm 篩孔），裝罐密封以供下列各項基本性質分析及重金屬污染土壤配置之用:

a. pH 值:將土壤與水以 1:1 之比例混合, 再以 pH meter 測定之。

b. 陽離子交換容量:醋酸鈉法（NIEA S202.60 A）測定之，分析步驟如下:

1. 秤取 4.0g 之風乾土壤置於離心管中，並加入 33mL 1M 醋酸鈉溶液，震盪五分鐘，然後離心丟棄上澄液，重複此步驟三次。
2. 再加入 33mL 99％的異丙醇，震盪五分鐘，然後離心丟棄上澄液，重複此步驟二次。
3. 再加入 33mL 中性 1M 醋酸銨溶液，震盪五分鐘後離心，將上澄液倒入 100mL 量瓶中，重複此步驟二次，然後結合上澄液以中性 1M 醋酸銨溶液定量至 100mL，用原子吸收光譜儀測定鈉離子濃度。

c. 土壤質地:本研究的土壤質地是採用雷射粒徑分析法測定之，秤取 1.0 g 之風乾土壤加入 20mL 濃度 50g/L 之六偏磷酸鈉，以去離子水定量至 150mL。經 24 小時攪拌後，以雷射粒徑分析儀(Coulter LS200)分析，可得知其各種粗細顆粒的含量百分比，並依美國農業部之質地三角形方式比對後予以定義。

二、重金屬污染土壤配置

a. 鉛污染土壤配置方法:

秤取 12174.89 mg Pb（NO_3）$_2$ 溶於 1L 去離子水後，均勻淋洗於 3.8kg 的土壤。再加入 1L 去離子水當流洗液，收集滲漏液重複淋洗五次歷經三天，其後配置鉛污染土壤置於通風處風乾三天，經攪拌混合均勻，裝罐保存。

b. 鎘污染土壤配置方法:

秤取 209.096 mg Cd（NO_3）$_2$ · $4H_2O$ 溶於 1L 去離子水後，均勻淋洗於 3.8 Kg 的土壤，再加入 1L 去離子水當流洗液，收集滲漏液重複淋洗五次，歷經三天，其後配置鎘污染土壤置於通風處風乾三天，經攪拌混合均勻，裝罐保存。

c. 銅污染土壤配置方法:

秤取 5979.211mg Cu（NO_3）$_2$ · $3H_2O$ 溶於 1L 去離子水後，均勻淋洗於 3.8 Kg 的土壤，再加入 1L 去離子水當流洗液，收集滲漏液重複淋洗五次歷經三天，其後配置銅污染土壤置於通風處風乾三天，經攪拌混合均勻，裝罐保存。

三、螯合劑濃度配置

本研究使用之螯合劑為 Na_2EDTA，分別秤取 0.03、0.06、0.09 及 0.12g 之 Na_2EDTA 加入 20mL 去離子水中，經攪拌混合完全溶解後，供後續試驗使用。

四、芥菜幼苗培育

本研究選取芥菜(*Brassica juncea*)做為萃取植物，首先將芥菜種子浸泡在去離子水中大約五個小時，然後栽種至原始未受污染之土壤中，分別培育二、三及四週，以供試驗。

五、植物萃取重金屬試驗

a. 將配置之污染土壤放置於直徑 5.5 cm 之栽種盆中，每盆土壤重量約 60 g。

b. 分別將 20mL 不同濃度的 Na_2EDTA 溶液, 均勻倒入各盆中，再以 5mL 去離子水當流洗液以達田間容水量，用以配置螯合劑添加量分別為 0.5，1.0，1.5 及 2.0 g/Kg-soil。

c. 將不同培育期程的芥菜幼苗，分別移栽至添加不同濃度螯合劑的盆中，移栽前須以去離子水洗滌芥菜幼苗根部殘存之土壤，每盆中栽種有五株芥菜幼苗且控制生物質量儘量相同。

d. 植物移栽後七天收成，分析植物中重金屬含量、經植物萃取後土壤中總金屬含量和土壤中各鍵結型態金屬含量。

六、植物中重金屬含量分析

植物收成後以去離子水洗滌根部殘存之土壤，置於通風處風乾三天後，以 1mL 20％之 H_2O_2 和 6mL 之濃 HNO_3 進行微波消化。消化後取上澄消化液，以原子吸收光譜儀測定植物中重金屬含量。

七、土壤中重金屬總量分析

秤取 0.3 g 經植物萃取後土壤，置於通風處風乾三天後, 加入 3mL 37％之 HCl 和 9mL 之濃 HNO_3 以進行微波消化。消化後取上澄消化液，以原子吸收光譜儀測定重金屬含量。

八、土壤中各鍵結型態金屬含量

以逐步萃取法 (sequential extraction procedure, SEP)[8，9]分析底泥中重金屬各鍵結型態之分佈。底泥中重金屬六種鍵結型態，包括可交換態(F1)、與碳酸鹽鍵結態(F2)、與錳氧化物鍵結態(F3)、與鐵氧化物鍵結態(F4)、與有機物鍵結態(F5)、殘餘態(F6)。SEP 操作條件如表一所示。

4、結果與討論 (Results and Discussion)

一、原始未受污染土壤之物化特性

將採集回來之原始土壤樣品進行物理化學分析，所得結果如表二所示。土壤 pH 為 6.8，約為中性。土壤陽離子交換容量(CEC)為 9.57 cmol/Kg。土壤中不同粒徑成份之組成比例分別為：細砂粒 (100-250μ m)(0.62%)，極細砂粒 (50-100μ m)(9.80%)，坋粒(2-50 μm)(77.97%)，粘粒(＜2μ m)(11.26%)。其中，坋粒佔大部份，依美國農業部之土壤質地三角形方式比對後，定義本原始土壤樣品為坋質壤土。原始土壤樣品中三種重金屬含量分別為: 總鎘(0.012 mmol/Kg-soil)，總銅(0.104 mmol/Kg-soil)，總鉛(0.121 mmol/Kg-soil)。

二、重金屬添加配製前後之土壤重金屬鍵結型態之分佈

原始土壤樣品經重金屬添加配製前後，土壤中重金屬鍵結型態之分佈，如表三所示。配製前，原始土壤中鎘主要與碳酸鹽鍵結，配製後主要與碳酸鹽鍵結及以易吸附性與易交換性型態存在。原始土壤中銅主要為殘餘態，配製後有一半以上與碳酸鹽鍵結。配製前後，土壤中鉛主要皆與碳酸鹽鍵結。由此結果可知，重金屬添加配製後之鍵結型態，主要係易釋出之鍵結型態，包括與碳酸鹽鍵結及以易吸附性與易交換態。除了銅以外，配製後之重金屬鍵結型態與原始土壤樣品中重金屬鍵結型態分佈相近。重金屬添加配製後三種重金屬含量分別為:

三、芥菜(*Brassica juncea*)對原始未受污染土壤之重金屬吸收量

以培育四週之芥菜對原始未受污染之土壤進行重金屬之植物萃取，結果如圖一所示。芥菜對銅與鉛之吸收蓄積蓄積量(0.116 及 0.110 mmol/Kg-air dried plant)比對鎘(0.017 mmol/Kg-air dried plant)高，主要可能與原始土壤樣品中三種重金屬含量高低有很大關係。

四、芥菜生物質量之變化

在不同培育時程及添加不同螯合劑量下，芥菜生物質量之變化，如圖二所示。進行含銅土壤植物萃取時，隨著培育時程週數增加，芥菜之生物質量也隨之增加。而當添加之螯合劑(Na_2EDTA)劑量增加時, 芥菜之生物質量則大約相同，並無明顯差異。當進行含鉛土壤植物萃取時，培育時程兩週時，芥菜之生物質量隨著螯合劑劑量之增加而降低，此結果與 Kulli *et al.* [5]及 Chen *et al.* [6]之發現一致。培育時程四週時，芥菜之生物質量並不會隨著螯合劑劑量之增加而有所變化。此結果可能因為兩週時芥菜幼苗較小，無法承受螯合劑量增加時所大量增加之萃取量，導致幼苗猝死，而降低生物質量。而培育四週時芥菜較能承受大量增加之重金屬萃取量，因此，生物質量無太大變化。

五、不同螯合劑量下，芥菜對不同重金屬之吸收量

在不同螯合劑量下，培育四週之芥菜對不同重金屬之吸收結果如圖三所示。隨著螯合劑添加之劑量增加，在芥菜之生物質量無明顯變化之下，芥菜對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量隨之大幅增加。此結果顯示在幾乎相同之生物質量下，添加愈多之螯合劑將愈增加芥菜對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量。在不添加螯合劑時，芥菜對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量不多，分別為: 5.02

mgCd/Kg- air dried plant (0.04 mmolCd/Kg- air dried plant)，53.86 mgCu/Kg- air dried plant (0.85 mmolCu/Kg- air dried plant) 及 355.06 mgPb/Kg- air dried plant (1.71 mmolPb/Kg- air dried plant)。在添加 2.0 g Na_2EDTA/Kg-soil 時，芥菜對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量分別可達 380.89 mgCd/Kg- air dried plant (3.39 mmolCd/Kg- air dried plant)，7978.61 mgCu/Kg- air dried plant (125.56 mmolCu/Kg- air dried plant)及 715.35 mgPb/Kg- air dried plant (3.45 mmolPb/Kg- air dried plant)。此結果顯示，芥菜對銅之吸收蓄積能力遠超過對鎘及鉛之能力。此外，螯合劑添加 2.0 g Na_2EDTA/Kg-soil 時，芥菜對鉛吸收蓄積效果之提升明顯較低，僅約為不添加螯合劑時之兩倍。而芥菜對鎘及銅吸收蓄積效果之提升明顯較高，分別約可達不添加螯合劑時之 85 倍及 148 倍。

六、不同螯合劑量下，芥菜萃取吸收後，土壤中重金屬鍵結型態之變化

在不同螯合劑量下，芥菜自土壤中對鎘、銅及鉛萃取吸收後，土壤中重金屬鍵結型態之變化情形如圖四所示。結果顯示隨著螯合劑添加劑量增加，土壤中易吸附性與易交換性重金屬也隨之增加，而其它鍵結型態之含量則逐漸減少，顯示螯合劑易將土壤中重金屬釋出至孔隙水或轉移形成易釋出之易交換性型態。此轉移現象非常有利於芥菜對鎘、銅及鉛之萃取吸收，也可協助解釋圖三所得之結果。

5、結論(Conclusions)

原始土壤樣品經重金屬添加配製前後，除了銅以外，配製後之重金屬鍵結型態與原始土壤樣品中重金屬鍵結型態分佈相近。

以培育四週之芥菜對原始未受污染之土壤進行重金屬之植物萃取時發現芥菜對銅與鉛之吸收蓄積量比對鎘高，主要可能與原始土壤樣品中三種重金屬含量高低有很大關係。

在幾乎相同之生物質量下，添加愈多之螯合劑將愈增加對鎘、銅及鉛之吸收蓄積量。芥菜對銅之萃取吸收能力遠超過對鎘及鉛之能力。添加螯合劑對提升芥菜吸收土壤中鉛之效果明顯較低。

隨著螯合劑添加劑量增加，土壤中易吸附性與易交換性重金屬也隨之增加，而其它鍵結型態之含量則逐漸減少，顯示螯合劑易將土壤中重金屬釋出至孔隙水或形成易釋出之易交換性型態。此轉移現象非常有利於芥菜對土壤中鎘、銅及鉛之萃取吸收。

6、參考文獻 (References)

[1] Utsunomiya T（1980）Japanese Patent Application No.55-72959.

[2] Huang JW, Chen J, Berti WR, and Cunningham SD（1997）Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction, *Environ. Sci. Technol*. 31:800~805.

[3] Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD, and Raskin I（1997）Enhanced accumulation of Pb in Indian Mustard by soil-applied chelating agents, *Environ. Sci. Technol*. 31:860~865.

[4] Ebbs SD and Kochian LV（1998）Phytoextraction of zinc by Oat（*Avena sativa*）, Barley（*Hordeum vulgare*）and Indian Mustard（*Brassica juncea*）, *Environ. Sci. Technol*. 32:802~806.

[5] Kulli B, Balmer M, Krebs R, Lothenbach B, Geiger G, and Schulin R（1999） The influence of nitrilotriacetate on heavy metal uptake of lettuce and ryegrass, *J. Environ. Qual*. 28:1699~1705.

[6] Chen H and Cutright T（2001）EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr and Ni uptake by *Helianthus annuus*, *Chemosphere* 45:21~28.

[7] Salt DE, Blaylock M, Kumar PBAN, Dushenkov V, Ensley BD, Chet I, and Raskin I（1995）Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants, *Biotechnology* 13:468~478.

[8] Tessier, A., P. Gampbell, and M. Bisson (1979) Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals, *Analytical Chemistry*, 51:844-851.

[9] Belzile n., Lecomte P. and Tessier A (1989) Testing readsortion of trace elements during partial chemical extractions of bottom sediment, *Environ. Sci. Tech.*, 23:1015-1020.

表一　逐步萃取法分析步驟

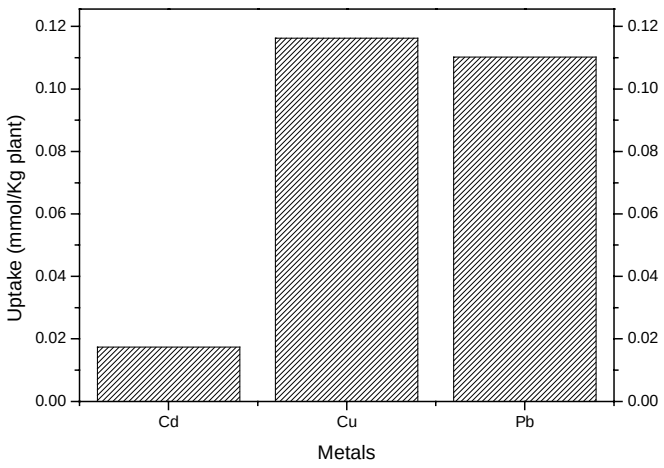
鍵結型態	萃取液	操作條件
F1	1 M CH_3COONH_4 (pH 7.0)	攪拌 0.5 小時，靜置 2 小時
F2	1 M CH_3COONa (pH 5.0)	攪拌 5 小時，靜置 2 小時
F3	0.1 M NH_2OH · HCl in 0.1 N HNO_3	攪拌 0.5 小時，靜置 2 小時
F4	0.04 M NH_2OH · HCl in 25 %(v/v) CH_3COOH	96℃下，攪拌 6 小時
F5	(1) 30 %H_2O_2 + 0.1N HNO_3 (2) 3.2 M CH_3COONH_4 in 20 % (v/v) HNO_3	先加(1)混和液 85℃下，攪拌 5 小時，冷卻後加入(2) 混和液攪拌 0.5 小時
F6	1mL H_2O_2 20％＋6mL HNO_3	微波消化

表二　原始未受污染土壤之物化特性

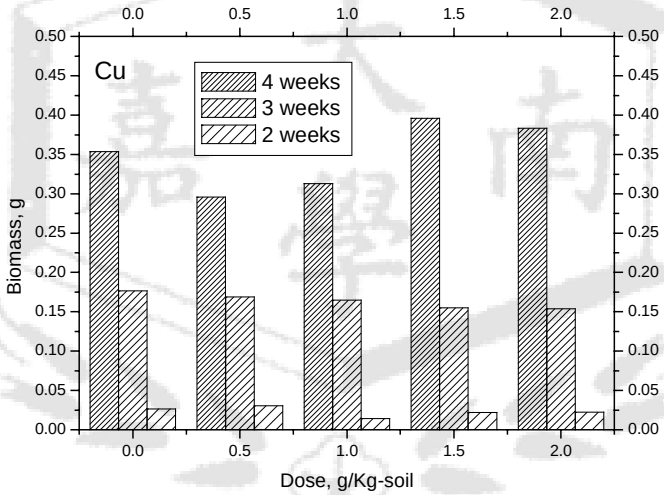
pH	CEC cmol/Kg	細砂 (100-250 μ m) %	極細砂 (50-100 μ m) %	坋粒 (2-50 μ m) %	粘粒 (＜2μ m) %	總鎘 mmol/Kg	總銅 mmol/Kg	總鉛 mmol/Kg
6.8	9.57	0.62	9.80	77.97	11.26	0.01	0.10	0.12

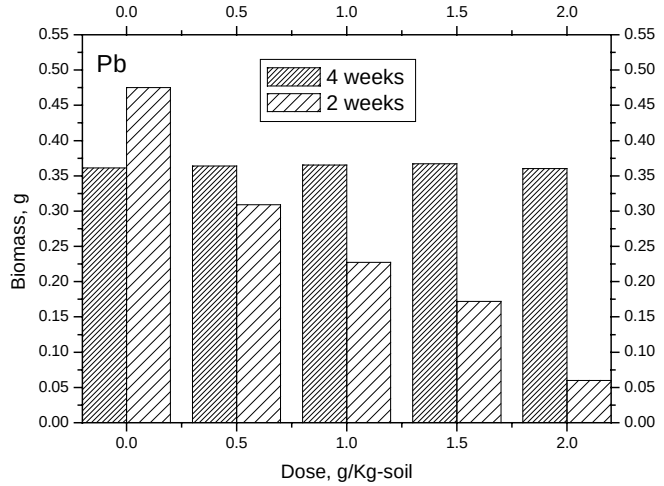
表三　重金屬添加配製前後之土壤重金屬鍵結型態之分佈

Fractions / Metals		Exchange-able %	Bound to carbonates %	Bound to Mn-oxides %	Bound to Fe-oxides %	Bound to organics %	Residue %	Total amount mmol/Kg
Cd	raw	0.00	0.79	0.00	0.00	0.28	0.24	0.01
	spiked	43.91	42.75	6.12	3.93	2.30	0.16	0.99
Cu	raw	0.00	1.04	0.00	0.00	2.17	3.43	0.10
	spiked	16.44	43.82	4.72	21.68	10.32	3.02	5.00
Pb	raw	0.56	14.89	1.42	3.37	4.73	0.19	0.12
	spiked	28.45	44.84	5.93	13.98	6.61	0.19	7.51

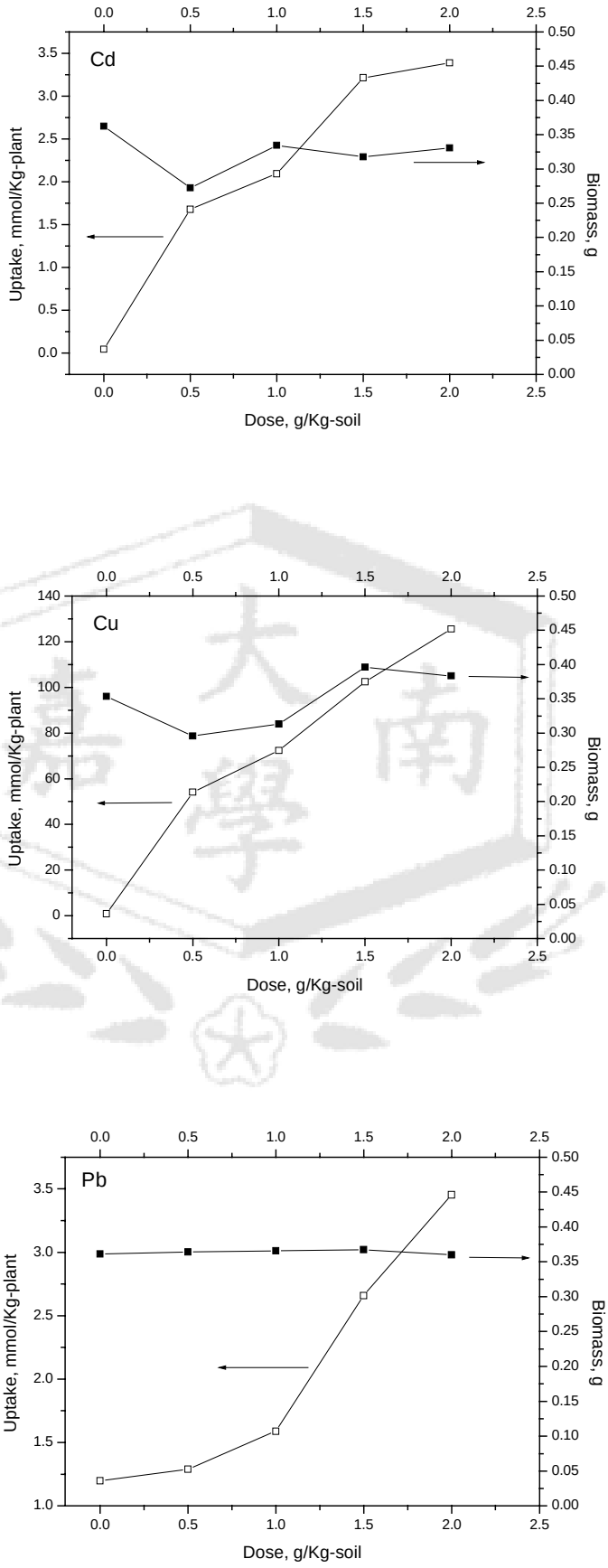


圖一　培育四週之芥菜(*Brassica juncea*)對原始未受污染土壤之重金屬吸收量

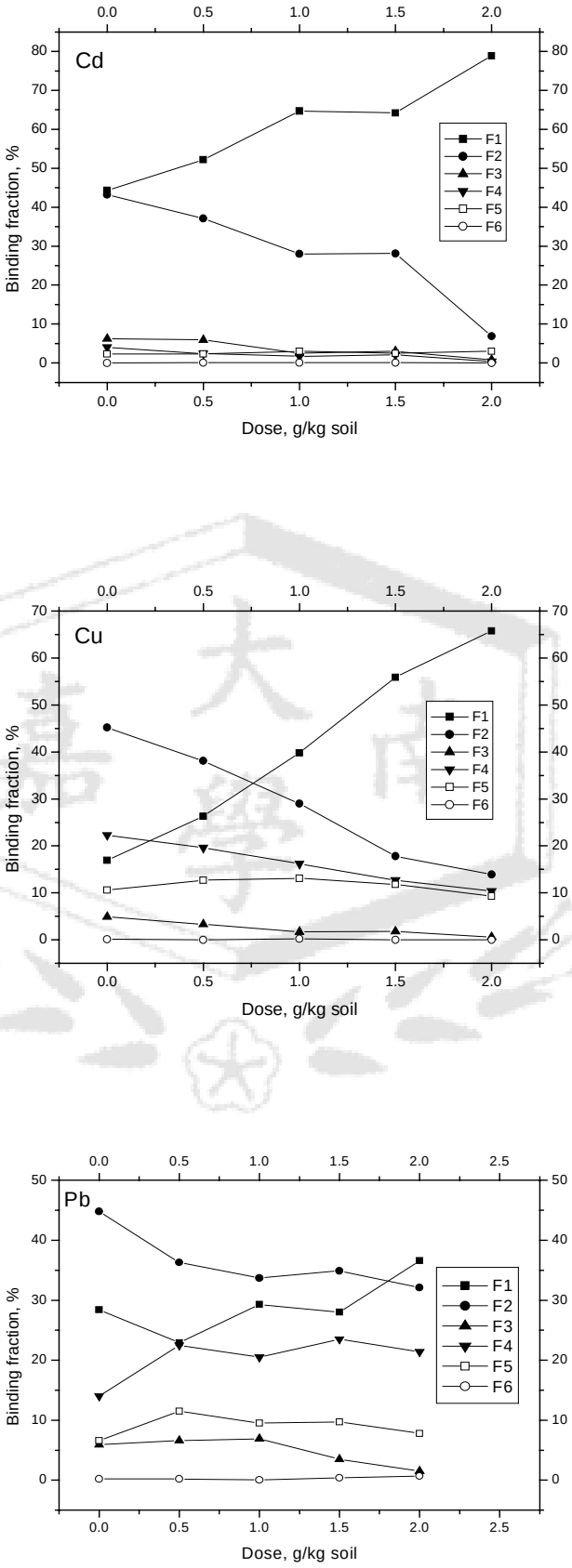




圖二　在不同培育時程及添加不同螯合劑量下，芥菜(*Brassica juncea*)生物質量之變化



圖三　在不同螯合劑量下，培育四週之芥菜(*Brassica juncea*)對不同重金屬之吸收量



圖四 在不同螯合劑量下，經芥菜(*Brassica juncea*)萃取吸收後，土壤中重金屬鍵結型態之變化

(F1: exchangeable; F2:bound to carbonates; F3:bound to Mn-oxides; F4:bound to Fe-oxides; F5:bound to organics; F6:residual)