

玉米、培地茅及麻瘋樹對戴奧辛/呔喃的吸收及累積之研究

吳裕民、陳珊玫

正修科技大學通識教育中心

楊磊

中山大學海洋環境及工程學系

摘要

本研究以溫室盆栽實驗的方式，探討玉米(maize)、培地茅(vetiver)及麻瘋樹(physic nut)等三種植物對於土壤中 PCDD/Fs 的吸收、傳輸及分布的趨勢，以及植物根部對根圈微生物的影響。研究結果顯示玉米、培地茅及麻瘋樹皆能夠生長於高濃度戴奧辛污染土壤。植物對於 PCDD/Fs 的吸收則以根部為主，少量的 PCDD/Fs 可傳輸至地上部(shoot)，但是三種植物中 PCDD/Fs 的分布有所差異，玉米根部的吸收濃度最高，地上部則以培地茅的吸收濃度較高。一般高 $\log K_{ow}$ 值的化合物，具有強烈的親脂性，而本研究結果顯示具高 $\log K_{ow}$ 的 PCDD/Fs 同源物，其根部 $\log BAF$ (bioconcentration factor) 越低，是影響植物吸收與傳輸的主要因素。種植植物的土壤中總菌落數明顯高於未種植物的實驗組，顯示根部可改善土壤中的物化環境，促進根圈微生物的生長，其中以玉米的效果最為明顯。

關鍵字：戴奧辛、呔喃、植生復育、生物累積



Uptake and Accumulation of Maize、Vetiver and Physic Nut for PCDD/Fs-contaminated Soil

Yu-Ming Wu、Shan-Mei Chen

Center for General Education, Cheng-Shiu University

Lei Yang

Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

Abstract

A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the uptake and accumulation of PCDD/Fs in maize (*Zea mays*), vetiver (*Vetiveria zizanioides*) and physic nut (*Jatropha curcas* L.) and the effect of plant root on microorganisms in the rhizosphere soil. The result showed three plants were able to grow in the high concentration of PCDD/Fs-contaminated soil. PCDD/Fs were detected in the root and shoot of three plant after test, but roots took up most of the PCDD/Fs compared with shoots. Due to the differences of plant species, the distribution of PCDD/Fs in the plant tissue was different. The root of maize and the shoot of vetiver could absorb the highest concentrations. The root bioconcentration factors (BAF) of PCDD/Fs was calculated and correlated with $\log K_{ow}$. The $\log K_{ow}$ values express the hydrophilic or hydrophobic of pollutants. PCDD/Fs congeners were taken up by the roots of plant, and the translocation of PCDD/Fs to the shoot was inversely related to congeners hydrophobicity. The high $\log K_{ow}$ was a main factor that influence the uptake and translocate of PCDD/Fs by plants. As the numbers of chlorine of PCDD/Fs increases, \log BAF of plants were lower. In our study, the most efficient plant species for the uptake of PCDD/Fs promoted the growth of the highest number of total bacteria compared to the unplanted.

Keywords: Dioxin, Furan, Phytoremediation, Bioaccumulation



一、前言

PCDD/Fs (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans)是包括 75 種多氯二聯苯戴奧辛 (Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, 簡稱 PCDDs) 及 135 種多氯二聯苯呋喃 (Polychlorinated dibenzofurans, 簡稱 PCDFs), 共約 210 種不同的化合物之總稱, PCDD/Fs 的來源大多為工業製程中或是燃燒過程中所產生的副產物[1,2]。由於 PCDD/Fs 的 $\log K_{ow}$ 值界於 6.5 - 8.8 之間, 具有極高的親脂性及低水溶性, 隨著空氣或水體的擴散後, 容易與土壤或沉積物中的顆粒或是有機質形成緊密的結合, 而且化學結構穩定, 在自然界中極不易被生物分解。人類可能藉由食物鏈的食入而增加生物累積性的風險。長期曝露於 PCDD/Fs 的環境中, 會導致人體的致癌性、致畸胎性及肝臟毒性, 國際上已列為持久性有機污染物(Persistent organic pollutants; POPs)[2,3]。

依資料[4]顯示國際間約有30多處受氯化有機物(如PCDD/Fs、PCB、DDT等)污染的整治場址, 其中也包含台南中石化安順廠場址。一般對於遭受PCDD/Fs污染的土壤整治, 通常採用熱焚化、還原脫氯或土壤萃取的處理方式, 這些無論是利用物理或化學的整治技術, 雖然對於土壤污染整治有較快速的效果, 但是處理過程中往往需要消耗大量的能量及化學藥劑的使用, 造成整治費用都相當的昂貴, 而且整治後土壤質地與結構也以受到嚴重的破壞, 不利於後續的土地利用, 因此尋找另一種經濟有效的整治技術成為未來重要的課題之一。

植生復育(phytoremediation)是一種結合陽光、植物與微生物的生態整治技術, 成本的花費較一般物理化學處理便宜, 在能源的消耗與加藥量上也較為節省, 因此對於現地場址的生態破壞能減至相當低的程度, 是屬於同時兼顧效率及永續性的污染整治方式。關於去除重金屬之植生復育機制主要有：(一)植物萃取(phytoextraction)：植物根部從土壤中吸取污染物, 然後傳輸至植物組織中儲存累積。(二)根圈過濾(Rhizofiltration)：藉植物根部吸收或吸附根區溶液中之污染物, 主要應用於處理受污染之地下水。(三)植物穩定作用(phytostabilization)：植物利用細密的根部固著土壤, 或是植物自根部釋放出化學物質, 將根部附近之污染物固定, 使污染物或是污染土壤減少活動性, 降低危害風險。而關於有機污染物之植生復育的主要機制有：(一)植物分解(phytodegradation)：植物將所吸收之污染物透過植物本身之代謝程序(metabolic processes)進行分解, 或是利用植物根部釋放出分解酶將根部附近的污染物分解成無毒或毒性較小之物質。(二)根圈降解(rhizodegradation)：藉由根區效應的影響, 利用植物根部傳輸氧氣的特性提高根部附近的氧氣量, 以及根分泌物之分泌或是根部共生菌的作用, 使根區部分的營養鹽增加, 提高微生物之活性, 增加污染物分解之效率。(三)植物蒸散(phytovolatilization)：將植物吸收之污染物經由植物之葉片之蒸散作用轉移至空氣中[5,6,7]。

近年來植生復育(Phytoremediation)整治技術已列入美國超級基金(Superfund)整治場址中, 為有效的現地整治技術之一, 植生復育技術已被應用在各類型的污染場址的整治上, 如重金屬的污染、有機污染物及輻射核元素等。在許多污染場址整治案例中, 植生復育被應用於後期的修飾步驟(polishing step), 可接續在前期高濃度處理單元後面, 或是單獨應用於整治低濃度污染場址, 更能顯示植生復育具有經濟性與有效性的整治特性[7,8,9]。

關於氯化有機化合物(Chlorinated organic compound) 相關的植生復育研究顯示, 如 Reed Canarygrass 與 Switchgrass 等可以快速分解 PCB[10]; Ryegrass 可促進土壤中的 PCP 的降解[11]; 部分草類(如 bermuda grass、bent grass 及 white clover 等)則被用於去除二聯苯呋喃可行性的探討[12]。少數的南瓜(pumpkin)及美洲南瓜(zucchini)則可藉由植物萃取機制, 吸收土壤中的有機污染



物(如 PCB、DDT 及 DDE 等), 具有高生物累積的特性[13,14,15]; 另外, 如一些水生植物如 eelgrass, 亦被用於處理海水沉積物中的 PAH 及 PCB[16], 顯示以植物清除土壤中的氯化有機化合物具有相當大的潛力, 但是現階段利用植物處理 PCDD/Fs 的相關研究仍屬貧乏, 對於可處理戴奧辛化合物的植物品種選擇, 仍需要更多的研究進行篩選。

因此, 本研究選擇玉米(maize)、培地茅(vetiver)及麻瘋樹(physic nut)等三種具有生長快速特性的植物, 探討應用於處理高濃度 PCDD/Fs 污染土壤的可行性, 藉由植物組織 PCDD/Fs 濃度分析, 瞭解 PCDD/Fs 在植物體內吸收、傳輸及分布的趨勢, 同時測定土壤中總菌落數, 以瞭解植物根部對根圈微生物的影響。

二、材料與方法

2.1 土壤樣品

原始土壤樣品採集自台南中石化安順廠區內深度 0 - 30 公分內的表土, 土壤樣品取回後先去石礫、樹枝等雜物後, 再以 4 mm 標準篩網過篩, 充分混合均勻後裝入塑膠桶內備用。此批土壤經分析後屬壤質砂土(Loamy sand), pH 值為 9.34, PCDD/Fs 濃度為 28050 ng I-TEQ/kg。

2.2 盆栽試驗

本研究採用玉米、培地茅及麻瘋樹等三種植物作為實驗觀察的對象。玉米以種子育苗方式培育, 首先將玉米種子直播於直徑 3 公分的穴盤中, 每個穴盤放置 3 顆種子, 發芽後經過約 6-8 天的育苗, 選擇高度約 20 公分與外型相似的植株再移至黑色塑膠盆定植, 每盆種 1 株植株; 培地茅及麻瘋樹則是購自種苗中心, 購入後先於溫室中培育約 10 天再移植至黑色塑膠盆定植, 培地茅在移植前先將各株地上部(shoot)統一先修剪為 20 公分長, 作為初始高度, 每盆種植約 3-5 株; 麻瘋樹則選擇高度(約 50 公分)及外型相似之成株進行定植, 每盆種植 1 株。每一種植物實驗組之盆栽實驗作四重複, 每盆土壤重量為 1000 公克, 塑膠盆直徑約為 13 公分, 高度為 12 公分。所有實驗組皆置於可控制溫度 (22-29°C) 的溫室中進行栽培, 試驗期間每日以逆滲透水給予適當的澆灌。此外, 因為每種植物的生長速度及成熟時間略有不同, 因此, 培地茅及麻瘋樹的試驗時間設定為 60 天, 玉米的試驗時間則為 40 天。

2.3 植物與土壤的採集

當到達預定的試驗採收日, 小心地將土壤與植株分離, 植株部分先以大量清水沖洗數次, 直到植物體表面完全乾淨無土壤顆粒附著為止, 最後再以去離子水清洗一次。然後以刀片將植株切分為地上物(shoot)及根部(root)二部分, 將植物體分別秤重紀錄之, 隨後放入封口袋中, 再放入 4°C 冰箱中存放, 等待後續分析。另外, 將分離的土壤先仔細去除部分植物細根後, 再充分混合均勻, 裝入封口袋中, 再放入 4°C 冰箱中存放, 等待後續分析。

2.4 戴奧辛分析

本試驗所收集的土壤及植物組織樣品統一送至正修超微量研究科技中心進行 17 種戴奧辛同位素分析, 戴奧辛分析係依環檢所公告 NIEA M801.12B 方法分析之, 利用 $^{13}\text{C}_{12}$ -同位素標識稀釋法(Isotope dilution method), 使用氣相層析儀/高解析質譜儀(HRGC/HRMS)分析樣品中戴奧辛(Polychlorinated dibenzo-*para*-dioxins, PCDDs)及呔喃(Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)測定十



七種含2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物之濃度並計算其總毒性當量濃度。檢測步驟如下所述：

一、樣品均勻化

土壤先剔除石礫、樹枝等雜物後，冷凍乾燥後，用 2 mm 標準篩網過篩，再經過研磨使其通過 18 mesh (即孔徑 ≤ 1 mm) 標準篩，再充分混合均勻裝入樣品瓶內，待進行萃取處理程序。

植物樣品經清洗晾乾後，切成2~3公分大小，置入冷凍乾燥瓶中並稱重，再移入冰櫃冷凍，經冷凍乾燥除水後秤重，除水後之樣品再移入不銹鋼攪拌機內攪碎均勻，儲存於棕色玻璃瓶，進行樣品萃取程序。

二、樣品萃取

以上皿天平稱取樣品於燒杯，以杓子移入圓筒濾紙內，圓筒濾紙置入索氏萃取器回流管，以 10mL 甲苯清洗燒杯，洗液置入回流管，並置入 2 克無水硫酸鈉，添加內標準溶液(L1613LCS) 20 μ L 在索式萃取管內之土壤，吸取 150mL 甲苯於 250 mL 平底燒瓶，回流 24 小時。將留於回流管內之甲苯以虹吸方法回流至平底燒瓶，以 25ml/次甲苯，兩次清洗冷凝器使之流入回流管，以虹吸方法回流至平底燒瓶。再利用減壓濃縮將萃取液濃縮至 1ml 左右。

三、酸洗淨化：

(1)以二氯甲烷將萃取濃縮液轉移至 6 dram 樣品瓶中，並以氮氣吹乾，隨後加入 7 mL 之正己烷，振盪約 5 秒後加入標準品(L1613CSS 10 μ l)，再加入 4 mL 之濃硫酸，劇烈振盪約 20 秒，進行第一次酸洗利用離心機離心分層。(2)轉移上層有機溶液至另一乾淨的 6 dram 試管中。有機溶液內再加入 4mL 之濃硫酸，振盪約 20 秒，進行第二次酸洗，靜置分層或離心機離心分層。(3)將有機溶液先收集於 50mL 試管中；各酸層再以 7 mL 之正己烷逐一溶洗兩次。將有機溶液收集於 50mL 試管中，再以氮氣吹除至 2mL 左右，隨後進行多層矽膠管柱之淨化步驟。

四、多層矽膠管柱淨化

(1)多層矽膠管柱：尖底部裝填玻璃棉後再依序填入 0.5g 矽膠、0.5g 硝酸銀矽膠、0.5g 矽膠、0.5g 氫氧化鈉矽膠、0.5g 矽膠、5g 硫酸矽膠、0.5g 矽膠、0.5g 無水硫酸鈉，充填時須以玻璃棒壓實。(2)以 30 mL 正己烷預洗管柱，洗液丟棄。(3)將完成酸洗之 2mL 正己烷溶液移入管柱中，全部轉移完成後，再以 1mL/次正己烷，共三次清洗樣品瓶並移入管柱中，再以 5mL/次正己烷，共兩次流洗管柱。(4)再以 120mL 正己烷流洗多層矽膠管柱，以 300 mL 錐形瓶收集流洗液，以氮氣吹至 1mL 左右。

五、酸性氧化鋁淨化步驟

(1)酸性氧化鋁管柱製備：尖底部裝填玻璃棉後再依序裝填 1g 之矽膠、6g 之酸性氧化鋁、1g 之矽膠及 1g 之無水硫酸鈉。(2)管柱預洗：以 20 mL 正己烷預洗管柱，洗液丟棄。(3)將完成酸性矽膠或多層矽膠管柱淨化之 1mL 正己烷溶液移入管柱中，全部轉移完成後，再以 1mL/次正己烷，共三次清洗樣品瓶並移入管柱中，再以 5mL/次正己烷，共兩次流洗管柱。(4)以 90mL 之正己烷流洗，流洗液收集於 150mL 錐形瓶中，編號儲存。(5)、以 20 mL 之二氯甲烷/正己烷(20/80)溶劑流洗，流洗液收集於 50mL 瓶中，以氮氣緩慢吹至近乾，加入 1 mL 正



己烷準備活性碳管柱淨化步驟。

六、活性碳管柱淨化步驟

(1)活性碳/矽藻土管柱製備：尖底部裝填玻璃棉後再依序裝填 0.5g 之矽膠、0.5g 之活性碳/矽藻土(18/82)、0.5g 之矽膠，充填時須以玻璃棒壓實。(2)管柱預洗：依序以甲醇、甲苯、二氯甲烷/甲醇/甲苯(75/20/5)、環己烷/二氯甲烷(50/50)、及正己烷各 5ml 預洗，洗液丟棄。(3)、將完成酸性氧化鋁淨化之 1mL 正己烷溶液移入管柱中，全部轉移完成後，再以 1mL/次正己烷，共三次清洗樣品瓶並移入管柱中。(4)以 2 mL/次環己烷/二氯甲烷(50/50)，共四次移入活性碳淨化管柱，以 1mL/次二氯甲烷/甲醇/甲苯(75/20/5)，共兩次移入活性碳淨化管柱，以上流出液皆合併於 50mL 瓶中。編號儲存 (此成份為含平面型多氯聯苯成份)。(5)再以 35 mL 甲苯溶劑流洗活性碳管柱，以 150 mL 錐形瓶收集，收集流洗液以氮氣緩慢吹至近乾，加入 1 mL 正己烷準備酸性矽膠淨化步驟(二次淨化)。

2.5 土壤總菌落數

稱取約1g的土壤，置於50 ml的離心管中，再加入50 ml 0.1%焦磷酸鈉緩衝溶液（已滅菌，pH=7±0.2），然後至於水平震盪器上以100 rpm緩慢搖動30分鐘。於無菌台內用無菌微量吸管吸取菌液於1 mL 玻璃試管中作連續稀釋，每一稀釋濃度至少做二重覆。再以 1 mL無菌微量吸管吸取 1 mL 的各稀釋度水樣滴在培養皿內。將溫度介於 45 至 50 °C 之培養基分別倒約 15 mL 至含稀釋度水樣的培養皿中，混搖均勻後靜置凝結。倒置培養皿於培養箱內，在 35 ± 1 °C 培養 48 ± 3 小時後，計數各稀釋度培養皿中所產生的菌落數並記錄之。每一植物實驗組土壤樣品做三重覆分析。

2.6 統計分析

本研究實驗的數據採用 PASW Statistic 18.0統計軟體計算，實驗組間差異以Duncan's Multiple Rang Test檢定之，顯著水準設定為p<0.05。

三、結果與討論

本研究所採集的土壤樣本經分析後，土壤毒性濃度為 28050 ng I-TEQ/kg，總濃度為 13.1530 ppm，土壤中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成則如圖 1 所示，分析結果顯示土壤中以含 7 個及 8 個氯的 PCDD/Fs 的 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzo (HpCD)、Octachlorodibenzo (OCDD)、1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzofuran (HpCDF)及 Octachlorodibenzofuran (OCDF)為主，其百分比分別為 3.60 %、47.70%、4.14%及 44.11%，合計共佔 99.54%，其他 13 種 PCDD/Fs 則佔 0.46%，顯示中石化安順廠 PCDD/Fs 污染物以含高氯數的 PCDD/Fs 化合物(如 1,2,3,4,6,7,8-HpCD、OCDF、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 及 OCDD 為主，主要原因是由於安順廠本來為生產五氯酚的鹼氯廠區，在五氯酚生產過程中會產生戴奧辛中間產物，而依文獻[17,18]指出，大部分五氯酚污染場址的土壤中，發現 PCDD/Fs 都以高氯數的 PCDD/Fs 存在。此外，本研究所使用土壤為壤質沙土 (loamy sand); pH 值為 9.34 屬於高鹼性，主要係由於廠區土壤中含大量的石灰。

植生復育技術中，植物種選擇的考量有：植物萃取或降解污染物的能力、生長速率、當地



氣候之適應力、植物根部結構與長度及適應不同土壤組成之能力等[6]。本研究採用培地茅、玉米及麻瘋樹等三種植物種作為供測植物，此三種植物主要具有生長快速、易於栽種及維護等特性。其中，培地茅之根系可深入土層 2 至 3 公尺，是植生復育技術的代表性植物之一，廣泛應用於處理重金屬 Cd、Zn、Hg、Ni 等受污染土壤[23]。玉米及麻瘋樹則為常見之生質能作物，期望除能有效地去除 PCDD/Fs 外，亦能提高植物後續利用之經濟價值。

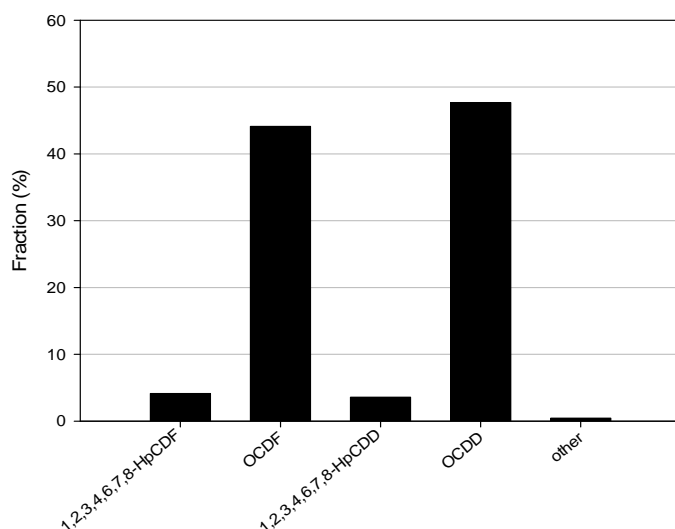


圖 1 土壤中 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF、OCDF、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、OCDD 及其他戴奧辛/呋喃所佔成分百分比

圖 2 係玉米、培地茅及麻瘋樹的根部(root)與地上部(shoot)的 PCDD/Fs 濃度(pg I-TEQ/g)分析結果。以根部組織而言，玉米、培地茅及麻瘋樹的吸收濃度分別為 3250、1195 及 887 pg I-TEQ/g，經 Duncan's Multiple Range Test 統計分析(n=2)後，玉米根部所吸收的 PCDD/Fs 濃度明顯地遠高於其他二種植物($p < 0.05$)，約為培地茅及麻瘋樹吸收濃度的 3 倍，而培地茅吸收濃度略高於麻瘋樹，但二者並無統計上的差異。以地上部組織而言，玉米、培地茅及麻瘋樹的吸收濃度分別為 9.84、22.85 及 8.97 pg I-TEQ/g，經 Duncan's Multiple Range Test 統計分析(n=2)後，培地茅吸收濃度明顯高於其他二種植物($p < 0.05$)，約為 2 倍左右，玉米及麻瘋樹的吸收濃度無明顯的差異。由圖 2 結果顯示，三種植物根部的吸收濃度遠高於地上部的吸收濃度，顯示玉米、培地茅及麻瘋樹對於 PCDD/Fs 的吸收主要以根部吸收為主，只有少量的 PCDD/Fs 被傳輸至地上部；但是，根部最大吸收濃度為玉米，地上部吸收濃度最高為培地茅。學者 Ficko *et al.*[19]以多種草類進行吸收土壤中 PCB 的研究顯示，PCB 多集中於植物的根部；少數南瓜品種 *Cucurbita pepo* 則可以藉由植物萃取作用，將 PCB 傳輸至地上部產生超累積(hyper-accumulation)[14,15]，顯示不同植物對於毒性污染物的吸收及傳輸有不同的處理策略。此外，一般有機物之親水性或疏水性質，使用辛醇/水分配係數(octanol-water partition coefficient, K_{ow})來決定，由於有機物之 K_{ow} 值範圍甚大，一般在 10^{-3} - 10^7 之間，故常以 $\log K_{ow}$ 表示之。 $\log K_{ow}$ 是描述有機化合物在環境中行為的重要物理化學參數，同時也與化合物的水溶性、土壤吸附常數和生物濃縮因子密切相關。



而一般愈高 $\log K_{ow}$ 值的化合物，具有強烈的親脂性，極不易溶於水中，即使藉由根部吸收進入植體內，由於化合物的低移動性，不易由根部傳輸至地上部。而特別的是本實驗所採集的土壤中的污染物以具 7 - 8 個氯數的 PCDD/Fs 為主，其 $\log K_{ow}$ 值約為 8 以上，相對地高於其他研究 [14,16,19] 污染物之 $\log K_{ow}$ 值。

表 1 係不同 PCDD/Fs 的 $\log K_{ow}$ 值比較，與玉米、培地茅及麻瘋樹的根部生物累積因子 (bioaccumulation factors; BAF) 計算結果，根部生物累積因子定義為 $[PCDD/Fs]_{root} / [PCDD/Fs]_{soil}$ 。玉米根部 BAF 值介於 0.1031 - 0.2012 之間，培地茅根部 BAF 值介於 0.0362 - 0.0589 之間，麻瘋樹 BAF 值介於 0.0220 - 0.0597 之間，玉米根部 PCDD/Fs 同源物的 BAF 值平均遠高於其他二種植物。其中， $\log K_{ow}$ 大於 8 的 OCDF、HpCDD 及 OCDD 的 BAF 值，在三種植物的根部 BAF 值中都是最低的， $\log K_{ow}$ 落在 6 左右的 TCDF、PeCDF、TCDD 及 PeCDD 的 BAF 值則是在各組中較高的，本研究進一步以 PCDD/Fs 同源物各組的 $\log K_{ow}$ 與 $\log BAF$ 做相關性分析，結果(圖 3)顯示，所有組別皆呈現負相關性，玉米及麻瘋樹的組別分別為 -0.855 及 -0.944，且 $p < 0.001$ 極為顯著，培地茅則為 -0.736，也達到顯著性 ($p < 0.05$)，結果顯示化合物的 $\log K_{ow}$ 扮演重要的關鍵腳色也是一項限制因子，會影響到植物對 PCDD/Fs 吸收或傳輸，甚至影響土壤與化合物間吸附及脫附的行為[16]。

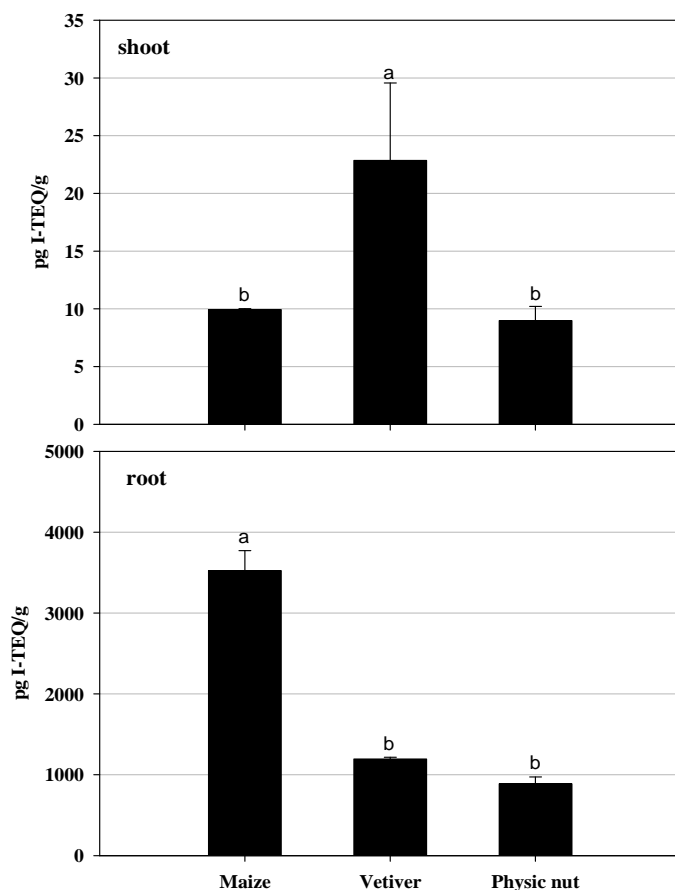


圖 2 玉米(maize)、培地茅(vetiver)及麻瘋樹(physic nut)的根部(root)及地上部(shoot)的戴奧辛/呋喃毒性濃度分析



爲了探討不同植物根部對於土壤根圈微生物的影響，在種植後取未種植土及各實驗組植物根部土壤進行土壤總菌落數分析，如圖4所示，種植玉米、培地茅及麻瘋樹的實驗組的土壤總菌落數明顯高於未種植植物土壤一至二個級數($p < 0.05$)，顯示植物根部確實可改善土壤中的物化環境，促進根圈微生物的增殖。而三種植物根部總菌落分析由高至低分別爲玉米(3.5×10^7 CFU/g)、培地茅(8.3×10^6 CFU/g)及麻瘋樹(1.9×10^6 CFU/g)，經Duncan's Multiple Range Test統計分析($n=3$)後，玉米明顯高於培地茅及麻瘋樹的土壤總菌落數($p < 0.05$)，培地茅及麻瘋樹二者間則無差異。

植生復育整治技術的另一優勢爲可藉由植物根部分泌出大量的根分泌物(如:酚、有機酸、乙醇及蛋白質等)當作微生物的碳或氮源，幫助根圈附近降解菌及不同微生物的生長及代謝，或是改變土壤的性質，促進污染物的溶解，增加土壤中污染物的生物可利用度(bioavailability)，根分泌物的化學成份及比例因植物的種類不同會有所差異[20]。本實驗結果(圖4)顯示種植物的實驗組明顯高於未栽種的實驗組，此結果與其他學者研究結果相似[10,21]。學者Chekol *et al.*[10]進一步發現PCB污染土中，種植物的實驗組的細菌及真菌數會高於未種植實驗組。此外，部分研究[22]顯示玉米根部可以提供大量根分泌物，促進根圈降解菌的活性，提高有機氯農藥或多氯聯苯的降解。

表 1 不同戴奧辛/呋喃的 $\log K_{ow}$ 值與玉米(maize)、培地茅(vetiver)及麻瘋樹(physic nut)的根部生物累積因子(bioaccumulation factors; BAF)

Congeners	$\log K_{ow}$	BAF _{root}		
		Maize	Vetiver	Physic nut
TCDF	6.2	0.1647	0.0570	0.0589
PeCDF	6.4	0.1437	0.0469	0.0477
HxCDF	7.0	0.1651	0.0508	0.0484
HpCDF	7.9	0.1363	0.0468	0.0368
OCDF	8.8	0.1031	0.0397	0.0220
TCDD	6.4	0.1927	0.0623	0.0585
PeCDD	6.6	0.2012	0.0589	0.0597
HxCDD	7.3	0.1310	0.0362	0.0319
HpCDD	8.0	0.1176	0.0373	0.0282
OCDD	8.2	0.1218	0.0426	0.0275
Total PCDD/Fs (base on I-TEQ calculated)		0.1257	0.0426	0.0316
Total PCDD/Fs (base on pg/g calculated)		0.1141	0.0413	0.0255

$$BAF_{root} = [PCDD/Fs]_{root} / [PCDD/Fs]_{soil}$$



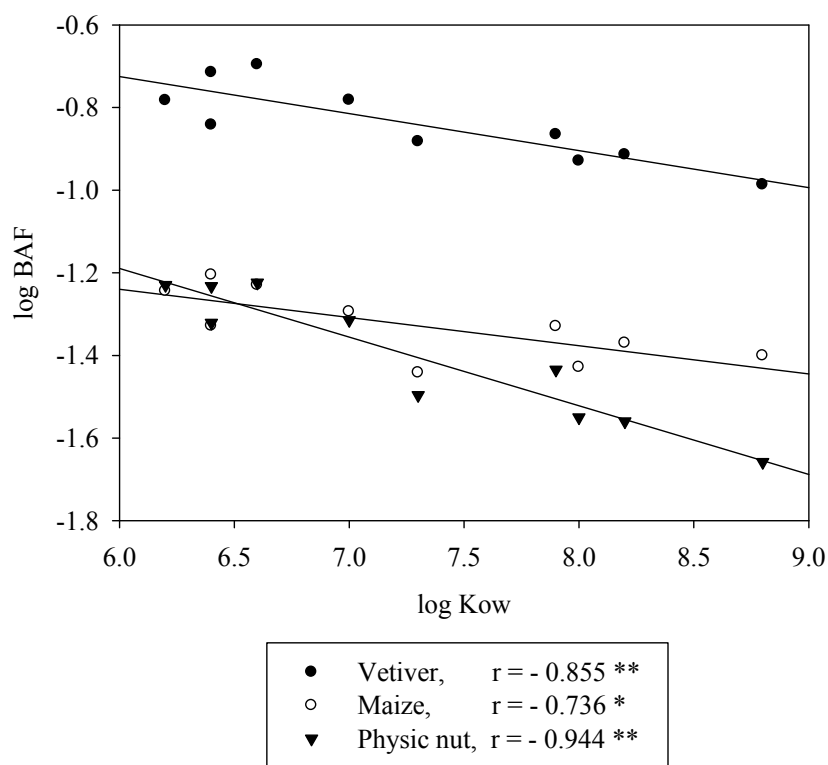


圖3 玉米(maize)、培地茅(vetiver)及痲瘋樹(physic nut)根部生物累積因子(bioaccumulation factors; BAF)與PCDD/Fs 同源物log K_{ow} 之散佈圖及相關係數。(* Significant at $p < 0.05$; ** Significant at $p < 0.01$)

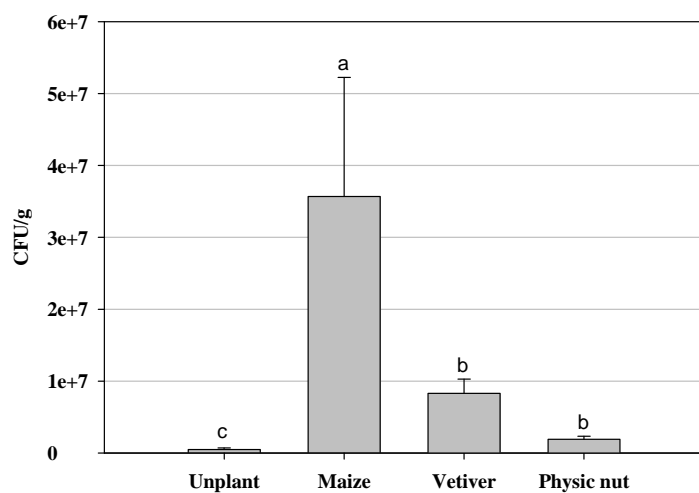


圖4 未種植物與種植玉米(maize)、培地茅(vetiver)及痲瘋樹(physic nut)之根圈土壤總菌落數比較圖



四、結論

- 1.玉米、培地茅及麻瘋樹對於高濃度戴奧辛污染土壤都有良好的耐受性，生長過程中未產生黃化或凋萎的現象。
- 2.整體而言，植物對於 PCDD/Fs 的吸收以根部為主，玉米根部的吸收濃度較高，但是地上部則以培地茅的吸收濃度較高。
- 3.根部 log BAF 與 log K_{ow} 有高度的負相關性，高氯數 PCDD/Fs 的低移動性，是影響植物吸收與傳輸的主要因素。
- 4.種植植物的土壤中總菌落數明顯高於未種植物的實驗組，顯示根部可改善土壤中的物化環境，促進根圈微生物的生長，其中以玉米的效果最為明顯。

參考文獻

- 1.Skene, S.A., Dewhurst, I.C., Greenberg, M., "Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans: the risks to human health . A Review," Human Toxicology, Vol. 8, pp.173–203. 1989.
- 2.Vanden Heuvel, J. P. and Lucier, G., "Environmental toxicology of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans," Environmental Health Perspectives, Vol. 100, pp. 189-200, 1993.
3. Fiedler, H., "CHAPTER 6 Dioxins and Furans (PCDD/PCDF)," The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 3, Part O Persistent Organic Pollutants, pp. 124-201, 2003.
- 4.Weber, R., C. Gaus, M. Tysklind, P. Johnston, M. Forter, H. Hollert, E. Heinisch, I. Holoubek, M. Lloyd-Smith, S. Masunaga, P. Moccarelli, D. Santillo, N. Seike, R. Symons, J. P. M. Torres, M. Verta, G. Varbelow, J. Vijgen, A. Watson, P. Costner, J. Woelz, P. Wycisk, and M. Zennegg, "Dioxin- and POP-contaminated sites—contemporary and future relevance and challenges," Environmental Science and Pollution Research, Vol. 15, pp. 363–393, 2008.
- 5.EPA, "A Citizen's Guide to Phytoremediation," EPA 542-F-98-011, PP.1-6, 1998.
- 6.Susarla, S., Victor, F., Medina B., Steven, C. M., "Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination," Ecological Engineering, Vol. 18, pp. 647-658, 2002.
- 7.Gerhardt, K.E., Huang, X.D., Glick, B.R., Greenber, B.M., "Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potencial and chanllenges," Plant Science, Vol. 176, pp. 20-30, 2009.
- 8.Jadia, C.D. and Fulekar, M.H., "Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques," Journal of Biotechnology, Vol. 8, No. 6, pp. 921-928, 2009.
- 9.EPA, "Introduction to Phytoremediation," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-99/107, 2000.
- 10.Chekola, T., Lester, R. V., Rufus, L. C., "Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: the rhizosphere effect," Environment International, Vol. 30, pp. 799-804, 2004.



11. He, Y., Xu, J., Tang, C., Wu, Y., "Facilitation of pentachlorophenol degradation in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne* L.)," *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 37, Issue 11, pp. 2017-2024, 2005.
12. Wang, Y., and Oyaizu, H., "Evaluation of the phytoremediation potential of four plant species for dibenzofuran-contaminated soil," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, Issues 2-3, pp. 760-764, 2009.
13. Zeeb, B. A., Amphlett, J. S., Rutter, A., Reimer, K. J., "Potential for phytoremediation of polychlorinated biphenyl-(PCB-)contaminated soil," *International journal of phytoremediation*, Vol. 8, pp.199-221, 2006.
14. White, J. C., and Zakia, D. P., "Soil Amendments, Plant Age, and Intercropping Impact p,p-DDE Bioavailability," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 35, pp.992-1000, 2006.
15. Whitfield, M. L., Zeeb, B. A., Rutter, A., Reimer, K.J., "In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl — (PCB) contaminated soil," *Science Total Environment*, Vol. 1, pp.1-12, 2007.
16. Huesemann, M.H., Hausmann, T.S., Fortman, T.J., "In situ phytoremediation of PAH- and PCB-contaminated marine sediments with eelgrass (*Zostera marina*)," *Ecological Engineering*, Vol. 35, pp. 1395-1404, 2009.
17. Alcock, R. E. and Jones, K. C., "Pentachlorophenol (PCP) and Chloranil as PCDD/F sources to sewage sludge and sludge amended soils in the UK," *Chemosphere*, Vol. 35, pp. 2317-2330, 1997.
18. Matthias K., Wilhelm K., Wolfgang R., "Source identification of PCDD/Fs in a sewage treatment plant of A German village," *Chemosphere*, Vol. 43, pp. 737-741, 2001.
19. Ficko, S. A., Rutter, A., Zeeb B. A., "Effect of pumpkin root exudates on ex situ polychlorinated biphenyl (PCB) phytoextraction by pumpkin and weed species," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 18, pp.1536–1543, 2011.
20. Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I., "Phytoremediation. Annu Review," *Plant Physiologists*, Vol. 49, pp. 643-668, 1998.
21. Ionescu, M., Beranova, K., Dudkova, V., Kochankova, L., Demnerova, K., Macek, T., Mackova, M, "Isolation and characterization of different plant associated bacteria and their potential to degrade polychlorinated biphenyls," *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 63, pp. 667–672, 2009.
22. Álvarez, A., Yañez, M.L., Benimeli, C.S., Amoroso, M.J., "Maize plants (*Zea mays*) root exudates enhance lindane removal by native *Streptomyces* strains," *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 66, pp. 14-18, 2012.
23. Truong, P., Mason, F., Waters, D., Moody, P., "Application of Vetiver Grass Technology in off-site pollution control : Trapping agrochemicals and nutrients in agricultural land," *Proceedings Second International Vetiver Conference*, pp.296-302, 2000.

