

以三種植物評估植生復育法處理受戴奧辛污染之土壤

吳裕民、楊磊

中山大學海洋環境及工程學系

陳珊玫

正修科技大學通識教育中心

張簡國平

正修科技大學超微量中心

摘 要

本研究係以配製 3 種不同濃度的戴奧辛污染土壤，並選用大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜進行盆栽試驗，於溫室栽種 8 星期後，觀測戴奧辛毒性對植物生長的影響及植物體內吸收與分布的情形，以評估植生復育處理受戴奧辛污染之土壤可行性。研究結果顯示在低濃度 PCDD/Fs 下，大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜的生長未受毒性影響，但中、高濃度的 PCDD/Fs 會對於植物生長高度產生明顯的抑制現象，部分植物甚至發生黃化及枯死的現象。三種植物體的 PCDD/Fs 濃度分析結果顯示，根部所吸收的 PCDD/Fs 濃度明顯大於地上部的 PCDD/Fs 濃度，其中以大花咸豐草根部分可吸收濃度最高，根部生物累積因子值可達 1.21，顯示大花咸豐草適用於植物穩定化，可避免土壤中 PCDD/Fs 的擴散。

關鍵字：戴奧辛、呋喃、植物修復、生物累積因子



Assessment of phytoremediation potential of three herb species for dioxin-contaminated soil

Yu-Ming Wu 、 Lei Yang

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

Shan-Mei Chen

Center for General Education, Cheng-Shiu University

Guo-Ping Chang-Chien

Super Micro Mass Research and Technology Center, Cheng-Shiu University

Abstract

The potential of three herb species *Bidens pilosa* var *radiata*, *Paspalum vaginatum* Sw and *Commelina diffusa* Burm f in the phytoremediation of PCDD/Fs contaminated soil was evaluated. All species could grow well under the low PCDD/Fs concentration after 8 weeks in the greenhouse. Increasing concentration of PCDD/Fs, phytotoxicity would clearly cause suppression effect on the plants. The PCDD/Fs could be uptake into the root but it can not hardly be translocate to the shoot. BAFs value is 1.21 for the root of *B. pilosa* var *radiat*. These results indicate that *B. pilosa* var *radiata* can be applied to minimize the spread of contaminants on the remediation site.

Keywords: Dioxin; Dibenzofurans ; Phytoremediation; Bioaccumulation Factors;



一、前言

PCDD/Fs (polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans)是由二個苯環所組成的含氯有機化合物，依氯原子鍵結的位置或數目的不同，可產生75種多氯二聯苯戴奧辛及135種多氯二聯苯呋喃等的衍生物化合物。PCDD/Fs已被認定為高毒性的化合物之一，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。PCDD/Fs的化學結構穩定，在自然界中極不易分解，可長期累積於土壤或沉積物內，人類可能藉由食物鏈的食入而增加生物累積性的風險[1,2]。

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，而且容易造成二次污染物的形成，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。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於植物組織中進行分解，或在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，或是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。(二)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。(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。(四)根圈復育(Rhizoremediation)：利用植物根部分泌化學物質到土壤中，將毒性物質減毒或分解成無毒之物質。(五)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[3, 4]。

近年來植生復育技術已列入超級基金整治場址中，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[5,6,7]。關於含氯有機化合物(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[8]，Ryegrass 可促進土壤中的 PCP 的降解[9,10]，White Clover[10]則利用根圈降解(Rhizodegradation)作用，進而分解二聯苯呋喃。南瓜(pumpkin)及美洲南瓜(zucchini)則藉由植物萃取機制，吸收土壤中的有機污染物(PCB, DDE)，具有高生物累積的特性[12,13,14]；研究顯示以植物清除土壤中的含氯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。



本研究目的主要探討大花咸豐草、海雀稗與白竹仔菜等三种植物，在不同濃度的PCDD/Fs污染逆境下，植物對於毒性污染物的耐受性與污染物對植物生理生長的影響程度大小，以及植物對PCDD/Fs吸收量的多寡與植物體內分布情形，用以評估植物應用於處理PCDD/Fs污染土壤的可行性。

二、材料與方法

2.1 土壤樣品與配製

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除石礫、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 8.56，PCDD/Fs 濃度為 62200 ng I-TEQ/kg。本實驗設計擬以 3 種不同 PCDD/Fs 濃度的土壤用以測試植物的耐毒性，首先將上述原始土壤設定為高濃度 PCDD/Fs 的 T6 實驗組，後續再依實驗設計所需要的濃度，分別以原始污染土：乾淨砂土(重量比) 為 1：1 及 1：5 的方式，調配成中濃度的 T3 實驗組(PCDD/Fs 濃度約為 34400 ng I-TEQ/kg)及低濃度的 T1 實驗組(PCDD/Fs 濃度約為 12100 ng I-TEQ/kg)，混合均勻後分別存於放密閉塑膠筒內，經 1 個月的穩定後作為各組實驗用土，穩定期間仍進行數次的攪拌混合。

2.2 盆栽試驗

本研究實驗植物採用大花咸豐草(*Bidens pilosa* var *radiata*)、海雀稗(*Paspalum vaginatum* Sw) 及白竹仔菜(*Commelina diffusa* Burm.)等三种植物作為研究觀察的對象。大花咸豐草以種子育苗方式培育，首先將植物種子種於直徑 3 公分的穴盤中，每個穴盤放置 10 顆種子，經數周育苗後，選擇高度約 17 公分與外型相似的成株移至塑膠盆定植，每盆種 3 株成株；海雀稗及白竹仔菜則採自野外成株，採集後於溫室中培育 2 周，選擇植物高度約 20 公分及外型相似的成株移至塑膠盆定植，每盆 6 株成株。完成定植當日設定為實驗期的第一天，整個試驗時間為期 8 週。每盆土壤重量為 800 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，每 4 周施以液態肥乙次，每種濃度與每種植物進行做四重複實驗。

2.3 植物與土壤的採集

試驗結束後分批採收，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，最後再的去離子水清洗一次。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 葉綠素a分析

取適量新鮮植物葉片，浸泡於80%丙酮於-20°C冷凍24小時後，以磨鉢將葉片磨成漿狀，用濾紙過濾，刮下留在濾紙上的葉片殘渣重複磨碎，直到殘渣中的綠色色素取出為止，然後將萃取液定量至50mL。取 2mL之葉綠素萃取液於石英管中，利用分光光度計測量波長645nm、663nm 之



吸光值，經計算後即可得知植體中葉綠素 a 之含量 [15]。

2.5 戴奧辛分析

本試驗所收集樣品的戴奧辛分析依環檢所公告NIEA M801.12B方法分析之，利用 $^{13}\text{C}_{12}$ -同位素標幟稀釋法(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)及呋喃(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 μL 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 μl)，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，共兩次清洗管柱。(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 1 g 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 正己烷準備活性炭管柱淨化步驟。

六、活性炭管柱淨化步驟

(1)活性炭/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 之活性炭/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)，共四次移入活性炭淨化管柱，以 1mL/次二氯甲烷/甲醇/甲苯(75/20/5)，共兩次移入活性炭淨化管柱，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 甲苯溶劑流洗活性炭管柱，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)。

2.6 統計分析

本研究採用 SPSS 12.0 軟體進行各項實驗數據計算與統計分析，各組實驗樣本的組間差異以 Duncan's Multiple Rang Test 檢定之，顯著水準設定為 $p < 0.05$ 。

三、結果與討論

圖 1(a)(b)(c)為大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜在三種不同的 PCDD/Fs 濃度下，植株高度生長曲線圖，生長期為 8 週，每周紀錄 1 次植高。大咸豐草株高(圖 1(a))觀察結果顯示，T1 實驗組未受 PCDD/Fs 毒性的影響，植株高度成穩定成長的趨勢，最終平均高度為 42cm；但是，T3、T6 實驗組與 T1 實驗組相比較後，顯示植株高度明顯受到高濃度 PCDD/Fs 的影響，植株成長趨勢緩慢，T3 實驗組 8 週後只增加 12cm，最終平均高度為 28cm，株高約為 T1 實驗組的二分之一，而且部分葉片出現黃化及凋萎的現象；T6 實驗組則在生長初期即發生嚴重葉片黃化、凋萎的現象，在第 4 週後已完全枯黑死亡。

圖 1(b)是海雀稗的株高生長曲線，結果顯示在不同 PCDD/Fs 的濃度下，皆呈現增長的趨勢，T1、T3 及 T6 實驗組最終平均高度分別為 77cm、61cm 及 50cm，雖然經統計分析後，三個實驗組株高有明顯差異($p < 0.05$)，但 T6 實驗組在高濃度 PCDD/Fs 下植株仍能緩慢增長，葉片無黃化的現象，由於海雀稗為中石化安順廠現地植物，在土壤採樣點的附近即有大量海雀稗生長，顯示海雀稗本身對 PCDD/Fs 所產生的植物毒性忍受力較強，具有較佳的逆境(stress)抗性。以白竹仔菜而言，圖 1(c)結果顯示 T1 實驗組株高遠大於 T3 及 T6 實驗組，T1 實驗組平均株高為 65 cm，



T3 及 T6 實驗組則明顯受到高濃度 PCDD/Fs 毒性的抑制，8 週的株高變化不大，高度分別為 30cm 及 28cm，T1 實驗組平均株高約為 T3 及 T6 實驗組的 2 倍。

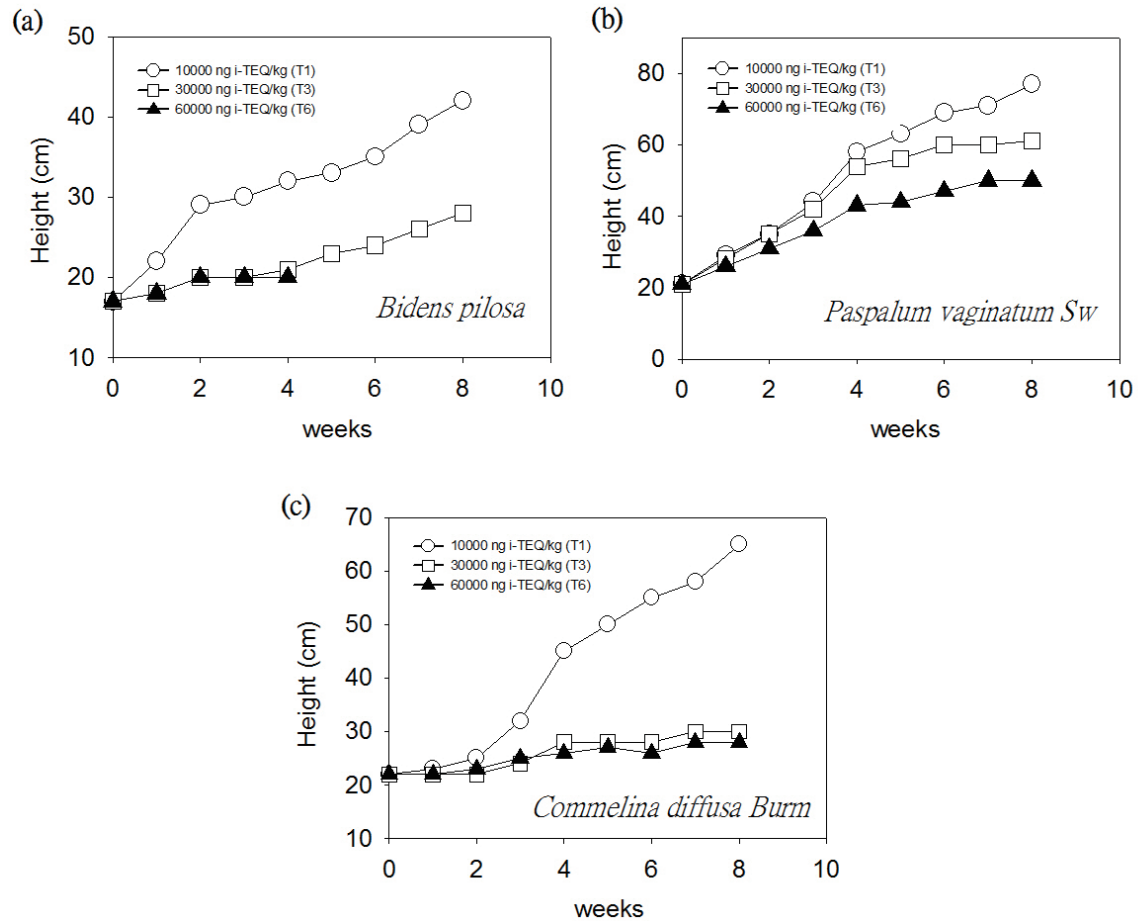


圖 1 不同 PCDD/Fs 濃度下，植株高度生長曲線圖 (a)大花咸豐草(*Bidens pilosa* var. *radiata*) (b)海雀稗(*Paspalum vaginatum* Sw) (c)白竹仔菜(*Commelina diffusa* Burm.)

葉綠素 *a* 是植物光合作用的主要光反應色素，植物葉片中的葉綠素 *a* 含量可顯示植物行光合作用的旺盛程度及生長的健康情形 [15]。表 1 為不同 PCDD/Fs 濃度下，三個實驗組植物葉片內葉綠素 *a* 含量的差異。大花咸豐草的 T1 實驗組葉片中葉綠素 *a* 含量為 0.338 mg，明顯高於 T3 及 T6 的實驗組，顯示在低濃度的 T1 實驗組生長情形良好，可有效地進行光合作用，而且在實驗期間內葉片並無產生黃化、凋萎的現象。

海雀稗 T1、T3 及 T6 實驗組間的葉綠素 *a* 含量並無明顯差異($p>0.05$)，顯示海雀稗對於 PCDD/Fs 的抗性較佳，PCDD/Fs 的毒性對海雀稗植株生長影響較小。白竹仔菜的葉綠素 *a* 含量則以 T1 實驗組最高，可達 0.453 mg，明顯大於 T3 及 T6 實驗組($p<0.05$)，此結果與圖 1(c)植株高度結果相同，高濃度的 PCDD/Fs 會對白竹仔菜產生植物毒性影響較大。

因此，綜合圖 1(a)(b)(c)與表 1 的結果顯示，高濃度的 PCDD/Fs (T3、T6 實驗組) 確實會對三



種植物的生長產生抑制作用，尤其對於大花咸豐草與白竹仔菜的影響最為顯著，二者對於 PCDD/Fs 毒性比較敏感，在高濃度的 T6 實驗組下，部分植株甚至出現嚴重黃化或枯死的現象；三种植物的 T1 實驗組皆適應良好，顯示 10000 ng I-TEQ/kg 左右的 PCDD/Fs 濃度是植物能忍受的限度，三种植物皆能表現出良好的抗性。

表1 不同PCDD/Fs濃度對植物葉片中所含葉綠素 a 的影響

實驗組	葉綠素 a (mg)		
	大花咸豐草	海雀稗	白竹仔菜
T1	0.358a	0.429a	0.453a
T3	0.093b	0.382a	0.232b
T6	0b*	0.379a	0.218b

*大花咸豐草於第2週後枯死，以0值表示之。

每行不同字母表示組間差異顯著 ($p < 0.05$)。

圖 2 為 T1 實驗組土壤(實驗前)中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成，分析結果顯示土壤中 PCDD/Fs 同源物以含 7 個及 8 個氯的 PCDD/Fs 的 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 及 OCDF 為主，其百分比分別為 3.10%、69.71%、2.27%及 24.72%，合計共佔 99.80%，毒性當量濃度為 9230 ng I-TEQ/kg，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，高氯數的 PCDD/Fs 為主要的戴奧辛化合物組成[16]，因此，在大部分五氯酚污染場址的土壤中，PCDD/Fs 都以高氯數的 PCDD/Fs 存在[17, 18]。

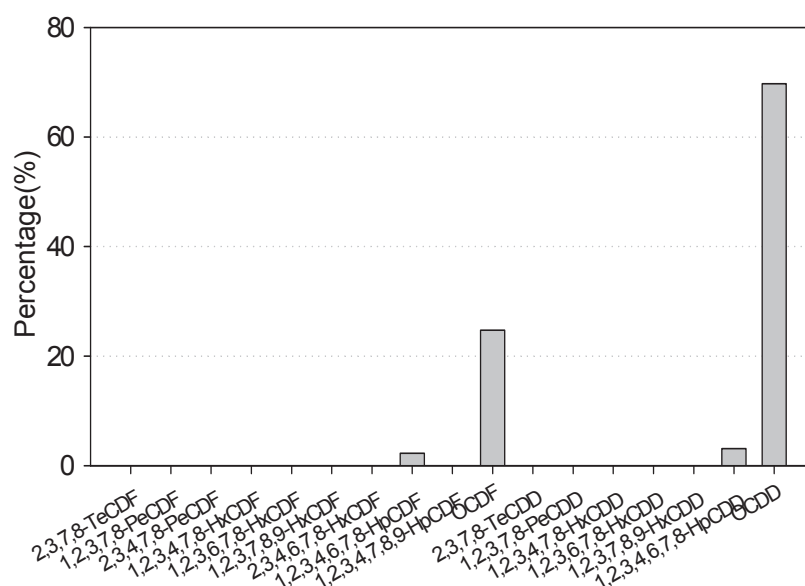


圖 2 為 T1 實驗組土壤(實驗前)中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成



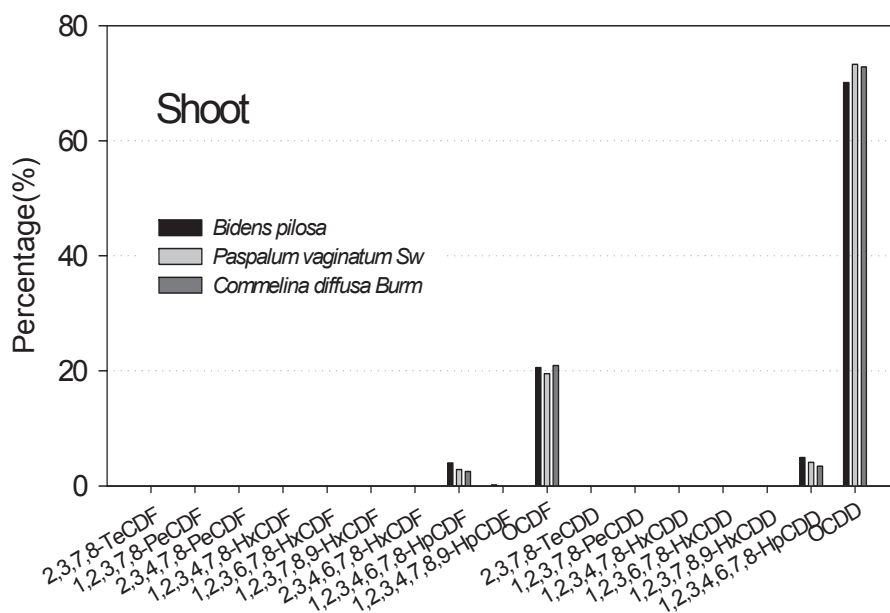


圖 3 大花咸豐草(*Bidens pilosa* var. *radiata*)、海雀稗(*Paspalum vaginatum Sw*)及白竹仔菜(*Commelina diffusa Burm.*)的地上部(shoot)中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成

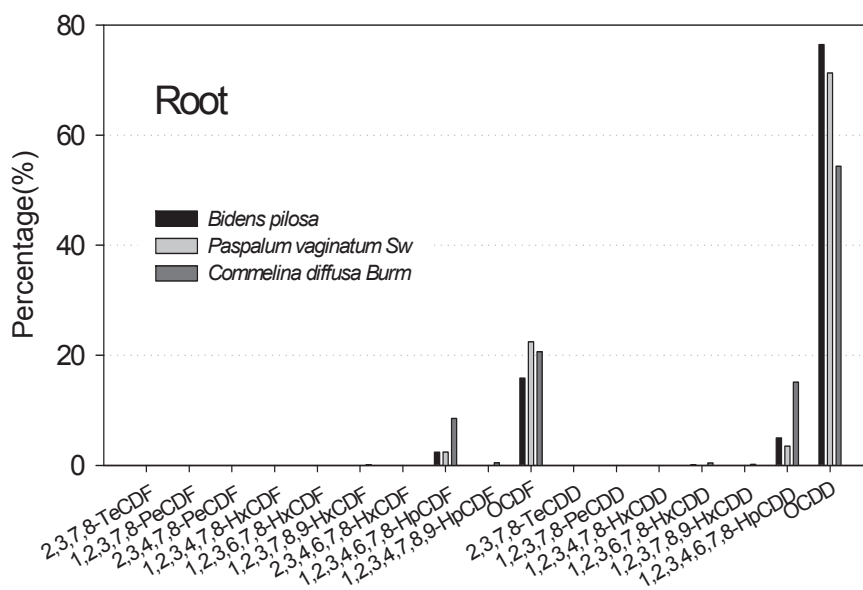


圖 4 大花咸豐草(*Bidens pilosa* var. *radiata*)、海雀稗(*Paspalum vaginatum Sw*)及白竹仔菜(*Commelina diffusa Burm.*)的根部(root)中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成



圖 3 與圖 4 為經 8 周實驗後，大花咸豐草、海雀稗及白竹仔的地上部(shoot)與根部(root)中 17 種 PCDD/Fs 同源物所占百分比組成，結果顯示植體的地上部或根部的 PCDD/Fs 的主要組成爲 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 及 OCDF，同樣以含 7 個及 8 個氯的 PCDD/Fs 爲主，與土壤中的組成(圖 2)相同，此現象與 Jou 等[19]進行安順場內其他現地植物採樣分析結果相同，顯示植物體內所吸收的 PCDD/Fs 組成與栽種土壤中所含 PCDD/Fs 組成有很大的關聯性，而且土壤中污染物濃度的高低亦會影響植物吸收量的多寡[19, 20]。

表 2 爲大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜的地上部(shoot)及根部(root)的 PCDD/Fs 的生物累積因子(Bioaccumulation factors; BAFs)計算結果。BAFs 定義爲[污染物]tissue/[污染物]soil [12]；大花咸豐草根 BAFs 值，除 OCDF 外，其他 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值介於 1.14 - 2.52 之間，顯示根部會累積大量的 PCDD/Fs；若以毒性當量濃度計算，根部的總 PCDD/Fs 濃度可達 14600 ng I-TEQ/kg，高於其所栽種的污染土壤濃度 12100 ng I-TEQ/kg，經換算後其根部 BAFs 值（以 ng I-TEQ/kg 計算）爲 1.21，顯示大花咸豐草根可吸收大量 PCDD/Fs，對土壤污染物會產生富集 (richness)效果；地上部的 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值則介於 0.04 - 0.23 之間，BAFs 值遠低於 1，顯示 PCDD/Fs 雖然可以被植物根部吸收，但只有極少量能傳輸至地上部中，大部分的 PCDD/Fs 都累積於根部。

海雀稗根部 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值介於 0.67 - 1.66 之間，整體根部 BAFs 值(以 ng I-TEQ/kg 計算)爲 0.86；地上部 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值介於 0.01 - 0.08 之間。白竹仔菜根部 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值介於 0.19 - 1.53 之間，根部 BAFs 值(以 ng I-TEQ/kg 計算)爲 0.57，地上部 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值則介於 0.01 - 0.04 之間。雖然海雀稗及白竹仔菜根部部份 PCDD/Fs 同源物的 BAFs 值大於 1，但總 BAFs 值(以 ng I-TEQ/kg 計算)仍小於 1，顯示三種植物根部皆可以吸收 PCDD/Fs，但根部總 BAFs 值(以 ng I-TEQ/kg 計算)爲大花咸豐草 > 海雀稗 > 白竹仔菜，以大花咸豐草根具有較佳的植物累積能力。

因此綜合表 2 的結果顯示，大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜的根部 BAFs 值遠大於三者的地上部 BAFs 值，三種植物對於 PCDD/Fs 吸收累積以根部爲主，此結果與其他文獻[21,22]結果相同，大部分的植物對於類戴奧辛化合物(如 PCB, DDT, DDE 等)的吸收大多集中於根部，莖葉或果實中的化合物濃度極低，主要原因係由於類戴奧辛化合物大多具高 log Kow 值，屬於脂溶性化合物，難溶於水中，無法藉由木質部(Xylem)傳輸於植物上部植體中。本研究所採用的污染土壤檢測分析結果(圖 2)顯示，土壤中的 PCDD/Fs 以 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、OCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 及 OCDF 等四種化合物爲主，合計約占 99%以上，而此四種 PCDD/Fs 同源物的 log Kow 更高達 7 以上，所以根部 PCDD/Fs 不易傳輸(Translocation)至地上部，多集中於植物根部。此外，其他現地植物調查結果顯示，大部分生長於污染場址的現地植物，也會有植物根部的污染物濃度會大於地上部的濃度，低於土壤中污染物濃度的現象[19,20]。雖然，本研究中植物體內污染物分布情形與其他研究結果相似，但特別的是，大花咸豐草根 PCDD/Fs 吸收濃度大於所種植的污染土壤濃度，顯示大花咸豐草根可以吸收超量的 PCDD/Fs，因此可利用此一特性，將 PCDD/Fs 經吸收或吸附於植物根部，進而減低污染物的移動性，避免污染物進入水體或逸散至大氣中。



表 2 大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜植體內的生物累積因子 (BAFs)

同源物	生物累積因子, BAFs					
	大花咸豐草		海雀稗		白竹仔菜	
	shoot	root	shoot	root	shoot	root
2,3,7,8-TeCDF	0.04	1.79	0.01	0.87	0.01	0.89
1,2,3,7,8-PeCDF	0.07	1.82	0.05	1.54	0.01	1.07
2,3,4,7,8-PeCDF	0.10	1.86	0.04	1.46	0.03	1.17
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.08	1.55	0.04	1.23	0.02	1.10
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.06	1.49	0.03	0.81	0.02	0.83
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.14	1.91	0.08	1.66	0.04	1.31
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.23	2.52	0.02	0.67	0.02	1.23
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.06	1.07	0.03	0.86	0.02	0.77
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.07	1.35	0.03	1.11	0.02	1.03
OCDF	0.03	0.57	0.02	0.72	0.01	0.18
2,3,7,8-TeCDD	0.02	1.34	0.03	0.83	0.01	0.59
1,2,3,7,8-PeCDD	0.04	1.49	0.04	1.21	0.02	0.93
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.04	1.44	0.05	1.30	0.03	1.09
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.05	2.46	0.04	1.48	0.02	1.51
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.05	2.21	0.05	1.51	0.03	1.53
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.06	1.66	0.03	0.88	0.02	1.03
OCDD	0.04	1.14	0.03	0.80	0.02	0.19
BAFs(以 ng /kg 計)	0.04	1.00	0.02	0.78	0.02	0.23
BAFs(以 ng I-TEQ/kg 計)	0.05	1.21	0.03	0.86	0.02	0.57

四、結論

本研究結果顯示在低濃度的 PCDD/Fs(約為 12100 ng I-TEQ/kg)下，大花咸豐草、海雀稗及白竹仔菜的生長未受 PCDD/Fs 毒性影響，植株高度皆能迅速增長；高濃度的 PCDD/Fs 對於植物高度則產生明顯的抑制現象，植株會有葉面黃化、萎凋的情形。三種植物體的 PCDD/Fs 濃度分析結果顯示，地上部的 PCDD/Fs 濃度偏低，PCDD/Fs 並無法傳送至地上部，PCDD/Fs 多集中於根部；吸收濃度以大花咸豐草根所吸收的 PCDD/Fs 濃度最高，尤其根部 BAFs 值可達 1.21。因此，可藉由大花咸豐草根吸收 PCDD/Fs，產生富集的效果；同時大花咸豐草具有環境適應力強與生長快速等特點，可大量栽種在環境較為惡劣的污染場址，於土壤表層形成廣大得綠色植被，減少表土的逸散與污染物的擴散，達到植物穩定化(Phytostabilization)的目的，進而降低污染區域的環境風險。



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. Cunningham, S.D. and Ow, D.W., "Promises and prospects of phytoremediation," Plant Physiology, Vol. 110, pp.715-719, 1996.
4. 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.
5. Gerhardt, K.E., Huang, X.D., Glick, B.R., Greenber, B.M., "Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potencial and challenges," Plant Science, Vol. 176, pp. 20-30, 2009.
6. Jadia, C.D. and Fulekar, M.H., "Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques," Journal of Biotechnology, Vol. 8, No. 6, pp. 921-928, 2009.
7. EPA, "Introduction to Phytoremediation," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-99/107, 2000.
8. 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.
9. 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.
10. 何豔、徐建民、汪海珍、吳愉萍、陳菁菁，「五氯酚（PCP）污染土壤模擬根際的修復」，中國環境科學，第25卷，第5期，pp. 602-606，2005。
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 張志良、瞿偉菁，植物分理學實驗，藝軒，2009。



16. McConnell E., Huff J., Hejtmancik, M., Peter, A., Persing R., "Toxicology and carcinogenesis studies of two grades of pentachlorophenol in B6C3F1 mice," *Fundamental and Applied Toxicology*, Vol. 17, 519-532, 1991.
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. Jou, J.J., Chung, J.C., Weng, Y. M. , Liaw, S.L., Wang, M.K., " Identification of dioxin and dioxin-like polychlorbiphenyls in plant tissues and contaminated soils," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 149, pp. 174-179, 2007.
20. Moklyachuk, L., Gorodiska, I., Slobodenyuk, O., and V. Petryshyna, "Phytoremediation of Soil Polluted with Obsolete Pesticides in Ukraine," *Environmental Security*, 2010, pp. 113-124, 2010.
21. Lunney, A., B. Zeeb, and Reimer K., "Uptake of Weathered DDT in Vascular Plants: Potential for Phytoremediation," *Environmental Science and Technology*, Vol. 38, No. 22, pp. 6147-6154, 2004.
22. White, J. C., T, Zakia, D. P., Mehmet, I., Martin, P. N., William, I. B., Brian, D. E., Mary, J. I., "Uptake of weathered p,p'-DDE by plant species effective at accumulating soil elements," *Microchemical Journal*, Vol. 81, Issue 1, pp. 148-155, 2005.

