

以布袋蓮累積移除二重疏洪區沼澤濕地 重金屬之研究

Using Water Hyacinth to Phytoaccumulate the Heavy Metals in Erh-Chung Flooding Plain

大仁技術學院環境工程衛生學系講師

台灣大學農業工程學系教授

廖 少 威

張 文 亮

Shao-Wei Liao

Wen-Liang Chang

摘 要

運用濕地植物光合淨化功能 (Phytoremediation) 以吸收微量元素已成功運用於自然或人工濕地。本研究以浮水性植物布袋蓮 (*Eichhornia crassipes*) 為例, 說明其對五種微量元素: 鎘、鉛、銅、鋅、鎳; 於莖葉部及根部兩不同部位在田間的累積吸收情形。比較出五種重金屬在布袋蓮組織內之移動能力 (translocation ability), 發現其移動能力為鋅 > 鎳 > 鎘 > 鉛 > 銅。又布袋蓮對不同微量元素, 當外部環境含低濃度微量元素時生物濃縮效應達最高, 而後隨外部含量的增加而減少。生物濃縮因子於水域環境: 銅 (2864) > 鉛 (2245) > 鋅 (1328) > 鎘 (1027) > 鎳 (611); 於底泥環境除銅外濃縮效應都不好。布袋蓮根部組織累積微量元素之量遠高於莖葉部之量, 平均約為莖葉部的 3~15 倍左右。根部組織累積微量元素高低依次為銅 > 鋅 > 鎳 > 鉛 > 鎘。布袋蓮對銅、鉛、鋅、鎘可說是一良好的植物淨化體。並估算出二重疏洪區沼澤濕地每公頃布袋蓮可去除之微量元素量為: 鎘 0.24kg、鉛 5.42kg、銅 21.62kg、鋅 26.17kg、鎳 13.46kg。

關鍵詞: 布袋蓮, 濕地, 鎘, 鉛, 銅, 鋅, 鎳, 生物濃縮因子, 移動能力。

ABSTRACT

Wetland plants have proven effective for the phytoremediation of trace elements in natural and constructed wetlands. This study demonstrates the potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), an aquatic floating plant, for the phytoremediation of five trace elements Cd, Pb, Cu, Zn, and Ni. The ability of water hyacinth to take up and translocate in roots and in shoots with five trace elements was studied by field sampling.

Translocation abilities of these five elements can be expressed by the root/shoot ratio of element concentration, and they are in the order of $Zn > Ni \approx Cd > Pb > Cu$. Water hyacinth had high trace element bioconcentration factors when supplied with low external concentrations of all five elements, results shows that $Cu (2864) > Pb (2245) > Zn (1328) > Cd (1027) > Ni (611)$ in aquatic environment, and in sediment environment except copper the bioconcentration factor was low. Generally the element contents in root tissue were 3~15 times higher than those in the shoots. The accumulation of root tissue were in the order of $Cu > Zn > Ni > Pb > Cd$. We conclude that water hyacinth is a promising candidate for phytoremediation of wastewater polluted by Cu, Pb, Zn, and Cd. After calculation, we found the absorption rate in natural wetlands were 0.24 kg/ha in Cadmium, 5.42 kg/ha in Lead, 21.62 kg/ha in Copper, 26.17 kg/ha in Zinc, and 13.46 kg/ha in Nickel.

Keywords: Water hyacinth, Wetland, Cadmium, Lead, Copper, Zinc, Nickel, Bioconcentration factor, Translocation ability.

一、前言

台灣的濕地多屬河口型濕地，因地勢較低窪多數的入流水源會將污染質帶入濕地當中，而在濕地中累聚。Mitsch. (1993)曾稱濕地為「大地之腎」，意即濕地可以將化學物質滯留於其中，經分解淨化、而後排出。不論是天然濕地或是人工濕地，對於流經其間的生化需氧量（BOD）、營養源、金屬無機鹽類及有機物質等污染質都有很好的減除效果（Kadlec and Kadlec, 1979）。但是一旦長時間流入之化學污染物質超過濕地的環境承載力，則濕地淨化的作用不但減低，同時亦會對環境造成劣化。二重疏洪區沼澤濕地因承受臨近五股工業區及五股、新莊零星工廠之排放廢水、附近任意傾棄掩埋場之垃圾滲出水及臨近行政轄區之生活污水⁽¹⁾，致造成嚴重污染。

近年來利用植物累積吸收移除污染質以改善濕地環境品質，是一新的環境污染整治技術。直到最近才瞭解到植物具有累積、吸收、移除重金屬的環境復育價值（Black, 1995; Cunningham et al., 1996）。部份植物具有吸收及超累積微量元素於其組織體內能力，對於受污染的土壤及水域環境，利用此能力以移除有毒重金屬及微量元

素，此種處理方法稱植物淨化處理方法（Phytoremediation process）。其主要原理乃對含微量元素的廢污水藉由植物體根部、莖葉部組織的累積可有效率的過濾累積吸收移除。

最近一、二十年，部份陸生植物已被證實對一些有毒微量元素具有高效率累積吸收功能，且已被應用於對受污染土壤的復育整治（Baker et al., 1994）。然對濕地裏佔優勢性之浮水性植物物種其淨化復育能力亦有討論。例如浮萍（*Lemna minor* L.）及滿江紅（*Azolla pinnata* R. Br）經證實在廢污水裏對鐵及銅有高達 78 倍的生物濃縮效應（Jain et al., 1989）。Pinto et al., (1987)也認為布袋蓮對含銀的工業廢水可在極短時間內給予有效率的移除及復育。存在於濕地的不同植物物種，布袋蓮（*Eichhornia crassipes*）、天胡荽（*Hydrocotyle umbellata*）、青萍（*Lemna minor*）、滿江紅（*Azolla pinnata*）等濕地植物，也於近年被熱絡的討論其對重金屬如：鎳、鋅、鐵、鈷、鉻、鉛、銅、鎘之累積吸收情形（Larsen and Schierup, 1981; Dunbabin and Bowmer, 1992; Salt et al., 1995; Zaranyika and Ndapwadza, 1995; Zhu et al., 1999）。布袋蓮在廢污水處理上已成功的用來淨化水中有機及無機營養源（Brix, 1993; Delgado et al., 1995）。布袋蓮亦可用來降低磷酸廢水的重金屬及

提供作為生物指標，它被證實可累積微量元素如：銀、鉛、鎘等(Pinto et al., 1987; Delgado et al., 1993; Fett et al., 1994; Zaranyika and Ndap-wadza, 1995)。此外植物體累積微量元素的量與水質濃度具有高度相關(Ismail et al., 1996)。

適當的選擇濕地植物物種可大大的提昇植物移除微量元素的功能，而適當物種的選擇乃基於對當地水文、水理、氣候環境條件、土壤理化性質及物種對移除物質的累積吸收能力而定。基於上述理由，不同的濕地植物在不同環境條件下對微量元素的累積吸收及移轉能力知識的瞭解是很重要的。本研究選擇布袋蓮（*Water Hyacinth*）植物物種乃是基於其在本調查區域是優勢物種；又其為多年生浮水性植物，根系發達綿密，可說是世界上生產量最多的水生植物體之一，生長快速且適合於不同之水質條件。如此性質使其成為可藉植物體組織過濾及累積吸收廢污水中有毒微量元素最好的植物物種之一。因為廣佈於環境及對動物、人類毒性的影響，選定排入二重疏洪道常見的五種微量元素：鎘、鉛、銅、鋅、鎳五元素，討論布袋蓮對此些微量元素累積吸收移除能力之適宜性比較。

然而一般研究布袋蓮在濕地對於重金屬的移除大都說調查區域為一均勻狀況。故本研究主要目的乃在瞭解布袋蓮於天然沼澤濕地對微量元素的累積吸收能力。希望能找出布袋蓮對何種微量元素累積吸收能力最強，及瞭解田間單位面積所能移除微量元素之量化數據。若確屬可行的話，則廣為種植以清除並解決長久以來的重金屬污染問題。

二、研究調查區域

二重疏洪區沼澤濕地位於大台北都會區人口密集、工廠林立的盆地中央，約在經度從 121° 25'30"~121° 27'00"緯度從 25° 04'30"~25° 06'00"間。緊臨三重市、新莊市、五股鄉、蘆洲鄉、泰山鄉近百萬的人口，龐大的都市污水、來自五股新莊的工業區與其它零星工廠之工業廢水及任意傾棄掩埋場之垃圾滲出水等，對本區造成嚴重的污染。整個生態沼澤棲地面積約 320 公頃，範

圍北處淡水河與基隆河匯流處，南至中山高速公路南側之五股濕地，西隔防河堤與五股鄉，南與新莊市為界，東至防河堤而與蘆洲鄉、三重市為界。本棲地環境平日匯流至棲地內的水難以排出，僅靠潮汐作用帶走表面部份的污水，因此沼澤區的水體大多呈靜止狀態，使區內水質日益惡化。主要水系為塹子圳及五股蘆洲淹灌區，且淹灌區已有嚴重淤積的現象。淹灌區的主要水源是來自中港大排與二重疏洪道，匯集新莊、三重、五股地方之工業廢水，都市污水與垃圾滲出水仍不斷進入調查區域，水呈污黑時有油膜漂浮其上，在塹子圳約有 60%-70%的自由水面為布袋蓮所覆蓋。

三、試驗與研究

調查區域以五股淹灌區與塹子圳為主，採樣時間有二次，第一次是在民國 87 年 2 月 12 日漲潮時採集，採樣點 1、2、3、4、5、6 的位置在五股淹灌區處。第二次是在同年 3 月 14 日退潮時採集，沿淹灌區與塹子圳之交接處直到塹子圳河口，採樣點編號為 7、8、9、10、11、12、13、14。每個樣點分別採集水樣、底泥及漂浮水面上之布袋蓮植物體，總計有 14 個樣點，採樣位置如圖 1。將水樣與土樣攜回實驗室後，用 0.1N HCl 酸化後，以原子吸收光譜儀（GBC 908 FLAME AAS）依標準方法測定五種重金屬銅、鎘、鎳、鉛、鋅之含量。

採集的植物體用清水徹底洗淨附著其上的污物，經瀝乾秤重後，置於 120 °C 烘箱經 12 小時烘乾，秤其乾重後磨碎混勻。秤取乾燥的植物組織地上部 0.5 克或根部組織 0.1 克，放入長 30 公分直徑 2.5 公分的試管中，加入 10 ml 69 %濃硝酸，使用消化加熱爐於 80 °C 加熱，此時會有大量紅棕色二氧化氮氣體產生，30 分鐘後調至 120 °C 約 1 小時，到植物組織可完全被分解。於冷卻後加 5 ml 70 %濃過氯酸於 150 °C 加熱直到溶液變為澄清。以上步驟皆須於通風櫥中進行。冷卻後經消化後的溶液用 Whatman #1 濾紙過濾，用兩次水補滿至 15 ml，再以原子吸收光譜儀測重金屬含量。

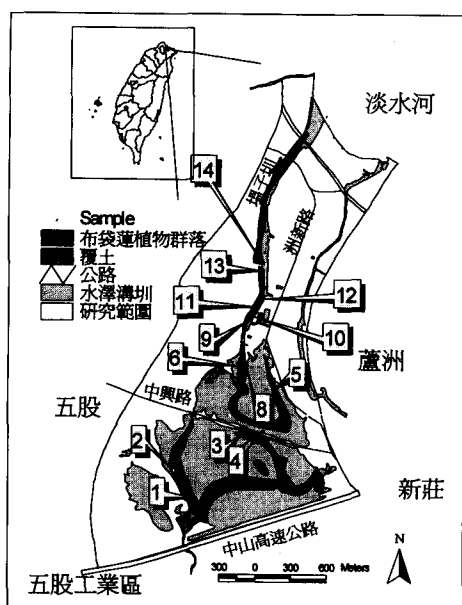


圖 1 二重疏洪區採樣點位置圖

生物濃縮因子(BCF: Bioconcentration factor)為微量元素存在於採樣植物體內含量與微量元素在水域或底泥外部環境含量之比值。計算式如下：

$$BCF = \left(\frac{P}{E} \right)_i$$

式中 i：該微量元素物質

BCF：生物濃縮因子，無因次單位

P：微量元素存在於布袋蓮體內含量
(mg/kg-dw；dw 為植物體乾重)

E：微量元素在外部環境（水體或底泥）含量（mg/l 或 mg/kg）

如：鎘的 BCF_{w,ps}（布袋蓮地上部組織於水域環境的生物濃縮因子）為布袋蓮地上部組織累積鎘的量與該點水域環境含鎘濃度之比。鎘的 BCF_{w,pr}（布袋蓮根部組織於水域環境的生物濃縮因子）為布袋蓮根部組織累積鎘的量與該點水域環境含鎘濃度之比。假設田間水的比重為 1，則 BCF 係一無因次單位。可當成是植物體累積微量元素相對於微量元素在基質濃度的指標。移動能力（translocation ability）為微量元素於植物

體根部及地上部累積量之比值。計算式如下：

$$Trans = \left(\frac{A_r}{A_s} \right)_i$$

式中 i：該微量元素物質

Trans：微量元素在布袋蓮體內之移動能力
(無因次單位)

A_r：微量元素於布袋蓮根部組織之累積量
(mg/kg-dw；dw 為植物體乾重)

A_s：微量元素於布袋蓮莖葉部組織之累積量
(mg/kg-dw；dw 為植物體乾重)

比值愈大表微量元素於布袋蓮組織移動能力愈差，亦為一無因次單位，其值依不同的微量元素及外部環境含量不同而有差異。

四、結果與討論

由田間試驗結果所作出之相關矩陣如表 1 可看出：以水域環境而言，水域含鎘濃度與布袋蓮地上部累積量呈負相關，即隨外部水域含鎘濃度的增加，微量元素在植物體地上部組織累積吸收量有緩緩減少的趨勢。當水域鎘含量為 0.05 mg/l 時，於布袋蓮地上部累積量達最低值 0.68 mg/kg-dw；而根部組織累積吸收量則隨外部水域含鎘濃度增加而增加的趨勢，當外部水域含鎘量達最高 0.06 mg/l 時，於根部累積達最大值為 10.05 mg/kg-dw，如圖 2。微量元素在濃度極低情況下，對植物能產生荷爾蒙之刺激作用而使植物生長狀況改善，但濃度稍高便會產生毒害（張文亮，1979）（楊友信，1980）。從底泥環境來看，布袋蓮地上部組織含鎘量隨外部底泥含量增加而增加的趨勢，當底泥含量達 0.27mg/kg 時，地上部累積量可達最大值 2.06 mg/kg-dw，如圖 4，至於底泥含鎘量與布袋蓮根部累積量相關性則不高。鎘在布袋蓮根部累積吸收量約為地上部組織的 2~11 倍。對於生物濃縮因子(BCF)，由表 1 可看出在水域環境中鎘的含量與布袋蓮生物濃縮因子於地上部及根部均呈現很明顯的負相關，其最大值均發生在低濃度為 0.01mg/l 時，個別值為 1301 及 3418；且在濃度 0.01~0.04 mg/l 時其地上部及根部 BCF 均下降的很快，如圖 3。

表 1 不同外域環境微量元素與其累積於植物組織體內含量及生物濃縮因子間之相關矩陣

		Cd,w	Cd,s	Cd,ps	Cd,pr	BCF,w,ps	BCF,s,ps	BCF,w,pr	BCF,s,pr
Cd	Cd,w	1.00							
	Cd,s	(0.47)	1.00						
	Cd,ps	(0.55)	0.63	1.00					
	Cd,pr	0.35	(0.13)	0.24	1.00				
	BCF,w,ps	(0.62)	0.51	0.52	(0.37)	1.00			
	BCF,s,ps	0.07	(0.71)	0.01	0.36	(0.19)	1.00		
	BCF,w,pr	(0.73)	0.65	0.64	(0.17)	0.88	(0.20)	1.00	
	BCF,s,pr	0.53	(0.76)	(0.32)	0.69	(0.51)	0.76	(0.47)	1.00
		Cu,w	Cu,s	Cu,ps	Cu,pr	BCF,w,ps	BCF,s,ps	BCF,w,pr	BCF,s,pr
Cu	Cu,w	1.00							
	Cu,s	0.67	1.00						
	Cu,ps	0.66	0.51	1.00					
	Cu,pr	0.06	0.06	0.69	1.00				
	BCF,w,ps	(0.51)	(0.29)	0.30	0.71	1.00			
	BCF,s,ps	(0.22)	(0.37)	0.25	0.77	0.56	1.00		
	BCF,w,pr	(0.51)	(0.32)	0.23	0.81	0.92	0.77	1.00	
	BCF,s,pr	(0.24)	(0.31)	0.23	0.78	0.57	0.98	0.79	1.00
		Ni,w	Ni,s	Ni,ps	Ni,pr	BCF,w,ps	BCF,s,ps	BCF,w,pr	BCF,s,pr
Ni	Ni,w	1.00							
	Ni,s	(0.08)	1.00						
	Ni,ps	(0.39)	(0.25)	1.00					
	Ni,pr	0.33	0.07	0.14	1.00				
	BCF,w,ps	(0.69)	(0.32)	0.81	(0.20)	1.00			
	BCF,s,ps	(0.27)	(0.49)	0.89	(0.03)	0.77	1.00		
	BCF,w,pr	(0.78)	(0.28)	0.69	(0.22)	0.97	0.64	1.00	
	BCF,s,pr	0.10	(0.62)	0.61	0.11	0.40	0.85	0.29	1.00
		Pb,w	Pb,s	Pb,ps	Pb,pr	BCF,w,ps	BCF,s,ps	BCF,w,pr	BCF,s,pr
Pb	Pb,w	1.00							
	Pb,s	0.08	1.00						
	Pb,ps	0.71	0.13	1.00					
	Pb,pr	0.10	(0.02)	(0.02)	1.00				
	BCF,w,ps	(0.77)	(0.01)	(0.27)	(0.42)	1.00			
	BCF,s,ps	0.15	(0.69)	0.46	(0.16)	0.05	1.00		
	BCF,w,pr	(0.86)	0.01	(0.48)	(0.06)	0.87	(0.19)	1.00	
	BCF,s,pr	(0.12)	(0.76)	(0.16)	0.53	(0.15)	0.56	0.01	1.00
		Zn,w	Zn,s	Zn,ps	Zn,pr	BCF,w,ps	BCF,s,ps	BCF,w,pr	BCF,s,pr
Zn	Zn,w	1.00							
	Zn,s	(0.06)	1.00						
	Zn,ps	0.32	0.51	1.00					
	Zn,pr	0.28	0.23	0.57	1.00				
	BCF,w,ps	(0.34)	0.58	0.70	0.35	1.00			
	BCF,s,ps	0.43	(0.42)	0.44	0.31	0.15	1.00		
	BCF,w,pr	(0.76)	0.00	(0.21)	0.27	0.39	(0.21)	1.00	
	BCF,s,pr	0.49	(0.67)	(0.10)	0.24	(0.29)	0.73	(0.09)	1.00

附註：各符號意義說明如下【Cd,w：水域環境之鎘含量；Cd,s：底泥環境之鎘含量；Cd,ps：布袋蓮莖葉部組織鎘累積量；Cd,pr：布袋蓮根部組織鎘累積量；BCF,w,ps：布袋蓮莖葉部組織於水域環境的生物濃縮因子；BCF,s,ps：布袋蓮莖葉部組織於底泥環境的生物濃縮因子；BCF,w,pr：布袋蓮根部組織於水域環境的生物濃縮因子；BCF,s,pr：布袋蓮根部組織於底泥環境的生物濃縮因子；()：括號內表負相關；(L) (R)：表看左右軸座標讀值。其它重金屬意義依此類推。內文中各因子單位於水環境中含鎘量為 mg/l，底泥含鎘量為 mg/kg，植物組織（乾重）含鎘量為 mg/kg-dw，生物濃縮因子（BCF）為無因次單位。】

從底泥環境來看鎘的含量與地上部及根部 BCF 值亦呈現很大的負相關，最大值發生在底泥鎘含量 0.09 mg/kg 時地上部 BCF 為 11.11 及底泥鎘含量 0.1mg/kg 時根部 BCF 為 78.28，如圖 5。相較於其它微量元素鎘在布袋蓮地上部及根部生物濃縮效應是最低的。

對於銅物質來講，底泥銅含量隨水域銅含量呈鋸齒狀的正相關，即水域環境銅含量愈高則沉降蓄積於底泥的銅含量愈高，當水域含銅量達最高 0.43 mg/l 時底泥含銅量亦達最高 25.84 mg/kg。從水域環境來看，水域含銅量與布袋蓮地上部累積量呈正相關，當水域含銅量 0.43 mg/l 時有最大累積量 61.31 mg/kg-dw。且相較於其它微量元素，水域環境含銅於低濃度 0.18 mg/l 時，布袋蓮根部累積量達最高值 1110 mg/kg-dw，明顯的布袋蓮根部組織對於銅之累積吸收量高於其它微量元素，如圖 6。有別於其它微量元素的是，外部環境含銅量與植物體地上部及根部 BCF 均呈負相關，水域環境含銅量較小 0.17mg/l、0.18 mg/l 時，於地上部及根部 BCF 達最高值分別為 270 及 6166，地上部 BCF 曲線跌落較緩，不同於其它微量元素的跌落較大，如圖 7。銅在布袋蓮根部的累積吸收量約為地上部的 7~24 倍。從底泥環境含銅量來看，與地上部累積量呈正相關而與根部累積量相關性則不高。當底泥含銅量最高 25.84mg/kg 及最低 0.04mg/kg 時，其於地上部及根部累積量分別達到最高 61.31 mg/kg-dw 及 1110 mg/kg-dw，如圖 8。與布袋蓮地上部及根部 BCF 則呈負相關，當濃度最低 0.04 mg/kg 時其地上部及根部 BCF 達最大值為 1147 及 27745，高於其它微量元素，如圖 9。於底泥環境來看，布袋蓮根部對於銅有很好的生物濃縮效應，其地上部則僅有在低濃度時有好的植物吸收淨化效果。

水域環境含鎳量與地上部累積量呈負相關而與根部累積量呈正相關。當外部水域含鎳量 0.16mg/l 時於地上部累積量達最高 216 mg/kg-dw。水域環境含鎳量大於鋅，然布袋蓮地上部對鎳的累積吸收量卻是次於鋅的。當含鎳量 3.13 mg/l 時根部累積量達最高 529 mg/kg-dw，如圖

10。與地上部及根部 BCF 值呈高度負相關，當外部水域於低濃度 0.16 mg/l 時地上部及根部之 BCF 可達最高值分別為 1369 及 2120，見圖 11。由底泥環境來看，外部底泥含鎳量增加則根部累積吸收量亦呈鋸齒狀增加，而與布袋蓮地上部累積吸收量呈負相關，如圖 12。底泥含鎳量與地上部及根部之 BCF 值均呈高度負相關，如圖 13。底泥含鎳量很高僅次於鋅，布袋蓮地上部累積吸收量亦僅次於鋅。然布袋蓮地上部及根部組織之 BCF 值則很小，僅略大於鋅。故以鎳來講布袋蓮並不是很好的植物淨化體。

鉛在水域環境含量與布袋蓮於根部的累積量相關性並不大，但與鎘不同的是鉛與地上部組織累積量有很高的正相關，如表 1。當水中含鉛量達最高 0.29 mg/l 時，地上部累積量可達最大值 33.34 mg/kg-dw。鉛在植物體根部累積量約為地上部的 4~16 倍，如圖 14。水域含鉛量與地上部及根部 BCF 均呈高度的負相關。即隨水域含鉛量的增加而減少，最大值發生在鉛含量最低 0.03mg/l 時，地上部 BCF 為 555，及根部 BCF 的 4333，如圖 15。以根部組織之生物濃縮效應來看，布袋蓮是一良好的累積吸收體。若從底泥環境來看，含鉛量與布袋蓮地上部及根部累積量相關性並不高，如圖 16；但與地上部及根部之 BCF 則呈現高度的負相關，最大值發生在底泥濃度 0.14 mg/kg 時地上部 BCF 為 147 及底泥濃度 0.22 mg/kg 時根部 BCF 為 979，如圖 17。單純由底泥含鉛量對布袋蓮生物濃縮效應來看，布袋蓮對於鉛的生物濃縮效應並不好。

水域環境含鋅量對布袋蓮於地上部及根部組織之累積量呈正相關，當外部水域濃度達 0.87 mg/l 時於地上部有最大累積量 474 mg/kg-dw，布袋蓮地上部組織對鋅的累積吸收量遠大於對其它微量元素的累積吸收量，如圖 18。而根部組織對鋅的累積吸收量，約為地上部累積吸收量的 1.5~5 倍。在本研究裏布袋蓮根部組織對鋅的累積吸收量是僅次於銅的。水域含鋅量與地上部及根部 BCF 均呈現負相關，當濃度升高到 0.87~1.62 mg/kg 時其 BCF 跌落的很快。含鋅量達最高 1.62 mg/l 時其地上部及根部 BCF 分別達最低為

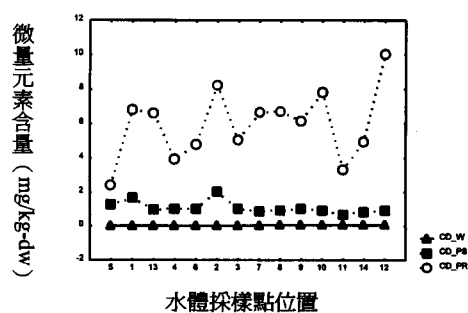


圖 2 鎘在植物組織體內累積含量圖

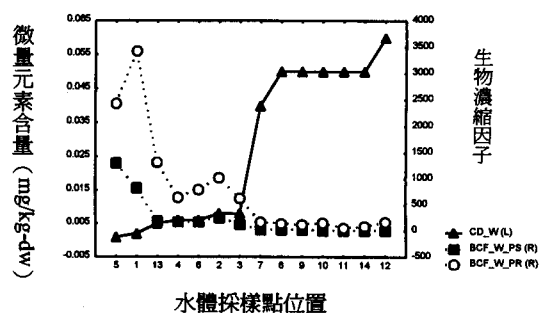


圖 3 鎘累積量及生物濃縮效應關係圖

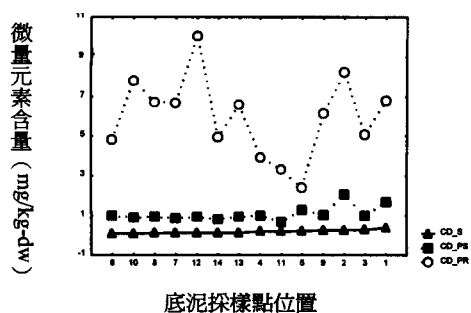


圖 4 鎘在植物組織體內累積含量圖

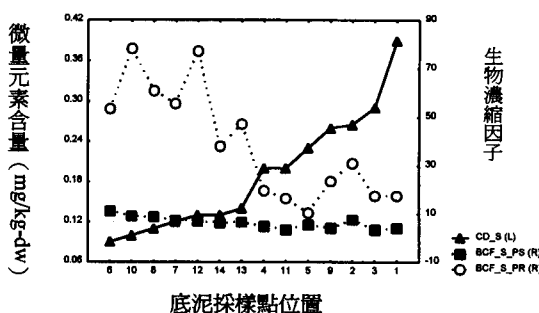


圖 5 鎘累積量及生物濃縮效應關係圖

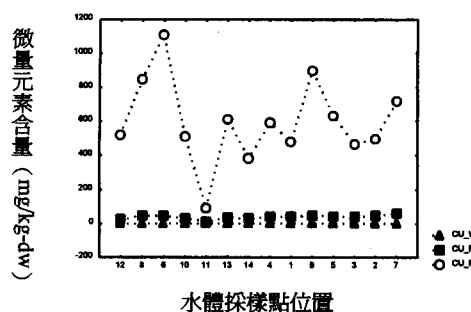


圖 6 銅在植物組織體內累積含量圖

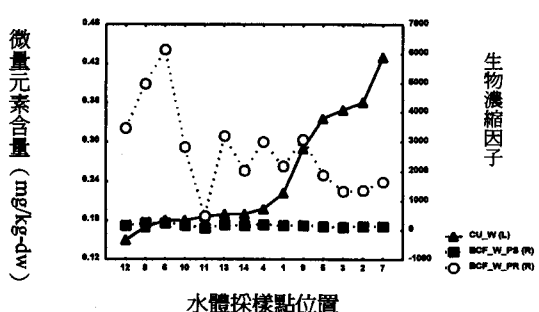


圖 7 銅累積量及生物濃縮效應關係圖

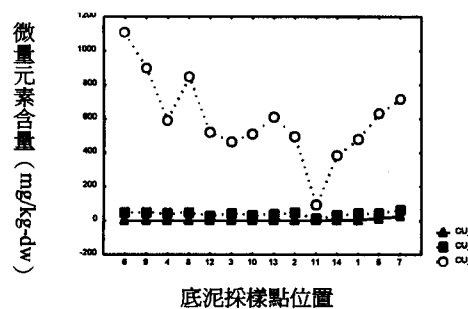


圖 8 銅在植物組織體內累積含量圖

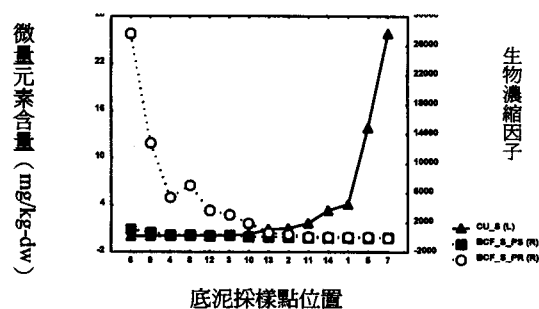


圖 9 銅累積量及生物濃縮效應關係圖

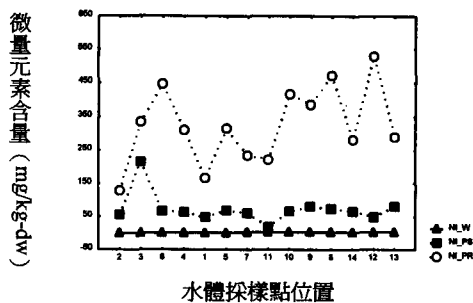


圖 10 鎳在植物組織體內累積含量圖

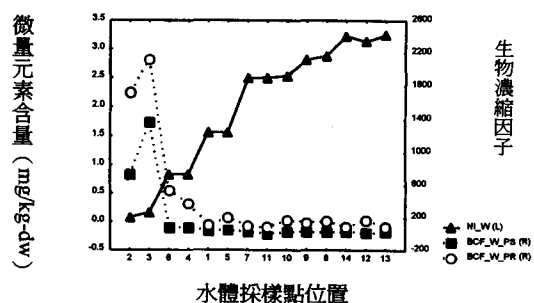


圖 11 鎳累積量及生物濃縮效應關係圖

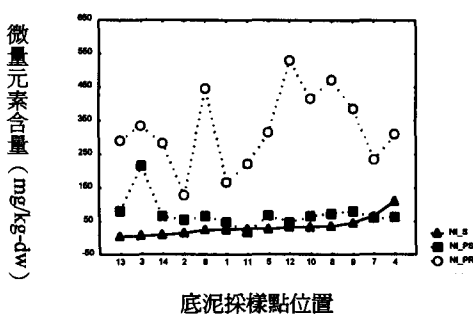


圖 12 鎳在植物組織體內累積含量圖

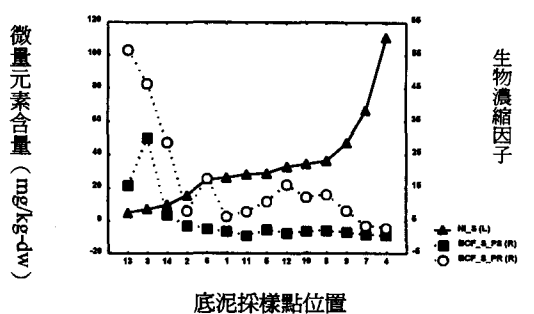


圖 13 鎳累積量及生物濃縮效應關係圖

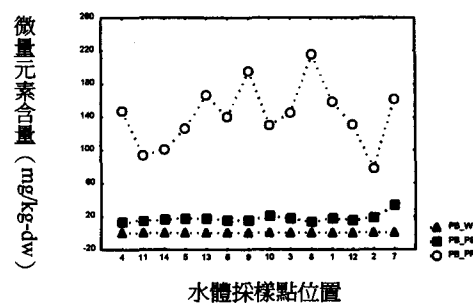


圖 14 鉛在植物組織體內累積含量圖

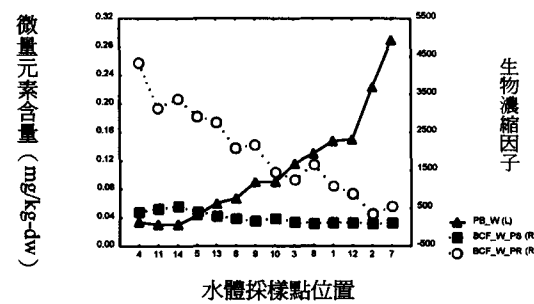


圖 15 鉛累積量及生物濃縮效應關係圖

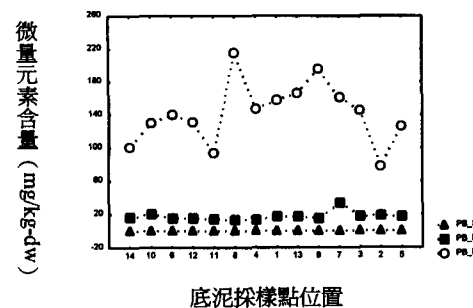


圖 16 鉛在植物組織體內累積含量圖

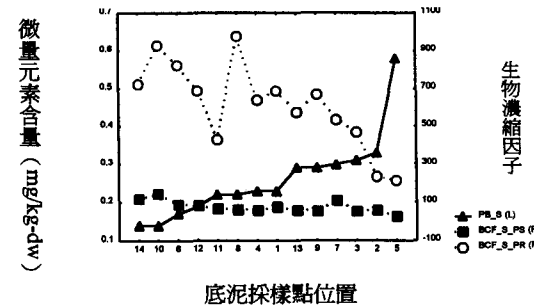


圖 17 鉛累積量及生物濃縮效應關係圖

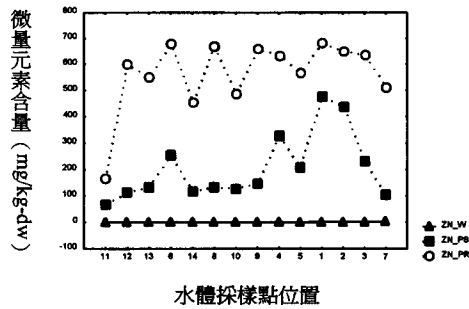


圖 18 鋅在植物組織體內累積含量圖

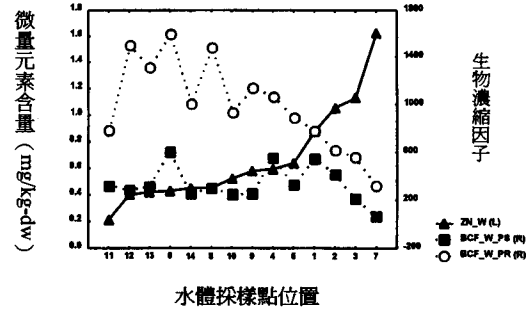


圖 19 鋅累積量及生物濃縮效應關係圖

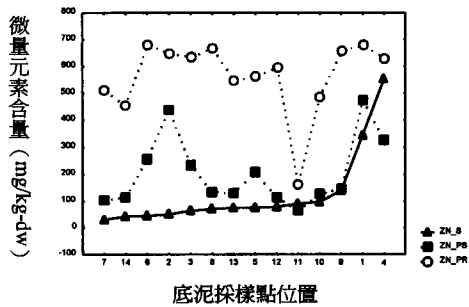


圖 20 鋅在植物組織體內累積含量圖

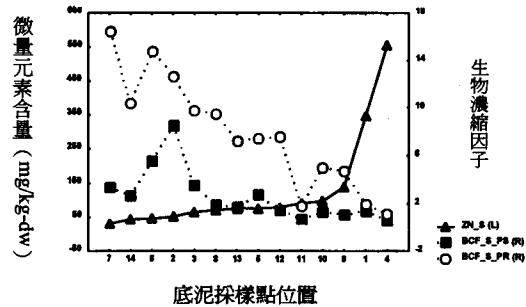


圖 21 鋅累積量及生物濃縮效應關係圖

64 及 316，如圖 19。以地上部之生物濃縮效應來看，布袋蓮對於鋅不是很好的自然淨化植物體。從底泥環境含鋅量來看，與地上部及根部累積量亦呈正相關。底泥累積鋅的量遠高於其它微量元素，相對使得布袋蓮地上部及根部累積吸收量高於其它元素。而底泥含鋅量與植物體地上部及根部 BCF 值呈現負相關，如圖 20；其於植物體地上部及根部之 BCF 為最低的，可能係底泥含鋅量相對較高所致。當底泥含鋅量最低 31.39 mg/kg 時於根部 BCF 有最大值 16.39，而鋅含量達最高 554.75 mg/kg 時，於地上部及根部 BCF 值為最小，如圖 21。

由以上圖示可看出，鎘、銅、鎳、鉛、鋅於外部環境濃度含量低時有較大的 BCF 值，當外部環境微量元素濃度增加時，BCF 於地上部及根部均呈鋸齒狀的跌落。BCF 值為考慮以植物淨化移除污染質時是很重要的因子之一。慎選移除對象物質之植物物種，用以處理大量低濃度廢污水，相較於傳統處理方法應更是有效且經濟的方法。不同植物物種對微量元素的累積吸收能力不

同，目前對於田間或自然濕地，利用植物累積吸收以淨化移除污染質之研究議題很是熱絡。然對特定微量元素到底採何種植物物種所得之累積吸收效果是最好的，則並未十分的明瞭，因其中牽涉到不同因子之考量，如遷涉到不同環境之水文、水理、氣候環境、土壤理化性質、污染質特性及人文社會環境條件等等之差異都會造成影響。根據 (Zayed et al., 1998) 試驗設計研究，好的植物累積吸收體必需考慮兩主要因子，即 (1) $BCF > 1000$ (2) 對微量元素的吸收能力大於 5000 mg/kg-dw。

基於此一規範，當水域環境含低濃度微量元素時，布袋蓮根部組織是一好的累積吸收體。對於地上部 BCF 僅鎘於低濃度時有達到規範標準，其餘均偏低。對於水域環境於低濃度含銅量 0.18 mg/l 時，根部 BCF 高達 6165，不同於實驗設計條件下鎘在布袋蓮的累積能力最好 (Zhu et al, 1999)。本研究不論於水域或底泥環境，鎘累積於布袋蓮的量均低於其它各微量元素的累積量，且布袋蓮植物體根部累積吸收微量元素的量

均遠大於累積於地上部的量。水域環境布袋蓮地上部組織累積量高低依次為鋅>鎳>銅>鉛>鎘，根部組織累積量高低依次為銅>鋅>鎳>鉛>鎘。當底泥環境含低濃度微量元素時，布袋蓮地上部及根部對銅物質之生物濃縮效應最大。底泥含銅量 0.04 mg/kg 時，地上部及根部 BCF 分別為 1147 及 27745，至於其它微量元素 BCF 值則低於 1000，故布袋蓮對於銅污染質之移除能力較好。BCF 值跌降最大的是銅於底泥環境根部 BCF 由 27745 降至 28，而跌降最緩的是鋅於底泥環境地上部 BCF 由 8.47 降至 0.59。微量元素除銅物質於部份樣點外，布袋蓮於水域環境之 BCF 值均大於於底泥環境之 BCF 值，且這些微量元素在根部的累積量是地上部累積量的 10~20 倍。即存在於水域環境之微量元素較易為布袋蓮根部組織所累積吸收。

綜合以上關係圖可看出不同水域或底泥環境，微量元素於布袋蓮地上部及根部之累積曲線很相似。且 BCF 圖除銅物質於水域環境植物體地上部曲線較平緩外，其餘均隨外部環境微量元素含量增加而呈鋸齒狀跌降的趨勢。從水域環境來看，當外部濃度突增時可看出於根部及地上部之 BCF 值亦呈驟降的趨勢，較明顯的趨勢如圖 3 鎘由 0.01 mg/l 上升至 0.04 mg/l 其地上部及根部 BCF 值分別從 257 降至 21.8 及 1028 降至 167；圖 11 鎳於 0.16 mg/l 上升至 1.56 mg/l 其於地上部及根部 BCF 值分別從 1369 降至 31 及 2120 降至 107；圖 15 鉛於 0.03 mg/l 上升至 0.22 mg/l 其於地上部及根部 BCF 值分別是由 555 降至 83 及 4333 降至 350；圖 19 鋅於 0.87 mg/l 上升至 1.62 mg/l 其於地上部及根部 BCF 值分別是由 544 降至 64 及 780 降至 316，至於銅則較為平緩。故對銅、鉛、鋅、鎘四元素其於布袋蓮組織有高的生物濃縮效應，是不錯的自然淨化植物體，而對鎳物質當外部環境含低濃度量時亦有不錯的污染自淨效果。若於底泥環境來看，外部濃度突增時可看出於根部及地上部 BCF 值亦呈驟降的趨勢，較明顯的趨勢如圖 5 鎘由 0.13 mg/kg 上升至 0.20 mg/kg，其根部 BCF 值為 77 降至 20，於地上部 BCF 下降則較為平緩；圖 9 銅於 0.04 mg/kg

上升至 25.84mg/kg 其地上部及根部 BCF 值分別是從 1147 降至 2 及 27745 降至 28；圖 13 鎳於 5.14 mg/kg 上升至 15.7 mg/kg 其地上部及根部 BCF 值分別是 30 降至 4 及 57 降至 8；圖 17 鉛於 0.3 mg/kg 上升至 0.58 mg/kg 其地上部及根部 BCF 值分別是從 111 降至 29 及 537 降至 217；圖 21 鋅於 76 mg/kg 上升至 555 mg/kg 其地上部及根部 BCF 值分別是從 3 降至 0.6 及 8 降至 1.1。故從底泥環境 BCF 值來看，布袋蓮移除微量元素只有銅尚稱效果不錯，另外於含低濃度鉛時亦有部份效果，其它鎘、鎳、鋅其 BCF 均遠小於 100 效果都屬不佳。可能是布袋蓮係浮水性植物，故從水域環境移除微量元素較從底泥環境移除效果為佳。

五、結論與建議

微量元素累積於布袋蓮根部組織量約為地上部組織累積量的 3~15 倍左右，可見得布袋蓮對重金屬的吸收主要在於根系的吸入。比較五種重金屬在植物組織內之移動能力（translocation ability），發現其移動能力為鋅（ 3.37 ± 1.27 ）>鎳（ 5.44 ± 3.05 ）>鎘（ 5.84 ± 2.27 ）>鉛（ 8.56 ± 3.17 ）>銅（ 14.77 ± 4.56 ）。顯示重金屬由根系所吸收後，可能只有約 6~25 % 運送至地上部。布袋蓮根部組織累積吸收微量元素的量隨水域環境含量呈正相關，而地上部組織累積吸收微量元素的量，除鎳外則隨底泥環境含量亦呈正相關。以水域及底泥環境來看布袋蓮地上部的累積量最高依次為鋅>鎳>銅>鉛>鎘，其根部累積量高低依次為銅>鋅>鎳>鉛>鎘。若以底泥環境含量來看，布袋蓮地上部及根部對於微量元素於低濃度時，植物體組織對銅之生物濃縮效應能力最大。

若依 Zayed et al., (1998) 所提出好的植物淨化體必需考慮兩主要因子，然本研究於現地採樣除底泥環境的銅、鋅、鎳外其餘俱為低濃度的環境，不可能達到對微量元素吸收能力大於 5000 mg/kg-dw 的要求。故只考慮 BCF 因子以作為好的植物淨化體選擇的評量標準。結果顯示布袋蓮根系從水域環境來看，鉛、銅、鋅為好的自然淨

化體，而鎘、鎳則於低濃度水域環境下尚稱是不錯的淨化體。由底泥環境來看，除銅於低濃度尚可達標準外，布袋蓮對其餘微量元素來說並不是好的累積吸收體。可能因布袋蓮為浮水性植物，受水域環境影響遠大於受底泥影響，故水域環境生物濃縮效應顯著於底泥環境。各微量元素於不同外部環境，其布袋蓮根部及地上部之 BCF 值均隨外部環境含量呈負相關的趨勢。對於微量元素的累積吸收能力依次為銅>鉛>鋅>鎘>鎳，其中對銅、鉛、鋅、鎘可說是一良好的植物淨化體。

根據 Wooteh & Dodd (1976)估計，在生長季中每平方公尺面積可生長出 64.5 公斤濕重之布袋蓮。依此數值可推算出單位面積所能累積吸收之微量元素的量。各別為鎘 24 mg/m²、鉛 542.02 mg/m²、銅 2162.22 mg/m²、鋅 2617.24 mg/m²、鎳 1345.83 mg/m²。又經現地探勘並應用 ARC/INFO 軟體可估算出本區布袋蓮約佔有 40 公頃面積，則可推算出二重疏洪區沼澤濕地每公頃布袋蓮可去除之微量元素量為：鎘 0.24kg、鉛 5.42kg、銅 21.62kg、鋅 26.17kg、鎳 13.46kg。

針對廣闊的二重疏洪道沼澤濕地作植生淨化復育處理的話，存在長久以來的工業廢水、都市污水及垃圾滲出水等污染問題，一方面要建好污水下水道截流系統，讓污染質不再進入外，且因布袋蓮在二重疏洪道沼澤濕地為優勢物種，可利用其自然淨化能力，將積蓄的污染物吸收移除，至於收割之布袋蓮經瀝除水份後可以焚化處理作能源回收型轉化利用，應為低成本、高效能的可行清除方法。

在密閉系統及控制條件下實驗所得的結果，驗證於田間現況，或因水文氣候因子改變、土壤物理、化學、生物因子等性狀的改變而有加成或拮抗的效果，導致與實驗室控制條件下有相左的結果。然此一結論亦可提供往後實驗設計的更加週詳及嚴謹。

六、謝 誌

本計劃承蒙行政院環境保護署之經費贊助，及台灣大學植物系郭城孟教授、潘素美教授

等之協助，在此一併致上謝意。

七、參考文獻

1. 行政院環保署，1998，二重疏洪道沼澤生態區基本調查與水域環境初步清理及整體規劃「期末報告書」。
2. 張文亮，1979，『布袋蓮生態與水質相關之調查研究』，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
3. 楊友信，1980，『布袋蓮處理重金屬之可行性研究』，國立台灣大學環境工程研究所碩士論文。
4. Baker, A., S.P. McGrath, C.M. Sidoli, and R.D. Reeves. 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resour. Conserv. Recycle* 11:41-49.
5. Black, H. 1995. Absorbing possibilities: Phytoremediation. *Environ. Health Persp.* 103:1106-1108.
6. Brix, B. 1993. Wastewater treatment in constricted wetlands: System design, removal process, and treatment performance. p. 9-22. In G.A. Moahiri (ed.) *Constructed wetlands for water quality improvement*. CRC Press, Boca Raton, FL.
7. Cunningham, S.D., W.R. Berti, and J.W. Huang. 1996. Phytoremediation of contaminated soils. *TIBTECH*. 393-397.
8. Delgado, M., M. Biegeriego, and E. Guardiola. 1993. Uptake of zinc, chromium and cadmium by water hyacinths. *Water Res.* 27: 269-272.
9. Delgado, M., E. Guardiola, and M. Biegeriego. 1995. Organic and inorganic nutrients removal from pig slurry by water hyacinth. *J. Environ. Sci. Health A* 30: 1423-1434.
10. Salt, D. E., M. Blaylock, N. P. B. A. Kumar, V. Dushenkov, I. Chet and I. Raskin. 1995. *Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment*

- using plants. *Bio/technology*. 13: 468-474.
11. Dunbabin, J.S., and K.H. Bowmer. 1992. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *Sci. Total Environ.* 111:151-168.
 12. ESRI, "PC ARC/INFO", 1997. Environmental Systems Research Institute version 3.5.1D, Redlands, CA.
 13. Fett, J.P., J. Cambraia, M.A. Oliva, and C.P. Jordao. 1994. Absorption and distribution of Cd in water hyacinth plants. *J. Plant Nutr.* 17(7): 1219-1230.
 14. Ismail, A.S., Abael-Sabour, and R.M. Radwan. 1996. Water hyacinth as an indicator for heavy metal pollution in different selected sites and water bodies around greater Cairo. Egypt. *J. Soil Sci.* 36(1-4): 343-354.
 15. Jain, S.K., P. Vasudevan, and N.K. Jha. 1989. Removal of some heavy metals from polluted water by aquatic plants: Studies on duckweed and water velvet. *Biol. Wastes* 28: 115-126.
 16. Larsen, V.J., and H.H. Schierup. 1981. Macrophyte cycling of zinc, copper, lead, and cadmium in the littoral zone of polluted and nonpolluted lake: Seasonal changes in heavy metal content of aboveground biomass and decomposing leaves of *Phragmites australis* (Cav.). *Trin. Aquat. Bot.* 11:211-230.
 17. Zaranyika, M. F., and T. Ndapwadza. 1995. Uptake of Ni, Zn, Fe, Co, Cr, Pb, Cu and Cd by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Mukuvisi and Manyame Rivers, Zimbabwe. *J. Environ. Sci. Health. A.* 30:157-169.
 18. Mitsch, W. J., and J. G. Gosselink, 1993. *Wetlands*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, N.Y.
 19. Pinto. C.L., A. Caconia, and M. Souza. 1987. Utilization of water hyacinth for removal and recovery of silver from industrial wastewater. In D. Athie (ed.) *The use of macrophytes in water pollution control*. *Water Sci. Technol.* 19: 89-102.
 20. Wooteh, T.W., and J.D. Dodd. 1976. Growth of water hyacinth in treated sewage effluent, *Econ. Bot.* 30:29-37.
 21. Zaranyika, M.F., and T. Ndapwadza. 1995. Uptake of Ni, Zn, Fe, Co, Cr, Pb, Cu and Cd by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Mukuvisi and Manyame rivers, Zimbabwe. *J. Environ. Sci. Health Part A Environ. Sci. Eng. Toxic Hazardous Substance Control* 30: 157-169.
 22. Zayed, A., S. Gowthaman, and N. Terry. 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I . Duckweed. *J. Environ. Qual.* 27:715-721.
 23. Zhu, Y.L., A. M. Zayed, J-H. Qian, M. Souza, and N. Terry. 1999. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II . Water Hyacinth. *J. Environ. Qual.* 28:339-344.

收稿日期：民國 89 年 6 月 16 日

接受日期：民國 89 年 8 月 7 日