台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 74(3):265–273 (2025)
https://doi.org/10.6156/JTAR.202509_74(3).0005

專題論述

重金屬高富集植物在土壤重金屬污染整治與修復上之應用

陳怡菁[1]　楊純明[2,*]

摘要

陳怡菁、楊純明。2025。重金屬高富集植物在土壤重金屬污染整治與修復上之應用。台灣農業研究 74(3):265–273。

由於長期以來的自然現象與工業及礦業的發展、農業化肥的長期超量使用及工業廢污水的農田灌溉等人為原因，造成全世界的生態系重金屬來源不斷增加與土壤重金屬污染越來越嚴重，臺灣也不例外。土壤重金屬污染牽涉土地利用、國民健康、居家安心及糧食安全等民眾關切的議題，因而普獲各方重視。因此，土壤重金屬污染的整治與修復不僅是重要的環境問題，也是廣被重視的社會與經濟焦點，而且重金屬污染對植物生長造成嚴重威脅，對農糧作物的生產與糧食安全的隱憂當然更是不在話下。據此，近年來開發具有成本效益且高效、環保、低價及易行的植生整治與修復技術來改善重金屬污染的土壤，遂成為環境、地理、土壤及農藝等學術領域關切的研究重點之一。本文整理與介紹一些可利用的重金屬污染整治與修復技術，尤其是相關於植生復育的重金屬高富集植物 (或稱超累積植物，hyperaccumulator plants)，裨益於未來進一步的深入探討及應用。

關鍵詞：重金屬高富集植物、超累積植物、土壤重金屬、污染整治與修復、植生復育。

前言

土壤是地球上最重要的自然資源之一，不僅是支持植物生長所需要的微生物環境，儲存與分解有機物轉換成可被吸收利用的養分以維持生態系統平衡，亦是水資源、碳循環的調節庫及生物多樣性的寶藏。在農業上，土壤也是影響農作物生長、病蟲害、肥培管理、灌溉效率、產量及品質等的重要因素，當受到毒害物質或重金屬污染時，將會產生嚴重的環境問題，更將牽涉到土地利用、國民健康、居家安心及糧食安全等民眾關切的重大議題。然而，除了自然現象之外，工業與礦業的蓬勃發展、農業化肥的大量使用等人為原因，卻造成全世界的生態系重金屬來源不斷增加與土壤重金屬污染越來越嚴重，臺灣也不例外。為求解決重金屬污染對農糧作物生產與糧食安全的隱憂，全球研究莫不聚焦於開發具有成本效益且高效的植物修復技術來整治或修復重金屬污染的土壤。

雖然在低濃度下重金屬是生命過程的重要組成，可協助酶 (酵素) 的製造，參與或催化生物之生理生化過程。然而，當超過特定的臨界值濃度/含量後，這些重金屬對許多生物可能變成毒害元素。植物在接觸重金屬後會經歷氧化逆境，導致細胞損傷，當達一定累積後會擾亂細胞離子的穩定狀態 (cellular ionic homeostasis) (Yadav 2010)。含有高濃度或高含量重金屬的土壤被認為係重金屬污染土壤，將對許多植物/農作物產生毒害甚至於阻礙其生長，因此需要予以整治、修復或改善，以使回歸農業使用。但在進行重金屬污染改善前，應先瞭解重金屬污染物種類、特性、污染範圍、濃度及適用的整治或修復方法，乃至於土壤特性、地下水文地質及當時狀況等，以免反而導致污染擴散而更加難以收拾。

收件日期：2025 年 2 月 8 日；接受日期：2025 年 5 月 8 日。
* 通訊作者：cmyang0616@gmail.com
[1] 農業部農業試驗所作物組計畫助理。臺灣 臺中市。
[2] 農業部農業試驗所作物組前研究員兼組長。臺灣 臺中市。

土壤的重金屬污染整治與修復牽涉層面很廣，對各產業的日常運轉與經營發展亦有深遠影響，並且其實務操作非一蹴可幾，作業前需要有充分的瞭解與周詳的規劃。近年來已有許多具有成本效益且高效、環保、低價及易行的植生整治與修復技術來改善重金屬污染的土壤，諸如環境、地理、土壤及農藝等學術領域也都持續積極的從事研究開發。本文整理與介紹一些可供利用的污染整治與修復技術，特別是相關於植生修復的重金屬高富集植物 (或稱超累積植物，hyperaccumulator plants)，裨益於需求者的應用參考與科研人員未來進一步的深入探討。

土壤的重金屬污染整治與修復

土壤或地下水的重金屬污染整治作業有許多修復技術可以採用，惟施行整治與修復之前宜先參考合適的作業指引，依步驟循序進行 (如參閱環境部環境管理署 2024 年 5 月出版之《土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引 (113 年修正版)》)。然而，不同國家地區的情境、環境狀況及經濟條件未必相同，技術種類又形形色色，實施前必須先行瞭解再來評估。通常應用於土壤重金屬污染整治與修復的技術，可概分為農業生態方法、工程方法及生物方法三類型，各有涵蓋內容，每一類型的方法亦皆有多種。如何選用合適的對應方法，端視污染場址的狀態及可採用的技術而異，無可諱言的也會有成本效益的考量。而且在現地生物型整治 (in-situ bioremediation) 實務上，可以將多種技術整合使用，以一種自然程序與環保考量來清除環境中包括重金屬在內的毒害物質。

農藝管理方法

農業生態方法又可分為農田土壤調控與農耕管理措施，前者如土壤 pH 值、水分及氧化還原電位 (Eh) 等項目的調節，後者如改變耕作制度、選用耐抗污染農作物種類與品種及施用合適型態化學肥料等。這些作法主要在於固定土壤中的重金屬、增加土壤對重金屬吸持能力，或減少重金屬被農作物吸收等，但是無法從根本上防治土壤重金屬污染，大多治標不治本。

工程方法

依照《土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引 (113 年修正版)》所述，工程方法係利用物理化學工程措施來整治與修復土壤重金屬污染，包括固化/穩定化、玻璃化法及分離濃縮 (如物理分離、土壤化學淋洗、電熱脫附及電動力法等) 等處理技術在內。簡要的說，固化/穩定化技術係將受污染土壤與固化劑以一定比例混合，改變土壤的理化性質，透過重金屬的吸附或沉澱作用來降低其對生物的效能，而且可緩解重金屬移向土壤深層與地下水，惟僅屬於暫時改變了重金屬在土壤中的存在形態。玻璃化法為將重金屬/廢棄物置於高溫下處理 (常高於 1,000℃)，以電能轉變成熱能將土壤中污染物質破壞分解或固定於成玻璃狀矽酸鹽物質的物理方法，因而降低其移動性。至於物理分離，有污染較不嚴重的耕犁/翻土工法與嚴重污染土壤的排土/換土/客土法 (翻土是將污染重金屬的小區域上層土壤翻至下層，換土是將污染土壤直接取走換入新的未污染土壤，客土稀釋是向污染土壤中加入大量的乾淨土壤予以稀釋)；化學淋洗係使用能促進土壤中非揮發性重金屬遷移或溶解的提取劑 (萃取劑)，使從固相結合的重金屬轉移到液相，再將含有重金屬的液體從土層中抽提出來予以分離與含萃取劑的污水處理；電熱脫附係將揮發性重金屬從土壤顆粒中通入熱蒸汽或熱源加熱等方式加熱土壤，使之從土壤顆粒中分離出來，再收集進行處理；電動力法係將正負電極置於待處理之污染場地施加適當之直流電壓或電流，藉由電極間的電場驅使帶正電荷之離子被吸引到負極、帶負電荷之離子則向正極移動，再將從土壤表面解吸與溶解之聚集於陰極區域的重金屬離子抽提去除。

生物方法

生物方法以植生復育 (或植生修護) (phytoremediation or vegetation remediation) 與微生物處理 (microbial treatment) 為主。植生復育也可稱植物整治，是一項對於環境較為友善、不具侵略性、復育效果明顯及費用較為經濟之技術，又具有安全、操作簡單、可持續性、

環境美學及綠色環保等多項優點而倍受青睞，不破壞環境理化性質、不引起二次污染，係利用植物各種相關新陳代謝反應來達到移除、濃縮及溶解環境重金屬污染物 (Brooks *et al*. 1977; Baker & Brooks 1989; Zhu *et al*. 2014; Guo *et al*. 2019; Ghuge *et al*. 2023)。這些生長於受到重金屬或有機污染物污染土壤、地下水及地面水體之重金屬『高富集 (超累積) 植物』，藉由植株的根部組織提供大量之比表面積，對重金屬具有相當顯著之吸收容量，而且與土壤間具有離子選擇性之傳輸系統，可以自我調整適應於環境中重金屬或污染有機染物之存在。有些植物除了吸收、固定、轉化或累積於根部之外，亦可藉由根部傳導組織將重金屬由土壤中濃縮至植物莖、葉部，或直接降解有機污染物、轉化或礦化成低毒性或無毒性的物質，以及減緩其移動，或促進土壤中微生物將重金屬或有機污染物予以降解或無害化，而達到去除污染物之目的。

經由人工添加或由土壤產生的微生物，來降解或轉移污染物成為低毒性或無毒性的型態，藉以降低或排除污染物濃度，是另一種常用的生物方法。雖然重金屬污染物基本上是不易被微生物降解，但可經由吸附、甲基化、螯合 (chelation) 及價態變化而轉化，因而影響了重金屬的流動性、反應性及生物的利用性。從而可以利用微生物降低重金屬的毒性並防止進一步的污染，如葡萄球菌、芽孢桿菌、假單胞菌、Citrobacteria、Klebsilla 及紅球菌等是常用於微生物復育機制的有機體。透過生物添加物，將微生物與營養物質添加到受污染的場址，或添加營養素與酶來補充及刺激場址的內部微生物活性，都是可行做法。Tiwari *et al*. (2025) 的回顧報告深入探討了高富集植物與其相關微生物群落之間的共生關係，強調根系分泌物與植物免疫如何影響微生物組成，以及這些微生物如何透過各種機制促進重金屬的修復，因此不同的高富集植物可能會以不同的機制進行重金屬修復程序。

上述的植生復育與微生物處理皆為利用某些特定的植物與微生物能夠較快地吸 (除) 去土壤重金屬而達到淨化土壤的目的，相較於其他物理與化學的方法，被歸屬於一種環境友善替代技術。而採用的高富集植物可利用自然生長植物或遺傳工程進行培育，逕行種植於重金屬污染地，微生物則可外添於作物根部附近土壤來改變根部微環境，一方面降低土壤中重金屬的毒性，另方面提高超富集植物對重金屬的吸收、固定，或揮發效率。但是，由於微生物的生物量小，且直接吸收的重金屬量較少，可能也有後續較難實施的清除處理。

重金屬高富集植物

重金屬高富集植物定義為能超量吸收與累積重金屬的植物，乃由 Brooks *et al*. (1977) 提出，又由 Baker & Brooks (1989) 予以整理回顧。一般而言，重金屬高富集植物同時具備 3 個特徵：一是植物地上部 (莖或葉) 重金屬含量是未受到污染或輕度污染的環境下其他植物在同一生長條件下的 10–500 倍 (如鉛的臨界含量為 1,000 mg kg^{-1})，二是植物地上部分的重金屬含量大於根部該種重金屬含量，三是植物的生長沒有出現明顯的毒害症狀 (Baker & Brooks 1989; Liu *et al*. 2007)。生活在重金屬污染程度較高土壤上地上部生物量沒有顯著減少，係超富集植物區別於普通植物的一個重要特徵，可區分出相對於普通植物的超強耐受性 (tolerance) 的表現之一。換言之，高富集植物在重金屬污染的土壤上仍能良好生長，多不會發生毒害現象。部分的普通植物雖然在這種情況下也能生存、生長，但是其地上部分之生物量往往明顯降低，使得植株較矮小，另有部分植物的外觀形態特性還會改變，如葉片大小、花色變色等。Wu (2013) 進一步指出，高富集植物之植株地上部分對重金屬的吸收量比普通植物高 10 倍以上，且不影響正常的生命活動，一般其地上部分的重金屬含量應高於根部重金屬含量：鎳 (Ni)、鉛 (Pb)、鈷 (Co) 等在 1,000 mg kg^{-1} (乾重)，鎘 (Cd) 在 100 mg kg^{-1} (乾重)，錳 (Mn)、鋅 (Zn) 在 10,000 mg kg^{-1} (乾重) 以上。即使在重金屬濃度較低時，高富集植物也有較高積累速率、能同時積累若干種重金屬、生物量大、生長迅速及根系發達等特點。

重金屬高富集植物一般多生長於富含重

金屬的土壤，具有高重金屬耐受性，目前世界上已發現超過 400 多種這類能夠超累積諸如鎘 (Cd)、鉻 (Cr)、銅 (Cu)、鉛 (Pb)、鋅 (Zn)、汞 (Hg)、鎳 (Ni)、鈷 (Co)、錳 (Mn) 及砷 (As) 等重金屬的植物，尤其以分布於熱帶與亞熱帶地區為最多 (Baker & Brooks 1989; Xia *et al*. 2012; Wu 2013; Li *et al*. 2018; Xu *et al*. 2020)。然而在實務操作上，高富集植物仍需要擁有高生物量、生長快速、耐受環境逆境、多種子數量等的特性，以及具有與當地植物競爭的能力，才能夠真正有效應用於植物修復技術。

從自然植物資源來篩選高富集植物的方法，一般係直接在重金屬污染的地方尋找，如礦場、礦區周邊及冶金工業區等。其次，係大量測定一些如花卉、農作物、雜草及牧草等特殊植物體內的重金屬富集程度，惟相對較為耗時費力，也容易忽略一些有修復潛力的植物。Xia *et al*. (2012) 則利用野外採集的土壤種子庫來篩選對重金屬具有高富集特性的植物，透過人為重金屬濃度梯度來驗證其是否具有高富集能力，即經由篩檢添加多種重金屬溶液的土壤中能夠萌發的種子，來選拔出對重金屬有較強耐性的植物種類。這些可以長大又具有高生物量的植物，經測定其植體確實含有高重金屬含量者，就被認定為重金屬高富集植物。此一方法兼顧重金屬耐受性、高富集特性及污染土壤修復能力三項重點，又相對較為省時省力與操作簡易，其關鍵在於土壤種子庫的豐富度、多樣性及代表性。

植物高富集的機制與案例

由於重金屬對植物的毒性與毒害，在自然界中可以觀察到植物也透過迴避 (avoidance) 和耐受機制來對抗重金屬的危害 (Guo *et al*. 2019)，並因此能夠在這些地方定殖，清楚這些機制將可進一步透過植物整治與修復及生物強化途徑來有效的降低或清除土壤重金屬的污染程度 (Viehweger 2014)。從致力於整治與修復重金屬污染的土壤的目的而言，首先需要深入瞭解與植物中重金屬累積及耐受性相關的機制。

近年來許多研究指出，植物根系結構在決定對重金屬逆境或毒性的敏感性或耐受性的過程中扮演著關鍵角色 (Viehweger 2014; Guo *et al*. 2019; Ghuge *et al*. 2023)。某些陸生與水生植物物種被認為是清除重金屬的良好高富集植物，藉由一些轉運蛋白參與重金屬獲取機制，例如 ABC (adenosine triphosphate (ATP)-binding cassette) 轉運蛋白家族、NRAMP 家族 (natural resistance-associated macrophage protein family)、HMA (heavy-metal-associated domain) 及重金屬耐受蛋白等。經由組學工具 (omics tools) 的研究顯示，重金屬的逆境或毒性可以調節高富集植物的多種基因、壓力代謝物或小分子、microRNA 及植物激素等，以促進對高重金屬逆境或毒性的耐受性，進而有效調節其生存代謝途徑 (Ghuge *et al*. 2023)。Yang *et al*. (2020) 從根系對鎘的快速吸收、鎘從根到地上部的有效轉運及植體較強解毒功能 (如植物細胞的區隔化、抗氧化、有機酸生成、滲透物質調節、光合與呼吸作用的維持及氮代謝調節等) 現象，綜述了龍葵高富集鎘的生理及分子機制。Rylott & van der Ent (2025) 評析有關重金屬超積累的分子機制，強調特定轉運蛋白，如 ZIP 家族 (zinc-regulated, iron-regulated transporter-like protein family) 和 NRAMP 家族，在重金屬吸收與轉運中的角色及作用，而且指出抗氧化劑與螯合劑 (如穀胱甘肽與檸檬酸鹽) 有助於減輕重金屬引起的氧化毒害。Xu *et al*. (2020) 研究與分析了 664 種高富集植物之間的系統發育關係 (phylogenetic relationships)，發現近緣物種通常會累積相似的重金屬，顯示重金屬累積特徵具有演化基礎。然而，因為累積特定重金屬的能力各不相同，顯然單憑系統發育仍可能無法預測特定物種之超累積能力。因此，除了各種物理、化學及生物性的重金屬污染土壤整治與修護方法之外，奠基於重金屬耐受植物 (高富集植物) 的形態、生理生化及基因調控機制的綜合應用，污染整治與修復效果將更全面和顯著，也避免了後續二次污染問題。

植物在接觸重金屬後會經歷氧化逆境，導致細胞損傷。此外，植物會累積擾亂細胞離子穩態的金屬離子。而為了最大限度地減少重金屬暴露及其累積的有害影響，某些植物進化出了基於螯合與次細胞區隔化 (subcellular

compartmentalization) 的解毒機制 (Viehweger 2014)。重金屬螯合是許多種植物普遍存在的解毒策略，經由高效率的運輸系統，從敏感位點去除有毒重金屬或將其引導至特定的細胞位置隔離。已知的主要一類螯合劑是植物螯合素 (phytochelatins; PCs)，屬於富含半胱氨酸的胜肽家族 (family of Cys-rich peptides)。PCs 係在植物螯合素合成酶 (phytochelatin synthase; PCS) 催化的轉肽反應中由還原型穀胱甘肽 (reduced glutathione; GSH) 非轉譯合成的 (Yadav 2010)。又在鋅的高富集植物 *Arabidopsis halleri* 案例上，研究發現其根部在過量鋅的環境下，可以分泌能調控植物根圈有效性鋅的螯合劑 (nicotianamine)，據以減緩鋅的吸收速率與降低土壤中鋅的毒性，直接相關於對過量鋅的耐受性 (Tsednee *et al*. 2014)。

以高富集植物整治與修復土壤重金屬污染土地的案例頗多。舉例而言，如對鉻具有高富集特徵的李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz)，被利用於重金屬鉻污染土壤的修復，包括在河川出海口、人工溼地及電鍍工廠廢水污染土地等 (Zhang *et al*. 2011)。由於根系對於鉛的高吸收高富集特性，蓖麻被利用作為大面積鉛污染土壤的植物修復，當植物長到開花期或成熟期時，再將移轉至地上部的植株從污染土壤上移除，實現除去土壤中污染物鉛的目的。如此，既不破壞土壤理化性質與地力，又不引起二次污染，大幅地減少土壤污染運作費用 (Liu *et al*. 2007)。Zhu *et al*. (2014) 精選 3 種礦山鉛污染修復有效植物尼泊爾酸模 (*Rumex nepalensis* Spreng.)、黑麥草 (*Lolium perenne*) 及白三葉草 (*Trifolium repens* Linn.)，藉由混植 (mixed cropping) 提高土壤中重金屬有效態濃度與這些高富集植物生物量，有效地整治與修復礦山重金屬鉛污染。同時混植的方式可增加礦區植被生物多樣性，改善生態功能，發揮長期的正向效果。其他如遏藍菜屬 (*Thlaspi rotundilolium*)、燕麥草 (*Arrhenatherum elatius*) 及愛遏藍菜 (*Thlaspi caerulescens*) 等亦被報導屬於鉛高富集植物，然其等大多生物量小與生長緩慢，大大限制了在修復污染土壤方面的應用 (Liu *et al*. 2007)。

Jing (2013) 則以孔雀草 (*Tagetes patula*)、鳳仙花 (*Impatiens balsamina*) 及腎蕨 (*Nephrolepis cordifolia*) 3 種銅耐性的花卉植物整治與修復銅污染土壤，發現這三種花卉的根系可從污染土壤吸收大量銅並向地上部分轉移，再將採收植株銷售或資源化利用，如此重複若干整治與修復週期的操作清除土壤中的銅污染。Zhong *et al*. (2020) 將多年生草本植物多裂翅果菊 (*Pterocypsela laciniata* (Houtt.) Shih) 幼苗直接移栽或將其種子直接播種於遭受重金屬鎘污染 (5–100 mg kg^{-1}) 的果園土壤中，因為其生物量高且積累量大，在鎘逆境下生長速度較快，可利用於修復果園土壤鎘的污染。Isnard *et al*. (2020) 研究了 New Caledonia 的原生特有種 *Pycnandra acuminata* 對鎳的超累積特性，發現該物種可以耐受高濃度的鎳，其乳膠中的鎳含量高達 257,000 μg g^{-1}，係已知生物體中紀錄的最高值。經由田野調查與栽培試驗，研究發現蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.) 對重金屬砷 (As) 具有很強的高富集作用 (Ma *et al*. 2001; Chen *et al*. 2002)。蜈蚣草植體中砷的分布情形與普通植物亦有顯著不同，部位含量高低為葉片 > 葉柄 > 根系，且地上部的生物富集係數 (bioconcentration factors，即生物體內污染物的平衡濃度與其生存環境中該污染物濃度的比值) 隨著土壤含砷量的增加而呈冪函數下降 (Chen *et al*. 2002)。其不僅對砷有很強的耐受能力與富集能力，且生長快、生物量大、地理分布廣及適應性強，對砷污染環境的修復結果甚佳。

在臺灣的實務研究案例上，近年來研究陸續證實十字花科植物具有吸收重金屬污染土壤中鎘與鋅，且累積高濃度鎘與鋅於植體內的現象。Lee *et al*. (2003) 的研究進一步顯示，土壤中重金屬鎘的含量會對根圈土壤中根分泌之雙羧基有機酸的含量造成影響，不論個別或總量皆是。在十字花科根圈中，以主要的雙羧基有機酸物種丙二酸及琥珀酸占有較高的比例 (約 62–100%)；而且土壤中可交換性鎘的含量，明顯導致不同植物根分泌雙羧基有機酸，以受土壤溶液中鎘的驅動而增加分泌與受土壤溶液中的鎘抑制而減低分泌為 2 種主要類型。當土壤溶液中的鎘-雙羧基有機酸複合物含量增加時，將提高植體吸收鎘的含量。Siao

(2011) 調查臺灣高屏溪流域下游地區的河口紅樹林生態系統，發現已成為重金屬的儲存場所，其中蘆葦、海茄苳及馬鞍藤等植體內重金屬含量各異；蘆葦吸收較多的鋅與鎳，平均含量為 72.65 mg kg^{-1} 與 3.31 mg kg^{-1}，海茄苳吸收較多 Cu、Pb 及 Ca，平均含量為 31.31 mg kg^{-1}、3.12 mg kg^{-1} 及 416.84 mg kg^{-1}，馬鞍藤吸收較高的鎘、鉻、鋁及鐵，平均含量為 3.33 mg kg^{-1}、3.99 mg kg^{-1}、5.05 mg kg^{-1} 及 21.12 mg kg^{-1}。其次，沉積物中重金屬生物有效態可被植物體吸收減少，而非生物有效態則被植物根圈吸附固定於沉積物中。而由於這些不同紅樹林植物種類所能吸收累積的重金屬種類不盡相同，因此未來在類似河口或溼地環境區可針對該區受污染種類特性，選擇適當紅樹林植物種類來達到降低重金屬污染的目的。Chen *et al*. (2002) 指出高富集植物的整治與修復效果仍有改進的空間，例如可以透過人為添加物對土壤中的重金屬進行化學活化，以提高重金屬的植物效能；可併行高富集植物與農作物間作，以提高前者的吸收量而使後者產出的農產品不受重金屬危害；將不同重金屬高富集植物進行間作或輪作，以相互促進富集效果；將高富集植物的決定性基因透過基因工程技術轉入生物量較大的植物中，以提高其重金屬去除能力。

Chou *et al*. (2014) 研究指出水稻植株中的砷含量，會受到灌溉用的地下水、土壤中砷的種類與濃度及稻田土壤特性的影響。稻田土壤中存在的亞砷酸鹽會被水稻根部吸收，使得砷保留在根系中，並可轉移到稻株的嫩芽與葉子中，惟因轉移係數較低 (< 0.05)，顯示砷從根部轉移到地上部的比例較低，稻株根組織具有很強的容納砷的能力。Chou *et al*. (2016) 進一步發現，透過灌溉與水管理兩項重要耕作措施，可以控制稻作的生產並調節稻田與稻株中的砷濃度。2013 年一期作的「台農 84 號」與二期作的「台南 11 號」在植株不同部位砷含量隨生育階段與灌溉方式不同而變化，在最大灌溉量的漫灌處理下，稻株在生長過程中體內砷濃度呈現季節性波動；在有氧灌溉與乾濕交替灌溉條件下，稻株中的砷含量低於漫灌下的稻株。顯示不同的灌溉方式可以改變稻田的氧化還原狀況，導致土壤中砷的釋放或吸收，進而影響稻株對砷的吸收。由於稻種之間具有不等積累重金屬能力的差異，未來可以篩檢水稻種子庫找出影響重金屬吸收的基因作為育種上的參考，以確保食用稻米的安全性。

Wang *et al*. (2014) 另在葉用油菜發現能夠在重金屬鎘污染土壤上正常生長的品種，植株地上部與根部含量均較低，或根部重金屬含量雖較高但地上部重金屬含量較低的植物，將之稱為重金屬排異植物 (heavy metal rejecting plants)。此類植物目前尚無公認的篩選標準與方法，且仍有爭議存在，某些研究比照高富集植物的篩選模式，基於可食部位低含量、地上部低富集、體內低轉運及高耐性等標準，以盆栽、小試區或水培等試驗方式，將不同品種可食用部位重金屬含量與國內或國際標準比較，經排序比對而篩選出低富集的重金屬排異品種。但是研究也發現，當土壤重金屬含量超過一定污染閥值時，參試品種可食用部位之重金屬含量皆無法符合食品衛生標準；另外，同一排異品種在不同地區的相近重金屬污染土壤上表現並不相同，出現地域性的差異 (Wang *et al*. 2014)。基此，在篩選重金屬排異品種時，應建議適用的污染地區、污染範圍及污染程度區間，限定其實際可應用的條件。

總體來說，此種排異植物一般在種間與種內皆存在差異，以應用於農業生產上在輕中度污染土壤上相對其他品種累積較低的重金屬為主，當其食用部位符合國家食品衛生標準時，則可以在這些較低污染土壤上進行安全生產。如此一來，既可保障農產品的質量安全，同時又可善用現有的土地資源於農作生產利用 (Wang *et al*. 2014)。Yu *et al*. (2019) 以 2 種具有顯著差異氣候生態區 (29°59′N、102°59′E 與 30°42′N、103°51′E) 之少花龍葵 (又名光果龍葵，*Solanum americanum*) 雜交 F1 植株秸稈施用於輕中程度鎘污染之生菜田區，發現能夠降低生菜植體中鎘的積累及促進生菜的生長，如預期排異植物之表現。基於此一理論，加拿大研究人員於 2004 年選育出硬粒小麥鎘的排異品種 ‘Strongfield’ (Clarke *et al*. 2005)，此品種目標性狀穩定且以商業推廣廣於加拿大種植。美國亦選育出鎘的向日葵排異品種，並成功地推廣栽培 (Tan *et al*. 2023)。

結語

土壤為植物提供了生長所需的水分、營養元素、空氣及地熱等重要因子，亦給予植體機械支撐。惟因隨著工商發展、農業生產及民眾生活等各樣活動所製造產生的污染物長期進入與累積於土壤，形成了土壤污染 (soil pollution)，使得土壤質地逐漸惡化並導致生產力下降，也間接危害人體健康與居住品質。土壤重金屬污染係由污染物中的重金屬或其化合物造成，農地被重金屬污染所生產的糧食如流入食物鏈中，勢將引起嚴重的食安問題及民眾的衛生安全惡果，因此土壤重金屬污染的整治與修復應予重視及優先處理。

雖然土壤的重金屬污染整治作業有許多修復技術可以採用，但是仍須綜合考量國情、社會氛圍、環境狀況及經濟條件，再來評選合適的污染整治與修復技術種類。在農業生態方法、工程方法及生物方法三大類型涵蓋的整治與修復技術當中，以生物方法是已知唯一對環境友善的修復做法，而高富集植物兼顧了重金屬修復、綠色環保及美化環境的多重優點，加上費用低廉、操作簡單安全、較為省時省力、無二次污染顧慮、持續性及全面性等益處，贏得了土壤清道夫美譽而值得採行。本文同時強調，在進行重金屬污染改善前，宜先充分瞭解當地的情境、重金屬污染情形、土壤及水文，再來選用適用的整治與修復方法，在不產生二次污染的前提下，依循自然程序與生態及安全原則予以清除。所回收的重金屬如果可予以資源化的循環再利用，如製成藥品、肥料及純化微量元素等，將可開展出新興產業的循環經濟，共創雙贏。

引用文獻

Baker, A. J. M. and R. R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-A review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery 1:81–126.

Brooks, R. R., J. Lee, R. D. Reeves, and T. Jaffre. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. J. Geochem. Explor. 7:49–57. doi:10.1016/0375-6742(77)90074-7

Chen, T., C. Wei, Z. Huang, Q. Huang, Q. Lu, and Z. Fan. 2002. Arsenic hyperaccumulator plant Torenia concolor and its arsenic accumulation characteristics. Chin. Sci. Bull. 47:207–210. (in Chinese) doi:10.1360/csb2002-47-3-207

Chou, M. L., J. S. Jean, G. X. Sun, Z. Y. Hseu, C. M. Yang, S. Das, and J. H. Teng. 2014. Distribution and accumulation of arsenic in rice plants grown in arsenic-rich agricultural soil. Agron. J. 106:940–951. doi:10.2134/agronj13.0497

Chou, M. L., J. S. Jean, G. X. Sun, C. M. Yang, Z. Y. Hseu, S. F. Kuo, ... Y. J. Yang. 2016. Irrigation practices on rice crop production in arsenic-rich paddy soil. Crop Sci. 56:422–431. doi:10.2135/cropsci2015.04.0233

Clarke, J. M., T. N. McCaig, R. M. DePauw, R. E Knox, F. R. Clarke, M. R. Fernandez, and N. P. Ames. 2005. Strongfield durum wheat. Can. J. Plant Sci. 85:651–654. doi:10.4141/P04-119

Ghuge, S. A., G. C. Nikalje, U. S. Kadam, P. Suprasanna, and J. C. Hong. 2023. Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants, detoxification, and remediation. J. Hazard. Mater. 450:131039. doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131039

Guo, Y., J. Ma, P. Jiang, J. Li, J. Gao, S. Qiao, and Z. Zhao. 2019. The mechanism of plant resistance to heavy metal. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 310:052004. doi:10.1088/1755-1315/310/5/052004

Isnard, S., L. L'Huillier, A. L. D. Paul, J. Munzinger, B. Fogliani, G. Echevarria, ... A. van der Ent. 2020. Novel insights into the hyperaccumulation syndrome in *Pycnandra* (Sapotaceae). Front. Plant Sci. 11:559059. doi:10.3389/fpls.2020.559059

Jing, Y. 2013. Method for Repairing Cooper Contaminated Soil by Using Three Copper Resistance Flower Plants. Pub. No. CN102935446A. Qufu, China. https://patents.google.com/patent/CN102935446A/zh (visit on 1/25/2025) (in Chinese with English abstract)

Lee, C. H., C. Y. Chiu, Y. M. Tzou, P. N. Chiang, and M. K. Wang. 2003. Effects of soil cadmium and zinc heavy metal contaminants on plant root exudates of low molecular organic acids. Soil Environ. 6:9–16. (in Chinese with English abstract) doi:10.30058/SE.200303.0003

Li, J. T., H. K. Gurajala, L. H. Wu, A. van der Ent, R. L. Qiu, A. J. M. Baker, ... W. S. Shu. 2018. Hyperaccumulator plants from China: A synthesis of the current state of knowledge. Environ. Sci. Technol. 52:11980–11994. doi:10.1021/acs.est.8b01060

Liu, X., Y. Gao, B. He, Z. Wang, P. Ning, X. Zeng, ... B. Wen. 2007. Application and Method of Utilizing Enriching Plant in Repairing Lead Polluted Soil.

Pub. No. CN1887457A. Yunnan Institute of Environmental Sciences. Kunming, China. https://patents.google.com/patent/CN1887457A/zh (visit on 1/22/2025) (in Chinese with English abstract)

Ma, L. Q., K. M. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai, and E. D. Kennelley. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature 409:579. doi:10.1038/35054664

Rylott, E. L. and A. van der Ent. 2025. Harnessing hyperaccumulator plants to recover technology-critical metals: Where are we at? New Phytol. 246:859–866. doi:10.1111/nph.20449

Siao, M. F. 2011. Uptake and accumulation of heavy metals in sediment by mangroves. Master Thesis. Department of Environmental Engineering and Science, Fooyin University. Kaohsiung, Taiwan. 106 pp. (in Chinese with English abstract)

Tan, D., L. Zhang, S. Zhang, and B. Cui. 2023. Physiological response of four widely cultivated sunflower cultivars to cadmium stress. Horticulturae 9:320. doi:10.3390/horticulturae9030320

Tiwari, S., A. Ullah, Y. X. Feng, and X. Z. Yu. 2025. Exploring plant symbiotic microbial dynamics in metal hyperaccumulators for phytoremediation. Intl. Biodeterior. Biodegrad. 196:105941. doi:10.1016/j.ibiod.2024.105941

Tsednee, M., S. C. Yang, D. C. Lee, and K. C. Yeh. 2014. Root-secreted nicotianamine from *Arabidopsis halleri* facilitates zinc hypertolerance by regulating zinc bioavailability. Plant Physiol. 166:839–852. doi:10.1104/pp.114.241224

Viehweger, K. 2014. How plants cope with heavy metals. Bot. Stud. 55:35. doi:10.1186/1999-3110-55-35

Wang, L., Y. Xu, X. Liang, Y. Sun, D. Lin, Y. Sun, and X. Qin. 2014. Method for Screening Cadmium Rejection Varieties of Leaf-Edible Rapes. Pub. No. CN103238439A. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture. Tianjin, China. https://patents.google.com/patent/CN103238439A/zh (visit on 1/22/2025) (in Chinese with English abstract)

Wu, J. 2013. Island ecological restoration and environmental protection. China Ocean Press. Beijing, China. 383 pp. (in Chinese)

Xia, H., X. Zhang, Z. Li, and P. Zhuang. 2012. Method for Searching Heavy Metal Hyper Accumulator. Pub. No. CN102160497A. South China Botanical Garden of CAS. Guangzhou, China. https://patents.google.com/patent/CN102160497A/zh (visit on 1/25/2025) (in Chinese with English abstract)

Xu, W., P. Xiang, X. Liu, and L. Q. Ma. 2020. Closely-related species of hyperaccumulating plants and their ability in accumulation of As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn. Chemosphere 251:126334. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126334

Yadav, S. K. 2010. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. S. Afr. J. Bot. 76:167–179. doi:10.1016/j.sajb.2009.10.007

Yang, X. Y., H. J. Wang, and H. B. Wang. 2020. Advances in physiological and molecular mechanisms of cadmium hyperaccumulation by *Solanum nigrum* L. Asian J. Ecotoxicol. 15(6):72–81. (in Chinese with English abstract)

Yu, X., Y. Tang, Y. Xie, H. Li, H. Tan, L. Wang, ... M. Liao. 2019. A Method to Reducing Cadmium Accumulation in Lettuce by Applying *Solanum nigrum* Straw. Pub. No. CN109848205A. Sichuan Agricultural University. Sichuan, China. https://patents.google.com/patent/CN109848205A/zh (visit on 1/30/2025) (in Chinese with English abstract)

Zhang, X., J. Liu, and Y. Zhu. 2011. Research on Phytoremediation Technology of Heavy Metal-Contaminated Soil: Study on the Hyperaccumulation Characteristics, Mechanism and Remediation Potential of Chromium by *Leersia hexandra*. China Science Publishing & Media. Beijing, China. 164 pp. (in Chinese)

Zhong, L., X. Li, D. Xia, P. Liu, H. Li, M. Liao, ... H. Xia. 2020. A Kind of Method for Repairing Cadmium-Contaminated Orchard Soil of *Pterocarpus multiflora*. Pub. No. CN108326039B. Sichuan Agricultural University. Sichuan, China. https://patents.google.com/patent/CN108326039B/zh (visit on 1/25/2025) (in Chinese with English abstract)

Zhu, X., Y. Yang, J. Shao, Z. Yang, and H. Yang. 2014. Remediation Method for Heavy Metal Lead Pollution in Mine. Pub. No. CN102847707A. Sichuan Agricultural University. Sichuan, China. https://patents.google.com/patent/CN102847707A/zh (visit on 1/20/2025) (in Chinese with English abstract)

Application of Hyperaccumulator Plants in the Remediation and Restoration of Heavy Metal Polluted Soils

Yi-Jing Chen[1] and Chwen-Ming Yang[2,*]

Abstract

Chen, Y. J. and C. M. Yang. 2025. Application of hyperaccumulator plants in the remediation and restoration of heavy metal polluted soils. J. Taiwan Agric. Res. 74(3):265–273.

Due to long-term natural phenomena and other man-made activities such as the development of industrial and mining enterprises, excessive use of agricultural fertilizers and farmland irrigation with industrial wastewater, the sources of heavy metals in the world's ecosystems have continued to increase and heavy metal pollution in soils has become more and more serious. Taiwan is no exception. Soil heavy metal pollution involves issues of public concern such as land use, national health, home security, and food security, and therefore has received widespread attention from all parties. As such, the remediation and restoration of soil heavy metal pollution is an important environmental concern and a widely valued social and economic focus. Heavy metal pollution poses a serious threat to plant growth and hidden worries to the production of food crops and food security. In recent years, the development of cost-effective, efficient, environmentally friendly, low-priced, and easy vegetation remediation technologies to remediate heavy metal-contaminated soil has become one of the research focuses of academic fields such as environment, geography, soil, and agronomy. This article collates and introduces some available heavy metal pollution remediation and restoration technologies, especially the heavy metal hyperaccumulator plants related to phytoremediation, which will benefit further in-depth research and application in the future.

Key words: Heavy metal hyperaccumulator plants, Hyperaccumulating plants, Soil heavy metals, Pollution remediation and restoration, Phytoremediation.

Received: February 8, 2025; Accepted: May 8, 2025.
* Corresponding author, e-mail: cmyang0616@gmail.com
[1] Project Assistant, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[2] Former Research Fellow and Division Director, Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.