

芒草在生質能源與植生復育的開發與利用

The Development and Application of *Miscanthus* in Bioenergy and Phytoremediation

賴明宏¹ 江友中² 洪國翔³ 米怡蒂⁴ 蔣鎮宇⁵ 許再文^{6,*}

Ming-Hung Lai¹, Yu-Chung Chiang², Kuo-Hsiang Hung³, Yi-Ti Mi⁴,
Tzen-Yuh Chiang⁵ and Tsai-Wen Hsu^{6,*}

¹ 國立台灣大學國家發展研究所 台北市

² 國立中山大學生物科學系 高雄市

³ 國立屏東科技大學生物資源研究所 屏東

⁴ 國立成功大學生物科技中心 台南市

⁵ 國立成功大學生命科學系 台南市

⁶ 行政院農業委員會特有生物研究保育中心 南投

¹ Graduate Institute of National Development, National Taiwan University, Taipei

² Department of Biological Sciences, National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung

³ Graduate Institute of Bioresources of National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung

⁴ University Center for Bioscience and Biotechnology of National Cheng Kung University, Tainan

⁵ Department of Life Sciences, National Cheng Kung University, Tainan

⁶ Endemic Species Research Institute, Nantou

*通訊作者:twhsu@tesri.gov.tw

* Corresponding author :twhsu@tesri.gov.tw

摘 要

C₄ 植物芒草因極高的光合效率與生物量具有生質能源的潛能，這個原生的雜草是組成台灣的草原生態系重要的物種，從低海拔的荒廢地(五節芒)、高鹽(八丈芒)及高重金屬(白背芒)的棲

地、中海拔的邊坡(台灣芒)一直到高山的草原(高山芒)，都有優勢的族群分布，然而這個台灣的草卻已經是歐洲的寶，透過國際合作，歐盟正式將台灣的芒草種源引入歐洲，作為生質能源發電的原料；在美國芒草被列為生產生質酒精的物種之一。台灣在缺乏完整的能源政策下，生質能源一直流於空談，尤其在原油價格直直落的大環境下更是雪上加霜，芒草作為生質能源有固碳及快速回收的優點，相較於只會產能及釋放二氧化碳的化石燃料，芒草可以從大氣中吸收碳，也就是具有碳吸存的能力，依據歐盟的研究，一公畝的芒草每年約可以固定 1.63 噸的碳。除了火力發電廠的發電，台灣最有潛力的則是利用芒草粒(經乾燥造粒)於鍋爐的燃燒使用，以及透過低氧燃燒產生的生物碳乃至活性碳的製造，環境永續的考量上；種植芒草還有定沙、防止地層下陷以及去除土壤重金屬與戴奧辛的污染，居於整體的考量，台灣應該透過政策推動，開發與利用這種原生的天然資源。

Abstract

Featuring high photosynthetic efficiencies and biomass, *Miscanthus*, a C₄ plants, has become a potential biofuel crop. *Miscanthus* is native to East Asia with high species diversity, including *M. sinensis* Anders. that is widespread in Mainland China and Japan. Taxa in Taiwan are ecologically diverse, with *M. floridulus* (Labill.) Warb. ex Schum. & Laut. distributing in wastelands, *M. sinensis* var. *condensatus* (Hack.) Makino in saline-alkali habitats, *M. floridulus* var. *papillayus* Lee in heavy metal areas, *M. sinensis* var. *formosanus* Hack. on slopes of intermediate altitude, and *M. transmorrisonensis* Hayata in grasslands of high mountains. In 1997, the European *Miscanthus* Improvement Project, which is sponsored by the European Union, identified *Miscanthus* as a potential biofuel crop for renewable energy. Via international collaboration, *Miscanthus* seeds were exported officially from East Asia including Taiwan to European Union. *Miscanthus* has been used for combustion in Europe to reduce the usage of charcoal in the fossil-fuel power; in America, *Miscanthus* is used for producing ethanol. Unfortunately biofuel crops have not been well developed in Taiwan due to the lack of sustainable development policies. Compared to fossil fuel, which simply emits greenhouse gases, *Miscanthus* plants fix carbon dioxide from the atmosphere and carbon elements from soil, and transfer to biomass. According to researches conducted by the European *Miscanthus* Improvement Project, one acre of *Miscanthus* farm can fix 1.63 tons of carbon per year. Altogether, this C₄ plant is not only ideal for producing renewable energy, but for fixing carbon from the environment. Practically, *Miscanthus* manufactured as pellets can be directly used in power stations and burners for local industry. Additionally, planting of *Miscanthus* is also helpful for sand fixation, mitigation of land subsidence, and accumulating heavy metals and dioxin from polluted soil. For sustainable development, we suggest developing policy of biofuel in Taiwan.

關鍵詞：生質能源、芒草、植生復育法

Key words: bioenergy, *Miscanthus*, phytoremediation

收件日期：2016年06月03日 接受日期：2016年08月12日

Received: June 06, 2016

Accepted: August 12, 2016

前 言

台灣的長遠未來有賴於自然與人力資源的永續使用，不論台灣或全球，人類經濟開發如果取之於自然生產力，這樣的開發則是永續性的。2012年11月在卡達杜哈(Doha)第18屆聯合國氣候變化大會暨第8屆京都議定書締約國大會所通過的「杜哈氣候途徑」(Doha Climate Gateway)，延續執行京都議定書，不致讓全球僅有的執行溫室氣體減量國際公約中斷，並確認在2015年前將達成全球新減量協議的目標時程表。世界各國紛紛投入替代能源的找尋與研究，野生的生質能源植物頓時之間成了全球注目的焦點，其中C₄植物的禾本科芒屬植物，因其生長快速的特性，成為生質能源議題關注的對象之一。台灣本身在地質上缺乏化石燃料的儲存量，長久以來製造業所需要的能量多是依靠進口能源和原材料進行生產，導致每人的平均二氧化碳淨排放量方面，台灣在全世界排名上名列前茅，因此，政府一直致力於提倡綠色再生能源來改善二氧化碳的排放量，能源的來源必須增加來自可再生能源和材料來源的多元化，減低二氧化碳的排放避免碳稅的產生，進而減少對環境的影響。

根據歐盟、英國與美國相關研究團隊的研究，芒屬生長速度快，目前歐盟已有利用芒屬

植物所培育的巨芒(*Miscanthus x giganteus*)進行商業生產，以50-50的比例與煤混合直接燃燒，代替煤炭直接燃燒來發電，直接作為火力發電廠的燃料。台灣的芒屬植物多樣性極高，英國 Aberystwyth 大學生物環境暨農村科學研究所(Institute of Biological, Environmental, and Rural Sciences)已與台灣依照國際生物多樣性公約的精神，針對採集野生芒類植物資源簽訂協議書，將由台灣提供的野生芒類植物資源種源，進行相關研究，並推展其商業化用途，為全球環境保護盡一份心力。台灣雲林及彰化縣嚴重地層下陷地區，現今農委會輔導農民從事低耗水性農業及調整生產措施，稱為農業「黃金廊道」計畫，計畫以彰化縣南部與雲林縣高鐵沿線三公里為範圍嚴重地層下陷地區，進行建立「省水、省能」的農業黃金廊道，兼顧「生產」、「生態」與「生活」。此地區若是引進低耗水性、適應性強及粗放管理之「芒草」，應具備推廣潛力，因此若要進行零碳排放之生質能源作物開發，由台灣本土原生植物中來選擇，芒草將會是首選植物，因此選育適當芒草品種及分析其生產之經濟效益有其必要性。

一、芒草的分類與育種

芒草在分類上的地位是禾本科黍亞科蜀黍族芒屬(*Miscanthus*)植物，與甘蔗屬

(*Saccharum*)是近緣物種，二屬之間有雜交成功的例子。芒屬植物全世界約有 14 至 20 種，主要分布地是東亞、南亞和環太平洋群島，現已擴展至西非、美洲和歐洲地區。依據新整理的系統，芒屬植物分區為 6 節 (Clifton-Brown *et al.* 2010)，其中作為能源作物親本物種主要為荻節 (Section *Triarrhena*) 和芒節 (Section *Miscanthus*)，荻節包含二物種，分別為荻 (*M. sacchariflorus*) 和南荻 (*M. lutarioriparius*)，此分類群台灣無分布，且此群植物雖高大但是耗水與分蘖少，不適合台灣使用。芒節植物主要區分為 2 大群，第一大群是由中國芒及其變種形成的分類群，第二大群是由五節芒形成的分類群 (江等 2008)，二分類群皆可以利用光照溫度控制開花，具有雜交可行性。然而，雜交現象導致芒草在系統分類上的困難度，尤其是在中國芒複合群因為廣域分布和形態特徵差異大，導致分類上的困難與種下階層複雜性 (Lee 1964a-d)。

芒節在台灣由海平面分布至高山草原地區，形態變化大，在 2007 年即被英國 Aberystwyth 大學生物環境暨農村科學研究所鎖定為非糧食作物在生物能源的研究之芒類植物的種源取樣地區，已經多次來台採集，並與行政院農業委員會特有生物研究保育中心於 2008 年簽訂「野生芒類植物資源」協議書，同意芒草種原採集，更於 2012 年正式簽訂芒類「使用及利益分享協議書」，同意雙方共同分享研究所得利益，雙方也希望在芒類生物能源作物的開發工作中能持續進行科技合作。然而，篩選高產量、高抗性的育種目標，其基礎研究如分類、繁殖、種原採集、雜交與育種、環境的適應生理、生物量性狀的比較、種植之經濟效益等項目皆是必要之項目，台灣芒草形態變異與環境差異的生理變異已天然篩選出

大量生態型，如何運用此項天然資源，以現代遺傳分子標誌加速篩選如高生物量等必要的性狀，為未來的目標與努力方向。

遺傳育種方面，芒草具有高度遺傳變異 (Chiang *et al.* 2003)，具有多倍體現象 (Clifton-Brown *et al.* 2008)，加上花柱柱頭成熟不同時特性導致傾向異花授粉 (Yu *et al.* 2009)，如荻 (*Miscanthus sacchariflorus*) 可以做為三倍體選拔之親本，現今商業生產使用巨芒即為三倍體。

二、芒草的生質能源潛力

台灣的芒屬植物為多年生植物，栽培容易，生長快速，無任何疾病，亦不需要灌溉，農業試驗所嘉義分所進行田間試驗結果，1 公頃面積可生產芒草乾重達 60 公噸，極具產業發展價值。多年生草本植物芒草具豐富的遺傳變異性和適應力，未來或許可以取代大豆、玉米等作物成為第二代能源作物 (以纖維提煉酒精) 選項，尤其因應氣候變遷、水資源不足及能源價格攀升之趨勢，發展低耗水性且具產製生質燃料潛力之芒草，評估其發展潛力實有其必要。芒屬物種在因適應性演化造成形態變異大，其植株大小與分蘖數目差異顯著，造成生物量累積速率不同。此生物量性狀屬於數量遺傳性狀，受到遺傳與環境調控，選育高產量芒草過程除傳統作物選拔方式，分子輔助選育將可以縮短生質能作物發展時程，因此利用分子標誌輔助選種以選拔適合環境之高產量的芒草品種為第一要務，所發展的分子鑑定技術亦能作為後續台灣芒草品種保護機制。

因應國際持續增加的壓力，未來以植物生物量作為生物燃料和生物發電可能為未來再生能源相關目標，因此，特用性能源作物

的開發，提高生物量的產量以作為煤炭替代品或是直接進行生質汽柴油的來源。在過去的十年中，已開發國家因為主要糧食作物和畜牧業飼料作物因為由其他來源獲得更便宜的來源，導致本國農業過度生產的困境，例如歐盟架構下歐洲農業、台灣、日本等。因此，各國為了不同的目的，皆有相關的農地休耕措施，例如歐洲國家的農地休耕是在1988年推出，以減少生產過剩問題而達到15%的耕地休耕，於1996年則降低到10%，然而，這些休耕的農業土地，應可進行非食品用途的生產，歐洲國家現今利用亞洲來源的巨芒作為可再生能源的燃料和化學成分的再生生產資源運用。台灣現今農地休耕農地達數十萬公頃，加上因應地層下陷問題，必須要降低農作物對於水資源的使用情形，例如高鐵在雲林嘉義一帶的地層下陷問題，經評估已經造成高鐵使用壽命降低的風險產生，因應此現象農業委員會提出「黃金廊道農業新方案」，其計畫願景即為打造節水、友善環境、提高農民所得的永續農業，推廣種植旱性作物為可行方案。植物的生物量(Biomass)中的木質纖維素被認為是用來替代非可再生能源的燃料和化學品的重要生產資源。芒屬植物由於己糖含量高(40-48%)，被認為是一種精煉碳水化合物作為生物燃料或是化學品的再生能源作物(Girisuta *et al.* 2012; 2013; Hayes 2013)。利用酸水解木質纖維素生物質的轉化以釋放糖和分離的木質素(Kang *et al.* 2013; Marcotullio *et al.* 2011; Rong *et al.* 2012; Weingarten *et al.* 2011)，並進一步進行酸水解獲得等量的乙酰丙酸(levulinic acid)和甲酸(formic acid)作為生物材料來源(Bozell and Petersen 2010)。顯示芒草具有：(1)可再生能源的生物燃料以替代煤炭使用的潛能；(2)二

氧化碳固定與排放相等以減少台灣碳排放量的潛能；(3)酸水解獲得等量的乙酰丙酸和甲酸作為生物材料來源的潛能。

解決大氣中日益升高的二氧化碳問題，現今技術有以地質碳封存方式，或以光合作用將二氧化碳轉變為碳水化合物方式，然而，徹底解決的方式以利用植物的光合作用能力來進行，是最重要且是全世界人類的希望，亦因此可再生能源或綠色能源便成為重要的研究課題。現今，尋找可用的生質能作物，已經由糧食作物轉變為非糧食性作物，多年生禾本科草本植物成為生質能作物的篩選方向。例如以芒草做為生質能作物的研究中，英國和歐盟科學家把東亞的二倍體中國芒和四倍體蔗芒人工雜交，形成三倍體的巨芒，它是多年生、具地下莖且快速生長特性的生質能作物，因此成為一種新興農作物(Purdy *et al.* 2013)。目前，這種芒草已經在歐洲東北部大量種植，供應局部地區發電廠直接燃燒使用，也有做為生質能基礎工業原料的潛力。在美國伊利諾州的種植實驗中，其生物量最高可達每年每英畝30公噸乾重(Dohleman and Long 2009)，歐洲可達20公噸乾重(Lewandowski *et al.* 2000)，可做為纖維、火力發電廠燃料等，並達成二氧化碳固定的目的(Clifton-Brown *et al.* 2008; 2010)。

三、土壤重金屬及戴奧辛的去除

數十年以來因人類種種活動所導致的土壤重金屬污染已嚴重影響我們所居住地球的生態環境，並逐步成為一個全球性所關注的議題。台灣亦不例外，許多土壤重金屬污染的新聞層出不窮，由於過去數十年間從台灣傳統農業導向的社會轉型邁入現今的工商業導向的

社會，在發展過程中高度污染的石化工業亦快速發展，進而葬送了美麗的大自然環境，使得台灣生態保育面臨巨大的浩劫，同時台灣福爾摩沙—美麗之島的美名亦蒙上一層陰影。至於何謂「重金屬」？密度在 5 g/cm^3 以上的金屬統稱為重金屬，如金、銀、銅、鉛、鋅、鎳、鈷、鎘、鉻和汞等 45 種。以環境污染方面所說的重金屬，實際上主要是指汞、鎘、鉛、鉻以及類金屬砷等生物毒性顯著的重金屬，也指具有一定毒性的一般重金屬如鋅、銅、鈷、鎳、錫等。重金屬可以大面積污染水源河川、大氣和土壤，其中對土壤造成污染後，更會嚴重影響地上面栽植植物或作物的生長，一方面造成土地資源的浪費與直接的經濟損失，更可通過食物鏈危害動物和人類自身的健康。因此，在國際上防治重金屬污染已成為相當重要的環境保護議題。根據評估全世界至少有 2 千 2 百萬公頃以上的土地遭受重金屬污染 (Nasanganwimana *et al.* 2014)，其中歐盟國家約占 409 至 479 萬公頃，美國則有 260 萬公頃，澳洲 6 萬公頃以及中國 810 萬公頃 (Evangelou *et al.* 2012)。美國政府更估計需要花費數十億美金，才可能清除國內所有受重金屬污染的土地；然而在台灣亦有許多民眾所耳熟能詳的重金屬污染事件，如台南安順場戴奧辛污染、高雄茄苳以及新竹香山地區綠牡蠣、桃園觀音及蘆竹鍋米事件等。如何將受污染的土地復原成乾淨土地是目前相當困難的挑戰，過往重金屬污染土壤修復技術通常採用物理和化學方法，如排土填埋法、稀釋法、淋洗法、物理分離法和穩定化及化學法等。這些傳統的整治方法雖然治理效果較好且歷時短，但也有許多缺陷，如成本高、難於管理、易造成二次污染以及對環境擾動大等缺點。因此國際上近年來多應用植生復育法 (phytoremediation) 來解決土壤

重金屬污染的問題，此方法主要藉由重金屬高聚積植物的吸收、轉運並積累進而去除土壤中有害的重金屬 (Cunningham *et al.* 1996)，目前則被視為一種低成本且為更有效的綠色技術，其中最為重要的優點在於可良好維護土壤生態系統同時可美化污染地的景觀，因此對環境破壞甚低。

4-1 重金屬高聚積植物 (Hyperaccumulator)

自然界中植物種類歧異度甚高，即使受到重金屬污染的土地也非全然沒有植被生長，早在 1865 年時，就有學者在德國及比利時發現一種十字花科的植物 *Thlaspi caerulescens*，能適應含鋅量相當高的土地；1948 年在義大利發現另一種可以蓄積大量鎳的十字花科植物 *Alyssum bertolonii*，顯示植物體本身可忍受重金屬環境甚至累積大量重金屬。高聚積植物 (Hyperaccumulator) 是 Brooks 等人 (1977) 所提出來的概念，能在體內聚積一定濃度以上的重金屬並大量聚積在莖或葉中、且沒有明顯毒性症狀產生的植物，可稱為「重金屬高聚積植物」。即鉻、鈷、鎳、銅以及鉛的含量應在 1000 mg/kg 以上，錳與鋅含量應在 10000 mg/kg 以上 (Baker *et al.* 1983)。現已發現鎘、鈷、銅、錳、鎳、鉛、鋅、砷和硒等元素的超積累植物高達 400 餘種 (Baker and Brooks 1989)。然而依重金屬種類可將重金屬高聚積植物區分為三大類群：銅／鈷聚積植物、鉛／鋅／鎘聚積植物及鎳聚積植物。目前已有許多重金屬高聚積植物相繼被發現，其中熱帶地區的重金屬高聚積植物大多屬於大戟科，而溫帶地區則是十字花科。許多十字花科的植物可聚積超過 1% 的鎳，有些則可聚積超過 1% 的鉛及 3% 的鋅，而部分水耕栽培的阿拉伯芥屬植物，地上部的鋅濃度可達 $32,000 \text{ 微克/克乾重}$ ，甚至有些植物的膠乳中，可累積高達 11% 乾重的鎳。全世

界約有 400 種已知的重金屬高聚積植物，然而這些植物都具有生長緩慢以及較低生物量 (biomass) 的特性。其中 *Thlaspi caerulescens* 已被廣泛認定為鋅的超高聚積植物，並已有許多該物種對鋅的吸收和轉移的研究 (Robinson *et al.* 1998; Frey *et al.* 2000; Matthew *et al.* 2008)。而在台灣，根據我們野外的調查，僅有少數能忍受或吸附這些重金屬離子的種類可以在污染地存活或繁衍後代，包括禾本科植物芒屬植物 (*Miscanthus* ssp.)、牛筋草 (*Eleusine indica*)、白茅 (*Imperata cylindrica* var. *major*) 與十字花科植物碎米薺 (*Cardamine flexuosa*) 等。基本上可以有效清除重金屬污染的植物，最好具備下列特徵：生長快速且生物量高、根系能深植土壤、容易收割、能夠容忍並累積多樣化重金屬為最佳選擇。

4-2 植生復育法—以芒屬植物為例

芒草在台灣幾乎隨處可見，其生命力旺盛的特性，使其可廣泛生長於各種環境，甚至於極端惡劣環境，如海邊高鹽地區、乾旱地、高山甚至於雪地，亦能適應不同土壤條件的環境，相對於其他植物而言，事實上芒草是天賦異稟，最主要的原因在於光合作用特性。芒草的光合作用和高粱、甘蔗皆為 C₄ 型植物，這類型植物的光合作用最初產物是四個碳的草醯乙酸 (oxaloacetic acid)，透過合成草醯乙酸，使植物體能在體內儲備 CO₂，能避免植物體開放氣孔獲取 CO₂ 的過程導致水分喪失，所以這樣的過程也間接加強植物對於水分利用效能，造就 C₄ 型植物耐旱適應的重要機制。芒草優異的生態習性以及特性，但芒草於台灣卻被視為無用之植物，國外則許多不同品種的芒草不斷被歐美人士所大量改良以及栽種。芒屬植物是高產量且非經濟作物的多年生草本植物，一直以來被認為是

作為生質能源良好的植物，植物體本身亦可作為生物性材料或工業上原料 (ValBiom, 2009; Acikel, 2011)，顯示芒草具有高度的經濟上價值。芒屬植物中的中國芒 (*M. sinensis*)、荻 (*M. sacchariflorus*)、五節芒 (*M. floridulus*) 以及巨芒草 (*M. x giganteus*) 因其經濟效益而被廣泛於歐美地區栽植，其中巨芒草為四倍體的荻與二倍體的中國芒雜交後代 (Deuter, 2000)，更被譽為未來可用來取代石化燃料的明星植物。研究顯示栽種於歐洲以及美國的巨芒草在 2-3 年的種植時間內總產量可高達每公頃 15-30 公噸 (Picco 2010)，雖然產量以及生長速度會受到物種種類以及基因型、管理方式、土壤以及其他環境因素影響。也由於此些特性近年來芒屬植物除了可取代石化燃料外，亦有許多國家將其視為應用植生復育法解決土壤重金屬污染的選項之一。

一般來說高生物量作物對重金屬積累的含量比較低，但由於其生物量相對大，所以整體上仍具有較高的重金屬積累量。近年來則開始關注利用高生物量的植物來進行植生復育 (Díez Lázaro *et al.* 2006)，此外植物生物量本身同時又可做為植物生長在重金屬污染土壤裡健康程度的一個重要標誌 (Fayiga *et al.* 2004)，芒屬植物則具有這樣的特性，其他植物如白楊木、向日葵與大麻等亦是 (Sebastiani *et al.* 2004)。綜合過往芒屬植物有關重金屬吸附能力或應用於植生復育的研究 (表一)，發現大多數試驗主要著重於中國芒、荻、五節芒以及巨芒草此四物種，顯示芒屬植物對重金屬鋅、鉛、銅、鉻、鎳、鈷、鎘以及砷有吸附能力。Kalembasa 以及 Malinowska (2009) 以荻為研究材料發現吸附能力依序為鋅 > 鉛 > 銅 > 鉻 > 鎳 > 鈷 > 鎘，其他研究也進一步說明根部累積程度略高於地上部 (Pidlisnyuk *et al.*

2014; Li *et al.* 2014)。Rosikon 等學者(2015)則利用城市與工業廢水做為土壤肥料來源來栽種巨芒草，顯示可吸附重金屬以鎘與鋅濃度最高，對鎳吸附能力則略低，該研究亦印證且巨芒草生長一年後重金屬吸附效果達最高。在野外田間試驗部分 Wanat 等學者(2013)則將巨芒草種植於高度污染的土壤中，結果顯示巨芒草可生存於砷、鉛與銻高度污染的地區，但會使其生物量減少，整體而言對其生長沒有太大影響，且根部累積重金屬的程度相對地上部高。Peng 等學者(2006)於中國湘西地區的三個高度污染地區廣泛取樣 125 種植物共 363 個樣本，進行鎘、鉛、鋅與銅重金屬的吸附能力比較，結果顯示其中五節芒對鋅吸附能力最好，鉛次之。綜合上述芒屬植物對鋅吸附效果為最好，此外對鉛、銅、鉻、鎳、鈷、鎘以及砷仍有吸附能力。此外過往並無相關研究說明芒屬植物可用來分解或吸附世紀之毒戴奧辛，但根據野外調查發現中石化安順廠戴奧辛污染植被呈現單一化，只有芒草生長於上，這也暗示著芒草對戴奧辛有高忍受力，亦有可能對戴奧辛具有吸附能力，但相關推論未來仍需進一步來印證。

四、可能的困難與能源政策建議

替代能源發展最大的限制來自於國際原油的價格，這個客觀的條件讓世界各國的能源研發，尤其在生質酒精的投入上，受到了相當大的限制，加上頁岩油的開採，緩解了能源即時需求的壓力，世界各國開始轉向太陽能、氫能的研發，歐盟則在生質能源的研發上轉向直接燃燒投入火力發電，表面上來看，燃燒芒草帶來的是二氧化碳的排放，似乎與政策違背，然而芒草所替代的是火力發電廠屬於植物化

石能源的燃煤，雖然都產熱而釋放溫室氣體，然而芒草需要透過植栽而獲得，植物從種子萌芽那一刻，葉綠體引擎就開始啟動，固定大氣中的二氧化碳，將光能轉換為化學能，芒草的植栽更將土壤內的碳元素吸附並固定，從碳元素的循環與固定，C₄植物的芒草無疑地是減碳又產能的最佳物種。

然而芒草生質能源的開發與利用，需要的不只是生物科技的突破，這其中包括高生物量品系的篩選與育種，更重要的是政府政策的配合，包括可用土地的獲得、可用的水源、收購與採收機制、運輸的工具、乾燥場域的覓得、以及芒草壓縮或造粒技術的研發，都需要有完整的配套；同樣地透過芒草植栽，吸附土壤的重金屬與戴奧辛，第一必須排除可食用的作物，以免流入市場造成二度的傷害，芒草以生長快速又能克服困難環境的特質，適合用於被污染土壤的恢復，在過往植生復育法(Phytoremediation)幾乎很少被採用，相對地化學淋洗或移地處理則是較常使用並被認為是有效的手段，然而隨著環保意識抬頭，污染土地被要求要就地低度污染的處理，利用植栽移除土壤汙染物的方式才開始受到了重視，在美國軍方為了不洩漏國防機密，軍事基地土壤黃色炸藥的移除這幾年來，採取的是栽培快速生長的白楊樹，這個無性繁殖的樹種，吸附了土壤大量的硝酸根，被送進到焚化爐，以高溫來降解，然而白楊樹屬於溫帶物種，在台灣低海拔地區幾乎無法生長。滿足生長快速又可以有效率吸附土壤的重金屬及戴奧辛的本土植物中，以芒草為首選，如何選育一個耐性最高又能生長快速的品系，則是下一個階段的任務。

表 1. 芒屬植物於植生復育法之相關研究彙整

Table 1. The Relationships of Phytoremediation in *Miscanthus*

種類	可吸附重金屬種類及特性	資料來源
<i>M. × giganteus</i>	可吸附鎘，且多累積於植物體根部。	Arduini <i>et al.</i> 2004
	對鎘、銅、鎳、鉛、鋅與鉻有吸附能力，其中對鋅吸附能力最好。	Fernando <i>et al.</i> 2004
	可吸附鎳，且多累積於植物體根部。	Lyubun and Tychinin 2007
	能生存於砷、鉛與銻高度污染的地區，雖生物量減少，但對其生長沒有太大影響，植物體根部累積程度較高。	Wanat <i>et al.</i> 2013
	對銅、鎳與鋅有吸附能力，但低於 <i>Spartina pectinata</i> ，且植物體地下部所含重金屬比例略高於地上部。	Korzeniowska <i>et al.</i> 2015
	以城市與工業廢水做為土壤肥料來源，顯示可吸附重金屬以鎘與鋅濃度最高，對鎳仍有吸附作用，且生長一年後吸附效果達最高。	Rosikon <i>et al.</i> 2015
<i>M. sinensis</i>	對砷有高度忍受力，次之為鋅。	Zhu <i>et al.</i> 2010
<i>M. floridulus</i>	分析 125 種植物，其中 <i>M. floridulus</i> 對鎘、鉛、鋅與銅其中以對鋅吸附能力最好，鉛次之。	Peng <i>et al.</i> 2006
	對鉛、鋅、銅、鎘以及砷有忍受力。	Leung <i>et al.</i> 2007
<i>M. sacchariflorus</i>	吸附能力鋅>鉛>銅>鉻>鎳>鈷>鎘。	Kalembasa and Malinowska 2009
	對鋅以及鉻有高忍受力，且多累積於根部。	Li <i>et al.</i> 2014
	對鈷與銅有吸附能力，根部累積程度略高於地上部。	Pidlisnyuk <i>et al.</i> 2014
<i>Miscanthus</i> spp. (<i>M. × giganteus</i> , <i>M. floridulus</i> , <i>M. sinensis</i>)	三物種對鋅皆有吸附能力，其中 <i>M. × giganteus</i> 能力較好，且植物體地下部所含重金屬比例略高於地上部。	Barbosa <i>et al.</i> 2015

五、芒屬植物應用之願景

芒草在最近三年來相關研究快速增長，近五年內已有超過 200 篇科學論文發表，被確認為是具有全球潛力的能源作物(Brosse *et al.* 2012, van der Weijde *et al.* 2013)。相關研究包含芒草外部形態特徵作為增加產量識別的模型(Robson *et al.* 2013)、具有高輻射適應、水和氮高效率利用能力(Lewandowski *et al.* 2000)、對於低溫處理具有高度容忍性的芒草四種基因型的外表形態特徵(Purdy *et al.* 2013)、根莖越冬條件(Clifton-Brown and Lewandowski, 2000; Yan *et al.* 2012)、低溫下小苗存活率(Yan *et al.* 2012)、在持續降溫下葉片的伸展狀況或是低溫下維持持續高度光合作用速率(Clifton-Brown and Jones, 1997; Wang *et al.* 2008)。然而，工業上相關研究則以芒草作為木質纖維素為主要產品進行後續相關研究(van der Weijde *et al.* 2013)，包含酸水解步驟以釋放糖(Kang *et al.* 2013; Marcotullio *et al.* 2011; Rong *et al.* 2012; Weingarten *et al.* 2011)和乙酰丙酸(levulinic acid)和甲酸(formic acid)作為生物材料來源(Bozell and Petersen 2010)。

植生復育是一項正處於發展之中且具有應用前景的土壤整治技術，其優點為安全且對生態有善以及花費低的特性，目前世界上多朝此方向前進，但這樣的技術較為適合應用於中、低濃度污染土壤的治理。其中利用芒屬植物進行植生復育目前已於中歐、東歐以及美國中部等地廣泛應用，多年生的草本芒屬植物適合種植於污染或其邊緣地區的一類植物，多數研究指出植物體不同部位重金屬儲存的量有所差異，而這樣的差異可能來自受到污染地區的現況不同、土壤狀況甚至於栽植的時間所影響。芒屬植物不論在實驗室或野外試驗都顯示其具有潛力用來移除土壤中重金屬，未來可藉

由改良栽種過程來增加芒屬植物於污染地區的生長速度，藉以增加生物量(Kacprzak *et al.* 2014)，如有機物質、螯合劑或生物炭的添加或增加土壤中微生物多樣性等方法；可篩選和培育對重金屬具有高聚積能力的芒屬植物品種或品系；或者可藉由整合基因工程和分子生物技術來解決高聚積植物於污染地生長緩慢和地上部生物量少的缺點。最後重金屬複合性污染土壤的修復，必須從當地經濟可持續發展和土地資源永續利用兩方面來考慮。因此，為提升環境品質，維護環境資源，追求永續發展，植生復育法搭配生質物再利用仍是一具有潛力的整治技術。

台灣的芒草具有高度的物種多樣性，耐鹽、耐重金屬乃至高山耐寒的生理適應特質讓芒草能夠適應不同的棲地，甚至形成優勢的草原生態，這個光合效率極高的 C₄ 植物，提供了發展生質能源以及去除土壤污染極佳的生物材料，過往被用來作為原住民祭祀、搭建草屋房舍的“野草”，在歐洲已經成了替代植物化石燃料的“寶藏”，而台灣芒草的利用仍處於早期發展的階段，如何提高碳的吸存以及如何提高生物量，需要的生物科技關鍵技術的突破以及政策的配合。

引用文獻

- 江友中、J. C. Clifton-Brown、王薇琍、沈姿秀。2008。風吹草低見能源。科學發展月刊 425: 20-25.
- Arduini I., A. Masoni, M. Mariotti and L. Ercoli 2004. Low Cd application increase *Miscanthus* growth and Cd translocate. *Environmental and Experimental Botany* 52: 89-100.
- Baker A. J. M. and R. R. Brooks. 1989. *Terrestrial*

- higher plants which accumulate metallic elements-a review of their distribution. *Ecology and Phytochemistry. Biorecovery* 1: 81-126.
- Baker, A. J. M., R. R. Brooks, A. J. Pease and F. Malaisse. 1983. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire. *Plant and Soil* 73: 377-385.
- Barbosa, B., B. Boléo, S. Sidella, J. Costa, M. P. Duarte, S. L. Cosentino and A. L. Fernando. 2015. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *BioEnergy Research* 8: 1500-1511.
- Bozell, J. J. and G. R. Petersen. 2010. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates -the US Department of Energy's "Top 10" revisited. *Green Chemistry* 12: 539-554.
- Brooks, R. R., J. Lee, R. D. Reeves and T. Jaffre. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* 7: 49-57.
- Brosse, N., A. Dufour, X. Meng, Q. Sun and A. Ragauskas. 2012. *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 6: 580-598.
- Chiang, Y. C., B. A. Schaal, C. H. Chou, S. Huang and T. Y. Chiang. 2003. Contrasting selection modes at the *Adh1* locus in outcrossing *Miscanthus sinensis* vs. inbreeding *Miscanthus condensatus* (Poaceae). *American Journal of Botany* 90: 561-570.
- Clifton-Brown, J. C. and I. Lewandowski. 2000. Overwintering problems of newly established *Miscanthus* plantations can be overcome by identifying genotypes with improved rhizome cold tolerance. *New Phytologist* 148: 287-294.
- Clifton-Brown, J. C. and M. B. Jones. 1997. The thermal response of leaf extension rate in genotypes of the C₄-grass *Miscanthus*: an important factor in determining the potential productivity of different genotypes. *Journal of Experimental Botany* 48: 1573-1581.
- Clifton-Brown, J. C., S. Renvoize, Y. C. Chiang, Y. Ibaragi, R. Flavell, J. Greef, L. Huang, T. W. Hsu, D. S. Kim, A. Hastings, K. Schwarz, P. Stampfl, J. Valentine, T. Yamada, Q. Xi and I. Donnison. 2010. Chapter 15 - Developing *Miscanthus* for bioenergy. From page 301-321, in Halford N. G. and A. Karp, eds. *Energy Crops*. RSC Energy and Environment Series No. 3. Royal Society of Chemistry. UK.
- Clifton-Brown, J. C., Y. C. Chiang and T. R. Hodgkinson. 2008. Chapter 10: *Miscanthus*: Genetic resources and breeding potential to enhance bioenergy production. From page 273 to 294, in Wilfred Vermerris (ed.) *Genetic Improvement of Bioenergy Crops*. Springer-Verlag New York, LLC. 420 pages.
- Cunningham, S. D., T. A. Anderson, A. P. Schwab and F. C. Hsu. 1996. Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants. *Advances in Agronomy* 56: 55-114.
- Deuter, M. 2000. Breeding Approaches to Improvement of Yield and Quality in *Miscanthus* Grown in Europe. *European*

- Miscanthus* Improvement (EMI) Project.
- Díez Lázaro J., P. S. Kidd and M. C. Monterroso. 2006. A phytogeochemical study of the Trás-os-Montes region (NE Portugal): possible species for plant-based soil remediation technologies. *The Science of the Total Environment* 354: 265-277.
- Dohleman, F. Gand S. P. Long. 2009. More productive than maize in the Midwest: How does *Miscanthus* do it? *Plant Physiology* 150: 2104-2115.
- Evangelou, M. W. H., H. M. Conesa, B. H. Robinson and R. Schulin. 2012. Biomass production on trace element-contaminated land: a review. *Environmental Engineering Science* 29: 823-839.
- Fernando, A. L., V. Godovikova and J. F. S. Oliveira. 2004. *Miscanthus x giganteus*: Contribution to a sustainable agriculture of a future/present oriented biomaterial. *Materials Science Forum* 455-456: 437-441.
- Frey, B., C. Keller, K. Zierold, R. Schulin. 2000. Distribution of Zn in functionally different leaf epidermal cells of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Cell Environ* 23: 675-687.
- Girisuta, B., K. Dussan, D. Haverty, J. J. Leahy and M. H. B. Hayes. 2013. A kinetic study of acid catalysed hydrolysis of sugar cane bagasse to levulinic acid. *Chemical Engineering Journal* 217: 61-70.
- Girisuta, B., K. G. Kalogiannis, K. Dussan, J. J. Leahy, M. H. B. Hayes, S. D. Stefanidis, C. M. Michailof and A. A. Lappas, 2012. An integrated process for the production of platform chemicals and diesel miscible fuels by acid-catalyzed hydrolysis and downstream upgrading of the acid hydrolysis residues with thermal and catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology* 126: 92-100.
- Hayes, D. J. M. 2013. Mass and compositional changes, relevant to biorefining, in *Miscanthus x giganteus* plants over the harvest window. *Bioresource Technology* 142: 591-602.
- Huang, C.-L., C.-W. Ho, Y.-C. Chiang, Y. Shigemoto, T.-W. Hsu, C.-C. Hwang, X.-J. Ge, C. Chen, T.-H. Wu, C.-H. Chou, H.-J. Huang, T. Gojobori, N. Osada, T.-Y. Chiang. 2014. Adaptive divergence with gene flow in incipient speciation of *Miscanthus floridulus/sinensis* complex (Poaceae). *The Plant Journal* 80(5): 834-847.
- Kacprzak, M., K. Rosikon, K. Fijalkowski and A. Grobelak. 2014. The Effect of Trichoderma on Heavy Metal Mobility and Uptake by *Miscanthus giganteus*, *Salix* sp., *Phalaris arundinacea*, and *Panicum virgatum*. *Applied and Environmental Soil Science* 2014: 506142.
- Kang, K. E., D. H. Park, G. T. Jeong. 2013. Effects of inorganic salts on pretreatment of *Miscanthus* straw. *Bioresource Technology* 132: 160-165.
- Lee, Y. N. 1964a. Taxonomic studies on the genus *Miscanthus*. Anatomical patterns of leaves. *Botanic Magazine (Tokyo)* 77: 122-130.
- Lee, Y. N. 1964b. Taxonomic studies on the genus *Miscanthus*. Relationships among the sections, subsections, and species, part 1.

- Journal of Japanese Botany 39: 196-205.
- Lee, Y. N. 1964c. Taxonomic studies on the genus *Miscanthus*. Relationships among the sections, subsections, and species, part 2: Enumeration of the species and varieties. Journal of Japanese Botany 39: 257-265.
- Lee, Y. N. 1964d. Taxonomic studies on the genus *Miscanthus*. Relationships among the sections, subsections, and species, part 3: Enumeration of the species and varieties. Journal of Japanese Botany 39: 289-298.
- Leung, H. M., Z. H. Ye and M. H. Wong. 2007. Survival strategies of plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi on toxic mine tailings. Chemosphere 66: 905-915.
- Lewandowski, I., J. C. Clifton-Brown, J. M. O. Scurlock and W. Huisman. 2000. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. Biomass & Bioenergy 19: 209-227.
- Li, C., B. Xiao, Q. H. Wang, S. H. Yao, J. Y. Wu. 2014. Phytoremediation of Zn-and Cr-contaminated soil using two promising energy grasses. Water, Air and Soil Pollution 225: 2027.
- Lyubun, Y. V. and D. N. Tychinin. 2007. Phytoremediation in Russia. Phytoremediation Methods and Reviews 23: 423-434.
- Marcotullio, G., E. Krisanti, J. Giuntoli and W. de Jong. 2011. Selective production of hemicellulose-derived carbohydrates from wheat straw using dilute HCl or FeCl₃ solutions under mild conditions. X-ray and thermo-gravimetric analysis of the solid residues. Bioresource Technology 102: 5917-5923.
- Milner, M. J. and L. V. Kochian. 2008. Investigating Heavy-metal Hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a Model System. Annals of Botany 102: 3-13.
- Nsanganwimana, F., B. Pourrut, M. Mench and F. Douay. 2014. Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. Journal of Environmental Management 143: 123-134.
- Peng, K., X. Li, C. Luo and Z. Shen. 2006. Vegetation Composition and Heavy Metal Uptake by Wild Plants at Three Contaminated Sites in Xiangxi Area, China. Journal of Environmental Science and Health, Part A 41: 65-76.
- Picco, D. 2010. Technical assistance for the development and improvement of technologies, methodologies and tools for enhanced use of agricultural biomass residues: energy plants production on unfavorable soils. Energy Plant Report. Central European Initiative, Italy, p. 53.
- Pidlisnyuk, V., L., Erickson, S. Kharchenko and T. Stefanovska. 2014. Sustainable Land Management: Growing *Miscanthus* in Soils Contaminated with Heavy Metals. Journal of Environmental Protection 5: 723-730.
- Purdy, S. J., A. L. Maddison, L. E. Jones, R. J. Webster, J. Andralojc, I. Donnison and J. C. Clifton-Brown. 2013. Characterization of chilling-shock responses in four genotypes of *Miscanthus* reveals the superior tolerance of *M. x giganteus* compared with *M.*

- sinensis* and *M. sacchariflorus*. *Annals of Botany* 111: 999-1013.
- Robinson, B. H., M. Leblanc, D. Petit, R. R. Brooks, J. H. Kirkman and P. E. H. Gregg. 1998. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant Soil* 203: 47-56.
- Robson, P., E. Jensen, S. Hawkins, S. R. White, K. Kenobi, J. C. Clifton-Brown, I. Donnison and K. Farrar. 2013. Accelerating the domestication of a bioenergy crop: identifying and modelling morphological targets for sustainable yield increase in *Miscanthus*. *Journal of Experimental Botany* 64: 4143-4155.
- Rong, C., X. Ding, Y. Zhu, Y. Li, L. Wang, Y. Qu, X. Ma and Z. Wang. 2012. Production of furfural from xylose at atmospheric pressure by dilute sulfuric acid and inorganic salts. *Carbohydrate Research* 350: 77-80.
- Rosikon, K., K. Fijalkowski and M. Kacprzak. 2014. Phytoremediation Potential of Selected Energetic Plants (*Miscanthus giganteus* L. and *Phalaris arundinacea* L.) in Dependence on Fertilization. *Journal of Environmental Science and Engineering A*. 4: 587-595.
- van der Weijde, T., C. L. Alvim Kamei, A. F. Torres, W. Vermerris, O. Dolstra, R. G. F. Visser and L. M. Trindade. 2013. The potential of C₄ grasses for cellulosic biofuel production. *Frontiers in Plant Science* 4: 107.
- Wanat N., A. Austuruy, E. Joussein, M. Soubrand, A. Hitmi, C. Gauthier-Moussard, J. Lenain, P. Vernay, J. Munch and M. Pichon. 2013. Potential of *Miscanthus* × *giganteus* grown on highly contaminated technosols. *Journal of Geochemical Exploration* 126-127: 78-84.
- Wang, D., S. L. Naidu, A. R. Portis, S. P. Moose and S. P. Long. 2008. Can the cold tolerance of C₄ photosynthesis in *Miscanthus* × *giganteus* relative to *Zea mays* be explained by differences in activities and thermal properties of Rubisco? *Journal of Experimental Botany* 59: 1779-1787.
- Weingarten, R., G. A. Tompsett, W. C. Conner Jr and G. W. Huber. 2011. Design of solid acid catalysts for aqueous-phase dehydration of carbohydrates: the role of Lewis and Brønsted acid sites. *Journal of Catalysis* 279: 174-182.
- Yan, J., W. Chen, F. Luo, H. Ma, A. Meng, X. Li, M. Zhu, S. Li, H. Zhou, W. Zhu, B. Han, S. Ge, J. Li and T. Sang. 2012. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *Global Change Biology Bioenergy* 4: 49-60.
- Yu, C. Y., H. S. Kim, A. L. Rayburn, J. M. Widholm and J. A. Juvik. 2009. Chromosome doubling of the bioenergy crop, *Miscanthus* × *giganteus*. *Global Change Biology Bioenergy* 1: 404-412.
- Zhu, Y. M., C. Y. Wei and L. S. Yang. 2010. Rehabilitation of a tailing dam at Shimen County, Hunan Province: effectiveness assessment. *Acta Ecologica Sinica* 30: 178-183.