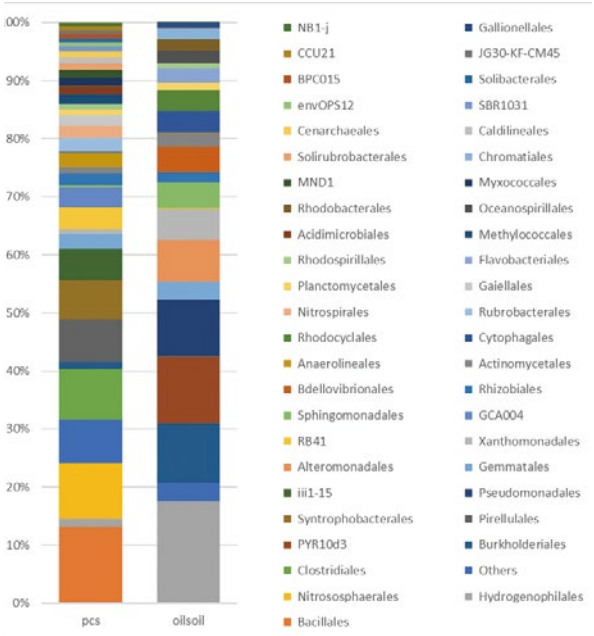
圖五：綠金蘆萃記者會

來自土壤，回歸土壤
—利用微生物分解農廢料

生命科學系\蔣鎮宇

農業是國家國力的根本，人類自1960年代經歷了綠色革命，將農業的產量大幅的提升而養活了更多的地球人口，如果當年寫人口論的馬爾薩斯再世，必定會對地球承載這麼龐大的人口而咋舌，更對所謂「生物資源是有限」的說法加以修飾。然而，即使到了二十一世紀，農業在糧食提供的功能及使命上，並未因為全球化或電子資訊的發達而有轉變，唯一不同的是，現在的農業不再只是單純的日出而做日落而息的農耕生活，而是必須鏈結社會、經濟及環境多面向的複雜機制。全球的農業有5兆美元的價值，代表的是全球消費的10%，以及40%的工作機會，這個看似影響人類經濟深遠的產業，在先進國家的經濟結構中卻是微不足道，這樣的現況隨著氣候的變遷、人口的成長及食品安全的需求，整體產業已經開始被迫尋求更高農業產出的創新方式。其中因為氣候變遷，越來越高的地球年均溫讓授粉的昆蟲北遷(北半球)、病蟲害加劇(尤其受到全球化的推波助瀾)，而造成農產品減產，甚至現代農業越來越倚重農藥及殺蟲劑，這樣的連鎖反應讓我們居住的環境越來越趨劣化，已經直接衝擊到人類的生存。很顯然，數位化科技將漸漸取代傳統的農業，過去幾年農業專家提出許多創新的概念，包括「生態農業」、「漁菜共生」、「垂直農業」乃至「精準農業」，概念及核心技術或有不同，然而目標的設定卻都是一致的，那就是讓新農業生產出更有產值及安全健康的農產品，面對的問題也幾乎是一致



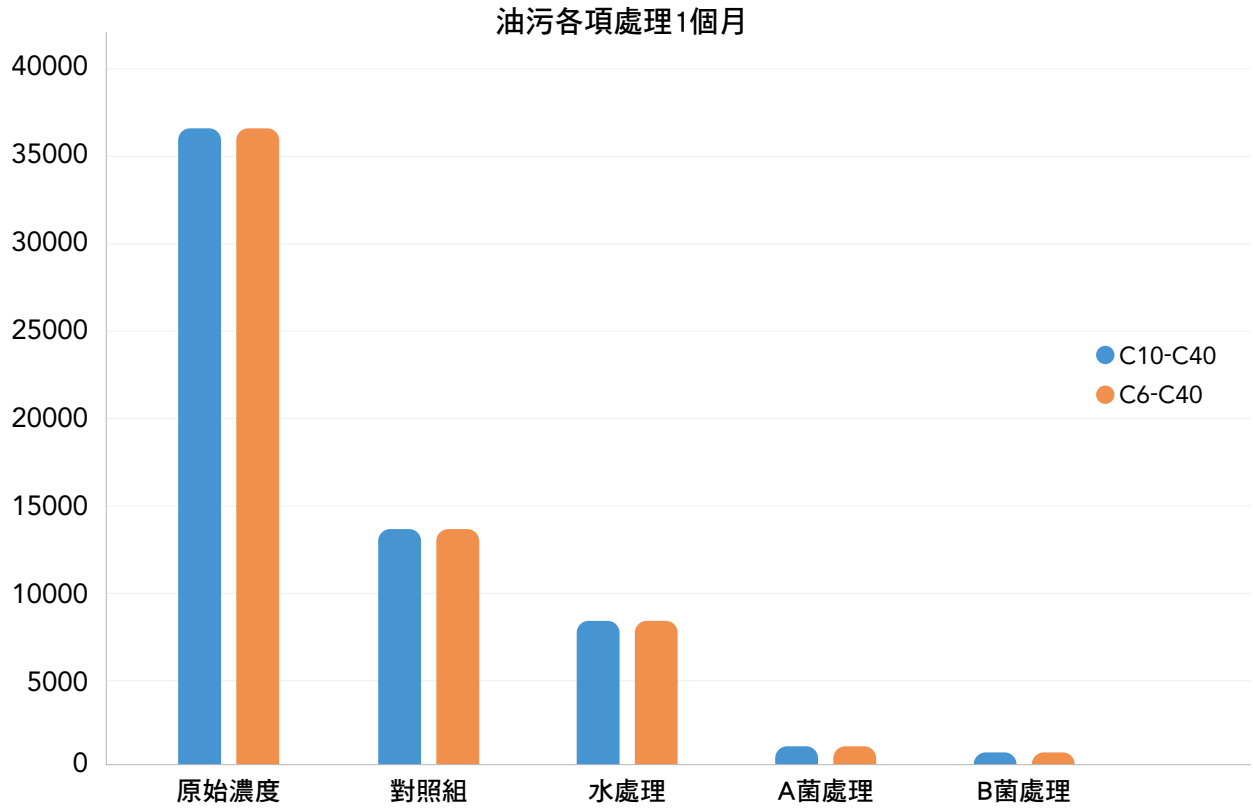
圖一：油汙土壤資料庫部分資料

的，那就是全球暖化、水資源的分配不均、病害的肆虐、過多的化肥及農藥的使用及農業廢棄物處理，農業廢棄物可以分為汙染所造成廢棄物(汙染的農作物及土地)及農業行為的廢棄物(枯枝、落葉、果皮等)，如何處理和再生農業廢棄物是發展永續農業的一大難題。

環境的微生物似乎無所不在，這是許多人對微生物的既定印象，無論在嚴寒永凍的南極以及喜馬拉雅山、在高濃度的橙劑污染的越南土地、或是高溫的溫泉及海底湧泉、乃至車諾比核子外洩污染的土地上，都有它們的芳蹤。主要的原因在於微生物代表的是看不見的生物世界，然而即使孢子可以快速地在風中水中傳播，細菌跟所謂高等的動植物沒有兩樣，有它的地域性，在環境梯度上呈現不同的分布模式，其中環境的逆境，包括高溫、暴冷、污染物(一如輻射物、油污)等，對於多數的細菌而言都是生長與繁殖的限制因子，面臨的即是適應上的問題。這個看不見生物擁有高度多樣性，也因此環境微生物代表的是生物除汙的寶庫，逆境下微生物利用不同的生理代謝機制及策略，阻隔或降解這些有毒的物質，讓細胞免於毒害，許多的研究鑑定出許多相關的代謝路徑上的基因，也獲得實驗的證實。隨著基因體科技的發展以及大數據分析的長足進步，對於微生物在極端環境下生存、適應乃至種化，又讓學者重新燃起了學術的興趣以及尋找解決極端環境的土地或降解污染源的有用微生物的產業商機。

但對於環境微生物以及生物體共生微生物與致病微生物相的解析，往往須仰賴菌種的培養加以鑑定，但生物學者發現有高達95%-99%的種類並無法以一般方式培養，而培養出的菌種是否有具有功能也無法立刻得知，隨著基因體技術的純熟，意味著過往對環境微生物生態學的研究，尤其是所謂”優勢種”的探討有不少來自技術的誤差。隨著次世代定序技術的進步，對於環境微生物的解析已經不再仰賴菌種的培養，利用生物條碼的擴增，環境微生物組成即可透過大量的定序被大規模的鑑定出來，物種的相對豐度也可以被一一解析，仰賴微生物學累積的知識，得以進一步鑑定所謂的有益菌乃致病原菌，以及伴隨的微生物種類，甚而依據其生理生化特性分離及培養出所欲的菌種。整體基因體(metagenomics)分析的長足進步，提供了生物學者探討特殊生態系微生物組成的分析工具，同時也是讓微生物科技能加速產業化的利器。然而metagenomics的分析結果(圖一)屬於商業機密，即使在Genebank 資訊分享的時代，有產業價值的微生物種類及相關分析也必須自己獲得與建構，屬於兵家必爭的領域。

臺灣1970年代的經濟起飛創造產業奇蹟，但也同時將大量的農地轉換成工業用地。50年過去了，臺灣也擠入了已開發國家之列，與日、韓、香港、新加坡齊名，然而回顧這一段經濟發展史，臺灣付出的是整個社會國家的代價，用土地與國民的健康換到了大額的外匯。臺灣從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，使得臺灣生態保育面臨巨大的浩劫，其中包含學甲的廢爐渣、RCA的污染事件、中石化臺南四草戴奧辛及汞汙染，此外像高雄煉油廠、臺北七股調車場、墾丁及龍洞則是油汙外洩的汙染事件。這些環境汙染事件對農業都有極大影響，除了農作物須要完全銷毀外，在汙染尚未去除前，土地都無



圖二：以製劑處理油汙土壤1個月

法再次利用。面對環境的污染，遷移能力高的動物(如人類、鳥類等)可以選擇遷徙來趨避有毒的污染來源，但對於遷移能力低的生物(如蚯蚓、微生物、植物等)便無法逃離，只能以自生能力絕域求生。

現今環保法規的規範，污染土地必須就地整治，並禁止化學淋洗及排放入河川或海域，如何將受　染的土地復原成乾淨土地是目前相當困難的挑戰。目前污染物的主流處理方法為物理性(客土稀釋、汙染物吸附)或化學性(化學物質溶解，高溫焚毀)方法。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　染以及對環境擾動大等缺點。近年來聯合國推行永續發展目標（SDGs），除汙界開始發展生物復育法相關技術，特別在微生物製劑相關研究如雨後春筍般冒出。目前微生物處理的污染主要為有機化合物(總石油碳氫化合物（Total petroleum Hydrocarbon，TPH）、原油、戴奧辛等)，利用多種微生物強大耐受性及多樣化的代謝路徑來快速分解各式有機化合物。蔣鎮宇教授團隊以總基因體技術分析油汙染土菌相，並以自有資料庫比對後成功開發出2組不同的製劑，能有效在1個月內將土壤中濃度16000 ppm的總石油碳氫化合物下降到法定標準的1000 ppm，2個月可降低到300 – 500 ppm，相較對照組(水處理和不處理)都有顯著性差異(圖二)。另外與市面上除汙相關技術相比也毫不遜色(圖六)，由此顯示團隊所開發的微生物製劑具有商業化的價值，也讓臺灣的生物復育法出現全新的道路。

圖三：蘆筍修剪後枝條

圖四：快速堆肥轉換系統及成品

汙染所造成的農業廢棄物相對較為罕見，但農業行為所造成的農業廢棄物卻是每年農民都需面對的問題，最常見的便是每年6月份和11月份行經嘉南平原時，除了隨風飄揚的金黃的稻穗外，農地上一綑綑的稻稈也吸引許多人的目光，除了堆疊成裝置藝術外幾乎毫無用處；咖啡、柚子、龍眼等果樹類樹種需要定期修枝，每年都有上百噸的枝條等待處理，更別提遭到天災破壞掉落的果實也都是農業的廢棄物；以將軍區蘆筍為例，因上市要求所有蘆筍需長度一致，因此採收後必須裁切成相同尺寸，剩下的部分便成為農業廢棄物；另外如木材或竹材加工所剩下的粉末和碎料也都是農業廢棄物。這些農業廢棄物的現行處理方式可分為3大類，分別為燃燒、掩埋跟垃圾丟棄，但這3種方法都有很大的缺點。燃燒方法在早年最常被使用，但是燃燒時產生的大量臭味、二氧化碳及PM 2.5隨著季風飄散於大氣之中，造成嚴重的空氣汙染，近年來由於環保法規的修訂，燃燒法已不被容許在田野之間；掩埋法則是目前農民最常使用的方法，農民將農業廢棄物先放置於田間乾燥(圖三)，之後在耕作時一同掩埋到土中，雖然能減少污染，但在缺乏微生物的協助下，除非有足夠的休耕，未分解完全的廢棄物反而成為下一季作物生長的障礙，對於農業廢棄物的處理只是杯水車薪；另外也有農民將農業廢棄物做為一般垃圾丟棄，被蟲蛀的果物或修剪的樹枝打包當作垃圾送進焚化爐，但這些帶有水氣的廢棄物很明顯地會縮短焚化爐的壽命，也會增加額外的二氧化碳排放。農業廢棄物的問題是影響臺灣農業走向永續農業的重要里程碑，也是不得不面對的問題。

有鑑於此，我們的團隊與新光綠寶合作，針對農業廢棄物處理開發出的快速高溫裂解生物炭器材，並依據總基因體的資料庫共同開發出微生物製劑，製劑中含有多種植物益生菌，除了可用來強化植物根部外，針對難以分解的纖維素加速分解，在7小時內快速農業廢棄物轉化成生物碳堆肥(圖四)。這樣的技術能將各式農業廢棄物轉化為生物炭，如廚餘(果皮、爛掉葉菜類)、植株類(枯枝落葉、修剪後的枝條)和廢材(碎木、木粉、竹粉)。部分的農業廢棄物是具有高營養或具有產業價值，如柚子皮的豐富精油、蘆筍下腳料的多醣體等。針對這類農業廢棄物，計畫團隊將有價值的部分先行萃取，之後可直接利用或搭配微生物發酵來製作商品販賣(圖五)，萃取後的殘留部分則回歸微生物堆肥製作。本項技術將農業廢棄物中的碳固定後再次回歸於大地，除了能減少二氧化碳的排放，同時也開啟農業廢棄物處裡的新章，計畫團隊在安定場域建立示範基地，除了協助農民處理多樣化的農業廢棄物外，也不定時舉辦青農共學課程讓農民親身體驗農業廢棄物的處理。

國際上永續農業已經不再只是口號，而是一股鋪天蓋地而來的潮流，而臺灣的農業也開始逐漸轉型，微生物的重要性也逐漸被重視，不僅僅是在種植的技術上，甚至連農業廢棄物的再利用都是環境永續的一環，計畫團隊藉由團隊開發的多項技術能讓臺灣的農業廢棄物處理符合永續農業的理念，讓自然農業在臺灣能永續發展。

方法	開挖處理法	現地化學氧化法	空氣注入法	本團隊方法
處理時間	1 天 ~ 數月（視面積及深度，不含土壤處理）	處理時間較快，需要反應時間較短	1~3 年	1~2 個月
處理後物質	受污染土壤	視使用之化學藥劑而定	無	無害無機物質
處理成本	1.5 萬元 / 噸（不含土壤處理及再利用）	包括機械設備購置、開挖搬運、化學加藥、操作維修及採樣分析。成本視個案狀況而變動	700~1,750 元 / 噸	3,000 元 / 噸
處理場域	現地挖除（移除土壤須離地處理）	現地處理	現地處理	現地處理
後續污染物	視受污染土壤處理方式而定	逸散氣體、氧化劑、地下水酸化、沈澱性固體阻塞土壤層顆粒間隙等	尾氣排放污染物類選擇設置適當之空氣污染防制設備並定期更換活性炭等耗材	無
處理後果	加，可完全挖除（但挖除之土讓需另外處理）	佳。但須考量土讓與氧化劑的反應性。	佳，但尾氣預進行廢氣處理	佳，殘留量為法定值的 30%(牽涉成本)
其他需求			氣體處理設備	微生物培養槽，水泥攪拌機

圖六：現行油汙處理方式與團隊開發法比較