國立宜蘭大學

農業推廣 季刊 NO.101

國立宜蘭大學農業推廣委員會
通訊總號第 101號
發行人/林世斌
地址：260 宜蘭市神農路 1 段 1 號
E-Mail：aec@niu.edu.tw

農業推廣(季刊)
中華民國 112年12月出刊
主編/賴裕順、陳瑩達
電話：03-9317613

中華民國 86 年 3 月創刊
農業部一補助編印
編輯：劉雅倫
傳真：03-9354152

農林結合之減碳規劃-以時生永續農場為例

國立宜蘭大學森林暨自然資源學系 陳瑩達

一、有機農業的減碳策略與效益

農業是溫室氣體的主要排放部門，透過適當的策略降低溫室氣體排放，減緩溫室效應帶來的負面影響，已是全世界共同關注的議題，聯合國糧農組織(food and agriculture organization, FAO)(2021)也為此提出農林牧業農產品及農地的自然解方(nature-based solution, NBS)行動來因應氣候變遷(見表 1)。例如在農產品的自然解方中，以「改善稻作栽植」的行動調整稻作栽植的環境設施，強化水資源及農業廢棄物循環利用的技術與基礎設施的建設，可以避免資源浪費，同時有益於氣候、水及土壤。而「生物炭」及「農地養分管理」的行動，係減少化學肥料的使用、促進土壤的碳儲存機制。有機農業對於環境與生物多樣性的維護亦頗為重視，因此 FAO(2021)也提出了農地種樹的概念，透過種樹作為圍籬、邊界等概念來創造農場棲地價值，促進生物多樣性。這些行動概念也與有機農業的永續發展不謀而合。相關研究指出，若欲減緩農業部門的溫室氣體排放量，必須先確認碳排放的來源。相關研究以農業投資價值鍊的概念將農業部門的上下游進行分類，並導入碳盤查範疇的概念，以利計算碳足跡。由圖 1 可見，農業部門的上游涵蓋範圍大概是關鍵的農業投入，例如農業設備、肥料、動植物遺傳學的提供等投入，下游涵蓋則是食品、農業副產品的加工、分銷，以確保全世界的穩定供給，至於農場則是價值鏈的核心。WBCSD(2022)基本上將農業價值投資鍊從上游到下游主要分為農業投入、農場、銷售、產品投入、產品加工及終點這六個過程。農場作為整個價值鏈的核心，只要在農場本體運作過程產生的溫室氣體排放，都被視為範疇 1 和 2，其中以直接或間接能源的使用為最大宗。而上下游例如農產品作為食物銷售、推廣、農產品的加工、加工農產品使用與服務等農場本體以外的各類過程，均視為範疇 3。



表 1、自然解方的改善功效及效益

農產品的自然解方		
行動	功能影響	效益
1. 優化放牧	改善動物畜牧集約度、牧場管理及餵養方式來減少 GHGs	C,B,W,S
2. 改善稻作栽植	調適水資源管理技術來改善排水系統、施行農業殘餘物整合	C,W,S
3. 生物炭	增加生物炭使用來強化固碳	C,S
4. 農地養分管理	減少超量的化學肥料與添加劑，消弭增加化肥使用的動機	C,B,W,S,A
5. 保育農業	休耕期間種植其他的覆蓋作物，轉為減少耕作或完全休耕	C,W,S,A
6. 農地種樹	提倡農地整合種樹來增加棲地價值	C,B,W,S,A
7. 人工林改良	對於集約式管理的生產林，採取延長伐採輪伐期	C,B,W,S,A

註: 1.譯自 FAO(2021)。

2.C 表示氣候，B 表示生物多樣性，W 表示水，S 表示土壤，A 表示空氣。

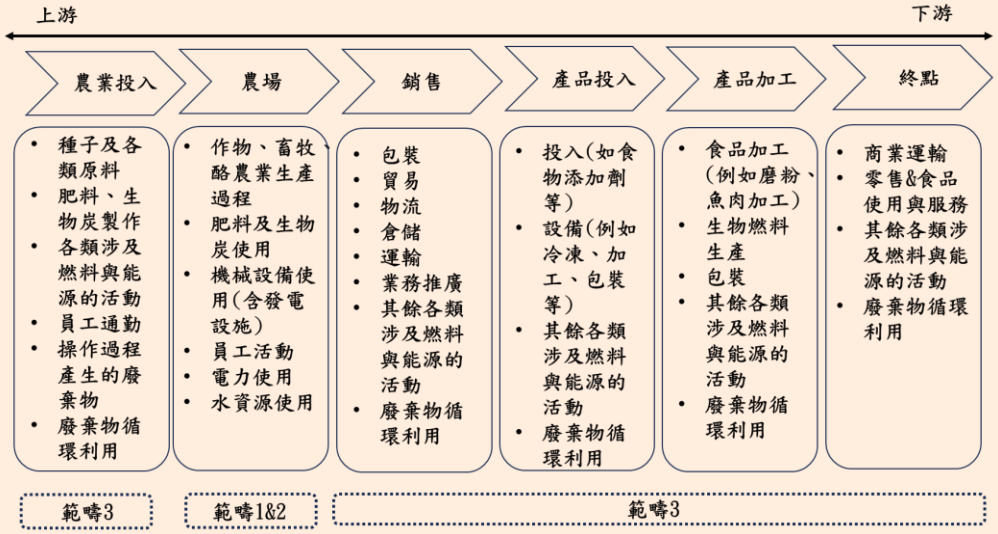


圖 1、(修改自 WBCSD(2022)、Miao et al.(2023)。)

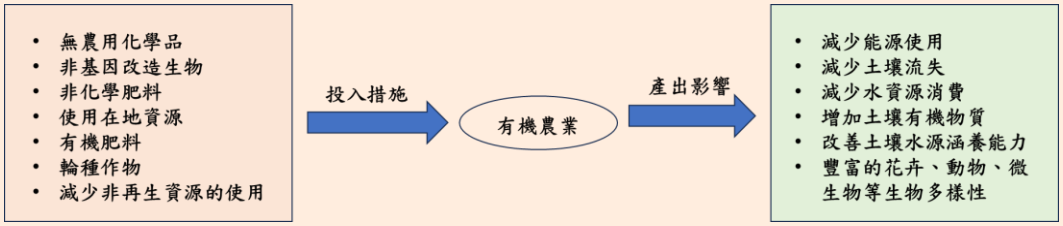


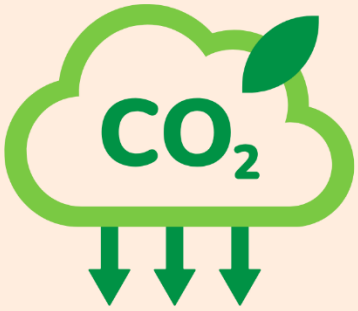
圖 2、有機農業投入產出對環境的影響。(修改自 Gamage et al. (2023))

隨著食品安全、生物多樣性及溫室效應等環境議題的重視，世界各國均認為發展有機農業是因應氣候變遷的重要策略。在 1980 年代以前，全世界有機農場的數量微乎其微(Lockeretz, 2007)，但在世界各國的努力下，有機農產佔全球農業用地面積已超過 1%，部分已開發國家的有機農業面積甚至高於 1%，且全球有機農產品的銷售金額已達 1,000 億美金以上(Meemken and Qaim, 2018；Reganold and Wacher, 2016；Willer et al, 2020)。諸多專家學者的研究指出，適當的有機農業措施有益於減緩氣候變遷。如圖 2 所示，有機農業的投入措施主要有幾個要點，分別是不使用農用化學品、不使用基因改造生物、不使用化學肥料、盡量使用在地資源、使用有機肥料、採取作物輪種作業及減少使用非再生資源，若依照上述原則施行，則可以減少能源使用、土壤流失及水資源的浪費，同時也可以增加土壤中的有機物質、改善水源涵養與生物多樣性(Gamage et al., 2023)。

相關研究顯示，耕作物種的選擇、有機肥料的使用、輪種方式改變等現地施作因素會改變土壤碳含量或整體碳足跡，意即控管圖 1 中上游範疇 3 到農場本體範疇 1 與 2 的碳排量，對於溫室效應有正面影響。例如美國華盛頓州小型有機蔬菜農場的研究針對馬鈴薯、花椰菜、乾灌木豆、冬南瓜、夏南瓜、甜菜、辣椒和洋蔥等作物進行生命週期評估，分析個別作物的碳足跡與熱點。研究結果發現，上述作物的碳足跡數值介於每年每公頃 1.68 到 2.67 噸二氧化碳當量之間，花椰菜的碳足跡最高，其次是馬鈴薯、胡椒，最低的是甜菜。而農場的碳排放熱點主要來自於燃料使用（38%）、施肥（18%）、土壤排放（12%）和灌溉（11%）。後續模擬以生質柴油取代化石燃料的情境時，則農場的碳足跡總量可以減少 32%(Adewale et al., 2016)。農作物混種也可以增加土壤有機碳含量，因此作物複種指數(multiple cropping index)越高，碳足跡越低。另有研究在中國華南地區設計了三種複種系統，包括玉米−水稻−休耕（MRF）、玉米−水稻/黑麥草×紫雲英混合物（1:1）（MRM1）和玉米−水稻/黑麥草×紫雲英混合物（1:2）（MRM2），並在 2021 至 2023 年進行試驗，研究結果發現 MRM1 和 MRM2 的作物生產力與 MRF 相比，分別提高了 14.97%和 14.01%，其中 MRM1 的增幅顯著。此外，作物複種指數越高，碳足跡越低，主要原因是因為 MRM1 和 MRM2 顯著增加土壤有機碳含量的緣故。因此，華南珠江三角洲地區在冬季引入玉米-水稻複種系統可以提高作物產量，增加經濟效益，降低碳足跡(Cai et al., 2023)。

肥料與耕作方式的搭配也對農場的碳排放有很大的影響。例如有研究指出耕作方法和氮肥的使用對土壤有機碳（soil organic carbon, SOC）的吸存量和作物的產量有很大的影響，對碳足跡計算影響甚鉅。在中國北方的實證研究以冬麥-夏玉米耕作系統進行了 6 年的田間試驗，設計了三種耕種方式及三種氮肥用量，這三種耕作方式中，第一種是以旋耕機旋耕 2 次，作業深度 10 至 12cm 的連年旋耕方式(RT)，第二種是先深耕一次，作業深度約 25





至 30cm，接著再以旋耕機旋耕 2 次的連年深耕方式(DT)，第三種是連續兩年的 RT 搭配一年的 DT 耕種方式(TT)，而氮肥的三種用量則是每公頃 300 kg (N300)、225 kg (N225)及 165 kg (N165)，探討耕種方式與氮肥組合對土壤有機碳含量、溫室氣體（GHG）排放量和農作物產量的影響。研究結果發現，RT 的耕種方式不管搭配何種氮肥用量，在 0 到 10 公分的土壤中，固碳效果最佳。但是隨著深度增加，在 10 到 30 公分的土壤層中，DT 和 TT 分別比 RT 每公頃多吸存了 2.87 到 3.82、1.85 到 2.53 Mg 的土壤有機碳(SOC)。而增加氮肥施用比例和施行 DT 會導致溫室氣體排放總量明顯增加。因為氮肥生產與運輸是最大的貢獻者，佔計算農場溫室氣體排放量的 40.4 到 47.0%，其次則是農場內使用氮肥和耕作後直接排放的一氧化二氮(N2O)和甲烷(CH4)排放(23.5 到 30.5%)。而施行 TT 耕種方式搭配 N225(TT-N225)的施肥量可以顯著顯著降低碳足跡，每年每公頃比 DT-N225 低 0.49 Mg CO2 eq，比 RT-N300 低 1.87 Mg CO2 eq，同時可以維持高生產力，故此法可能是中國北部地區較佳的農業策略(Gui et al., 2022)。另有研究結果也證明有機肥料取代非有機肥料的策略對於土壤有機碳(soil organic SOC)的動態有顯著影響，可協助集約化蔬菜生產對抗土壤退化及氣候變遷。相關研究者在氮(N)含量相等的前提下設計了純礦物肥料(SN)、摻入 20%有機肥料（M1N4）、摻入 50%有機肥料(M1N1)和摻入 100%有機肥料(SM）等四種施肥處理，並在中國長江三角洲沖積平原進行了五年的田間試驗，研究結果也證明土壤有機碳含量有顯著增加，尤其是 M1N1 的處理。因為有機物質增加了土壤中粗團粒(macroaggregates)的比例、木質素酚(lignin phenols)、烷基碳(alkyl-C)群等物質。五年的實驗結果顯示每公斤蔬菜的碳足跡大約在 1.82 至 2.58 公斤的二氧化碳當量，主要排放源是運輸和肥料。但是全有機肥處理(SM)卻反而使每公斤蔬菜增加 0.54 公斤的二氧化碳當量。M1N1 的碳足跡最低，每公斤蔬菜為 1.82 公斤二氧化碳當量。總體而言，這種以有機肥料取代 50%礦物氮的方法是增強土壤碳穩定、促進碳累積並減輕亞熱帶地區與密集蔬菜生產相關的碳足跡的可行策略(Xu et al., 2024)。

為了有效評估農業減碳的策略與效果，農業領域的各類經營者如消費者、貿易商和食品工廠而言，應用圖 1 建立碳足跡（Carbon Footprint, CF）生命週期的概念作為評估環境友善的工具，可確保其在生產管理的過程中能夠有效控管能源投入與排放的平衡。因此，建立一項產品或一個事件的生命週期（Life Cycle Assessment, LCA）來評估碳足跡，並且找出排放「熱點（hotspots）」，可協助農業管理決策者判斷生產過程中如耕作、運輸、機械或化肥等環節是否為關鍵的碳排放來源，並進一步優化生產過程與成本，達到降低農產品碳足跡的目的（Hartikainen et al., 2014；Kehagias et al., 2015；Clune et al., 2017; Michos et al., 2018）。農業的熱點來源視狀況而定，例如不同種類農作物的熱點有差異，集約農業生產與使用化學肥料的過程就是重要的

熱點來源（Hillier et al., 2012；Litskas et al., 2019），農地耕作、灌溉和運輸作業所使用的能源生產與消費過程，也是排放的重要熱點來源（Kaltsas et al., 2007; Kavargiris et al., 2009; Litskas et al., 2017; Michos et al., 2018）。

為了達成農業減碳的策略，農場會有不同的措施來減少化學肥料使用、化石能源燃燒等排碳行為，轉而施用有機肥料、太陽能、智慧監控、省水設施及種樹等行動來減緩農場的溫室氣體排放。本文即以時生永續農場及其旗下相關農場設施為例，介紹農場在節能減碳的實際措施，以供國內業界之參考與交流。

二、農林業的減碳策略

(一)智慧低碳溫室控管

如圖3所示，時生永續農場面積約8公頃，位於官田區南廍段南318區道1.2公里，現地有6座日治時期建立以埤塘為基礎之灌溉、排水系統，農場本身亦有自己的生態池可用以調節農地用水，輔以周遭作為邊界或緩衝帶的景觀造林，間接建構並維護了在地的生物多樣性。此外，農場本身緊鄰國道1號及3號系統，讓農場具備了都市園藝農場及整合運輸的要件。

農場在建立之初，必須到現地進行場勘及蒐集相關資料，了解在地土壤、水質、風向、雨量、排水系統及採購運輸路線，並進行種源收集與試種，方能做出適當的規劃藍圖，減少農場各類成本負擔。例如溫室的溫度控制對於產量的影響相當大，因此溫室的架構必須考量安裝抽風機來進行排風、灑水系統灌溉同時降溫，但是這些操作若沒有適當規劃，就會面臨使用許多資源卻達不到節能減碳效果的情況。而為了減少資源使用，如圖1時生農場的溫室排列可發現，這些溫室的排列方向一致，此係觀察現地風向後，將溫室的排列方向及間距設計好，利用自然風力讓溫室通風降低溫度，減少抽風機電力能源的使用。而農場生態池及景觀林木強化了空氣的流動，對於溫度的調節也起了一定的作用，必要時也在乾旱季節提供調度水源的彈性。

除了依照現地現況調整資源與空間的配置，時生永續農場也利用智慧科技輔以節能設施來監測並調整溫室的溫溼度，例如圖2所示，透過手機的監控軟體，可即時了解溫室的現場數據如室內溫濕度、室外風向與光度等資料，之後以遠距操控灑水設施來調節溫室設施以降溫或灌溉，而灑水設施也採用節水設施來進行大面積灌溉，避免水資源的浪費。

然而，智慧監控與操作設備可有效幫助農場經營者降低人力、電力、水等資源的使用，達到節能減碳的效果，但若能從根本上盡量降低設備操作的使用，則對節能減碳的效果更有幫助。有鑑於此，時生永續農場李惟裕場長團隊在經歷幾年的經驗觀察與參照相關理論後，設計出專利溫室(見圖5)，由屋頂的特殊設計讓溫室內通風對流迅速降溫，不需要使用電力風扇來排風降溫，以此真正達成節能減碳的效果。





圖3、時生永續農場全貌



圖 4.智慧監控系統

(二)農地隔離帶種樹

如表 1 農產品解方列出的農地種樹行動，農場利用種樹作為柵欄、邊界、隔離帶，可代替鋼筋、水泥或塑膠等高耗能產品，同時達到碳保存與碳替代的效果。時生農場在 2015 年草創，但在 2008 年左右才開始種樹，並於 2022 年左右茁壯茂密(圖 6&7)。經時生永續農場李惟裕場長團隊以森林測計學的標準方法測量農場範圍內的樹木後，確認農場總計有 292 株樹木，其中有 249 株小葉欖仁、37 株黑板樹、桃花心木 3 株、黃連木 2 株及茄苳 1 株。之後，團隊再以計算國家溫室氣體清冊採用之材積計算公式、密度轉換係數、根莖比係數及碳含量轉換係數等資料，計算 292 株樹木之碳匯。計算結果發現，在 2008 到 2022 這 13 年間，農場 8 公頃內栽植的景觀或隔離樹木總計吸收了 114 公噸的二氧化碳，平均每年儲存約 8.7 公噸的二氧化碳。若以環境部造林方法學申請驗證，則農場可將獲取的碳匯量用以抵免農場碳排放量。相較於純粹的土地造林，農場以隔離帶、景觀等概念種樹所獲取的碳匯量相對低許多，但在農場經營管理的 SDGs 永續發展主軸上能對環境與生態更有意義。





圖 5、專利溫室





圖 7、生態池畔景觀樹



2008



2022

圖 6、時生農場創立前後期空拍圖

三、結論

整體來說，聯合國與世界各國早已提出各種農業因應氣候變遷的策略，這些策略的原則均不外乎表 1、圖 1 及圖 2 所示之概念。然而，每個地區的農場都是一個個案，必須要從各種農業減碳措施中找出最適合的農業低碳管理模式。而在病蟲害、強降雨、乾旱、颱風等天災的影響下，有機農業不似傳統農業可利用化學藥劑、肥料、生長激素等方式減少災害對產量產生的衝擊，要找出適合的有機農業低碳管理模式更為不易，但是只要秉持著「簡單」的原則下去規劃，把有機農場整體運作流程化為生命週期計算碳足跡，找出重要的熱點排放源加以改善後，應可有助於達成有機農業節能減碳之目標。