

菇類與淨零

農試所植病組 余祥萱 呂昀陞

一、前言

氣候變遷導致乾旱、強降雨及高低溫等極端氣候頻傳，連帶對自然生態和社會經濟層面產生負面影響。氣候變遷主要和溫室氣體排放增加有關，包含二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化碳 (N₂O)、氫氟烴 (HFC)與全氟碳化物 (PFCs)等，由於此些氣體於大氣中滯留並形成溫室效應，因而導致地球表面溫度上升 (Olivier and Bakker 2000)。為因應氣候變遷所帶來的影響，聯合國195個成員國於2015年12月12日通過《巴黎協定》，盼能透過降低溫室氣體排放、推動可再生能源、提高能源使用效率，逐步達成溫室氣體零排放的目標，減緩氣候暖化所造成的衝擊。我國為呼應全球淨零趨勢，於2021年宣示將藉由推動「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」及「社會轉型」四大轉型策略，並配合12項關鍵戰略，期能逐步實現2050淨零轉型之政策目標。菇類為常見的食材來源，含有豐富的蛋白質、膳食纖維與維生素，因此深受消費者喜愛。

依據美國菇類中心 (American Mushroom Institute)統計每生產1英鎊重的洋菇，需1千瓦小時 (kWh)的電力和1.8加侖(gal)的水，並排放0.7 磅 (lbs)的CO₂ (SureHarvest 2017)。根據吳等人(2024)報導指出於農業生產體系中，以稻米、小麥和玉米之碳排放最高，其中產地碳足跡分別為1.33、0.83、0.60 kg二氧化碳當量。由此可知，菇類栽培過程相較其他作物更為環境友善，雖仍無法避免溫室氣體的排放，但作為蛋白質營養來源，已經比傳統肉類減少許多。現今淨零議題深受重視，各個產業皆投入相關研究，而菇類當然無法置身其外，因此本文將針對菇類與淨零之關聯進行說明。

二、淨零碳排概念與策略

「淨零碳排」係指於特定範圍或地區內，人為碳排放可被抵銷或完全消除，使總碳排放量為零。而為達此目標，執行策略主要可分為碳中和、碳淨零及負碳排等3個概念 (Haszeldine et al. 2018)。碳中和為透過減碳手段或碳補償機制，如植樹造林、使用再生能源(如風力或太陽能)和節能減排等形式，抵銷難以避免的碳排放；碳淨零則為藉由對環境友善的技術或方法，減少所有溫室

作者：余祥萱助理研究員
連絡電話：04-23317516

氣體之排放，實際將其自大氣中移除，如碳捕捉、碳封存與改進生產過程等；負碳排的概念則是期盼所使用之技術或方法所減少的二氧化碳大於所排放之數量。目前越來越多的國家、企業和組織正在制定並實施淨零計畫，以應對氣候變遷所帶來的問題，亦有部分國家開始施行碳權交易體系，藉由購買和出售碳權額，來鼓勵減排二氧化碳以實現淨零之目標。

三、菇類與碳中和

為配合我國2050年淨零碳排之目標，菇類栽培時所產生之CO₂勢必須導入更廣泛的政策方法或新興技術來降低。近年來綠能產業之發展，太陽能已被納入發展範疇。而菇類之菌絲生長時，喜好陰暗的環境，且出菇階段僅需微弱之散射光，因此整體栽培過程並無需過多之光線照射。基於此特性讓菇類

栽培可與光電產業結合，於合法申請之菇類設施屋頂，附屬架設太陽能板（圖一），則可將太陽能板所蒐集之太陽能轉換成菇類栽培過程所需之電力能源，顯現「發電自用」的精神，方可達到節能減碳之效果，並提升我國能源自給率。以香菇栽培設施為例，目前台灣香菇合理經濟栽培規模約為2分地以上，而根據綠能業者估算發電1度(kWh)需3~4坪太陽能，因此若將2分地皆覆滿太陽光電板，則該地每小時即具有可產生195.6度電量之能力。另依經濟部能源署的統計顯示目前香菇大宗產區台中市平均每天日照時數為3.5小時，因此換算後一年約可發電產生25萬度電力左右，約等於減少123噸的碳排放(引用經濟部能源局公告111年電力排放係數進行計算)。其中農民需特別注意，倘若設施所產生之光電是依躉購電價販售給台電或其他公



圖一、依農業設施容許規定合法於菇舍屋頂架設太陽能板。

司，則不屬於發電自用，因此相關碳權係屬於購電單位所有，未來恐將無法藉以獲得減碳之效益。此外菇類設施附屬綠能設施與一般溫室之規範不同(一次施工二次審查)，菇類生產設施若欲結合光電系統，則必須遵守農業設施容許使用審查辦法的相關規定：須先取得菇類農業設施容許資格後，才得於不影響農業設施用途及結合農業經營使用之前提下，向縣市政府提出設置屋頂型綠能設施，並經查核具有農業經營實績，再依政府同意書於溫室上方進行太陽能施作，方符合二次施工二次審查。

先前伊朗之研究指出，於洋菇生產時，低效率之能源使用，會使整體栽培過程產生 $32.86 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$ 之排放，然而高效率處理組，則僅排放 $23.84 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$ ，相對可減少27.44%，由此可知透過有效管理柴油燃燒與電力消耗將可大幅降低栽培過程中之 CO_2 產生 (Ebrahimi

and Salehi 2015)。因此為更有效的使用能源，菇類栽培過程除可透過更換節能設備，亦可藉由電力智能監測系統，即時掌握能源使用狀況，以擬定高效電能使用策略，並同時依據不同氣候條件，制定換氣及製冷時間，進一步開發符合菇類生產所需之節電措施。

此外菇類栽培所需之介質通常以有機物質組成，例如木屑、稻草及廢棉等，而介質於生產結束後則可轉化為農業資源物。我國菇類產業發達，每年產生約40萬公噸之栽培後介質，目前多以堆肥方式轉為有機肥料 (圖二)，而此些肥料施用於田間，即可將碳固定於土壤中，減少大氣中之二氧化碳含量。此外木屑與稻草具有高比例的碳素源，因此亦可應用於生質燃料之開發，並透過不同的處理流程，如氣化、發酵或直接燃燒，轉換為生物天然氣、生物柴油或生物質電力等之能源，從而充分利用資源並提高循環經濟價值 (Leong et al. 2022)。除上述方式外，近年亦有研究將菌絲體成型技術導入菇類栽培後介質中，並開發出可取代塑化製品之生物性材料，降低石化原料對環境之污染與製造過程所產生之碳足跡 (Almpiani-Lekka et al. 2021)。另因養生風潮與動物福祉觀念盛行，植物肉市場快速成長，菇類由於具有肉質口感與特殊風味，因此亦被視為植物性的肉類替代品之一。傳統肉類生產對環境影響較大，包含動物排放、土地使用和水資源消耗，而植物肉的生產過程並不涉及動物飼養和屠宰，



圖二、菇類栽培後介質多以堆肥方式轉為有機肥料。

因此其所產生的溫室氣體較少，亦有助於減少溫室氣體的排放。因此菇類產業只要能透過新技術的引進與異業結合，是有潛力能協助達到碳中和之目標。

四、菇類與碳匯

碳匯 (carbon sink) 為能夠固定和儲存大量二氧化碳的負碳場域或生態系統，於對抗氣候變遷中扮演關鍵角色，其中森林、土壤及海洋是現階段被認為較具潛力的三大領域 (Reay et al. 2008)。依據我國「國家溫室氣體排放清冊報告」可知，國內目前僅將森林納入溫室氣體排放移除源，而農業部林業及自然保育署第4次全國森林資源調查報告指出台灣森林每年約可移除2,185萬公噸CO₂，約可抵減國內排放量7%。為提升森林碳匯對淨零排放之貢獻，目前我國農業部林業及自然保育署對森林碳匯之管理策略主要可分為三項：(一)增加森林面積：於國有林、海岸林及山坡地等場域進行森林復育或造林作業，並排除超限利用林地之情形；(二)加強森林經營：活化人工林及老化竹，另利用生態撫育的概念，增加生物多樣性與碳儲存量；(三)提高國產材利用：促進國產木材或竹材之使用，開發環境友善之林木產品，將環境中的碳盡可能儲藏於相關產品中，同時開發剩餘木竹材之再利用技術。而林木固碳能力主要和林木之材積、絕乾比重與碳含量比例有關，因此勢必須提高森林復育率，才得以增加森林碳匯的固碳能力。目前已發現部分森林性菇類與樹木存在共生關係，此類菇類又稱為

菌根菌，如：松露、松茸及牛肝菌，相關機制為菇類促進樹木生長，而樹木透過光合作用吸收二氧化碳，並將碳轉化為有機物，再將一部分碳透過根系傳遞給菇類，形成碳匯 (Thomas and Vazquez 2022)。加上菇類屬於腐生性生物，通常生長於野外之「腐爛木材植物殘骸」中，倘若應用菇類將森林中之有機物轉化為腐植質等儲存於土壤，亦達到另類碳捕捉的效果 (Six et al. 2006)。此外樹木於生長20年後，其生理特性漸趨成熟，進而樹木之光合作用能力下降，無法吸收更多的碳 (Unwin and Kriedemann 2000)，因此其對碳儲存之貢獻有限，需進行疏伐作業，以強化森林碳匯之永續發展。而疏伐下之林木則可透過菇類生產，創造農民收益，所產生之栽培後介質再透過製作成堆肥或生物碳之方式，施用於田間，使其達到土壤碳匯之功效。

五、結語

為因應氣候變遷，實現淨零碳排儼然成為各國致力推動的目標，雖已提出諸多重要政策與施行方法，然而唯有透過跨域合作與多方面整合，方能使減碳效益最大化。菇類栽培與畜牧業或其他作物相比，更具有和淨零碳排概念相輔相成的潛力，主要策略包含整合再生能源，如太陽能，以提高能源自給率，同時結合智能監測技術等節能措施，可有效降低菇類栽培過程之碳排，而目前日本長野市已將菇類栽培納入淨零策略的執行項目中 (Nagano City Biomass Industry City Concept)。此外菇類栽培後的介質除

可作為堆肥外，近年來更可轉化為生質燃料，或者應用菌絲體成型技術製作生物性材料，不僅可作為綠能的來源，其所產生之剩餘物還可提升土壤固碳之能力。而菇類與樹木之間的共生關係在森林碳匯中亦扮演關鍵的角色，對於森林碳捕捉的策略具有重要影響。因此透過多面向的策略整合，菇類栽培不僅可減少碳排放，同時有助於建立永續生態體系，以應對氣候變遷所帶來的影響。總體而言，菇類產業與淨零碳排間具有潛在的協同效應，相信可對產業永續發展和環境保護做出寶貴的貢獻。

六、參考文獻

- Almpani-Lekka, D., Pfeiffer, S., Schmidts, C., and Seo, Si. 2021. A review on architecture with fungal biomaterials: the desired and the feasible. *Fungal Bio. Biotechn.* 8:17.
- Ebrahimi, R., and Salehi, M. 2015. Investigation of CO₂ emission reduction and improving energy use efficiency of button mushroom production using Data Envelopment Analysis. *J. Clean. Prod.* 103:112-119.
- Haszeldine, R. S., Flude, S., Johnson, G., and Scott, V. 2018. Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. *Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 376:20160447.
- Leong, Y. K., Varjani, S., Lee, D.J., and Chang, J.S. 2022. Valorization of spent mushroom substrate for low-carbon biofuel production: Recent advances and developments. *Bioresour. Technol.* 363:128012.
- Olivier, J. G., and Bakker, J. 2000. Historical global emission trends of the Kyoto gases HFCs, PFCs and SF6. SF6 and Environment: Emission Reduction Strategies.
- Reay, D. S., Dentener, F., Smith, P., Grace, J., and Feely, R. A. 2008. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nat. Geosci.* 1:430-437.
- Six, J., Frey, S., Thiet, R., and Batten, K. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:555-569.
- SureHarvest. 2017. The mushroom sustainability story: water, energy, and climate environmental metrics.
- Thomas, P. W., and Vazquez, L. B. 2022. A novel approach to combine food production with carbon sequestration, biodiversity and conservation goals. *Sci. Total Environ.* 806:151301.
- Unwin, G. L., and Kriedemann, P. E. 2000. Principles and processes of carbon sequestration by trees. Research and Development Division State Forests of New South Wales.