

淺談太陽光電溫室栽培研究現況- 以萵苣為例

一、前言

為符合世界潮流對綠能產業的重視，政府正積極思考及運作綠能產業與農業結合的可能性，近來推動於不利耕種或受地層下陷、汙染影響的地區，架設非農業利用的光電設施，另於農業生產用溫室上方設置光電設施，同時進行種菜養電，希望利用有限的空間創造出農產品及供電營收，這種新潮的概念令人對這種產業發展帶來美好的憧憬，但在投入之前，必須先來了解什麼是太陽光電溫室？以及其應用於農業生產之情形與造成的影響。

二、太陽光電溫室介紹

光伏發電板(photovoltaic panel, PVP, 又稱太陽能板)在農業上的運用最先於1982年提出，於21世紀初運用在小部分溫室屋頂，用來發電供應如通風系統之低耗能的設備。太陽能板架設方式可分為地面型和屋頂型，以運用在台灣農業為例，地面型太陽能板(圖一)架設於不利農耕之土地，屋頂型太陽能板則設置在農業設施(如溫室)，依規定需有農業

農試所鳳山分所 李香誼

經營之事實。南歐曾經於農地大量發展大型地面型太陽能發電設備，對農業生產造成威脅，引發當地農民抗議，使得政府相關單位對這方面的發展有所警覺。因此，Dupraz等人於2010年提出農業生產結合發電系統的概念，並賦予農電系統(Agrivoltaic systems, AVS)的定義，其定義為「同時同地混合太陽能板和作物的系統」，有助於調和糧食安全及綠能供應，為農電共享的概念。

三、太陽能板架設影響作物生長之潛在問題

值得注意的是在使用太陽能板屋頂發電的情況下，可能會因板子覆蓋造成部分或斷斷續續的陰影，出現光量減少の問題。Yano等(2010)之研究指出太陽能板的排列方式會影響陰影的分布，比較棋盤式排列(checkerboard)與直線式排列(straight-line)可發現，棋盤排列形成之陰影於單日內間歇投射在同一位置、投射的陰影較寬，直線排列情況則會使陰影長期分布於相同位置；天氣晴朗情況下，此兩種排列方式之發電量無顯著差異，但棋盤式對作物生產影響較小，因此作物栽培利用上可參考棋盤排列(圖二)。

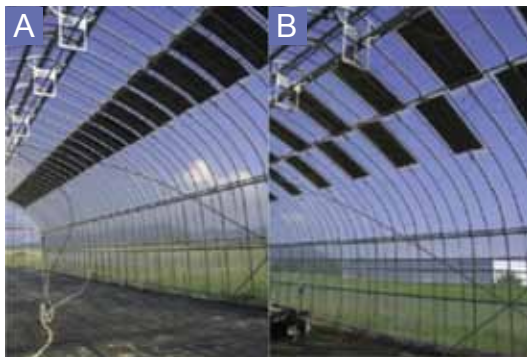
作者：李香誼助理研究員
連絡電話：07-7310191-707

另外，太陽能板設置的方向也與所在地緯度方位有關，為了使作物生產受到最小影響，且兼具充足發電量之前提下，太陽能板架設的位置需考慮周延，以北半球南北向溫室為例，太陽能板架設在溫室北端會有最小陰影；若東西向溫室將太陽能板面南，雖適合發電，但太陽能板產生的陰影對作物生長影響較大。由於台灣地處北半球，南面的受光面積較大，若考慮最大發電量則需將太陽能板面南設置，傾斜角度約 $22^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 。

作物因溫室內太陽能板部分遮蔽，產生光線不均勻的狀況而影響其生長，有研究指出可藉由太陽能板內側鋪設散射膜(F-clean diffuse)來改善，藉由散射膜



圖一、地面型太陽能板。



圖二、太陽能板排列方式：直列式(A)、棋盤式(B)。

提高光線的均勻度並使植株下層也能獲得陽光，增進 CO_2 的固定。

四、太陽光電溫室栽培之候選作物

太陽能板下會有光線較不足或不均的問題，因此栽培作物的選擇需考慮到作物本身對光的需求：例如光補償點及光飽和點。光補償點為呼吸作用速率等於光合作用速率時的光強度，當光強度大於光補償點時，植物由呼吸作用轉而進行光合作用，由消耗變成累積有機物；隨著光強度提升，植物光合作用速率會增加，但到特定光強度時，無論光強度如何增加，光合作用速率也無法提升，此為光飽和點。光飽和點低的作物，於較低光強度下即能達到作物本身最大的光合作用速率。因此，若要於太陽光電溫室栽培作物需從光補償點及光飽和點較低的作物著手。以Tani等(2014)研究為例，其試驗的光電溫室光線遮蔽率約50%，剩下光強度約 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可試種較適應低光環境的高苣、菠菜、茼蒿、不結球白菜等蔬菜作物(表一)，需光性較高的作物目前研究相對較少，且作物不同品種間也會有光需求的差異，未來還有待進一步試驗評估。

五、太陽光電溫室栽培高苣之研究情形

1. 高苣生產

Tani等(2014)的研究發現，夏秋季於太陽光電溫室內搭設散射膜栽培水耕高

莖，雖造成光合作用速率下降，植株的乾重與對照組比較仍相當；現有的文獻提到光電溫室之產量與一般溫室栽培無差異，然而數據中均未提到對鮮重的影響，對農民來說，鮮重多寡是很重要的生產指標，且產品之含水量會影響消費者食用生鮮莖莖的口感。

評估產品外觀，Marrou等(2013)認為成熟葉之葉面積與葉乾重比(SLA=leaf area/leaf dry weight)於遮蔭情況下顯著較高，而SLA與葉片厚度具有高度負相關性，據此推測葉片厚度之減少由遮蔭造成，而成熟葉的長寬比並不受影響。但Tani等(2014)則認為太陽能板遮蔭造成葉片長寬比變高、葉片變窄，可能是較低的光量造成植株徒長的結果。在風味方面，於設有散射膜的光電溫室下栽培之莖莖整體的接受度較高。

綜合來看，文獻中並無展示莖莖外觀比較的圖片，我們無從得知其試驗數據與實際情形的差異。而目前國人對葉菜類硝酸鹽累積量格外重視，有研究指出，水耕莖莖地上部之鮮乾重隨遮蔭比例增加而遞減，且硝酸鹽累積量與遮蔭程度具有正相關性(Cometti et al., 2011)。因此，針對光度不足造成葉菜硝酸鹽累積的問題，需設法改善以符合歐盟莖莖硝酸鹽最大容許量之規定(表二)。另外，光電板下陰影區與非陰影區之莖莖品質是否均一？產品的市場價值與消費者接受的程度如何？以上等等問題皆需經過審慎評估，若能克服前述的限制，則光電溫室生產模式的效率能更為提升。

2. 發電效能與成本

回顧光電溫室栽培莖莖的文獻當中，沒有提到關於太陽能板發電效能以及成本收益的估算。以陽光屋頂百萬座網站試算，若於雲林地區溫室屋頂設置太陽能板，每分地架設成本約七百萬元，另需加入電流轉換器的成本；每年發電量約十五萬度，預估每年電能躉售收入約可回收架設成本的十分之一，粗估回收時間約十年。目前太陽能板廠商多有十年保固，但往後太陽能板之損壞折舊和發電效率降低仍需列入考量。

根據2015年農產品生產成本調查報告，生產結球莖莖每年農家賺款約13萬元，以每分地結球莖莖約有一萬元的淨收入來算，假設溫室內可栽培3-4次，光電溫室栽培收入不足的部分，則需要靠大面積的露地栽培或是種植其他高經濟

表一、蔬菜作物光需求

光強度需求	蔬菜種類
高光 $750\sim 1800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	番茄、茄子、甜椒、洋香瓜、胡瓜、芹菜
中光 $180\sim 750\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	甘藍、結球白菜、蘿蔔、胡蘿蔔、番椒、豇豆
低光 $180\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	莖莖、不結球白菜、菠菜、茼蒿、莧菜、紫蘇、薑

表二、歐盟莖莖硝酸鹽最大容許量

品 項	最大容許量(mg NO ₃ /kg)	
新鮮莖莖	10/1-3/31採收(冬季)	設施栽培 5,000
		露地栽培 4,000
	4/1-9/30採收(夏季)	設施栽培 4,000
		露地栽培 3,000
結球莖莖		設施栽培 2,500
		露地栽培 2,000

價值的作物來平衡初期的投資與維持生活水平。

六、結語

目前關於太陽光電溫室栽培蔬菜的研究並不多，由此可見這是一個新興的產業，許多困難盲點還有待摸索克服。萵苣研究部分多著重在對產量的影響，鮮少去評估整體生產以及發電之間的相互效應，生產上多重「量」不重「質」。舉例台北果菜市場一市萵苣(本島圓葉)價格，依品質分為上價40(元/kg)、中價26(元/kg)、下價10(元/kg)三等級，商品間價差大，品質好壞為其重要因素；若能同時兼顧品質與產量，找到最適的栽培方式以及蔬菜生產和發電效率的最大公約數，便有創造「農電共享」雙贏的機會。

七、參考文獻

- Cometti, N. N., M. Q. Martins, C. A. Bremenkamp, and J. A. Nunes. 2011. Nitrate concentration in lettuce leaves depending on photosynthetic photon flux and nitrate concentration in the nutrient solution. *Hortic. Bras.* 29:548-553.
- Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbo, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard. 2010. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimizing land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renew. Energ.* 35:2725-2732.
- European Union. COMMISSION REGULATION (EU) No 1258/2011

of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. O. J. EU.

Goetzberger, A. and A. Zastrow, 1982. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *Int. J. Sol. Energ.* 1:55-69.

Marrou, H., L. Dufour, C. Dupraz, and J. Wery. 2013. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agr. Forest Meteorol.* 177:177-132.

Marrou, H., J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz. 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur. J. Agron.* 44:54-66.

Tani, A., S. Shina, K. Nakashima, and M. Hayashi. 2014. Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. *J. Agr. Meteorol.* 70:139-149.

Yano, A., K. Tsuchiya, K. Nishi, T. Moriyama, and O. Ide. 2007. Development of a greenhouse side ventilation controller driven by photovoltaic energy. *Biosys. Eng.* 96:633-641.

Yano, A., M. Kadowaki, A. Furue, N. Tamaki, T. Tanaka, E. Hiraki, Y. Kato, F. Ishizu, and S. Noda. 2010. Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. *Biosys. Eng.*