



自動化植物工廠

國立台灣大學生物產業機電工程學系／方煒教授

廣義的植物工廠係指「在一定生產管理下的全年無休的植物生產系統」，狹義的植物工廠則指「在完全人工環境下的全年無休的植物生產系統」。廣義的植物工廠除包含狹義者外，尚包含具備環境調節能力的太陽光利用型系統（溫室）。

溫室由於有陽光的進入，有通風的進行，基本上仍屬靠天吃飯的設施，但所能掌控環境因子的程度已比傳統的露地栽培與簡易設施等高明許多。再加上與水耕栽培的結合，日夜間冷暖氣及培養液冷卻等技術的建立，使得較高程度的環境控制為可能，廣泛範圍的蔬菜、花卉可做周年生產。在過去幾乎無產量的夏季也因使用了環控與培養液冷卻的技術，使得相當穩定的周年生產也成可能，同時因環境條件與培養液條件皆由微電腦控制，所以能夠做確實的生產管理。

所謂的工廠生產，有兩大前提：其一是要能去除靠天吃飯的不利因素，可以不管寒暑且風雨無阻地生產；其二則是要能預先明確地決定好生產流程，並做好作業分析，也就是說對象的輸入、輸出特性皆可定量的掌握，甚麼樣

的操作會產生甚麼樣的輸出是可以預期的。

植物工廠的理想栽培作物是那些生長程序容易量化的作物，換言之，環境條件與作物生長的關係已明確地被量化。完全控制型系統是在完全人工的環境下栽培，在環境因子已知的前提下，可定時、定量生產固定品質的產品。

植物工廠的時代意義

1. 可提昇農業的生產力：提昇農業生產力可協助解決糧食問題。植物工廠在土地狹窄、地力貧瘠或氣候條件較差的地區來說具有特殊的意義。我們很難像美國那樣在廣大地面用機械化來提高勞動生產力。在狹小的土地上，用高度環境控制技術來提高單位面積產量及勞動生產力是最好的選擇。從水耕栽培到植物工廠，然後再跟生物技術結合的方式就是邁向 21 世紀現代化農業的發展策略。組織培養苗以立體栽培架在環控室內生產，單位面積產量大，產值高是大家熟知的。日昇公司在 1998 年建立的蝴蝶蘭小苗栽培植物工廠的產能是一般溫室的 17 倍以上，其



關鍵就在使用人工光源與立體化栽培。

2. 有望做寒冷地、不毛地的農業：加拿大、蘇聯、北歐等寒冷地或寒冷期，中、近東及非洲的沙漠地帶，如用一般的栽培方法是不可能或很難的。寒冷地的溫室栽培須費很大的能源(燃油)成本，沙漠地則受自然環境的限制就是有充分的水也難栽培。但如電力成本便宜的話，完全控制型植物工廠便能發揮效用。尤其要解決森林被濫伐、土壤沙漠化，時常在旱魃為虐，而政府卻束手無策的非洲窮國的飢餓問題，也許只能靠"它"了。有望做寒冷地、不毛地、地下、海底與太空中的農業，進一步協助解決糧食問題。
3. 可生產高品質作物：在最適當環境下栽培植物(蔬果)，植株體內一般的維他命或微量元素的含量會增加，可提高營養價值。但是環境條件、作物生長階段與營養價值的關係，目前對大多數作物尚無法完全加以量化，是今後的研究課題。可定量定期生產高品質作物之後才可進行生產規劃，才可做到農業生產工業化與農業經營企業化。美國紐澤西州羅格斯大學生物資源工程系開發成功的單果串番茄生長系統即為最典型的代表。在該系統中使用日光配合人工光源(高壓鈉燈)，由植物所接受的累計總光量，可預估番茄之產期、產量與品質。每平方米面積的年產量可達 45-50 公斤，為現階段台灣業者產能的近兩倍。
4. 作業環境良好、有省力化的可能：作業環境良好、有省力化的可能，可吸引年輕人回歸農業。農業本是冒著寒冷酷暑的重勞動，跟一般上班族在有冷暖氣機 / 中央空調的大廈中快適地工作，兩般情況大有逕庭。可是農業從事者也有主張在舒適環境中作業的權利吧！因工作環境惡劣導致不少年輕人不願留

在農村或拒絕嫁到農村是毋庸置疑的事實，又在社會趨向高齡化的今日，良好的作業環境且兼顧省力化是很重要的。

5. 可吸引具技術背景的年轻人回歸農業生產：植物工廠內監控管理技術層次高與強調系統整合是優點也是缺點，這些因素使得現階段植物工廠的發展需要技術性人員的參與，門檻較高，但只要獲利率不錯，自然也可吸引具技術背景的年轻人回歸農業生產。
6. 能供給無農藥的新鮮作物：在完全控制型植物工廠裡，由於與外界隔絕，使用的培養液也經紫外線殺菌，所以植物比較不會受病蟲害感染，其對病蟲害的抵抗力也增強，是以可做完全無農藥的生產，當然完全沒有農藥殘留的可能，鑑於農藥大量使用的現狀，無農藥栽培的作物有很大的經濟價值，是對環境無污染的永續農業。又如在市郊生產的話，更具有可供應最新鮮的蔬果給消費者的優點。
7. 沒有連作障礙：土壤栽培的最大問題之一是連作障礙，植物工廠因採水耕栽培，所以無此問題，亦不會因天然災害而中斷生產。此優點或許就是可以把農業從根本上改革的主因。

植物工廠負有「農業工業化」的任務。將農作物在工廠內(不管是用陽光或人工光線照射)像製造工業產品那樣的生產出來。這是可以節省土地的技術革新，這在像美國那樣大規模化的農業地帶施行，不如在像台灣這般耕地面積小、人口又過密的地域實施來得有效用，因已用大規模機械化達成高生產力的地方，對植物工廠的必要性沒有那麼迫切。以中國大陸而言，由於陸上交通並不發達，所以以設在大型都市附近為最適宜。

植物工廠的種類

植物工廠依使用光源的不同可分成"太陽光利用型"(簡稱太型)與"完全控制型"(簡稱完型)與綜合型三種。完型不僅使用人工光源,連溫度、濕度、二氧化碳濃度、培養液等,凡對植物生長有影響的主要環境條件,都以人工來控制,所以可以說是理想的植物工廠,但在現實上有能源成本的問題,必須設法降低成本。太型是水耕栽培法的延伸,在夏季如何降低設施內與養液的溫度是最大的重點課題。

太型及完型雖然同是植物工廠,但在基本精神上仍有很大的差異。太型會受到不確定要因—太陽光的決定性影響,此點與傳統上的農業生產一樣,即對天候與收穫量不能夠有正確的預測與控制且栽培者的直覺與經驗通常對生產結果的好壞有很大的影響。反之,完型可以根據定量測定過的栽培技術知識做計畫生產。

太陽光利用型(簡稱太型)植物工廠,事實上即為具環境控制能力的溫室的延伸,可是既然說是「植物工廠」,首先便必須能克服夏天的酷熱,這在乾燥地區使用噴霧(fogging)或風機濕簾法(Pad and Fan)等成本低廉的蒸發冷卻設備即可達到適當的降溫效果,但在高溫高濕的台灣,多種降溫方法的併用為必需的手段。選擇耐熱品種與遮蔭通常是雙管齊下的第一步,強制通風次之,再輔以前述的蒸發冷卻方法與策略性的使用空調系統,可達到全年生產的目標。

太型植物工廠的次要問題是環境控制需做到甚麼程度。諸如加溫、降溫、補光、二氧化碳濃度、施肥等,控制的環境因子愈多,成本愈高,然而是否可得相對的產量的增加呢?所以需對照生產成本來考慮究竟要控制到何種程度方稱合理;此點通常需要依產值來確定。整

體而言,只增加有效的控制要因才是上策。綜合型為前述兩型之折衷。

完型植物工廠依作物是否需行光合作用的特性分為兩大類:其一,需使用人工光源,美國康乃爾大學的高苜與菠菜栽培示範工廠可為葉菜類的代表,然而,由於耗電成本高,其後續量產均在溫室進行。日昇公司蝴蝶蘭小苗栽培可為花卉類的代表。其二,不需人工光源,如豆芽菜與菇類等,台南改良場的綠豆芽菜工廠、台糖的苜蓿芽工廠,戴養菌園農場的金針菇工廠均為代表。

綜合型植物工廠為兩段式的栽培模式,如蘿蔔嬰或水芹等植物工廠的栽培方式多為在暗處發芽(室內栽培),軟白栽培,等莖長10cm再移至明亮處(溫室)使雙葉綠化。從播種到收穫包裝約1週左右。丹麥克里斯天仙農場的水芹生產系統與日本海洋牧場的蘿蔔嬰生產系統為此類型的代表。豌豆苗的栽培型態亦同,豌豆苗在暗處三天進行催芽後,移至溫室生長,4-5天後採收。國內的豌豆苗工廠化生產以台糖公司善化糖廠與桃園縣平鎮市福田公司為代表,在搬運上兩者的自動化程度均低。水耕高苜栽培可以美國康乃爾大學的高苜與菠菜栽培工廠與日本川鐵株式會社的栽培工廠為代表,後者的自動化程度頗高,工人只負責定植與收穫,所有的搬運均可自動化進行。



各型植物工廠

戴養菌園農場金針菇栽培植物工廠（完全控制型）



120 度 C 蒸氣殺菌消毒



生長於5度C環境，以立體床架栽培從原料到採收一期約60天，每日產量達130噸。

台南改良場芽菜栽培植物工廠（完全控制型與太陽光利用型）



綠豆芽自動生產出料



綠化芽苗菜立體栽培管理

日昇公司蝴蝶蘭小苗栽培植物工廠（完全控制型）



立體栽培床架



自走式燈具

台糖公司苜蓿芽栽培植物工廠（完全控制型）



生長於10度C環境



上層採溢流方式對下給水



收穫



產品（200克/包）



台糖公司豌豆苗栽培植物工廠（綜合型）



室內催芽立體床架



移至溫室栽培



溫室外觀



收穫後

美國康乃爾大學萵苣栽培植物工廠（綜合型）



種子置於環控室催芽3天



溫室23天（平均萵苣重 150 克/株）

美國羅格斯大學單果串番茄栽培植物工廠（太陽光利用型）



蓋於垃圾掩埋場舊址的示範溫室



定期定量生產固定品質的番茄

日本川鐵（Kawatetsu Life Co. Ltd.）株式會社水耕高苣栽培工廠（太陽光利用型）



立體植床架：催芽



人工定植



溫室：量產（間距自動調整）



機械手臂自動搬運



選擇作物的原則

植物工廠的建造與操作成本都不便宜，所以只能栽培高經濟效益的作物，筆者過去所建立的溫室生產決策支援系統，允許針對作物栽培資料庫中的各種作物選擇最能獲利的作物，其選擇原則係依據每單位面積與單位時間內的淨利(\$/week/m²)為指標。針對立體栽培的植物工廠而言，該指標可改為每單位體積與單位時間內的淨利(\$/week/m³)。選擇適合在完全控制型植物工廠內栽培的作物的原則簡列如下：

- 所佔面積與高度均小的作物
- 需光量小的作物
- 週轉率高的作物（栽培期短）
- 可銷售部分佔整株較大比例的作物（光能利用率高）
- 高淨收益的作物
- 需要人工維護時間少的作物
- 可以用水耕方式栽培的作物

依據上述原則，果菜類一般地光飽和點較高，又須丟棄莖葉，就所生產的可食部份的重量與總光能利用量的比例來看，果菜類應以太陽光利用型植物工廠來生產。完全控制型植物工廠生產花卉則應以小、中苗階段或特殊目的為宜，譬如嫁接苗的癒合養生與花期調節等。在完全控制型植物工廠生產蔬菜，可選擇芽菜類與菇類。芽菜類需光少，生長期短(一週)，菇類完全不需光。基於耗電成本的考量，葉菜類多採綜合型植物工廠方式生產。葉菜類中高莖的單價高，生長期也在 30 天之內。芽菜類、菇類與葉菜類三者除了根部以外都可食用，在論重計價上也頗有利。

結論

植物工廠是接在露地栽培、設施園藝、水

耕栽培等依序發展之後的技術，其不僅技術上可行，更可以有經濟上的實質利益。針對所欲栽培的作物與植物工廠的建購成本與操作成本等預先進行工程經濟分析是必須的先行作業。

初始成本高與能源負荷大為發展植物工廠的兩大瓶頸，然而，硬體建設的成本雖稍高，但具有使用壽命長，風險低的優勢，可大幅降低硬體建設的年折舊成本。氣密性佳的植物工廠允許對病蟲害做有效防治，採有機栽培為更可行，市場接受度高，產品單價亦高於平均。使用人工光源的植物工廠可採立體化栽培，當層數達到某一規模時，由於產量大增，單位產品的能源負荷就不再是高不可攀了。

在生產成本中，電費的比率通常占操作成本的 50% ~ 60%，主要來自人工光源與空調。然而，並非所有的植物工廠都需採空調系統降溫，蒸發冷卻降溫的強制通風系統在某些應用上已是足夠，如日昇公司的蝴蝶蘭小苗栽培工廠與台糖公司的豌豆苗溫室為最好的證明。有些作物如金針菇與苜蓿芽的栽培，完全不需光源，其生產成本以空調系統與冰水機的耗電費用為最高，戴養菌園農場的金針菇工廠與台糖公司的苜蓿芽栽培工廠為此類型植物工廠的代表。操作條件的是否適當、冰水機與空調系統的效率與設施的絕熱與操作成本關係至鉅。完全控制型植物工廠內的天候可與外界不同，不僅可去除靠天吃飯的不利因素，更可栽培非當令蔬菜，採逆勢操作方式，平均售價可提高之餘，更能全年定時、定量地提供固定品質(定質)且固定價位(定價)的貨源。農作物能像期貨般生產與銷售，能掌握前述的「四定」，自然具備進軍國際市場的實力。

植物工廠具備「四定」的特質能提供管理者在計畫生產與銷售上很大的彈性，可掌握獲利的契機。植物工廠在台灣的發展已有成功的

先例，在進入 WTO 之後的產業競爭時代，農業無法再躲在保護傘下，慎選作物推動「植物工廠」的發展是農企業值得追求的方向。

參考文獻

1. 方煒、賴建洲 2001。植物量產工程在台灣的實現。生物科技研討會。農業陳列館，台灣大學。
2. 方煒。1998。植物工廠。種苗生產自動化技術通訊。第三期第 98001 號。種苗生產自動化技術服務團。台北：財團法人農業機械化研究發展中心。
3. 方煒 1993。發展本土化精密溫室與植物工廠之可行性分析。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。計畫編號：NSC 82-0409-B-002-028。
4. 方煒、丁冠中。1992a。整合溫室生產系統之決策支援。環控農業機械工程研討會專輯。P85-92。財團法人農業機械化研究發展中心。
5. 方煒、丁冠中。1992b。工程經濟在溫室的應用。環控農業機械工程研討會專輯。P64-74。財團法人農業機械化研究發展中心。
6. 蔡尚光 1990。植物工廠。淑馨出版社。
7. Fang, W. 1989. Strategic planning through modeling of greenhouse production systems. Unpublished Ph.D. dissertation, Rutgers University, U.S.A..
8. Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. 1990. Optimizing resource allocation for greenhouse potted plant production. Transactions of the ASAE, 33(4): 1377-1382.
9. Fang, W., K.C. Ting and G.A. Giacomelli. 1992. Computer software development for Greenhouse design and management. In Proceedings of the 4th International Conference on Computers in Agricultural Extension Programs, ASAE, St. Joseph, MI:274-279.
10. Lai, C.C., W. Fang and S.F. Chang. 2001. Plant factory in Taiwan Using Moving Light. Proceedings of the International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses. April 15-18, Taichung, Taiwan.

