

蔬菜植物工廠發展現況

高德錚

摘 要

蔬菜工廠的主要特徵為：(1)蔬菜的生產具計畫性、週年性、產量安定性；(2)生育期間短、收量多、單位面積之整年收量為露天栽培的 10 餘倍；(3)無需使用農藥，蔬菜具生食性；(4)無需特定農地，都市內畸零地、大廈屋頂、地下室等，均能構築；(5)栽培立體化，一如養鷄場，亦可公寓化；(6)輕勞動力，老少皆宜；(7)與生物技術相結合，可生產稀有植物；(8)大量使用電力，(9)設施構築成本高。21 世紀以來由於 LED 燈具及替代能源之開發，蔬菜植物工廠之生產技術已逐漸普及，例如利用植物日總光量法(daily light integral method)可正確估算蔬菜植物工廠內二氧化碳施肥量、LED 之光強與入射總時間之相關性而達到節能省電及增產之效果。但因 LED 燈具所能提供之光強及光質僅日光之八至十分之一，導致目前僅能生產一些弱光性蔬菜如萵苣、菠菜、冰菜、芝麻菜等及蔬菜植物工廠中生產之蔬菜其含油溶性維生素和含硫配醣體性物質均不如傳統栽培蔬菜，此點有待進一步去克服。

前 言

工廠化的蔬菜栽培方式，大致採用水耕栽培法。水耕栽培是使作物的根系直接吸收液體肥，與露天栽培者相較，其養分利用率較高。因植物能獲得各種生長必須元素，所以生育速率較快。且無連作障害，收穫物的清潔度亦高。又因生育期間工廠內的濕度、溫度、光照、二氧化碳等栽培環境，均受電腦調控，使蔬菜生長速度快，在短期間即可收穫，且收穫量豐多。同時大氣環境因子被摒棄在外，病蟲害無法入侵，農藥的使用頻度幾乎為零。設置蔬菜植物工廠之技術在 1990 年代大致已具成熟，唯因環控所需能源費用太高，而未達商業化推廣階段。

內 容

一、蔬菜工廠化生產系統之比較

蔬菜工廠是利用高科技的栽培方式，配合電腦調控設備，將蔬菜種植在一個密閉的空間—猶如工廠廠房。廠內的二氧化碳、氧氣、濕度、肥料、光照等物化條件，均加以監控，使蔬菜的生長速率、品質及產量，可不受大氣環境季節性之影響，如同工廠的生產線，具有精緻化、均質化及豐產性等特點。工廠化之蔬菜生產可由傳統之看天吃飯的栽培法演進至環境調控之現代科技和由傳統菜農之經驗隨機法則進化至知識經濟及計畫生產管理。

露天栽培之蔬菜會受到季節性的影響，使生育期無法預期，在栽培過程中，受到日射量、日長短、雨量多寡、病蟲害及連作障害等因素的困擾，使作物的產量及品質無法預估。近年來，各種簡易的設施栽培技術應運而生，例如最簡易的被覆栽培、矮隧道式栽培、水平棚架栽培、高隧道式栽培大量利用塑膠布、塑膠紗網及鍍鋅鐵管之栽培技術，均是為達到防雨、防蟲、保濕的目的，來提高蔬菜的品質及產量。

植物工廠係結合無土栽培技術，並利用電腦達成栽培環境管理自動化、省力化和操作空間清潔化、輕勞動力等目標。不論是農地或非農地，均能在最小的土地面積上，以最集約的栽培技術，生產高品質及豐產性的蔬菜。茲將露天栽培(傳統的栽培技術)、一般設施栽培(土耕及無土栽培)及以水耕栽培為主之蔬菜工廠等三種生產系統的比較表列如下表 1。

二、蔬菜工廠化生產系統之生產品目比較

蔬菜工廠的生產設施費用極高。因此必須種植附加價值較高的蔬菜，才能達到經濟性目的。目前世界各國的蔬菜工廠，其產物分成芽菜、葉菜、果葉、菇類和中草藥及香辛菜類等五類。栽培作物種類如表 2。

三、蔬菜工廠之設計基準

筆者以為要邁向開發實用化之蔬菜工廠的道路，在硬體方面尚需考慮到建築物(溫室)，栽培設施(栽培床、移植機器...)，空調設備，水耕設備等，使爾後之例行生產流程可以規則化，具多收穫性，且能在最省能源下，兼具節省人工之自動化較具經濟性；在構築蔬菜工廠所採用之建築物，可分成兩種，人工型蔬菜工廠

係採隔熱保溫資材，工廠之外貌與內部與一般倉庫相仿，而在太陽光型或人工光/太陽光併用型之外貌則大致採用玻璃溫室。表 3 為設立蔬菜工廠之必需條件而表 4 為栽培設施之立體化、平面化及移動化間之差異。

表 1. 不同蔬菜生產系統之比較

栽培別 特性	露天栽培	一般設施栽培	蔬菜工廠化栽培
周年生產性	受自然環境的控制， 受季節性影響甚鉅	有困難，冬菜夏種技 術尙待克服	可周年生產各季節性 蔬菜
對象作物	當季蔬菜	也受季節影響，夏季 時無法生產夏冬季蔬 菜	可生產非季節性蔬菜 及選擇高經濟價值蔬 菜
單位面積收量	低	因可周年性生產，收 量為露天栽培的 5~8 倍	因可立體化及周年性 生產，收量為露地栽 培的 10~20 倍
單位時間土地栽 培利用率	65-80 %	70-120%	80-800%
生產獲利性 (粗收入)	少	露地栽培的 3~8 倍	露地栽培的 5 ~20 倍
農藥之施用	絕對必要	少許	不要
生產流程之作業	需重勞動性及耗勞動 力且受天候影響	設施內高溫多濕、病 蟲害、土壤連作障害 等問題不易解決	輕勞動力且無季節性
環境管理自動化	有困難	部份環境因子之改善 可自動化	多數環境因子之控制 已可自動化
作物管理機械化	少數作業過程可機械 化	多數作業可機械化	可完全機械化自動化 生產

表 2. 植物工廠的對象作物

類別	種類
芽苗菜類	蘿蔔嬰、苜蓿、豌豆苗、生菜苗、水芥苗
葉菜類	生菜用萵苣、菠菜、千寶菜、芝麻菜、京水菜、冰菜
果菜類	草莓、甜椒、番茄
菇類	草菇、金針菇、香蕈、鮑魚菇
中草藥及香辛菜類	葉用中草藥：絞股藍，一點紅，紅枸杞、細香蔥、芫荽、

表 3. 蔬菜工廠的設立準則

項目	建物	栽培設備	環境條件		
			空調設備	照明設備	水耕設備
生產過程的規格化			室溫、相對濕度、風速、二氧化碳施肥	HPS/LED/HEFL/CCFL 燈源之光質(譜)、光強度、明暗周期照射時間	養液之流速/流量、養液之濃度/酸鹼度/溶氧/液溫
多收穫化		可密植栽培及可立體/平面及移動/靜止			
省能源化	密閉、隔熱式，能利用天井之反射光		利用太陽能、廢氣及地下水	間斷照明並能排除及利用照明設備生產之熱度	營養薄膜法(NFT)
省力化、自動化		配合自動化播種機、移植機、定植機、收穫機	電腦監控：溫濕度/風速/雨量/光度等感測器	電腦監控光度感測器	電腦監控：養液 EC/pH、單一離子濃度、二氧化碳
經濟性	組合式建築	空間的有效利用	能源多樣化：電氣，瓦斯、石油、綠能		

表 4. 栽培設施的設置方式及特徵

方 式	優 點	缺 點
立體式	土地之有效利用、需人工光補足時成本較低	設施內環境條件不均勻，栽培設施會遮蔽部分光源，初期投資大
平面式	設施內環境條件均一化光度相當平均，初期投資較少	實際栽培面積比率較少，早、晚之日射量較少
移動式	設施內環境條均一化，栽培管理較容易，省力化能利用較低之入射太陽光	初期投資大

在蔬菜工廠內之栽培系統大致上均以水耕栽培為主，其原因係利用水耕養液去提供植物最適之養分，各種水耕系統各有其優劣點，但若無栽培環境之調控，則無法充份發揮其效能，典型之蔬菜工廠中各種環境因子及水耕系統自動化控制項目包括育苗室及栽培室內之溫度、濕度、二氧化碳、遮蔭網之收放和栽培室內外之日射量及風速。又栽培系統中之控制項為養液之酸鹼度(pH)、濃度(EC)、給水及停電時之緊急處理。

四、現階段發展蔬菜工廠之限制因子

現階段蔬菜工廠之營運尚不能突破設備投資費用高昂、日常營運經費不低及產出蔬菜品目少且僅能生產需弱光型之蔬菜困境，導致大規模商業化蔬菜工廠成功案例尚屬少數。

由表 5 筆者對不同光源對葉萵苣生長之影響之試驗結束資料可知：

1. 以自然光為對照處理之有效波長(ηm)及有效光照($\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$)特質而言，冷陰極螢光燈管處理(CCFL, cold cathode fluorescent lamp)均優於發光二極體處理(LED, light emitting diode)，其中又以LED 紅光處理之有效光照度最低。
2. 以自然光為對照處理之對葉萵苣之地上部產量特質而言，自然光處理之產量最高，其次為CCFL處理，而CCFL處理亦優於其他LED處理，其中又以LED紅光處理之產量最低。
3. 以自然光為對照處理之對葉萵苣之品質營養特質(葉綠素a, b, 維生素A, β -胡蘿蔔素)而言，自然光處理之品質營養特質最優而各種人工光源處理均有下降之趨

勢。在各種人工光源處理中以CCFL處理優於其他LED處理，其中又以LED紅光處理之含量最低。

4. 以自然光為對照處理之對葉萵苣之維生素C營養特質而言，各種光源無明顯差異。
5. 以自然光為對照處理之對葉萵苣之硝酸態氮品質營養特質而言，自然光處理之品質營養特質最低而各種人工光源處理均有上昇之趨勢。在各種人工光源處理中以CCFL處理優於其他LED處理，其中又以LED 藍光處理之硝酸態氮含量最低，LED 紅光處理最高，
6. 各種人工光源處理在入射光強及光質均不及自然光源處理下產量與品質低下，而各種人工光源處理中以CCFL最優其次為LED紅光/藍光8:2處理和LED紅光處理而LED藍光處理最差。
7. 各種人工光源處理會影響脂溶性維生素A及β-胡蘿蔔素之生合成。

表 5. 不同光源對葉萵苣生長之影響

調查項目 \ 試驗處理*	LED 紅光	LED 藍光	LED 紅：藍 8:2	CCFL	自然光
有效波長 nm	620-650	420-450	620-650 及 420-450	380-430 及 620-720	200-1200
有效光照度 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{sec}$	120	150	178	201	450
葉片厚度 mm	0.28	0.27	0.28	0.29	0.31
株高, cm	43.2	31.3	36.7	38.5	40.5
八葉齡產量, gm/plant	39.5	33.2	40.5	41.3	47.5
葉綠素 a, %	0.79	0.89	0.98	1.02	1.09
葉綠素 b, %	0.71	0.67	0.69	0.52	0.53
維生素 A, IU	4,689	4,321	5,021	5,578	6,450
β-胡蘿蔔素 μgm	3,358	2,890	3,453	2,021	3,542
維生素 C mg/100 gm	5.41	5.59	5.53	5.76	5.89
硝酸鹽, mg/kg 鮮重	1,678	1,249	1,510	1,239	754

* LED -發光二極體(light emitting diode)

* CCFL -冷陰極螢光燈管(Cold Cathode Fluorescent Lamp)

結 語

蔬菜植物工廠是一種在完全環境控制環境下，以無土栽培技術栽培蔬菜的生產系統。蔬菜工廠係以立體栽培及全年無休之生產技術來生產高品質無污染農作物，由於植物工廠作業環境良好，可輕省勞力化又無連作障礙。因應全球性氣候變遷，開發蔬菜植物工廠之技術，將特別適用發展極地農業。植物工廠的發展種類依其對陽光之利用度可分成太陽光利用型、人工光源控制型與太陽光與人工光源併用型三種；而人工光源控制型則進一步地不僅使用人工光源，連設施內溫度、濕度、二氧化碳濃度及培養液等，凡對植物生長有影響的主要環境條件，都以人工來控制。

21 世紀以來由於 LED 燈具及替代能源之開發，蔬菜植物工廠之生產技術已逐漸普及，例如利用植物日總光量法(daily light integral method)可正確估算蔬菜植物工廠內二氧化碳施肥量、LED 之光強與入射總時間之相關性而達到節能省電及增產之效果。但因 LED 燈具所能提供之光強及光質僅日光之八至十分之一，導致目前僅能生產一些弱光性蔬菜如萵苣、菠菜、冰菜、芝麻菜等及蔬菜植物工廠中生產之蔬菜其含油溶性維生素和含硫配醣體性物質均不如傳統栽培蔬菜，此點有待進一步去克服。以臺灣現階段設施農業的發展趨勢看來，若未能即時了解自身的處境(環境因子、作物種類、國人嗜食習慣...)而貿然引入溫帶國家慣用之自動化設施栽培技術而無法本土化，則不但無法達到農業升級，提高農民所得，反因生產成本過高，更加無法與他國農產品相匹配，終將落入萬劫不復之地。

參考文獻

1. 高德錚 1990 水耕栽培實務 行政院青年輔導委員會出版第三版。
2. 高德錚 2003 水耕栽培技術 行政院僑務委員會中華函授學校出版第十版。
3. 日本施設園藝協會 2008 養液栽培新方法 社團法人日本施設園藝協會第五版。
4. (財)電力中央研究所我孫子研究所 2010 野菜工場の實用技術 社團法人農業電化協會第五版。
5. 板木利隆 1995 施設園藝—裝置栽培技術 株式會社誠文堂新光社出版。
6. 村井邦彥 1995 空中菜園 化學工業日報社出版第三版。

7. 高士正基 1987 植物工場入門 株式會社 才-△ 社出版。
8. Marschner, P. 2012. Marchner's mineral nutrition of higher plants 3rd ed. Academic Press. USA.
9. Resh. M. Resh. 1995. Hydroponic Food Production. 5th ed. Woodbridge Press Publishing Co. USA.
10. Ross Jack 1998. Hydroponic Tomato Production- apractical guide to grow tomatoes in containers Casper Publications Pty Ltd.
11. Shimizu Hiroshi, Yuta Saito, Hiroshi Nakashima, Juro Miyasaka and Katsuaki Ohdoi. 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. P 605-609 from Proceedings of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 -September 2, 2011.
12. Takemiya A., Y. Takahashi and K. Shimazaki. 2007. Leaf temperature reduction by blue light-dependent stomatal opening. Cryobiology and Cryotechnology, 53(1): 1-5.
13. Terashima I., T. Fujita., T. Inoue., S.C. Wah and R. Oguchi. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic Question of why leaves are green. Plant Cell Physiol., 50(4): 684-697.