

為解決耕地不足的問題，
Dickson Despommier教授
於1999年提出
立體農業的觀點，
帶入了垂直型的農業景觀
與提供都市綠化的概念。
在理想的狀況下，
立體農業可帶來產量增加
及免於環境災害等優點，
但囿於能源效率、
碳排放的表現，
以及經濟效益的評估，
因此立體農業的理想
並未具體落實成
農業摩天樓等建築，
惟其中精密控制的技術
卻仍在持續發展，
將食品安全的需求
以另一風貌呈現，
隨著設施農業的發展，
「植物工廠」的
新興技術型產業，
正逐漸嶄露頭角…。

嶄露頭角的植栽模式

全球立體農業與 植物工廠發展趨勢

楊玉婷

全球農業的困境

根據聯合國的估計，2050年以前全球人口將再增加30億人，人類需要額外開發10億公頃的可耕地，才可免於糧食短缺的問題。屆時都市化的趨勢會更加嚴重，目前全球人口已有60%居住在都市中，在2050年以前，都市人口將會達到總人口的80%。

在綠色革命後，農作物產量的提升雖然解決了糧食問題，但化肥及農藥的大量使用對土地造成極大壓力，不但遠超過土地的負

荷量，也造成河川海洋的汙染。另一方面，科技大幅提升農業產量，雖然解決了人口增加的問題，但是相對必須耗用更多能源及水資源，在能源短缺的今日，如何節約並使用再生性能源成為無可避免的趨勢。此外，由於糧食長程運輸造成食物品質低下的食品安全議題，在先進國家吹起一股消費者對在地農產品的風潮；然而更加嚴重的問題還有，糧食跨海運輸的模式大量消耗石化能源，造成近年糧價隨石油價格波動，此一現象再度喚醒全球對在地農業的重視。

無論從供給、環境或生態層面來看，目前主流的慣行農業都必須轉型。農業生產力的提升、永續農業技術的開發，以及在地農業模式的建立，都將是重要課題。

觀察目前立體農業在糧食生產上的工程成本和能源成本仍高於慣行農業，因此立體農業的成功，還需要更多都市計畫、科學界、工程界、建設公司的人才，以及資金的投入，才有可能建構出其原型。

立體農業的發想

為了解決耕地不足及因應都市化發展，或許像人們從鄉村走入都市時住進高樓的公寓，新世代的農業可能會進駐都市，躋身商業區的大樓樓層中。層層堆疊的概念可解決耕地不足的問題，除了提供實用的耕作功能外，垂直型的農業景觀也可同時提供都市綠化功能。此一立體農業的概念，最初由美國紐約哥倫比亞大學公共環境健康系的Dickson Despommier教授於

1999年提出，此後，許多結合建築美學的農業摩天樓構想紛紛興起。

立體農業的優勢

在理想的情況下，立體農業的模式可帶來許多優點，例如：(1)產量增加：立體農業透過精密調控，可提供全年生產，使一般作物的產量可達到露地栽培的4~6倍，而草莓的產量甚至可達到30倍；(2)免於環境災害：立體農業和外界隔離，可避免水旱災及病蟲害的發生；(3)減少農業逕流：立體農業將水的回收再利用，可避免充滿化學農藥肥料的廢水，如慣行農業排入河川及地下水而引起汙染；(4)促進農地復育：由於立體農業取代慣行農業，大面積的農場可停止耕作，或轉作林業，使土地回復自然生態功能，情況允許時，使用「間伐」方式收成木材；(5)減少化石燃料使用：立體農業不需使用大型農業機具，也可直接供應都市人口的糧食而大幅縮短食物里程，故可減少碳排放；(6)應用可再生能源：立體農業在大樓頂樓使用太陽能板及風力發電渦輪，廢棄的植物殘體也會回收作為生質能源；(7)回收城市廢水：城市居民排放的汙廢水可回收用於立體農場的灌溉，其固體副產物則可提供大量的電力。

立體農業計畫

Despommier教授的構想是在城市的一個街區內，建造一棟30層的大樓，若以紐約曼哈頓的兩公頃街區為例，將可提供60公頃的土地，大約等同於一個大型戶外農場的土地面積。樓層由上至下會分別使用氣霧耕、水耕和滴灌的栽培技術；能源來自頂樓及牆壁上的太陽能電

池，以及每一樓層的廢物所產生電力；淨化過的城市汙廢水可用於灌溉植物；樓下的雜貨店和餐館則負責銷售鮮食。

此外，許多國家也發揮別出心裁的創意。如瑞典的球型垂直溫室，由Plantagon公司設計，其內部樓層呈螺旋狀，番茄在一樓播種，樓層配合番茄生長期漸漸旋轉，並隨時提供所需生長要素，等到30天後轉到頂樓時即可收成。

又如比利時建築師設計的摩天立體農場Dragonfly，外型如蜻蜓翅膀，預計在美國紐約州建造。這座摩天立體農場共132層，高約600公尺，建築內的水、能源、生物肥料皆可自給自足。建築空間可供人居住、辦公，同時也可種植蔬果玉米等28種不同種類的作物，並飼養乳牛或家禽。能源方面，冬天利用太陽能維持暖氣系統運作，夏天則利用自然通風與植物的蒸發作用保持涼爽；戶外花園設有過濾設備可回收雨水，雨水混合家庭廢水經過有機處理程序，將可再次作為農業用水。

在技術上，建造摩天型立體農場進行精密設施栽培是完全可行的，人類技術已經達到可以完全在封閉密統中，全年穩定生產各種作物，但目前仍然沒有以立體農業概念的豪華農業景觀大樓落成。

立體農業的技術限制

（一）能源效率

從過去農業技術帶來農業轉型過程中不難發現，科技雖可使每位農民的產量和收益提升，但產量提升的同時卻必須投入更多能源，如農業機具的運轉及化學農藥肥料的生產過程，都有大量石油燃料被消耗。而立體農業雖然使用

可再生能源，但其能源效率仍有進步空間。

單從太陽能的能源效率來看，以目前的技術要達成單層溫室作物所須的亮度，必須由其面積20倍大的太陽能板進行轉換才足夠。因此許多人質疑立體農業的可行性，也有專家建議單層溫室才是比較可行的模式。

另外，若以前述的都市汙廢水的固體廢棄物所提供的電力，以及30層2公頃規模的農業摩天樓來看，根據Despommier教授的計算，全紐約市800萬居民所製造的固體廢棄物可供應四座摩天樓運轉，但是，如果要供應全市居民所需的食物，卻需要160座同樣的摩天樓的生產量。

然而設施栽培的生產效率仍十分值得期待，若可利用大樓屋頂或是牆壁的太陽光種植作物，栽培過程中的能源需求量可減少為戶外耕作的1/7，土地及水的需求量為其1/20。表示目前的立體農業深具潛力，但仍須找尋更有效益的做法，才能達到節約能源的目標。

（二）碳排放表現

以英國環境友善的水耕農場Thanet Earth為例，為了達成全英國15%的蔬菜供應量，在冬季短日照時調控番茄的光照，仍不得不使用人工光源。

Thanet Earth是英國最大的高科技溫室，主要種植番茄、甜椒和瓜類，園內完全採用水耕栽培，使用岩棉等纖維介質取代土壤，栽培後可回收重複使用。栽培過程中會由中央控制系統，隨植物品種、時段、外界天氣條件、光照強度，以及所須生長速度調整供給的水分及養分，其銷售對象以英國及在地食物里程的市場為主。

但即使是大型單層溫室如Thanet Earth，在冬

季日照不足時，其光源甚至需要倚賴一座小型發電廠的每天運作15小時，才足以提供人工光源調節番茄產期，達到全年供貨的目的。顯示在目前，立體農業可減少碳排放的理想尚未落實。

（三）經濟效益

由亞利桑納大學的控制環境農業中心(Controlled Environment Agriculture Center)主任Gene Giacomelli主導興建的南極食物生長室(South Pole Food Growth Chamber)，可供應南極科學團隊的各式多樣化蔬菜水果，雖然面積只有22平方公尺，但即使在嚴寒的冬天，也足以提供研究站65名員工每天一頓新鮮生菜沙拉。這個蔬菜補給站的成功因素在於，對在南極進行研究的科學家而言，新鮮的蔬菜水果一向是奢侈品，和從紐西蘭距離南極最近的港口進口食物，所須付出昂貴的運費成本相較之下，還不如自行耕種來得合乎經濟效益。

這是由於進口價格太高才具有比較利益，在有豐富天然可再生資源的其他地區，也可降低成本。那麼立體農業到底要付出多少成本？上個世紀末著名生物圈二號(Biosphere 2)計畫，曾得到一位慈善家贊助，耗資2億美元才打造出一個完全與外界隔離，1.3平方公尺、八層樓的人造建築；如今的摩天型立體農業，據Despommier教授估計，首棟建築物恐怕需要億元以上的資金，但隨技術進步和經驗累積，成本可漸漸減少。從這個數字看來，只有少數先進國或中東地區的產油國家，才有能力大力推動立體農業的發展。綜合以上所述，目前立體農業在糧食生產上的工程成本和能源成本仍高於慣行農業。Despommier教授也表示，立體農

業的成功還需要更多都市計畫、科學界、工程界、建設公司的人才，以及資金的投入，才有可能建構出其原型。

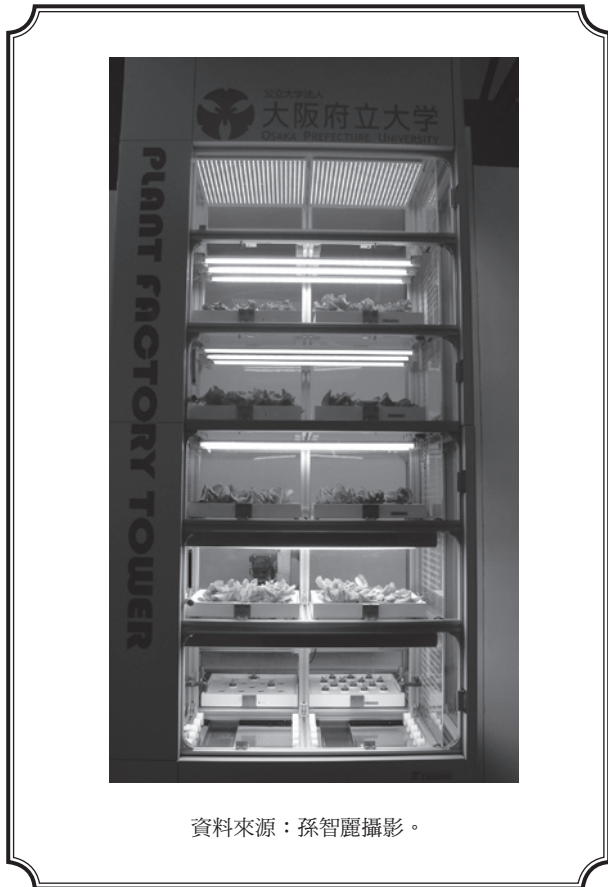
植物工廠為採用室內生產，使作物獨立於外界環境的一種設施栽培模式，其概念在日本由來已久，直到近年才真正落實；而台灣則在國際花卉博覽會展出植物工廠設備，希望能有效導入無毒、安全、健康等生產模式。

植物工廠的興起

雖然立體農業的理想並未具體落實成農業摩天樓等壯觀地景建築，其中精密控制的技術卻仍持續發展，將食品安全的需求以另一風貌呈現。新興的技術型產業「植物工廠」，正隨著設施農業的發展逐漸嶄露頭角。植物工廠為採用室內生產，使作物獨立於外界環境的一種設施栽培模式，在監控作物的生長及環境狀態（如光照、溫度、濕度、二氧化碳濃度、養分及水）的同時，精密調控其環境條件，並預測生長趨勢，使週年生產得以落實。

植物工廠可分為兩種，一是「完全人工光源型」植物工廠，為不使用太陽光，只使用人工光源進行全年生產的模式。這種植物工廠於完全密閉的空間中生產，可在室內以層架堆疊，大幅增加栽培空間，但由於光照密度高，且須精密調控環境條件，故所須成本很高。二是「人工陽光併用型」植物工廠，光源以太陽光為基礎，但在陰雨天時必須使用人工光源補光，且在夏季高溫時須進行溫度調控，為半開放式的空間。由於受限於陽光，這一型只能建

附圖 日本大阪府立大學植物工廠



資料來源：孫智麗攝影。

造成單層的植物工廠。

（一）以日本植物工廠為鏡

植物工廠的概念在日本由來已久，直到近年才真正落實，這是由於人工光照技術的進步，加上政策鼓勵農民、企業設廠，並投資學校、企業進行教育訓練及研發，許多建設、食品、紡織業者皆展開創新農業相關事業，植物工廠才再度開始蓬勃發展（附圖）。

日本深知以其自身條件，無法和歐美企業競爭產量，以中東地區為例，在沙漠地區使用可再生能源而開發的高科技植物工廠，多半以委

託荷蘭等歐洲國家和美國、澳洲的企業為主。由於日本國土狹小，難以建立大規模設施栽培的量產管理技術，但其具有製造業技術與人才優勢，並有農業技術基礎，有益於發展「完全人工光源型」植物工廠。尤其是近期許多外食和零售業者，流行在店舖內及購物中心設置小型植物工廠，初期資金為數百萬日幣起跳，相較於大型植物工廠需要高額的門檻，更具發展優勢。

由於日本政府亦大力推廣糧食自給率的提升，日本消費者也十分重視食品安全及糧食產地，「店產店銷」的模式十分吸引消費者目光。目前許多餐飲業者推行此模式，其中最知名的應屬大型連鎖三明治業者Subway，在其店舖內設置植物工廠，讓消費者吃得安心。

從日本植物工廠的發展可看到「異業投入」的現象，如丸紅股份有限公司(Marubeni Corp.)為日本前五大的商社，除了的機電工程事業外，亦跨足食品、材料、化學品、能源、建設、金融、物流等產業，目前積極投入植物工廠的開發。自2008起丸紅和株式會社verde合作，以有機栽培的天然土壤資材，展開室內蔬菜工廠銷售事業。由於丸紅使用的替代介質，重量僅為一般培養土的1/10，保水力及保肥力卻分別可達10倍及50倍，相較於一般使用室內水耕技術只能以葉菜類為主要作物，丸紅對白蘿蔔及牛蒡等根莖類蔬菜的栽培亦具優勢。此技術可應用在大樓或工廠空間處，或在沙漠或嚴寒氣候進行作物栽培。

（二）台灣植物工廠發展現況

台灣國際花卉博覽會展出的植物工廠設備由光茵生物科技提供，以從事光電半導體與能

源產業多年的經驗與技術，將相關科技投入植物工廠的開發。希望能有效導入低耗能、高產出、生產無毒、安全、健康、高營養價值的生產模式，來兼顧安全糧食供應與地球生態保護。目前已開發出家庭及店鋪可用的植物工廠設備，在未來可望推出和植物工廠結合的主題餐廳。

此外，鴻海、英業達、億光、新世紀等科技業者，先後規劃或在廠區改裝植物工廠，試種萵苣、蘭花種苗等高經濟作物。雲林縣政府也正積極爭取台塑、友達、台達電、鴻海等指標企業進駐興建植物工廠，使重要作物能夠穩定量產。

（三）產業發展建議

植物工廠的密閉環境有利於病害防治，故可大幅減少有害藥劑的使用，以生產安心安全的農產品。完全人工光源型的植物工廠，也可節省栽培面積，增加產量。然而這種植物工廠其實是成本最高的一種溫室栽培技術，未來產業發展重點應放在如何節約能源，使成本回收進而創造利潤。

立體農業的其他面貌

能源短缺的議題為立體農業發展的一大限制，受限於前述可再生能源的技術，都市型農業難以向上發展成為摩天大樓型的景觀，但在都市叢林的頂樓，另一種「都市農業」的生產型式仍逐漸形成。雖然可耕種面積十分有限，但仍有一些成功案例。

另外，「立體花園」則是近年各大城市出現一種熱門的植物造景，其做法是利用支架將盆栽固定在牆面上，讓建築的外表呈現綠意盎然

風貌。立體花園並不要求作物的生產效率，而是以美觀耐久為訴求。最知名的創作者是法國國家科學院的植物學家兼設計師Patrick Blanc，他以綠色植物創作聞名世界，作品遍及全球各大都市，在巴黎、紐約、洛杉磯、馬德里、曼谷、漢城、東京及台北等地，皆可看到他生意盎然的作品。台灣的兩廳院大理石牆上的「生態牆」，就是他發明的立體植栽專利系統，於2007年落成。他從小就對植物和生態系互動充滿熱忱，所創作出的植生牆合乎自然特性，將植物以管線方式定時補充水分和養分，無須土壤栽培即可生長，為一大突破。

兩項技術可望截長補短

全球農業面臨諸多困境，立體農業概念隨之興起，理論上，耕地不足、都市化、化學農藥肥料大量使用、食品安全等問題有機會得到解決，透過合理的設計，立體農業可有效提升糧食生產力，並提供在地、安心的食材，建立在地農業模式，惟能源使用技術仍有待提升，才能真正落實永續農業。

然而一個永續發展的社會中，長遠的經濟思維其實包含環保生態的範疇，而非僅限於狹義的工商利益，也不應只考量成本效益，而忽略生產過程中對整體系統的影響。人們關心化學農藥及肥料的殘留問題，更不該只停留在對人類的健康影響，而應該擴及周遭環境的層面。因為人與環境無法避免互相影響，目前沒有一個密閉系統可以做到完全自給自足的生態循環，即使都市化進步如今日，人類所呼吸的空氣、所使用的水，終究會回歸外界，成為自然循環的一部分。

目前立體農業尚未落實，但植物工廠已可小規模地體現其中諸多概念，植物工廠的技術及經驗可望在未來立體農業的摩天大樓興建時派上用場，因此備受各界矚目。雖然目前受限於技術，立體農業在能源使用的效益仍不合乎預期，但只要有周延而完善的考量和管理，隨技術的提升，未來仍很可能推出更友善環境的設計，而成為諸多困境的解決方案。■

（作者為台灣經濟研究院生物科技產業研究中心助理研究員）

■ 參考文獻

1. Farming in a skyscraper Bayer CropScience Editorial Service - Issue 18, 2010/10/06.
2. Innoplex <http://innoplex.org/>.
3. Skyscraper Farms Popsi, 2007/07/11.
4. Thanet Earth <http://www.thanetearth.com/>.
5. Vertical Farm <http://www.verticalfarm.com/>.
6. Vertical farming: Does it really stack up? The Economist, 2010/12/09.
7. Vertical Farming Time, 2008/12/11.
8. Vertical Garden Patrick Blanc <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com/>,
9. 日本丸紅株式會社，<http://www.marubeni.co.jp/environment/004356.html>。
10. 日本株式會社，verde <http://www.verde-jp.com/>。
11. 日本農林水產省，<http://www.maff.go.jp/index.html>。
12. 方煒，“以植物工廠生產農作物與綠能產業研究發展”，國立台灣大學生物資源暨農學院院訊，第10期，2010春季。
13. 光茵生物科技，<http://www.nanobiolight.com/>。
14. 陳加忠，“環控技術與完全密閉型植物工廠”，中興大學生物系統工程研究室。
15. 陳加忠，“蘭花與精緻農業：自遮蔭網至植物工廠”，中興大學生物系統工程研究室。
16. 陳昌岑，“節能減碳新發想 立體農業之探討”，農訊雜誌，239期。
17. 戴斯波米耶(Dickson Despommier)，“垂直農場開心種菜”，科學人，2009.12。
18. 馬希斯·威克那格、威廉·雷斯，“生態足跡，降低人類對地球的衝擊”。