

第零章

環境控制應用於生物產業

國立台灣大學生物產業機電工程學系暨研究所 / 方煒 教授

第一節	前言	0-1
第二節	禽畜舍	0-2
第三節	作物栽培	0-4
第四節	儲藏	0-8
第五節	水產	0-9
第六節	其他	0-10
第七節	結語	0-12
參考文獻	0-13

關鍵字：環境控制、生物產業、環控農業、科技農業、植物工廠

第一節 前言

加熱、通風和空氣調節是工程領域中的一環，環境控制在生物產業（含傳統農業）的應用也是隨處可見。早期的經濟動物和糧食作物、蔬果等都是在自然環境下飼養或栽培，其經濟效益較差，風險較高。譬如放牧的乳牛體重多半較輕，牛乳產量也較少；在開放式禽舍或放牧方式飼養的蛋雞僅能在特定的長日季節產卵；三十年前台灣的蝴蝶蘭也只能在農曆年期間開花；每年因為酷暑、暴雨、颱風等天災導致的農漁牧業損失也不斷重現。無法控管因天候導致的風險是傳統農業的宿命，但是透過環境控制技術（包含設施與設備）可獲得改善。少了環控技術，農漁牧業將擺脫不了靠天吃飯的宿命，也不會有成熟的畜禽產業，不會有溫室工業，不會有全球性的花卉產業，更不會有植物工廠。

要設計生物產業的環境控制系統時，需要了解環境提供給生物系統的空間與環境之間複雜的交互作用。生物的生長、生產與健康都會受到環境的影響，無論是何種環境參數，都有一個最適當的範圍，但是，各環境參數的最適值的累加，不見得可以創造最適系統。此外，生物體也會影響空間內的各項參數值，隨著生物體的成長，其影響程度也不一樣。如何維持穩態的系統常常是最大的挑戰。環境控制的目標就是要創造一個最適合生物生長、繁殖的生物物理平衡系統，而為了要成功創造出這樣的平衡，需要了解物理學、熱力學、微積分、流體力學、熱交換、質量交換、環境參數測定、冷凍、氣候學、控制學和環境生物學等。

環境因子對於生物體的影響常常是多方耦合的，以植物工廠內的作物栽培為例，涉及的環境因子包括了空氣溫度、濕度、風速、光量、光譜、光照時間、營養配方、營養液濃度、營養液供應頻率與供應量、二氧化碳濃度等。植物的成長速率與以上每一項都有關係，可以用牽一髮動全身來描述，在控制上常常需要做綜合性考量，以整合式環境控制稱之。

以下針對環境控制技術在生物產業上的廣泛應用範疇做逐項簡介：

第二節 禽畜舍

一、機械通風禽畜舍

在傳統的禽畜飼養產業中，體型較小的動物會被飼養在禽畜舍內，僅靠自然風力或熱對流效應來達到通風效果，較大體型的動物則多是採放牧方式飼養，以乳牛為例，夏季裡，除了擠牛奶時，牛隻都待在室外，而雞隻僅有夜晚時才被趕進室內。在禽畜舍設計時要考慮到天冷時，所有動物都待在室內時，每隻動物都仍須擁有足夠的空間。若太多動物聚集在一個狹窄的空間，會使空氣中充斥不健康的因子而導致生病，嚴重時甚至可能導致窒息，這主要是氣體交換量不足，也就是通風不足。

若有電力時，則可使用風扇來提供穩定的通風率。因此若有必要，可讓更多的牛隻在整個夏季都待在農舍裡，也就是所謂的零放牧 (zero pasture) 法；而母雞可養在籠子裡，以階梯排列方式來增加單位空間的飼養密度；即便整年將大量的豬隻圈養，亦不會發生如呼吸道疾病等致命的流行病。遺傳學的進步使得動物（特別是雞隻）更適合集約飼養，而獸醫學則發展出得以解決因集約飼養而產生健康問題的方法。

機械通風是現今集約飼養動物的必須設備，溫帶與寒帶地區，許多乳牛、大多數的豬和所有的母雞，終其一生都待在機械通風的建築物裡。配合適當的設計，機械通風之建築物裡的條件可不亞於甚至優於室外環境。選擇適當的通風速率和維持較佳的通氣分布可使室內溫度與室外相差無幾，若使用冷卻裝置，室溫甚至可以較室外低許多度，建築物可以保護動物免於陽光和不利天氣的危害。



圖 1. 立體化環控蛋雞舍

二、自然通風禽畜舍

自然通風定義為由所謂的自然方法—風力或熱對流效應所產生的通風。熱帶與亞熱帶地區，在溫暖的天氣時，乳牛會待在室外的遮陽棚下，而在寒冷的天氣時，乳牛大多則處於只有自然通風的畜舍裡。自然通風系統多適用於大型牲畜的飼養。台灣早期的豬舍、肉雞與蛋雞的飼養等也多採開放式建築，只具備遮雨功能。

在歐美，80 頭以下的乳牛飼養場多半採用自然通風建築，將牛隻分群餵食，而擠牛奶則利用擠乳區來運作。採用自然通風的畜舍，建築的成本可減少，牲畜的管理亦可簡化。環境調控能力當然是不如機械通風的畜舍，建議要做好自然通風空間氣流的徹底分析。

大部分自然通風的畜舍可讓動物免於太陽和風的影響，但無法控制氣溫。這些畜舍在溫暖的天氣時，特別適合供動物生活，但在寒冷天候中僅能稍微有所改善。因此在寒冷天氣時，大多數自然通風農舍的動物明顯吃較多的食物，而餵食所增加的花費傾向與不使用機械通風扇所節省的花費相抵消。



圖 2. 傳統開放型雞舍

三、雞蛋孵化室

雞蛋的孵化有特定的環控室，一般稱為孵化室。孵化室可以設定室內溫度與濕度，更能定時開啟風門換氣以排出過高的二氧化碳；較先進的設備還能針對各類雞蛋提供適當光譜的照明。



圖 3. 孵蛋室蛋架與溫度濕度調控設備

四、實驗動物飼養室

規劃合宜之設施及實施妥善之管理為維護動物健康與品質的重要條件，同時也保障實驗動物工作人員和研究人員之健康與安全。在建築動物房時，須要考量動物福祉來設計，以減少飼養環境因子對實驗動物的影響，因此必須遵守一些條件限制。在同一空間中飼養不同動物也可能會有相衝突的需求，特別需要考慮除臭。很遺憾的是多數時候，飼養室是由不了解動物實驗室之特殊問題的建築師或工程師所設計。各機構的動物房依照其需求來設計，訓練有素且善盡職責的工作人員也是動物設施運作上重要的一環。在設計規劃時需考慮諸多因素，譬如：動物種類、品系及個體之特徵，獨居或群飼，房舍之設計及建築，房舍內裝飾品(配件)之適合性及取得難易，動物房之用途(做為繁殖、育種、研發或教學使用等)，實驗過程中操控動物之頻度與對動物個體所致侵害性，有無危險物質或疾病感染源之存在，動物飼養之時間長短等。

五、流浪動物收容所

流浪動物收容所內動物飼養的空間主要需留意臭味與噪音的問題，適當的通風是必要的。在台灣，部分流浪動物收容所安裝了類似環控雞舍的自動餵飼系統是錯誤的設計。臭味與噪音問題也通常沒有被設計者考慮在內，再一次凸顯台灣缺乏相關專業人才。

六、動物園

動物在自然環境中不會待在房子裡，但是在動物園內有些動物整年都待在室內，而大部分的動物至少在冬季寒冷的天氣下也會被趕進室內。在設計不良的室內長期生活，很容易產生健康問題，所以應該找富有設計動物房舍知識的人來設計是很重要的。台灣曾發生蝴蝶館設計不當，夏季散熱不良，熱氣集中於室內上方，造成蝴蝶飛到上方紛紛被熱死的狀況，最後導致該館更改用途的失敗教訓應該被記取。

動物園的動物大多很昂貴並且難以被取代，有些甚至是瀕臨絕種的動物。當大眾看不到動物時，他們大多被限制在專屬的狹小室內空間內。新鮮的空氣很難平均分配到各狹小空間，而氣味的控制更是重要的議題，也必須避免病菌透過生物氣膠（或其他途徑）傳播。對於健康和繁殖而言，控制溫度和光照是很重要的，上述這些和其他可能的問題使得動物園的環境控制變成一個特別的挑戰。

第三節 作物栽培

一、組織培養室

組織培養室（簡稱組培室）用來大量複製植物種苗，以無性繁殖方式進行。培養基中多半會含有糖分，很容易受到汙染，所以對環境的潔淨度有較高的要求。組培室一般以人工光源提供植物光合作用所需之光量，室內溫度使用空調系統進行控制，室內溼度則多半沒有控制。亦有使用溫室作為組培室的設計，此類組培室不使用人工光源，溫度的控制則是使用同於一般溫室的加溫與降溫方式，有時亦使用冷暖空調系統。



圖 4. 研究型與量產型組織培養室

二、菇舍

菇菌類的量產栽培在台灣也有超過四十年的歷史，早期以香菇與金針菇為主，近年來品種大增，不僅供應作為日常食品，部分品種也作為醫療養生食材，譬如靈芝、樟芝、蟲草、巴西蘑菇等。菇菌類的栽培須維持高濕度，過去採單層栽培且以人工灑水方式加濕，如今多已改成立體床架且採自動噴霧方式加濕，部分品種譬如金針菇需要低溫，使用密閉的冷氣房；大多數品種在常溫下即可栽培，所以採用強制通風方式。密閉栽培方式尚須留意勿使室內的二氧化碳濃度太高。



圖 5. 環控菇舍

三、癒合養生設施

生長勢較弱或不耐逆境的種苗一般可以採嫁接方式來補強，許多瓜果類作物的育苗多以嫁接方式進行。嫁接作業頗為耗工，已有自動化設備來取代人力，但是造價不便宜。嫁接後的種苗需有 5~7 天的恢復期，恢復期內需維持低光量與高濕度，所以有專用的環控室，一般以癒合養生設施稱之。



圖 6. 嫁接苗

四、植物生長箱

植物生長箱的使用多數用於研究，近年來也有用於高品質種苗種苗的量產，後續可移植到田間或是溫室內繼續栽培。

典型研究用的生長箱都很小，有桌上型冰箱或是一般家用冰箱大小的設備，也有小型貨櫃大小的設備，一般可控制氣溫、相對濕度和光量。若有特別需求，生長箱亦可提供如二氧化碳濃度、風速和環境平均輻射溫度的控制。

用於種苗的量產雖然設備成本偏高，操作成本也高，但考量其可迅速、統一的生產高品質種苗，再加上可立體化栽培，年產能較高的優越性，其量產單株的成本並不比在溫室量產種苗的投資要高，所以此投資還是被大多數業者所接受。在此類設施中，環境控制的問題通常聚焦在如何維持環境條件的一致性以及如何去除人工光源所產生的熱等問題。



圖 7. 植物生長箱

五、量產溫室

遠在羅馬帝國時代就知道使用作物保護的設施可以在冬季維持作物的成長，十九世紀時大型溫室在富人間流行，然而直到前兩、三代前才發展出在溫室培植非當季的花卉、觀葉植物、蔬果和草藥等的技術。

商業溫室需要嚴格的控制溫度、光量和施肥，並將病蟲害控制在最低範圍。適合溫室的環境條件其範圍通常較禽畜舍來得小，由於陽光的光量再整天會持續改變，這使得溫室的環境控制變得複雜。然而，若想在一定的時間生產一定量高品質的作物，這問題又必須解決。

溫室有量產的需求，而大部分植物的生長在適當的溫度範圍內會遵守 Q10 規則，即每上升 10°C 反應速率增加一倍。然而若作物的品質不好，則投資將無法回收。品質是植物收成的短暫表現，但對於利潤卻相當重要，而環境條件對溫室作物的品質影響極深。另外，有些作物若收成的時間點不正確，就算品質高且數量大也都無法取得利潤，特別是對於觀賞植物而言，如聖誕節後一週的聖誕紅將沒有任何市場價值。許多因子決定作物收成的時間，而環境控制和環境的一致性的達成是主要手段。

對於溫室的環境控制而言，加熱器、冷卻器、通風和空氣分布是重要的。在夏天，只透過自然通風是無法提供寒帶植物適當的生長條件的，此時大部分的溫室需要機械通風或是增加蒸發冷卻的降溫方法。冬天使用加熱器價格昂貴，因此較適合直接利用太陽的輻射能。



圖 8. 聖誕紅量產溫室夜間補光

六、觀光溫室

一般的溫室以量產植物為目的，通常同一溫室內不會種植太多種類的作物，且環境控制條件的設定多半以提高光合作用速率為設計目標。以觀光為目的的溫室雖然會有多種作物在同一空間內栽培，但是通常也是以熱帶、溫帶、寒帶(高山)、沙漠作物等做分類；不同類別使用不同程度的環境控制系統在不同空間進行栽培；所有環境控制條件以維持其基本生長所需為設計條件，不見得要其快速生長。栽培相同作物的量產溫室與觀光溫室，在品種的選擇上也會有差別，以草莓為例，量產品種以耐運輸為主，觀光品種以多果、香氣為主，多半不耐運輸。

在溫帶地區建立溫帶作物的觀光溫室通常不吸引人，最常見的是在熱帶地區建立寒帶(高山)作物溫室，在溫帶與寒帶地區建立熱帶或沙漠作物溫室。此類觀光溫室為了環境調節通常所需的能源成本很高，如何設計節能的系統是一大挑戰。另外，溫室內濕度通常較高，如果室外溫度偏低，很容易在溫室四壁或屋頂的內側產生結露現象，如何避免結露的產生是另一項設計重點。



圖 9. 草莓觀光溫室

七、人工氣候室

F. W. Went 博士於 1949 年在美國加州 Pasadena 首創可以人為調整溫度、濕度、光照的人工控制氣候室 (Phytotron)，以提供精密的植物生長環境，探討環境變化對植物生長、發育及遺傳特性之影響，並將試驗之結果應用於作物育種、栽培及生產的改進。全球較具規模的大學與研究單位陸續跟進，部分並歸屬於國家級設施，有充裕的經費及人員可供運作。多年來對於各種氣候因素與作物生理問題研究之成果，益發證明此項人工氣候設備對農業及生物科學研究之

功效。此類設施包括了自然光照玻璃室、人工照明室，低溫暗室等，各室可獨立調控溫度、濕度與照明度。另有，機械室、控制室、教室、實驗室與辦公室等輔助空間與設施。



圖 10. 台大人工氣候室

八、植物工廠

植物工廠可分成太陽光利用型與完全人工光利用型等兩類，前者包括了使用或未使用人工光源補光的溫室。兩者被稱為“工廠”的特徵就是允許全年穩態量產高品質的農作物。完全人工光利用型植物工廠是前述植物生長箱的放大應用，植物生長箱可調控室內的溫度、濕度、光量、二氧化碳濃度、風速與環境的均勻度等。植物工廠除了具備類似的環境控制功能之外，栽培多半為採用水耕或是噴霧耕的立體床架，配備營養液的自動調控功能。

植物工廠在早期屬技術上可行但經濟上不可行，主要就是人工光源補光與散熱的能源成本太高。近來由於半導體技術與能源技術的進步，高效率發光二極體與高效率空調系統的商品化開發，再加上人們對於食品安全更加重視，對於無農藥、無重金屬、低生菌數、低硝酸鹽蔬菜的需求日益殷切，使得植物工廠用於量產短期葉菜類變得經濟上更為可行，所以在 2010 前後在日本、台灣、韓國、中國等東亞國家開始蓬勃發展，在歐美也陸續有廠商投入量產與整廠輸出。



圖 11. 位於台北信義計畫區大樓內的一間植物工廠

第四節 儲藏

一、農產品儲藏

為保持農產品的新鮮，通常都會以活體方式儲存。譬如穀物未經乾燥處理而直接冷藏，為了能長時間儲存，則環境控制系統的設計必須要很謹慎。

在過去，農產品的儲存只控制溫度。現今有多種農產品從收成後到販售前都儲存在控制的條件下。農產品需依靠溼度和氧氣存活，也仍會產生水蒸氣、二氧化碳和其他氣體。長期儲存農產品的環境需求是很嚴格的，不僅需時常維持足夠的相對溼度來避免植物脫水，又必須避免發霉。

氣調儲藏技術的進步允許農產品儲藏很長一段時間。蘋果收成後，僅用冰箱就可以儲存好幾個月。若將儲藏室空氣中大部分的氧氣去掉，並增加二氧化碳和其他產品需要的因子，則可以更延長儲藏的時間。主要原因是由於比起在簡易的冰箱中，產品存放於儲藏室對於養分如糖分的代謝較慢，如此可以維持產品的食用品質，而產品雖仍活著，但偏向於休眠狀態。蘋果是主要應用氣調儲藏技術的農產品，有些甘藍菜亦使用此儲藏技術，未來可應用於更多農產品。

二、食品儲藏

許多加工食品在販售前需儲藏於控制的環境中，有些食物可冷藏，有些則必須要冷凍儲存。儲藏室的規模不一，提供卡車運輸的冷凍貨櫃或是專供超級市場儲藏使用的冰櫃。冷藏與冷凍的最大差別在溫度，涉及的硬體系統不僅在設計上有差異，譬如庫板的材質、厚度等不同，選用的冷媒也有差異。有些冷藏庫以冷風透過強制對流來降溫，也有在上方與四周建置維持低溫的平面，靠輻射與自然對流來維持低溫。

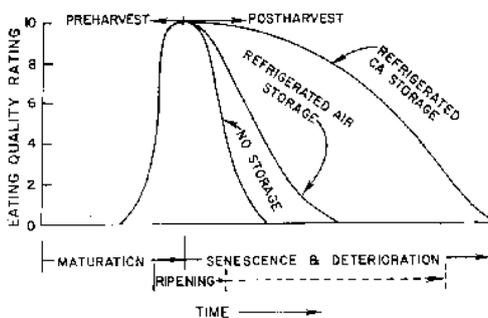


圖 12. 儲藏提高產品櫥架壽命示意圖

第五節 水產

一、室內養殖

水產養殖過去都以露天魚塢進行飼養，但是露天的飼養方式受天候影響大且爆發病害的風險高，使得部分漁民投入大量抗生素甚至是不該使用的藥物，讓消費者產生食品是否安全的疑慮。室內養殖是相對安全的作法，室內超集約循環水養殖的技術層次相對更高。所謂超集約是指單位水體的飼養量比傳統魚塢高出許多倍，所謂循環水養殖是指每日用水量有超過百分之九十是被循環使用，每日排出低於 10% 的用水量。超集約循環水養殖系統的投入成本高，控管的

精確度與技術要求也較高。系統配備包括粗過濾、細過濾、紫外線滅菌、溶氧量補充、硝化菌與亞硝化菌培養、脫硝等。



圖 13. 室內循環水養殖系統之示意圖

二、水族館

水族館內會有淺海、深海與底棲生物的飼養，各有不同的水體溫度需求。相同是淺海的生物，來自於不同緯度亦有不同的溫度需求。台灣屏東的海生館飼養來自於俄羅斯的小白鯨，在海水溫度的控制上就需要特別留意，引入屏東海域的海水，其海水溫度偏高，要降成 17~20 度 C 的合適水溫，考量數以噸計的進出水體，其冷卻系統的設計相當可觀。

另外，紅光無法抵達深海，深海生物無法看到紅光，對於此類生物要觀察其夜間行為，使用紅光是很好的選擇。軟體生物通常需要使用藍光或紫外光來照射，水草則是使用白光或是紅光即可栽培。小型水族缸尚須留意缸體外壁須避免發生結露的問題。

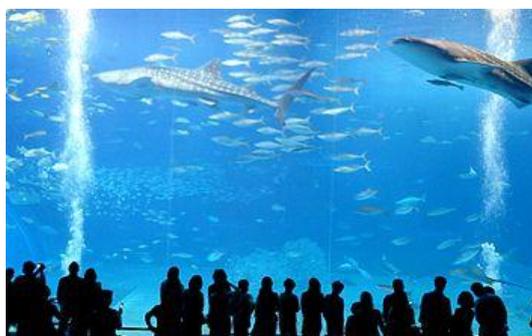


圖 14. 水族館內一景

第六節 其他

一、複合養殖

複合養殖的英文是 Aquaponics，這是使用淡水的水產養殖 (Aquaculture) 與水耕栽培 (Hydroponics) 的異業結合。水產養殖的廢水需要經過層層過濾處理才能排放或是再使用，其間涉及硝化與亞硝化處理來去除水中的氨氮，這些氨氮廢棄物可以做為植物栽培所需的養分來源，所以水耕系統可以提供等同於過濾系統的作用，養殖系統則提供免費的營養來源。這是合則兩利的生態組合，但是在調控上要注意兩者的平衡，對於系統的設計上也需要考量兩者的穩態發

展，譬如氮磷廢棄物的產生必須是全年固定的量，這代表養殖的魚貝類與投入的飼料量需要維持固定的量，栽培的作物也必須維持能夠全年消耗固定量的廢棄物。簡言之，複合養殖兼顧了系統的生態性，但也增加了系統的複雜度，對於管理人員的培訓須費時較久，初期的系統設計多半就決定了系統在後續能否穩態運作。



圖 15. 位於南投埔里的複合養殖觀光農場之一景

二、太空農業

美國太空總署在登陸月球成功之外，積極發展太空站、月球基地與火星基地的建立等太空科技，研究過程中深切體會到隨著探索距離越遠，飛行時間越長，太空人日常生活所需的食材與產生的廢棄物如果不能自行處理，其儲運成本將大為提高；所以在 1990 年代開始進行為期各五年的兩期太空農業的研究，分別是生態可控制的生命支援系統 (Controlled Ecological Life Support System, CELSS) 與可控制的生質再生生命支援系統 (Controlled Bioregenerative Life Support System, CBLSS) 計畫。此兩期計畫主要都是在探討長途太空任務所需的食物、空氣及水作再生循環利用所涉及的生物性與物化性的轉化過程，植物在此計畫中扮演了多元的角色，包括了食材的供應、空氣淨化與水質淨化等。研究成果讓人們更了解環境、食物、人類三者之間的關係，也開啟了發光二極體應用於植物栽培的研究先例。



圖 16. 美國 CELSS 計畫執行現場

企業界也在美國亞利桑那州人煙稀少的沙漠地區建立了第二生物球，八位研究人員進入與外界完全隔離的生物球內自給自足地做為期兩年的生活，自行生產所需的糧食，栽培植物提供所需的氧氣與降低二氧化碳。此實驗最終雖以失敗收場，但人們也充分了解到自己的不足，釐清失敗的原因竟然是因為少算了水泥牆會吸收二氧化碳的這個因素。



圖 17. 美國第二生物球計畫之設施外觀

第七節 結語

全球暖化造成極端氣候不斷，2005 年歐洲酷熱、2006 年澳洲大旱、2010 年俄羅斯乾旱、2011 年澳洲洪水、歐洲乾旱、2012 年美國乾旱、美東大雪等連年的天災更造成全球糧食的減產與產量的難以預測。環境控制技術在生物產業的應用，特別是量產相關的設施，譬如溫室與植物工廠等會越來越重要。本章概略說明環境控制在生物產業的廣泛應用範疇，其中，動物園、水族館、觀賞溫室等休閒相關的應用場所，環境控制的實施以提供穩定的環境為優先考量；量產經濟動物與量產溫室及植物工廠等應用場所則是以經濟效益為優先；太空農業則是須兼顧成本與安全。

環境控制是人為手段，需要額外投資，目的在降低風險且/或提高產品品質。如何做最適化設計要考量須達成目標的優先順序，當成本有限，需要針對環控項目作選取時也是有其優先順序，需針對現場需求進行判斷。有關本章所述各節的進階內容可參考環控農業工程學的相關教材，針對植物工廠則有市售教科書與科普書籍提供更深入的參考。

習題

1. 請比較畜禽舍機械通風和自然通風的差異。
2. 若欲設計菇類的裁培養殖系統，應需特別注意哪些環控因子？
3. 何謂癒合養生設施？
4. 植物工廠被稱為“工廠”的最大特徵為何？
5. 植物工廠量產模式在早期僅屬技術上可行，近來已變成經濟上可行，請問有哪些改變？
6. 請問循環水養殖系統的主要單元有哪些？
7. 何謂複合養殖？其優缺點各為何？
8. 美國在 1990 年代的太空農業研究分成兩期，各由哪五個大學來執行，執行的內容又是甚麼？
9. 何謂穩態量產？

10. 傳統農漁牧業的最大風險是甚麼？透過環境控制的設施與設備可以降低哪些風險獲得甚麼改善？

參考文獻

1. 方煒譯。古在豐樹編著。2011。太陽光型植物工廠－永續性的先進植物工廠。pp.166. 豐年社。ISBN 978-957-9157-49-0.
2. 方煒譯。高辻正基著。2011。完全人工光控制型植物工廠。pp.92. 豐年社。ISBN 978-957-9157-54-4.
3. 方煒譯。古在豐樹著。2012。LED 型植物工廠。pp.222. 豐年社。ISBN 978-957-9157-55-1.
4. 方煒、賴建洲 2001. 植物量產工程在台灣的實現。生物科技在農業上的應用研討會論文集。楊盛行主編。台灣大學。pp295-311。
5. 周志遠，方煒。2003。環控立體雞舍雞蛋計數系統之開發與應用。九十二年度農業機械與生物機電論文發表會。8 月 29-30 日，台北。中華民國。
6. 賴建洲、方煒、張森富。2004。建構組織培養苗量產植物工廠。九十三年度農業機械與生物機電論文發表會。宜蘭。中華民國。
7. Albright, L. D. 1990. Environment Control for Animals and Plants. ASAE Text Book.
8. Chang, C.M., W. Fang, R.C. Jao, C.Z. Shyu and I.C. Liao. 2005. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. *Aquaculture Engineering*. 32:343-353.
9. Jao, R. C. and W. Fang. 2001. Development of a flexible lighting system for plant related research using super-bright red and blue light-emitting diodes. *Acta Horticulturae*. 578:133-140.
10. Jao, R. C. and W. Fang. 2003. An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 19(5):601-608.
11. Lai, C. C., W. Fang and S. F. Chang. 2001. Plant Factory in Taiwan Using Moving Light. *Acta Horticulturae*. 578:263-272.
12. Takakura, T. and W. Fang 2002. *Climate under cover*. 2nd Ed. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston. London. pp.190.
13. Ting, K. C. and W. Fang. 2012. Intelligence empowered Vertical Farming Systems. Symposium on Challenges in Vertical Farming, Maryland, USA.