



設施栽培之降溫方法

國立台灣大學生物產業機電工程學系／方煒教授

台灣夏季常受暴雨、高溫、颱風、病蟲害等的威脅，冬季又有低溫之害。地膜(mulch)可調節土溫，不織布浮面覆蓋(floating mulch)可保溫防低溫傷害，上方與四周搭蓋防蟲網的網室(net house)可防蟲並減弱雨滴對葉面的直接衝擊，上方以塑膠布鋪蓋、四周維持開放的隧道式遮雨棚(tunnel)與塑膠布簡易溫室(plastic house)可有效防雨，四周加防蟲網可兼具防蟲效果，遮蔭網(shade cover)覆蓋可降低直射的熱傷害。

上述簡易設施都是可紓解冬、夏災害性氣候的有效手段，都具有提高產能的經濟效益。然而，此些簡易設施完全不耐強風的侵襲為最大的缺點；但由於安裝成本較低，所以農友每次在被吹毀之後，又積極重新搭蓋。在颱風季節有日益拉長且每年平均颱風數有增多的今天，使用此些設施的風險變得頗高，如果颱風在接近收穫期來襲，不僅設施垮了，作物毀了，農友先前投入的資本也將血本無歸，每年颱風季節菜價飆漲即為明證。此些簡易設施所能調節的微氣候環境範圍有限，就算無颱風的侵襲，也難以全年無休的生產作物。

結構強固的設施是一切的基礎，初始的建造成本會比簡易設施高，但輔以工程的最佳化設計，當可發揮一分錢一分貨的效益。最怕的就是農友只問蓋溫室一坪多少錢，而完全不問功能。最低價得標的弊病到處可見，不需在此贅言。本文旨在探討下一個重點，如何建立可全年無休栽培作物的溫室。

台灣的夏天，溫度超過35度C並非少見，設計不當的溫室，在高溫的夏季，溫室內溫度可達45度C以上，這已超出多數作物的容忍範圍，農友只好在夏季休耕，造成資源的浪費。

溫室的降溫能力為是否能全年無休栽培的關鍵技術，本文擬從六個方向探討各種可行的降溫方法，包括：設計、遮蔭、自然通風、強制通風、蒸發冷卻、與空調。

設計

溫室地點的選擇需看風水：避風與排水。有天然的屏障可擋季節性強風為最佳，有必要時需加破風網。排水良好是必要的，不僅不要位於低窪地，地面的平整，不留可能積水的空



間也是重要考量，溫室天溝的尺寸也需配合當地已知的單位時間最大降雨量來設計。

善用自然風：不論是自然通風或強制通風的溫室，空氣入口都應盡量位於夏季季風的迎風面。強制通風的溫室最忌風扇面對迎風面，如此則風扇能力無法充分發揮。

溫室被覆材料的選擇不應以直射光的穿透率為選擇的依歸，而應以散射光的穿透率為準。許多蝴蝶蘭溫室使用高透光率的玻璃，又安裝外遮蔭與內遮蔭便是矛盾的做法。有些被覆資材具備光波選擇性，可阻隔或將部分紅外線轉為可見光，提高進入溫室內的光合作用有效光(PAR)的量。此些材料目前的價位仍偏高，但值得留意。

遮蔭

大氣層外圍正向太陽的平面，其年平均輻射量為 1353 W/m^2 ，在通過大氣層後到達地表的輻射量，在晴天一般也有 $700 - 800 \text{ W/m}^2$ ，依據溫室被覆材質穿透率之不同，到達溫室內部的熱量以 500 W/m^2 估算是合理的假設值，假設此熱量一半用來加熱溫室內的空氣，則 2m 高的不通風的溫室昇溫程度可達 12 度C 。假設仍維持不通風，要使昇溫的程度減半有幾個對策，其一：溫室高度加倍，其二：溫室內植物栽培密度增加或灌溉頻度增加，使得水分蒸散量增加，使更多的能量(潛熱)用於蒸發水分，用在昇溫的熱量(顯熱)只有原來之一半，其三：使用遮蔭網使進入溫室的熱量減半。顯然，第三個方法是最容易，但會降低光合作用速率，而第一個方法是最貴，同時增加受風面，結構需更加強。務實的做法是二、三併用，最熱期間增加灌溉頻度與栽培密度，並作局部遮蔭。遮蔭方法包括：外噴漆、外遮蔭、內遮蔭、外覆蓋與外灑水等。如圖 1 所示為各

種遮蔭方法的實施例。

外噴漆經雨水沖刷會自然脫落，每年需重新噴漆為缺點，遮蔭程度視噴刷的層數而定，遇雨透光度增加為特色，國內較少用。外遮蔭需留意與屋頂之間的高度，高度低則效果較差。高度為 0 ，相當於外覆蓋。外覆蓋的施工比外遮蔭簡單許多。內遮蔭會在屋頂與遮蔭網間形成熱區，如果熱量無法排出，將阻礙下方熱氣的上升。外遮蔭與外覆蓋使用的材料常見的有針織銀網、白網與黑網。前者較貴，前二者反光性較佳，但後者較普及，因為便宜且取得容易。大熱天，外遮蔭與外覆蓋的黑網溫度可高達 60 度C 以上，後者直接鋪於塑膠布上，降溫效果白網優於黑網，但都比外遮蔭差，有輔以灑水的設計則可改善許多。單獨灑水在被覆資材上形成一層水膜可吸收紅外線，也有部分降溫效果，但對作物而言並不明顯。綜合言之，外覆蓋網上灑水的設計由施工難易度、成本與降溫效果應是頗佳的選擇。



圖 1a. 外噴漆實施例



圖 1b. 外遮蔭(針織銀網)實施例



圖 1c. 內遮蔭實施例 (遮蔭網收起)

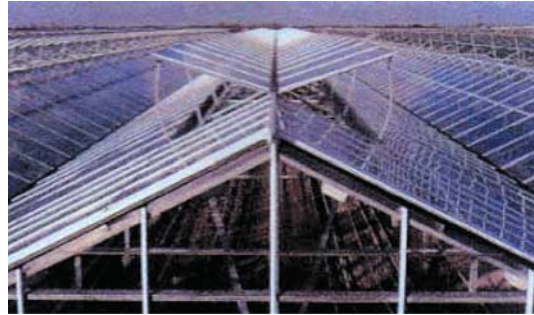


圖 2a. 屋脊式連續天窗 (Ridge-Wing)



圖 1d. 外覆蓋(黑網)實施例



圖 2b. 屋簷式連續天窗 (Gutter-Wing)

自然通風

通風方式可大分為自然通風與強制通風兩種。自然通風溫室仰賴煙囪效應與風速來降溫，溫度影響空氣密度，熱空氣較輕因而上浮，空氣入出口高度差愈大，溫差愈大，空氣上浮的流動速率也愈大，此為煙囪效應。煙囪效應在熱天與低風速時主導空氣之流動。屋頂有熱氣滯留時會影響下方熱氣的上升，以熱天、低風速時影響最嚴重。所以屋頂處最好沒有熱氣滯留區，換言之，有連續的屋頂空氣出口(continuous roof vent)為最佳，開口面積愈大愈好。如圖 2 所示為具連續開口的天窗，有安裝於屋脊者(ridge wing)、屋簷者(gutter wing)與中段者(mid. wing)。早期的設計多為屋脊式，但考慮受風面與結構的強固性，改為屋簷式，又因散熱效果不如屋脊式且在雪季，積雪會壓住開口造成無法開啓，所以有中段式的改良。



圖 2c. 中段式連續天窗 (Mid-Wing)

台灣早期的自然通風溫室多採太子樓的設計，該設計在屋脊處提供連續的空氣出口，但施工難度較高，除增加成本外，不耐強風也是缺點，圖 3a 所示為太子樓型溫室示意圖，圖 3b 與 3c 為各種改良方式，均為雙層屋頂的設計。雙層屋頂需要雙層結構，成本較高，筆者曾建議改採如圖 3d 的自然通風溫室設計，若



要使用風扇則應採正壓式系統。圖 3e 為台糖公司善化糖廠豌豆苗生產溫室，除外遮蔭之外，尚有內遮蔭，內遮蔭網至屋頂的空間使用免電力排風器散熱，內遮蔭網下方的空間使用負壓式的風扇與水簾降溫。此系統如果空氣通過免電力排風器開口加內遮蔭網的壓降比通過

水簾片的小，有可能風扇抽入溫室的是上方的空氣，如此則水簾的降溫效果不彰，但若確實確保內遮蔭網上下空間的區隔，則又不失為一個良好的設計。有關正壓與負壓的討論請參見圖 6。

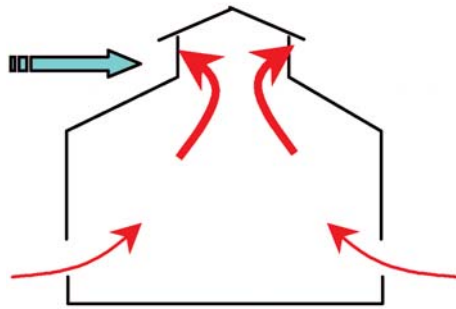


圖 3a. 太子樓式溫室

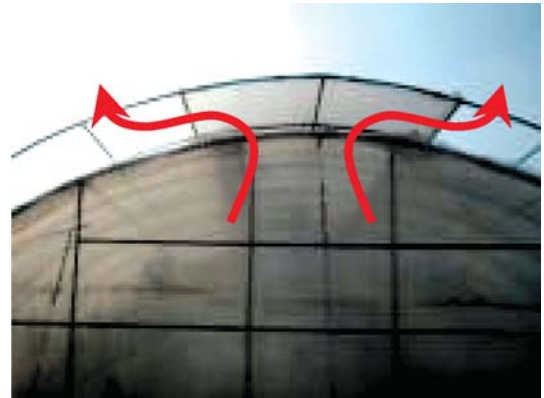


圖 3b. 施工方式的改良



圖 3c. 抗風與防蟲性的改良
(上層塑膠布，下層與四週為防蟲網)

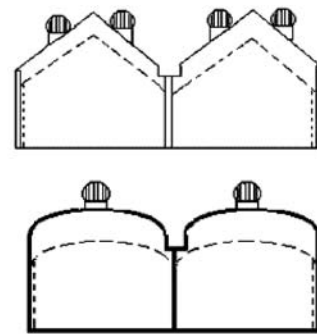


圖 3d. 安裝透光型免電力排風器的設計
(實線：塑膠布，虛線：防蟲網)



圖 3e. 安裝免電力排風器於屋頂 (豌豆芽栽培溫室)

荷蘭地處北歐，降溫需求低，加溫與保溫需求高，Venlo 型自然通風溫室的屋頂張開比例多在 30% 以下，並不適用於熱帶與雅熱帶地區。紐西蘭的同型溫室有 30% 的張開比例，但仍是不足。如圖 4 所示為張開比例在 1/2 以上

的各種溫室，除了圖 4e 之外都為國外的設計，圖 4e 為台灣中部地區的一棟葡萄溫室，溫室在網室內，溫室屋頂可全開，設計理念與圖 3c 雷同，通風程度則更勝一籌。



圖 4a. 屋頂張開比例為 1/2



圖 4b. 屋頂張開比例為 2/3



圖 4c. 屋頂張開比例為 2/3



圖 4d. 屋頂開口面積為 100%



圖 4e. 屋頂開口面積為 100%

自然通風溫室在風速高於 2 m/s 情況下空氣的流動不再由煙囪效應來主導。設計良好的自然通風溫室需具備至少一個空氣入口與多個空氣出口，換言之，要有側窗作為空氣入口。具上方開口的自然通風溫室，在迎風面與背風面的側開口關閉與打開時，在試驗條件下空氣交換率分別為 0.38 A.C./min 與 0.9 A.C./min。前者之室內外溫差可高達 10 度 C 且室內空氣流通情況差，後者室內外只有 3 度 C 溫差且室內空氣流通情況良好。

常見的前兩種。側開口的位置若高出作物許多且接近出口高度，將完全無法對作物達到降溫效果。狹長型溫室一般只在兩側有側窗，較寬的溫室應採四面皆有側窗的設計。空氣由側開口進入溫室至由出口離開，應經過作物區，以發揮降溫效果。自然通風溫室配備內遮蔭時，

側開口的啓閉，一般有三種方式，分別為外舉式、上捲式與充氣式。圖 5a 與 b 所示為



圖 5a. 外舉式側窗



應確保不阻擋熱空氣上浮的通路。



圖 5b. 上捲式側窗

強制通風

當溫室完全不通風時，被覆材質的性質對室內溫度的影響並不明顯，如表 1 所示，當室外為 35 度 C 時，PE 塑膠布溫室內的溫度可達 52 度 C，玻璃溫室內則達 55 度 C，兩者相差不多，作物都無法生存(方，1994)。一旦開始通風，當風量達每分鐘兩次的同溫室體積的交換量時，PE 塑膠布溫室的內外溫差只有 5 度 C；PE 塑膠布溫室加上外覆蓋的內外溫差為 2.5 度 C，PE 塑膠布溫室加上外覆蓋加灑水的內外溫差則只有 1 度 C。

表 1 通風風量率與外覆蓋的降溫效果比較

溫室室外溫度	設施與降溫類型	通風風量率	溫度室內溫室
35.0 度 C	PE 塑膠布溫室	0	52.0 度 C
35.0 度 C	玻璃溫室	0	55.0 度 C
34.5 度 C	PE 塑膠布溫室	2	39.5 度 C
34.5 度 C	PE 塑膠布溫室 + 外覆蓋	2	37.0 度 C
34.5 度 C	PE 塑膠布溫室 + 外覆蓋 + 外灑水	2	35.5 度 C

強制通風的溫室可分負壓式與正壓式兩種，前者將空氣抽出溫室，造成負壓，室外空

氣由其他開口被吸入；後者將空氣吹入溫室，造成正壓，室內空氣由其他開口被吹出。熱帶、亞熱帶地區的溫室應安裝防蟲網，但防蟲網增加的壓降會大幅降低通風量，所以增加防蟲網面積或加大風量是必要的設計。負壓式強制通風可能將室外的昆蟲吸入，正壓式強制通風只要在開口處維持風速超過昆蟲的飛行速度，則可將昆蟲阻絕在外。如何提供均勻的風壓是設計上的挑戰，且相同面積下，正壓式系統所需的風扇馬力數要比負壓式系統為高。圖 6a 與 6b 所示分別為負壓與正壓式系統的示意圖。

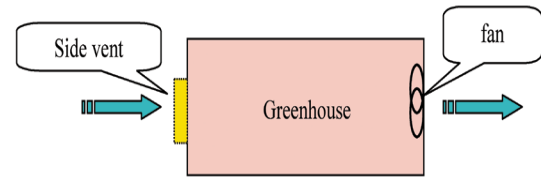


圖 6a. 負壓式強制通風系統示意圖

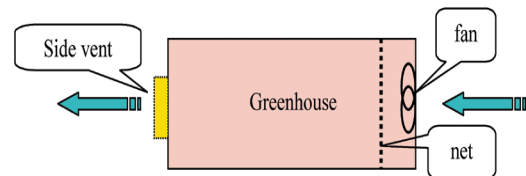


圖 6b. 正壓式強制通風系統示意圖

負壓式蒸發冷卻法

強制通風系統的降溫極限在與室外空氣溫度相同，如表 1 所示的最佳狀況仍是在 35 度 C 以上，這幾乎已是許多作物容忍的上限溫度。風速加倍，昇溫幅度可減半，但增加不少安裝成本與電費，所以進一步的降溫方式便需仰賴蒸發冷卻方法。常見的方法包括細霧法 (fan and mist)、噴霧法 (fogging) 與風機水簾法 (pad and fan)，每種方法有不同的使用方式，使用材料也可有多種選擇。如圖 7 所示為細霧法，使用低壓管路噴嘴於一側，風扇在另一側，屬負壓強制通風方式。

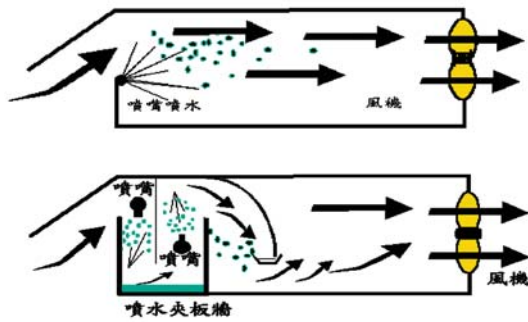


圖 7 負壓式細霧降溫方法

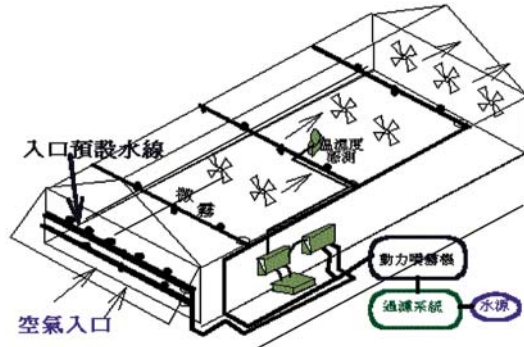


圖 8. 負壓式噴霧降溫方法

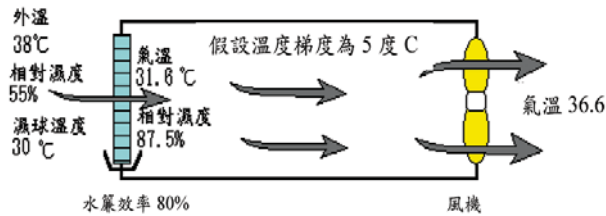


圖 9. 負壓式風機水簾降溫方法

表 2 各種溫、溼度狀況下的乾濕球溫度差 (WBD)

WBD Table										
	24	26	28	30	32	34	36	38	40 °C	
50 %	7	7.39	7.78	8.16	8.54	8.91	9.27	9.62	9.96	
55	6.23	6.57	6.92	7.25	7.58	7.91	8.22	8.53	8.82	
60	5.47	5.77	6.07	6.37	6.66	6.94	7.21	7.47	7.72	
65	4.73	4.99	5.25	5.51	5.75	5.99	6.22	6.44	6.65	
70	4.01	4.23	4.45	4.67	4.87	5.07	5.26	5.44	5.61	
75	3.3	3.49	3.67	3.85	4.01	4.17	4.33	4.47	4.6	
80	2.6	2.75	2.9	3.04	3.18	3.3	3.41	3.52	3.61	
85	1.92	2.04	2.15	2.26	2.36	2.44	2.52	2.59	2.65	
90	1.25	1.33	1.41	1.49	1.55	1.61	1.65	1.69	1.72	
95	0.59	0.64	0.69	0.73	0.76	0.79	0.8	0.81	0.8	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

如圖 8 所示為噴霧法，可同時適用於氣密性良好的溫室或開放的空間。系統使用較細的噴嘴，所以需要較高的水壓，水霧顆粒較細，蒸發效果良好，降溫極限為室內空氣的濕球溫度。如圖 9 所示為風機水簾法，降溫極限為室外空氣的濕球溫度。所有蒸發冷卻法在溼度高時都無法發揮降溫效果，幸好在高溫時段，空

氣的濕度通常不高，所以蒸發冷卻法還有使用的空間。如表 2 所示為各種溫度與相對濕度下的降溫極限，該極限為乾濕球溫度差，蒸發冷卻法的降溫幅度應將表 2 上的數值再乘上系統的效率。

如圖 10a 所示的水簾片需仰賴進口，維護不當會發生長藻與積垢的問題(圖 10b,c)，嚴重影響降溫效率與使用壽命，其單價也高，所以有不少人嘗試由當地既有材料中尋找替代材質。如科威特使用棕櫚樹的纖維(圖 11a, b)，

台灣的畜牧界亦有使用塑膠籃堆積成水牆，但效果不佳，經建議籃內填充菜瓜布或其他類似材質(圖 11c,d)後可獲得改善。筆者亦嘗試使用多層式黑網(圖 11e)，最初僅在外圍安裝低壓灑水管路，後續修正為使用高壓噴霧方式配合 6 層黑網可得比使用進口的 10cm 厚水簾片更佳的降溫效率，且系統壓降程度比灑水時較小。



圖 10a. 常見的水簾片



圖 10b. 水簾片長滿藻類

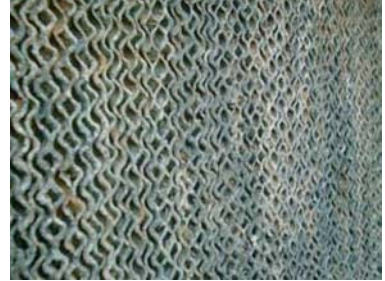


圖 10c. 水簾片積垢嚴重



圖 11a. 使用棕櫚樹纖維的水簾



圖 11b. 使用棕櫚樹纖維的水簾溫室



圖 11c. 以塑膠籃堆疊的水簾



圖 11d. 塑膠籃內可行的填充材料



圖 11e. 使用多層網的水簾

複合式蒸發冷卻降溫系統

不論使用何種材質，負壓方式的風機水簾法免不了會存在如圖 9 所示的溫度梯度，使用進口水簾片也有價格高、壽命短與維護不易的問題，以下說明筆者設計的系統，可克服上述缺點。

系統示意圖如圖 12 所示，左側所示為使

用上、中、下三道噴霧管路的多層網式水簾降溫系統，另外在溫室內的前、中與末段安裝如圖 8 所示的噴霧管路，再配合前述的外覆蓋與灑水。此系統在溫室內、外均充分利用蒸發冷卻的降溫原理，使用材料均頗容易取得，系統造價便宜，施工與維護都頗方便，外覆蓋的遮

蔭比例應視栽培作物的需光程度而定，屋頂灑水則應以間歇方式進行，啓、閉時間的長短視使用的噴嘴與加壓馬達所能提供的流量而定，以潤濕外覆蓋網並允許靠自然風吹乾為原則。降溫發生於馬達關閉時的吹乾階段(利用水分蒸發帶走的潛熱)，而非馬達開啓時的灑水階段。

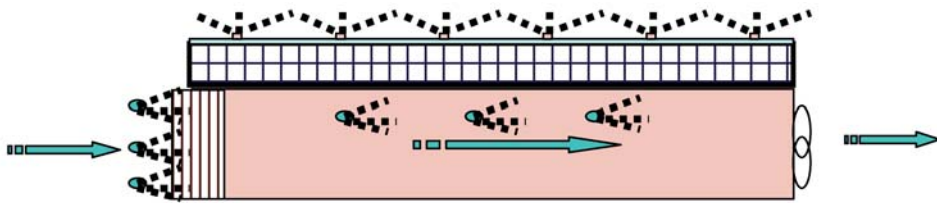


圖 12 複合式蒸發冷卻降溫方法

正壓式蒸發冷卻法

如圖 13 所示，正壓式蒸發冷卻法使用蒸發冷卻單元機，水簾與風機合為一體，依機型不同，側吹式有三面的水簾片，下吹式有四面的水簾片，後者效率較高，但都在 90% 以上。

水簾片使用木絲(wood wool)，屬非剛性的水簾材質，與剛性的水簾片一樣，都是取自白楊木。圖 14a 所示為蒸發冷卻單元機安裝於溫室外，涼空氣吹入溫室內，溫室內可使用塑膠軟管將涼風均勻地導入溫室內，如圖 14b 所示。



圖 13a. 側吹式正壓式蒸發冷卻單元機



圖 13b. 下吹式正壓式蒸發冷卻單元機



圖 14a. 溫室外安裝側吹式單元機

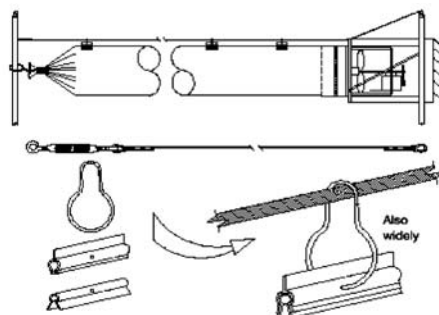


圖 14b. 溫室內安裝配件



正負壓併用型蒸發冷卻降溫系統

如圖 15 所示為結合負壓式蒸發冷卻降溫系統與正壓式系統的設計，圖中的塑膠軟管之前端有風機與立面的百葉窗相連，提供室外的新鮮空氣，此部份一般稱為風扇噴流系統(Fan-jet)，空氣亦可由兩側的水簾進入，部分被軟管前端兩側的風扇吸入風管，部分則直接被抽向圖中的遠端，並由空氣出口排出。塑膠軟管上有許多小孔，一般位於軟管截面的 4 點與 8 點鐘方向，空氣由此些小孔噴出，並由前端的空氣出口流出，此部份為正壓系統。如表 3 所

示，此系統具備高度的控制彈性，整體通風量較小為主要缺點。視開啓設備之不同，此系統兼具正壓式的強制通風系統、內循環系統、正負壓併用的蒸發冷卻降溫系統等功能。表 3 最末列所示為軟管前端的風機、立面上的百葉窗與兩側風機同時打開時，吸入的室外空氣與通過水簾的較濕空氣混合，溫室內可避免濕度太高，但降溫能力也被犧牲了。兩側風機可配備加熱管路，開啓時，可做溫室加溫之用，此時百葉窗應關閉，兩側水簾外側的擋板或捲簾亦應放下。

表 3 視各項設備的開啟組合不同可發揮的多種功能

軟管前端的風機	百葉窗	兩側風機	兩側風機之附屬加熱管	水簾外擋板或捲簾	作用
開	關	關/開	關	關	內循環
開	開	關	關	開	強制通風
開	關	開	關	開	正負壓併用的蒸發冷卻降溫
開	開	開	關	開	正負壓併用的蒸發冷卻降溫，含空氣混合。
開	關	開	開	關	加熱與內循環

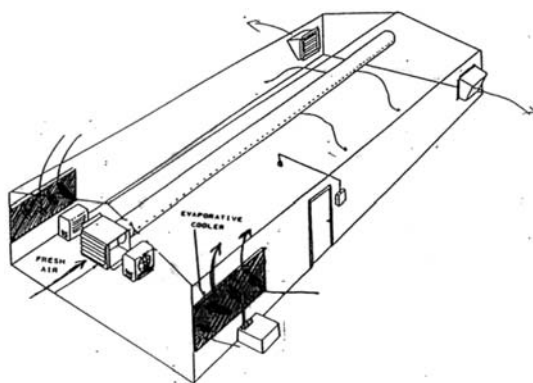


圖 15 正負壓併用型蒸發冷卻降溫系統

空調

空調系統是最理想的降溫系統，高耗電成本使得其在農業的應用範圍較為侷限，但有些特殊目的的農業設施仍會使用到空調系統，譬如蝴蝶蘭催花溫室、夏季水耕系統養液降溫、金針菇栽培工廠、苜蓿芽栽培工廠等。

蝴蝶蘭催花溫室需維持日夜溫度在 25/20 度 C 的範圍，夜溫視品種而定，亦有業者設定在 18 或 16 度 C。通常是在黃昏時啟動冰水機，1-5 度 C 的冰水在管路內循環，溫室內安裝冷排，冷排上的風扇抽入溫室內空氣，使之

通過冰水管路達到降溫的目的。溫室內硬體設施如圖 16 所示。

水溫愈高，水耕系統養液中的溶氧量愈低，根系呼吸不易自然新陳代謝無法正常進行。夏季水耕系統的養液可透過間接式冷凍空調系統進行降溫，有必要時，亦可直接在養液內透過高效率的混合裝置補充高壓的液態純氧，以達到提高溶氧量的目的。

金針菇栽培需使太空包內菌絲體維持在 5 度 C 的低溫環境下生長，必須使用空調系統；苜蓿芽採水耕方式栽培，水溫維持在 10 度 C 可得口感佳的產品，使用冰水機栽培。

根溫調節系統使用冰水機與熱水機，如圖 17 所示的植床，底部埋設管路，管路內通以冷水或熱水。此系統一般應用在種苗的栽培，以調節作物所在環境為主，並不針對溫室內作物以外的環境。



圖 16 蝴蝶蘭催花溫室內硬體設施

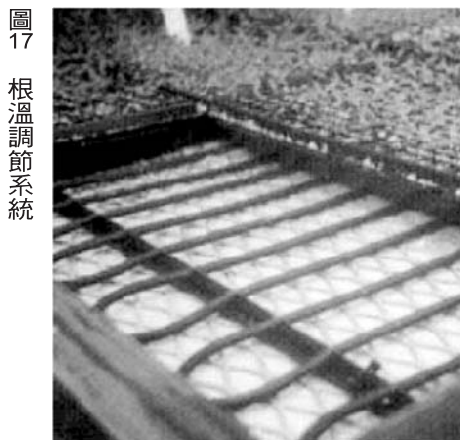


圖 17 根溫調節系統

結論

溫室降溫的探討除了需了解各種可行的技術與該項技術的環境調節極限之外，更需了解涉及的成本，因為可運用的資金有其上限；也需了解所能產生的效益，此者又與所栽培的作物種類相關。溫室降溫是一項複雜的課題，本文有系統的介紹了多種降溫方法，分設計、遮蔭、自然通風、強制通風、蒸發冷卻、與空調等六大類依序探討，並提出個人認為理想的複合式蒸發冷卻降溫方法提供參考。

參考文獻

1. 方煒。1994。水牆設計與使用。農業機械學刊 3(4): 57-70。
2. 方煒。1995。溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊 4(2): 15-25。
3. 方煒。1996。本省農業氣象與溫室降溫方法。蔬菜自動化育苗技術研討會論文集。5 月 30-31 日。國立台灣大學農業機械工程學系。p127-143。
4. 方煒、馮丁樹、簡至樺、王岱淇。2001。生物環境控制工程電腦軟件之更新及其應用-I. 濕空氣熱力性質。中國國際果蔬技術論壇論文集。10 月 11-14 日。廈門市。中國。
5. 馮丁樹，方煒。1986。個人電腦應用之三：空氣線圖之電腦模擬。中國農業工程學報 32(2)：49-64。
6. Fang, W. 1994. Greenhouse Cooling in Sub-tropical Regions. Acta Horticulturae. 399: 37-48.
7. Anonymous. 2001. 溫室廠商型錄. Volume XV. Stuppy Greenhouse Manufacturing, Inc. USA.

