

技術短文

水牆設計與使用

方 煒

國立台灣大學農業機械工程學系副教授

摘 要

蒸發冷卻是一種透過水份蒸發，帶走潛熱以降低空氣溫度的過程。在本省農業之應用中以風機濕簾，俗稱水牆法最為大眾熟悉。本文除了基本原理的介紹與影響水牆降溫效率諸因子的探討之外，尚包括風機與水牆之設計、安裝、使用與維護上需要知道的公式、原則與要點；同時根據得自中央氣象局的本省多年來的氣象資料分析水牆在本省十個地區之適用情形，包括年使用率與降溫能力的探討。

關鍵詞： 溫室，蒸發冷卻，水牆

DESIGN AND OPERATIONS OF FAN AND PAD SYSTEM

Wei Fang

Associate Professor

*Dept. of Agricultural Machinery Engineering,
National Taiwan University*

ABSTRACT

In Taiwan, "Fan and Pad" is the most popular evaporative cooling system used in Greenhouses. Besides the review of basic theories and factors affecting the performance of the system, the design rules, governing equations on designing a system as well as important issues on operations and maintenances were all mentioned in this paper. The suitability of fan and pad system in Taiwan was also investigated based on 11 years of hourly weather data collected by Central Weather Bureau of Taiwan.

Keywords: Greenhouse, Evaporative cooling, Fan and pad

一、前 言

臺灣為亞熱帶地區海島，一般皆會直覺的認為一定是高溫高濕，非常不利於採用加濕（蒸發）冷卻方式進行降溫。然而，在夏季之正午及午後的高溫時段，大氣相對濕度通常維持在50%，

濕球溫度維持在25°C或以下（圖一），是以在最需降溫之同時，若溫室之設定溫度在25°C或以上時，蒸發冷卻式降溫方法仍有其可發揮之處。

加濕（蒸發）冷卻是一種透過水份蒸發，帶走潛熱以降低空氣溫度的過程，是比強制通風進一級的降溫方式；常見者有風機濕簾法(Fan

and Pad)、風機水溫之同時，若溫室之設定溫度在25°C或以上時，蒸發冷卻式降溫方法仍有其可發揮之處。

加濕(蒸發)冷卻是一種透過水份蒸發，帶走潛熱以降低空氣溫度的過程，是比強制通風進一級的降溫方式；常見者有風機濕簾法(Fan and Pad)、風機水霧法(Fan and Mist)及風機微霧法(Fan and Fog) (Hellickson and Walker, 1983)。

本省目前以風機濕簾法最為大眾熟悉，本方法俗稱水牆法，不僅應用於溫室降溫，尚可應用在禽畜舍等其它農業設施。水牆法雖然廣被應用，但一般業者普遍缺乏操作與維護的正確觀念，導致系統的效率低落，甚至短期內便得維修或重新更換，更糟的還有因操作或設計不當，造成室內過濕而病蟲害滋生，正所謂未蒙其利先受其害。

歐美日等各溫室產業先進國家使用水牆已有多年的歷史，整套系統早已商品化，許多累積的經驗經整理與濃縮成「設計原則」與「基本公式」散見於諸多相關文獻與推廣手冊中。本文旨在參考此些文獻與推廣手冊為本省使用水牆的業者介紹風機濕簾法的基本原理、設計原則、使用注意事項與維護要點，期能對業者有所裨益。本研究的第二目標則在探討風機濕簾法在本省應用的可行性；由本省氣象資料分析此系統在本省之適用性為如何，提供量化之資料供業者或系統設計者參考。

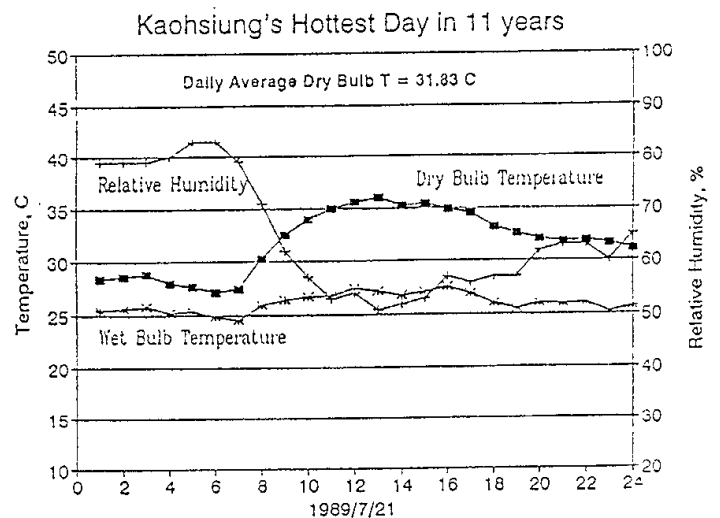
二、蒸發冷卻法介紹

本省之高溫期長達八個月以上，機械通風方式常常不敷使用，採完全開放方式利用自然通風亦無大用，此兩型降溫方法充其量可降至與外溫相同。本省夏季午後的氣溫可高至37, 38°C，此溫度對室內之動植物而言仍屬偏高。

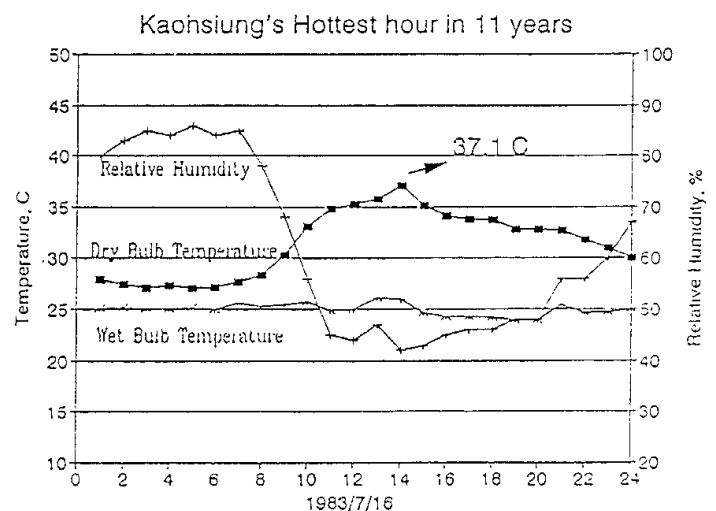
表一所示為本省各主要地區十一年中之最高日總平均氣溫與絕對最高氣溫。資料來源為中央氣象局各測站十一年來之逐時資料(Fang, 1994)。此資料可作為吾人作降溫系統設計之參考。表中同時列出該最高氣溫發生之日期。由氣象局資料中吾人可輕易找出該日之逐時溫、濕度資料。經過計算，吾人可將該日之乾球、濕球溫

度與相對溫度數據予以製圖，如圖一所示為高雄測站之資料，圖一(上)為十一年中日總平均溫度為最高之一日，十一年中溫度為最高之一刻則發生在圖一(下)所示之日。圖一之上下兩圖顯示全日的濕球溫度都維持在25°C附近，此資料可提供吾人作蒸發冷卻系統設計的參考，亦可提供吾人瞭解在當天使用任何蒸發冷卻系統之降溫極限溫度為何。

風機濕簾、風機水霧及風機微霧等三種蒸發冷卻法之降溫極限同為外界空氣之濕球溫度，然



圖一 (上) 高雄地區1989/7/21之乾濕球溫度與相對濕度分佈狀況，本日為十一年中「日總平均溫度」為最高之日



圖一 (下) 高雄地區1983/7/16之乾濕球溫度與相對濕度分佈狀況，本日為十一年中「絕對最高氣溫」發生之日

表一、本省各地十一年中之最高日總平均氣溫與絕對最高氣溫

氣象局 測站	北 緯	東 經	海 拔 m	最高日總平均氣溫 (絕對最高氣溫)	日 期
台北 692	25°02'	121°30'	5.5	32.60 °C (38.00)	1990/8/ 9 1988/8/22
花蓮 699	23°59'	121°36'	16.1	30.52 °C (34.60)	1981/8/22 1981/9/ 3
宜蘭 708	24°46'	121°45'	7.4	31.03 °C (35.20)	1991/7/27 1988/7/19
台南 741	23°00'	120°12'	13.8	31.98 °C (36.60)	1986/6/23 1986/9/ 2
高雄 744	22°34'	120°18'	2.3	31.83 °C (37.10)	1989/7/21 1983/7/16
嘉義 748	23°30'	120°25'	26.9	30.87 °C (35.70)	1983/7/ 2 1987/7/12
台中 749	24°09'	120°41'	84.0	30.96 °C (37.10)	1983/7/ 2 1990/8/26
台東 766	22°45'	121°09'	9.0	31.70 °C (39.60)	1983/5/30 1988/5/ 7
梧棲 777	24°16'	120°32'	7.2	30.99 °C (35.00)	1986/7/ 7 1984/8/29
阿里山 753	23°31'	120°48'	2413.4	17.96 °C (23.40)	1990/8/17 1988/7/ 6

資料來源：中央氣象局各測站十一年（1981-1991）之逐時資料

而三者各有其使用效率之極限且計算分析方式也稍有不同（方，1993a；1993b）。風機濕簾法之設計優良者其效率在75-85%，風量過大、風速過高降低空氣與溼簾之接觸時間，效率反而下降（Anonymous, 1990; Bottcher, et al., 1988）。

風機水霧法由於水霧之顆粒大小又分為水霧(mist)與細霧(micromist)；其顆粒大小分別為1mm與0.1mm。後者大約只有50%的水份能有效蒸發帶走蒸發潛熱，前者能帶走的熱更少。室內現有的相對濕度值(RH, %)對系統效率(β)之影響為最大，Bottcher等(1993)找出其關係式如下：

$$\beta = 1.1906 - 0.009077 * RH$$

其中，RH的適用範圍在60至96%，相對應的 β 值則在0.65與0.3之間。

風機微霧法所產生之水霧顆粒為0.01-0.05mm，只要噴嘴安裝離地夠高通常能近乎100%的完全蒸發。風機濕簾法與風機水霧法之水牆與水霧產生設備通常只安裝在溫室之一側，是以無可避免的溫室內會有「溫度梯度」的現象。風機微霧法通常有多重『水線』，譬若在吸氣口側廣設預冷水線，在室內氣流之中途設再冷水線，一般降溫效果較佳且均勻（方，1994）。設計良好之風機微霧型降溫設備（換氣率夠大且水量足）通常可將溫室溫度降至同於外界大氣之濕球溫度。

風機水霧法、細霧法與風機微霧法對水質之要求皆比水牆法高，前二者之水壓需求在10-14大氣壓之間，後者則維持在35大氣壓或以上。基於高壓之需求，管路之材質與噴嘴之要求均較高，相對的成本亦較高。前二者在本省農家已有

應用，後者若成本及對水質的要求能降低，則非常值得大力推廣。

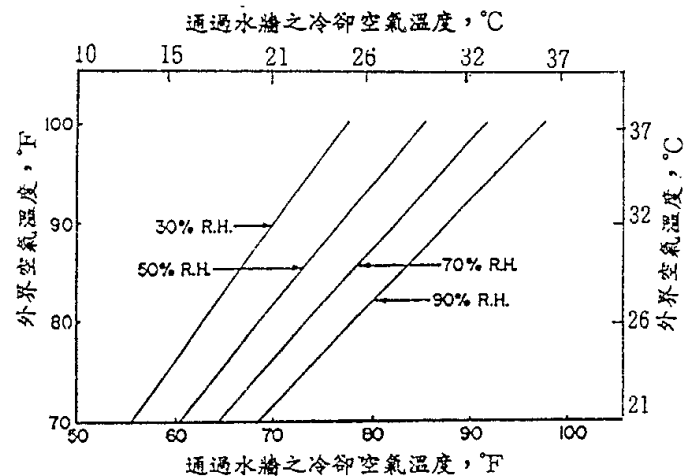
三、水牆降溫基本原理

蒸發冷卻是一種透過水份蒸發，帶走潛熱以降低空氣溫度的過程。在本省溫室中常見的利用此種原理降溫的設備為排氣風機與水牆併用。水牆通常安裝在溫室四邊的其中一邊，風機通常安裝在與水牆相對的另一端。水由水牆上方流至下方，在水牆的展露面形成一薄層水膜。由於風機的運轉在溫室內形成負壓，假設該溫室有良好的氣密性，所以所有進入溫室的空氣都必需通過濕的水牆。水牆上薄膜狀的水由空氣中吸收潛熱，蒸發進入空氣中，於是通過水牆進入溫室的空氣溫度便可降低，但其絕對濕度會增加。若通過的空氣溫度比水的溫度高時，空氣亦會將部份熱量傳給水，此為附加之降溫效果，但與水份蒸發所吸收之潛熱相比，此者便顯得微不足道（不值得花費能量去降低水牆循環水的溫度）。常溫下水的蒸發潛熱約為2400 kJ/kg，此蒸發所需之熱量全部得自於進來的空氣，所以通過水牆進入溫室的空氣便會比外面的空氣「涼」。

藉由水的蒸發，空氣通過水牆會被冷卻到什麼程度是由濕球溫度與水牆效率來決定。氣象資料顯示在本省最熱時的平均濕球溫度大約在22~25°C之間。大部份設計良好、操作正常的水牆系統應可使進入溫室的空氣溫度比外界空氣最多低8°C（效率以80%計算，乾濕球溫度差最大以10°C計算）。

乾球與濕球溫度的差值稱為濕球降(Wet Bulb Depression, WBD)。濕球溫度可直接由濕球溫度計量得；或者假設，室外的乾球溫度和相對濕度為已知，則濕球溫度可透過濕氣圖或公式求得。理論上，若水牆效率為100%，則室外空氣之濕球溫度值即為進入溫室的空氣溫度。然而，沒有任何水牆系統的效率可達100%，一個設計優良、安裝和操作適當的蒸發冷卻系統，其運轉效率達85%為可能，所以若您的水牆效率為85%，則進入溫室的空氣溫度將會是濕球溫度加上15%的濕球降。圖二所示為水牆效率在85%時，外界空氣之溫濕度狀況對離開水牆之空氣溫度

之影響。



圖二 水牆效率為85%時，外界空氣之溫濕度狀況對離開水牆之空氣溫度之影響

空氣在通過水牆以後其溫度為最低，當其橫越整個溫室，空氣會從室內地表面和植物中吸收熱量，因而其溫度也漸漸的增加，造成風機這端的空氣溫度為最高；此「溫度梯度」便極可能造成溫室內作物品質之不一致。

風機與水牆之間的距離通常取決於「溫室的大小」與「溫室內作物對溫差的容忍度」。前者以業者能維持合理經營與有效運作的規模為最合適，後者則視作物種類而異。所謂「作物對溫差的容忍度」係指不影響作物品質的溫度變化範圍。一般言之，水牆與風機的最大距離不應超過60公尺，以45公尺以內為較適當(Skinner and Buffington, 1977; Augsburg, et al., 1991)。

四、影響水牆降溫效果的其它因子

水牆的效率主要取決於其系統之設計；水牆效率亦是系統降溫能力的決定性因子，但是水牆效率並不等於水牆系統的降溫能力。除水牆之外尚有一些其它因子會影響系統的降溫能力，以下為其中最主要的兩項：

(一) 溫室的氣密程度

使用水牆系統需儘可能使溫室維持氣密狀態，即在沒有使用時所有開口包括門、窗等皆必須保持關閉。溫室是否氣密對此冷卻系統之成效有極大的影響，必須要維持良好的氣密性才能迫使

所有進入溫室的空氣都要通過水牆。如果有一扇門沒關，一個通風口沒關或沒蓋好，或者有大的裂縫未處理，空氣便會由此些阻抗小的地方進來。如此，便只有少量的空氣通過水牆，那麼此水牆系統對整個溫室的降溫效果便不可能好。

(二) 水牆的操作狀況

在操作上尚要留意是否有因循環水中的磷物、夾雜物、藻類、腐蝕或因鼠患等所引起的阻塞。水牆的全部或部份面積受阻塞，則能通過的空氣量將會減少；如果水牆有些部位因腐蝕而變薄或是有缺口，則空氣將選擇此些阻力最小的路徑進入溫室，換言之，空氣與水的接觸會大幅度減少，降溫效果便會大減。

五、水牆設計與操作實務

一些正在或想要使用水牆冷卻系統的人常有的疑問可歸納成下列幾個問題：

1. 通過水牆的空氣（戶外空氣）與離開溫室的空氣之間的溫差為多少？
2. 通過水牆後進入溫室的空氣溫度為何？
3. 空氣通過溫室，所造成的溫度梯度是否維持穩定且可預測？
4. 溫室建築本體的方位（東西向、南北向、或其他）是否重要？
5. 應該使用什麼種類的水牆材料？
6. 需要多大的水牆面積？需要多少量的水？需要多大的風量？
7. 水牆和風機應該裝在那裏？
8. 水牆面迎風或逆風等對系統操作之效率是否有影響？
9. 風機如何維護？
10. 需要用什麼來控制此系統？

此些問題可再分成基本原理、設計實務與操作實務等三種類型。問題1, 2, 3屬基本原理類，可在前述「水牆降溫基本原理」中得到答案。問題4, 5, 6與設計實務相關，其它則與操作實務相關。

(一) 設計實務

就本省的地理位置而言，溫室建築本體的方位（東西向、南北向、或其他）對一年四季所接

受之太陽輻射能影響不大；建築物的高度對作物層面之溫度則有很大的影響，屋簷高度在3.5公尺或以上可大幅降低作物之熱緊迫。

長久以來，水牆皆是以白楊木為材料。直到近幾年，才有新材質的出現。在高溫多濕的天候下，如本省或美國佛羅里達州，以白楊木為材質的水牆壽命通常不會太長。水牆對藻類的破壞是非常敏感的，又藻類會導致水牆的腐蝕且造成阻塞。近年來開始有其它的水牆材料的出現，其比白楊木為材料的水牆更能抵抗藻類的成長和實質上的破壞。較普及者為採特殊纖維質紙板做成的水牆，在紙板內同時加入保濕添加劑及不會溶解的藥用鹽以抗腐蝕。其它還有以混合纖維質和以豬毛經橡膠化處理為材料所作成的水牆。此些較新材質水牆在高溫多濕地區的使用效果，看來還算不錯。但尚需更多的試驗才能明確地說何者為較佳。

當有計劃要更換或安裝新水牆時，由系統可行性上之考量，建議如下：

1. 有系統的比較所有可選擇的水牆種類，包括材質、價錢與水牆厚度等，
2. 參考廠商宣稱的水牆冷卻效率，配合當地最高溫（參考表一）計算通過水牆之空氣溫度，並與溫室內作物之最適生長溫度比較，
3. 計算所需之水牆面積並與廠商之設計比較，儘量發掘可能的問題，再向廠商尋求解答，
4. 參考廠商宣稱的使用壽命，售價與估計之操作成本計算投資報酬率。

上述第2.步驟為降溫系統在功能上是否合乎需求的考量，第4.步驟則為該系統經濟上是否可行的考量。第2.與第3.步驟涉及一些簡單的計算，請參見本文其它部份。

所需要的水牆面積主要與水牆使用的材料種類有關。製造廠商通常可提供允許的風量率值。使用白楊木質水牆者的參考值為每平方英尺的水牆面可通過150 CFM（廠商仍習用英制），所需要的水牆面積為系統需要之總風量率除此值。纖維質紙板水牆容許的風量率可更大且不會有漂流(drifting)產生。所謂「漂流」是指由於風速太大，水份來不及蒸發便以自由水(free water)的型態由水牆之展露面直接被吹入溫室的現象。

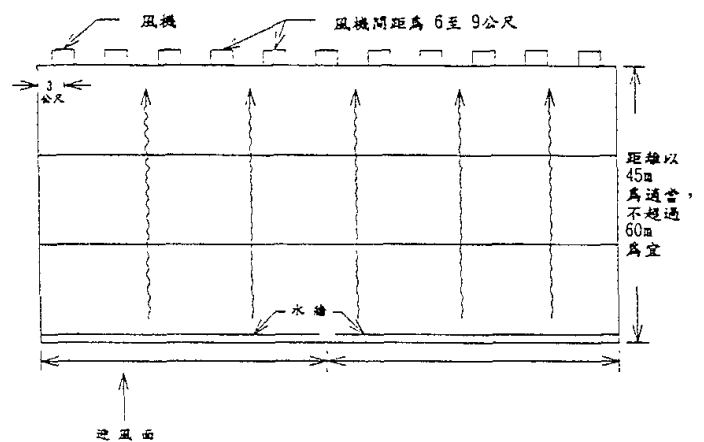
水的需要量隨所使用的系統種類而定，一般而言，欲保持整個水牆表面完全潮濕，每英尺的水牆（上側）大約需要1/3加侖的水在循環著。應在從泵出發的管線中安裝一個流量控制閥，以調節進入分流水管的水量。從水牆供水管流下來的水由下方排水管收集流回儲水槽，再由此用泵將水打入送水管重新循環。在泵的入口通常有濾網，需注意定時清理。溫室長度超過22.5公尺（75呎），通常將儲水槽放在溫室的中間地帶以避免管路過長，水壓加大造成的其它問題。有關泵大小、儲水槽容量與補充水流量率之需求請參見下節「水牆系統的設計」。

不管水牆的材質為何，溫室通風用之風機每分鐘至少應能供給一個溫室體積的通風量(Buffington and Skinner, 1977a)。大部份的溫室被覆材料允許太陽光（以短波方式）進入溫室，但卻不容許以長波方式（輻射）離開溫室，此即所謂「溫室效應」，此亦為造成溫室內氣溫偏高的原因(Mastalerz, 1990)。太陽光的能量除少數為光合作用所需之外大部份皆轉換為熱能。當空氣經過時，會因土壤、植物、結構的輻射，使得空氣的溫度上升。每分鐘一個溫室體積的通風量可避免室內空氣之氣溫由於熱累積而不斷升高。假設某溫室為無水牆的強制通風系統，每分鐘一個溫室體積的通風量可使溫室內維持在比外溫高0~5.5°C的範圍(Buffington and Skinner, 1977)；若有水牆則可望進一步降低室溫。

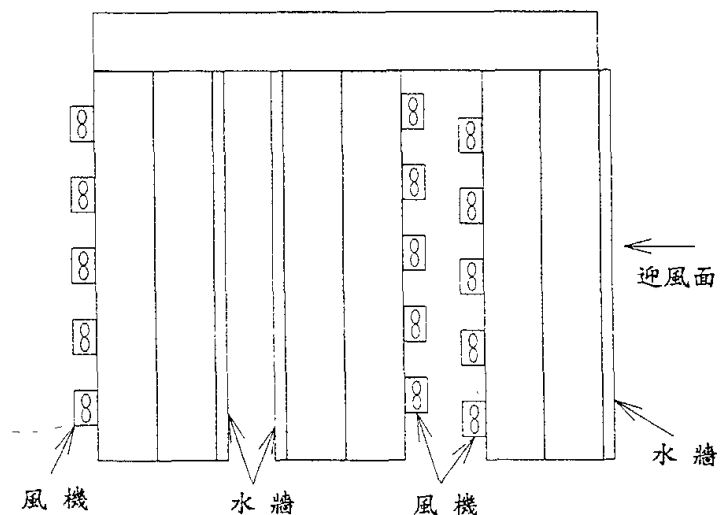
風機與水牆安裝位置的選擇，設計原則與使用注意事項簡列如下：

1. 將水牆安裝在夏季常吹風的那一面（迎風面），風機則安裝在對側（圖三）。萬一距離水牆7.5公尺（25英尺）內尚有其它建物，則風向的影響將大幅的減少，甚至可忽略不計。
2. 如果需要將風機面對迎風面，則設計的風量率(CFM)需要增加10到15%，且需同時增加所需的馬達馬力並且加上百葉窗或止回流氣閘。
3. 排氣風機不可和另一棟溫室的水牆相對（圖四），除非兩棟溫室之間的距離至少有15公尺（50英尺）或以上時才可。

4. 當相臨兩棟溫室的風機必須相向排氣時，兩棟的風機應交錯安裝以避免所排出的空氣直接地相互碰撞（圖四）。



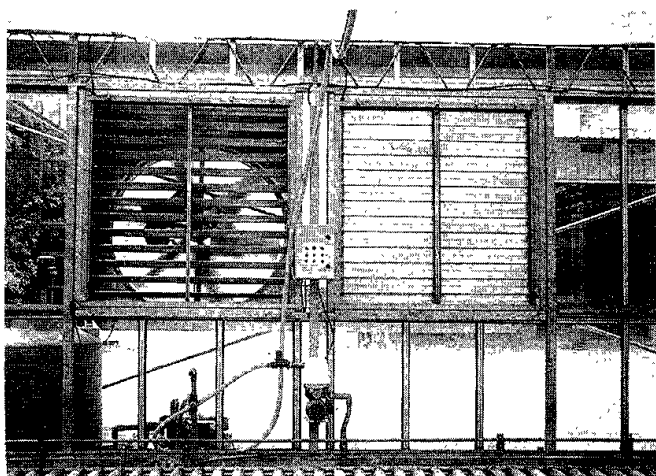
圖三 水牆安裝與配置原則說明圖 I



圖四 水牆安裝與配置原則說明圖 II

5. 如果風機在氣流的流出開口和最接近的阻礙物之間沒有至少1.5倍風機直徑的間隙，則應將風機架設於屋頂上，朝空中排氣。
6. 風機和水牆之間的最大實際距離不應該超過60公尺（200英尺），以45公尺（150英尺）或者更短的距離為較有效。就北美地區之溫室而言，纖維質紙板水牆至風機間的距離與所需之水牆高之比約為 28 比 1。
7. 在很長的溫室內，可將水牆裝置在溫室的兩末端，風機則裝在溫室的另兩邊牆的中央，或架設於溫室中央部份的屋頂，於是冷空氣由兩末端流入而從溫室的中央（兩邊牆或屋

頂) 排出; 亦可能反過來將風機置於溫室的兩末端, 水牆裝於兩邊牆中央 (圖八)。所有的風機都應裝有自動百葉窗可自動開啓, 且在風機不用時可自動關閉以防止逆流 (圖五) (Buffington and Skinner, 1977b)。



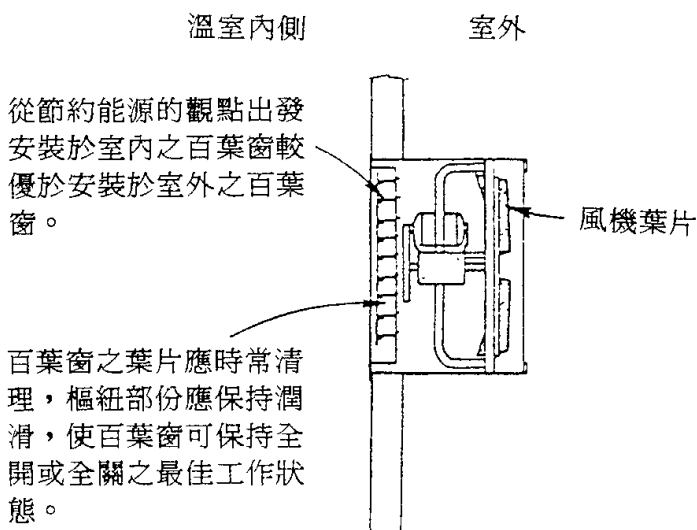
圖五a 可防逆流之自動百葉窗

水牆安裝於邊牆外部的安裝原則如圖七所示。不論安裝於何處均需確保所有進入溫室之空氣皆經過水牆。

11. 在停止水牆系統之操作時應注意先關泵, 等數分鐘之後, 水牆表面全乾時再關風機。

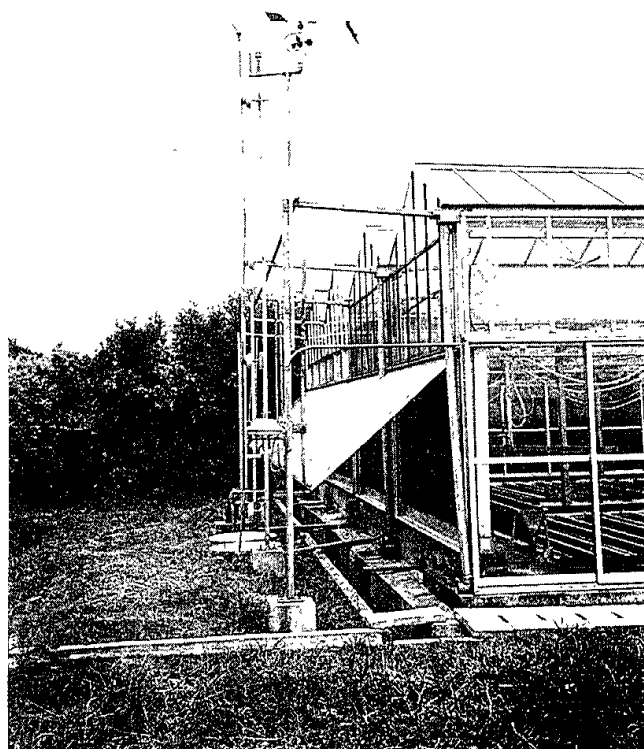
氣流通過溫室, 其在入出口處之溫度會有差異, 此即所謂之溫度梯度。在溫室內, 有很多變數會影響此梯度值, 所以不易預測。這些變數包括: 植台的安排方式、通過溫室的空氣所可能碰到的障礙物、植物被覆多少比例的地表面積、地表為光禿禿的土壤或是水泥地等。再者, 屋頂的形狀也會影響溫度梯度。經驗告訴我們, 在夏天有陽光的日子裡, 空氣每移動5.2公尺溫度會很快的升高 1°C (10 英呎/ 1°F)。空氣移動得愈慢, 則空氣上升的愈快, 且溫度梯度也愈大。

氣流由開口進入溫室內後會逐步擴散, 其擴散高度與水平約成 7 度角, 即, 在前進 8 公尺的水

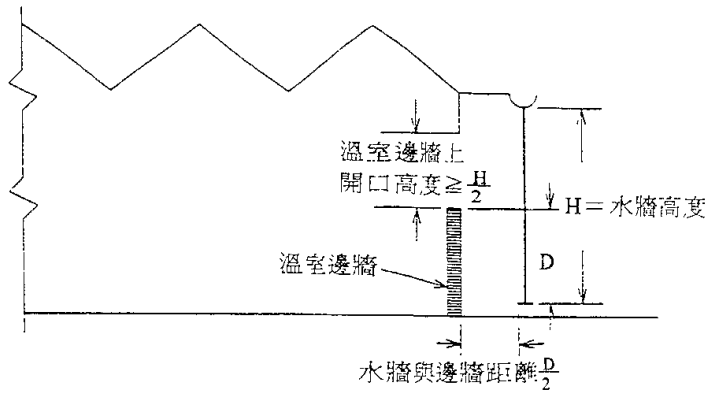


圖五b 風機內側加裝可防止逆流的自動百葉窗

8. 排氣風機應等間隔安置, 間距以不超過 6 至 9 公尺 ($20\sim 30$ 英呎) 為宜。又, 水牆的安裝必須是一個連續區域, 且必須有正確的大小和厚度。水牆若被門、窗給間隔, 變成不連續, 則將在溫室內造成一寬度為該不連續面寬度 6 至 8 倍的狹長熱帶。
9. 水牆在不用時應由溫室外部加以覆蓋, 儘量避免太陽的直射 (圖六)。
10. 水牆可建築在溫室內部、邊牆上或溫室外。

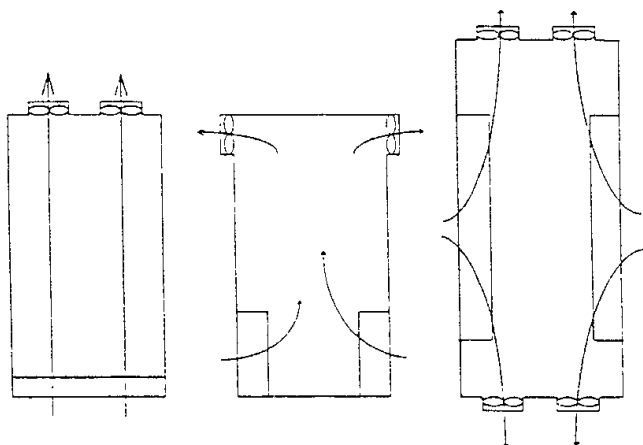


圖六 水牆外側安裝遮蔭裝置



圖七 水牆安裝於溫室邊牆之外的安裝原則

平距離內其範圍會擴寬至1公尺的高度。如此則通過水牆之上半層冷空氣傾向於爬昇到溫室的頂端，此部份的冷空氣對地面上作物的降溫幾乎只有極小的作用。在氣流為橫向流動的連棟溫室中（圖九上圖）各棟之屋頂本身即有導流的功能，向上的氣流可再往下通過作物葉冠面(Canopy)。在氣流為縱向流動的連棟溫室中(圖九下圖)，則有必要從屋頂往下延伸每隔9公尺安裝一個軟質透明阻風板(Nelson, 1985)。若屋頂至作物葉冠面之距離為1，則可將阻風板往下延伸2/3的距離，可使大部份的冷空氣流過作物葉冠面，達到有效的冷卻作用。

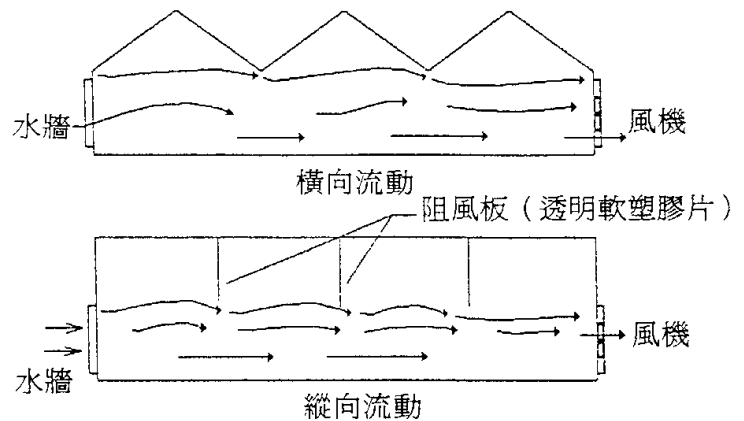


圖八 風機與水牆之各型配置方式

(二) 操作實務

從節約能源的角度看，維持一台風機正確的運轉與挑選一台有效率的風機是同等重要的。不當的操作情況可能降低風機的效率達50%或更多。對某些型式的風機而言，風扇皮帶的調節是所

有維護工作中最重要的。皮帶傳動式風扇必須經常調整，才能保證在暑熱的天候中隨時提供最大的通風量；所以其設計上應該設計成很容易被調整。當換裝新風機或新皮帶時，在運轉兩週後，應重新調整皮帶，因為新皮帶在最初使用時會有一初始的伸長，應將其調回適當的張緊度。



圖九 連棟溫室中風機與水牆安裝方位(上圖：橫向，下圖：縱向)對阻風板之需求示意圖

配與風機一起使用的自動百葉窗一般有兩種型式：一為馬達啟動，另一為空氣啟動。空氣啟動型的百葉窗會使氣流降低20~30%，且其效率也較差，這是因為有部份風力用在百葉窗的開啓上。馬達啟動型的百葉窗則無此問題，因為百葉窗是自動地開啓和關閉。除此之外，馬達啟動型百葉窗不會因百葉窗的骯髒或接合處變得有些黏滯而卡住(Person, et al., 1979)。

風機沒有運轉時，百葉窗便應緊閉，如此可避免加熱系統(若有)所補充之熱量的散失；或者當風機有多段控制時，初級階段皆只開啓部份風機，此時未開的風機便必需緊密關閉以避免逆流。

當風機在運轉時，百葉窗必須完全打開，否則它們將會阻礙來自溫室的氣流。一台有此阻流現象的風機需要運轉較長的時間且承受較大的負荷，才能達到所期望的通風冷卻效果，這相對也要花費更多的電力。百葉窗有時會在全開或全關的位置卡住，常常只是需要做點清潔工作或在樞紐處塗上油或去鏽劑即可解決。在風機的抽風流程，任何的阻塞物都會阻礙空氣流；所以室外型

百葉窗的風機（百葉窗在風機葉片之外，氣流先通過葉片再經過百葉窗）其效率較室內型百葉窗的風機要低（圖五b）。

使用室內型百葉窗的風機應該在風機外圍加裝安全防護柵（鐵絲網），以防工作人員接觸任何活動的機件（風機葉片、滑輪、皮帶）而發生危險。

雖然許多溫室的水牆降溫系統只用恆溫器做控制，一般建議再配合恆濕器之使用。恆溫器和恆濕器雖只提供兩段的on/off控制，多半皆已足夠，何況其尚有價廉的優點。恆溫器中溫度感測部所傳入的訊號為控制風機和泵的依據。恆溫器可因應室內氣候的改變開啓或關閉風機以維持較穩定的室內溫度。只使用恆溫器時，泵需配合風機動作。同時使用恆溫與恆濕器時，恆溫器動作同前，恆濕器則可另外用來控制水牆供水部中泵的動作，當溫室內濕度過高時將泵關閉。

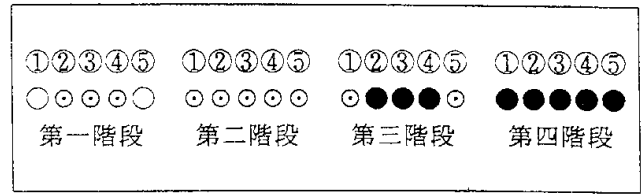
同時要根據溫度與濕度之狀況來控制泵，則此二者應予以串聯，溫度高且濕度沒有過高時才造成通路、啓動泵。這樣可幫助維持一穩定的溫度及避免過度的潮濕，也可幫助節約能源及用水。

恆濕器亦可與排氣風機連線，就算溫室內溫度不高，風機與水牆皆未啓動，但濕度過高時啓動風機。恆溫器和恆濕器應於每季開始時校正且各季中再作多次校正來確保其正確運作。

為了使水牆在不用時能維持全乾狀態，在操作程序上應先關泵，隔幾分後再將風機關掉。溫、濕度之調節除自動控制外應另各加裝一個手動開關，方便彈性使用，同時在每個風機與泵附近都應加裝一緊急斷電裝置以備不時之需。

等間隔安置的排氣風機可依控制策略分成若干組，隨溫度之高低開啓適量的風機。某些溫室裝有兩段變速風機，則控制策略中可有之變化就更大了。假設原單速風機可分為兩組（如下圖，②③④一組、①⑤一組），若改用兩段變速風機，則該溫室強制通風之控制即可有四種風量的變化（如下圖）；若考慮風機停止運轉的狀態，則應有九種變化，未納入下圖者包括：○○○○○，○●○○○，●○○○○，○●●●○與●●○○○，其中○表示關，○為第一段風速，●為

第二段風速。



若溫室中同時裝有加熱系統，則控制加熱系統開啓之設定點溫度一定要比控制通風用風機開啓之最低設定點溫度還要低3~5°C，以避免降溫與加熱控制系統的同時開動。

所有的溫濕度感測器或溫度計均應避免太陽光的直接照射（可加蓋或置於保護盒內），如此才可提供較正確的感測值或讀數。若裝於保護盒內，則應維持一定的通風使感測器能正確感測環境之狀況。另外應將它們安裝在適當的地方，以溫室中央與植物等高之處為最佳選擇地點。切勿將感測器安裝在加熱管線旁或空氣入口，尤其是水牆邊。

六、水牆系統的設計

水牆系統的設計可簡單分成兩大步驟：風機選擇與水牆設計。欲選擇合適之風機種類與數量，首先需計算溫室所需之總通風量；其次選擇所欲使用的水牆種類，再依據廠商提供之設計資料計算系統所需之水牆面積包括長度與高度，泵之大小，儲水槽容量及補充水所需的流量率。

溫室所需總通風量之計算主要根據以下四大因子：①溫室所在地之海拔高度，②溫室內部之最大光照強度，③允許的溫室內水牆至風機間之溫度梯度與④溫室內水牆至風機間之距離(Augsburger, et al., 1991)。每個因子分別由一參數代表，依序為： F_{Elev} ， F_{Light} ， F_{Temp} 與 F_{Vel} 。取前三者之連乘積 F_{house} 與 F_{Vel} 之較大者為水牆設計系統參數 F_{sys} 。此些因子之計算，簡單說明如下：

$$F_{Elev} = 1.04 + 0.04 * (Elev - 300)/300$$

當海拔 (Elev, 單位為公尺) 大於或等於300公尺

$$= 1, \text{ 當海拔 (Elev) 小於300公尺}$$

$$F_{Light} = FC/500$$

其中，FC為溫室內部之最大光照強度，以Lux為單位

$$F_{Temp} = 4.0/\Delta T$$

其中， ΔT 為允許的溫室內水牆至風機間之溫度梯度(°C)。

$$F_{house} = F_{Elev} * F_{Light} * F_{Temp}$$

$$F_{Vel} = 10/\sqrt{D}$$

其中，D為溫室內水牆至風機間之距離，以英尺為單位，當 $D \geq 100$ 英尺(約30公尺)時，本因子之值為1。

$$F_{Sys} = MAX(F_{house}, F_{Vel})$$

某溫室之長、寬分別為L與W(英制單位為ft，公制單位為m)，配有水牆與風機，當風機之靜壓為0.1英寸水柱時，通過水牆之風速以V表示，則該溫室所需之總通風量(AFR)可用下式計算：

$$AFR = L * W * V * F_{Sys}$$

其中， $V=8$ ft/min或0.04 m/s， $L * W * V$ 為基本通風量，AFR之單位為CFM或 m^3/s 。

溫室所有開口加裝防蟲網為近來之發展趨勢，此舉可有效防止蟲類之入侵，但同時也將提高系統之總壓降。總壓降之增加量與防蟲網材質與網孔大小有關，網孔大小則視所欲防制之對象而定。總壓降增加，風機個數與窗戶開口大小不變，則風機所提供之總風量將減少。對策之一為加大窗戶開口面積以降低靜壓值，對策之二則為增加風機數目或改換較大型風機，以提供較大的風量。有關防蟲網材質與網孔大小對靜壓之影響，應可仿前述之諸因子予以公式化，提供吾人作系統設計之參考。唯此方面之研究尚未完整。

由所需之總通風量再配合風機資料可求出所需風機之種類及數量。下表所列為廠商提供之水牆設計資料(以英制表示)，以典型的兩種水牆材質為範例。

水牆名稱	Excelsior Pad	Crossfluted Cellulose Pad
水牆材質	白楊木質纖維	纖維紙板
風量率需求	150 FPM/平方英尺	250 FPM/平方英尺
水牆面積		
泵之需求	每英尺水牆長度每分鐘需0.6加侖	每英尺水牆長度每分鐘需1/3加侖
儲水槽容量	每英尺水牆長度需1.5加侖	每英尺水牆長度需1.5加侖
補充水需求	每英尺水牆長度每分鐘需0.01加侖	每英尺水牆長度每分鐘需0.01加侖

由計算所得之總通風量值再配合上表之資料，可完成水牆之設計。介紹如下：

步驟1. 選擇水牆種類與廠牌，假設選擇Crossfluted Cellulose Pad

步驟2. 計算所需之水牆面積，以變數Area表示，

$$Area = AFR / 250$$

由於此者所允許的風量率比白楊木質纖維水牆較大，所以所需要的水牆面積就可以減少。

步驟3. 選擇溫室的一端安裝水牆，水牆長度以PAD_L表示，考慮可用的最長連續面積，一般等於溫室的全長L或全寬W，

步驟4. 計算所需之水牆高度，以變數PAD_H表示，

$$PAD_H = Area / PAD_L,$$

若此值超過溫室由地面至屋簷的高度，則前述之風量需求計算有問題，應重回前面步驟更改設計，或考慮安裝兩片水牆於溫室之兩側，配置方式請參考圖八。

步驟5. 計算所需之泵的大小，以變數PumpC表示，

$$PumpC = 1/3 * PAD_L$$

泵的需求為每分鐘可供應PumpC 加侖，

步驟6. 計算所需之儲水槽的大小，以變數TankW表示，

$$TankW = 1.5 * PAD_L$$

儲水槽必需能容納 TankW 加侖的水，以供應水牆上循環的水，同時容納當水牆不用時之所有循環水。

步驟 7. 計算所需之補充水的流量率，以變數 MakeUpW 表示，

$$\text{MakeUpW} = 0.01 * \text{PAD}_L$$

由於循環水通過水牆會有部份蒸發，所以必需有補充的來源，補充水之流量率為每分鐘 MakeUpW 加侖，儲水槽內應有液位開關來停止補充水之流入。

七、水牆在本省之適用性探討

自民國75年起，在農委會經費補助下，中央氣象局與農林廳合作建立台灣農業氣象觀測網，逐年在各試驗場所建立自動觀測一級或二級站，由各測站定期將氣象資料傳給中央氣象局彙總。由近十一年來的逐時氣象資料可得知本省平地地區的全年溫濕度狀況大致如下：

乾球溫度範圍在5至40°C

相對濕度範圍在50至100%

濕球溫度範圍在5至30°C

乾濕球溫差（濕球降）範圍在0至10°C

合乎上述範圍的分佈機率值列於表二。本表數據之計算係使用方(1994)所發展之微電腦軟體(Wea_Prob)，該軟體可自動擷取自氣象局之溫、濕度逐時資料檔，做迴歸計算，得出各地區之乾、濕球溫度與濕度之機率分佈及累積機率分佈公式，所有資料均可採繪圖方式顯示。軟體中目前包括本省十個地區十一年來的逐時資料。表三與表四即為該軟體之計算結果。吾人可由表三與表四得出以下分析結果（僅以台南地區做說明）：

1. 大氣之乾球溫度超過25、27與30°C之機率分別為39.63%，25.18% 與7.97%，此些值分別代表一年中的3471小時（約145天），2206小時（約92天）與700小時（約29天）。若溫室或其它農舍之遮蔭與通風效果良好，則僅靠自然或強制通風方式便可維持室內空氣溫度與大氣溫度相差不大，則一年中需要使用水牆或其它

蒸發冷卻方式來降溫之時機最多只有一個月；反之，若遮蔭不良且通風效果不佳，熱緊迫極容易造成，需要使用水牆或其它蒸發冷卻方式來降溫之時機增加，可能長達3個月或更多。此處所謂1或3個月，並非指一年中的某一個月或某三個月，而是指該系統實際操作時間的累計。

表二、本省各主要地區溫、濕度分佈機率表 I

氣象局測站	乾球溫度 5~40°C	濕球溫度 5~30°C	相對濕度 50~100%	濕球降 0~10°C
台北	99.67%	99.88%	96.92%	99.87%
花蓮	100.00%	99.99%	99.30%	99.99%
宜蘭	100.00%	99.96%	99.88%	100.00%
台南	100.00%	99.95%	98.78%	99.99%
高雄	100.00%	99.99%	99.17%	99.99%
嘉義	100.00%	99.67%	98.76%	99.97%
台中	100.00%	99.83%	96.42%	99.95%
台東	100.00%	99.00%	98.85%	99.93%
梧棲	100.00%	99.96%	98.81%	99.99%
阿里山	86.87%	76.58%	95.40%	92.85%

2. 大氣之相對濕度超過85%與90%之機率約為31.5%與17%。此些值分別代表一年中的2759小時（約115天）與1489小時（約62天）。大氣之相對濕度愈高，水牆所能發揮之功效愈低。在常溫範圍中，相對濕度為85%或90%時，乾濕球溫差不會超過2.5或1.5°C，水牆效率以85%計算，通過水牆之空氣溫度最多只比大氣溫度低2.125或1.275°C。在此高濕情況下的水牆幾乎未能發揮任何功效；若再加上考慮由於水牆的安裝而增加之靜壓降所造成通風量的減少，則此水牆系統在一年中幾乎有2~4個月的時間是乏善可陳。由圖一可得知，高溫的夏季午後時分通常其濕度為較低，是以水牆法有其可用之處。表三所示乾燥與適宜之區塊下的高溫區（≥27°C）即為水牆之最佳使用時機，此段時間約佔全年之30%。高濕高溫期佔3.72%（約13.5天），此為水牆法無效之時段。

表三、本省各主要地區溫、濕度分佈機率表II

氣象局 測站	乾球溫度				濕球溫度	相對濕度			
	≤10°C	> 25°C	> 27°C	> 30°C	≥25°C	≤70%	≤75%	≤85%	≤90%
台北	3.20%	31.32%	20.23%	8.50%	24.60%	26.69%	39.00%	69.07%	83.25%
花蓮	0.27%	30.74%	16.95%	3.70%	21.05%	21.01%	35.05%	73.49%	89.65%
宜蘭	2.14%	26.77%	15.83%	4.85%	24.45%	11.32%	19.63%	48.85%	68.50%
台南	1.72%	39.63%	25.18%	7.97%	32.10%	22.93%	35.86%	68.49%	83.03%
高雄	0.38%	46.08%	28.84%	7.54%	34.44%	26.61%	43.06%	81.25%	94.01%
嘉義	2.67%	31.49%	19.15%	5.78%	28.48%	14.01%	22.43%	50.56%	69.53%
台中	2.72%	32.81%	20.55%	6.99%	21.63%	28.22%	41.06%	71.81%	85.55%
台東	3.96%	38.25%	21.84%	5.94%	24.00%	31.84%	53.21%	86.70%	93.13%
梧棲	3.02%	31.51%	19.27%	5.90%	25.72%	22.70%	36.80%	73.91%	89.21%
阿里山	44.57%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	16.11%	21.37%	37.56%	50.54%

表四、本省各主要地區溫、濕度分佈機率表III

in °C	乾 燥		適 宜		高 濕		濕球降(WBD)		
	0% < RH < 65%		65% < RH < 85%		85% < RH < 100%		WBD = Tdb - Twb, °C		
	T < 27	T ≥ 27	T < 27	T ≥ 27	T < 27	T ≥ 27	WBD ≤ 3	WBD ≤ 4	WBD ≤ 5
阿里山	11.08%	0.16%	26.44%	0.11%	62.06%	0.15%	70.38%	78.38%	83.03%
台中*	9.10%	8.83%	35.64%	16.80%	28.60%	1.02%	66.28%	77.73%	87.43%
台北	8.05%	8.75%	34.64%	16.19%	30.21%	2.16%	68.35%	80.76%	88.84%
台南	5.93%	5.80%	32.16%	24.27%	28.11%	3.72%	69.01%	82.39%	92.25%
台東	9.72%	4.25%	46.96%	25.67%	12.29%	1.09%	58.39%	81.37%	93.29%
高雄	7.99%	3.94%	38.67%	30.51%	15.31%	3.57%	62.39%	81.83%	93.51%
嘉義	3.71%	3.65%	23.23%	18.29%	47.62%	3.47%	79.14%	88.13%	94.68%
梧棲	7.74%	2.90%	40.14%	22.49%	24.00%	2.72%	72.12%	87.12%	95.33%
花蓮	7.35%	1.78%	43.28%	20.47%	25.67%	1.45%	72.78%	89.05%	96.45%
宜蘭	3.01%	1.36%	27.63%	17.22%	47.90%	2.86%	84.82%	93.53%	97.92%

* 按照濕球降(WBD ≤ 5 °C)之機率值順序排列

3. 大氣之濕球溫度超過25 °C之機率為32.1%，此值代表一年中的2812小時（約117天，約4個月）。濕球溫度為噴霧方式的蒸發冷卻法的降溫極限，水牆法的降溫極限為空氣離開水牆之溫度，由於水牆效率不可能達100%，所以其降溫極限應高於濕球溫度。若水牆效率(β)為已知，則其離開水牆之空氣溫度應為濕球溫度加上(1 - β)乘上大氣之濕球降(WBD)，如下式所示：

離開水牆之空氣溫度

$$= \text{濕球溫度} + (1 - \beta) \times \text{WBD}$$

$$= \text{乾球溫度} - \beta \times \text{WBD}$$

使用水牆系統時，由水牆至風機必定存在一溫度梯度(ΔT)，所以溫室之平均溫度可用下式表示：

使用水牆之溫室的平均溫度

$$= \text{離開水牆之空氣溫度} + \Delta T / 2$$

$$= \text{乾球溫度} - \beta \times \text{WBD} + \Delta T / 2$$

由表四可同時得知濕球降在 $\leq 3^{\circ}\text{C}$ ， $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 與 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之機率值分別為69.01%，13.38% (82.39-69.01)與9.86% (92.25-82.39)，若 β 之值以80%計算，則離開水牆之空氣溫度如下：

大氣之濕球溫度加 0.6°C 或乾球溫度減 2.4°C ，

$$\text{當 WBD} = 3^{\circ}\text{C}$$

大氣之濕球溫度加 0.8°C 或乾球溫度減 3.2°C ，

$$\text{當 WBD} = 4^{\circ}\text{C}$$

大氣之濕球溫度加 1.0°C 或乾球溫度減 4.0°C ，

$$\text{當 WBD} = 5^{\circ}\text{C}$$

水牆系統可發揮最大功效者應屬 $\text{WBD} > 5^{\circ}\text{C}$ 之範圍，以台南為例，此時機佔全年的7.75% (1-92.25%)，相當於679小時 (約28天)；表四即依照此順序由上而下 (阿里山地區除外，該地不需水牆降溫系統)，就表四所列之地區而言，以台中地區之水牆系統之適用性為最大，台北地區次之，花蓮與宜蘭地區之效果為最差。

八、結 論

以下將水牆冷卻系統的設計與操作上需注意的事項，做一摘要式的總結：

1. 水牆的尺寸要適當，水份的供應要充足但是又不要太大，真正需要的是在水牆裡有一水的薄層，此薄層的水由於空氣的通過可蒸發進入空氣中；若水流太大，不僅可能增加氣流的阻抗，也可能會造成水珠未變成水汽之前就直接被帶入溫室，這都是不好的。一般，水牆製造商都會提供每英尺水牆長度所需之循環水量為若干，應確實依照此值作設計。
2. 水牆應連續地安裝在牆上，不應有中斷的部份。
3. 空氣通過水牆的速度與水牆材料有關。此速度值同時決定其所需要的水牆面積。
4. 一般而言，在下午的兩、三點左右，乾球溫度會達到最高點，此時乾球與濕球溫度之間的差

是最大的 (不考慮雨天)，此差值即為最大濕球降。本省夏季常有的濕球降約在 5 至 10°C ，水牆效率以80%計算，則離開水牆之空氣溫度可比大氣低 4 至 8°C ，若溫度梯度為 4°C ，則溫室之平均溫度為比大氣低 2 至 6°C 。

5. 風機上裝設自動百葉窗 (anti-backdraft shutter)，使風機在沒有運轉時不會有回流。
6. 要保持水牆降溫的效率，在操作時要維持溫室的氣密性。當系統運轉的時候不要讓門或其它通風口開啓，空氣要通過開啓的門是比通過水牆要容易的多。
7. 不論水牆是架設在溫室的牆上、牆內或牆外，要確保進入溫室的空氣都必須先經過水牆。
8. 在天冷時，若需啓用加熱系統，則水牆之外層應予以覆蓋以減少熱的散失。
9. 小心地觀察水牆的情況。如果水牆有破洞或變薄，則可保證的是大多進入溫室的空氣是由這些區域進來的，此些進來的空氣透過水牆達蒸發冷卻的效果本來就很差，要想降溫就更難了。

水牆、風機、泵與控制等是一個整合的系統，不論設計或操作都須一體對待。除了貫徹執行上述對策之外，系統的定期維護與確實管理是確保系統運轉正常的唯二法門。必須確保在系統運轉時，不必要的人員進出能減至最少。缺少好的管理，再好的設計、最佳的配備也將得不到理想的降溫效果。

九、誌 謝

本研究由國科會 NSC 83-0409-B-002-094「本省精密溫室環控極限與環控設備使用效率之探討 (I)」計畫補助，研究期間承蒙中央氣象局農業氣象科張侑芳小姐與本系黃秋本助理之協助，謹致謝忱。

十、參考文獻

1. 方煒。1994。本省精密溫室環控極限與環控設備使用效率之探討 (I)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC 83-0409-B-002-094。

2. 方焯。1994。溫室環境控制（下）。台灣農業機械雜誌。第8卷第1期。P.5-7。
3. 方焯。1993a。溫室環境控制（上）。台灣農業機械雜誌。第7卷第7期。P.7-11。
4. 方焯。1993b。「溫室環境控制-降溫方法之探討」。民國82年4月1-3日。桃園農業改良場。
5. Anonymous. 1990. Cooling System Design Considerations. Fort Myers, Florida: The Munters Corp.
6. Augsburg, N.D., H.R. Bohanon and C.E. Rahilly. 1991. The Greenhouse Climate Control Handbook. Horticultural Division, ACME Engineering and Manufacturing Corp. USA.
7. Bottcher, R.W., L.B. Singletary and G.R. Baughman. 1993. Humidity Effects on Evaporative Efficiency of Misting Nozzles. 4th International Symposium on Livestock Environment. Publication 03-93. St. Joseph, MI: ASAE.
8. Bottcher, R.W., D.J. Kesler and G.R. Baughman. 1988. Improving Evaporative Cooling effectiveness by reducing Ventilation Rate. ASAE Paper No. 884069. St. Joseph, MI: ASAE.
9. Buffington D.E. and T.C. Skinner. 1977a. Greenhouse Ventilation. Agricultural Engineering Fact Sheet. Gainesville, Florida: Florida Cooperative Extension Service.
10. Buffington D.E. and T.C. Skinner. 1977b. Maintenance Guide for Greenhouse Ventilation, Evaporative Cooling and Heating Systems. Agricultural Engineering Fact Sheet. Gainesville, Florida: Florida Cooperative Extension Service.
11. Fang, W. 1994. Greenhouse Cooling in Subtropical Regions. Symposium on Greenhouse Environment Control and Automation. Kyoto: XX IVth International Horticultural Congress.
12. Hellickson, M.A. and J.N. Walker. 1983. Ventilation of Agricultural Structures. St. Joseph, MI: ASAE.
13. Mastalerz, J.W. 1990. Greenhouse Effects on Environmental Control. San Francisco: HSA Proceedings 9th Annual Conference.
14. Nelson, P.V. 1985. Greenhouse Operation and Management. 3rd Edition. New York: Prentice-Hall, Inc.
15. Person, H.L., L.D. Jacobson, K.A. Jordan. 1979. Effect of Dirt, Louvers and other Attachments on Fan Performance. Transactions of the ASAE. 22(03) 612-616.
16. Skinner, T.C. and D.E. Buffington. 1977. Evaporative Cooling of Greenhouse in Florida. Agricultural Engineering Fact Sheet. Gainesville, Florida: Florida Cooperative Extension Service.

收稿日期：1994年7月13日

修改日期：1994年8月16日

接受日期：1994年12月12日