

蒸發冷卻原理 與水牆降溫技術(一)

中興大學農機系 陳加忠

國內夏天的天氣溫度通常高達35°C，在少數的時日，氣溫更是高達到38°C。對許多蘭科作物而言，適當的生長溫度在30°C以下，因此必須利用環境調整設備使溫室內部溫度調整到30°C以下。在環控技術中，利用自然通風，內部氣溫高於外部氣溫大約5-15°C。使用機械風扇大量通風，也僅能使得溫室內部溫度約等於外面大氣溫度。因此要使溫室內部溫度低於大氣溫度，且能低於30°C之內，唯有使用蒸發冷卻技術與冷凍機械。但是冷凍機械的設備能源成本十分昂貴，僅適用少數發芽室或為產期調整而特殊設計的溫室。對於多數作物而言，也唯有蒸發冷卻技術才能使得內部溫室低於大氣之溫度。此章節內容以此為主題，討論蒸發冷卻原理、此技術之實際應用、蜂巢式水牆之介紹、水牆之設計基準、水牆之維護與溫室結構的配合等。

一、蒸發冷卻原理與技術

在討論蒸發冷卻原理之前

，必須瞭解氣中相對濕度之物理性質。

對大氣空氣而言，本身不是完全乾燥的空氣。平常的空氣一定含有水蒸氣，含有的水蒸氣少的空氣比較乾燥。含有的水蒸氣量愈多，空氣愈潮濕。因此在一天之中，晚上空氣較潮濕，而在中午，空氣較乾燥。下雨之後，空氣則潮濕。因此，往往以海棉來比喻空氣，由海棉吸收水分的多少代表是乾海棉或濕海棉。

如何用數量來代表空氣是潮濕或乾燥？在物理學上首先以蒸氣壓力的觀念加以定義。空氣中的水蒸氣有壓力，稱為蒸氣壓。空氣愈潮濕，水分含量愈大，蒸氣壓愈大。到了空氣當中的水蒸氣一直增加到了極限值，通常稱為飽和值，則無法再吸收水分了，此時空氣中的水蒸氣壓力稱為飽和蒸氣壓。飽和蒸氣壓的影響因子在於空氣的溫度，目前已有理論的公式或是簡單的公式以計算飽和蒸氣壓。

空氣在尚未到達飽和時，所存在的蒸氣壓與當時溫度下的飽和蒸氣壓，兩者的比例值

一定少於或等於100%，因此此比例值即通稱為相對濕度，單位為百分比(%)。相對濕度愈高，空氣中水蒸氣愈多，愈潮濕。相反地，相對濕度愈低，空氣中水蒸氣愈少，空氣愈乾燥。

另一種空氣的性質為絕對濕度，代表每公斤乾空氣含有水蒸氣重量。單位為(kg水重量/kg空氣重量)。

瞭解相對濕度的觀念，可以討論介紹蒸發冷卻技術。使空氣與液體的水滴接觸混合。水滴吸收了空氣所含的熱量使水滴變成了水蒸氣(液體的水滴轉變成了氣體的水蒸氣)，因此空氣所含的熱量減少了，溫度就降低。水蒸氣增加了，因此空氣的相對濕度隨著增加了。此種空氣遇見了水滴，使溫度降低而相對濕度增加的過程稱為蒸發冷卻原理。在氣象量測中，在溫度計上面包裹著吸滿水分的紗布，以足夠的風吹過溫度計表面。因為水分的蒸發使溫度降低，一直到溫度不再降低的溫度底限稱為濕球溫度。而空氣在此降溫吸濕的過程並沒有外界能量的加入，

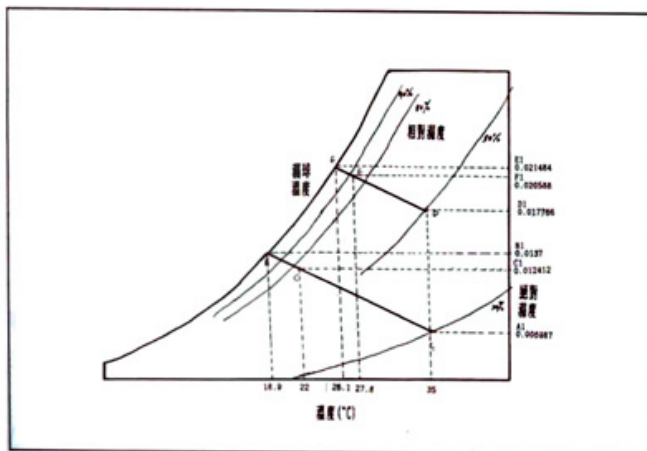


圖1. 空氣圖與蒸發冷卻路徑圖

為了方便與瞭解空氣中溫度與其他性質，將所有空氣物理性質的關係繪製成空氣圖（如圖1）。橫座標為乾球溫度，縱座標為絕對濕度，曲線為相對濕度。另外有濕球溫度與熱焓線（圖中等未標出）。由圖1可以清楚描述蒸發冷卻現象。以國內夏天常見的空氣為例，大氣溫度為 35°C ，相對濕度為50%（圖中D點），因為蒸發冷卻之作用，空氣性質沿著DE線變化，一直到了空氣完全飽和，到達濕球溫度E點（ 26.1°C ）不再降低，因此 26.1°C 為蒸發冷卻的降溫極限。此過程中氣溫降低了 8.9°C （ $35^{\circ}\text{C}-26.1^{\circ}\text{C}$ ），每公斤的空氣吸收了 0.00372 公斤的水量（ $0.021484-0.017766$ ）。以大陸型溫帶國家夏天的氣候為例，在同樣 35°C 溫度，20%低的相對濕度下（圖中A點），蒸發冷卻作用沿著AB線移動，一直到飽和（B點） 18.9°C ，

此過程中溫度降低了 16.1°C ，每公斤空氣吸收了 0.00671 公斤的水量。

由此比較可知，在同一溫度下，相對濕度愈低，利用蒸發冷卻所能降低的溫度限度愈低，也是國外溫室在夏天利用水牆等設備可以將溫室內部降到 25°C 以下的原因。而國內夏天最高溫度時，相對濕度仍在50%左右，因此無法將內部氣溫降到 25°C 以下。

二、蒸發冷卻原理之應用設備

由蒸發冷卻原理可知，降溫能力要好，第一個條件在於空氣中的大氣溫度與濕球溫度差距大，因此空氣吸收水汽後，溫度降得低。第二個條件在於空氣與水滴要有充份混合的機會，因此空氣與水滴接觸的表面積要愈大愈好，時間要愈久愈好。歸納上述條件，大氣溫度與濕球溫度相差要大，取

決於當時的大氣氣候，通常而言，相對濕度愈低，愈有利於降溫。第二個條件則取決於蒸發冷卻系統的設計能否滿足以下要求：

1. 有足夠的風量與風壓。
2. 有足夠的水量。
3. 風（空氣之流量）與水滴有足夠的接觸時間將水滴蒸發。

由於國內暑熱期間相對濕度在50%RH左右，全島不論山區或平地，濕球溫度接近 26°C ，而工程技術無法達到百分之百的降溫效果。因此利用蒸發冷卻技術，溫室內部溫度接近 28°C 。因此在不使用冷凍機械時，降溫設備的能力極限為 28°C ，代表生長條件 25°C 以下的作物無法在台灣周年生產。

利用蒸發冷卻之技術與設備可略分為五型（圖2），分述如下：

（一）水牆—風扇型

最早（1954年）發展的蒸發冷卻技術，即是此種水牆+風扇技術。溫室一側使用抽氣風扇，另一端的牆壁由吸水物質構成。水自上方供水部流下，到底部集水部收集再送回上方循環使用。由於風扇將大氣抽入內部時被強制利用通過水牆，空氣與水份接觸而產生蒸發冷卻作用，冷空氣通過溫室內部進行降溫作業。

此型設備成本不算昂貴，維護容易、使用簡易。但是水牆在國內之使用問題在青苔與

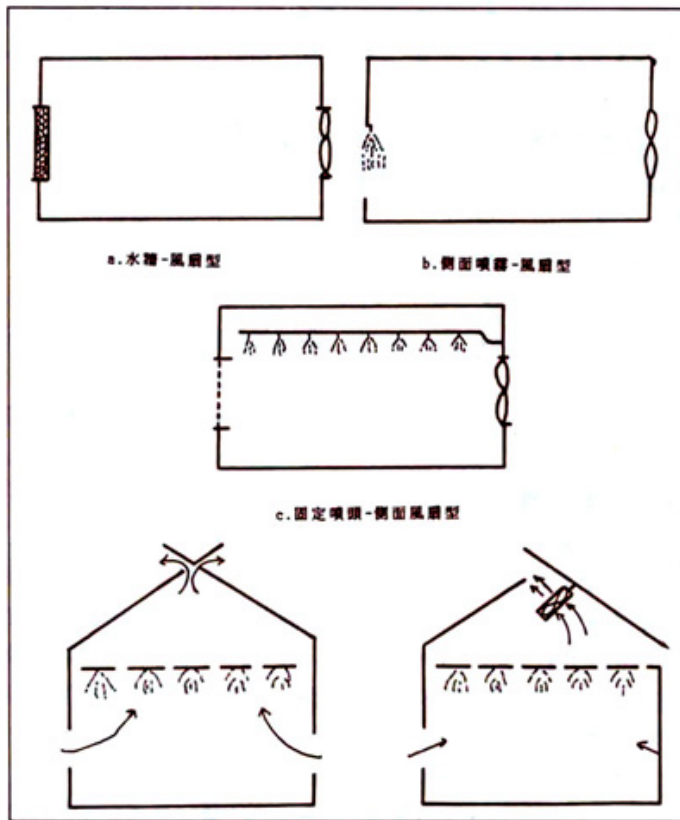


圖2. 蒸發冷卻之利用設備

長菌問題。主要原因在於國內傍晚相對濕度轉為偏高，風扇停止作用、水牆內不再供水。但因氣體之高濕，水牆內水份不易蒸發，使青苔、細菌得以成長。

水牆之細部構造與設計規範於下一章節持續介紹。

(二) 側面噴霧—風扇型

以溫室原風扇相對的另一邊裝設噴霧裝置，在外面空氣吸入溫室時，將霧滴噴入氣流中以達到蒸發冷卻的效果。早期日本人對降溫技術之研究與近年來台糖公司蝴蝶蘭栽培都曾採用過此型設備。

此方式最大的問題在於霧滴與空氣接觸的時間太短，造成靠近噴頭附近之地面有水滴未及蒸發而滴落，有部分地區有降溫效果，而大部份地區仍然酷熱，因此此降溫技術近年來很少被利用。

(三) 固定噴頭—風扇型

在溫室內部上方依固定距離裝設噴頭，以高壓邦浦（ $6900\text{kpa} \approx 66$ 倍大氣壓）施壓，使霧滴（Fog）以小於40微米（ 40microns ）之粒徑噴至溫室內部。由於霧粒十分細小，接觸面積大，蒸發速率快，蒸發冷卻的效果幾乎百分之百

，因此降溫性能最佳。

固定噴頭另一個優點在於噴頭裝設時均勻的分佈在整個溫室內部，霧粒因此也完全分佈，因此降溫之溫度均勻。由於空氣自外界吸入內部時無水牆的阻力，因此所需風扇之動力可以較少。

在美國廣受歡迎此類細霧系統，在國內推廣使用時則必需注意以下的問題：

1. 以細霧系統進行蒸發冷卻作業時，為維持十分細微的霧滴，動力邦浦需要以極高的壓力 加施動力，因此邦浦的購置成本，維護費用與安全性需要特別留意。

2. 為產生細霧，噴嘴的孔徑也十分細窄。水中的青苔雜質容易阻塞，造成出水不良。另外 水中化學物如鐵質、礦化物均容易沈澱而阻塞噴頭。因此水質的檢定與處理十分重要。

3. 國內大氣的相對濕度並不穩定，因此溫室內部最適當的供水量也不是常數。太少的細霧 則造成降溫不夠，太多的細霧則使空氣飽和，造成水滴落下於作物表面或地面，容易造成病害。最佳供水量需要以大氣溫度，相對濕度加以計算，控制設備比較複雜。因此實用的應用方式有兩類。

A. 以時間控制器控制噴霧時間與通風時間，以間歇方式分別動作抽水邦浦與風扇。

B. 噴嘴之作用數目以分層

進行，將原來全開／全關方式改成分段開啓方式。

(四) 固定噴頭—自然通風型

國內農民原來的溫室結構為太子式溫室，加裝固定噴頭於溫室內部，利用自然通風時空氣上昇而將細霧噴灑於空中，以蒸發冷卻作用降溫。此種應用方式最大的問題在於風量與風壓均不足，因此對溫室微氣候的改良能力有限。

(五) 固定噴頭—頂部風扇向上抽風型

此種應用技術主要為了改良原來利用自然通風時作業風量與風壓不足的問題。在屋頂開口下方，裝設向上抽氣的機械風扇，以吸力方式將內部空氣向上吸起而向外排出。因為係以向上方開口送風方式，空氣自底部兩側開口補充，溫室不必維持密閉狀態，在日本九州鹿兒島地區已開始使用。

由於國內的蒸發冷卻技術仍然以水牆為主，以下之章節以水牆為主題。有關固定噴頭的應用技術則在另篇文章加以發表。

三、水牆之結構與性能影響因子

典型的水牆結構如圖3。裝設在溫室一側，另一邊為風扇。因為抽氣作用，外界空氣通過水牆材料間隙而進入內部。水流自上方流下，而在底部

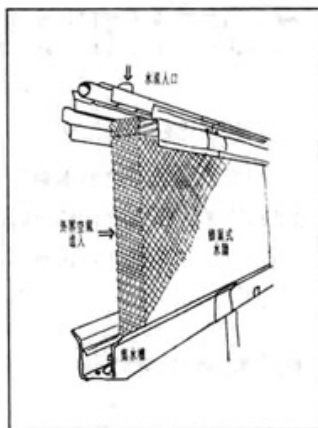


圖3. 典型的水牆結構

收集，流水作用使水牆材料吸收水份，而材料的特殊結構內部有空隙存在，空氣在空隙中穿透時與水面有接觸作用，產生了蒸發冷卻作用。

傳統上水牆材料有兩種，第一種水牆稱為非固體形態水牆，在夾層中充填充豬毛、碎布、薄木屑等材料。由於此種材料吸水後與空氣的交互作用並不完善，降溫效果不良，除了研究單位持續研發之外，很少有業者使用。

第二種水牆稱為固體材質水牆，即水牆的形狀製作而成固定形狀，而材料通常為相互摺紋狀的多孔紙材，通稱為蜂巢式水牆，此型水牆普遍應用於國內溫室與畜舍。

蜂巢式水牆包括兩部分，上面之材料稱為分配水用材料，底下部分為降溫用材料，規格通常以 $\alpha - H \times W \times D$ 註明（圖4）， α 表示摺紋角度， H 為水牆材料高度， W 為寬度， D 為厚度。 W 通常為30公分，高度 H

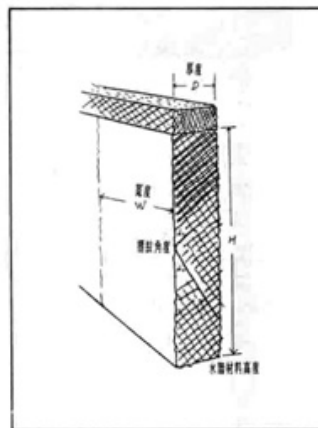


圖4. 蜂巢式水牆規格

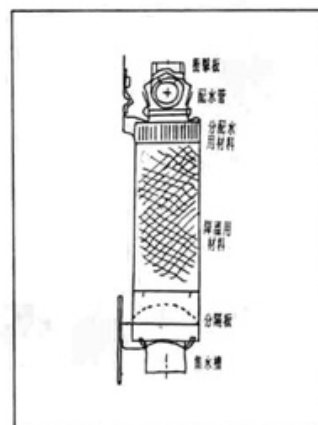


圖5. 蜂巢式水牆的細部結構

可選擇，例如Munter公司提供50、70、90、100、140、150、180與200公分等6種材料。厚度也有5、10、15、30公分等不同規格。

蜂巢式水牆的細部結構如圖5。由配水管供應水流，水流自水管上方開口處噴出，由衝擊板引導平均分佈於水分配材料。水分配材料高度通常以5公分為主，使用的目的在於使水流分配更均勻，向下流進蜂巢式材料後再由分隔板加以

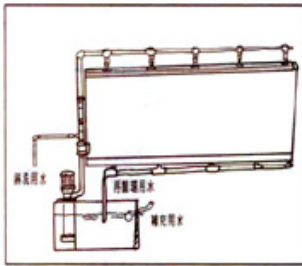


圖6. 典型供水系統

引導至水槽內收集回收再利用。典型供水系統與再處理系統如圖6。

爲了比較水牆的蒸發冷卻降溫能力，水牆效率的定義如下：

$$zff = (T_{db} - T_b) / (T_{db} - T_w) \times 100\%$$

T_{db} ：大氣空氣

T_e ：通過水牆後的空氣溫度

T_w ：當時大氣的濕球溫度

由圖1中DE線加以說明，在35°C, 50%RH的大氣狀態下通過水牆後空氣爲27.8°C，當時濕球溫度26.1°C，水牆效率可計算如下：

$$Eff = (35 - 27.8) / (35 - 26.1) = 80\%$$

瞭解水牆降溫效率定義與計算公式後，可以探討水牆之使用特性。

水牆的利用特性因子有四項：購買成本、使用年限、壓力降與降溫作業效率。

(一) 購買成本

水牆的購買成本，取決於供應廠商之製作技術與市場需求。

(二) 使用年限

由使用的材料，使用地區

的水質與空氣品質，還有整體系統的設計，使用者的維護保養等所影響。

(三) 壓力降

用來表示風力通過水牆後風壓減少量，壓力降在選擇使用風扇時十分重要，工程要求標準通常爲0.03kPa。影響因子與降溫效率相同。

(四) 降溫作業效率

影響因子有整體的設計，使用的材料、厚度、作用角度、通過的空氣速度，水流流量與使用時間。

由於水牆之供水量很少供應不足的現象，因此以國內慣用的蜂巢式水牆的影響因子中

三個主要項目：

1. 厚度
2. 作用角度
3. 通過的風速加以說明（圖7與圖8）。

1. 風速：材料厚度10公分，風速大於1.5公尺/秒後，對降溫效率影響不大。材料厚度15公分，風速可增加到1.8公尺/秒。

2. 角度：以45-45°C之分配角度

比30-30°C分配角度好。

3. 厚度：20公分厚水牆其作業效率高於15公分水牆更高於10公分水牆。

由此可歸納水牆之利用條件

1. 風速以1.5公分/秒左右最好，風速太快對降溫效率之提昇幫助不大，反而容易浪費能源。

2. 材料分佈角度45-45°C比30-30°C好。

3. 厚度15公分優於10公分。20公分可提高降溫效率至90%以上，但是壓力降顯著增加，需要更多風扇與電力，因此並未合乎成本要求。

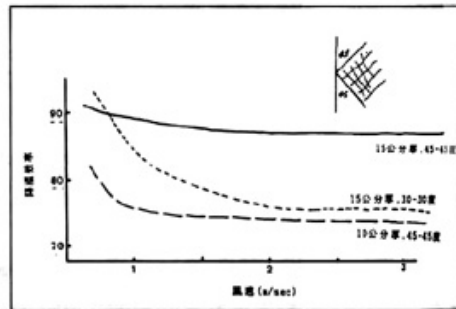


圖7. 水牆降溫效率性能特性圖
Glacier-Cor 公司

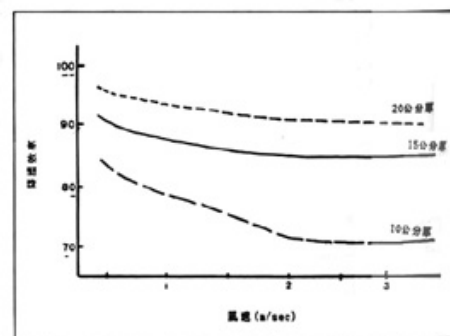


圖8. 水牆降溫效率性能特性圖
Munter 公司