開頂溫室控制系統及微霧降溫技術研究

黃禮棟*、姚銘輝*、鄭皓文**
* 作行政院農業委員會農業試驗所農工組研究員
** 作行政院農業委員會農業試驗所農工組研發替代役

一、摘要

本研究利用反應曲面法探討低溫微霧降溫系統進行不同噴霧溫度、噴頭孔徑與噴霧壓力對溫室內溫度、噴霧粒徑與噴霧流量關係之研究，並將該系統安裝於開頂溫室中，進行設施內部降溫、加濕效率與使用效益面向之評估。將分析結果之設施內溫度、噴霧粒徑及噴霧流量三項反應性狀利用中心組合因子設計（central composite design, CCD）建立其迴歸模式，評估低溫微霧降溫系統之最適操作參數。溫室頂部開頂面積與四周側邊下方開口面積分別固定於 45%與 34%，並將上述三項反應性狀之等高線圖重疊後可得噴霧最適溫度為 10~11℃；噴頭最適孔徑為 0.16~0.18mm；噴霧最適壓力為 96~107 kgf/cm2。依上述之最適操作條件進行實際量測，所得之設施內溫度為 29.6℃、噴霧粒徑為 16 μm 及噴霧流量為 1.42 L/min。本研究所得之實驗結果除了可提供低溫微霧降溫系統實際操作所需之參考資料，更可發揮開頂溫室之最大降溫效益。

關鍵詞：噴霧降溫、蒸發冷卻、反應曲面法。

二、前言

台灣位於太平洋季風氣候區，夏季炎熱多雨常有颱風，冬季時逢寒流來襲，又受全球氣候變遷影響，豪大雨日益增多，於此條件下多利用設施遮雨以穩定農作物生產，故本省利用溫室生產已行之有年且相當普及，而為了使作物在最適環境條件中成長，必須要有良好環控設備，目前環控設備已因能源價格之攀升與環境友善的考量之下，除溫室需求功能之外必須考慮設備之能源效率，以期維持產品品質及降低生產成本，提升產品競爭力，研發高壓微霧降溫技術使作物能於適宜之溫、溼度環境中栽培，生產高品質蔬果，提升產品價格，並節約夏秋溫室降溫所需之能源支出，以期對地球節能減碳方面亦有所貢獻。

利用噴霧系統噴出之微霧粒水滴氣化作用吸收溫室內空氣從陽光吸收之熱氣而降低溫室內溫度之研究及利用例子，在台灣已有應用之實例，由於水之氣化熱達 539 卡/公克，故其降溫效果在空氣濕度較低之情形下十分有效，其缺失為當空氣濕度高時效果不顯著，且會使作物潮濕產生病變。國內之善化工業公司於 93 年發表設施高壓噴霧降溫系統，於室外空氣相對濕度 60%-72%情形下，運轉 10 分鐘後室內濕度即

升高至 90-95%之間，有其應用上之限制。北歐芬蘭發展一套水帷幕降溫系統，在當地夏季可於溫室內生產小黃瓜及番茄等，但需要有大型水池以使吸熱之水藉由循環略降溫後再由冷凍系統降低溫度，且設備費用昂貴。依據實際觀測資料結果顯示開頂溫室在無任何降溫設備下，利用自然對流可提供與戶外接近之溫度環境，溫室頂部開啟在夏季正午約可下降 3℃。

雖然開頂溫室的通風對流為目前農業設施較普遍應用的降溫方式，可使溫室內外空氣進行交換，排除設施內高溫高濕的空氣，減少因高濕而衍生的病蟲害，促進植物生長。通風方式又可分為機械通風及自然通風二種。為減少成本支出，農家多使用自然通風，但卻容易造成通風量不足之情況，故此時必須利用機械通風加以輔助改善。在通風良好情況下，設施內降溫極限僅止於與外氣溫度相同，若是作物所需溫度低於外氣溫時，應用蒸發冷卻原理，使用噴霧降溫是一種解決高溫的方法(Prenger et al., 2002)。

三、材料與方法

3.1 實驗地點與材料

本研究所使用的試驗溫室設置於台中市霧峰區農業試驗所(Taiwan Agricultural Research Institute)內(24。1’49”N, 120。41’45”E ; north-south direction)，其結構為圓屋頂鋅管塑膠布溫室，長 12m、寬 5m，屋頂高度 4.3m，集水槽高度 3m，覆蓋材料為 0.18mm 厚之 PEP，無內外遮蔭，四面周壁裝有 32 網目之防蟲網及捲揚作業的塑膠布，屋頂為開頂式，由馬達驅動使塑膠布捲收至屋頂頂部，屋頂兩側開頂面積各為 7.8 m ×2 m。土壤表面並覆蓋一層塑膠布，如圖 1 所示。

3.2 低溫微霧降溫系統

本研究利用 YEU HER ENTERPRISE CO., LTD. Taiwan. 所生產的噴霧控制系統，以低溫水作為低溫微霧空調主機之設計基礎，將冷卻介質-水，經由五道過濾器過濾後注入第一水箱儲存，再由循環馬達輸送至蒸發器熱交換為 6~8℃之低溫水之後，經由水離子化器進行二次過濾並分解為更細小的離子以增加霧化效果，離子化後之潔淨水會進入第二水箱儲存，最後由下方出口處之高壓水泵送至低溫水管路及各噴頭執行噴霧降溫作業，而噴頭端的擾流風扇則以強制對流方式增加微霧的熱交換效率，提升降溫效果。系統設計圖如圖 2 所示

3.3 噴霧粒徑量測

以 Mastersizer-雷射繞射粒徑分析儀，對本低溫微霧降溫系統進行噴頭霧化粒徑分析與量測，量測範圍為 2.55~850 μm 微半圓形或不規則形狀粒子，光源為固態雷射，波長 680nm，功率為 1nW，量測濃度為 1ppm~10,000ppm，相對雷射 Obscurations

2%~95%，量測速度為每秒 2,000 個粒徑分佈。

3.4 實驗設計

本研究利用反應曲面法三變數三層級之中心點合成設計（central composite design, CCD），並以噴霧溫度、噴頭孔徑與噴霧壓力做為低溫微霧降溫系統之操作條件。根據預備實驗結果進行評估，將噴霧溫度範圍設為 7℃、10℃、13℃，噴頭孔徑範圍則為 0.15mm、0.20mm、0.25mm，噴霧壓力範圍設為 80kgf/cm^2、100kgf/cm^2、120kgf/cm^2，共計有 15 組處理組，中心點採三重複，如表 1 所示。低溫微霧降溫系統固定操作條件方面，低溫微霧降溫系統啟動時間為 10:00 AM ~ 14:00 PM 共 4 小時，經 1 個小時後，其系統降溫趨於穩定後，進行量測 11 時、12 時以及 13 時之溫室內平均溫度，噴頭數固定為 24 顆，六組軸流風扇之風速固定為 7m/s，溫室開頂面積為 45%，四周捲揚塑膠布由底部至上方 2m 處為封閉，2m 至 3m(集水槽)為開啟作為外氣通風之用。將其分析結果之三項反應性狀利用中心組合因子設計建立其迴歸模式，評估低溫微霧降溫系統之最適操作參數。



圖 1 本研究之開頂溫室

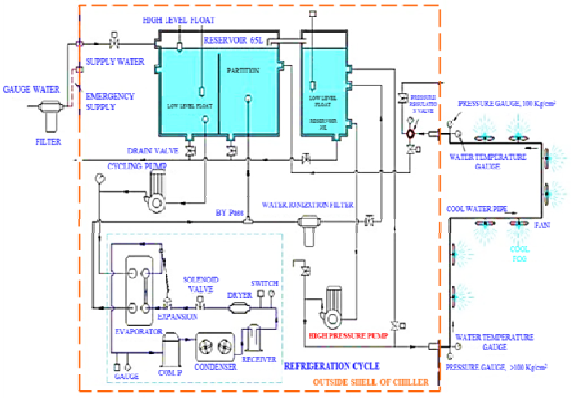


圖 2 低溫微霧降溫系統設計圖

四、結果與討論

4.1 溫室內降溫情形

在噴霧冷卻的應用上，高壓微霧之蒸散速率影響降溫系統的冷卻能力，其量測值如表 1 所示，當霧滴離開噴嘴後，在空氣中高速運動所產生的摩擦與吸熱的過程中粒徑會逐漸蒸散與縮小。因此，當微霧粒徑大小不同時，所產生的熱交換量亦不相同，微霧與空氣間的溫度差而產生的顯熱交換量(Katsoulas et al., 2001)以及微霧和周圍空氣的水蒸氣分壓之間的壓差而產生的質傳，所造成的潛熱交換量，而兩者的代數總和即為空氣與微霧間的總熱傳量，當總熱傳量愈大時，其降溫效果愈好。

各處理組測試後，其溫度變化在 28.2℃至 31.8℃之間。在圖 3 中，溫室內溫度之反應曲面圖可得知，當噴霧溫度較低時，溫室內溫度則會有先下降而後上升之趨勢；而當噴頭孔徑增加，溫室內溫度指標則會有下降的趨勢；當噴頭壓力增加時，溫室內溫度會隨著噴頭孔徑增加，有下降的趨勢，而當噴頭孔徑增加時，溫室內溫度則會隨著噴頭壓力增加，而有逐漸下降。根據反應曲面圖得知，噴霧溫度會隨著噴頭孔徑增加，其霧粒粒徑與噴霧量增大時，其蒸散時間與熱交換率不足，導致濕度過高，無法完全蒸散，進行影響溫度變化；噴霧壓力的提升，增加噴霧的距離，再藉由 6 組擾流風扇產生風速為 7.4m/s 之離心氣流攜帶，迅速地傳送至溫室中，使降溫更有效率(Arbel and Shklyar, 2003)。

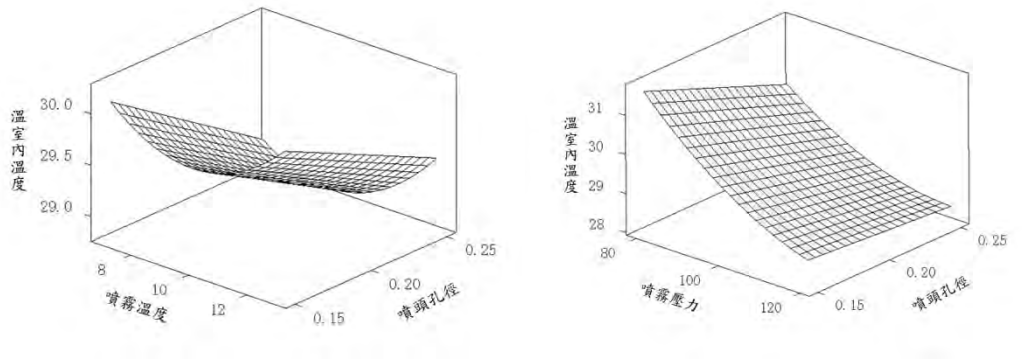


圖 3 溫室內溫度變化之反應曲面圖

表 1 實驗設計與各處理組之量測數據

Treatments	Coded			Variables			Responses		
	X1	X2	X3	X1 (℃)	X2 (mm)	X3 (kgf/cm^2)	Y1 (℃)	Y2 (μm)	Y3 (L/min)
1	-1	-1	0	7	0.15	100	29.7	15.1	1.32
2	1	-1	0	13	0.15	100	30.2	14.3	1.28
3	-1	1	0	7	0.25	100	29.1	22.2	1.56
4	1	1	0	13	0.25	100	29.9	18.9	1.48
5	-1	0	-1	7	0.20	80	31.5	19.9	1.18
6	1	0	-1	13	0.20	80	31.1	17.5	1.19
7	-1	0	1	7	0.20	120	28.9	15.2	1.60
8	1	0	1	13	0.20	120	29.0	14.8	1.67
9	0	-1	-1	10	0.15	80	31.8	17.3	1.17
10	0	1	-1	10	0.25	80	29.9	22.0	1.28
11	0	-1	1	10	0.15	120	28.9	10.3	1.48
12	0	1	1	10	0.25	120	28.2	17.2	1.66
13	0	0	0	10	0.20	100	29.7	18.2	1.44
14	0	0	0	10	0.20	100	28.8	16.0	1.47
15	0	0	0	10	0.20	100	29.4	16.8	1.53

X1, 噴霧溫度; X2, 噴頭孔徑; X3, 噴霧壓力； Y1, 溫室內溫度; Y2,噴霧粒徑; Y3,噴霧流量

4.2 噴霧粒徑

由量測實驗結果如表 1 所示，噴霧壓力愈大、其細霧之粒徑愈小，而總體表面積與熱交換面積則愈大，導致降溫效果較佳，反之，噴頭孔徑愈大，其粒徑愈大，整體蒸散作用較差，容易造成濕度過高。在圖 4 中，噴霧粒徑之反應曲面圖可得知，當噴頭孔徑在 0.25mm 時，噴霧粒徑會隨著噴霧溫度減少，有快速上升的趨勢，而當噴頭孔徑在 0.15mm 時，噴霧粒徑與噴霧溫度無太大變化。當噴霧壓力增加時，噴霧粒徑會隨著噴頭孔徑增加而有上升的趨勢，而當噴霧壓力增加時，噴霧粒徑則會隨著噴頭孔徑減少亦有相同下降的趨勢。即當噴霧在同樣噴霧壓力、但噴霧溫度低於測試環境露點溫度(約 27℃)的情況時，其粒徑會因為與周圍空氣中的水蒸氣發生質傳(Hwalader and Liu, 2002)，水蒸氣凝結於水滴表面，而使粒徑變大，無論工作壓力的大小會因低溫而造成粒徑增加。在溫室中，噴霧邊界層上的水蒸氣則會蒸散至空氣中，使空氣中濕度增加。若粒徑較大時，有未蒸散完全的狀態下，水滴易附著在作物上，造成植物發生病蟲害，也使得溫室內的環境變成潮濕的情況，故在應用上需以強制通風增加霧粒飄移的距離並提升蒸散效率及降溫效果。

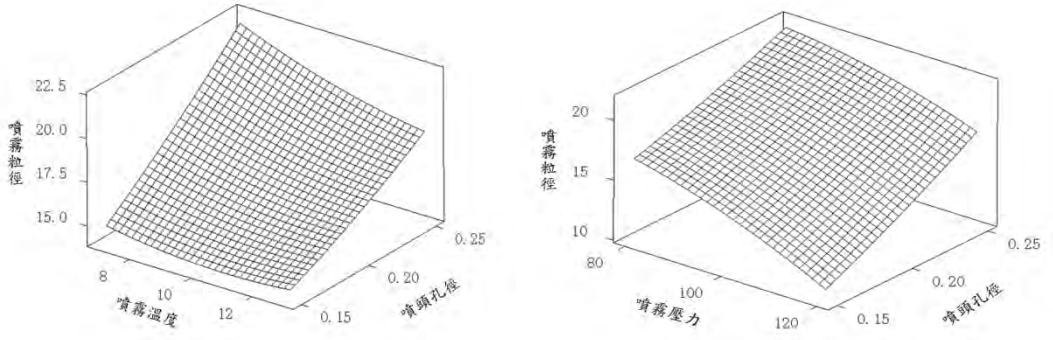


圖 4 噴霧粒徑之反應曲面圖

4.3 噴霧流量

噴霧流量為影響系統之降溫能力及環境濕度的重要參數。噴霧流量經測試後在 1.17L/min 至 1.67L/min 之間，如表 1 所示。在圖 5 可見，當噴霧溫度增加時，噴霧流量會先緩緩上升而後下降的趨勢，亦即噴霧溫度影響噴霧流量較為不大，而噴頭孔徑變大時，會使噴霧流量快速上升，而當噴霧壓力增加時，噴霧流量則有快速上升之趨勢，代表噴霧壓力會隨噴頭孔徑增大而上升。經噴霧流量之反應曲面圖顯示，噴頭之噴霧流量與噴頭口徑及壓力大小成正比，但噴霧量增加的同時環境濕度也隨之上升(Fukatsu and Hirafuji, 2005)，故溫濕度的控制是以間歇噴霧的方式做調控，目前較佳的控制方式是以設定溫室內溫度做為噴霧啟動條件，配合設定相對濕度為停止條件，以達溫室內降溫及避免控制環境內過濕之目的。

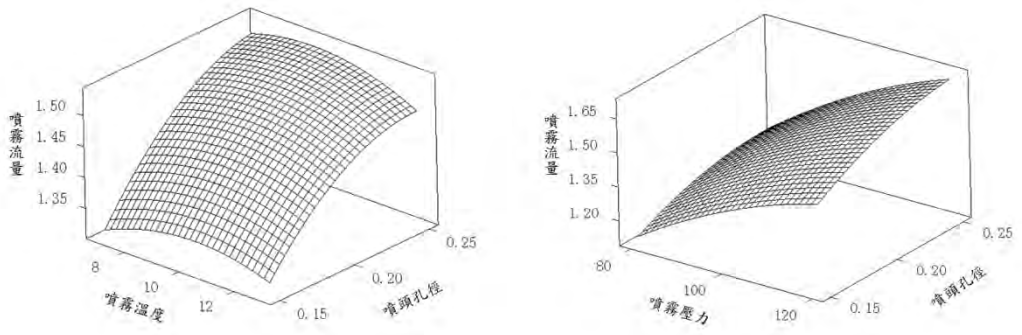


圖 5 噴霧流量之反應曲面圖

4.4 最適操作條件

經由本實驗前述有關低溫微霧降溫系統之各項反應性狀分析可知，產品之溫室內溫度代表植物於溫室內合適之生長溫度。噴霧粒徑在低溫微霧降溫系統中代表蒸散效率的快慢，同時也影響空氣間的熱交換時間與熱交換量，因此，噴霧粒徑同樣也是不能忽略的重要指標。噴霧流量為影響系統之降溫能力及環境濕度的重要參數，實際應用上，測得噴頭的噴霧粒徑及噴霧流量之後，才能依照與降溫之環境性質進行規劃，代表噴霧流量大小影響高壓霧化增加其體表面積後，可直接提升其總熱交換量，進而影響溫室內降溫的程度(Abdel-Ghany and Kozai, 2006)。故以低溫微霧降溫系統之溫室內溫度、噴霧粒徑及噴霧流量作為最適操作條件之指標。並參考下列文獻（蔡等人，2000；黃，2000；余和江，2013；Fukatsu and Hirafuji, 2005）與主觀認定，並配合本研究之實際分析結果，設定條件目標範圍為：29.4℃＜溫室內溫度＜29.8℃；15 μm＜噴霧粒徑≦16 μm；1.36 L/min＜噴霧流量＜1.48 L/min。將以上三種反應性狀之反應曲面等高線圖重疊以找出最適操作區域範圍，如圖 6 所示。重疊以上各範圍之結果，由圖 6 中之白色區域（feasible region），即為本研究之最適操作比例範圍。由圖 6 可得知當溫室內溫度為 29.6℃時，噴霧粒徑為 16 μm 以及噴霧流量為 1.42 L/min。將此驗證條件帶入各反應性狀之迴歸模式，可得噴霧溫度之最佳操作範圍為 10~11℃、噴頭孔徑之最佳操作範圍為 0.16~0.18mm、噴霧壓力之最佳操作範圍為 96~107 kgf/cm^2。

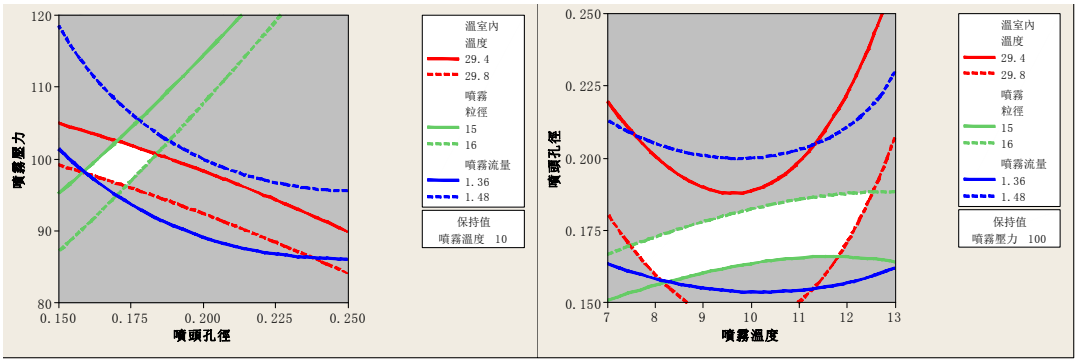


圖 6 等高線圖求最適配方比例

五、結論

傳統風機式噴霧降溫法已普遍應用於溫室植栽及市場等開放性空間進行降溫調節，但無法調控微霧的溫度及粒徑大小，而使降溫效果受限。本研究採用低溫微霧降溫系統可調整噴霧出水之壓力大小，配合不同噴頭孔徑，其噴霧粒徑大小亦隨之改變，以 100kg/cm^2 的壓力噴霧時，大部分微霧在掉落地面以前就完成蒸發，再利用蒸散冷卻的原理，配合擾流風扇，增加通氣量，由開頂溫室之上方開頂面積進行蒸散作用，溫室內溫度與大氣溫度相較之下，其降溫幅度達 6℃以上。本研究之低溫微霧降溫系統，以高壓噴霧能產生較佳的霧化效果，提升蒸發冷卻效率，故較低壓系統更具經濟效益，根據本研究之提供低溫微霧降溫系統最適化操作條件作為參考資料，更可發揮開頂溫室之最大降溫效益。

六、參考文獻

1. 余光正、江晏慶。2013。以冰霧空調系統改善環境負離子數量及降溫之研究。綠色科技工程與應用研討會。論文編號:GT3-004 127~132。
2. 黃裕益。2000。鼓風式噴霧法於開放型溫室降溫之研究。農業機械學刊 9(4)：17-~30。
3. 蔡致榮、梁連勝、陸龍虎。2000。氣輔噴霧系統之模擬評估。中華農業研究 49(2)：68~87。
4. Abdel-Ghany, A.M., E. Goto and T. Kozai. 2006. Evaporation characteristics in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. Renewable Energy 31: 2207-2226.
5. Arbel, A., M. Barak and A. Shklyar. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. Biosyst. Eng. 84: 45-55.
6. Fukatsu, T. and M. Hirafuji. 2005. Field monitoring using sensor-nodes with a web server. Journal of Robotics and Mechatronics 17(2)：164-172.
7. Hwalader and Liu. 2002. Numerical study of the thermal hydraulic performance of evaporative natural draft cooling towers. Applied Thermal Engineering, 22 : 41-59.
8. Katsoulas, N., A. Baille, and C. Kittas. 2001. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. Agricultural and Forest Meteorology 106:233-247.
9. Prenger, J. J., R. P. Fynn and R. C. Hansen. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment 45(6): 1779–1788.