

# 開頂溫室自動控制系統研發

姚銘輝<sup>1,\*</sup> 洪福良<sup>2</sup> 趙宗明<sup>2</sup>

## 摘要

姚銘輝、洪福良、趙宗明。2016。開頂溫室自動控制系統之研發。台灣農業研究 65(3):306–312。

夏季高溫問題一直是溫室環境控制難以解決的問題，尤其是一般建置成本較低之蔬果溫室。本研究以文心蘭生長需求為依據，將溫室各項捲簾開閉之控制參數化，結合自動控制技術，以研發開頂溫室之自動控制系統。本研究之作物對象為文心蘭，文心蘭和其他作物相較，其生長環境於低光照狀態且可接受較高的環境溫度，所以在降溫策略的擬定上，可於較低光及較高溫的環境生長。研究結果顯示，開頂對於溫室內微氣象影響，可因垂直風速增加而將熱氣及水汽排於溫室外。另依據作物生理需求所規劃溫室控制流程，由實測結果，自動開頂控制系統有助於降低夏季溫室內積熱，未來可依據不同作物生理需求分別建立控制系統，以提升簡易溫室對於環境控制的能力。

**關鍵詞：**開頂溫室、自然對流、自動控制、微氣象。

## 前言

政府近年來積極推廣設施栽培，以調節產期、提升品質、促使產業由傳統產業轉型為精緻農業。10年來設施栽培農業發揮較優勢之生產方式，創造較高經濟價值，但生產環境卻隨著氣候變遷使得作物生長面臨更多的逆境。雖然投入降溫設備後可有效營造適合作物生產的環境，但生產成本卻非蔬果類作物所能承擔，如何以低成本及運用氣象資源改善溫室環境是本研究之目的。擴大開頂面積以降溫，並經由垂直風速增加將溫室內高溫及高濕排室外，皆是有效做法。另因設施栽培土壤缺少長期及大量的雨水淋洗，農民又慣於施用過量的肥料，在連續高密度複種情況下，經常會出現土壤因鹽類累積而劣化。改善溫室氣象環境，增加葉片蒸發散量以帶動蒸散流增加根部對水分及營養鹽的吸收，除增加肥料使用效率，也可減少土壤鹽分過度累積風險。

農業設施乃藉由人為方式來控制栽培環

境，藉以達到提高產量、改善品質及穩定生產等目的。目前農業設施泛指以溫室 (greenhouses) 栽培之耕作制度，但就溫室的定義相當稀少，大部分以環境控制農業 (controlled environment agriculture; CEA) 的名詞出現的文獻較多 (Scott *et al.* 2005; Alec 2013)。環境控制農業，是指任何使農業生產者操控作物的環境，以達到作物生長需求條件之農業技術與設施。台灣地區溫室型式可概分為簡易型及精密型 2 種，精密型如蘭花溫室，是高投入及高成本之溫室栽培模式，可透過各項環境控境設備以生產高產值之農作物。另 1 種為種植蔬果所用之簡易型溫室，採用鍍鋅輕管或輕型鋼材為材料，頂部以透光之塑膠布覆蓋，四周為塑膠布捲簾，捲簾內裝設防蟲網，鮮少需能源投入之設備，建置及營運成本相對低廉，是目前台灣溫室栽培之主流型式。然而，簡易型溫室在夏季面臨溫室內高溫及高濕之逆境，夏季溫度常超過 40°C，不僅作物無法生長，農民也

---

投稿日期：2015 年 7 月 30 日；接受日期：2015 年 12 月 8 日。

\* 通訊作者：mhyao@tari.gov.tw

<sup>1</sup> 農委會農業試驗所農業工程組研究員。台灣 台中市。

<sup>2</sup> 農委會農業試驗所農業工程組研究助理。台灣 台中市。

難以在溫室內工作。由於夏季溫室高溫之熱源來自於太陽輻射穿透頂部塑膠布及部分輻射對塑膠布加熱之作用，使其熱源往溫室內傳送而造成高溫出現。在熱帶及亞熱帶國家之溫室栽培，夏季皆會面臨溫室內高溫問題。Kumar *et al.* (2009) 認為解決方法包括遮蔭降低太陽光輻射量，改變溫室結構以增加自然通風，研發塑膠布材質以改善光學特性，利用水汽/霧蒸發以吸收溫室內熱氣等。其中溫室開頂增加通氣面積以增加自然對流，是一種低成本之溫室降溫策略 (Baptista *et al.* 1999; Atarassi *et al.* 2006)。

開頂溫室對於作物生長的益處，在夏天將因開頂而減少溫室效應積熱問題，冬天則覆蓋增溫減少寒害發生，以維持溫室溫度的平穩。另可因垂直對流增加，水汽氣壓差增加，溫室作物葉片氣孔開啟，蒸散流加速，有助於根部營養吸收，也減少溫室土壤鹽化問題。開頂雖具有降低溫室內溫度及濕度作用，但因現有大部分開頂結構為固定型，為防止雨水濺入溫室內，一般開口小且開口方向與溫室垂直，如此熱氣及水汽無法快速散出，對於降溫效果有限。本文主要是研發 1 套開頂自動控制系統，環境控制項目包括頂部塑膠布、四周捲簾及外遮蔭，所有控制元項皆可由馬達驅動，並連結於控制器，再依據作物生長需求規劃控制程

序，以進行溫室內微氣象控制。

## 材料與方法

### 溫室規格及設備

兩棟開頂溫室之規格，其結構為圓屋頂鋸管塑膠布溫室，長 12 m、寬 5 m，屋頂高度 4.3 m，集水槽高度 3 m，覆蓋材料為 0.18 mm 厚之塑膠膜。屋頂上方建置外遮蔭，四面周壁裝有 32 網目之防蟲網及捲揚作業的塑膠布，溫室屋頂為開頂型，由馬達驅動使塑膠布捲收至屋頂頂部。開頂面積 31.2 m<sup>2</sup>，佔圓頂總面積 52%。環境控制項目包括頂部塑膠布、兩側捲簾及外遮蔭，皆可由馬達驅動，並由控制系統依據作物生長需求調整頂部與兩側捲簾捲簾及遮蔭網，進行溫室內微氣象之控制。

### 氣象環境偵測

儀器包括全天輻射儀 (pyranometer) (Eppley precision spectral pyranometer; PSP)；光度計 (quantum sensors) (Li-190SA)，測定範圍 400–700 nm，每一感測器在使用前以光學輻射校正器 (optical radiation calibrator) (Licor 1800-02) 校正參數；戶外大氣所使用之溫濕度計 (hygro-thermometer) (Campbell CS 500)；溫室內感測器裝設位置示意圖，如圖 1

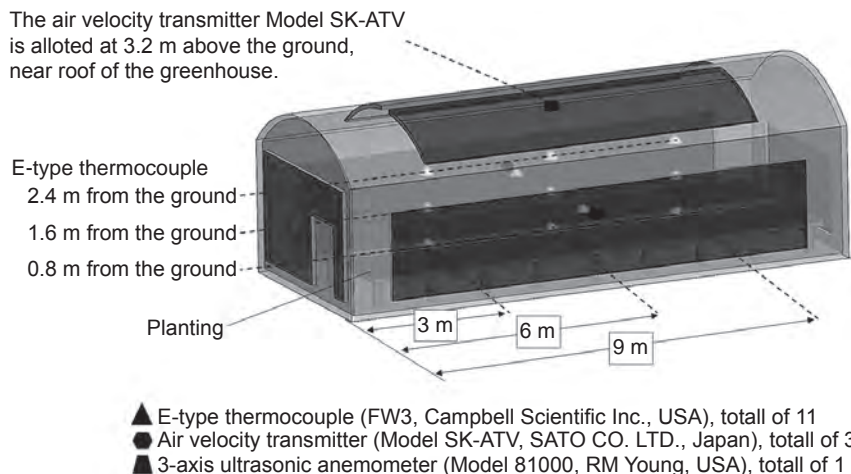


圖 1. 感測器裝設位置示意圖。

Fig. 1. Sensing elements for an automatic open-roof greenhouse.

所示。E-type 熱電偶溫度計 (FW3, Campbell Scientific Inc., USA), 共 11 支, 分別在距地面 0.8、1.6 與 2.4 m 處的前、中、後各擺放 3 支, 另外 2 支則在溫室內左右兩側, 藉以監測整間溫室空間的溫度分布情形, 輸出規格為  $60 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。熱線風速計 (Model SK-ATV, SATO Co. Ltd., Japan), 共 3 支, 測定範圍為風速  $0\text{--}30 \text{ m s}^{-1}$  (溫度補償:  $0\text{--}60^\circ\text{C}$ ), 測定精度為風速  $\pm 3\%$  FS, 分別置於兩側牆面通風之防蟲網與上方接近開頂通風口處, 主要為監測大氣入口風速與風向。三維音波風速計 (Model 81000, RM Young, USA), 共 1 支, 風向分辨率  $0.1^\circ$ , 風速分辨率  $0.01 \text{ m s}^{-1}$ , 置於溫室空間最中央的位置, 藉以觀測整間溫室三維的風速與風向。我們將上述感測器搭配資料抓取裝置 (CR1000, Campbell Scientific, USA), 資料擷取間隔設定為每筆 1 min, 擷取時間設單日為 00:00–23:59 之間共 14,400 個分析點, 不同的實驗溫室測試條件則分不同天進行。

### 光合作用速率及蒸散速率量測

利用光合作用分析儀 (Model 6400 Licor, Inc., Lincoln, NE, USA) 量測作物葉片光合作用速率、蒸散速率、氣孔導度及氣孔內腔二氧化碳濃度 ( $C_i$ ) 之數值。

### 開頂溫室自動控制策略

將外遮蔭、頂部塑膠布、前後側捲簾及左右側捲簾共 4 種降溫設備之馬達啟動控制, 連結於以資料收集器為主體之自動控制系統, 控制程序為控制 10 min 動作 1 次。第一優先: 下雨時頂部關閉。溫度大於  $26^\circ\text{C}$  時, 則頂部、左右側側、前後側捲簾開啟。溫度小於  $24^\circ\text{C}$  時, 則頂部、左右側捲簾關閉, 溫度小於  $20^\circ\text{C}$ , 則前後、左右側捲簾再關閉。光度大於  $500 \mu\text{mol}$ , 則外遮蔭開啟, 光度小於  $100 \mu\text{mol}$ , 則外遮蔭關閉。

### 結果與討論

溫室環境的設定來自於作物生理需求, 每種作物有其最佳生育條件, 包括對溫度、濕度、光照及水分的需求, 溫室內能夠控制之氣象因子以溫度及光度為主。有關於蝴蝶蘭光合作用特性及與氣象因素 (尤其是溫度及光度) 的交感已有相當多研究 (Yao *et al.* 2011), 對於推估蝴蝶蘭園之最佳溫度及光照條件, 已有較詳細的統計數據與實驗條件。我們參照文獻參數, 並利用環控試驗室量測不同溫度及光度對於文心蘭葉片之光合作用影響程度。由圖 2 的結果, 說明文心蘭對於光度需求及敏感度較低, 當光量子密度 (photosynthetic photon flux

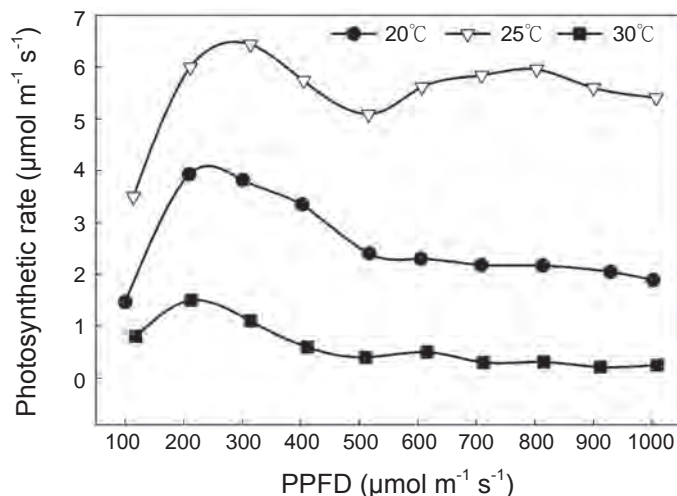


圖 2. 溫度及光度對文心蘭葉片光合作用速率之差異。

Fig. 2. The changes of photosynthesis rates of *Oncidium* leaf under the different temperatures and PPFD combinations.

density; PPFD) 在  $200\text{--}300\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  即達飽和點，但溫度效應則影響極大； $25^\circ\text{C}$  有最高光合作用速率，約可達  $6\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ ， $20^\circ\text{C}$  為  $4\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ ，溫度高於  $30^\circ\text{C}$  在適當光度下則只剩下  $1.5\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 。由此結果，說明文心蘭對溫度敏感遠高於光度，光度控制在  $200\text{--}300\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  即可達最佳條件。另由實測溫室內文心蘭之生理參數，將光合作用儀設定為自動偵測模式，每 10 min 偵測 1 次，圖 3 為葉片生理參數及即時氣象在 1 日間之變化。當太陽光在 6:00 開始照射後，文心蘭葉片之光合作用及蒸散作用開始啟動，顯然此時氣孔開啟，葉片進行固碳作用。並隨光度逐漸增加，文心蘭葉片對二氧化碳羧化反應提高，但當葉片溫度到達  $30^\circ\text{C}$ ，此時光度約為  $150\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ ，光合作用及蒸散作用達到最高 (分別為  $2.5\ \mu\text{mol CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  及  $0.4\ \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ )。之

後葉溫皆高於  $30^\circ\text{C}$ ，葉片生理反應停滯，一直到光度消失為止皆然。雖然這段時間有適宜之光度範圍 ( $200\text{--}300\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ )，然因溫度使氣孔關閉，而停止生理作用。這些基本作物葉片生理資料是開頂溫室自動控制決策的依據。

溫室增加通氣面積，可加大換氣率以減少因溫室效應之積熱問題 (Flores-Velazquez *et al.* 2014)，此種方式不需要動能也不需要後續溫室營運成本。當然，也因無降溫設備，所以溫室內溫度最佳狀態為與室外溫度相同。過去我國已有開頂類型之溫室，但因考量颱風問題，一般開口甚小或與溫室垂直，造成降溫效果不明顯。本研究研發之自動開頂系統，主要是擴大開頂面積，讓熱氣及水氣直接向頂部傳送，較冷空氣由側邊進入，形成空氣循環。圖 4 為兩棟開頂溫室之外觀及控制設備，由馬達驅動外遮蔭，頂部捲簾及四周捲簾。

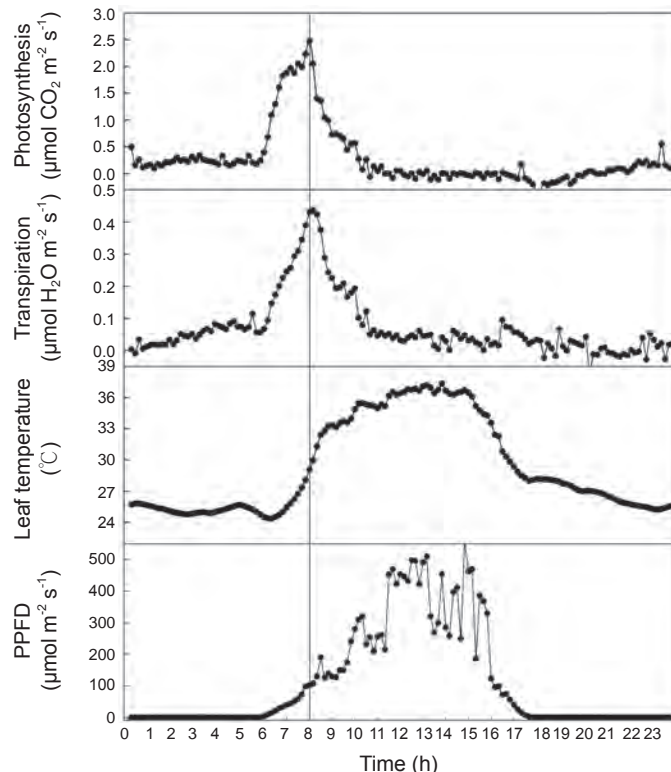


圖 3. 溫室內文心蘭葉片光合作用、蒸散作用、葉片溫度及光度之日變化。

**Fig. 3.** Diurnal changes of photosynthesis, transpiration, and temperature of an *Oncidium* leaf and fluctuation of PPFD in greenhouse.

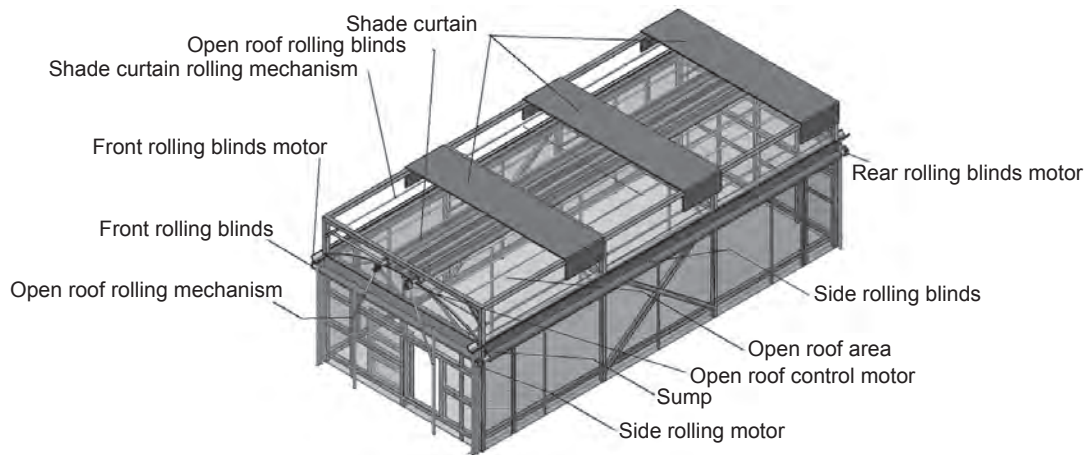


圖 4. 自動開頂溫室之控制設備配置情形。

Fig. 4. Control units for an automatic open-roof greenhouse.

為了解開頂結構對於溫室內微氣象的影響，在兩間溫室內各架設包括垂直及水平剖面之溫度計 11 支，熱線風速計 3 支，三維風速計 1 支及光度計 1 支，以提供溫室微氣象量測之用。其中，感測器裝設位置於圖 1 所示，同時以四周捲簾開啟為基本條件，一棟將開頂打開，另一則關閉，以觀測開頂對於溫室微氣象之影響。圖 5 為兩棟溫室之日溫度比較，開頂對於降溫效應，在正午 (11:00–13:00) 之間，每 1 min 擷取 1 筆資料，兩間溫室分別各有 120 個資料點，結果顯示約有 2–3°C 的溫差，平均值 2.43°C，標準差為 1.45°C；濕度則差異相當明顯 (圖 6)，開頂在白天有助於水汽對外

溢散，相對濕度較未開頂處理為低；開頂溫室之溫度及濕度較未開頂溫室為低，正午因煙囪效應 (stack effect) 是原因之一，以熱線風速計量測由地面向上之垂直風速變化 (圖 7)，垂直風速增加以帶動熱空氣及水汽的向上傳送，經頂部開啟而傳於室外。

由溫室實測結果說明，開頂對於降溫及除濕具有效果，但另一降溫方式為遮蔭。本研究在溫室頂端上約 50 cm 加裝自動外遮蔭系統，外遮蔭可降低太陽光對溫室塑膠布的加熱，減少溫室積熱產生，對於降溫具有更多效率。然而對於作物生長而言，遮蔭則減少葉片行光合作用，如何在遮蔭降溫及作物生長間取得平

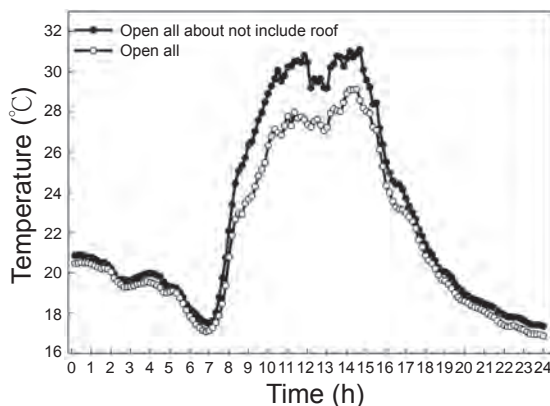


圖 5. 溫室內開頂及未開頂之日溫度變化。

Fig. 5. Diurnal variations of air temperature inside the open-roof and non open-roof greenhouses.

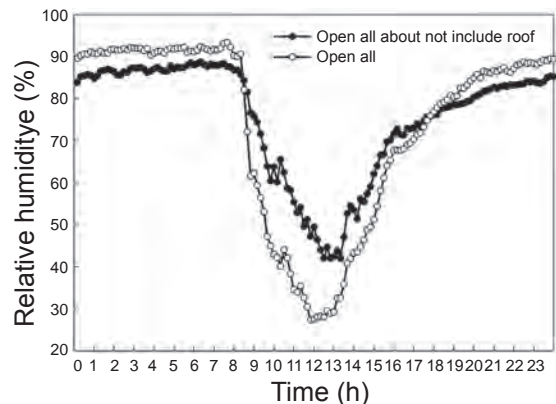


圖 6. 溫室內開頂及未開頂之日濕度變化。

Fig. 6. Diurnal variations of relative humidity inside the open-roof and non open-roof greenhouses.

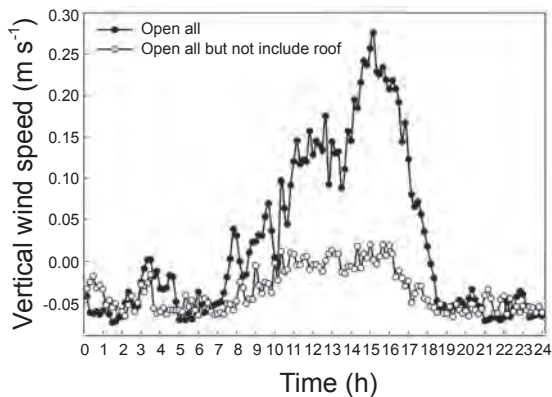


圖 7. 溫室內開頂及未開頂之垂直風速變化。

Fig. 7. Diurnal variations of vertical wind speed inside the open-roof and non open-roof greenhouses.

衡，需依作物生理特性作決定。由圖 2 及圖 3 可知，文心蘭和其他作物相較，可於較低光及較高溫的環境生長，所以在降溫策略的擬定上，採用本研究之自動化控制策略，依照作物生理訊號進而有效供應作物所需之環境狀態。圖 8 為由夏季開頂溫室自動控制系統實際運作下溫室內外之溫度差，由資料可知，在此控溫策略下，並且無循環風扇或使用其他耗能的降溫設備，開頂溫室可維持與戶外相近的溫度，皆在  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  以內。表示溫室內外空氣通風能充分交換，已有效避免溫室在夏季高溫下積熱之問題。

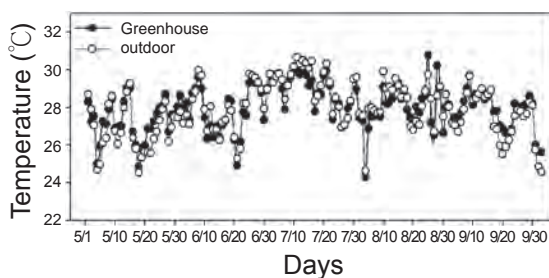


圖 8. 自動控制開頂溫室之夏季溫度變化。

Fig. 8. The daily average temperature of an auto-controlled greenhouse during the summer time (from May to September, 2012).

## 結論

本文除研究開頂對溫室微氣象改善之影響

外，也同時研發 1 套自動控制系統，整合各項降溫及增加溫室通氣率之設備，如四周及頂部帷幕控制，外遮陰開閉等，以自然通氣方式降低溫室內積熱問題。而由實測結果，開頂對於溫室降溫效應，雖然由夏季日均溫可和室外相近，但在正午 (11:00–13:00) 時仍會高於室外溫度約會高  $2^{\circ}\text{C}$ ；相對濕度的結果顯示，無開頂溫室平均相對濕度約有 43.1%，開頂溫室平均相對濕度約有 33.2%，兩者相差 9.9%。由此可知，開頂在白天是有助於水汽對外溢散，溫室內相對濕度低表示作物更容易進行蒸散作用，作物透過蒸散流以加速根部吸收水分 (及肥分)，有助於調整作物水分平衡及加速生長。本研究以文心蘭之生長需求為案例，導引出研發自動控制系統的動機，而由實測結果，自動開頂控制系統的利用是有助於降低夏季溫室因溫室效應所導致之積熱問題，未來可依據不同作物生理需求分別建立控制系統，以提升簡易溫室對於環境控制的能力。

## 引用文獻

- Alec, M. 2013. The future of controlled environment agriculture. *Appl. Eng. Agric.* 20:13.
- Atarassi, R. T., M. V. Folegatti, and R. P. C. do Brasil. 2006. Convection regime between canopy and air in a greenhouse. *Sci. Agric.* 63:77–81.
- Baptista, F. J., B. J. Bailey, J. M. Randall, and J. F. Meneses. 1999. Greenhouse ventilation rate: Theory and measurement with tracer gas technique. *J. Agric. Eng. Res.* 72:363–374.
- Flores-Velazquez, J., J. I. Montero, E. J. Baeza, and J. C. Lopez. 2014. Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *Intl. J. Agric. Biol. Eng.* 7:1–16.
- Kumar, K. S., K. N. Tiwari, and M. K. Jha. 2009. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. *Energ. Buildings* 41:1269–1275.
- Scott, N. R., C. J. Rutzke, and L. D. Albright. 2005. Energy conversion options for energy-efficient controlled environment agriculture. *HortScience* 40:287–292.
- Yao, M. H., C. J. Chen, and G. S. Huang. 2011. Estimating optimum temperature and light intensity for orchid of phalaenopsis from the measurements of carbon dioxide flux and daily carbon balance. *Crop Environ. Bioinform.* 8:172–180. (in Chinese with English abstract)

# Development of an Automatic Control System for Open-Roof Greenhouse

Ming-Hwi Yao<sup>1,\*</sup>, Fu-Liang Hong<sup>2</sup>, and Chung-Ming Chao<sup>2</sup>

## Abstract

Yao, M. H., F. L. Hong, and C. M. Chao. 2016. Development of an automatic control system for open-roof greenhouse. *J. Taiwan Agric. Res.* 65(3):306–312.

Heat dissipation is a troublesome problem to solve for designing environmental control in a greenhouse, particularly for low-cost facilities in the summer. This study was conducted to develop an automatic controlling system for open-roof greenhouse in order to meet the demand for growing *Oncidium*. The on/off control of curtain will be parameterized and automatically controlled to provide the environment suitable for the growth of *Oncidium*, an orchid species that can tolerate more warm and humid conditions as well as lower illumination status than other crops. These characteristics are used in strategic planning of the cooling system. Results showed that the microclimate inside greenhouse can be manipulated in open-roof adjustment. The vertical wind speed was accelerated to drive out warming water vapor more effectively and efficiently so as to exhaust the hot air outside greenhouse. The temperature inside greenhouse may be lowered down by about 3°C at noon in the summer. Results also showed that the controlling processes based on plant physiological mechanism can be reached with the designed system. With that, it further improves the applicability for controlling the greenhouse environment less costly.

**Key words:** Open-roof greenhouse, Natural ventilation, Automatic control, Micrometeorology.

---

Received: July 30, 2015; Accepted: December 8, 2015.

\* Corresponding author, e-mail: mhyao@tari.gov.tw

<sup>1</sup> Research Fellow, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

<sup>2</sup> Research Assistants, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.