

# 網格化氣象預報資料用於智慧化溫室環控系統建置

姚銘輝<sup>1</sup> 王懷慶<sup>1</sup> 張庭槐<sup>2</sup> 李育杰<sup>3</sup>

農委會農業試驗所<sup>1</sup> 交通部中央氣象局<sup>2</sup> 國立交通大學應用數學系<sup>3</sup>

## 摘要

面對極端天氣事件發生益發頻繁，為穩定農產品供應，溫室設施栽培已成為台灣蔬果類作物生產的主流，用以避免暴雨或強風所造成的農業損失。溫室栽培在夏季因高溫常造成作物生長逆境，智慧化溫室環境控制系統的研發是一項迫切的問題，因現有溫室控制受制於建置成本偏高及感測元件更換不易的困難，若能善用中央氣象局所研發之網格化預報產品導入農業溫室產業，利用氣象預報同時降低感測器佈建密度及後續維護。本研究採用氣象局 STMAS-WRF 極短期預報模式，預報產品網格解析度為 3 公里，進行逐 12 小時之天氣預報，包含溫度、濕度、短波輻射等農業可運用環境參數，並利用 LSTM 模型將外部氣象資料轉換成溫室內部微氣象，對於溫室內溫度預測能力在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的標準下準確度可達 94.2%；相對溼度在 $\pm 5\%$ 下之準確度為 61%；光強度 $\pm 100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 下之準確度為 82.4%。除相對溼度預測能力偏低仍需再調整模式外，其餘兩項預測能力可為溫室環控系統所接受。目前進行利用雲端運算最佳溫室控制決策資訊，並研發控制箱體與環控設備介接，用以建構智慧化環境控制系統。

關鍵字：溫室、網格化、逐小時預報、LSTM 模型

## 一、前言

極端天氣事件於近年愈發頻繁下造成諸多農業災害，不僅農作物生產上的損失，農產品價格更是與之波動。以 2016 年為例，寒害與颱風害即造成 350 億元的農業損失，蔬果價格更是飆漲到歷年新高(農業統計年報, 2017)。因此行政院農業委員會為了推廣減災或避災的栽培方式，提出新增溫室設施面積「5 年 2000 公頃」的政策，期盼在能減緩夏季颱風所造成的農業損失，穩定生產並提供高品質農產品。另一方面，隨著臺灣農業人口老化與從事農業人數下降，溫室栽培省時、省工的精緻農業模式亦為未來發展的趨勢。

溫室栽培除了提供能夠抵抗外界各種環境變化的生長環境外，現代化溫室更具有主動控制內部環境的能力。近年溫室的發展已經逐漸由單純的溫室內氣象監測條件為控制設定參數的環控系統，開始發展智慧化(Artificial Intelligence; AI)系統。隨著雲端運算技術的成熟與物聯網(Internet of Thing)時代的到來，藉由智慧感知技術，讓溫室內微氣象、灌溉、作物生長條控等因子結合 AI 演算法，分析環境因子、栽培管理與農作物成長間的關聯性，並結合自動化調控系統與討入人工智慧決策，開發「自主決策溫室」(Autonomous Greenhouse) (Hemming *et al.*, 2019)。

不論是智慧溫室或是自動化溫室都必須以大量的感測器為基礎，做為控制溫室設施的參考依據，例如溫濕度計、光度計、風速計、土壤濕度計等，若是安裝於一間大型溫室中，其感測器數量更為可觀。如

此大量感測器雖然能夠維持並控制溫室自動化，但是成本也隨著感測器增加而增高，另外感測器的維修及養護又是另外一筆額外的開銷，除了蘭花等高經濟價值的作物能負擔大量感測器的溫室外，瓜果類溫室無法負擔這麼多額外的成本。因此若能降低感測器數量使成本降低，並提供完善的決策系統，可讓更多的農民願意投入自動化溫室栽培之中。

以現有資源提升溫室栽培的精準控制及降低成本是本研究的重點，中央氣象局現有大氣網格化產品可提供下 12 個小時逐小時預報，內容包含氣溫、濕度、大氣壓力、光度等環境因子，若能將此預報產品以 AI 分析技術推估溫室內下個小時微氣象變化，可做為提前控制溫室設備之依據，迴避對植物生長有害之逆境環境，有助於溫室決策系統的建構，同時減少感測器數量以達到降低成本之目的。

本試驗以下 1 小時預報作為溫室外環境條件，並利用 LSTM 模型將外部環境之溫度、濕度、光通量推估為溫室內溫度、濕度、光通量，提早獲得溫室微氣候資料，並以此作為溫室控制決策系統之參考資料，嘗試開發具有預報功能且成本降低之決策系統。

## 二、材料與方法

### 溫室型態與環境監測系統

試驗溫室位於行政院農業委員會農業試驗所內，溫室型態為開頂型，為圓屋頂塑膠布溫室，長 12m、寬 5m、屋頂高度 4.3m，披覆材料為 0.18 mm 厚塑膠膜。溫室上方設有外遮陰網，屋頂 2 面以及前後左右

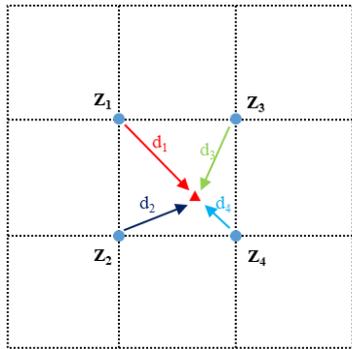
4 面捲揚之塑膠布均由馬達驅動使其捲收。

溫室內外皆備有氣象站進行長期環境監測，試驗溫室內氣象站感測器：溫濕度計(HMP60, Vaisala Inc., Finland)、光通量計(SQ-215, Apogee Instruments, USA)、三維音波風速計(Model 81000, RM Young, USA)；試驗溫室外氣象站感測器：溫濕度計、光通量計、二維音波風速計(WindSonic 1405-PK-100, Gill Instruments, France)。內外氣象站數據由記錄器每 10 分鐘記錄 1 筆(CR1000, CR800, Campbell Scientist Inc., USA)，並經由 4G 無線網路傳送回農業試驗所內伺服器。

### STMAS-WRF 極短期預報模式

中央氣象局利用時間與空間多尺度分析系統(Space-Time Multiscale Analysis System；STMAS)整合各項觀測資料，將觀測資料分為不同波長，依序從長波到短波計算，並採用不同約束條件，保留不同尺度的天氣特徵(王等，2015)。STMAS 所提供的初始值可配合數值預報模式(Weather Research Forecast；WRF)，進行每小時 1 次之 0-12 小時天氣預報。

經由 STMAS-WRF 產製之數值模式預報網格氣象參數可利用 IDW (Inverse Distance Weighted) 空間內插演算法推估到目標點位置，是針對每一個未知的數值進行推估，利用鄰近的已知點數值來進行加權運算，所給的權重依據距離遠近來計算(圖 1)。本試驗使用的網格解析度為 3 × 3 km，空間內插位置為農業試驗所試驗溫室所在位置(24°01'43.3"N 120°41'26.5"E)。預報內容包括逐 12 小時之溫度、濕度、短波輻射、長波輻射、蒸氣壓差、露點溫度等資料。



$$w_i = \frac{(d_i)^{-2}}{\sum_{i=1}^n (d_i)^{-2}} \rightarrow \hat{Z} = \sum_{i=1}^n (w_i Z_i)$$

圖 1. 空間內插演算法示意圖

### 微氣象轉換模型

由於逐 12 小時網格預報資料同步建置中，本試驗先使用內外氣象站資料進行外部氣象參數推估溫室內微氣象之評估與建模。以過去  $k_1$  小時外部氣象站資料(即  $d \equiv k_1 \times 6$  個資料點；過去資訊包括  $X_t = [X_{t-(d-1)}^T; \dots; X_{t-1}^T; X_t^T]$ )，來預測溫室內接下來第  $k_2$  小時微氣象變化(以指標  $i = 1, 2, 3$  表示而言，預測

$y_t^i$  一變數  $i$  在  $t + f$  時間點的讀值，其中  $k_2 \times 6$ )，並以內部氣象站資料比對校正。

為了獲取每個變數  $i$  由外而內的轉換公式，本試驗使用長短期記憶網路模型(Long Short-Term Memory；LSTM)，並為了每個溫室客製化不同的轉換模型，本次有 3 × 2 個客製化轉換模型。

圖 2 為本試驗 LSTM 模型框架，在時間點  $t$  輸入的維度為  $d \times p$  的數據  $X_t = [X_{t-(d-1)}^T; \dots; X_{t-1}^T; X_t^T]$ ，代表從時間點  $t - (d - 1)$  到  $t$  的過去測量資訊， $X_t$  的每一列皆為存儲  $p$  維度的向量變數，包括外部氣象站數據：溫度、濕度、光通量、月、日、時、分，總共 7 個變數訊息( $p = 7$ )。輸出變數  $\hat{y}_t^i$  是在時間點  $t + f$  時對變數  $i$  的數值預測(預測內部環境數據：溫度、濕度、光通量，標示為  $i = 1, 2, 3$ )。本模型由 2 層「LSTM cells」的 hidden nodes ( $h_{t-(d-1)}^{(j)} \in R^{u_j}, j = 1, 2$ ) 構成。此類 cells ( $h_{t-(d-1)}^{(j)}$ ) 會提取  $t - (d - 1)$  至最新時間點的重要歷史訊息；此外，這些 cells 可以向上傳遞已進行更深入的特徵學習(feature learning)，將第一層( $j = 1$ )中每個 node 設置為  $u_1 = 50$  個單位，第二層( $j = 2$ )中每個 node 設置為  $u_2 = 100$  個單位，最後值至最上層的最後一個 node ( $h_t^{(2)}$ ) 才能彙總所有淬鍊的資訊，並密集投影到一維度成為預測值  $\hat{y}_t^i$ 。

試驗溫室內微氣象資料採用  $k$ -fold 交叉驗證( $k$ -fold cross-validation)策略( $k=5$ )，以評估模型的一致性。設樣本數( $\#\{\text{time points}\}$ )為  $N$  的資料集— $\{x_t, y_t^i\}_{t=d}^{N-f}$ ，此資料隨機分為  $k$  個片段，每個片段均可視為測試集(testing set)，相對應的其餘資料則做為訓練集(training set)。每個訓練即可用來估計一個模型，並以其對應的測試集評估此模的表現。整個過程可重複  $k$  次，其平均與標準差(SD)可視為此模型的整體表性，並以平均絕對誤差(MAE)之平均做為評估指標。各 MAE 可由測試集預測值與實際值( $y_t^i$ )的所有絕對誤差的均值計算所得。

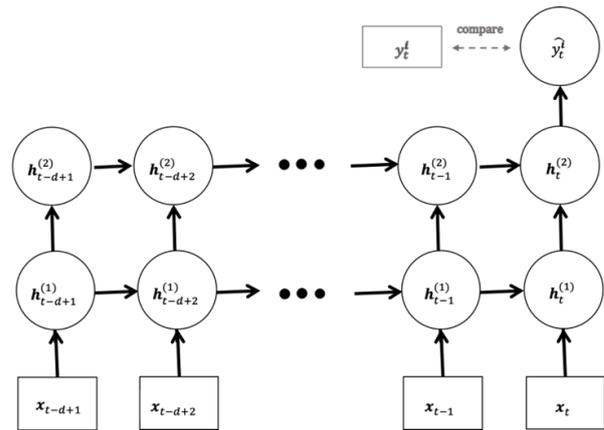


圖 2. LSTM 預測模型結構示意圖

## 三、結果與討論

### 逐 12 小時外界網格預報資料

STMAS-WRF 極短期預報模式是採用 ARW(Advanced Research WRF) / WRF，配合 STMAS

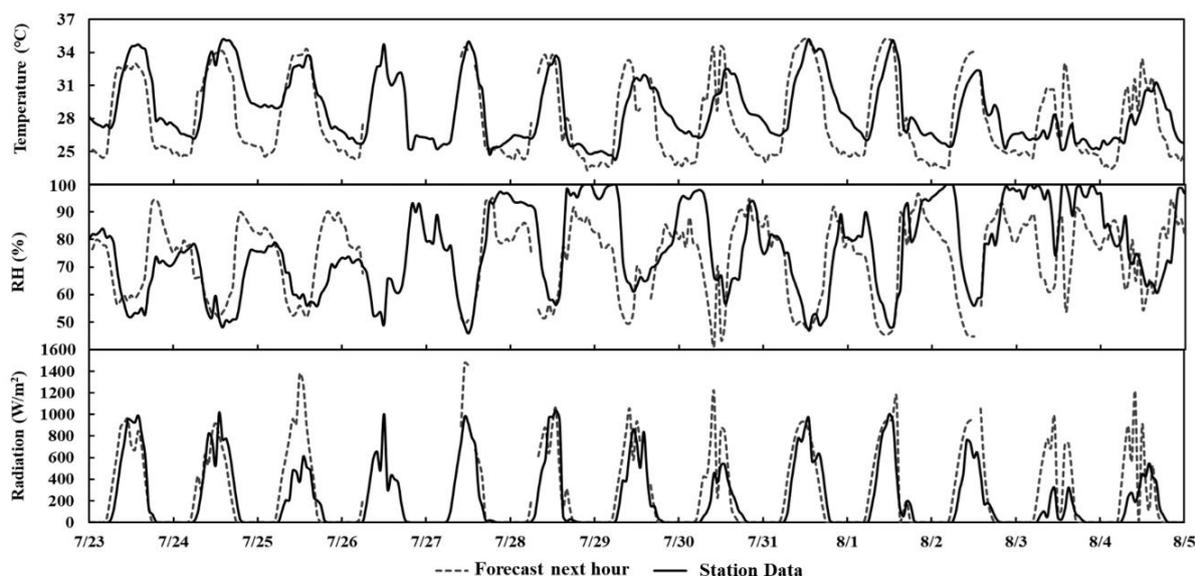


圖 3. 下 1 小時預報(f01)(---)與溫室外氣象站(—)溫度、濕度、日射量之比較  
(日射量使用農業一級站農業試驗所測站資料)

所提供的初始值，進行每小時 0-12 小時天氣預報，下 1 個小時網格預報資料以 f01 表示，以此類推下 12 小時網格預報資料為 f12。逐 12 小時網格化氣象預報自 2020 年 1 月開始產製，於每整點 5 分產製完成後傳送至農試所伺服器中。本次試驗目標為預報中溫度、濕度與短波輻射(日射量)，此 3 種數據為影響植物生長的环境因子，故為溫室決策系統控制的重要指標。將 2020 年 7 月 23 日至 2020 年 8 月 5 日之每個整點的 f01 網格預報資料與下 1 個小時實際環境數據進行比較(圖 3)，可發現溫度的部分，夜晚溫度明顯低估，偏差較大時(如 7/24、7/25、7/30)可差到 3-5°C，而白天溫度則較為相近，不過溫度變化基本上有成功預測。濕度的預報是建立於預報溫度之上，若溫度已存在偏差時，濕度的偏差就會更加擴大，因此可見預報濕度與實際濕度的變化幅度較不一致。

由於預報日射量單位與試驗溫室外光通量計不同，此兩種單位原則上無法直接進行轉換(光通量計僅測量 400-700nm 光合作用可用光的波段，單位為  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，預報資料內日射量測量全光譜，單位為  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )，故先使用鄰近的農業一級站農業試驗所測站數據代替(距離試驗溫室約 400m)。從圖 3 得知，晴天的日射量可準確預測(7/23、7/24、8/1)，上下波峰可準確預測，但是陰天時就會出現較大的偏差(7/25、7/30、8/3、8/4)，預測值明顯偏高，並無法預判出溫室所在位置日射量較低。

理想上會希望預測之溫度誤差值介於  $\pm 1^\circ\text{C}$  之間，濕度誤差值介於  $\pm 5\%$ ，日射量介於  $\pm 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，避免對後續運用造成更大的偏差。表 1 為溫度、濕度、日射量之各誤差範圍內，佔所有數據之比例。溫度誤差值在  $\pm 1^\circ\text{C}$  之間的數據佔總數據 20.86 $\pm$ 2.75%， $\pm 2^\circ\text{C}$  之間的數據佔總數據 45.86 $\pm$ 4.89%， $\pm 3^\circ\text{C}$  之間的數據佔總數據 66.00 $\pm$ 4.91%；濕度誤差值在  $\pm 5\%$  之間的數據佔總

數據 31.63 $\pm$ 2.74%， $\pm 10\%$  之間的數據佔總數據 55.89 $\pm$ 1.07%， $\pm 15\%$  之間的數據佔總數據 74.04 $\pm$ 2.66%；日射量誤差值在  $\pm 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之間的數據佔總數據 32.24 $\pm$ 3.54%， $\pm 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之間的數據佔總數據 48.51 $\pm$ 3.26%， $\pm 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之間的數據佔總數據 72.67 $\pm$ 1.57%。網格預報資料是本試驗溫室決策系統最開始的資料，因此誤差值控制越小越好，但是目前誤差值仍偏高，仍有一半以上數據大於理想誤差值，還有待後續校正與調整。

表 1. 下 1 小時預報(f01)與實際溫室外溫度、濕度、日射量之誤差範圍內佔總數據比例 (單位：%)  
(資料自 2020 年 7 月 1 日至 2020 年 8 月 5 日)

溫度	$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$
	20.86 $\pm$ 2.75	45.86 $\pm$ 4.89	66.00 $\pm$ 4.91
濕度	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$
	31.63 $\pm$ 2.74	55.89 $\pm$ 1.07	74.04 $\pm$ 2.66
日射量 <sup>yz</sup>	$\pm 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
	32.24 $\pm$ 3.54	48.51 $\pm$ 3.26	72.67 $\pm$ 1.57

<sup>y</sup> 日射量使用農業一級站農業試驗所測站資料

<sup>z</sup> 日射量數據只取白天數據(日射量 $\neq$ 0)

### LSTM 模型轉換後溫室內微氣象參數

溫室內微氣象為不穩定的非線性系統，只靠傳統的建模方式可能無法有效模擬(Taki *et al.*, 2018)，因此若想利用模型推估溫室內微氣象，需仰賴機械學習的方式。本次試驗使用之 LSTM 模型屬於遞歸神經網路(Recurrent Neural Networks; RNN)的一個分支，主要用來處理順序資料(Hochreiter and Schmidhuber, 1997)，RNN 中又以 LSTM 模型的表現與普及最為突出。

若單純只是以溫室環境條件作為溫室控制的參

考，其誤差值可以相對較為彈性，但是本試驗所開發之決策系統是以植物最適生長環境作為控制條件，因此可容忍之誤差不可過大。以溫度環境為例，植株分別處於相差 5°C 的兩種環境中，可能使植株營養生長或生殖生長之方向有所改變，此生長階段的不同對於溫室決策選項也會截然不同。因此現階段希望溫度誤差值能夠介於±3°C、濕度誤差值介於±5%、光通量誤差值介於±100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

試驗過程中注意到光通量這項變數是否存在對於模型的預測表現有不同程度的影響，因此本次試驗模型可分為含外界光通量或不含外界光通量輸入變數(故  $p = 7$  或  $6$ )的模型，並選擇模擬正確率較高之模型。綜合上述標準進行模擬，試驗溫室內溫度平均預測正確率為  $94.21 \pm 0.92\%$ ；濕度平均預測正確率為  $61.02 \pm 8.34\%*$ ；光通量平均預測正確率為  $82.41 \pm 3.74\%$  (預測模型輸入變數未包含外界光通量者以\*標記)。溫度預測模型較另外兩個模型表現的更穩定(因為其 SD 較低)，準確性也較高；光通量模型的正確率已達到可接受水準，但是濕度模型預測準確率仍偏低。

現階段想要提升模型準確度，可進一步調整模型參數(如圖 2 模型中的  $d$ 、 $f$ 、 $j$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ )，但是此過程需要花費更多的時間來訓練模型。另一方面，由上述是否包含光通量變數會影響模型預測能力可知，輸入變數選項會影響模型的能力。如果要做到可以通用於每個溫室(或至少同類型溫室)的一般模型(general model)，需要使模型包含更多的輸入變數(即擴大  $p$ )，如捲揚開關、屋頂開關、水牆開關、是否遮陰等影響溫室內微氣候之溫室設備參數，用於更精準描繪周圍的環境，若能成功建立通用轉換模型，便可投入溫室決策系統之中。

此模型仍以外界實測環境數據進行建模，後續還有待改成輸入網格預報資料，並觀察推估數據是否會能持續產出理想的下 1 小時環境參數推估值，才可用於溫室決策系統之中。

### 新系統雛形

本試驗最終目的在於建立新型態的溫室控制與決策系統，整體架構如圖 4：

1. 網格預報資料：每個小時接收由中央氣象局提供下 1 小時預報溫度、濕度、日射量。由於網格預報資料中，日照的數值會是以日射量( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )表示，但是外界環境推估內部微氣象模型是以光通量( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )進行預測，且植物光合作用所需光是以光通量(400-700nm)為主，需要進行單位轉換。姚(2011)利用兩種不同波長範圍的光度感測器進行測量並推算其轉換方式，提出  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \approx 4.45 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
2. 外推內溫室微氣象模型：中央氣象局的網格預報資料導入模型中，得到下 1 小時溫室內部溫度、濕度、光通量。
3. 作物模型：現大多數溫室控制系統皆只能以環境條件控制溫室設備，但是溫室栽培的主體應該是內部栽培之作物。光合作用模式在各種生產模式皆廣泛的運用，將推估得到之下 1 小時溫室內部溫度、濕度、光通量帶入光合作用模式中，可得下 1 小時光合作用速率。光合作用速率理論上數值越高代表植物生長狀況越好。故系統可計算如何維持溫室環境狀態於光合作用速率最大之環境。
4. 控制系統：控制系統架設於溫室內，接收雲端計算加值過之資料，並依決策指令控制溫室設備。

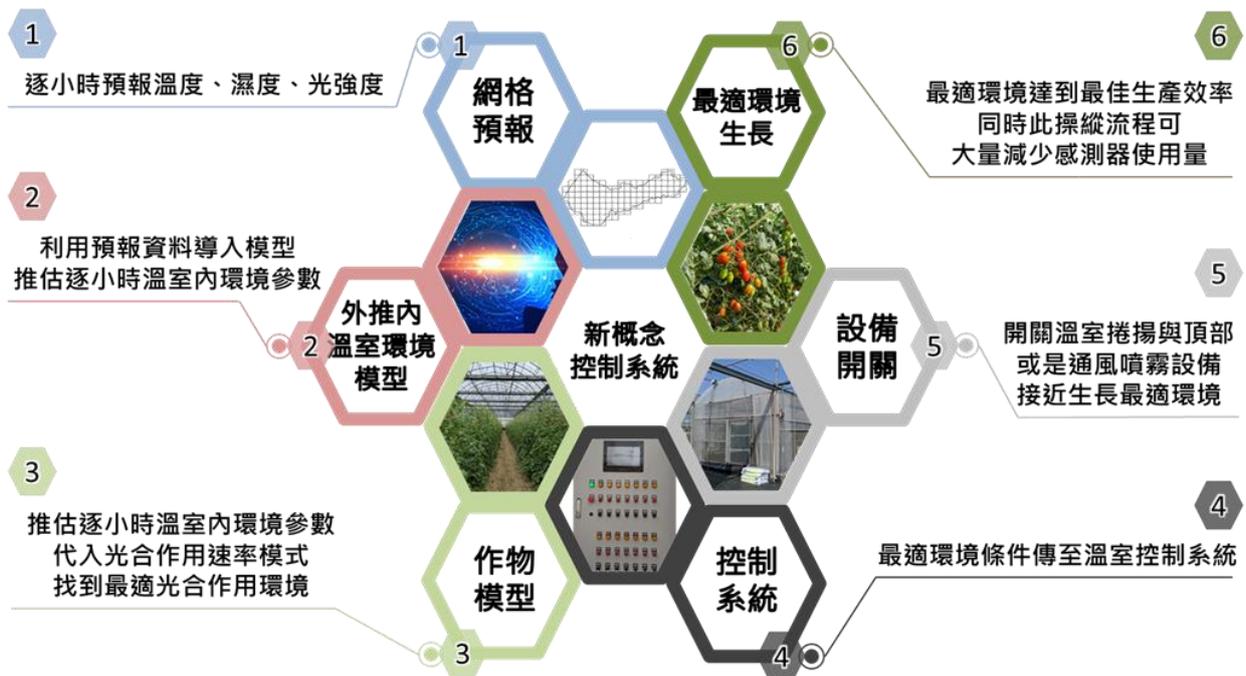


圖 4. 新系統雛型概念圖

5. 設備開關：常見的環境控制設備如捲揚、天窗、風扇、噴霧、內外遮陰等設備，皆具有改變溫室內微氣象之能力。
6. 溫室環境最適化：溫室內環境維持於作物生長最適條件，使作物生長與作物產量達最大效率。

本新系統有別於傳統控制系統，以作物為中心進行環境調整，並非以大量感測器監測並單純設定固定值控制溫室環境，同時又提供預報功能可做到預警功能，使生產者可提前進行判斷，提早進行相關操作迴避植物生長逆境之環境。

## 四、結論

溫室是防範氣象逆境及生產安全健康農產品的一種栽培方式，但如何降低成本及精準控制溫室內微氣象環境是科技研發的一項挑戰，尤其整合其他領域的資源，讓溫室栽培能永續推動。本研究是嘗試建立一種溫室環境控制的模式，除了使用大氣網格化預報氣象資料，並導入 AI 分析模式推導出溫室內微氣象環境，以及作物相關生長模式。此系統計算出的決策方針具有預報功能，使溫室內環控設備可提前作業，降低逆境發生的機會，藉以完成具有預報及減少感測器架設之新型溫室環境控制流程及技術，希望對未來溫室控制提供新的選擇。

## 五、致謝

感謝科技部「利用 AI 智慧感知技術建構溫室番茄栽培管理專家系統 (MOST 109-2321-B-055-004)」計畫經費支持。

## 六、參考文獻

- 王溫和，張惠玲，陳嘉榮，方偉庭，2015: “STMAS/WRF 極短期預報模式能力評估”，104 年天氣分析與預報研討會論文。
- 行政院主計總處，2017: 106 年農業統計年報，行政院農業委員會，台北。
- 姚銘輝，2011: “光度單位轉換問題之探討”，農業試驗所技術服務 85, 26-29.
- Hemming, S., Zwart, F., Elings, A., Righini, I., and Petropoulou, A., 2019: “Remote control of greenhouse vegetable production with artificial intelligence—greenhouse climate, irrigation, and crop production”, *Sensors* 19(8), 1807.
- Hochreiter, S., and Schmidhuber, J. 1997: “Long short-term memory”, *Neural compu.* 9(8), 1735-1780.
- Taki, M, S.A. Mehdizadeh, A. Rohani, M. Rahnama, and M. Rahmati-Joneidabad, 2018: “Applied machine learning in greenhouse simulation; new application and analysis”, *Inf. Process. Agric.* 5, 253-268.

# Using grid weather forecast for development of smart greenhouse environmental control system

M.H. Yao<sup>1</sup> H.C. Wang<sup>1</sup> T.H. Chang<sup>2</sup> Y.J. Lee<sup>3</sup>

Taiwan Agriculture Research Institute, Council of Agriculture, Taiwan<sup>1</sup>

Central Weather Bureau, Taiwan<sup>2</sup>

Department of Applied Mathematics, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan<sup>3</sup>

## Abstract

Extreme weather events occur more frequently in this day and age. To stabilize the supply of agricultural products, greenhouse cultivation has become the mainstream of Taiwan's vegetable and fruit crop production to avoid agricultural losses caused by heavy rains or strong winds. Greenhouse cultivation often causes crop growth stresses due to high temperatures in summer. The research and development of the smart greenhouse environment control system is an urgent problem because the existing greenhouse control is subject to the difficulty of high costs and the difficult replacement of sensors. If the grid forecast products developed by the Central Weather Bureau can make good use to introduce into the agricultural greenhouse industry, we can use the weather forecast to estimate micro-weather changes in the greenhouse, and start equipment control in the greenhouse early to maintain the best growth environment in the greenhouse while reducing the density of sensors setting and subsequent maintenance cost. This study used the STMAS-WRF extreme short-term gridded meteorological forecasting model from the Central Weather Bureau. The scale of the forecast product is 3 kilometers which produces hourly weather forecasts for the upcoming 0-12 hours including air temperature, relative humidity, short wave radiation, etc. The outdoor environmental parameters were used the long short-term memory (LSTM) model to convert into micro-weather inside the greenhouse. For the prediction ability in the greenhouse, the accuracy of temperature can reach 94.2% in the standard of  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ; the accuracy of relative humidity can reach 61.0% in the standard of  $\pm 5\%$ ; the accuracy of PPFD can reach 82.4% in the standard of  $\pm 100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . The temperature and PPFD two prediction ability can be accepted by the greenhouse environmental control system except that the relative humidity prediction ability is too low and the model needs to be adjusted. Currently, we are using cloud computing for optimal greenhouse control strategies, and developing a control box to interface with environmental control facilities to fulfill the smart environmental control system.

Key Words: greenhouse, grid, weather forecast per hour, LSTM model