

亞熱帶臺灣自然通風溫室環境感測與智慧灌溉應用

陳令錫¹

¹行政院農業委員會臺中區農業改良場

摘 要

植物生長需行光合作用製造碳水化合物，光合作用需要CO₂、光線與水分，光線不足則光合作用降低、水分不足造成植物萎凋；過度灌溉則有根部透氣性差、浪費水、浪費抽水的動力、環境潮濕容易孳生病害等缺點。臺灣普遍使用自然通風溫室也存在夏季溫室內氣溫時常高於35°C常伴隨低相對濕度(50%以下)，在無土離地介質耕場合將發生高介質溫度而增強熱與水逆境；因為高太陽輻射和蒸氣壓差，氣孔的部分或全部關閉而大幅影響蒸發散量。作物生長環境條件將決定蒸發散量，而本研究擷取作物生長環境之溫度、濕度、太陽輻射、風速等為自變數，運用蒸滲儀測量作物之蒸發散量為因變數，收集之試驗數據經統計分析獲得單株牛番茄重量變化與太陽輻射強度之關係呈現正比關係；進一步構思將植物蒸散作用與光照強度成正比關係運用在灌溉控制系統，實現適時適量的智慧灌溉目標，選用積分累加方法，設計光度離散數據累加，實現光積值(LIV)的概念應用於灌溉管理，獲得簡單強健之蒸發散量估測模式，將蒸發散量估測化繁為簡，應用於溫室的智慧灌溉，比較晴天和陰雨天的灌溉水量，應用光積值驅動灌溉有效減少灌溉水量與養液用量58%。期作水分利用率(WUE) 光積值驅動肥灌約19.2 kg·m⁻³，定時混合桶肥灌約15.3 kg·m⁻³，顯示光積值驅動灌溉之用水效率優異，達成適時、適量、省工、節水、節能效果。

關鍵字：亞熱帶、自然通風、溫室、環境感測、水分利用率、智慧灌溉

一、前言

農作物生長需要乾淨的水資源，灌溉是確保糧食穩定的必要方法，農業缺工與水資源匱乏的今日，省工節水自動適時適量灌溉是農業工程努力的目標(Chen L.H. et al., 2014; Chen W.Y. et al., 2014; Lee et al., 2000; Davis and Dukes. 2010)。根據FAO (Food and Agriculture Organization) 資料全球溫室作物生產面積估計為405,000 ha，技術和複雜層次因地域氣候條件和社經環境而異(Gallardo et al., 2011)。地中海氣候區過去20年來在溫室蔬菜生產上相當競爭，就溫室生產技術而言，在溫室設計、塑膠布樣式和品質、肥灌、地面覆蓋、高產雜交品種、作物馴化和修剪、整合病蟲害管理(IPM)、授粉昆蟲、氣候控制和土壤日曬等均有革新進展，番茄產量由100 t ha⁻¹提升到300 t ha⁻¹已經很普遍(Ahmed, 2013)。

溫室土耕滴灌種植蔬果花卉是大部分台灣小農的首選，不必額外投資離地介質耕的植床(Baille et al., 1991)和介質的資本支出，採用省工節水灌溉技術實現少量多次、薄肥頻灌的操作可行性。植物生長需行光合作用製造碳水化合物，光合作用需要

CO₂、光線與水分，光線不足則光合作用低、水分不足植物會萎凋；過度灌溉則有根部透氣性差、浪費水、浪費抽水的動力、環境潮濕容易孳生病害等缺點(Patricia, 1999)。

與北歐國家比較，地中海地區面臨介質與空氣的環境控制問題，因為低的投資動力而優先採用非尖端溫室；夏季時常發生高太陽輻射和飽和差，會因為氣孔的部分或全部關閉而大幅影響蒸發散量；溫室內氣溫高於35°C常伴隨低濕(50%以下)，在無土耕作場合將發生高介質溫度而增強熱與水逆境，大幅影響品質和產季的延長(Baille and Baille, 1991)，亞熱帶臺灣自然通風溫室也存在相同問題。

本研究感測作物生長環境之溫度、濕度、太陽輻射、風速等為自變數，運用蒸滲儀測量作物之蒸發散量為因變數，數據經統計分析獲得單株牛番茄重量變化(蒸發散量)與太陽輻射強度之關係呈現正比關係；進一步構思如何將植物蒸散作用與光照強度成正比關係運用在灌溉控制系統，實現適時適量的智慧灌溉目標，運用積分累加方法，設計光積值(light integral value, LIV)的概念導入灌溉管理，獲得簡單強健之蒸發散量估測模式，將蒸發散量估測化

繁為簡，應用於溫室的智慧灌溉，達成適時適量、省工、節水、節能效果。

二、材料與方法

(一)臺中區農業改良場內之試驗溫室

臺中區農業改良場2012年建置簡易鋸管遮雨溫室一棟，長11 m，寬4.8 m，圓弧屋頂高3.5 m，四週圍上32目防蟲網再被覆側邊捲收塑膠布，2.5 m高處設置電動遮陽網，自然通風，設施內構築二個寬0.45 m，高0.3 m植畦，畦距1.3 m。試驗溫室設置自動注入式施肥灌溉(簡稱自動肥灌)系統一套，試驗作物小黃瓜與番茄。

(二)自動肥灌系統

自動肥灌系統(陳, 2009)之組成單元包含一只儲存充裕潔淨灌溉水之5 m³清水桶，五只0.25 m³養液桶調製濃縮養液，五組文氏管養液注入器將適量養液注入主管路與清水混合，五只3/8英寸孔徑流量計檢測養液輸出量，一只2 HP孔徑1.5英寸離心式幫浦裝設於主管路輸送混合養液之灌溉水至指定田區，一只1.5英寸孔徑流量計檢測混合液輸出量，一只累積式機械式水表，一組PLC控制器負責執行養液與灌溉水量之參數設定與操作程序輸出，具有聯網功能。本系統設計可應付6-10田區之肥灌需求，每田區之面積按照噴/滴頭種類，計算總噴/滴頭數量來決定幫浦流量。

自動肥灌系統除了肥灌主機與清水桶之外，還需過濾器、田區電磁閥與田區滴灌管路等硬體。PLC控制器經由人機介面與操作者互動，控制軟體具有作業參數設定功能，包括設定作物生長階段，各階段指定適當之養液輸出量、灌溉作業時間、灌溉次數(或光積值)、灌溉開始與結束時間等參數，系統自動依據設定數據，執行定量灌溉水與養液之輸出，將水與肥送到作物根部。

(三)設施微氣候測量裝置

本研究的設施微氣候測量裝置設置在溫室內，未架設室外氣象站。採用資料紀錄器(CR1000, Campbell Science, USA)連接各種感測器，測量設施內栽培作物的微氣候，用CRBasic Editor 撰寫程式擷取感測器訊號，感測器包括溫濕度(EE21, E+E, Austria)、光度(LP-02, Hukseflux, USA)和風速(熱線式HD103T.O, Delta OHM, Italy)等。為求試驗數據正確，採用熱電堆(Thermalpile)型式LP-02的光度感測器，單位為W·m⁻²，呈現溫室內的太陽輻射強度。

(四)作物重量變化(蒸滲儀)測量-單位時間重量變化率

單株番茄、小黃瓜作物盆栽置於日製電子秤(A&D, GX-60 60 kg, Japan)上，具有RS-232通訊埠，長期測量單株作物盆栽之重量變化，不計作物生長的增量，分析日間與夜間之重量減輕幅度，視為該植株在該期間的蒸發散量。電子秤的RS-232埠可以與電腦或資料紀錄器連線，接線完成後撰寫程式擷取文字與數值字串訊號，再從字串中分離出重量數據，儲存於紀錄表檔案中。

重量式蒸滲儀(weighting lysimeter)的重量原始數據對時間作一次微分，獲得單位時間之變化率(梯度、斜率)，為重量對時間的變化梯度，本試驗之取樣間隔 Δt 為10 min，自然條件下重量遞減 ΔW_i 為負值。

$$\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$$

W_i ：時間點 i 之重量數據

W_{i-1} ：時間點 $i-1$ 之重量數據

$$G_r = \frac{\Delta W_i}{\Delta t}$$

G_r ：代表 Δt 時間內之蒸發散量(重量)變化率。

Δt ： $t_i - t_{i-1}$ 為取樣時間間隔

(五)番茄種植管理

溫室內2植畦各種植牛番茄苗32株；另外，盆栽種植8株，其中1株置於電子秤上，紀錄重量變化。運用臺中場研製的自動肥灌系統輸出灌溉水與養液，透過灌溉管路與滴箭構成滴灌系統，養液以臺肥43號速溶複合肥料為主，生殖生長期加入磷酸一鉀。

三、結果與討論

(一)光照強度與作物蒸散變化之關係

於彰化縣大村鄉境內的臺中區農業改良場試驗牛番茄單株重量變化與太陽輻射強度之關係呈現正比關係，如圖1(左)所示，番茄單株重量變化率可以視為蒸發散量變化率，陽光型自然通風塑膠布溫室內的太陽輻射強度之曲線變化起伏頻繁，可推知當日雖是晴天但是雲層斷續出現，10點到13之間太陽輻射強度較高，最高值接近400 W·m⁻²，平均125 W·m⁻²。當日自然通風塑膠布溫室內單株番茄盆栽之重量變化率如圖1(左)之蒸發散率，白天呈現陡升、高原、陡降趨勢，夜晚平緩。該日單株番茄盆栽之蒸發散量約1,500 g(Chen et al., 2014)。

陽光型自然通風塑膠布溫室內的太陽輻射強度變化從早上7點開始上升，中午前後太陽輻射強度

較高，傍晚17時降低後漸趨穩定，與單株番茄盆栽之重量變化對時間一次微分結果之起止時間、高低變化趨勢相似，顯示番茄的蒸發散量明顯隨太陽輻射強度之增強而增加，因此太陽輻射強度為番茄蒸發散量的重要影響因子。該日之溫室內空氣溫度與相對濕度變化如圖1(右)所示，太陽東昇氣溫上升相對濕度下降，10時到14時高溫低濕，傍晚太陽西沉溫度緩降濕度緩升。因此溫室內空氣溫度和濕度受太陽輻射強度所影響。

(二)光度積算法則驅動灌溉

灌溉管理良好的田間，植物根部水分充足，植物蒸散作用與光照強度成正比關係，亦即強光有強的光合作用，弱光則弱。因此，進一步構思如何將植物蒸散作用與光照強度成正比關係運用在灌溉控制系統，實現適時適量的智慧灌溉目標？運用積分累加方法，設計光度離散數據累加，實現光積值的概念應用於灌溉管理。本研究形成此光積值概念與歐盟發表的灌溉刊物(Fernandez, et al., 2010)介紹太陽輻射推估蒸發散量是簡單的方法，結果相似。

光度積算法則方程式為：

$$L_i = \sum_{i=0}^n R_{ni}$$

L_i ：光積值

R_{ni} ：瞬間光度值

光積值是光照強度經過一段時間累加計算之後的數值，當光積值超過設定值時啟動灌溉一小段時間，此設定值與一小段時間，則按照當地季節、日照強度、作物發育階段與灌溉條件而定。例如中午日照強度100 klux，若每分鐘積算一次，灌溉間隔定為30分鐘，則設定值設為3,000 klux；若種植1分地番茄每天灌溉水需要2公噸，晴天灌溉5次，則每次灌溉水量0.4公噸，2英吋口徑離心式幫浦的灌溉一小段時間可設為1-2分鐘。

光積值的設定值(when)與啟動灌溉一小段時間(how much)這二個數值巧妙的搭配，可讓介質籃耕植床下的灌溉滴漏量降到最低，灌溉給水量與作物生長的蒸發散量達到平衡，此為灌溉技術最高境界。一般而言，離地介質耕允許20-30%溢流量，以緩和微灌器具之水量誤差、減少鹽積發生(Pardossi et al., 2011; Lee et al., 2016)、以及作物種植位置環境之差異。某些農友的管理技術在適當時機給作物

營造適當的水分逆境，刺激作物根系、新芽、花朵或果實生長，本技術亦可藉由調整參數輕易達成。

(三)場外試驗田應用

光積值應用於臺中場研發的自動肥灌系統，試驗田為彰化縣溪湖鎮面積430 m²介質籃耕的設施番茄園，介質為泥炭土混和椰纖，採用光積值灌溉模式。圖2為2012年12月21日彰化縣晴天及12月8日陰雨天的光照強度變化及灌溉時間點與灌溉量，12月21日中午日照強度約75 klux，全日灌溉7次，中間5次集中在上午10點到下午3點之間，這段時間也是作物蒸散最強的時候，總灌溉水量737公升，肥料養液用量33公升；12月8日降雨量8.5 mm，中午日照強度約20 klux，全日灌溉3次分別在10:02、12:23及15:47，總灌溉水量309公升，肥料養液用量14公升。比較晴天和陰雨天的灌溉水量，應用光積值驅動灌溉有效減少灌溉水量與養液用量58%。2014年的試驗有相似結果(陳，2014)

比較臺中場研發的自動肥灌系統與定時混合桶肥灌系統之期作灌溉用水量，自動肥灌系統為163.23 m³，單位面積用水量379.6 L·m²。定時混合桶肥灌系統為245.24 m³，單位面積用水量430.24 L·m²。2處理隨機取樣2畦之產量，自動肥灌系統之產量為286.7 kg，單位面積產量為7.3 kg·m²；定時混合桶肥灌系統之產量為285.0 kg，單位面積產量為6.6 kg·m²。因此，運用光積值技術的自動肥灌系統在單位面積產量與用水量均較定時混合桶肥灌系統優異。

關於期作水分利用率(WUE, water use efficiency)(單位面積產量/單位面積用水量)，光積值驅動自動肥灌系統約19.2 kg·m⁻³，定時混合桶肥灌系統約15.3 kg·m⁻³，顯示用水效率優異，然與國外資料比較仍有改進空間。

本研究運用光度(太陽輻射強度)與作物蒸發散量呈現正相關的原理，提供一種簡單低成本且性能穩定的灌溉技術決策方法，結合自動肥灌系統在番茄介質籃耕栽培應用，結果為晴天灌溉6-8次，陰雨天灌溉1-4次，隨作物蒸發散速率決定灌溉時機，灌溉兼備施肥，提供作物適當的水量與肥量。

作物蒸發散量的影響因素除光照強度之外，還有溫度、濕度、葉面積、風速等，然完整準確的蒸發散測量設備價格昂貴，一般農民較少採用。光積值的應用須要照度計與積算的軟硬體，價格會比較低，因此，農民享用此技術的機會較大。

光積值技術應用在自動灌溉上確實減少農民因為天氣陰晴不定衍生的定時器反覆設定工作，自動減低陰雨天灌溉次數與用水用肥量，晴天足量灌

溉、陰雨天自動減量灌溉，並且在晴天中午豔陽下較密集灌溉，發揮適時適量灌溉的效果，但是每次灌溉量仍須依據季節、天候、作物種類與生長階段微調。

(四)臺中區農業改良場試驗溫室持續應用

2021年1月20日試驗溫室種植小黃瓜，啟動具有光積值驅動功能的自動肥灌主機，在維持作物生長環境根部水分之動態平衡前提下，設定灌溉水量及光積值，隨著作物生長，每日灌溉次數由3次增加到6次，以4月23日至27日5天的太陽輻射和灌溉次數與灌溉量為例，如圖3所示，23及24日晴天中午太陽輻射約600-700Wm²，每日灌溉6次，25日雨天中午太陽輻射約100Wm²，該日灌溉1次。而27日陰天中午太陽輻射約200-600Wm²，該日灌溉5次，充分展現智慧彈性灌溉之優異性能。

四、結論

1. 番茄單株重量變化率可以視為蒸發散量變化率。
2. 晴天番茄蒸發散率，白天呈現陡升、高原、陡降趨勢，夜晚平緩，與太陽輻射變化趨勢相似。
3. 本研究發現太陽輻射強度為番茄蒸發散量的重要影響因子，運用光度(太陽輻射強度)與作物蒸發散量呈現正相關的原理，設計光積值方法，具有簡單低成本且性能穩定的灌溉技術決策，實現智慧彈性灌溉之優異性能。
4. 運用光積值技術的自動肥灌系統在單位面積產量與用水量均較定時混合桶肥灌系統優異。
5. 光積值驅動自動肥灌系統水分利用率(WUE)約19.2 kg·m⁻³，定時混合桶肥灌系統約15.3 kg·m⁻³，顯示用水效率優異。

參考文獻

- 陳令錫、戴振洋、田雲生、何榮祥，2009：自動注入式施肥灌溉系統使用於介質槽耕栽培胡瓜之研究。臺中區農業改良場研究彙報 104:29-37。
- 陳令錫，2018：具有蒸發散概念的智慧灌溉技術—適時灌溉驅動裝置 臺中區農業專訊 第101期 蔬果省工栽培機械 p.4-6。
- Ahmed, A. O, 2013: Preface. In good agricultural practices for greenhouse vegetable crops, principles for mediterranean climate areas. P.vii-ix. FAO plant production and Protection Paper 217, Rome.
- Baille, M. and Baille A, 1991: Greenhouse soilless crops in Mediterranean countries: the need for a better environmental control (air, substrate). P.91-105. In:

- Martinez P. F. (eds.). Agriculture, Agrimed Research Programme, Environmental Constraints in Protected Cultivation: Possibilities for New Growing Techniques and Crops. Commission of the European Communities. Luxembourg.
- Chen Ling-Hsi, Jiun-Yuan Chen, Chia-Chung Chen, 2014: Analysis the effect of vapor pressure deficit and solar radiation to evapotranspiration of tomato. p.1176-1182. Proceedings of the 7th international symposium on machinery and mechatronics for agriculture and biosystems engineering (ISMAB), Yilan, Taiwan.
- Chen Wu-Yang, Ling-Hsi Chen, Liang-Tsai Kuo, Jacqueline Hughes, 2014: Comparing two automated fertigation systems for year-round tomato and sweet pepper production under glasshouse conditions in Taiwan. p.781-787. Proceedings of the 7th international symposium on machinery and mechatronics for agriculture and biosystems engineering (ISMAB), Yilan, Taiwan.
- Davis S.L. and M.D. Dukes, 2010: Irrigation Scheduling Performance by Evapotranspiration-based Controller. Agri. Water Management. 98:19-28.
- Fernandez, M.D., S. Bonachela and F. Orgaz, R. Thompson, J.C. Lopez, M.R. Granados, M. Gallardo and E. Fereres, 2010: Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrig Sci. 28:497-509.
- Gallardo, M., R.B. Thompson and M.D.Fernandez, 2011: Water requirements and irrigation management in Mediterranean greenhouses: the case of the southeast coast of Spain. In: Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops, Principles for Mediterranean Climate Areas. P.109-136. FAO plant production and Protection Paper 217, Rome.
- Lee, A., Enthoven N., Kaarsemaker R, 2016: Best practice guidelines for greenhouse water management. Grodan & Priva, Netherlands.
- Lee I.-B. P. Fynn and T. Short, 2000: Development and Evaluation of a Computer-controlled Fertigation System. Applied Eng. In Agri. 16(3):279-284.
- Pardossi, A., G. Carmassi, C. Diara, L. Incrocci, R. Maggini, D. Massa, 2011: Fertigation and substrate management in closed soilless culture. Report of project title: Efficient Use of Inputs in Protected Horticulture, University of Pisa, Italy.
- Patricia I, 1999: Recent Techniques in Fertigation of Horticultural Crops in Israel. Recent Trends in Nutrition Management in Horticultural crops Workshop, Dapoli, Maharashtra, INDIA.

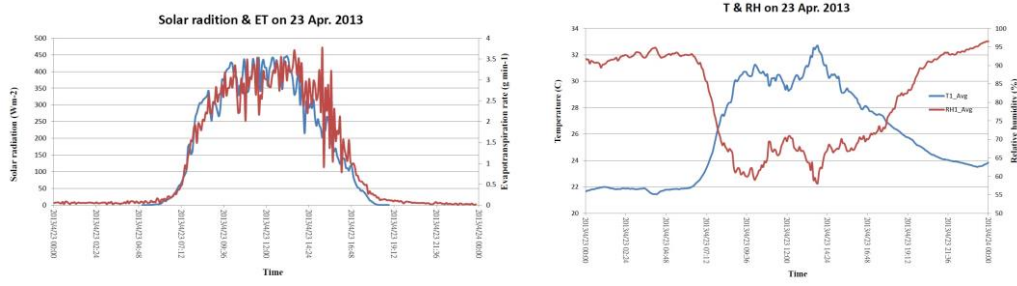


圖1 自然通風塑膠布溫室內的太陽輻射強度及單株番茄盆栽之重量變化率呈現正比關係(左)，白天呈現陡升、高原、陡降趨勢，夜晚平緩。該日之空氣溫度與相對濕度變化(右)。

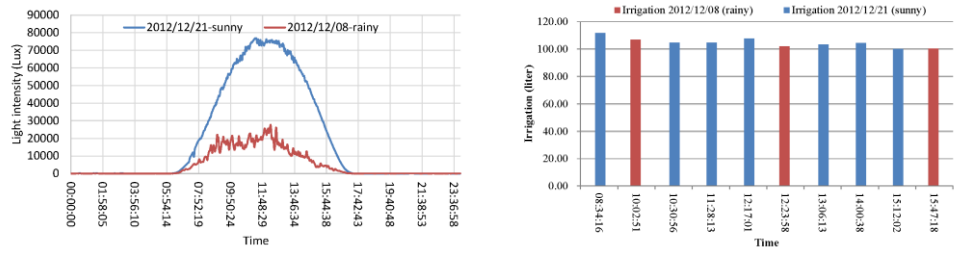


圖2 彰化縣2012年12月8日陰雨天及21日晴天的光照強度變化(左)和灌溉時間點與灌溉量(右)

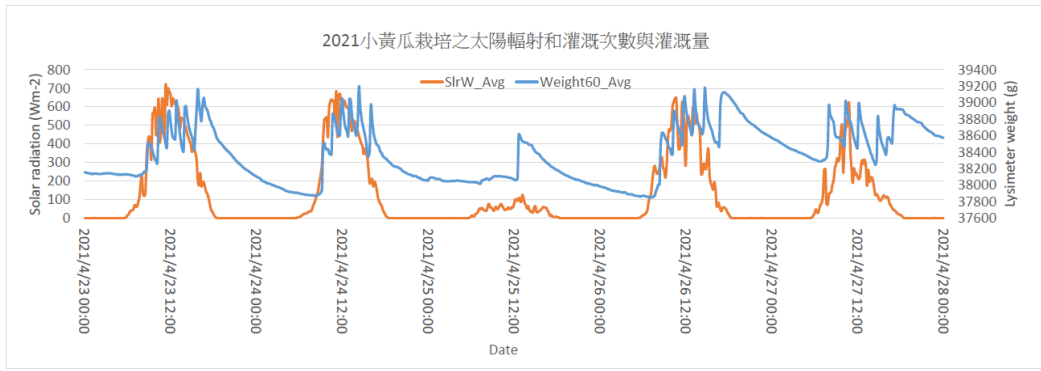


圖3 2021年4月23日至27日5天小黃瓜栽培的太陽輻射和灌溉次數與灌溉量，充分展現智慧彈性灌溉之優異性能

The Environment Sensing and Smart Irrigation Application of Nature Ventilation Greenhouse in Sub-tropical Taiwan

Chen Ling-Hsi

¹Taichung District Agricultural Research and Extension Station (TCDARES), COA, EY, Taiwan

Abstract

Plant growth requires photosynthesis to produce carbohydrates, and photosynthesis requires CO₂, light and water. Insufficient light results in low photosynthesis, and insufficient water plants will wither. Excessive irrigation has disadvantages such as poor air permeability of the roots, waste of water, waste of pumping power, and damp environment which can easily breed diseases. Naturally ventilated greenhouses are commonly used in Taiwan. In summer, the temperature in the greenhouse is often higher than 35°C and often accompanied by low relative humidity (below 50%). High medium temperature will occur in the field of soil-free medium cultivation, which will increase heat and water stress. Due to high solar radiation and vapor pressure deficit, partial or all of the stomata are closed, which greatly affects the amount of evapotranspiration. Crop growth environment conditions determine the amount of evapotranspiration. In this study, the temperature, humidity, solar radiation, wind speed, etc. of the crop growth environment are taken as independent variables. The lysimeter is used to measure crop evapotranspiration as a dependent variable. The data is statistically analyzed to obtain a proportional relationship of the weight change of a single tomato plant and solar radiation intensity. Further conceive how to apply the proportional relationship between plant evapotranspiration and light intensity in the irrigation control system to achieve the goal of smart irrigation in a timely and appropriate amount. Choose the integral accumulation method, design the concept of light integral value (LIV) to introduce irrigation management, obtain a simple and robust evapotranspiration estimation model, simplify the evapotranspiration estimation, and apply it to the smart irrigation of greenhouses. Comparing the irrigation water amount on sunny days and cloudy days, the application of LIV to drive irrigation can effectively reduce the irrigation water amount and nutrient solution consumption by 58%. The water use efficiency (WUE) of the season crop irrigation on driven by the LIV is about 19.2 kg·m⁻³, and about 15.3 kg·m⁻³ on driven by timer, showing LIV method has excellent water efficiency, and to achieve timely, appropriate, labor-saving, water-saving and energy-saving.

Key words: sub-tropical, nature ventilation, greenhouse, environment sensing, WUE, smart irrigation