

# 屋頂流水技術對溫室熱環境影響

## Greenhouse Thermal Environment Effected by the Roof-Watering Techniqe

台灣省農業試驗所農工系副研究員

陳 加 忠  
Chiachung Chen

台灣省農業試驗所園藝系副研究員

林 瑞 松  
Ruey-Song Lin

### 摘 要

此研究之目的在於探討屋頂流水技術對溫室內部熱環境之影響。實驗設備包括屋頂流水基本裝置與山型太子樓塑膠布溫室。試驗結果顯示覆蓋材料上水膜減少全日照量與可見光能量之透過率。增加水膜厚度則減少更多透過量。對塑膠布溫室而言，低日照時屋頂流水對內部溫度無顯著影響，在高日照量時，反而增加了內部溫度而無降溫效果，此原因來自水膜厚度降低覆蓋材料之熱傳導係數，使內部熱量傳至大氣之比例減少。增加水膜厚度則增加用水量與設備費用。此降溫技術對疏解溫室內部熱累積現象並不實用。

關鍵詞：屋頂流水、熱環境、溫室。

### ABSTRACT

The objective of this research is to study the effect of the roof-watering technique on the thermal environment of the greenhouse. The experiments were executed by a roof-watering apparatus and attic-type, PVC plastic greenhouse. The results indicate the roof-watering techniques reduce the transmittance of total solar intensity and the photosynthetically active radiation (PAR). The thickness of water layer on the roof influence the transmittance. The effect of the roof-watering on the temperature difference between the inner and outer of greenhouse did not have the isgnificant effect at the lower solar intensity, however, the technique increased the inner temperature at higher solar energy. The resules can be explained by the decreased of the thermal conductivity for the effect of water layer then reduced the ability of the inner thermal energy transmitted to the outside. Increase the thickness of water layer also increase the water consumption and the cost of equipments. The roof-water technique was impractical to relase the thermal accumulation for users.

Keywords : Roof-watering, Thermal environment, Greenhouse.

## 一、前 言

台灣位於亞熱帶與熱帶地區，夏日日照量充沛，使大氣溫度高達 $30^{\circ}\text{C}$ 以上(中央氣象局, 1993)。對於利用溫室等設施進行周年生產之作物而言，設施結構主要用於防風、防雨與冬日久保溫，但是由於夏季豐盛之日照能量，使溫室於密閉狀態時產生嚴重的溫室效應，熱果積量造成溫室內部溫度的昇高，因此如何避免熱果積以降低內部溫度已成為溫室經營者關心之問題。

降溫的主要方式依能源之處理作業可分為兩種：驅除溫室內部多餘的能量與減少進入溫室的能量。前者可利用自然通風與機械通風方式，在要求降低內部溫度低於大氣乾球溫度時，必須採用蒸發冷卻原理或安裝冷凍機械。後者主要利用遮蔭設備如遮蔭網或反光網等，以減少穿透溫室覆蓋材料而進入內部的太陽能量。另一種減少日照能量之技術係採用屋頂洒水方法。朱氏(1989)所建議方式係以細霧噴在溫室頂部，用以帶走溫室頂部之太陽能量，而此方式之主要問題在於噴水所引起之青苔成長問題與需要大量的水源。王氏(1988)評論此方法認為利用噴水於屋頂再使其自然流下，由於流水對日射量的吸收與蒸發冷卻作用可降低溫室內部溫度，但是所能降低的溫度有限。流水含有鐵質或鹽類時，容易減少覆蓋材料的透光率。此種屋頂流水降溫方式在國內則常為畜產業者採用。

對於太陽光的光譜分佈而言，波長 $0.4\mu\text{m}$ 以下稱為紫外線區， $0.4\sim 0.75\mu\text{m}$ 的範圍稱為可見光區， $0.76\mu\text{m}$ 以上稱為紅外線區。地表面所受到之太陽光能量約有9%為紫外線，47%為可見光，44%為紅外線。可見光之範圍幾乎為植物光合作用所需之能量來源，紅外線則產生熱源。對以降溫為目的設施而言，能維持可見光通過而能阻絕紅外線光源之覆蓋材料為最理想之使用資材。田中氏及石井氏等(1988)與田中氏等(1989)以硫酸銅溶液通過兩面玻璃之夾層做為覆蓋材料，以人工光源取代自然太陽光，研究紅外線吸收材料對溫室內部熱環境之影響，其結果顯示為保持降溫效果，所用溶液的溫度應該降低，若採用固體形紅

外線吸收物質，此材料需要隔離於屋頂表面。杉氏等(1963)研究水膜於玻璃屋頂表面流動時對太陽能量透過率的影響，發現以 $0.1\text{cm}$ 厚的流動水膜，可使太陽能透過率自無水膜之89.7%減少至81.5%。船田氏及增井氏等(1968)之研究結果發現利用 $0.1\text{cm}$ 之水膜流動，可減少8%的全日照量。

Tross氏等(1984)提出光學性液體濾器溫室(Optical Liquid Filter Greenhouse, OLF)之概念。此型溫室覆蓋材料為中空塑膠片，以能夠吸收紅外線的液體流過內部，有關之研究係建立一項熱力學模式以模擬溫室熱環境，但其研究內容並未報導此型覆蓋材料的功能。

在覆蓋材料施用流水之另外功能則是用以加溫或保溫。在加溫作業時，以熱水通過溫室屋頂或週壁，利用熱水能量的傳導作用，使熱量傳入溫室內部以進行加溫(Walker等, 1978; 1979)及Walker氏等(1982)。另一項功能則利用水膜增加覆蓋材料的熱傳導係數，以增加隔絕溫室內部熱源逸至外部的比例，有關之研究如小倉氏(1982, 1984)建立熱傳導模式以研究地下水之散布以增加溫室保溫能力，相關的實用技術與限制條件亦已有報導(木村氏, 1989)。

針對國內之溫室降溫問題，理想的覆蓋材料在於減少紅外線的通過而維持可見光。此研究目的在於以國內塑膠布溫室所慣用之PVC塑膠布為研究對象，探討屋頂流水之水膜對於全日照量與可見光量透過率之影響能力，並以實際之溫室熱環境量測方式，比較屋頂流水方式之降溫能力。

## 二、理論探討

### (一)溫室熱環境模式

典型的溫室熱環境系統如圖1所示，所用之符號單位為 $\text{W}/\text{m}^2$ 。因此研究不涉及蒸發冷卻效應，對潛能之影響並不加以考慮。

$Q_1$ ：大氣全日照量

$Q_2$ ：溫室內部對天空長波輻射熱

$Q_3$ ：溫室內部與外界因傳導，對流作用之傳遞熱量

$Q_4$ ：因通風作用與大氣之熱交換量

$Q_5$ ：內部空氣與地面熱交換量

$Q_p$ ：植物蒸散作用所利用之能量

$Q_c$ 與 $Q_v$ 之計算公式如下：

$$Q_c = U \cdot A_w \cdot (T_i - T_o) \dots\dots\dots (1)$$

$A_w$ ：溫室周壁面積，(m<sup>2</sup>)

$T_i$ 與 $T_o$ 為溫室內外溫度(°C)

$U$ ：熱傳遞係數

$$Q_v = \rho \cdot C_p \cdot M' \cdot (T_i - T_e) \dots\dots\dots (2)$$

$\rho$ ：空氣密度(Kg/m<sup>3</sup>)， $C_p$ 為空氣比熱(Kj/Kg·°C)， $M'$ 為通風量(m<sup>3</sup>/sec)， $T_e$ 為有效通風溫度，在此研究中因為未使用蒸發冷卻設備，因此 $T_e = T_o$ 。  
依熱環境模式之研究結果(陳氏等，1991)：

$$\tau Q_i = Q_c + Q_v + Q_e + Q_r \pm Q_g \dots\dots\dots (3)$$

$\tau$ ：覆蓋材料之太陽能量透過率

$$T_i - T_o = \frac{\tau \cdot Q_i - Q_c - Q_p \pm Q_g}{U \cdot A_w + \rho \cdot C_p \cdot M'} \dots\dots\dots (4)$$

由方程式(4)可知，為消除熱累積， $T_i$ 與 $T_o$ 值差距愈小愈好，因此方程式(4)之分母之數值要增加，分子則減少。屋頂流水技術對溫室熱環境模式之影響在於 $\tau$ 與 $U$ 值。

覆蓋材料上有水膜流過時，其相關物性示意圖如圖2，影響探討如下：

$\tau_w$ ：水膜對日照能量的透過率

$\tau_c$ ：覆蓋材料對於日照能量透過率

$T_y$ ：水膜上層溫度(°C)

$T_w$ ：水膜下層溫度(°C)

$T_1$ ：覆蓋材料底層溫度(°C)

$h_o$ ：水膜外層或覆蓋材料外層對空氣之熱對流係數(W/m·k)

$h_i$ ：覆蓋材料下層與內部空氣之熱對流係數(W/m·k)

$K_w$ ：水膜熱傳導係數(W/m<sup>2</sup>·k)

$K_c$ ：覆蓋材料熱傳導係數(W/m<sup>2</sup>·k)

$L_w$ ：水膜厚度(m)

$L_c$ ：覆蓋材料厚度(m)

對於日照能量的透過率 $\tau$ 而言，水膜之影響為 $\tau = \tau_w \times \tau_c$ ，而在傳導部份，水膜之影響比較如下：

1.無水膜時

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_i}} \dots\dots\dots (5)$$

2.有水膜時

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_w}{K_w} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_i}} \dots\dots\dots (6)$$

方程式(6)可解釋水膜對熱傳能力之影響，由於 $L_w/K_w$ 值的增加，造成 $U$ 值降低。以隔絕外界溫度之影響為環控目的時， $U$ 值降低有利於環控性能。在內部溫度高於外界溫度時， $U$ 值降低則不利於散熱。

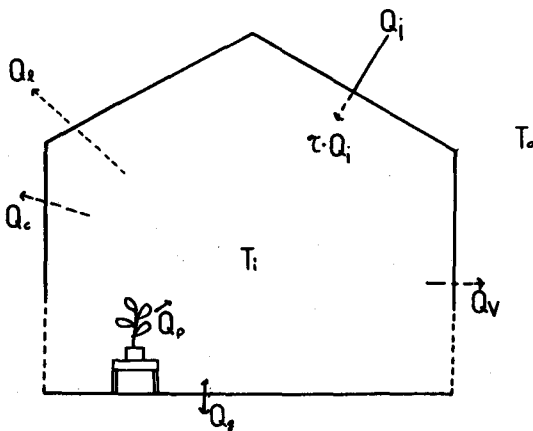


圖 1. 溫室熱環境系統  
Fig. 1. Thermal environmental system of greenhouse

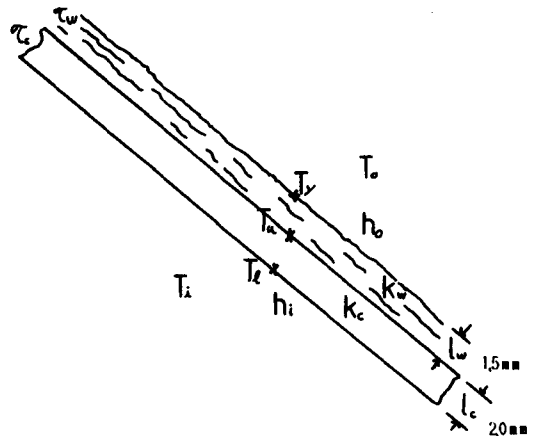


圖 2. 熱傳係數計算之示意圖  
Fig. 2. Schematic diagram for the calculation of heat transfer coefficient

### 三、材料與方法

此研究所用之設備包括太陽光能量透過研究用屋頂流水產生基本試驗裝置，與太子樓型塑膠布溫室。

#### (一)日照能量透過率試驗裝置

水膜對全日照與可見光能量透過率的量測裝置，如圖3所示。支持結構以金屬鋸管組成，以塑膠製固定夾固定PVC塑膠布形成斜面屋頂。在右側上方以打洞的塑膠管提供水膜沿塑膠布屋頂流下。供水管之洞口大小由小而大，使水流均勻。最大供水量為每分鐘37.51/m<sup>2</sup>。

三組感測器的位置如圖3，同時量測三種位置之相關日照能量：大氣狀態下，塑膠布屋頂下，流水通過塑膠布之屋頂下。每組感測器包括全日

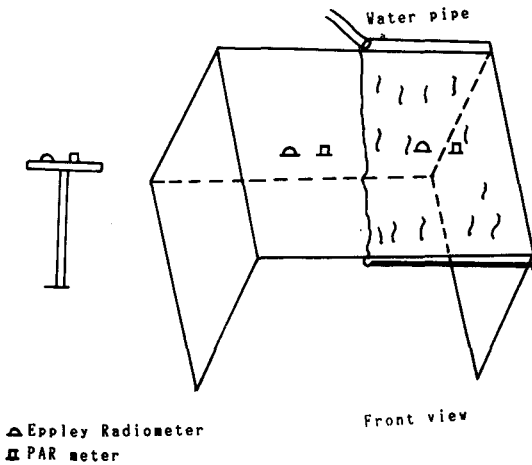


圖 3. 日照能量透過率試驗裝置與感測器位置  
Fig. 3. Apparatus of solar intensity transmitting test and location of sensors

照量感測計與光合作用能量計各一具。

#### (二)塑膠布溫室

此型山型太子樓式溫室之覆蓋材料為單層25mm厚之PVC塑膠布。其主要結構如陳氏等(1992)與陳氏(1993)之研究文獻所述。在屋頂上裝置噴頭以產生屋頂水膜，其作業如圖4。

日照能量的量測比較中，除大氣之全日射量與可見光能量之外，在溫室內部與屋簷平行之高度(3.6m)放置全日照量與可見光能量計各一具。

溫室內外各設有溫度計，內部溫度計所位置為溫室中央，離地面1.2m之位置。

#### (三)感測器

此研究所用之全日照量感測器為Eppley Radiometer Model 8-48型，Eppley Lab. INC.產品，感測元件為熱電堆(Thermopile)，量測波長為300~3,000nm，輸出0-10mv，誤差±3%。實驗前利用ESP型Eppley of Reference Standard加以校正。

光合作用能量用Li-Cor Li-190SB Quantum Sensor量測，量測波長範圍為400-700nm，感測元件為Silicon Photodiode。輸出0-10vm，校正值1mv代表200 μmol/2<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>，誤差±5%。使用前以Li-Cor 1800-02 Optical Radiation Calibrator加以校正。

溫度之量測採用PT-100電阻型溫度計，準確性±0.1°C。

#### (四)試驗方法

試驗進行時，以Delta-T data logger (Delta-T Devices LTD)記錄各感測器之輸出訊號，感測器

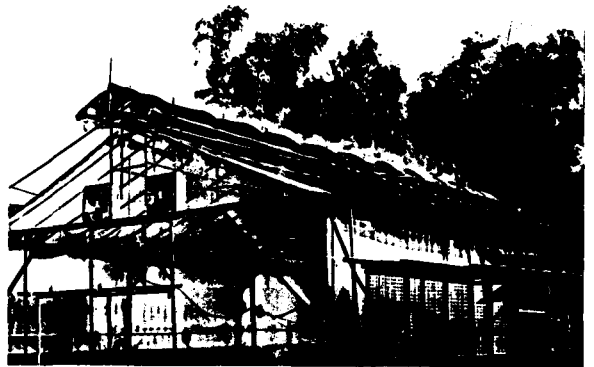


圖 4. 太子樓溫屋頂灑水  
Fig. 4. Roof-watering for attic-type greenhouse

之校正值在data logger之程式設定內已加以修正，因此記錄器輸出數值已為五分鐘平均值。

為便於區分屋頂水膜有無狀態對透過率的影響，相關透過率定義如下：

$$T_{11} = I_w (\text{有水膜之全日照量}) / I_a (\text{大氣下全日照量}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T_{12} = I_n (\text{無水膜之全日照量}) / I_a (\text{大氣下全日照量}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T_{12} = I_w (\text{有水膜之全日照量}) / I_n (\text{無水膜之全日照量}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$P_{P1} = PAR_w (\text{有水膜之可見光能量}) / PAR_a (\text{大氣下可見光能量}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$P_{P2} = PAR_n (\text{無水膜之可見光能量}) / PAR_a (\text{大氣下可見光能量}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$P_{12} = PAR_w (\text{有水膜之可見光能量}) / PAR_n (\text{無水膜之可見光能量}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

#### 四、結果與討論

##### (一) 水膜對日照能量透過率的影響

典型不同覆蓋材料所影響之日照能分佈如圖5 (水膜之厚度約0.15cm)。當日早上為陰天，陽光於10:00後出現，由圖5可知，屋頂流水之水膜對太陽能之全日照量透過率有減弱之功能。

將圖5之日照能量分佈以透過率表示，如圖6所示，屋頂未有水膜流過的塑膠布屋頂日射能量透過率( $T_{12}$ )大於有水膜之屋( $T_{11}$ )， $T_{11}$ 之平均值約為 $0.85 \pm 0.07$ ， $T_{12}$ 之平均值約為 $0.78 \pm 0.06$ 。

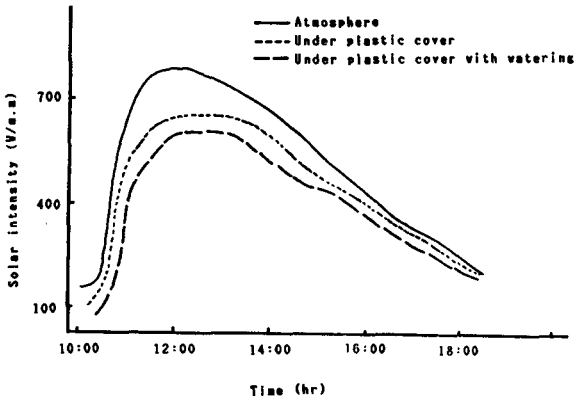


圖 5. 屋頂流水對全日照量之影響  
Fig. 5. Effect of the total solar intensity by the roof-watering

屋頂流水對可見光能量之影響如圖7所示。 $P_{P2}$ 為不具流水時塑膠布對PAR透過率之影響，其平均值約為 $0.968 \pm 0.011$ ， $P_{P1}$ 表示屋頂有水膜流過時，對PAR透過率之影響，其平均值約 $0.931 \pm 0.015$ ，由可知覆蓋材料所製成之溫室屋頂在具有流水通過時，除了減弱全日照量之通過，也同時阻絕部份可見光。

以方程式(9)與方程式(10)所定對 $T_{12}$ 值與 $P_{12}$ 值，經計算後其數值與全日照量，可見光能量之關係如圖8a與8b。 $T_{12}$ 與全日照量之關係由圖8a中數據之分佈似乎有直線關係，但以迴歸分析結果直線關係並不顯著， $T_{12}$ 之平均為 $0.922 \pm 0.011$ ，顯示屋頂流水對溫室之透光率減少了8%左右。

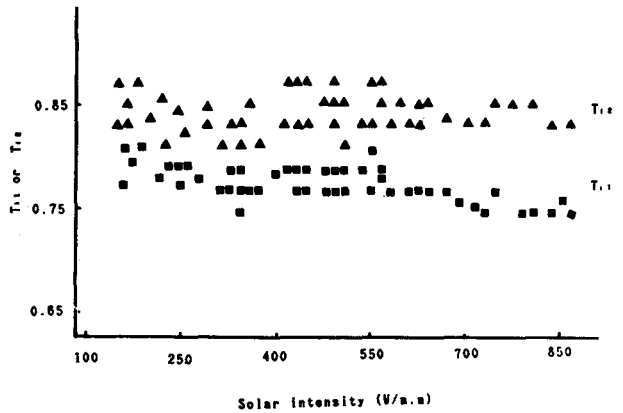


圖 6. 屋頂流水對全日照量透溫率之影響  
Fig. 6. Effect of the transmittance for total solar intensity by the roof-watering

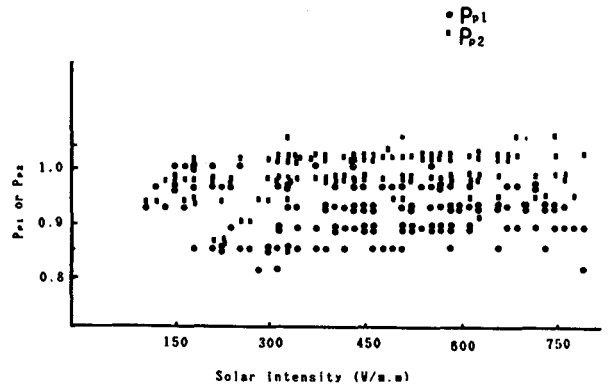


圖 7. 屋頂流水對可見光穿透率之影響  
Fig. 7. Effect of the PAR transmittance by the roof-watering

$P_{12}$ 對大氣PAR值之數據分佈關係如圖8b。 $P_{12}$ 之平均數值為 $0.94 \pm 0.08$ 。以 $T_{12}$ 與 $P_{12}$ 之平均值比較可知，屋頂流水對全照量之減弱能力遠大於對於可見能量之透過性減弱能力。

增加水量，使流經塑膠布之水膜厚度增加為0.32cm時， $P_{12}$ 與 $T_{12}$ 之數值對全日照量之分佈關係圖示於9a與9b。由圖可知，在水膜厚度增加時， $T_{12}$ 數值約為 $0.8 \pm 0.12$ ，而 $P_{12}$ 值則為 $0.875 \pm 0.128$ 左右，此結果顯示，增加水膜厚度則減少了全日照量與可見光能量的透過率。

### (二)山型溫室試驗

以山型屋頂太子樓之塑膠布溫室進行日照量透過率之試驗，水膜厚度約為0.05~0.08cm。有關之統

計平均數值 $T_{12}$ 約為0.57， $T_{12}$ 為0.567，以統計分析結果，兩者並無差異性。 $P_{P1}$ 平均值為0.528， $P_{P2}$ 平均值為0.514，屋頂水膜對PAR減弱能力值， $P_{12}$ 約為0.973，在統計上亦不顯著。

### (三)溫室降溫能力試驗

太子樓式山型溫室其典型內外溫度差與大氣全日照量的關係如圖10。由方程式(4)可知，在無機械通風之下，自然通風量 $M'$ 值與內外溫差有關，但在高日照能量下，此自然通風影響溫室內部熱能環境有限，且 $Q_i$ 與 $Q_e$ 值在高日照量下其比例不顯著(陳氏等, 1992)。溫室內作物蒸散作用之所耗能量與大氣日照量有比例關係，因此方程式(3)在高大氣日照量( $I_1$ )下，內外溫差量( $T_i - T_o$ )與 $I_1$ 有直

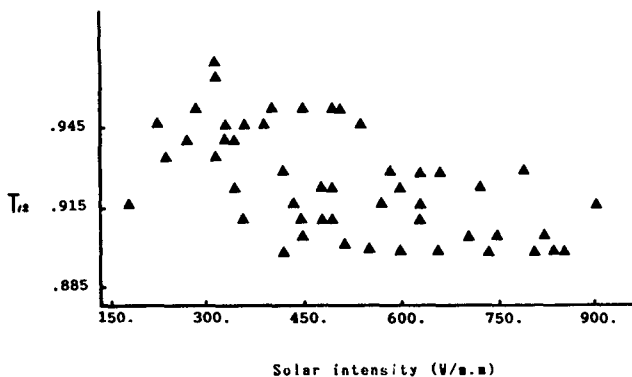


圖 8a.  $T_{12}$ 值與全日照量之關係(W/m.m)

Fig. 8a. Relationships between  $T_{12}$  and total solar intensity (water thickness is 0.15cm)

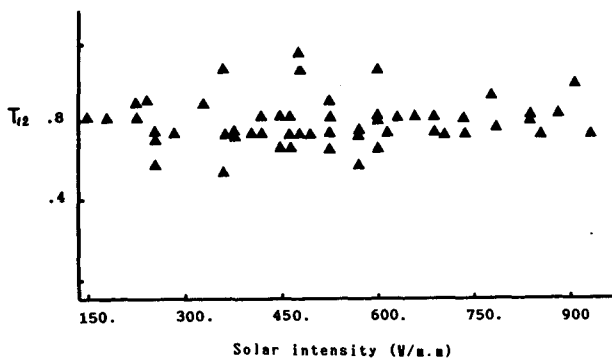


圖 9a.  $T_{12}$ 值與全日照量之關係(水膜0.32cm)

Fig. 9a. Relationships between  $T_{12}$  and total solar intensity (water thickness is 0.32cm)

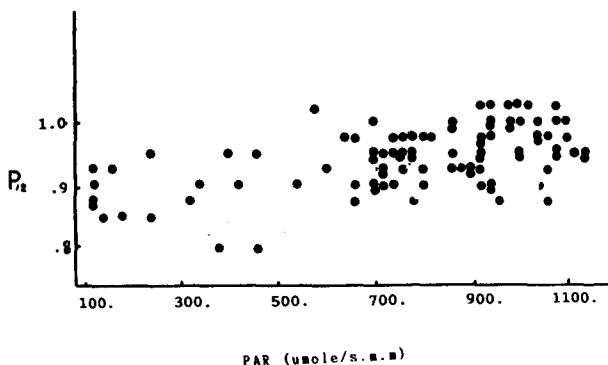


圖 8b.  $P_{12}$ 值與PAR之關係(水膜0.15cm)

Fig. 8b. Relationships between  $P_{12}$  and PAR (water thickness is 0.15cm)

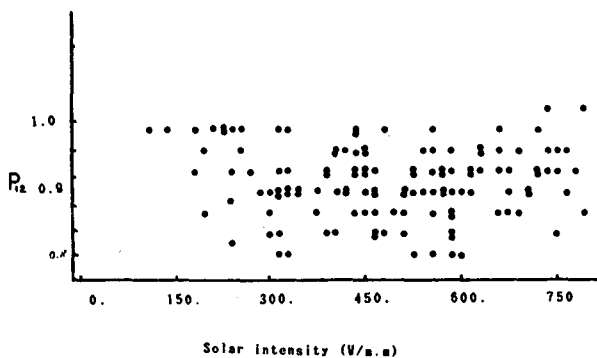


圖 9b.  $P_{12}$ 值與全日照量之關係(水膜0.32cm)

Fig. 9b. Relationships between  $P_{12}$  and total solar intensity (water thickness is 0.32cm)

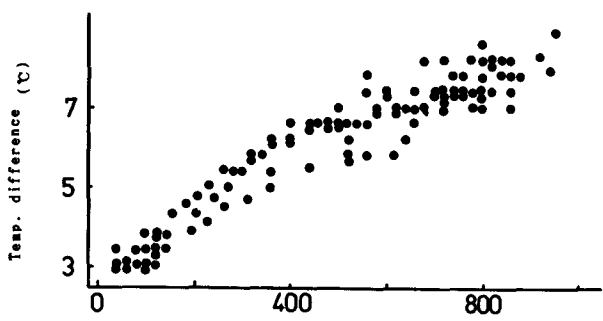


圖 10. 山型溫室內外溫差與大氣日照量之關係  
 Fig. 10. Relationships of the total solar intensity and the temperature difference between inner and outer greenhouse

線關係存在。圖10之數據以迴歸分析結果：

$$\Delta T = 3.209 + 0.005923 \times I_1, R^2 = 0.83 \dots (3)$$

將此研究中，屋頂有無流水處理之各10組數據以統計分析技術加以處理，其結果圖示於圖11。大氣日照量為500W/m<sup>2</sup>以下時，屋頂有無水膜對內外溫度差之影響並不顯著。在日照量大於500W/m<sup>2</sup>時，屋頂有水膜流過反而造成內外之溫差高於無水流之處理。此與一般溫室業者原欲以屋頂流水達到降溫效果之意願得到相反之結果。此

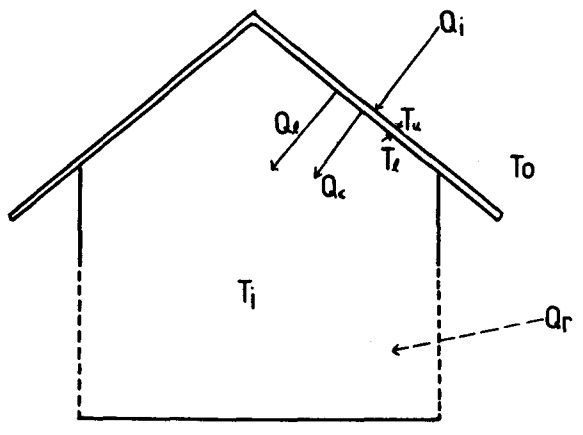


圖 12. 開放型畜舍熱環境系統  
 Fig. 12. Thermal environmental system for the open-type livestock house

原因可由方程式(4)與方程式(9)加以解釋。由於屋頂加以施用水流，水膜在覆蓋材料上，對熱傳係數U<sub>2</sub>而言，分母部份增加L<sub>w</sub>/K<sub>w</sub>項次，使U<sub>2</sub>值減少，因而降低了溫室內部熱量以傳導方式經屋頂向外散失的比例。對於太陽能量的透過率而言，以屋頂流水之方式，減低的比例仍是有限。

由以上之研究結果可知，溫室屋頂施用流水對於內部熱環境之影響有兩類：

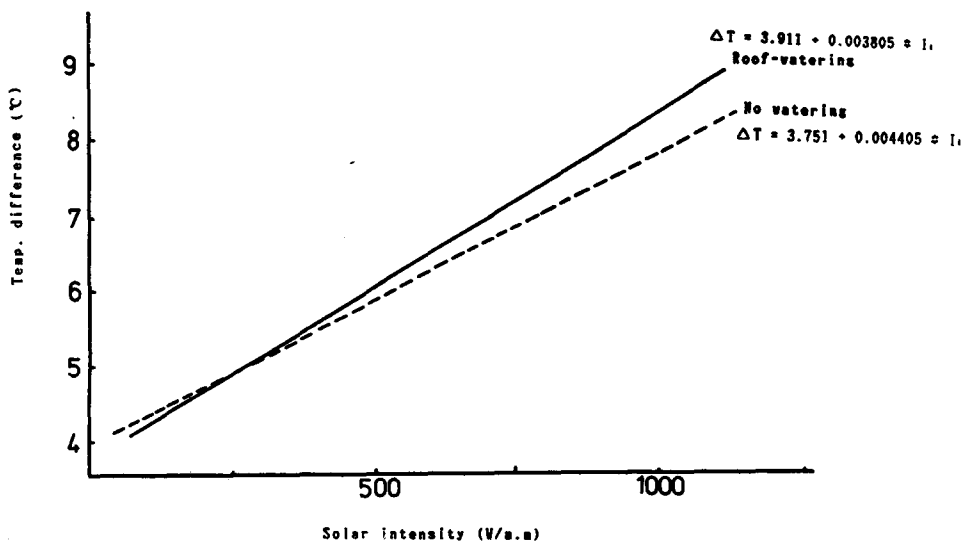


圖 11. 屋頂流水對溫室內外溫差之影響  
 Fig. 11. Effect of the roof-watering on the temperature difference between inner and outer greenhouse

1. 降低覆對材料透光率，以減少太陽能量進入溫室內部之比例。

2. 減低屋頂覆蓋材料之熱傳係數，降低溫室內外熱量交換之能力。

相關的量化能力由於溫室內部熱環境影響因子包含長波熱輻射，作物蒸散作用——等項目，準確之預測能力必須配合熱環境模式加以量化（陳等，1992），但其能量對溫室內部總能量之影響較小，因而在此研究並未加以量測。而日本之早期研究（船氏等，1968；杉氏等，1962），利用屋頂流水對設施環境改良之目的係用以改善生長室之電力需求，而其生長室維持之溫度低於大氣溫度。因此利用屋頂流水法，恰可減少進入日照量與隔絕外界熱能進入。國內之設施若內部溫度已高於外界溫度，此方法則不適用，若溫室利用蒸發冷卻設備（水牆或噴霧系統）使內部溫度已低於大氣溫度時，屋頂流水對維持低溫有所助益，但與其他環控技術比較，其改善能力有限。

利用屋頂流水技術之另一問題在於供水問題，在水膜厚度增厚時，透過率的減低才有顯著改善，而大量供水造成設備（馬達、塔、供水管等）費用的增加，頻繁的使用流水又容易造成覆蓋材料長苔之問題。以實用之觀點而言，屋頂流水對溫室降溫並非適用之技術。

#### 四 開放型畜舍之熱環境

屋頂流水在國內開放型畜舍夏季進行降溫時常為採用，而畜舍環境與溫室熱環境之相異點可由圖12加以說明。由於畜舍屋頂材料為不透明性，太陽能量無法以直射方式進入畜舍內。而大氣環境對於開放型畜舍內部熱環境之影響方式主要有三類：

1.  $Q_r$ ：大氣日照量經散射或反射進入。
2.  $Q_c$ ：屋頂內面溫度與內部空氣之熱對流。
3.  $Q_1$ ：屋頂內面溫度以長波熱輻射方式影響內部動物。

畜舍屋頂之上表面溫度（ $T_u$ ）主要來自太陽之輻射能與大氣空氣之熱對流， $T_u$ 值因傳導作用，使熱量通過屋頂材料進入內部表面，再以對流與輻射方式影響內部環境，因此在夏季降溫作業中，降低屋頂表面溫度可降低內部表面溫度，進

而降低 $Q_c$ 與 $Q_1$ 兩項熱源。在畜舍屋頂洒水或利用水膜流過，可吸收熱源而達到降溫效果。對於溫室而言，內部之熱源主要來自直接透過覆蓋材料之太陽能量，水膜對降溫之功能僅在於減少透過比例，而其效果有限，由熱環境系統分析可知屋頂流水對畜舍有效但對溫室降溫之功能有限。

## 五、結 論

由上述之研究結果可知，屋頂流水技術中覆蓋材料PVC上增加水膜同時降低全日照能量與可見光能量之透過率。增加水膜厚度則可減弱更多能量的透過。由實際溫室之降溫能力試驗結果顯示，在 $500W/m^2$ 以下大氣狀態下，使用屋頂流水技術對內部溫度並無顯著影響，在高日照量時，屋頂流水技術反而增加內部溫度，其原因在於水膜減少內部熱量散失至外界的能力，此環境改善技術對疏解國內夏季設施熱累積現象並不實用。

## 六、參考文獻

- 中央氣象局。1993。農業氣象旬報。中央氣象局。臺北。
- 朱品聰。1089。如何渡過洋爽的夏天—談夏季的溫室降溫。洋蘭：12：36—41。
- 王鼎盛。1988。設施園藝設計手冊。台灣大學農工系。
- 陳加忠、陳志昇、黃照明。1992。溫室環境模式之研究。中華農業研究41(1)：79—114。
- 陳加忠、林瑞松。1993。塑膠布溫室環控系統之研究。農業工程學報39(2)：84—91
- 陳加忠。1993。透明PVC塑膠布山型溫室日照能透過率之研究。中華農業研究42(4)：419—429。
- Tross, M. J., D. Degan, A. Ziv and R. Kopel. 1984 An optical liquid filter greenhouse: numerical solution and verification of a thermodynamic model. ACTA Horticultrae 148:401—490.
- Walker, P. N. 1978. Surface heating heating greenhouses with power plant cooling water. Transactions of the ASAE 21(2):322—328.
- Walker, P. N. 1979. Greenhouse surface heating with

（文轉第58頁）