

水田生態環境微氣候之量測與數值模擬

Measurement and Numerical Simulation of Paddy Field Ecoenvironment and Microclimate

國立台灣大學生物環境系統工程學系副教授
兼水工試驗所副研究員

吳 富 春

Fu-Chun Wu

國立台灣大學生物環境系統工程學系
研究助理

李 長 穎

Chang-Ying Lee

摘 要

本研究針對水田生態環境微氣候進行實際量測與數值模擬，並評估水田區不同土地利用對區域性微氣候之影響。本研究為更精確模擬水田生態環境之溫度及濕度變化，乃以簡易生物圈(SiB2)模式架構修改先前之植物大氣土壤模式 PASSM，採用電流概念模擬植物群內可感熱流及蒸發潛熱流之傳輸，考慮湛水層及深層土壤之熱流機制，並採用較合理之葉面積分布型態及葉面傾斜校正係數計算植物所吸收之輻射量，另外在地溫計算方面，採用深層土溫校正地表溫度，而深層土溫則以實測資料搭配週期函數模擬溫度變化。本研究並以試驗田區實測之微氣候資料驗證數值模擬結果，比較結果顯示本研究改良之 SiB2 模式由於在植物群內及地熱處理部分均做了相當幅度之修改，故能獲致較佳之模擬結果。此外本研究利用改良之數值模式評估水田區不同土地利用狀況對區域性微氣候之影響，模擬結果顯示水田在夏季具有涼化環境之功效，每公頃水稻田相當於約 620 台家用冷氣機之冷房效果，而水田在冬季則有暖化環境之功效，每公頃水稻田相當於約 2,400 台家用電暖爐之暖房效果。模擬結果亦顯示水田休耕時若能做為蓄水池使用，則調節區域性微氣候之效果更為顯著，其夏季冷房效果為水稻田之 4 倍，而冬季暖房效果為水稻田之 2 倍。

關鍵詞：水田，生態環境，微氣候，簡易生物圈模式，數值模擬。

ABSTRACT

In this study we perform measurements and numerical simulations of paddy-field microclimate, and assess the effect of land-use pattern on the regional microclimate. To accurately simulate the paddy-field temperature and humidity variations, we use the theoretical framework of the simple biosphere model (SiB2) to modify the earlier plant-atmosphere-soil simulation model (PASSM). The electrical analog resistance

formulation of heat and water fluxes is used, the heat fluxes in the surface-water and soil layers are incorporated, the more realistic leaf area distribution and inclination correction factor are used to evaluate the adsorbed solar radiation. Additionally, the periodic function of deep soil temperature variation is employed to evaluate the surface soil temperature. The microclimate data measured at the test paddy field are used to verify the model results. It is revealed that the modified SiB2 model gives better results than the PASSM model, primarily due to the improvements made in the computations of canopy and ground heat balance. The modified SiB2 model is further used to assess the effect of paddy-field land-use pattern on the regional microclimate. The simulation results indicate that in the summer the paddy fields function to achieve cooling of the environment, a one-hectare paddy field is equivalent to 620 family-type air conditioners, whereas in the winter they function to achieve warming of the environment, a one-hectare paddy field is equivalent to 2,400 family-type heaters. The simulation results also indicate that more significant cooling and warming effects can be achieved if the non-irrigated paddy fields are used as the storage ponds. The cooling effect of the storage pond is 4 times that of the paddy field, while the warming effect of the storage pond is twice that of the paddy field.

Keywords: Paddy field, Eco-environment, Microclimate, Simple biosphere model (SiB2), Numerical simulation.

一、前言

水稻田除了生產性之功能外，尚存在生態上及生活上之機能，本研究建立水田微氣候模式，分析水田調節微氣候之功能，評估各種休耕方案對水田生態環境之影響。本研究過去已完成水田區垂直一維微氣候模式之建立，並建立區域性二維微氣候模式，針對試驗田區進行區域性三維微氣候模擬，評估水田調節微氣候之功能，並探討區域性不同之土地利用搭配對鄰近住宅區之影響。本研究之重點在試驗田區實際量測田間各項環境氣象資料，以實測資料驗證水田微氣候模式模擬結果。另外為求精確描述植物群中溫、濕度之變化，本研究以簡易生物圈模式(SiB2)架構進行修改，與先前模式印證比較，並以改良之數值模式模擬評估水稻田在夏季涼化環境之功效與冬季暖化環境之功效。

二、模式理論

2.1 SiB2 一維氣候模式

SiB2 (Simple Biosphere Model)為大氣環流模式(GCMs, General Circulation Models)下的其

中一種地表模式(LSMs, Land Surface Models)。本模式為 Sellers 等人於 1986 年提出之 SiB1 模式修改版本，模式之目的在於模擬地表與大氣間之能量、動量及質量交換。其後 Sellers 等人又將原模式加以修改，加入了光合作用之傳導架構。在 1996 年時，描述植物生化反應造成地表與大氣間能量、水分及二氧化碳交換過程之 SiB2 模式正式被提出。

本研究過去所發展之垂直一維水田區微氣候模式，主要根據「植物-大氣-土壤模式」(PASSM)之架構(Wu, 1990)。此模式將一維垂直方向分為多層，探討於定態條件(Steady State)下，各層之間由於溫度、濕度差異所造成之擴散作用。模式主要包含三個部分：(1)植物群內之能量平衡；(2)輻射量分布；(3)動量、熱量及水蒸氣交換。

本研究改良之水田微氣候模式，主要改變在於模式之第三部分，也就是熱量及水蒸氣交換部分，改以簡易生物圈模式(SiB2)之理論為基礎。原 PASSM 模式之架構是以亂流擴散為動量、熱量及水蒸氣傳遞之機制，擴散之驅動力來自於兩層之間溫度及濕度之差異。熱量及水蒸汽傳輸方

程式如下：

$$SH(z) = -\rho \cdot c_p \cdot K_h(z) \cdot \frac{dT_A(z)}{dz} \dots\dots\dots(1)$$

$$LE(z) = -\rho \cdot c_p \cdot K_w(z) \cdot \frac{dQ_A(z)}{dz} \dots\dots\dots(2)$$

式中 $SH(z)$ 與 $LE(z)$ 分別為高度 z 處之可感熱流與潛熱流， ρ 為空氣密度， c_p 為空氣比熱， $K_h(z)$ 與 $K_w(z)$ 分別為可感熱與潛熱之亂流擴散係數， $T_A(z)$ 與 $Q_A(z)$ 分別為高度 z 處之空氣溫度與比濕度。而在 SiB2 模式中，將可感熱流及蒸發潛熱流類比為電流，將溫度差及濕度差視為電位差，傳遞阻抗視為電阻，其關係式可表示為：

$$\text{可感熱流} = \frac{\text{溫度差}}{\text{阻抗}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{蒸發潛熱流} = \frac{\text{濕度差}}{\text{阻抗}} \dots\dots\dots(4)$$

在地面與空氣之間、植物體與空氣之間、以及兩層空氣間皆有各自之阻抗值，可感熱流及蒸發潛熱流由溫度及濕度較高處往較低處傳遞，傳遞機制如圖 1 及圖 2 所示。

此外，由於水田田面有湛水，與傳統 SiB2 模式所處理之旱作地表能量傳輸機制上有所差異，因此 Kim 等人(2000)提出適用於亞洲地區水田之 SiB2-Paddy 模式，此模式在地表上加一湛水層，考慮湛水層及深層土壤之熱流機制，如圖 3 所示。

2.2 垂直一維微氣候模式

地表在接受太陽短波輻射後，除了以長波輻射方式將能量散至大氣中，且利用地表物質與空氣溫差所產生之可感熱流(Sensible Heat)，以及地表水分與植物之蒸發散所產生蒸發散潛熱流(Latent Heat)將地表本身之熱量以非輻射方式散至大氣中。

2.2.1 種植植物區

1. 植物群內之太陽輻射分布

植物群內之太陽輻射熱流 $S_T(z)$ 可根據經驗公式估計：

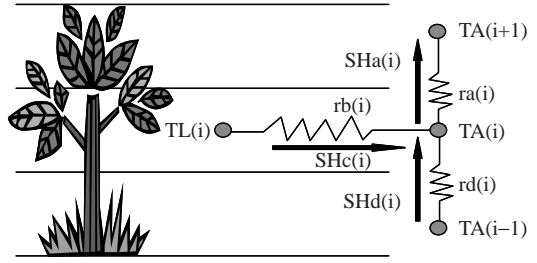


圖 1 可感熱流傳遞機制示意圖

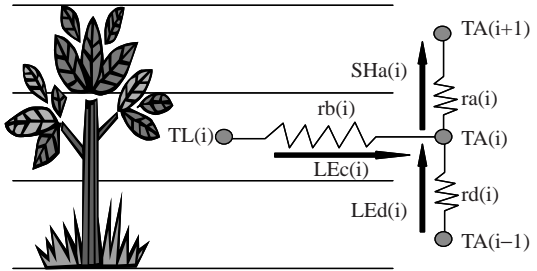


圖 2 蒸發散潛熱流傳遞機制示意圖

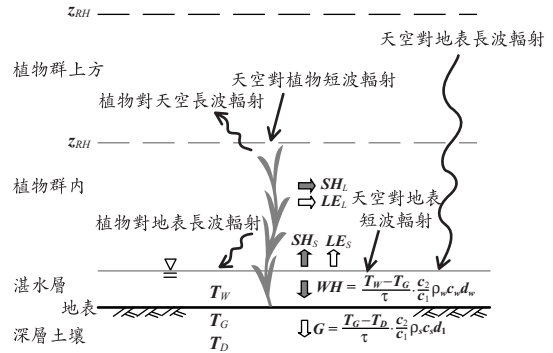


圖 3 熱流傳遞示意圖

$$S_T(z) = S_{TCH} \cdot \exp[-\alpha_L \cdot CLAI(z)] \dots\dots\dots(5)$$

式中 S_{TCH} 為大氣之太陽輻射熱流(W/m^2)； α_L 為消滅係數(無因次)，值約 0.3 至 1.5 之間(Ross, 1975)； $CLAI(z)$ 為高度 z 以上之累積葉面積指數(m^2/m^2)，可由葉面積密度 $LAD(z)$ (m^2/m^3)求得，其關係式如下：

$$CLAI(z) = \int_{z_{CH}}^z LAD(z) dz \dots\dots\dots(6)$$

式中 z_{CH} 為植物群之平均覆蓋高度(Canopy Height)。

植物所吸收之長波輻射 $L_N(z)$ 可藉由經驗公式求得(Murphy and Knoerr, 1972) :

$$L_N(z) = \sigma(T_{SK}^4 - T_L(z)^4) + \sigma(T_G^4 - T_L(z)^4) \dots\dots\dots(7)$$

式中 σ 為 Stefan-Boltzmann 常數(W/m^2k^4) ; T_{SK} 與 T_G 分別為天空及地表之溫度(k) ; $T_L(z)$ 為高度 z 之平均葉面溫度(k)。

根據式(5)與式(7), 可求得植物群內高度 z 處所吸收之淨輻射能 $R_N(z)$:

$$R_N(z) = F \cdot [a_L \cdot S_T(z) + L_N(z)] \dots\dots\dots(8)$$

式中 a_L 為葉面對太陽輻射熱流之吸收率 ; F 為葉面傾角校正係數(Kondo and Watanabe, 1992) ; $F=0$ 表示葉面垂直地面, $F=1$ 表示葉面平行地面。

2. 動量傳遞

(1) 植物群上方 ($z \geq z_{CH}$)

空氣中風速之變化可分為穩定(Stable)、不穩定(Unstable)及中性(Neutral)等三種條件來討論, 當空氣中溫度不隨高度改變且垂直的熱流為零時, 稱之為中性條件, 其平均風速之垂直變化梯度可表示如下(Wu, 1990) :

$$\frac{dU}{dz} = \frac{U^*}{k(z-d)} \quad \text{for } z \geq z_{CH} \dots\dots\dots(9)$$

將式(9)積分可得風速曲線 $U(z)$:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad \text{for } z \geq z_{CH} \dots\dots\dots(10)$$

式中 U^* 為摩擦速度(m/s) ; k 則是 von Karman 常數(無因次) ; d 與 z_0 分別為零平面之位移高度(m) 與植物群之糙度(m), 可利用經驗公式求得(Monteith, 1975 ; Goudriaan, 1977), 如下所示 :

$$\log d = 0.9793 \cdot \log z_{CH} - 0.1536 \dots\dots\dots(11)$$

$$\log z_0 = 0.9970 \cdot \log z_{CH} - 0.8830 \dots\dots\dots(12)$$

當大氣中溫度會隨著高度增加而增加時, 空氣中存在著向下的可感熱流 SH , 此時稱之為穩定之大氣條件。而當大氣中溫度會隨著高度增加而減少時, 其存在向上的可感熱流, 此時稱之為不穩定之大氣條件。大氣的穩定度會影響質量、

熱量及動量之垂直傳輸, 當大氣條件為不穩定時, 垂直傳輸過程會受到浮力的影響而增加, 反之則造成趨緩之影響。考慮浮力的影響, 植物群上風速梯度可表示如下(Dyer, 1974) :

$$\frac{dU}{dz} = \frac{U^*}{k(z-d)} \cdot \phi_m(\Gamma) \quad \text{for } z \geq z_{CH} \dots\dots\dots(13)$$

將式(13)積分可得 :

$$U(z_2) - U(z_1) = \frac{U^*}{k} \left[\ln \frac{z_2-d}{z_1-d} - (\Phi_m(\Gamma_2) - \Phi_m(\Gamma_1)) \right] \dots\dots\dots(14)$$

式中 $\phi_m(\Gamma)$ 為動量穩定函數, $\Phi_m(\Gamma)$ 動量穩定積分參數, Γ 為穩定參數。利用式(14)可求得摩擦速度 U^* , 如下所示 :

$$U^* = \frac{k \cdot U(z_{RH})}{\ln \left[\frac{z_{RH}-d}{z_0} \right] - \Phi_m(\Gamma_{RH})} \dots\dots\dots(15)$$

式中 z_{RH} 為風速邊界層影響高度。

熱量穩定函數 $\phi_h(\Gamma)$ 、動量穩定函數 $\phi_m(\Gamma)$ 、水汽穩定函數 $\phi_w(\Gamma)$ 三種穩定函數之計算方法會因為大氣之穩定條件而有所不同, 可分別表示如下(Dyer, 1974) :

$$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m(\Gamma) = 1.0 \quad \text{for 中性條件} \dots\dots\dots(16)$$

$$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m^2(\Gamma) = (1-16\Gamma)^{-1/2} \quad \text{for 不穩定條件} \dots\dots\dots(17)$$

$$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m(\Gamma) = 1+5\Gamma \quad \text{for 穩定條件} \dots\dots\dots(18)$$

各穩定函數之積分式如下(Arya, 2001) :

$$\Phi_h(\Gamma) = \Phi_w(\Gamma) = \Phi_m(\Gamma) = 0 \quad \text{for 中性條件} \dots\dots\dots(19)$$

$$\Phi_m(\Gamma) = \ln \left[\left(\frac{1+x^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2} \quad \text{for 不穩定條件} \dots\dots\dots(20)$$

$$\Phi_h(\Gamma) = \Phi_w(\Gamma) = 2 \ln \left[\frac{1+x^2}{2} \right] \quad \text{for 不穩定條件} \dots\dots\dots(21)$$

$$\Phi_h(\Gamma) = \Phi_w(\Gamma) = \Phi_m(\Gamma) = -5\Gamma \quad \text{for 穩定條件} \dots\dots\dots(22)$$

式中 $x = (1-16\Gamma)^{1/4}$ 。穩定參數 Γ 定義為 :

$$\Gamma = \frac{z-d}{L_{MO}} \dots\dots\dots(23)$$

式中 L_{MO} 稱之為 Monin-Obukhov 長度(m)，可以下式計算：

$$L_{MO} = -\frac{\rho \cdot c_p \cdot T_A(z) \cdot U^{*3}}{k \cdot g \cdot SH} \dots\dots\dots (24)$$

式中 ρ 為空氣密度(kg/m³)； g 為重力加速度(m/s²)； c_p 為大氣之比熱(J/kg°C)； $T_A(z)$ 高度 z 之空氣溫度(°C)； SH 則是空氣溫度差異所造成之可感熱流(W/m²)。

穩定函數計算時可利用 SH 之正負判斷大氣條件為穩定或不穩定的狀態，當 SH 為正值時，表示此時存在向上之熱流， L_{MO} 為負，大氣條件為不穩定，反之則為穩定。

(2) 植物群內($z \leq z_{CH}$)

植物群內之風速曲線可由下列公式求得(Wu, 1990)：

$$U(z) = U(z_{CH}) \cdot \exp\left[\alpha_w \left(\frac{z}{z_{CH}} - 1\right)\right] \text{ for } z \leq z_{CH} \dots (25)$$

式中 α_w 為風速消減係數。

3. 熱量與水蒸氣之傳遞

(1) 植物群上方($z \geq z_{CH}$)

因為空氣之熱容積相當小，所以將溫度與水氣轉換之過程假設為定態，溫度及溼度並不隨時間改變($\partial T_A / \partial t = \partial Q_A / \partial t = 0$)。根據 Wu (1990)，植物群上方任意兩層 z_1 與 z_2 之溫度及比溼度變化可以下列兩式表示：

$$T_{A1} = T_{A2} + \frac{SH}{\rho \cdot c_p \cdot k \cdot U^*} \left[\ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Phi_h(\Gamma_2) + \Phi_h(\Gamma_1) \right] \dots\dots\dots (26)$$

$$Q_{A1} = Q_{A2} + \frac{LE}{\rho \cdot L_v(z) \cdot k \cdot U^*} \left[\ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Phi_w(\Gamma_2) + \Phi_w(\Gamma_1) \right] \dots\dots\dots (27)$$

式中 LE 為蒸發所造成之潛熱熱流(W/m²)， $L_v(z)$ 則是高度 z 之蒸發潛熱(J/kg)， $\Phi_h(\Gamma)$ 與 $\Phi_w(\Gamma)$ 分別為熱量及水汽穩定積分參數。 $L_v(z)$ 為葉面溫度 $T_L(z)$ 之函數，可表示如下(Murphy and Knoerr, 1972)：

$$L_v(z) = 4187 \cdot [595 - 0.567 \cdot T_L(z)] \dots\dots\dots (28)$$

(2) 植物群內($z \leq z_{CH}$)

根據 SiB2 模式之理論架構，定態下植物群內各層之可感熱流及潛熱流傳遞，如圖 1 及圖 2 所示。植物體至空氣間之可感熱流 SH_c 及蒸發潛熱流 LE_c 可以式(29)及(30)表示：

$$SH_c(z) = \rho \cdot c_p \frac{[T_L(z) - T_A(z)]}{rb(z)} \dots\dots\dots (29)$$

$$LE_c(z) = \rho \cdot L_v(z) \frac{[e^*(T_L(z)) - Q_A(z)]}{rb(z) + rs(z)} \dots\dots\dots (30)$$

式中 $rb(z)$ 為葉面邊界阻抗(Leaf-boundary resistance)， $rs(z)$ 為植物葉面氣孔對水氣蒸發之阻抗(Stomatal resistance)， $e^*(T_L(z))$ 為葉面溫度 $T_L(z)$ 之飽和比濕(kg/kg)，可利用下列之經驗公式求得(Murray, 1967；Webb, 1965)：

$$e^*(T_L(z)) = \frac{622}{P_{atm}} \cdot (6.1078) \cdot \exp\left[\frac{(17.2693882) \cdot T_L(z)}{T_L(z) + 237.3}\right] \dots\dots\dots (31)$$

式中 P_{atm} 為大氣壓(mb)。 $rb(z)$ 可表示如下(Gates, 1980)：

$$rb(z) = C_1 \cdot \left[\frac{D_L}{U(z)}\right]^{1/2} \dots\dots\dots (32)$$

式中 D_L 為平均葉面寬度(m)； C_1 則為一經驗常數。 $rs(z)$ 可表示如下(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)：

$$rs(z) = D_{RY}(z) \cdot \left[146.0 + \frac{3.6}{4.59 \times 10^{-4} \cdot S_T(z) + 0.0015} \right] \dots\dots\dots (33)$$

$$D_{RY}(z) = \frac{e^*(T_L(z)) - Q_A(z)}{Q_{crit}} \text{ for } e^*(T_L(z)) - Q_A(z) > Q_{crit} \dots\dots\dots (34)$$

$$D_{RY}(z) = 1 \text{ for } e^*(T_L(z)) - Q_A(z) \leq Q_{crit} \dots\dots\dots (35)$$

式中 Q_{crit} 為比溼度差之最小影響值(kg/kg)。

兩層之間的可感熱流及蒸發潛熱流可以式(36)、(37)、(38)及(39)表示：

$$SH_d(z_i) = \rho \cdot c_p \frac{[T_A(z_{i-1}) - T_A(z_i)]}{rd(z_i)} \dots\dots\dots (36)$$

$$SH_a(z_i) = \rho \cdot c_p \frac{[T_A(z_i) - T_A(z_{i+1})]}{ra(z_i)} \dots\dots\dots(37)$$

$$LE_d(z_i) = \rho \cdot \frac{c_p}{r} \frac{[Q_A(z_{i-1}) - Q_A(z_i)]}{rd(z_i)} \dots\dots\dots(38)$$

$$LE_a(z_i) = \rho \cdot \frac{c_p}{r} \frac{[Q_A(z_i) - Q_A(z_{i+1})]}{ra(z_i)} \dots\dots\dots(39)$$

式中 r 為濕度常數， $ra(z_i)$ 及 $rd(z_i)$ 分別為該層空氣與下層、上層空氣間之阻抗，由亂流擴散係數之倒數求得(Waggoner et al., 1968)：

$$rd(z_i) = \frac{z_{CH}}{\alpha_k \cdot K_h(z_i)} \cdot \{\exp[\alpha_k \cdot (z_{CH} - z_{i-1})] - \exp[\alpha_k \cdot (z_{CH} - z_i)]\} \dots\dots\dots(40)$$

$$ra(z_i) = \frac{z_{CH}}{\alpha_k \cdot K_h(z_i)} \cdot \{\exp[\alpha_k \cdot (z_{CH} - z_i)] - \exp[\alpha_k \cdot (z_{CH} - z_{i+1})]\} \dots\dots\dots(41)$$

式中 α_k 為消滅係數。其中植物群內之亂流擴散係數可利用下列公式求得 (Mehlenbacher and Whitfield, 1977)：

$$K_h(z) = K_h(z_{CH}) \cdot \exp\left[\alpha_k \left(\frac{z}{z_{CH}} - 1\right)\right] \text{ for } z \leq z_{CH} \dots\dots\dots(42)$$

$$K_w(z) = K_w(z_{CH}) \cdot \exp\left[\alpha_k \left(-\frac{z}{z_{CH}} - 1\right)\right] \text{ for } z \leq z_{CH} \dots\dots\dots(43)$$

在穩定條件、不穩定條件或中性條件時，熱量穩定函數 $\phi_h(\Gamma)$ 與水汽穩定函數 $\phi_w(\Gamma)$ 均相等，故無論是在植物群內或植物群上方，亂流擴散係數 $K_h(z) = K_w(z)$ 。 $K_h(z_{CH})$ 與 $K_w(z_{CH})$ 則分別表示溫度與水蒸氣在植物群高度之亂流擴散係數 (m^2/s)，可分別表示如下(Dyer, 1974)：

$$K_h(z) = \frac{k \cdot U^* \cdot (z-d)}{\phi_h(\Gamma)} \text{ for } z \geq z_{CH} \dots\dots\dots(44)$$

$$K_w(z) = \frac{k \cdot U^* \cdot (z-d)}{\phi_w(\Gamma)} \text{ for } z \geq z_{CH} \dots\dots\dots(45)$$

(3) 地面交界處 ($z = 0$)

空氣與地面交界處，可感熱流之計算方式與植物群內相同，蒸發潛熱流之計算則須視面條件而定。若有蓄水則用 Penman 公式計算，若無蓄水則依下式計算：

$$LE_{soil} = \rho \cdot L_t(z_0) \cdot \left[\frac{h_{soil} \cdot e^*(T_G) - Q_A(z_1)}{r_{soil} + rd(z_1)} \right] \dots\dots\dots(46)$$

式中 h_{soil} 為土壤孔隙中之相對濕度(mb/m)； r_{soil} 則是土壤表面之蒸發阻抗(s/m)。 h_{soil} 乃是土壤孔隙負壓之函數，可利用下式求得(Sellers et al., 1996)：

$$h_{soil} = \exp\left(\frac{\psi_s \cdot g}{RT_G}\right) \dots\dots\dots(47)$$

式中 R 為氣體常數($Jkg^{-1}K^{-1}$)， ψ_s 則可利用地表土壤之含水量 θ_G 求得，如下式所示(van Genuchten, 1980)：

$$\psi_s = \frac{-1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_G - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(48)$$

式中 θ_s 與 θ_r 分別為近地表土壤之飽和含水量及田間含水量(cm^3/cm^3)，而 α 、 n 及 m 均為土壤之特性參數。 r_{soil} 可由土壤含水量求得，經驗公式如下(Sellers et al., 1996)：

$$r_{soil} = \exp(8.206 - 4.255 \cdot \theta_G) \dots\dots\dots(49)$$

4. 植物群內之能量平衡

定態模式中植物群所釋出之可感熱及蒸散潛熱與植物所吸收之輻射能達到平衡，可表示為：

$$R_N(z) = F \cdot [SH(z) + LE(z)] \dots\dots\dots(50)$$

式中 $R_N(z)$ 可由式(8)求得。利用式(29)、式(30)與式(32)、(33)，可求得葉面溫度分布函數 $T_L(z)$ ：

$$T_L(z) = T_A(z) + \frac{rb(z)}{\rho \cdot c_p} \cdot R_N(z) - \frac{L_t(z) \cdot rb(z) \cdot [e^*(T_L(z)) - Q_A(z)]}{c_p \cdot [2rb(z) + rs(z)]} \dots\dots\dots(51)$$

整個植物群所釋放至空氣中之可感熱流 SH 及潛熱流 LE ，可利用式(29)及式(30)之積分而求得，如下所示：

$$SH = \int_0^{z_{CH}} \frac{\rho \cdot c_p \cdot [T_L(z) - T_A(z)] \cdot LAD(z)}{rb(z)} dz \dots\dots\dots(52)$$

$$LE = \int_0^{z_{CH}} \frac{\rho \cdot L_t(z) \cdot [e^*(T_L(z)) - Q_A(z)] \cdot LAD(z)}{2rb(z) + rs(z)} dz \quad (53)$$

5. 地表之能量平衡

種植植物區若未蓄水，其地表能量平衡關係可以下式表示：

$$(1-r_g) \cdot S_{TG} + L_{NSK} + L_{NL} = LE_S + SH_S + G \quad (54)$$

式中 r_g 為地表之反射率； S_{TG} 為到達地表之太陽短波輻射，可將 $z=0$ 代入式(6)求得； L_{NSK} 天空對地表之淨長波輻射， L_{NL} 為植物對地表之總長波輻射，分別以下列二式求得：

$$L_{NSK} = \sigma(T_{SK}^4 - T_G^4) \quad (55)$$

$$L_{NL} = \sum \sigma(T_L(z)^4 - T_G^4) \cdot LAD(z) \cdot dz \quad (56)$$

SH_S 與 LE_S 分別為地表所釋放之可感熱及蒸發潛熱流， G 為深層土壤熱流，可由地表吸收之淨輻射量減去釋放之可感熱流及蒸發潛熱求得。地表溫度 T_G 在定態時可由下式求得 (Deardorff, 1978)：

$$T_G = T_D + c_1 \frac{G}{\rho_s c_s d_1} \frac{\tau}{c_2} \quad (57)$$

式中 ρ_s 為土壤密度， c_s 為土壤比熱， T_D 為深層土溫， τ 為深層土溫影響時間，可由實測資料檢定求得。 c_1 、 c_2 為經驗常數， d_1 為受外界溫度影響之土壤層厚度，可以下式計算：

$$d_1 = (\kappa_s \cdot \tau_1)^{1/2} \quad (58)$$

式中 κ_s 為土壤熱擴散係數， τ_1 為一日長度(86400 秒)。深層土溫 T_D 計算如下：

$$T_D = AVGT_D + AMP_{T_D} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_1} T_{24} - \pi\right) \quad (59)$$

式中 $AVGT_D$ 為平均深層土溫， AMP_{T_D} 為平均土溫變化幅度， T_{24} 為當時時間(24 小時制，以秒計)。

蓄水時澆水層淨輻射量吸收 R_{N_w} 如下所示：

$$R_{N_w} = S_{TG} + L_{NSK} + L_{NL} + \sigma(T_L^4 \cdot V \cdot a_L - 2 \cdot T_W^4 + T_G^4) \quad (60)$$

式中 σ 為波茲曼常數； T_L 為葉面溫度； V 為植物覆蓋面積比例； a_L 為葉面對太陽輻射吸收率； T_W

為水溫； T_G 為地表溫度。有澆水層時地表短波輻射 S_{TG} 因為水田中的水非常泥濘，視為全部吸收而不反射。澆水層熱平衡關係式如下，熱流傳遞示意圖如圖 3 所示：

$$WH = R_{N_w} - SH_S - LE_S \quad (61)$$

式中 WH 為澆水與地表間之熱流。可感熱流 SH_S 可以公式(66)計算；蒸發潛熱流 LE_S 可依表面蓄水及不蓄水，分別以 Penman 公式及式(67)計算。定態下澆水層水溫之計算如同地面溫度之計算，採用下式：

$$T_W = T_G + c_1 \frac{WH}{\rho_w c_w D_W} \frac{\tau}{c_2} \quad (62)$$

式中 ρ_w 為水密度， c_w 為水比熱， D_W 為澆水深。澆水層下之地表熱平衡關係式如下：

$$G = WH + R_{N_G} \quad (63)$$

式中 R_{N_G} 為水面下地表吸收之輻射量，Kim et al. (2001)僅考慮來自於水面之長波輻射，如下式所示：

$$R_{N_G} = \sigma(T_W^4 - T_G^4) \quad (64)$$

2.2.2 未種植植物區

未種植植物區不蓄水時地表能量平衡關係可以下式表示：

$$(1-r_g) \cdot S_{TG} + L_{NG} = LE_S + SH_S + G \quad (65)$$

地表之可感熱流 SH_S 及蒸發潛熱 LE_S ，可以下式表示：

$$SH_S = \frac{\rho \cdot c_p \cdot [T_G - T_A(z_1)]}{rd} \quad (66)$$

$$LE_S = \frac{\rho \cdot L_t(T_G) \cdot [h_{soil} \cdot e^*(T_G) - Q_A(z_{RH})]}{R_{soil} + rd} \quad (67)$$

有澆水層時淨輻射吸收量 R_{N_w} 如下：

$$R_{N_w} = S_{TG} + L_{NSK} + \sigma(T_G^4 + T_W^4) \quad (68)$$

式中 z_{RH} 為地表邊界層影響高度； rd 為阻抗係數，可利用亂流擴散係數求得，如下所示：

$$rd = \int_{z_0}^{z_{RH}} \frac{1}{K_h(z)} dz \quad (69)$$

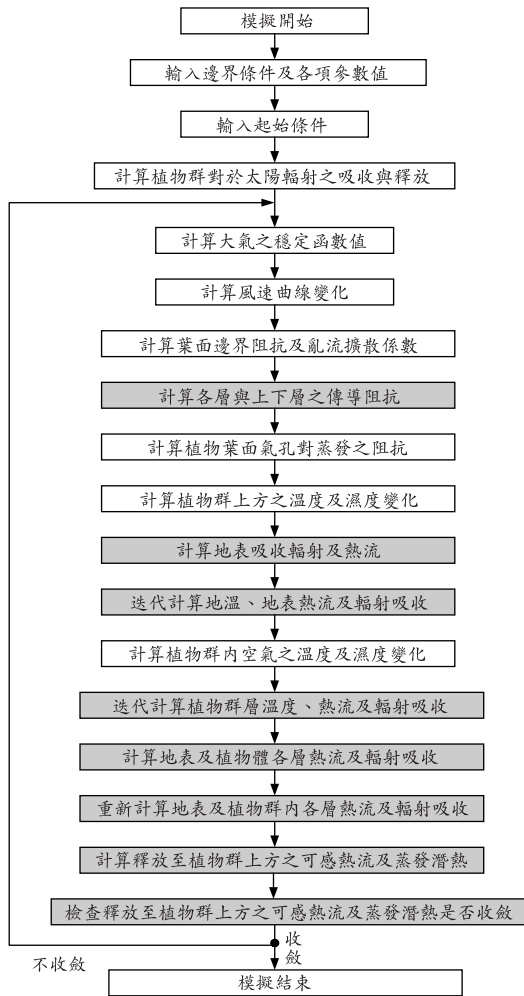


圖 4 種植植物區模擬流程圖

式中 z_0 為地表粗糙高度(m)。地表潛熱流之計算可分為有澆水及無澆水兩種情況，有澆水之蒸發潛熱流 LE_{water} 可利用 Penman 公式計算，而無澆水之潛熱流 LE_{soil} 則以(46)式計算。

2.3 模式計算流程

本研究所發展之水田微氣候模式為定態多層(Steady-state multi-layered)之一維模式，在植物群上方採用擴散原理探討植物與周遭環境之能量交換，植物群內則採用 SiB2 之阻抗原理計算植物體與環境之能量交換。模擬之條件包括種植植物與未種植植物兩種情況，其計算流程分別如圖 4、圖 5 所示，圖中灰階底色之框格為本研究

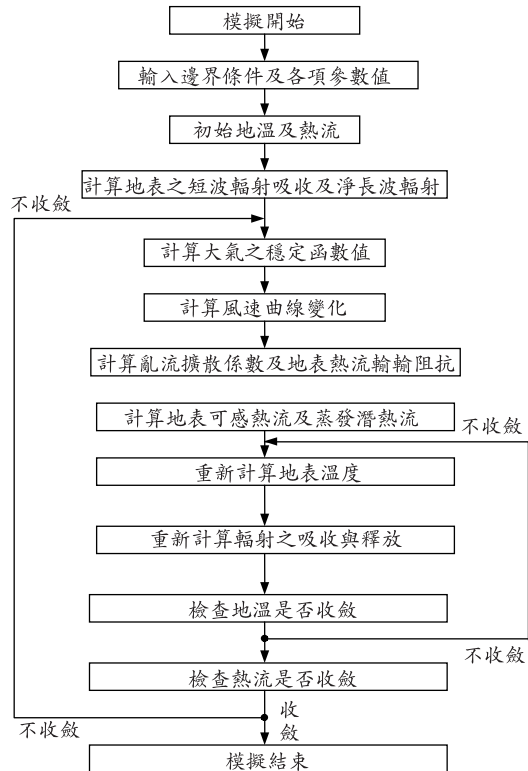


圖 5 未種植植物區模擬流程圖

改良模式修改之部分。

三、田區微氣候資料實測

本研究針對雲林水利會溝壩工作站管理之水稻田區進行現地資料蒐集，連續量測二個月(92年10月及11月)之日輻射量、風速風向、氣溫分布、葉溫分布、水溫及土壤溫度等，資料每小時平均值記錄一次。本研究以實測之日輻射、風速及所量得之上下層邊界溫、濕度做為邊界條件進行數值模擬，並與實測之溫、濕度進行比較驗證。

3.1 研究區域

量測地點位於雲林農田水利會所屬溝壩工作站所轄之水稻田區，位於連接斗六及斗南之一丁省道旁，研究區域如圖 6 所示。試驗設備架設地點周遭除田間連接道路之外，均為大區域之水稻田，地表植栽可視為均勻分佈。

表 1 微氣候量測儀器設備

儀器	數量	備註(廠牌型號)
風速風向計	1 組	R.M. Young 03001
溫濕度感測器	4 組	HTS-801
葉面溫度感測器	3 支	
土溫感測器	2 支	
水溫感測器	1 支	
資料記錄器	1 組	CR23X
記錄器擴充板	1 個	AM-32/16
3 米固定氣象架	1 組	不銹鋼及鋁材支架
防潮箱	1 個	
日輻射計	1 個	Eppley8-48



圖 6 研究區域位置圖(溝壩工作站)

3.2 儀器設備

量測所使用之儀器設備如表 1 所示，進行風速、風向、日輻射、氣溫、相對濕度、葉溫、水溫及土溫量測。微氣候量測系統照片如圖 7 所示，儀器設備架設配置如圖 8 所示。

3.3 實測資料

(1) 日輻射量

日輻射量如圖 9 所示，由圖中可看出日輻射量由每日 6 時開始增加，尖峰時間大都發生在每日 12 時，並於 18 時降至最低。其間可能因下雨或雲層遮蔽造成輻射接收量下降，如 10 月 23 日 12 時之記錄，其餘大致維持正常狀態。

(2) 風速及風向

圖 10 為 10 月 10 日之風速風向關係圖。風向以 0 度表示北方。由圖中可看出一日之中風向大致為北風，其次為西風。圖 11 顯示每日風速

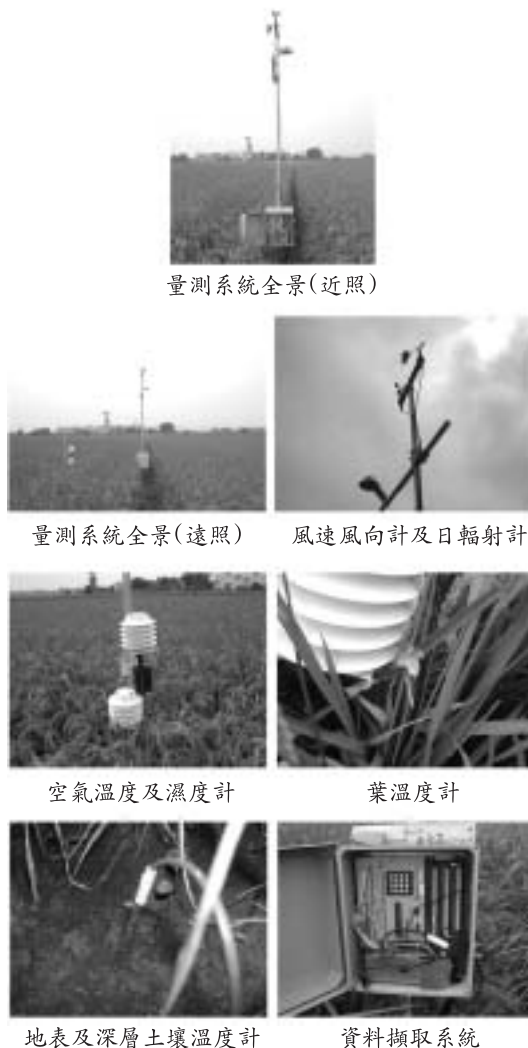


圖 7 微氣候量測系統

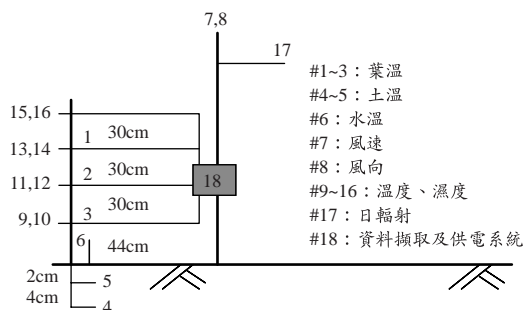


圖 8 儀器設備配置圖

之變化趨勢，大致以下午 2 時至 4 時風速為最大，這段期間也正是地表溫度升高的時間，可見

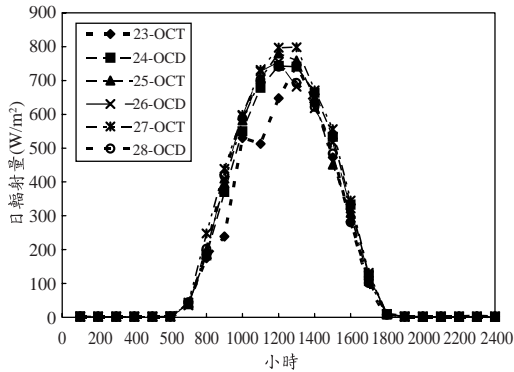


圖 9 日輻射量時變圖

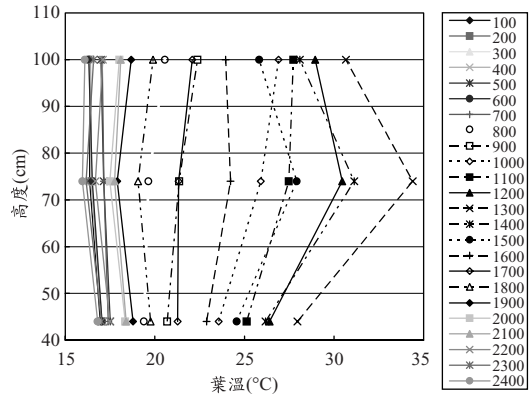


圖 12 葉面溫度分布圖 (10月23日)

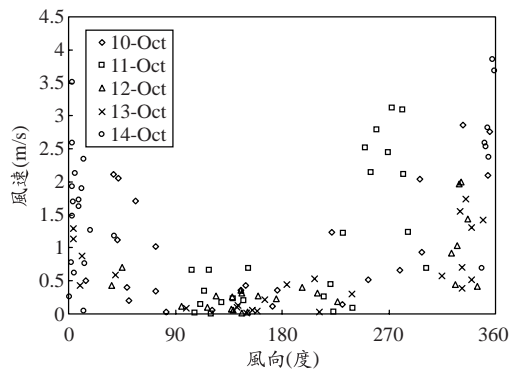


圖 10 風速風向圖

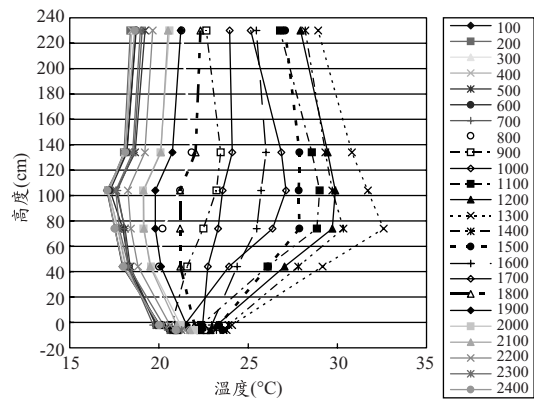


圖 13 氣溫及土溫分布圖 (10月23日)

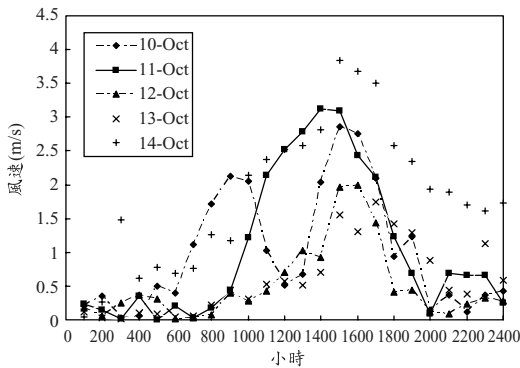


圖 11 每日風速時變圖

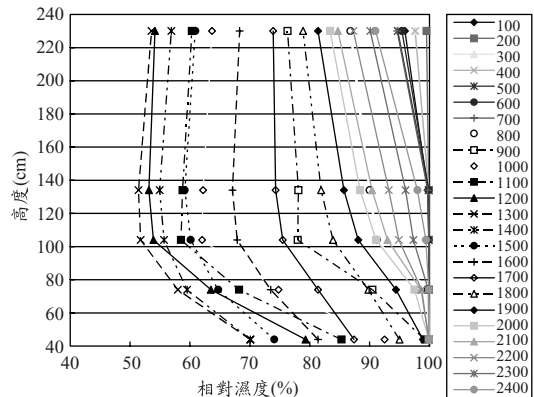


圖 14 相對濕度分布圖 (10月23日)

得地面增溫造成之對流現象為本區空氣流動之主因。

(3) 溫度及濕度

量測溫度包括土溫、水溫、葉溫及氣溫。從圖 12 葉面溫度變化中可以看出，每日 8 時至 16 時葉面溫度較高，而至 12 時前後溫度剖面才有

較顯著之變化。圖 13 所示氣溫剖面圖亦有相同之趨勢，而在地溫的部分變化較小，符合一般對氣溫及地溫觀察變化的趨勢。圖 14 所示為相對濕度剖面變化圖，中午 12 時相對濕度降至最低。

表二 水田微氣候模式參數表

參數名稱	參數符號	參數值	單位	參考來源
環境參數				
空氣比熱	C_p	1000.0	$J\ Kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	(Wu and Liu, 2000)
大氣壓力	P_{atm}	1013.25	mb	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
空氣密度	ρ	1.205	Kgm^{-3}	
水氣密度	ρ_w	1000	Kgm^{-3}	
太陽短波輻射消減係數	α_L	1.0	無因次	(Ross, 1975)
風速消減係數	a_w	3.0	無因次	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
亂流擴散消減係數	a_k	2.0	無因次	(Wu and Liu, 2000)
von Karman 常數	κ	0.41	無因次	(Dyer, 1974)
Stefan-Boltzman 常數	σ	5.67×10^{-8}	$Wm^{-2}k^{-2}$	(Wu and Liu, 2000)
理想氣體常數	R	286.9	$J\ Kg^{-1}K^{-1}$	(Sellers et al., 1996)
濕度常數	r	0.66	$mb^\circ C^{-1}$	(王如意, 應用水文學)
土壤飽和含水量	θ_s	0.49	cm^3/cm^3	(農委會, 1996)
土壤特性參數	α	0.38	cm^{-1}	(van Genuchten, 1980)
土壤特性參數	n	2	無因次	(van Genuchten, 1980)
土壤特性參數	m	0.5	無因次	(van Genuchten, 1980)
土壤密度	ρ_s	2050	Kg/m^3	(Incropera, 2002)
土壤比熱	c_s	1840	$J/kg^\circ C$	(Incropera, 2002)
土壤熱擴散係數	κ_s	1.5×10^{-7}	m^2/s	(Deardorff, 1978)
土地利用參數				
水稻田				
水稻高度	z_{CH}	1	m	實測資料
水稻田影響高度	z_{RH}	2	m	水稻高度兩倍 (Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
平均葉寬	D_L	0.016	m	實測資料
葉面邊界阻力常數	C_1	60.0	$s^{-1/2}m^{-1}$	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
葉面對太陽輻射之吸收率	a_L	0.86	無因次	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
植物與空氣濕度差之最小值	Q_{crit}	0.004	kg/kg	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
地表對太陽輻射之反射率	r_g	0.2	無因次	0.18~0.25 (Arya, 1988)
葉面傾斜輻射量校正參數	F	0.45	無因次	(Kondo and Watanabe, 1992)
葉面積指數	$CLAI$	2.9	cm^2/cm^2	(葉金川, 1984)

四、模式驗證與比較

4.1 模擬條件與模式參數

本研究以雲林溝壩工作站試驗田區之實測資料進行模式驗證。模擬時段為 92 年 10 月 23 日上午十點到下午二點。模式各項參數如表 2 所示，模擬邊界條件如表 3 所示。因當日田間未蓄水，故地表以飽和濕潤土壤條件處理。平均深層土溫採用 10 月 23 日當日之深層土溫平均值，最大平均深層土溫則採用 10 月 24 日至 28 日每日

最大深層土溫之平均值。耕作稻種為台梗 16 號，葉面積指數 $CLAI$ 採用品種類似之台農 67 號完熟期之值(葉金川, 1984)，並採用玉米之葉面積密度垂直分布函數(Brown and Covey, 1966)。

4.2 模擬結果驗證

模擬與實測之氣溫分布如圖 15 至 19 所示；模擬與實測之葉溫分布如圖 20 至 24 所示；模擬與實測之相對濕度分布如圖 25 至 29 所示，表 4 為各時間之熱流比較表。

表三 水田微氣候模擬邊界條件

時間	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
太陽短波輻射(W/m ²)	530	512.6	647.8	745	635.4
影響高度氣溫(°C)	25.14	26.79	27.94	28.92	28.2
影響高度相對濕度(%)	63.69	60.31	54.15	53.57	56.89
影響高度風速(m/s)	1.572	2.143	2.863	2.926	5.774
平均深層土溫(°C)	21.79	21.79	21.79	21.79	21.79
平均最大深層土溫(°C)	23.13	23.13	23.13	23.13	23.13

表四 模擬熱流比較表

項目	10:00		11:00		12:00		13:00		14:00	
	熱流 (W/m ²)	百分比 (%)	熱流 (W/m ²)	百分比 (%)	熱流 (W/m ²)	百分比 (%)	熱流 (W/m ²)	百分比 (%)	熱流 (W/m ²)	百分比 (%)
太陽短波 輻射	530	-	512.6	-	647.8	-	745	-	635.4	-
短波 輻射 吸收	216.9	77.9	209.8	72.4	265.2	73.7	304.9	74.3	260.1	74.5
短波 輻射 反射	313.1	-	302.8	-	382.6	-	440.1	-	375.3	-
淨長波 輻射吸收	61.6	22.1	81.4	27.6	94.8	26.3	105.4	25.7	89.1	25.5
總吸收 輻射量	278.5	100	291.2	100	360	100	410.3	100	349.2	100
深層熱流	381.3	160.6	433.3	173.5	608.4	198	609.3	173.9	655.5	220.4
可感熱流	-228.2	-96.1	-274.3	-109.8	-410.1	-133.5	-374.5	-106.9	-471.2	-158.4
蒸發潛熱	84.3	35.5	90.8	36.3	108.9	35.5	115.6	33	113.1	38
總釋放 熱量	237.4	100	249.8	100	307.2	100	350.4	100	297.4	100

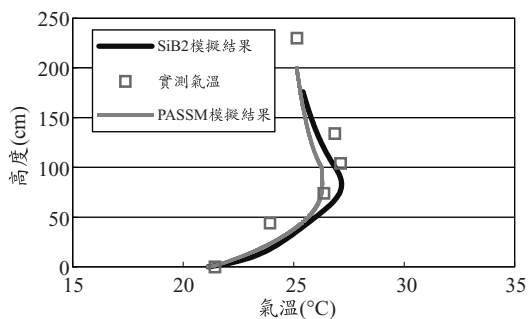


圖 15 十月二十三日 10:00 氣溫分布比較

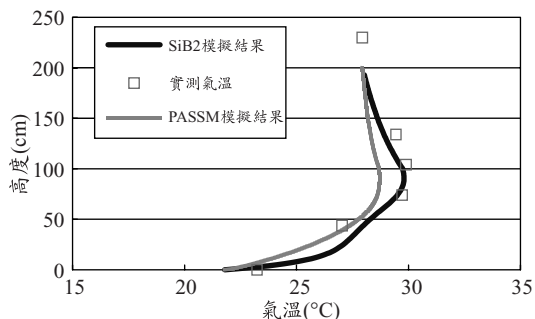


圖 17 十月二十三日 12:00 氣溫分布比較

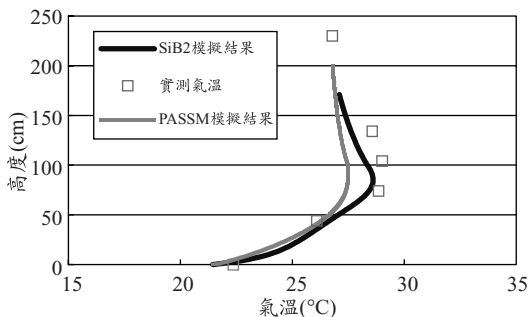


圖 16 十月二十三日 11:00 氣溫分布比較

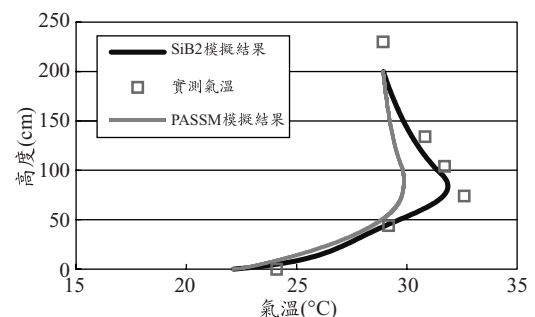


圖 18 十月二十三日 13:00 氣溫分布比較

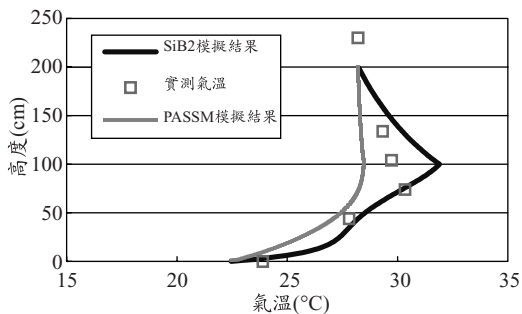


圖 19 十月二十三日 14 : 00 氣溫分布比較

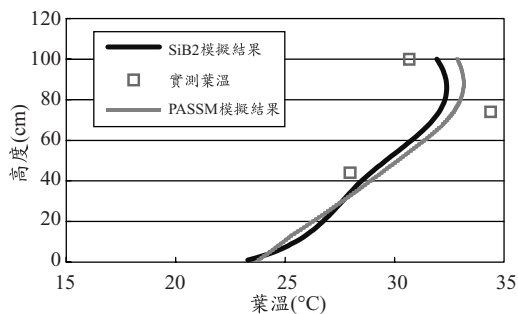


圖 23 十月二十三日 13 : 00 葉溫分布比較

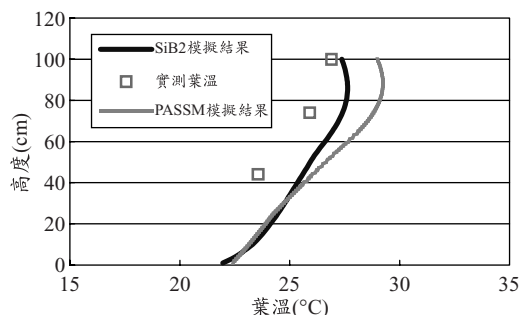


圖 20 十月二十三日 10 : 00 葉溫分布比較

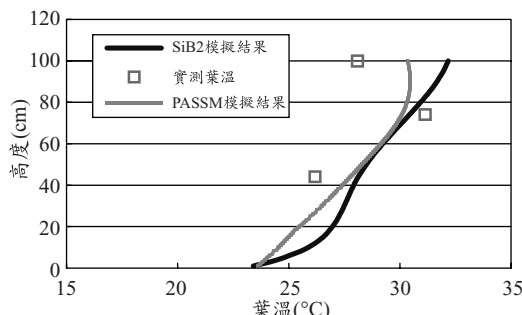


圖 24 十月二十三日 14 : 00 葉溫分布比較

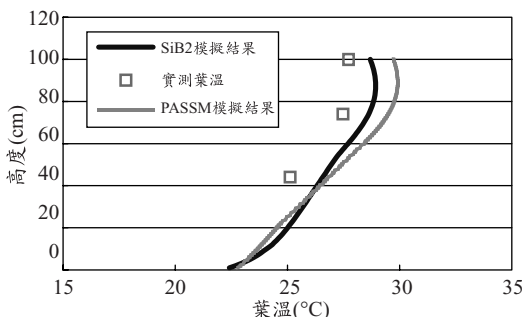


圖 21 十月二十三日 11 : 00 葉溫分布比較

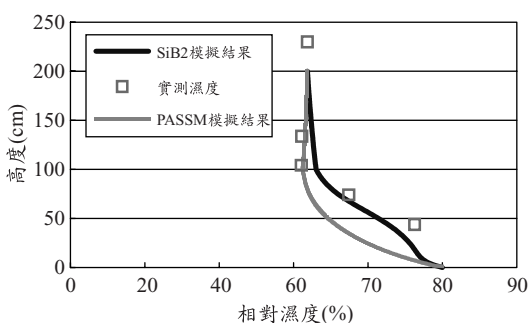


圖 25 十月二十三日 10 : 00 相對濕度分布比較

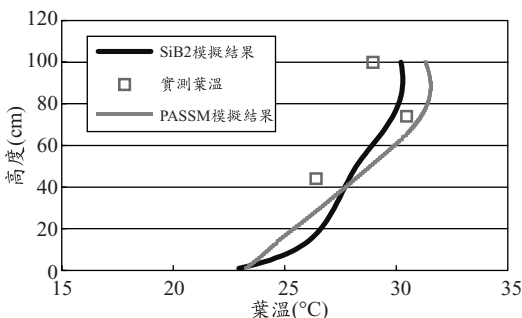


圖 22 十月二十三日 12 : 00 葉溫分布比較

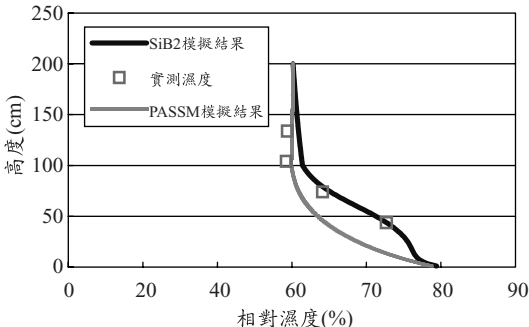


圖 26 十月二十三日 11 : 00 相對濕度分布比較

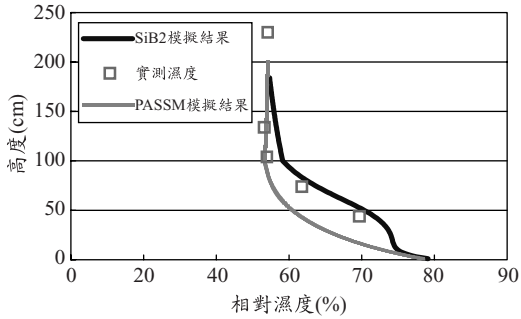


圖 27 十月二十三日 12:00 相對濕度分布比較

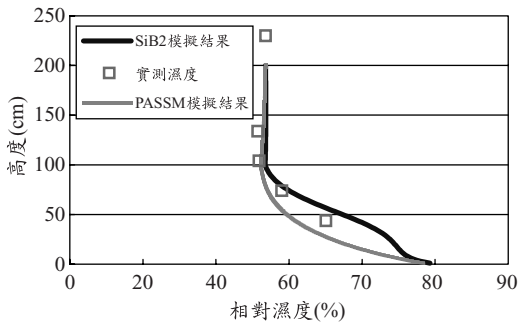


圖 28 十月二十三日 13:00 相對濕度分布比較

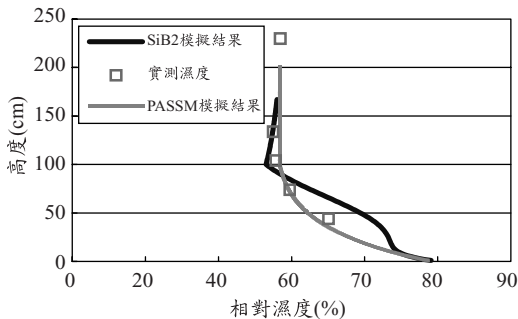


圖 29 十月二十三日 14:00 相對濕度分布比較

模擬結果顯示各時間之氣溫(圖 15~19)、葉溫(圖 20~24)及相對濕度(圖 25~29)分布皆能精確反映實測數據變化之趨勢。表 4 數據顯示，因地表上方氣溫較地表溫度為高，故可感熱流均為負值，表示可感熱流由空氣進入地表，尤以中午 12:00 以後更為旺盛，蒸發潛熱則穩定釋出，均佔 30% 上下，深層熱流模擬結果亦顯示有大量之熱流進入深層土壤。而由輻射吸收量來看，各時間之短波輻射吸收均佔 70% 以上；長波輻射吸收所佔比例較小是因為有部分植物溫度比氣溫及

地溫高，故長波輻射由植物釋放而非吸收。總體而言，植物與地表之總釋放熱量與總吸收輻射量相當一致，誤差均在 15% 以內，顯示本模式所採用之熱守恆機制具有合理之精確度。

4.3 模式比較

模擬結果顯示本研究改良之 SiB2 模式較先前之 PASSM 模式更能精確反映植物群內氣溫變化之趨勢；葉溫方面，SiB2 模式模擬結果較接近實測值，PASSM 模式模擬結果偏高；植物群上方之氣溫方面，SiB2 模式大都能反映垂直變化趨勢，而 PASSM 模式則有低估之現象；相對濕度方面，PASSM 模式在 12:00 之前模擬值偏低，12:00 之後模擬結果與實測值吻合，而 SiB2 模式之模擬結果大致都能與實測值吻合。總體而言，SiB2 模式有較佳之模擬結果。本研究模式改良之處主要在於採用以電流概念模擬植物群內可感熱流及蒸發潛熱流之傳輸，將湛水層及深層土壤之熱流機制納入考量，採用較合理之葉面積分布型態及葉面傾斜校正係數計算植物所吸收之輻射量，另外在地溫計算方面，採用 Deardorff (1978) 提出之模式，以深層土溫校正地表溫度，而深層土溫則以實測資料搭配週期函數模擬溫度變化。由於本研究改良模式在植物群內及地熱處理部分均做了相當幅度之修改，故能獲致較佳之模擬結果。

五、水田調節微氣候功能評估

5.1 模擬方案說明

為評估水田對於區域性微氣候之影響，本研究模擬下列四種土地利用方案：

- 方案一：水田種植水稻(有湛水)
- 方案二：水田休耕蓄水
- 方案三：水田休耕不蓄水(土壤濕潤)
- 方案四：水田休耕不蓄水(土壤乾燥)

本研究為進一步比較水田在夏季與冬季時所具有之調節微氣候功能，分別採用夏季與冬季兩種氣候條件進行模擬，夏季以七月份平均氣候條件模擬，太陽輻射為 841.07W/m^2 、相對濕度 80%、風速 2.0m/s 、平均氣溫 27.7°C ，深層平均土溫及

表五 各模擬方案土地利用參數

參數名稱	參數符號	參數值	單位	參考來源
方案一：水田種植水稻(有灌水)				
水稻高度	z_{CH}	1	m	實測資料
水稻田影響高度	z_{RH}	2	m	水稻高度兩倍(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
平均葉寬	D_L	0.016	m	實測資料
葉面邊界阻力常數	C_1	60.0	$s^{-1}m^{-1}$	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
葉面對太陽輻射之吸收率	α_L	0.86	無因次	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
植物與空氣濕度差之最小值	Q_{crit}	0.004	kg/kg	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
地表對太陽輻射之反射率	r_g	0	無因次	(Kim, 2001)
葉面積指數	$CLAI$	2.9	cm^2/cm^2	(葉金川, 1984)
方案二：水田休耕蓄水				
水田影響高度	z_{CH}	1	m	實測資料
水田土壤糙度	z_{G0}	0.0025	m	(Guyot, 1996)
土壤含水量	θ_G	0.489	m^3/m^3	(農委會, 1996)
地表對太陽輻射之反射率	r_g	0	無因次	(Kim, 2001)
土壤熱擴散係數	κ_s	1.2×10^{-6}	m^2s^{-1}	(Deardorff, 1978)
土壤密度及比熱乘積	$\rho_s c_s$	2343096	$Jm^{-3}C^{-1}$	(Deardorff, 1978)
水密度	ρ_w	1000	Kg/m^3	(Incropera, 2002)
水比熱	c_w	4180	$J/Kg^{\circ}C$	(Incropera, 2002)
方案三：水田休耕不蓄水(土壤濕潤)				
水田影響高度	z_{CH}	1	m	實測資料
水田土壤糙度	z_{G0}	0.01	m	(Guyot, 1996)
土壤含水量	θ_G	0.489	m^3/m^3	(農委會, 1996)
地表對太陽輻射之反射率	r_g	0.15	無因次	0.1~0.2 (Arya, 1988)
土壤熱擴散係數	κ_s	1.2×10^{-6}	m^2s^{-1}	(Deardorff, 1978)
土壤密度及比熱乘積	$\rho_s c_s$	2343096	$Jm^{-3}C^{-1}$	(Deardorff, 1978)
水密度	ρ_w	1000	Kg/m^3	(Incropera, 2002)
水比熱	c_w	4180	$J/Kg^{\circ}C$	(Incropera, 2002)
方案四：水田休耕不蓄水(土壤乾燥)				
水田影響高度	z_{CH}	1	m	實測資料
水田土壤糙度	z_{G0}	0.01	m	(Guyot, 1996)
土壤含水量	θ_G	0.21	m^3/m^3	(農委會, 1996)
地表對太陽輻射之反射率	r_g	0.3	無因次	0.2~0.4 (Arya, 1988)
土壤熱擴散係數	κ_s	2×10^{-7}	m^2s^{-1}	(Deardorff, 1978)
土壤密度及比熱乘積	$\rho_s c_s$	1255230	$Jm^{-3}C^{-1}$	(Deardorff, 1978)

最大土溫分別採用 30°C 及 31°C；冬季為模擬寒流來襲時之乾冷氣候，故太陽輻射及相對濕度均較夏季為低，風速則因受大陸冷高壓影響而較夏季為高，採用條件如下：太陽輻射 550W/m²、相對濕度 60%、風速 2.5m/s、上空氣溫 15°C，深層平均土溫及最大土溫分別採用 20°C 及 21°C，地

表反應時間經實測資料檢定採用 134 秒，方案一之灌水深度及方案二之蓄水深均採用 5cm。模擬所採用之環境參數如表 2，各模擬方案之土地利用參數如表 5 所示。

5.2 模擬方案比較

表六 各模擬方案熱流比較(夏季)

項目	方案一 水田種植水稻				方案二 水田休耕蓄水				方案三 水田休耕不蓄水 (土壤濕潤)				方案四 水田休耕不蓄水 (土壤乾燥)			
	熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)	
太陽短波 輻射	841.07		-		841.07		-		841.07		-		841.07		-	
短波 輻射 吸收	349.9	491.17	109.3	-	841.07	0	101.7	-	714.87	126.2	102.1	-	588.7	252.3	102.7	-
短波 輻射 反射																
淨長波 輻射吸收	-29.6		-9.3		-13.97		-1.7		-14.47		-2.1		-15.5		-2.7	
總吸收 輻射量	320.3		100		827.1		100		700.4		100		573.2		100	
深層熱流	96.8		36.5		-25.3		-3.1		611.9		87.4		507.5		88.5	
可感熱流	6.6		2.5		177		21.4		44.4		6.3		47.6		8.3	
蒸發潛熱	161.6		61		675.4		81.7		44.2		6.3		18.1		3.2	
總釋放 熱量	265		100		827.1		100		700.5		100		573.2		100	
每公頃 土地消耗蒸 發潛熱功率 (KW)	1,616				6,754				442				181			
等效家用 冷氣機台數	618				2,583				169				69			
一日*節省 冷氣機使用 電力(度)	19,392				81,048				5,304				2,172			
一日*節省 電費(元)	66,864				280,502				18,049				7,196			

*：以一日開機十二小時計算

5.2.1 水田調節夏季微氣候功能評估

由於蒸發潛熱為水分轉變為水蒸氣所消耗之熱量，具有帶走熱量之功效，因此本研究以模擬所得之蒸發潛熱代表水田之冷房效果，並以面積 5 坪之房間所需家用冷氣機功率(2250 kcal/hr)將蒸發潛熱流換算為對等之冷氣機台數所具有之冷房效果。模擬結果顯示每公頃水田休耕蓄水時冷房效果最佳，相當於約 2600 台家用冷氣機之功效；其次是種植水稻時，相當於 620 台家用冷氣機之功效；而水田休耕不蓄水時，土壤濕潤條件相當於 170 台家用冷氣機，土壤乾燥條件相當於 70 台家用冷氣機。若以一日開機十二小時計算，每公頃水田休耕蓄水時可節省電力約

81,000 度，種植水稻時可節省電力約 19,400 度，休耕不蓄水時濕潤土壤可節省電力約 5,300 度，乾燥土壤可節省電力約 2,200 度；以夏日家用表燈電價換算，每公頃水田休耕蓄水可節省電費約 280,000 元，種植水稻可節省電費約 67,000 元，休耕不蓄水之濕潤土壤可節省電費約 18,000 元，乾燥土壤可節省電費約 7,200 元。由模擬結果亦可看出，水田休耕不蓄水情況下，地面所吸收之熱量大多進入地底，待氣溫降低時以可感熱流方式釋出，將會造成區域性氣溫升高。各模擬方案熱流比較如表 6 及圖 30~38 所示，從模擬結果可以看出，種植水稻時植物群內溫度及相對濕度在垂直分布有較大之變化，顯示植物體對於溫

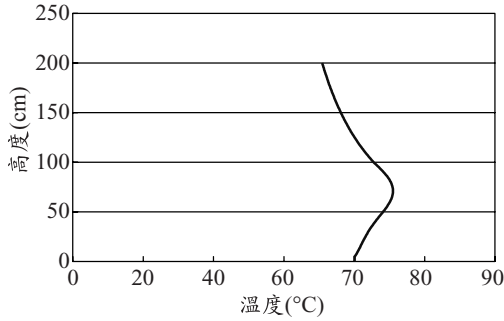


圖 30 夏季種植水稻時溫度分布模擬結果

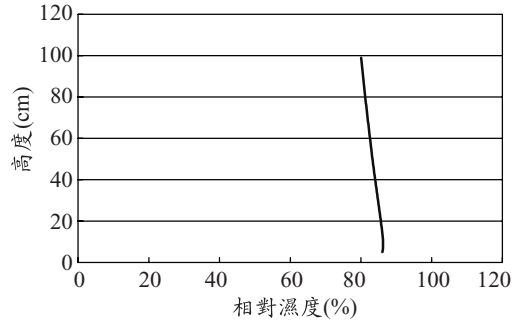


圖 34 夏季休耕蓄水時相對濕度分布模擬結果

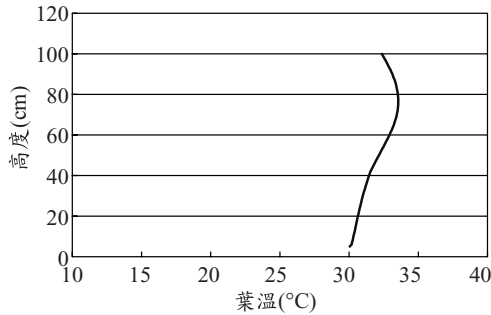


圖 31 夏季種植水稻時葉溫分布模擬結果

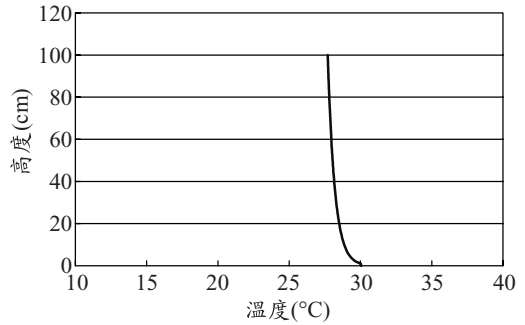


圖 35 夏季休耕不蓄水(濕潤土壤)氣溫分布模擬結果

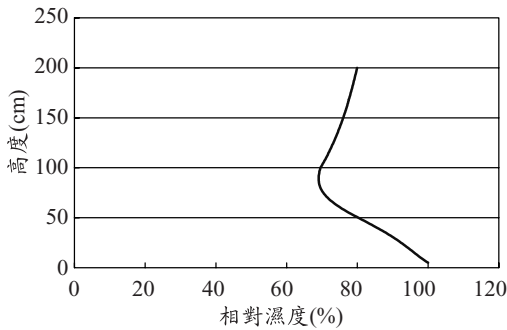


圖 32 夏季種植水稻時相對濕度分布模擬結果

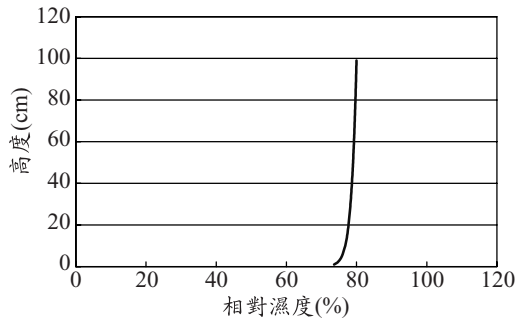


圖 36 夏季休耕不蓄水(濕潤土壤)相對濕度分布模擬結果

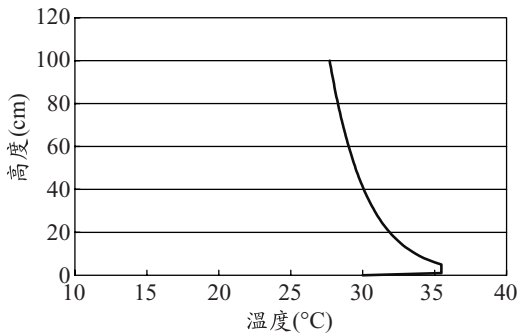


圖 33 夏季休耕蓄水時溫度分布模擬結果

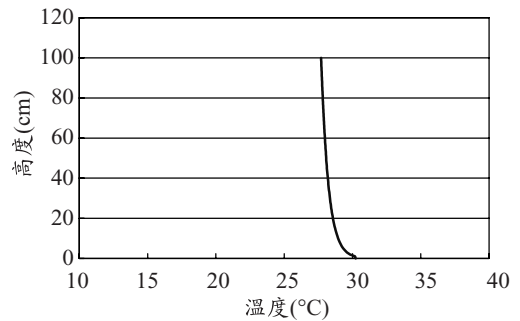


圖 37 夏季休耕不蓄水(乾燥土壤)氣溫分布模擬結果

表七 各模擬方案熱流比較(冬季)

項目	方案一 水田種植水稻				方案二 水田休耕蓄水				方案三 水田休耕不蓄水 (土壤濕潤)				方案四 水田休耕不蓄水 (土壤乾燥)			
	熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)		熱流 (W/m ²)		百分比 (%)	
太陽短波 輻射	550		-		550		-		550		-		550		-	
短波 輻射 吸收	228.8	321.2	136	-	550	0	104.8	-	467.5	82.5	107.8	-	385	165	107.8	-
短波 輻射 反射																
淨長波 輻射吸收	-60.5		-36		-25.1		-4.8		-27.5		-6.3		-27.9		-7.8	
總吸收 輻射量	168.3		100		524.9		100		440		100		357.1		100	
深層熱流	-208		-148.2		-481.6		-91.8		275		62.5		219.3		61.4	
可感熱流	284.3		202.6		601.7		114.6		118.1		26.8		119.8		33.5	
蒸發潛熱	64		45.6		404.8		77.1		46.9		10.7		18		5.1	
總釋放 熱量	140.3		100		524.9		100		440		100		357.1		100	
每公頃 土地消耗蒸 發潛熱功率 (KW)	2,843				6,017				1,181				1,198			
等效家用 電暖爐台數	2,369				5,014				984				998			
一日*節省 電暖爐使用 電力(度)	34,116				72,204				14,172				14,376			
一日*節省 電費(元)	92,999				196,978				38,551				39,108			

*：以一日開機十二小時計算

度及濕度有顯著之影響。一般來說植物群內氣溫較地表溫度及上空氣溫為高，可推斷植物體釋出相當之熱量；水田休耕蓄水時，模擬結果顯示水體具有良好之吸熱效果，其溫度較不蓄水之地表溫度為高；而休耕不蓄水時，無論土壤乾燥或濕潤，地表溫度與上空溫度均無太大差異。

5.2.2 水田調節冬季微氣候功能評估

由於地表及植物所釋放之可感熱具有升高氣溫之效果，本研究以模擬所得之可感熱流做為評估水田調節冬季微氣候功能之依據，並以市面一般 1200W 功率之電暖爐換算每公頃土地所釋出可感熱流對等之電暖爐台數所具有之暖房效果。模擬結果顯示水田休耕蓄水時，每公頃土地所釋出之可感熱流功率相當於約 5,000 台電暖爐

之功效，暖房效果最佳；其次是種植水稻時，相當於約 2,400 台電暖爐之暖房效果；水田休耕不蓄水時，相當於約 1,000 台電暖爐之暖房效果。若以一日開機十二小時計算，每公頃水田休耕蓄水時可節省電力約 72,000 度，種植水稻時可節省電力約 34,000 度，休耕不蓄水時可節省電力約 14,000 度；以非夏日家用表燈電價換算，每公頃水田休耕蓄水可節省電費約 200,000 元，種植水稻時可節省電費約 93,000 元，休耕不蓄水可節省電費約 40,000 元。由模擬結果可知，水田休耕時，在冬季若能用以蓄水可使區域性氣溫升高，具有保暖之效果。各方案模擬結果如表 7 及圖 39~47 所示，模擬結果顯示，種植水稻時垂直方向之溫度及濕度變化較為顯著，尤其在植物

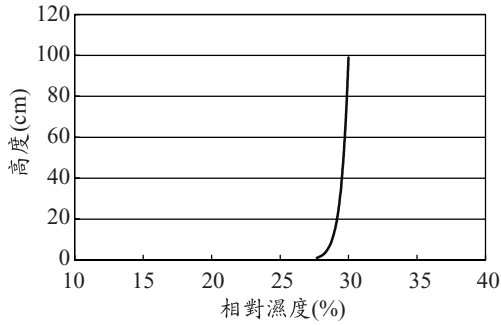


圖 38 夏季休耕不蓄水(乾燥土壤)相對濕度分布模擬結果

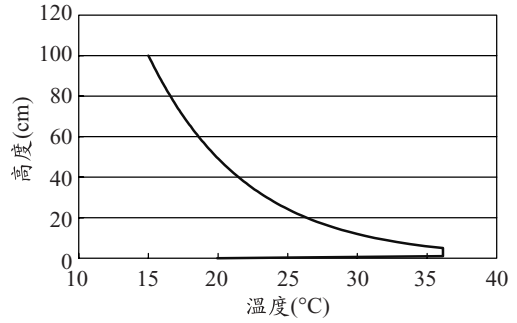


圖 42 冬季休耕蓄水時溫度分布模擬結果

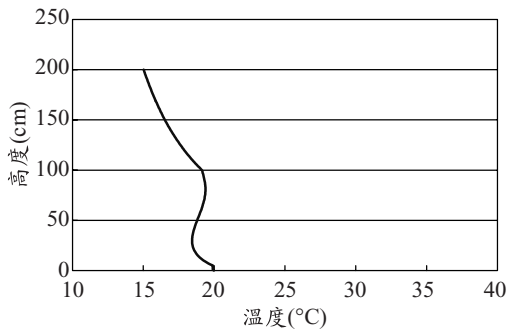


圖 39 冬季種植水稻時溫度分布模擬結果

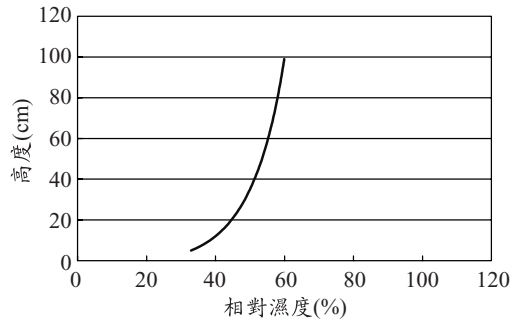


圖 43 冬季休耕蓄水時相對濕度分布模擬結果

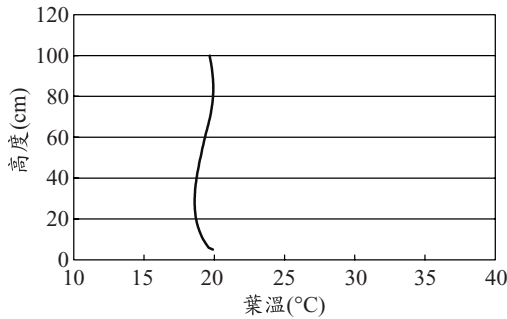


圖 40 冬季種植水稻時葉溫分布模擬結果

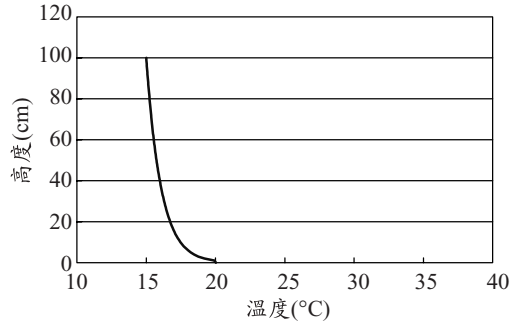


圖 44 冬季休耕不蓄水(濕潤土壤)氣溫分布模擬結果

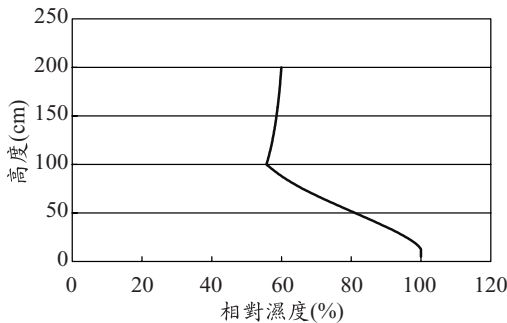


圖 41 冬季種植水稻時相對濕度分布模擬結果

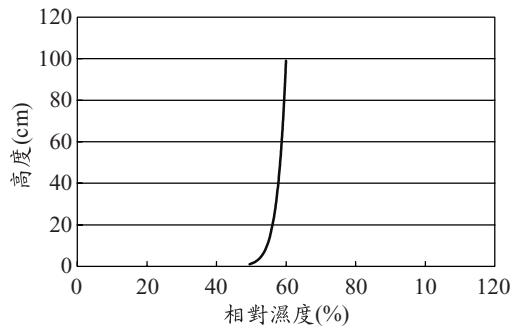


圖 45 冬季休耕不蓄水(濕潤土壤)相對濕度分布模擬結果

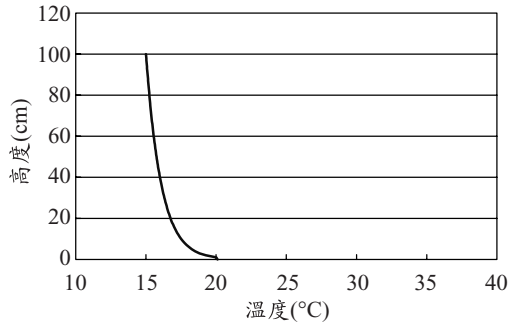


圖 46 冬季休耕不蓄水(乾燥土壤)氣溫分布模擬結果

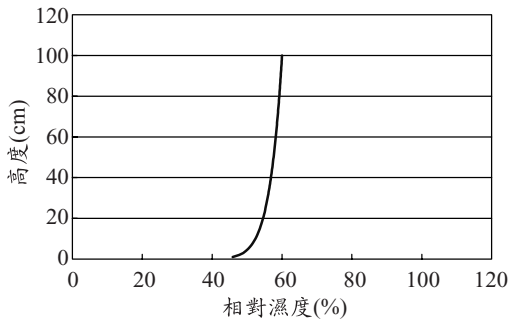


圖 47 冬季休耕不蓄水(乾燥土壤)相對濕度分布模擬結果

群內氣溫明顯較高；水田休耕蓄水時，水體具有良好之吸熱效果，所釋出之可感熱流大幅增加；水田休耕不蓄水時，濕潤與乾燥土壤上方之氣溫分布差異不大，但相對濕度則與土壤濕度有顯著之關聯。

六、結 論

本研究建立水田生態環境微氣候模式，以簡易生物圈 SiB2 模式架構修改先前之 PASSM 模式，並以試驗田區實測之微氣候資料驗證數值模擬結果。比較結果顯示本研究改良之 SiB2 模式由於在植物群內及地熱處理部分均做了相當幅度之修改，故能獲致較佳之模擬結果。本研究並利用改良之 SiB2 模式評估水田區不同土地利用狀況對區域性微氣候之影響，模擬結果顯示水田在夏季具有涼化環境之功效，每公頃水稻田相當於約 620 台家用冷氣機之冷房效果，而水田在冬季則有暖化環境之功效，每公頃水稻田相當於約 2,400 台家用電暖爐之暖房效果。模擬結果亦顯

示水田休耕時若能做為蓄水池使用，則調節區域性微氣候之效果更為顯著，其夏季冷房效果為水稻田之 4 倍，而冬季暖房效果為水稻田之 2 倍。本研究結果可做為擬定水田休耕策略之參考及依據。

謝 誌

本研究承蒙行政院農委會補助研究經費(計畫編號：92 農發-8.2-林-01(14))得以順利進行，特此謹致謝忱。

參考文獻

1. 吳富春、沈易徵，「水田微氣候模式之建立與應用」，農業工程學報，48(1)，pp.10-23，2002 年。
2. 吳富春、楊國鑫，「水田土地利用型態對區域性微氣候之影響評估」，農業工程學報，49(2)，pp.53-68，2003 年。
3. 葉金川，「水稻葉面積指數與產量之關係」，中華農業研究，33(2)，pp.109-116，1984 年。
4. 行政院農委會，「水稻田對地下水補注功能評估分級」，水稻田生態環境保護規劃及示範成果報告，1996 年。
5. Arya, S.Pal., *Introduction to Micrometeorology*, International Geophysics Series, Vol. 79, 2001.
6. Brown, K.W. and Covey, W., "The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield", *Agric. Meteorol.*, 3, pp.73-96, 1966.
7. Dyer, A.J., "A review of flux-profile relationships", *Boundary-Layer Meteorol.*, 7, pp, 363-372, 1974.
8. Deardorff, J.W., "Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation", *J. Geophys. Res.*, 83(4), pp, 1889-1903, 1978.
9. Incropera, Frank P. et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2002.
10. Gates, D.M., *Biophysical Ecology*. Springer, New York, pp.611, 1980.

11. Guyot, G'erald, *Physics of the Environment and Climate*, John Wiley & Sons, 1996.
12. Kim, W., Arai, T., Kanae, S., Oki, T. & Musiake, K., "Application of the simple biosphere model (SiB2) to paddy field for a period of growing season in GAME-Tropics", *J. Met. Soc. Japan*, 79, 387-400, 2001.
13. Kondo, J. and Watanabe, T., "Studies on the Bulk Transfer Coefficients over a Vegetated Surface with a Multilayer Energy Budget Model", *J. Atmos. Sci.*, 49, 2183-2199, 1992.
14. Mehlenbacher, L.A. and Whitfield, D.W.A., "Modeling thermal eddy diffusivity at canopy height", *Boundary-Layer Meteorol.*, 12, pp. 153-170, 1977.
15. Ross, J., "Relative transfer in plant communities." In: Monteith (Ed), *Vegetation and the Atmosphere I*, Academic Press, New York, pp. 13-55, 1975.
16. Sellers, P.J. et al., "A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model Formulation", *Journal of Climate*, 9, pp. 676-705, 1996.
17. Waggoner, P.E. et al., "Simulatuon of the Temperature, Humidity and Evaporation Profiles in a Leaf Canopy", *Journal of Applied Meteorology*, 7, pp. 400-409, 1968.
18. Wu, J., "Modeling the energy exchange processes between plant communities and environment", *Eco. Model.*, 51, pp. 233-250, 1990.
19. Wu, J., Liu, Y., "Effects of leaf area profiles and canopy stratification on simulated energy fluxes: the problem of vertical spatial scale", *Eco. Model.*, 134, pp. 283-297, 2000.

收稿日期：民國 93 年 1 月 6 日

修正日期：民國 93 年 3 月 3 日

接受日期：民國 93 年 3 月 8 日