

# 水田土地利用型態對區域性微氣候之影響評估

## Impact Assessment of Paddy-Field Land Use on Regional 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

楊國鑫  
Kuo-Hsin Yang

### 摘 要

本研究擴充過去發展之垂直一維微氣候模式，建立區域性二維微氣候模式，可同時考慮垂直方向熱擴散與水平方向熱對流之平衡，以探討田區之不同土地利用型態對區域性微氣候之影響。本研究發展之區域性二維微氣候模式乃利用熱交換區之概念計算兩種不同土地利用區域間之熱交流，並可針對兩種以上不同之土地利用區域進行區域性三維微氣候模擬。本研究利用二維微氣候模式針對雲林荊桐試驗田區之不同土地利用策略進行二維與三維微氣候模擬，模擬結果顯示田區之土地利用型態對鄰近社區上方之氣溫分布有相當大之影響。迎風面之土地利用對社區微氣候有直接顯著之影響，而處於非迎風面之土地利用對社區微氣候之影響較為間接。迎風面之土地利用地表含水量愈高、面積愈大，對鄰近社區上方之降溫效果愈大，反之迎風面之土地利用地表含水量愈低、面積愈小，則對鄰近社區上方之降溫效果愈小。若迎風面之土地利用為水稻田時，鄰近社區上方 0.5~1 公尺以下部分氣溫偏高，但對人體感受之氣溫(1~2 公尺部分)則具有降溫之效果。

**關鍵詞：**水田，土地利用，區域性微氣候模式，影響評估。

### ABSTRACT

In this study we extend the previous vertical 1-D microclimate model to develop a regional 2-D model that incorporates the heat balance between vertical heat diffusion and horizontal heat convection. The proposed model is used to investigate the impact of paddy-field land use on regional microclimate. The concept of heat exchange region is employed in the 2-D model for calculating the heat transfer between two areas with different types of land use. The model can be also used in the 3-D microclimate simulation for areas

with more than two different types of land uses. The proposed model is further used in the 2-D and 3-D simulations of different land-use strategies for the Chi-Tung experimental paddy-field area in Yun-Lin County. The simulation results reveal that the effect of paddy-field land-use pattern on the microclimate of neighboring community is significant. The upwind land use has a direct effect on the microclimate of neighboring community, whereas the non-upwind land use only has a minor effect on the community microclimate. The higher the ground-surface moisture content and the larger the area in the upwind land use, the greater the cooling effect on the community air temperature. If the upwind land use remains as a paddy field, the air temperature approximately 0.5 to 1 m above the community ground surface becomes higher, but the human-body sensed temperature (1 to 2 m above ground surface) is lowered.

**Keywords:** Paddy field, Land use, Regional microclimate model, Impact assessment.

## 一、前言

水田具有生產、生活及生態等三生功能，近年來由於我國農業政策面臨調整，部份水田亦將休耕，水田之生態性功能(如補注地下水、調節微氣候及淨化環境等)日益受到重視，本文針對水田之土地利用型態對於區域性微氣候之影響進行評估。本研究將過去所發展之垂直一維微氣候模式(吳富春等，2002)擴充為區域性二維微氣候模式，並針對雲林莿桐試驗田區進行區域性三維微氣候模擬，探討水田在不同之土地利用型態時(包括種植水稻、水田休耕蓄水及休耕不蓄水等)，對鄰近社區氣溫之影響。以下首先就模式理論進行說明。

## 二、區域性二維微氣候模式

過去所發展之水田區垂直一維微氣候模式，乃假設所模擬之田區面積極大，不受四周其他土地利用之影響，但實際上田區面積有限，周邊影響不可忽略，若欲探討田區土地利用型態對鄰近社區微氣候之影響，必須建立區域性二維微氣候模式，同時考慮垂直方向與水平方向之熱流平衡。圖 1 所示為區域性垂直與水平熱流示意圖，其中垂直方向熱流主要為溫差所造成之可感熱流，水平方向熱流則主要為風力所造成之熱對流，由於各種土地利用上方有不同之垂直溫度分

布，因此水平方向之熱流即受其影響，區域性二維微氣候模式乃結合垂直一維微氣候模式與水平方向熱傳機制重新計算各區域上方之溫度分布。以下針對垂直一維與區域性二維微氣候模式進行說明。

### 2.1 垂直一維微氣候模式

地表接受太陽短波輻射後，除了以長波輻射方式將部分能量釋出外，亦利用地表與空氣之溫差產生可感熱流(Sensible Heat)及地表水分與植物蒸發散產生蒸發散潛熱流(Latent Heat)將地表之熱量以非輻射方式釋出。垂直一維微氣候模式乃是利用此熱平衡概念所建立之穩態(Steady state)模式，可用以計算地表至上空之氣溫與濕度分布。模式可針對種植作物與無種植作物兩種情況進行模擬，而地表亦可設定為水面(水田或蓄水池)及土壤(乾燥土壤或濕潤土壤)等不同邊界條件，並可同時考量風速亂流所造成之動量、熱量及質量(水汽)傳遞。詳細模式理論可參考過去文獻(吳富春等，2002)，垂直一維微氣候模式之重要控制方程式與各項參數詳列於附錄一與二。

本研究已採用國內外資料進行垂直一維微氣候模式之驗證，其中國外資料為 Lemon et al. (1973)之玉米田實測氣溫與濕度分布，模擬所得之垂直溫度與濕度分布與實測值非常吻合，模式計算之可感熱流與蒸發散潛熱流誤差均在 10%

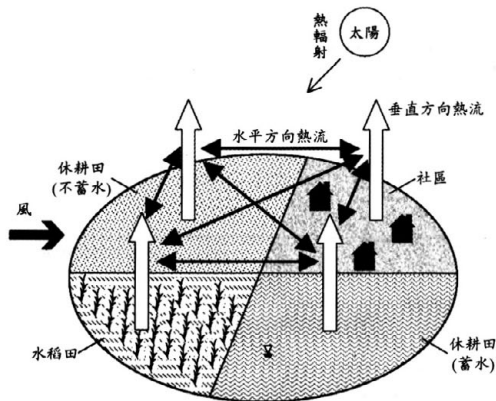


圖 1 區域性垂直與水平熱流示意圖

以內(吳富春等, 2002), 顯示模式具有合理之精確度。國內資料則利用遙測方法所推測之地表溫度(譚智宏, 2002)驗證雲林莿桐休耕示範田區地表溫度模擬結果, 模式中採用距離莿桐最近之虎尾氣象站 1999 年所測得之氣象資料進行模擬, 為探討水田對夏季炎熱氣候之影響, 以七月份之平均氣候條件進行模擬, 平均太陽輻射 841.07 W/m<sup>2</sup>、相對濕度 80%、風速 0.5 m/s、平均氣溫 27.7°C、最高及最低氣溫分別為 34.7°C 及 23°C, 模式各項參數值如表 1 所示。模擬所得之四種土地利用地表溫度如表 2 所列, 模擬結果顯示社區(住宅與道路)之地表溫度最高(38.66°C), 休耕之蓄水田地地表溫度最低(33.30°C), 雖然水面對太陽輻射之反射率(5%)較社區對太陽輻射之反射率(8%)為小(亦即水面吸收較多之太陽輻射), 但水面可藉由水分蒸發潛熱釋出較多熱量, 因此其地表溫度反較社區地表溫度為低。水稻田之地表溫度(34.87°C)略高於休耕之蓄水田地地表溫度, 主要係因水稻田地表吸收葉片所釋放之長波輻射所致。水田休耕不蓄水時, 其對太陽輻射之反射率隨土壤含水量之增加而減小(乾燥與濕潤土壤之反射率分別為 25%與 15%), 但濕潤土壤可藉由水分蒸發潛熱釋出較多熱量, 因此濕潤土壤之休耕地地表溫度(35.72°C)較乾燥土壤之休耕地地表溫度(37.6°C)為低。

## 2.2 區域性二維微氣候模式

由於垂直一維微氣候模式僅考慮垂直方向

之熱平衡, 無法針對周邊不同土地利用之影響進行分析, 因此本研究結合垂直一維微氣候模式與水平方向熱傳機制建立區域性二維微氣候模式, 考慮在不同土地利用時地表糙度、地表反射率及地表含水量等差異所形成之風速分布及地表熱平衡關係, 計算各區域上方之水平方向熱對流, 進而探討不同土地利用型態對區域性微氣候之影響。以下針對區域性二維微氣候模式進行說明。

### 2.2.1 控制方程式

二維微氣候模式之熱平衡方程式可分為無植物之空氣與植物群內之空氣兩種情況, 分述如下。

#### (1) 無植物之空氣熱平衡

二維微氣候模式在無植物空氣中之熱平衡關係採用穩態之對流擴散方程式(Convection-diffusion equation), 如下所示:

$$-\frac{\partial UT_A}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T_A}{\partial z}) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

式中  $U$  為空氣對流速度(即風速);  $T_A$  為空氣溫度;  $K_h$  為亂流擴散係數(m<sup>2</sup>/s);  $x$  為水平方向座標。式(1)顯示在定態時  $x$  方向之熱對流與  $z$  方向之熱擴散達到平衡。

#### (2) 植物群內空氣熱平衡

植物群內之空氣熱平衡除考慮空氣之熱對流與擴散外, 亦須考慮植物葉面與空氣溫差所造成之可感熱流, 其關係式可表示如下:

$$-\frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T_A}{\partial z}) = -\frac{\partial UT_A}{\partial x} + \frac{[T_L(z) - T_A(z)] \cdot LAD(z)}{R_a(z)} \dots\dots\dots (2)$$

式中  $LAD$  為葉面積密度(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>),  $R_a$  為葉面邊界阻抗(s/m)。

本研究為模擬不同土地利用區域上方空氣之熱交流, 乃利用熱交換區之概念配合上述控制方程式進行迭代演算, 有關熱交換區之概念與計算步驟詳述如下。

### 2.2.2 熱交換區模式

熱交換區乃是為執行二維熱傳演算所建構之概念模式, 如圖 2 所示, 其中熱交換區(C 區)

表 1 水田微氣候模式參數值

參數名稱	參數符號	參數值	單位	資料來源
氣象條件				
太陽短波輻射	$S_{TCH}$	841.07	W/m <sup>2</sup>	(虎尾氣象站 1999)
高空空氣溫度	$T_{SK}$	27.7	°C	
相對濕度		80	%	
高空風速	$U$	0.5	m/s	
環境參數				
空氣比熱	$c_p$	1000.0	J/kg°C	(Wu and Liu, 2000)
大氣壓力	$P_{atm}$	1013.25	mb	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
空氣密度	$\rho$	1.205	kg/m <sup>3</sup>	
水氣密度	$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>	
風速消滅係數	$\alpha_w$	3.0	無因次	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
亂流擴散消滅係數	$\alpha_k$	2.0	無因次	(Wu and Liu, 2000)
von Karman 常數	$\kappa$	0.41	無因次	(Dyer, 1974)
Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	(Wu and Liu, 2000)
氣體常數	$R$	286.9	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	(Sellers et al., 1996)
濕度常數	$r$	0.66	mb/°C	(王如意, 應用水文學)
土壤飽和含水量	$\theta_s$	0.49	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	(劉振宇, 1996)
土壤特性參數	$\alpha$	0.38	1/cm	(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)
土地利用參數				
水稻田				
水稻高度	$z_{CH}$	1	m	
水稻田影響高度	$z_{RH}$	2	m	(Wu and Liu, 2000)
平均葉寬	$D_L$	0.05	m	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
葉面邊界阻力常數	$C_l$	60.0	s <sup>-1/2</sup> m <sup>-1</sup>	(Mehlenbacher and Whitfield, 1977)
葉面對太陽輻射之吸收率	$\alpha_L$	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	$r_g$	0.05	無因次	0.03 ~ 0.1 (Arya, 1988)
住宅社區				
農舍平均高度	$z_{BH}$	3	m	
農舍影響高度	$z_{RH}$	6	m	(Wu and Liu, 2000)
地表對太陽輻射之反射率	$r_g$	0.08	無因次	0.05 ~ 0.1 (Arya, 1988)
土壤含水量	$\theta_G$	0.2	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	(劉振宇, 1996)
水田休耕蓄水				
水田影響高度	$z_{GRH}$	1	m	
水田土壤糙度	$z_{Go}$	0.0025	m	(Guyot, 1996)
地表對太陽輻射之反射率	$r_g$	0.05	無因次	0.03 ~ 0.1 (Arya, 1988)
水田休耕不蓄水(土壤乾燥)				
水田影響高度	$z_{GRH}$	1	m	
水田土壤糙度	$z_{Go}$	0.01	m	(Guyot, 1996)
土壤含水量	$\theta_G$	0.2	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	(劉振宇, 1996)
地表對太陽輻射之反射率	$r_g$	0.25	無因次	0.2 ~ 0.35 (Arya, 1988)
水田休耕不蓄水(土壤濕潤)				
水田影響高度	$z_{GRH}$	1	m	
水田土壤糙度	$z_{Go}$	0.01	m	(Guyot, 1996)
土壤含水量	$\theta_G$	0.49	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	(劉振宇, 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)

表 2 垂直一維微氣候模式模擬所得地表溫度

土地利用型態	水稻田	水田休耕蓄水	水田休耕不蓄水 (土壤濕潤)	水田休耕不蓄水 (土壤乾燥)	社區 (住宅與道路)
地表溫度(°C)	34.87	33.30	35.72	37.6	38.66

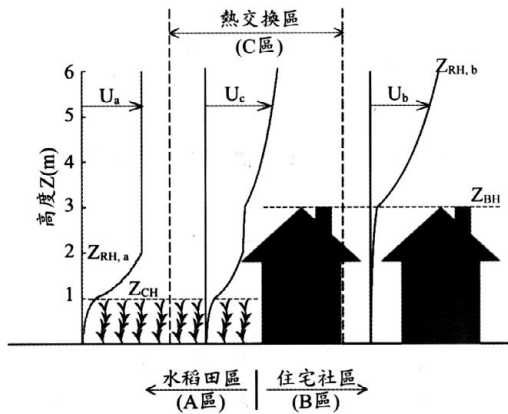


圖 2 熱交換區示意圖

為介於兩種土地利用區域(A區與B區)間之過渡區域，透過熱交換區之概念，便可利用式(1)或(2)針對不同土地利用區域進行二維微氣候模擬，其計算步驟如下所述。

(1) 步驟一：利用A區與B區計算熱交換區

首先利用一維垂直模式分別計算A區與B區上方之空氣溫度分布，將此溫度分布視為熱交換區之左右邊界條件代入式(1)或(2)計算水平方向熱對流，其中熱交換區之風速 $U_c$ 乃利用A區與B區上方風速 $U_a$ 與 $U_b$ 之權重平均值代入，即

$$U_c(z) = \frac{A_a \cdot U_a(z) + A_b \cdot U_b(z)}{A_a + A_b} \dots\dots\dots(3)$$

式中 $A_a$ 與 $A_b$ 分別為A區與B區之面積。由於式(1)或(2)為垂直二階微分式，需要上下邊界條件 $T_c(z_{RH,b})$ 與 $T_{G,c}$ 方可數值求解熱交換區內之垂直溫度分布，在此亦使用A區與B區之權重平均溫度代入上下邊界條件，即

$$T_{G,c} = \frac{A_a \cdot T_{G,a} + A_b \cdot T_{G,b}}{A_a + A_b} \dots\dots\dots(4)$$

$$T_c(z_{RH,b}) = \frac{A_a \cdot T_a(z_{RH,b}) + A_b \cdot T_b(z_{RH,b})}{A_a + A_b} \dots\dots\dots(5)$$

熱交換區之亂流擴散係數可採用A區與B區之亂流擴散係數並聯公式求得，可表示如下：

$$K_{h,c}(z) = \frac{A_a \cdot K_{h,a}(z) + A_b \cdot K_{h,b}(z)}{A_a + A_b} \dots\dots\dots(6)$$

(2) 步驟二：利用A區與熱交換區重新計算A區

將一維垂直模式計算之A區上方溫度分布與步驟一求得之熱交換區上方溫度分布當做A區之左右邊界條件代入式(1)或(2)，重新進行二維熱傳演算，其中水平方向熱對流之計算採用A區上方風速為 $U_a$ 、熱交換區上方風速為 $U_c$ 做為左右進出對流速度，而垂直方向熱擴散則採用A區上方之亂流擴散係數計算之。

(3) 步驟三：利用B區與熱交換區重新計算B區

同理，將步驟一求得之熱交換區上方溫度分布與一維垂直模式計算之B區上方溫度分布當做B區之左右邊界條件代入式(1)或(2)，重新進行二維熱傳演算，其中水平方向熱對流之計算採用熱交換區上方風速 $U_c$ 與B區上方風速 $U_b$ 做為左右進出對流速度，而垂直方向熱擴散則採用B區上方之亂流擴散係數計算之。

利用上述步驟二與三求得之A區與B區上方新溫度分布，重覆步驟一至三迭代計算直至溫度分布收斂為止，本研究所採用之收斂標準為絕對誤差值小於0.01。

2.2.3 有限差分式

式(1)或(2)之熱對流項可表示為下列差分式：

$$-\frac{\partial UT_A}{\partial x} = \frac{U_L(i) \cdot T_{A,L}(i) - U_R(i) \cdot T_{A,R}(i)}{\Delta x} \dots\dots\dots(7)$$

式中 $U_L(i)$ 與 $U_R(i)$ 為第*i*層格網之左右邊界對

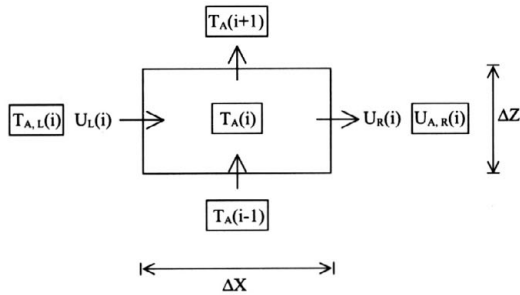


圖 3 二維格網與熱傳定義圖

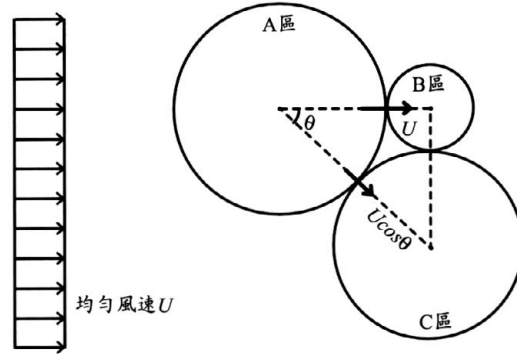


圖 4 三區熱對流案例示意圖（鳥瞰圖）

流速度(風速);  $T_{A,L}(i)$  與  $T_{A,R}(i)$  則為左右邊界空氣溫度(如圖 3 所示);  $\Delta x$  為格網長度, 在計算熱交換區時  $\Delta x_c = (L_a + L_b)/2$ , 其中  $L_a$  與  $L_b$  分別為 A 區與 B 區之長度, 在計算 A 區時  $\Delta x_a = L_a/4 + \Delta x_c/2 = L_a/2 + L_b/4$ , 在計算 B 區時  $\Delta x_b = L_b/4 + \Delta x_c/2 = L_b/2 + L_a/4$ 。

式(1)或(2)之熱擴散項可表示為下列差分式:

$$\frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T_A}{\partial z}) = \frac{K_h(i + \frac{1}{2}) \cdot [T_A(i+1) - T_A(i)] - K_h(i - \frac{1}{2}) \cdot [T_A(i) - T_A(i-1)]}{\Delta z^2}$$

$$K_h(i + \frac{1}{2}) = \frac{K_h(i+1) + K_h(i)}{2}$$

$$K_h(i - \frac{1}{2}) = \frac{K_h(i-1) + K_h(i)}{2} \dots\dots\dots(8)$$

**2.2.4 區域性三維微氣候模擬**

本研究所發展之區域性二維微氣候模式可針對同時存在三種以上土地利用之情況進行區域性三維微氣候模擬。圖 4 所示為三種土地利用區域(A、B、C 三區)之熱對流案例示意圖, 假設風速  $U$  由 A 區吹向 B 區, A、C 兩區連線方向之風速分量為  $U \cos \theta$ , 假設 B、C 兩區連線方向垂直風速方向, 因此並無風速分量, 則 A 區上方溫度分布對 B 區上方溫度分布有直接之影響, 而 C 區與 B 區間雖無直接熱對流, 但 C 區透過與 A 區之熱對流間接影響 B 區上方溫度分布。本研究依此原理進行區域性三維微氣候模擬, 其演算步驟如下:

- (1)利用一維垂直模式計算 A、B、C 三區上方溫度分布。

- (2)利用二維模式重新計算 A、B 兩區上方溫度分布。
- (3)將步驟(2)所求得之 A 區上方新溫度分布代入二維模式重新計算 A、C 兩區上方溫度分布。
- (4)利用步驟(3)所求得 A 區上方新溫度分布重覆步驟(2)~(4), 迭代計算直至各區溫度分布達收斂標準(絕對誤差值小於 0.01℃)為止。

**三、案例研究**

本研究針對雲林荊桐休耕示範田區進行二維與三維微氣候模擬, 探討不同之休耕策略(包括不同休耕面積、休耕田是否蓄水、休耕田位置等)對區域性微氣候之影響, 案例研究區域說明如下。

**3.1 研究區域**

案例研究以荊桐示範田區中之一輪區(面積 3520 公畝)及其鄰近農宅社區(面積 128 公畝)為模擬區域(衛星航照 GIS 圖檔如圖 5 所示), 輪區外圍道路設定為模擬區域之邊界, 利用虎尾氣象站 1999 年 7 月份之平均氣象資料進行模擬, 平均太陽輻射 841.07 W/m<sup>2</sup>、相對濕度 80%、風速 0.5 m/s、平均氣溫 27.7℃、最高及最低氣溫分別為 34.7℃及 23℃, 白天之平均風速 0.5 m/s 由海面吹向陸地(即由田區吹向社區), 本研究探討之重點為田區休耕策略對於社區微氣候之影響, 以下分別就二維與三維各種模擬案例及模擬結果進行說明與討論。

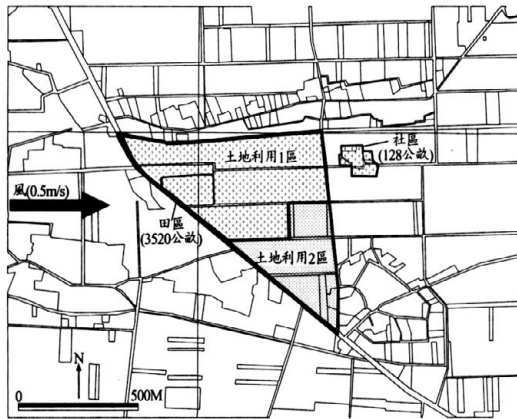


圖 5 模擬區域位置圖（雲林荊桐休耕示範田區）

### 3.2 二維微氣候模擬

圖 5 所示之模擬區域中，若田區(3520 公畝)均屬同一種土地利用型態，則可進行二維微氣候模擬，本研究分別針對田區土地利用為：(1)水稻田，(2)水田休耕蓄水，(3)水田休耕不蓄水(土壤濕潤)，及(4)水田休耕不蓄水(土壤乾燥)等四種情況，探討田區之土地利用型態對鄰近社區微氣候之影響，模擬結果如圖 6 所示。

模擬結果顯示水田休耕蓄水時，鄰近社區上方之溫度最低，水田休耕不蓄水且土壤乾燥時，社區上方溫度最高，而水田休耕不蓄水但土壤濕潤時，社區上方溫度介於上述兩者之間，此種趨勢與垂直一維模式演算結果一致。田區種植水稻時，鄰近社區上方之溫度在~1 公尺以下部分較不蓄水之休耕田為高，而在~1 公尺以上部分則較不蓄水之休耕田為低，此乃因田區在 1 公尺以下部分有植物(水稻)釋放可感熱使空氣溫度增高，並透過熱對流方式影響鄰近社區上方之溫度，故田區種植水稻時，鄰近社區上方氣溫在~1 公尺以下部分反較水田休耕不蓄水時為高。而田區在 1 公尺以上部分因無植物釋出可感熱增高氣溫，加上地表濕水蒸發及植物葉面蒸散所消耗之潛熱能有助於降低氣溫，因此田區種植水稻時，鄰近社區上方溫度在~1 公尺以上部分會較水田休耕不蓄水時為低，但仍較水田休耕蓄水時為高。

利用二維模擬結果，可進一步量化分析田區

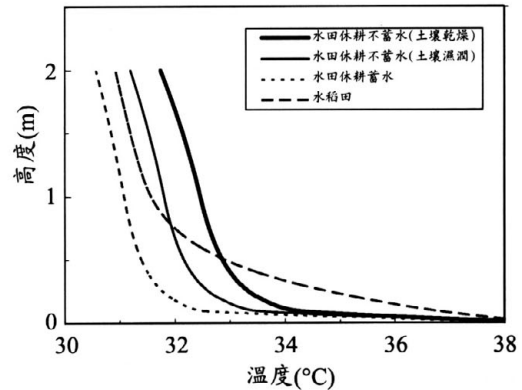


圖 6 田區不同土地利用時社區上方之溫度分布模擬結果

土地利用型態對鄰近社區微氣候之影響，本研究採用三種量化指標如下：

(1)社區地面上方 1 公尺至 2 公尺範圍之平均溫度

由於人體腰部以上對周遭環境溫度之敏感度較高，因此以社區地面上方 1 公尺至 2 公尺範圍內之平均溫度代表人體所感覺之空氣溫度。

(2)蒸發散潛熱

由於水分蒸發散有助於降低地面釋放可感熱流及長波輻射，具有冷卻空氣溫度之功效，因此以田區之蒸發散潛熱流代表田區調節微氣候之效果。

(3)家用冷氣機台數

將田區之蒸發散潛熱流換算為一般家用冷氣機台數，代表田區在各種土地利用型態時所具有之冷房效果。

表 3 數據顯示鄰近社區地面上方 1~2 公尺之平均氣溫在田區休耕蓄水時為最低(30.81°C)，田區種植水稻時次之(31.17°C)，而在田區休耕不蓄水時則偏高，尤以土壤乾燥之情況為最(32.09°C)，此結果表示田區休耕不種植水稻時若能做為蓄水池使用，則有助於降低鄰近社區之溫度。田區各種土地利用型態之蒸發散潛熱結果顯示田區休耕蓄水時為 643.52W/m<sup>2</sup>，田區種植水稻時為 448.84W/m<sup>2</sup>(其中地表蒸發潛熱佔 94%，葉面蒸散潛熱佔 6%)，田區休耕不蓄水時，在土壤

表 3 田區土地利用型態對鄰近社區微氣候影響量化指標

微氣候量化指標	田區土地利用型態			
	水田休耕蓄水	水稻田	水田休耕不蓄水 (土壤濕潤)	水田休耕不蓄水 (土壤乾燥)
社區地面上方 1~2 公尺平均溫度 (°C)	30.81	31.17	31.49	32.09
田區蒸發散潛熱 (W/m <sup>2</sup> )	643.52	448.84	113.03	42.69
地表蒸發潛熱	643.52	420.3	113.03	42.69
葉面蒸散潛熱	—	28.54	—	—
田區蒸發散潛熱換算家用冷氣機 (台/公畝)	0.41	0.29	0.07	0.03

濕潤與乾燥情況下分別為 113.03W/m<sup>2</sup> 與 42.69W/m<sup>2</sup>。根據上述數據換算為家用冷氣機，則分別為 0.41 台/公畝(田區休耕蓄水)、0.29 台/公畝(田區種植水稻)、0.07 台/公畝與 0.03 台/公畝(田區休耕不蓄水土壤濕潤與乾燥)，顯示田區在種植水稻與休耕蓄水時，較乾燥之休耕田分別高出 9.5 倍與 14 倍之冷房效果。

### 3.3 三維微氣候模擬

本研究針對圖 5 所示田區(3520 公畝)有兩種不同土地利用型態時進行三維微氣候模擬，模擬案例包括土地利用 1 區(上分區)與土地利用 2 區(下分區)之各種土地利用型態組合在不同面積大小之情況共 18 種，如表 4 所列。

#### 3.3.1 模擬結果與討論

##### (1) 土地利用 1 區休耕型態與面積之影響

圖 7 至圖 9 所示為土地利用 1 區在不同休耕型態與不同面積大小時模擬所得之社區上方溫度分布，此模擬結果顯示共同一致之趨勢，即社區上方之溫度隨土地利用 1 區之面積增大而降低，而土地利用 2 區之水稻田面積改變對社區上方氣溫分布所造成之間接影響並不顯著。社區上方氣溫以土地利用 1 區在休耕蓄水時為最低，在休耕不蓄水且土壤乾燥時為最高，如圖 10 至 12 所示。由此可知，增大迎風面土地利用 1 區之休耕蓄水面積，可使社區上方氣溫降低效果最大，而減小迎風面土地利用 1 區之休耕不蓄水(乾燥土壤)面積，可使社區上方氣溫降低效果最小。

##### (2) 土地利用 2 區休耕型態與面積之影響

圖 13 至圖 15 所示為土地利用 2 區在不同休

表 4 三維微氣候模擬案例

案例編號	土地利用型態組合		土地利用區域面積比 (1 區 : 2 區)
	土地利用 1 區	土地利用 2 區	
1	休耕不蓄水(乾燥土壤)	水稻田	2 : 1
2	休耕不蓄水(乾燥土壤)	水稻田	1 : 1
3	休耕不蓄水(乾燥土壤)	水稻田	1 : 2
4	休耕不蓄水(濕潤土壤)	水稻田	2 : 1
5	休耕不蓄水(濕潤土壤)	水稻田	1 : 1
6	休耕不蓄水(濕潤土壤)	水稻田	1 : 2
7	休耕蓄水	水稻田	2 : 1
8	休耕蓄水	水稻田	1 : 1
9	休耕蓄水	水稻田	1 : 2
10	水稻田	休耕不蓄水(乾燥土壤)	2 : 1
11	水稻田	休耕不蓄水(乾燥土壤)	1 : 1
12	水稻田	休耕不蓄水(乾燥土壤)	1 : 2
13	水稻田	休耕不蓄水(濕潤土壤)	2 : 1
14	水稻田	休耕不蓄水(濕潤土壤)	1 : 1
15	水稻田	休耕不蓄水(濕潤土壤)	1 : 2
16	水稻田	休耕蓄水	2 : 1
17	水稻田	休耕蓄水	1 : 1
18	水稻田	休耕蓄水	1 : 2

耕型態與不同面積大小時模擬所得之社區上方溫度分布，此模擬結果亦顯示共同一致之趨勢，即社區上方~1 公尺以下部分之溫度隨迎風面土地利用 1 區之水稻田面積增大而升高，而社區上方~1 公尺以上部分之溫度則隨之降低。此乃因



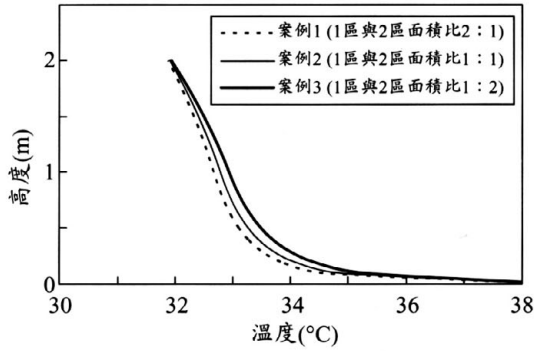


圖 7 土地利用 1 區(休耕不蓄水, 乾燥土壤)與土地利用 2 區(水稻田)不同面積模擬所得社區上方溫度分布

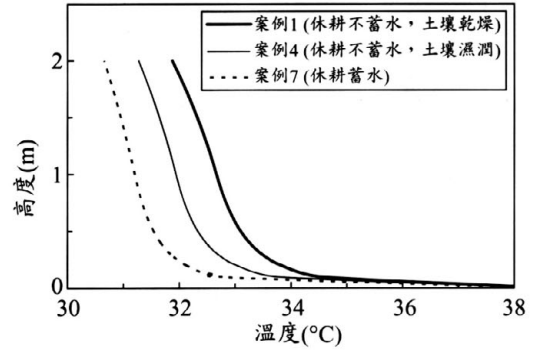


圖 10 土地利用 1 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布(土地利用 1 區與 2 區面積比 2:1)

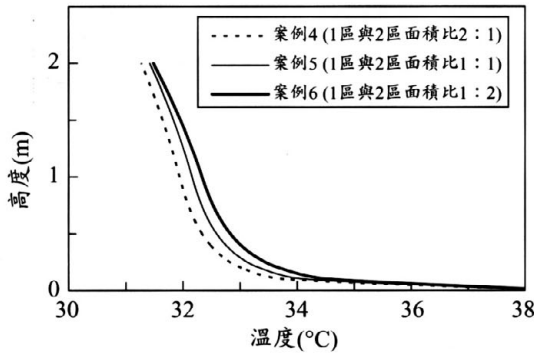


圖 8 土地利用 1 區(休耕不蓄水, 土壤濕潤)與土地利用 2 區(水稻田)不同面積模擬所得社區上方溫度分布

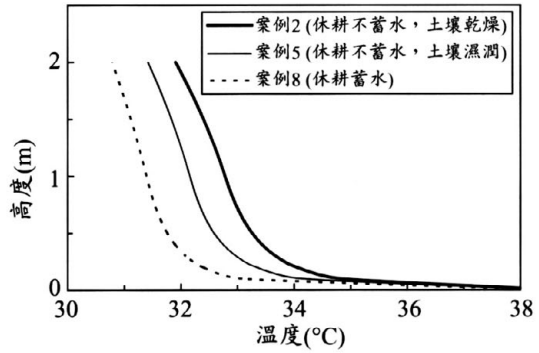


圖 11 土地利用 1 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布(土地利用 1 區與 2 區面積比 1:1)

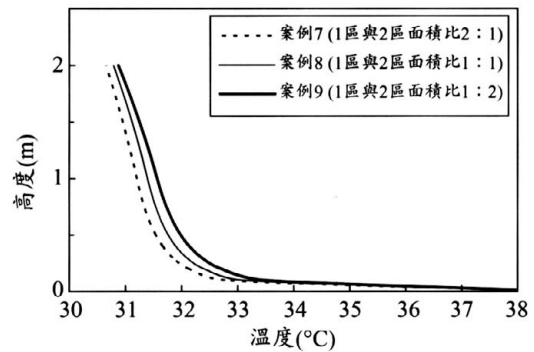


圖 9 土地利用 1 區(休耕蓄水)與土地利用 2 區(水稻田)不同面積模擬所得社區上方溫度分布

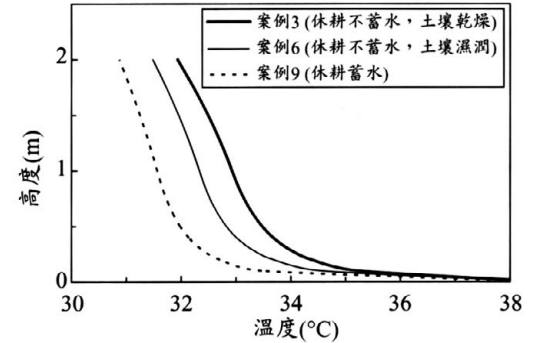


圖 12 土地利用 1 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布(土地利用 1 區與 2 區面積比 1:2)

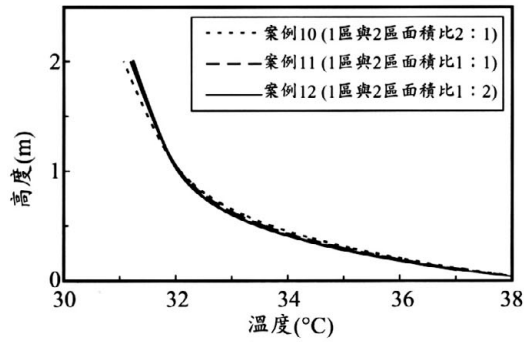


圖 13 土地利用 1 區（水稻田）與土地利用 2 區（休耕不蓄水，乾燥土壤）不同面積模擬所得社區上方溫度分布

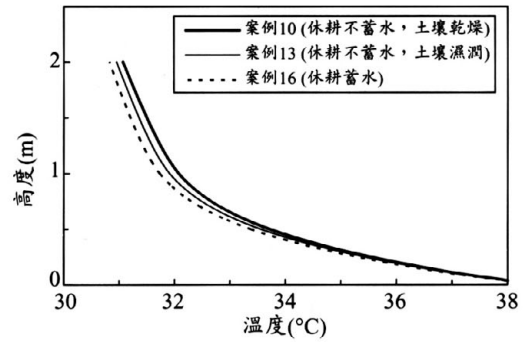


圖 16 土地利用 2 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布（土地利用 1 區與 2 區面積比 2：1）

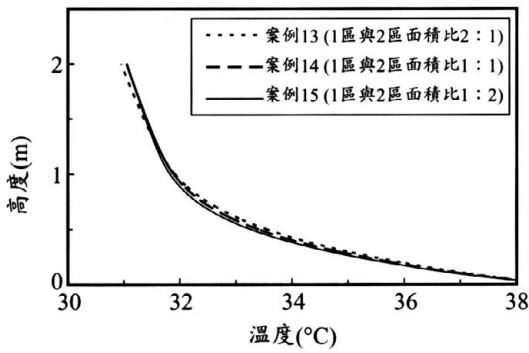


圖 14 土地利用 1 區（水稻田）與土地利用 2 區（休耕不蓄水，土壤濕潤）不同面積模擬所得社區上方溫度分布

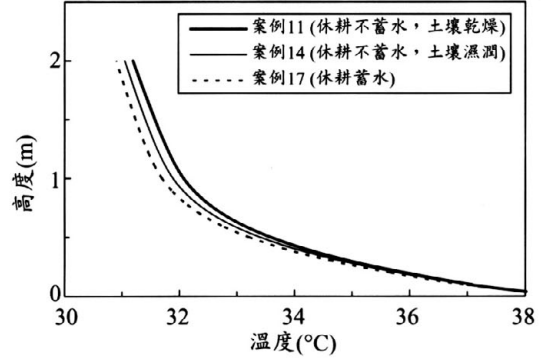


圖 17 土地利用 2 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布（土地利用 1 區與 2 區面積比 1：1）

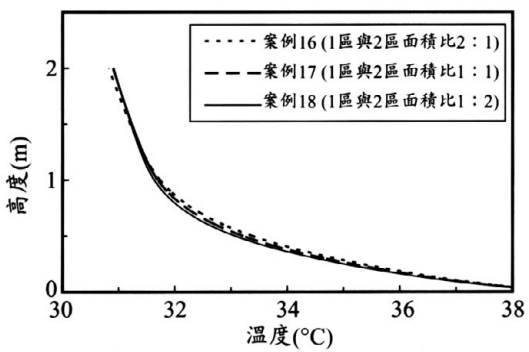


圖 15 土地利用 1 區（水稻田）與土地利用 2 區（休耕蓄水）不同面積模擬所得社區上方溫度分布

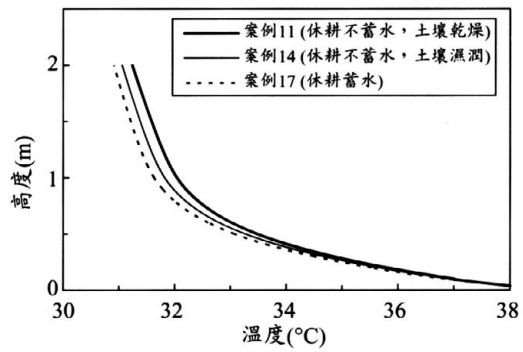


圖 18 土地利用 2 區不同休耕型態模擬所得社區上方溫度分布（土地利用 1 區與 2 區面積比 1：2）

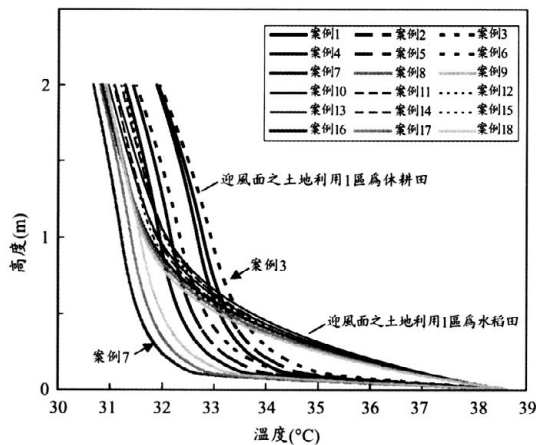


圖 19 18 種案例模擬所得之社區上方溫度分布綜合比較

水稻田區在 1 公尺以下部分有植物葉片釋出可感熱增高氣溫並透過熱對流影響社區上方氣溫所致，而水稻田區在 1 公尺以上部分則無植物釋出可感熱增高氣溫，且水稻田透過蒸發散潛熱之消耗有助於降低氣溫，故社區上方大約 1 公尺以上部分之氣溫反而隨土地利用 1 區之水稻田面積增大而降低。

土地利用 2 區休耕時對鄰近社區上方之溫度分布有較顯著之影響，如圖 16 至圖 18 所示。土地利用 2 區在休耕蓄水時，社區上方之溫度為最低，而土地利用 2 區在休耕不蓄水且土壤乾燥時，社區上方之溫度則為最高，此種趨勢隨土地利用 2 區之面積增大而更趨明顯(圖 18)。由此可知，土地利用 2 區雖無直接之熱對流傳遞至社區，但其休耕型態則透過土地利用 1 區間接影響社區上方溫度，增大迎風面土地利用 1 區之水稻田面積，搭配土地利用 2 區之休耕蓄水型態，可使社區上方人體感受之氣溫降低效果最大，而減小迎風面土地利用 1 區之水稻田面積，搭配土地利用 2 區之休耕不蓄水型態(乾燥土壤)，可使社區上方人體感受之氣溫降低效果最小。

### 3.3.2 綜合比較

圖 19 所示為本研究之 18 種案例模擬結果綜合比較，圖中顯示社區中人體所感受之氣溫(介於高度 1~2 公尺之氣溫)以迎風面之土地利用 1 區

在休耕不蓄水土壤乾燥時(案例 1~3)為最高，其次為休耕不蓄水土壤濕潤時(案例 4~6)，迎風面之土地利用 1 區為水稻田時(案例 10~18)，社區中人體所感受之氣溫均較土地利用 1 區在休耕不蓄水時(案例 1~6)為低，而迎風面之土地利用 1 區在休耕蓄水時(案例 7~9)，社區中人體所感受之氣溫為最低。在 18 種案例之模擬結果中，以案例 3 模擬所得溫度最高，案例 7 模擬所得溫度最低，顯示迎風面之土地利用 1 區若為休耕狀態時，將其蓄水面積最大化或將其不蓄水乾燥土壤面積最小化可分別使社區上方產生最大及最小之降溫效果。而迎風面之土地利用 1 區為水稻田時，則無論土地利用 2 區為何種型態，社區上方 0.5 公尺以下部分均因植物釋出之可感熱而呈現較高之氣溫。

## 四、結論

本研究將過去所發展之垂直一維微氣候模式延伸擴充為區域性二維微氣候模式，同時考慮垂直方向熱擴散與水平方向熱對流之平衡關係，探討不同之土地利用型態對區域性微氣候之影響。本研究發展之區域性二維微氣候模式乃利用熱交換區之概念計算兩種不同土地利用區域間之熱交流，若研究範圍內同時存在兩種以上不同之土地利用區域時，則須重覆計算兩兩區域間之熱交流，直至各區域溫度分布均達收斂為止，此種區域性之三維微氣候模擬雖為一種簡化模式，但卻能迅速準確地評估較複雜之土地利用型態對區域性微氣候所造成之影響。本研究利用所發展之二維微氣候模式針對雲林莿桐試驗田區之不同休耕策略進行二維微氣候模擬(二區模擬)與區域性三維微氣候模擬(三區模擬)。模擬結果顯示田區之土地利用型態對鄰近社區上方之氣溫分布有相當大之影響。大體而言，迎風面之土地利用對社區微氣候有直接顯著之影響，而處於非迎風面之土地利用對社區微氣候之影響較為間接。迎風面之土地利用地表含水量愈高、面積愈大，對鄰近社區上方之降溫效果愈大，反之迎風面之土地利用地表含水量愈低、面積愈小，則對鄰近社區上方之降溫效果愈小。若迎風面之

土地利用為水稻田時，鄰近社區上方 0.5~1 公尺以下部分氣溫偏高，但對人體感受之氣溫(1~2 公尺部分)則具有降溫之效果。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：91 農發-8.2-林-01(14))得以順利進行，特此謹致謝忱。

### 參考文獻

1. Arya, P.S., 1988. Introduction to micro-meteorology. Academic Press, San Diego.
2. Dyer, A.J., 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.* 7: 363-372.
3. Guyot, G., 1996. Physics of the environment and climate, John Wiley & Sons.
4. Incropera, F.P. et al., 2001. *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons.
5. Kim, W., Arai, T., Kanae, S., Oki, T., and Musiaka, K., 2001. 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.
6. Kim, W., Agata, Y., Kanae, S., Oki, T., and Musiaka, K., 2001. Hydrological simulation by SiB2-Paddy in the Chao Phraya River basin, Thailand. *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models* (Proceeding of a symposium held during the sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, July 2001), 270: 19-26, IAHS.
7. Kondo, J. et al., 1996. Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54: 498-509.
8. Lemon, E., Stewart, D.W., and Jensen, S.E., 1973. Experiments in predicting evapotranspiration by Simulation with a Soil-Plant - Atmosphere Model. In: *Field Soil Water Regime*, Soil Science Society of America. pp. 57-76.
9. Mehlenbacher, L.A. and Whitfield, D.W.A., 1977. Modeling thermal eddy diffusivity at canopy height. *Boundary-Layer Meteorol.*, 12: 153-170.
10. Ross, J., 1975. Radiative transfer in plant communities. In: Monteith (Ed), *Vegetation and the atmosphere I*. pp. 13-55, Academic Press, New York.
11. Skupniewicz, C.E., 1993. Two-zone convective scaling of diffusion in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology*. 33: 642-653.
12. Sellers, P.J. et al., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 9: 676-705.
13. Seppo K., and Wang K.Y., 1999. Short-term environmental controls of heat and water vapour fluxes above a boreal coniferous forest : model computations compared with measurements by eddy correlation. *Eco. Model.* 124: 145-173.
14. Wu, J., 1990. Modeling the energy exchange processes between plant communities and environment. *Eco. Model.* 51: 233-250.
15. Wu, J. and Liu, Y., 2000. Effects of leaf area profiles and canopy stratification on simulated energy fluxes: the problem of vertical spatial scale. *Eco. Model.* 134: 283-297.
16. 吳富春、沈易徵，2001，『水田生態環境及微氣候模式』，推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注成果報告，行政院農委會。
17. 吳富春、沈易徵，2002，『水田微氣候模式之建立與應用』，農業工程學報，第四十八卷第一期，pp. 10-23。
18. 劉振宇，1996，『水稻田對地下水補助功能評估分級』，水稻田生態環境保護規劃及示範成果報告，行政院農委會。

19. 譚智宏，2002，『區域性水田生態環境功能  
 量化評估』，推廣水田生態環境保護及地下  
 水涵養補注成果報告，行政院農委會。

收稿日期：民國 92 年 2 月 17 日

修正日期：民國 92 年 3 月 21 日

接受日期：民國 92 年 3 月 28 日

附錄一 垂直一維微氣候模式之控制方程式

方程式	描述
<b>植物群內之太陽輻射分布</b>	
$R_N(z) = S_N(z) + L_N(z)$	高度 $z$ 時植物吸收淨輻射能
$S_N(z) = a_L \cdot S_T(z)$	高度 $z$ 時植物吸收的淨太陽輻射
$S_T(z) = S_{TCH} \cdot \exp[-\alpha_L \cdot CLAI(z)]$	高度 $z$ 時的太陽短波輻射
$CLAI(z) = \int_z^{z_{CH}} LAD(z) dz$	高度 $z$ 以上之累積葉面積指數
$L_N(z) = \sigma \left[ T_{SK}^4 + T_L(z)^4 \right] + \sigma \left[ T_G^4 - T_L(z)^4 \right]$	高度 $z$ 時植物所吸收之長波輻射
<b>動量、熱量與水蒸氣之傳遞</b>	
$U(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0}$	植物群上方，大氣之穩定條件為中性時之風速分布
$\log d = 0.9793 \cdot \log z_{CH} - 0.1536$	零平面位移高度
$\log z_0 = 0.9970 \cdot \log z_{CH} - 0.8830$	植物群糙度
$U(z_2) - U(z_1) = \frac{U^*}{\kappa} \left[ \ln \frac{z_2-d}{z_1-d} - (\Phi_m(\Gamma_2) - \Phi_m(\Gamma_1)) \right]$	植物群上方，大氣之穩定條件為穩定與不穩定時之風速分布
$U^* = \frac{\kappa \cdot U(z_{RH})}{\ln[(z_{RH}-d)/z_0] - \Phi_m(\Gamma_{RH})}$	摩擦速度
$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m(\Gamma) = 1.0$ (中性條件)	
$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m^2(\Gamma) = (1-16\Gamma)^{-1/2}$ (不穩定條件)	不同大氣條件下動量、熱量及質量穩定函數
$\phi_h(\Gamma) = \phi_w(\Gamma) = \phi_m(\Gamma) = 1+5\Gamma$ (穩定條件)	
$\Gamma = \frac{z-d}{L_{MO}}$	穩定參數

$L_{MO} = -\frac{\rho(z) \cdot c_p \cdot T_A(z) \cdot U^*{}^3}{\kappa \cdot g \cdot SH}$	Monin-Obukhov 長度
$U(z) = U(z_{CH}) \cdot \exp\left[\alpha_w \left(\frac{z}{z_{CH}} - 1\right)\right]$	植物群內風速分布
$T_{A1} = T_{A2} + \frac{SH}{\rho(z) \cdot c_p \cdot \kappa \cdot U^*} \left[ \ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Phi_h(\Gamma_2) + \Phi_h(\Gamma_1) \right]$	植物群上方溫度分布
$Q_{A1} = Q_{A2} + \frac{LE}{\rho(z) \cdot L_t(z) \cdot \kappa \cdot U^*} \left[ \ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Phi_w(\Gamma_2) + \Phi_w(\Gamma_1) \right]$	植物群上方比濕度分布
$L_t(z) = 4187 \cdot [595 - 0.567 \cdot T_A(z)]$	高度 $z$ 時蒸發潛熱
$\frac{-d}{dz} \left[ K_h(z) \cdot \frac{dT_A(z)}{dz} \right] = \frac{[T_L(z) - T_A(z)] \cdot LAD(z)}{R_a(z)}$	植物群內溫度分布
$\frac{-d}{dz} \left[ K_w(z) \cdot \frac{dQ_A(z)}{dz} \right] = \frac{[e^*(T_L(z)) - Q_A(z)] \cdot LAD(z)}{R_a(z) + R_s(z)}$	植物群內比濕度分布
$e^*(T_L(z)) = \frac{622}{P_{atm}} \cdot \frac{6.1078}{1000} \cdot \exp\left[\frac{17.2693882 \cdot T_L(z)}{T_L(z) + 237.3}\right]$	飽和比濕度經驗公式
$R_a(z) = C_1 \cdot \left(\frac{D_L}{U(z)}\right)^{\frac{1}{2}}$	葉面邊界阻抗方程式
$R_s(z) = D_{RY} \cdot \left(146.0 + \frac{3.6}{4.59 \times 10^{-4} \cdot S_T(z) + 0.0015}\right)$	植物葉面氣孔水氣蒸發阻抗
$D_{RY}(z) = \frac{e^*(T_L(z)) - Q_A(z)}{Q_{crit}} \quad \text{for } e^*(T_L(z)) - Q_A(z) > Q_{crit}$	比濕度差方程式
$D_{RY}(z) = 1 \quad \text{for } e^*(T_L(z)) - Q_A(z) < Q_{crit}$	
$K(z) = \frac{\kappa \cdot U^* \cdot (z - d)}{\phi(\Gamma)}$	植物群上方亂流擴散係數
$K(z) = K(z_{CH}) \cdot \exp\left[\alpha_k \left(\frac{z}{z_{CH}} - 1\right)\right]$	植物群內亂流擴散係數

#### 植物群內之能量平衡

$R_N(z) = SH(z) + LE(z)$	能量平衡方程式
$\frac{dSH}{dz} = \frac{\rho(z) \cdot c_p \cdot [T_L(z) - T_A(z)] \cdot LAD(z)}{R_a(z)}$	植物群內可感熱流方程式
$\frac{dLE}{dz} = \frac{\rho(z) \cdot L_t(z) \cdot [e^*(T_L(z)) - Q_A(z)] \cdot LAD(z)}{R_a(z) + R_s(z)}$	植物群內潛熱流方程式

$$T_L(z) = T_A(z) + \frac{R_a(z)}{2 \cdot \rho(z) \cdot c_p} \cdot R_N(z) - \frac{L_t(z) \cdot R_a(z) \cdot (e^*(T_L(z)) - Q_A(z))}{c_p \cdot (R_a(z) + R_s(z))}$$

葉面溫度方程式

### 未種植植物區

$$SH = \frac{\rho(z_{GRH}) \cdot c_p \cdot [T_G - T_A(z_{GRH})]}{R_d}$$

未種植植物區可感熱流方程式

$$R_d = \int_{z_{G0}}^{z_{GRH}} \frac{1}{K_h(z)} dz$$

地面介質阻抗方程式

$$LE_{soil} = \rho(z_{GRH}) \cdot L_t(z_{GRH}) \cdot \left[ \frac{h_{soil} \cdot e^*(T_G) - Q_A(z_{GRH})}{R_{soil} + R_d} \right]$$

未種植植物區，地表為土壤時，潛熱流方程式

$$h_{soil} = \exp\left(\frac{\psi_s \cdot g}{R \cdot T_G}\right)$$

土壤濕度勢能方程式

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

土壤孔隙負壓方程式

$$R_{soil} = \exp(8.206 - 4.255 \cdot \theta_G)$$

土壤地面之蒸發阻抗

$$LE_{water} = \rho_w \cdot L_t(T_G) \cdot \frac{(\Delta \cdot R_G + r \cdot E_a)}{\Delta + r}$$

未種植植物區，地表為水面時，潛熱流方程式

$$E_a = 0.75 \cdot \frac{P_{atm}}{0.622} \cdot \frac{(0.175 + 0.188 \cdot u_{GRH}) \cdot [e^*(T_G) - Q_A(z_{GRH})]}{8.64 \cdot 10^7}$$

自由水面勢能蒸發潛熱流

$$R_G = (1 - r_g) \cdot S_{TG} + L_{NG} = LE + SH$$

地表之能量平衡方程式

$$L_{NG} = \sigma (T_{SK}^4 - T_G^4)$$

地表所吸收之淨長波輻射

$$T_G = T_A(z_{GRH}) + \frac{R_d \cdot (R_G - LE_G)}{\rho(z_{GRH}) \cdot c_p}$$

地表溫度