

微氣象之特性及其在農業上之應用*

楊之遠¹

摘要

本文之目的在於闡明微氣象之尺度及特性，以及有關之基本理論包括能量平衡、各種實體垂直輸送等，並說明微氣象研究在農業上應用之可行性，期冀國內農業單位及有關學者能對微氣象有一具體瞭解，擴大其應用效果。

一、前言

以往農業氣象研究作物與天氣之關係時，多根據歷年作物產量與氣候資料，藉複迴歸分析等統計方法，建立數學相關模式。近年來由於環境物理學 (environmental physics) 之應用，吾人可藉由特殊設計之精密氣象儀器，配合農藝試驗之需要，來研究自然環境下植物族羣或田間栽培作物集團與大氣之相互關係。

植物之生長與低層大氣各種氣象因素關係臻為密切。同時在田間植物集團整個葉冠 (canopy) 與周圍氣象環境間彼此會發生相互影響，此與單一植物所處之氣象環境有顯著差異⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾。植物集團生長所需之CO₂，由大氣直接供給，同時植物集團日間由太陽所得之淨熱，一部份用來增加植物體溫，一部份可經過蒸發(散)之過程與大氣發生交換，以使植物集團與外界環境得適宜之熱平衡⁽¹⁾⁽³⁾。因此作物微氣象學(crop micrometeorology)之重點，在於利用熱平衡、空氣力學(aerodynamics)原理，藉各種介量(parameter)闡明作物與大氣之關係，並探討作物葉冠內部及上方各種氣象因素之剖面變化，以估算或測量作物葉冠內部或與大氣間各種實體(entities) (包括動量、熱量、質量) 之垂直輸送(交換)通量。本文係將微氣象之特性、有關理論，及其在農業上之應用及展望做一扼要說明。

二、微氣象之尺度及特性

本文所稱之微氣象學，其涵蓋之尺度僅限於數平方公里之內，而所探討之高度亦僅限於大氣低層

之幾十公尺以下區域；即在地表境(邊)界層(surface boundary layer) 以內之範圍，科氏力之影響可以忽略。許多學者對於微氣象、局地(local) 氣象，中尺度氣象(meso) 等，劃分尺度之標準儘管不同，而事實上，微氣象所討論之範圍可小至 1 公分(例如葉片表面溫濕度之變化)，大至 10—100 公尺(森林氣象或溫室微氣象)⁽²⁹⁾。由圖 1，可具體地看出三者之區別。由於人類及動植物均生存於境界層以內，因此微氣象之研究可以應用於農業、水文、森林、環境污染及公共衛生方面。同時大氣中許多轉換過程均在低層大氣中發生，而蒸發、蒸發散、對流、風之摩擦拖曳作用亦於地表一大氣交界面發生，因此微氣象學實為應用氣象之理論基礎。

微氣象觀測之項目主要包括(1)輻射(短波及長波) (2)溫度(3)濕度(4)風速等四項。由於偏重局地變化或特殊目的，微氣象觀測具有下列特性：

- (1)根據研究需要，在一地區做多點或密集觀測(水平或垂直方向)。
- (2)使用之感應器數目較多，靈敏度高。
- (3)多採用遙測方式(remote sensing)，以資料蒐集器(datalogger) 或微處理機來蒐集處理觀測資料。
- (4)配合特殊研究需求，觀測項目、感應器數目及感應器架設位置，亦需視應用之目的而異。

三、有關之基本理論

1. 熱量平衡(能量平衡) (energy balance)

就單一葉片而言，其葉片表面自日(輻)射所得

* 收稿日期：8月29日 送審日期：8月30日

1. 中央氣象局簡任技正

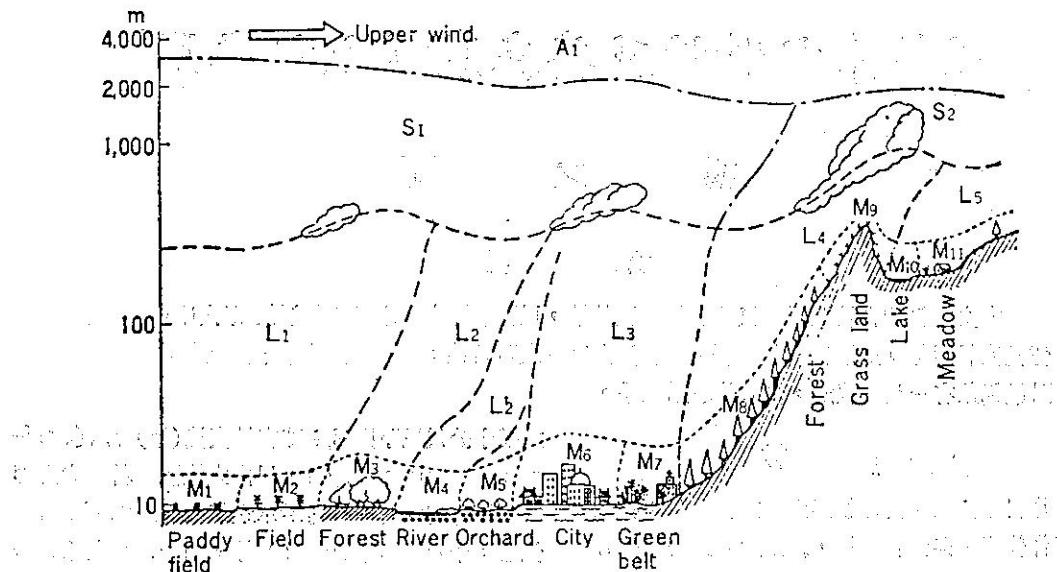


圖 1 微氣候、局地氣候、中尺度氣候，以及大尺度氣候現象圖例說明。

Fig.1 An example of micro-, local-, meso-, and macroclimatic phenomena

M₁-M₁₁: microclimatic, L₁-L₅: local climatic, S₁-S₂: meso-climatic and A₁: macroclimate (Yoshino, 1975)

到之淨熱 (R_N)，可為下列幾種形式所消耗掉。(1)可感熱(sensible heat)係由葉片溫度增加所造成之對流熱通量(heat flux by convection)(2)蒸發潛熱(latent heat)(λE)，葉片水份蒸發(散)所消耗之熱量(3)傳導熱通量(heat flux by conduction) (G) (4)光合作用轉化化學能之能量(P)(5)儲於葉片之熱量(S)，可以(1)式表之。

$$R_N = C + \lambda E + G + P + S \quad (1)$$

P、S項通常很小，可以忽略不計，故(1)式變為: $R_N = C + \lambda E + G \quad (2)$

$$R_N - G = C + \lambda E = H \quad (3)$$

H又稱為有效能量(available energy)，由式(3)可知葉片溫度增加造成之對流熱通量與蒸發潛熱(λE)間呈消長關係，葉片周圍之氣流環境能導致葉片之蒸發(散)作用增加時(例如風速增加)，會導致葉片溫度降低⁽³⁰⁾，亦能間接影響到光合速率之改變。

式(2)能量平衡之觀念不僅可應用於整個植物集團之葉冠外，亦可應用於農田表面熱量分析，即農田表面由日射所得之淨熱(R_N)，亦為可感熱(C)、蒸發潛熱(λE)及土壤熱通量(soil heat flux)等三項所消耗，茲以圖2來說明：

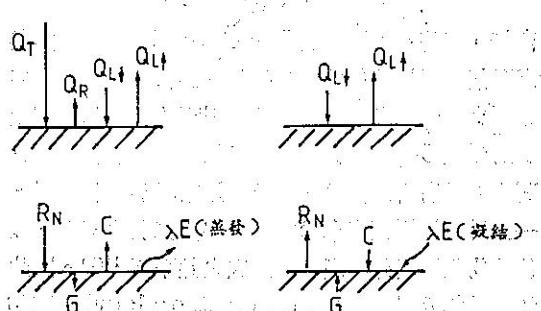


圖 2 裸地表面日、夜間各種熱通量之方向

 Q_T : 全天輻射 Q_R : 地表短波反射 $Q_{L\downarrow}$: 大氣向地表之長波輻射 $Q_{L\uparrow}$: 地表向大氣之長波輻射

地表得到能量時為(+)

失去或消耗能量時為(-)

Fig.2 Schematic representation of the heat fluxes at the earth's surface by day and by night.

如果農地之土壤性質不同，顏色不同，含水量不同，覆蓋作物不同，均會導致可感熱(C)、蒸發潛熱(λE)、土壤熱流量(G)等成份之改變，導致能量平衡改變。農藝學家在進行栽培試驗時，可藉由熱

量平衡之測計，探討物理環境影響作物生育之機制。鈴木等(1982)⁽³⁾在大豆田畦表面以黑色聚乙烯(polyethylene)膠膜覆蓋，發現在夜間C及xE較對照區(未覆蓋)者增加達3.7倍，同時覆蓋處理能減少地溫之日振幅。

2. 各種實體(entities) 垂直輸送之理論

(1) 動量輸送(momentum transfer)

當氣流水平流過地表面，由於地表摩擦之影響，速度會減低，而形成速度梯度(velocity gradient) $(\partial u / \partial z)$ ，各水平層次之分子會發生持續性交換，而造成水平動量(horizontal momentum)之垂直交換(vertical exchange)。根據牛頓移動第二定律，動量輸送會依輸送速率而產生一種力量。因此在二個鄰近層次空氣間之動量輸送，會依速度梯度($\partial u / \partial z$)產生一種黏力(viscous force)。由距地表面高度(z)處，對單位地表面積所產生之黏力 $\tau(z)$ ，又稱為切應力(shearing stress)。可以(4)式表示

$$\tau(z) = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4)$$

μ : dynamic viscosity (NSm^{-2})

如將(4)式右側分子、分母分別乘以 ρ ，則(4)式變為

$$\tau(z) = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = \nu \cdot \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \quad (5)$$

ν : kinematic viscosity (m^2s^{-1})

$\rho \cdot \mu$ 之單位為 $(\text{M/L}^3 \times \text{L/T})$ (即密度 \times 速度)，可改為 $(\text{MLT}^{-1}/\text{L}^3)$ ，亦即轉換為單位容積之動量或動量濃度。

在地表面 ($z=0$) 會對氣流流動方向承受一種摩擦力 τ_0 ，根據牛頓第二定律，地表面亦會對氣流相反方向之空氣施以一種摩擦拖曳力(friction-drag) $\tau(0)$ ；見圖3。

切應力 τ 之物理單位為(質量 \times 加速度 \div 面積)，即 $\tau \cong \text{MLT}^{-2}/\text{L}^2$ 。

如將(6)式右側分子、分母均乘以 T ，則(6)式變為

$$\tau \cong \text{MLT}^{-1}/\text{L}^2 T \quad (7)$$

$$\tau \cong \text{ML}^{-3} \times (\text{L/T})^2 \quad (8)$$

由(7)式可知切應力之單位與動量通量(momentum flux)相等，即單位時間單位面積之動量(質量 \times 速度)。由此可知地表對風(水平流動)所產生之摩擦拖曳作用，亦可單純視為地表不斷地自

空氣中吸收動量，或者由上層空氣將水平動量不斷地向地表輸送之過程。由(8)式可知切應力亦等於氣流密度與速度平方之乘積($\tau = \rho u^2$)，不過該速度係指垂直交換速度，即摩擦速度而言。

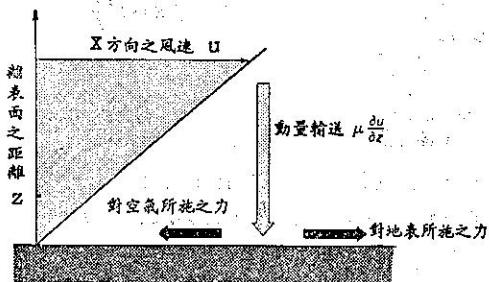


圖3 動量由流動空氣傳送至靜止地表時，所產生之有關力量

Fig.3 Transfer of momentum from moving air to a stationary surface and related forces

動量通量之大小與風速及地表粗糙度(surface roughness)有關。由動量通量之大小亦可顯示出在亂流下傳送其他實體之性質，如 H_2O 、 CO_2 、熱量等之有效程度(effectiveness)。因此動量通量亦被視為基本通量(primary flux)。

(2) 質量輸送 (mass transter)

在空氣中之 H_2O 、 CO_2 分子有濃度梯度(concentration gradient)存在時，則不同濃度空氣間之 H_2O 及 CO_2 會以擴散(diffusion)方式來傳送。如圖4係以 H_2O 為例，在一層靜止、溫度一致且含有水汽之空氣，與一吸濕性(hygroscopic) (可吸收水汽) 表面相接觸。如果空氣濕度隨距離該表面之距離增加而增加，則相近層次空氣之水分子會發生交換，使得 H_2O 分子會向吸濕性表面產生一淨向移動(net movement)，此種分子輸送通常以質量通量 E 表之。 E 係與 H_2O 分子之濃度梯度($\partial x / \partial z$)成比例，以(9)式表之。

$$E = -D \frac{\partial x}{\partial z} \quad (9)$$

D : molecular diffusion coefficient
(m^2s^{-1})

一般而言，質量輸送之係數乃視擴散氣體分子及傳送氣體(carrier gas)、分子間力量(inter-molecular force)而定。

(3) 热量輸送 (heat transfer)

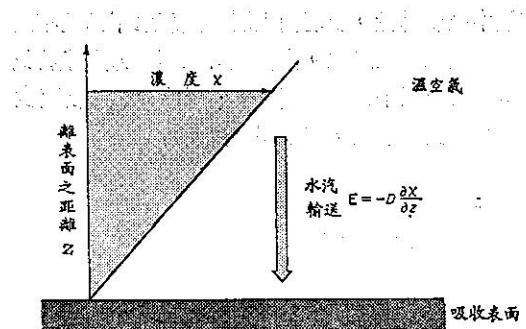


圖 4 水汽由濕空氣輸送到吸濕表面

Fig.4 Transfer of heat from still, warm air to a cool surface

在靜止空氣中之熱量傳導與動量輸送相似，由圖 5 知悉，當靜止之溫暖空氣與一較冷之表面接觸，各鄰近層次之分子因分子能量 (molecular energy) ($\frac{1}{2}mv^2$) 之交換，而導致熱量隨之交換。此種熱量傳送之通量 (C) 與溫度梯度 (temperature gradient) ($\partial T/\partial z$) 成比例。

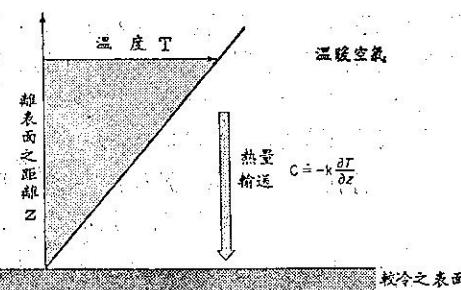


圖 5 热量由静止之温暖空气传送到冷表面

Fig.5 Transfer of vapor from humid air to an absorbing surface

$$C(z) = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

k : coefficient of thermal conductivity
($\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$)

右側 “-” 號係依數學上慣性，表示當溫度與距表面距離成正比時 ($\partial T/\partial z > 0$)，熱通量係向表面流動 ($C < 0$)

如將(10)式右側分子，分母分別乘以 ρ 及 C_p ，則(10)式變為

$$C = \frac{-k}{\rho C_p} \cdot \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial z} = -K \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial z} \quad (11)$$

ρ : 空氣密度

C_p : 空氣定壓比熱

ρC_p 係為空氣之容積熱量 (volumetric heat capacity of air) ($\text{Jm}^{-3}\text{C}^{-1}$)

$\rho \cdot C_p \cdot T$ 表示空氣之單位容積熱含量

$$K = k / \rho C_p \quad (12)$$

K : thermal diffusivity (m^2s^{-1})

上述各種動量、質量及熱量之垂直輸送，均係假設空氣流動為層流 (laminar flow) 或靜止情形下，其空氣分子之運動係以擴散方式 (diffusion) 自由運動。如比較(5)、(9)、(11)式之 v 、 D 、 K 等係數之單位均為 m^2s^{-1} ，亦表示該三種輸送均係由相同之分子擾動 (molecular agitation) 方式，同時動量、熱量及質量 (CO_2 、 H_2O) 之擴散係數均具有相似之體積 (size)，亦都隨溫度而變。

但是在實際大氣中，甚少有層流情形出現，而以亂流 (turbulent flow) 情形居多。在亂流中則不以單一分子運動，而係以整塊較大集團之空氣自由運動，此種空氣塊 (air mass) 稱為渦流 (eddy)，渦流之體積隨離地高度增加而增大。由於亂流大氣中各種實體 (entities) 之輸送，均以渦流形式交換，故動量、水汽量、 CO_2 及熱量之亂流擴散係數 K_M 、 K_V 、 K_C 、 K_H 均較層流擴散係數 v 、 D_v 、 D_C 、 K 為大。亂流大氣中動量、熱量、水汽量及 CO_2 之垂直輸送通量以下列(13)、(14)、(15)、(16)式表之

$$\tau = K_M \frac{\partial \rho u}{\partial z} \quad (13)$$

$$E = -K_V \frac{\partial x}{\partial z} \quad (14)$$

$$C = -K_H \frac{\partial \rho C_p T}{\partial z} \quad (15)$$

$$P = K_C \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (16)$$

K_M 、 K_V 、 K_H 、 K_C 單位均為 m^2s^{-1}

通常在層流大氣中，各種實體擴散係數約為 $10^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，見表 1。但在近地氣層之亂流大氣中，各種亂流擴散係數值約為 $10^4\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ，較層流擴散係數高約 10^5 倍。

3. 阻力 (Resistance)

式(5)(9)(10)均據有與費克氏擴散律 (Fick's law of Diffusion) 有相似之形式，即

通量 = 擴散係數 × 濃度梯度

如以式(9)為例，將右側積分，則

表 1 不同溫度之空氣密度、熱傳導率及動量、水汽CO₂之分子擴散係數
Table 1 Properties of air, water vapour and CO₂

溫 度		空氣密度		飽和空氣虛溫		水的蒸發潛熱		乾空氣的熱傳導率		水之分子擴散係數	
符號	T	ρ_a	$\rho_{as}(T)$	T _v	λ	γ	κ	K	ν	D _v	D _c
單位 °C	°K	kgm ⁻³		°C	Jg ⁻¹	mbar°C ⁻¹	mWm ⁻¹ K ⁻¹		cm ² s ⁻¹		
-5	268.2	1.316	1.314	-4.57	2513	0.643	24.0	0.183	0.129	0.205	0.124
0	273.2	1.292	1.289	0.64	2501	0.646	24.3	0.189	0.133	0.212	0.129
5	278.2	1.269	1.265	5.92	2489	0.649	24.6	0.195	0.137	0.220	0.133
10	283.2	1.246	1.240	11.32	2477	0.652	25.0	0.202	0.142	0.227	0.138
15	288.2	1.225	1.217	16.87	2465	0.655	25.3	0.208	0.146	0.234	0.142
20	293.2	1.204	1.194	22.62	2454	0.658	25.7	0.215	0.151	0.242	0.147
25	298.2	1.183	1.169	28.62	2442	0.662	26.0	0.222	0.155	0.249	0.151
30	303.2	1.164	1.145	34.97	2430	0.665	26.4	0.228	0.160	0.257	0.156
35	308.2	1.146	1.121	41.73	2418	0.668	26.7	0.235	0.164	0.264	0.160
40	313.2	1.128	1.096	49.03	2406	0.671	27.0	0.242	0.169	0.272	0.165
45	318.2	1.110	1.068	57.02	2394	0.675	27.4	0.249	0.174	0.280	0.170

ρ_a : density of dry air.

κ : thermal conductivity of dry air.

$\rho_{as}(T)$: density of air saturated with water vapour at temperature T.

K : thermal diffusivity of dry air.

T_v : virtual temperature of saturated air. D_v: diffusion coefficient of water vapour in air.

λ : latent heat of vaporization of water. D_c: diffusion coefficient CO₂ in air.

γ : $c_p p / \lambda_s$ - the psychrometer constant.

ν : kinematic viscosity of dry air.

$$E = -D \frac{\partial X}{\partial z} = \frac{X_{(21)} - X_{(22)}}{\int_{z_1}^{z_2} dz/D} \quad (18)$$

式右側分母 $\int_{z_1}^{z_2} dz/D$ 即為分子擴散阻力 (diffusion resistance), 亦為傳導度 (conductance)

g 之倒數, 單位為 sm^{-1} 。

$$r = g^{-1} = \frac{1}{\int_{z_1}^{z_2} dz/D} \quad (19)$$

式(18)與歐姆定律 (ohm's law) 很類似, 即電流 (i) = 電壓 (V) ÷ 電阻 (ohm)

將(19)式修正後亦可適用於動量、熱量、質量之擴散通量。

$$\text{動量: } \tau = \rho u \div \int dz/v \quad (21)$$

$$\text{熱量: } C = \rho C_p T \div \int dz/k \quad (22)$$

$$\text{質量: } E = X \div \int dz/D \quad (23)$$

通常分別以 r_M, r_H, r_V, r_C 來表示一物體表面之動量、熱量、水汽、CO₂ 之輸送阻力。此種阻力觀念不僅適用於層流大氣之分子擴散, 亦可適用於亂流大氣。同時此種阻力概念在作物微氣象研究中很重要, 因為作物之株高、密度、株型等會影響到作物與大氣各種實體輸送 (交換) 阻力, 吾人可藉由物理式計算出有關 CO₂, H₂O 之阻力 (r_C, r_V 等), 及測訂作物葉冠頂層與大氣某層間之 CO₂, H₂O 濃度梯度, 可分別計算該作物集團與大氣間交換 CO₂, H₂O 之速率。Gäastra (1959) 利用阻力之觀念以式 (23) 來估算植株之光合速率

$$P = \frac{[CO_2]_1 - [CO_2]_2}{r_a^{CO_2} + r_m^{CO_2} + r_s^{CO_2}} \quad (24)$$

[CO₂]₁ 為外界 CO₂ 濃度

[CO₂]₂ 為葉肉細胞內發生 Carboxylation 部位之 CO₂ 濃度

r_a^{CO₂} : 界層阻力, r_m^{CO₂} : 葉肉細胞阻力,

r_s^{CO₂} : 氣孔阻力

四、作物葉冠與大氣間動量、熱量、質量($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$)之垂直輸送

當氣流通過一廣闊而且表面均勻之作物葉冠上方時，由於植株對氣流之摩擦拖曳作用，會造成作物與大氣間發生動量之垂直輸送或交換，植株不斷地自大氣吸收動量，或大氣連續地向地面植株輸送動量，其輸送通量或速率，不僅視風速大小，亦受植株高度、株型、栽植密度之影響。同時在所有觀測項目中，以風速最為重要，因為風速不但控制動量之輸送，亦在熱量與質量($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$)之輸送過程扮演重要的角色，茲分別以短莖及高莖作物上方之風剖面來說明：

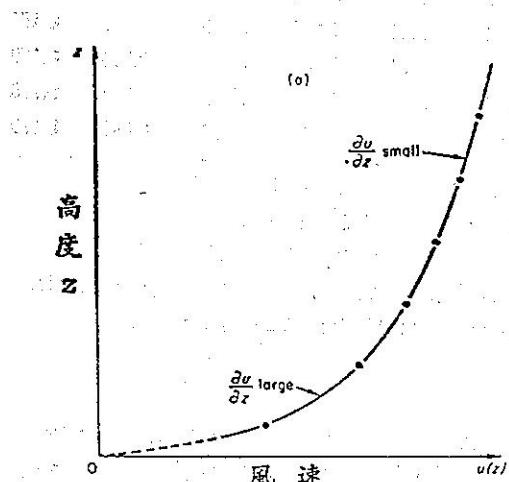


圖 6 裸地或短莖作物葉冠上層風速(u)與高度(z)之關係
(a) 及風速與高度對數($\ln z$)之關係(b)。

Fig 6. Typical wind profile over an open, level site: (a) plotted linearly against height Z ; and (b) plotted against the logarithm of Z .

由式(6)可看出，當 $u(z)$ 固定時，則 z_0 愈大（即裸地或葉冠表面愈粗糙），其垂直交換之速度（摩擦速度）(u_*) 亦愈大。

2. 高莖作物葉冠上層之風剖面

當水平氣流（風）通過高莖作物集團上層時，風速所受之拖曳力（drag force）較裸地或短莖作物集團者為大。同時其上層風速剖面變化與裸地或短莖作物不同。因高莖作物葉冠上層風速 $u(z)$ 係與 $\ln(z-d)$ 呈直線相關，即

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k(z-d)} \quad (6)$$

轉換成對數式，則為

1. 裸地或短莖作物上層之風剖面

氣流通過裸地或短莖作物上層時，如為中性（neutral）大氣，則風速係隨高度呈指數函數上升。其上層之風剖面可以對數方程（the logarithmic wind profile equation）來表示，見圖 6

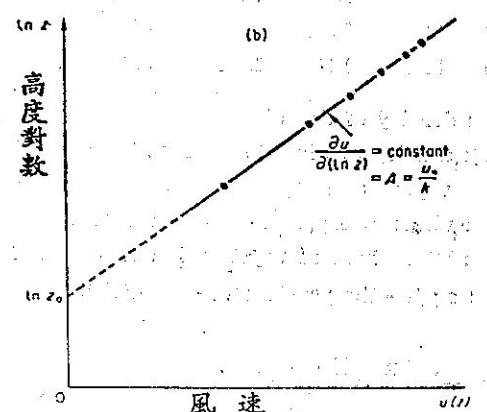
$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (7)$$

$u(z)$ ：高度 z 之水平風速

u_* ：摩擦速度（friction velocity）或渦流速度（eddy velocity）

k ：Von Karman's constant 0.41

z_0 ：粗糙長度（roughness length）



$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z - d}{z_0} \quad (7)$$

d 值為地面修正量（zero plane displacement）為作物集團各個植株吸收動量之平均層度（mean level），一般約為株高之 0.7~0.8，如株高愈高則該作物集團吸收動量之平均層度亦愈高。同時要超過該層以上才能發生亂流交換（垂直交換）。 z_0 為粗糙長度（roughness length）係表示作物集團單一植株吸收動量之有效性，通常為株高之 0.1。植株愈高， z_0 愈大，其對動量吸收能力亦愈強。

Monteith (1981) 及 Thom (1975) 導出高莖

作物集團與大氣間輸送動量之阻力 r_a^M 與粗糙長度 z_0 之關係如下式

$$\begin{aligned} r_a^M &= \frac{u(z)}{(u_*)^2} \\ &= [\ln(z-d)/z_0]^2 / [k^2 u(z)] \end{aligned} \quad (28)$$

如計算二層高度 z_1, z_2 間之動量輸送阻力，則

$$\begin{aligned} r_a^M(z_1, z_2) &= \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_M} = \frac{1}{u_*^2} \int_{z_1}^{z_2} du \\ &= \frac{u_2 - u_1}{u_*^2} \end{aligned} \quad (29)$$

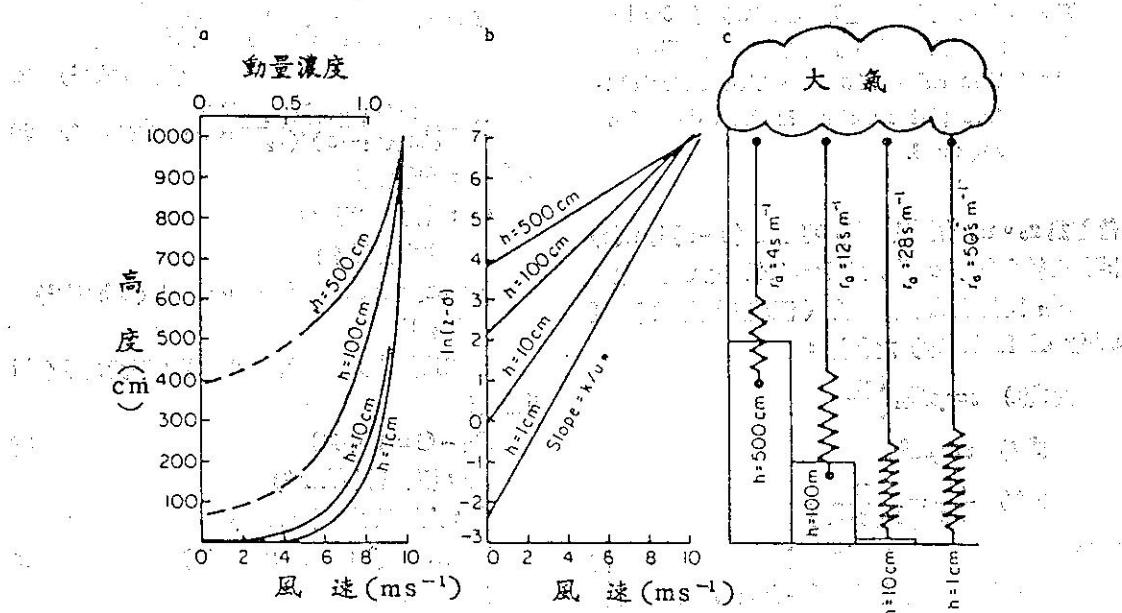


圖 7 株高對動量交換之影響⁽⁷⁾。a. 四種不同株高 (h) 之作物葉冠上層之動量剖面變化，虛線表示外插值。b. 利用風速與 (z-d) 之對數值標訂出粗糙長度值 Z_0 。c. 利用式(28)估算出由理論之植物動量受源 (sink) 與離地 10m 高之大氣間之動量輸送阻力值 r_a^M 。Grace (1981)

Fig. 7 Momentum exchange as affected by vegetation height.

$[\ln(z-d)]$ 所得之截距 z_0 值亦較大。反之株高愈矮者 ($h=1\text{cm}$)，則斜率 k/u_* 較大，所得之 z_0 值亦較小。圖 7c 係根據式(28)計算出不同株高之作物葉冠與大氣間 (10m 高) 之動量輸送阻力 r_a^M 。株高高者 ($h=500\text{cm}$)，其與大氣間之動量輸送阻力則愈小，($r_a^M=4\text{sm}^{-1}$) (表示動量輸送容易)；株高矮者 ($h=1\text{cm}$)，其輸送阻力大 ($r_a^M=50\text{sm}^{-1}$)，植株自空氣中截獲 (吸收) 動量之能力亦差。

2. d, z_0 及 u_* 值之估算：

由式(28)可知作物株高愈高， z_0 愈大，則該作物集團與大氣間之動量輸送阻力 r_a^M 愈小。由圖 7a 可看出不同株高之作物葉冠上方之風剖面形狀不同。株高愈矮者 ($h=1\text{cm}$)，其風速隨高度之變化較快，表示其上方空氣混合過程要比株高高者之效率為差。反之株高高者 ($h=500\text{cm}$) 之作物葉冠上方風剖面曲線形狀較為緩和，表示其上方空氣混合較佳。圖 7b 將縱軸改為 $\ln(z-d)$ 時，更能顯示各種不同株高上方風剖面之形狀差異，株高愈高者 ($h=500\text{cm}$) 之直線斜率 k/u_* 較小，同時在縱軸

根據作物葉冠上方風剖面資料，估算 d 值有二種方法(1)試值法 (trial method)，通常 d 值為 $0.7 \sim 0.8h$ (h 為株高)，因此可利用接近 $0.7 \sim 0.8h$ 之不同假設值 δ 代入式(2)。如所求得之關係為直線，則該假設值 δ 即為吾人所求之 d 值，見圖 8。

(2)利用式(2)以三種高度 z_1, z_2, z_3 之風速 u_1, u_2, u_3 以下式求之

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 - u_3} = \frac{\ln(z_1-d) - \ln(z_2-d)}{\ln(z_1-d) - \ln(z_3-d)} \quad (30)$$

當 d 值求得後，根據式(2)在縱軸上所得之截距

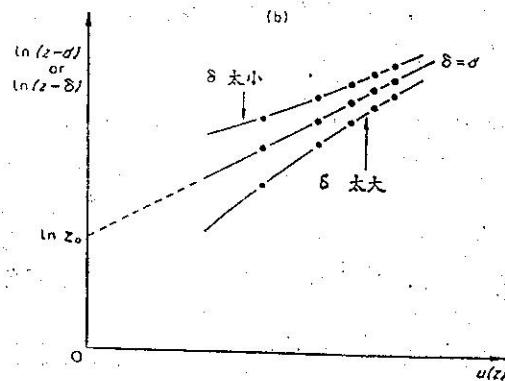


圖 8 利用不同之假設值 δ 代入式(27)，如 $\delta=d$ ，則其關係為直線。該 d 值亦為正確值⁽²⁴⁾。

Fig. 8 The value of δ for which a straight-line plot results, is the value of d required.

值即為 $z_0 \cdot u_*$ （摩擦速度）可由 $\ln(z-d)$ 對 $u(z)$ 關係直線之斜率 u_*/k ，以 $k=0.41$ 代入而求之。

K_M 動量亂流擴散係數（渦流擴散係數）（eddy diffusivity）之估算：

$$\text{由式(3)} \quad \tau = \rho K_M \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\text{式(8)} \quad \tau = \rho u_*^2$$

$$\text{式(2)} \quad \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k(z-d)}$$

可得

$$K_M = k u_* (z-d) \quad (3)$$

在完全強制性對流(fully-forced convection)大氣中（即大氣中所有之垂直輸送運動均由大氣與地表摩擦反應所產生或維持者），各個實體（性質）之渦流擴散係數均相等，即

$$K_M = K_V = K_H \quad (3)$$

此為相似性假設(the similarity hypothesis)。根據相似性假設，吾人可由作物葉冠上方風剖面資料，所求得之動量渦流擴散係數 K_M ，間接求得熱量、水汽、 CO_2 之渦流擴散係數 K_H 、 K_V 及 K_C 。

3. 作物葉冠與大氣間動量、熱量、質量(CO_2 , H_2O)垂直輸送通量之估算方法。

微氣象學者通常採用下列兩種方式來估算作物葉冠與大氣間動量、熱量、質量之垂直輸送通量。

(1)空氣力學法(Aerodynamic method) (2)包威比值法(Bowen's ratio method)。

(1)空氣力學法

本法係利用微氣象儀器，在作物葉冠上方之境

界層內(boundary layer)測訂五點高度之風速剖面資料，計算出 d 值後，再根據葉冠上層二點高度之風速(u_1, u_2)、溫度(T_1, T_2)、濕度(e_1, e_2)、 CO_2 濃度(C_1, C_2)，利用下列(33)、(34)、(35)、(36)式分別計算出二層間動量(τ)、熱量(C)、水汽量(E)及 CO_2 (p)之垂直輸送通量（通常以1小時為單位之觀測值來計算）。

$$\tau = \frac{\rho k^2 (u_1 - u_2)^2}{\{ \ln[(z_1 - d)/(z_2 - d)] \}^2} \quad (\text{Nm}^{-2}) \quad (33)$$

$$C = \frac{\rho C_p k^2 (u_1 - u_2) (T_2 - T_1)}{\{ \ln[(z_1 - d)/(z_2 - d)] \}^2} \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (34)$$

$$E = \frac{\rho C_p k^2 (u_1 - u_2) (e_2 - e_1)}{\lambda \nu \{ \ln[(z_1 - d)/(z_2 - d)] \}^2} \quad (\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (35)$$

$$p = \frac{k^2 (u_1 - u_2) (C_1 - C_2)}{\{ \ln[(z_1 - d)/(z_2 - d)] \}^2} \quad (\text{g/cm}^2) \quad (36)$$

ρ : 空氣密度

C_p : 空氣定壓比熱

λ : 水之蒸發潛能

ν : psychrometric constant ($\text{mb}^\circ\text{C}^{-1}$)

(2)包威比值法

包威比值法係根據耕地表面能量平衡之觀念衍生而來

$$R_N - G = C + \lambda E \quad (37)$$

R_N : 淨輻射(Wm^{-2})

G : 土壤熱通量(Wm^{-2})

$$\text{以 } C/\lambda E = \beta \text{ (Bowen ratio)} \quad (38)$$

代入式(37)可得

$$\lambda E = \frac{R_N - G}{1 + \beta} \quad (39)$$

$$C = \frac{R_N - G}{1 + \frac{1}{\beta}} \quad (40)$$

$$\text{而 } \beta = \frac{C}{\lambda E} = \nu \frac{\partial T}{\partial e} = \nu \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \quad (41)$$

β 即可用作物葉冠上方二層高度(z_1, z_2)之溫度(T_1, T_2)及濕度(e_1, e_2)之觀測值代入而求得。因此根據農作物上方之淨輻射(R)，土壤之熱通量(G)之測訂值及 β 值，亦可計算作物葉冠上方二層高度 z_1, z_2 間之蒸發潛熱(λE)、可感熱(C)之垂直輸送通量。

吹風距離(Fetch)

前述應用空氣力學原理在作物集圃表面估算各種實體之垂直輸送通量時，其前題為該作物集圃必須廣大而且表面均勻。同時微氣象感應器之測訂位

置均應在境界層以內，才能保證在亂流空氣中，各種實體於平衡梯度 (equilibrium gradient) 下，求得其垂直輸送通量。但是在田間常常由於栽培作物不同，其株高或株型之差異，會使得表面粗糙度不一致。當風 (氣流) 吹過不同作物集團表面時，其對氣流之摩擦拖曳力 (τ) 亦不同，導致境界層改變。因此要在一較為粗糙之作物集團表面 (例如株高較高) 上測訂各種實體輸送通量，而且其上風側有較矮小之作物存在時，感應器之架設位置必須要距該作物受風前緣有足夠之距離，以便能在新的境界層達到平衡處，測訂各種實體交換通量，此段

距離稱為吹風距離 (fetch)。有關境界層之高度 (δ) 與吹風距離 (x) 之關係，許多學者看法不同，Elliott (1958) 認為 $\delta = 0.75x^{0.8}$ ，而 Bradley (1968) 認為 $\delta = 0.1x^{0.8}$ ，但是實際上許多學者認為 x/δ 之比值低於或等於 200:1 即可，此表示當境界層高度為 1 m 時，其吹風距離應為 200m，故其感應器架設於距受風前緣 200m 的地方。茲以圖 9 來說明當氣流自運動場上短莖草地吹至較為粗糙之水稻田表面時，其新的境界層發展過程，以及利用空氣力學法及包威比值法測訂水稻葉冠與大氣間各種實體垂直輸送通量時，感應器之架設位置。

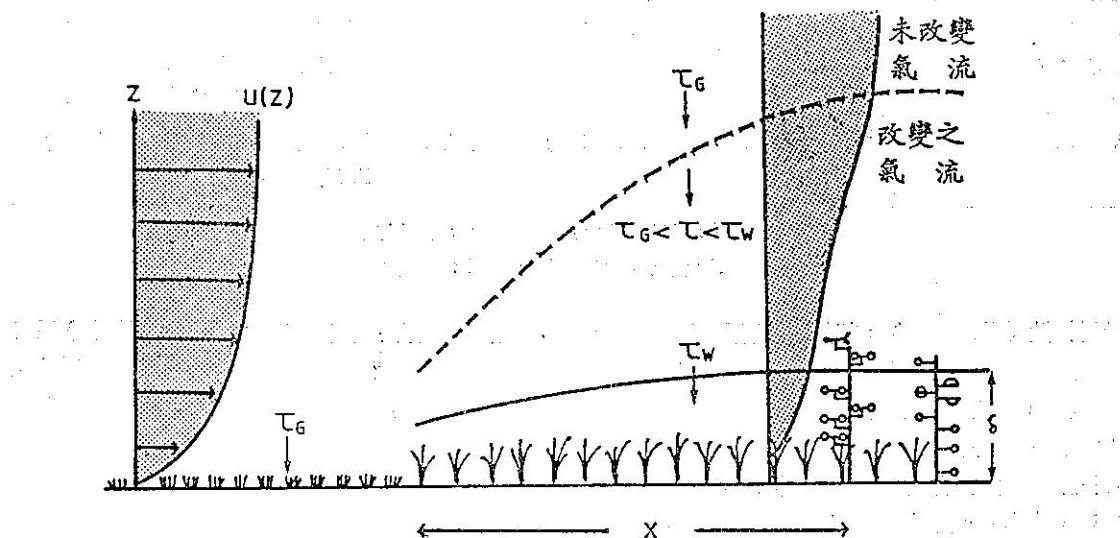


圖 9 當氣流自短莖草地運動場吹至較為粗糙之水稻田表面時，新的境界層發展過程，在短莖草地上之動量通量為 τ_G ，在水稻田上新的境界層 δ 內之通量為 τ_W ，此時測訂境界層 δ 內之通量，觀測儀器需架於距水稻田前緣距離 X 處， X 為吹風距離。

Fig. 9 Development of a new equilibrium boundary layer when air moves from a short grass playground (smooth) to a paddy field (rougher surface).

4. 作物葉冠內各種氣象要素剖面變化——作物微氣候

前節曾討論在作物葉冠上層與大氣境界層內各層次間之各種實體之輸送通量，可藉由空氣力學法及包威比值法來估算。在作物葉冠內之輸送通量雖然無法利用該二法來計算，但是歷年來許多學者亦能利用氣象儀器在葉冠內測訂自土壤表面至葉冠頂層之各種氣象要素 (包括日射、溫度、濕度、CO₂、風速等) 剖面變化，來研究作物葉冠內熱量、水汽、CO₂ 之供源 (source) 及受源 (sink) 之分

布，(表 2)，茲分別以可感熱 (C) 及 CO₂ 之分布為例來說明：

(1) 可感熱：

根據式(1)，習慣上當可感熱通量 (C) 向地表輸送時定義為 (-)，向上為 (+)。當獲得作物葉冠內之溫度 (T) 剖面資料時，可計算不同層次間之可感熱通量 (C)，如為正值表示其為向上輸送，如 C 為負值表示通量向地表輸送，但是僅表示出輸送方向。當 C_(z+dz) 大於 C_(z)，即 $\partial C / \partial z > 0$ 時，表示在葉冠內 (z+dz) 與 (z) 層間之可感熱垂直通

表2 有關作物微氣象研究之參考文獻
Table 2 Literature on crop micrometeorology

作物	日射量	淨輻射	氣溫與土壤熱通量	土壤溫度與土壤熱通量	水蒸汽	CO_2	風與動量
Barley	Pi(12)	Pi(12)	Pai(12)		Pai(12)	Pai(12)	PaFa(12)
Bulrush millet		Pi(1)	Pi(1)		PFi(1)		
Cotton	Fa(19,22)	Fa(20,22)		F(22)			Pa(22)
Lucerne	Fa(21)		PFa(21)		PFa(21)	PFa(21)	Pa(21)
Maize	Pi(27)	Pi(3)	PFi(3)		PFi(3)	Pia(26)	PFai(25)
						Fi(8)	
						PFa(10)	
						PFi(11)	
Orange	Fa(9)	PFia(9)	Pi(9)		Pi(9)		Pia(9)
Potato			Pia(13,15,28)	PF(28)	Pia(13,28)		Pia(13)
Sugar beet			Pia(14)		Pia(14)	Pia(23)	Fa(16)
Sunflower	Fa(5)		PFa(5)		PFa(5)	PFa(5)	Pa(5)
Wheat		Fa(4)	Pia(14,18)	PF(14,28)	Pia(18)	PFa(4)	Pia(18)
					Fa(4)		

F : 通量 (flux) a : 葉冠上方

P : 潛勢 (potential) i : 葉冠內

量為輻散 (diverges)，即離開該層之可感熱通量大於進入該層之可感熱通量，因此在 $(z+dz)$ 與 (z) 層間，吾人視為可感熱之「供源」 (source)；反之在葉冠內某二層間 $\partial C/\partial z < 0$ ，即此層內之可感熱通量為輻合 (converges) 時，視為「受源」 (sink)。同時根據 $\partial C/\partial z$ 體積之大小，可判

斷供源與受源之強度 (strength)。圖10(a)係日間作物葉冠內典型之溫度剖面分布，圖10(b)(c)係分別根據溫度剖面分布所計算之熱通量 C 及 $\partial C/\partial z$ 分布，由 10(c) 可明顯地看出葉冠內之可感熱之供源及受源區域。

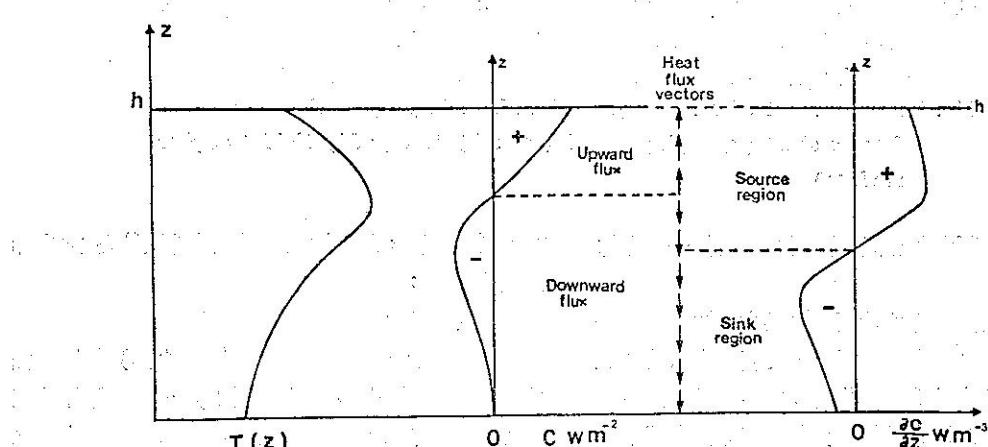


圖10. 作物葉冠內日間典型之溫度(T)，可感熱通量(C)及通量梯度($\partial C/\partial z$)剖面分佈。(Thom, 1975)

Fig. 10. Typical daytime profiles of temperature T , the vertical flux of sensible heat C and its gradient $\partial C/\partial z$ within a plant community.

(2) CO_2

在田間栽培作物，由於各層葉面積密度 (leaf area density) 及受光量不同，因此光合速率不同，導致在葉冠內 CO_2 之濃度 (ϕ) 不同，由 ϕ 之分布，根據式(6)，可算出 CO_2 通量 P 之分布。當 P 向下輸送時定義為 (+)，向上輸送為 (-)。再將 P 對高度 (z) 微分，則由 $\partial P / \partial z$ 可看出其葉冠內 CO_2 供源與受源之區域，不過與可感熱相反， $\partial P / \partial z >$

0 之區域為受源，表示其光合作用很強，對 CO_2 吸收能力大，即 CO_2 在此區域內輻合，而在 $\partial P / \partial z < 0$ 之區域，則為供源， CO_2 在此區域為輻散，同時表示其呼吸作用很強，有 CO_2 之釋出。圖 11 為以玉米為例說明在日間葉冠內之 CO_2 濃度及通量分布，與受源、供源之區域。由圖 10 可知在葉層內 CO_2 濃度較低之區域，亦為光合作用最旺盛之區域，其受源之體積及強度亦最大。

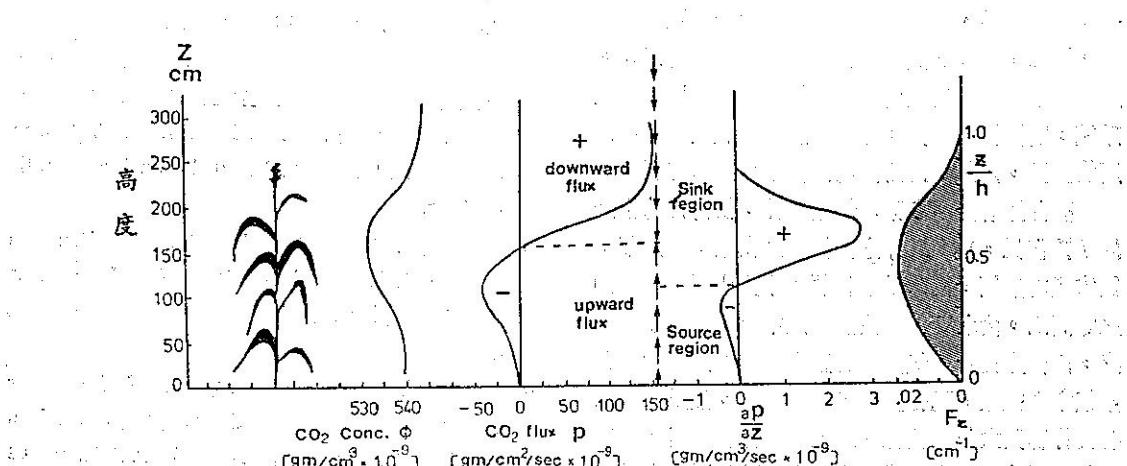


圖 11. 玉米葉冠內日間典型之 CO_2 濃度 ϕ 、通量 P 及通量梯度 $\partial P / \partial z$ 剖面分布， $F(z)$ 為葉面積密度。(Lemon & Wright 1969)。

Fig. 11. Typical daytime profiles of CO_2 concentration ϕ , the vertical flux P , and its gradient $\partial P / \partial z$ within a maize community.

5. 微氣象研究在農業之應用

(1) 微氣象觀測可根據農藝、園藝、森林學者之特殊實驗目的，配合試驗設計，提供測訂田間局地氣象環境之技術，藉以精確地瞭解試驗作物周圍物理環境之變化及其對試驗作物生育及產量之影響。

(2) 測訂農地輻射平衡，可以研究不同性質之農地、覆蓋材料及作物種類對日射量吸收利用之情形，以有效地運用太陽能。

(3) 測訂作物葉冠與大氣間 CO_2 、 H_2O 垂直輸送通量，可以估算田間自然狀態下作物集團之光合作用，呼吸作用及蒸散作用。

(4) 根據數理模式，以多種介量 (d , z_0 , u_*) 來評估作物集團之株型結構 (architecture)，栽培密度對大氣間發生各種實體交換能力之影響，以做為在不同氣候環境下，提供改進栽培技術或育種之參考。例如在多風、寒冷之地區要選擇株型較為矮小之作物或品種，因為株型矮小者 z_0 亦較小，

使得該作物集團與大氣間交換熱量之阻力 r_a^H 較大，(根據相似擬說 $K_M = K_H = K_V = K_C$ ，故 $r_a^M = r_a^H = r_a^V = r_a^S$)，因此較矮之作物集團不易散失熱量，能保持葉冠溫度，不致遭受寒害。

(5) 測訂作物葉冠內熱量、日射、 CO_2 、 H_2O 之剖面分布，可瞭解在不同時間及環境下葉冠內熱量、 CO_2 、 H_2O 等輸送通量之受源與供源分布，及其與葉面密度等株型結構之關係，提供做為改進栽培方法之參考。

(6) 利用微氣象儀器測訂人為方法 (例如：擋風、遮蔭) 對農田微氣象之改變及對作物生育、產量之影響可瞭解作物生育最適合之物理條件，亦可做為農業氣象災害預防之參考。

六、結語：

微氣象係根據物理學之原理來探究或闡述大氣—植物—土壤間各種狀態 (states) 與過程 (pro-

-cesses) 之關係。譬如作物集團與大氣間動量輸送乃根據牛頓移動定律 (Newton's law of motion)，熱量 (輻射) 平衡係根據熱力學第一定律 (The first law of thermodynamics)，當以梯度 (gradient)，通量 (flux) 或阻力 (resistance) 等觀念來分析各種實體輸送通量時，則根據類似歐姆定律及費克氏擴散定律。因此一位農業研究人員在從事有關微氣象研究時，除需具備農 (園) 藝栽培原理、植物生理學、土壤學等基本農學理論以外，亦須具有物理學、熱力學及流體力學之概念，所以微氣象研究人員之培育甚為困難。同時從事微氣象研究所使用之觀測儀器及資料處理系統，所需經費昂貴，亦非一般農業試驗研究單位所能負擔，因此國內鮮少有關微氣象之研究報告。

臺灣雖有高溫多雨之優越條件，使得作物生長的季節很長，農作時序之安排較為密集，但是氣象災害頗為頻繁，同時地形複雜，中央山脈、雪高山脈等高山，由北至南縱貫於島之中央，復與季風相交，使得臺灣各地氣候有明顯之差異；因此如何藉微氣象之觀點，配合臺灣各地之地形、氣候來研究各種作物與大氣之關係，以改善農作物或農業設施之物理環境，提高農業生產之產量及品質，亦為目前農業氣象發展之目標。

期冀各農業單位能注重農業氣象人員之培育，並能充實微氣象觀測設備，除實施基本氣象觀測以外，亦能配合試驗設計在農作物集團內外、農田、畜舍、溫室等進行微氣象觀測，則不僅能研究改善農業生產之物理環境，亦能與育種學及植物生理學家相配合，擴大微氣象在農業之應用，使臺灣各地之農業氣候資源充份予以利用。

七、參考文獻

1. Begg, J. E., Bierhuizen, J. F., Lemon, E. R., Misra, D., Slatyer, R. O. and Stern, W. R. 1964. Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet. *Agric. Meteorol.*, 1:294.
2. Bradley, E. F. 1968. A micrometeorological study of velocity profiles and surface drag in the region modified by a change in surface roughness. *Q. Jl R. met. Soc.*, 94:361.
3. Brown, K. W. and Covey, W. 1966. The energy budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a corn field. *Agric. Meteorol.*, 3:73-96.
4. Denmead, O. T. 1969. Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*. *Agric. Meteorol.*, 6:357.
5. Eckardt, F. E., Heim, G., Methy, M., Saugier, B. and Sauvezon, R. 1971. Fonctionnement d'un écosystème au niveau de la production primaire mesurés effectuées dans une culture d'*Helianthus annuus*. *Oecol. Plant.*, 6:51.
6. Elliott, William P. 1958. The growth of the atmospheric internal boundary layer. *Trans. Amer. Geo. Union* 36:1048-1054.
7. Grace, J. 1981. Some effects of wind on plants. In: *Plants and Their Atmospheric Environment*. (Grace, J., E. D. Ford & P. G. Taxis, eds.) pp. 31-56. Blackwell Scientific Publications.
8. Impens, I. 1965. Experimentele Studies van de Thysische en Biologische Aspekter van de Transpiratie, Rykslandbouwhogerschool, Gent.
9. Kalma, J. D. 1970. Some aspects of the water balance of an irrigated orange plantation. Special Publication, Volcani Institute of Agricultural Research, Israel.
10. Lemon, E. R. 1960. Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. *Agron. J.*, 52:697.
11. Lemon, E. R. and Wright, J. L. 1969. Photosynthesis under field conditions. X. A. Assessing sources and sinks of carbon dioxide in a corn crop using a momentum balance approach. *Agron. J.*, 61:408.
12. Long, I. F., Monteith, J. L., Penman, H. L. and Szeicz, G. 1964. The plant and its environment. *Met. Rdsch.*, 17:97.
13. Long, I. F. and Penman, H. L. 1964. The micrometeorology of the potato crop. In: *The Growth of the Potato*, J. D. Ivins. & F. L. Milthorpe. Butter-worthes, London.
14. Mattsson, J. D. 1961. Microclimate observations in and above cultivated crops with special regard to temperature and relative humidity. *Lund Stud. Geogr.*, Ser. A, No. 16.
15. Mattsson, J. O. 1966. The temperature cli-

- mate of potato crops. Lund Stud. Geogr., Ser. A, No. 35.
16. Monteith, J. L. and Szeicz, G. 1960. The carbon dioxide flux over a field of sugar beet. *Q. Jl R. met. Soc.*, 86:205.
 17. Monteith J. L. 1981. Coupling of plants to the atmosphere. In: Plants and Their Atmospheric Environment. pp. 1-30, Blackwell Scientific Publications.
 18. Penman, H. L. and Long, I. F. 1960. Weather in wheat: an essay in micrometeorology, *Q. Jl R. met. Soc.*, 86:16.
 19. Rijk, D. A. 1967. Water use by irrigated cotton in Sudan. I. Reflection of short wave radiation. *J. appl. Ecol.*, 4:561.
 20. Rijk, D. A. 1968. Water use by irrigated cotton in Sudan. II. Net radiation and soil heat flux. *J. appl. Ecol.*, 5:685.
 21. Saugier, B. 1970. Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. *Oecol. Plant.*, 5:179.
 22. Stanhill, G. and Fuchs, M. 1968. The climate of the cotton crop. *Agric. Meteorol.*, 5:183.
 23. Tamm, E. and Krzysch, G. 1959. Beobachtungen des Wachstumsfaktors CO₂ in der Vegetationszone. *Z. Acker-u. PflBau*, 107:275.
 24. Thom, A. S. 1975. Momentum, mass and heat exchange in plant communities. In: Vegetation and the Atmosphere, Vol. 1, Principles. (J. L. Monteith, ed.) pp. 57-109, Academic press, London.
 25. Uchijima, Z. and Wright, J. L. 1964. An experimental study of air flow in a corn plant air layer. *Bull. natn. Inst. agric. Sci., Tokyo*, A. II.
 26. Uchijima, Z., Udagawa, T., Horie, T. and Kobayashi, K. 1967. CO₂ environment in a corn plant canopy. *J. agric. Met.*, Tokyo, 23:1.
 27. Uchijima, Z., Udagawa, T., Horie, T. and Kobayashi, K. 1968. Penetration of direct solar radiation into corn canopy. *J. agric. Met.*, Tokyo, 24:141.
 28. Van Eimern, J. 1964. Untersuchungen über das Klima in Pflanzengeständen, Ber. dt. Wetterd., Offenbach, No. 96.
 29. Yoshino, M. M. 1975. Climate in a small area. An introduction to local meteorology. University of Tokyo Press.
 30. 伊藤代次郎, 長谷場徹也。1984. 水稻の葉温、蒸散に及ぼす短波放射と風速の影響。農業気象 (J. Agr. Met.) 40(1): 21-28.
 31. 鈴木晴雄, 宮本硬一, 松尾直幸。1982. 畦面被覆の微気象に関する研究。V. 大豆の植生と黒色有孔ポリエチレンフィルムが地温及ぼす影響。農業気象 (J. Agr. Met.) 38(2):135-144.

The Characteristics of Micrometeorology and Its Application on Agriculture

Che-Yuan Young

Senior Specialist, Central Weather Bureau

ABSTRACT

This paper described the scale and characteristics of micrometeorology, and introduced the basic theories involved in micrometeorology such as energy balance and the vertical transport of entities between earth surface and the atmosphere. The author also reviewed the possible application pathway of micrometeorology on the agriculture, in order to give a clear idea for agriculture institutes and researchers about micrometeorology, so as to enlarge its application achievements on agriculture.