

近地面邊界層——水稻集團與大氣間 動量、熱量與水汽量之垂直輸送通量分析(一)

楊之遠 曾文柄

柳 中 明

中央氣象局

台灣大學大氣科學系

摘 要

本文應用中央氣象局嘉義氣象測站之微氣象自動觀測系統，在水稻集團上方所測定之近地面溫度、濕度、風速、輻射量等資料，以分析水稻葉冠與近地面（4公尺以下）大氣間動量、熱量與水汽量在74年4月～6月間之垂直輸送情形。

所得結果顯示1日間水稻集團上方風場、溫度場與濕度場變化極大。因此自水稻集團向上傳送之熱量與水汽量在12～13時間達最大值，而自大氣向下傳送之動量在17～19時達高值。另外4～6月間，時平均風速逐漸減弱，風向趨穩定，是以動量垂直輸送在水稻分蘖期（4月2日～20日）為相當重要，但至成熟期（5、6月），由於氣溫與相對濕度增加，因此熱量與水汽量自水稻向上輸送，為相當重要之水稻與大氣相互作用機制。此外，本文尚提供地表粗糙度 Z_0 ，摩擦速度 U_s ，熱量通量、水汽量通量、日射量、淨輻射量等之相關方程式，不僅希望能探水稻生產與近地面物理環境之關係，亦能有助於氣象模式中對地表邊界條件之決定。

關鍵詞：近地面邊界層，水稻葉冠與大氣相互作用

前 言

Tennekes (1981) 指出近地面大氣內（約100公尺以下），科氏力不再重要，平均風受地面摩擦拖曳產生亂流，不斷進行垂直向動量、熱量與水汽量的輸送，其特徵為平均風隨高度成對數函數分佈，Blackadar and Tennekes (1968) 稱之為慣性次層 (inertial Sublayer)。而在近地面20 m以內，摩擦張力幾為一常值，因此定義為等張力層 (Constant Stress Layer)，又稱近地面邊界層 (Surface Boundary Layer)。Businger (1981) 分析亂流動量方程式，指出風切項為產生亂流的主要機制，而垂直向熱力不穩定所激發熱力對流為次要機制。

本文應用中央氣象局嘉義氣象測站之微氣象自動觀測系統，所測定之近地面溫度、

濕度、風速、輻射量等資料，並同時栽種水稻，以控制近地面物理結構，以分析水稻葉冠與近地面（4 m 以下）大氣間動量、熱量與水汽量之垂直輸送情形。

本文為一系列研究之第一篇，主要將分析資料收集期間大氣特徵，並將初步依 Businger (1981) 概念，先假設熱力不穩定所產生的亂流在垂直向大氣輸送過程中為次要，而在中性大氣的假設下，分別採用空氣力學法與能量平衡法，計算動量、熱量與水汽量之垂直輸送通量，以作初步之特徵分析。未來則將計算雷強森數 (Richardson Number)，依熱力不穩定情形，修正本文所得結果。

類似實驗與資料分析在世界各地均曾進行 (Monteith, 1975)，但各地區由於環境結構不同，綜觀大氣狀況不同，以及有興趣之地面栽種植物不同，因此所得結果雖有共通之物理特徵，但在細節上則不盡相同。本文所得結果，未來可供台灣區氣象模式研究者，有關近地面邊界層內大氣與地面交互作用之邊界條件之選定。同時，本文分析水稻葉冠與大氣間之交互作用情形，配合水稻生長資料，將有助於了解作物在本地區之生長習性，與大氣配合情形，以作為農業專家改良品種或設計栽種方式之研究參考。

通量計算

在中性大氣下，近地面摩擦張力 (τ) 或稱垂直動量通量為 (本文引用符號請參考附錄)：

$$\tau = -\rho \overline{U^1 W^1} = \rho U_*^2 \quad (1)$$

U_* 為摩擦速度。同時，近地面平均風切為：

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{U_*}{k} \frac{1}{Z} \quad (2)$$

當高度 h 的植物生長在地面上時，(2) 式需修正為

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{U_*}{k} \frac{1}{(Z-d)} \quad (3)$$

式中， d 為修正量，物理上代表植物吸收動量之平均層高度，或地面舉升高度，約為 h 之 0.6 ~ 0.8 倍。(3) 式積分後，即可得對數函數分佈之平均風場 (沿著摩擦張力的方向)

$$U(Z) = \frac{U_*}{k} \ln \frac{Z-d}{Z_0} \quad (4)$$

式中 Z_0 為粗糙度，風速 $U(Z_0)$ 為 0。凡科門常數 (Vonkarman Constant) k 約為 0.41。

設若植物 h 高度以上，有 3 點測量資料，即可用以估計 d 與 Z_0 。也即由

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1 - U_3} = \frac{\ln(Z_1 - d) - \ln(Z_2 - d)}{\ln(Z_1 - d) - \ln(Z_3 - d)} \quad (5)$$

可先估算 d ，再代入(4)式計算 Z_0 。(5)式中 U_1, U_2, U_3 為 Z_1, Z_2, Z_3 高度處之風速。

1. 空氣力學法

將(3)式代入(1)式，則

$$\tau = \rho k^2 \left[\frac{\partial U}{\partial \ln(Z-d)} \right]^2 \quad (6)$$

以差分法處理，則若在 Z_1, Z_2 高度處測得風速 U_1, U_2 即可得

$$\tau = \rho k^2 \frac{(U_1 - U_2)^2}{[\ln(Z_1 - d) - \ln(Z_2 - d)]^2} \quad (7)$$

再依相似假設 (Similarity Hypothesis)，對垂直溫度剖面、水汽剖面，作相似處理，則垂直熱量通量 C 為

$$C = \rho C_p \overline{W^1 T^1} = -\rho C_p U^* T^* \quad (8)$$

而溫度梯度剖面為

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T^*}{k} \frac{1}{(Z-d)} \quad (9)$$

(9)式中 T^* 為相對應於 U^* 之尺度項。將(9)式代入(8)式中，乃得

$$C = -\rho C_p k^2 \frac{\partial U}{\partial \ln(Z-d)} \frac{\partial T}{\partial \ln(Z-d)} \quad (10)$$

$$\approx \rho C_p k^2 \frac{(U_1 - U_2)(T_2 - T_1)}{[\ln(Z_1 - d) - \ln(Z_2 - d)]^2} \quad (11)$$

(11)式中 T_1, T_2 為在 Z_1, Z_2 高度處之溫度。

同理，水汽梯度剖面 (q 為絕對濕度) 為：

$$\frac{\partial q}{\partial Z} = \frac{q^*}{k} \frac{1}{(Z-d)} \quad (12)$$

而垂直水汽通量 E 為

$$E = \rho \overline{W^1 q^1} = -\rho U^* q^* \quad (13)$$

q^* 為相對應於 U^*, T^* 之尺度項。將(12)式代入(13)式中，並採一般習用之水汽壓 e ($q = \epsilon e / p$)，同時定義 $\nu = C_p P / \lambda E$ ，乃得

$$E = \frac{-\rho C_p k^2}{\lambda \nu} \frac{\partial U}{\partial \ln(Z-d)} \frac{\partial e}{\partial \ln(Z-d)} \quad (14)$$

$$\approx \frac{\rho C_p k^2}{\lambda \nu} \frac{(U_1 - U_2)(e_2 - e_1)}{[\ln(Z_1 - d) - \ln(Z_2 - d)]^2} \quad (15)$$

採用(7)，(11)與(15)式計算 τ, C, E 即為 Thom (1975) 所提出之空氣力學法 (

Aerodynamic Method)。明顯地， τ 為向下傳送， C 、 E 則為向上傳送。也即地面上植物傾向於自平均風中吸收動量，但同時輸送可感熱與水汽入大氣內。

2 包威比值法

依空氣力學法，將觀測值代入方程式中，可計算得 τ 、 C 、 E ，但可能並無法滿足近地面能量收支平衡的要求。Thom (1975) 乃提出包威比值法計算 C 、 E 。

近地面空氣柱內，能量收支平衡可以下式表之

$$R_n = G + C + \lambda E + H + \mu A \quad (16)$$

配合圖 1，(16) 式中淨輻射能量 R_n 為向下之土壤熱通量 G ，向上之熱通量 C 與水汽潛熱通量 λE ，水平向上之熱量輻散通量 H ，和向下之植物吸收熱量 μA 等所平衡。一般由於估計困難，同時若假設小範圍內水平溫度梯度小，則 H 可以忽略。而植物所能吸收之熱量 P ，在低植物（譬如水稻）時，小於其他各項 1~2 個尺度以下，可以忽略。所以

$$R_n - G = C + \lambda E \quad (17)$$

此時定義包威比值 β 為熱量通量 C 與水汽潛熱通量 λE 之比值

$$\beta = C / \lambda E \quad (18)$$

則若能先經由其他方式估計 β 值，則在實測 R_n 與 G 值下，可估計

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (19)$$

與

$$C = (R_n - G) / (1 + 1/\beta) \quad (20)$$

至於 β 值的估計，若將(10)式與(14)式代入(18)式中，可得

$$\beta = \nu \frac{\partial T}{\partial Z} / \frac{\partial e}{\partial Z} = \nu \frac{\partial T}{\partial e} \approx \nu \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \quad (21)$$

明顯地， β 值的估計參考了空氣力學法的假設，但包威比值法經由(17)式強制性地約束 C 與 λE 的總和，因此所得結果可能與空氣力學法所得結果不同 (Thom et al. 1975)。不過，除非吾人能直接測量 C 與 E 值，否則二不同方法所得結果，將可提供熱量與水汽量傳送之基本重要特徵，雖然可能並非絕對正確估計。

比較包威比值法與空氣力學法，可發現前者無法估計動量通量 τ ，且不受熱力不穩定影響。在本文中，吾人將僅比較觀測資料在空氣力學法中性大氣假設下，可以計算 d 、 Z_0 、 τ 、 C 與 λE 情況下，二方法所計算 C 與 E 之不同。

實驗設計

本研究在中央氣象局嘉義氣象測站進行，試驗田四周圍為廣潤平坦之水稻栽種區，選種水稻品種為台農 67 號，採用機器插秧方式於 74 年 2 月 13 日栽種，行株距 $30\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ ，施肥量與日間管理與一般農民相同。實驗期間為 1 期作生育期（2～5 月），並在試驗田中央架設垂直分佈之微氣象感應器作剖面觀測。上風側之吹風距離應足可使架設點之界層到達平衡，所測得各層高度間之實體（熱量、動量、質量）濃度亦應視為平衡。水稻分蘗期（4 月 2 日～20 日），株高約 35～65 公分。成熟期（5～6 月中），株高約 70～120 公分（圖 2）。本文主要分析 4 月以後，水稻成長至少 30 公分後，與大氣間交互作用之特徵。

於水稻插秧後，在田區中央架設各種微氣象感應器（圖 3）。風速、溫濕度各為 5 點（5 種高度），最高者為 4 公尺，各點架設高度隨水稻生長每隔一星期作一次調整，並校驗準確度。淨輻射計向南架於 2 公尺高處，土壤熱通量計埋於表土下 2 公分處，架設位置見圖 2。所有之感應器均利用電纜連接，將各種感應信號（類比信號），經信號調諧器輸入 A-Ten 型資料蒐集器，以小時為單位計算基本均值，其結果資料由印字機列表印出。表 1 列所採用各類儀器。

當然，此處的實驗可設計為分析短時間內的近地面大氣結構，則資料時間平均間隔可縮短到 1 分鐘以內，以研究微觀之亂流動量、熱量、水汽量傳送。但此類研究，與本文第一作者所期望了解之水稻整期生長期間內，大氣與水稻之交互作用研究，在尺度上不盡相同。同時，所得研究結果，不若小時平均結果代表相當長時間內之平均特徵，是以無法用於氣象模式之邊界條件設定。

結 果

一、實驗期間大氣特徵

圖 4 a, b 為實驗期間（1985 年 4 月 1 日～6 月 14 日），實驗站離地 3 公尺高度處之風向，風速每 5 日變化情形。大致而言，平均風向在 4、5、6 月間，介於西北～西南向之間。4 月下旬變化較大，且在 4 月底 1 日之間風向變化甚大。5 月～6 月間趨穩定。同時，風速之日變化甚大，平均介於 2 m/s 左右，明顯地平均風速由 4 月起逐漸減弱。大略而言，清晨時風速弱，然後逐漸增強，至正午達高值，再逐漸減弱。

圖 4 c 與 d 則為水稻葉冠高度處（參考圖 2），溫度與相對濕度每 5 日變化情形。明顯地溫度由 4 月起逐漸增加，且 1 日間，氣溫由清晨起增溫至正午達高值，再下降至晚上為低值。相對濕度則反之，在正午為低值，在晚上為高值，且 1 日之間之變化甚大，顯然為水汽量與氣溫二者日變化大之故。

表 1 中央氣象局嘉義氣象測站所採用之各類微氣象感應器

儀 器 名	廠 牌	Model	準 確 度
Micro Response Vane	Weathertronic	2020	$\pm \tau^\circ$ over $0 - 360^\circ$
Micro Response Anemometer	"	2030	$\pm 1\%$ or 0.15 mph over 0.5 - 100 mph range
Net Radiometer	"	3035	$\pm 5\%$ over -0.3 to 1.5 ly / r
Platinum Temperature Sensor	"	4470-99	$\pm 0.1^\circ\text{C}$ over -10 to $+60^\circ\text{C}$
Humidity Sensor	"	54101-99	$\pm 0.1^\circ\text{C}$ and $\pm 3\%$ respectively over -10° to $+60^\circ\text{C}$
Short Wave Radiation	"	3015-99	$\pm 1\%$ over $0 - 2.0$ ly/min

表 2 (a) dh 與 Z_0 之相關方程式

$h(\text{cm})$		35	45	55	65	70	80	85	90	95	110
$dh = a + bZ_0$	n	12	16	36	10	58	35	30	25	36	30
	a	24.03	30.04	47.31	46.83	56.83	68.35	79.13	75.25	86.85	98.93
	b	-1.54	0.14	-3.94	0.19	-1.00	-1.56	-2.98	-2.46	-2.24	-2.00
	r	-0.66	0.03	-0.68	0.13	-0.48	-0.78	-0.92	-0.86	-0.88	-0.95

表 2 (b) dh 與 U^* 之相關方程式

$h(\text{cm})$		35 ~ 40	45 ~ 55	60 ~ 65	70 ~ 80	85 ~ 90	95 ~ 110
$dh = a + bU^*$	n	33	51	29	93	55	66
	a	27.65	39.12	58.61	57.46	73.16	93.19
	b	0.30	-0.31	-0.62	-0.32	-0.92	-1.27
	r	0.28	-0.78	-0.75	-0.21	-0.61	-0.70

設若分析 1 日間垂直溫度、濕度與風速剖面之變化，則更可注意到日變化在此微氣象研究中之重要。以 5 月 13 日為例（圖 5），自夜間至清晨期間，由於葉冠表面長波輻射之影響，因此葉冠表面之氣溫較鄰近上層者為低（圖 5 a），在葉冠頂部至 120 cm 處（距地面 180 cm）溫度隨高度上升而增加，超過 120 cm 其溫度即無明顯變化，此種形式之溫度剖面稱為放熱型或逆轉型，尤其在清晨（03 ~ 06 時）最為明顯，同時此時整個溫度剖面值亦最低。於日出後，葉冠表面接受太陽輻射導至溫度迅速增加並且較鄰近氣層為高（09 時以後），因此溫度隨高度上升而減少，惟其距葉冠 180 cm 以上溫度不再變化，同時在葉冠頂層與上方 180 cm 處之溫度梯度在正午 12 時最大，可達 6.8°C ，同時整個溫度剖面值亦較高，此種剖面溫度形式又稱為吸熱型，在下午 19 時整個溫度剖面變化很小，溫度均在 26°C 左右。

水稻葉冠上層之濕度（水汽）剖面（圖 5 b），因受溫度之影響，在清晨水稻葉冠頂層與鄰近上層空氣濕度（水汽壓 e ）差異不大。日出以後水稻植株之蒸散作用及水面之蒸發作用（二者合稱為蒸發散（*evapotranspiration*）），逐漸增加，其水汽量較鄰近氣層為高，以中午 11 ~ 12 時到達最高約 48 mb，同時葉冠頂層與上方 280 cm 處之水汽壓差可達 17 ~ 19 mb。在下午 18 ~ 21 時，在水稻葉冠與上方 40 cm 處之水汽壓有 4 ~ 5 mb 之差距，在 40 cm 以上無明顯之變化。

水稻葉冠上層之風速剖面變化（圖 5 c），大致上與(4)式符合，即與高度呈指數函數關係，但其梯度在清晨（03 ~ 08 時）期間較小，在下午（15 時）之梯度最大。

二、利用空氣力學法估算水稻葉冠與大氣間動量、熱量、水汽量之輸送通量

圖 6 a, b, 與 c 分別為垂直修正量 d ，地表粗糙度 Z_0 ，與摩擦速度 U_* 等每 5 日變化圖。由於水稻株高不斷成長（圖 2）， d 與 Z_0 均由初始之小值，不斷增加。 d 值約由 4 月初之 0.3 增至 6 月之 0.5。且一般介於 1 ~ 0.1 之間。由於株高愈長，則受風力影響愈趨明顯，因此 d 值與風速（圖 4 b）間呈負相關，即風速大時 d 值小，風速小時 d 值大。地面粗糙度 Z_0 與風速間之相關呈負相關，即風速大時 Z_0 小，風速小時 Z_0 大。再觀之 U_* ，其與 3 m 高度處之風速呈明顯之正相關，且幾乎為同一變化步調。由以上分析可見，平均風速大時，動量不斷由平均風場中傳遞至亂流場中，因此 U_* 亦增大。而水稻之垂直修正高度 dh 因風速大而降低，因此 Z_0 亦降低。當然在水稻成長初期，株高不高，因此 U 與 d 與 Z_0 之相關不明顯，甚至 d ， Z_0 變化不大，但當 h 大於 80 cm 後，彼此之相關性即非常明顯。

表 2 內提供有關 dh 與 Z_0 ， U_* 之相關，並以 h 高度改變為分界。大致上 dh 與 Z_0 ，與 U_* 均呈負相關。相關性在 h 值小時較不明顯。此點明確顯示，近地面植物愈高時， U_* 與 Z_0 趨小。

根據(7)式利用風速剖面資料可估算水稻葉冠與上層空氣之動量交換通量（ τ ）。由於風速隨離地高度上升而增加，因此動量係由上方向下傳送（ τ 為正值）。在分蘗期（

4月2日~20日) (株高約35~65 cm)，其全月變化似乎無明顯之規則(圖7 a)。在5月8日以後，全日中由於清晨及夜間之風速梯度較小，因此其動量交換通量 τ 亦最少僅約 $5 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}$ ，至午後13~16時最高。一般 τ 可達 $300 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}$ 以上(圖7 c)，最高值可達 $450 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}$ (圖7 d)。如就全期觀察(以5日為間隔)，分別以每日8~9時，12~13時，17~19時之交換通量來比較，可發現一般以下午17~19時期間之動量交換通量為高(圖8 a)。

另外，根據溫度剖面觀測資料利用(11)式可估算水稻葉冠與大氣間之熱量輸送通量 C 。一般而言在日間由於水稻葉冠截受日射而增溫，溫度較大氣為高，因此熱量由葉冠向上層空氣輸送(為十值)，其輸送通量(C)由清晨起逐漸增加至中午(12~14時)達到最高(圖9 a)，最高值可達 200 W/m^2 (圖9 a)，亦可能降至 20 W/m^2 。清晨至夜間由於葉冠表面長波輻射，喪失較多的熱量，其溫度與鄰近氣溫很接近，甚至較低，因此熱量輸送通量 C 很低(接近0)，亦可能出現負值，最低可達 -40 W/m^2 (圖9 b)。圖8 b為每5日變化情形，一般而言以(12~18時)間之熱量交換通量為高。且4~6月間平均變化趨緩。

根據濕度(水汽壓剖面觀測資料)利用(15)式可估算水稻葉冠與大氣間之水汽輸送通量 E (圖10)，發現雖有部份係不規則變化，大致上 E 之全日變化與 C 相似。清晨及夜間，由於水稻葉冠與大氣間濕度梯度較小，因此 E 值亦較小，接近零。但是日出後，由於水稻植株葉片之蒸散作用及水面蒸發作用增加，水稻葉冠上之水汽含量逐漸高於上方鄰近空氣，水汽由葉冠向大氣中輸送(為十值)，輸送通量 E 於中午時(12~14時)到達最高，一般可達 $200 \times 10^{-6} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，最高可達 $355 \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (圖10 a)。在中午以後逐漸減少，通常至下午16時以後變化比較緩慢，此表示水稻集團之蒸散作用於中午為最高。圖8 c為每5日變化情形，一般而言，以(12~13時)間之水汽量交換通量為高。4~6月間，水汽量交換通量逐漸增高，此與水稻成長，與氣溫增加有極大正相關。由於圖4 b顯示4~6月間平均風速逐漸減小，而圖8 a顯示動量交換通量亦逐漸減少，圖8 b顯示熱量交換通量僅有緩慢之增加趨勢。因此，水稻與大氣間之主要相互作用過程，顯然由初期之動量輸送過程(由上而下)，轉變至後期之水汽量輸送過程(由下而上)。

水稻葉冠與大氣間熱量輸送通量 C ，係與日射量(S)呈正比，即日射量愈高，水稻葉冠向大氣輸送之熱量愈多，主要因為水稻葉冠表面截受日射量愈高，葉冠溫度與大氣溫度相差愈大。由表3可看出二者之相關係數均達極顯著($r = 0.69, 0.79$)。同理水稻葉冠與大氣間之熱量輸送通量亦與淨輻射 R 呈正比，二者在4, 5, 6月之觀測值相關係數均達顯著水準。(表3)。($r = 0.81, 0.86, 0.73$)。

水稻葉冠與大氣間之水汽輸送通量 E ，與日射量 S 亦成正比，在中午時為最高。二者在4, 5, 6月份之觀測值顯示二者之間是正相關。(表3) ($r = 0.72, 0.52, 0.57$)。表3中所列相關方程式，可供數值模擬者之參考。

表3 利用空氣力學法估算之水稻葉冠

(A)熱通量C與日射量S (B)C與淨輻射量R (C)水汽通量E與S
(D)E與R (E)C與E 之相關分析

月 份	A				B				C				D				E			
	C = a + b S				C = a + b R				E = a + b S				E = a + b R				C = a + b E			
	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ
4月	31	2.62	0.093	0.69	30	-5.58	0.16	0.81	35	6.30	0.25	0.64	26	8.79	0.16	0.85	33	-8	0.42	0.72
5月	27	-25.13	0.79	0.79	28	21.11	0.13	0.86	31	50.93	0.33	0.76	25	63.22	0.37	0.65	18	72.04	0.80	0.52
6月	10	61.81	0.47	0.47	10	26.30	0.26	0.73	11	30.38	0.25	0.69	17	6.79	0.46	0.71	25	3.41	0.5	0.67

三、利用包威比值法估算水稻葉冠之熱量及水汽輸送通量

以包威比值法藉熱平衡觀念來估算水稻葉冠與大氣間之各種實體通量時，必須測定水稻葉冠之淨輻射量 (R_n) 及土壤熱流量 (G)。圖 11 係分別於 4 月 3 日、5 月 18 日、6 月 5 日，在試驗水稻田所觀測之全天日射量 (S)、淨輻射 (R_n)、土壤熱流量 (G) 之日變化，由圖 11 可知葉冠表面所得之日射量及淨輻射於清晨起逐漸開始增加，至正午時達到最高值，其後逐漸下降，日射量於夜間為零，淨輻射於夜間為負值，(地表向大氣之長波輻射 $>$ 大氣向地表之長波輻射)。而土壤流量於夜間為正值(熱量由土壤深處向地表流動)。在太陽出來後，地表接受淨熱，溫度上昇，向土壤深處傳送熱量，土壤熱流量為負值，在中午時負值為最低。

利用 (19) 式藉能量平均之觀念所估算之水稻葉冠與大氣間之可感熱 (Sensible heat) 輸送通量 C ，其全日變化趨勢一般與前述用空氣力學法所估算之變化趨勢大致相似，最高值大部份出現在中午(圖 12 a、b、d、g)，惟使用包威比值法所估算之值較空氣力學法者略高，例如 4 月 3 日 12 時空氣力學法所估算之 C 為 50 W/m^2 ，而包威比值法之估算值 C_b 為 60 W/m^2 (圖 12 a)。5 月 29 日 12 時由空氣力學法之估算值約為 100 W/m^2 ，而包威比值法之估算值可達 240 W/m^2 (圖 12 f)。

利用包威比值法估算出水稻葉冠之潛熱通量 (λE) (式 8)，再除以當時氣溫之水汽蒸發潛熱 (λ)，可估算水稻葉冠與大氣之水汽交換通量 E_b 。由圖 13 b、d、e、f 可發現包威比值法所估算之 E_b 與空氣力學法所估算之 E 變化趨勢大致相似，最高值亦出現於中午時間，然而 E_b 通常較 E 值為低。例如 4 月 12 日 12 時，由空氣力學法所估算之水稻葉冠水汽通量 E (向上) 超過 $160 \times 10^{-6} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，而包威比值法所估算之 E_b 僅達 $120 \times 10^{-6} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (圖 13 b)，於 5 月 4 日更明顯地看出 E 值全日變化均高於 E_b (圖 13)。

圖 14 a、b 為每 5 日 C_b 與 E_b 之變化，比較圖 8 b 與圖 14 a，並比較圖 8 c 與圖 14 b，可看出 C_b 值略較 C 值為高， E_b 略較 E 值為低。而由於包威比值法硬性要求滿足(17)式，因此當大氣條件不合乎假設時，即可能產生極大之 C_b 與 E_b 值，此皆應視為錯誤而忽略之。因此，一般而言， C_b 在 4~6 月間亦如同 C 值變化緩慢，且一般 12~13 時間 C_b 量較高。 E_b 在 4~6 月則有緩慢增加之趨勢(較圖 14 c 中 E 值增加之趨勢為緩)。同時 12~13 時間 E_b 量較高。

根據包威比值法所估算之水稻葉冠熱通量 C_b ，與日射量 S 呈明顯之正相關，表 4 於 4、5、6 月之相關係數 r 分別為 (0.70, 0.86, 0.94)，同時於水稻分蘗末期至成熟期 (5、6 月)，由於葉冠發育完整，葉面積指數增加，葉面截獲日射能力增加，即需少量日射即可增加水稻葉冠與大氣間之熱量輸送通量，因此在表 4 中可看出 C_b/S 斜率值隨時間增加，4 月為 0.11，5 月為 0.13，6 月為 0.29。

包威比值法所估算之 C_b 與淨輻射 R 呈極顯著正相關，4、5、6 月觀測值之相關係數分別為 0.9, 0.9, 0.96 (表 4)。

(A) 熱通量 Cb 與日射量 S (B) Cb 與淨輻射量 R (C) 水汽通量 Eb 與 S
 (D) Eb 與 R (E) Cb 與 Eb 之相關分析

表 4 利用包威比值法估算水稻葉

月 份	A				B				C				D				E			
	Cb = a + b S				Cb = a + b R				Eb = a + b S				Eb = a + b R				Cb = a + b Eb			
	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ	n	a	b	γ
4月	32	-3.46	0.11	0.7	27	-3.07	0.19	0.90	40	-10.94	0.21	0.86	34	-5.91	0.28	0.95	32	94.7	-1.23	-0.51
5月	34	11.68	0.13	0.86	35	-9.59	0.26	0.9	38	-11.06	0.18	0.98	26	-4.93	0.28	0.98	23	288.83	-1.82	-0.82
6月	11	-20.31	0.29	0.94	10	3.79	0.37	0.96	12	6.23	0.1	0.73	14	-1.12	0.22	0.87	15	266.38	-1.85	-0.86

包威比值法所估算之水汽輸送通量 E_b 與日射量呈正相關，二者於 4、5、6 月之觀測值之相關係數為 0.86，0.98、0.73（表 4），同時 E_b 與淨輻射 R 亦成正相關，4、5、6 月之觀測值相關係數為 0.95，0.98，0.87。

利用包威比值法所估算之 C_b 與 E_b 二者呈負相關，於 4、5、6 月之觀測值相關係數分別為 -0.51、-0.82、-0.86，與前節所述用空氣力學法所估算之 C 及 E 關係呈相反結果（表 4）。

比較表 3 與表 4，可注意到 C 、 E 與 S 、 R 之相關不若 C_b 、 E_b 與 S 、 R 之相關高，明顯地是因為包威比值法要求滿足(17)式。但也因如此， C_b 與 E_b 間呈負相關。而 C 與 E 間為正相關。比較圖 8 與圖 14，可看出 C_b 與 E_b 之估算中誤差大，且出現次數多，因此包威比值法在微氣象之研究中由於強制性假設太多，可靠性實可存疑。

結 論

本研究利用中央氣象局嘉義氣象測站的微氣象觀測設備，研究水稻葉冠與近地面大氣間動量、熱量與水汽量之交換現象。所得結果大致為：

1. 近地面 4 公尺以內，大氣之風場、溫度場與濕度場之日夜變化極大，是以也影響到水稻與大氣間之交互作用。一般，中午 12 ~ 13 時間水稻葉冠溫度最高，因此向上傳送之熱量通量大。同時水汽之向上傳送通量亦達最高值。而風場垂直梯度在下午 15 時以後達最高值，因此動量由大氣向下傳送之通量，在下午 17 ~ 19 時間達高值。

2. 4 ~ 6 月 1 期水稻生長期間，3 公尺高度處 1 小時平均風速逐月減弱，風向亦由西北趨向西南而漸穩定。氣溫則由 4 月起不斷上升。同時相對濕度亦不斷上升。分析動量、熱量與水汽量通量，則可發現由於平均風速漸弱，動量向下輸送通量亦趨減小，熱量向上輸送通量則緩慢增加，水汽向上輸送通量為逐月增加。由此可見，水稻分蘗期（4 月 2 日 ~ 20 日），水稻株高 35 ~ 65 公分間，近地面亂流運動不斷自平均風場中吸收動量往下輸送，此為大氣相助水稻生長之重要機制。水稻成熟期間，自水稻往上輸送熱量與水汽量入平均氣流中，反成重要機制。

3. 本文比較空氣力學法與包威比值法，並因假設熱力不穩定所產生的亂流在垂直向大氣輸送過程中為次重要，而取中性大氣的假設，因此所有資料的分析，均是在第 2 節中空氣力學法可以計算得 τ 、 C 與 E 的情況下，與包威比值法所得之 C_b 與 E_b 相比較。由於包威比值法，不受熱力不穩定的影響，因此本文分析二法所得結果在特徵上大致相似，似足以顯示中性大氣的假設在 4 公尺以內大氣可能並非錯誤。不過，未來吾人仍將加以修正，以得更為正確之結果。

另外，在二法之比較中，吾人發現包威比值法傾向於高估 C 值、與低估 E 值，同時因要求滿足(17)式，因此 E_b 與 C_b 值易產生極大誤差，且二者在迴歸分析中呈不合理之負相關。仔細分析，很可能包威比值法由能量收支平衡方程式中著手，以假設之水平熱量通量 H 可以忽略，並非絕對可行之故。

4. 本文中表 3 與表 4 分別提供空氣力學法與包威比值法所估算之 C 、 E 與日射量 S 、淨輻射量 R 以及 C 與 E 彼此間之相關方程式等。由於相關係數均相當高（個案達 15 個以上者），因此可供氣象模式近地面邊界條件之使用。一般近地面日射量 S 或淨輻射量 R ，大致可由時間、緯度、垂直可降水量、地表溫度等決定，再由 S 或 R 決定 C 與 E ，應為適當。不過，由於水稻高度之改變與所採用之方程式有密切關係，因此相關方程式要隨月份調整。另外表 2 中提供 d 與 Z_0 ， d 與 U^* 之相關方程式等，其在邊界層氣象中之應用性極大。

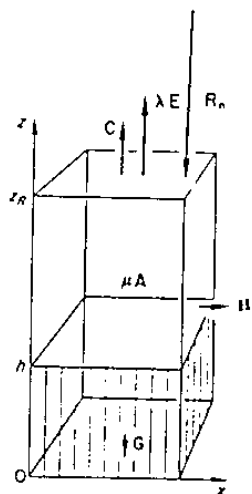


圖 1 近地面能量平衡示意圖

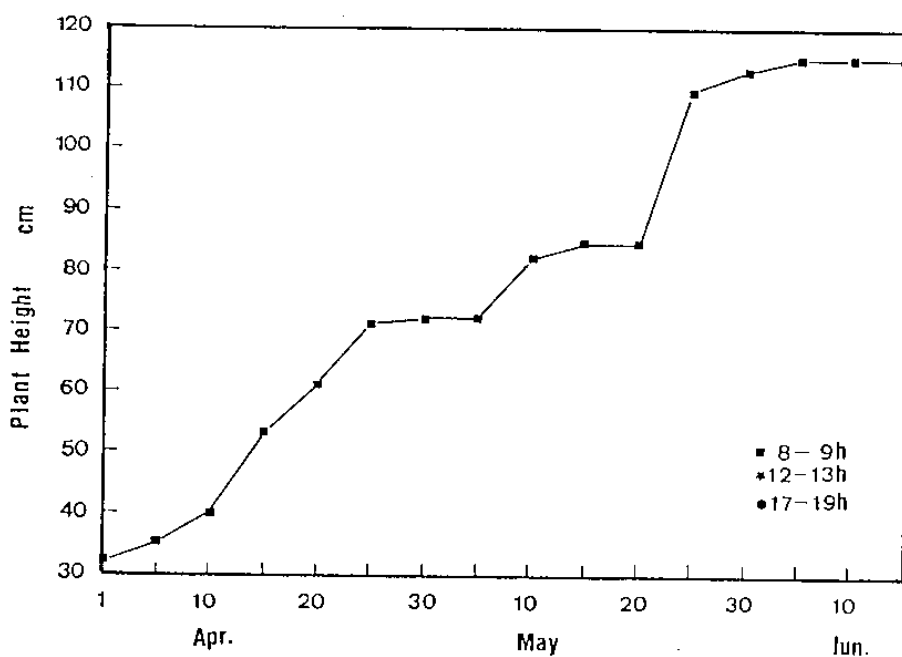


圖 2 水稻高度在 1985 年 4 月 1 日~ 6 月 14 日間生長情形

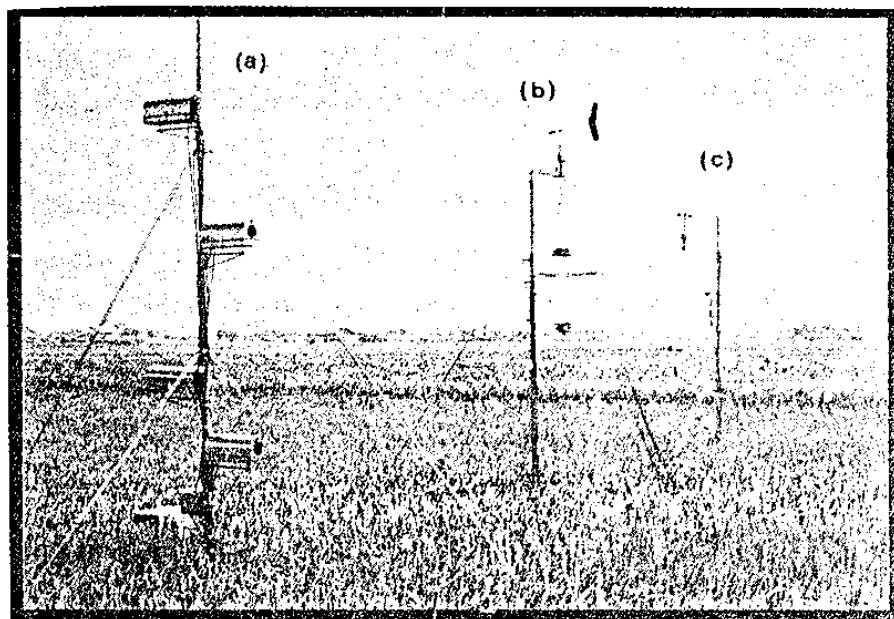


圖 3 水稻田微氣象剖面觀測各感應器之架設
(a) 溫濕度
(b) 淨輻射、反照率 (向上、向下之太陽輻射)
(c) 風 速

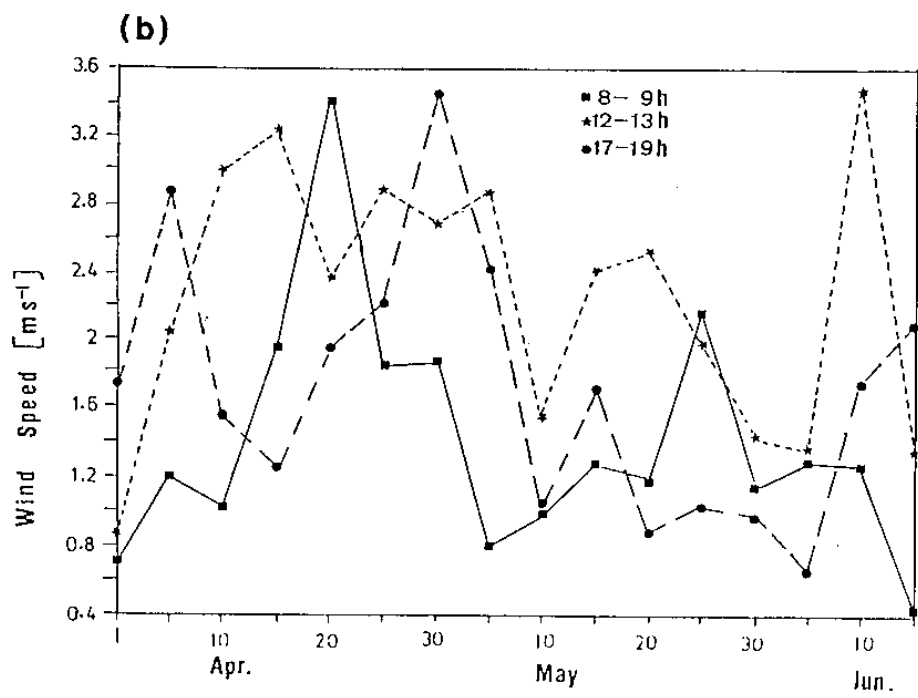
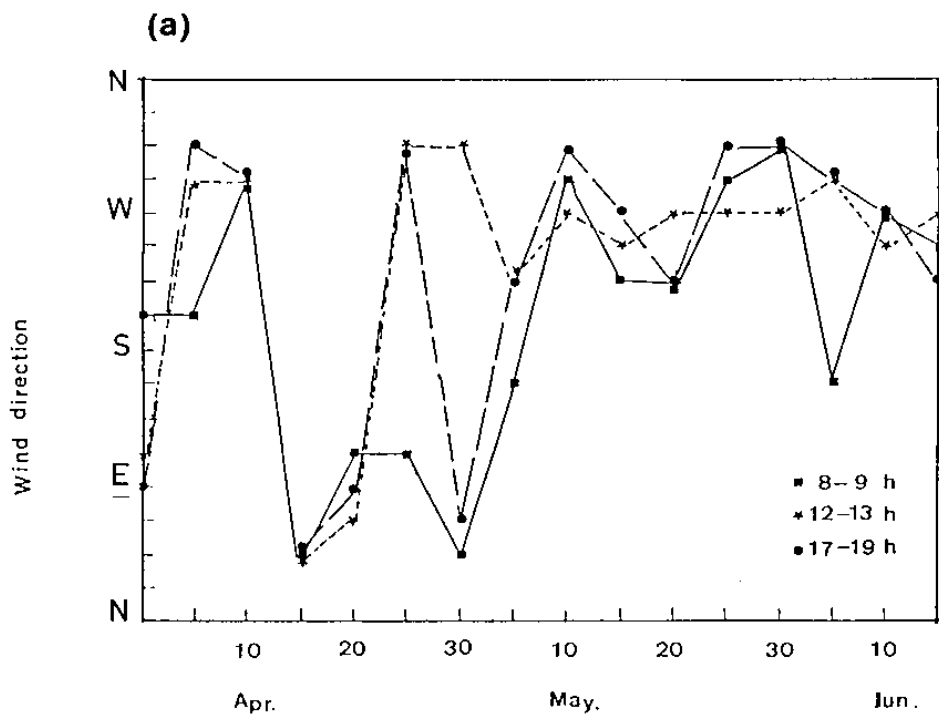


圖 4

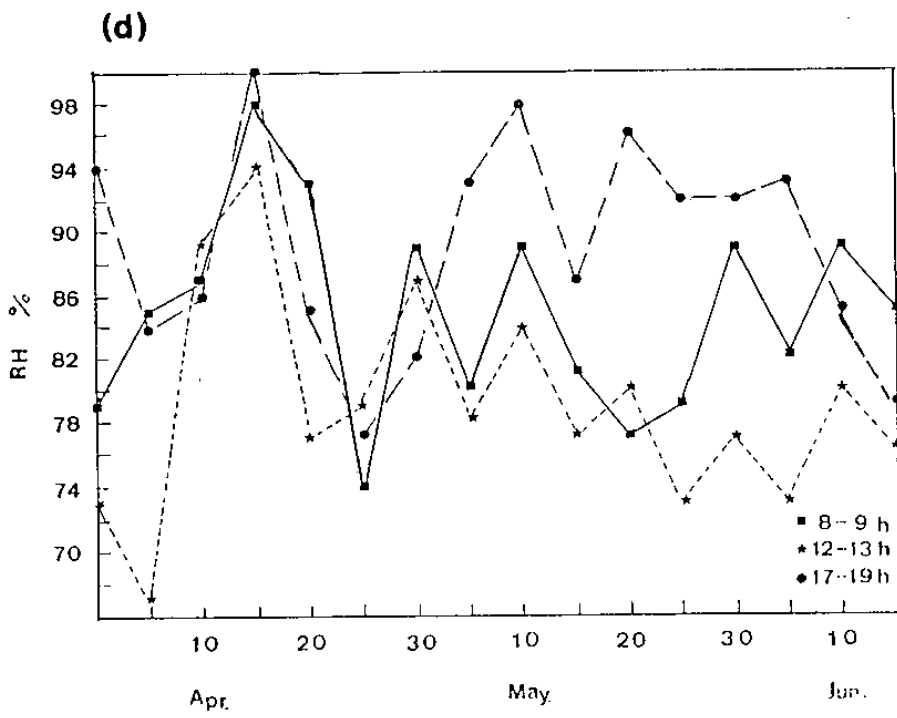
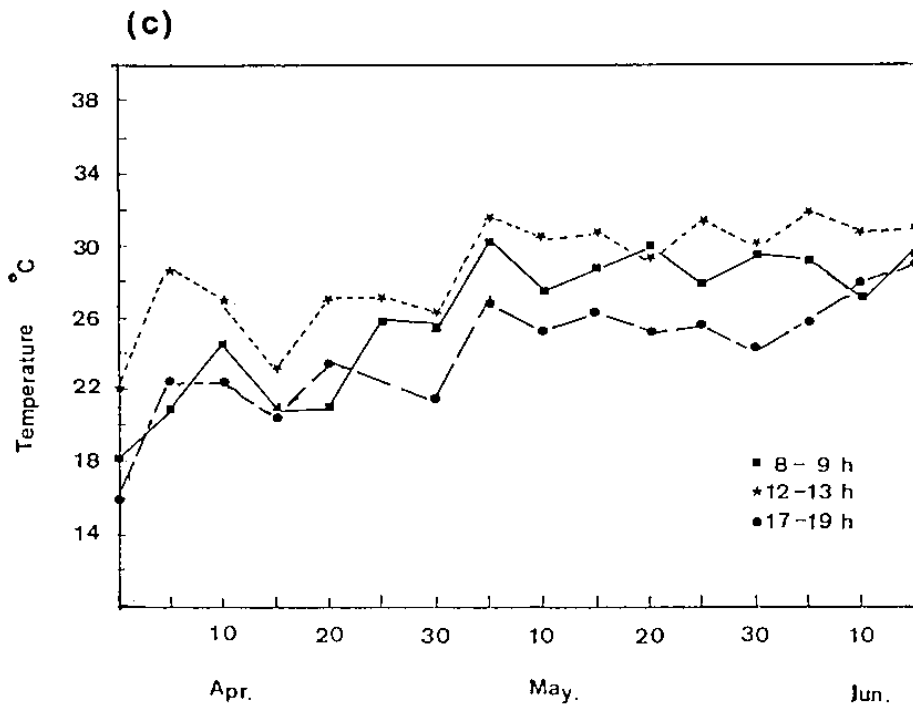


圖 4 1985 年 4 月 1 日 ~ 6 月 14 日在實驗站，離地 3 m 高處
(a)風向與(b)風速，以及水稻葉冠處(c)溫度與(d)相對濕度，在 8 ~ 9 時，
12 ~ 13 時，與 17 ~ 19 時之變化情形。

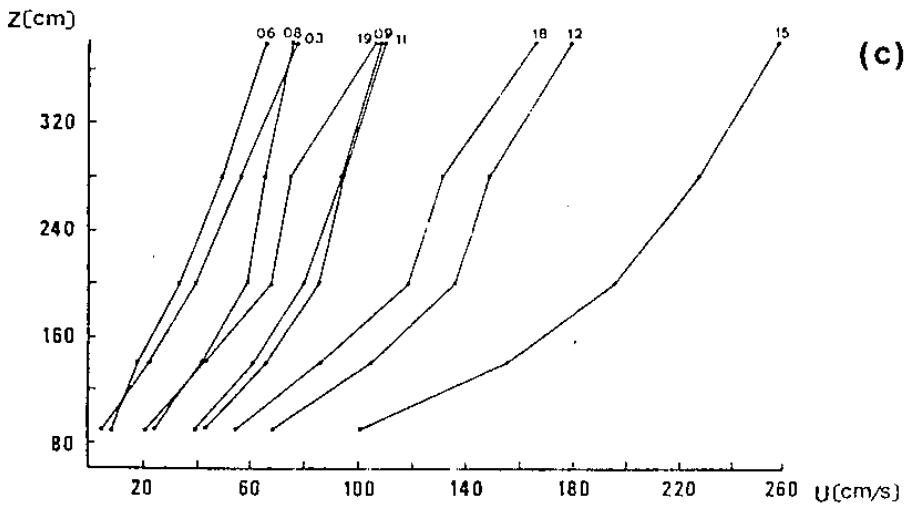
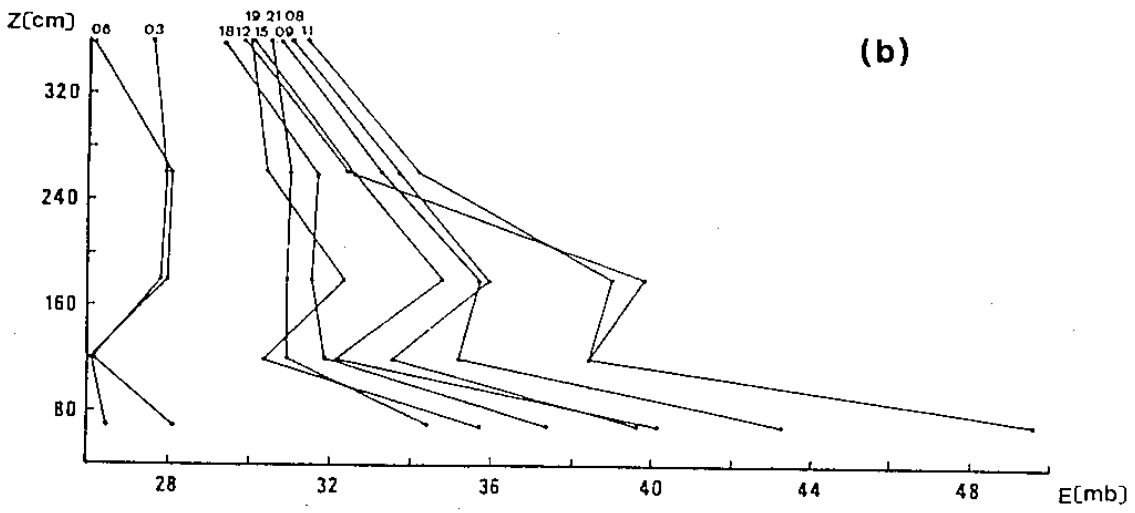
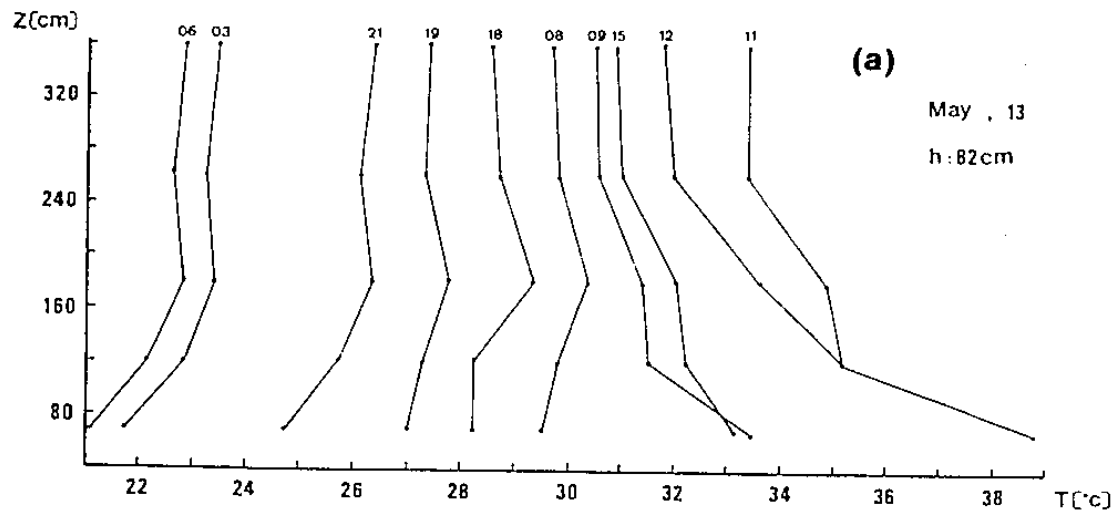
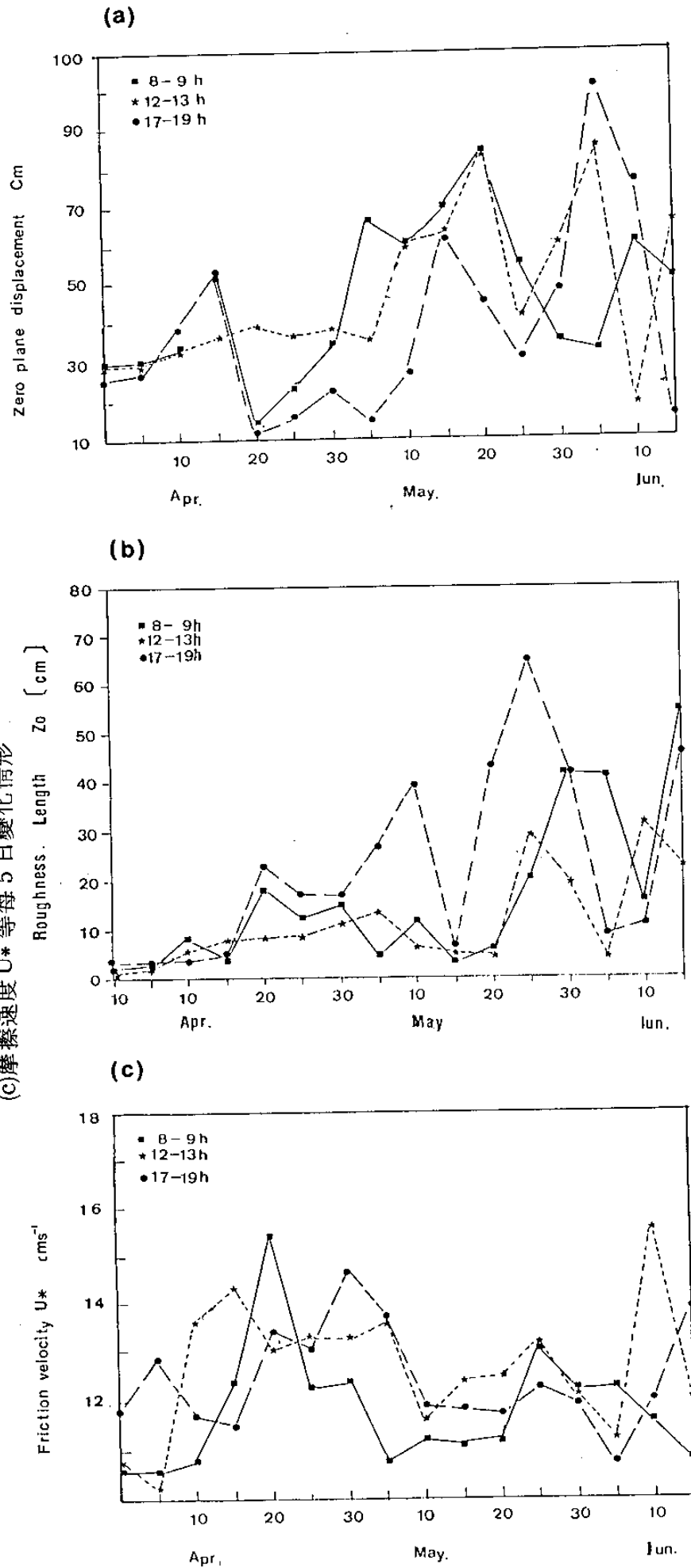


圖 5 水稻葉冠上層之(a)溫度剖面(b)濕度剖面(c)風剖面 (74年 5月 13日)

圖 6 依空氣力學法所估算之(a)垂直修正量 d , (b)地表粗糙度 Z_0 ,
 (c)摩擦速度 U^* 等每 5 日變化情形



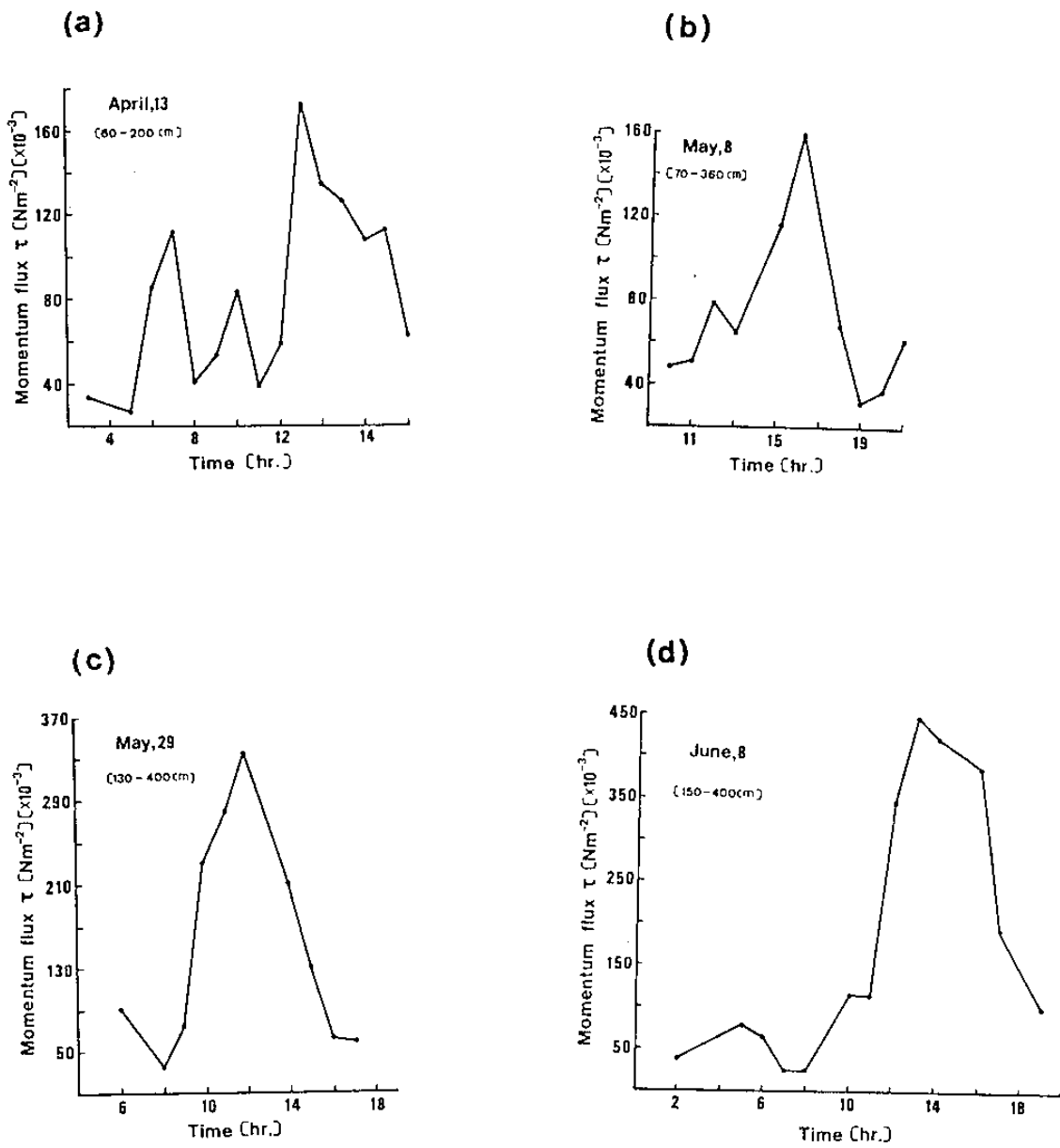


圖 7 不同生育期間水稻葉冠與大氣間動量輸送通量（空氣力學法）之日變化

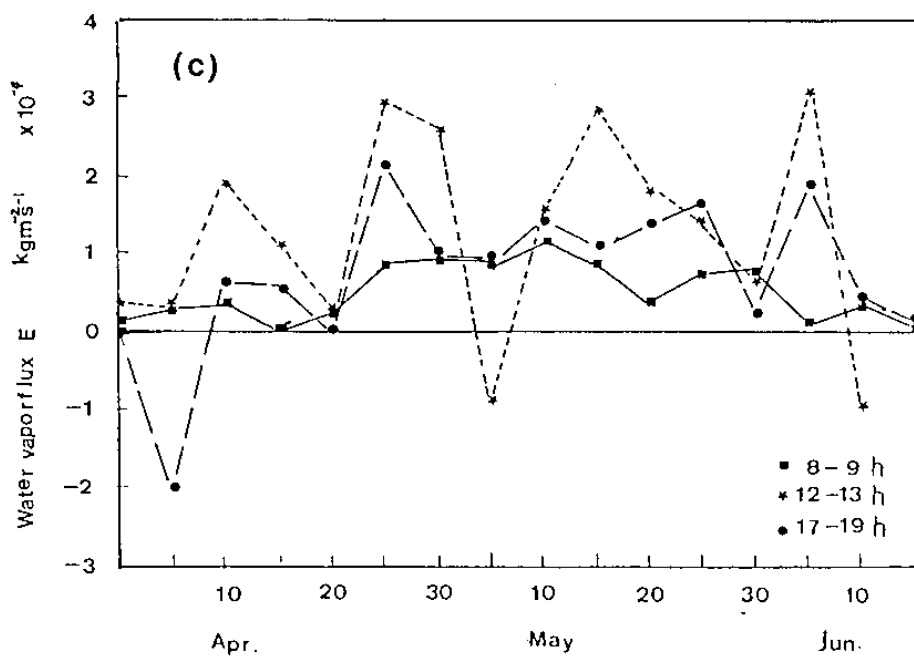
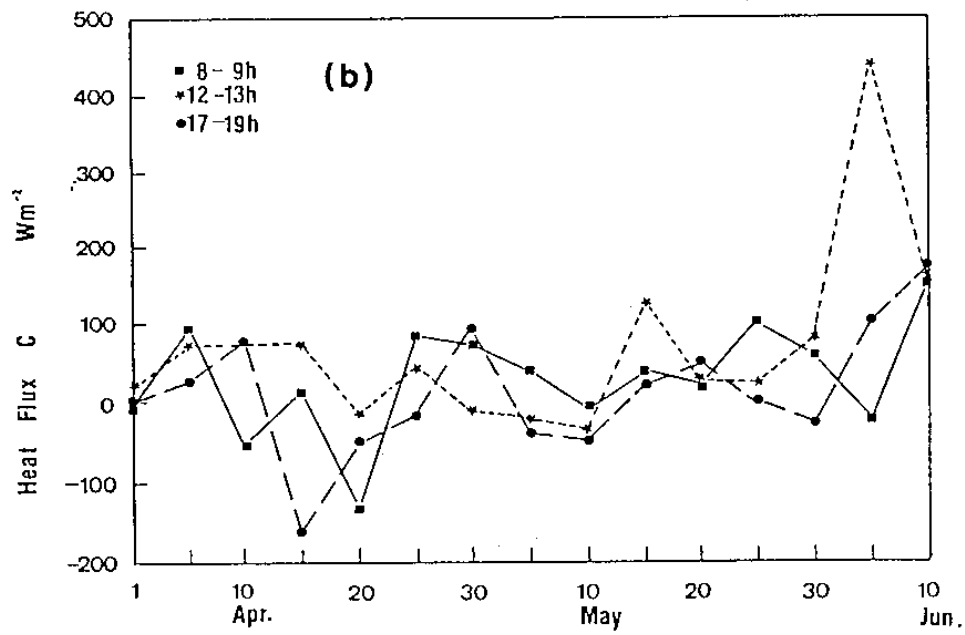
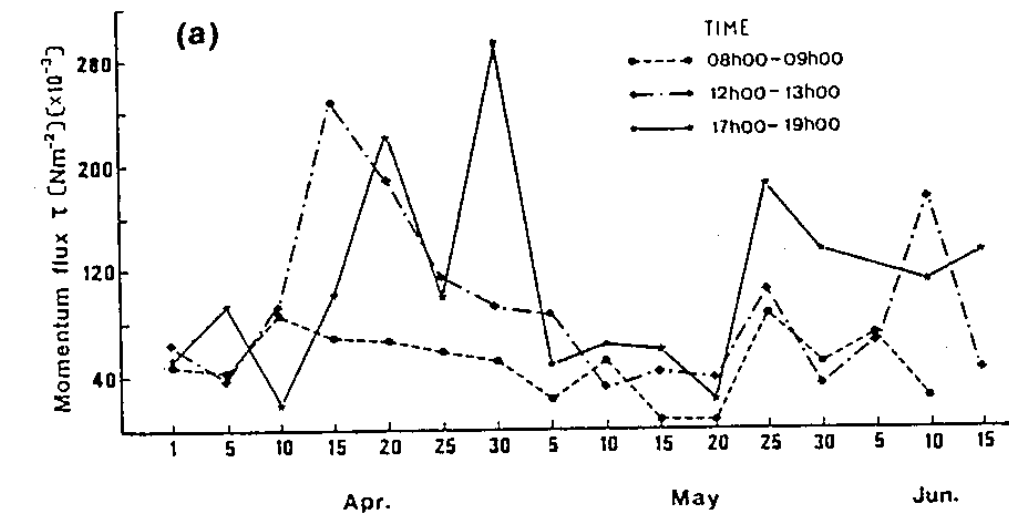


圖 8 利用空氣力學法，每五日葉冠與大氣垂直輸送
(a)動量(b)熱量(c)水汽量通量之變化

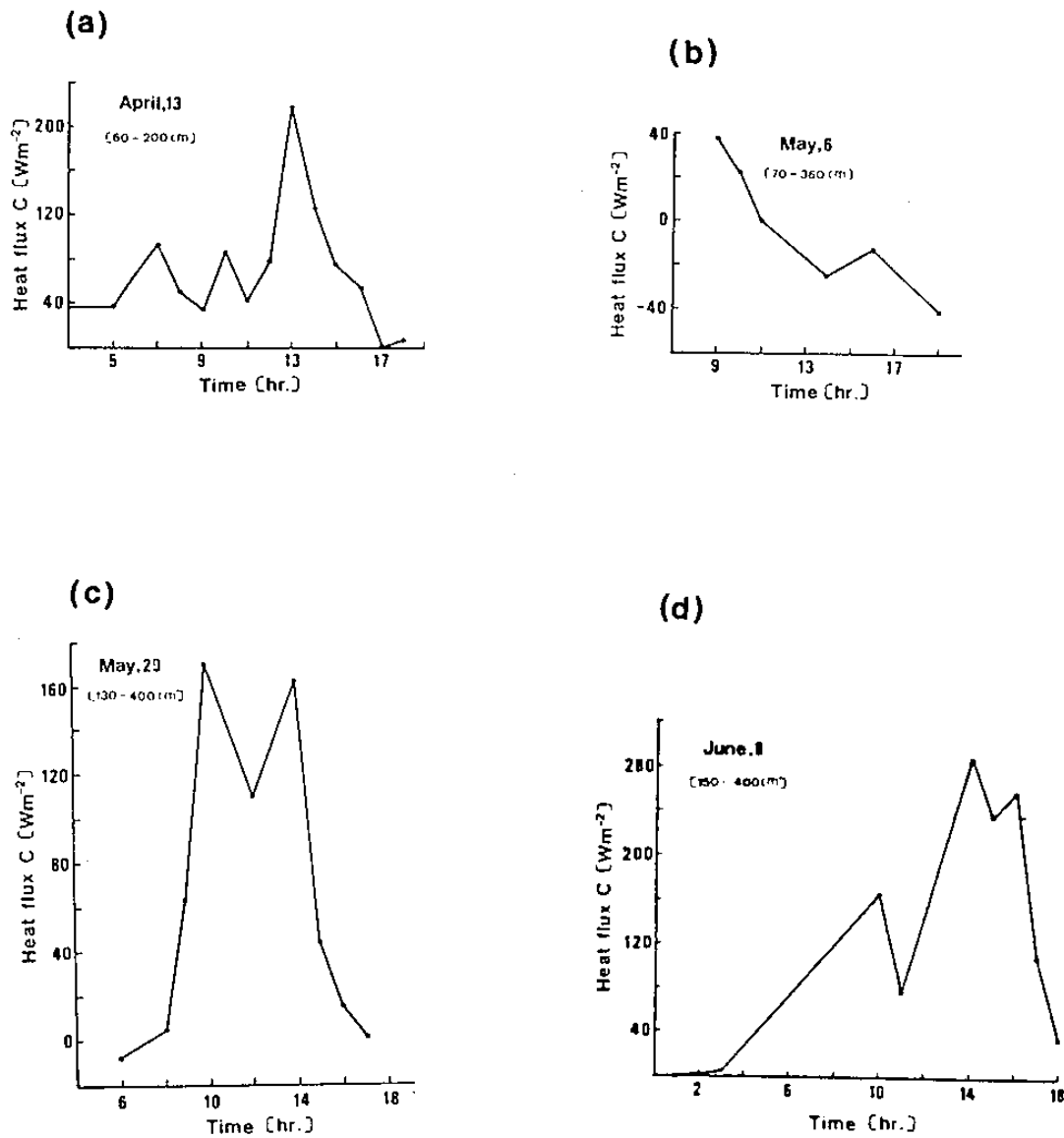


圖 9 不同生育期間水稻葉冠與大氣熱量輸送通量（空氣力學法）之日變化

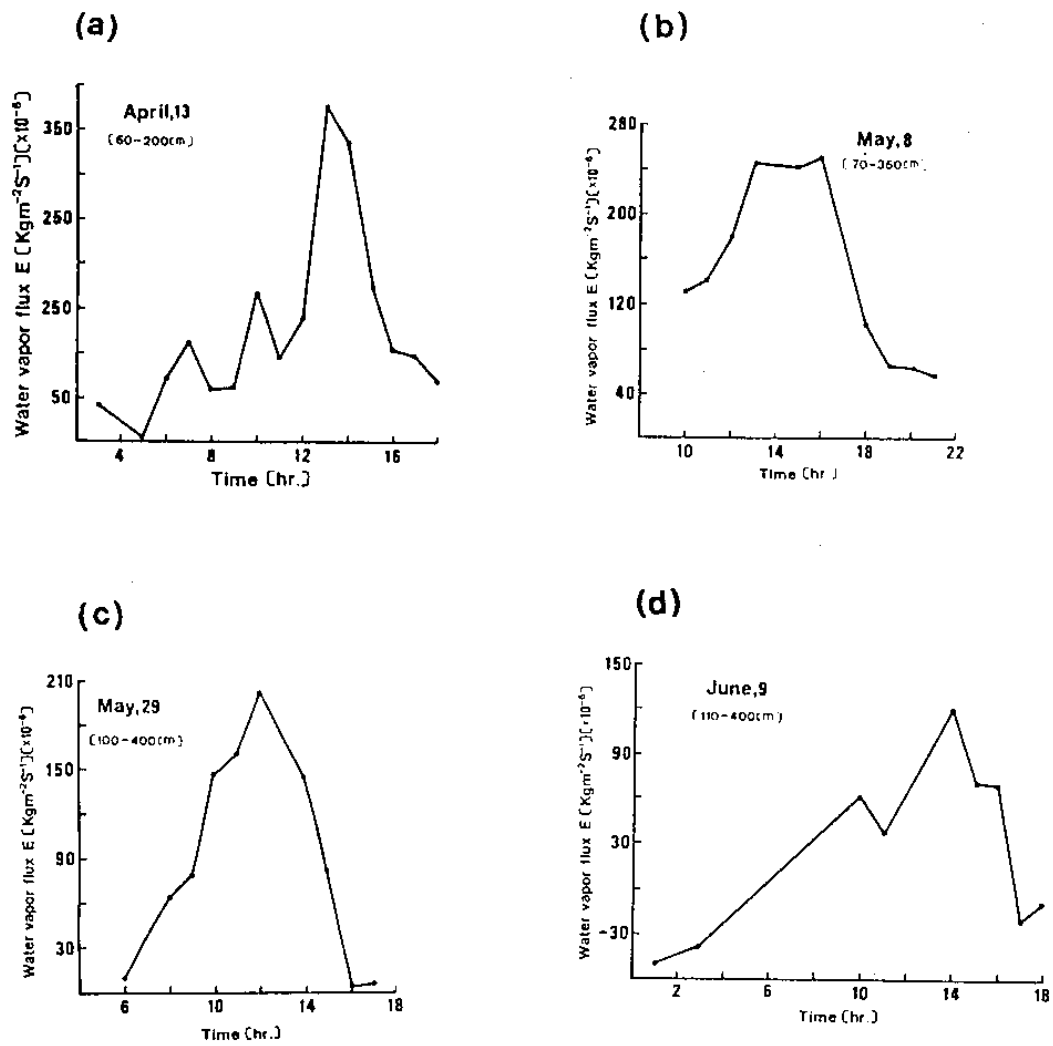


圖10 不同生育期間水稻葉冠與大氣間水汽輸送通量 (空氣力學法) 之日變化

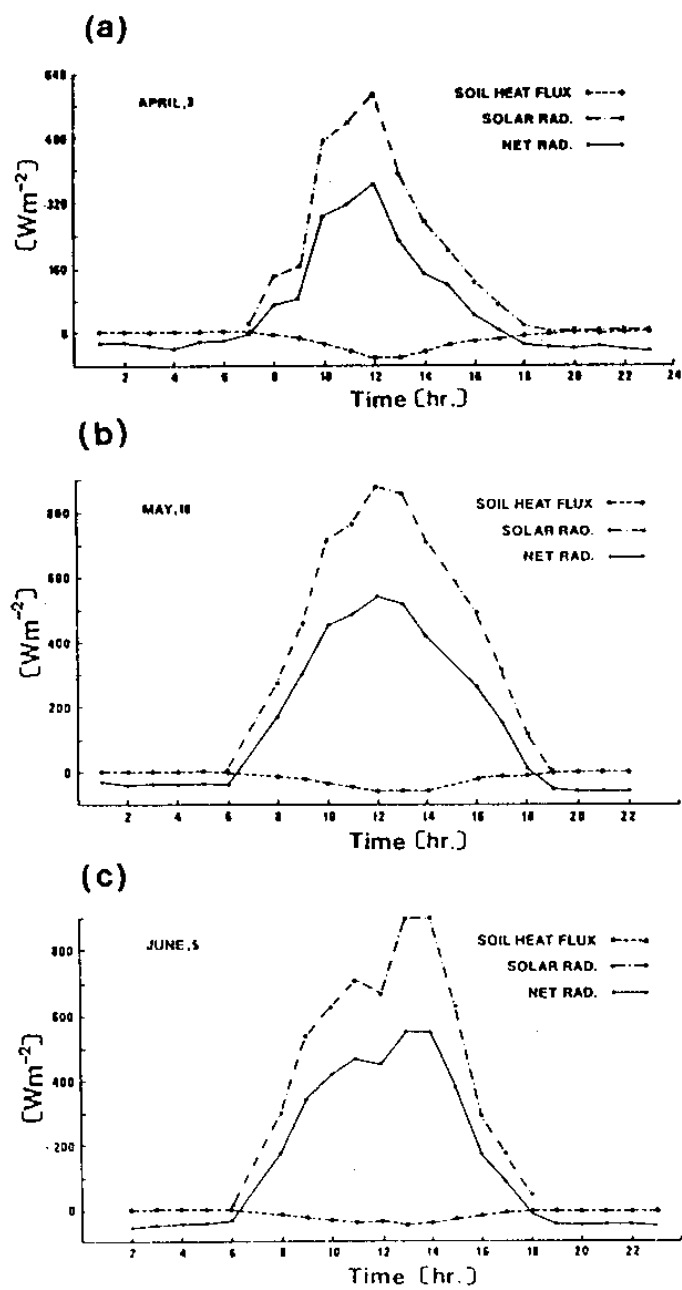


圖11 不同生育期間水稻田日射量、淨輻射及土壤熱流之日變化

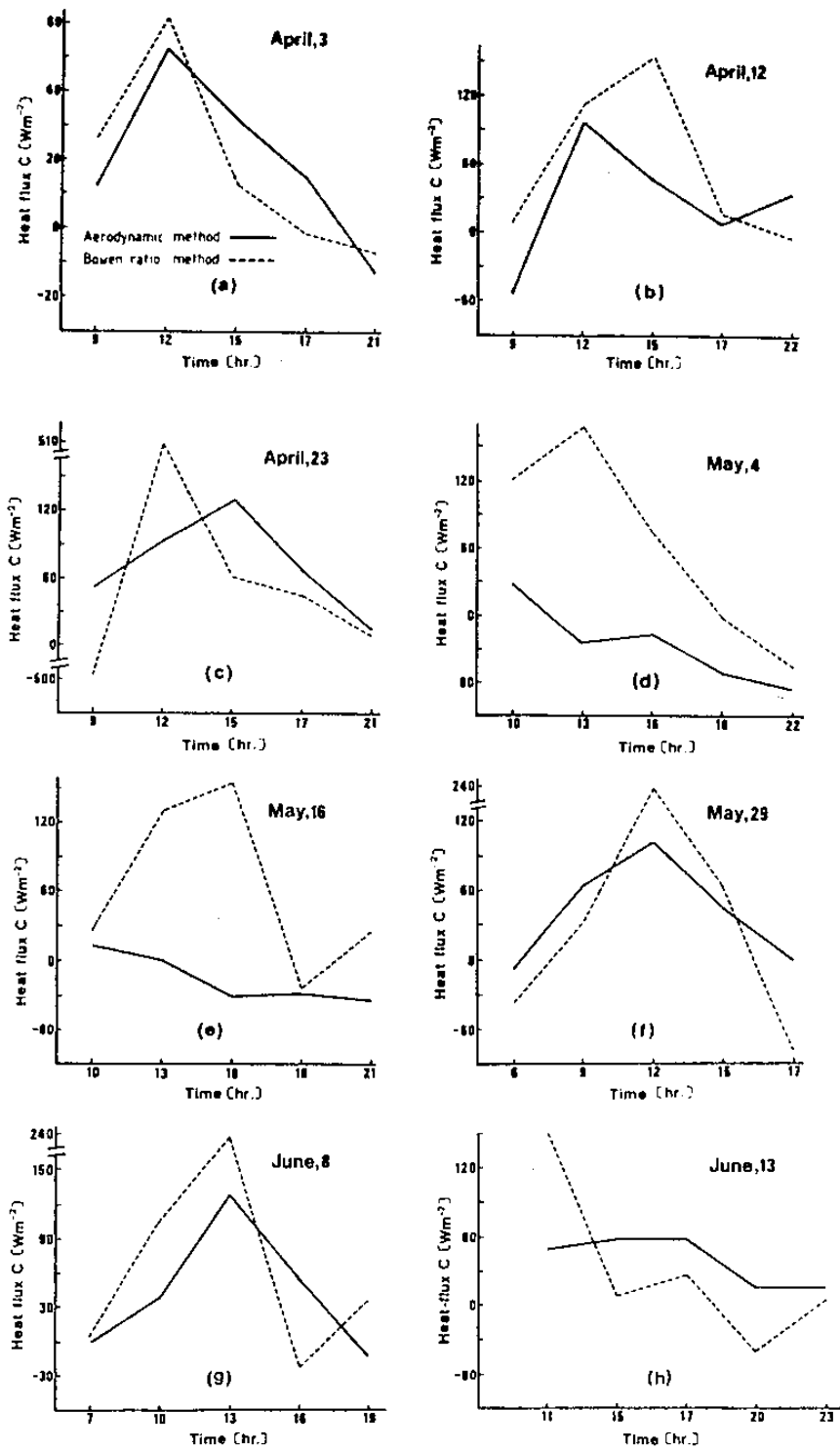


圖 12 用包威比值法及空氣力學法估算水稻葉冠熱通量日變化之比較

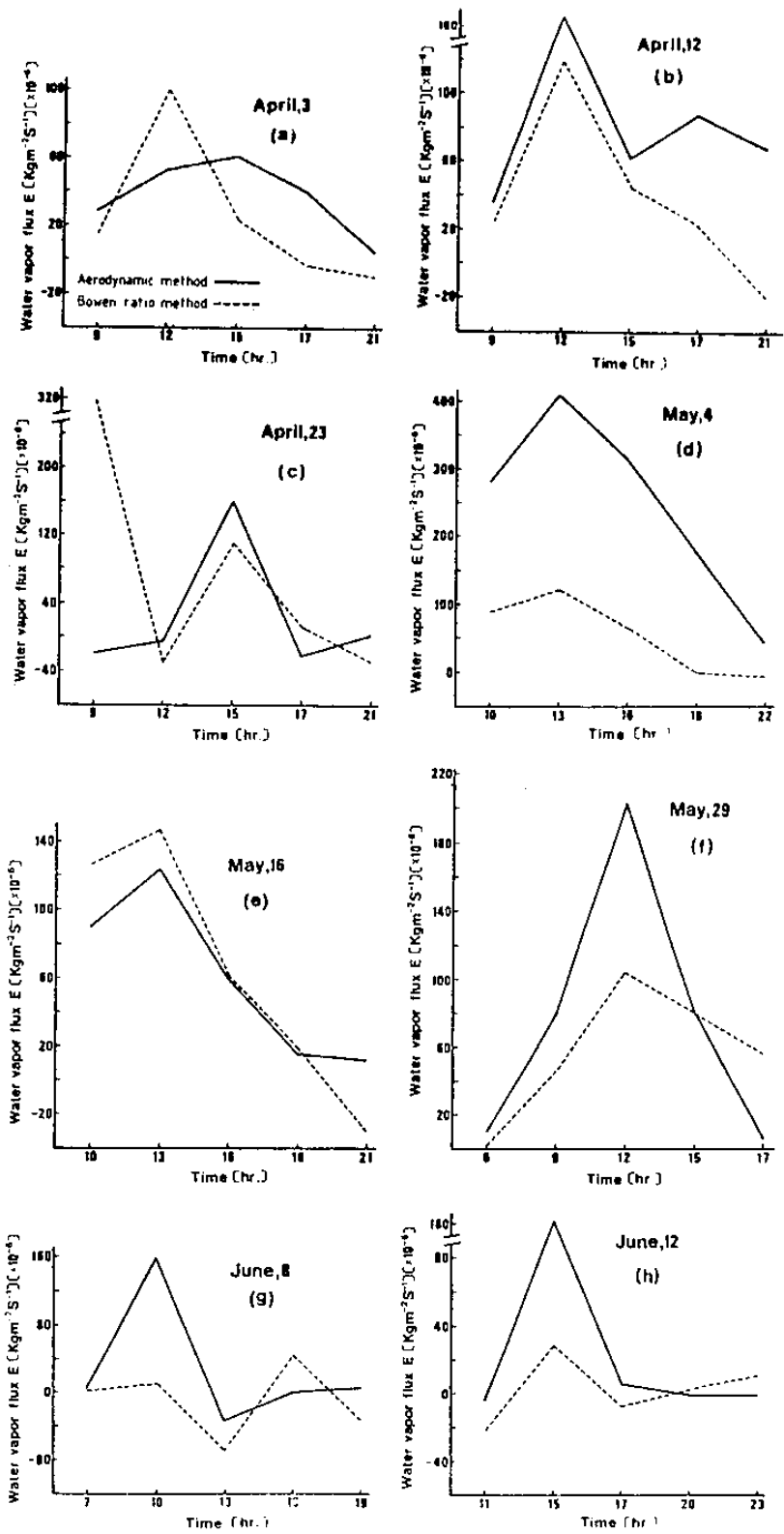


圖 13 利用包威比值法及空氣力學法估算水稻葉冠及水汽通量日變化之比較

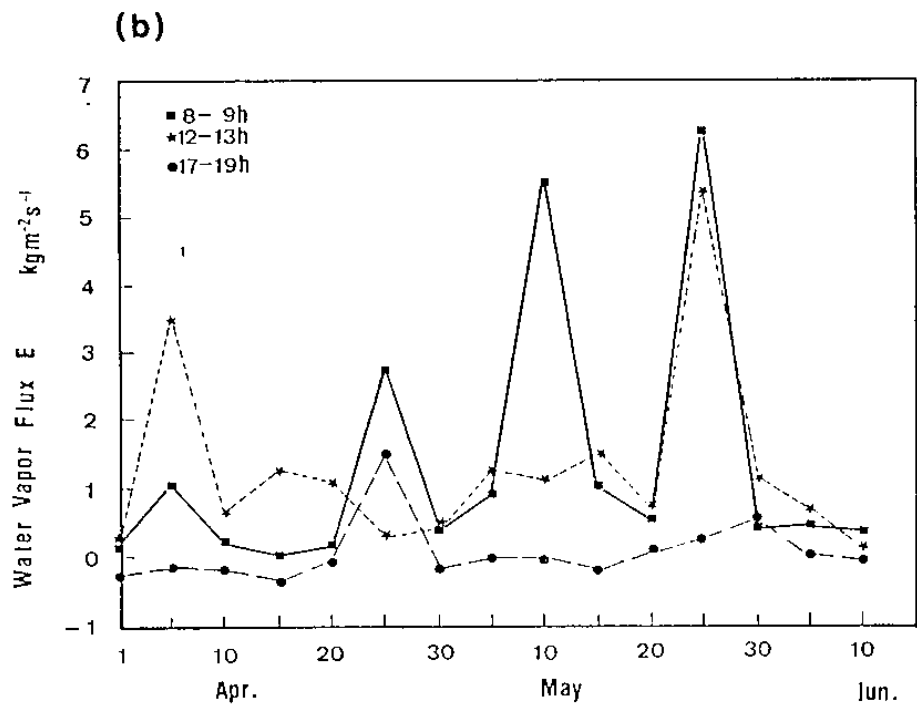
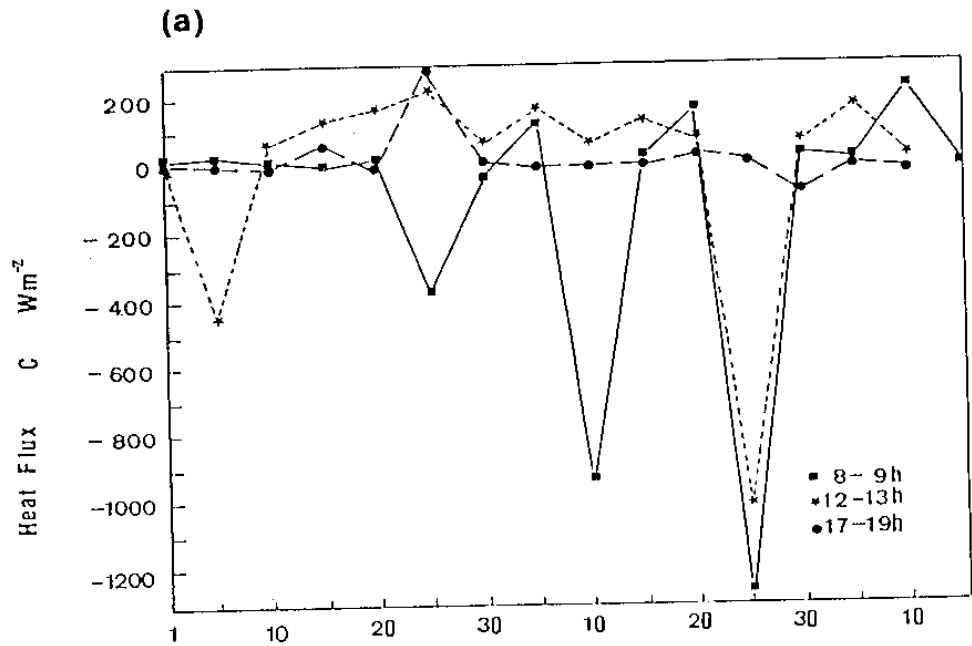


圖 14 利用包威比值法，每五日葉冠與大氣垂直輸送
 (a)熱量 C_b ，與(b)水汽量 E 通量之變化

附 錄

τ	摩擦張力	e	水汽壓
ρ	空氣密度	P	氣壓
U_*	摩擦速度	$\epsilon = 0.622$	
U	平均風速	λ	水蒸發潛熱
h	植物高度	R_n	淨輻射通量
Z	垂直座標	G	土壤熱通量
k	凡科門常數 (Von Karman Constant)	H	水平向之熱量輻射通量
d	垂直修正量	P	向下之植物吸收熱量
Z_0	粗糙度	$\beta = C / \lambda E$	
C	垂直熱量通量	$\overline{U'W'}$	動量通量
C_p	等壓比熱	$\overline{W'T'}$	熱量通量
T	氣溫	$\overline{W'q'}$	水汽量通量
q	絕對濕度	T^*	摩擦溫度尺度
E	垂直水汽量通量	q^*	摩擦水汽量尺度

參考文獻

1. Begg, J. E., Bierhuizen, J. F., Lemon, E. R., Misra, D. K., Slatyer, R. O. and Stern, W. R. 1964. Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet in an area of high solar. *Agr. Meteorol.* 1: 294–312.
2. Blackadar, A. K. and H. Tennekes, 1968: Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 25: 1015–1020.
3. Brown, K. W. and Covey, W. 1966. The energy budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a corn field. *Agr. Meteorol.* 3: 73–96.
4. Businger, J. A., 1981: Equations and concepts. Chap. 1 of “Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling”, Eds. F.T.M. Nieuwstadt and H. Van Dop, D. Reidel Publ. Comp.
5. Denmead, O. T. 1969. Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of PINUS RADIATA. *Agr. Meteorol.* 6: 357–371.
6. Eamus, D. R., Fenton & J. M. Wilson 1983. Stomatal behaviour and water relations of chilled *Phaseolus vulgaris* L. and *Pisum sativum* L. *J. Exp. Bot.* 34(141): 434–441.
7. Monteith, J. L. 1980. Principles of Environmental Physics. Edward Arnold.
8. Monteith, J. L, 1975: “Vegetation and the Atmosphere”, Vol. 1: Principles. Academic press. 278pp.
9. Monteith, J. L. & Szeicz, G. 1961. The radiation balance of bare soil and vegetation. *Quart. J. R. Met. Soc.* 87: 159–170.
10. Tennekes, H., 1981: Similarity relations, scaling laws and spectral dynamics. Chap. 2 of “Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling”, Eds. F.T.M. Nieuwstadt and H. Van Dop, D. Reidel Publ. Comp.
11. Thom, A. S. 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities, “Vegetation & The Atmosphere. Vol. 1, Principles”, pp. 57–109.
12. Thom, A. S., Stewart, J. B., Oliver, H. R., and Gash, J. H. C., 1975: *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101: 93–105.

THE STUDY OF VERTICAL FLUX OF MOMENTUM,
HEAT AND MASS NEAR THE SURFACE BOUNDARY LAYER –
BETWEEN THE RICE CANOPY AND ATMOSPHERE (I)

Chea-Yuan Young, Wen-Ping Tseng
Central Weather Bureau

and

Chung-Ming Liu
Dept. of Atmos. Sci, National Taiwan Univ.

ABSTRACT

The entities (momentum, heat and water vapor) transport flux between rice canopy and atmosphere were estimated by aerodynamic and Bowen's ratio method, i.e., in the viewpoint of micrometeorology. The results indicated the maximum downward momentum flux to the rice canopy were occurred in the afternoon, due to the higher windspeed. The maximum heat and water vapor transport flux were occurred at noon, because the highest solar radiation and net radiation, which caused the greatest temperature and humidity gradient between rice canopy and atmosphere. The water vapor flux can be used as an index of the evapotranspiration of rice community.

The daily variation tendency of heat and water vapor flux estimated by both aerodynamic and Bowen's ratio methods were much similar. So the authors suggested that the application of the micrometeorological methods to estimate the water consumption of crop community in the field, should be an easier and effective way, it can be observed continuously in a nature condition, thus to understand the variation of evapotranspiration of daily and whole growth period of crop community.

Keywords: Surface Boundary Layer, interaction between atmospheric and rice canopy.

