

利用熱收支法測定蒸發散量

Measurements of Evapotranspiration by the Method of Energy Balance

臺南區農業改良場技正兼農藝課長

蘇 匡 基

在田間狀態下，因為需要多數的土壤水分測定與表面流出或滲漏等可能性，如要獲得可靠的作物蒸發散量是一件困難而昂貴的工作，一般作物之蒸發散需要作物或土壤表面之水分變成水蒸氣，然後擴散到大氣，即其必須的物理條件為有熱源使液體變為氣體，此熱源需靠太陽熱而來，其次即需要水蒸氣濃度之傾度，如蒸發面之蒸氣濃度超出其上面空氣濃度時才會發生擴散作用，因此利用地面植被面的純輻射量與其他的放出項間存在的 Energy 保存的法則測定其純輻射量、溫度差、濕度差、計算其蒸發散量的方法，似值得研究的必要。

一、蒸發散量的測定方法及其得失

(一) 水收支法：(Water-balance methods)

(1) Catchment area balance sheet

降雨量(灌溉) = 蒸發 + 地面流出 + 地下浸透量 + 蒸散。

(2) Lysimeter

定期定量土壤及其容器或定期供給一定量之水，測定其給水量與滲漏量之差。

(3) Soil sampling

測定土層內土壤水分之 Sawpling change 最近有用 Neutron-Scattering 法能正確的測定

(二) 秤量法 (Standard device)

(1) Pan

(2) Porous porcelain atmometer (Livingston)

黑色與白色的 Atomometer 放在一起調查其 evaporation rate 之差異，其差異太陽輻射熱有密切相關

(三) 經驗方程式 (Empirical equation)

(1) Blaney and Criddle (1950)

利用月平均氣溫(華氏)月日照時間對全年日長時間之比率計算

(2) Prescott (1952)

"Saturation deficit" 量計算空氣之乾燥力

(3) Thornthwaite (1948)

利用緯度與月平均氣溫計算

(4) Penman (1952)

利用純輻射熱飽和不足量風速計算。

(四) 亂流變動法 (Vapor-flow methods)

(1) 變動法 (Eddy flow of water vapor in the atmosphere)

同時測定風速之垂直方向的變動與水蒸氣張力的變動由此計算水蒸氣之輸送量 (Tayson et al-1958)

(2) 傾度法 (Aerodynamic approach)

在不同高度之二點測定濕度、濕度差乘水蒸氣擴散係數(搬運水蒸氣之速度)即能計算損失的水量、蒸發散量。

(五) 熱收支法 (Surface energy-balance)

(1) Radiation balance (Suomis & Tanner 1958)

由熱收支計算蒸發散量

水收支法，利用 hydrologic equation 於大面積僅於長期間才能用而不能告訴蒸發的經過，同樣的測定土壤水分的變化在短期間不能正確的大型 Lysimeter 的秤重法如有適當的水分控制與有保護區 (guard-ring area) 時可能在短期間表示相當準確，但其不能移動及高價為其缺點，如僅考慮土壤水分含量，簡易 Potential evapotranspirometer 似有價值利用。

Standard device 如不需要非常的正確，作物之蒸發散量與標準蒸發盤有相關關係，為了記錄的繼續性與比較性，蒸發盤法尚有用處。

經驗公式 (Empirical formula) 在該公式得來的條件範圍外似不能適用，因此類公式對真正蒸發散量的合理推算值尚缺乏物理學的根據，可能猜測此種現象對有關的許多因子其些少變化是無反應的，在各種公式試驗結果) Penman 公式是十分可靠的。

Vapor-blow method 相當有用，其儀器的可

動性是極有利，可能在相當範圍的自然與作物面上，不會有擾亂能測定，但其測定結果的計算化工，適於短期間之研究。

熱收支法 僅需較簡單的儀器即能測定，如氣溫與濕度在低處能觀測的話可能得到相當的準確度，缺點與 Vapor flow 法一樣，記錄之計算麻煩。

二、利用熱收支的蒸發散量測定

(一) 輻射收支 (The radiation balance) 與純輻射 (Net radiant)

在地面輻射流可分為向上的與向下的，向下的輻射流有短波太陽輻射 (Solar radiation) 長波熱輻射 (thermal radiation) 與擴散 (Diffuse) 的輻射流，向上的包含由地表反射之太陽輻射流與由地面放出的熱輻射，向上的輻射與向下的輻射，其差異稱為純輻射 (Net radiation) 純輻射在地面上從事熱變化作用 (energy transformation)。

(二) 熱收支 (The energy balance or heat budget) 純輻射可能由其熱變化作用分為下述公式 (參照附圖)

$$R_n = E + A + S + M$$

R_n : Net radiation

E : 用於氯化潛熱 (latent heat of vaporization) 的熱量即蒸發 (Evaporation term)

A : 利用於發熱空氣的熱量稱為 Sensible heat

S : 存於土壤或植物體之熱量 (Storage term)

M : 其他熱量如利用於光合作用或吸收作用的 Energy

貯存於土壤中的熱量根據 Decker (1959) 在濕潤土壤七月初作物尚小而其田間覆蓋程度少時，其 Storage term 佔純輻射之比為15%到八月作物增大，作物體覆蓋田間大時僅佔 5%，九月上旬生長停止土壤乾旱冷涼時即佔15%。其他熱量根據測定 CO_2 量，在自然條件下玉米生長盛期光線弱時光合作用消耗的熱佔 Net radiation 之14%，中午強光時僅 5%，因此在各種作物生長旺盛期光合作用所用的 radiation 佔日純輻射量之5~10% (Lemon 1950)

一般而言存於土壤或植物體中之熱量與其他熱量，因其在純輻射量中所佔比率較少普遍省略之。

熱收支可能用下式表示：

$$R_n = -PC_pKT \frac{dT}{dz} - \rho K_w \frac{dq}{dz} + S$$

PC_p : 空氣之定壓比熱

$\frac{dT}{dz} \cdot \frac{dq}{dz}$: 溫度、濕度之垂直傾度

ρ : 空氣之密度

$KT \cdot K_w$: 熱、水蒸氣之亂流擴散係數

l : 蒸發潛熱

(普通 $594.9 \text{ mm} - 0.51 \text{ mm} \times T^\circ\text{C}$ 計算之)

如假定 $KT \approx K_w$ 時上式可變形為

$$E = \frac{R_n - S}{l(1 + \frac{C_p}{l} \cdot \frac{dT/dz}{dq/dz})} = \frac{R_n - S}{l(1 + \frac{C_p}{l} \cdot \frac{T_1 - T_2}{q_1 - q_2})}$$

$$= \frac{R_n - S}{l(1 + \beta)}$$

$T_1, T_2; q_1, q_2; Z_1, Z_2$ 的氣溫 $^\circ\text{C}$ 濕度 (g/g air)

$$\beta = \frac{C_p}{l} \cdot \frac{T_1 - T_2}{q_1 - q_2} \text{ : Bowen 比}$$

如用水蒸氣張力 (mmHg) 代替比濕 q 時蒸發散量 E_{cm} 可用下式計算之。

$$E_0 = \frac{R_n - S}{l(1 + 0.5 \frac{\Delta T}{\Delta e})}$$

ΔT : 蒸發散面之溫度與氣溫之差

Δe : 蒸發散面飽和水蒸氣張力與大氣水蒸氣張力之差

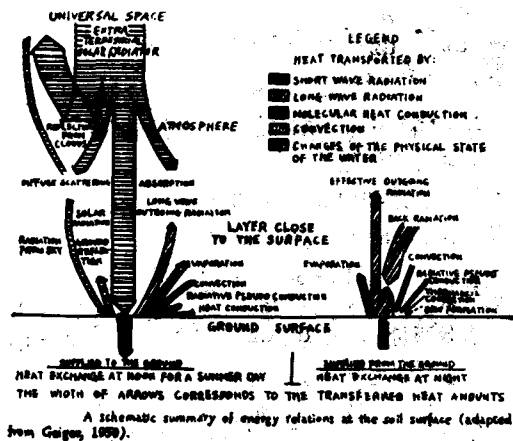
根據上述公式在日本宮崎農試計算結果 9 月的計算值為 100mm，露場蒸發量為 110mm，6 月計算值為 75mm 露場蒸發量為 84mm，在東海近畿農試 (1962) 用ルーサン測定計算日蒸發散量為 2.81mm 實測結果為 2.76mm 其數值很接近，其測定方法及所需儀器如次：

純輻射量……Beckman 之通風式 Net radiometer 設於 2m 高處測定純輻射量。

地中傳達熱量……Thermister 溫度計 (6 點式自記) 測定地表及地表下 5, 10, 20, 30, 40cm 處測定從探 0~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40 cm 處之土壤測定土壤水分及土壤真比重與假比重計算地中傳達熱量。

顯熱傳達量……Thermister 溫度計，一支做乾球，一支做濕球放於地上 40 cm 及 200cm 二點測定二點間之溫度與水蒸氣張力 (通氣式溫、濕度計) 計算 Bowen 比

$$\left(\frac{\text{顯熱傳達量}}{\text{潛熱傳達量}} \right)$$



三、影響會轉換為蒸發量的純輻射量之因子

(一) 土壤水分：

土壤水分性質影響 E/Rn 者有二種，第一是土壤水分減少時根部之毛細管作用減少而根部之吸引水分會增加，這種水分供給之限制對植物會誘起氣孔之關閉及其他生理變化影響蒸散作用，第二是土壤水分之減少會限制對地面的毛管作用，如作物僅覆蓋一部分時地面之乾燥即使由心土部繼續供給適量水分做蒸散作用，由地面之直接蒸發會減少。

根據 Halstead (1954) 在砂壤土的草原試驗結果，如水分含量多而草呈綠色時其 E/Rn 值為 0.8，但隨土壤水分之減少 E/Rn 亦減低如 Suomi (1956) 等資料，玉米之 E/Rn 值在地面乾旱時較地面濕潤時小。

資料來源	期 間	玉米株高	表面	E/Rn	日間
Suomi	9/3-9/4/52	8 英 尺	乾燥	0.63	0.48
Gerber等	7/17-8/7/59	全 長	濕潤	0.84	—
	9/4-9/8/59		乾燥	0.52	—
Graham等	7/15-8/6/58	1.7-4.7英尺	濕潤	—	0.86
	8/25-9/24/58	7.5 英 尺	濕潤	—	0.77
Harris等	6/25-7/9/57	於 6 月 5 日	濕潤	0.87	—
	7/9-7/27/57	1 英 尺	濕潤	0.89	—

(二) 植物

植物因子會影響土壤到大氣的水分轉換者包含作物之覆蓋程度，根分歧之範圍，作物本身的生理變化等，Shaw 與 Fritschen (1960) 測定玉米之結果（如下表）即表示覆蓋（作物之增大）會提高 E/Rn 率，Plasticmulch 者表示

期 間	作物覆蓋	表 面	E/Rn
6/10-6/26/59	3-18英寸高	Plastic mulch	0.17
7/10-8/26/59	42-48英寸高	"	0.52
6/10-6/26/59	3-18英寸高	Soil	0.28
7/10-8/26/59	42-48英寸高	"	0.65

E 全部為蒸散量，同時表示蒸發散量在生育初期蒸發量約佔 40%，生育後期隨作物之增大減少到 20%，即消費水量中蒸散佔的比率會增加，除覆蓋程度外，作物型 (Crop type) 亦對 E/Rn 發生差異如 Dtcker (1959) 調查結果在同樣大氣下，bluegrass 較玉米少 12% 較 Alfalfa 少 8%，根據 Shaw 與 Yao (1964) 試驗結果玉米行距 21 英寸時較 42 英寸時每穴種二株時較種一株者純輻射量到達土面供給蒸發者愈少，Rn (G) (表示 Net radiation 到地面) / Rn (T) (表示總輻射量) 在生育初期因作物尚小栽植密度間差異少，但隨作物體及葉數之增加 Rn(G)/Rn(T) 減少至抽絲期，以後即維持定量。

(三) 水平方向之熱移動 (Advection energy)

在某種情況下，由他處轉換來的顯熱 (Sensible heat) 如土壤水分充足時對蒸發散量會發生影響，在地面與其土面空氣間顯熱之流出是靠溫度差異的大小而做的，其流出的方向要靠作物面上之溫度較氣溫溫暖或冷涼而定，同樣的蒸氣之轉移亦是受作物與空氣間水蒸氣張力之差異而定，如冷涼之空氣水平移動在作物上時較多之純輻射量轉變為顯熱而轉變為蒸發者較少，根據 Graham 與 King (1961) 灌溉的玉米其周圍乾旱時其 E/Rn 比率較周圍為濕潤者高 20%，Lemon (1957) 在 50 英尺平方之灌溉 bermudagrass 區，其周圍為無灌溉的 bermudagrass 時，隨周圍之無灌溉區之乾旱程度，其上面的純輻射量轉換為顯熱者愈多，被提昇空氣溫度移動至灌溉區，於是此種 Advection energy 量用於蒸發者與直接落在灌溉區的熱量配合着着的增加。

結 論

以上簡述的利用熱收支法的蒸發散量測定法，雖然有土壤水分作物因子及 Advection Energy 的影響，如下表面土壤水分十分濕潤純輻射之大部分用於蒸發散時，即 $0.5 \frac{\Delta \theta}{\Delta e} < 1$ 的條件時，其測定值會相當準確，同時其測定可以在自然的氣象條件及土壤條件下用比較簡單的儀器測定等長處，在本省旱作灌溉基本研究方面似值得利用。（下接第 13 頁）