

作物蒸發散量測量方法與應用

Crop Evapotranspiration Estimation Method and Application

蔡秉芸¹、張勝智²、張倚瓏²、郭寶錚³

一、前言

2021 年臺灣遭逢自 1947 年以來最嚴重的乾旱，迫使政府必須進行限水、停灌等措施，世界氣象組織（World Meteorological Organization，WMO）在 2022 年發布的「全球水資源狀況報告」（State of Global Water Resources）中也指出：「2001 至 2018 年間，74% 的天然災害都與水有關」，包括更強烈也更頻繁的乾旱、更極端的洪水、更不穩定的季節性降雨，以及冰川加速融化等，水資源如何開源節流已然成為全球的重要議題。

在過去多數作物多採用溝灌及淹灌等灌溉方式，雖然操作簡易且快速，但是相對灌溉量也較多，而針對作物需求提供適切灌溉量的精準管理，不僅可以提升水分利用效率，也可以進一步提升作物品質。農業上要達到水資源的精準管理，就必須先了解作物的需水量及水分狀態，使生產者能夠及時提供適當的灌溉，減少過度供

水並提升用水效率，植物自根部吸收的水分，大多透過蒸散作用散失，因此監測蒸發散量可以有效推估需水量並建立精準灌溉的解方。本篇分別就作物蒸發散量的測量方法與應用進行介紹。

二、蒸發散量的測量方法

蒸發散包含了水經由介質蒸發及葉面蒸散等多個途徑散失水分，可以簡單視為栽培作物過程水分散失之總和，其量測方法包含直接測量的蒸滲儀、莖流法、水氣通量與氣孔導度，以及間接測量的蒸發皿法、氣象資料估算與衛星遙測等方法。以下僅就目前常應用於農業作物蒸發散量評估之方法進行簡介。

（一）蒸滲儀

透過記錄特定面積接收水量與損失水量，藉以計算蒸發散所損失的水量，是一種直接測量蒸發散量的方法。主要可分為重量式與非重量式蒸滲儀（圖 1），分別利用水分蒸散產生質量或張力改變進行測

¹ 種苗改良繁殖場繁殖技術課 助理研究員

² 種苗改良繁殖場品種改良保護課 助理研究員

³ 中興大學農藝系 教授

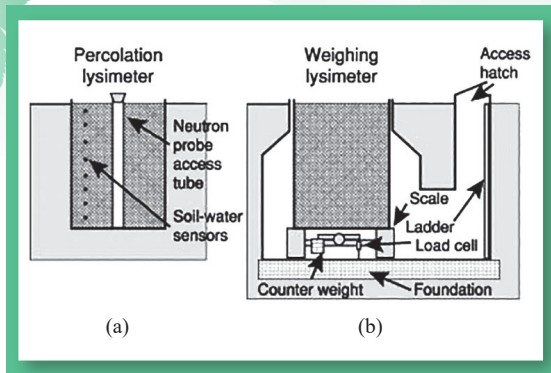


圖 1. 蒸滲儀 (a) 非重量式蒸滲儀，(b) 重量式蒸滲儀。(圖片來源：T.A. Howell, 2005)

量，重量式蒸滲儀 (圖 1(b)) 將特定土體獨立出來，並以秤重的方式計算蒸發散所減少的水量，可以較直接的測量蒸發散量，因此較常被使用，同時也常用於比較其他測定方法的基準，然而測量時仍受土壤回填造成密度及土層分布改變等因素，使實際蒸發散量與測得數據略有出入，安裝於田間也較繁瑣。

(二) 莖流法

又稱樹液流法，當水分由氣孔蒸散出去，造成鄰近葉肉水分含量減少形成負壓，因此對維管束內的水形成一股向上移動的張力，莖流即是測量維管束內樹液上升的速度與斷面面積，推算樹液流動量，推算求得蒸散量。此方法常用於林木及果樹蒸散量測量，具有器材便宜、敏感度高且對環境限制小等優點，然而因探針具有一定體積、長度及重量，作物本身莖部須有一定寬度及硬度支撐，因此較不適用於草本作物。

(三) 氣孔導度儀



圖 2. 氣孔導度儀可以快速檢測特定葉片蒸發狀況，可攜式設備便於田間操作。(圖片來源：本場張倚瓏助理研究員)

氣孔為葉面主要控制水氣蒸散的構造，透過開閉調節水分蒸散的阻力，氣孔導度即為此阻力的倒數，可代表氣孔對於水蒸氣的傳導率。氣孔導度儀利用葉室進行觀測，以固定體積的葉室夾著葉片，藉由測量進入葉室空間前後的空氣水分含量，計算期差值以測量蒸散量 (圖 2)，使用氣孔導度儀可以快速便捷的獲取特定葉片的蒸散量，儀器攜帶便利性高，不過葉片年齡、位置等因素皆會影響其蒸散率，因此植株哪個節位或生長狀態的葉片狀態較能顯示全株狀態，仍需經過試驗確立，另外也較難以同時監測田區土壤蒸發作用之水分耗損狀況。

(四) 水氣通量

能量的轉換有時難以量測，因此科學家常以通量的形式進行描述，熱通量即是指單位時間內流過單位面積的熱量。地表上的能量變化中，能量來源主要來自太陽輻射熱 (R_n)，其中一部分會加熱地表及

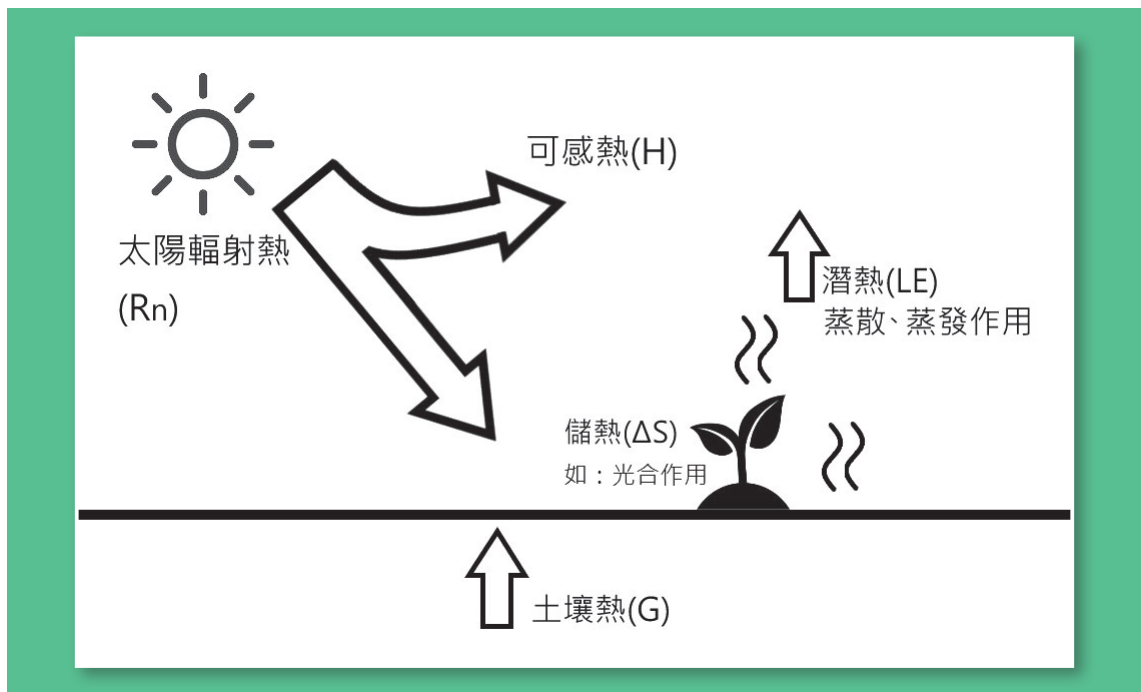


圖 3. 地表能量平衡關係圖

大氣成為可感熱通量 (H)，另一部分能量則供應土壤水分蒸發及植物蒸散，稱為潛熱通量 (LE)，一部分進入土壤中的熱能會透過熱傳導的方式將表層高溫傳導至深層土壤，形成溫度梯度，而因為日夜交替再使深層土壤向上傳導至土面，形成土壤熱通量 (G)，最後一部分的能量轉換為儲熱 (ΔS)，由光合作用或其他機制將能量儲存於自然界中 (圖 3)。其關係可由下列公式呈現：

$$H + LE = Rn - G - \Delta S$$

H：可感熱通量 (W/m^2)

LE：潛熱通量 (W/m^2)

Rn：淨輻射通量 (W/m^2)

G：土壤熱通量 (W/m^2)

ΔS ：儲熱 (W/m^2)

可感熱通量及潛熱通量可藉由測量渦流相關系統進行估算，流動的空氣中其實含有無數個小漩渦，每個漩渦皆具有自己的結構與組成差異，利用測量儀器通量塔中的氬濕度計測量空氣中絕對溼度，並配合三圍音波風速計與極細熱電偶測量數個渦流細微的差異，即可計算可感熱及潛熱，其中潛熱通量即為田間之蒸發散總量。此方法突破以往利用作物生理原理測定時，僅能針對單株或者單葉進行測量的限制，可以同時間測較大區域的蒸發散量，更能符合實際水分散失的情況，然而因為渦流容易受到環境干擾，因此架設通量塔測量時，空間需要具備均質性，包含地面平坦、

高度需依測量象物而進行調整，機械成本也較高，整體而言架設的限制因子較多。

(五) 氣象資料估算

蒸發是分子離開葉體表面的現象，當溫度越高，熱能轉換為動能蒸發就發生的越劇烈，因此蒸發散量模型就利用此物理現象配合經驗模式建立，以氣象資料進行蒸發散量的估算。目前最常使用的蒸發散量模型即為 Penman-Monteith 方程式，同時為聯合國農糧組織於 1998 年發行作物蒸發散量參考手冊中之建議方法，Penman-Monteith 方程式以能量平衡及水汽擴散理論為基礎，同時考量植物體內在阻力，具有充分理論基礎且具有較高的計算精度，在實務操作上，Penman-Monteith 方程只需測量氣溫、相對溼度、輻射量及風速等資料即能進行計算。然而此方法相當依賴可靠的氣象資料，當無法獲取精細的資料或資料有缺失時，便會造成估算上的困難，因此後續也有相對簡化的估算方程式出現，例如僅需溫度資料的 Hargreaves-Samani 方程式，但精確度就稍顯不足。另外方程式中用以校正植物體產生阻力的作物係數也需經過試驗進行驗證，不同品種間的特性稍有差異，也是使用氣象資料估算的限制之一。

三、蒸發散量的應用

(一) 提供生產者灌溉量參考

蒸發散作用描述包含水分從環境及植物體中散發至空氣的現象，對農業生產而言，當水份缺乏會造成氣孔關閉，降低水

分散失同時，二氧化碳交換效率亦被降低，阻礙光合作用進行並進一步抑制作物發育，因此提供作物生長期間充分的水分將有助於生產，目前農產灌溉模式多提供過量的水分，多餘的灌溉水最後以逕流或流入地下水的方式自田間排除，作物蒸發散量建立後，依據田間所散失的水分評估灌溉量，可以提供生產者更精準的作物灌溉量決策依據，提升作物水分利用率。

(二) 提供灌溉計畫決策依據

對水資源布局而言，每年我國用於農業生產約為 113 億噸，其中約有 3 成的用水來自地下水、水庫及壩堰，其餘 7 成則來自河川飲水及區域排水回歸利用，近年水資源受氣候變遷影響，部分水源因長期乾旱而短缺，因應各期作及區域栽培作物擬定灌溉計畫，將有助於提升農業用水的利用率，利用作物蒸發散量基本資訊，回歸作物需水量來制定灌溉策略，有望成為未來永續經營農業的解方。

四、結語

以科學方法支持技術研究，細細破解水分在農業中流轉的軌跡，透過科學的量測方法，我們能建立農田蒸發散量模型，精確的評估水分散失的狀態，在全球氣候變遷情況下，自然的水分供應越來越難以預測，但以蒸發散量模型為基礎，建立更加精確的灌溉決策及計畫，讓每一滴水都發揮最大的效能，穩定我國糧食供給，同時提供農業更有韌性的栽培技術。