

木本盆栽植物水分監測技術及灌溉策略

林連雄¹ 廖宜健¹ 張允瓊^{2*}

¹宜蘭大學生物機電工程學系

²宜蘭大學園藝學系

摘要

中大型木本盆栽植物為近年來廣泛應用於景觀造景及環境綠美化之素材，然具大量根系及因植體體積較大不易換植等因素限制，中大型盆栽之水分管理為植栽能否成功栽培之關鍵因素之一。本研究以土壤含水率感測裝置進行土壤含水率監測，並據以建立適宜之灌溉策略。裝設土壤含水率感測裝置之金柑盆栽放置於可控制環境溫、濕度之植物生長箱中進行試驗，並同時量測植體之水分生理指標包含莖流量 (stem sap flow)、葉片水勢 (leaf water potential) 及氣孔導度 (stomatal conductance)，以進行植物水分生理表現比對。試驗結果顯示，感測裝置量測之土壤水分含率與植體之水分狀態具高相關性。當土壤水分充足，金柑放置於光照環境下，植株之莖流量隨照光時間增加而明顯提高，並於正午達高峰；然於無光情況下，莖流量隨即下降並歸零。又於土壤含水率低於 10% 時，莖流變化不受光線影響，此時植物處於缺水狀態。而葉片水勢在土壤含水率高於 10% 時，都能維持於 -1.0 MPa 以上，土壤含水率低於 10% 時，葉片水勢隨著土壤含水率下降而降低。綜言之，土壤含水率與植物水分狀態具高相關性，即可透過土壤水分監測進行精確之植物水分管理。而在灌溉策略上，可設定 18% 之土壤含水率為灌溉補水閾值，並依此訂定灌溉策略，進行精準之盆栽灌溉管理。

關鍵詞：金柑、莖流、葉片水勢、土壤含水率

*通訊作者。E-mail: changyc@niu.edu.tw

Soil Water Monitoring Technology and Irrigation Strategy of Potted Woody Plants

Lian-Hsiung Lin¹, Yi-Jian Liao¹, Yung-Chiung Chang^{2*}

¹Department of Biomechatronic Engineering, National Ilan University

²Department of Horticulture, National Ilan University

Abstract

Medium and large woody potted plants have been widely used in landscape landscaping and environmental greening in recent years. However, due to a large number of roots and limitations of plant size, it is challenging to replace pot soil and resulting plant vigor decrease. The water management of medium and large potted plants is one of the critical factors for the success of the planting. This study used the soil moisture sensing device to monitor soil water content and establish appropriate irrigation strategies accordingly. The potted kumquat with the soil moisture sensing device was placed in a controlled growth chamber. Meanwhile, the values of stem flows, leaf water potentials, and stomatal conductance were also measured. The results show that the soil water content measured by the sensing device had a high correlation with the water state of the plant. When the potted kumquat was under the light and with sufficient soil water content, the stem flow increased significantly with the increase of the illuminated period and reached a peak at noon. However, in the dark, the stem flow dropped and returned to zero. Once the soil water content was lower than 10%, the stem flow was no more changed by light, and the plant was under water stress. When the soil water content was higher than 10%, the leaf water potentials were all above -1.0 MPa; however, if the soil moisture content was lower than 10%, the leaf water potentials decreased with the decrease of soil water contents. In summary, the soil moisture content has a high correlation relationship with the water of the plant; therefore, the right irrigation strategies of potted kumquats may be carried out by the device practical application. Moreover, the soil moisture content of 18% could be set as the irrigation threshold that offers a precise irrigation strategy for potted kumquats.

Keywords: kumquat, sap flow, leaf water potential, soil water content

*Corresponding author. E-mail:changyc@niu.edu.tw

壹、前言

植物根部自土壤中吸取水分，並傳輸至植物體各部位，以滿足正常生理代謝需求；當土壤水分含量過多或缺乏時，可能影響植物之正常活動，即為水分逆境。於淹水或通氣不良的土壤中，因土壤中之氧氣量不足，植物根部呼吸作用受限，嚴重時可能導致根部潰爛甚至植株死亡。然於土壤乾旱情況下，為減少水分散失，植物葉面氣孔關閉，光合作用中斷，致使植物生長效能下降（潘，2013；Hopkin and Norman, 2008）。施和向（1992）給予嫁接梨三種不同乾溼程度之水管理，觀察土壤水分含量對梨樹枝條生長之影響，結果顯示在高土壤水分含量（土壤水勢為-0.01 MPa）時，枝條頂端芽體萌發量增加，樹體營養生長較為強勢；於中土壤水分含量（土壤水勢為-0.03 至-0.05 MPa）時，枝條營養生長勢低，梨樹植體處於生長相變化階段；而於低土壤水分含量（土壤水勢為-0.3 至-0.5 MPa）時，樹體雖無明顯萎凋現象但生長緩慢。Nxele 等（2017）研究調查乾旱對高粱植物生長、氧化損傷，葉綠素含量和脯氨酸積累的影響，結果顯示，植物生物量和葉綠素含量因乾旱程度增加而顯著降低，但總脯氨酸含量則隨乾旱程度提高而增加。郭（2003）針對不同土壤水分對植物可能造成之影響指出，缺水可能導致植物葉片較為小而厚，而為避免水分散失，葉片之氣孔型態則呈現較為小而密集之變化；此外，缺水可能使根系為增加深入土層以擷取水分，將較正常水分含量土壤中之根系更為茂密，而當水分逆境解除，植物葉片及根部之型態變化將回覆正常。

植體水分狀態判斷可藉由植物形態如葉片捲曲、葉片角度改變、葉片顏色變為深綠或嫩芽轉紅等變化加以判讀，實務上操作簡便但準確性不足。水勢（water potential）為水的化學潛能，即水的自由能大小的指標；化學潛能是相對量，純水水分子與溶液水分子之間自由能的差數即為水勢，一般將純水的水勢定為零，故溶液的水勢為負值，以壓力單位表示如 MPa (megapascal)，水勢可用以說明植物體內水分流向（陳和楊，2002）。水勢量測方法包括組織重量變化法、乾溼球溼度法、冰點降低法、初發原生質分離法與壓力室法等，分別適用於不同狀況下植物體水分潛勢的量測。另外，植物樹液流量監測亦為直接量測植體水分含量方法之一，量測方式可分為熱脈衝（heat pulse）法與熱消散（thermal dissipation）法兩種（Smith and Allen, 1996）。

土壤水分含量可能因土壤質地、土壤總體密度、土壤孔隙度以及土壤有機質含量等因素而異（Lin and Chen, 2006）。土壤水分量測，常以土壤水分張力或田間容水百分比呈現（鄭等人，2007）。土壤水分張力（或稱土壤水勢）是以水分附著於土壤顆粒時所

吸附張力的大小表示水分含量多少，水分子在純水中自由度最高，當水分易於流動時，表示具有較高的土壤水勢，若水分受限於土壤不能隨意流動時，則土壤水勢相對就變低。一般土壤水勢約為-0.033 至-100 MPa，值愈低表示水分愈難由土壤中取出，植物也愈難吸收利用。除土壤張力計外，Kim 和 Evans (2008) 開發以無線感測器為基礎的灌溉系統，藉此有效提高用水效率，以圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI) 設計灌溉系統管控軟體，透過簡易之清單選擇方式讓使用者有效管理系統；其無線通訊以藍芽為主，並提出一種噴頭排序演算法，用以降低噴嘴開啟時所造成之水壓起伏狀況。Lopez 等 (2009) 利用無線感測器網路發展精準農業，此系統設置於半乾燥區域，遠端監控土壤含水率、氣溫、相對溼度、灌溉水溫度及鹽度等指標，為達最佳灌溉效率目的，系統可依環境變化對種植作物進行精準之灌溉策略及灌溉水質。

金柑為蘭陽地區重要之果樹種類，相較於其他大型果樹，金柑中型灌木特性，極適合開發作為景觀木本植物用途，因此，為提昇中型木本植物金柑盆栽之植栽品質及土壤水分管理效率，本研究開發「土壤含水率感測裝置」用以監測土壤含水率變化，並據以建立適宜之灌溉策略。於土壤水分監測同時並針對植物水分生理變化進行探討，監測指標包括莖流量 (stem sap flow) 變化、葉片水勢 (leaf water potential, ϕ) 變化及葉片氣孔導度 (stomatal conductance, g_s) 等。

貳、材料與方法

一、植物材料

供試植株為嫁接於枳殼 (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) 之 2 年生長實金柑 (*Fortunella margarita* (Lour) Swingle)。植株以膠盆種植 (L × D × H = 45 × 26 × 23.5 cm，土壤容積 8.5 L)，栽培介質組合體積比為田土：河砂：泥炭土：椰纖 = 2：4：1：1。每 3 個月施用好康多 1 號 180 天型 (N：P：K = 14：12：14) 35 克及金玉肥 (N：P：K：有機質 = 4：1：1：77) 30 克，每 2 週施用 1,000 倍百得肥 (Peter's, N：P：K = 20：20：20) 1 次；開花期間改施用 1,000 倍百得肥 (Peter's, N：P：K = 15：20：25)。每月噴灑農藥一次，農藥種類依當季病蟲害調整。置放於國立宜蘭大學簡易型塑膠棚溫室之金柑盆栽，每年 1-2 月間進行修剪，另外為避免非必要養分消耗，7 月份後萌發之枝梢一律疏除。

二、土壤含水率感測裝置

本研究開發「土壤含水率感測裝置」量測盆栽土壤水分變化。感測裝置包含土壤水分感測器、類比數位轉換器、微控制器及無線通訊裝置（圖 1）。感測裝置使用電容式土壤水分感測器（EC-5，Decagon），將土壤水分含量轉換為電壓訊號，並藉由解析度為 12 位元之類比數位轉換器（ADS7822，Burr-Brown），轉換為數位訊號值；使用微控制器（AT89C51IC2，ATMEL）讀取土壤水分值，並透過無線電波頻段範圍為超高頻 902-928 MHz 傳輸訊號之無線通訊裝置（WS232HPA1B41，文星），將土壤水分值訊號傳輸至裝置有無線通訊裝置（WS232HPA1B41，文星）電腦端，完成盆栽土壤含水率之監測。

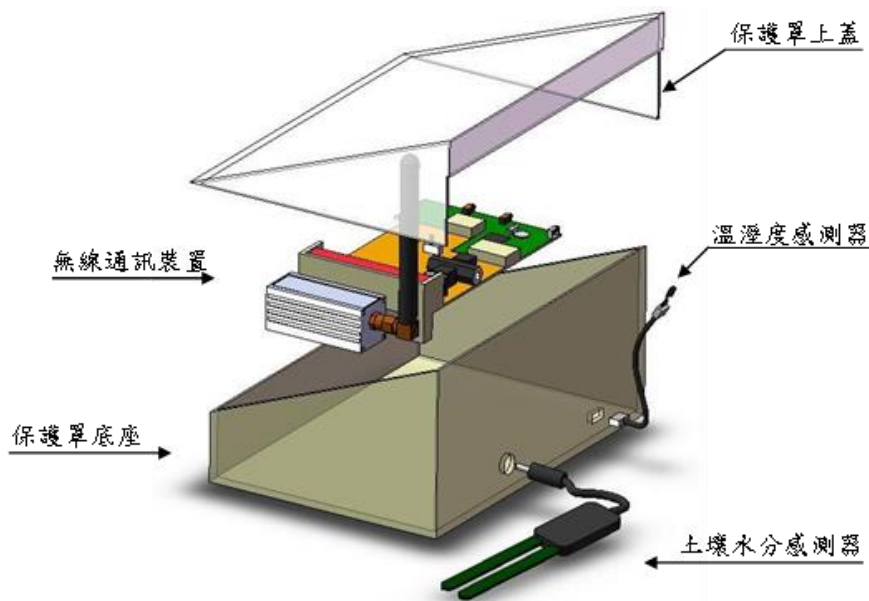


圖 1. 土壤含水率感測裝置。

Fig. 1. The sensing device of soil water content.

三、土壤含水率感測裝置檢量線建立

(一)、EC-5 感測器輸出電壓與土壤含水率之相關性建立

塑膠盆中裝填約 2 L 金柑栽培介質，並將 EC-5 垂直埋入土表下約 12 cm 處。於埋設水分感測器之盆栽土壤中充分注水至土壤水飽和並排出重力水，之後不再加水使盆栽土壤水分自然蒸發。將已完成排水之水飽和盆栽置放於磅秤，並紀錄盆栽重量與 EC-5 之感測輸出值。數值擷取規律為盆栽重量每降約 100 g 時，即同時紀錄 EC-5 之感測輸出值與磅秤上之盆栽重量值，直至盆栽重量無明顯變化為止。土壤含水率變化則由盆栽重量扣除塑膠盆及 EC-5 感測器之重量推算之。

(二)、以烘乾法測定土壤含水率

將盆栽土壤放置於 105°C 烘箱中 72 hr，以電子天平量測烘乾前後之土壤重量並計算土壤含水率。土壤含水率 = $[(\text{烘乾前土重} - \text{烘乾後土重}) / \text{烘乾土重}] \times 100\%$ 。

四、土壤含水率感測裝置於盆栽金柑土壤水分監測效能評估

為探討土壤水分變化與植物生理變化間之關係，將裝設土壤含水率感測裝置之盆栽金柑放置於可控制環境之植物生長箱中進行試驗。生長箱環境條件設定為日/夜溫 35/30 °C，相對溼度 80%，光照 (PPFD: 350-380 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 時間為上午 6:00 至下午 6:00，共 12 hr。為同時監測金柑植株生理變動趨勢，同步監測金柑植株之莖流量 (stem sap flow) 變化、葉片水勢 (leaf water potential, ψ) 變化及葉片氣孔導度 (stomatal conductance, gs) 等值之表現並分析各數值間之相關性變化。莖流量以植物莖流分析儀 (Dynagage Sap Flow Sensor, Flow 4, Dynamax Inc, USA) 量測；葉片水勢以高壓式植物水分潛勢測定儀 (Model 1000 Pressure Chamber Instrument, PMS Instrument Company, USA) 進行葉片水勢量測；葉片氣孔導度則使用 LI-6400 可攜式光合作用測定儀 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) 進行量測。

為使植株表現出較明顯之水分需求差異，植株於土壤含水率達到田間容水量 29.6% 後置入植物生長箱，其後則不再給水。盆栽同時以錫箔紙封蓋盆面，以避免土壤水分蒸發流失。在資料收集部分，莖流數值每 30 min 記錄 1 次，土壤含水率感測裝置每 10 min 傳輸 1 筆資料。在植物葉片水勢實驗中，其實驗地點與植株處理如同植物莖流實驗。量測葉片水勢時，從植株上摘取葉片，為減少對植物影響，每天正午取樣一次，隨機取樣兩葉片求取水勢之算術平均值，取樣時一併記錄土壤含水率數值。

參、結果與討論

為確認本研究所開發之「土壤含水率無線感測裝置」具準確之土壤水分測定效能，首先進行本裝置中土壤水分感測器 (EC-5) 於不同土壤水分含量中之電壓值與使用 105 °C、72 hr 烘乾土樣所測得之土壤含水率檢量線之建置。將 EC-5 埋設於水份含量不同之土壤中，感測器所量測之輸入訊號經 ADC 轉換為數位資料後，再依 ADC 轉換公式換算為數位資料，最後還原為輸入訊號的電壓值；同時，將同一含水量之土壤樣本，以烘乾法量測取得其土壤含水率，據此建立裝置土壤水分感測器 EC-5 輸出電壓值與烘乾法測得之土壤含水率之檢量線。

圖 2 顯示 EC-5 輸出電壓與土壤含水率的相關性。圖中顯示，於土壤含水率 2.8-39.0% 間，EC-5 之輸出電壓值與土壤含水率呈現高度正相關性，判定係數 (R^2) 高達 0.97，顯示本裝置使用之土壤水分感測器 EC-5，於土壤水分變異量測上具高度準確性。

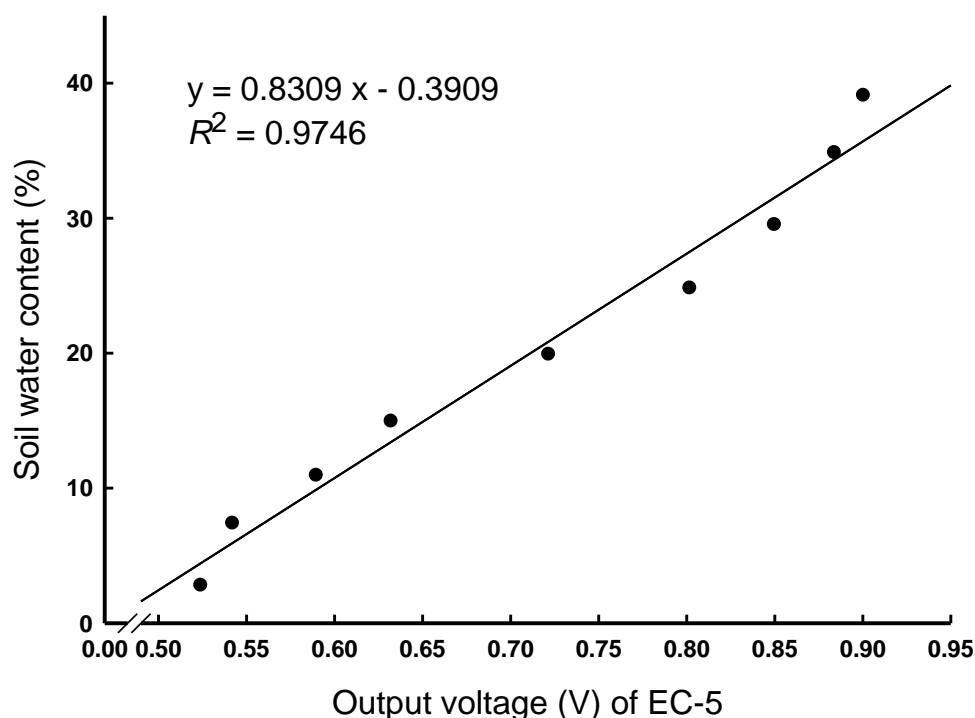


圖 2. 土壤含水率與土壤水分感測器 (EC-5) 輸出電壓之相關性。

Fig. 2. The correlation relationship between the soil water content (%) and the output voltage (V) of EC-5.

土壤含水率感測裝置於盆栽金柑土壤水分監測效能評估，金柑盆栽土壤含水率與莖流量變化關係如圖 3。由於僅於第一天充分供水後即不再供水，因此土壤含水率隨時間增長而逐漸下降，土壤含水率由最初之 29.6% 下降至約 7.8%。隨著生長箱光照時間（上午 6:00 至下午 6:00）之規律性，植物之莖流量變化，亦表現出因光照規律而產生之波段變化。結果顯示，當進入光照環境，植物莖流量即逐步增加，並於近正午之 12-13 時達到最高峰，隨後逐漸下降，並於光照結束後明顯下降並逐漸歸零。於第 1 至第 3 天間，由於盆栽土壤水分含量尚豐，土壤含水率範圍於 15.0-29.6%，此時植物之莖流量表現依光照期間之轉變呈規律性變化，雖每日正午之最高莖流量因盆中之土壤水分含量逐日下降而隨之降低，但整體之莖流量具相似之變化趨勢。第 4 天時，因植物持續進行蒸散流失，於未補水情況下，土壤含水率降至約 10.0%，此時之植物莖流量變化即呈現較不規則之波動曲線，雖仍具光照規律及正午高峰之波動趨勢，但已顯示不穩定之變化結

果。監測第 5 天後，土壤含水率持續下降至 8% 以下，植物莖流即無規律性表現。不同土壤含水率下之植物莖流量變化如圖 4，顯示植物莖流量與土壤含水率呈現高正相關性 ($r = 0.89$)，即盆栽土壤含水率與金柑莖流量間具高關聯性。

圖 5 顯示土壤含水率與金柑葉片水勢之關係。結果顯示在 10.0-29.6% 的土壤含水率範圍內，不似莖流量具隨土壤含水率變化之正相關性，不同土壤含水率之金柑葉片水勢變化不大，葉片平均水勢為 -0.88 MPa；然當土壤含水率降至 8% 以下，金柑葉片水勢即隨土壤含水率降低而明顯下降當土壤含水率為 3.8% 時，葉片水勢為 -2.15 MPa。金柑葉片水勢與葉片氣孔導度之關係如圖 6，顯示當金柑葉片水勢上升，葉片之氣孔導度亦隨之增加，兩者呈現高度相關性 ($r = 0.95$)。

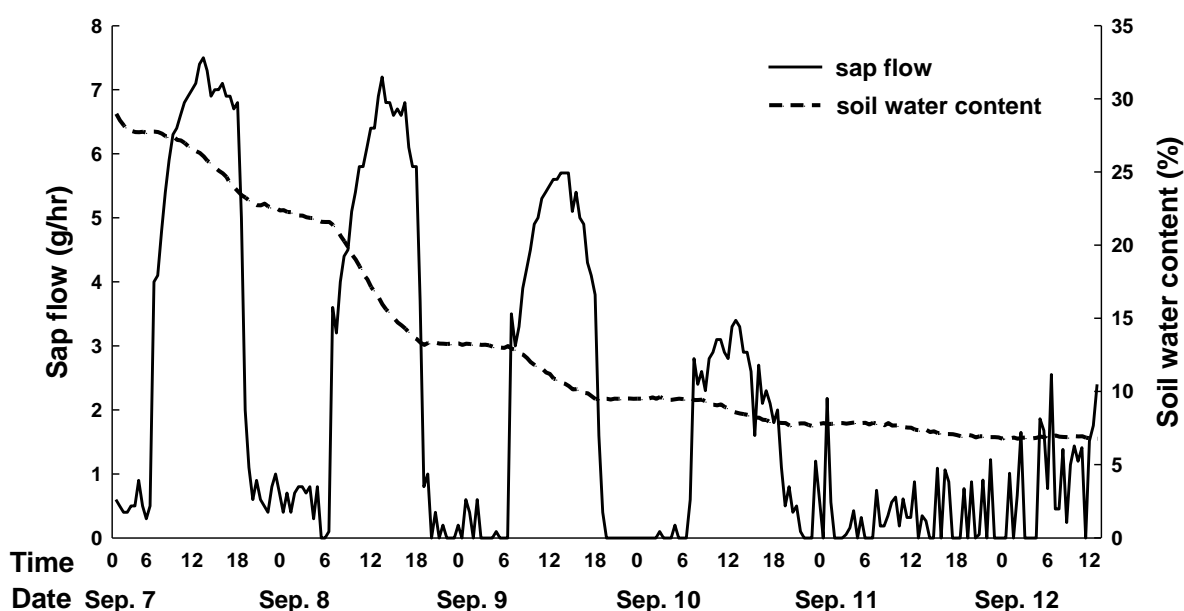


圖 3. 金柑盆栽土壤含水率與莖流量變化之關係。

Fig. 3. The relationship between soil water content and stem sap flow of the potted kumquat.

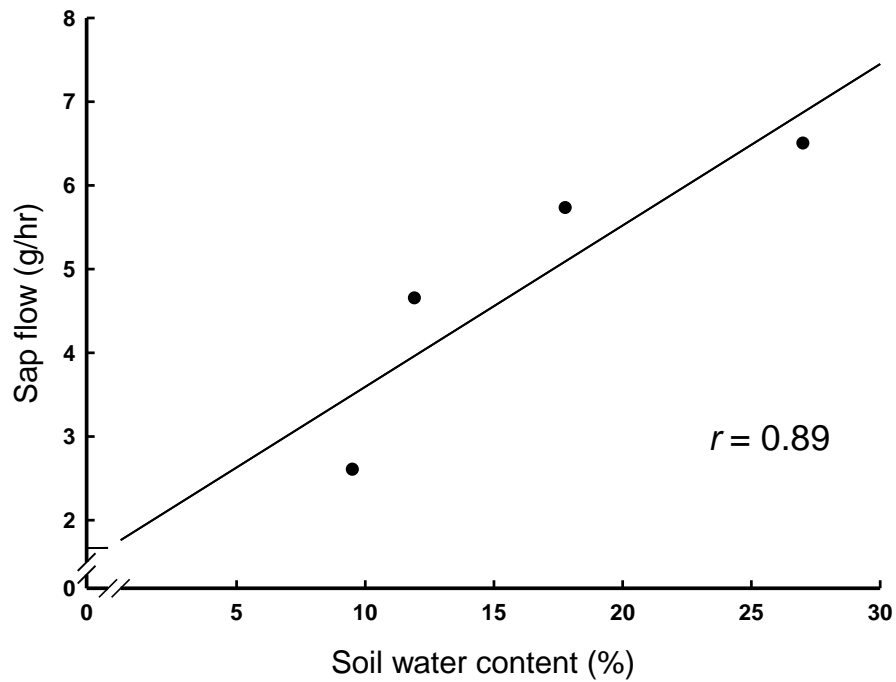


圖 4. 日間（6:00 AM - 6:00 PM）盆栽土壤含水率與金柑莖流量之關係。

Fig. 4. The relationship between soil water content and stem sap flow of kumquat during 6:00 AM - 6:00 PM.

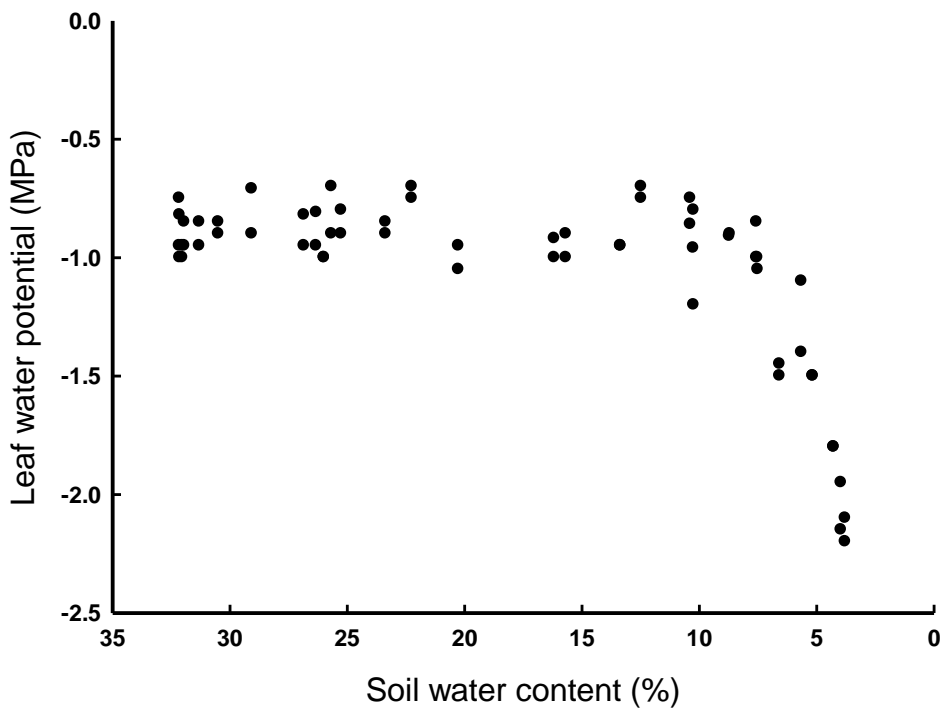


圖 5. 金柑盆栽土壤含水率與葉片水勢變化之關係。

Fig. 5. The relationship between soil water content and leaf water potential of the potted kumquat.

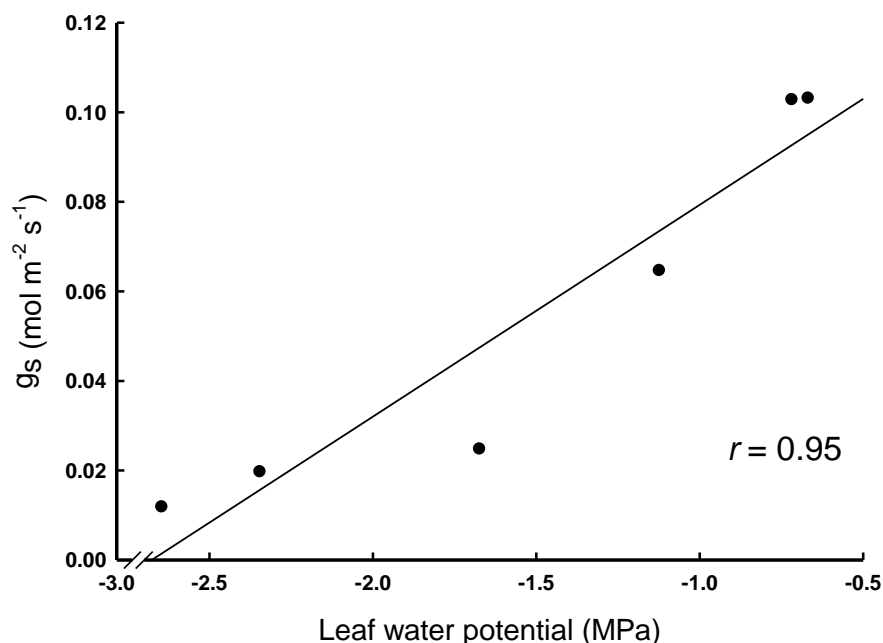


圖 6. 金柑葉片水勢與葉片氣孔導度之關係。

Fig. 6. The relationship between leaf water potential and stomatal conductance of the potted kumquat.

綜合上述，金柑植株之生理變化受土壤含水率影響甚鉅。本研究結果顯示，當土壤含水率於 15.0-29.6%時，植物之莖流量呈正常之規律性變化；而若土壤含水率降至約 10.0%以下，植物莖流量之規律性變化即消失。同時監測之葉片水勢，則是在低含水率情況下始具較明顯之變化趨勢；亦即，不同土壤含水率情況下，莖流量及葉片水勢變化趨勢不同，顯示兩指標於不同土壤含水率下之監測靈敏度差異性。當土壤含水率較高時，35°C之光照環境驅使植物氣孔正常開張，因此蒸散作用進行，莖流變化明顯；但當土壤含水率下降至 10.0%以下，金柑葉片凋萎並捲曲，植物處於明顯缺水狀態，此時葉片氣孔因乾旱逆境而關閉，氣孔導度下降，蒸散作用停止，植物莖流流動停止，因此產生不規則波動；而葉片水勢量測則不受莖流流動停止影響，隨著土壤含水率下降而明顯降低。

量化植物需水狀態以及指標化植物缺水程度，以供灌溉系統進行精準灌溉作業，使作物達到最佳生長狀態，是盆栽灌溉技術上重要的依據。當土壤排出重力水，土壤微管完全充水時，即為土壤水飽和狀態，亦可稱此時土壤水分達田間容水量，此時土壤水分充足，植物根系可因滲透壓差順利吸水。當土壤水分含量逐漸下降，並減少至某一限度時，植物根系則因土壤水勢過低而無法順利吸水，植株開始呈現凋萎現象，若萎凋情況無法經由復水而解除，則此時之土壤含水率則稱為永久萎凋點（Permanent wilting

point)。植物於土壤中可利用水即介於田間容水量及永久萎凋點間之含水量，亦稱為有效水 (available water) (郭，2003；鄭等，2007)。本研究之土壤配方 (田土：河砂：泥炭土：椰纖 = 2：4：1：1)，於土壤水飽和狀態之土壤含水率，即為此土壤之田間容水量約為 30%；當盆栽金柑放置於日/夜溫 35/30°C，相對溼度 80% 之生長箱中，金柑葉片於環境中經由蒸散消耗水分，致使土壤含水率逐漸下降，置放 3 天後，土壤含水率大幅下降至約 10%，植物之氣孔逐漸關閉、氣孔導度下降、蒸散流動停止並呈現萎凋，亦即此時之土壤含水率應為植物正常生長之最低值，對植物已造成乾旱威脅。本研究之土壤有效水範圍為 10-30%，因此有效水含量為 20%，當此 20% 之有效水含量減少 60%，亦即僅剩餘 40% 有效水時即應進行灌溉，此時之土壤含水率為 18%，此值可作為本研究金柑盆栽之灌溉閾值 (圖 7)，當土壤含水率低於此閾值時即需進行灌溉作業。

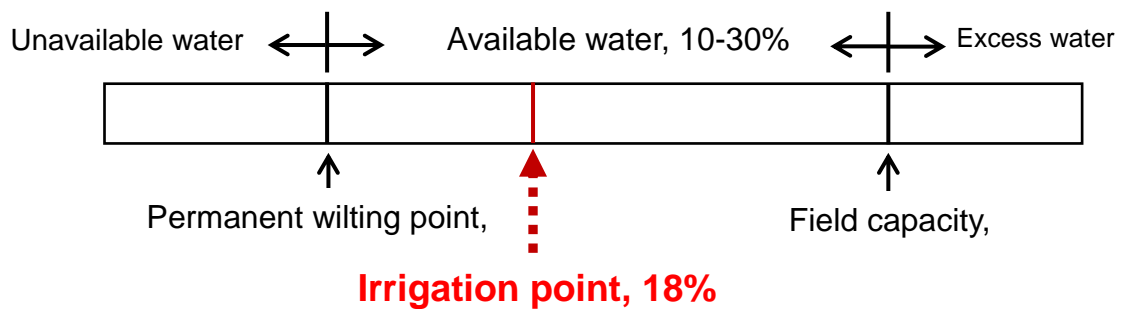


圖 7. 盆栽金柑灌溉策略概念圖。

Fig. 7. The schematic of irrigation strategy of the potted kumquat.

肆、結論

透過植物需水狀態量化及植物缺水程度指標化，可提供精準之灌溉策略，使中大型木本盆栽植物正常生長。裝設土壤含水率感測裝置之金柑盆栽放置於日/夜溫 35/30°C，相對溼度 80% 及日光照 12 hr 之生長箱中，進行盆栽土壤含水率之監測，並進行植物水分生理指標莖流量、莖水勢及氣孔導度的相關性分析。金柑種植於土壤配方為田土：河砂：泥炭土：椰纖 = 2：4：1：1 之介質中，於生長箱中置放 3 天後，盆栽土壤含水率由 29.6% 大幅下降至約 10%，土壤有效水範圍為 10-30%，有效水含量為 20%。以 20% 之有效水含量進行灌溉點水分含量估算，當有效水總量減少 60%，亦即僅剩餘 40% 有效水時即應進行灌溉；即當土壤含水率降至 18% 時，達金柑盆栽灌溉閾值，應進行灌溉以利植株生長。

參考文獻

- 施昭彰、向為民。1992。不同時期的乾旱處理對梨樹枝梢生長之影響。中華農業研究 41: 357-360。
- 郭幸榮。2003。植物在逆境下的生存策略。科學發展 336: 32-37。
- 陳榮坤、楊純明。2002。簡介農作物光譜-植被光譜特徵與植體水分含量之關係。農業試驗所技術服務 50: 7-13。
- 潘瑞熾主編。2013。植物的抗性生理。第 12 章。”植物生理學”。pp. 325-345。藝軒圖書出版社。台北。
- 鄭寶仁、趙靜夫、黃瑞海、解賀橋、張紅燕、馬建華、杜俊卿。2007。土壤與肥料。初版。北京：北京大學。
- Hopkin, W. G., and N. P. A. Hüner. 2008. Responses of plants to environmental stress. Ch 13 in “Introduction to Plant Physiology”, 4th ed., pp. 223-240. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.
- Kim, Y., and R. G. Evans. 2008. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. Comput. Electron. Agric. 66: 159-165.
- Lin, L. L., and H. H. Chen. 2006. A study on estimating soil water characteristics. J. Soil Water Conserv. 38: 387-302.
- Lopez, R., J. A. F. Soto, J. Suardiaz, P. Sanchez, A. Iborra, and J. A. Vera. 2009. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain. Comput. Electron. Agric. 68: 25-35.
- Nxele, X., A. Kleinb, and K. Ndimba. 2017. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. S. Afr. J. Bot. p. 261-266.
- Smith, D. M., and S. J. Allen. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. J. Exp. Bot. 47: 1833-1844.

108年 3月 19日 投稿

108年 5月 8日 接受