

利用葉片溫度進行灌溉管理—以北台灣玉米為例

USING LEAF TEMPERATURE MEASURES FOR IRRIGATION MANAGEMENT OF CORN IN
NORTHERN TAIWAN

國立中央大學
土木工程學系
碩士

陳紀穎
Chi-Ying Chen

國立中央大學
土木工程學系
特聘教授

吳瑞賢*
Ray-Shyan Wu

國立中央大學
土木工程學系
碩士班研究生

劉姿吟
Zi-Yin Liu

摘 要

本文利用作物水分逆境指數 (Crop Water Stress Index, CWSI) 對玉米進行監測，量化作物的水分狀況。試驗將玉米分為「乾燥」與「濕潤」兩種處理組別來建立其上下基準線，並透過建立好的上下基準線探討 CWSI 之變化。本研究結果探討分三個部分：1. 建立當地上下基準線；2. 討論不同灌溉深度對 CWSI 數值變化；3. 探討 CWSI 與土壤水分含量之間的關聯性。試驗一中顯示玉米在灌溉後，前期會因停止灌溉而導致 CWSI 略為上升至 0.35 左右，之後三天會因為土壤水分不足而大幅上升增加至 0.8，建議生長時期將玉米之 CWSI 控制在 0.35 以下；試驗二中 CWSI 的不穩定，推斷為天氣因素不佳，量測時為陰天，使得無法利用 CWSI 判斷植株的水分情況，因此建議在使用 CWSI 進行量測時須於晴天收集數據，以降低不準確性；試驗三則顯示玉米的 CWSI 確實會因為灌溉而有上下變動，故本研究認為透過 CWSI，並結合大面積遙測監測對玉米進行灌溉時程制定是可行的。

關鍵詞：水分逆境指數、葉片溫度、灌溉管理、土壤含水量。

* 通訊作者，國立中央大學土木工程學系特聘教授兼副校長
32001 桃園市中壢區中大路 300 號 · raywux@gmail.com

USING LEAF TEMPERATURE MEASURES FOR IRRIGATION MANAGEMENT OF CORN IN NORTHERN TAIWAN

Chi-Ying Chen

National Central University
Department of Civil Engineering

Ray-Shyan Wu*

National Central University
Department of Civil Engineering

Zi-Yin Liu

National Central University
Department of Civil Engineering

ABSTRACT

In this study, Crop Water Stress Index (CWSI) is used as an indirect measurement to quantify the water status of corn in northern Taiwan. To develop both the upper and lower baseline required in defining CWSI, two groups, namely “dry” and “wet”, of water status of corn are discussed and then CWSI can be calculated based on these baselines. There were three experiments conducted on the corn field. The first experiment helped in developing both the upper and lower baselines on the corn in northern Taiwan. The second experiment was applied to explore the change of CWSI under different irrigation depth. The third part revealed relationship between CWSI and soil moisture. Based on the result of the first experiment, the CWSI slightly increased to 0.35 around 2 days after cutting off the irrigation. Due to the low soil moisture, CWSI substantially increased to 0.8 in the next 3 days. Therefore, it is recommended that CWSI of the corn should be maintained under 0.35. According to the second experiment, the result showed that CWSI is unstable. It is suspected that CWSI cannot indicate the water status of plants, which is probably owing to its poor weather condition. As a result, it is suggested that such experiments of monitoring the water status through CWSI shall only be conducted under clear days to avoid the inaccuracy. The third experiment indicates that CWSI of the corn field did show fluctuations caused by irrigation. It is feasible to perform irrigation management of corn field through monitoring CWSI with remote sensing on leaf temperature of the area.

Keywords: Crop water stress index, Leaf temperature, Irrigation management, Soil water content.

一、前言

台灣的標的用水主要分為三種：農業用水、工業用水、民生用水。以農業用水為大宗占了七成。由於台灣的降雨季節分配不均，夏雨冬乾，倘若隔年的梅雨來晚了，或是前一年的颱風雨量不足時便會造成台灣的乾旱，因此水量的調配成了重要的課題。

蒸發散觀測需要花費許多經費與儀器以進行數據蒐集及估算，而地區氣候的不同亦會使經驗式運用上有所困難。傳統的植物水分狀況量測方法大多依據土壤水分的測定、蒸發散量的估算、對植物直接測量其莖水勢、氣孔導度等。這些方法的使用上多半較為繁瑣或對植物、土壤具破壞性，並且僅能反映出一小區域的狀況，若能透過監測葉面溫度，將能以遙測方式快速取得大面積植物水分逆境情況，以取代傳統之植物水分測定方式，具有實務應用之價值。

根據統計，台灣平均每十年會出現一次大乾旱、二至三年出現一小旱，在近期就出現兩次嚴重乾旱分別為 2015 年及 2021 年。當水資源吃緊時，民生用水為排序優先用水，對占了總水量的農業用水進行減供甚至於停耕的政策，而農業休耕將進一步影響到我國的糧食供應與經濟發展的穩定，因此水量的分配是個重要的關鍵。從前遵循著過往的經驗給予灌溉水量，近幾年來科技的日新月異，熱像儀輔助了農業上的操作，透過熱成像我們可以判斷植物的狀態，並擬定灌溉時間，本研究目的在於利用葉片溫度結合蒸氣壓差對玉米進行監控，發展屬於台灣的上下基準線，透過不同灌溉量探討作物水分逆境指數 (Crop Water Stress Index, CWSI) 的變化，並建立作物水分逆境指數與土壤含水量的關係式，往後便可利用 CWSI 估算出土壤含水量，推估出灌溉所需用水量，用於用水管理。

二、水分逆境指標理論

Idso (1981) 考慮環境因素，基於 “Stress-Day-Degree” 的概念，提出一種作物水分逆境指標 (Crop Water Stress Index, CWSI) 來量化植物的水分狀況。作物水分逆境指標由兩條基準線組成，如圖 1 所示，分為上基準線 (Upper Baseline) 與下基準線 (Lower Baseline)。下基準線表示為在水分供應充足的狀態下，不受土壤水分影響下，植物以潛在蒸散量進行蒸散作用時的 ΔT 與 VPD 的線性迴歸方程式，如下式：

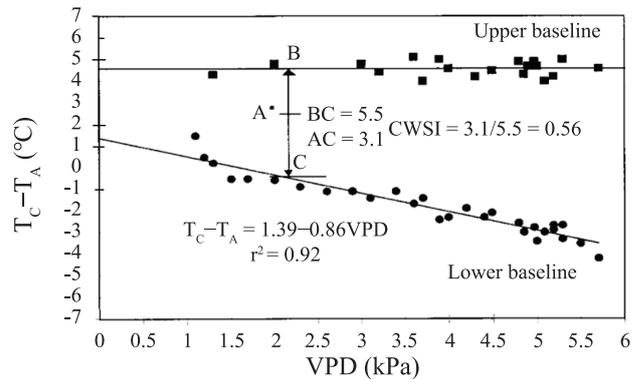


圖 1 CWSI 計算之示意圖 ($p < 0.05$)

$$(T_C - T_A)_L = a + b \times \text{VPD} \dots\dots\dots(1)$$

$(T_C - T_A)_L$ 為土壤水分供應充足時，植物以潛在蒸發散量進行蒸散作用時的葉溫減氣溫之差值 ($^{\circ}\text{C}$)； a 為截距； b 為斜率；VPD 為蒸氣壓差 (kPa)。

其中：

$$\text{VPD} = e_s - e_a \dots\dots\dots(2)$$

$$e_s = 0.6108 \times e^{\frac{17.27 \times T}{237.3 + T}} \dots\dots\dots(3)$$

$$e_a = e_s \times RH \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

e_s 為飽和蒸氣壓 (kPa)； e_a 為實際蒸氣壓 (kPa)； T 為溫度 ($^{\circ}\text{C}$)； RH 為相對濕度 (%)。

另一條基準線為上基準線，表示為作物處於完全缺水之逆境情況下。因土壤根系無法供給足夠水分，使植物蒸散作用停止，防止水分的散失，因此葉面氣孔關閉，造成葉面溫度的上升，此時的 (葉面溫度) - (空氣溫度) 即為上基準線。

得出兩條上下基準線後，對作物進行測量，由當時的氣溫、葉溫、蒸氣壓差，計算出 CWSI 值，如圖 1：

$$\text{CWSI} = \frac{(T_C - T_A)_A - (T_C - T_A)_L}{(T_C - T_A)_U - (T_C - T_A)_L} = \frac{AC}{BC} \dots\dots\dots(5)$$

CWSI 的範圍介於 0~1 之間，接近 0 表示靠近下基準線，植物的水分狀態良好；接近 1 表示靠近上基準線，植物面臨缺水狀態需要進行灌溉。然而，每種作物對於需水量的要求不一，因此 CWSI 對各種作物有不同的標準。

三、研究區域與方法

3.1 研究區域

本研究的試驗田區位於關渡平原，該平原為臺北市最後一片大規模的農業生產區，其中試驗田區所在的南關渡平原北緯 $25^{\circ} 116'$ ，東經 $121^{\circ} 491'$ ，如圖 2 所示，主要灌溉水源為八仙圳，水源取自於磺溪，總長約 3,653 公尺。關渡平原位於台北盆地西北邊，淡水河與基隆河之交會處，由於距離淡水河出口僅約 10 公里，區域內的生態環境深受淡水河口潮汐漲落影響，為半鹹淡且兼具水域、泥灘地、沼澤等多樣的溼地環境，動植物生態豐富，自古以來一直是候鳥的重要棲息地。

關渡平原位於台北市北投區，北投因位於大屯山南麓的背風坡，故雨量較少。根據中央氣象局石牌氣象觀測站資料，紀錄年分為 2000 ~ 2020 年，共計 21 年，以日為單位的氣象資料共 7,671 天，取各個月份的平均資料；在風速資料統計上，使用的資料年分僅為 2020 年。本研究區域位於關渡平原內，設有雨量觀測站，鄰近關渡試驗田區雨量站為氣象局所建立之石碑觀測站；台灣水資源與農業研究院 (以下簡稱台

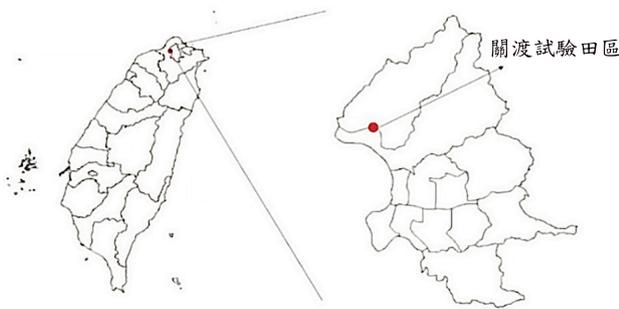


圖 2 研究區域示意圖



圖 3 台農院關渡測站

農院) 於 2019 年建置另一觀測站—台農院關渡站，在本研究中空氣溫度、相對濕度、降雨量，均採用此測站。

關渡地區全年各月平均溫度最低為 1 月之 16.9°C ，最高為 7 月之 30.4°C ；平均月降雨量 60~320 mm，其中多集中於 5~9 月；年平均總降雨量為 1894 mm；月平均相對濕度為 69~73%；月平均風速為 1.2~2.8 m/s；年平均日照時數為 1,606 小時，年平均日照率為 35.7%。

本研究之研究作物為玉米，分為 3 塊試驗區，每一區塊長 8 公尺，寬 0.7 公尺，玉米的株距為 0.8×0.5 公尺，從 2021 年 2 月 6 日播種。

在台灣，玉米每年栽培面積約有 10,000 ~ 12,000 公頃，主要產區在雲林、臺南和嘉義地區。玉米的株高約 2 公尺，依照不同品種高度上略有差異。春作之玉米生長期約 100~120 天，秋作約 110~130 天。其開花期與成熟期隨氣溫變化而異，從播種至開花期約 55 天，開花期至採收約 35~50 天。

3.2 葉溫測量

本研究使用手持式紅外線測溫槍，為 BOSCH 公司所製造的型號 GIS500 測溫槍，其優點：i.不用直接接觸待測物，避免對植物造成破壞 ii.反應時間快速。

由於紅外線溫度計所量測的是一個區域的平均溫度，因此在使用紅外線溫度槍量測溫度時，必須特別注意與待測物的距離以及儀器本身的 FOV 值 (Field of View)，確保量測區域內只有待測物的存在，以避免測量上的誤差。根據說明書指示測溫槍距葉片大約為 20 公分，方能避免有其他物體影響到測量。在紅外線溫度槍測量葉片溫度時，其夾角之角度亦會影響溫度的準確性，根據建議與葉面垂線的夾角應在 15° 內，若能垂直於葉面最佳。

輻射率是依據待測物本身溫度輻射出的能量來描述待測物體輻射能力的參數，亦指物體自身輻射的能量與同一溫度下絕對黑體所輻射能量之比值。輻射率僅與物體表面性質有關，如成分、結構等。輻射率數值介於 0~1 之間，其值的大小與被測物的材料、形狀、表面粗糙度、凹凸度等有關。而紅外線測溫槍從待測物體上接收到的輻射能量大小與待測物的輻射率成正比。故在輻射率的設定上為 0.95。

測量日選為晴朗無雲的天氣情況，從 2021 年 3 月 10 日開始，持續到 2021 年 5 月 25 日，於上午 11 時至下午 2 時區間至關渡試驗田區進行葉溫測量。

3.3 土壤水分含量

水分是作物生長不可或缺的元素之一，適時適量

供給作物水分為灌溉管理中重要的一環，精確且適時的水量灌溉不僅有益於作物，亦可提高用水效率。本研究使用之土壤水分計為電導式便攜土壤水分計，本儀器係由土壤介電常數的變化計算得出土壤重量水分含量。其能對各類土壤和多種介質的水分進行測量，可作為水分定點監測或移動測量的工具，有低功耗、便於攜帶、性價比高等優點。

在土壤含水量資料收集上，本研究分別以地表下深度 10 公分、20 公分、30 公分、40 公分進行採樣，量測其土壤重量水分含量。從 2021 年 4 月 20 日到 2021 年 5 月 25 日進行資料收集，每次量測從深度 10 公分開始，待 5 ~ 10 分鐘其數據穩定後再進行 20 公分處的資料收集，以此類推收集至 40 公分處土壤水分含量資料。

3.4 分析方法

線性迴歸 (Linear regression) 是指利用線性迴歸方程的最小平方函數對一個或多個自變數 (Independent variable) 和依變數 (Dependent variable) 之間關係進行建模的一種迴歸分析。這種迴歸分析是由一個或多個自變數組成，只有一個自變數的情況稱為簡單迴歸，大於一個自變數情況則叫做多元迴歸。

本研究係利用簡單線性迴歸並以決定係數 (Coefficient of determination, R^2) 為判定標準，驗證葉面溫度、空氣溫度差值及土壤水分含量三者間是否存在關聯性。

線性迴歸方程式如式 (6)

$$Y = a \times X + b \dots\dots\dots(6)$$

X 為自變數；Y 為依變數；a 為斜率；b 為截距。

四、結果與討論

本研究利用經驗型 CWSI 來對作物進行監測，將結果將分為三個部分。首先為建立水分逆境指數之上、下基準線、接著探討不同灌溉深度對 CWSI 數值變化，最後則是 CWSI 與土壤水分含量之間的關聯性。

4.1 上下基準線建立

首先將玉米分為兩區域並選取相同大小之植株，一區充分給水達到濕潤狀態，每次取樣七株玉米用以

建立下基準線；另一區則不做任何灌溉，使玉米因缺水逆境而呈現暫時性凋萎，在不傷其結構狀態下進行乾燥處理，每次取樣三株玉米用以建立上基準線，透過葉片溫度減去空氣溫度之差值取平均後求得上基準線。於 2021 年 3 月 10 日至 2021 年 4 月 15 日 (播種後 32 天至播種後 69 天) 11 時至 14 時期間測量葉面溫度，並利用台農院關渡測站資料取得相對濕度、空氣溫度建立迴歸式。

圖 4 為利用葉面溫度和空氣溫度的差值與蒸氣壓差建立之迴歸經驗式。由圖可看出，在下基準線中 $(T_C - T_A)$ 與 VPD 確實呈一線性關係 ($(T_C - T_A)_L = -3.06 \times VPD + 4.69, R^2 = 0.62$)，當 VPD 越大時， $(T_C - T_A)$ 則越小。 $(T_C - T_A)$ 與 VPD 的線性迴歸式有其獨特的截點及斜率，意即下基準線的建立會因為植物種類、土壤質地、氣候條件而有不同的斜率與截距。下基準線資料收集上，大部分的 $(T_C - T_A)$ 皆大於 0，這方面與台灣天氣相對濕度高有關，有偏小的 VPD。若於較為炎熱的夏季建立下基準線， $(T_C - T_A)$ 值將會更趨近於 0 甚至有小於 0 的情況。

此外，本研究比對了過去國外文獻，表 1 為收集不同區域之玉米下基準線，截距與斜率分別為 0.8 ~ 3.2 與 -0.7 ~ -3 之間，相同地區因氣候條件相同，下基準線截距、斜率相近，但可能因測量當時天氣條件而有些許差異；當地區不同時所建立之下基準線差異甚鉅，溫度、濕度、輻射量、風速等皆會影響，與本研究之下基準線相比，截距大於他人的研究，推測因台灣濕度高，VPD 之範圍不同而有所差異。

與其他國家相比，台灣相對濕度約 70 ~ 75 %，而他人研究中相對濕度大部分落在 40 ~ 60 %，如 Zhang *et al.* (2019) 研究區域為亞熱帶沙漠氣候，其相對濕度約 35 % 左右，此會影響 VPD 範圍而產生較大的差異，建議在使用上應發展當地之下基準線；另外 Payero *et al.* (2005) 收集過去前人對玉米、苜蓿所建立的下基準線，指出不同地區的物種對下基準線會有其獨特性，建議下基準線須透過實驗來建立。

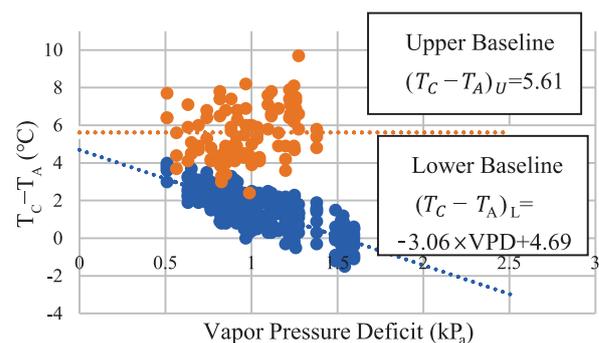


圖 4 水分逆境指數之上、下基準線 ($p < 0.05$)

表 1 不同地區之玉米下基準線

	地區	氣候	下基準線
Irmak <i>et al.</i> (2000)	Antalya, Turkey	地中海半乾旱氣候	$(T_C - T_A)_L = -0.86 \times VPD + 1.39^\circ\text{C}$
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Dalate Banner, China	溫帶大陸性氣候	$(T_C - T_A)_L = -3.35 \times VPD + 2.96^\circ\text{C}$
Yazar <i>et al.</i> (1999)	Texas, America	夏雨型暖溼氣候	$(T_C - T_A)_L = -2.56 \times VPD + 1.06^\circ\text{C}$
Idso (1982)	Arizona, America	亞熱帶沙漠氣候	$(T_C - T_A)_L = -1.97 \times VPD + 3.11^\circ\text{C}$
Nielsen & Gardner (1987)	Colorado, America	半乾旱氣候	$(T_C - T_A)_L = -2.06 \times VPD + 2.67^\circ\text{C}$
Stegman (1986)	Texas, America	夏雨型暖溼氣候	$(T_C - T_A)_L = -1.93 \times VPD + 0.84^\circ\text{C}$
Taghvaeian <i>et al.</i> (2012)	Colorado, America	半乾旱氣候	$(T_C - T_A)_L = -1.90 \times VPD + 2.73^\circ\text{C}$
本研究	關渡, 台灣	副熱帶季風氣候	$(T_C - T_A)_L = -3.06 \times VPD + 4.69^\circ\text{C}$

上基準線則表示植物遭受嚴重水分逆境的情況，為一水平直線，不因 VPD 而產生變化。Jackson (1981) 利用 $(T_C - T_A)$ 與植物水勢建立相關性，發現植物水勢降低至 -30 bars 後， $(T_C - T_A)$ 僅有些微的變化；到達 -50 bars 後， $(T_C - T_A)$ 則達到極限 5°C ，因此 Jackson (1981) 建議上基準線可以定義在 $(T_C - T_A)_U = 5^\circ\text{C}$ 。本研究中玉米處於缺水逆境時，上基準線結果 $(T_C - T_A)_U = 5.613^\circ\text{C}$ ，與 Jackson (1981) 結果相差不大，這表示直接利用建議值 5°C 對 CWSI 的運算上不會產生過大的影響。

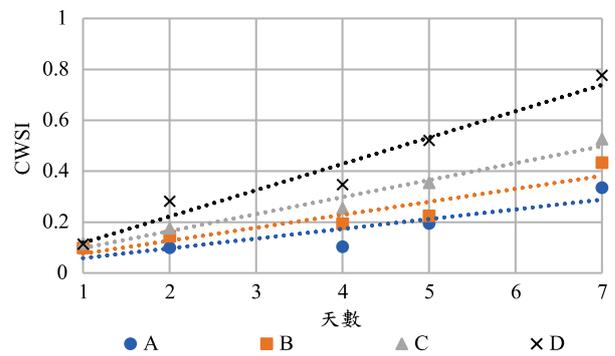


圖 5 試驗一各組之 CWSI 與時間的變化

4.2 不同灌溉深度比較

作物水分逆境指數是利用葉片溫度與空氣溫度之差及蒸氣壓差，透過適當地運算而量化植物的缺水情況，其值趨近 1 表示植物此時靠近上基準線，為植物極其缺水、氣孔關閉、無法利用蒸散作用帶走熱能的情況；而趨近 0 時則表示植物此時靠近下基準線，水分供給充足、植物可行蒸散作用帶走熱能。本研究將以下分成三組實驗，探討不同的灌溉深度及控制在不同的 CWSI 其變化趨勢。

4.2.1 試驗一

本試驗於 2021 年 4 月 20 日至 2021 年 4 月 26 日 (播種後 74 天至播種後 80 天) 展開，將為期 7 天的試驗分成 A、B、C、D 不同灌溉水量之四個組別，其中 A、B、C 組僅於第一天進行灌溉 (灌溉水量如表 2)；D 組則是不進行任何灌溉。另外本次試驗過程中並未有降雨事件。

圖 5 為本研究於分組實施不同灌溉水量並記錄下之 CWSI 的變化。可以看出雖然第一天便給予不同水

表 2 試驗一不同分組之灌溉水量

	A	B	C	D
灌溉水量 (mm)	56	28	14	0

量，此時 CWSI 並未因為灌溉量不同而有明顯差異，皆維持在 0.1 附近。第二天 A、B 兩組實驗之 CWSI 亦未有明顯升高，推測乃因土壤保持一定水分含量供給植物進行蒸散作用，因此 CWSI 仍與前一天差不多；在 D 組由於無灌溉量，與前一天資料相比 CWSI 有約 0.2 的上升，之後 CWSI 有逐漸上升的趨勢。在 A、B 兩組試驗中 CWSI 上升的幅度差不多，C 組試驗上升幅度略微大於前者，而由 D 組可以看出，CWSI 增加的速度明顯大於其他三組。根據結果推論：玉米在灌溉後，前期會因停止灌溉而導致 CWSI 略為上升至 0.35 左右，而後 CWSI 會因為土壤水分不足而大幅上升。

4.2.2 試驗二

本試驗於 2021 年 5 月 2 日至 2021 年 5 月 7 日 (播種後 86 天至播種後 91 天) 進行，在試驗開始前，4/27、4/28、4/29 有降雨事件，降雨量分別為 2.5 mm、15 mm、24 mm，除此外並未進行任何灌溉。同樣將為期 6 天的實驗分成 A、B、C、D 四個不同灌溉水量之組別，其中 A、B、C 組僅於第一天進行灌溉 (灌溉水量如表 3)；D 組則是不進行任何灌溉。然而，本次試驗中 5/5 發生降雨，雨量為 20 mm。

圖 6 為本試驗不同灌溉水量各分組之 CWSI 的變

表 3 試驗二不同分組之灌溉水量

	A	B	C	D
灌溉水量 (mm)	14	7	3.5	0

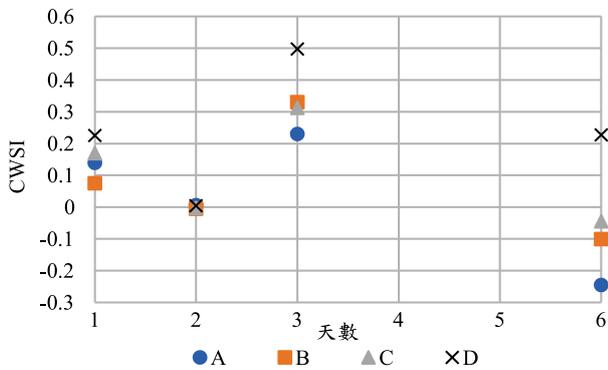


圖 6 試驗二各組之 CWSI 與時間的變化

化。因本研究先量測葉溫後再行灌溉，因此隔天才能觀察灌溉是否被植物有效利用。從圖 6 可以看到第一天各組 CWSI 分布在 0.08 ~ 0.22 之間；第二天各組 CWSI 又一致性回到 0 的位置，並無因灌溉量不同而產生差異；第三天各組資料出現明顯差異：以 A 組之值為最低，D 組之值則最高，反映出灌溉對植株造成的影響；第四天因有降雨事件，四個組別均給了 20 mm 的灌溉量；第六天 A、B、C 三組之 CWSI 均小於 0。關於 CWSI 不穩定之原因推測為當時的天氣不佳，使得無法利用 CWSI 準確判斷植株的水分情況。

判斷以下兩個原因會導致 CWSI 大於 1 或小於 0。

1. 受天氣情況有所影響。如先前介紹在使用 CWSI 對作物進行監測時，應在晴朗無雲好天氣下，由於陰雨天影響到葉溫的表現，無法判斷 CWSI 的準確性，測量出的值低於 0。當淨輻射量降低時，葉溫通常亦會隨之降低，因此試驗期間遇上陰雨天，經驗型 CWSI 便容易受天氣因素影響而降低其準確度。
2. 植物之狀態會影響將植物進行水分控制以建立上下基準線的過程。當上基準線設定太低時，CWSI 便會大於 1；反之，下基準線設定太低時，CWSI 便會小於 0。建議可搭配其他量測方式，如測量葉水勢、莖水勢等，來判定植物狀態以更準確地建立上下基準線。

4.2.3 試驗三

本試驗於 2021 年 5 月 12 日至 2021 年 5 月 17 日 (播種後 96 天至播種後 101 天) 進行。亦將為期 6 天的實驗，分成 A、B、C、D 四個組別 (灌溉水量如表 4)，此試驗以不同的 CWSI 進行灌溉。當 CWSI 達到

表 4 試驗三不同分組之灌溉水量 (mm)

灌溉日	A	B	C	D
1	7	7	0	0
2	7	7	0	0
3	14	14	14	0
4	21	21	21	21
5	0	0	0	21

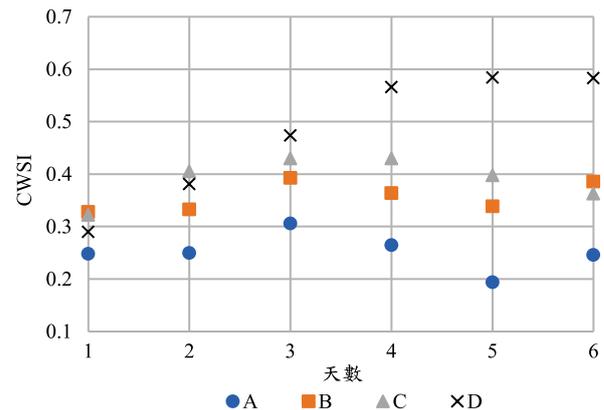


圖 7 試驗三各組之 CWSI 與時間的變化

設定值時便給予灌溉，各組設定 CWSI 值分別為：A 組 0.25；B 組 0.35；C 組 0.45；D 組 0.55，在每一天計算完 CWSI 後針對達到預設值的組別進行灌溉，在本次試驗中未發生降雨事件。

圖 7 為本試驗針對 CWSI 控管達到預設值進行灌溉之變化。因本研究先量測葉溫後再行灌溉，計算得出 CWSI 後，若結果接近預設值才予以灌溉；反之，若未達到則不灌溉，因此隔天才能觀察灌溉是否被植物有效利用。

從圖 7 可以看到第一天 A、B 兩組 CWSI 分別為 0.25 與 0.33，接近灌溉之預設值，在測量後給予灌溉；第二天 A、B 兩組 CWSI 與先前接近，既沒有上升趨勢也並未因灌溉量數值下降，因此再次進行灌溉；第三天 A、B 兩組之 CWSI 仍舊沒有下降趨勢反而上升，因此給予相較之前多一倍的灌溉量，C 組在試驗的第三天達到預設值，給予灌溉，D 組之值則是以每天增加 0.1 穩定上升；第四天 A、B 兩組因灌溉量的增加導致 CWSI 下降，但仍舊高於預設值，C 組是幾乎無變化，D 組則在此日接近門檻值 0.6，予以灌溉；第五天 A、B、C 三組之 CWSI 皆下降，其中以 A 組下降幅度最大，D 組實施灌溉後，CWSI 並未如期下降，但有減緩上升的跡象，故推斷可能需要提高灌溉量。

植物體利用水的過程需透過根系吸收、輸送等，無法即時透過 CWSI 看出灌溉是否有效。本研究

透過試驗三發現灌溉後的隔天 CWSI 會有下降的跡象，因此若想透過 CWSI 查看植物水分情形，建議應等待至少一天，待植物吸收水分後才能增加 CWSI 判斷上的準確性，亦說明 CWSI 判讀有時間差，但「可用來決定是否灌溉」這點亦與 Zhang *et al.* (2019) 中有相同的結果。

4.3 土壤含水量與 CWSI

本研究利用玉米為研究作物，透過不同灌溉量影響土壤水分含量（土壤水分含量高植物較易吸收水分；反之，土壤水分含量低植物吸收水分則較困難），找尋 CWSI 與土壤水分含量之間的相關性，以期能透過 CWSI 換算出土壤水分含量。

本研究針對地表下 10 公分、20 公分、30 公分、40 公分收集土壤水分含量資料與 CWSI 做相關性分析。土壤水分含量資料收集為試驗一及試驗三，因試驗二受降雨影響而不準確，並無將其一同做相關性分析。植物在根系吸收到水分再反應到葉溫上需一段時間，因此在相關性分析的部分，皆利用灌溉前的資料進行分析。

圖 8 為玉米之土壤水分含量數據收集。以 40 公分處土壤水分含量從高至低排列，該資料為灌溉隔天所收集。根據測量結果，本研究發現在地表下 10 公分處土壤水分含量最低；地表下 40 公分處的土壤水分含量最高，因較深層的土壤不會受到地表氣溫以及太陽輻射的影響，故深層土壤的含水量高於表層土壤。隨著土壤深度越深，土壤水分含量越高，若透過灌溉或降雨，土壤水分含量變化則會以表層土壤較為明顯；深層土壤的變化較為緩和。由於淺層土壤含有較多且大的孔隙，灌溉時入滲迅速；而深層土壤大孔隙較少，因而土壤水分變化較穩定。另外，儀器觀測灌溉對土壤水分的變化為即時性的，在灌溉後便可以立即透過儀器查看變化量，但是 CWSI 則有時間差。

圖 9 至圖 12 為不同深度之土壤含水量與 CWSI 相關性結果。在試驗二收集葉溫資料時受天氣影響 CWSI 的準確度，故在此沒有列入討論。在 CWSI 與不同深度土壤含水量之結果，土壤深度 10 公分、20 公分、30 公分、40 公分，決定係數分別為 0.69、0.72、0.78 及 0.81，越深層土壤與 CWSI 相關性越高；反之，淺層土壤與 CWSI 相關性較低，土壤深度 10 公分、20 公分處水分含量變化相對較大，但整體而言，此線性迴歸在預測四個不同深度之土壤水分含量與 CWSI 值之相關性均可準確預測且可直接應用於田間。根系在土壤中的分布深度、密度皆影響著土壤

表 5 不同深度之土壤水分含量與 CWSI 的決定係數與迴歸方程式

不同深度 (cm)	R ²	方程式
10	0.69	y = -13.10x + 47.48
20	0.72	y = -11.95x + 48.98
30	0.78	y = -12.22x + 47.94
40	0.81	y = -12.24x + 49.61
平均	0.82	y = -12.38x + 48.50

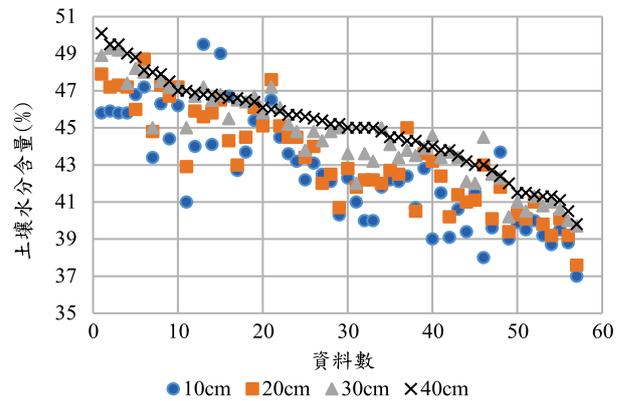


圖 8 各深度之土壤水分含量關係

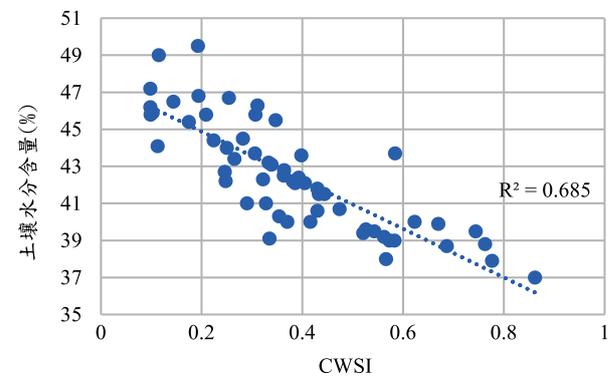


圖 9 地表下 10 cm 之土壤水分含量與 CWSI 相關性 (p < 0.05)

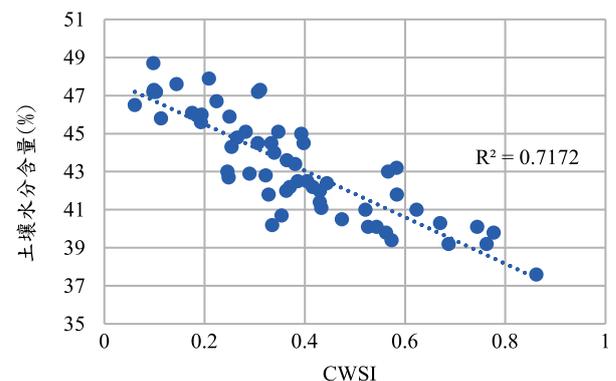


圖 10 地表下 20 cm 之土壤水分含量與 CWSI 相關性 (p < 0.05)

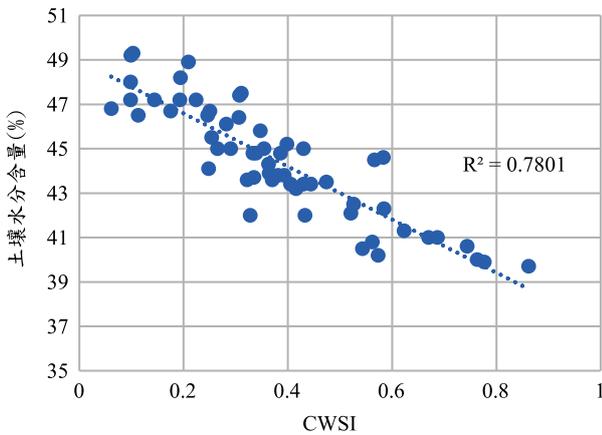


圖 11 地表下 30 cm 之土壤水分含量與 CWSI 相關性 ($p < 0.05$)

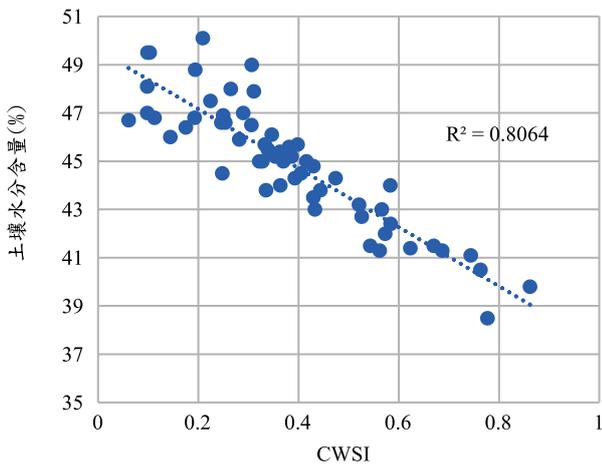


圖 12 地表下 40 cm 之土壤水分含量與 CWSI 相關性 ($p < 0.05$)

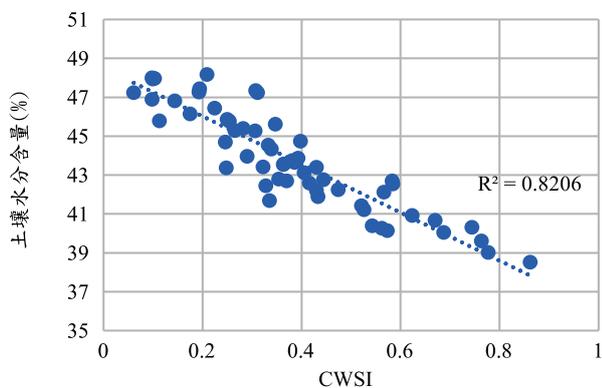


圖 13 平均土壤水分含量與 CWSI 相關性 ($p < 0.05$)

中水分的傳輸過程。此研究中玉米根系深度可達 80 ~ 100 公分，多集中於深度 40 公分處，此為深度 40 公分處與 CWSI 相關性較高之原因。圖 13 將 40 公分深之土壤水分含量取平均與 CWSI 進行迴歸分析， R^2 為

0.82。由於植物根系為連續的，意即玉米在淺層根部就會吸取水分，因此本研究認為在土壤水分含量與 CWSI 的相關性方面，雖深層土壤相關性較高但亦不可忽略表層土壤水分含量的影響。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本研究利用 Idso *et. al.* (1981) 所發展之水分逆境指數，對玉米進行灌溉監測，下基準線的斜率為 -3.062，截距為 4.693，決定係數為 0.62；上基準線 $(T_C - T_A)_U = 5.613$ ，與 Jackson (1981) 結果相差不大，故直接利用建議值：5 °C，對 CWSI 的運算上不會產生過大的影響。試驗一，CWSI 與時間的關係中，當 CWSI 增加至 0.35 後便快速上升，而土壤水分含量會隨著 CWSI 增加而下降，因此，為節省灌溉，建議將玉米之 CWSI 控制在 0.35 以下。
2. CWSI 對氣候要求較為嚴謹，僅能在晴朗無雲的天氣情況下蒐集數據。可從本研究試驗二中看到，於陰雨天蒐集之數據會有負值或低估的情形，造成 CWSI 的不準確性。
3. 試驗三中發現利用 CWSI 進行灌溉監測有其可行性。可透過 CWSI 數值高低估算灌溉深度，其中亦顯示 CWSI 在超過 0.35 時，變化量非依灌溉量有相關改變。因此本研究認為 CWSI 在 0.35 以下且灌溉相同深度時，CWSI 之變化值應極為接近。
4. 本研究測量土壤分層之水分含量取其平均數與 CWSI 進行迴歸分析，決定係數為 0.82。土壤水分含量上，越深層與 CWSI 的相關性越高，但亦不可忽略表層土壤水分含量的影響。

5.2 建議

本研究所發展的下基準線與文獻比對後，發現當地區不同時，下基準線之截距會有差異。因此在不同氣候條件下，應發展配合當地氣候條件之下基準線；上基準線的部分，可以直接使用 Jackson (1981) 所建議的 5 °C，並不會對試驗造成過大的影響。

參考文獻

1. Abdul-Jabbar, A. S., Lugg, D. G., Sammis, T. W., Gay,

- L. W., "Relationship between crop water stress index and alfalfa yield and evapotranspiration.", *Trans. ASAE*, Vol.28, pp.454-461, 1985.
2. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., "Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements", FAO Irrigation and Drainage Paper 56, electronic version 29, Italy, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
 3. Ehrler, W. L., "Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and meteorological factors.", *Agron. J.*, 65, pp.404-409, 1973.
 4. Han, M., Zhang, H., DeJonge, C. K., Comas, H. L., Gleason, S., "Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize.", *Agricultural Water Management*, Vol.2018, pp.366-375, 2018.
 5. Idso, S. B., "Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress", *Agric. Meteorol.* Vol.27, pp.59-70, 1982.
 6. Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., Hatfield, J. L., "Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability.", *Agricultural Meteorology*, Vol 24, pp.45-55, 1981.
 7. Idso, S. B., Jackson, R. D., Reginato, R. J., "Remote sensing of crop yields.", *Science*, Vol.196, pp.19-25, 1977.
 8. Irmak, S., Dorota, Z. H., Bastug, H., "Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn.", *Agron. J.*, Vol.92, pp.1221-1227, 2000.
 9. Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., Pinter, P. J., "Canopy temperature as a crop water stress indicator.", *Water Resources Research*, Vol.17, pp.1133-1138, 1981.
 10. Jones, H. G., "Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling.", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.95, pp.139-149, 1999.
 11. Kirmak, H., Irik, H. A., Unlukara, A., "Potential use of crop water stress index (CWSI) in irrigation scheduling of drip-irrigated seed pumpkin plants with different irrigation levels.", *Sci. Hortic.*, 256, 108608, 2019.
 12. Nielsen, D.C., and B.R. Gardner., "Scheduling irrigations in corn with the crop water stress index (CWSI)", *Applied Agricultural Research*, 2:295-300, 1987.
 13. Stegman EC. "Efficient irrigation timing methods for corn production." *Transactions of the ASABE* 29, pp.203-210, 1986.
 14. Taghvaeian, S., Chávez, J., Hansen, N., "Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado.", *Remote Sens.*, 4, 3619, 2012.
 15. Yazar, A., Howell, T.A., Dusek, D.A., Copeland, K.S., "Evaluation of water stress index for LEPA irrigated corn.", *Irrig. Sci.*, Vol.18, pp.171-180, 1999.
 16. Zhang, L., Zhang, H., Niu, Y., Han, W. "Mapping Maize Water Stress Based on UAV Multispectral Remote Sensing.", *Remote Sens.*, Vol.11, 2019.
 17. 古展宏, 「應用藍芽於溫室作物灌溉控制之研究」, 國立屏東科技大學生物機電工程所, 碩士論文, 2016。
 18. 李明達, 「水分逆境下植物影像特徵分析之研究」, 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所, 碩士論文, 2001。
 19. 周檳源, 「紅外線溫度計用於火鶴葉溫量測之研究」, 國立中興大學生物產業機電工程學系, 碩士論文, 2003。
 20. 姜善鑫, 「土壤溫度和作物體溫與農作物之關係」, 台灣地區農業氣象資源應用研討會專輯, 第 63-70 頁, 1989。
 21. 張敏德、黃裕益、盛中德, 「電阻式土壤水分感測器之研究」, 農林學報, 第 51 卷, 第 1 期, 第 15-27 頁, 2002。
 22. 陳加忠, 「土壤水分感測器之性能研究」, 農業工程學報, 第 43 卷, 第 4 期, 第 87-94 頁, 1997。
 23. 楊純明與賴小麗, 「土壤缺水與農作物植體溫度之關係」, 技術服務, 第 34 期, 第 7-9 頁, 1998。
 24. 蔣雨芳, 「黃金金露華和彩葉草之作物水分逆境指數 (CWSI) 與其水分狀況之研究」, 國立台灣大學, 碩士論文, 1995。
 25. 蔣德安, 「植物生理學」, 2018。
 26. 蘇元風, 「遙測應用於水稻水分逆境監測之研究」, 國立臺灣海洋大學河海工程學系, 碩士論文, 2004。

收稿日期：民國 111 年 04 月 14 日

修改日期：民國 111 年 06 月 17 日

接受日期：民國 111 年 07 月 25 日