

# 硬質玉米生育期需水量之研究<sup>1</sup>

謝禮臣<sup>2</sup>

## 摘 要

謝禮臣。2024。硬質玉米生育期需水量之研究。臺南區農業改良場研究彙報 85：28-42。

在臺灣，硬質玉米是重要雜糧作物，栽培面積超過 2 萬公頃，其中雲嘉南為主要產區，栽培面積占全臺總面積近 9 成。近年來，伴隨氣候變遷影響，降雨不均問題日益嚴重，對農作物生產造成影響。本研究旨在了解硬質玉米生育期需水量，經 111 ~ 112 年在嘉義朴子的試驗結果指出，111 年秋季硬質玉米生育期需水量為 195.8 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.29、作物發展階段為 0.51、中間階段為 0.54、末期階段為 0.25。112 年春季硬質玉米生育期需水量為 238.3 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.25、作物發展階段為 0.58、中間階段為 0.62、末期階段為 0.60。112 年秋季硬質玉米生育期需水量為 174.4 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.32、作物發展階段為 0.56、中間階段為 0.53、末期階段為 0.26。本研究建立 111 ~ 112 年度的硬質玉米生育期需水量及春秋兩季作物係數之結果，期能做為未來供灌參考。

**現有技術：**目前國內對硬質玉米需水量研究資訊甚少。

**創新內容：**本研究在不同季節中，透過精密的通量分析系統偵測田間實際作物蒸發散量 (ET)，並計算硬質玉米生育期間作物係數，做為後續供灌應用。

**對產業影響：**能提供農田水利署做為供灌參考依據，並降低因氣候風險而對硬質玉米造成之生產影響。

**關鍵字：**硬質玉米、作物係數、蒸發散量、需水量、氣候變遷

接受日期：2024 年 10 月 28 日

---

1. 農業部臺南區農業改良場研究報告第 580 號。

2. 農業部臺南區農業改良場助理研究員。712009 臺南市新化區牧場 70 號。

## 前 言

玉米 (*Zea mays* L.) 由於適應性廣泛，可在大部分地區種植，並供做糧食、飼料及加工用原料使用，故成為世界上最重要的糧食作物之一<sup>(17)</sup>。近年來，伴隨極端氣候的發生，降雨不足對玉米生產造成極大的挑戰。據鍾等人<sup>(13)</sup> 研究指出，以年總降雨量的趨勢來看，西半部由北而南呈現減少的趨勢，東半部則由南往北呈現減少的趨勢。極端降雨與年總不降雨日數，在全臺灣各地區都有增加之趨勢。陳等人<sup>(5)</sup> 透過長期降雨變化分析得出，小雨發生頻率有減少趨勢，不過大雨發生頻率卻明顯增加。故長期觀測數據顯示年總降雨量雖然相對穩定，但每次降雨的強度顯著提升，這意味著未來的乾季和濕季將愈加分明，乾季的小雨次數將減少，濕季的強降雨次數則會增加。

在水資源有限的情況下，若能配合適當的灌溉措施，不僅可保障作物產量，還可有效提升水資源的利用效率。是故，如何精確計算作物需水量成為一項關鍵議題。根據農業部在 2020 年出版的《灌溉原理》第五章<sup>(7)</sup> 中提到，從灌溉角度來看，作物需水量指的是在不缺水的情況下，作物獲得最大產量時所消耗的水量，即「作物耗水量」。換句話說，作物耗水量是指單位面積內某段時間內，作物生長的蒸散量和鄰近土壤表面的蒸發量的總和，這與蒸發散量的概念一致。故作物需水量等同於作物蒸發散量 (ET)，即作物生長期間的蒸散量與附近土壤蒸發水分的總和。

有關作物需水量的測量方法<sup>(4,7)</sup>，可分為直接測定法、間接估算法等類型。直接測定法包含：盆栽觀測法、滲透計觀測法、田間觀測法等。間接估算法為聯合國糧食及農業組織 (FAO) 推薦的推估作物蒸發散量之標準方法。其估算方式可分為三個要件，包含：潛勢能蒸發散量 ( $ET_0$ )、作物係數 (Kc)、作物實際蒸發散量 ( $ET_c$ )。其中，估算潛勢能蒸發散量 ( $ET_0$ ) 的方法多樣，包含 Modify Penman 法、Modify Blaney-Criddle 法、Pen Evaporation Method 法、Radiation 法及 Penman-Monteith 法等。

據甘俊二 (1996) 等人<sup>(1)</sup> 研究指出，透過 Penman-Monteith 法進行作物需水量推估為最佳方式。由於 Penman-Monteith 法對蒸發散量之推求是以植物生理為出發點，消弭估算式中因地域性參數之影響所產生的誤差，故穩定性佳。在 FAO-56 文章報導<sup>(14)</sup> 中，詳細說明 Penman-Monteith 法如何應用氣象參數，如溫度、濕度、風速和太陽輻射，來計算潛勢能蒸發散量 ( $ET_0$ )，進而廣泛應用於全球的作物需水量估算。

CROPWAT 8.0 是一款由聯合國糧食及農業組織 (FAO) 開發的農業灌溉管理軟體，主要用於計算灌溉需求和水資源管理。CROPWAT 8.0 的官方使用手冊對於如何使用軟體進行  $ET_0$  計算提供詳細指導，並引用 Penman-Monteith 法作為計算的基礎<sup>(16)</sup>，進行潛勢能蒸發散量 ( $ET_0$ ) 運算。

在臺灣，硬質玉米是重要的雜糧作物之一，主要作為動物飼料使用。配合休耕地活化、綠色環境給付、稻作四選三、大區輪灌等農業政策的推動，過去 10 年內，硬質玉米栽培面積從 102 年的 8,350 公頃增至 112 年的 22,639 公頃，成長面積達 14,289 公頃，相當顯著。主要栽培區域集中在臺南市、嘉義縣和雲林縣，這三地的栽培面積占全臺總面積的 88%<sup>(11)</sup>。然而，近年來，極端氣候導致的降雨不足，對硬質玉米播種後發芽率、植株生長勢及最終產量均造成影響。進而思考，若能了解硬質玉米生育期所需的水量，並提供適當的灌溉用水，將能有效解決這些問題。不過，根據歷年國內文獻，關於硬質玉米灌溉的研究相對較少。因

此，本研究旨在了解硬質玉米生育期需水量，透過通量感測器偵測實際蒸發散量 ( $ET_c$ )、分析土壤理化性質，並運用 CROPWAT 8.0 軟體進行運算，以獲取作物係數及需水量等資訊，作為未來灌溉管理的參考。

## 材料與方法

### 一、不同年度的硬質玉米作物係數調查

#### (一) 試驗條件說明：

1. 試驗時間：111 年秋作 ( 111 年 9 月 12 日播種 )、112 年春作 ( 112 年 3 月 15 日播種 )、112 年秋作 ( 112 年 10 月 12 日播種 )。
2. 試驗材料：春作為中熟性硬質玉米 FY13、秋作為晚熟性硬質玉米明豐 3 號。
3. 試驗地點與面積：嘉義縣朴子市 ( 朴子分場 )，約 6,000 m<sup>2</sup>。
4. 栽培方式：採全面積種植單一品種方式栽培，行株距為 75 公分乘以 20 公分，採慣行栽培方式管理。
5. 灌溉時間：玉米生長期葉齡 10 ( $V_{10}$ ) 及籽粒形成期 ( $R_2$ ) 等二個時期執行灌溉。

#### (二) 作物係數的調查：

1. 作物實際蒸發散量 ( $ET_c$ )：
  - (1) 通量感測器包含三維音波風速計 ( 型號：7900-410 )、開放式二氧化碳 / 水氣分析儀 ( 型號：LI-7500DS / 公司：LI-COR )、細熱電偶線 ( 型號：FW05 )、土壤濕度計 ( 型號：CS616 )、土溫計、淨輻射計 ( 型號：NR-LITE2 )、土壤熱流板 ( 型號：HFP01 ) 等，並進行實際作物蒸發散量 ( $ET_c$ ) 調查。
  - (2) 實際田間之蒸發散量是由土壤之蒸發量及作物葉片之蒸散量所組成，受作物不同生育階段之葉面積及土壤水分狀態之影響，不同於由氣象資料所估算之  $ET_0$  值。是由二氧化碳 / 水汽分析儀偵測而得，因每半小時可得 1 筆數值，故 24 小時可得 48 筆數值。
2. 潛勢能蒸發散量 ( $ET_0$ )：
  - (1) 收集試驗場區之農業氣象站資料，依據 Penman-Monteith 法之蒸發散量公式及氣象資料求取潛勢能蒸發散量。
  - (2) 氣象資料蒐集：計算 Penman-Monteith 法之蒸發散量公式所需的氣象資料
    - i. 溫度：每小時平均溫度 (°C)、24 小時內最高溫度和最低溫度 (°C)
    - ii. 日照：輻射量 ( $MJ m^{-2} hour^{-1}$ )、日照時數 (hour)
    - iii. 每小時平均風速 ( $m sec^{-1}$ )
    - ix. 每小時平均相對濕度 (%)
3. 作物係數 ( $K_{crop}$ ,  $K_c$ )：為作物實際蒸發散量 ( $ET_c$ ) 與潛勢能作物蒸發散量 ( $ET_0$ ) 比值。藉由二氧化碳 / 水汽分析儀觀測之  $ET_c$  及氣象資料所估算之  $ET_0$ ，並配合 CROPWAT 8.0 軟體計算，統整出玉米不同生育期之作物係數 ( $K_c$ )。

### 二、不同年度的硬質玉米生育期需水量評估

CROPWAT 8.0 軟體為聯合國糧食及農業組織 (FAO) 開發的灌溉管理模式系統，可支援 Window 系統下的統計軟體。主要目的是協助灌溉管理者估算作物需水量及灌溉計畫的規劃<sup>(9)</sup>。根據 CROPWAT 8.0 灌溉管理模式的說明，是以當地的參考蒸發散量、有

效雨量、作物生長階段資料、土壤有效水分利用，四項基礎構面進行作物需水量的計算，模式中各項具體參數如下：

- (一) 潛勢蒸發散量 ( $ET_0$ )：以 FAO Penman-Montieth 法公式運算，搭配輸入試驗地點的最高溫、最低溫、平均風速、日照時數、相對溼度等氣象參數，計算出潛勢蒸發散量的數值。
- (二) 有效雨量：為試驗地降雨量的有效利用量。
- (三) 作物生長階段資料：依玉米生長過程中的作物係數、生長日數、根系深度、臨界消耗散率 (critical depletion)、產量係數 (yield response)，模擬作物實際生長情形。
- (四) 土壤：試驗田區土壤採樣委由農業試驗所農業化學組採樣分析，利用土鑽、環式採樣器、土壤入滲器等工具，分別針對土壤質地 (粒徑分析)、水分特性曲線、有效性水分含量、土壤有機質、陽離子交換能力、pH 值、土壤飽和導水度、總體密度、入滲速率等數據調查。經分析結果顯示，試驗田區土壤性質為壤土、入滲率 559 mm/day、有效含水量 324 mm/meter。

完成上述各項參數調查後，可透過 CROPWAT 8.0 軟體運算出作物生育期間，每旬的蒸發散量、建議灌溉量等資料。

## 結果與討論

### 一、不同年度的硬質玉米作物係數調查

作物係數係指「作物之真實蒸發散量 ( $ET_c$ ) 與潛勢蒸發散量 ( $ET_0$ ) 之比值」，代表該作物因不同生長期距所需的蒸發散量之不同和氣候條件的差異，會與生長期距產生一該作物之生長曲線。它的目的是可在預知潛勢蒸發散量 ( $ET_0$ ) 後，乘上該時期之作物係數即為該時期之實際作物蒸發散量或作物需水量<sup>(4)</sup>。

為便於灌溉管理，通常將旱作的作物係數分成四個階段，包括：作物初始階段 (Initial stage)、作物發展階段 (development stage)、中間階段 (mid season stage)、末期階段 (late season stage)。初始階段定義為作物種植到覆蓋面積達 10% 的時期，通常指玉米幼苗期，這階段需水量小、作物係數值低。作物發展階段通常是指玉米節間生長期，定義為作物覆蓋面積介於 10 ~ 70% 之間，作物係數呈線性遞增。中間階段通常是玉米開花期至乳熟期間，定義為作物覆蓋面積介於 70 ~ 100%，因蒸發散量旺盛，故作物係數較高。末期階段通常指玉米糊熟期至生理成熟期，伴隨生長進入收穫時期，此時玉米根系老化、葉面積縮小、蒸發散量降低，使作物係數呈線性遞減<sup>(9,14)</sup>。

本研究分別在 111 年秋季、112 年春季及 112 年秋季進行硬質玉米生育期間的作物係數調查，結果分述如下：

#### (一) 111 年秋季硬質玉米作物係數

111 年秋季硬質玉米 (明豐 3 號) 試驗於 111 年 9 月 12 日播種，112 年 2 月 17 日收穫，生育日數共計 159 日。利用通量感測器偵測嘉義朴子試驗田區的田間實際蒸發散量 ( $ET_c$ ) 及利用氣象觀測資料計算  $ET_0$  後，獲取硬質玉米作物係數 ( $K_c$ ) (表 1)。分別為作物初始階段 (Initial stage) 0.29、作物發展階段 (development stage) 0.51、中間階段 (mid season stage) 0.54、末期階段 (late season stage) 0.25 (圖 1)。

由於幼苗期的硬質玉米葉面積小，因此初始階段的蒸發散量主要由裸露的土表提供蒸發量，作物係數介於 0.2 ~ 0.3。伴隨植株進入發展階段至中間階段，葉面積的覆蓋率開始增加，葉片的蒸散作用逐漸旺盛，致使作物係數線性增加，因此數值介於 0.5 ~ 0.6 間。最後進入末期階段，伴隨植株根系老化、葉面積減少，導致蒸發散量下降，因此數值下降至 0.2 ~ 0.3 間。本試驗結果與劉<sup>(12)</sup>、FAO-56<sup>(14)</sup>、S. Irmak<sup>(19)</sup> 所發表的結果具相同趨勢。

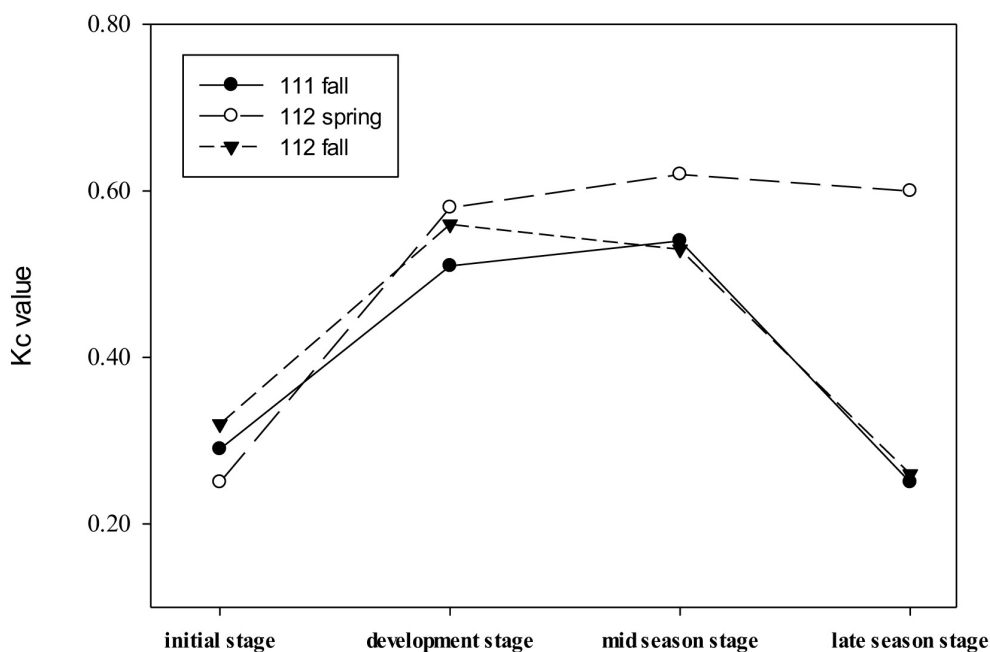


圖 1. 111 ~ 112 年硬質玉米需水量試驗的作物係數

Fig. 1. The crop coefficient for the water requirement of field corn from 2022 to 2023

## (二) 112 年春季硬質玉米作物係數

112 年春季硬質玉米 (FY13) 試驗在嘉義朴子試驗田於 112 年 3 月 15 日播種，112 年 7 月 10 日收穫，生育日數共計 119 日。利用通量感測器偵測田間實際蒸發散量 (ET) 及利用氣象觀測資料計算  $ET_0$  後，獲取硬質玉米作物係數 (Kc) (表 2)。分別為作物初始階段 (Initial stage) 0.25、作物發展階段 (development stage) 0.58、中間階段 (mid season stage) 0.62、末期階段 (late season stage) 0.6 (圖 1)。

根據試驗結果，在初始階段、作物發展階段與中間階段的作物係數，均與劉<sup>(12)</sup>、FAO-56<sup>(14)</sup>、S. Irmak<sup>(19)</sup> 所發表的結果具相同趨勢。不過，值得注意的是，112 年春季末期階段 (late season stage) 的作物係數，原本預期因生長後期植株衰老、根系老化、葉面積減少等因素影響下，將導致作物蒸發散能力下降，進而使作物係數值降低。但因春季的生育後期碰上梅雨影響，使土壤濕潤，導致土面蒸發量旺盛。又因土壤含水量增加會促使根壓增大，提高蒸發散量，因此，末期階段之作物蒸發散量依舊旺盛。使得該時期的玉米雖已進入生理成熟期，但作物係數值仍與中間階段的作物係數相近。這試驗結果與劉<sup>(12)</sup>、Liu<sup>(18)</sup> 等人的研究結果有相似趨勢。

## (三) 112 年秋季硬質玉米作物係數

112 年秋季硬質玉米 (明豐 3 號) 試驗在嘉義朴子試驗田於 112 年 10 月 12 日播種, 113 年 3 月 6 日收穫, 生育日數共計 143 日。利用通量感測器偵測田間實際蒸發散量 ( $ET_c$ ) 及利用氣象觀測資料計算  $ET_0$  後, 獲取硬質玉米作物係數 ( $K_c$ ) (表 1)。分別為作物初始階段 (Initial stage) 0.32、作物發展階段 (development stage) 0.56、中間階段 (mid season stage) 0.53、末期階段 (late season stage) 0.26 (圖 1)。

表 1. 111 年秋季、112 年秋季栽培期間的觀測氣象月平均資料<sup>1</sup>

Table 1. Monthly average meteorological data observed during the cultivation periods in fall 2022 and 2023

	平均最高氣溫 (°C) average maximum temperature (°C)		平均最低氣溫 (°C) average minimum temperature (°C)		平均相對溼度 (%) average relative humidity (%)		平均風速 (公尺/秒) average wind speed (m/s)		累積日照時數 (小時) cumulative sunlight hour (hours)	
	111 年 秋 <sup>2</sup> 111 fall	112 年 秋 <sup>3</sup> 112 fall	111 年 秋 111 fall	112 年 秋 112 fall	111 年 秋 111 fall	112 年 秋 112 fall	111 年 秋 111 fall	112 年 秋 112 fall	111 年 秋 111 fall	112 年 秋 112 fall
九月 September	32.4		24.5		78.7		1.6		182.1	
十月 October	29.8	29.8	22.2	22.4	79.9	80.6	1.9	1.3	277.3	176.6
十一月 November	28.5	27.8	21.1	18.6	88.0	75.9	1.7	1.3	255.6	270.1
十二月 December	22.1	23.8	14.3	16.3	77.0	77.0	2.5	1.6	258.5	244.5
一月 January	21.5	22.7	13.8	13.4	81.5	76.3	2.2	1.5	251.7	263.4
二月 February	23.3	24.5	15.0	15.0	83.5	76.6	2.2	1.6	139.9	262.4
三月 March		24.1		14.8		74.7		1.9		49.7

<sup>1</sup> 觀測氣象月平均資料以栽培期間的平均資料為主。Monthly average meteorological data based on the average data during the cultivation period.

<sup>2</sup> 111 年秋季播種日期為 111 年 9 月 12 日, 收穫日期為 112 年 2 月 17 日。The sowing date is September 12 in 2022, and the harvesting date is February 17 in 2023.

<sup>3</sup> 112 年秋季受小犬颱風影響, 播種日期延為 112 年 10 月 12 日, 收穫日期為 113 年 3 月 6 日。The sowing date is October 12 in 2023, and the harvesting date is March 6 in 2024.

根據 FAO-56<sup>(14)</sup> 資料指出, 中間階段處於玉米開花期至乳熟期間, 由於此時作物已完全覆蓋地表, 達生產高峰期, 因此蒸發散量應屬最大。但 112 年秋季硬質玉米的中間階段作物係數為 0.53, 略低於發展階段作物係數 0.56。推測可能與中間階段所處時間點有關。根據張<sup>(8)</sup> 與劉<sup>(12)</sup> 等人研究報導, 作物係數受氣候因子影響, 當溫度下降, 會減少蒸發散量。由於玉米在中間階段時, 處在 12 月旬至翌年 1 月下旬, 平均溫度為 17.5°C, 小於發展階段的平均溫度 22.4°C。而中間階段的日照時

數累計為 346 小時，小於發展階段的日照時數累計 388 小時。因此，推測由於溫度低、日照時數短等因素，導致中間階段作物係數降低。

表 2. 112 年春季<sup>1</sup>栽培期間的觀測氣象月平均資料<sup>2</sup>

Table 2. Monthly average meteorological data observed during the cultivation period in spring 2023

	平均最高氣溫 (°C) average maximum temperature (°C)	平均最低氣溫 (°C) average minimum temperature (°C)	平均相對溼度 (%) average relative humidity (%)	平均風速 (公尺/秒) average wind speed (m/s)	累積日照時數 (小時) cumulative sunlight hours (hour)
三月 March	25.9	18.2	84.8	2.1	154.3
四月 April	28.1	20.5	82.3	1.7	279.6
五月 May	30.0	23.3	85.3	1.8	303.5
六月 June	32.2	25.7	87.3	1.7	304.3
七月 July	33.2	26.6	81.6	2.6	121.3

<sup>1</sup> 112 年春季播種日期為 112 年 3 月 15 日，收穫日期為 112 年 7 月 10 日。The sowing date is March 15 in 2023, and the harvesting date is July 10 in 2023.

<sup>2</sup> 觀測氣象月平均資料以栽培期間的平均資料為主。Monthly average meteorological data based on the average data during the cultivation period.

#### (四) 兩年度的秋季硬質玉米作物係數與作物需水量比較

陳等人<sup>(6)</sup>認為作物係數是一項經驗參數，會受田間環境及作物本身之影響，不同栽培條件下也會有不同之係數。申<sup>(2)</sup>也認為，作物係數受氣候環境改變而有區別。根據兩年度的試驗結果指出，111 年秋季硬質玉米生育期需水量為 195.8 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.29、作物發展階段為 0.51、中間階段為 0.54、末期階段為 0.25。112 年秋季硬質玉米生育期需水量為 174.4 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.32、作物發展階段為 0.56、中間階段為 0.53、末期階段為 0.26。結果確實與受氣候環境改變而有區別，並呼應劉<sup>(12)</sup>的報告提及，作物係數與潛在作物蒸散量 (ET<sub>0</sub>) 和實際作物蒸散量 (ET) 呈顯著相關性。研究結果顯示，由於潛在作物蒸散量與實際蒸散量存在不同年度間波動，因此作物係數在不同年度間表現出不穩定性。而不同年度間的作物係數變異，可歸因於氣候因子的影響。

根據張<sup>(7)</sup>的研究指出，玉米需水量主要受平均最高溫度、平均相對濕度、平均風速、累計日照時間等因子影響。一般來說，溫度高、相對溼度低、平均風速高、累計日照時間長會增加作物蒸發散量並提高作物需水量。比較 111 年與 112 年秋季的氣象資料 (表 1)，發現 111 年秋季的栽培期間，月平均最高氣溫僅 11 月的 28.5°C 大於 112 年秋季的 27.8°C。111 年秋季的月平均最低氣溫僅在 11 月的 21.1°C 與 1 月的 13.8°C 高於 112 年秋季。在平均風速觀察上，111 年秋季每月的平均風速

均大於 112 年秋季。由於 111 年秋季栽培期間，11 月份正值硬質玉米從節間生長期跨入開花吐絲期的時期，屬於生長旺盛階段。由於該時期葉面積覆蓋率大、作物蒸發散量旺盛，因此當平均最高溫度與平均最低溫度均高，將有助於提高玉米生育期的作物蒸發散量，又因栽培時期的平均風速高於 112 年秋季，加速蒸發散量進行，因此推測是導致 111 年作物需水量高於 112 年的原因。

## 二、不同年度的硬質玉米生育期需水量評估

本研究透過 CROPWAT 8.0 軟體運算，搭配氣象參數(最高溫度、最低溫度、風速、日照時數、濕度、雨量等)、土壤性質、作物生長階段等相關資料，估算 111 ~ 112 年度裡，硬質玉米生育全期的作物需水量試驗結果，分述如下：

### (一) 111 年秋季硬質玉米生育期需水量

在 111 年秋季栽培期間，實際灌溉用水量(包含降雨量及灌溉用水)，分別為降雨量為 64.5 mm、灌溉水量為 64.0 mm，共計為 128.5 mm。

利用 CROPWAT 8.0 軟體，搭配生育期間的氣象參數等重要因子後，計算出 111 年秋季硬質玉米生育期間的每旬實際蒸發散量合計為 195.8 mm(表 3)，代表在 111 年秋季嘉義朴子試驗田區的硬質玉米生育期需水量為 195.8 mm。進一步觀察表 3 資料，硬質玉米栽培期間，搭配土壤性質等因素後，計算有效降雨量為 57.7 mm，建議灌溉用水量為 154.3 mm，合計 212.0 mm。將田間實際灌溉水量和硬質玉米生育期需水量相互比較(表 4)，結果顯示，田間實際灌溉水量低於硬質玉米生育期間的蒸發散量，代表 111 年秋季硬質玉米生育期間的灌溉量應有不足。

### (二) 112 年春季硬質玉米生育期需水量

在 112 年春季栽培期間，實際灌溉用水量(包含降雨量及灌溉用水)，分別為降雨量為 420.0 mm、灌溉水量為 78.3 mm，共計為 498.3 mm。

利用 CROPWAT 8.0 軟體，搭配生育期間的氣象參數等重要因子後，計算出 112 年春季硬質玉米生育期間的每旬實際蒸發散量合計為 238.3 mm(表 5)，代表在 112 年春季嘉義朴子試驗田區的硬質玉米生育期需水量為 238.3 mm。進一步觀察表 5 資料，硬質玉米栽培期間，搭配土壤性質等因素後，計算有效降雨量為 313.7 mm，建議灌溉用水量為 28.3 mm，合計 342.0 mm。

將栽培期間的實際灌溉水量和硬質玉米生育期需水量相互比較(表 4)，結果顯示，112 年春季栽培期間，由於 5 月和 6 月降下充沛雨水，使得實際灌溉用水量 498.3 mm 已遠高於硬質玉米生育期需水量的 238.3 mm。若再扣除土壤蒸發、逕流、耗損等情況後，必然可達到生育期間所需的水量。

然而，值得注意的是，因降雨時間不平均(如播種前及 3 月中旬至 4 月中旬間的生育初期，因缺乏有效雨量，導致田區土壤乾燥、玉米葉片捲曲，植株呈缺水狀)，因此雖整個生育全期的需水量已滿足，但就從生育初期來看，其實不利生長。因此，雖 112 年的春季栽培中，生育全期的需水量已由降雨量大幅度涵蓋，但實際執行上，在春季的生育初期的灌溉用水問題應特別留意，以確保玉米出土率與存活率佳，進而促進節間生長期的幼穗分化，以穩定最終產量。

### (三) 112 年秋季硬質玉米生育期需水量

在 112 年秋季栽培期間，實際灌溉用水量(包含降雨量及灌溉用水)，分別為降雨量為 46.5 mm、灌溉水量為 140.0 mm，共計為 186.5 mm。



表 3. 111 年秋季硬質玉米之作物蒸發散量及灌溉量 (嘉義朴子)

Table 3. The crop evapotranspiration and irrigation requirements for field corn in fall 2022 (Poutz, Chiayi)

月份 Month	實際蒸發散量 ET <sub>c</sub> (mm)	有效降雨量 Effective rain (mm)	建議灌溉量 Irrigation requirement (mm)
九月 September	25.7	4.8	20.3
十月 October	41.6	7.3	34.3
十一月 November	41.6	8.8	32.8
十二月 December	37.2	28.1	25.8
一月 January	34.5	8.2	26.3
二月 February	15.3	0.5	14.8
總計 Total	195.8	57.7	154.3

表 4. 不同年度間，實際田間用水量與作物需水量的情形

Table 4. Actual water usage and crop water requirement in the fields in different years

	實際田間情形 Actual field condition		實際田間用水總計 Sum of actual water usage in the field (mm)	作物需水量 Crop water requirement 實際蒸發散量 ET <sub>c</sub> (mm)
	實際降雨量 Actual rainfall (mm)	實際灌溉量 Actual irrigation (mm)		
111 年秋季 111 fall	64.5	64	128.5	195.8
112 年春季 112 spring	420.0	78.3	498.3	238.3
112 年秋季 112 fall	46.5	140.0	186.5	174.4

利用 CROPWAT 8.0 軟體，搭配生育期間的氣象參數等重要因子後，計算出 112 年秋季硬質玉米生育期間的每旬實際蒸發散量合計為 174.4 mm (表 6)，代表在 112 年秋季嘉義朴子試驗田區的硬質玉米生育期需水量為 174.4 mm。進一步觀察表 6 資料，硬質玉米栽培期間，搭配土壤性質等因素後，計算有效降雨量為 44.2 mm，建議灌溉用水量為 130.5 mm，合計 174.7 mm。考量灌溉過程中的耗損等因素，因此有效降雨量加上建議灌溉用水量的總和略高於作物需水量，尚屬合理。

表 5. 112 年春季硬質玉米之作物蒸發散量及灌溉量 (嘉義朴子)

Table 5. The crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) and irrigation requirements for field corn in spring 2023 (Poutz, Chiayi)

月份 Month	實際蒸發散量 $ET_c$ (mm)	有效降雨量 Effective rain (mm)	建議灌溉量 Irrigation requirement (mm)
三月 March	16.4	6.7	9.9
四月 April	37.3	41.2	1.3
五月 May	66.9	100.4	0
六月 June	83.1	147.7	0
七月 July	34.6	17.7	17.1
總計 Total	238.3	313.7	28.3

表 6. 112 年秋季硬質玉米之作物蒸發散量及灌溉量 (嘉義朴子)

Table 6. The crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) and irrigation requirements for field corn in fall 2023 (Poutz, Chiayi)

月份 Month	實際蒸發散量 $ET_c$ (mm)	有效降雨量 Effective rain (mm)	建議灌溉量 Irrigation requirement (mm)
十月 October	23.9	0	23.9
十一月 November	37.2	0.1	37
十二月 December	37.5	6.9	30.6
一月 January	37.7	5.6	32.2
二月 February	32.4	29.3	3
三月 March	5.7	2.3	3.8
總計 Total	174.4	44.2	130.5

將栽培期間的實際灌溉水量和硬質玉米生育期需水量相互比較 (表 4)，結果顯示，112 年秋季栽培期間的實際灌溉用水量 (186.5 mm) 已高於硬質玉米生育期間需水量 (174.4 mm)，表示栽培期間的灌溉用水已滿足作物生育期的需水量。

#### (四) 作物係數與作物需水量關係

##### 1. 比較內建作物係數與實際作物係數對作物需水量估算影響

在使用 CROPWAT 8.0 軟體估算需水量的過程中，需要輸入當地的氣象參數、試驗田區的土壤性質及作物生長資訊等內容，才能進一步估算出作物生育期間的蒸發散量（或稱需水量）。CROPWAT 8.0 軟體提供了多種作物的生長參數，包括水稻、玉米、小麥、高粱、大豆等，因此可以節省大量調查工作。

根據劉等人<sup>(12)</sup>於 2023 年的研究報告，作物係數受多種因素影響，包括作物類型及品種、作物高度、葉片特徵、土壤性質、氣候條件和灌溉方法等。即使是同一種作物，因植被和地表以及其他因素的變化，作物係數在整個生育期也會有所不同。因此，在不同地區及管理措施下，需要考慮 FAO-56 推薦的作物係數是否適用，並根據當地實際情況調整作物係數參考值。

進而思考，CROPWAT 8.0 內建的作物係數是否能夠全面涵蓋臺灣的種植條件仍然值得考量。以 112 年秋季在嘉義朴子試驗的硬質玉米為例，實際試驗結果顯示，不同生育階段的作物係數分別為：作物初始階段 (Initial stage) 0.32、作物發展階段至中間階段 (development stage - mid season stage) 0.55、末期階段 (late season stage) 0.26。根據這些數據，使用 CROPWAT 8.0 軟體計算的硬質玉米生育期需水量為 174.4 mm。

如果在保持氣象參數、土壤性質和作物生長條件不變的情況下，僅調整作物係數，可以發現作物蒸發散量的結果會顯著不同。在 CROPWAT 8.0 的內建資料中，玉米的作物係數為：作物初始階段 0.30、作物發展階段至中間階段 1.2、末期階段 0.35。因此，根據內建作物係數計算出的硬質玉米生育期需水量為 331.6 mm (表 7)。

將兩者結果相比較可以發現，112 年秋季硬質玉米的實際作物係數，在作物發展階段至中間階段的數值僅為內建作物係數的一半，因此計算後的硬質玉米生育期需水量僅為內建作物係數的 52%。這表明作物係數越小，實際蒸發散量越少，生育期的需水量也相對較少，即更省水。實際上，嘉義朴子試區的硬質玉米作物係數，即便在對水分需求最大的中間階段，其數值也僅介於 0.5 ~ 0.7 之間，顯著低於 CROPWAT 8.0 內建的中間階段作物係數 1.2。因此，建立符合臺灣實際情況的硬質玉米作物係數顯得尤為重要，以便更準確地估算當地之作物需水量。

##### 2. 國內外的硬質玉米作物係數差異的可能原因

FAO-56 報告<sup>(14)</sup>中，硬質玉米的作物係數在初始階段為 0.3 ~ 0.4、作物發展階段至中間階段為 1.15 ~ 1.20、末期階段為 0.4 ~ 0.6。而在嘉義朴子試區經過兩年的試驗，所得的硬質玉米作物係數為：初始階段 0.25 ~ 0.32、作物發展階段至中間階段 0.51 ~ 0.62、末期階段 0.25 ~ 0.6。將 FAO-56 和嘉義朴子的作物係數進行比較，發現數值上有明顯差異，特別是在作物發展階段至中間階段的作物係數。

這些差異的原因可能與種植環境的氣候條件、栽培密度、品種及耕作方式等有關。美國的玉米帶屬於溫帶大陸性氣候，四季分明，夏季炎熱且降雨集中，冬季寒冷而乾燥。適合種植玉米的時間是從春季 4 ~ 5 月份開始，此時氣溫逐漸回

暖，土壤溫度達到種子發芽所需的溫度。在生育期間，玉米經歷夏季的高溫、多雨及長日照條件，這會導致作物蒸發散量旺盛，因此作物係數較高。另外，一些地區如內布拉斯加州西部和堪薩斯州西部等乾旱或半乾旱地區，其蒸發散量更大，作物係數也更高。相比之下，臺灣位於亞熱帶氣候區，根據中央氣象署 1991 年至 2020 年間的相對濕度統計資料<sup>(3)</sup>指出，各地的年平均相對濕度均在 70% 以上，為高溼度環境。由於環境濕度高且日照時數短，作物蒸發散量相對較低。這與劉<sup>(12)</sup>、Zhang<sup>(20)</sup>的觀點一致，即氣候參數的變化會影響蒸發散量，進而影響作物係數。雷等人<sup>(10)</sup>的報導也指出，作物係數在不同年度間的變異可歸因於氣象因素的影響，在潮濕或半潮濕地區，作物係數通常低於 FAO-56 報告的值。

此外，種植密度和品種也可能是造成差異的因素之一。較高的種植密度能增加植株對地表的覆蓋，從而降低土壤蒸發量並提高作物蒸散量，這會導致作物係數上升。目前臺灣硬質玉米的種植密度為 65,000 ~ 74,000 株 / 公頃。Assefa 等人<sup>(15)</sup>的報告指出，北美洲玉米栽培的最佳密度從 1987 ~ 1991 年的 76,250 株 / 公頃增加至 2012 ~ 2016 年的 94,750 株 / 公頃。與此相比，臺灣的種植密度較低，這導致作物蒸發散量相對較低，而北美洲的高種植密度則造成作物蒸散旺盛，進而提高作物係數。

表 7. 以內建作物係數估算 112 年秋季硬質玉米之作物蒸發散量及灌溉量 (嘉義朴子)

Table 7. Using built-in crop coefficients to Estimate the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and irrigation requirements for field corn in fall 2023 (Poutz, Chiayi)

月份 Month	實際蒸發散量 ET <sub>c</sub> (mm)	有效降雨量 Effective rain (mm)	建議灌溉量 Irrigation requirement (mm)
十月 October	22.9	0	22.9
十一月 November	63	0.1	62.9
十二月 December	86.7	6.9	80
一月 January	87.8	5.6	82.1
二月 February	62.9	29.3	33.6
三月 March	8.3	2.3	6.3
總計 Total	331.6	44.2	287.8

綜合而言，在臺灣，硬質玉米主要以秋季栽培，種植密度為 65,000 ~ 74,000 株 / 公頃。作物生長期間，溫度由高轉低，日照時數由長逐漸縮短，降雨量由多逐漸減少，加上地處亞熱帶氣候區，環境濕度高，因此作物蒸發散量偏低。此

外，由於硬質玉米種植地區多為旱地或貧瘠土壤，或缺乏灌溉設備，土壤乾燥，使得作物蒸發量更低。受限於這些先天和後天因素，這可能是造成作物係數與 FAO-56 報告值有所差異的原因。

## 結 論

本研究經過兩個年度的試驗工作，獲取 111 年秋季硬質玉米生育期需水量為 195.8 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.29、作物發展階段為 0.51、中間階段為 0.54、末期階段為 0.25。112 年春季硬質玉米生育期需水量為 238.3 mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.25、作物發展階段為 0.58、中間階段為 0.62、末期階段為 0.60。112 年秋季硬質玉米生育期需水量為 174.4mm，作物係數 (Kc) 在初始階段為 0.32、作物發展階段為 0.56、中間階段為 0.53、末期階段為 0.26。

從應用角度來看，作物係數是最關鍵因子。因為作物係數是指「實際蒸發散量 (ET<sub>c</sub>)/ 潛在蒸發散量 (ET<sub>0</sub>)」比值，故經獲取春秋兩季的作物係數後，可進一步透過未來氣候條件估算潛在蒸發散量 (ET<sub>0</sub>)。並將作物係數與潛在蒸發散量 (ET<sub>0</sub>) 相乘，算出實際蒸發散量 (ET<sub>c</sub>)，而該數值即為所需灌溉的用水量。因此，在各生長階段中，其作物係數能計算出該階段的實際蒸發散量 (ET<sub>c</sub>)，並估算出該生長時期至少應供灌多少用水量 (最低耗水量)。不過需留意的是，考量灌溉中的土壤滲漏、逕流與流速損失等因素下，實際的灌溉用水量必須高於最低供灌用水量的參考值。

然而，值得注意的是，要取得具有代表性的作物係數，是須經由長時間的田間試驗監測而獲得。由於作物係數不僅因氣候環境改變 (如：濕度、風速、蒸發散量等) 而有地區性與季節性差異，同時作物品種 (如：早熟品種、晚熟品種)、栽培管理方式 (如：耕犁、灌溉等)、土壤性質等 (如：砂質土、黏質土) 都可能影響作物係數高低。故長時間的調查監測所求得的作物係數，才能更精準的指向灌溉參考數值<sup>(2)</sup>。本次雖歷經兩年度的試驗，求得春秋兩季的硬質玉米的作物係數，不過，就應用價值上，仍需有更長時間的作物係數調查與監測，才能作為更精準且具代表性的供灌參考依據。

## 致 謝

感謝農業部臺南區農業改良場科技計畫經費支持【111 農科 -18.1.1- 南 -N1、112 農科 -11.1.1- 南 -N1】。另外，向水資源團隊及農試所許健輝博士團隊一併致謝，因有你們協助，本研究才得以順利完成。

## 引用文獻

1. 甘俊二、陳清田、陳焜耀。1996。臺灣地區作物需水量推估模式之合適性研究。農業工程學報。第 42 卷第 2 期。
2. 申雍。2002。田間蒸發散量之估測與應用。農業氣象及農業水資源之應用與管理。85-

96。

3. 交通部中央氣象署氣候統計 <https://www.cwa.gov.tw/V8/C/C/Statistics/monthlymean.html> (下載日期：113.09.26)。
4. 施嘉昌、黃成達。1994。玉米蒸發散係數之研究。農業工程學報。第 40 卷第 1 期。
5. 陳玄芬、涂建翊。2017。以 TCCIP 資料分析臺灣降雨的氣候特徵與長期變化。中國地理學會會刊。59：1-20。
6. 陳述、姚銘輝、陳守泓。2008。利用潛熱通量資料驗證水稻田蒸發散模式。作物、環境與生物資訊。5：29-39。
7. 陳清田、郭勝豐、黃振昌、張煜權、陳意昌、廖志聰。2020。灌溉原理。行政院農業委員會出版。pp.55-74。
8. 張耘銓、劉繼龍、聶堂哲。2018。基於 CROPWAT 模型的玉米需水量及灌溉制度研究。灌溉排水學報。37(7)：67-75。
9. 郭勝豐、施嘉昌。1999。灌溉管理模式應用於農業用水量之規劃。農業工程學報。第 45 卷第 4 期。
10. 雷志棟、羅毅、楊詩秀。利用常規氣象資料類比計算作物係數的探討。農業工程學報。1999(3)：119-122。
11. 農業統計資料查詢 <https://agrstat.moa.gov.tw/sdweb/public/trade/TradeCoa.aspx> (下載日期：113.09.04)。
12. 劉梓萌、李璐、李昊天、劉娜、王鴻璽、邵立威。2023。華北平原 40 年夏玉米作物係數變化及影響因素。中國生態農業學報。31(9)：1355-1367。
13. 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲。2009。臺灣區域降雨趨勢分析。農業工程學報。55(4)：1-18。
14. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
15. Assefa Y, Carter P, Hinds M, Bhalla G, Schon R, Jeschke M, Paszkiewicz S, Smith S, and Ciampitti IA. 2018. Analysis of long term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain. Scientific Reports 8, 4937.
16. FAO. 2009. CROPWAT 8.0 for Windows: User Guide.
17. Kar, P., Ramadas, Sendhil, Phurailatpam, Romen, Jat, Bahadur, Choudhary, Mukesh, Aggarwal, Sumit Jat, Shankar Rakshit, Sujay. 2023. Trends in different global research fronts on maize: A Scopus-based Scientometric study. 12: 121-125.
18. Liu Yu, Wang Lin, Ni Guangheng, *et al.* 2009. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China. Transactions of the CSAE, 25(12): 6-12.
19. S. Irmak, 2008, Evapotranspiration, Encyclopedia of Ecology, Academic Press, Pages 1432-1438.
20. Zhang xy, Chen sy, Sun hy. 2011. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades. Agricultural Water Management, 98(6): 1097-1104.

# Research on water requirement of field corn in the growth period<sup>1</sup>

Hsieh, L. C.<sup>2</sup>

## Abstract

In Taiwan, field corn is one of the primary miscellaneous grains, with a cultivation area exceeding 20,000 hectares, mainly concentrated in the Yunlin-Chiayi-Tainan region, which accounts for nearly 90% of the total cultivation area in the country. Recently, the effects of climate change, particularly irregular rainfall patterns, have increasingly impacted crop production. This study aims to understand the water requirements of field corn during its growth stages. Based on the results from 2022 to 2023 in Puzi, Chiayi, the water requirement for field corn in the fall of 2022 was 195.8 mm, and the crop coefficient (Kc) values was 0.29 in the initial stage; 0.51 in the development stage; 0.54 in the mid-season; and 0.25 in the late-season. In the spring of 2023, the water requirement increased to 238.3 mm, and corresponding Kc values was 0.25 in the initial stage; 0.58 in the development stage; 0.62 in the mid-season; and 0.60 in the late-season. By the fall of 2023, the water requirement decreased to 174.4 mm, and Kc values was 0.32 in the initial stage; 0.56 in the development stage; 0.53 in the mid-season; and 0.26 in the late-season. This study provided valuable insights into the water requirements and crop coefficients for field corn in the 2022–2023 growing seasons, offered a reference for future planning of irrigation.

### **What is already known on this subject?**

Currently, there is relatively little research on the water requirement of field corn in Taiwan.

### **What are the new findings?**

This study utilized a precise flux analysis system to detect the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) in the field across different seasons and calculated the crop coefficient for field corn during the growth period, serving as a reference for future irrigation applications.

### **What is the expected impact on this field?**

This can serve as a reference for the Irrigation Agency to support irrigation planning and reduce the impact of climate-related risks on field corn production.

**Key words:** Field Corn, Crop Coefficient, Evapotranspiration, Water Requirement, Climate Change

Accepted for publication: October 28, 2024

---

1. Contribution No. 580 from Tainan District Agricultural Research and Extension Station.

2. Assistant Researcher, Tainan District Agricultural Research and Extension Station. 70 Muchang, Hsinhua, Tainan 712009, Taiwan, R.O.C.