

# 不同類型入滲筒應用於草地入滲率現地測定之 試驗研究

## Comparative Evaluation of Infiltrometer Methods for Measuring Infiltration Rates in Grassed Soils

淡江大學水資源及環境工程學系

大學部四年級專題生

廖子琮                      詹博棟                      王正宏                      陳信嘉  
Tzu-Tsung Liao              Po-Tung Chan              Cheng-Hung Wang              Hsin-Chia Chen

淡江大學水資源及環境工程學系

大學部四年級專題生

劉宇珩                      劉耕齊                      璩浩宸                      藍子翔  
Yu-Heng Liu                  Keng-Chi Liu                  Hao-Chen Chu                  Tzu-Hsiang Lan

國立台灣大學生物環境系統工程學系

博士生

陳冠嘉  
Guan-Jia Chen

財團法人農業工程研究中心

研究員兼環境組組長

淡江大學水資源及環境工程學系

兼任助理教授

陳豐文  
Feng-Wen Chen

### 摘 要

本研究旨在探討不同入滲筒觀測方式對土壤入滲率測定結果之影響，藉以評估其適用性與準確性，本研究採用單環、雙環、雙環配合馬力奧入滲筒等 3 種入滲觀測方式)於農業工程研究中心進行不同入滲儀器對於草地入滲率觀測的差異；試驗成果顯示 1. 單環、雙環、雙環搭配馬力奧之平衡入滲率分別為 36.88、1265.45、436.62 mm/day，與應用土壤類別推估的理論入滲率(20~50 mm/day)差異約 60 倍，推測原因為土壤較為寬鬆，因此有過多的孔隙使水流快速垂向滲流；2.入滲平衡所需時間依序為雙環搭配馬力奧入滲筒(420 分鐘)、雙環(585 分鐘)、單環僅趨於平衡但未達標準(1522 分鐘)，研究發現雙環搭配馬力奧入滲筒最快達到穩定使用單環入滲筒則平衡過程最緩慢；3.現地試驗與理論入滲率的差異性分析顯示單環入滲筒之誤差率最小(45.77%)；入滲穩定性部分，由雙環與雙環搭配馬力奧入滲筒可以比較發現定水頭與變水頭之差異，數據顯示馬力奧入滲筒之入滲曲線較為平緩，誤差率約 1~16%，而單環、雙環入滲筒則是水分垂向入滲較不穩定，誤差率 4~25%，顯見使用馬力奧入滲筒有入滲穩定之優點。本研究僅針對現地入

滲試驗常用 3 種涉及方式進行試驗比較，其對象為草地；本研究後續進一步針對水稻田進行試驗，以建立不同土地利用或作物栽培方式條件下之適用性比較。

關鍵詞：單環入滲筒、雙環入滲筒、馬力奧結合雙環入滲系統、草地土壤入滲率

## Abstract

This study investigates the effects of different field infiltrometer methods on the measurement of infiltration rates in grassed soils, with the aim of evaluating their applicability and accuracy. Three infiltration measurement methods—single-ring, double-ring, and double-ring combined with a Mariotte bottle—were employed at the Agricultural Engineering Research Center to compare their performance in assessing soil infiltration under grass-covered conditions. The experimental results revealed the following: 1. the steady-state infiltration rates measured by the single-ring, double-ring, and double-ring with Mariotte bottle methods were 36.88, 1,265.45, and 436.62 mm/day, respectively. These values significantly exceeded the theoretical infiltration rates estimated based on soil type (20~50 mm/day), by up to 60 times, likely due to the loose soil structure and the presence of abundant macropores facilitating rapid vertical flow. 2. the time required to reach infiltration equilibrium varied among the methods: The Mariotte Infiltrometer system (a double-ring with a Mariotte bottle) achieved equilibrium the fastest (420 minutes), followed by the double-ring method (585 minutes). The single-ring method only approached equilibrium and failed to reach a stable state even after 1,522 minutes, indicating the slowest rate of stabilization. 3. in terms of deviation from theoretical values, the single-ring infiltrometer exhibited the lowest error rate (45.77%). Regarding infiltration stability, comparisons between constant-head (Mariotte bottle) and falling-head (single- and double-ring infiltrometers) methods showed that the infiltration curve produced by the Mariotte infiltrometer system (i.e., a double-ring infiltrometer with a Mariotte bottle) was smoother, with error rates ranging from 1~16%, whereas the single- and double-ring methods exhibited greater fluctuations, with error rates between 4~25%. These results indicate that the Mariotte infiltrometer system provides superior infiltration stability. This study conducted a comparative evaluation of three commonly used field methods for measuring infiltration in grassed soils. Future research will extend the investigation to paddy fields to further examine the applicability of these methods under varying land use and cropping conditions

Keywords: Single-ring Infiltrometer, Double-ring Infiltrometer, Mariotte Infiltrometer system, Infiltration Rate of Grassed Soils.

## 一、前言

土壤入滲率為農業工程與水文領域研究及實務應用上極為重要的參數，不僅影響地表逕流與地下水補注，也是農業灌溉與水資源利用評估過程的關鍵因素。入滲是水文循環中地表水與地下水相互作用的重要過程。當水施於土壤表面時，受重力影響，水分開始向下移動，這就是入滲的開始(陳念均，1970)；隨著表土毛細管逐漸充滿，入滲率呈下降趨勢，水分入滲過後，其含量隨土層深度增加而遞減，最後經歷飽和、轉移、濕潤至乾燥等複雜過程(劉振宇等，1999)。評估入滲率的方式，包含現地試驗與理論推估兩種；在理論方面，以土壤類別評估土壤入滲率的做法為主，例如臺灣大學農業工程學系(1970)及林俊男(1993)提及台灣省水利局設計規範之經驗公式，利用土壤黏粒百分比即可求得理論入滲率，常用於田間灌溉作為參考。現地試驗方面，施嘉昌(1966)將現地試驗分為兩種，溝灌法的入滲率用流進流出法來觀測入滲 100 呎溝長之水量；梗間灌溉法，用入滲筒測量。而入滲筒的測量又可分為單環入滲筒與雙環入滲筒兩種方法觀測。吳嘉俊等(2012)運用單環入滲筒進行田間入滲試驗，藉以瞭解礫石地的入滲現象及礫石含量對飽和水力傳導度的影響。Zhang *et al.* (2016)則指出單環入滲試驗容易受優先流與側向流的影響，造成入滲值偏高或不穩定，並建議在數據層面需考慮這些非均質水流的影響，以提升測量準確性。Petkov (2021)則利用雙環入滲筒測定飽和與不飽和條件下之入滲的特性與水力傳導率，結果顯示該方法操作簡便且數據可靠。也有許多研究針對雙環入滲筒進行相關的改良，例如許振崑等(2015)運用雙環入滲儀搭配馬利奧筒，進行垂直入滲速率的估算，藉以瞭解降雨入滲於地表土壤特性及速率。Zhang & Li (2020)對傳統雙環入滲筒進行改良，減少插入過程對土壤結構的擾動，適用於結構鬆散或易受干擾的土壤類型。Angulo-Jaramillo *et al.* (2000)比較盤狀入滲儀與環狀入滲儀的現地量測方法，發現這些設備均能於定水頭或變水頭條件下量測非飽和水力傳導率與入滲速率。李慶雅(2021)彙整各種入滲試驗之優缺點(單環、雙環)，歸納雙環入滲儀是應用最廣泛的方法。

有鑑於目前國內研究常用的現地測量方法仍以單環入滲筒、雙環入滲筒為主，馬力奧入滲筒的應用多偏向研究用途。相關文獻較缺乏針對精確度與穩定性的系統性比較。因此本研究目的在於探討單環入滲筒、雙環入滲筒與馬力奧入滲筒三種不同量測土壤入滲率方法的差異，並進一步將實測結果與土壤質地推估之理論入滲值進行比較；針對不同設備類型的使用，透過相同人員操作、同一試驗場址及土壤臨前條件下，僅針對因不同設備設施條件反映出獲得土壤入滲率推估的結果及特性進行歸納比較，以釐清 3 種不同入滲儀器對於入滲率推估成果準確性及操作時間的差異性。

## 二、材料與方法

### (一).試驗設備介紹

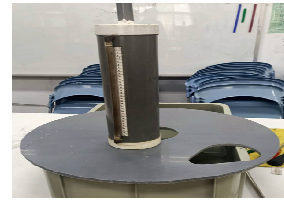
本研究利用三種入滲設備進行研究，分別為1.單環入滲筒、2.雙環入滲筒、3.雙環搭配馬力奧入滲筒，如圖1所示。其中單環入滲筒之內徑為40 cm、筒高30cm；雙環入滲筒則由內環與外環構成，筒高皆為30cm、內徑分別為30 cm及40 cm；馬力奧入滲筒則由兩不同管徑圓管串連組成，大管為長度33cm、內徑10 cm之PVC管；銜接的小管則為長度15cm、內徑2 cm之PVC管，並設置閥門以利操作。試驗原理部分，單筒及雙筒均為變水頭條件、而馬力奧入滲筒則為定水頭條件下的入滲率。



A.單環入滲筒(筒高30cm)



B.雙環入滲筒(筒高30cm)



C.馬力奧入滲筒及筒蓋

圖1 本研究採用之入滲儀器

## (二).現地入滲試驗設計與流程

本研究以現地入滲試驗為主，規劃 3 種試驗組別；分別為 1.單環入滲筒、2.雙環入滲筒和 3.雙環搭配馬力奧入滲筒，試驗場址位於桃園的農業工程研究中心一處空曠草皮進行，試驗條件為草皮植生養護狀況一致、試驗前 7 日均為非降雨日的條件下進行(圖 2)。入滲試驗流程步驟以單筒入滲筒為例，主要為 1.移除表面植生、2.槌擊筒深入土 15 cm(土壤表面以上水深設定 15 cm)、3.快速注水至筒頂、4.測定不同時間間距之水面下降高度(圖 3)。雙環入滲筒步驟與單環入滲筒一致，外環先實施而後內環，外環的作用是消除側向流，促使水垂向入滲，避免向外橫向側滲干擾內環的垂向入滲測定，先打外環再打內環，可避免內環周邊土壤過度擾動，保持測點穩定性；雙環搭配馬力奧入滲筒是由一組雙環入滲設備搭配馬力奧入滲筒所組成，其中完成雙環的實施流程後，雙環內外筒均加水至 15cm 處等高，放上馬力奧入滲筒和專屬筒蓋後，即可進行觀測。前述 3 組試驗組別的 1.單環入滲筒、2.雙環入滲筒均為變水頭試驗、雙環搭配馬力奧入滲筒則為定水頭試驗。入滲試驗開始後，測定不同時間間距的入滲量，並最後均統一轉換為各個時間間隔的入滲率，單位統一用(mm/day)表示，並根據當次入滲率與下一時刻的入滲率的差別，計算誤差量及誤差率。試驗開始後，記錄試驗時間直到測得穩定入滲率為止；平衡入滲率的選定原則為前後兩次入滲率的誤差率小於前次的入滲率的 10% 以內。



試驗前 1 周無降雨

草皮植生養護狀況一致

圖2 本研究之試驗地點



A. 設置入滲筒



B. 敲擊筒蓋



C. 注水



D. 觀測紀錄

圖3 入滲試驗過程一覽

## (三).理論入滲率推估方法

理論入滲率主要依據土壤類別進行簡易入滲率區隔，N種土壤可推估N種理論入滲率，因此本研究採用土壤分類試驗(包含篩分析試驗、比重計試驗、比重試驗)，並由試驗結果繪製粒徑分佈曲線，求得砂粒、粉粒、粘粒之含量百分比，參考美國農業部USDA公告之土壤質地三角圖作為土類類別判定之依據，分類流程如圖4；USDA公告之土壤質地三角圖包含12種土壤質地，如表1。土壤理論入滲率推估包含下列2種推估方式：第1種為查表推估，表2依據台灣省水利局過去於台灣各地之田間試驗結果，根據土壤類別以查表方式快速推估；第2種為依據土壤的黏粒百分比進行進一步推估，如公式(1)及(2)。

$$P=240/(C*I) \dots\dots\dots(1)$$

$$I=0.932039+0.0362642C-0.000296759C^2 \dots\dots\dots(2)$$

式中：P 為入滲率(mm/day)；C 為土壤黏粒百分比(%)；I 為係數。

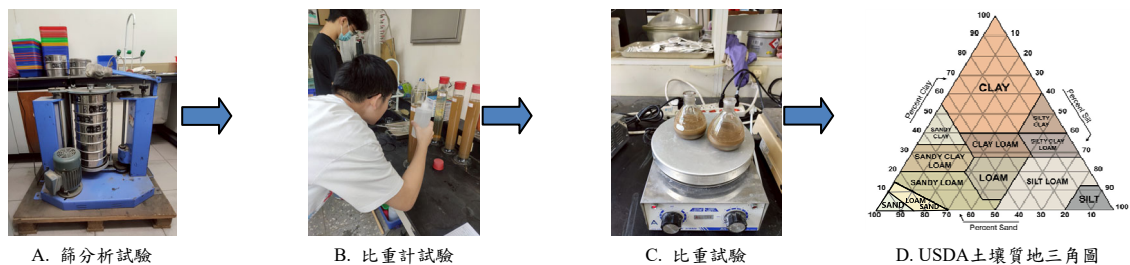


圖4 土壤分類試驗方法一覽

表1 美國農業部(USDA)土壤分類一覽

中文名稱	代號	黏粒%	粉粒%	砂粒%	中文名稱	代號	黏粒%	粉粒%	砂粒%
砂土	S	0~10	0~15	85~100	砂質黏壤土	SCL	20~35	0~28	45~80
壤質砂土	LS	10~15	0~30	70~93	黏質壤土	CL	20~45	15~53	27~40
砂質壤土	SL	0~20	0~50	43~85	粉質黏壤土	SiCL	27~40	40~73	0~20
粉土	Si	0~20	80~100	0~20	砂質黏土	SC	35~55	0~20	45~65
粉質壤土	SiL	0~27	50~88	20~50	粉質黏土	SiC	40~60	40~60	0~20
壤土	L	7~27	28~50	23~52	黏土	C	40~100	0~40	0~45

表2 台灣各土壤對應入滲率一覽

土壤種類	粘粒含量C(%)	係數 I	滲漏量 (mm/day)	土壤種類	粘粒含量C (%)	係數 I	滲漏量 (mm/day)
砂質礫土	1.6	1.0	150.00	粘質壤土	21.9	1.6	6.85
礫質砂土	5.0	1.1	43.70	壤質粘土	27.0	1.7	5.24
砂土	8.0	1.2	25.00	粘土	33.0	1.8	4.04
壤質砂土	11.6	1.3	15.90	中粘土	40.0	1.9	3.16
砂質壤土	14.9	1.4	11.50	重粘土	49.0	2.0	2.45
壤土	18.2	1.5	8.80				

資料來源：臺灣大學農業工程學系，1970

### 三、結果與討論

#### (一).土壤現地入滲成果

入滲試驗成果:本次研究由初期時間間隔1、5、10、30、60分鐘，紀錄各入滲設備之水位下降量，經轉換得各時間點之入滲率後，繪製入滲曲線並進行比較，如圖5，結

果顯示單環、雙環、雙環搭配馬力奧到達平衡之時間分別為1,522、585、420分鐘；單環的初始入滲率為17,280 mm/day，平衡入滲率為36.88 mm/day；雙環的初始入滲率為2,880 mm/day，平衡入滲率為1,265.45 mm/day；雙環搭配馬力奧的初始入滲率為1,061.6 mm/day，平衡入滲率為436.62 mm/day；其中雙環搭配馬力奧最快達到平衡。外筒的作用是消除側向流，使水主要向下滲入，避免外側滲流干擾內環的測定。本研究的雙環試驗組之外筒測定結果為初始入滲率為23,040 mm/day，平衡入滲率為637.09 mm/day；雙環搭配馬力奧達試驗組的外筒初始入滲率為14,400 mm/day，平衡入滲率為2,352 mm/day；比較內外筒的入滲率數據顯示不同的設備反應的入滲情形皆不太相同。比較平衡入滲率：將入滲成果進行比較可以發現單環之平衡入滲率僅36.88(mm/day)為三者最低，而雙環內筒平衡入滲率1,265(mm/day)高於外筒637(mm/day)，與雙環搭配馬力奧內筒436(mm/day)、外筒2,352(mm/day)的現象不同，如圖6。入滲率公式推估：本研究採用乘冪式、指數式、線性式、對數式等4種不同迴歸分析方式進行入滲率公式的建立歸納，其中乘冪式迴歸相較於其他方式迴歸有較高的相關性， $R^2$ 介於0.93~0.98，因此採用乘冪式迴歸分析之公式作為入滲行為的數學式公式，如公式(3)~(5)。

單環入滲筒： $P=5590.9t^{-0.729}$  .....(3)

雙環入滲筒： $P=7022.4t^{-0.261}$  .....(4)

雙環搭配馬力奧入滲筒： $P=1803.4t^{-0.252}$  .....(5)

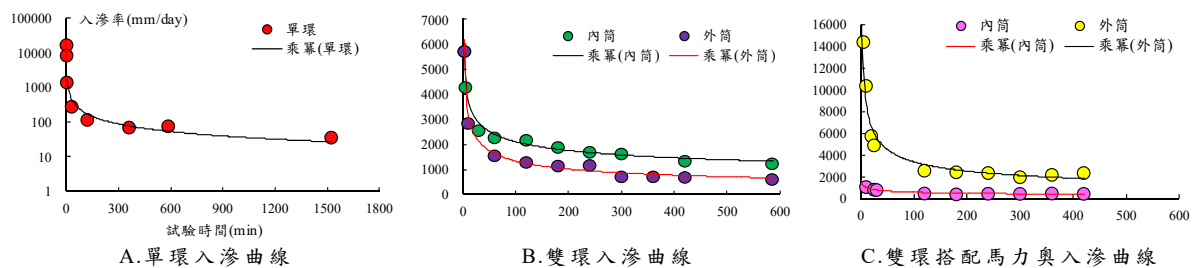


圖 5 現地入滲試驗之入滲曲線成果一覽

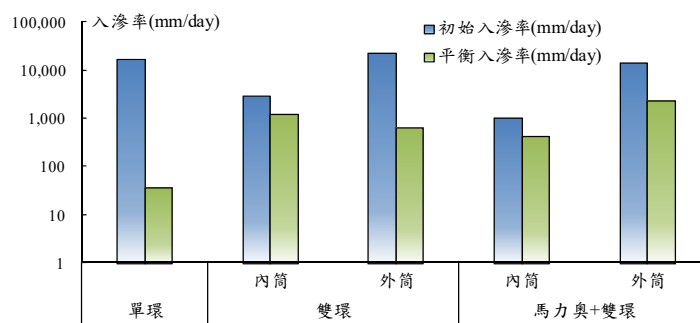


圖 6 現地入滲試驗之初始入滲率及平衡入滲率之比較

(二).理論入滲率推估

本研究針對3組試驗別之場址分別採集土壤進行土壤分類試驗，經由篩分析、比重計試驗、比重試驗求得各土壤之砂粒、粉粒、黏粒百分比後，參考USDA之土壤質地三角圖進行分類，分類結果如表3，土壤分類顯示單環入滲筒、雙環

入滲筒、雙環搭配馬力奧入滲筒組別之土壤分別為坩質壤土、壤土、砂質壤土。本研究進一步依據表4之成果配合公式(1)可推估土壤理論入滲率，分別為單環入滲筒(53.76 mm/day)、雙環入滲筒(20.87 mm/day)、雙環搭配馬力奧入滲筒組別(20.53 mm/day)；若以查詢表2的方式，則理論入滲率為6.85~11.5 mm/day)之間。

表 3 土壤質地分類成果

試驗組別	土壤顆粒百分比			分類	代號
	黏粒%	粉粒%	砂粒%		
單環	4.14	52.24	43.62	坩質壤土	SiL
雙環	9.26	49.64	41.11	壤土	L
雙環搭配馬力奧達	9.38	33.06	57.56	砂質壤土	SL

### (三).試驗結果討論

#### 1.三組入滲設備之差異討論

- (1).入滲行為是否達到平衡：由本研究試驗的平衡入滲率及最終測定紀錄的誤差率進行分析，其中單環入滲筒的平衡入滲率為 36.88 mm/day，誤差率為 53.04 %；雙環入滲筒的平衡入滲率為 1,265.45 mm/day，誤差率為 7.5 %；雙環搭配馬力奧入滲筒之平衡入滲率為 436.62 mm/day，誤差率為 7.27 %。若以誤差率<10 %為平衡判定之原則，則單環入滲筒雖歷時 1,522 分鐘，誤差率高達 53.04 %，顯示入滲行為尚未達到平衡狀態；而雙環入滲筒及雙環搭配馬力奧入滲筒之組別的誤差率均<10 %，顯示入滲率已達平衡狀態。
- (2).現地試驗時間之差異：比較各組試驗時間，單環試驗歷時 1,522 分鐘還未達到平衡標準，因為水入滲到土裡會產生側向之入滲，使垂向入滲率較難達到平衡狀態；反觀雙環入滲筒試驗歷時 585 分鐘即達平衡，顯示外環發揮消除內筒產生側向流的影響效應，內環得以加速達成垂向入滲穩定的入滲行為，因此雙環入滲筒相較於單環有較快達到平衡的優點；雙環搭配馬力奧入滲筒之達成平衡入滲率的時間更短，僅 420 分鐘，凸顯馬力奧入滲筒具備縮短入滲測定時間的優點。
- (3).定水頭與變水頭條件之差異：依據入滲誤差率的成果顯示雙環入滲筒及雙環搭配馬力奧入滲筒之誤差率分別僅為均 7.5 %及 7.27 %，由於單環及雙環入滲筒屬於變水頭條件，而雙環搭配馬力奧入滲筒屬於定水頭試驗，考量均具備變水頭條件的單環未達成入滲率平衡的結果，而雙環入滲筒以達成平衡狀態，顯示變水頭條件下，可能有無施設外筒而產生相同測定時間下達成平衡入滲率與否之不同結果，比較均達成平衡狀態的雙環入滲筒及雙環搭配馬力奧入滲筒，兩者分屬變水頭及定水頭的條件，但仍然獲得相同的平衡入滲結果，原因應為兩者均採用雙筒的原因。而比較單筒及雙環搭配馬力奧入滲筒的試驗成果，兩者在入滲筒數量及水頭條件均不同下產生不同的結果；綜合上述比較，定水頭較變水頭條件更能快速達成入滲率平衡狀態。

#### 2.平衡入滲率合理性之驗證

本研究為驗證現地試驗成果之合理性，本研究以 20025 年 5 月 10 日發生於農工中心試驗場域之單場降雨事件進行驗證，該場降雨歷時 660 分鐘，總降雨量為 80.5 mm，經現地量測地表積水深度，經計算得該場降雨初始入滲率及平衡入滲率分別為 7,553.26 及 77.78 mm/day，最終紀錄顯示誤差率仍 47.0 %，尚未達平衡狀態，因此若

平衡狀態則遠低於 77.78 mm/day；相較於本研究 3 組試驗，其成果與單筒入滲試驗成果近似。

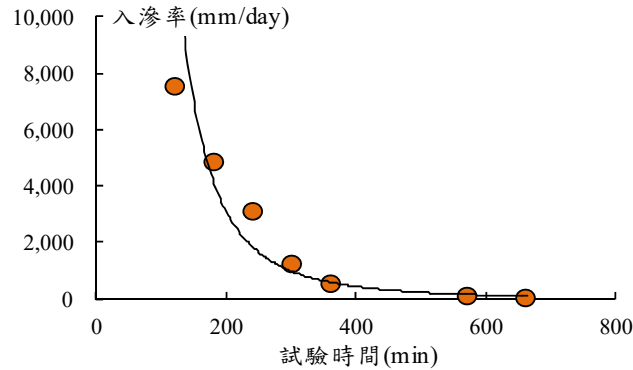


圖 7 單場降雨事件示意圖

### 3. 比較現地試驗與理論入滲率之差異及潛在成因

茲將現地測定之入滲率與利用土壤粘粒百分比計算之理論入滲率進行比較，兩者之誤差率如表 4，其中 3 種試驗之誤差率單環最小，為 45.77%，而其他兩種皆大於 90%，顯示現地入滲率與理論入滲率有較大的差異，可能原因為本試驗之臨前條件僅強調前 7 天無下雨的土壤臨前條件，植生種類、土壤結構、作物根系的影響、土壤物理性質(土壤水分及土壤硬度)等，均無測定或比較；許多學者的研究顯示其可能是兩者差異的原因；例如施嘉昌(1966)指出影響入滲率的因素相當多，包括土壤的結構、初始含水量、土壤與水溫、地表地形與觀測方法及地表水深等，Mualem (1976)也提出在初始含水量方面，非飽和土壤的水力傳導率受孔徑分佈影響，在大孔比例較高的土壤中，導水率會顯著增加，入滲曲線由快速趨於平緩，林俐玲等(2007)、曾怡潔(2019)亦透過入滲量與初始含水量之關係，發現初始含水量越低，則入滲量越高，含水量上升速度越快。Angulo-Jaramillo et al. (2000)發現入滲速率受土壤結構異質性及表面條件影響顯著，土壤的裂縫亦影響入滲，特別是裂縫與大孔隙會顯著增加初期入滲量。(Cui et al., 2019; Liu et al., 2019)；Liu et al., (2020)指出細根的生物量、長度密度與分佈深度能顯著提升土壤入滲能力，透過改善團粒結構與增加孔隙連通性可促進水分入滲；反之，高初始含水量或粗根比例則會降低入滲率。草地覆蓋及植被生長年齡亦會影響土壤水力性質。Lichner et al. (2011)證實草地的覆蓋能有效改善沙質土壤的水分保持與傳輸效率，減少水流異質性；Nguyen et al. (2020)則發現草齡增加可隨根系發育提升粗顆粒土壤的入滲與持水能力。其次，本研究進單環入滲率為平衡入滲率，其餘兩組觀測時間有限，尚未達平衡條件所致，因此本次試驗時間過短，其與理論值之比較，尚難推論兩者之關聯性。

表4 現地、理論入滲率比較

項目	單環	雙環	馬力奧+雙環
現地試驗-平衡入滲率 A	36.88	1265.45	436.62
理論入滲率	土壤分類	SL	L
理論入滲率 B	53.76	20.53	20.47
誤差率 e	45.77	98.38	95.31

註:e 為現地與理論入滲率之誤差百分比  $((B-A)/A*100\%)$ ，入滲率單位為 mm/day、誤差率單位為%、S 表示土樣

## 四、結語

本研究藉由比較3種入滲設備試驗發現，雙環搭配馬力奧的入滲平衡時間最快，依序為雙環、單環入滲筒；入滲平衡時間依序為雙環搭配馬力奧入滲筒 360 分鐘、雙環 585 分鐘、單環 1,522 分鐘趨於平衡(未達平衡標準)。藉由雙環與雙環搭配馬力奧入滲筒可以比較發現定水頭與變水頭之差異，數據顯示有搭配馬力奧入滲筒之試驗其入滲曲線較為平緩，且所計算之誤差率穩定介於 1~16%，而沒有搭配馬力奧入滲筒則是下降較不穩定，誤差率介於 4~25%，可見搭配馬力奧入滲筒有入滲穩定之優點。比較雙環入滲筒之內外筒入滲速度，試驗顯示內筒與外筒的入滲率有顯著的差異，雙環試驗的內筒與外筒平衡入滲率為 1,265.45 與 637.09mm/day，差異量為 628.36。雙環搭配馬力奧入滲筒之內筒與外筒的入滲率分別為 436.62 與 2,352.00 mm/day，差異量為 1915.38 mm/day；前者內筒入滲率較高，後者外筒入滲率較高。本研究另將現地入滲試驗顯示單環、雙環、雙環搭配馬力奧之平衡入滲率分別為 36.88、1,265.45、436.62 mm/day，與應用土壤類別推估的理論入滲率(20.47~53.76 mm/day)差異甚大(現地跟理論最大差異約 60 倍)，顯見理論值僅考量土壤質地，而未能考量土壤現地物理特性(土壤水分、土壤硬度、土壤結構、表土植生種類及根系狀態)。本次試驗對於平衡入滲率的門檻條件設定誤差<10 %，後續為確認達到入滲率穩定狀態，建議門檻值的誤差率設定可更嚴謹，例如<5 %，以更長的時間能測定完整的數據，更能完整描述入滲歷程及入滲行為。

## 參考文獻

1. Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J. P., Roulier, S., Thony, J. L., Gaudet, J. P., & Vaucelin, M. (2000). "Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments". *Soil and tillage research*, 55(1-2), p.1~29.
2. Cui, Z., Wu, G. L., Huang, Z., & Liu, Y. (2019). "Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils". *Journal of Hydrology*, 578, 124023.
3. Lichner, L., Eldridge, D. J., Schacht, K., Zhukova, N., Holko, L., Sir, M., & Pecho, J. (2011). "Grass cover influences hydrophysical parameters and heterogeneity of water flow in a sandy soil". *Pedosphere*, 21(6), p.719~729.
4. Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2019). "Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China". *Catena*, 182, 104147.
5. Liu, Y., Guo, L., Huang, Z., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2020). "Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils". *Agricultural Water Management*, 235, 106153.
6. Mualem, Y., (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, 12(3), p. 513~522.
7. Nguyen, B. T., Ishikawa, T., & Murakami, T. (2020). "Effects evaluation of grass age on hydraulic properties of coarse-grained soil". *Transportation Geotechnics*, 25, 100401.
8. Petkov, P. (2021). "Using the double-ring infiltrometer to evaluate key unsaturated and saturated hydrological". *Water Resources Research*, 14(4), p.601-604.
9. Zhang, J., & Li, S. (2020). "Surface-positioned double-ring to improve traditional infiltrometer for measuring soil infiltration". *Soil Research*, 58(3), p.314-321.
10. Zhang, J., Lei, T., & Chen, T. (2016). "Impact of preferential and lateral flows of water on single-ring measured infiltration process and its analysis". *Soil Science Society of America Journal*, 80(4), p.859-869.

11. 吳嘉俊、王建涵、詹于婷(2012),「礫石地之土壤水分入滲特性研究」, 中華水土保持學報, 43(1), p.65~74。
12. 李慶雅(2021),「雙環入滲實驗分析與數值模擬」, 國立臺灣大學生物環境系統工程學系, 碩士論文。
13. 林俊男, 1993,「地理資訊系統應用於乾旱期安排停灌順序之研究」, 農委會研究報告。
14. 林俐玲、蔡義誌、王永琦(2023),「室內模擬降雨觀測土壤初始含水量對入滲與逕流之影響」, 水土保持學報, 39(4), p.453~466。
15. 施嘉昌(1966),「入滲率之觀測法及其應用」, 社團法人台灣農業工程學會。
16. 許振崑、林伯勳、冀樹勇(2015),「雙環入滲及土壤理化試驗應用於石門水庫集水區土壤沖蝕指數研訂」, 中興工程, 第 126 期, p.31~40。
17. 陳念均(1970),「滲透現象及其影響因子的研討」, 水土保持學報, 第 3 期, p.18~23。
18. 曾怡潔(2019),「蒸發散與入滲對土壤含水量與地下水位變動之影響研究」, 中央大學水文與海洋科學研究所, 碩士論文。
19. 臺灣大學農業工程學系, 1970,「台灣之水稻灌溉」, 中國農村復興聯合委員會水利工程組印行。
20. 劉振宇、陳世楷、周曉雯(1999),「雲林地區水田入滲量之評估」, 農業工程學報, 45(1), p.38~54。