

土壤水分移動模式於旱作溝灌水量評估之 應用研究

Application of soil moisture movement model in evaluation of
Irrigation water volume for ditch irrigation in upland field

國立中興大學
土木工程學系 教授
陳榮松
Rong-Song Chen

國立中興大學
土木工程學系 碩士班
葉利穰
Li-Huang Yeh

國立中興大學
土木工程學系 碩士班
鄭思捷
ZHENG,SI-JIE

摘 要

臺灣由於地形緣故水資源保存不易，再加上近年來全球暖化影響，降雨分布不均，如何調配、運用與分配各標的間水資源儼然成為現今重要的課題。而臺灣農業用水約占了整體水資源用量的 70%。若能著手大宗旱作物的節水灌溉措施，想必對臺灣水資源的有效利用將大有助益。

林暉恩(2018)以日本東播溝灌地區資料進行一段水筒模式及改良型水筒模式比較，結果以改良型水筒模式模擬成效較佳，且透過分析以 25 cm 土層能當代表土層進行總體模擬，本研究為驗證其結論在台灣一樣適用，因此以彰化溪州包心白菜溝灌試驗地作為研究目標，利用兩種水筒模式進行二、三期作包心白菜土壤水分變化模擬，並以水文指標進行模式評估。其中為模擬更詳細之土壤水分變化曲線，將三期作包心白菜資料以各小時為間隔進行模式模擬，並探討及驗證其模式的適用性及適合性。

在三期作方面，模擬比較後以改良型水筒模式之模擬成效較佳，二期作方面兩種水筒模式表現差不多，在各小時模擬中，不考慮日(24 hr)的情況下以 1 hr 模擬表現最好，能更加詳細準確的模擬土壤水分，而若只需要單純模擬期作間整體水分變化趨勢，忽略過程的水分變化的話，以日(24 hr)模擬為最好的方式。

分析各層土層後發現，以 35 cm 土層之含水率與總土層含水率最為接近，因此考量減省經費及人力上能單以 35 cm 土層作為代表土層進行整體模擬。

關鍵詞：一段水筒模式、改良型旱田水筒模式、土壤水分移動模式、溝灌、TRAM

Abstract

Due to the topography of Taiwan, the preservation of water resources is not easy. Coupled with the impact of global warming in recent years, the distribution of rainfall is uneven. How to allocate, use and allocate water resources among various targets has become an important issue today. Taiwan's agricultural water consumption accounts for about 70% of the overall water consumption. If water-saving irrigation measures for bulk dry crops can be implemented, it will be of great help to the effective use of Taiwan's water resources.

Lin Huien (2018) compared the water tank model and the improved water tank model based on the data of the Tobo furrow irrigation area in Japan. The results showed that the improved water tank model has better simulation results, and through the analysis, the 25 cm soil layer can be used as the representative soil layer for the overall analysis. Simulation, in order to verify that its conclusions are also applicable in Taiwan, this study takes the furrow irrigation experimental plot of cabbage in Xizhou, Changhua as the research target, and uses two water tank models to simulate the soil moisture change of cabbage in the second and third phases. Metrics for pattern evaluation. Among them, in order to simulate a more detailed soil moisture change curve, the model simulation was carried out on the three-phase cabbage data at hourly intervals, and the applicability and suitability of the model were discussed and verified.

For the third phase of production, after the simulation comparison, the improved water tank model has better simulation results. In the second phase of the production, the performance of the two water tank models is similar. In each hourly simulation, the simulation performance is performed with 1 hr regardless of the day (24 hr). It is best to simulate soil moisture in a more detailed and accurate manner, and if it is only necessary to simply simulate the overall moisture change trend during the crop period and ignore the process moisture change, daily (24 hr) simulation is the best way.

After analyzing each soil layer, it is found that the moisture content of the 35 cm soil layer is the closest to the total soil moisture content. Therefore, considering the cost reduction and manpower, the 35 cm soil layer can be used as the representative soil layer for overall simulation.

Keyword : one-stage water tank model, improved dry field water tank model, soil moisture movement model, furrow irrigation, TRAM

一、緒論

1.1 研究動機及目的

台灣處亞熱帶地區，年平均降雨量約為 2,515 毫米，為世界各國年平均降雨量之 2.5 倍，但由於地形為島嶼特性，使得降雨型態在時間及空間之分布極不均勻，加上現階段因氣候變遷造成豐枯兩極化的趨勢日益明顯，可用水資源也面臨保存不易以及越來越少的窘境。而臺灣農業用水約占了整體水資源用量的 70%，尤其以 109 年臺灣農耕土地面積 79.0 萬公頃中，旱作之果樹 18.2 萬公頃、蔬菜 14.3 萬公頃，加上其他種類旱作如高爾夫球場草皮，園藝植物栽種等，其面積在農作物面積的一半以上。因此若能著手大宗旱作物的節水灌溉措施，想必對臺灣水資源的有效利用將大有助益。

本研究將利用台灣田區實際資料進行兩種水筒模式之比較，與林暉恩(2018)以日本東播地區溝灌試驗地之研究結果相比，以尋找出適合台灣之水筒模式，本次研究亦會透過驗證成效較佳之水筒模式進行每小時土壤水分變化模擬，探討以日為單位及以小時為單位之模擬成效，有別於以往以日為單位之土壤水分模擬，若能有效模擬每小時土壤水分變化，則在監測灌水時機便能更加精準，在發展節水及智慧灌溉方面想必能有一大方面的進步。

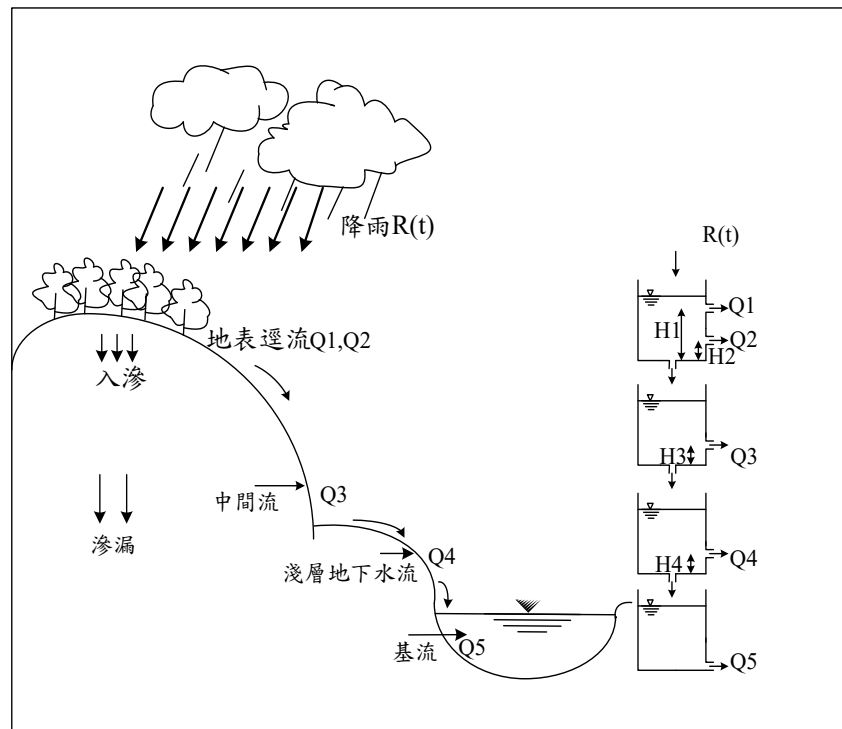
二、文獻回顧

2.1 水筒模式相關研究

1971 年日本科學技術廳防災研究中心所長菅原正巳博士(Dr. Masami Sugawara)提出關於水筒模式的相關研究，水筒模式是一種具物理概念的水文模式，一般自然水文常會發生降雨、逕流及入滲等自然水文現象，因此將此現象透過水收支平衡概念，置換成由數個具有貯留效果的模型容器，由地表至地下所組成的模型容器，即為水筒模式，其模式概念如圖 2-1 所示。

由圖 2-1 可知，假設某一時段內降雨均勻地發生在一集水區內，一部分降雨以截留損失、植物蒸散、地面蒸發及窪蓄等方式保留於地表上，形成降雨損失，剩下之降雨持續入滲至土壤中，若降雨已注滿窪蓄可貯留量，且土壤達飽和狀態，則降雨因無法持續入滲即儲留因此開始產生地表逕流；至於入滲至地表下的雨水，一部分繼續向下滲漏成深層地下水，一部分則成為中間流，形成逕流排入河川中；另外一部分則成為淺層地下水流出，剩餘之地下水最後會排入河川中成為基流。

因此將水筒模式利用上述概念，轉換成幾段不同深度之水筒，將具有貯留效果的水筒當成土壤容水量，當降雨落於第一段水筒時，一部分貯留於第一段水筒中，待水位高度達第一段水筒之側邊孔口高時，容器中的水便會由 Q1、Q2 孔口流出，產生自然現象中的地表逕流，此時地表土壤已達飽和，窪蓄亦注滿水量，另一部分雨水入滲至第二段水筒，同理第二、三、四段水筒使用相同概念計算。



2-1 水筒模式概念圖

參考資料: 謝正晟(2003)

由此可知，水筒模式是具有相當物理概念之參數型水文模擬模式，而且水筒模式在日本的應用已有相當良好的成效。

三、試驗地介紹

3.1 試驗地概述

(1) 地理位置

本研究於溪州農業區中設置溝灌試驗田區，田區位於東經 120.52 度，北緯 23.81 度，以包心白菜田區作為試驗，包心白菜分為三期種植，第一期為 108 年 8 月至 9 月初，第二期為 108 年 9 月初至 10 月中，第三期為 108 年 10 月中至 12 月底，田區由荖仔埤圳取水，以溝灌為灌溉方式，灌溉水至田區。

(2) 地形

溪州鄉全境皆位濁水溪沖積扇頂位置之上，地勢低平。早期溪洲以旱作居多，自從荖仔埤圳完成之後，形成大片肥沃的水田，溪州鄉成為稻米的重要產區，目前每期稻作約有 1,800 公頃左右，加上原先就已有一定規模種之旱作，使得溪洲為台灣重要糧倉。

農人通常運用濁水來補充農田的養分、地利、增肥，還會在農閒時特別讓自己的田地積滿圳水，沉積泥土，這讓原本只能種植旱作的沙礫地慢慢的沉積成一畝一畝良田。

(3) 氣候

溪洲年平均溫度約為 22.8℃，年平均降雨量約為 1,506 mm，屬亞熱帶季風氣候地區。年降雨分布不均，冬季少降雨，夏季降雨大多集中在五月至八月，為梅雨與颱風季節，約佔年降雨量 70%。冬季以東北季風為主，夏季吹行西南風，溫暖潮濕。

3.2 試驗地之相關資料調查

3.2.1 水量調查：

從農務者灌水記錄掌握灌溉水量，紀錄灌溉起始與結束時間，試驗地採用抽水機抽取地下水進行溝灌。試驗地抽水機的流量如表 3-1 所示，接著依據農民於作物耕種期間所記錄每次的灌溉時間，將抽水機的流量乘以灌溉時間得到農民實際灌溉的用水量。

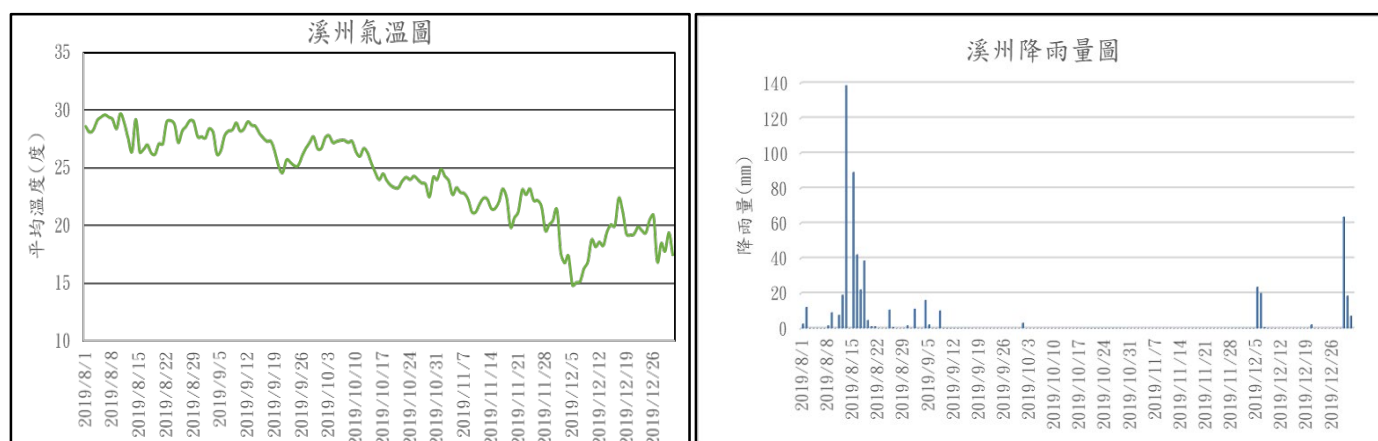
表 3-1 抽水機之試驗結果

	出水量(m ³)	流量(cms)	量測時間(sec)	平均流量(cms)
第 1 次試驗	2.152	0.0186	10.76	0.0186
第 2 次試驗	2.166	0.0185	10.83	
第 3 次試驗	2.166	0.0185	10.83	
第 4 次試驗	2.120	0.0189	10.60	

3.2.2 氣象資料

由於進行程式模擬需運用到該地相關氣象資料，因此以臨近溪州溝灌試驗地之交通部中央氣象局溪州(C0G720)地區氣象觀測站的紀錄資料作為本次實驗模擬之氣象資料，若資料尚有欠缺，則以鄰近之北斗(C0G840)地區氣象觀測站的資料補遺之。測站資料如圖 3-2 所示。可以看到降雨主要集中於八月，九月過後降雨天數少，單次降雨量也不多。

圖 3-2 溪州溝灌試驗地氣溫、降雨圖



3.2.3 農民灌溉資料

為了準確比對實際灌溉用水及模擬灌溉用水量，本研究請農家記錄灌水時程及水量以掌握灌溉水量，並配合各試驗地灌溉系統標準計算出用水量並與灌溉面積作，並計算可得出當次灌溉水深。

四、研究理論

4.1 水筒模式介紹

本研究透過建置有森正浩一段水筒模式及林暉恩(2018)改良型水筒模式，並比較其模式驗證成效，因此本章將介紹所使用之土壤水分移動水筒模式的發展與相關應用

4.1.1 有森正浩一段水筒模式

有森正浩等(2009)為模擬未飽和土壤內水分移動情形，並使土壤水分移動模式化，因此有森正浩等以菅原正巳(1981)提出的土壤水移動水筒模式作為核心概念，將土壤內水分收支及移動情形簡化如圖 4-1 所示之概念圖。

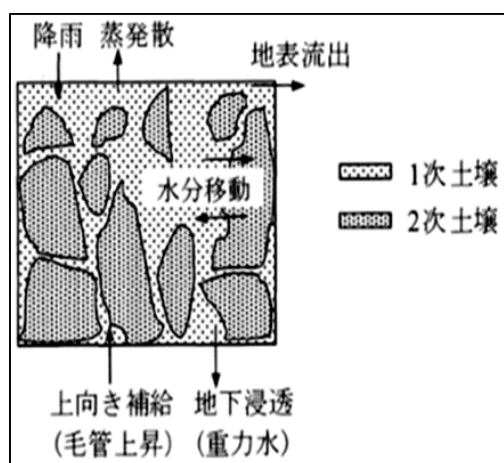


圖 4-1 土壤水移動概念示意圖

參考資料：有森正浩(2009)

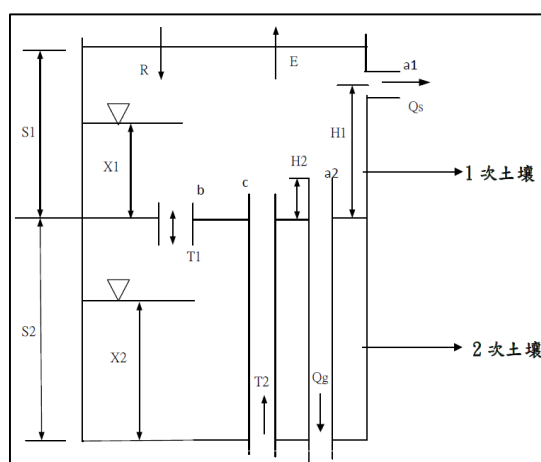


圖 4-2 一段水筒土壤水分移動模擬模式圖

參考資料：有森正浩(2009)

圖 4-2 為有森正浩等依據土壤水移動概念而作成之水筒模式，假設土壤水為垂直方向移動並忽略水平方向的移動。且為了便於模式的計算，把 1 次土壤當作上層；2 次土壤當作下層，這並非表示此為分段結構，只是便於使用在模式的計算上所設計而成的架構。分析對象為土層內部之有效土層，模式計算方法如下：

$$Q_s = a_1 \times (X_1 - H_1) \text{ if } X_1 \leq H_1, Q_s = 0 \quad (4.1)$$

$$Q_g = a_2 \times (X_1 - H_2) \text{ if } X_1 \leq H_2, Q_g = 0 \quad (4.2)$$

$$T_1 = b \times (X_1/S_1 - X_2/S_2) \quad (4.3)$$

$$T_2 = c \times (1 - X_1/S_1) \text{ if } Q_g > 0, T_2 = 0 \quad (4.4)$$

$$E = D \times E_p \quad (4.5)$$

$$D = 1/\{1 + f \times \exp(-g \times S_r/E_p)\} \quad (4.6)$$

參數說明：

Q_s : 地表流出量($mm \cdot h^{-1}$), Q_g : 地下滲透量($mm \cdot h^{-1}$), S_1 : 1 次土壤飽和容積(mm), S_2 : 2 次土壤飽和容積(mm), X_1 : 1 次土壤水分量(mm), X_2 : 2 次土壤水分量(mm), H_1 : 地表流出孔高(mm), H_2 : 地下滲透孔高(mm), T_1 : 1~2 次土壤間水分移動($mm \cdot h^{-1}$), T_2 : 向上補給水量($mm \cdot h^{-1}$), E : 蒸發散量($mm \cdot h^{-1}$), E_p : 潛勢能蒸發散量($mm \cdot h^{-1}$), D : 蒸發散量及潛勢能蒸發散量比, S_r : 一次土壤飽和度, $a_1(h^{-1})$ 、 $a_2(h^{-1})$ 、 $b(mm \cdot h^{-1})$ 、 $c(mm \cdot h^{-1})$ 、 f 、 g 為各項係數。

在有森正浩提出的土壤水移動概念示意圖中可以看到有森正浩在一塊土塊中假定 1、2 次土壤的存在，其 1、2 次土壤在土塊中不均勻分布，彼此間因水壓力造成水分移動的現象，但由於其不均勻分布，1、2 次土壤體積、面積大小參差不齊，難以計算整體水分移動，因此有森正浩等將此土壤水移動水筒模式之概念另行做假設。

將實際土壤分為上層 1 次土壤及下層 2 次土壤，由於 1 次土壤直接接觸到降雨、蒸發等作用及水文變化，因此主要水分皆透過此土壤層進行移動，2 次土壤在 1 次土壤下方可與 1 次土壤進行水分交換。當 1 次土壤在水分足夠呈現飽和狀態時，2 次土壤能吸收由 1 次土壤向下入滲的水分；另外當 1 次土壤未飽和，孔隙呈現負壓時，2 次土壤則將水分透過毛細管作用向上補給至 1 次土壤。將 1、2 次土壤結合成土壤內部主要構造，即為模擬實際土壤水移動情形之概念。

當降雨或灌溉時，水快速滲入 1 次土壤並注滿 1 次土壤內空隙後，使 1 次土壤飽和，而 2 次土壤因空隙較小，故入滲速率不如 1 次土壤快速。然而並非所有水分都能有效被 2 次土壤吸收，未吸收至 2 次土壤的過剩水會因重力向下滲漏變成地下水，而因 1 次土壤飽和而無法入滲之雨水則會形成地表逕流。無降雨時，1 次土壤因蒸發散的作用逐漸喪失土壤水分，因此 2 次土壤的水會緩慢移動到 1 次土壤進行水分補給，向上補給水也會因毛細管作用而產生按一定比例補給到 1 次土壤。此循環不斷的過程為降雨-移動-蒸發散之土壤內水分移動。

4.2.2 改良型旱田水筒模式

在 1972 年菅原正已提出水筒模式基本概念後，有森正浩等(2009)與丸山利輔等(1979)便以此概念提出之土壤水分移動水筒模式及早田水筒模式，林暉恩(2018)依據日本學者提出之土壤水移動概念並且加以改良，提出之改良型旱田水筒模式如圖 4-3 所示，此改良型水筒模式在水分變化相當複雜的乾燥地區，適用性優於一般旱田模式，且更能有效說明總土層之水分變化。

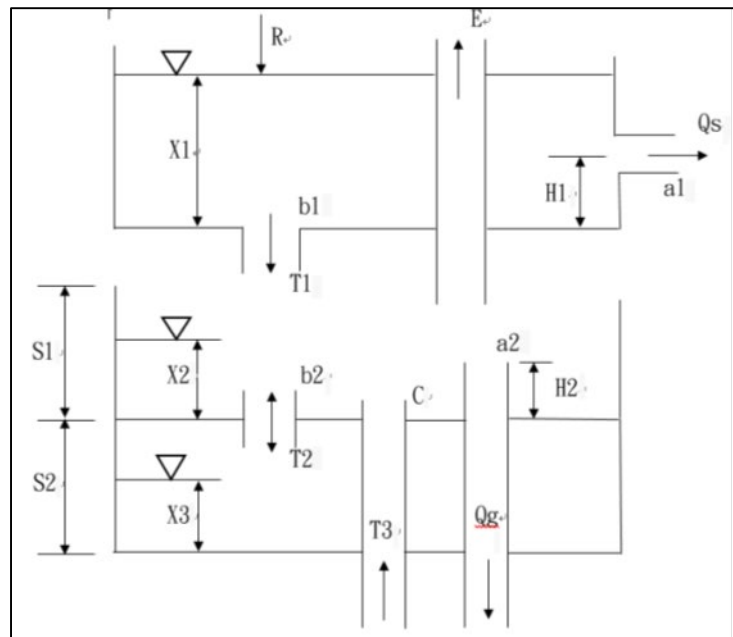


圖 4-3 改良型土壤水筒模式示意圖

參考資料：林暉恩(2018)

改良型旱田水筒模式參數說明：

$S1$ 第二段水筒 1 次土壤飽和容積； $S2$ 第二段水筒 2 次土壤飽和容積； $X1$ 第一段水筒初始水深； $X2$ 第二段水筒 1 次土壤水分量； $X3$ 第二段水筒 2 次土壤水分量； $H1$ 地表流出孔高； $H2$ 地下滲透孔高； $a1$ 、 $a2$ 、 $b1$ 、 $b2$ 、 c 模式參數。

模式計算公式如下：

- (1) 上段水筒逕流量 Q_s

$$Q_s = a_1 \times (X_1 - H_1) \text{ if } X_1 \leq H_1, Q_s = 0 \quad (4.14)$$

上段水筒入滲量 T_1

$$T_1 = b_1 \times X_1 \quad (4.15)$$

- (2) 下段水筒流出滲透量 Q_g

$$Q_g = a_2 \times (X_2 - H_2) \text{ if } X_2 \leq H_2, Q_g = 0 \quad (4.16)$$

- (3) 下段水筒一次與二次土壤間水分移動量 T_2

$$T_2 = b \times (X_2/S_1 - X_3/S_2) \quad (4.17)$$

- (4) 下段水筒向上補給水量 T_3

$$T_3 = c \times (1 - X_2/S_1) \text{ if } Q_g > 0, T_3 = 0 \quad (4.18)$$

- (5) 模式蒸發散量

$$E = D \times E_p \quad (4.19)$$

$$D = 1/\{1 + f \times \exp(-g \times S_r/E_p)\} \quad (4.20)$$

$$S_r = X_2/S_1 \quad (4.21)$$

E_p 為潛勢蒸發散量(4.14)式中，以 Penman 式計算所得，計算方式依據土地改良事業計畫設計基準 (2015)所表示之方法，方程式如下：

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{S}{1} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (4.22)$$

式中：

Δ ：氣壓曲線斜率； γ ：濕度常數； S ：淨輻射量； e_{sa} ：飽和水蒸汽壓； e_a ：露點水氣壓； l ：水的蒸發潛熱； $f(u_2)$ ：2 公尺高所量測到之風速函數。

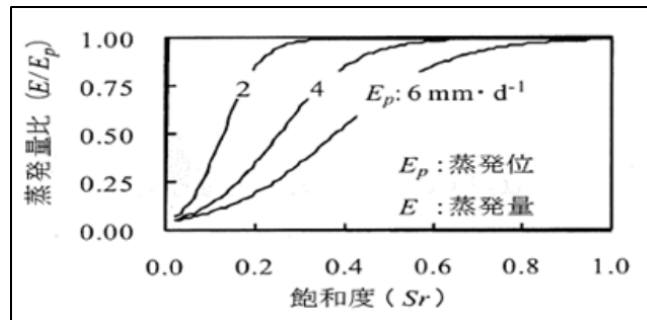


圖 4-4 S_r 與 D 之假設關係

參考資料：有森正浩(2009)

五、試驗地模擬結果與評析

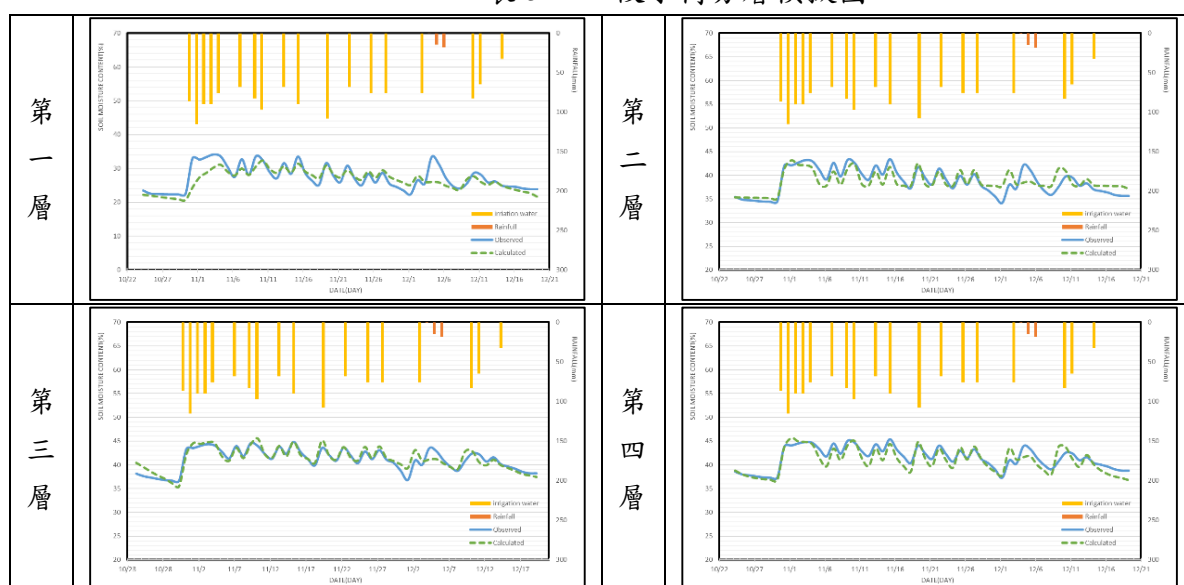
本章節將會呈現以有森正浩一段水筒模式及改良型旱田水筒模式模擬結果比較，比較林暉恩(2018)以日本東播地區旱田溝灌試驗地為模擬對象之模擬結果，並以小時模擬來得到更詳細土壤水分變化。

5.1 模擬結果

由於本次研究包心白菜數據分為一、二、三期，一期作由於資料誤差故不使用，而本研究在二、三期作擇一選用三期作資料進行模式驗證。

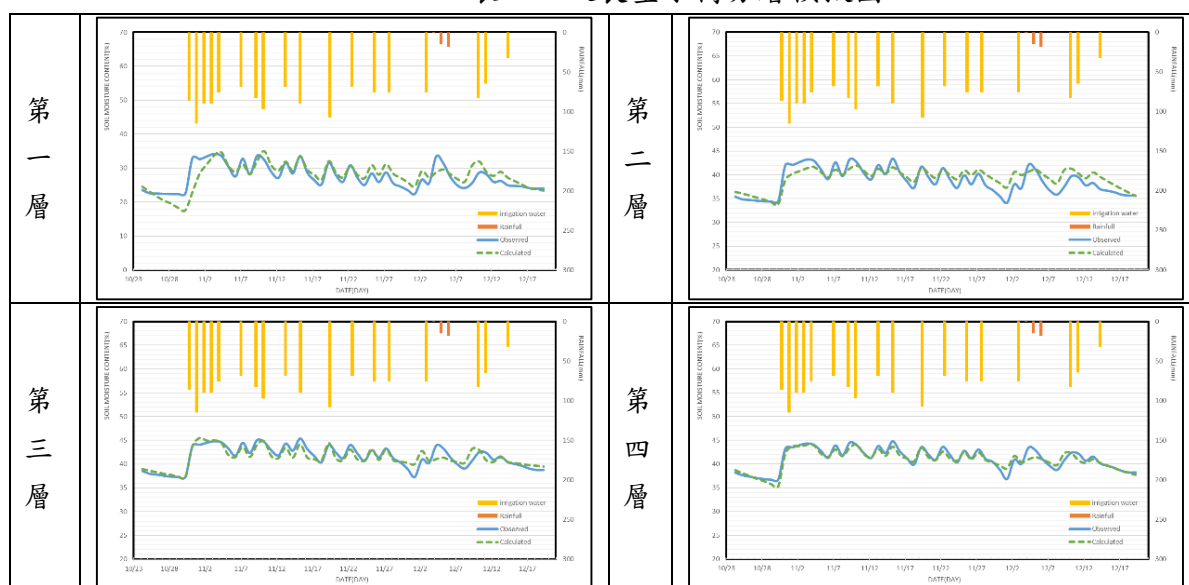
1. 一段水筒模式模擬結果

表 5.1 一段水筒分層模擬圖



2. 改良型水筒模式模擬結果

表 5.2 改良型水筒分層模擬圖



3. 率定結果比較

(1) 一段水筒模式模擬分析

在一段水筒模擬中，將其模擬結果之水文指標做成表，如表 5-3 所示，可以看到以 0~10 cm 土層模擬表現最差，而 0~20 cm 土層及 0~30 cm 土層的模擬結果相差不多，四層中表現最好的為 0~40 cm 土層的總土層模擬，在三種指標中皆優於其他累積土層。該結果不同於林暉恩(2018)所作結果，其模擬為 0~30 cm 土層表現最佳，而本次模擬為 0~40 cm 土層表現最好，因此可以知道該模式於不同試驗地及不同地區會有不同結果。

表 5-3 一段水筒各累積深度土層水文評估值

	土層累積深度(cm)	RR	RMSE	CE
第一層	0~10	0.079	0.024	0.553
第二層	0~20	0.041	0.016	0.664
第三層	0~30	0.031	0.013	0.692
第四層	0~40	0.025	0.01	0.812

(2) 改良型水筒模式模擬分析

在改良型水筒模擬中，水文指標表如表 5-4 所示，可以看出 0~10 cm 土層模擬表現最差，而表現最好的依然為 0~40 cm 總土層，在模式整體表現上相當不錯。

林暉恩(2018)在改良型水筒模式模擬中，也以 0~60 cm 總土層進行模擬之模擬結果為最好，因此可以大概推估此改良型水筒模式在分析不同地區時以總土層的模擬成效會最好。

表 5-4 改良型水筒各累積深度土層水文評估值

	土層累積深度(cm)	RR	RMSE	CE
第一層	0~10	0.09	0.025	0.524
第二層	0~20	0.043	0.016	0.646
第三層	0~30	0.025	0.01	0.801
第四層	0~40	0.019	0.008	0.883

(3) 兩種水筒模式比較與結論

- 1) 兩種水筒模式皆以 0~10 cm 土層模擬最差，推估是由於該層土壤受植物根系吸水作用，加上由於為地表因此容易受到降雨及灌溉水量影響，水分變化較大，且無降雨時蒸發散量也容易直接影響其水分變化，因此造成模式在模擬上不夠精準。

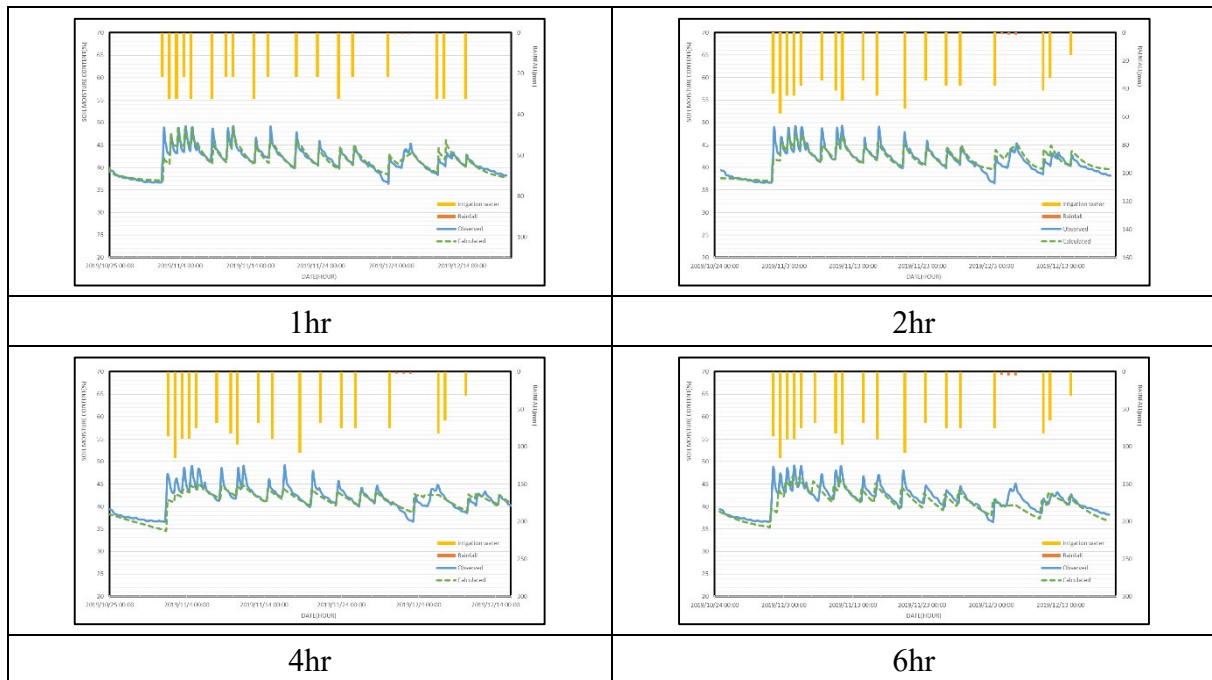
- 2) 以 0~40 cm 模擬成效來看，兩種水筒模式模擬結果皆為最佳，而進而比較 0~40 cm 總土層水文指標，一段水筒 RR、RMSE 及 CE 值分別為 0.025、0.01 及 0.81，而改良型水筒模式分別為 0.019、0.008 及 0.883，因此可以判斷改良型水筒模式在加入地表進行改良後，其模擬結果優於一段水筒模式。
- 3) RR 值較重視低水位之適合度，也就是能有效模擬含水率在低點的評估值，由於若能將含水率在底部低點值有效模擬出來，便能判斷灌水時機，因此比較兩種水筒模式之 RR 值可以看到，改良型水筒模式明顯優於一段水筒模式，因此透過改良型水筒模式進行用水量模擬，想必能更準確得到含水率降低時的灌水時機。

5.2 改良型旱田水筒模式分時模擬探討

5.2.1 以各小時為單位模擬

在上節以日(24hr)為單位的模擬中能夠有效模擬土壤水分變化，且以改良型水筒模式模擬結果較佳，本節將以三期作包心白菜資料於改良型旱田水筒模式進行不同小時土壤水分的模擬，並比較其模擬結果並以水文指標來判斷成效，由於三期作耕種日數較長，較能驗證模式對於種植期距更長的作物也能有效模擬，因此在二、三期作中選擇三期作為模擬資料，並以驗證成效較好之總土層進行模擬，模擬結果如表 5-5 所示。

表 5-5 各小時模擬圖



(1) 各小時模擬結果比較

為了更準確判斷模擬成效，因此將各小時模擬結果運用上述之水文評鑑指標進行評估，並加入第三期以日為單位模擬之評鑑結果，如表 5-6 所示。

表 5-6 各小時模擬水文指標

模擬單位	RR	RMSE	CE
1 hr	0.024	0.011	0.849
2 hr	0.028	0.012	0.807
4 hr	0.032	0.014	0.744
6 hr	0.048	0.021	0.998
日 (24hr)	0.019	0.008	0.883

- 1) 在各小時模擬中以 1 hr 模擬結果最佳，其次為依序到 6 hr 之模擬結果，且雖然在高部水分變化較大地方模擬成效較差，然而水分下降至底部時都能精準模擬出來，可見未來能夠在水分曲線降至低點時精確地找出灌水時機。
- 2) 以日(24 hr)進行模擬結果比 1 hr 還好，在 RR 值及 RMSE 值中皆比 1 hr 模擬結果還要接近 0，代表模式模擬較佳，且 CE 值更接近 1，模擬值曲線相當密合實測值曲線，這與當初推測之時間分為越細模擬結果越好的想法有誤。
- 3) 推測日(24 hr)模擬結果比 1 hr 還好，是由於此次輸入 1 hr 之灌溉水量及蒸發量資料皆為以日資料做平均輸入，並非為每小時的監測記錄，加上由於時間分的越細，當中有資料誤差皆會明顯顯示出來，而換成日(24 hr)灌溉模擬上，由於每筆輸入之資料為一天一筆，若過程中有增加水量，到該筆資料輸入時，水量皆已入滲至穩定情況，才會造成日(24hr)模擬成效比 1 hr 的好。

(2) 日模擬與小時模擬適用性

- 1) 若只需單純模擬期作間整體水分變化趨勢，忽略過程水分變化，以日(24 hr)模擬為最好的方式，且若資料數量少，或者過程有誤差，以日(24 hr) 方式模擬便能忽略過程誤差且以少量資料便能得到良好的整體趨勢模擬結果。
- 2) 由於一般在實務上，在不相當精準控制用水量的情況下，種植作物不需隨時監控水分變化，只要單純控制整體土壤水分，保持作物適當生長即可，且由於溝灌此種灌溉方式較粗糙，不易控制灌溉用水量，因此模擬整體一日用水量在實務上便已經可以有效控制作物水分，且比起以往農民灌溉方式也已經能夠達到節省相當多的灌溉用水量了。
- 3) 而不同於一般作物，若是在一些觀賞植物上，需要考量到其生長表現，或對於水分敏感度較高的植物，則可利用 1 hr 為單位來進行每小時水分監測，並以較精準灌溉方式如滴灌進行灌溉，利用模式模擬來分析每小時損失量，並在智慧化灌溉系統設定當水分下降至多少便自動灌溉，相信對於控制水量能有很大的進步。

- 4) 未來若在灌溉方面，以相當精準節水為目的，由於一天中每小時水分變化因素過多，或許此時土壤水分增加已不需要進行灌溉，因此以小時模擬先概略得知作物正常耕種時每小時水分損失量，若過程有水量進入田區如降雨，將損失量與增加水量進行比較便能知道接下來幾小時是否需要再灌水，並且將灌溉方式由溝灌改為滴灌，直接透過水管將水輸送至植物根部，減少過程損失，透過精準掌控土壤水分量，想必在灌溉用水方面能有很大的節約。

5.3.2 一段水筒分時模擬

在前述比較驗證中，在不考慮以日(24 hr)模擬的情況下以 1 hr 表現最好，然而本章為驗證改良型水筒模式表現優於一段水筒模式，因此若是更進一步進行兩種水筒模式 1 hr 的模擬比較，改良型水筒模式是否還會優於一段水筒模式須待證明。因此本節一樣以三期作資料，呈現一段水筒模式以 1 hr 模擬結果，並與改良型水筒模式比較，模擬結果圖如圖 5-1 所示。

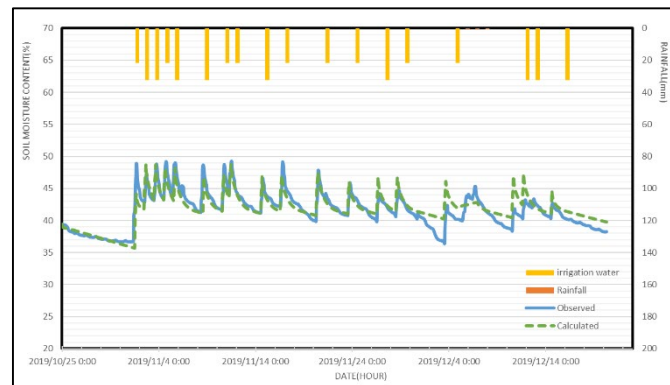


圖 5-1 一段水筒 1hr 模擬圖

由表 5-7 可以看到，一段水筒模式在模擬 1 hr 的方面表現也不差，在 RR 值及 RMSE 值方面分別為 0.033 及 0.014，CE 值也有 0.92，曲線相當密合，而改良型水筒模式雖然曲線密合程度不如一段水筒模式，然而其整體表現還是優於一段水筒模式，在 RR 值及 RMSE 值方面表現皆優於一段水筒模式。

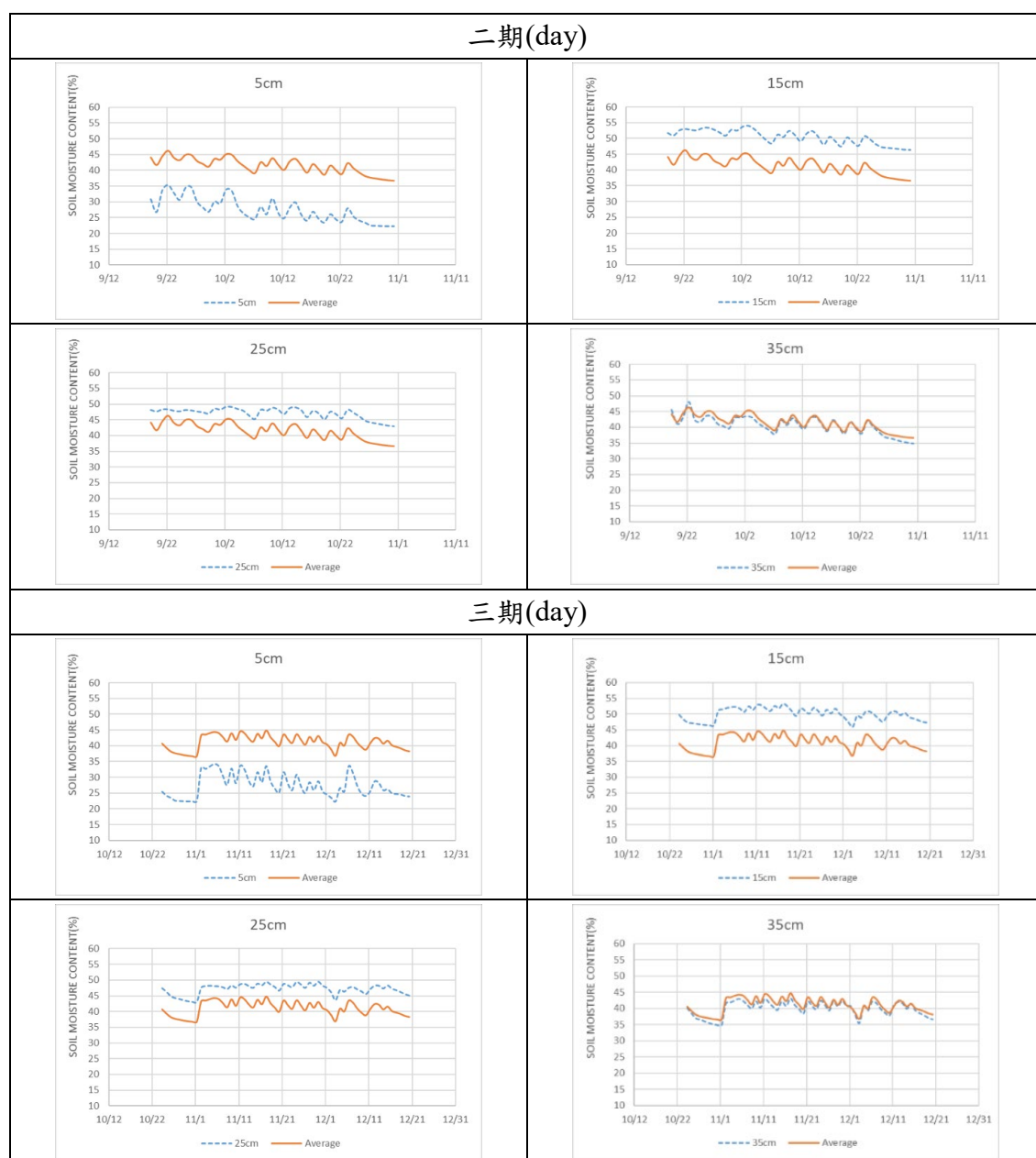
表 5-7 兩種水筒模式 1 hr 水文指標評估值

模式	RR	RMSE	CE
一段水筒模式 1 hr	0.033	0.014	0.920
改良型水筒模式 1 hr	0.024	0.011	0.849

5.3 水筒模式精簡探討

本研究以一段水筒模式及改良型水筒模式模擬土壤水分變化皆有良好的模擬結果，然而若在整體研究方面能更精簡進行模擬分析，以節省各方面成本及花費，則對於加速加大發展智慧旱作灌溉系統方面有益無害，因此以下將進行模式模擬與現地實測方面的探討。

5.3.1 試驗地土壤水分分層圖



比較各土層含水率及總土層平均含水率後，可以看到在二期作及三期作方面，35 cm 土層(30 cm~40 cm)之土壤含水率皆與總土層平均含水率最為接近，因此往後若在現地實測上，考慮節省經濟、人力成本，則可考慮以 35 cm 土層為代表土層，單只購買一支土壤水分感測器 TDR 進行量測該土層含水率以作為模式實測值，進而進行模擬。

參考文獻

1. 王如意、易任，1979，「應用水文學」，茂昌圖書出版社。
2. 張仲民，1988，「普通土壤學」，茂昌圖書出版社。
3. 農業工程研究中心，1995，「旱作灌溉新技術」。
4. 陳榮松, 賴任瑄, 2001, 7, 水田水筒模式之降雨-逕流模擬研究, 第十二屆水利工程研討會論文集, pp. E38-E43。
5. 甘俊二等，2002，「農業結餘水量有效運用策略研析電子書」，臺北：行政院經濟部水利署。
6. 陳榮松, 謝正晟, 畢嵐杰, 2003, 6, 水筒模式參數全域最佳化率定之研究, 台灣水利, Vol. 51, No. 2, pp. 34-45。
7. 張順竹，2004，「坡地旱田降雨之研究」，碩士論文，臺中：國立中興大學土木工程研究所。
8. 楊弘倫，2004，「時域反射儀應用於土壤含水量及地下水監測技術」，碩士論文，桃園：國立中央大學土木工程研究所。
9. 林錦源，2006，「應用土壤含水量觀測推估蒸發散量之研究」，碩士論文，台南：國立成功大學水利及海洋工程研究所。
10. 陳榮松, 楊國賢, 王國樑, 張洵傑, 2009, 水筒模式應用於水稻梯田降雨-逕流之研究, 農業工程學報, Vol. 55, No. 3, pp. 88-100. (EI)。
11. 陳榮松, 楊國賢, 王國樑, 張松源, 2009, 修正型水筒模式應用於水稻梯田降雨-逕流之研究, 台灣水利, Vol. 57, No. 3, pp. 28-35. (EI)。
12. 陳榮松, 楊國賢, 王國樑, 彭文霈, 2009, 降雨-逕流模式於水稻梯田之適用性分析, 中華水土保持學報, Vol. 40, No. 2, pp. 135-145。
13. 陳榮松, 王國樑, 楊國賢, 張順竹, 2009, 改良式水筒模式於坡地旱田之降雨-逕流研究, 中華水土保持學報, Vol. 40, No. 2, pp. 147-157。
14. 洪啓智，2014，「水稻溝灌與漫灌之灌溉效率評估」，國立屏東科技大學土木工程系碩士論文。
15. 張聖瑜，2015，「田間精密灌溉用水模式及管理機制之建立」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
16. 大槻恭一，2016，「旱田灌溉技術士講習會 2016 資料」，日本：九州大學演習林。
17. 陳榮松, 林暉恩, 2018, 11, 9, 水筒模式於模擬旱田土壤水分量變化之應用分析, 農業工程研討會論文摘要集, p. 169-170.。
18. 陳榮松, 蘇致仁, 2019. 10. 25, RETC 軟體於推求土壤水分特性曲線之應用分析, 農業工程研討會論文集, p. 384-398.。
19. 陳榮松, 施文傑, 2019. 10. 25, 旱田土壤水分移動之模擬研究, 農業工程研討會論文

- 集, p. 412-424.。
20. 陳榮松, 楊宗祐, 張峻誠, 2020. 10. 28, 土壤水分特性曲線方程式參數最佳化之研究, 農業工程研討會論文集, p. 738-750.。
 21. 小林慎太郎、藤森新作、富田正彥、丸山利輔「複合水筒模式於廣域水收支解析之應用—3. 淀川水系之適用案例」, 農業土木學會誌 47(4), pp. 29-34(1979)。
 22. 農林水產省構造改善局, 1982, 「土地改良事業計畫設計基準·計畫(旱田灌溉)」, 日本: 農業土木學會, pp. 28-36。
 23. 有森正浩、遠藤泰、林春奈, 2012, 「在旱田使用水筒模式推估土壤含水量之長期變化和旱災發生的頻率」, 農業農村工學會論文集, 第 280 號, p. 341-347。
 24. 太田弘毅、凌祥之, 1990, 「水筒模式於土壤水收支之解析」, 農業土木學會誌 58(7), p. 675-679。
 25. 丸山利輔、富田正彥、小林慎太郎、藤森新作, 1979, 「複合水筒模式於廣域水收支解析之應用-1. 複合水筒模式之特徵與構成」, 日本: 農業土木學會誌 47, pp. 19-24。
 26. 太田弘毅、凌祥之, 1990, 「水筒模式於土壤水收支之解析」, 日本: 農業土木學會誌 58(7), pp. 675-679。
 27. 有森正浩、宮本博文、橋本敏行, 2012, 「使用水筒模式於包心菜旱田之土壤水分量推估」, 日本: 水土の知 80(12), pp. 1009-1012。
 28. 有森正浩, 2017, 「使用水筒模式於土壤水分量變化之再現研究」,
 29. 日本: 旱地農業, 第 702 號, pp. 19-28。有森正浩、遠藤泰、林春奈, 2012, 「在旱田使用水筒模式推估土壤含水量之長期變化和旱災發生的頻率」, 日本: 農業農村工學會論文集, 第 280 號, pp. 341-347。
 30. Rong-Song Chen, Lan-Chieh Pi and Cheng-Cheng Hsieh, 2005, Application of Parameter Optimization Method for Calibrating Tank Model, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 41, No. 2, pp. 389-402.
 31. 台中區農業改良場, 2006, 結球白菜栽培注意要點。
 32. 行政院農業委員會, 2022, 農業經營現況。