

旱作灌溉效率之研究

—地面灌溉與多孔管噴灌效率比較—

Studies on Irrigation Efficiencies for Upland Crops

臺灣省水利局副工程司

黃金全

灌溉效率為一項含義相當籠統的名詞。近年來由於水資源經濟使用問題普遍引起注意，灌溉效率也相應引人重視。灌溉效率低，不獨指灌溉水之浪費，且亦指灌溉之不適當，久而久之，足以破壞土壤理化性質，降低土地生產力。本文說明灌溉效率觀念之演變，同時闡明各種灌溉效率之含義及幾項主要灌溉效率之求法，最後以地面灌溉與多孔管噴灑灌溉效率實驗結果，做為實例試算，以供參考並求正於各位專家。

一、一般地面灌溉效率的評估

一般灌溉水量損失評估方法，在最早時期只以灌溉水之輸送效率 (Water conveyance efficiency) 來表示，迄今所有灌溉系統設計，此項輸送損失或輸送效率仍為一項不可缺的設計因素。它的含義就是渠首攔取的灌溉水量對輸送到田間之水量的百分比。如以公式表示，即

$$E_c = \frac{W_r}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

在此， E_c = 灌溉水之輸送效率

W_r = 輸送到田間之水量

W_s = 渠首攔取之水量

至1926~27年，Beckett, Blaney 和 Taylor 三人在加州聖地亞哥做果園灌溉需水量研究，做了40次「灌溉效率」測定。由此產生另一項效率評估的方法。當時所稱「灌溉效率」與後來Israelsen在1932年所稱的灌溉水之適用效率 (Water application efficiency) 含義相同，即田間灌溉水量對根系土層所貯留水量的百分比。以公式表示，即

$$E_a = \frac{W_s}{W_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

在此， E_a = 灌溉水之適用效率

W_s = 貯留在根系土層中之灌溉水量。

W_r = 輸送到田間之水量。

上述貯留在根系土層中之灌溉水量，後來在1939

年經美國農業工程學會灌溉委員會改訂為「作物主要根系土層中使土壤含水率增加之灌溉水量」，是土壤含水率直接成為灌溉效率評估標準之開始。

嗣後若干年中，有關灌溉效率評估方法的研究，似乎都集中在灌溉水之適用效率。如1937~41年間Israelsen在猶太州之試驗，1942年Blaney及1948年Diebold和Williams等在新墨西哥之試驗等是。

迨至1957年Vaughn E. Hansen，發表灌溉效率的新觀念，對灌溉效率提出新想法與定義。Hansen提出的新觀念，包含有以下三項意義；即灌溉的適當性 (Adequacy of irrigation)，灌溉的均勻性 (Uniformity of irrigation)，及作物的可利用性 (Ability of crop to utilize)。對灌溉的適當性，他提出新評估方法稱為灌溉水之貯藏效率 (Water Storage efficiency)。它的意義就是根系土層中需要補充之水量對根系土層中由灌溉而貯留之水量的百分比。以公式表示，即

$$E_s = \frac{W_s}{W_n} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

在此， E_s = 灌溉水之貯藏效率。

W_s = 貯留在根系土層中之灌溉水量。

W_n = 根系土層中需要補充之灌溉水量。

由上可知，所謂灌溉的適當性乃指一次灌溉結果能滿足根系土層所需要的程度。在灌溉水源不十分充足情況下，一次灌溉輸送到田間的灌溉水，或許可以100%貯留在根系土層，但不一定能滿足根系土層全部的需要。因此，在高灌溉水適用效率下，當時的貯藏效率高低成為灌溉之適當與否的重要指數。

對灌溉的均勻性，他提出的評估方法稱為灌溉水分布效率 (Water distribution efficiency)，為田區間灌溉水分布情形之評估。以公式表示，即

$$E_d = \left[1 - \frac{V}{d} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

在此， E_d = 灌溉水分布效率

$y =$ 土層中平均貯留灌溉水深與田區間各點土層實際貯留灌溉水深之差的平均值。

$d =$ 土層中平均貯留灌溉水深。

對作物的可利用性，他提出一項稱為灌溉水消耗效率 (Consumptive use efficiency) 的評估方法，為正常狀態下消耗的作物用水量 (Normally consumptively Used) 對根系土層中實際消耗水量的百分比。據 Hansen 稱，在過寬的畦溝間隔與透水性良好而水分充裕情況下，畦栽作物的用水量除一般所謂作物用水量 (Consumptive use) 以外，尚有由土面蒸發與溝底向下移動的水分損失。根據他對寬行而透水性良好地區所作馬鈴薯的灌溉試驗結果，此項效率只有 50%。如以公式表示，即

$$E_u = \frac{W_u}{W_d} 100\% \dots\dots\dots (5)$$

在此， $E_u =$ 灌溉水之消耗效率

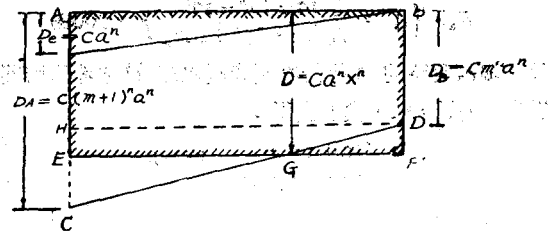
$W_u =$ 正常狀態消耗之作物用水量

$W_d =$ 根系土層損失之水量。

以上所有五項灌溉效率中，(1)，(5)兩項必須由實驗決定，而(2)(3)(4)三項則由土壤滲入率與水流前進率觀測結果，可以計算得知。又五項灌溉效率中，第(1)項之輸送效率，純為渠道工程控制範圍，第(5)項之消耗效率有關之畦溝間隔及土壤之透水性等，非灌溉操作所能支配。故旱作灌溉一般地面灌溉效率的評估研究，可以其他三項效率為主要對象。

二、主要地面灌溉效率的計算方法

早期灌溉效率——主要為灌溉水之適用效率——都靠田間實驗求得。Israelsom 在 1938 年發表之灌溉水適用效率測定，就是利用量水堰或槽測定田間灌溉水量，再用採土烘乾法求得灌溉前及灌溉後 1~2 天之土壤含水率，計算主要根系土層含水率之增加而得。但因田間操作，採土代表性及時間航誤等因素，田間實驗法無法達到相當可靠精度。1950 年 Fuhrman 建議自灌溉前採土以後至灌溉後再度採土烘乾之期間，田間土面蒸發與作物蒸散量加以考慮，如此所得適用效率較所測定者略高。但此項蒸發散量觀測本身既困難又不確實，在應用上相當不便。1959 年日人椎名乾治利用土壤滲入率與水流前進率資料，並應用美國四分法之觀念，以計算方法直接求出灌溉水之適用，貯藏及分布效率，在實用上頗稱簡便。計算公式分別說明於下：



AB 為畦溝之一段，長度 l ，水流由 A 流達 B 需時 a 分，土壤滲入需要灌溉水深 D 所要時間為 T 分，在末端 B 實際滲入時間為 x 分，土壤累積滲入率 $D = CT^n$ 之指數 n 為已知，並假設 $\frac{x}{a} = m$ ， $\frac{T}{a} = X$ ，則由效率之定義獲知：

$$E_a = \frac{\square AEGBD}{\square ACBD} \times 100\% = \left(1 - \frac{\triangle ECG}{\square ACBD}\right) \times 100\%$$

$$E_a = \frac{\square AEGBD}{\square AEBF} \times 100\% = \left(\frac{\square ACBD - \triangle ECG}{\square AEBF}\right) \times 100\%$$

$$E_a = \left[1 - \frac{\frac{1}{4}(AC - BD)}{\frac{1}{2}(AC + BD)}\right] \times 100\%$$

$$= \left[1 - \frac{\frac{1}{2} \triangle HCD}{\square ACBD}\right] \times 100\%$$

而 $\square ACBD = \frac{1}{2} l c a^n ((m+1)^n + m^n)$

$$\triangle ECG = \frac{1}{2} EG \cdot EC = \frac{1}{2} \cdot \frac{l[(m+1)^n - X^n]}{[(m+1)^n - m^n]} \cdot [(m+1)^n - X^n] C a^n = \frac{1}{2} l C a^n \frac{[(m+1)^n - X^n]^2}{[(m+1)^n - m^n]}$$

$$AEBF = C a^n X^n l$$

$$\triangle HCD = \frac{1}{2} l C a^n [(m+1)^n - m^n]$$

由是 $E_a = \left\{1 - \frac{[(m+1)^n - X^n]^2}{[(m+1)^n + m^n][(m+1)^n - m^n]}\right\} \times 100\%$

$$E_s = \left\{\frac{[(m+1)^n + m^n] - \frac{[(m+1)^n - X^n]^2}{[(m+1)^n - m^n]}}{2X^n}\right\} \times 100\%$$

$$= \left\{\frac{[(m+1)^n + m^n][(m+1)^n - m^n] - [(m+1)^n - X^n]^2}{2X^n[(m+1)^n - m^n]}\right\} \times 100\%$$

$$E_a = \left\{ 1 - \frac{[(m+1)^n - m^n]}{2[(m+1)^n + m^n]} \right\} \times 100\%$$

設末端灌溉時間 x 等於計劃灌溉水深 D 之滲入時間 T 時，則 $X=m$ ，代進去得：

$$E_a = \left\{ 1 - \frac{(m+1)^n - m^n}{(m+1)^n + m^n} \right\} \times 100\%$$

$$E_a = \left\{ \frac{[(m+1)^n + m^n] - [(m+1)^n - m^n]}{2m^n} \right\} \times 100\% = 100\%$$

倘若在某一特定之 n ， m 值範圍內分別計算 E_a ， E_s 及 E_p 並以圖表示，則當土壤滲入率之 n 已測知，需要灌溉水深亦已知時，很簡便地可選擇某一灌溉效率下容許之畦溝流下時間。畦長、流量、坡長與畦溝流下時間之間的關係由田間實驗求得，因而某一灌溉效率下之通常畦長及流量，均能告確定。

三、噴灌效率評估方法

噴灌灌溉由於輸水施灌方法與一般地面灌溉迥異，其灌溉效率評估方法亦不盡相同。例如灌溉水之輸送效率在地面灌溉時幾乎是一項不可避免之重要因素，但在噴灌系統內，都是封閉管路，其輸送階段之損失幾乎微不足道。又地面灌溉因上下游灌溉水滲入時間之差異，產生深層滲漏，故有灌溉水之適用效率分布效率等，但噴灌系統在田間上下游幾乎同時施灌，深層滲漏可予儘量避免。由此種種，灌溉效率在噴灌系統，有其特殊的評估方法。最普遍而重要的就是噴灌水之分配效率 (Pattern efficiency)。它的意義就是從適當配置的噴灌系統噴灌水量之後，其最小噴水深達到需要灌水深度時，此水深對實際平均施灌水深之百分比。若以公式表示，即

$$E_p = \frac{h_m}{h_a} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

在此， E_p = 噴灌水之分配效率

h_m = 最小噴水深。

h_a = 平均噴水深。

最小噴水深之決定，通常在方格狀排列之接水盤中水深小的選出總數之25%，以其平均值計之。

另在噴灌實施中間，由噴頭噴出之水滴在未落到地面前遭受蒸發，飛散，或葉面截留等有相當量的損失。在分配效率計算時，其平均噴水深必須加上此種離開噴頭未到達地面間之損失水量。以此計算之分配效率另改稱為噴灌水之適用效率 (Water application efficiency)，與地面灌溉之適用效率相同意義，就是根系土層中獲得之灌溉水量對全施灌水量之百分比。以公式表示之即；

$$E_a = \frac{h_m}{h_n} \times 100\% \dots\dots\dots(7)$$

$h_n = h_a + h_r$

在此， E_a = 噴灌水之適用效率

h_n = 噴頭噴出之平均噴水深。

h_a = 土壤中平均噴水深

h_m = 最小噴水深。

h_r = 水滴蒸發，飛散，與葉面截留等損失總計。

上式中， h_r 值之大小受噴管壓力，相對濕度，落下高度，風速、及地面作物覆蓋等因素而定。由實驗直接測定損失量甚為困難，簡便而粗放的方法可以分別測定噴頭噴出水量及田間平均噴灌水深度而求得差數即為損失水量。Criddle 估計此項損失水量應該限制在 10 ~ 15 % 以內。下表為日人椎名氏所建議水滴蒸發，飛散及葉面截留等損失估計範圍，提供為參考之用。

表一 噴灌中間水滴蒸發，飛散及葉面截留損失表

	蒸發損失	條件	飛散損失	條件	截留損失	條件	h_r
最大值	8%	水壓大、水滴平均粒徑約 0.5~1.0 mm 土面蒸發約 10mm/日左右	15%	風速 3 m/sec 以上水壓大	28%	陸稻、生育後期、噴水深約 30mm	28%
最小值	2%	水壓小、水滴平均粒徑約 2.0 mm 土面蒸發約 3 mm/日左右	2%	風速 0-1.0 m/sec 水壓小	2%	陸稻生育初期、噴水深約 30mm	8%

美國水土保持局對噴灌之適用效率提出下列之估計標準。

表二 噴灌之通用效率參考表*

一次灌溉水深 (公厘)	噴 灌 速 率	
	每小時12.7公厘以下	每小時12.7公厘以上
	平均風速在 0 ~ 1.80 每 秒 公 尺	
50 以下	65%	70%
50 以上	70	75
	平均風速在 1.80 ~ 4.50 每 秒 公 尺	
50 以下	60	65
50 以上	65	70
	平均風速在 4.50 ~ 6.70 每 秒 公 尺	
50 以下	55	60
50 以上	60	65

* 上表應用在最大作物用水量5.0公厘/日以下和樹下灌溉時應將表中效率提高5%使用。

以上所述，係以噴頭為中心之通用效率。在有多數噴頭之支管，應另求其支管平均效率。支管平均效率為各噴頭效率之平均。在有多條支管之幹管系統，倘若各支管分岐點水壓不同亦應分別求出支管效率再平均求出系統效率 (System efficiency)。

噴灌水之適用效率有如以上所述，約在70%左右，當風速大時分配效率受影響尤大，故倘欲使最小噴水深能達計劃灌溉水深，則平均噴水深可能須提高甚多，有時為節省灌溉用水，改平均噴水深為計劃灌溉水深。此時，對一部份深層滲漏損失就有一部份灌溉不足地區。深層滲漏損失百分比可以下式計算。

$$L_d = 100 - C_u / 2$$

在此， L_d = 深層滲漏損失 (%)

C_u = 均勻係數 (Coefficient of Uniformity) (%)

均勻係數的意義與地面灌溉的分布效率相同，可以下式表示。

$$C_u = \left[1 - \frac{\sum x}{M_n} \right] \times 100\%$$

$\sum x$ = 在平面上每一點測定值與平均值之差的總和。

$M = n$ 個測定點測定值之平均值。

n = 測定點數。

四、地面灌溉與多孔管噴灌效率比較

以上所述，地面灌溉與噴灌因水份的傳遞方法有基本上的分別，灌溉效率的評估方法亦有異，結果也有顯然的差異。一般而言，噴灌的維護運轉費用比較

地面灌溉昂貴，可是用水可以比較節省，也就是說效率比較高。筆者為探求兩種不同灌溉方法對增加土壤含水率有何不同效果，曾於民國53年11月下旬，利用臺灣省旱作灌溉瑞穗推行站場所，舉辦一次地面灌溉與多孔管噴灌效率的初步比較試驗。茲將試驗目的與主要經過與結果報告於下：

(一) 試驗目的：

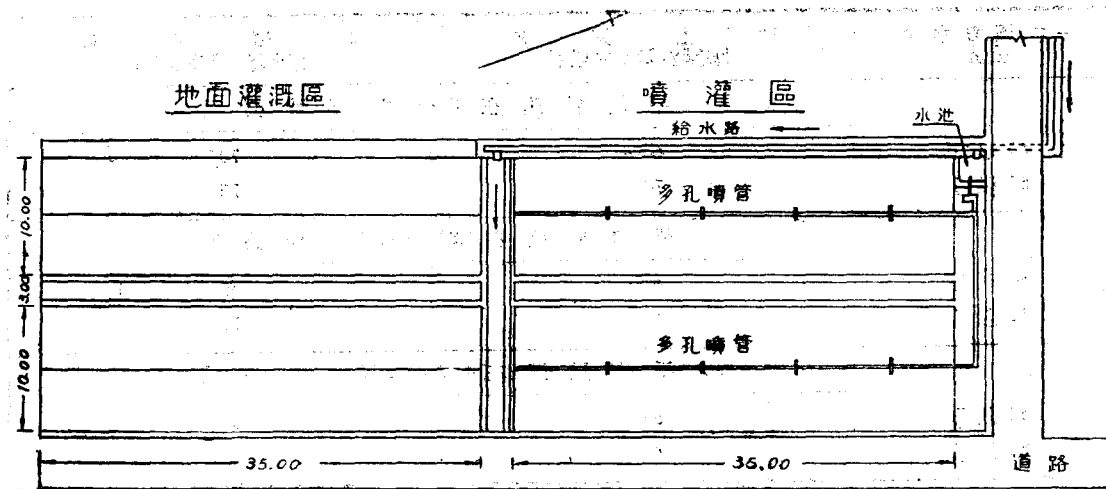
應用上述各項灌溉效率的觀念，用同一灌溉水深，使用地面灌溉與多孔管噴灌二種方法施灌結果，比較其灌溉效率的高低。

(二) 試驗場所佈置：

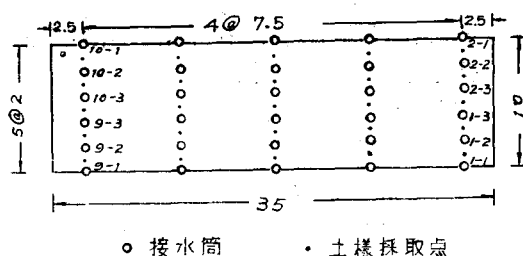
試驗地點在花蓮縣瑞穗鄉水利局旱作灌溉推行站內，兩筆相鄰的土地，每筆各約有 800 平方公尺。分一筆為多孔管噴灌地區，一筆為地面灌溉試驗地區。土地預先整成 35 × 10 公尺坵塊二區，每區地面均以牛犁犁過後再縱橫耙平成為水平坵塊。灌溉水由深井抽水站供應，經離試驗區約 150 公尺處之巴歇爾量水槽調整與量水而至試驗地點，中間所經過之小渠皆有內面工鋪設，所以中間之輸送損失不予考慮。

在噴灌區邊緣另開挖 2 × 3 × 1.5 公尺之蓄水池 (容積 9 立方公尺)，四週及底皆予襯砌以防止漏水，並加設水尺以觀水位變化。灌溉每次使用一排多孔噴管 (Perforate pipe)，放置在噴灌小區之中間，管長 35 公尺，兩側田區寬度 5 公尺。噴灌抽水機直接由蓄水池抽水，其抽灌水量除用水池水尺觀測計算外另於田間埋設接水筒，以測定地面分布情形。試驗場所佈置與接水筒之配置分別以圖一及圖二表示。

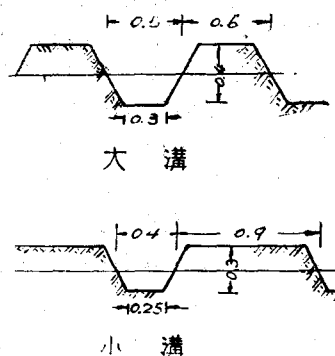
圖一 噴灌與地面灌溉效率比較試驗區平面圖



圖二 接水筒配置圖



圖三 溝狀断面圖



接水筒除兩側（則1-1~2-1及9-1~10-1）及中間一行用直徑20公分特製圓型鉛筒外其餘兩行均用空奶粉罐頭，直徑約10公分。所有接水筒皆埋在地下，使筒上緣與地面齊平。

所有噴灌及地面灌溉試驗田區地面狀況為配合地面灌溉容易，分別整成大溝及小溝狀兩種，其詳細形狀如圖三所示。

試驗區土壤水分常數為：

田間容水量29.14，凋萎點4.74，假比重1.41地面無作物，但灌溉土層深度假定為40公分。

(二) 試驗設計：

i) 灌溉試驗：噴灌水深由首次噴灌前土壤水分推定為40公厘，以後未予改變。試驗分大溝及小溝狀兩種施噴，各重複試驗一次，各次相隔若干時日舉行。

ii) 地面灌溉試驗：地面灌溉試驗有35×10公尺小區二區，分大溝及小溝狀兩種，分別舉行。每區溝

內流量約在每溝 4 l/sec至 6 l/sec之間，各重複一次，相隔若干時日舉行。

iii) 土壤水分測定，土壤水分測定用土鑽採土以烘乾法測定。採土地點位在兩接水筒中間（參照圖二所示）。但都在大溝或小溝之畦中間部位，採土深度分0~10，10~20，20~30，30~40公分四層分別計算。採土時期分灌溉直前及灌溉後24小時之二次。全面積土壤含水率以各採樣點所得結果繪製等水分線計算全面積平均含水率。

(四) 試驗經過：

試驗於53年11月26日開始辦理第一次噴灌及小溝地面灌溉，11月29日辦理第一次噴灌及大溝地面灌溉，12月12日辦理第二次噴灌及小溝地面灌溉，12月15日辦理第二次噴灌及大溝地面灌溉而告結束。噴灌施灌速度約在每分鐘 0.24~0.40 公厘之間，地面灌溉田間進行速度以全長35公尺計約需143~172秒（小溝）及186~299秒（大溝），每溝流量約 4 l/sec 者較之

62/sec 者需時較長。噴灌時地面附近風速未予特別測定，但據氣象所報告約在2~3級風，惟有第二次噴灌與大溝地面灌溉時風速較大，約為4級風。全部試驗過程中，平均氣溫約在16~18°C之間，蒸發盤蒸發量則在1.5~1.9公厘。因試驗結果之分析：各次試驗結果，灌溉前後土壤含水率變化情形列如表(三)，四次噴灌接水筒所接水深如表(四)所示。

表三 灌溉前後各層土壤含水率變化一覽表

地面狀況	試驗次數	灌溉方法 土壤水分 土層深度	地 面 灌 溉			噴 洒 灌 溉		
			灌溉前	灌溉後	增加	灌溉前	灌溉後	增加
小 溝 狀	第 一 次	cm 0~10	% 19.91	% 23.82	% 3.91	% 23.22	% 27.14	% 3.92
		10~20	18.59	18.81	0.22	22.52	26.71	4.19
		20~30	17.90	21.55	3.65	21.85	26.23	4.38
		30~40	18.37	19.49	1.12	22.11	25.49	3.38
		平均	18.69	20.92	2.23	22.42	26.39	3.97
	第 二 次	0~10	26.35	29.70	3.35	17.25	29.86	12.61
		10~20	26.46	27.86	1.40	24.81	28.01	3.20
		20~30	24.93	27.39	2.46	24.96	27.24	2.28
		30~40	24.51	25.71	1.20	25.69	25.03	0.66
		平均	25.56	27.66	2.10	23.18	27.54	4.36
大 溝 狀	第 一 次	0~10	24.90	26.84	1.94	23.52	27.55	4.03
		10~20	24.43	26.24	1.81	23.26	27.14	3.88
		20~30	20.54	24.48	3.94	21.37	25.31	3.94
		30~40	27.04	23.52	1.48	19.98	14.33	4.35
		平均	22.98	25.27	2.29	22.03	26.08	4.05
	第 二 次	0~10	23.62	26.57	2.95	25.22	28.30	3.08
		10~20	21.92	23.40	1.48	23.10	25.98	2.88
		20~30	20.11	21.25	1.14	21.81	24.92	3.11
		30~40	19.82	20.76	0.94	22.75	23.64	0.89
		平均	21.37	23.00	1.63	23.22	25.71	2.49

表四 噴灌接水筒水深統計表

接號 雨 筒 碼	代面 表積 (M ²)	小溝第一次		小溝第二次		大溝第一次		大溝第二次		註
		水深 (mm)	權重 水深	水深 (mm)	權重 水深	水深 (mm)	權重 水深	水深 (mm)	權重 水深	
1~1	6.25	16.80	105.00	41.60	260.00	30.60	161.25	49.40	308.75	大接水筒，直徑20cm
1~2	12.50	3.90	48.75	14.70	183.75	27.70	346.25	21.40	267.50	"
1~3	12.50	3.50	43.75	6.20	77.50	24.20	302.50	20.40	225.00	"
2~1	12.50	12.30	153.75	23.10	288.75	30.50	381.25	1.60	20.00	"
2~2	12.50	7.30	91.25	24.00	300.00	37.30	466.25	25.20	315.00	"
2~3	6.25	5.30	33.13	14.10	88.13	43.20	270.00	25.80	161.25	"
3~1	7.50	28.40	56.25	58.00	435.00	12.20	91.50	49.80	373.50	小接水筒，直徑約10cm
3~2	15.00	41.40	621.00	46.20	693.00	35.40	531.00	54.60	819.00	"

3~3	15.00	36.40	546.00	42.00	630.00	31.60	474.00	10.40	156.90	"
4~1	15.00	29.60	444.00	31.20	468.00	7.60	114.00	2.80	42.00	"
4~2	15.00	25.20	378.00	28.00	420.00	27.60	414.00	6.20	93.00	"
4~3	7.50	37.20	279.00	40.00	300.00	39.20	294.00	9.80	73.50	"
5~1	7.50	42.30	317.25	48.80	366.00	34.10	255.75	48.60	364.50	大接水筒，直徑20cm
5~2	15.00	38.10	571.50	30.20	453.00	49.00	735.00	40.40	606.00	"
5~3	15.00	45.30	679.50	32.00	480.00	38.70	580.50	45.00	975.00	"
6~1	15.00	30.40	456.00	22.10	331.50	16.70	250.50	9.40	141.00	"
6~2	15.00	30.80	462.00	34.60	519.00	32.30	484.50	31.80	477.00	"
6~3	7.50	36.60	274.50	68.00	510.00	32.10	240.75	49.40	370.50	"
7~1	7.50	37.20	279.00	13.20	99.00	23.60	252.00	10.80	81.00	小接水筒，直徑約10cm
7~2	15.00	39.20	588.00	35.20	528.00	38.00	570.00	9.40	141.00	"
7~3	15.00	38.00	570.00	49.60	744.00	23.60	354.00	10.60	159.00	"
8~1	15.00	22.80	342.00	7.20	108.00	32.20	483.00	4.00	60.00	"
8~2	15.00	22.30	334.50	28.00	420.00	36.00	540.00	6.60	99.00	"
8~3	7.50	18.40	138.00	41.60	312.00	27.60	207.00	8.20	61.50	"
9~1	6.25	35.10	219.38	29.00	181.25	1.40	8.75	30.80	192.50	大接水筒，直徑20cm
9~2	12.50	43.30	541.25	36.70	458.75	21.10	263.75	45.60	570.00	"
9~3	12.50	43.40	542.50	28.60	357.50	11.40	142.50	28.80	360.00	"
10~1	12.50	20.20	252.50	15.20	190.00	12.90	161.25	36.80	460.00	"
10~2	12.50	29.40	367.50	29.20	365.00	12.10	151.25	22.80	285.00	"
10~3	6.25	36.40	227.50	47.50	296.88	31.70	191.88	54.00	337.50	"
總計	350.00		9,962.76		10,864.01		9,748.38		8,325.50	
平均		28.47		31.04		27.85		23.79		

最小噴水深之決定，因接水筒之排列非等間隔，總面積為全面積之 25 % 時求其平均，結果如下表所示代表面積不一致，改以接水筒水深小的，其代表示：

表五 最小噴水深計算表

地面狀況	項目 試驗次數	代表25%面積 (M ²)	權重水深	最小噴水深 (mm)	註
小溝	第 1 次	87.5	977.63	11.17	
	第 2 次	87.5	1,222.26	13.97	
大溝	第 1 次	87.5	1,051.62	12.02	
	第 2 次	87.5	446.00	5.10	

由上述結果，各次噴灌的分配效率及適用效率，地面灌溉的適用效率分別計算如表六。

表六 多孔管噴灌分配效率適用效率地面灌溉適用效率表

地面狀況	試驗次數	多孔管噴灌效率					地面灌溉效率			註
		h_m (mm)	h_a (mm)	h_n (mm)	E_p (%)	E_a (%)	W_s (mm)	W_F (mm)	E_a (%)	
小溝狀	第 1 次	11.17	28.47	40	39.20	27.93	12.60	40	31.50	E_p = 分配效率
	第 2 次	13.97	31.04	40	45.00	34.93	11.85	40	29.63	E_a = 適產效率
大溝狀	第 1 次	12.02	27.85	40	41.60	30.05	12.35	40	30.88	W_s = 增加% × 5.64
	第 2 次	5.10	23.79	40	21.40	12.75	9.20	40	23.00	

上表所示，多孔管噴灌效率受最小噴水深度的影響，普遍甚低。最小噴水深以接水筒水量來衡量，則接水筒大小，排列，與其埋設方法等直接可以影響結果。此次試驗，接水筒大小之不一致，其排列不均勻，顯然影響噴水深計算正確性。又大溝狀第二次試驗風速較大，多孔管噴灌試驗只做一支管區，噴灌水受風

力吹散在試驗區外者甚多，直接成爲通用效率及最小噴水深甚低的原因。

假設不用接水筒測定水深結果爲根據，一如地面灌溉，改用土壤水分增加率計算通用效率，並分別假設灌溉土層水深爲20，及40公分時，多孔管噴灌與地面灌溉的通用效率可比較如表(4)所示。

表七 由土壤水分計算之多孔管與地面灌溉適產效率*

地面狀況	試驗次數	多孔管噴灌效率						地面灌溉效率					
		灌溉土層20公分			灌溉土層40公分			灌溉土層20公分			灌溉土層40公分		
		增加 (%)	Ws (mm)	Ea (%)	增加 (%)	Ws (mm)	Ea (%)	增加 (%)	Ws (mm)	Ea (%)	Ws (mm)	Ea (%)	
小溝狀	第1次	4.06	11.45	28.63	3.97	22.49	56.23	2.07	5.82	14.55	12.60	31.50	
	第2次	7.96	22.48	56.20	4.36	24.70	61.75	2.38	6.71	16.78	11.85	29.63	
大溝狀	第1次	3.96	11.20	28.00	4.05	22.90	57.23	1.88	5.31	13.28	12.35	30.88	
	第2次	2.98	8.39	20.90	2.49	14.05	35.13	2.22	6.28	15.70	9.20	23.00	

* 上表所用WF，無論土層20公分或40公分均一律使用40公厘計算。

上表結果顯示，噴灌比較地面灌溉在同一水深，灌溉土層40公分時通用效率有12~32%的提高，而灌溉土層20公分時就有5~40%的提高，可知噴灌在淺層土壤灌溉時遠較地面灌溉爲優。

五、檢 討

灌溉效率研究，在本省以往先例甚少。尤其是旱作灌溉，由於近幾年來才開始方法與理論的實驗研究，可以說，尙無旱灌效率研究的先例。上述筆者在瑞穗推行站之試驗，限于場所、設備、人力、及其他條件，有諸多不妥善之點，列舉於下：

(一)噴灌與地面灌溉效率在比較試驗之前，地面灌溉方法沒有事前之研究。其滲入率，水流前進率；乃至適當畦長 (Propor Length of run) 及單位流量 (Unit size of Stream) 均未判明，影響地面灌溉效率應有水準。

(二)試驗場所不够寬大，噴灌管之排列只有一支管施灌，既無重疊效果 (Overlapping effect)，其
(上接第16頁)

超出試驗區之水量只算無效水量，亦影響其應有的效率。

(三)田間接水筒尺寸的劃一及排列，均有欠理想，影響試驗結果的精度。

(四)土壤採樣技術不十分熟練，其採土深度受烘乾箱容量之限制，只限于40公分，不能直接測定深層土壤水分資料。

(五)以等水分線計算全面積平均值的方法，受等水分線繪製技術之影響很大，如採樣點以方格狀排列，以算術平均代替等水分線法誤差機會較少，似較合理。

以上五點欠點之外，在試驗方法本身尚有下列二點問題提出請各位專家討論：

(一)採土烘乾法在灌溉效率研究上對一平面內土壤水分增加之測定，受採土方法及採樣點之代表性問題之影響，恐不十分理想。有否其他更精確之測定方法？

(二)分布效率計算如何由線上效率變爲面上效率？

參 考 文 獻

1. Russel et al: Water and its relation to Soil and crops. Advance in Agronomy, Vol 11, Pp. 1-122 (1959)
2. Tanner & Lemon. Radiant energy utilization in evapotranspiration. Agron. J. Vol. 54 Pp. 207~212 (1962)
3. Viet et al: Tertilizers and efficient use of water. Advance in Agronomy. Vol. 14 PP. 223~261 (1962)
4. Yao & Shaw: Effect of plant population and planting pattern of corn on the distribution of net radiation. Agron. J. Vol. 56 pp. 165-169 (1964)
5. 久保祐雄：作物と水 農業及園藝第8~10卷(1964)
6. 東海近畿農試場 畑作物の蒸發散量に関する研究 (1)蒸發散量の測定法に関する研究 東海近畿農試場 地灌溉試驗成績書(1962)