

滲入率之觀測法及其應用

Measurement and Application of Intake Rate

臺灣大學農業工程系副教授

施 嘉 昌

一 引 言

影響灌溉的因子很多，諸如土壤種類，氣候條件，作物需水量，根系分佈，灌溉水理灌溉時土壤水分含量，地下水位高低，地形狀態等等；如全部考慮以上各因子而求得最適合的灌溉，似非易事。最重要者，首先須考慮在根系範圍內一次灌溉水深，如此即需考慮土壤之種類，根系分佈及灌溉時土壤水分含量等因子。次之，為使灌溉水量平均分佈在根系範圍內，應考慮灌溉水理及地形狀態。至於灌溉期距之決定須考慮氣候條件及作物需水量。本文僅討論第二問題，因灌溉水理之求得須根據滲入率 (Intake Rate)，故本文首先提及如何觀測滲入率及其應用之器具，進而討論滲入率數據之分析而求得合理之灌溉水理。

數次接臺大農工系主任張建勛教授寄來臺灣有關旱作灌溉試驗資料與研究報告知悉臺灣之旱作灌溉試驗與研究突飛猛進，無論在需水量試驗，溝灌法，埤間灌溉 (Barder Irrigation) 法，噴洒灌溉，管孔灌溉及滲入率之測定皆有豐碩之成果。為使以上資料規格化，俾便與美國之資料相比較，特將滲入率一項加以討論，以供從事灌溉研究同仁之參考。

二 滲入率之性質及其應用公式

(1) 滲入率之意義與性質：灌溉水施於田間，一面順坡度向前流動，一面垂直滲直滲入土層中，其因次為 LT^{-1} ，後者稱為滲入率 (Intake Rate)，亦有稱之為 Infiltration，惟通常 Infiltration 僅用於水文學方面，二者意義相同，用處互異。如灌溉水量過多時間過長時，灌溉水滲至根系以外，作物無法吸收，即成為滲漏水 (Percolation)，完善之灌溉不至發生此種現象。影響滲入率之因子很多，如土壤結構與組織，土層水分含量，土壤與水之溫度，表面地形，觀測方法，地表水深等。由表一所示。在同一地點，觀測之時間不同，上列各因子亦不能雷同，因之其觀測結果亦有差異。表中亦可看出開始觀測時滲入速度快，如觀測時間久，滲入率無甚變化而成一常數，此數值稱為基本滲入率 (Base Intake Rate)

(參看圖四)，常用來計算灌溉所需之時間。各種不同土壤之基本滲入率如表二所示。

表一：同一地點 * 觀測時間不同滲入率比較表

觀測經過時間 (分鐘)	滲入率 (吋/小時)	
	1965年6月26日	1965年7月10日
0	30.00	27.60
1	6.00	6.30
3	3.70	3.51
10	1.92	1.32
38	0.83	0.72
68	0.56	0.44
131	0.18	0.15
150	0.16	0.11
184		

* 觀測地點美國猶他羅城 (Logan)

表二 * 各種土壤之基本滲入率

土 壤 別	基本滲入率 (吋/時)
粗 砂	0.75~1.00
細 砂	0.50~0.75
細 砂 質 壤 土	0.50
淤 質 壤 土	0.40
黏 質 壤 土	0.30
淤 質 黏 土	0.20

* 取材於參考書 (8) 第FRI-12頁

(2) 滲入率公式：計算滲入率公式有下面三個：

$$I = Kt^n \dots\dots\dots(1)$$

$$I = kt^n + C \dots\dots\dots(2)$$

$$I = B + Ee^{-rt} \dots\dots\dots(3)$$

式中 I 為在任何時間 t 之滲入率，以單位時間滲入深度表之 K、k、C、B 皆為常數；K、k 表示 t = 1 時之數值；B、C 為另一實驗常數，惟 B 值較 C 值到達之時間為快，

n 為 t 之指數，其值在 $0 \sim$ 與 t^{-1} 之間依土壤性質而異， r 之性質與 n' 相似。

E 為開始與最終滲入率之差數，

e 為自然對數之底等於 2.718 。

上列三式皆為實驗公式，其中(1)式應用較為普遍。筆者曾證明(參考文獻(7))如滲入率在對數紙上呈現曲線時，則(2)式較(1)式為適合。(3)式應用比較困難，即 r 值甚難決定。本文僅限討論(1)、(2)公式之應用。

在任何時間灌溉水滲入土壤中之深度可將(1)、(2)式積分而得即

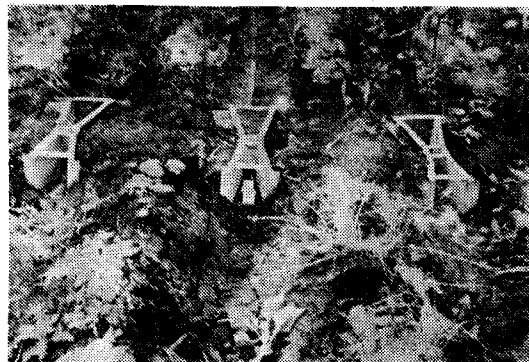
$$D_1 = \int_0^t I dt = \int_0^t Kt^n dt = \frac{Kt^{(n+1)}}{(n+1)} \dots\dots(4)$$

$$D_2 = \int_0^t (kt^n + C) dt = \frac{kt^{(n+1)}}{(n+1)} + Ct \dots\dots(5)$$

由(1)、(2)式求得 I 值後，在灌溉時間 t 時，可由(4)或(5)式求得滲入土層中之水深 D_1 或 D_2 。

三 滲入率之觀測及應用之器具

滲入率之觀測法依灌溉方法而異，觀測溝灌法之滲入率普通用流進流出法(Inflow outflow method)觀測滲入 100 呎溝長之水量，然後化為滲入率如(1)、(2)式之表示法，其觀測與計算法參看參考文獻(2)或臺灣水利 13 卷 4 期，本文不再說明。惟須注意者，觀測時須應用三溝同時流過相等之流量，在上下游各設量水設備，(參看圖片一)而滲入率觀測值可取中間壩溝。應用於埤間灌溉法時，可用測滲筒(Cylinder Infiltrometer)量測之。應用之器具，觀測步驟，詳細說明如下：



圖片一 流進流出法觀測滲入率，採用三溝，上下游二端各放 2 吋巴歇爾水槽測定流量，圖片所示下游三個巴歇爾水槽(自下游向上游看)

(1) 觀測器具之規格、觀測器具包括測滲筒、墊板、打入錐、鈎尺、水桶及停錶等，茲分別說明如

下：

(a) 鐵製測滲筒：用鋼鐵製成二頭無底之圓筒，內徑不得小於 9 吋，壁厚 0.08 吋，內外側力求光滑，使減少筒與土壤之磨擦；筒高至小 10 吋，普通為 12 至 14 吋。測滲筒皆五個成組，為求攜帶與儲藏便利，常採用不同大小之直徑，以便將小筒放入大筒內，其內徑尺寸常為 10 、 $10\frac{1}{2}$ 、 11 、 $11\frac{1}{2}$ 及 12 吋等五個。

(b) 墊板：用 $\frac{1}{2}$ 吋厚鐵板製成，當測滲筒打入土中時，以防筒邊損壞，故將墊板放置上緣，然後夯打。墊板皆為方形，邊長須較最大筒徑大 2 至 4 吋，板之下側四邊各焊以小鐵塊，應用時可使板經常大致在筒之中央。為求攜帶方便，板之一邊焊以把手，其尺寸與測滲筒之關係示於圖一。

(c) 打入錐：用鐵塊製成，其大小為 $2 \times 6 \times 8$ 吋，重約 30 磅，錐之上側焊以徑 $\frac{3}{4}$ 吋鐵管桿長約 22 吋，桿之上端焊以同大鐵管之把手長 10 吋，其結構與尺寸詳於圖二。

上列測滲筒，墊板及打入錐參看圖片二

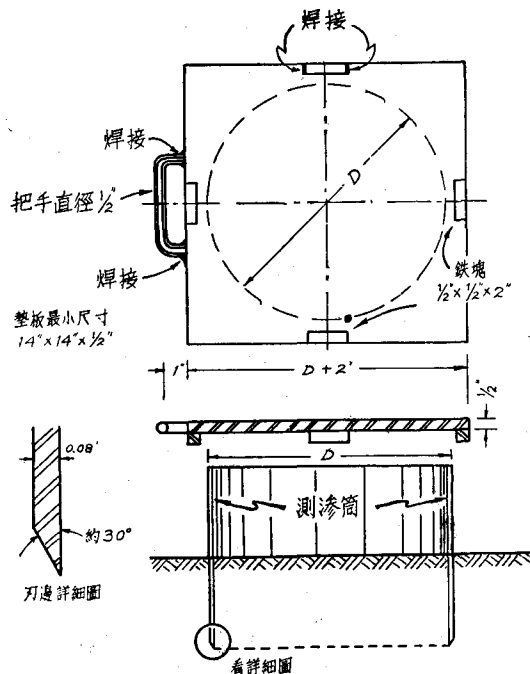


圖 1 * 測滲筒與墊板結構圖

* 取材於參考文獻(4)第 9 頁

(d) 鈎尺：與水利試驗時所用之鈎尺同，用以度量測滲筒內水面降低之尺寸，為度量便利，鈎尺上端常連以長柄，用銅片固定，裝入三角比例尺之槽中

，尺之最小刻度以 0.05 吋（1 公厘）為適，其結構及尺寸示於圖三。

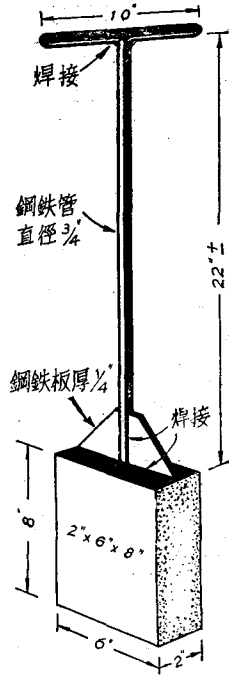


圖 2 測滲筒打入錐結構圖

(e) 水桶及停錶：水桶為提水至測滲筒之用，可用普通之洋鐵桶代之，其容量以三加侖（約 12 公升）為適，有時需用二個桶。停錶用以記錄滲入所經之時間，普通以分鐘為單位，如無停錶，有秒針之手錶亦可代用。



圖片二 測滲筒，墊板與打入錐

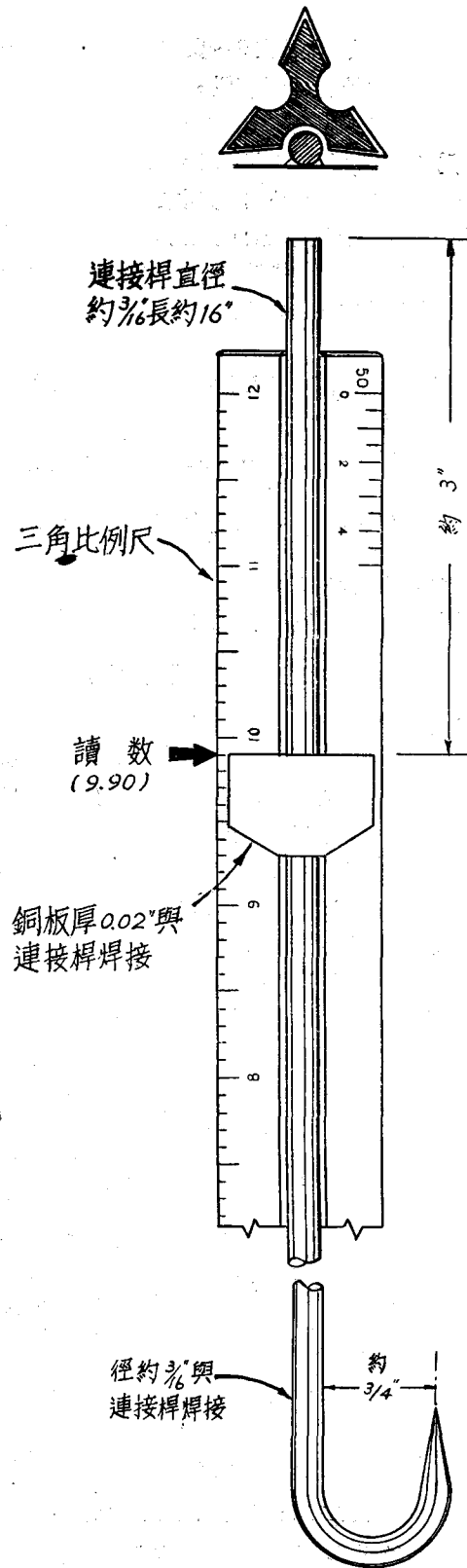


圖 3 * 鈎尺之裝置

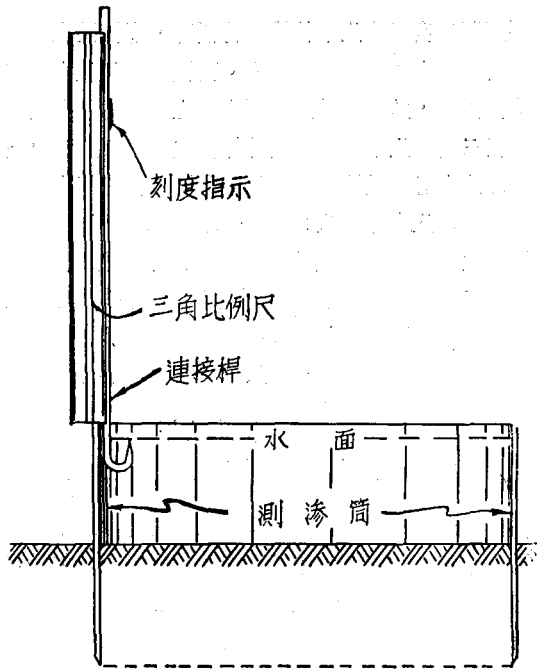


圖 3. 鈎尺之使用

(2) 觀測裝置：未觀測前應選擇土壤代表性之位置，如地表有裂縫，不得選在裂縫深於 4 吋之位置



圖片三 將測滲筒用重錘打入土中

，每次觀測至少要用三個或五個測滲筒，其位置力求集中在 0.2 公頃之內，以便操作與照顧。應用之水最好與灌溉水同，否則應先判別水質。準備工作做好後，把測滲筒用手用力壓入表土寸許，使其平整隱固，然後將整板放在筒之上緣，一人站在板上，用重錘打入土中（參看圖片三），打時用力力求均勻，各方向輪流夯打，使筒之上緣保持水平，必要時須用木匠水準度量之，如夯打一側用力過大而歪斜過甚時，應將筒拿起換地點重打，切不可將筒在原地擊正後繼續夯打，因該地土層已鬆動，[滲入值與正常土層迥異。測滲筒打入深度約 6 吋為宜。如滲入率大之土壤，俟測滲筒打好後，應在筒周築堤作緩衝池（Buffer Pond），約深 3 至 6 吋，較測滲筒打入之深度為淺，內側土堤堤脚至少離筒邊 6 吋，築堤時須注意不擾動池內土層；亦有較大直徑圓鐵筒作緩衝池者，則鐵筒之直徑至少要大於測滲筒 12 吋，其長度可較測滲筒短，普通約長 8 吋，打入土層深度為 2 至 4 吋。

(3) 觀測工作：測滲筒及緩衝池(有時可不用)設置好後，先加水至池內，其深度至少 2 吋，在觀測時應保持水面在同一高度，然後注水於測滲筒內(參看圖片四)未加水前應在筒底鋪麻布或草皮等保護物，以免沖動表土，注水深度約 4 至 5 吋。然後拿去麻布等保護層，立刻用鈎尺觀測水面高度(參看圖片五)觀測時須選定筒邊一點為基準，每次觀測必須將鈎尺放在該點，觀測後將鈎尺讀數及時間記錄之。第二



圖片四 徐徐加水至測滲筒內



圖片五 用鈎尺觀測測滲筒內水面高度

次觀測時間約在第一次後 5 至 10 分鐘，如此觀測 2 至 3 次後，可將觀測間隔拉長至 30 至 60 分鐘，惟須視土壤之滲入率快慢而定。大多數土壤之觀測間隔為 5、10、20、30、45、60、90 與 120 分鐘。如遇滲入率快之土壤須有更多之觀測次數與較短之觀測間隔，通常規定每次觀測其滲入水深不得超過 1 吋，全部觀測滲入率之時間，大多數土壤以繼續 4 小時為適，惟滲入率快之土壤，滲入 6 吋水深之時間已足。筒內水面如降低 1 吋或 2 吋時，需再加水至初測之高度，加水前後須各讀水面高度，其間隔愈短愈好，以減少誤差，

觀測期間如發現滲入率特快或特慢時，應掘開土層，研究所發生之原因，並記錄之。觀測完畢後須立刻將測滲筒掘起，並洗淨粘附筒周之泥土，妥為收藏之。

表三為滲入率之記錄與計算格式，第 1 與 2a 項為野外記錄之必要數據，回室後依各測滲筒記錄之數據計算累積滲入水深列入 2b 項，累加各 2b 項以測滲筒數目除之，即為第 3 項平均累積水深。再由第 3 項計算各相鄰二數之差列為第 4 項。由第 1 項計算累積時間及經過時間分別示於第 5 及第 6 項。由第 4 項除以第 6 項並將分鐘化為點鐘即為瞬間滲入率示於第 7 項。由第 3 項除以第 5 項亦化為點鐘即為平均滲入率示於第 8 項，以時間為橫座標，滲入率或滲入水深為縱座標，分別將第 5 與第 3 項、第 5 與第 7 項、第 5 與第 8 項數據繪入方格紙上，即各為圖四之累積滲入水深，瞬時滲入率及平均滲入率等曲線。如此等數據繪入對數紙上，如圖五所示，可由公式(1)、(4)表示其各曲線之方程式，在圖中量出瞬時滲入曲線在縱座標上所截取之數值即為公式(1)中之係數 K，其斜率即為 n 值，則瞬間滲入率曲線方程式為 $I = 5.4t^{-0.40}$ ；如將此式積分後再化成深度，即成累積滲入水深曲線方程式 $D = 0.15t^{0.60}$ ；而平均滲入率曲線方程式 $I_{ave} = 9.0t^{-0.40}$ ，即將單位吋/時化成吋即可無庸積分，通常皆應用瞬時滲入率方程式。如上列數據點入對數紙上所連之線非為直線，即為 C 值出現，亦即為公式(2)與(5)式，其曲線示於圖六，瞬時曲線方程式為 $I = 2.2t^{0.5} + 0.5$ ，將其積分後再除以 t^0 即為累積滲入水深曲線方程式 $D = 0.073t^{0.5} + 0.0083t$ 。

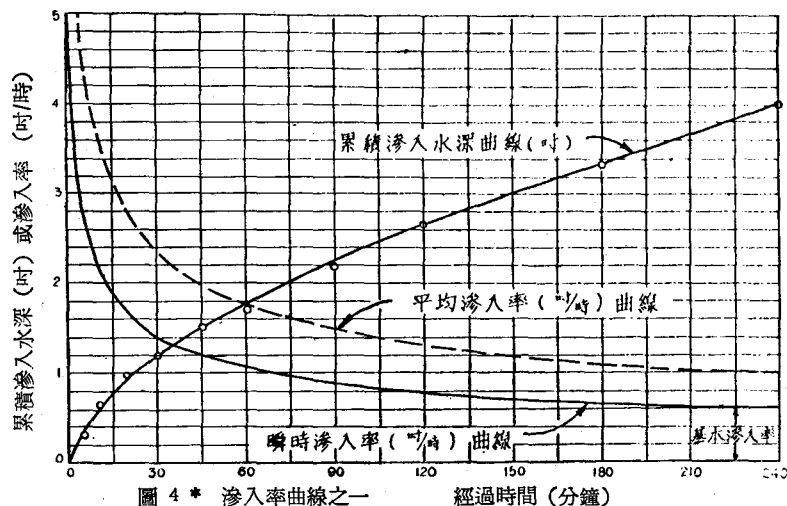


圖 4 * 滲入率曲線之一

* 取材於參考文獻 (4) 第 7 頁

表三* 滲入率觀測記錄與計算

1 觀測時間	2 觀測數據 (吋)										3 平均累積 滲入量 (吋)	4 經過時間 滲入量 (吋)	5 累積時間 (分鐘)	6 經過時間 (分鐘)	7 瞬間滲 入(吋/時)	8 平均滲 入(吋/時)
	第二測滲筒		第二測滲筒		第三測滲筒		第四測滲筒		第五測滲筒							
	a 讀數	b 累積	a 讀數	b 累積	a 讀數	b 累積	a 讀數	b 累積	a 讀數	b 累積						
8:00	9.15	0	9.26	0	9.03	0	9.20	0	8.95	0	0	0.36	0	5	4.32	0
8:05	8.75	0.40	8.80	0.46	8.78	0.25	8.88	0.32	8.76	0.19	0.36	0.26	5	5	3.12	4.32
8:10	8.47	0.68	8.60	0.66	8.51	0.52	8.66	0.54	8.27	0.68	0.62	0.33	10	10	1.98	3.72
8:20	8.10	1.05	8.26	1.00	8.20	0.83	8.34	0.86	7.96	0.99	0.95	0.22	20	10	1.32	2.85
8:30	7.86 9.10	1.29	8.03 9.25	1.23	7.92 9.05	1.11	8.17 9.15	1.03	7.78 8.98	1.17	1.17	0.33	30	16	1.23	2.34
8:46	8.79	1.60	8.98	1.50	8.61	1.35	8.87	1.31	8.61	1.54	1.50	0.19	46	14	0.82	1.96
9:00	8.51	1.88	8.62	1.86	8.43	1.73	8.75	1.43	8.60	1.55	1.69	0.49	60	30	0.98	1.69
9:30	7.99	2.40	8.23	2.25	7.96	2.20	8.22	1.96	8.04	2.11	2.18	0.47	90	30	0.94	1.45
10:00	7.49 9.14	2.90	7.83 9.21	2.65	7.40 9.05	2.76	7.83 9.17	2.35	7.56 9.01	2.59	2.65	0.70	120	60	0.70	1.33
11:00	8.36	3.68	8.56	3.30	8.19	3.62	8.49	3.03	8.46	3.14	3.35	0.46	180	60	0.46	1.12
12:00	7.64	4.40	7.96	3.88	7.45	4.36	7.91	3.61	7.80	3.90	4.01		240			1.00

* 表中 1~3 項取材於參考文獻(4) 第三頁

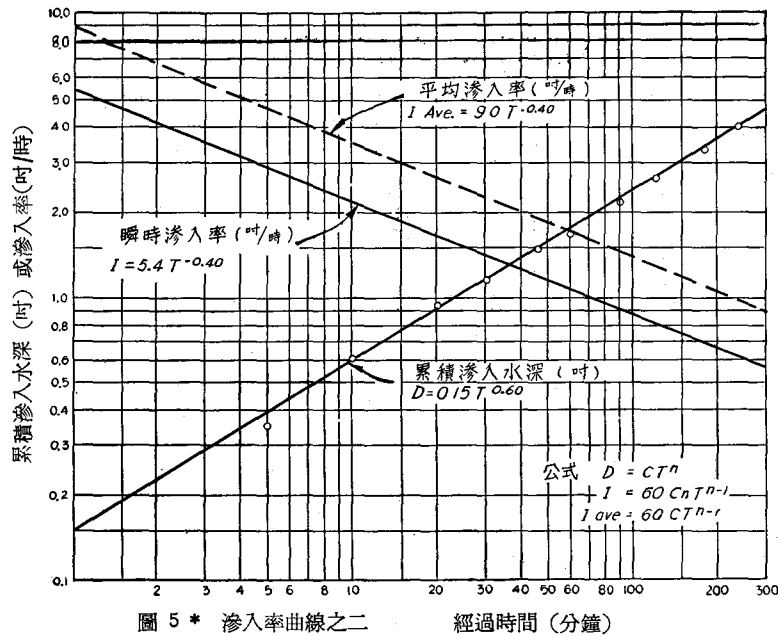


圖 5 * 滲入率曲線之二 經過時間(分鐘)

* 取材於參考文獻(4)第8頁

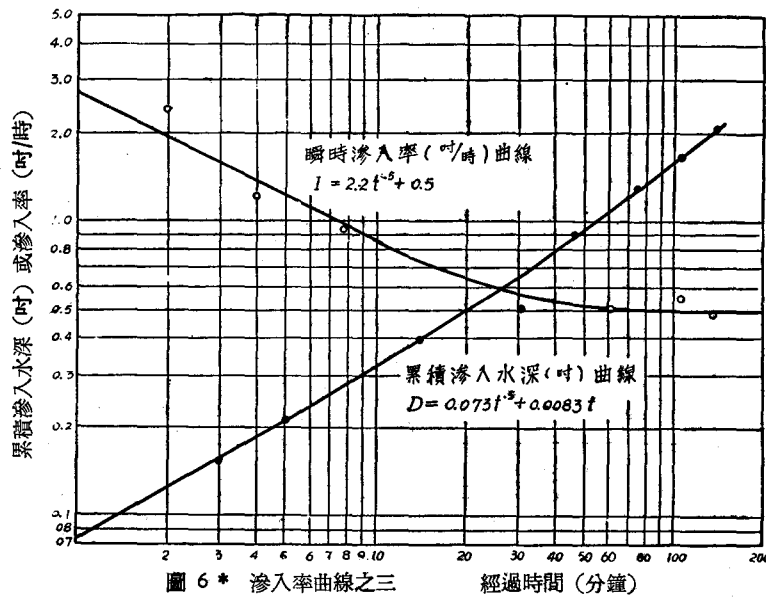


圖 6 * 滲入率曲線之三 經過時間(分鐘)

* 取材於參考文獻(7)第38頁

五、滲入率之應用

無論何種灌溉方法，皆以滲入率為基本來計算適合之流量，灌溉時間，灌溉水深，灌溉長度等，如參考文獻(2)圖六即以灌溉流量，滲入率，田間坡度，灌溉水深等函數所製成之圖解，如預知三個條件，可求得另一因素。噴灑灌溉亦常用基本滲入率來決定應施

灌之時間，如基本滲入率為0.3吋/時，應灌水深為3.6吋，即灌溉所需之時間為3.6/0.3=12小時，亦即噴水設備一天需移動二次。而對埂間灌溉及溝灌法，不能如此簡單，須同時考慮灌溉時間，灌溉流量，灌溉長度等，美國各地常以試驗資料來求得某一地區灌溉因素相互間之關係。如應用公式計算各相互間之因素，可用下列普通而簡單之公式：

$$Qt = AD \dots\dots\dots(6)$$

如 $A = WL$ 及 $D = D_s + D_a$ 代入 (6) 則

$$L = \frac{Qt}{W(D_s + D_a)} \dots\dots\dots(7)$$

式中 A = 灌溉水流經之面積。

Q = 灌溉流量。

D = 灌溉水在面積 A 之平均水深，包括滲入土層之平均水深 D_a 及地表面水深 D_s 。

L = 灌溉水到達之長度。

t = 灌溉時間。

W = 灌溉水流經之寬度。

D_s 可由實際觀測，亦可演算而得即

$$D_s = \frac{D_o}{1+b} \dots\dots\dots(8)$$

式中 D_o 為水進入田區內先端之水深。

b 為水流前進經驗公式 $L = at^b$ 中之時間指數，可由實驗求得，其值在 0 至 1 間

FoK 會由公式(1)導出平均滲入土層水深 D_a 為

$$D_a^* = \frac{KFt^{(n+1)}}{(n+1)(n+2)} \dots\dots\dots(9)$$

* 參考文獻 (3)

筆者會由公式(2)導出平均滲入土層水深 D_a 為

$$D_a = \frac{kFt^{(n+1)}}{(n+1)(n+2)} + \frac{Ct}{(b+1)} \dots\dots\dots(10)$$

將(8)、(9)或(8)、(10)兩式分別代入(7)式，則

$$L_F = \frac{Qt}{W \left[\frac{D_o}{(1+b)} + \frac{KFt^{(n+1)}}{(n+1)(n+2)} \right]} \dots\dots\dots(11)$$

$$L_s = \frac{Qt}{W \left[\frac{D_o}{(1+b)} + \frac{kFt^{(n+1)}}{(n+1)(n+2)} + \frac{Ct}{(1+b)} \right]} \dots\dots\dots(12)$$

式中 F 值為 Kiefer 校正係數其與 n 、 b 值之關係如圖(7)所示。(11)、(12)兩式僅適用於埤間灌溉法，如應用於溝灌法 FoK^② 會導出公式如下：

$$L = \frac{Qt}{\frac{UD_o^2}{(1+b)} + \frac{WFKt^{(n+1)}}{(n+1)(n+2)}} \dots\dots\dots(13)$$

式中 U 為灌溉溝之面積係數視溝之形狀而異，其值自 1 至 0.5。如將滲入率資料代入(11)、(12)、(13)式，即可求得灌溉流量 Q ，灌溉時間 t 及灌溉長度 L 相互間之關係，而埤間灌溉法，究竟用(11)式或(12)式要看滲入率曲線有無 C 值出現而定。

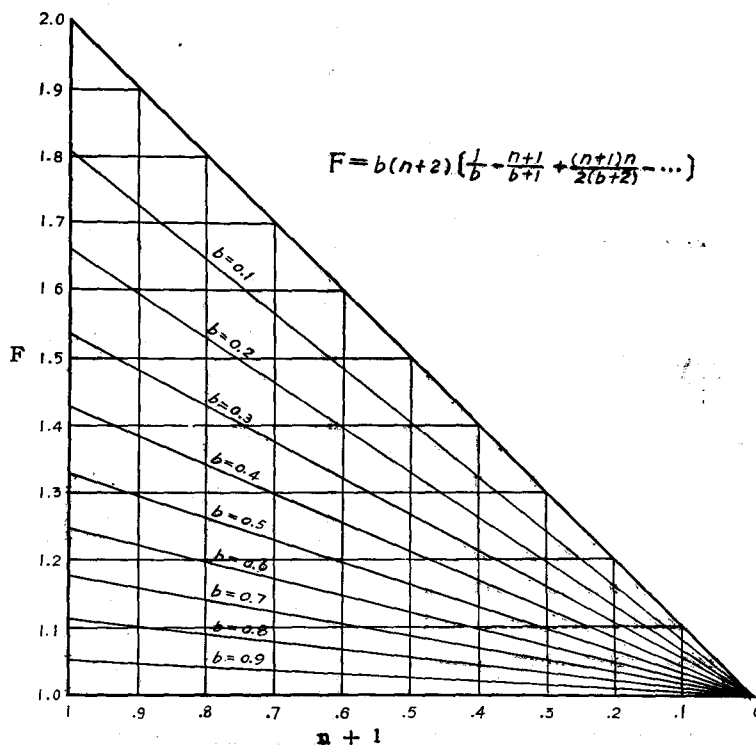


圖 7 * Kiefer 校正係數值與 b 及 n 值之關係

* 取材於參考文獻 6

六 結 論

1. 滲入率為灌溉之基本資料，凡對灌溉水理之研究或應用，必須先求得此項資料。

1. 影響滲入率之因子有土壤結構與組織，土層水分含量，土壤與水之溫度，表面地形，觀測方法，地表水深等。

3. 滲入率應用之公式普通有①式與(2)式二個。

4. 溝灌法滲入率之觀測普通皆用流進流出，而埤間灌溉與噴洒灌溉可用測滲筒觀測之。

5. 為求較精確之滲入率，在觀測設備，觀測方法上應遵照第三節所述之要點。

6. 滲入率曲線繪製時，應作適當之調整，使成平滑正直曲線，因土層之組織與結構各處非一致也。

7. 滲入率資料求得後，可應用基本滲入率作各種灌溉設計或應用(11)、(12)、(13)式計算Q及L及t間之相互關係。

8. 因影響灌溉之因子甚多，上列公式未全部考慮，僅能視為近似公式，有志研究灌溉問題同仁可向土壤物理性及灌溉水理等方向努力。

1966年 10月1日於美國紐約州

① 參考文獻 (7)

② 參考文獻 (3)

主要參考文獻

1. Christiansen, J. E., A. A. Bishop, and Yu Si Fok. The Intake Rate as related to the advance of water in surface irrigation. Presented at the 1959, Winter meetings of the American Society of Agricultural Engineers, Chicaga, Illinois. 1959.
2. Criddle, W. D., S. Davis, C. H. Pair and D. G. Shockley. Method for evaluating irrigation systems. Agricultural Hand Book No. 82, USDA Soil Conservation Service, 1956.
3. Fok, Yu Si and A. Alvin Bishop. Analysis of water advance in surface irrigation. paper 4259, Journal of Irrigation and Drainage Division Proceedings ASCE, March 1965.
4. Haise, Howard R., William W. Donnan, John T. Phelan, Lestel F. Lawhon, and

Dell G. Shochley, The Use of Cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigation soils. USDA, ARS, and SCS, May 1956.

5. Israelsen, O. W. and Vaughn E. Hansen. Irrigation principles and practices. New York: John Wiley and Sons, pp. 198-204 1962
6. Kiefer, F. W., Jr. Average depth of absorbed water in surface irrigation. Civil Engineering De-partment, Utah State University. Logan, U-tah, 1959.
7. Shih, Charles. The influence of intake function on the Mathematic model of the water advance function for surface irrigation. Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah state University, Logan, Utah, June 1966.
8. W. R. Ames Company. AMES Irrigation hand bood. pp. FRI-12 to 20. 1962.

岡 山 疊 行

地址：岡山鎮壽天里壽天路三一號
電話：岡 山 四 〇 三 號