

# 專 論

## 地面灌溉試驗之探討 A Discussion on Experiment in Surface Irrigation

臺灣大學農工系副教授

施 嘉 昌

### 一、引 言

臺灣旱作灌溉試驗已有六年歷史，小地區之旱作灌溉亦在局步改進推廣中。在這不短不長的時間內，的確已做了不少工作，歷年亦在不斷的改進中。惟旱作灌溉有關因子繁多，距理想之灌溉尚遠。過去之試驗着重於各作物之耗水量及灌溉經濟之分析，然對基本問題之研究尚待努力。近年來灌溉方法之試驗亦在積極進行中，然對試驗之過程與資料之分析尚待確商。本文僅以灌溉方法提出探討，以作從事旱作灌溉試驗同仁之參考。

灌溉方法可分地面灌溉，地下灌溉及噴洒灌溉三大類，而地面灌溉又分無控制之灌溉與有控制之灌溉，前者已視為落伍之灌溉法，後者可分埂間(Border)灌溉，分區(Check)灌溉，水盤(Basin)灌溉，溝灌(Furrow)與紋溝(Corrugation)灌溉等方法，其中水盤灌溉法用於果樹之灌溉，分區灌溉法與埂間灌溉法相似，紋溝灌溉與溝灌法亦相似，依目前臺灣旱作物之種植，研究埂間灌溉法與溝灌法已足。

臺灣旱作灌溉地區可分為輪作田與坡地二種，前者為水稻與各旱作物輪流種植之田區，坡度甚小，土壤物理性亦有其特殊之性質；坡地可分山坡地與平地旱作區二種，此等地區係純粹種植旱作，其區別僅為地形及坡度之差異，而土壤物理性可視為同類，皆屬高地及砂質地區，已往無灌溉之利。在灌溉試驗立場，以上二種應分別考慮。

臺灣耕地具有其特殊之性質，對灌溉之實施細節亦有其特殊性，不能借用他國現成灌溉資料作為實施灌溉之根據，本文雖述及美國有關之灌溉資料，僅能作參考之用；此外尚提出臺灣輪作田之特性，地面灌溉之有關因素及灌溉試驗之實施等細節與各位從事旱作灌溉同仁共勉之。

### 二、臺灣輪作田之特性

臺灣輪作田之面積占耕地百分之八十以上，以往

僅着重於水稻之灌溉，故實施旱作灌溉以前應分析輪作田之特性，針對其特性實施灌溉試驗，此種特性之形成乃因氣候條件，丘塊大小，耕作方式，作物種類與灌溉管理等因子所引起。水稻之灌溉需浸水於田面，土層中之水分常保持飽和狀態，而輪植旱作灌溉僅補充土壤水分至田間容水量即可。經多年之輪作，土層組織與純種旱作者差異甚大，次層土常有黏土聚積層，加之犁耕甚淺，未能破壞黏土層，久之而成牛踏層，因此深根作物根系生長受阻，排水滲入等性質與純種旱作地區截然不同；又水田之整地甚為平坦，水稻收穫後破埂連數丘塊為一，改種旱作，因此旱作田區演成平階段不規則之微坡。以上僅以種植方式而影響輪作田之特性，茲合併考慮氣候等其他條件綜合輪作田之特性如下：

1. 因牛踏層僅適種淺根作物。
2. 田面坡度平坦，因水稻收穫後破埂種植旱作，演成不規則之微坡階段。
3. 因輪作而演成之土壤物理性與純種旱作田區不同。
4. 氣候高溫潮濕，中耕除草工作頻繁，田面粗度係數不同，灌溉因子亦因之而異。
5. 雨量豐沛，僅在雨量缺少或分配不均勻時實施灌溉即可。
6. 丘塊形狀長短不一，適合之灌溉流長亦應分別考慮。
7. 集團栽培時之作物種類不一，耗水量亦因之而異，實施灌溉時應分別考慮。
8. 灌溉水量不足，水量分配與管理，應研究一套可行之規則。

以上八點為輪作田實施灌溉試驗時應注意者，惟5.6.8.三點非輪作田亦有同樣性質。

### 三、地面灌溉之有關因素

影響地面灌溉之因素繁多，加之考慮輪作田之特性更為複雜，其中最重要者為滲入率，流量，施灌水

深，滲入水深，土壤種類，土壤水分，地表狀態，水流速度等等，茲分別說明如下：

**滲入率：**滲入率為實施灌溉之最重要依據，憑此項數據可得實施灌溉之時間，計算公式以 1932 年 Kastiakov 之實驗式  $l=Kt^n$  應用最多，雖然其他尚有很多有關計算滲入之公式，大家都認為此公式最為可靠，尤以灌溉水深或灌溉時間不長地區應用最為合適。式中  $n$  為土壤特性因子，如土壤種類及孔隙率等，同一土壤其  $n$  值大致相同； $K$  為土壤中可變因子如同類土壤之土壤水分，土壤組織，土壤與水之溫度，地下水位高度，表面狀態，觀測方法等而異，雖在同一地區觀測，其值亦甚難一致，以上數因素中以土壤水分與土壤組織影響最大，故在應用上常以同法各地同時觀測數次求其平均值。按滲入率之觀測法可分圓桶法 (Cylinder Method)，流水法 (Inflow outflow Method) 及水池法 (Ponding Method) 其中圓桶法所測得之滲入率皆用於埤間灌溉，而流水法與水池法適用於溝灌法。依臺灣過去之觀測資料，非但各法間誤差甚大，且同一觀測法所測得之值亦相差懸殊，其中以圓筒法所求得之值較為接近，其誤差發生之原因為：

1. 觀測時土壤水分不同。
2. 各處土層非均勻一致。
3. 觀測時水深，流量及地表狀態未能一致。

如論圓桶觀測法只要遵守上列(1)(2)二點，並求多次平均值，各次間之誤差必可減少。而流水法除遵守上列(1)(2)點外，第(3)條件尤為重要，但甚難控制與判別，如各次觀測時之整地有粗細鬆硬之別，雖為同一流量亦會有不同之水深與流速，此為各次觀測誤差發生之由來，故各次觀測欲得一致數據，非為易事，如觀測前以肉眼判別地表之鬆緊與粗糙度，切實控制一致之流量及每次觀測則相同之土壤水分，可減少各次觀測之誤差。如欲減少水池法與流水法間之誤差，應控制相等之水深與灌溉前一致之土壤水分，則二法在同一地區觀測不致發生過大之誤差。

**土壤種類與土壤水分：**大家都知道土壤種類不同影響灌溉甚大，土壤種類雖同而土壤水分不同亦可影響灌溉之結果，土壤水分在有效水分之 50% 與在 75% 時實施灌溉有很大之差異，故灌溉試驗時必須有相同之土壤水分，以便比較分析。

**施灌水深與滲入水深：**施灌水深乃由公式  $d=qt/A$  計算所得之水深，當吾人作流長試驗時，水流前進至某距離，灌溉水覆蓋該面積之一瞬間由上式

所求得之平均水深之謂。但此水尚在繼續流動，直至水流到達終點斷水，下游亦無水流出，此時由上式所求得之水深稱為平均灌溉水深。而滲入水深乃以公式  $D=\frac{K}{n+1}t^{(n+1)}$  中所計算得者，式中  $t$  為水在田區內所覆蓋之時間， $K$  與  $n$  值與滲入公式之符號同，作流長試驗時同時要觀測退水時間，退水時間與水流到達時間之差，代入上式之  $t$  所計算得之水深為該段之滲入水深，此為灌溉試驗之目的，由此可分析灌溉是否均勻及滲入水深是否合於灌溉之要求。

**地表狀態與水流速度：**整地之良莠與水流速度及滲入水深之關係至大，灌溉試驗結果除列出土壤類別之數據外，尚需分列地表土壤鬆緊粗細之等級，以便農民實施灌溉時之選擇。

#### 四、美國地表灌溉因素之準則及其參考價值

影響地表灌溉之因素繁多，用某一公式來表示相互間之關係甚感困難，故美國農部經多次試驗而得各灌溉因素之準則，此等資料適用於坡地旱作灌溉，在臺灣坡地灌溉甚有參考價值，而大多數之輪作田亦可憑此等資料與當地之灌溉試驗制定另一套準則，可作輪作田灌溉之準繩。茲將各不同土壤一次灌溉水深，最適合畦溝之寬度，埤間灌溉準則，溝灌準則及灌溉效率等分別列表與說明如下：

##### 1. 每次灌溉水深：

表 1. 不同土壤及根深一次淨灌溉水深

土壤性質	作物根深 cm		淨灌溉水深 mm					
	30	45	60	75	90	120	180	
均勻一致之粗砂厚 180cm	11	15	22	33	33	45	66	
次層較緊密之砂土	11	15	38	44	51	64	76	
均勻一致之細砂質壤土厚 180cm	22	33	44	56	66	76	102	
次層較緊密之細砂質壤土	22	38	51	61	71	83	127	
均勻一致之均質壤土厚 180cm	28	43	57	70	76	102	152	
次層較緊密之均質壤土	28	43	64	76	83	108	158	
重黏土或黏質壤土	23	36	51	61	71	98	140	

表 1 所列之一次灌溉水深乃以土壤性質與作物根深為依據，已考慮土壤之空隙率。依臺灣輪作田各土質之淺根作物可考慮採用表中次層較緊密之土壤組織，根深在 45 與 60cm 之灌溉水深，此等數據接

近目前臺灣試驗所用之一次灌溉水深。惟應用於純種旱作之坡地，上表數據甚有參考價值。

2. 畦溝或紋溝之寬度：普通行栽作物之寬度通常要配合作物及土壤之種類，如中等土質之均勻土層，畦溝下濕潤土體深度與寬度幾乎相等，則最大畦溝行距以不大於成熟作物之根深為宜。表2.以各不同土質擬定之最適合畦溝或紋溝之寬度，表中雖未考慮作物之種類，然何種土質適合種植何種作物亦大致可決定矣，例如表2中之均勻粗砂行距為30cm與本省種植花生之行距相近，故表中數據在臺灣亦甚有參考價值。

表2 最適合畦溝或紋溝寬度

土壤種類	行距 (cm)
均勻粗砂	30
次層緊密粗砂	46
均勻細沙與砂質壤土	61
次層緊密細砂與砂質壤土	76
均勻中砂質粉壤土	92
次層緊密中砂質粉壤土	102
均勻粉質黏壤土	122
均勻重黏土	92

3. 埂間灌溉各因素間之關係：表3所列數據為埂間灌溉與土質，坡度，灌溉水深及流量間之關係，表中可看出有坡度之旱田在各因子間有下列相互之關係：

1. 不論田面坡度如何粗質土較細質土應有較大之流量及較短之灌溉長度。
2. 同一類土壤坡度小者應有較大之流量。
3. 同一坡度較大之灌溉水深應配合較小的流量與較長之灌溉長度。
4. 不同土質雖坡度相同，細質土應有較長之灌溉長度。
5. 灌溉水深與埂間寬度無關，其寬度皆在9~15公尺，而較大之坡度應配合較小之寬度。

臺灣輪作田除表中所列最小坡度之數據外，極少有利用之價值，且田丘狹小之限制亦很難配合表中所列之長寬數據，惟可根據上列各因素之關係，另以試驗為基礎，定出一套適合臺灣自然環境之數字。至於臺灣大農場純作旱作耕種地區，下表甚有參考之價值。

表3 埂間灌溉與土質，坡度，灌溉水深及流量之關係

土質	坡度 (百分比)	灌溉水深 (mm)	埂間長度與寬度		流量 (l/s)
			寬度 (m)	長度 (m)	
粗質土	0.25	51	15	150	227
		102	15	245	199
		152	15	405	170
	1.00	51	12	90	78
		102	12	150	71
		152	12	275	71
	2.00	51	9	60	36
		102	9	90	28
		152	9	185	28
中質土	0.25	51	15	245	199
		102	15	405	170
		152	15	405	100
	1.00	51	12	405	71
		102	12	150	71
		152	12	305	71
	2.00	51	9	90	28
		102	9	185	28
		152	9	305	28
細質土	0.25	51	15	405	114
		102	15	405	71
		152	15	405	43
	1.00	51	12	405	71
		102	12	405	36
		152	12	405	21
	2.00	51	9	200	28
		102	9	405	28
		152	9	405	19

4. 溝灌及細溝灌溉各因素間之關係：表4中各數據無論應用於臺灣之輪作田與坡地，最大容許流長似嫌過長，根據已往之試驗，適合輪作田之溝灌長度僅在100公尺左右，而表中所列坡度最平坦之粗質土灌溉水深51mm時可容許流長160公尺，與實地試驗數據相差過大，故臺灣溝灌各因素間之關係僅能參考下列各點關係，另外制定一套適合於當地情況者方可。

(1) 坡度與流量成反比，即坡度小者應採用較大之流量，其數值在0.1~2.5 l/s之間。

(2) 如坡度與灌溉水深相同，細質土與粗質土灌溉長度之比約2比1，中質土介於二者之間。

表4. 溝灌與土質，坡度，灌溉水深及流量之關係

土質	畦溝最大容許流量	粗質土				中質土				細質土			
		51	102	152	204	51	102	152	204	51	102	152	204
百分比	l/s	最大容許流長 (m.)											
0.25	2.5	160	235	285	325	265	375	470	535	340	485	565	695
0.50	1.3	110	155	195	220	180	260	315	365	235	330	405	475
0.75	0.8	90	120	155	180	145	200	250	290	190	265	325	370
1.00	0.6	75	105	130	150	125	175	210	245	160	240	275	320
1.50	0.4	60	85	105	120	100	140	170	200	130	185	225	260
2.00	0.3	50	75	90	105	85	120	145	170	110	155	195	220
3.00	0.2	40	60	70	80	70	95	115	135	90	125	150	180
5.00	0.1	30	45	55	60	50	75	90	105	70	95	115	130

\* 不冲刷之最大容許流量，如溝底有雜草遮蓋，此項流量值應加 25%或更大。

(3)無論土質如何，灌溉水深小者應配合較短之灌溉流長，而坡度大流量小者亦有較短之流長。

5. 灌溉效率：一般所指之灌溉效率皆為施灌效率(Application Efficiency)表5為美國地面灌溉平均之施灌效率，其中水盤灌溉法效率最高為60~70%，埂間灌溉法以深之中質土壤效率最高為75%，其他砂質與重質土壤坡度不一致者可低至40%。溝灌法亦為深之中質土壤效率最高可達65%，如砂質土較陡坡度可低至20%。用坡度控制之漫灌法效率最差為55~20%。

表中所列之灌溉效率如用於臺灣，似嫌過低，因田區小，灌距短，水流容易控制，如再加強管理必可得較表中所列之灌溉效率為高。

表5. 地面灌溉平均施灌效率

土質與坡度	埂間灌溉	畦溝或紋溝灌溉	坡度控制之灌溉法	水盤法
砂質土壤				
一致與適合坡度	60%	40~50%	45%	70%
坡度不一致	40~50%	35%	30%	—
起伏坡度或陡坡	—	20~30%	20%	—
深之中質土壤				
一致與適合坡度	70~75%	65%	55%	70%
坡度不一致	50~60%	55%	45%	—
起伏坡度或陡坡	—	35%	35%	—
淺之中質土壤				
一致與適合坡度	65%	50%	45%	60%
坡度不一致	40~50%	35%	35%	—
起伏坡度或陡坡	—	30%	30%	—
重質土壤				
一致與適合坡度	60%	65%	50%	60%
坡度不一致	40~50%	55%	45%	—
起伏坡度或陡坡	—	35~45%	30%	—

6. 灌溉期距，灌溉水深及灌溉次數之計算：計算法列如表6，表中20項中可分三段來說明，即(1)至(8)項為基本資料，(9)至(14)項為計算每次灌溉水深之步驟，(15)至(20)為全生長季節灌溉次數之計算，茲將各項計算步驟說明如下：(9)項可由表1依不同土壤及根深查得，或可由公式  $d = \frac{Pac As}{100}$  計算而得，(10)項

表6 灌溉期距，施灌水深及灌溉次數計算舉例

(1) 表土	坊質壤土
(2) 次層土	坊質壤土
(3) 土層有效深度	180cm.
(4) 田間容水量	50mm/30cm.
(5) 基本滲入率	0.4mm/hr.
(6) 土壤其他性質	無
(如土壤各層深度，硬盤，石層，肥分，排水等等)	
(7) 作物種類	穀類
(8) 根深	123cm.
(9) 每次灌溉可蓄積水深	100mm.
(10) 最大耗水量	5mm/day.
(11) 灌溉期距	20day.
(12) 淨灌溉水深	100mm.
(13) 施灌效率	75%
(14) 每次灌溉水深	133mm.
(15) 全季節淨耗水量	345mm.
(16) 估計根系中有效蓄積水深	150mm.
(17) 最早年之有效雨量	50mm.
(18) 全季節缺乏之水深	145mm.
(19) 灌溉需水量	200mm.
(20) 平均灌溉次數	2次

依作物之種類及當地氣象條件求得，(9)項除以(10)項即得第(11)項之灌溉期距，(12)項與(9)項同，每次灌溉水深應與根系內所蓄積之水深同，(13)項由表5依土壤類別，灌溉方法及田面坡度等條件而定，(12)項除以(13)項即得每次灌溉水深。(15)項依作物之性質與氣候經試驗後求得，(16)項由田區中實測，除雨量以外所補充之水分如地下水等，由(15)項減去(16)與(17)項即得(18)項，(18)項除以施灌效率得(19)項，(19)項除以(14)類所得之整數即為(20)項。

由表6可知，為實施旱作灌溉，除表1至5外，尚須求得土壤類別，作物根深，土壤水分各常數，滲入率，耗水量等資料，故在作灌溉試驗時應一併求得，以作實施灌溉之用。

臺灣之旱作灌溉，僅於雨量不均勻與乾旱季節實施，故上表計算方法僅適用於乾旱季節。

### 五、灌溉試驗之實施

第四節所列各表，不一定適合臺灣之旱作灌溉，尤以具有各種特性之輪作田為甚。因此為求類似數據而適合臺灣之旱作灌溉，非自行作一整套試驗不可。本節所述僅限表3. 4. 5. 中各適合數據求得之試驗法。數年來臺灣之地面灌溉試驗已有不少資料，大體言之未能將各有關因子同時考慮，致使未能作有系統之分析。譬如在流長試驗前必須先測定土壤水分與滲入率，並在作流長試驗前先行分析，依據分析結果設計最適合之流長試驗，此種試驗不一定一次就能得理想之數據，必須更改各有關因素再三試驗，方可得理想之結果。惟在土壤水分及滲入率之觀測時，與作流長試驗之時間愈接近愈好，且實施試驗時之土壤水分應配合實施灌溉時間，照以往規定最適合灌溉之土壤水分為土壤有效水分之50%，故觀測滲入率與流長試驗時應符合此數據，則所試驗之結果方可適合將來灌溉時之情況，為求進一步之了解，茲舉列以明之：

設試驗田之土質 0~20cm 深處為壤土，20~40 cm. 處為粉質壤土，其土壤水分各常數及假比重等數據如下表：

土壤類別	假比重	田間含水量 (重量比)	凋萎點 (重量比)	75%有效水分 (重量比)
壤土	1.46	19.37%	4.29%	1
粉質壤土	1.39	18.70%	4.55%	10.6%

表中最後一行75%有效水分乃田間含水量與凋萎點差之75%，以此法計算有效水分較為合理。

設根深為 40cm，在實施灌溉試驗前所測得之土壤水分 0~20cm 處為 9.94%，20~40cm 處為 9.85% 適為有效水分之 50%，由公式  $d = \frac{Pac As}{100} D$  分層求得應補充之灌溉總水深為 55mm。

採土時同時作滲入率觀測（此時之土壤水分亦為有效水分之50%）其結果繪如圖1. 土壤水分及滲入率資料必須於作流長試驗前分析完成，有已知之灌溉水深，可在圖1中求得水停留在田面之平均時間為50分鐘，則此項數據可作流長試驗之依據。為求較高之施灌效率，作流長試驗時，希望灌溉水停留在田面各段之時間皆為 50 分鐘，如退水速度接近水流前進速度

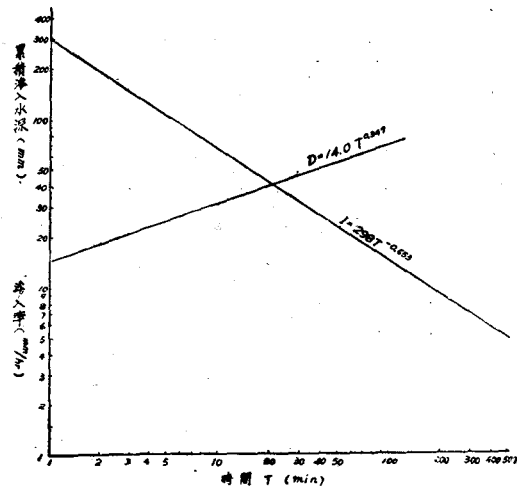


圖1 埤間灌溉試驗滲入曲線

，即可假定水流自首端流至終點之時間為50分鐘，然後停水，則餘水可由上游慢慢退至終點，水流自到達終點至水乾涸之時間如亦為50分鐘，可視為理想之灌溉。如退水速度較水流前進速度為慢，則不等水流至終點即行停水，可得較理想之灌溉。總之停水時間與流量應以實際田面狀況隨時作適當之調整，則可求得理想之灌溉資料。今以假定水流前進速度與退水速度相等時之情況，舉例設計灌溉試驗時各水理因素如下：

設流長為 100 公尺，埤間寬度為 5 公尺，流量為 9 l/s 即  $Q/W = 1.8 l/s/m$ 。灌溉後 50 分鐘停水，則灌溉水之總體積為  $50 \times 60 \times 0.009 = 27 m^3$ ，灌溉區之面積為  $5 \times 100 = 500 m^2$ ，則平均灌溉水深為  $27 \div 500 = 0.054 m = 54 mm \approx 55 mm$ 。如此剛適合補充土層土壤水分至田間含水量之要求，如因田區實際情形流量過小，50分鐘不能流達 100公尺或其他情形，可增

減流量與長度使能田區各段灌溉水停積之時間約為50分鐘。為達此目的除水流前進觀測外，必須繼續觀測退水時間，然後將觀測資料繪入同一圖中，來效核每段正確停水之時間。

以上所舉的例，僅為埂間灌溉試驗之原則，至於溝灌試驗是大同小異，亦須同時考慮土壤水分及滲入率等數據，惟滲入率之觀測法與埂間灌溉不同。圓桶法觀測之滲入率用於埂間灌溉已成定論，而水池法與流水法觀測滲入率用於溝灌，何者較適，過去無比較之資料，將來尚待研究，通常有坡度之田區流水法較切實際；而平坦坡度，水流緩慢，似以水池法所測得之滲入率較為接近，無論何法觀測滲入率應考慮下列各點：

- (1) 用流水法觀測滲入率時，流量，土壤水分，坡度，糙率等因子應與實施試驗之田區條件同。
- (2) 用水池法觀測滲入率時，土壤水分，水深，糙率等條件亦與實施試驗之田區同。
- (3) 灌溉田區之土壤非均勻一致，故應觀測多次，以求得平均之滲入率，如為流水法應多設量水設備，以便求得各段之滲入率。

土壤水分及滲入率測定後，在坡度糙率相同之田區，只少用三種以上不同之流量作前進水流試驗，詳細觀察最大容許流量，然後將試驗結果繪如圖2，再以滲入率曲線由土層中應補充之土壤水分求得滲入時間，由此數值在圖2縱座標繪一平行橫座標之虛線交於最大容許流量曲線，再垂直繪虛線交橫軸於一點即可得最適合之流長。前進水流試驗完畢後，繼續觀測退水時間，以校核每段停水時間是否與滲入補充水分之時間相近，否則應調整灌溉時間與流量，在圖上再求適合之流長。

灌溉後以公式  $d = \frac{qt}{A}$  求平均水深，再於24小時後觀測土層中蓄積之土壤水分是否接近應補充之水分，由此可校核灌溉是否理想。

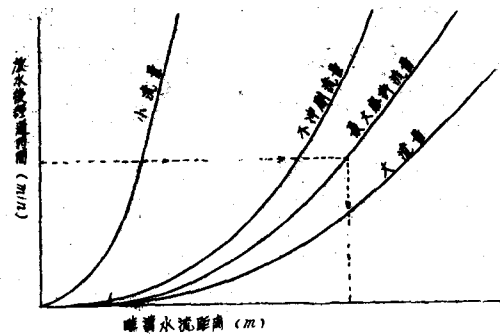


圖2 溝灌試驗前進曲線

## 六、結 論

- 1 臺灣旱作栽培地區，分輪作田與坡地二種，前者具有其特性，作灌溉試驗時應分別考慮。
- 2 國外旱作灌溉之準則不適用於臺灣，尤以輪作田為甚，然坡地灌溉甚有參考價值。
- 3 影響旱作灌溉之因子繁多，實施灌溉試驗時應一併考慮。
- 4 滲入率為旱作灌溉最重要根據，應觀測多處，求其平均值以利應用。
- 5 圓桶法測滲入率用於埂間 (Border) 灌溉已成定論，惟溝灌法用流水法抑水池法測滲入率，應以實際地形而定。
- 6 灌溉試驗除考慮土壤種類外，整地良莠亦應分別作試驗。
- 7 土壤水分影響滲入率與灌溉試驗至大，故觀測時應採用實施灌溉之土壤水分，即土壤有效水分之50%。
- 8 埂間灌溉與溝灌試驗前應先測土壤水分與滲入率，憑分析後之數據再按排水流觀測試驗。
- 9 灌溉試驗應分別觀測水流前進與退水時間，以校核灌溉停留田面之時間。
- 10 灌溉試驗前後必須觀測土壤水分以校核灌溉試驗是否理想。