

第一章 概述

1.1 灌溉方法分類

灌溉方法 (irrigation methods)，係以人為方式將水供給田間作物吸收、成長之方法，可分直接與間接二種。直接灌溉之方法，即以土壤為媒介供給作物吸收，水自田區上端流至下端，一面滲漏一面前進之方法，即所謂地表灌溉 (surface irrigation)。如將水供給至次層土，藉根系吸收而供給作物之灌溉名為地下灌溉法 (sub-surface irrigation)，其它不以土壤為媒介之灌溉方法，如噴灑灌溉 (sprinkler irrigation) 及滴水灌溉 (trickle irrigation) 等，藉空中將水供應至作物，名為間接灌溉，此等灌溉方法之灌溉效率較地表灌溉為高，約有 80% 以上之水皆可被根系吸收。茲將其詳細分類及影響之因子分別說明如下。

1.1.1 地表灌溉法

地表灌溉可分無控制 (uncontrolled irrigation) 與有控制灌溉 (controlled irrigation) 二種，前者為古老之灌溉方法，無技術可言，灌溉效率亦差，一般稱為漫灌 (wild flooding)，有控制之灌溉方法，因地形、作物種類及其種植方法不同而異，可分為畦溝灌溉 (furrow irrigation)、紋溝灌溉 (corrugation)、埂間灌溉 (border irrigation) 及水盤灌溉 (basin irrigation) 等方法。上述各灌溉方法亦因土質、地形、水量多寡，作物種類及灌溉習慣等因子而異，各地表灌溉之性質略述如下：

一、埂間灌溉法

將田區分成長條形，寬約 5 至 7 公尺，長為 100~200 公尺，隔以低埂，相互平行，此種田區之灌溉名為埂間灌溉。田埂間橫向坡度，原則上為水平，即水流前進時可橫蓋田面，而田埂之縱坡與田面一致，理想坡度約千分之 2 至 4，但亦有小至千分之一及大至千分之 75 者，坡度大者必須防止沖刷。田區灌溉流量之大小通常在每秒 14~280 公升之間，視田區大小，土質類別及作物之種類而異。埂間灌溉適應甚多土質，但其大小與土壤之物理性必須妥為配合，如次層土為堅實之黏壤土，可有較長之田區，而易透水之次層土應有短而狹之田區。埂間灌溉常適用於密生點播等作物，水稻灌溉亦屬此類。

二、圍埂浸灌法

與埂間灌溉最大不同點，此法以地形情況不同作圍埂灌溉，田埂不相平行，有時依等高線高差每隔 6~13 公分圍埂，故又名等高圍埂

(contour check)。一般灌溉之流量較大，地表亦較平坦，如用於滲透性較大之土壤，大流量覆蓋地表甚快可減小滲漏損失，如用於黏重土滲漏較低之土壤，延長水流覆蓋地面之時間，亦可得良好之效果。

三、水盤灌溉法

此法與圍埂漫灌法相似，惟僅用於果樹之灌溉，即於果樹四周挖溝灌水，使水覆蓋於四周，如地形良好，水之覆蓋可同時圍繞 2 株或更多之果樹。各水盤亦有互相連接者，可由給水渠道輸送至水盤內。

四、畦溝灌溉

此種灌溉方法不像埂間灌溉與圍埂漫灌，將水灌入田區後濕透全面，而將水灌入溝中，僅潤濕全溝之 $1/4 \sim 1/5$ ，因此可減少蒸發損失，灌溉後亦易乾不會耽誤耕期，常用於行栽作物之灌溉如甘藷、甘蔗等。畦溝坡度無特殊之限制，可適用於較陡之坡度，唯需考慮沖刷問題，一般土質可採用 $10\text{‰} \sim 15\text{‰}$ ，以水之容量來控制沖刷，坡度以 $0.5\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 最為適合，但若干土質以 $3\text{‰} \sim 6\text{‰}$ 較適。畦溝長度普通以 100~200 公尺，過長之畦溝在上游易發生過度之沖刷與深層滲漏，然對土地經濟利用與農機操作之觀點，較長畦溝較短者有利。

以上四種皆屬地表灌溉方法，其水理亦同屬一類，水力因素甚為複雜亦不易明瞭，唯一解決之途僅了解其原理及影響之因子，再作良善之設計方可粗略解決現場之應用。至於以直接方法澈底解決此錯綜問題是不易做到的。綜合地表灌溉水力因子 (hydraulics of surface irrigation) 可包括下列十項：(1) 流量大小 (size of stream)；(2) 水流前進速度 (rate of advance)；(3) 田區長度與所需灌溉時間 (length of run and time required)；(4) 水流深度 (depth of flow)；(5) 入滲率 (intake rate)；(6) 地表坡度 (slope of land surface)；(7) 地表糙率 (surface roughness)；(8) 沖刷問題 (erosion hazard)；(9) 流槽類型 (shape of flow channel) (如埂間田區、畦溝、紋溝等)；(10) 施灌水深度 (depth of water to be applied)。

1.1.2 地下灌溉法

地下灌溉係控制或補給地下水，依土層毛細管作用上升而供作物生長之灌溉方法。此法適宜於表土易滲透之壤土或砂壤土，地形條件甚佳，地面坡度平緩均勻及距地表 3 公尺以下有不透水層。此法如不徹底了解地勢、地質、地下水、土壤等各種性質，不可輕易採用。地下灌溉可以下二類：

一、兼排水之地下灌溉

此種灌溉以控制地下水位，並藉土壤毛管作用使水分上升以供給作物根系吸收。當雨水過多時常使地下水位過高而影響作物生長，此時供地下灌溉之地下管線系統可作為排水管線使用，以排除土層中多餘之水。

二、人工地下補給灌溉

在完全乾旱或地勢高之地區，無排水問題，則可施行完全人工地下補給灌溉。方法為完全由人工引水並在地下適當深度埋設管路供水灌溉，使土壤水分依毛管作用移動以供作物生長。此法需具備適宜之土壤條件為：水分容易橫向移動並容易依毛管上升之土壤，根系下有不滲透層不使水分滲入地下深層等。

1.1.3 噴灑灌溉

噴灑灌溉歷史甚短，普遍應用於農業僅為最近 50 年之事，噴灌猶如人工降雨，非但可得甚均勻之灌溉，且可實施少量而頻繁之高效率灌溉，甚少受氣候與地形之限制，所影響之因子亦少，為目前最佳之灌溉方法。

1.2 灌溉方法優劣比較

一、地表灌溉之優點

- 1.地表灌溉設備維持費低廉。
- 2.各種作物皆可實施地表灌溉。
- 3.可施用於大面積之灌溉。
- 4.灌溉時不需要有專門技術之工人。

二、地表灌溉之缺點

- 1.影響之因子甚多，不能得較高之效率。
- 2.因配水溝渠減少耕地面積 10%~15%。
- 3.一次灌溉所需之水量甚多，用水不經濟。
- 4.實施灌溉之農地，必須預先整地便成均勻一致之坡度，增加整地費用。
- 5.土壤沖刷問題甚易發生。

6.灌溉水量不易均勻。

7.因地表灌溉損失水量甚多，易發生排水問題。

8.地表灌溉水中所含野草種子等雜物甚多，必須防治農田中野草之滋長。

三、地下灌溉之優點

1.水分供給至根系，減少蒸發量，可達有效經濟用水。

2.節省灌溉勞工，不致耽誤農期。

3.如能控制地下水位及鹽鹼之聚積，可提高產量。

4.防止雜草種子之傳播，可節省除草費用。

5.水分供給至根系無沖刷問題發生。

6.如兼排水之地下灌溉，同時可解決灌溉排水問題，節省工程費。

四、地下灌溉之缺點

1.受地形、土壤性質、地下水高低及排水良窳等條件之限制，應用範圍不廣。

2.建築費甚高。

3.容易發生浸水（water logging）及鹽鹼聚集，有害作物。

4.地下水位必須在作物根系之下，限制某種作物之種植。

5.需要整地費用。

6.灌溉系統如有損壞，修理困難。

7.因受地形限制，常需抽水，增加營運費用。

五、噴灑灌溉之優點：

1.可用少量之頻繁灌溉，灌溉效率高。

2.不受地形影響，可節省整地費用。

3.避免逕流及輸水損失。

4.噴灌如同降雨，灌溉水均勻一致。

- 5.不致發生土壤沖刷，土壤表面亦不會發生硬殼。
- 6.適用於入滲率較大之地區。
- 7.適用於種子發芽時之灌溉。
- 8.可兼噴灑農藥及液肥，以節省勞力。
- 9.無需建築給水渠路與田埂，約可增加耕地 15%
- 10.可洗除葉面及莖上之塵砂，使氣孔擴大。
- 11.有冷卻作用亦可防止霜害。
- 12.容易控制水量，節省勞力，並易自動化管理。
- 13.減少灌溉管理人員。
- 14.水源取自地下水者，可減少雜草之繁殖。
- 15.無排水問題。

六、噴灑灌溉之缺點

- 1.噴灌設備較貴，維持費亦昂。
- 2.葉面及地面蒸發水量較大。
- 3.如受風力影響，則減低灌溉效率。

第二章 畦溝灌溉

2.1 影響因子及使用時機

畦溝是一種小且平行之水路，且能夠輸送水而對作物加以灌溉。作物通常被種在畦溝間之壟土上。

很多作物皆可適用於畦溝灌溉，特別是條播作物。但水若順著畦溝淹過作物之莖或頂部時，如此將會對作物之生長產生很大之傷害。當然畦溝灌溉亦適合果樹作物之灌溉。一般而言，畦溝灌溉常被應用於行栽作物之玉米、太陽花、甜菜、黃豆等作物，然在它們被水淹沒時則會有浸損現象，又如蕃茄、蔬菜、馬鈴薯及一些豆類亦是，果樹類則像柑橘、葡萄等等，然如條播作物則需利用紋溝灌溉像小麥。

均勻的低地和不太陡的坡度是最適合畦溝灌溉，但坡度以不超過 0.5% 為宜，通常理想之畦溝坡度應大於 0.05%，以幫助畦溝排除因降雨而產生過剩之水深。在高低起伏之田區上應隨著田地之等高線依設畦溝。

畦溝可以被使用於許多的土壤質地，然而，也會有很多地表灌溉方式，於較大的粗砂粒土壤中，會因滲透作用而損失較高之水量而不適用，但表面較硬之砂質土反而適用於地表灌溉，因為水流深度不會超過田壟，所以可維持耕地裡作物之生長。

2.2 畦溝配置

2.2.1 畦溝長度

畦溝長度必需和坡度、土壤質地、水流流勢、灌溉深度、耕作實行和田區長度等因素加以考量，上述各因子皆會對畦溝長度產生影響，以下分別討論之：

一、坡度

當田地坡度較陡時畦溝雖然可以流得較長，然畦溝坡度之最大限度最好應不超過 0.5%，以避免土壤沖蝕。畦溝之設計有時亦可以窄且平坦地為之，但無論如何，仍建議以 0.05% 為最小限度之限制值，以利灌溉或有效排除過度降雨之水量，假如土地坡度較陡峭且超過 0.5%，則畦溝可以在主要的斜坡上設置一個安全設施，或者甚至建議在限制的範圍內沿著地勢來保持畦溝的斜度。當田地斜度有超過 3%，畦溝可以這方法加以設置。此外，在畦溝系統中若有土壤沖蝕之缺點，這將是其主要的風險。又在陡峭的土地或梯田，畦溝可沿著梯田予以建造，如此梯

田即可利用從事耕種。

二、土壤質地

在砂質土壤中的灌溉水迅速地滲透土壤中，溝畦之設計長度應該要較短（少於 110 公尺），以使水到達田區末端時而不致過度的滲透流失。在黏質土壤中，其滲透的比率比在砂質土壤中慢許多。因此於黏土中，畦溝長之設計可比在砂質土壤中長的多。有關滲透率之測定，將於本篇第七章加以說明。

三、水流大小

正常水流大小應大於 0.5 ℓ/sec ，如此方可提供畦溝一個適當的供灌水量，而不致太多。當有較大的水流可利用時，水將迅速流至畦溝，所以畦溝通常會較長。最大灌溉水量之限制應視畦溝坡度，且不會導致土壤沖蝕而定，一般而言，最大用水量以不超過 3.0 ℓ/sec 為宜，這是必須加以熟慮的，如表 2.1 所示。

四、灌溉水深

灌溉水深較大時，則畦溝通常需做長一點，因水流到畦溝入滲量會較大，且灌溉時間會較長。

五、農業耕作之實施

當農業機械化後，畦溝長度儘可能做長一點，如此將可增加田間操作之容易度，但當畦溝渠較短時，宜需特別注意水之流動，是否會經常從一個畦溝改變到下一個畦溝。通常，短畦溝之灌溉效率會較長畦溝為高，此乃因灌溉時間較短，其滲漏量較低之原因所致。

六、田間長度

大部分畦溝長度設計之經驗值是應等於田間長度，此為一較理想之設計，否則將有可能導致一小塊在下游之面積無法考慮到（如圖 2-1）。同樣地，田間長度亦有可能小於畦溝長度許多。當然，這不是一經常性之問題，因為畦溝長度大都可以作為田間長度之邊界。

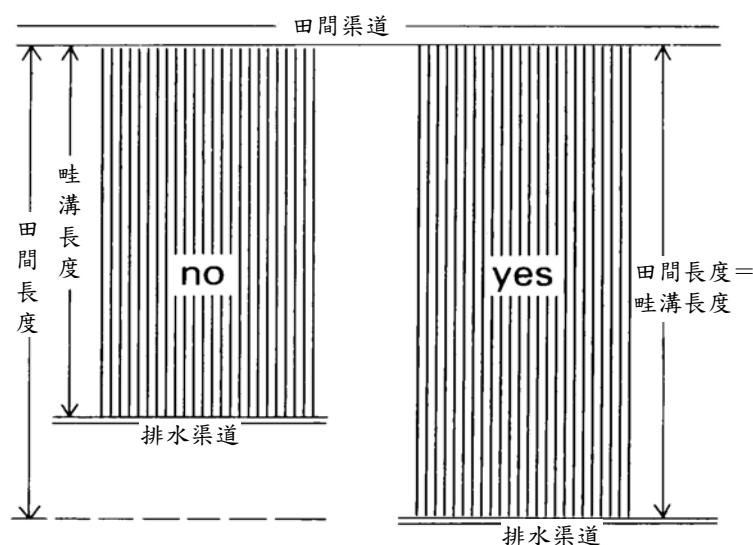


圖 2-1 田間長度及畦溝長度

表 2-1 提供了於小型區域之灌溉條件下其最大畦溝長度之經驗值，通常而言，這些數值皆較灌溉手冊中所提供的數值為低。而較高之數值之採用則適用全面機械化之大面積耕作區域。

表 2-1 不同坡度、土質、水流及純灌溉水深條件下畦溝長度之最大經驗值

畦溝坡度（%）	每條畦溝 最大水流 （ℓ/s）	粘土		壤土		砂土	
		純灌溉水深（mm）					
		50	75	50	75	50	75
0.0	3.0	100	150	60	125	30	45
0.1	3.0	120	170	90	150	45	60
0.2	2.5	130	180	110	150	60	95
0.3	2.0	150	200	130	170	75	110
0.5	1.2	150	200	130	170	75	110

注意事項：上述表 2-1 提供了在不同坡度、土質、及水流大小及純灌溉水深下畦溝長度之概略經驗值，這些資料僅是田間工作經驗使用上之指導原則，和科學無任何關連。最大之畦溝長度是在提供合理化之灌溉效率。然而，若畦溝長度甚至比上表 2-1 所提供之長度更為短，通常而言，這將有助於灌溉效率之改善，此時只有藉著畦溝系統設置之指導方針，即可評估其適用性。

2.2.2 畦溝分類

畦溝分類可依土壤型態和水流大小而定。

一、土壤型態

在砂質土壤裡，水的垂直流動較橫向流動快，狹窄且深的 V 形畦溝是可以降低其滲漏量（如圖 2-2），但無論如何，多砂之土壤是較不穩定的，且易於倒塌，並有可能降低其灌溉效率。

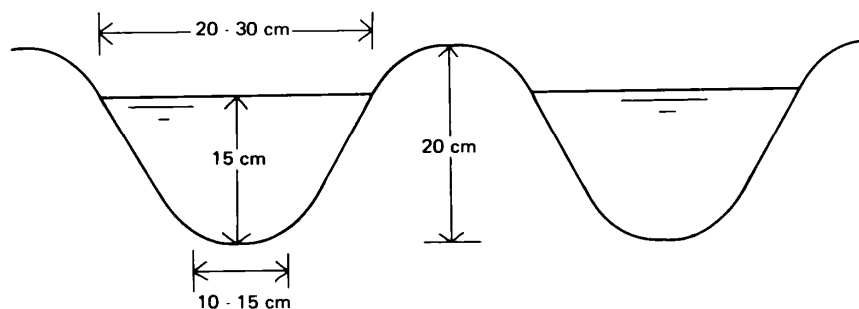


圖 2-2 砂質土壤中深且窄之畦溝

在粘質土壤，由於水的流動較砂質土壤為快且其入滲率又較低，故畦溝可以寬且淺之方式為之，如此可以保持較大之濕潤區域，降低其逕流量（如圖 2-3）。

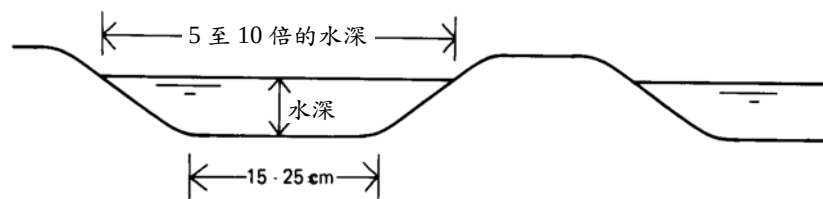


圖 2-3 粘質土壤中寬且淺之畦溝

二、水流大小

一般較大型的畦溝必須可以控制水流之流量。

2.2.3 畦溝寬度

土壤類型和耕種型式會影響到畦溝的寬度大小。

一、土壤類型

依照原則來說，於砂質土壤之畦溝寬應介於 30~60cm 之間，而對於劣質粗砂之畦溝寬可以為 30cm，純淨之細砂時之畦溝寬可以為 60cm，而粘質土壤之畦溝寬可為 75~150cm，目前粘質土之雙壟上亦可被作為使用，有時稱此為苗床，它的優點是容易除去現有排列在每一田壟上之許多農作物，目前在田壟圓形之頂點上，是可以排去少許的水量，除此之外，在大量降雨期間田壟的表面亦有可能會產生積水。(如圖 2-4)。

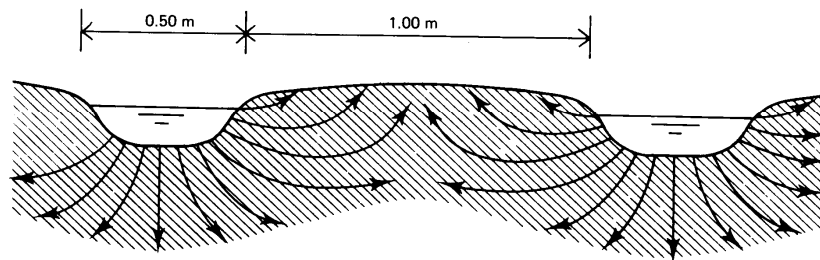


圖 2-4 一個雙田壟之犁溝

二、耕種型式

使用機械來挖田埂以保持作物足夠的空間，因此機械化耕作是必須的。假如可維持田埂間標準寬度，甚至當作物在常態下成長需要不同的距離時，機械之設備可減少工作量。當這設備從這株作物移至另一株，這樣機具中的零件就不需要更換。然而在所有的土壤種類中，保持田埂中標準間隙的濕度是必須的。

2.3 土壤濕潤型態

為維持根系區域濕潤均勻，畦溝寬度應要非常適當，且坡度需均勻及灌溉水應能被迅速利用。

畦溝中的水向下入滲比橫向或側向之滲透為快，使得植物根系從畦溝吸收水分而潮濕，不管是向下或橫向滲透都受土壤形態之影響，我們可從圖 2-5 看到其滲透情形。

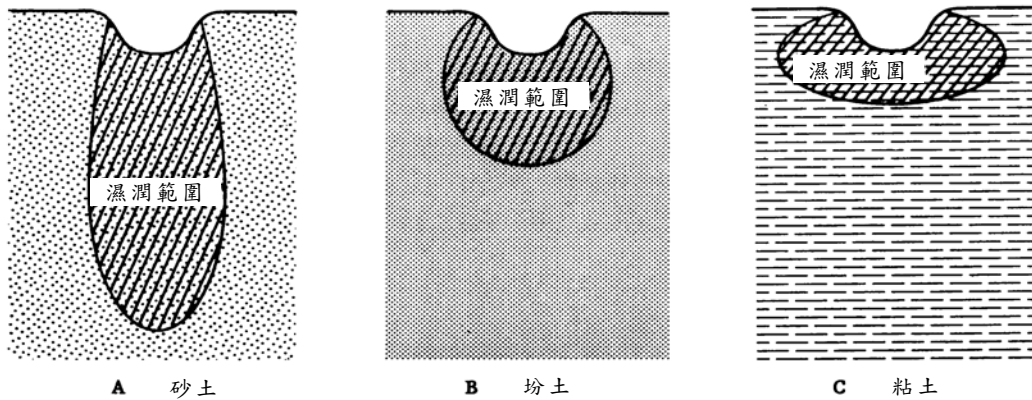


圖 2-5 畦溝於不同土壤型態之不同濕潤型式

一、理想的濕潤灌溉模式

在一個理想適當的情況下，將鄰接互相重疊的濕潤圖當中，潮濕的水份會全部往隆起處向上移動（毛細作用），如此便能供給植物根部地區的水份（如圖 2-6）。

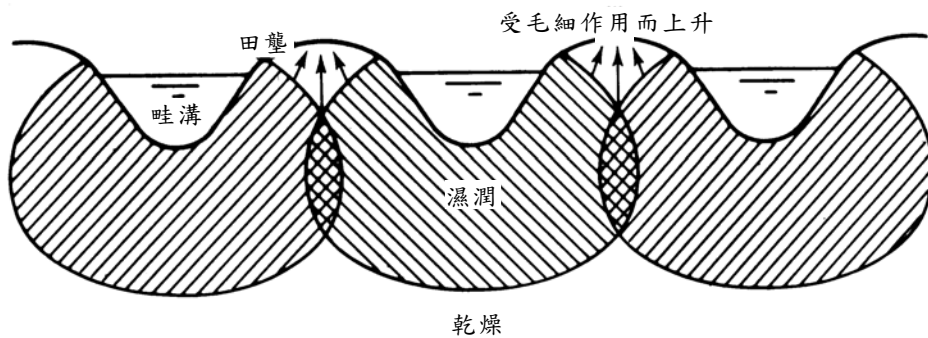


圖 2-6 理想之濕潤型態

均勻坡度與足夠多的水量，對畦溝長度維持水量分布之均勻性是很重要的，因水分將能迅速流往畦溝被吸收，如此可避免水分在畦溝中大量的滲透而流失，為了把滲透的損失減少到最小，可使用四分法來限定水分由田間水路流至畦溝後所需之時間。

二、不良之濕潤型態

導致不良濕潤模式之原因有：

1. 不利的自然現象，例如：密度大的地層，不同的土壤，不適當之坡度。
2. 不適當之佈置，例如：畦溝間距的大小過寬。

3.缺乏管理：供應的水量過多或過少，阻塞物流入太快。

三、有害的自然現象

水盤灌溉與畦溝灌溉，在密度大的土層或不同的土壤類型，皆有同樣的影響。

畦溝中一個不平坦的坡面會導至水分分佈不均，水分於陡峭的坡面中會快速流失，而在平緩的坡面會慢慢的留下，這樣會影響在固定的時間內缺乏可用水源及導致缺水，這問題可由均勻的坡面加以克服。

四、不良的配置

假如畦溝間隔太寬時，會使根系區域沒有足夠的水量，畦溝的間隔必須小心地選擇，才能確定將根系區域之土壤適當地變濕（如圖 2-7）。

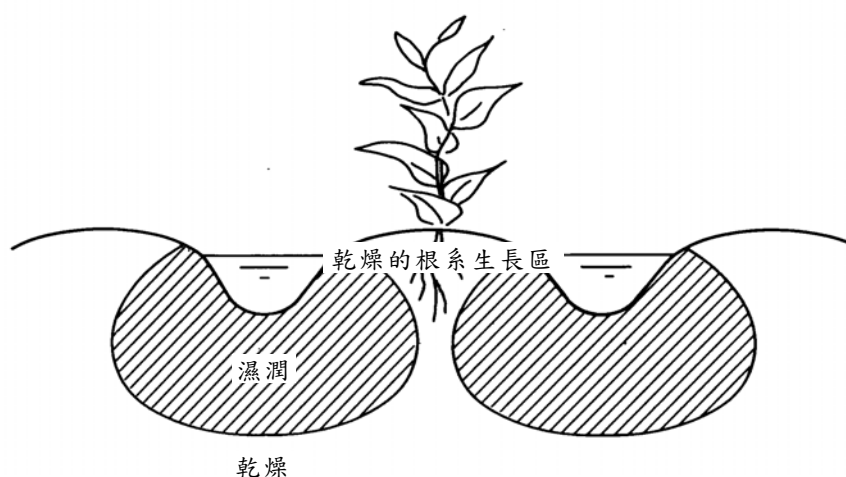


圖 2-7 兩畦溝寬作物生長示意圖

五、不良的管理

灌溉水流量太小（圖 2-8）將會造成狹長隆起田壟水分之不足，即使作物種植在田壟的左右邊，其水量亦是不足，其對作物之生長是有害的，小流量將會沿著畦溝長度使水分分布不均，且太多的水會在畦溝的前端深處滲漏流失。

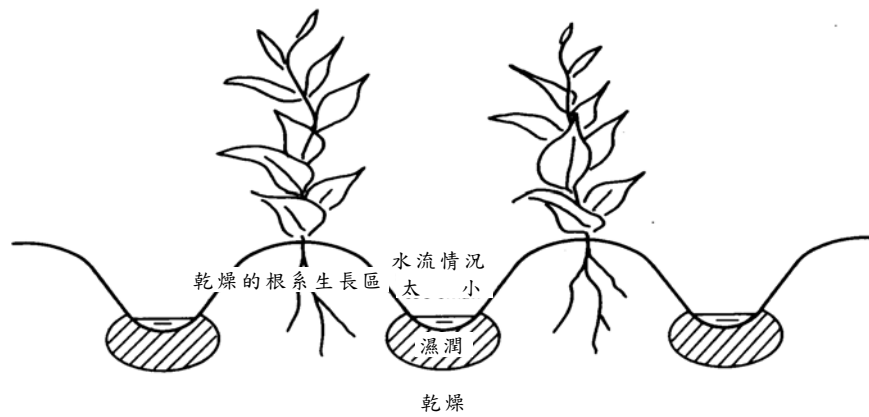


圖 2-8 小流量時田壟乾燥情形

在平坦斜坡上，如果水流量太大可能會發生田壟被淹沒（圖 2-9），滲入太多水量的坡面，若不能停止於坡床和畦溝兩側之水流，將可能會使土壤沖蝕。

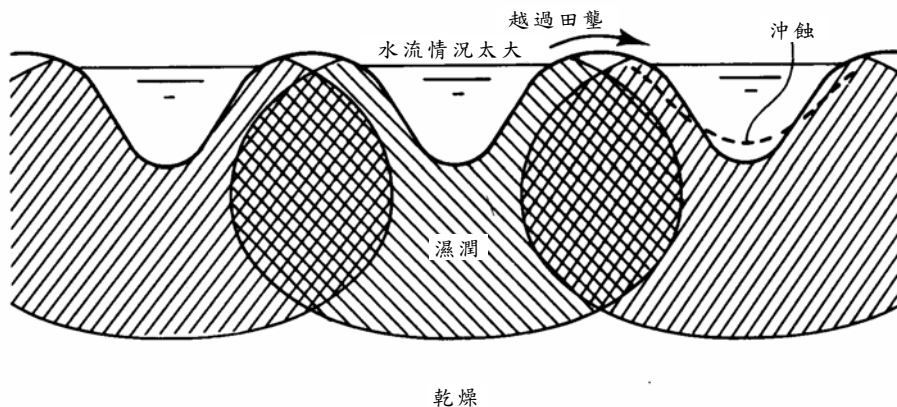


圖 2-9 水流太大土壤沖蝕

於灌溉管理上，其共同之缺點乃在於太快停灌水量，這雖可降低其逕流量，但其結果卻使得灌溉水之分佈極為不平均，特別是在畦溝之末端得不到足夠之水量，假如引灌水量不是很快加以停止，則將產生過度逕流，且種在畦溝末端之作物會因排水不良之現象，最後，造成植物之死亡。

2.4 四分之一法及灌溉時間

在地表灌溉，水是由給水路將水供應至整個田區。供應溝渠的水來自於田區對面的埂間，稱之為“水流前進”（如圖 2-10）。

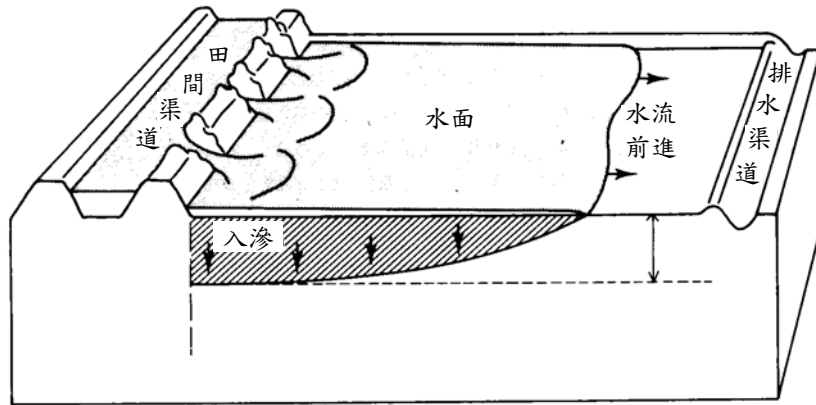


圖 2-10 水流前進示意圖

當水停止供應時，在這地區的水，逐漸滲透進入土壤裡，且水流離開溝渠稱之為「水流退後」（如圖 2-11）。

理想的水流前進速度應和水流後退的速度相同，這發生在水灌滿整個田區時才有相同的滲透速度，然而，水流前進和退後通常是不相同的，水流前進速度時常常比退後慢，此結果造成接近供應水源溝渠的田地比末端的田地得到更多的水，尤其當水源以少量水供給田區時，特別明顯。

例如在砂土上的小水流應用在一個大田區，它將花費很多的時間，使水流到達遠處盡頭的田地，水迅速的滲透到砂土裡，田邊接近供給水源溝渠的會得到較多的水量，在另一端的田區得到的水較少，如圖 2-12 所示。

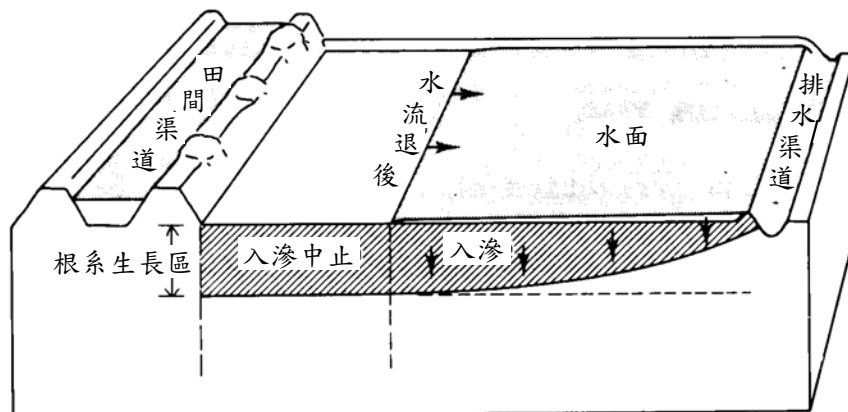


圖 2-11 水流退後示意圖

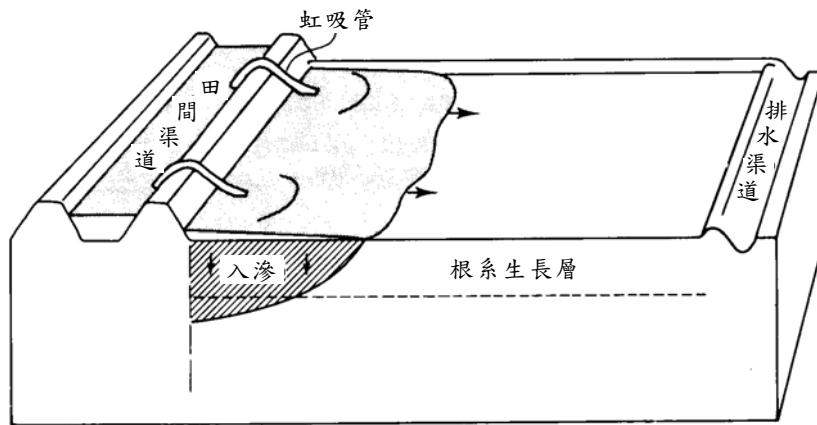


圖 2-12 在小流量下水之分佈

當田區水流量增加時，將改善田區之分佈情形，水的滲透率雖是相同的比率，但是由於水流的前進使水能很快的到達對面田區。所以同理這邊會得到一般水源分配，雖然總是少於接近有水源溝渠的田邊（如圖 2-13）。

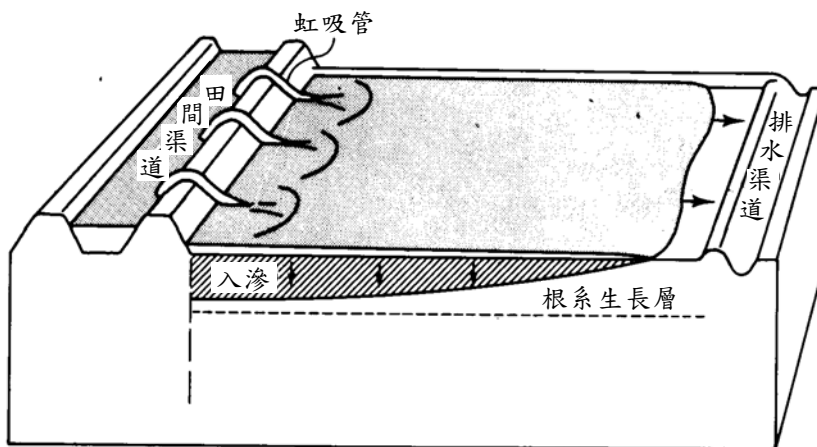


圖 2-13 水流大時，水之分佈情形

為了選擇一個適當的水流大小，採用概測法，此法通常被稱為四分之一時間法則。

四分之一時間的法則表示水流大小足夠的話，水就能夠到達田地的末端。畦溝灌溉或是水能灌滿整個田地（水盤灌溉），足夠的水需要四分之一的灌溉時間才能將根系填滿。灌溉時間是指浸潤所需要水的總量所需花的時間。灌溉時間之決定來自於入滲曲線。

例如：

假定入滲曲線已決定有 70mm 之水量供灌於水盤，而入滲量為 70mm 所花時間約為 74 分鐘，這意味應用四分之一時間規則之方法時，水盤被水灌滿時間需 18 至 19 分鐘（74/4），因此水流大小必須選擇其灌滿時間不應超過 18 或 19 分鐘。假如田區長度夠長，則分佈於根系區域的水是不夠的。因此若不能增大水流流量及需花費比 18 或 19 分鐘較長的時間去灌滿田地，則必需去縮小田區面積，這樣才可能只花 18 或 19 分鐘去灌滿田地。

灌溉時間

灌溉時間 t （分鐘或小時）是指供給田區必要灌溉水深所需之時間。灌溉時間取決於流量的大小 Q （ ℓ/sec ），需要的灌溉水深 d （mm）和需要田地的面積大小 A （ha）。灌溉時間之計算，可以 t 時間內總施灌水量（體積）來思考，亦即，可依 $Q \times t = A \times d$ 恆等式，解得灌溉時間 t 值，有關公式如下：

$$\text{灌溉時間 (hr)} = \frac{2.78 \times \text{灌溉深度 (mm)} \times \text{灌溉面積 (ha)}}{\text{流量 } (\ell/\text{sec})}$$

例如：

假如有一灌溉水深為 50mm，而可用的流量為 20 ℓ/sec 和田地的面積是 75×50m²，則灌溉時間之計算如下：

步驟 1：決定田地面積（公頃）。

這個面積大小是 75×50m=3,750m²=3,750/10,000=0.375ha。

步驟 2：決定灌溉時間

$$\text{灌溉時間 (hr)} = \frac{2.78 \times \text{灌溉深度 (mm)} \times \text{灌溉面積 (ha)}}{\text{流量 } (\ell/\text{sec})}$$

$$\text{灌溉時間 (hr)} = \frac{2.78 \times 50 \times 0.375}{20}$$

$$\text{灌溉時間} = 2.6 \text{ (hr)} = 156 \text{ (min)}$$

以四分之一法則應用，水必需在 156/4=39 分鐘到達畦溝或灌滿田地的末端。假如田區的長度較長時，則將增加每一畦溝或水盤之流量，或是減少畦溝長度或水盤大小。

2.5 臺灣輪作田灌溉特性

畦溝灌溉法適用於行栽作物，其間距約一公尺左右，作物種類有甘藷、蔬菜、甘蔗等。影響畦溝灌溉之因素有流量、行距、行長、灌溉時間、地面坡度、灌前土壤水分與入滲率等。美國以四分法來控制灌溉時間，同時隨時調節畦溝流量而得一均勻之灌溉。台灣輪作田耕作方法與環境特殊，未能採用美國所用之四分法，茲將台灣輪作田之特性敘述如下。

- 1.輪作田坡度平坦，水流緩慢，如採用四分法灌溉時間過長，易增加深層滲漏與逕流。
- 2.皆種植淺根作物，每次灌溉較少水量即可滿足作物之需要。
- 3.畦溝耕犁後，皆經人工整理，表面土塊小，易實施灌溉。
- 4.每坵塊皆有田埂圍隔，灌溉後不容許發生逕流，深層滲漏亦少。
- 5.實施灌溉時由掌水工專司其事，在美國隨時調節畦溝流量，雖可得均勻之灌溉，但掌水工無暇按溝調節，不便實施。
- 6.因田面坡度平坦，雖用較大流量亦不至發生土壤沖刷問題。

第三章 埂間灌溉

3.1 影響因子及使用時機

埂間灌溉為一種控制地表漫灌之方法，通常將田間以田埂區分成若干田區，每一田區分別施灌。灌溉時由田區一端引入水流，一面前進，一面將水滲入根系，最後完成灌溉之目的。埂間灌溉是藉由渠道將水流引至田埂的上游來灌溉，水流順著坡度而下，當所需求的水量引進埂間之後，就把引入水流切斷，甚至有可能在灌溉用水尚未完全灌滿時，就把引入水流切斷，何時把引入水流切斷並沒有一個明確的準則，但是如果水流太早切斷，距離田埂上游較遠的地方就可能無法得到足夠的水來完成灌溉；但如果剩下的水太多，而經過漫長的流動之後，水流可能會在田區末端產生逕流，由排水系統加以排出而造成水量之浪費。如圖 3-1 所示。

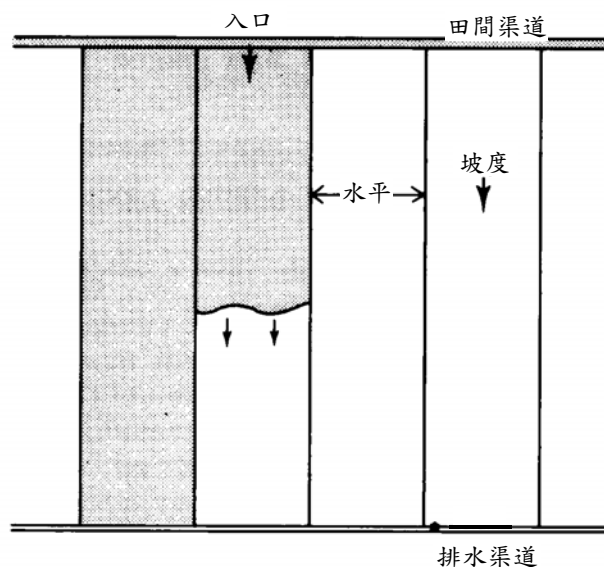


圖 3-1 埂間灌溉示意圖

埂間灌溉通常是最適合較大機械化的農地，如此可設計出較長之田間長度，如此，一方面可增加生產且易於機耕。田埂長度約在 800m 或以上，寬度則為 3~30 公尺，其取捨主要決定於如下不同因子。

一、適當之坡度

埂間之坡度要均勻，最低限度之坡度為 0.05%，如此才能充分將多餘水量排出，而最大坡度之限制則為 2%，以避免造成土壤沖蝕。

二、適當之土壤

深且均勻之壤土或黏土具中等之入滲率，而重黏土於實施埂間灌溉時是較困難的。因為要有足夠之水才能滲入土壤中，否則不能提供作物足夠之水量，盤灌即是一例！

3.2 埂間配置

田埂的尺寸和樣式就如同水盤灌溉及畦溝灌溉一樣，深受土壤種類、水流大小、坡度、灌溉深度和一些其他的因素，諸如耕作習慣、耕作區域或是耕地大小所影響。埂間田區設計要點包括如下：

- 1.田區橫向坡度：灌溉水進入田區後，使橫向之水深相同，其坡度以水平為原則，但因地形關係不能完全水平時，此橫斷面上之水深，不得小於 5 公分或大於 7 公分，換言之，橫斷面二側之高度不得超過 2 公分，如以坡度表之，其最大坡度可定為 0.2 %。
- 2.田區之長度：如田區甚長，縱坡與灌溉流量皆小，而入滲率甚大，則田區前端較末端吸收更多之水；如增大縱坡與流量，增加灌溉速度，減短田區長度則可改善灌溉。砂土地田區灌溉長度常用 60 公尺以下，而黏質土壤入滲率低至 6cm/hr 必須要緩慢灌溉。
- 3.田區縱向坡度：田區有 0.15%~0.3%之緩坡，其寬度可大至 30 公尺，0.4~0.5%之中等坡度其寬度可為 6~10 公尺，較大之陡坡其最大寬度可為 5~7 公尺。
- 4.流量：中質土壤田區之灌溉流量可用 14ℓ/s，如此可灌溉最大寬度 7.5 公尺，單位寬度之流量為 1.87ℓ/s。
- 5.田埂斷面：台灣一般之田埂斷面已示於前述，但將來實施農業機械耕作後，機械越田常會破壞田埂，茲將目前美國適用之田埂形狀說明如下，以備參考。田埂形狀之選定應具備下列三條件：

(1)限制灌溉水流出區外。

(2)有足夠之寬度，不使水滲出區外。

(3)機械耕作時容易穿越田埂。

表 3-1 列出了一些參考數值以供決定埂間的最大尺寸，但要強調的是，這張表只是經驗上的一些參考數值，並不具任何科學意義。

3.3 土壤濕潤型態

埂間灌溉之重要性如其它灌溉方法一樣，必須有足夠之灌溉水量確保埂間使水量能均勻分佈在根系區域。然而，有許多共同的問題其結果導致水量之分佈並不均勻，這些包含：

- 1.不良土地等級。
- 2.不正常的水流大小。
- 3.斷水之時間之不適當。

1.不良土地等級

假如田地本身是一個橫向斜坡及不適當地分級，灌溉水將無法均勻散佈於田區，不平均地流動至埂間的邊緣（圖 3-2）。但若能依正確的邊界坡度來消除更正，或者在邊界建造導溝，可防止這交雜的流動水。

2.不正常的水流大小

水流如果太小其結果將導致在靠近渠道處會產生深層滲漏（如圖 3-3），尤其在砂土。

假如水流流量太大，水將迅速地流動至田間末端，以致於不能充滿根系區域，在灌溉水未達到應用之前，水之逕流應該予以避免（圖 3-4），在這狀況下停止水的流動是必要的，直到根系區域充分地充滿水份，而這結果將導致相當可觀的地表逕流損失。過大的水流可能引起水土流失。假如田地沒有適當地定次序且有一個逆向坡，灌溉水將不會在田地上平衡地散佈，它將會沿著斜坡流動，總是在尋找田埂邊緣最低處，這可以校準田埂坡度或者用田埂構造輔助來引導防止水的反向流動。

3.斷水時間不適當

假如水流停止太快了，那水流可能無法流到田區之末端，相形之下，假如水量大且時間長，則水將會在下游溢流出埂間，而由排水系統排出。

表3-1 建議埂間灌溉田埂的最大長度與寬度

土壤種類	邊界坡度 (%)	每百公尺寬之單位 逕流量 (公升/秒)	埂間寬度 (公尺)	埂間長度 (公尺)
砂土 滲透速率高於 25公釐/小時	0.2-0.4	10-15	12-30	60-90
	0.4-0.6	8-10	9-12	60-90
	0.6-1.0	5-8	6-9	75
壤土 滲透速率介於 10~25公釐/小時	0.2-0.4	5-7	12-30	90-250
	0.4-0.6	4-6	9-12	90-180
	0.6-1.0	2-4	6	90
黏土 滲透速率低於 10公釐/小時	0.2-0.4	3-4	12-30	180-300
	0.4-0.6	2-3	9-12	90-180
	0.6-1.0	1-2	6	90

註：單位逕流量是以埂間每一百公尺寬來計算，因此，埂間的總逕流量就等於單位逕流量乘以埂間的寬度，而寬度以公尺為單位。

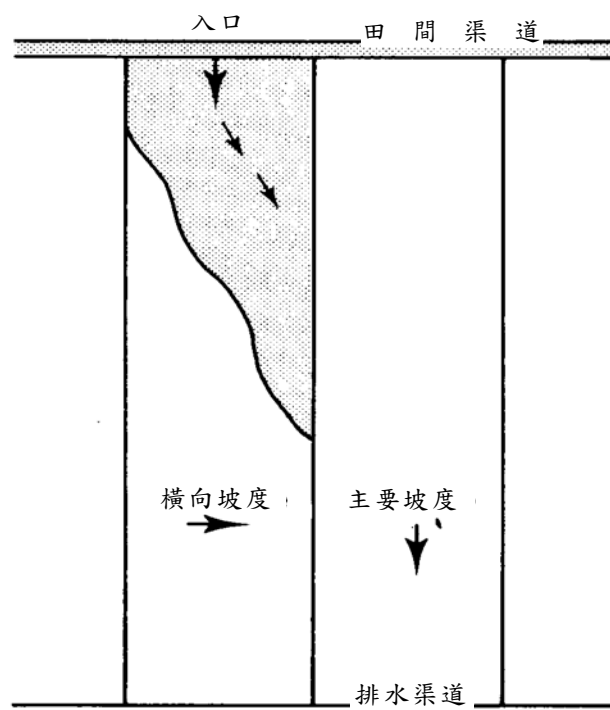


圖 3-2 埂間裡水流之斜坡流動

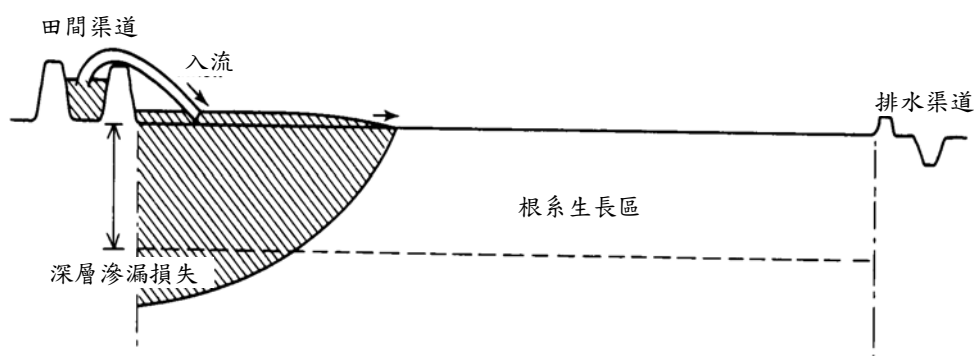


圖 3-3 水流太小之情形

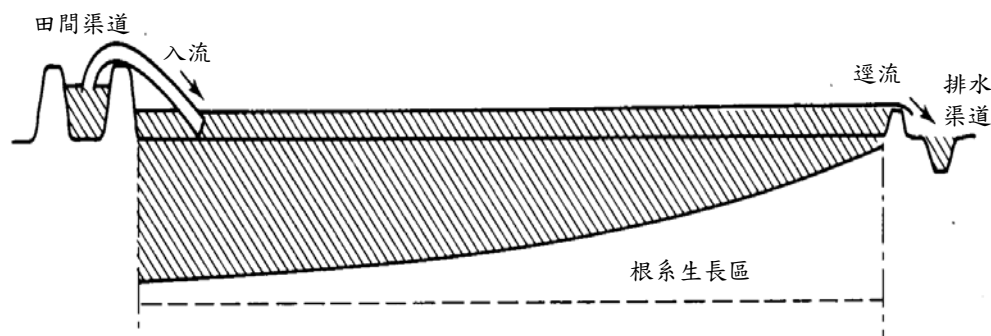


圖 3-4 水流太大之情形

3.4 埂間灌溉公式及應用

埂間灌溉公式考慮之因子，包括灌溉流量、時間、長度、寬度、水深、土壤質地、土壤水分、田面坡度、入滲速度、地表狀態等因子，可以下式表示之：

$$I=f(Q, t_a, L, W, d, S, M, G, V, N) \dots\dots\dots(3-1)$$

式中：

- I：灌溉之結果。
- Q：灌溉流量。
- t_a ：灌溉時間亦即斷水時間。
- L：田區灌溉長度。

W：田區寬度。

d：灌溉水深。

S：土壤質地。

M：灌溉前土壤水分。

G：田面坡度。

V：灌溉水入滲速度。

N：地表狀態包括地表粗糙程度，土層鬆緊程度及地形等。

如欲求上列公式，必須解以上十個變數方程式，目前雖可藉電子計算機求解，但各變數之影響程度不甚明顯，甚難求解，為求合理之灌溉，除將以上影響之因子歸類外，並經分組，方可求得一近似公式，如將公式 3-1 中之流量 (Q)，田區灌溉長度 (L) 及田區寬度同時考慮，即用每長 10 公尺寬 1 公尺之流量秒公升表之即為單位流量 q (unit discharge)，如設灌溉時間為 t_a ，則長 10 公尺，寬 1 公尺之條形地所灌水量為 qt_a ，如用水深 d 表之則 $d=qt_a/10$ 土質，地表狀態為影響灌溉主要因子，應分組成獨立因子，如砂質壤土花生表土疏鬆狀態之灌溉或粉質黏土玉米表土堅實狀態之灌溉等。式中坡度 G 及灌溉前土壤水分 M 皆可視為常數，因輪作田坡度甚為平坦，普通皆在 0.2~0.3% 之間，而灌前土壤水分大約皆在有效水分之 50%；式中最後一值為 V 入滲速度即為公式 $D=Ct_i^{n+1}$ ，此值必須與灌溉水深 d 相同，將二者相等起來，並將流量之單位化成秒公升，則可成立如公式 3-2。

$$q = \frac{ct_i^{n+1}}{6t_n} = \frac{Ft_i^{n+1}}{t_a} \dots\dots\dots(3-2)$$

式中：

q ：為單位流量即 1 公尺寬，10 公尺長所灌之流量，以秒公升表之。

t_i ：為積水時間 (Intake time)，即灌溉水停留於地表之時間，以分鐘表之。

t_a ：為灌溉時間，以分鐘表之。

F ：為常數等於 $C/6$ 。

C ：為入滲累積水深公式 $D=Ct_i^{n+1}$ 中之常數。

公式 (3-2) 單位流量 q ，積水時間 t_i 及灌溉時間 t_a 三因子間有某種關係存在。欲由試驗各組資料中尋求一適當之配合式，須藉統計方法；且此三因子之間成複迴歸方程式 (multiple regression equation) 之關係。由於 q , t_i , t_a

非線性相關 (non-linear correlation)，則三因子間可假定為對數線性相關，公式 3-3, 3-4, 3-5 表示其複迴歸方程式。

$$q = Ft_i^a t_a^b \dots\dots\dots(3-3)$$

式中 F， α ， β 為係數，可由統計方法確定之。即

$$\alpha = \frac{\sum x_1 y \sum x_2^2 - \sum x_1 x_2 \sum x_2 y}{\sum x_1^2 \sum x_2^2 - (\sum x_1 x_2)^2} \dots\dots\dots(3-4)$$

$$\beta = \frac{\sum x_1^2 \sum x_2 y - \sum x_1 x_2 \sum x_1 y}{\sum x_1^2 \sum x_2^2 - (\sum x_1 x_2)^2} \dots\dots\dots(3-5)$$

$$F = \bar{y} - \alpha \bar{x}_1 - \beta \bar{x}_2$$

式中：

$$x_1 = \log t_i; \quad x_2 = \log t_a; \quad y = -\log q$$

如將某一試驗值代入上列三式，即可解得 α ， β 及 F 值，再將此等值代入 (3-3) 式，可得如 $q = 4.493t_i^{0.295}t_a^{-1.016}$ 之方程式。

公式 (3-3) 尚未考慮灌前之土壤水分，亦即未計及一次應灌水深 (net irrigation water) 與施灌水深 (gross irrigation water)，故灌溉前必須先觀測土壤水分、假比重與田間容水量，如某作物之根深已知，可計算應灌水深，將應灌水深再除以施灌效率 (irrigation application efficiency) 即得施灌水深，如以圖解表示可自圖 (4.3-5) 中求得。設該土壤灌前土壤水分與田間容水量之差為 7.18% (Pw)，假比重為 1.47，連接圖 (4.3-5) A，B 二刻度，並將連線延長至刻度 C，即可求得一公尺土層應灌水深之公厘數，設施灌效率為 60%，連 C，D 刻度並延長至 E 刻度，即可讀得一公尺土層施灌水深為 179 公厘，如根系深為 0.4 公尺，則施灌水深為 71.6 公厘。圖 (4.3.6) 為公式 (3-3) 經試驗及統計分析後，所得之方程式 $q = 4.493t_i^{0.295}t_a^{-1.016}$ 之圖解，既知施灌水深為 71.6 公厘，田區長度為 100 公尺，水流至 80 公尺斷水，則在圖 (4.3-6) 中連 A，B 二刻度並延長至 C，可得單位流量為 0.271/s/w/10m，並可在刻度 B 左側求灌溉時間為 44.4 分鐘。設田區寬為 5 公尺，則長 100 公尺田區所需流量為 $0.27 \times 5 \times 10 = 13.5$ 1/s。圖 (4.3-6) 僅適用於砂質壤土花生之埂間灌溉，故欲灌溉他種作物與土壤，可參考表 (4.3-2)，表中各數據求得之方法，與本節以上各點所說明者同。

表 3-2 機耕與牛耕各不同土質與作物埂間灌溉最適灌溉因子表

土 質	耕 犁 式	作 物 別	施灌水深 (mm)	單 位 流 量 (1/s/m/10m)	停 水 百分比*
砂壤土	牛 犁	花 生	80	0.30	80
玢壤土	"	"	85	0.35	80
砂壤土	"	玉 米 、 高 梁	75	0.30	80
玢壤土	"	"	80	0.33	80
壤 土	"	"	78	0.32	80
砂壤土	"	整 地	100	0.40	90
玢壤土	"	"	90	0.35	90
壤 土	曳引機	玉 米 、 高 梁	90	0.42	90
壤 土	耕耘機	"	81	0.40	90
壤 土	曳引機	整 地	110	0.60	90
壤 土	耕耘機	"	105	0.50	90

*註：所謂停水百分比即水流達田區長度之百分比時即行停水，餘水可流達田區末端，可達均勻之灌溉。

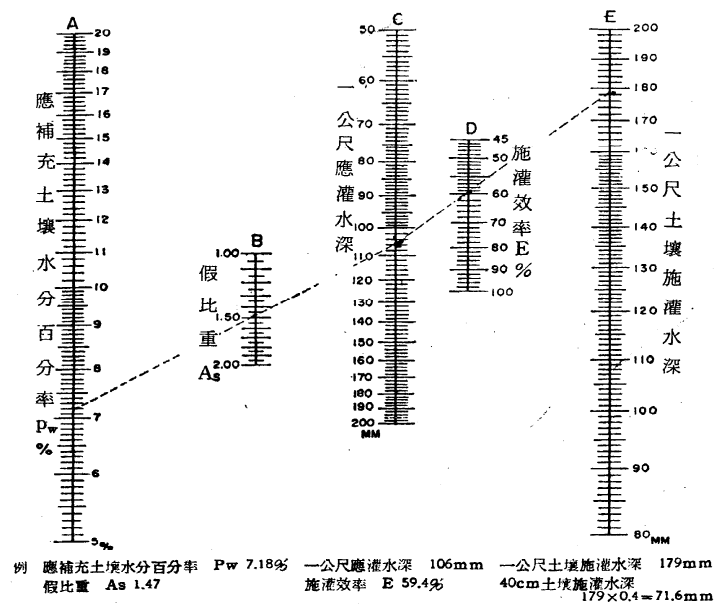


圖 3-5 埂間灌溉土壤水分百分率、假比重、施灌效率及施灌水深關係圖

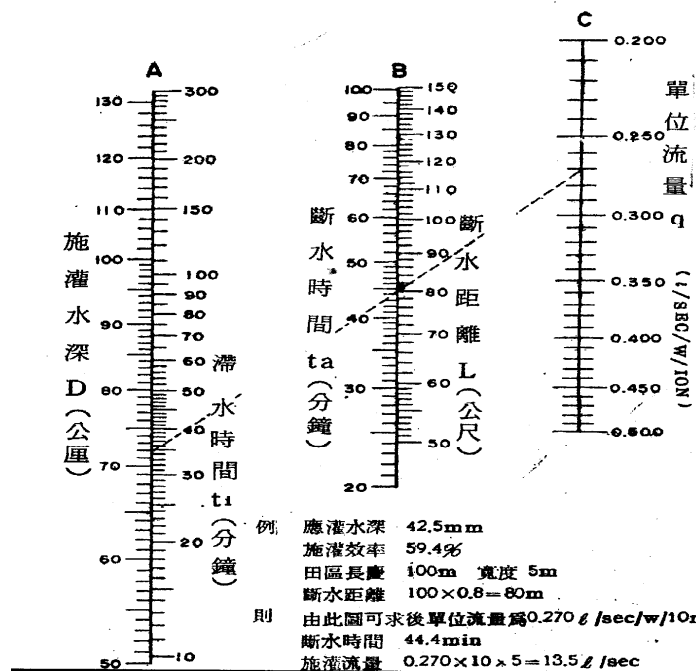


圖 3-6 砂質壤土埂間灌溉施灌水深、斷水距離及單位流量關係圖

3.5 臺灣水稻灌溉特性

為因應乾季時水量不足現象，臺灣水稻採用輪流灌溉（rotational irrigation），簡稱為“輪灌”。為根據用水計畫，在適當時期（適時）以適當之水量（適量）按照順序（依序）供水之灌溉方法。多用於水稻灌溉，依實驗其用水量將較自古以來所習用之繼續灌溉（continuous flow irrigation）方法節省用水 17%~50%，而不減少水稻之單位面積產量。輪灌是間歇灌溉法（intermittent irrigation）的一種。依其給水方式，可分為標準式輪灌、精密式輪灌和大區輪灌三種：

一、標準式輪灌

先劃分輪區，原則上以每 50 公頃為一個輪區，且每一輪區設一個水門和量水設備，輪區內劃分若干單區（一般設有五個單區），每一單區約 10 公頃。各單區內設單區配水箱和小給水路，或補助水路，以便各田坵均能直接引水灌溉。執行輪灌時，集中輪區應得的給水量，依單區順序輪流給水，週而復始。單區的給水順序和給水時間，是由下而上，由左而右，按土壤性質、實際面積、稻作需水量和給水量損失程度，決定供水多少時間。為求達到執行順利，宜統一品種，各輪區應設置共同秧田，和組織共同工作隊，使秧苗生長和整地插秧，均能配合輪灌時間。採用公灌制度，農戶不需自己看水，這是臺灣推行的輪灌制度，故稱為“標準式輪灌”。因以單區為用水計畫和配水，故亦可稱“小區輪灌”。

二、精密式輪灌

因臺灣地區在農業生產環境與農地結構上，大多田坵崎零狹小，耕地使用分散，農路缺乏且排水不良，灌溉不便，雖增設小給水路，而越田灌溉或排水不良的情形，仍不能避免，因此為求達到綜合性的農場結構改良需要，乃實施農地重劃。

農地重劃的標準規格為配合輪流灌溉所設施之小給水路，排水溝與農路等，均有一定標準，整齊劃一。藉農地重劃，不但水路用地易於解決，而且每坵塊農地均能直接引水，直接排水。於是輪流灌溉可以進一步改善，因此，用水計畫或配水操作，均可依每塊田坵之各次用水因子加予計算，而達成適時適量依序的供水，故稱為精密式輪灌。尤其在長年水源不足或嚴重缺水時採用此法，因各坵塊均臨小給水路，較易實施輪灌，故已完成農地重劃之灌溉系統較適合推動辦理。精密式輪灌之每塊田坵為耕作之最小單位面積，且以長方形為原則，短邊在 25~30m 間，長邊在 100~150m 之間。考慮地形時，其標準如表 3-3。

表 3-3 坵塊形狀一般標準表

地 形 及 坡 度	坵 塊 長 邊 (m)	坵 塊 短 邊 (m)
平坦地 (1/500 以下)	100~150	25~30
緩傾斜地 (1/100~1/500)	100~120	25~30
傾斜地 (1/100 至 1/15 以上)	75~100	20~25

三、大區輪灌

大區輪灌，亦稱為粗放式輪流灌溉，是灌溉水源短缺時的補救辦法，按幹支分渠系統或埤圳別間歇輪流配水的方法，大致可分為：

- 1.在同一河川水源的若干灌溉圳路系統，當其水源水量減少至圳路總灌溉需水量的 70%~80%時，開始實施圳路輪流取水灌溉，以便獲得地區性的平均輸配水量的效果。
- 2.在埤圳內分幹線，或支分線系統，或分段區，實施大區輪灌，即以幹支線，按分水比率，實施間歇輪流配水。因此，大區輪灌可以說是灌溉缺水時期的一種補救配水辦法，因時因地臨時執行。

自提倡輪流灌溉制度後，各農田水利會參照輪灌用水計算方式，計算大區輪灌需水量和配水時間表，當水源水量低於需水量某一程度時，採用此種輪流配水灌溉方法。

第四章 漫灌

4.1 影響因子及使用時機

與埂間灌溉最大不同點為此法以地形情況不同作圍埂灌溉，田埂不相平行，有時依等高線高差每隔 6~13 公分圍埂，故又名等高圍埂（contour check），即為梯田灌溉。一般灌溉之流量較大，地表亦較平坦，如用於黏重土滲漏較低之土壤，大流量覆蓋地表甚快可減少滲漏損失，如用於黏重土滲漏較低之土壤，延長水流覆蓋地面之時間，亦可得良好之效果。

何種土質適合盤灌乃取決於耕種的作物，主要差別在於水稻田與非水稻田或其他作物。稻米種在黏土上是最好的，該土質幾乎全部都是低滲透率的不透水土質。稻米雖亦可以種植在砂質土壤上，但該土質的其滲透率高而無法維持一定水深，這種情形有時候發生在溪谷底部的地方。雖然許多作物能種在黏土上，但盤灌時最好的是砂質壤土，因為它能避免水分到達永久飽和點。粗砂質地則不建議使用盤灌，因其入滲率太高，水分大部份都流失掉。如果土壤有堅硬外殼，那麼也不適合用作盤灌。

許多作物皆適合盤灌。稻米最佳的成長時期是發生於根部浸在水裡的時候，所以漫灌是最適合水生作物之栽培。其他適合漫灌之作物尚有：

牧草類的：紫花苜蓿、江花草。

果樹：香蕉、柑橘。

國外作物如玉薯黍、麥片等。

亦有些如條播作物，如煙草亦可。

盤灌通常不適合無法浸水或不能泡在水中超過 24 小時的作物，而有些作物，例如玉薯黍、樹薯、甜菜及胡蘿蔔，其根及莖部需要寬鬆及排水良好的土壤。

4.2 漫灌配置設計

盤灌計畫的設計不只有其盤灌區域之大小與形狀而已，當然也包括其內耕地的大小與形狀。灌區該是正方形、矩形還是不規則形狀？大小是 10、100、1,000 或是 10,000 平方公尺呢？高度是 10、50 或是 100 公分呢？耕地該適合何種形式呢？地大小主要取決於其地表坡度、土質、現有河川流量的大小（可引至灌區的水源）、灌溉水深及農業實務。

在寬度上最主要的限制是坡度的大小，如果坡度太陡，灌區則宜較窄。

否則太多的地表運動將使得灌區需要加以整平。表 4-1 說明最大之灌區寬度除取決於地表的坡度，其他尚有三個可能影響灌區寬度的因素：

1. 肥沃土壤的深度。
2. 構築灌區的方法。
3. 農業實務。

決定灌區大小不只端賴坡度，土壤之種類及現有河川所能提供之水源也是考量的重點。土壤種類、現有河川水量多寡與灌區大小間之關係如表 4-2。上述為一原則性之決定，但有些是根據以往的經驗來調整某些特殊情形以配合小規模的灌溉條件。

表 4-1 盤灌或梯田寬度之概略值

坡度 (%)	最大寬度 (m)	
	平均值	範圍
0.2	45	35—55
0.3	37	30—45
0.4	32	25—40
0.5	28	20—35
0.6	25	20—30
0.8	22	15—30
1.0	20	15—25
1.2	17	10—20
1.5	13	10—20
2.0	10	5—15
3.0	7	5—10
4.0	5	3—8

表 4-2 不同土壤質地與引灌水量下之灌區面積 (m²)

河川流量 (<i>l</i> /sec)	砂土	砂壤土	粘壤土	粘土
5	35	100	200	350
10	65	200	400	650
15	100	300	600	1,000
30	200	600	1,200	2,000
60	400	1,200	2,400	4,000
90	600	1,800	3,600	6,000

4.3 土壤濕潤型態

適量且規律的在作物的根部供水，對於作物的成長是非常重要的。如果水分不足，表土會變的乾燥，且耕地面積會減少；如果水分太多，則容易造成深層滲漏，尤其是黏土，可能造成永久性的飽和狀態使植物浸死。

想要在作物的根部獲得均勻的水分，則灌區必須整平，且必須能快速供水。圖 4-1 顯示出理想的濕潤灌溉型式：地盤之整平且由適切的河川流量供水。由於根部不可能同時且完整的濕潤。靠近田間渠道的部份灌區，與水源相銜接的一邊總是比另一邊的末端區域有較多之水流時間，因此滲漏損失會發生在靠近田間渠道的地方。(假設另一邊可獲得足夠水量)。

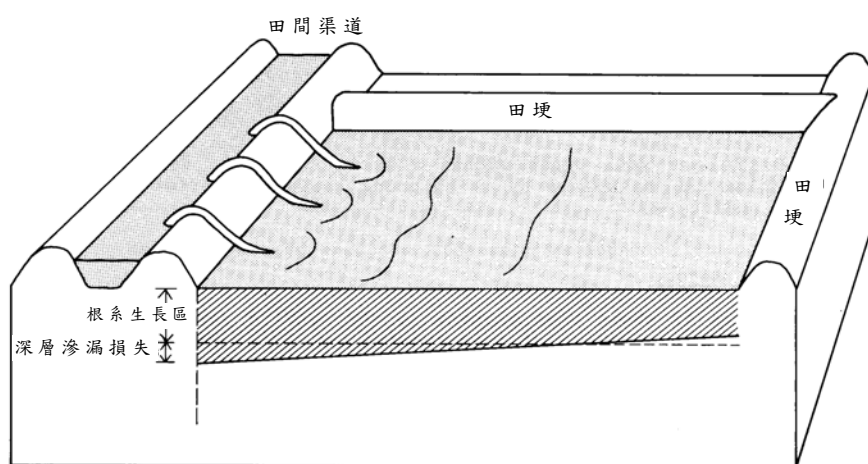


圖 4-1 理想之濕潤灌溉型式

1.不良的濕潤灌溉型式

導致土壤不夠濕潤之因素：不理想的自然條件，例如緊密的下層土或同一區塊內有不同類型的土壤。不周詳的規畫，例如地表不夠平整。不妥善的管理，例如河川供水量不正確（太多或太少）。

2.不理想的自然條件

緊密的下層土有時在會發生在地表下 30~60 公分處，入滲的水分經過這一層時會變的很慢，而且有堆積在該層之傾向，如圖 4-2，該層會形成所謂的“棲水層”，這可能會導致浸水現象的發生。這種情形對水稻栽作是有益的，但對於其他作物來說卻是壞處。此密實的下層土可以藉著犁耕深的畦溝而加以翻鬆。

灌區內不同的土壤類型使得水分分佈不均勻，不斷的調整田埂與鬆土可使土壤攪拌而漸呈一致性。

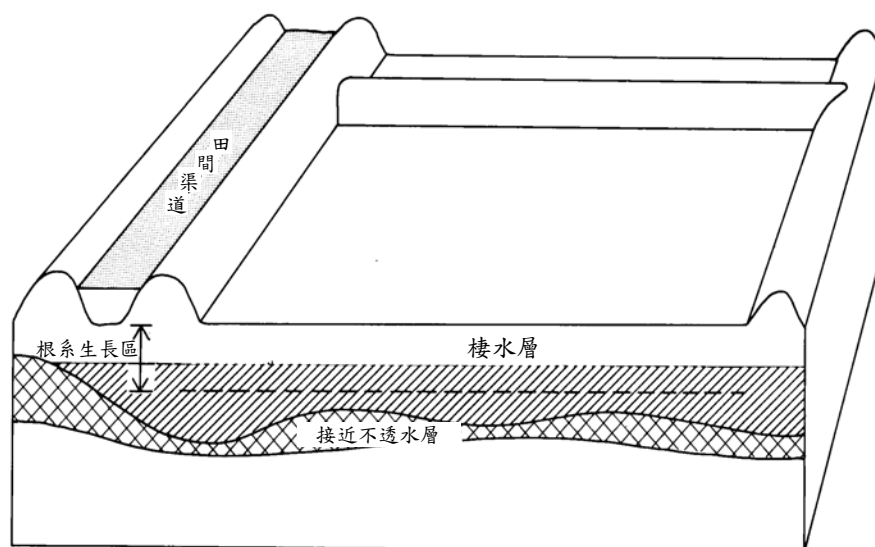


圖 4-2 接近邊界時灌溉水分分佈示意圖

3.不周詳的規畫

圖 4-3 顯示出在不平整的地表之下，某些根部的地方無法吸收足夠的水分，而且較低的部份可能會積水、較深的地方會發生滲漏。作物在乾燥的環境中吸收不到足夠的水分會開始凋萎；在過於潮濕的環境之下，其養分會從根部被帶到土壤下，尤其是黏土質的情形更嚴重，作物可能會因此而淹死。然而，解決這個問題的方法就是必須小心翼翼的做好整地工作。

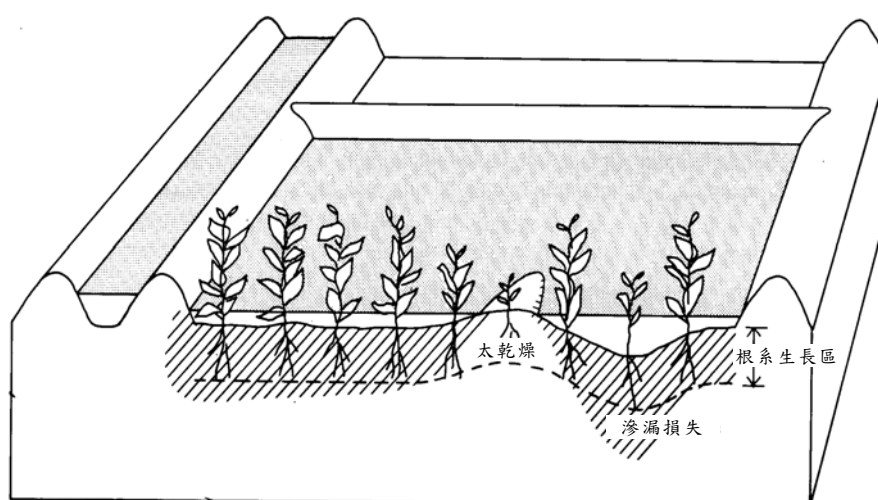


圖 4-3 不良區域之濕潤型態

4.不妥善的管理

圖 4-4 顯示出當灌溉速度太慢時，最先灌溉的區域其灌溉的時間最長，吸收的水分太多。這種現象造成滲漏損失，土壤中的養分被沖洗掉並且使得植物淹死。而其他區域則是太乾了。解決這個問題的方法就是：增加引灌水量，使得灌區能快速的充滿水，或者是將區塊劃分的更小而適合較小的引灌水量。

圖 4-5 顯示出灌溉水不足以填滿根深部份之土壤，稱為“地下灌溉”這是水量估算太少所造成。再多施灌幾天便可補足水分。在灌溉不足的區域不會有任何的滲漏，雖然這種方法蠻有效率地，但必需經常灌溉以供作物所需。然而持續性的灌溉不足現象最後會使得根部成長受到限制，而且作物可能受到灌溉的延期，就好比說當水源短缺時，給水系統則會故障或停擺。圖 4-6 則相對顯示超量灌溉之土壤入滲示意圖。

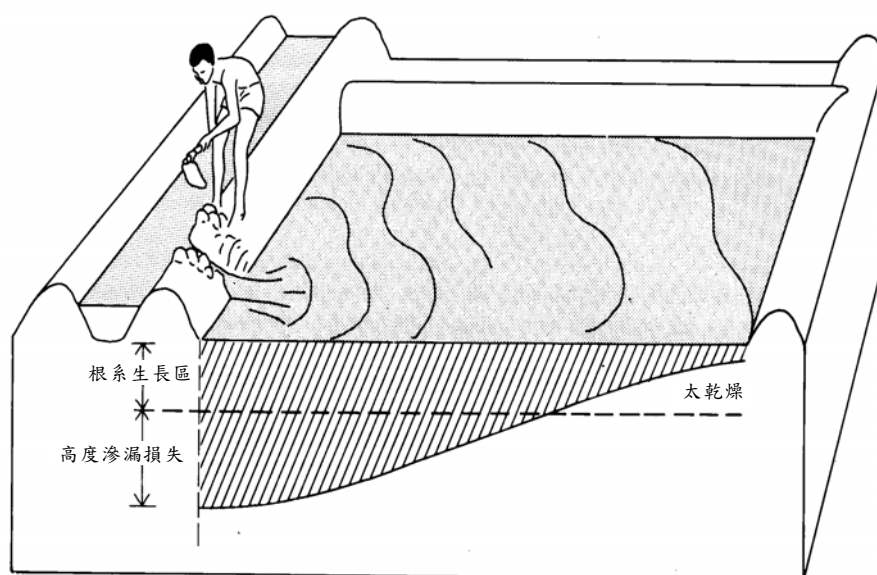


圖 4-4 水流不足時之濕潤型態

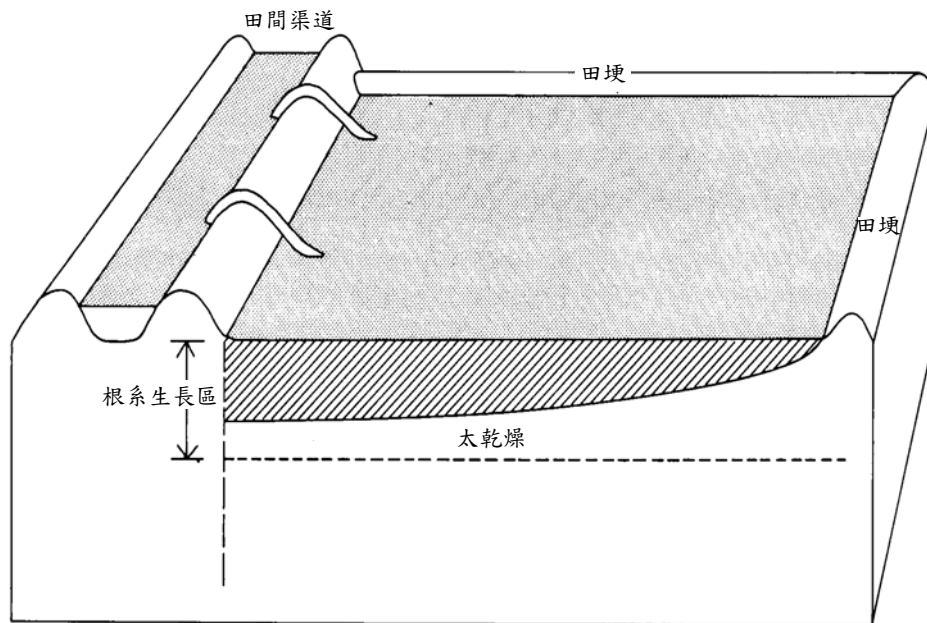


圖 4-5 地下灌溉示意圖

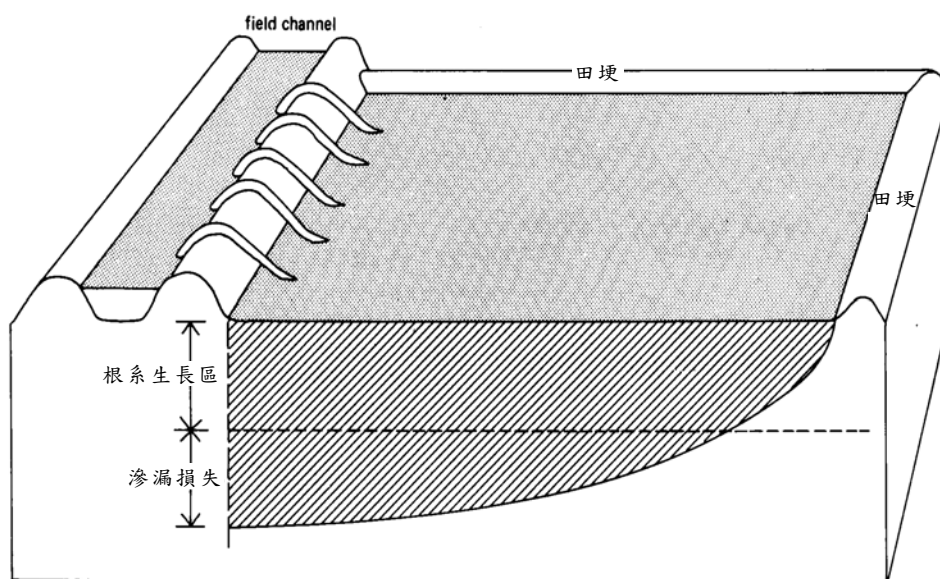


圖 4-6 超量灌溉示意圖

4.4 漫灌灌溉效率評估

實施漫灌灌溉效率評估之示意圖如圖 4-7 所示，其步驟如下：

步驟 1：典型的水盤灌溉或畦溝灌溉需考慮耕地大小、土壤類別及作物、水盤大小或畦溝長度可以卷尺量測之，並記錄在資料表上。

例如：

試驗日期：11,4,1987

水盤大小：24 (m) ×15 (m) =360 (m²)

作物：花生

純灌溉水深：45 mm

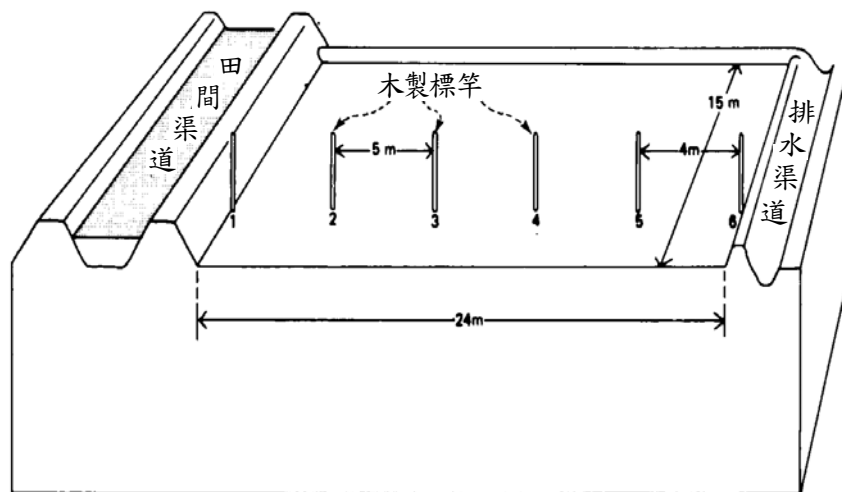


圖 4-7 5 公尺木樁間距佈置示意圖

步驟 2：在每隔 5 到 10m 處放置標桿（如圖 4-7），並記錄標桿位置於數據表上（數列 2）。

步驟 3：完成數個入滲試驗後，並作入滲曲線，作成入滲曲線圖（如圖 4-8）。

步驟 4：灌溉開始時，使用相同水量及相同灌溉時間，並記錄水到達每根標竿（1—6）前所需要時間，此稱為水流前進時間（數列 3）。

步驟 5：記錄每一標桿其水滲入土壤所需時間，此稱為退水時間（數列 4）。

步驟 6：計算每一標桿所接觸時間，此接觸時間則為全程水歷時與退水時間差（數列 5）。

步驟 7：計算達到每一標桿高度的用水量，使用入滲曲線圖（如圖 4-8）（數列 6），並把資料記錄於記錄表上，如下列範例。

1 編號	2 水流距離 (m)	3 水流前進時間		4 水流退水時間		5 停止時間 (min)	6 施灌水深度 (mm)
		計時 (hr、min)	開始時間 (min)	計時 (hr、min)	開始時間 (min)		
1	0	11	00	0	11	50	65
2	5	11	04	4	11	50	63
3	10	11	08	8	11	50	61
4	15	11	11	11	11	51	60
5	20	11	20	20	11	52	56
6	24	11	30	30	11	54	46
						平均值	59mm

步驟 8：田間施灌效率之決定

田間施灌效率，即指農作物的有效用水量，假定沒有逕流損失，其田間施灌效率等於所需要之灌溉深度 (mm)，即為需灌深度除以實際平均灌溉深度 (mm)，再乘以 100%，如下式：

$$\text{田間施灌效率 (\%)} = \frac{\text{需要灌溉深度 (mm)}}{\text{實際灌溉深度 (mm)}} \times 100\%$$

平均施灌水深度為 (65 + 63 + 61 + 60 + 56 + 46) / 6 = 59 mm

需灌深度為 45 mm

田間施灌效率 (%) = 45 / 59 × 100 = 76 %

平均深層浸透損失深度為 59 - 45 = 14 mm

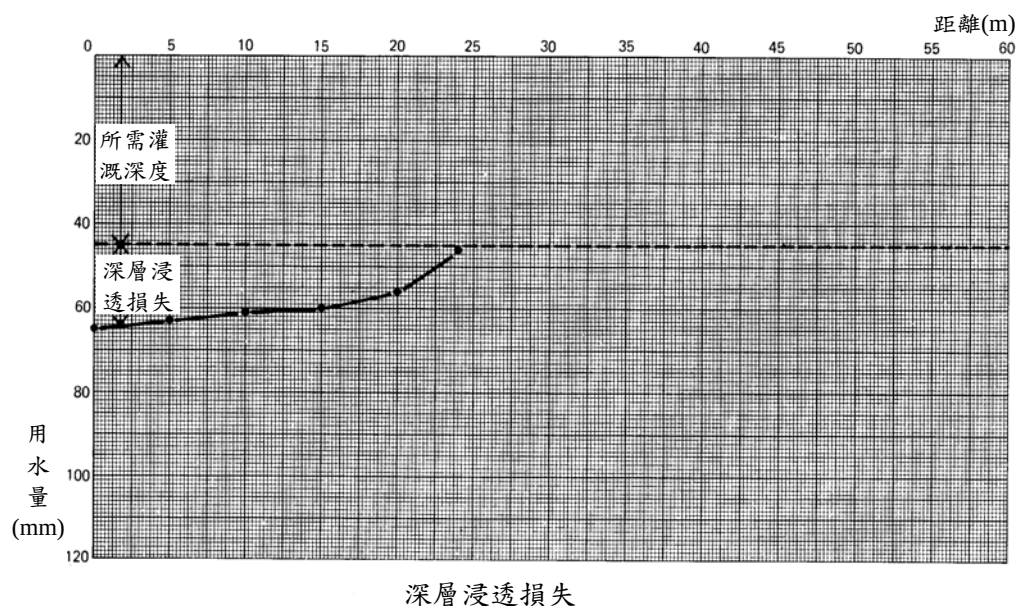


圖 4-8 深層浸透損失曲線圖

灌溉成效記錄表

試驗日期：

土壤種類：

水盤大小： $(\text{m}) \times (\text{m}) = (\text{m})^2$ 或畦溝長度 (m)

作物：

純灌溉深度：

1 編號	2 水流距離 (m)	3 水流前進時間		4 水流退水時間		5 停止時間 (min)	6 施灌水深 (mm)
		計時 (hr、min)	開始時間 (min)	計時 (hr、min)	開始時間 (min)		
							平均值

第五章 噴灑及微噴灑灌溉

5.1 影響因子及基本資料

噴灑灌溉是農田水利新技術之一，乃將灌溉水如降雨般地向地面散佈，使作物獲得灌溉水的滋潤，以達增產之目的。噴灑灌溉有下列之優點：

- 1.節省灌溉用水量，促進水資源有效利用；
- 2.適時供水灌溉，增加作物產量，提高作物品質，增加經營收益；
- 3.省工、省時，降低灌溉成本；
- 4.提高灌溉均勻度及灌溉效率；
- 5.適用於所有地形，不需整地；
- 6.增加灌溉面積，促進邊際土地開發利用；
- 7.操作方便，管理簡易，灌溉時可兼做其他田間工作；
- 8.可調節產期，增加根系發達及延長作物壽命；
- 9.減少土壤沖刷及雜草滋生；
- 10.施肥、噴灑農藥方便，可多目標利用及自動化管理；
- 11.可以減少地表積存鹽份；
- 12.可以兼作防凍害或高溫等多目標使用。

雖然有上述之優點，但也有下列之缺點：

- 1.設施成本及營運管理費高；
- 2.易受風干擾，影響灌溉均勻度；
- 3.噴嘴易阻塞；
- 4.固定式設施會妨礙田間耕作，而移動式設施則須花費較多勞力。
- 5.施工及維護需要較高之技術。

噴灑灌溉規劃設計前應具備之基本資料有下列各項：

- 1.地形圖：地形圖為噴灑灌溉規劃設計前最重要之基本資料之一，其比例尺以 1/5,000~1/10,000 為適，等高線之間隔約 1.0~2.0 公尺。有地形圖後，即可決定抽水機之位置、灌溉區之區分、主支管排列及有效水頭之估算等。如灌溉區為一山坡地，普通主管為橫越等高線排列而支管則順等高線排列。
- 2.土壤：包括土壤質地之調查、地層深度之觀測、肥力之測定、PH 及鹽分含量等，皆為噴灑灌溉設計前必須之土壤資料。如為大灌溉區之土質調查每 1~10 公頃選取調查點一處，每隔 20 公分垂直採取土樣一個至作物根系深度為止，然後作以上各項分析與測定。
- 3.土壤水分及各常數之測定，利用調查土壤時所採取之土樣測定孔隙率、田間容水量、凋萎點、假比重等，並分析土層中可蓄積水分，以作計算灌溉期距與灌溉時間之根據。表 5-1 為以上各土質之約數，如無測定資料亦可作噴灑灌溉設計之根據。

表 5-1 各種土質土壤水分常數及每呎土層蓄積水深

土 質	孔隙率 %	假比重 As	田間容水量 (Fc) %	凋萎點 (Wp) %	有效水分 (Pw) ⁽¹⁾ %	容積比 (Pr) ⁽²⁾	每 d=30 公分 土層之水深(D) ⁽³⁾ mm
砂 土	38	1.65	9	4	5	8	25
砂 壤 土	43	1.50	14	6	8	12	36
壤 土	47	1.40	22	10	12	17	50
黏 壤 土	49	1.35	27	13	14	19	58
淤質黏土	51	1.30	31	15	16	21	64
黏 土	53	1.25	35	17	18	23	69

備註：(1) $Pw = Fc - Wp$

(2) $Pr = Pw \cdot As$

(3) $D = \frac{Pw}{100} \cdot As \cdot d$

- 4.入滲率之測定：入滲率為噴雨強度之根據，與土質、土壤結構、土壤水分等因素有關，故設計前亦須於灌溉區中測定，凡不同土質地區皆須觀測，每種土質至少要三重複，求其平均值，表 5-2 為各種不同土質之基本入滲率。

表 5-2 各種土質之基本入滲率（公厘/時）

土 質	土壤結構良好有機質含量高	土壤結構差有機質含量差
粗 砂	19~25	13
細 砂	13~19	9
細砂質壤土	13	8
淤質壤土	10	7
黏質壤土	8	6

5.氣象調查：包括雨量、連續乾早日數、蒸發、風速、風向等資料，前三者為設計噴灌期距及每次灌溉水量之依據，風速、風向為噴灌系統佈置之準繩。

6.水源調查：包括地表水源、地下水源、水質、水量與取水之難易及經費等。

7.作物種類與根深，各種作物之需水量與根系深度之分佈亦為噴灑灌溉設計之因子，設計前亦應妥為調查。

綜合以上七項資料所考慮之噴灑灌溉設計因素有下列九點：(1)有效用水量；(2)噴水強度；(3)噴水均勻度；(4)噴灑水量與頻度；(5)灌溉區之相對高度；(6)壓力水頭；(7)噴灑系統水頭損失；(8)噴灑系統佈置；(9)噴灑灌溉之經濟價值。

5.2 設計基本原則

一般噴灑灌溉系統之設計配置大略如圖 5-1 所示，各重要元件包括：

1.水源及加壓設備：

噴灑灌溉需要壓力來完成，除了少數有天然落差可以利用之情況外，大部份之噴灑灌溉系統均需要設置加壓設備，如水中含有雜物，則需另外加設沉砂及過濾之設施。

2.主管：指由水源送水至田區的一段管線，有時採地下埋管方式。

3.支管：指由主管至噴頭間之管線。

4.噴頭

在噴灑灌溉系統之設計有三個間距長度十分重要，描述於下：

- (1)主管間距：即兩隻相臨支管間之距離，通常以 S_m 表示。
- (2)支管間距：即兩個相臨噴頭間之距離，這個常度除了中央轉軸系統外，其它的噴灑灌溉系統通常維持定長，以 S_l 表示。
- (3)噴灑直徑（又濕潤直徑）：即於設計之操作壓力下，噴出的水可以潤濕之圓形區域，通常以 D_m 表示。

噴灑系統配置設計之基本原則及步驟，包括如下：

1. 調查設計所需之基本資料，包括水文氣象、水源水質、地形、土壤、動力來源及種類，作物及耕地作業等項目。
2. 決定一次施灌水量。
3. 決定設計用的灌溉率或灌溉期距。
4. 決定系統容量。
5. 決定最佳施灌率。
6. 噴頭之選定。
7. 決定噴頭間隔、出水量、噴嘴尺寸，操作壓力等，以符最佳灌溉效率。
8. 決定噴頭數及操作方式，並考慮符合系統的需水量。
9. 噴灑系統幹支線佈置。
10. 作必要的最後調整，以符合佈置條件。
11. 噴灌支管之設計，決定支管之所需管徑及管長及每條支線之最大總需水壓力。
12. 副管及主管之設計，決定所需尺寸。
13. 檢討幹線主管尺寸對動力經濟與否。
14. 決定最大及最小操作條件。
15. 選擇在操作條件範圍內具有最大運轉效率之抽水機及動力設備，水源工程及調整池之設計。
16. 準備平面圖，進程表及操作使用說明書，以供水利會及農民營管理及操作之用。

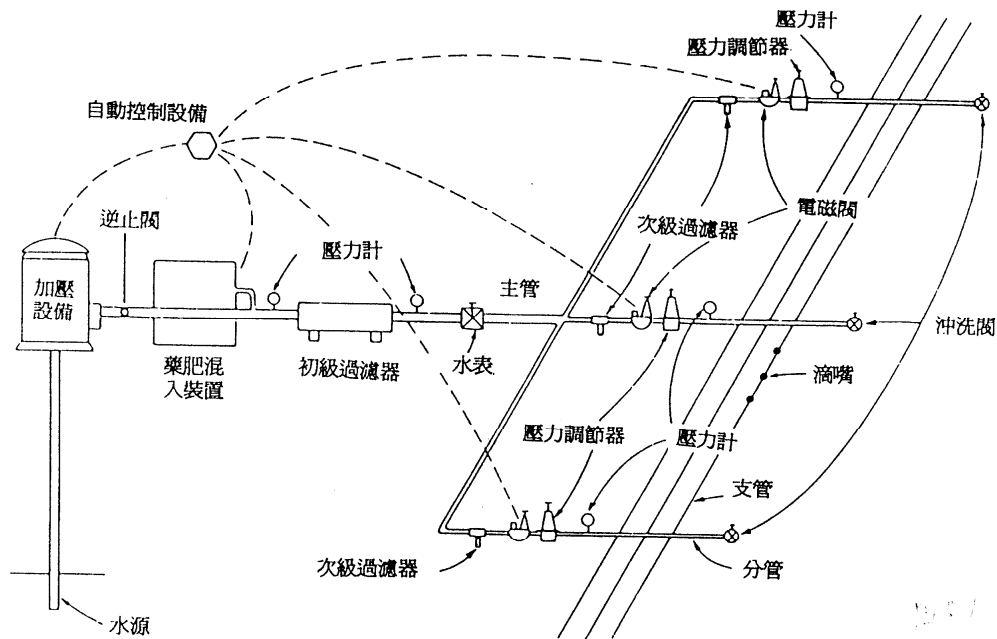


圖 5-1 噴灑灌溉系統配置示意圖

噴灑系統設計中，包括：噴灑均勻度，施灌率，灌溉期距，系統容量等均為設計中應考慮事項，茲概述如后：

一、Christiansen 均勻度係數 (Uniformity Coefficients)

噴灌水量在地表分佈均勻程度之係數，一般以 Christiansen 氏所提出之下列數學式表示：

$$UC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|Xi - \bar{X}|)}{(n\bar{X})} \dots\dots\dots(5-1)$$

式中：

UC：Christiansen 均勻度係數（以小數表示）

Xi：第 i 個量筒中之水量（mm）

$\bar{X}$ ：所有量筒之平均累積水量（mm）

n：量筒之個數

二、施灌率（application rates）

設計施灌率之定訂以不造成地表逕流為原則，其大小應在土壤基本入滲率及蒸發率之間，大於土壤入滲率則會形成地表逕流，小於蒸發率

則所噴之水量無法到達地表。設計之施灌率可以依土壤質地、氣候狀況、地形及作物對水份之敏感度等因子來決定，一般粗施灌率（gross application rate）可以下式表示：

$$\text{施灌效率} = (\text{灌溉水蓄積於作物根系內之水量} / \text{噴灌水量}) \times 100 \dots (5-2)$$

三、灌溉期距

灌溉期距對噴灑灌溉系統設計是十分重要之項目，其長短決定於土壤保水力、根層深度、允許土壤水份消失量及施灌效率。

$$Tad = Tam \times Ad \times Dr \dots (5-3)$$

式中：

Tad ：總允許土壤水份消失量（mm）

Tam ：總有效水份（mm/m）

Ad ：允許土壤水份消失率（以小數表示）

Dr ：根層深（m）

$$Tam = Fc - Pwp \dots (5-4)$$

Fc ：田間容水量（mm/m）

Pwp ：永久凋萎點（mm/m）

因此，灌溉期距可以下式估算：

$$Ti = Tad / Etp \dots (5-5)$$

式中：

Ti ：灌溉期距（天）

Etp ：尖峰蒸發散率（mm/天）

所謂允許土壤水份消失率是一灌溉管理之標準，即表示於施灌之前允許之土壤有效水份被使用之比率，一般依作物之耐性而定：耐旱或深根層作物用 67%，一般作物用 50%，不耐旱或淺根層作物則以 33% 為基準。

四、系統容量

所謂系統容量，即指於所訂之施灌期距內，能灌完某一設計區域面

積的系統設計容量。

$$Q = 2.778 \times ig \times A / (Nop \times Top) \dots\dots\dots(5-6)$$

式中：

Q：系統容量（升/秒）

ig：粗灌水深（mm）

A：總面積（ha）

Nop：每一灌溉周期天數

Top：每天運轉時數

n：噴頭數 = Q / q （ q = 噴嘴流量）

5.3 管路水理設計

噴灑灌溉之配水系統設計乃指主管及支管部份之配置，其配置需考慮田間之地形狀況及管路之水理。

5.3.1 主管

一、總動力水頭（Tdh）

$$Tdh = Hop + Hf + Hfp + Hz + V2g \dots\dots\dots(5-7)$$

式中：

Hop：噴頭操作壓力（m）

Hf：由抽水機至噴頭之摩擦損失（包括接頭次要損失）（m）

Hfp：抽水機吸水管部份之摩擦損失（m）

Hz：由水源至噴頭處之高程度（m）

V2g：流速水頭（一般可以省略）

抽水機必需能提供 Tdh 以使系統順利運轉，若主管採用較大管徑，則摩擦損失減少可使操作成本降低，但初期之管路投資將提高，反之若採用較小之管徑，則初期投資額小，但日後之操作費用將是沉重的負擔，因此主管管徑之設計，應在初期之設備投資及日後之操作成本間取得平衡。此外若系統中有一小區域因地形特別高或須要較其它區域之操作壓力高出甚多，則應以加壓抽水機（booster pump）作局部加壓以降低能源費用。

二、支管入口處之設計壓力

設計壓力之計算是由噴頭往回算，且必需以整個系統中運轉壓力最小之噴頭（一般又稱作 Critical 噴頭）作為起算之基點，除非有中央隆起之地形，一般為最後一隻支管的最後一個噴頭。支管入口處之設計壓力為：

$$H_m = H_a + [0.75(H_f + H_e) + H_r] 9.807 \dots \dots \dots (5-8)$$

式中：

H_m ：支管入口處之設計壓力（kPa）

H_a ：噴頭之設計壓力（kPa）

H_f ：支管內之摩擦損失（m）

H_e ：入口處至（Critical）噴頭間之高程差（m）

H_r ：提升管（raiser）、豎管高度（m）

0.75：以支管中點處壓力為平均壓力之校正係數

因為一般所謂操作壓力是指噴頭出口處之壓力，所以豎管長度必需於上式中考慮，表 5-3 為一般使用之豎管高度及管徑之參考值。

表 5-3 豎管高度及管徑

豎管管徑		豎管高度	
cm	in	cm	in
1.27	1/2	7.6	3
1.90	3/4	15	6
2.54	1	30	12
7.6	3（噴槍）	90	36

5.3.2 支管

支管設計最重要之原則是不要讓支管內各點之壓力相差太多，因為壓差太大會影響支管內各噴頭流量之均勻度，進而影響全系統之效能，一般之設計準則是支管內之壓差不得大於 $\pm 20\%$ ，而各噴頭流量差不得大於 $\pm 10\%$ 。因此支管中兩個臨界（critical）噴頭間之最大允許水損失為：

$$HL = (\theta \times H_a - H_e) / L \dots \dots \dots (5-9)$$

式中：

HL：最大允許水頭損失 (m/m)

θ ：最大允許壓差比

Ha：噴頭設計壓力 (m)

He：兩端之高程差 (m)

L：兩端之距離 (m)

支管之水理和一般之管流稍有不同，支管內因延線有許多噴頭取走部份流量，因此其內之流量延流動方向遞減，為對此種狀況加以分析，作了下面三個假設：

- a. 支管上每一噴頭之間距均一樣。
- b. 支管上每一噴頭之流量均一樣。
- c. 所有進入支管之流量最後均由噴頭流出。

Hazen-Williams 公式為常用之管流分析公式：

$$hf = k \times L \frac{(Q/C)^{1.852}}{D^{4.87}} \dots\dots\dots(5-10)$$

式中：

hf：摩擦損失

k：換算因子

L：管長

Q：流量

C：管材之 Hazen-Willian 摩擦係數

D：管徑

支管內之摩擦損失可由 Hazen-Willian 公式推算：

$$hac = F (hf) \dots\dots\dots(5-11)$$

式中：

hac：實際之摩擦損失 (m)

F：Christiansen's 摩擦係數

上式中之 Christiansen's 摩擦係數和支管中之噴頭數有關，若第一個噴頭和支管入口處之距離等於設計之噴頭間距（S1）時：

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^{0.5}}{6N^2} \dots\dots\dots(5-12)$$

式中：

N：支管上之噴頭數

m：計算摩擦損失時使用之公式中流速項之指數值

Scobey 公式 $m=1.9$ （如表 6-2 所示）

Hazen-William 公式 $m=1.852$ （如表 6-2 所示）

Darcy-Weisbach 公式 $m=2.0$ （如表 6-2 所示）

若第一個噴頭和支管入口處之距離等於設計之噴頭間距之一半（0.5 S1）時：

$$F = \frac{2N}{2N-1} \left(\frac{1}{m+1} + \frac{(m-1)^{0.5}}{6N^2} \right) \dots\dots\dots(5-13)$$

5.4 實例介紹

本章節介紹設計 40 公頃柑園，栽植間隔 7m×4m 之微噴灑器灌溉系統之設計實例，程序包括如下：

1. 純灌溉水量之決定

近代的灌溉計畫僅利用根層內有效水分之一部分。若利用全部有效水分時，土壤之水分張力會升高，以致降低收穫量。柑橘園（基本數據如下：柑橘根深 1,200mm、 $F_c=10\%$ 、 $W_p=4.25\%$ 、 $A_s=1.6$ ，所以，以容積%表示為 $(10-4.25) \times 1.6=9.2\%$ ，有效水深 $d=9.2 \times 1,200/100=110.4\text{mm}$ ）灌溉喜用較低之水分張力，而微噴灑器以 40%（已知值）有效水分作灌溉計畫已被廣泛採用。因此，有效水分量 110.4mm（已知值，如上述）經下式修正而得純灌溉水量：

$$\frac{110.4\text{mm} \times 40\%}{100\%} = 44.16\text{mm}$$

2. 實施灌溉水量

在微灌溉時，僅施灌田區之 70%（已知值），故其實純灌溉水量如下：

$$\frac{44.16 \times 70\%}{100\%} = 30.9\text{mm}$$

3.實粗灌溉水量

為決定最後之灌溉水量，必須考慮適用效率。當滿足下述條件時，微灌溉之適用效率可達 95% 以上，即(1)單位面積灌溉水量不超過預定之限度。(2)附方霧化裝置之微噴灑器分佈，隨著與噴頭距離而逐漸降低。(3)清除會妨礙噴水之枝葉。為安全計，採用適用效率 90% 時，實粗灌溉水量如下：

$$\frac{30.9\text{mm} \times 100\%}{90\%} = 34.3\text{mm}$$

4.灌溉期距之計算

計算灌溉期距，係採用實純灌溉水量，而不考慮適用效率。

$$\frac{30.9\text{mm} \text{ (實純灌溉水量)}}{4.4\text{mm} \text{ (日消耗水量)}} = 7\text{天 (最低)}$$

5.灌溉期距之決定

考慮灌溉設備故障及假日休息，保守決定灌溉期距。在比例，採用 1 天之餘裕，故其灌溉期距為 6 天。

6.日需水量

灌溉期距 7 天修正為 6 天後，其實粗灌溉水量修正如下：

$$\frac{34.3\text{mm}}{6\text{天}} = 5.72\text{mm/day} \text{ (} 57\text{m}^3/\text{ha} \text{)}$$

將此值帶入灌溉面積，即可決定灌溉系統容量及管路口徑。以灌溉期距 7 天計算之日消耗水量為 4.9mm，而灌溉期距 6 天之日消耗水量為 5.72mm，一次灌溉水量如下式：

$$7\text{天} \times 4.9\text{mm/天} = 34.3\text{mm}$$

$$6\text{天} \times 5.72\text{mm/天} = 34.3\text{mm}$$

7.粗日消耗水量

日粗消耗水量之計算如下：

$$\frac{\text{1次灌溉水量}}{\text{灌溉期距}} = \frac{34.3\text{mm}}{7\text{天}} = 4.9\text{mm}$$

8.系統容量

系統容量計算如下，式中換算係數係將水深換算為每公頃水量之係數。

$$\frac{\text{粗日消耗水量} \times \text{換算係數} \times \text{面積} \times \text{灌溉期距計算值}}{\text{抽水機日操作時間} \times \text{灌溉期距採用值}} = \frac{4.9 \times 10 \times 40 \times 7}{24 \times 6} = 95.3\text{m}^3/\text{hr}$$

註：10 為 mm×ha→m³ 之係數

9.水之消耗與補給

水之消耗量為 40ha×10×4.9mm×7 天 = 13,720m³，而水之補給量為 6 天 ×95.3m³/h×24hr = 13,723m³，兩者一致。

10.栽植間隔

樹之行距為 7m，株距為 4m，故一棟樹之支配面積為 28m²。

11.每公頃株數

$$\frac{\text{ha}}{S_1 \times S_2} = \frac{10,000\text{m}^2}{7\text{m} \times 4\text{m}} = 357\text{株/ha}$$

12.每公頃灌溉水量

$$\text{粗灌溉水量} \times \text{ha} = 34.3 \times 10,000\text{m}^2 = 343,000 \text{ } \ell/\text{ha}$$

13.每株灌溉水量

$$\frac{343,000 \text{ } \ell/\text{ha}}{357\text{株/ha}} = 960 \text{ liter/株}$$

14.每株消耗水量

$$\frac{960 \text{ } \ell/\text{株}}{7\text{天}} = 137 \text{ } \ell/\text{株/日}$$

15.灌溉時數

$$\frac{\text{每株灌溉水量}}{\text{噴頭出水量}} = \frac{960 \text{ } \ell/\text{ha}}{80 \text{ } \ell/\text{hr}} = 12\text{hr}$$

16.全部灌溉次數

$$\frac{\text{灌溉期距} \times \text{日操作時數}}{\text{灌溉時數}} = \frac{6\text{天} / 24\text{hr}}{12\text{hr}} = 12\text{次}$$

全區分成 12 次灌溉（亦即分成 12 小區）

17.每株噴灑面積

$$(\text{支配面積} \times \text{灌溉面積率} / 100\%) = (28\text{m}^2 \times 70\% / 100\%) = 19.6\text{ m}^2$$

18.噴灑直徑

$$(\text{每株噴灑面積} / 0.875)^{1/2} = (19.6\text{m}^2 / 0.875)^{1/2} = 5\text{m}$$

19.微噴灑器之選擇（廠商所提供型錄 catalog 之已知值）

DN-881C 型防霧化器之性能如下：(1)操作壓力：15m；(2)桔色噴嘴操作水壓：30m；(3)桔色防霧化器之噴灑直徑為 4.9m；(4)黃色旋轉架散佈器之噴灑直徑：5m；(5)出水量：80 ℓ/hr。

20.每平方公尺補給水量

$$\frac{\text{出水量} \times \text{灌溉時間}}{\text{單噴頭之噴灑面積}} = \frac{80\text{ ℓ/hr} \times 12\text{hr}}{19.6\text{m}^2} = 49\text{ ℓ/m}^2$$

21.每日灌溉次數

$$\frac{\text{全部灌溉次數}}{\text{灌溉期距}} = \frac{12\text{天}}{6\text{天}} = 2\text{次/天}$$

22.一次灌溉面積

$$\frac{40\text{ha}}{12\text{次}} = 3.33\text{ha}$$

（check 1:以噴頭數 $n = Q / q$ 計算之， $3.33\text{ha} \times 357\text{ 株/ha} \times 80\text{ ℓ/hr} = 95,105\text{ ℓ/hr} \doteq 95.1\text{ m}^3/\text{hr} \doteq 95.3\text{ m}^3/\text{hr}$ ）

（check 2：以（5-6）式計算之， $2.778 \times 34.3 \times 40 / 24 \times 6 = 26,468\text{ ℓ/sec} \times 3,600 \doteq 95.285\text{ ℓ/hr} \doteq 95.3\text{ m}^3/\text{hr}$ ）

23.總株數

$$40\text{ha} \times 357 \text{ 株/ha} = 14,280 \text{ 株}$$

24. 噴灑強度

各噴頭之出水量為 80 ℓ/hr，支配面積為 28 m²，故其噴灑強度計算如下式為 2.9 mm/hr，亦即每公頃每小時之灌溉水量為 29 m³。

$$\frac{80\ell/\text{hr}}{28\text{m}^2} = 2.9\text{mm/hr}$$

25. 實噴灑強度

以噴灑面積除噴頭之出水量即為實際噴灑強度，可和土壤入滲率比較。

$$\frac{80\ell/\text{hr}}{19.6\text{m}^2} = 4.1\text{mm/hr} < \text{表 5-2 所示任何數據，}\therefore \text{O.K.}$$

26. 結果概要

(1)灌溉面積：40 公頃；(2)灌溉期距計算值：7 天；(3)灌溉期距採用值：6 天；(4)噴頭出水量：80 ℓ/hr；(5)系統容量：95.3 m³/hr；(6)粗日消耗水量：4.9mm；(7)一次灌溉水量：34.3mm；(8)根層深度：1.2m；(9)灌溉面積率：70%；(10)全部灌溉次數：12 次；(11)噴灑面積：19.6m²；(12)每公頃灌溉水量：29m³/hr。

第六章 穿孔管及滴水灌溉

6.1 影響因子及使用時機

又稱為放射口或滴水口灌溉，係指使用一條小直徑的塑膠管且管上附有適當之噴嘴，水管以 2~20 l/hr 之低壓流量輸送水量。只提供位在根系四周一小部份土壤之灌溉，並使其潮濕（圖 6-1），滴水系統不同於地表上的噴灌系統，在於灌濕土壤之方式；滴灌系統之應用比起其它種類之灌溉方式，在於需有較多次之灌溉次數（通常每天 1~3 次），這種供水方式正可提供確保土壤之濕潤性，以使植物更加茂盛。

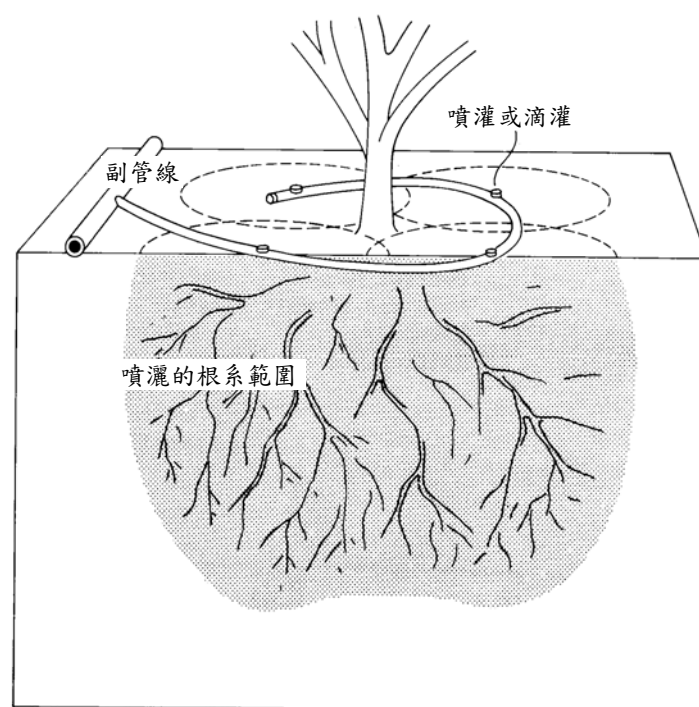


圖 6-1 根系部份濕潤之滴灌系統

滴水灌溉之優點可分下列各點：(1)機動施灌，有益作物生長，可提高產量與品質；(2)經濟使用灌溉水，約可節省 25~50%；(3)減少鹽害，因連續滴水，保持低土壤水分張力，而降低鹽分滲透作用所引起之張力；(4)節省施灌及施肥勞力，灌溉時僅控制首部之制水閥，即可依照計劃實施，施肥也可利用施肥裝置，使可溶性肥料或液肥與灌溉水自動混合施灌，可節省灌溉及施肥之勞力；(5)以低流量率施灌，對土壤之透水性能保持良好條件。滴水灌溉之缺點為對密植作物之田區設施費高、滴嘴易堵塞及管子易被野鼠咬毀等。

在灌溉方法之選擇上並不一定要選用複雜或高技術之方法，而是要由管理、經濟、資源、及技術支援等各層面作一整體之考慮，一般須要考慮到下列各項因子。

- 1.根層土壤之種類及特性。
- 2.地形及整地工程量之需求。
- 3.氣候。
- 4.所需之技術層次及可能之支援能力是否匹配。
- 5.市場之狀況（如材料之供應能力，價格等）。
- 6.整體水資源之考慮：是否要採用用水效應較高之施灌方法。
- 7.經濟及財務上之分析及考量。

本省自民國 60 年最先引進在崎頂砂丘地進行試驗，並持續在山坡地果樹、蔗園、鳳梨園及澎湖地區，分別進行適應性試驗研究。同時也試製一些滴嘴及設備產品。目前，由於滴灌設施費用尚高，滴嘴堵塞問題也亟待研究改善解決，故尚未普遍大面積推廣。惟因其具有特殊優點，在傳統灌溉方法不易達到目的之處，可取代應用。故未來之可能發展，仍頗具遠景。

6.2 設計基本原則

一、系統設備

一個典型的滴水灌溉系統如（圖 6-2）顯示其組成份之順序如下：

1. 抽水機
2. 控制系統
3. 主管及副管
4. 支管
5. 滴水孔或放射孔

抽水機提供適當之壓力將水輸送至各管路系統，控制系統是由閘門和壓力系統所組成，以控制流量之進出，它也有過濾器清理水，普通過濾器的樣式包括篩濾器和將砂分類的濾器，可將懸浮於水中的細微物質清除，更有一些水源控制裝置包含了肥料或營養槽，在灌溉時，緩慢的分配一定量的肥料入水中，這是滴水灌溉優於其它方法的主要優點。

主管、副管及支管可將水輸送至田區裡，管線之材料通常用 PVC 管或是聚乙烯管，且應該埋於土壤下，因為暴露於太陽照射下，容易老化脆化降低品質，支管之直徑通常在 13~32 mm。滴嘴開關通常是來自作物旁的支管，

間隔為多於一公尺以上的距離，對象是一棵樹的單一作物使用一個或多個滴嘴開關。

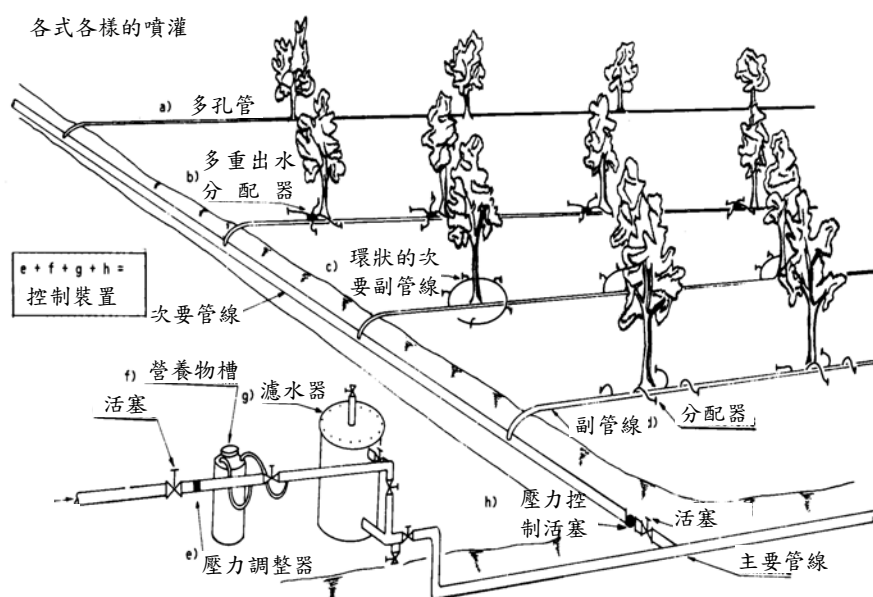


圖 6-2 滴灌系統田間佈置示意圖

二、濕潤灌溉型式

不同之地表灌溉、噴灌及滴灌，僅在土壤根系區域產生不同之濕潤區域，滴灌之土壤濕潤體積較其它灌溉方式低 30%，其濕潤型主要取決於出水量及土壤型態，如圖 6-3 顯示出當流量之改變，在砂土及粘土兩種不同土壤類別其土壤濕潤型態。

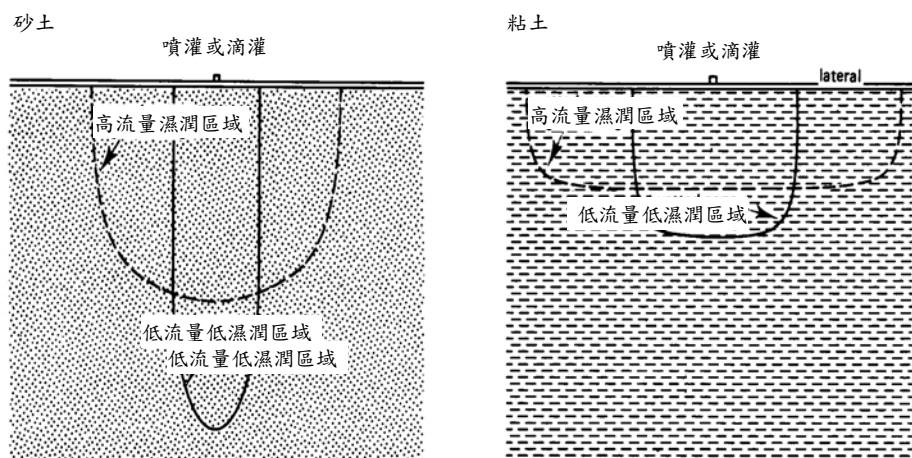


圖 6-3 砂土及粘土於高低流量時土壤之濕潤型式

雖然只有部份根系是濕潤的，但對作物之需水性仍然是重要的，有時滴灌雖然能保存水分降低作物之用水，這是不真實的，作物用水是不能改變的，不管其任何灌溉方式皆是。作物需水時，而能適時提供水量，對作物之成長是有幫助的。

滴灌能降低滲漏量、地表逕流及土壤蒸發，故對水分之保存具有不錯之效果，水分之保存全賴使用者及設備之配合。

滴灌並非完全適用於任何地區之灌溉方式，但若於灌溉水質良好、田間坡度陡峻、水源缺乏、水價昂貴與高經濟作物之區域，滴灌是最理想之灌溉方式。

三、均勻性

滴嘴滴水均勻性之考慮可分為兩大部份，一是各滴嘴處供水壓力之穩定與均勻，另一則是滴嘴生產之品質均勻度。由於滴嘴之流量一般都很小，因此若滴嘴之品質不穩定對於全灌溉系統之施灌均勻度會造成很大之影響。常用之均勻度以下式來表示：

$$U_c = (1.0 - 1.27 \times C_v / n) \times (Q_{\min} / Q_{\text{avg}}) \times 100 \dots \dots \dots (6-1)$$

式中：

U_c ：均勻度（以％表示）

n ：點源（Point Source）方式，為每株作物分配到的滴嘴數
線源（Line source）方式則下式計算但不得小於 1.0
（植株距） / （廠商計算 C_v 時之單位長度）

C_v ：滴嘴生產管之變異系數

$Q_{\min}$ ：系統內滴嘴之最低流量（公升/時）

Q_{avg} ：系統內滴嘴之平均流量或設計流量（公升/時）

一般設計之 U_c 約在 75%至 95%之間，依使用之滴嘴種類、作物之植株距及地形狀況而定，一般植株距越大，地形越均勻 U_c 越高。而點源較線源之 U_c 大。表 6-1 表示乾燥地區滴嘴均勻度之設計標準。

表 6-1 乾燥地區滴嘴均勻度之設計標準

滴嘴種類	植株距	地形	Uc
點源	> 4 公尺	均勻緩坡 (<2%)	90-95
		稍陡坡 (>2%)	85-90
	< 4 公尺	均勻緩坡 (<2%)	85-90
		稍陡坡 (>2%)	80-90
線源	< 4 公尺	均勻緩坡 (<2%)	80-90
		稍陡坡 (>2%)	75-85

6.3 水理設計

一、操作壓力和滴嘴流出量之關係

1. 孔口型滴嘴（完全紊流 fully turbulent）

$$q = 3.6 \times (A) \times Co \times (2gh)^{0.5} \dots\dots\dots(6-2)$$

式中：

q：滴嘴流量（ℓ/hr）

A：滴嘴出流面積（mm²）

Co：孔口係數

G：重力加速度（9.807 m/s²）

H：操作壓力（m）

2. 長流徑型滴嘴（層流 laminar）

$$q = 0.11384 \times A \times \frac{2gHD}{f \times L} \dots\dots\dots(6-3)$$

式中：

f：摩擦係數

L：滴嘴內之流動長度（m）

3. 長流徑型滴嘴（完全紊流 fully turbulent）

$$q = 0.11384 \times A \times \left[\frac{2gD\sqrt{H}}{f \times L} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(6-4)$$

二、支管水理設計

支管水理設計和一般之輸水管不同處，在於輸送之流量延支管之流動方向逐漸減少，雖可以利用一般之公式如 Darcy Weisbach 公式來計算管流之摩擦損失，但必需再乘上一校正因子 F（如表 6-2）。

$$hf = 6.377 (F) f (L) Q^2 (1/D)^5 \dots\dots\dots(6-5)$$

式中：

hf：摩擦損失（m）

L：支管長（m）

f：摩擦係數

F：流量校正因子

Q：支管進口處之流量（公升／小時）

D：支管內徑（mm）

摩擦係數（f）可由下列兩式計算求得，亦可由 Moody Diagram 查得：

層流： $f = 64 / R$

紊流時： $1/\sqrt{f} = 2 \log (D/\varepsilon) + 1.14$

上兩式中：

R：雷諾數（Reynolds Number）

D：管內徑（mm）

ε ：絕對糙度（mm）

滴嘴及接頭之摩擦損失可以等值管長（equivalent length）處理：

管內連接型滴嘴 $Le = 1.0 \sim 3.0 \text{ m}$

管面連接型滴嘴 $Le = 0.1 \sim 0.6 \text{ m}$

表 6-2 計算支管摩擦損失時之流量校正因子

滴嘴數	摩擦損失公式內之流速項之指數		
N	1.852	1.900	2.000
1	1.004	1.003	1.000
2	0.639	0.634	0.625
3	0.534	0.529	0.519
4	0.485	0.480	0.469
5	0.457	0.451	0.440
6	0.438	0.433	0.421
7	0.425	0.419	0.408
8	0.416	0.410	0.398
9	0.408	0.402	0.391
10	0.402	0.396	0.385
11	0.397	0.392	0.380
12	0.393	0.388	0.376
13	0.390	0.384	0.373
14	0.387	0.381	0.370
15	0.385	0.379	0.367
16	0.382	0.377	0.365
17	0.381	0.375	0.363
18	0.379	0.373	0.362
19	0.377	0.372	0.360
20	0.376	0.370	0.359
22	0.374	0.368	0.356
24	0.372	0.366	0.354
26	0.370	0.364	0.353
28	0.369	0.363	0.351
30	0.367	0.362	0.350
35	0.365	0.359	0.348
40	0.363	0.357	0.346
50	0.361	0.355	0.343
100	0.356	0.350	0.338

註：指數＝1.853，適用於 Hazen-William 公式。

指數＝1.900，適用於 Scobey 公式。

指數＝2.000，適用於 Darcy-Weisbach 公式。

6.4 實例介紹

一支管上有 30 個滴嘴，支管內徑 10mm，滴嘴間距 1.0m，第一個滴嘴至支管之距離為 1.0m，地表為水平，壓力調節閥使支管之進水壓維持在 10.0m，滴嘴之出水量和壓力之關係為 $q = 2.813 H^{0.63}$ 。故壓力 $P = 10m$ 時之流量約為每小時 12 公升，設計此一支管各滴嘴流量之差異狀況，計算如下：

$$1. \text{Total } Q = 30 \times q = 30 \times 12 = 360 \text{ } \ell/\text{hr}$$

$$V = Q/A = \frac{360 \times (1/3600) \times (1/1000)}{\pi \times (10)^2 / 4 / (1000)^2} = 1.273 \text{ m/s}$$

$$2. Rn = VD/1,000v = 1.273 \times 10 / 1,000 / 1.0 \times 10^{-6} = 12,730 > 10,000$$

故為 Fully Turbulent Flow

$$1/\sqrt{f} = 2 \log (D/\varepsilon) + 1.14$$

for 平滑之塑膠管 $e = 0.003 \text{ mm}$

$$\therefore 1/\sqrt{f} = 2 \log (10/0.003) + 1.14 \quad \therefore f = 0.0149$$

$$3. hf = 6.377 \times f \times L \times \frac{Q^2}{D^5}$$

$$= 6.377 \times 0.0149 \times 30 \times \frac{360^2}{10^5} = 3.69 \text{ m}$$

$m = 2, N = 30$ 查表得 Christiansen's friction factor $F = 0.350$

實際之 Head Loss $= 3.69 \times 0.350 = 1.29 \text{ m}$

故最後一個 Emitter 之水壓為 $10 - 1.29 = 8.71 \text{ m}$

而其出流量 $q = 2.813 (8.71)^{0.63} = 11 \text{ } \ell/\text{hr}$

$$\therefore \Delta q = (12 - 11) / 12 \times 100\% = 8.3\%$$

PS. 設 Coefficient of Variation $C_v = 0.08$ ，每株作物分配 2 個 em

$$U_c = (1.0 - 1.27 \times C_v/n) \times (Q_{\min}/Q_{\text{avg}}) \times 100$$

$$= (1.0 - 1.27 \times 0.08/2) \times (11/12) \times 100 = 87\% (\text{與表 6-1 所示數據比較})$$

4. Point source, uniform slope, close crop spacing : $U_c : 85 - 90\%$

第七章 入滲率之觀念與試驗

7.1 入滲率之觀念

入滲率 (intake rate)，係指水入滲土壤的速率或速度，即單位時間內水深(單位 mm)滲入土壤的速率，例如水深為 15 mm 所需入滲時間為一小時，則入滲率為 15 mm/hour。

乾燥土壤開始初期水之入滲迅速，此稱為最初入滲率，當水份充滿孔隙中的空氣時，水則由土壤表面緩慢入滲最後達到固定速率則稱為基本入滲率 (basic intake rate)。通常以入滲率之遞減率達到當時入滲率之 1/10 時，稱之基本入滲率，以 I_b 表之，常被應用於土壤性質之分類，是一土壤透水性之指標，不同種類土壤之基本入滲率，如表 7-1 所示。入滲率取決於土壤質地 (土壤顆粒大小)、土壤構造 (土壤顆粒排列)、土壤種類及土層分佈等等。入滲率測定方法以雙圓筒式 (如圖 7-1) 為例，在田間之入滲測定配備包括：鐵鎚 (2kg)、計時器、公升水桶、木造障礙物 (75×75×400)、至少 100 公升水、直徑為 30 cm 和 60 cm 入滲圓筒、測尺 (mm)。

表 7-1 不同種類土壤基本入滲率 (basic intake rate)

土壤種類	基礎入滲率 (mm/hr)
砂 土	30 以下
砂質壤土	20-30
壤 土	10-20

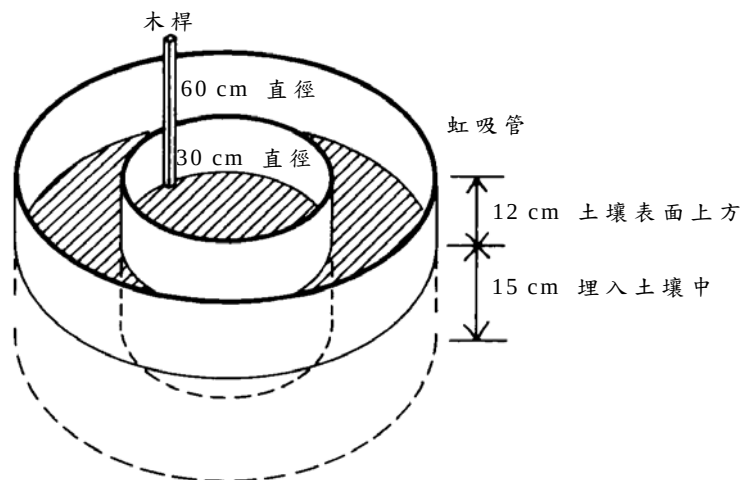


圖 7-1 田間入滲試驗之佈置 (圓筒法)

任何土壤質地之入滲率，都可以透過現場試驗（如圖 7-1 所示）所獲數據，以點繪方式在雙對數座標紙或直角座標紙上圖解之，或公式計算方式解得入滲方程式（或稱瞬時入滲率）、平均入滲率、基本入滲率及累積入滲量。

1.入滲方程式（或稱瞬時入滲率，instantaneous intake rate, I_{inst} ）：一般常用之計算公式有：

$$I = Kt^n \dots\dots\dots (7-1)$$

式中， I 表示入滲率，單位 mm/min 或 mm/hr

K 為常數，依土壤質地、土壤結構等因素而異

t 為時間，以分鐘或小時表之

n 為負值，依土質而異，界於 $0 > n > -1$ 之間

（7-1）式若繪於直角座標系，是呈由左向右遞減之指數型曲線，若繪於雙對數座標系，則是右左向右傾斜之直線。

2.累積水深（accumulated depth）：將（7-1）式積分，則可得（7-2）式為累積水深方程式。

$$D = \int I = \int Kt^n = \frac{K}{n+1} t^{n+1} = Ct^{n+1} \dots\dots\dots (7-2)$$

式中， D 表示累積水深，單位 mm

$$C \text{ 為常數} = \frac{K}{n+1}$$

（7-2）式若繪於直角座標系，則可得一左下右上漸增之曲線（曲面向下）。

3.平均入滲率（average intake rate, I_{ave} ）：將累積水深 D 除以時間 t ，即得平均入滲率 I_{ave} ，即

$$I_{ave} = \frac{D}{t} = \frac{K}{n+1} \cdot \frac{t^{n+1}}{t} = \frac{K}{n+1} t^n \dots\dots\dots (7-3)$$

觀察（7-1）式及（7-3）式，可得 I 與 I_{ave} 之關係，即

$$I_{ave} = \frac{I}{n+1} \dots\dots\dots (7-4)$$

4.基本入滲率（basic intake rate, I_b ）：入滲率之遞減率達到入滲率之 1/10 時，該入滲率定為基本入滲率。依據此定義，經（7-1）式推導可得 I_b ，

$$\frac{dI}{dT} = \frac{d}{dt}(Kt^n) = nKt^{n-1} = 0.1Kt^n$$

$$n=0.1t \quad \text{or} \quad t=10n \quad (\text{以小時計})$$

$$\text{or} \quad t=600n \quad (\text{以分鐘計}) \dots\dots\dots (7-5)$$

將 (7-5) 式代入 (7-1) 式，得

$$I_b = k(600n)^n \dots\dots\dots (7-6)$$

入滲率測定方法及設備：入滲率因地表形狀及灌溉方法不同，測定方法及設備皆不相同。測定方法依目的通常可分為圓筒法 (cylinder method)，畦溝流入流出法 (inflow and outflow method) 與水池法 (ponding method) 以及斜面入滲測定法。各種測定法之主要測定設備及適用灌溉方法如表 7-2 所示。

表 7-2 各種入滲率測定方法其設備與適用灌溉方法一覽表

入滲率測定方法		主要測定設備	適用灌溉方法
圓筒法	蓄水於無底圓筒內，在地表流失之狀態下，測定時間與供給水深之方法。	鐵圓筒、槌打用鐵蓋板、槌、跑錶、鈞尺裝置、定水頭給水筒。	田埂間灌溉、水盤灌溉、噴洒灌溉、等高漫灌法。
流入流出法	測定單位時間給水量與地表流下量之差之方法。	水準儀、量尺、布尺、跑錶、木樁、鏟、量水設備。	畦溝灌溉、等高線畦溝灌溉，較有坡度之田區。
水池法	貯溜灌溉水於畦溝內以測定入滲率之方法。	定水頭給水筒、截水鐵板。	平坦畦溝灌溉，適合於本省輪作田旱作畦溝灌溉(坡度平坦而無出口)。
斜面入滲測定法	入滲量係使用特製裝置循環利用斜面逕流量隨時測定所補充之水量，即為入滲量。	簡易斜面入滲計及自動操作斜面入滲計兩種，均由(1)供水裝置(2)斜面逕流槽(3)回收循環裝置而成。	斜面漫灌或噴洒灌溉。

7.2 現場試驗實例及演算

- 步驟 1：鉋打直徑為 30 cm 圓筒，打入土壤深度為 15 cm，鉋打時用木板保護圓筒以免損害，並使圓筒垂直打入土壤內，並把測尺插入土壤內，而圓筒則露出土壤表面 12 cm。
- 步驟 2：鉋打直徑為 60 cm 圓筒，圍繞於 30 cm 圓筒，並與圓筒同高，其圓筒可保護土壤表面水外漏。
- 步驟 3：開始試驗時，先把水倒入圓筒內直到一定深度 70~100 mm。同時，加水讓水面介於兩個圓環或者是圓筒和邊界相等的深度。進行上面步驟時應須迅速。在邊界中的水或裝入的兩個圓筒是為了防止水深之側漏現象。
- 步驟 4：當試驗開始時，記錄計時器的時間，並且記錄量測尺上的水深。
- 步驟 5：在 1~2 分鐘之後，記錄測尺內部水平面的下降水深；並且再加入水至原先開始試驗時大概的水面高，記錄水面位置，保持外部圓筒的水面高和內部圓筒水面高相似。
- 步驟 6：持續在相同時間間隔試驗，一直到滴入之水面是相同時，在試驗起初時先清楚地朗讀（在每隔 1~2 分鐘時），而後就延長讀數間隔的時間（當間隔為 20~30 分鐘時），至少記錄兩組入滲試驗資料以確定所獲得的結果是正確的。詳細如表 7-3 及其所附記錄表表 7-4。

表 7-3 記錄表說明

第一行：時間讀數，以小時、分鐘及秒表示。
第二行：兩次不同讀數之時間。
第三行：累積試驗時間。
第四行：水位加水前及加水後之水深讀數。
第五行：兩次不同時間所量測水位之差值。
第六行：入滲率（in, mm/min）即為入滲量（第五行）÷不同時間（第二行）。
第七行：入滲速率，以入滲率乘以 60 換算成小時。
第八行：累積入滲量，係指一開始試驗入滲量逐一累積而得。

表 7-4 入滲率記錄表

試驗地區：土壤

種類：壤土

試驗日期：

1 時間讀數 (hr、min、sec)	2 時間差 (min)	3 累積時間 t (min)	4 水位讀數		5 入滲量 (mm)	6 入滲率 (mm/min)	7 入滲率 (mm/hr)	8 累積入滲量 D (mm)
			加水前 (mm)	加水後 (mm)				
14 05 0	開始 0	開始 0		100				開始 0
14 07 0	2	(0+2) 2	92	100	(100-92) 8	(8/2) 4.00	240	(0+8) 8
14 10 0	3	(2+3) 5	93	99	(100-93) 7	(7/3) 2.33	140	(8+7) 15
14 15 0	5	(5+5) 10	89	101	(99-89) 10	(10/5) 2.00	120	(15+10) 25
14 25 0	10	(10+10) 20	84	100	(101-84) 17	(17/10) 1.70	102	(25+17) 42
14 35 0	10	(20+10) 30	89	102	(100-89) 11	(11/10) 1.10	66	(42+11) 53
14 45 0	10	(30+10) 40	95	101	(102-95) 7	(7/10) 0.70	42	(53+7) 60
15 05 0	20	(40+20) 60	92	100	(101-92) 9	(9/20) 0.45	27	(60+9) 69
15 25 0	20	(60+20) 80	91		(100-91) 9	(9/20) 0.45	27	(69+9) 78

7.2.1 入滲率圖解法

依現場試驗實例所得數據，經過些微計算，以表 7-4 第 3 行累積時間及第 8 行累積入滲量，點繪在直角座標紙上，可得如圖 7-2 所示累積入滲曲線，累積的時間（分鐘，第 3 行）是對照累積的滲透（mm，第 8 行）而行成的曲線，可以從圖 7-2 為例子去觀察土壤 70 分鐘灌溉水約為 74 mm。

基本的入滲率可從表 7-4 第 7 行求得，入滲率的單位為 mm/hour，當一個入滲率值是不變時，即已達到基本入滲率，再舉例說明，當基本入滲率是 27 mm/hour 而且在 60 分鐘後到達基本入滲率，則在 69 分後的累積入滲量是 69mm，在第一個 60 分鐘後入滲率是固定的：27 mm/hour，所以在 120 分鐘後（2 小時後）累積的入滲量是 $69 + 27 = 96$ mm（顯示在有曲線的圖），3 小時之後累積入滲量是 $96 + 27 = 123$ mm。當一累積入滲曲線圖已經建立，此時若是知道灌溉時間，即可得知土壤之累積入滲水量為多少，這就是入滲試驗主要之目的。

注意：入滲曲線之決定，通常應在灌前土壤水份之狀態，是乾燥土壤下實施。

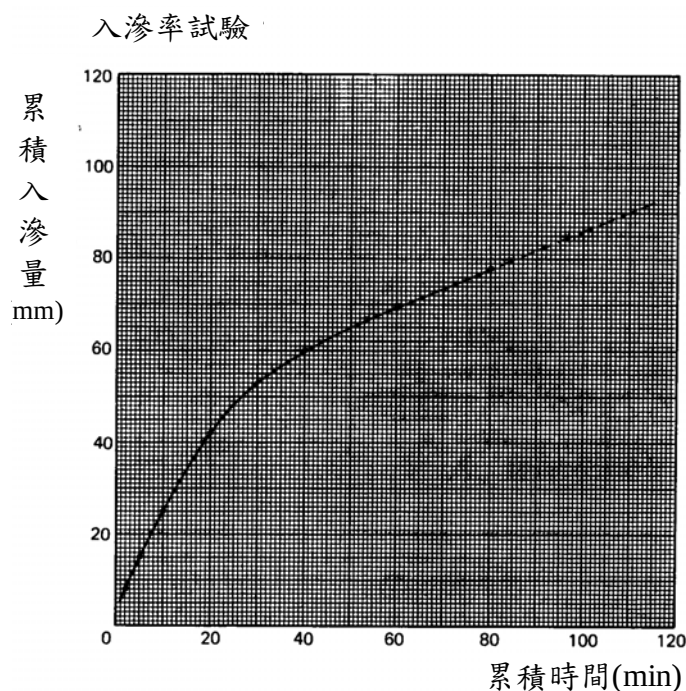


圖 7-2 記錄表實例曲線圖

7.2.2 入滲率公式計算解法

由 (7-2) 式 $D = Ct^{n+1}$ ，等式兩邊取對數 $\log$ ，可得

$$\log D = \log C + (n+1)\log t \dots\dots\dots (7-7)$$

假設： $y = \log D$ ， $a_0 = \log C$ ， $a_1 = n+1$ ， $x = \log t$ ，則 (7-7) 式，可改寫為直線方程式

$$y = a_0 + a_1 x \dots\dots\dots (7-8)$$

以最小二乘法 (least square method) 求解 a_0 、 a_1 ，即以下列聯立方程式 (simultaneous equations) 解之，

$$\begin{cases} \sum y = a_0 N + a_1 \sum x \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{cases} \dots\dots\dots (7-9)$$

解 (7-9) 式，可得

$$a_0 = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N\sum x^2 - (\sum x)^2} = \log C$$

$$= \frac{(\sum \log D)(\sum (\log t)^2) - (\sum \log t)(\sum (\log t \cdot \log D))}{N \sum (\log t)^2 - (\sum \log t)^2} \dots\dots\dots (7-10)$$

$$a_1 = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} = n + 1$$

$$= \frac{N \sum (\log t \cdot \log D) - (\sum \log t)(\sum \log D)}{N \sum (\log t)^2 - (\sum \log t)^2} \dots\dots\dots (7-11)$$

將表 7-4 第 3 行及第 8 行數據，進行（7-10）及（7-11）式計算前之相關演算，如表 7-5 所示，

表 7-5 入滲率公式解法演算表

(3)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
t	D	x=logt	x*x	y=logD	x*y
2	8	0.301030	0.090619	0.903090	0.271857
5	15	0.698970	0.488559	1.176091	0.822053
10	25	1.000000	1.000000	1.397940	1.397940
20	42	1.301030	1.692679	1.623249	2.111896
30	53	1.477121	2.181887	1.724276	2.546965
40	60	1.602060	2.566596	1.778151	2.848705
60	69	1.778151	3.161822	1.838849	3.269752
80	78	1.903090	3.621751	1.892095	3.600826
sum		10.061452	14.803914	12.333741	16.869993
aveage		0.838454	1.233659	1.027812	1.405833

並將結果代入之，得

$$a_0 = \frac{(12.3337)(14.8039) - (10.0615)(16.87)}{8(14.8039) - 101.2328}$$

$$= \frac{182.5869 - 169.7375}{17.1984} = \frac{12.8494}{17.1984} = 0.7471 = \log C$$

∴C=5.587（取 anti log）

$$a_1 = n + 1 = \frac{8(16.87) - (10.0615)(12.3337)}{17.1984}$$

$$= \frac{134.96 - 124.0955}{17.1984} = \frac{10.8645}{17.1984} = 0.632 = n + 1$$

$$\therefore n = -0.368$$

將上述計算所得結果，代入 (7-2)、(7-1) 及 (7-3) 式，即可得本文所列舉入滲率試驗實例之公式解法，

$$D = 5.587t^{0.632}$$

$$I = 5.587 \times 0.632 \times 60 \times t^{-0.368} = 211.9t^{-0.368}$$

$$I_{ave} = 60Ct^n = 60 \times 5.587 \times t^{-0.368} = 335.22t^{-0.368}$$

參考文獻

1. 行政院農委會水利特刊第二十八號,“灌溉排水工程設計”,1978。
2. 行政院農委會,”早作灌溉推廣講義”,1983。
3. 行政院農委會水利特刊第三號,“微噴灌溉”,1984。
4. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二,”灌溉排水原理”,國立編譯館,1984。
5. 農田水利會聯合會,“農田水利技術人員訓練教材—灌溉管理類合訂本”,1984。
6. 行政院農委會水利特刊第八號,“灌溉節水技術手冊”,1995。
7. 行政院農委會,”農田水利會之灌溉排水維護及管理訓練推廣計畫—灌溉方法”,1999。
8. 七星農田水利研究發展基金會,”台灣農業與水利研究發展論叢—灌溉排水設施及管理”,1999。
9. Israelsen, O.W. and Vaughn Hansen, “Irrigation Principle and Practice.” New York, John Wiley and Sons, 1962.
10. Kay, M. “Surface Irrigation: System and Practice.” Bedford, UK., Cranfield Press, 1986.
11. Smith, Stephen W. “Landscape Irrigation—Design and Management. “, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
12. Wynn R. Walker. “Surface Irrigation: Theory and Practice.” N.J., Prentice Hall, 1987.