

從灌溉排水原理之觀點討論

臺灣灌溉土壤之研究方向

Under the Point of Irrigation and Drainage Principle
to Discuss the Research Direction of Taiwan Irrigation Soil

臺大農工研究所研究生

蔡 明 華

壹、前 言

一二十年來臺灣之水利建設，在東南亞地區而言，其努力與成就，可謂相當輝煌。尤其大型灌溉水庫及多目標水庫等相繼地出現，對臺灣農業之發展，確實提供了不少貢獻。然而，從經濟觀點而言，這些巨資開發水源之投資是否能發揮最大效用，誠令人懷疑*。坦誠地承認，所以造成此種現象之原因：(一)工程人員或主政者，欲彰顯其工程建設之事功，為使工程建設之可行性增高，往往過高估計其效益。(二)昧於灌溉管理，對水庫等工程完成後，在水源之運用與管理方面，漠不關心。造成此項事實之主要癥結，是決策者未能透析灌溉基本原理，農民不瞭解水與作物之適量關係，以及臺灣缺乏可資應用之灌溉數據資料所致。論臺灣目前之灌溉管理制度，俱有規模，但缺乏有效合理而科學化的灌溉管理技術與方法，因此，基層管理者只好以「差不多」的觀念行事，農民更是貪求無厭，有水必極力取用，耗水多却不見得有益。終使花費巨資開發得到的有效水源多作無謂浪費而未能發揮灌溉之最大功效，對國家社會而言，是一極大之損失。

又臺灣目前之農業發展是否到了極限？從耕地而言，是否已盡了最大努力？這是個極重要的問題，筆者認為尚有許多研究發展之餘地。僅就農業工程方面而言，只要在技術方面，多做研究努力，目前尚有很

多生產潛力可以倍增之地區。如：山坡地可開發，砂丘地可開發，海埔地可開發，河川地可開發，這些耕地之開發可使現有耕地面積橫向之擴展，這些發展潛力在目前臺灣之農業發展誠不可低估。再看看現有之耕地，已有之灌溉面積僅佔耕地總面積51%而已，即使是在已有灌溉設施之耕地中，亦非整年均可滿足對水之需要。例如有水灌溉之時期，因土壤之客觀條件不良，再加之不科學之灌溉管理，並未有最高之單位面積產量。以臺灣水稻平均單位產量(2970kg/ha)與日本水稻平均單位產量(4750kg/ha)相較即可探知，世界水稻單位產量以西班牙最高為5770kg/ha，意大利次之5240kg/ha，第三為日本，第四為義國3750kg/ha，第五為中國大陸3470kg/ha，第六臺灣。何以日本水稻產量會如許高？我們亦可同樣努力使產量與之相等，臺灣競賽田區高產，第一期作達9700kg/ha，第二期作達8000kg/ha，因此，在提高單位面積產量之努力上亦尚有可為。造成平均產量低之原因，主要有低產地區。水田如許，其他旱田，產量並不穩定更是有發揮的潛在性。因此，我們不可自滿現有的成就，更不必自卑未來發展之局限。我們須再繼續努力研究，利用科學技術，開發現有未利用之可耕地，以擴大面積，另一方面改善現有耕地的土地生產力，加強水利建設及灌溉排水管理措施，以提高耕地之單位面積生產量。為共同擔負農業發展的前途努力。

筆者近年來潛心灌溉排水之學理學習研究，對灌溉土壤及土壤物理等課程尤有深厚之興趣。是以藉此文略舒筆者「從農田水利之立場，展望臺灣目前之農業發展」之看法，以及在農田水利方面應有的努力責任。因此，本文之重點即以灌溉排水原理之觀點，來討論臺灣灌溉土壤應研究之方向及內容，以供識者之參考與高明先輩之指正。

* 註：現階段開發水源之投資，與目前粗放式灌溉管理之改善方案如：

- ①水權重新分配，將餘水地區向缺水地區之調節。
- ②改善末端輪灌工程。
- ③加強基層灌溉管理人員之訓練。
- ④科學化配水之管理及研究等。

貳、灌溉排水之基本理論

一、水—土—作物之系統觀念

灌溉與排水措施乃在調整水—土—作物三者間之關係臻於最適情況，使作物在此情況中得以正常生長，並保證獲得增加生產之效益。故其基本之理論，乃須先尋求探討水—土—作物三者間之最適環境組合及相關條件，以為實施之依據。為明瞭此三者關係之地位及吾人所能作之努力與調整途徑，筆者將該觀念析示如下系統圖：

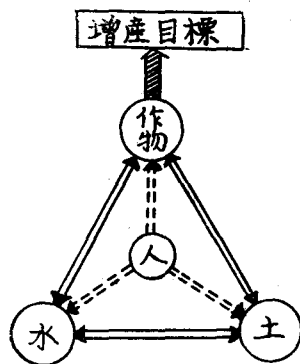


圖1. 水—土—作物之系統觀念圖

由上列系統觀念圖示，可知為達到增產目標，吾人是居於主動調整使其有最適關係的地位。吾等知道，作物能獲得正常生長，除日光及養分外，尚須從土壤中獲得適量的水分與空氣，但自然界中，土壤內所存在之水分量，空氣量及各種養分量，雖然自然很神奇奧妙，但並不能僅賴自然調整而能滿足作物所需的最適條件。因此，吾人則須加以補充調整措施。科學的研究，講求效率及精確，是以對其間所謂之最適關係條件為何，應有質的瞭解及量的測定。例如，水分對不同作物之生長發育之影響程度如何？誠不是立可置答之問題。又其最適量究竟多少，又在某一種情況下，最適量該多少，諸如這些問題，非從事實地試驗研究，誠難明言。

過去，或限於試驗研究人材及經費上之困難或關如，但為實地應用，因此有許多措施所依據之條件，均係由經驗直覺假定。因此，有所偏差甚至完全錯誤，以至未能發揮最大之生產潛力。現在再若能從科學精密的研究，了解此系統中三者之最適關係，便可以最經濟有效的方法分別從水、土、作物三方面從事個別之配合調整改善。以期達到吾人之理想目標。

二、理論系統闡析

雖然在此理論系統中，客體只有水、土、作物三種，但是自然界中，此三種客體在時間及空間上常有所變異，而這些變異若細分，可謂無窮；縱使大別而分之，三者所構成的不同環境組合，亦是甚為錯綜複雜。因此其有關研究頗為繁複，且難以導出通式而可適用於各種土壤環境，而須分別研究各類型下之客體組合的最適關係，以為調整時之依據。目前，為求精密可靠，故細分之下，其間之組合過多，所涉因子複雜，又難以數學模式來研究處理，故多年來之進展有限。因此，在未知或未確切知其間應有如何的適當關係前，常有不適當不合理的調整措施，或者因不知而未敢或未能實踐主動調整改善的任務。是以，目前所得之效益，猶未能滿足增產之慾望。於今，人類對增產慾望強烈，科學之發展協助我們對水、土、作物客體之瞭解，設想我們努力藉助當今的科學技術與基礎，做更進一步徹底的研究發展，必有豐碩的結果。

臺灣目前對此方面之研究雖已有相當之努力與進展，但距希望仍有段距離。因此，筆者擬就灌溉排水原理之基本理論為基礎，提出當前臺灣極須努力研究的方向及內容，以為推進灌溉排水研究及臺灣灌溉土壤利用開發技術研究者之參考。茲為易於瞭解將臺灣之灌溉土壤及其研究改良之關係系統圖用圖示列出（如圖2），便不難構想今後臺灣灌溉土壤之研究梗概。

叁、臺灣灌溉土壤今後之研究方向及內容

基本理論知識的發展有助於應用的特殊問題研究，由於臺灣目前對於有關灌溉土壤之基本理論研究資料太少，因此，對於現況之特殊問題研究時，所遭遇的難題，往往仍屬於基本理論之領域。又因土壤客體之富地域性，故難以直接引用外國之試驗成果資料，而須自己針對自己區域內之土壤特性加以個別試驗研究。

本文所討論之目的，其一為求灌溉排水實施之可用數據資料，藉以從事灌溉或排水措施之調整改善之依據，而達增產之目的。另一為研究改善技術措施，使未能利用或利用不善之土地，成為可用或最適合利用之目的，即含有土地改良之重大意義。為達上述目的之研究，茲分為基本與應用兩方面來討論：

一、基本理論關係之研究方向及內容

1. 調查及整理臺灣之灌溉土壤資料。

為明瞭分佈在臺灣之灌溉土壤之類別與特性，對

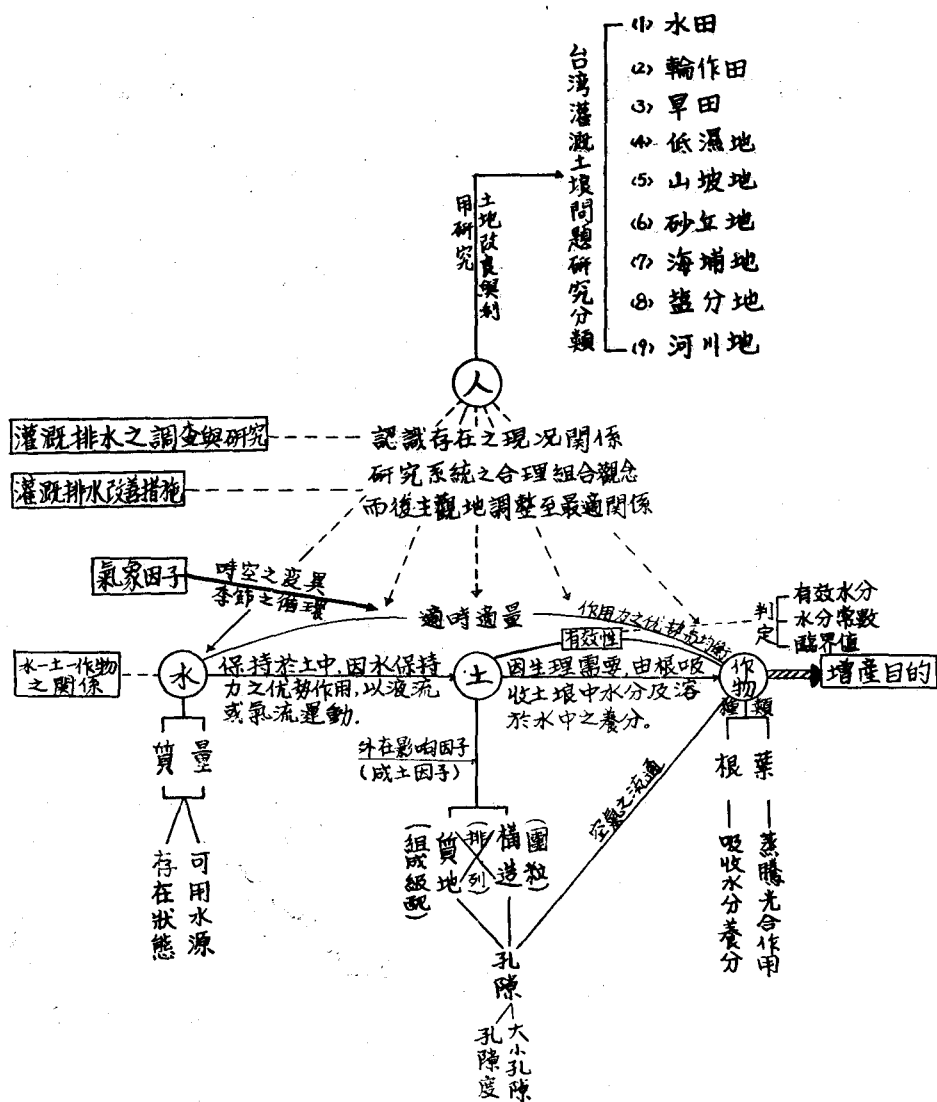


圖 2. 台灣之灌溉土壤研究及其改良關係系統圖

於其質地、構造、保水能力，水分常數等應有詳細之分析資料，以爲計劃之參考。此項研究，臺灣在某些局部地區在進行中，但仍不全，應設法再從事測量調查補齊。另由農林廳主持綜合整理臺灣全省之灌溉土壤調查資料。此項工作，需大量經費、人力，但却爲一切研究及應用之基本資料，急需審慎從事，不可忽略。

2 土壤水分保持能力之研究

各種土壤保持水分之能力各不相同，其與土壤之特性有關，但其共同之特徵是：水分在土壤中之保持是受吸着力、吸附力、毛管力、滲透力、重力等之優勢之力作用所影響。其量之大小，則又受土壤之質地

及構造等特性所左右。此項研究有助於土壤水分運動性之瞭解，其主要目的，則是要定出有效水分之範圍。即有效水分之上限與下限研究問題。目前有效水分之上限與下限，尚缺乏科學理論之根據。蓋在精密之灌溉管理下，實應探究土壤與作物對水分之吸收作用及平衡現象。有效水分上限與下限，是否完全由土壤因子決定，已被懷疑。故將來的有效水分可能是由土壤與作物爲決定指示因子。

3. 土壤水分之運動性研究

水分存在於土中之量與形態，影響其本身在土壤中之運動性，也直接間接地影響土壤之物理性，此項特性對植物生長及水分之利用有莫大之關係。維持作

物之正常生長，水分之供應，固然要充裕，但同時亦要有相當量的土壤空氣，以及其他必須之營養分，對於水分與空氣之供應，站在土壤管理，為減少灌溉之頻繁以及水量之浪費，土壤保水力愈強愈好，然而欲達此目的時，則對保持相當空氣量之流通必有妨害，因此，欲使作物在土壤中有良好的物理環境，瞭解土壤水分之運動性與作物生長之關係，是必須要的。據前人之研究，認為土壤水在某種狀態下有其一定之規律性，故此項研究之目的，即想探求在某種狀態下土壤水運行之規律性。

土壤水分之運動性，從土壤水分之分類知與土壤濕度有關，但須記住，土壤水分之含量表示並不能用為探討水分運行之依據，而須以蒸氣壓或水分張力之表示，方能定其運動性。土壤水分之運行可分液態與氣態運行兩種方式，其運動方向是從保持水之力較弱的地方向保持水之力較強的地方運行，或是水蒸氣壓高者往低者運行。故其運動性取決於作用諸力之梯度，同時取決於其土壤濕度，亦即是說土壤水的運動性是由土壤孔隙中被水充滿之程度與土壤之導水性決定。在此尚要了解一現象，土壤水分之運動性隨土壤濕度變化而變化，其現象不是漸變的，而是飛躍性地變化，且在某些臨界點呈顯著的變化，故探究這些顯著飛躍的臨界點值，對於控制水分運動性，有莫大的助益。

土壤水分之實際運動，在低含水量下，水分不能充滿空隙空間，而以某種厚度的薄膜狀態包圍土粒表面，其水分運行，是由薄膜較厚的地方向較薄膜的地方移動，運行速度極緩。其原因有二：一為其水分運行是從此土粒向另一土粒進行，而非一連續之水體，一為土壤在此濕度下，完全是束縛水類型，即定向水，其水有部份是聚密的水，具有較高的粘結性，較高的密度，所以非常強烈地阻滯土壤中水的運行。

當土壤全部為水所飽和時，土壤水具有最大之運動性，通常可用滲透係數來表示。水田即屬此狀態之水分運行。隨着濕度下降，導水性降低，水分的運行自然亦降低，然其水分的運動性在田間容水量以上，仍然很大。在 F.C (田間容水量或最小持水量) 以上的全部水分在土壤中，由於重力和毛管力都參與水分下降運行，所以很容易於往下層流動。直至 F.C 時，水分下降之運行速度方顯著變慢。此為水分運動之第一轉捩點。土壤水分運動性發生的顯變化的第二轉捩點為毛管斷裂濕度值。在 F.C 至毛管斷裂濕度值的水分，比其 F.C 以上之水分運動性雖小得多，但

仍具有明顯的運動性，此觀念可修正以往認為 F.C 即不再運動的說法。在毛管斷裂濕度值以下，其水分運行過慢，速度難以補充作物之需要，若以毛管斷裂濕度值為灌溉之起點，較有科學理論依據。

4 土壤水分運動之模式研究

此項模式之研究，有助於土壤中水分變化之了解與測算。土壤中某點之平均速度設以下式表示。

$$V = K\rho\nabla\Phi \dots\dots\dots (1)$$

式中 V = 土中某點之平均速度

K = 常數

ρ = 該點土壤水分密度

Φ = 總勢能 = $\pi + \varphi + \phi$ = 水力勢能 + 滲透壓勢能 + 重力勢能。

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \text{ (數學運算符號)}$$

由上模式，可以討論在各種狀態下（即受各種限界條件支配）之模式簡化。此項模式之推演，有助於實測資料之分析研究，但此類模式之建立，大多僅發展於條件簡單之假定，應再深入探討才能更接近自然條件之狀態應用模式。故此項模式內容應包括：①各種含水狀態下之運行模式。②在不均質土壤中之模式。③向上、向下、向側各方向之運行情況模式。④有地下水位時之運動模式。⑤有作物狀態下之運動模式。

Willard Gardner & John A. Widtsoe 曾將此水分運動公式加以推演，並說明其代表意義，茲舉摘以供參考。

設 P = Hydrostatic pressure

p = Capillary pressure

$$\text{則 } \nabla\Phi = -\frac{1}{\rho} \nabla(P+p) + \nabla\phi$$

為滿足連續方程式，因此

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\nabla(\rho v) \dots\dots\dots (2)$$

將(1)式乘 ρ 並滿足(2)式，則得

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -K\nabla(\rho^2\nabla\Phi) \dots\dots\dots (3)$$

當 $\nabla^2\phi = 0$ ，則又可改為下式

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -K\{\rho\nabla^2(P+p) + \nabla\rho[\nabla(P+p) + 2\rho\nabla\phi]\} \dots\dots\dots (4)$$

再討論此式之意義：

(1) 當 P 固定， $p=0$ ， $\nabla p=0$ ， $\frac{\partial\rho}{\partial t}=0$ 時，此種情況即吾人所熟悉的當土壤孔隙充滿水時，我們可導出得

$$\nabla^2 P = 0 \quad (\text{I})$$

(2) 當 p 固定, $P=0$ 時, 此為最常見之情況, 於灌溉實施中常遇到。此時(4)式可減化為

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -K \{ \rho \nabla^2 p + (\nabla p)^2 + 2\rho \nabla \phi \rho \} \quad (\text{II})$$

$$\text{設 } \psi = \frac{c}{\rho} + b \quad \text{則 } \nabla p = \frac{c}{\rho} \nabla \rho$$

將此代入(II)式, 即得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -Kc \{ \nabla^2 \rho + \frac{2\rho}{c} \nabla \phi \nabla \rho \} \quad (\text{II})'$$

在穩定狀態時, 此式可變為

$$\nabla^2 \rho + \frac{2\rho}{c} \nabla \phi \nabla \rho = 0 \quad (\text{II})''$$

將此式積分, 當其運動方向為垂直時, (Vertical flow), 此時, $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ 為負, 則得

$$\rho = A \tan (B - Cz) \quad (\text{a})$$

式中, A, B, C 均為常數。

此時, 設土壤水分運動係由一地下水面上升時, 則由其界面條件 (Boundary conditions) 當 $z=0$ 時, $\rho = \rho_0$ 。當 $z = \infty$ 時, $\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$ 則又得

$$\rho(z - \frac{c}{\rho_0 g}) = -\frac{c}{g} \quad (\text{b})$$

再引入一特性常數介量 k (Lento-capillary parameter)

$$(\rho - k)(z - \frac{c}{\rho_0 g}) = -\frac{c}{g} \quad (\text{b}')$$

(3) 當 p 固定, $P=0$, 且 $\nabla \phi \nabla \rho = 0$ 時。此情形即水流受毛管壓力 (Capillary pressure) 作用而水平移動時, 則(4)式簡為

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -Kc \nabla^2 \rho \quad (\text{III})$$

令 $Kc = k_d$ (擴散常數 Diffusion constant)

則當 Steady state 時 $\nabla^2 \rho = 0$ (III)'

若只考慮單方向流 (One dimensional flow)

$$\rho = Ax + B \quad (\text{a})$$

在雙方向流之穩定狀態下, 則

$$\rho = C \log (x+1) + \rho_0 \quad (\text{b})$$

(4) 當 $p=0$, $P=0$, $\nabla \phi = -g$, 而無其他限制時,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \text{則 } \rho \text{ 為 Constant, 此時(4)式右邊}$$

均為 0, 則(1)式可變為

$$V = K\rho \nabla \phi = -K\rho g = \text{Constant} \quad (\text{IV})$$

$$\nabla P = \frac{c}{\rho} \nabla \rho \text{ 於水鋒為一定}$$

如考慮垂直方向 (Vertical flow)

$$\begin{aligned} \rho V &= K\rho \nabla p + K\rho^2 \nabla \phi = Kc \nabla \rho + K\rho^2 \nabla \phi \\ &= -K\rho^2 g + Kc \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (\text{因 } \nabla \phi = -g) \end{aligned}$$

再考慮水鋒 (Water front) 之 ρV 值時,

$$\rho_a \frac{\partial a}{\partial t} = -K\rho_a^2 g + Kc \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (z=a)$$

如代入 $\rho = \rho_0 + \alpha e^{-\beta t}$

為滿足(III), (II)

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = -Ae^{-\beta t}$$

如 ρ_0 亦獨立於 z , 及 $A (= \frac{c\alpha}{\partial z})$ 亦獨立於 t , 則

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -K\rho_a g + \frac{Kc}{\rho_a} Ae^{-\beta t}$$

$$a = C_1 t + C_2 (1 - e^{-\beta t}) \text{ Approximately (a)}$$

在細質地土壤 (Fine texture soil) 中, C_1 可略,

$$\text{則 } a = C_2 (1 - e^{-\beta t}) \quad (\text{b})$$

至於水分運動量 Q

$$Q = \int_0^a \rho d\chi$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= \int_0^a \frac{\partial \rho}{\partial t} d\chi = \int_0^a -Kc \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial \chi^2} - \frac{\partial \rho}{\partial \chi} \right. \\ &\quad \left. g \frac{\partial \rho}{\partial \chi} \right) d\chi \\ &= -K \{ C \left[-\frac{\partial \rho}{\partial \chi} \right]_{\chi=a} - \frac{\partial \rho}{\partial \chi} \bigg|_{\chi=0} \} - g \left[\rho_a^2 - \rho_0^2 \right] \} \end{aligned}$$

如設 $\rho = \rho_0 + \alpha e^{-\beta t}$, 式中 ρ_0 獨立於 χ 及 t , α 亦獨立於 t , 則

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= -K \{ Ce^{-\beta t} (A_a - A_o) - 2g\rho_0 e^{-\beta t} \\ &\quad (\alpha_a - \alpha_o) - g e^{-2\beta t} (\alpha_a^2 - \alpha_o^2) \} \\ &= -Ke^{-\beta t} \{ C(A_a - A_o) - 2g\rho_0 (\alpha_a - \alpha_o) \\ &\quad - g(\alpha_a^2 - \alpha_o^2) e^{-\beta t} \} \end{aligned}$$

則積分之, 可得 Q

$$Q = K' + Le^{-\beta t} + Me^{-2\beta t} \quad (\text{V})$$

K', L, M 均為常數, 可由實驗值來印證,

Willard Gardner & Jolm A. Widtsoe 曾將田間土壤向下運動之資料, 研究得一公式

$$Q = 14.6 + 2.7e^{-0.02t} + 2.7e^{-0.04t}$$

此外, 應用於土壤水分之運動公式, Darcy law 普遍地被應用, $V = Ki$, K : 導水係數, i : 水力坡降。此式之應用範圍限於線流, 但土壤中之水流均很緩慢, 可利用該式, 在飽和狀態及非飽和狀態,

該觀念均可應用。以上模式概念，有助於其他研究資料之分析與推演。欲從事灌溉與排水措施研究者，對此當應有相當的基礎了解。

5. 植物對水分欠缺反應之研究以及植物生長有關之水分運動性研究。

作物生長於土壤中時，對水分之要求有一最適水分範圍 (Optimum Moisture Range)，據若干實驗研究，認為約在 0.3 atm 附近為最適。在此範圍土壤團粒構造最多，耕耘所費勞力也最省，同時土壤水分呈現塑性範圍，土壤易碎，可維持土壤之構造，加壓後可恢復原狀。此項試驗研究，在外國已被重視，但在臺灣却尙少人談起。目前臺灣積極推廣機耕，到時大中小型機械均進入田間，則此問題將變成非常重要，因此研究對機耕作業與土壤結構及水分含量之影響情形，亦是今後研究方向之一。

對作物利用水分之觀點言，灌溉學者均知，有一有效水分之範圍，一般所訂之範圍為 F.C. 至永久凋萎之間。初期的學者，認為作物在此範圍之水分利用效率為相同，後經若干試驗證實不然，仍有不同程度之差異。若干試驗指出，水分保持在 0.3atm 附近，效率最高，至於下限上限之定義，乃從植物之利用臨界值與土壤保持水之臨界值而定。但吾認為此項研究，應站在某種立場為準，如為純水分生理之理論研究，或為兼論實用經濟之立場來研究，須說明清楚，才可表明其上下限之意義。在旱作灌溉中，以 F.C. 定為土壤保持水分之最大限界，灌多了，則引起灌溉水下滲於根域之外成滲漏水，殊為浪費。土壤水分之有效性隨含量減少而改變，在土壤濕度較低的情況下，即從凋萎濕度值或最大吸附持水量起，是取決於土壤保持水分的強大的力量。而在比較高的土壤濕度範圍內，水分有效性的降低，主要原因是土壤水分之運動性減低，另一方面即因根毛直徑較大，很難伸入較細的土壤孔隙內，以致造成這些存在細小孔隙內的水分為無效。

以往的試驗中，曾發現土壤濕度對植物的生長發育影響，其濕度之表現可分若干等級的濕度轉捩點，這些可用為吾人進一步研究之參考。茲舉述如下：

- (1) 植物完全不能吸收的枯死貯水量，相當於緊束縛水的最大含量 亦即相當於最大吸附持水量。
- (2) 極難離的水分，介於最大吸附持水量與凋萎濕度之間，在此範圍內，植物明顯地表現出由於水分缺乏而引起的外部為害特徵，植物產量必受害而減少。
- (3) 難效水分，介於凋萎係數與毛管斷裂濕度之間

，在此範圍內，植物能够生存，沒有呈現任何由於水分不足而引起的危害特徵，然而產量却保持在極低的水平。

(4) 中等有效水分，介於毛管斷裂濕度與最小持水量之間。在此範圍內，水分具有很大的運動性，因此可不斷地供給植物，土壤濕度超過毛管斷裂濕度之後，植物的產量就迅速增長，並且繼續增大。

(5) 易致並逐漸過渡為過量的水分，即介於 F.C. 至飽和持水量之間，在此範圍，雖略可增產，但滲漏流失太大，故認為過量。在限量水源經濟利用時，此觀念務須具備。

從前述各水分範圍觀念，知水分之運動性大小決定植物對其利用之有效性。廣泛而言，有效水分應從凋萎係數起，但目前之旱作灌溉，考慮最大之經濟效益，盼望能提高產量，故有提倡以達 $\frac{1}{2}$ A.V. 即灌溉之方法，此項論據，或許即由此促成，認為達相當毛管斷裂濕度值起即開始灌溉。而灌溉計算以達 F.C 為上限。

6. 各種土壤質地對水分保持及運動之影響研究

為確定各種質地之土壤，其最適關係之水量，並確定調整補充水量之時間。此項試驗研究若非有充水資料，實難獲精確之答案，因此，理論與試驗須同時進行。在從事基本理論討論時，粘土礦物種類不同，其本身所具有之物理化學特性影響對水分的保持與運動關係，應有深入的瞭解，則較易明瞭其真象。分析試驗結果，亦不致有難下手的感覺。土壤水分之保持，事實上非僅係物理現象，而是包括化學及生物之作用之錯綜現象在內，有時誠不能將後者完全忽略，尤其在特殊環境之土壤研究，如鹽分地，泥炭土等，若僅從土壤物理觀點來歸納，可能無甚結果，或誤差偏大。

此項研究，雖是屬基本研究，但也是一最實用的研究，其資料可直接應用於現況 故其研究之價值很大。

7. 各種土壤構造對水分保持及運動性影響研究

此項研究目的同上項，為確定最適關係之水量及補充水量之參考。同時，尙具有通氣性對植物生長發育影響之目的。通常僅以孔隙度誠難描述土壤構造所具有之特性，孔隙有大孔隙與小孔隙之分，但兩者所表現的水分保持量及水分之有效性，作用及現象恰相反。因此欲以孔隙之研究來說明，應將大孔隙與小孔隙或團聚之間的孔隙 團聚體內部土壤顆粒間之孔隙兩者之影響作用分開討論。土壤構造雖係因顆粒之排列

與積聚所影響，但因水之作用及若干如 Fe^{+++} , Ca^{++} 及 Na^+ , Li^+ 等離子所表現，特性也有影響。同時團粒構造之形成及破壞，與外力之作用如耕耘，土壤中動物等。更有直接間接的影響。土壤之質地雖然自然因子不易改變，但構造則可藉耕作管理加以改變，此一現象給吾人改善土壤環境一大生機。筆者認為此項研究最為有趣，將來，由於此方面之構造改善，將使作物在土壤環境中產生有另外的奇景以貢獻農業生產。故此項應再包含土壤構造對空氣流通性之影響以作物在水分、養分、空氣平衡之條件下，確定其最適當之空隙量。以為改善構造之憑據。

8. 土壤對灌溉表現特性之研究

灌溉後水分之分佈性狀及運動狀況瞭解，有助於灌溉方法之決定及灌溉實施之參考。灌溉水達田面之運動過程，在水田灌溉為一滲入之運動，即滲透運動，較為簡單，然而旱作灌溉，當水灌入田面起，即由滲入，至灌水填滿上層土壤大空隙，濕潤周圍土壤，增加它的水分含量，達到 F.C.，當達 F.C. 後剩餘水分再以同一程序往下滲，直到灌水無剩時為止。此時作物開始吸收土壤中之水分，將儲存在土壤之水分漸漸消耗，而水分運動性也漸變低，當將達到有害作物程度時，即再行灌溉。故每一次灌溉，水分之運動性即轉變為週期。其運動過程及消耗水分之變遷時間為何，是本研究所應瞭解之課題。

9. 地下水位之影響問題研究

地下水位在某一平準上時，水分可藉毛細管作用，地下水能源源供應作物利用，以補充灌溉之水量。但相反之影響，當地下水位過高，排水不良，影響作物根系之通氣，則有妨害其生長，且有時，藉毛管上升將下層之鹽分帶至上層積聚，使土壤變壞，此項影響應有詳細的研究，其利多少？其害多少？地下水位在何狀況始有益？何狀況始有害？諸問題宜從事試驗探討，臺灣若干平坦輪作用地區，雨季中地下水位過高，此項問題困擾存在，宜早日能得到結論。

10. 土在改良技術研究

有若干的土地，先天性即不良，有的則因長期耕種，管理不善，土壤理化性兩呈劣化，影響作物之生產。若從土壤本身加以改善，不但可使用水經濟，且能使作物生產增加。此項改良純屬技術上問題。由於土壤種類繁多，其不良之情形各有千秋。誠如，醫生為病人治病，除了須了解病情病理外，尚須會開藥方，懂得藥方之功效，方能治病。土地改良之工作亦正是如是，故除須先對土地不良情形分析其原因外，最

主要，還是要研究改善的方法及技術。目前的土地改良技術尚屬初階，僅有簡單之客土技術及土地改良劑，洗鹽鹼等方法出現，且因缺肯定的技術，效果並不盡理想。故為長期利用現有之土地，應多作此方面之研究。

二、應用性研究方向及內容

臺灣之耕地有限，故如何使可耕地全面開發利用，且能達最高之產量，則為目前急切的問題研究。臺灣一島面積雖小，但由於氣候及地形條件特殊，各類型之土壤幾乎均有，目前之利用程度也各有不同，以灌溉排水觀點而言，除需對上述所列各項之基本理論研究試驗外，筆者再將臺灣較具有問題之特殊地區及土壤，列為應用性之特殊問題研究。提出以供對此方面有興趣者之參考：

1. 水田土壤之研究

以往臺灣水田之研究，大部偏於需水量之研究及輪灌方法之研究，對於水田物理性之探討尚少觸及。外國文獻中，理論及實驗均指出連續的水田經營能破壞土壤的物理性，如還原層的生成會導致減產，牛踏層（硬盤）的生成降低滲漏，阻碍空氣的流通等，對水稻之生育亦有不良的影響，臺灣現在雖然有人提到此方面之問題，但却未見有人從事此項專題研究，故其影響程度如何，缺少數據資料。站在用水的立場當然需要越少越好，但站在土壤管理的立場，則尚要求有足够的流動空氣，因此，兩者應同時考慮研究，深求其最適的條件以為依據。在日本已有最適滲漏量，其產量最高之試驗研究，在臺灣也發現若干高產區均為有相當滲漏。故若僅為提高單位產量，在水源充裕地區，可考慮其灌溉管理依最適滲漏量之原則灌溉排水，或設法提高水田的滲漏量至相當程度，此則須有試驗研究之資料為依據。

多年來之配水情形，發現有一不合理之問題，以往水田配水之依據，是以水池法(Ponding method)測定土壤之滲漏量，但由此所測之值對大面積而言是點狀值，且以往認為此值不包括水平滲漏，其實點狀的測定實驗，時間一長，水平方向之滲漏仍不可避免，故此值似嫌過高，用於計算大面積之水田灌溉頗覺浪費，尤其成問題的是配水的計算，其依土壤質地定用水量，按面積配水，對於地形的因子並沒有考慮，但臺灣的水田有很多地區並非全是水平，而有呈或多或少階梯狀排列，通常水田有一牛踏層存在，可阻滯灌水之繼續下滲，相當時間後之垂直滲漏量因而減

少，而橫向滲漏成爲重要，故此地區其側向滲漏量頗爲可觀，上田的水可以滲漏流到下田，導至上田缺水，而下田水過多需要排水，對其量之管理未能盡善合理分配利用。最近用水收支之試驗，已發現具有地形之地區，尚有許多可用之回歸水。故區域配水之依據，似應重新研究改善，其研究之內容應包括配水單位及田間之重新劃分，與量之依據重新訂定。值得研究之方向，如區域性水收支研究，水田垂直滲漏研究，水田橫向滲漏，研究同品種間之需水量研究，再加上水路損失之研究，由此研究資料，可以獲得配水之依據。

水田輪作制度，除了節水，對水經濟有效之利用外，對於土壤物理性維護，亦有很大的意義，應再積極其研究，使有更合理之經濟輪作制度產生，以改善現有之地區，並推廣至其他未實施之灌區。

2. 輪作田之研究

輪作田有其特性，其共同特徵是：①田面成水平狀態，幾無坡度，即在坡地也整成階段。②輪作田由於水稻與旱田輪作之結果，土壤中原有團粒構造之大團聚體多已破壞，而成緊密粘閉構造，耕犁層之下：因水分滲濾作用：粘粒沉積，往往有形成滲透性極緩慢之粘盤存在。③輪作田於水稻種植後改種旱作時，土壤水分亦由飽和狀態漸降至旱田乾燥狀態，其時田面土壤由於收縮而龜裂，龜裂程度因土壤質地及含水量而不同，粘重乾燥者，裂縫深度可達數十厘米，寬度達數吋，此種龜裂土壤耕犁時很難破碎，因而增加田面之粗糙率。影響施灌時之水深，同時水分沿裂縫滲入，使土層水分分佈不均勻。④輪作田因受水稻灌溉之影響，地下水位一般均很高，其與坡地旱田地下水位深達數十米者，完全不同。⑤輪作田因遷就水稻栽培，田面必需水平，長短形狀極不一致，同時栽培作物之種類複雜，往往不能集團栽培。此特性對土壤水分之運動有很大之影響，但其影響程度究竟爲如何？則尚缺確定數值。輪作田由於前期水田栽培與隣田水田栽培，因此從事旱作物栽培時，地下水位普遍高，但地下水位高可影響作物需水量，也可以影響作物的生育以至作物的產量，其與純旱田耕作迥然不同，此項專題比較研究，目前尚無足夠資料，是一極待研究的專題。此外牛踏層之存在，對於水之滲透現象頗有影響，也是值得研究的專題。又輪作田因從事水田栽培時需整平，待從事旱作栽培時，田面水平之情況下，此對地面灌溉方法之研究，則異於外國旱田特殊環境，故此項研究需臺灣自己從事。

3. 旱田之研究

純旱田之經營在臺灣除了若干坡地外，平地旱田分佈之面積尙少，其研究項目較爲單純，外國的若干情形可作爲參考，在臺灣的研究，則考慮作物需水量及灌溉方法等爲重要問題。

4. 低濕地之研究

低濕地之問題乃爲排水不良，其或因無排水設備或無排水出路，排水不良之情形以雨季爲甚，影響作物之生長。此問題之解決當以設法降低地下水位爲原則，但如何降低地下水位及排除餘水於根系之外，以何種設計與技術爲最經濟，有效？例如宜蘭地區有低濕地之分佈，由於地勢低，雨季時，河流之水位尙高出田面，在此環境借用重力自然排水似乎不可能。筆者認爲在低濕田下埋設暗管，從排水暗管匯集所排水量，然後以抽水機抽送到較高的隣地，作爲高地之灌溉水源。或在低溫地區劃定若干單位田區，每一單位田區旱一水池，四周挖排水溝，而將水聚集後以抽水機打入水池，同時可利用水池從事漁業養殖等。皆是研究規劃之路徑。

5. 傾斜地之利用研究

傾斜地之利用研究可分爲水稻梯田和坡地旱作及果園經營兩類。已闢爲水稻之梯田，除了水土保持外，問題較少，通常亦都有較充裕之水源。至於旱作及果園，以往之經營方式極爲粗放，除了有水土之問題外，尙有水源及灌溉問題。至於尙未利用的可耕坡地之開發，尙加有開發之技術問題。因此，筆者認爲此方面之研究方向及內容，包括有：①坡田之開發規劃及整理技術研究。②灌溉水源之解決問題。③特殊灌溉方法之研究。④灌溉系統之佈置與設計研究。⑤與水土保持之配合研究等。臺灣目前擁有之坡地面積不少，對於其開發與利用有很大之前途。

6. 砂丘地之利用問題

砂丘地由於滲透性大，一般採用明渠重力系統及地表灌溉方法時，損耗水量過大。故此方面之研究應屬灌溉系統及灌溉方式之研究，與如何改善滲透性之土地改良研究。灌溉系統之發展應屬管路之前途，施水方式則以噴灌效率爲佳，至於土壤改良之技術，可能的方法爲客入黏性細質土壤，或設法於根系土層下形成一不易透水層，以降低滲漏之損失。此項有關之技術效果如何，尙須加強研究發展。

7. 海埔地之開發及利用之研究

臺灣目前在平均海湖位以上之海埔地，約有55,000公頃，故對海埔地之開發，對臺灣耕地面積之

擴大，具有很大之意義與責任。海埔地之開發可藉工程技術圍墾，圍墾後，即需洗鹽，才能適於耕種。臺灣目前圍墾工程開發成本尚高，技術上尚有研究改進之必要。至於洗鹽工作也是技術性問題，鹽分能否有效洗除影響到其利用之成敗。故吾人認為下述幾項問題，宜早日有結論。(1)海埔地圍墾工程之技術。(2)洗鹽方法及效果。(3)作物對不同鹽分之適應性情形。(4)乾雨季中降雨分佈對海埔地鹽分升降之影響。(5)洗鹽之水源開發問題。

以上問題研究，並不僅限於物理性研究，尚涉及工程技術與化學方面之研究。另外，為促使早日開發利用海埔地，政府實應制定鼓勵政策，由政府投資開發，放領農民，較易實現。

8. 鹽分地之洗鹽研究

臺灣西海岸地區，有若干鹽分地之分佈，有的是以前之海淤地，有的是因地下水之排水不良，鹽分積聚而成。也有若干地區因乾旱缺向下淋洗之作用，以至毛管水向上移動蒸發，遺下鹽分積聚者。至於鹼土地之改良方法，亦應包括於鹽分地之改良研究中，處理鹽旱土時，應調查分析其鹽分生成之原因，以為技術上解決之抉擇。故本專題之研究項目應包括(1)鹽分地及旱土地之調查分析技術研究，(2)洗鹽理論與技術方法研究，(3)有效地地下水位之控制方法技術研究。(4)工程改善技術研究。(5)海水入侵的研究。(6)化學及生物之改良方法研究等。

當我們從事灌溉洗鹽時，有一情形應了解予以考慮處理，即鹽類之濃度降低會滲透性，以至引起排水困難，難以竟功。在鹽類濃度變化對滲透性之研究中，發現當鈉離子濃度降低時，其引起之滲透係數減小最多。故洗鹽時，故洗鹽時，鹽分之濃度漸漸降低，滲透性也跟着降低，以至難以排除淋洗之水，此種問題的辦法，即在灌水中加入適量之鈣離子，以提高鹽類濃度，維持排水良好，同時鈣本身對土壤構造亦有助益。此外，鹽分地之回升問題，亦為一值得注意研究問題。

9. 河川地之開發與利用問題研究

臺灣現有之河川地，亦有相當之面積可以開發利用，開發利用當然亦涉及政策性與技術性問題，當然政策性問題應以協助技術開發為目的，至於利用，也是一相當的技術問題。現有若干河川地種植水稻，產量很高，但用水量亦大，因此很值得吾人注意與同味的事實，河川地大多砂礫土，滲漏情形特大，通氣良好，若水源足夠，用以開發種水稻為佳，其滲漏之水

仍流入下段河川，過相當距離時間，尚可出現引用。但開發利用這些河川地，臺灣目前只是才開始從事，許多技術困難尚未解決，因此開發成本偏高，而利用率却偏低。此方面之問題研究有：(1)開發整理之技術研究。(2)利用整理之技術研究，如何減低過多的滲漏。(3)利用耕作之灌溉處理研究。(4)防洪之管制問題與保護問題研究等。

由上述九大分類之討論研究看來，可知臺灣目前對於灌溉土壤除了適時適量的灌溉管理配合外，尚須從事土壤方面之改善調整，方能發揮水土最大的功能。而這些均屬技術上之問題，如何有效合理的處置，應有實驗研究做為先驅與依據。故筆者認為上述所敘為目前解決問題之必要研究方向與內容，盼望吾等有心者有志者，能有機會從事此方面之研究，以早日促進技術上之改善，來貢獻發展農業之職責。

肆、結論與建議

初看灌溉與土壤之研究，認為係一極粗淺，粗放，而不富科學之學問，不值得研究；未入門者，更是具有此種觀念與感覺。但事實上，當深入探討時，處處碰到的均是一門極複雜精密的科學存在，它具有的相關性學問太多，太複雜了，也因此使吾人覺得深入太難，以至目前整個研究的發展很慢。吾人知曉，此方面的學問並非僅純物理上，或化學上，或生物上之問題，而是一具有物理物學生物等綜合學問技術才能解決的問題，故從事此方面研究者，應具有物理化學生物學上之基礎，以各學科之基礎理論加以研究合併運用。此項工作，純工程人員無法勝任，純農業人員亦無法勝任，故只好落在補充橋樑之農業工程人員身上，吾人之責任實在太大了。

站在灌溉排水立場，似乎研究的對象僅為水量與水質之控制而已，其實不然，水、土、作物三者之關係，是互相關連影響的，為促使三者之間以最容易，最經濟的方法達到最適之條件關係，當對某一單項調整到極限之努力，猶未能達最適情形時，則試着調整另一項以遷就之，可能是較經濟有效的選擇。因此，對於灌溉土壤之問題之研究，如何改善土壤，也是一極重要之方向。以臺灣目前之土地利用狀況而言，想今後朝此方向多作努力改善，方有革命性之奇蹟出現。因此，於上節提出之研究方向及內容，除加強現有水之管理外，即期望能改善土壤之性質，提高單位面積產量，及擴大耕作面積之幅度。此項展望，就學理之觀點評論之，將有無限的美景與前途。

(下轉第6頁)