

從水污染觀點重估灌溉需水量之數學理論與應用

Mathematical Theory and Application of Re-estimation of Irrigation Water Requirement from Water Pollution

國立台灣大學農業工程學系副教授

國立台灣大學農業工程學系碩士班研究生

張文亮

黃耿亮

Wen-Lian Chang

Keng-Liang Huang

摘 要

台灣現階段不僅灌溉用水量逐漸減少，同時水遭受污染日益嚴重；傳統的灌溉需水量是由蒸發散量來決定，未考慮水污染的影響。本研究是加上灌溉水質因子，導出數學公式，計算不同灌溉水質情況下的灌溉需水量。數學理論的推導由最基本的達西公式—赫夫曼公式，在考慮土壤鹽分、淋洗率、作物根系吸水率、根系深度、水田蒸發、作物產量對土壤鹽分減產斜率，與灌溉水鹽分，這些因子，導出灌溉水鹽分，作物減產與灌溉需水量的關係。並利用盆栽實驗結果，來計算不同灌溉水鹽分的灌溉需水量，並可計算遭受鹽分污染時，作物產量的損害。

關鍵詞：鹽分灌溉水，灌溉需水量，根系深度。

ABSTRACT

Recently, irrigation water has been reduced and polluted severely. Traditionally, estimation of irrigation water requirement only considered amount of evapotranspiration which does not consider water quality. The purpose of this study is to consider both evapotranspiration and water quality to establish theoretical equations, then to calculate different amount of irrigation water requirement under different concentration of water salinity. Theory is derived from Darcy's law and Maas-Hoffman equation, and consider many factors in soil-water-air-plant relationship like soil salinity, leaching ratio, water absorption by different root zone, evapotranspiration, water salinity etc.. Results of pot experiment were also applied to equation to calculate percentage of yield decreasing related with water salinity and irrigation water requirement.

Keywords: Water salinity, Irrigation water requirement, Root depth.

前 言

生態學家 Wetzel 在 1978 年曾經預測「人類由二十世紀的末期，到二十一世紀，所面對最大的資源危機，將是缺乏足夠的乾淨水，供給人類活動所使用」。他的預測隨水污染的日益嚴重，與氣候變遷的影響，使得民生、工業、農業、養殖、生態用水都覺日不敷數情況下，似乎是正確的預測。在各方面爭取水質源之際，本省佔最多用水的灌溉用水，未來將面臨農業用水的減少，尤其隨著農業的萎縮與日後加入 GATT 所帶來的衝擊，農業水資源工程師勢必要面對灌溉用水更仔細的規劃與計算，以提出合理使用灌溉用水量的依據。

傳統灌溉用水量的考慮，無論是旱作或是水稻，主要的依據是水量對蒸發散的相關性 (Doorenbos and Kassan 1977, Doorenbos and Pruitt 1977)。灌溉水質不在考慮之內。Russo and Bakker (1987) 認為這是個不合理的現象，因為農業用水所面對的不僅是水量的減少，而且是水質的鹽化，日後缺乏適量的淋洗，土壤根區的鹽分逐漸累聚將造成作物減產，嚴重鹽化者將致土質惡劣成爲不毛之地，因此灌溉需水量的估計，需考慮水質中的鹽分濃度。

灌溉水中鹽分濃度逐漸增加，是世界性的問題 (Ayars et al., 1993)，爲影響農業生態環境與作物產量的最主要的因子。高鹽分濃度導致土壤鹽化不僅使大部份的作物減產 (Maas and Hoffman, 1977) 並且劣化收成品質 (Francois et al., 1988)，使得農田周圍的生態環境劣化，最有名的一個例子是加州的 San Joaquin Valley，因爲由地下抽取灌溉水中含有過高的鹽分與微量元素硒 (selenium)，導致下游濕地水鳥的死亡，導致 1983 年 17,000 公頃的農田排水系統被重新改道排放，幾個野生動物保護水澤區因爲被排水波及也被下令關閉。

本省灌溉水中鹽分濃度的來源，除了少量鹽分來自上游土壤、岩石的風化以外，主要來自進入灌溉水路的工業廢水，都市排水與畜牧廢水。根據各農田水利會的調查 (民國 82 年)，進入灌溉系統的排泄戶至少 3,305，廢水量達 557,694 噸

／日，其中 51.43 % 的排泄戶排水不合灌溉水質標準，尤其是因著電導度超過 $750 \mu s / cm$ 佔的比率很高，結果導致下游的灌溉用水鹽分很高，例如彰化東西二圳電導度 $1010 \mu s / cm$ 、苗栗灰寮溪 (萬春橋下) $1855 \mu s / cm$ 、台中銅安支線 $1766 \mu s / cm$ 、屏東社皮圳 $1659 \mu s / cm$ 等。在灌溉需水量考慮水質中的鹽分濃度，過去的研究主要有二個方向：一是用田間滲漏計或是溫室裡的盆栽實驗方式，施灌不同的鹽分濃度，看作物在不缺水的情況下其生育對於鹽分的反應。這一方向的研究報告非常的多，以水稻爲主的研究也不少，例如 Pearson (1959)，Pearson and Bernstein (1959)，Kaddah (1963)，Pearson et al., (1966)，Narale et al., (1969)，Kaddah et al., (1975) 等。第二個研究方向是用土壤—鹽分水—作物關係，建立數學模式去計算灌溉需水量，最早 Raats (1974) 提出這個觀念，並建立初步模式，以計算降低土壤鹽分所需的淋洗率，可惜沒有與作物產量建立關係。而後 Maas and Hoffman (1977) 提出土壤鹽分與作物產量的關係，但是沒有連上灌溉的需水量。Bresler (1987) 與 Prendergast (1993) 都建立土壤鹽分—作物的模式來計算需水量，但是沒有考慮鹽分在土壤的移動。Letey et al., 是惟一結合 Raats 與 Maas and Hoffman 的理論，並且考慮淋洗之下土壤鹽分的移動，但是忽略蒸發作用。在旱田蒸發作用也許不占顯著影響，但是在水田是影響用水的重要因子。這二個研究方向看似獨立，其實互相影響。因爲數學模式裡的許多參數，需要前面實驗的結果輔助，才能達成田間實用的目的。

本研究的目的是以土壤—灌溉水鹽分—水稻產量—蒸發的相關性，建立一個數學模式，並將過去本省水田鹽分實驗的結果，代入數學式裡計算，對不同灌溉水鹽分的灌溉需水量，提供數學理論與實驗依據。期能對於日受污染，而又被外界要求減少用水的貧乏農業環境，有所助益。

理論與方法

根據 Maas and Hoffman (1977) 提出的假設：作物受到鹽害的影響，作物的減產百分比與土壤飽和鹽份濃度成正比例的直線關係。土壤鹽分濃

度以土壤飽和抽出液 (saturated soil extract) 的電導度 (electrical conductivity) EC_e 示之, 則:

$$RY = 100\% - B (EC_e - EC_t) \quad (1)$$

RY 為作物相對產量 (relative yield), EC_t 是土壤飽和抽出液之臨界電導度 (threshold salinity), 當 $EC_e > EC_t$ 時(1)式才成立, 若 $EC_e \leq EC_t$, $RY = 100$ 即作物相對產量達百分之百, 沒有減產。B 是作物相對產量與土壤飽和電導度的斜率, B 值愈大作物對於土壤鹽分反應愈敏感, 相對產量減少迅速。 EC_e 與 EC_t 的單位為 $\mu s/cm$, B 的單位為 $cm\%/\mu s$; RY 單位為 %。

根據相對產量的定義:

$$RY = 100\% \frac{Y_m - Y_d}{Y_m} \quad (2)$$

Y_m 是作物不受鹽害之下的產量, Y_d 是受鹽害後減產的量。將(2)代入(1)式得:

$$EC_e = EC_t + \frac{100\% Y_d}{Y_m} \frac{1}{B} \quad (3)$$

(3)式右端 $\frac{Y_d}{Y_m} 100\%$ 即為作物產量減產百分比, 該比值需 < 100 。

(3)式在作物鹽害的評估上有所助益, 但是在灌溉管理上用處不大, 因為在水分管理的著眼點是在灌溉水分鹽分 (irrigation water salinity), 以電導度 EC_t 示之。而在田間, 灌溉水鹽分濃度與土壤鹽分濃度的關係相當複雜, 牽涉到水分進入農田後作物蒸發散 (evapotranspiration), 土壤水分再分佈 (redistribution), 鹽分在滲漏作用 (percolation) 下的淋洗 (leaching), 作物根系的深度, 鹽分在土壤中的沈澱—溶解 (precipitation-dissolution), 與土壤顆料界面的吸附—脫附 (adsorption-desorption), 降雨等微氣象 (microclimate) 等因素的影響, 很難在一個數學模式裡, 能夠全部考量大氣—作物—土壤—水分—鹽分這個生態因子的每一個控制參數。本研究的考慮以水稻為主, 並且假設整期作水稻灌溉量大於水稻蒸發散量的情況。由傳統的達西公式 (Darcy's Law) 推導起。

當灌溉水進入水稻田以後, 假設在淹水狀態下, 水分在土壤間的移動以垂直滲漏方向為主。滲漏通量 (percolation flux) 在土壤深度的變化率, 主要是受水稻根系吸水速率的影響, 故:

$$\frac{dq}{dz} = -\lambda \quad (4)$$

q 為滲漏通量, 單位 cm/day 。Z 為土壤深度, 單位 cm 。 λ 為水稻根系吸水速率, 單位 l/day 。這代表土壤含水量 (θ) 在不同時間 (t) 的變化, 祇受水稻根系吸水的影響, 故:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\lambda \quad (5)$$

(4)與(5)式的 λ 皆為正值, 表示作物吸水。如果 λ 為負值, 表示作物脫水。 λ 前面的負號係根據本文定義水份運動向下為正號, 向上為負號。

根據 Darcy's Law, 土壤水分通量與水分能量的梯度成正比, 故

$$q = -K \frac{dH_T}{dz} \quad (6)$$

K 為土壤導水係數 (hydraulic conductivity), 單位 cm/day 。 H_T 為總水頭 (total head), 單位 cm 。假設不考慮滲透壓對於水分運動的影響, 土壤任何一深度的總水頭是壓力水頭 (pressure head) 與重力水頭 (gravity head) 的和, 即:

$$H_T = H_p - Z \quad (7)$$

Z 值, 負號代表水流向下。 H_p 為負值, 代表土壤水分能量受孔隙表面張力的影響, 壓力能量都小於大氣壓。將(7)代入(6)式, 得:

$$q = -K \frac{dH_p}{dz} + K \quad (8)$$

根據早期土壤物理學家 Gardner (1958) 的假設, 土壤導水係數是 H_p 的指數函數, 故:

$$K = K_s e^{aH_p} \quad (9)$$

K_s 是土壤飽和導水係數 (saturated hydraulic conductivity), 單位 cm/day 。 a 是土壤水分能量特性參數 (soil water-energy characteristic parameter), 單位 $1/cm$ 。影響 a 值的主要因子, 是土壤質地 (soil texture), 質地愈粗, 如沙土其 a 值愈大, 反之黏土的 a 值小 (Hillel 1981)。因為 H_p 是負值, 所以(9)式的指數關係是遞減的。

根據 Raats and Gardner (1971) 的報告, 認為 K 與 H_p 值的關係, 可用一參數質體通量潛勢 (matrix flux potential) 示之, 可表示為:

$$\varphi = \int_{-}^{H_p} K dH_p \quad (10)$$

φ 為質體通量潛勢, 單位 cm^2/day 。

將(9)代入(10)式得:

$$\begin{aligned} \varphi &= \int_{-}^{H_p} K_s e^{aH_p} dH_p \\ &= \frac{K_s}{a} e^{aH_p} \\ &= \frac{K}{a} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

將(10)與(11)式代入(8)式得：

$$q = -\frac{d\varphi}{dz} + a\varphi \dots\dots\dots (12)$$

(12)式可解得：

$$\varphi = \varphi_0 e^{az} - e^{az} \int_0^z q e^{-az} dz \dots\dots\dots (13)$$

φ_0 是地表下的質體通量潛勢。

(13)式的積分式無法解開，除非找到 q 與 Z 的函數關係。

根據 Gerwitz and Page (1974) 的報告，作物根系的吸水量常隨土壤深度成指數遞減，但與蒸散 (transpiration) 成正比，表示為數學式如下：

$$\lambda = \left(\frac{T}{\delta}\right) e^{-z/\delta} \dots\dots\dots (14)$$

T 為作物蒸散速率，單位 cm/day 。 δ 為作物根系吸水遞減參數。

由(14)式知：

$$\begin{aligned} \int_0^z \lambda dz &= \int_0^z \left(\frac{T}{\delta}\right) e^{-z/\delta} dz \\ &= (1 - e^{-z/\delta}) T \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

當 $z \rightarrow \infty$ 時，(15)式的左端等於 T 值，又在 Z 深度的滲漏通量 q ，為水分自地表進入的通量 q_0 與作物蒸散速率的差值，故：

$$\begin{aligned} q &= q_0 - \int_0^z \lambda dz \\ &= q_0 - T + T e^{-z/\delta} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

將(16)代入(13)式得：

$$\varphi = \varphi_0 e^{az} - e^{az} \int_0^z (q_0 - T + T e^{-z/\delta}) e^{-az} dz \dots\dots\dots (17)$$

令地下水距地面深度為 h ，(17)式可推得：

$$\begin{aligned} a\varphi_0 &= (q_0 - T) + \left[K_s - (q_0 - T) - T \frac{a\delta}{1+a\delta} e^{-h/\delta} \right] \\ &e^{-a(h-z)} + T \frac{a\delta}{1+a\delta} e^{-z/\delta} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

因為地下水深度遠大於水田作物根系深度 $h \gg Z$ (張氏, 1994)，故 $e^{-ah} \approx 0$ 。(18)式可簡化為：

$$\frac{a\varphi}{q_0} = 1 - \frac{T}{q_0} + \frac{T}{q_0} \left(\frac{a\delta}{1+a\delta} \right) e^{-z/\delta} \dots\dots\dots (19)$$

根據 Thorne and Peterson (1949) 的報告，認為淋洗率 (leaching fraction) L 是土壤灌溉鹽分管

理因子，依定義：

$$\begin{aligned} L &= \frac{q}{q_0} \\ &= \frac{q_0 - T}{q_0} \\ &= 1 - \frac{T}{q_0} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

將(20)代入(19)式得：

$$\frac{a\varphi}{q_0} = L + (1-L) \frac{a\delta}{1+a\delta} e^{-z/\delta} \dots\dots\dots (21)$$

(21)式的右端：

$$\frac{a\delta}{1+a\delta} e^{-z/\delta} < 1 \dots\dots\dots (22)$$

如果考慮水田的鹽分濃度有最低的淋洗量，以免地面灌溉的污染水影響到地下水達到最少的程度，故(21)式的 L 值最小是在 $a\varphi = 0$ ，即：

$$L_m + (1-L_m) \frac{a\delta}{1+a\delta} e^{-z/\delta} = 0 \dots\dots\dots (23)$$

L_m 是土壤最少滲漏比值。(23)式顯示祇要知道土壤水分能量參數 a ，作物根系吸水特性參數 δ ，在土壤水分穩定入滲下，能算出土壤最少滲漏比值 L_m 。當 Z 等於作物根深 d 時， L_m 代表水分自根層 (root zone) 向下滲漏之比。

滲漏比是土壤鹽分管理的重要因子，對於土壤鹽分濃度在土壤的質量平衡有密切的影響。鹽分在土壤的反應是複雜的機構，用數學描述每一個微觀尺度下的變化，相當的困難。假設完全由質量平衡的觀點，不考慮鹽分在土壤的沈澱與溶解，則較可能，這個假設在溶解度積 (solubility product) 較大的離子，如 Cl^- ， Na^+ ， Ca^{++} ， Mg^{++} ， HCO_3^- ， SO_4^{--} 等較符合，但在溶解度積較小的重金屬則不符合此假設，所幸重金屬在土壤鹽分所佔的比例甚少。故假設土壤鹽分移動符合質量平衡，並且假設鹽分運動主要是跟隨土壤水分移動，不考慮擴散移動，則：

$$\frac{dcq}{dz} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

C 為土壤鹽分濃度，可表示為 meq/l ，或是根據美國鹽分實驗室 (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954) 所建議以電導度 (EC) 示之。由(24)式可得：

$$Cq = C_0 q_0 \dots\dots\dots (25)$$

q_0 是水分進入土壤的入滲通量， C_0 是入滲土壤表

面，即 $Z = 0$ 的鹽分濃度。又根據 U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) 的定義：

$$L = \frac{q}{q_0} = \frac{C_0}{C} \quad (26)$$

或改寫為：

$$q = \frac{q_0 C_0}{C} \quad (27)$$

將(27)代入(4)式得：

$$\lambda = \frac{-d \frac{q_0 C_0}{C}}{dZ} = \frac{d(1 - \frac{C_0}{C})q_0}{dZ} \quad (28)$$

將(14)代入(28)式，並兩端積分：

$$\int_0^z \frac{T}{\delta} e^{-z/\delta} dz = \int_{C_0}^C d(1 - \frac{C_0}{C})q_0 \quad (29)$$

可得：

$$T(e^{-z/\delta} - 1) = q_0 (\frac{C_0}{C} - 1) \quad (30)$$

(30)式的左端比較(16)式，即知：

$$q - q_0 = C_0 q_0 \ln \frac{C}{C_0} \quad (31)$$

又根據(16)與(31)式，可得：

$$q = q_0 - T(1 - e^{-z/\delta}) = q_0 - (q_0 - Lq_0)(1 - e^{-z/\delta}) = q_0 - q_0(1 - L)(1 - e^{-z/\delta}) \quad (32)$$

或改寫為：

$$\frac{q}{q_0} = 1 - (1 - L)(1 - e^{-z/\delta}) = L + (1 - L)e^{-z/\delta} \quad (33)$$

將(27)代入(33)式得：

$$\frac{C_0}{C} = L + (1 - L)e^{-z/\delta} \quad (34)$$

又

$$q_0 = q_i - E \quad (35)$$

q_i 為灌溉率， E 為水田蒸發 (evaporation) 率，單位 cm/day 。

$$\frac{C_0}{C_i} = \frac{q_i}{q_0} = \frac{q_i}{q_i - E} \quad (36)$$

故(36)式中不容易測定的 C_0 可以表示為：

$$\frac{q_i C_i}{C(q_i - E)} = L + (1 - L)e^{-z/\delta} \quad (37)$$

假設鹽分濃度與電導度成正比例，則：

$$\frac{C_i}{C} = \frac{EC_i}{EC_e} \quad (38)$$

EC_i 為灌溉水電導度， EC_e 為作物根區土壤溶液平均電導度。這個假設在溶液鹽分濃度大於 0.1M 時會有偏差，因為此時溶液中偶離子 (ion pair) 與錯離子 (complex ion) 在水中逐漸佔優勢，減少溶液的導電性，因此高鹽分時鹽分濃度與電導度並非等比例的增加。這種情況在灌溉水中較少發現，但在土壤溶液中可能會存在。Maas and Hoffman (1977) 建議用 $2EC_e$ 來代表土壤的鹽分，他們主要的考慮對象是旱田，土壤非飽和時鹽分濃度是更高，但是本研究以水田為考慮，根層土壤含水幾近飽和，鹽分較低，故不似 Maas and Hoffman 的建議，以 EC_e 來表示。

故：

$$\frac{EC_i}{EC_e} = \frac{q_i - E}{q_i} [L + (1 - L)e^{-z/\delta}] \quad (39)$$

水田作物灌溉的時間為 t ，單位 day 。(39)式可改寫為：

$$\frac{EC_i}{EC_e} = \frac{(q_i - E)t}{q_i t} [L + (1 - L)e^{-z/\delta}] = \frac{IR - E_e}{IR} [L + (1 - L)e^{-z/\delta}] \quad (40)$$

IR 為水田整期作灌溉水深，單位 cm ， E_e 為水田整期作的蒸發水深，單位 cm 。此時的 EC_i 與 EC_e 相當於整期作灌溉水與作物根層水溶液的平均電導度。在灌溉管理的實際考量上，採取整期作用水量而非每次灌溉量。

當灌溉水量 > 作物蒸發散量 (evapotranspiration) 時，即 $IR > ET_{max}$

$$L = \frac{IR - ET_{max}}{IR} \quad (41)$$

ET_{max} 為作物在不缺肥料與無病害影響下的蒸發散量。將(41)與(3)式代入(40)式：

$$EC_i = (EC_t + \frac{100Yd}{YmB}) (\frac{IR - E_e}{IR}) \{ (\frac{IR - ET_{max}}{IR}) + (1 - \frac{IR - ET_{max}}{IR}) e^{-z/\delta} \} = (EC_t + \frac{100Yd}{YmB}) \{ 1 - \frac{ET_{max}}{IR} (1 - e^{-z/\delta}) \} - \frac{E_e}{IR} + \frac{E_e ET_{max}}{IR^2} (1 - e^{-z/\delta}) \quad (42)$$

(42)式中的參數雖多，但是許多是依靠實驗與當地的現場觀測可以求得的，如 EC_i 、 B 、 Z 、 δ 是可以由實驗量測， E_s 與 ET_{max} 是由現場微氣象資料計算而得，或是直接量測而得，後由 EC_i 、 IR 的關係就可以算出作物的減產百分比 $\frac{Y_d}{Y_m} 100$ 。

計算範例

根據世界農糧組織 (FAO, 1988)，認為水稻的土壤飽和抽出液的臨界電導度值 (EC_i) 為 $3000 \mu s/cm$ ，水稻受鹽害的減產率 (B) 是 $12\% / 1000 \mu s/cm$ ，即土壤飽和抽出液的電導度每增加 $1000 \mu s/cm$ ，水稻的穗重即減少 12% 。追查這個資料的來源，主要是根據 Kaddah et al., (1975) 與 Pearson et al., (1966) 等研究文獻，主要的供試土壤是玢質黏土與黏土，供試的水稻並耕種方式、施肥量都類似本省，本地的實驗結果以李振榮 (民國 79 年)，李振榮、徐玉標、張文亮 (民國 82 年) 等實驗報告顯示 EC_i 為 $3000 \mu s/cm$ ，水稻減產率 B 值為 $8\% / 1000 \mu s/cm$ ， B 值與 FAO 的建議值不同，可能與供試水稻品種與微氣候條件不同有關，國外的研究大都在加州中部水田進行，相對濕度在 $40\% \sim 60\%$ 之間，使水稻的蒸散增加，蒸散較大可能致使水稻對鹽害的敏感性增加。因此在 EC_i 與 B 值的採用上，本研究不用 FAO (1988) 的建議，而用本地的實驗結果。

水稻根系在土壤不同深度的吸水能力，是很難測定的項目，根據 Ehlers et al., (1991) 研究，可用根系在不同土壤的重量分佈來代替。水稻土壤根系分佈的研究在國內外都很稀少，祇有高勝平 (民國 80 年) 的盆栽實驗結果，可算出 δ 值為 $2.36 cm$ ，試驗結果並發現水稻主要根系深度 $9cm$ 之內，因此 (42) 式中 $-Z/\delta = -9 cm / 2.36 cm = -3.81$ ，這個值與 Hoffman and van Genuchten (1983) 所建議在旱作採用 $-Z/\delta = -5.00$ 略有差異，這是水稻與旱作在根系分佈上之不同。

假設以本省一期作水稻，水田期作蒸發量 $350 mm$ ，與 $700 mm$ 水深為最大蒸發散量。將這些已知代入 (42) 式：

$$EC_i = (3000 + 0.08 \times 10^3 \cdot \frac{Y_d}{Y_m}) [1 - \frac{700}{IR} (1 - e^{-3.81}) - \frac{350}{IR} + \frac{700 \cdot 350}{IR^2} (1 - e^{-3.81})]$$

以目前的灌溉水質標準電導度 $750 \mu s/cm$ ，代入上式，計算在不同的灌溉水量對水稻產量的減產影響如圖(-)所示。另外超過灌溉水質標準的污染水，電導度以 $1000 \mu s/cm$ 與 $1500 \mu s/cm$ 兩個例子，代入同式後，灌溉水量的減少對於水稻產量的影響也如圖(-)所示。

計算結果顯示灌溉水質的電導度愈高，維持作物產量不受影響、減產百分比為 0 的灌溉需水量愈大，如電導度 750 ， 1000 ， $1500 \mu s/cm$ 灌溉水，其避免水稻減產的期作灌溉需水量分別為 $1085.02mm$ 、 $1267.76mm$ 與 $1803.48mm$ 。這個計算結果顯示灌溉水質鹽分污染時，其灌溉需水量需要增加，以增加土壤淋洗率，避免鹽分在土壤累聚，影響產量。目前田間灌溉需水量大約在 $1500 mm$ 以電導度 $750 \mu s/cm$ 為標準，應該仍可以省水 27.7% [$= (1500mm - 1085.02mm) / 1500 mm$]，或農業灌溉用水移作他用，在不影響水稻產量的前提下，應該以不超過 30% 為底線。

上式的另一個用途是在作物遭受水污染時的損害評估依據。過去田間水稻受污染減產的估計，主要依賴現場工作人員的觀察經驗，缺乏定量依據，而由 (42) 式祇要現場量測污染水的電導度和調查灌溉用水量，就可以算出減產多少。

結 論

傳統的灌溉需水量祇考慮蒸發散量，沒有考慮灌溉水質，而水質污染導致土壤污染，若沒有足夠的淋洗水量將影響作物減產。依據達西定律與馬斯-赫夫曼 (Mass-Hoffman) 公式推導出新的作物灌溉需水量公式，在考慮水質鹽分的因素下，重新計算灌溉需水量，以對農業用水提出理論依據，並對日益嚴重的農業用水遭受污染，提出合理客觀的作物損害評估理論。惟本研究仍缺乏田間數據佐證，這有待以後之研究。

誌 謝

本研究的執行承蒙農委會研究計劃「加強水

污染影響農業水土資源之調查研究及管理推動」經費的補助。感謝台大徐玉標教授的指導，多次不厭其煩的討論，並且堅持由土壤根區鹽分平衡做主要的理論，由此才建立數學理論。農委會陳益榮技正的意見，水利局劉以釐工程師的問題，都深得啟發，在此致上感謝。也感謝田間第一線的水利工作人員與農夫，由於他們不斷提出水量的考慮需加水質因素，才使我們想起去著手研究這個問題。

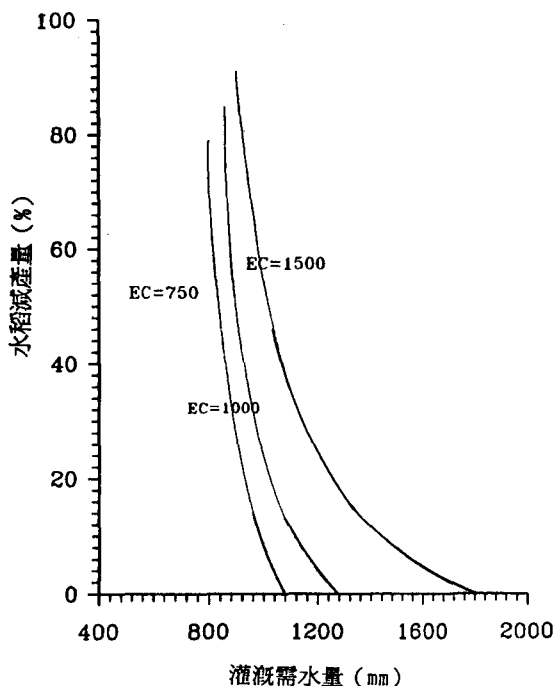


圖 1. 不同電導度之灌溉水需水量對水稻產量之影響

參考文獻

1. 李振榮，民國 79 年，灌溉水中鹽分濃度對水稻生育之影響，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
2. 高勝平，民國 80 年，灌溉水對土壤鹽分累聚及其組成成分對水稻生育及產量之影響，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
3. 李振榮、徐玉標、張文亮，民國 82 年，灌溉水鹽分對水稻產量之影響。農業環境品質整體規劃研討會，p.2-1 ~ 16。

4. 水利局，民國 82 年，灌溉水質調查及管理制度化及推動研究計畫成果報告。
5. 張文亮，民國 83 年，孔隙介質板阻力對於非飽和導水係數測定的影響，農業工程學報，第 40 卷，48 ~ 57 頁。
6. 張文亮，民國 83 年，雜草蒸散作用促進地下毛管水上升導致休耕土壤鹽化之探討，台灣水利，42 卷，56 ~ 62 頁。
7. Ayars, J.E., Hutmacher, R.B., Schoneman, R.A., Vail, S.S., and T. Pflaum. 1993. Long term use of saline water for irrigation. *Irrig. Sci.* Vol.27, p.27-34.
8. Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. *FAO Irrigation and Drainage Paper.* No.33.
9. Doorenbos, J., and W.O. Pruitt 1977. Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 24.
10. Ehlers, E., Hamblin, A.P., Tennant, D., and R.R. van der Ploeg. 1991. Root system parameters determining water uptake of field crops. *Irrig. Sci.* Vol.12, p.115-124.
11. Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* Vol.85. p.228-232.
12. Francois, L.E., Donovan, T.J., Maas, E.V., and G.L. Rubenthaler. 1988. Effect of salinity on grain yield and quality, vegetable growth, and germination of triticale. *Agron. J.* Vol.80, p.642-647.
13. Gerwitz, T., and E.R. Page. 1974. An empirical mathematical model to describe plant root systems. *J. of Applied Ecology.* Vol.11, p.773-781.
14. Hoffman, G.J. and M. Th. van Genuchten. 1983. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. p.73-85. In H.M. Taylor et al., *Limitations to efficient water use in crop production.* American Society of Agronomy, Madison.
15. Hillel, D. 1981. *Fundamentals of Soil Physics.* Academic Press.
16. Kaddah, M.Y., 1963. salinity effects on growth of rice at the seedling and inflorescence stages of

- development. *Soil Sci.* Vol.96, p.105-111.
17. Kaddah, M.T., Lehman, W.F., Meek, B.D., and F.E. Robinson. 1975. Salinity effects on rice after the boot stage. *Agron. J.* Vol. 67. p.436-439.
 18. Letey, J., A. Dinar, and K.C. Knapp. 1985. Crop-water production function model for saline irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.49, p.1005-1009.
 19. Maas, E.V., and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. and Drain Div.*, Vol.103. p.115-134.
 20. Narale, R.P. Subramanyan, T.K., and R.K. Mukherjee. 1969. Influence of salinity on germination, vegetable growth, and grain yield of rice. *Agron. J.* Vol.61. p.341-344.
 21. Pearson, G.A. 1959. Factors influencing salinity of submerged soils and growth of Caloro rice. *Soil Sci.* Vol.87. p.198-206.
 22. Pearson, G.A., and L. Bernstein. 1959. Salinity effects at several growth stages of rice. *Agron. J.* Vol.51. p. 654-657.
 23. Pearson, G.A., Ayers, A.D., and D.L. Eberhard. 1966. Relative salt tolerance of rice during germination and early seedling development. *Soil Sci.* Vol.102, p.151-156.
 24. Prendergast, J.B. 1993. A model of crop yield response to irrigation water salinity: theory, testing and application. *Irrig. Sci.* Vol.13, p.157-164.
 25. Raats, P.A.C., and W.R. Gardner, 1971. A comparison of some empirical relationships between pressure head and hydraulic conductivity, and some observations on radially symmetric flow. *Water Resour. Res.*, Vol. 7, p.921-928.
 26. Raats, P.A.C. 1974. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.38, p.717-722.
 27. Russo, D., and D. Baker, 1987. Crop-water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.51, p.1554-1562.
 28. Thorne, D.W., and H.B. Peterson. 1949. *Irrigated Soils.* The Blakiston Company.
 29. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soil.* U.S. Dept. Agri. Handbook. No.60.
 30. Wetzel, R.G. 1983. *Limnology.* Saunders College Publishing.

收稿日期：民國 84 年 2 月 19 日

接受日期：民國 84 年 3 月 6 日