

農業之乾旱缺水損失經濟分析
—以明德水庫灌區水稻為例

**Economic Loss Analysis for Agriculture During
Drought Period—A Case Study for Rice at
the Irrigated Area of Min-Der Reservoir**

國立台灣海洋大學河海工程系副教授

廖朝軒

C.H. Liaw

國立台灣海洋大學河海工程系副教授

朱壽銓

S.C. Chu

國立台灣海洋大學河海工程研究所博士班研究生

黃文龍

W.L. Huang

國立台灣海洋大學河海工程研究所碩士

洪英璋

I.W. Horng

摘 要

乾旱相對於洪水來說，發展緩慢，歷時較長，其開始與結束現象較不明顯，但其災害影響範圍較廣泛，俗語說：「水災一條線，旱災一大片」，故其會帶來較大範圍之經濟損失。而有關乾旱早期農業缺水損失之研究成果較少，故本文試圖建立乾旱缺水時期農業缺水損失經濟函數，首先嘗試利用條件估價法，透過假設市場之建立及考慮農業用水現況設計調查問卷，調查內容包括六大項目：(一)基本資料；(二)用水狀況；(三)保險制度；(四)購水制度；(五)懲罰制度及(六)限水制度，另外自農業生產及用水量關係，分別利用全生育期作物水分生產函數之 Hanks 模式、生育階段作物水分生產函數之 Blank 連加模式及 Jensen 連乘模式推導農業缺水經濟損失理論函數；並以明德水庫水稻灌區進行實例說明，其中條件估價法所獲結果之趨勢雖合理但損失值偏低且較分散；而理論農業缺水經濟損失函數中 Blank 連加模式及 Jensen 連乘模式之作物水分短缺敏感因子則參考茆智等人在 1988 至 1993 年試驗所獲之結果，如係利用 Blank 連加模式計算則所獲之各月份農業缺水經濟損失值較 Jensen 連乘模式所計算值為高；而整個二期作之理論農業損失則以 Blank 連加模式計算所獲之值為最高，Jensen 連乘模式所獲之值次之，Hanks 全生育期作物水分生產函數所獲之值最低。另外本研究也發現勢能蒸發散量越大，則作物水分短缺敏感因子亦越

大，則在相同缺水率下的農業經濟損失亦越大。

關鍵詞：乾旱，經濟損失，作物水分生產函數，缺水灌溉，缺水。

ABSTRACT

The impacts of drought differ from those of flood in four essential characteristics — slow development, long duration, difficult in determining onset and end time, and spatial coverage. Because of these, droughts may cause large and diverse economic losses. Until now, there is a little research being found in investigating agricultural losses due to droughts. The purpose of this study is to derive economic loss functions for agricultural loss due to water shortfall which can be used for water management during drought period. Firstly, the contingent valuation is conducted using a face-to-face survey. The survey contains questions focusing on six aspects: 1)basic information, 2)current water-use situation, 3)insurance, 4)purchase system, 5)punitive tariffs, and 6)water rationing policy. Secondly, crop-water production functions are being used in developing theoretical economic losses for agriculture during drought period. In the analysis, both whole growth period production function(Hanks model) and growth stage-wise function(Blank and Jensen models) are selected. The sensitivity coefficients of growth stage of paddy rice for both Blank and Jensen models are experimentally estimated by Mao et al. (1994) from 1988 ~ 1993. The irrigated paddy rice area of the Min-Ter reservoir is chosen as an illustrated example to estimate the economic loss for water shortfall. From the results of the contingent valuation method, it reveals a reasonable trend with water shortfall but values are underestimated.

The magnitudes of economic losses for different months obtained by Blank model are higher than those values of Jensen model and Hanks model gains the smallest values. Also from the study, it is found that sensitivity coefficient of each growth stage increase as evapotranspiration value increases, and this results in increasing economic loss for the same percentage of water shortfall.

Keywords: Drought, Economic loss, Crop-water production function, Inadequate irrigation, Water shortfall

一、前言

水資源的開發、經營與管理，對社會經濟發展與生活品質皆有重大影響。台灣地區近年來工商業的快速發展與生活水準的提高，造成需水量快速增加；由於國內地理環境與水文條件的限制，加上民眾環保意識高漲，使新水源開發日益困難，造成水資源供需逐漸失調；因此，每逢降雨較少時，部分地區易造成乾旱缺水現象，進而

造成經濟損失。近年即因乾旱缺水造成多次嚴重的社會經濟損失，其中又以中南部地區農、工業的損失範圍及程度較大，而民國 82 年的乾旱，受災區域更是遍及全省。

目前各用水標的供水順序可依民國 72 年修正公告之水利法第十八條之一訂定之。該條款指出：「多目標水庫用水標的之順序，依主管機關核准之計畫定之」。但各標的權利人另有協議並報經主管機關核定者，從其協議。多目標水庫，

有時因情況特殊，各標的需水特性不同，而必需再因應緊急情況調整分配水量，例如將農業用水移轉為公共給水以救急，此時經常以協調方式解決問題，其間就發生短期移轉與補償問題。而乾旱災害帶來之經濟損失到底有多大，如何訂定？國內外在此方面的研究成果極少，故建立各不同用水標的之乾旱缺水損失函數是有必要的，而農業用水單元之缺水損失是較難量化的，因其中涉及政府補助、作物種類、耕地特性、耕作方式與作物價格等等之複雜問題，而使農業用水易被認為是高用水、低產值之產業，所以在缺水期應最優先限水，是故，農業乾旱缺水損失的經濟分析乃是有必要進一步探討的。其一方面能提供用水移轉補償價格之參考，俾順利移轉用水；另一方面農業缺水損失函數亦可供未來自經濟方面探討缺水時期供水、限水措施擬定之參考依據。

二、農業乾旱損失評估方法

在過去，台灣省政府農林廳對於乾旱缺水損失的估計方式是以無收穫之面積方式計算^[1]，對於因乾旱減量供水所帶來的產量減少損失並未觸及。截至目前為止，對乾旱相關的研究大多集中在有關乾旱因應措施^[23,28,29]、乾旱指標^[25]、乾旱嚴重程度^[26]及乾旱水文統計特性^[9]等方面，有關乾旱缺水時期的農業損失之研究相對較少；而乾旱缺水經濟損失如從另一個角度來看，可將乾旱缺水視為農業灌溉工程無法滿足作物需水所致，故也可自灌溉工程效益方面來探討乾旱缺水損失，而這也是水資源經濟中有關供水效益的範疇，一般在水資源經濟中評估供水效益之方法，可概分為下列 4 種：

(一) 效益/成本分析法

效益/成本分析法最早是由美國聯邦政府與水資源開發有關的機構所採用，其目的是在評估水資源開發計劃的投資方案，比較投資成本和其所帶來的效益。但是本研究主要是探討因乾旱減量供水所帶來的產量減少損失，並未討論工程上的投資；因此，效益/成本分析法並不適合本研究。

(二) 調查分析法

由於乾旱缺水是一種自然現象，所以具有隨機的特性，故傳統上取其期望值當成是其缺水損失值，故其計算步驟包括下列三項：1.乾旱頻率資料；2.既定頻率下的乾旱延時及 3.不同乾旱延時的損害資料。

但是實際上並不太容易獲取上述結果，最主要的原因是缺乏損害資料，或是所能蒐集到的資料不夠精確。因此，陳佩君及趙寶玉^[10]依據實地調查資料建議採用下列三種方法可以計算農業缺水損失：

1. 對比法：根據受早年份實際農業產量或產值與該年的正常產量或產值進行對比分析計算，其計算式為：

$$Q_{as} = Q_{ao} - Q_{ag} \dots\dots\dots (1)$$

式中， Q_{as} ：地區受早年份的農業損失(公斤或元)； Q_{ao} ：地區正常年份的農業產量或產值(公斤或元)； Q_{ag} ：地區受早年份的農業產量或產值(公斤或元)。

2. 災情損失法：根據受災地區各種災情面積調查及成災年份農業正常單位面積產量或單位面積產值，推求受災年份的農業損失，其計算式為：

$$Q_{as} = \frac{Q_{ao}}{A} (\alpha_1 AD_1 + \alpha_2 AD_2 + \alpha_3 AD_3) \dots (2)$$

式中， A ：地區耕地總面積(畝)； AD_1 ， AD_2 ， AD_3 ：分別為該地區輕旱、重旱與極端乾旱的耕地面積(畝)，依據產量減少 10%至 30%(平均為 20%)則為輕旱，減少 30%至 50%(平均為 40%)則為重旱，減少 50%至 80%(平均為 65%)則為極端乾旱； α_1 、 α_2 及 α_3 為權重。

3. 減產係數法：按歷年成災面積，推估農業損失，並折合成糧食產值，其計算式為：

$$Q_{as} = \alpha A_g p q_{ao} \dots\dots\dots (3)$$

式中， α ：農業產量平均減產百分數； A_g ：成災面積(萬畝)； p ：糧食價格(元/公斤)； q_{ao} ：正常年單位面積農業產量(公斤/公頃)。

經驗式之推導需大量調查數據，但往往這部分數據的獲取不易，且其具地域性，故不易建立通用之經驗公式，故理論農業缺水損失函數之通用理論模式具有其必要性。

(三) 非市場估價法

非市場估價法則是將不能以市場價值表示的項目，以某種非市場估價方式賦予價值，然後進行效益/成本分析；然而非市場價值估算之方法眾多，不易獲取一致之認同，易招致紛爭，故在此也不加以考慮。

(四) 條件估價法

雖然間接的市場方法，可以用來評估許多非市場財的價值，但是卻無法有效估計乾旱缺水所帶來的損失，由於間接方法在實際應用的限制，使得直接詢問法在衡量非市場價值方面，扮演更重要的角色。一般而言，條件估價法係直接要求受訪者賦予非市場財某種價值；因此，本文擬嘗試利用條件估價法計算乾旱缺水損失。而任何條件估價法均需具備下列三種條件^[17]：

1. 描述所欲評估財貨的性質；
2. 支付方法；
3. 引導出價值的方法。

大多數的試驗研究顯示，私有財假想願意支付值和實際願意支付值在平均值方面並無統計上的顯著差異；然而在願意接受值方面，多數研究顯示實際值低於假想值。總之，條件估價法的訪問調查必需同時符合調查研究在方法論上的必要性及經濟理論上的需要性。

除了上述條件估價法之外，由於國內外對於在各種供水情況下的農作物產量已有相當多的研究^[14,20]，這對理論農業缺水損失函數的建立助益頗多；因此，本研究擬另外嘗試利用農業產量與用水量關係，考慮作物在不同生育階段缺水之影響，並據此建立農業缺水經濟損失函數。

三、條件估價法

本法希望藉由直接詢答的方式，透過假設市場的建立，設計問卷，藉以透過間接方式來建立

農業乾旱缺水損失經濟函數。而條件估價法的調查訪問必需同時符合調查研究在方法論上的必要性及經濟理論上的需要性。所以為了建立農業缺水損失函數，就必須先瞭解農業實際用水的情況及缺水所可能造成的反應，才能估算出農業缺水損失函數；因此，本研究首先以問卷調查的方式瞭解研究區域內農業受限水措施的影響及限水意願，藉以建立農業缺水損失函數。

為了瞭解農業用戶對限水之接受程度與其影響並提高資料之可靠性，故本研究採取實地面訪、調查的問卷資料作為建立農業乾旱缺水損失的依據，並依據條件估價法的理念研擬、設計問卷，進行試調後作最後修正完稿，每份問卷的前面並附有一簡短的說明以供受訪者閱讀，使其對現今乾旱的問題有更清楚的認知，而問卷內容包括下列六大問題：

- (一) 基本資料：藉此瞭解調查對象基本資料。
- (二) 用水狀況：藉此瞭解調查對象用水情況及供水減少時其因應措施與影響。
- (三) 保險制度：藉此瞭解調查對象對於事先多支付一些成本以防止限水或減量配水的保險制度接受程度。
- (四) 購水制度：藉此瞭解調查對象在乾旱缺水時期願意額外支出多少成本來購買水源，以降低缺水所造成的損害。
- (五) 懲罰制度：藉此瞭解調查對象在乾旱缺水時期，水價上漲各種不同比例時所能節省的用水量。
- (六) 限水制度：藉此瞭解調查對象較偏好多次的少量限水或少次的大幅度限水，以供制定限水策略之參考。

上述第(一)、第(二)及第(四)項目調查結果是供推估各標的缺水損失函數，而藉由第(三)及第(四)項問卷調查結果則可以瞭解研究區域內各標的限水意願，同時第(四)項問卷調查結果亦可作為研擬限水補貼措施的參考依據，第(五)項問題問卷調查結果則可供主管單位在實施限水措施(調漲水價)時的參考依據，另外第(六)項問題問卷調查結果則可作為建立限水策略的參考依據。

四、理論農業缺水經濟損失函數

一般而言，建立作物缺水經濟損失的困難度較高，也容易造成爭議，因為其中涉及作物種類、作物產量、耕地特性、耕作方式及作物價格等等複雜的問題；雖然如此，本文仍然嘗試自農民實際耕種收益的角度著手，配合作物水分生產函數的觀念，再考慮農業用水現況後，建立一可計算的農業缺水經濟損失函數。由於實際作物的單位面積產量、固定成本等變異性大；因此為便於公式之推導，本文假設在同一區域內相同作物單位面積產量、固定成本等均是相同，故正常年之農作物淨收益一般可表示如(4)式所示^[22]：

$$I = \sum_{i=1}^m I_i \dots\dots\dots (4)$$

$$I_i = P_i Y_i - P_w Q_i - V_i Y_i - f_i \dots (5)$$

式中， I_i ：i 作物單位耕種面積之淨收益(元/公頃)； P_i ：i 作物之單位產量售價(元/公斤)； Y_i ：i 作物之單位面積產量(公斤/公頃)； P_w ：單位水價(元/噸)； Q_i ：i 作物之單位面積灌溉用水量(噸/公頃)； V_i ：i 作物單位作物產量之變動成本(元/公斤)； f_i ：i 作物單位耕種面積之固定成本(元/公頃)； i ：農作物種類； m ：耕種作物總數。

(5)式中，農作物產量 Y 可以用「作物水份生產函數」(Crop-water production function)表示^[18]。所謂「作物水份生產函數」，係國內外學者從各種不同角度深入探討水份與作物產量之間的關係後，所建立的一些數學函數模式。歸納起來，這些模式可分為下列兩大類：

(一) 蒸發散模式(Evapotranspiration model)

本模式是研究農田灌溉供水狀況與作物產量間的經驗關係，分析供水量對作物產量的效應，以應用在灌溉計劃的規劃、設計及操作上。當作物需水量及作物缺水量已知時，作物產量與水量供給間的關係便可以測定，而作物需水壓力可以用實際蒸發散量 (ET_a) 與最大蒸發散量 (ET_m) 的關係加以量化，Vaux and Pruitt^[28]也指出在進行作物產量預測時，利用蒸發散量作為考慮

因素較採用實際灌溉水量為佳。當供水量不能完全滿足作物需求時，作物缺水會影響作物成長，進而影響產量，這種影響情形會隨作物種類、成長時期與缺水程度的不同而有所差異。Hanks and Hill^[21]曾對數種蒸發散模式進行回顧，根據相關的研究結果指出，在不同的水量供給情況下，實際產量 (Y_i) 與最大產量 (Y_m) 間的關係可以藉由實際蒸發散量與最大蒸發散量的關係加以推估。此種以作物耗水量(蒸發散量)為變量，尋找作物在不同生育階段不同程度的水份短缺與產量的關係模式，可稱之為作物水份生產函數的「最終產量模式」，較適合應用在灌溉規劃中進行經濟分析之用。

(二) 模擬模式(Simulation model)

本類模式是建立作物生長過程中不同農田水份狀況與礦物質累計量之間的關係，反應作物生長與水份供應間的機理型關係，具有連續動態特徵，可稱之為作物水份生產函數的「動態產量模式」，它可以跟蹤作物生長過程，並根據可能的供水狀況對作物產量進行預測、預報，具有即時模擬的特色，其較適合在用水管理過程中運用。Manani^[24]在考慮氣象、土壤及作物特性等因素之後，建立 COTMOD 模式，藉以模擬棉花對灌溉用水及氮肥施用的反應；Ephrath and Marani^[19]則對 COTMOD 模式進行修正，利用灌溉經驗資料，對乾旱缺水情況的作物產量反應進行模擬。

由於本文係探討農業用水之缺水經濟損失函數，著重其經濟規劃、分析方面，故擬採用作物水份生產函數的「最終產量模式」來計算作物產量較為適當，而暫不考慮「動態產量模式」。

作物水份生產函數的「最終產量模式」係直接將作物產量表示成作物生育期內蒸發散量的函數，它是經驗型或半經驗型的，透過對實驗數據的回歸分析予以確定。這類模式又分為「全生育期作物水份生產函數」(Whole growth period production function)模式和「生育階段作物水份生產函數」(Growth stage-wise function)模式兩種，其表示函數式分別簡述如下：

1. 全生育期作物水份生產函數：該函數以作物整個生育期的總蒸發散量為變數所表示的函數，主要常用的模式有：

Hanks(1974)模式

$$Y_i = Y_{mi} \frac{(ET_{ai})}{(ET_{mi})} \dots\dots\dots (6)$$

Stewart(1977)模式

$$1 - \frac{Y_i}{Y_{mi}} = \beta \left[1 - \frac{(ET_{ai})}{(ET_{mi})} \right] \dots\dots\dots (7)$$

Hiler and Clark(1971)模式

$$Y_i = a + b \left[1 - \frac{(ET_{ai})}{(ET_{mi})} \right] \dots\dots\dots (8)$$

上諸式中， Y_i ：i 作物單位面積實際產量(公斤/公頃-期)； Y_{mi} ：i 作物單位面積最大產量(公斤/公頃-期)； ET_{ai} ：i 作物單位面積實際蒸發散量(公分/公頃-期)； ET_{mi} ：i 作物單位面積最大蒸發散量(公分/公頃-期)； β ：經驗係數(又稱為減產係數)； a 及 b 為與氣候及土壤有關的經驗係數。

2. 生育階段作物水份生產函數：該函數考慮不同生育階段缺水受旱對產量的影響是不同的。Hiler and Clark(1971)、Stewart(1972)、Barrentt(1980)等人透過實驗發現水分短缺的時期比水分短缺量對作物產量的影響更大。由此可證明，在不同生育階段，缺水對作物產量的影響是不同的。而此類模式中，又可分為連加及連乘兩種模式，較具代表性的連加模式有：

Blanks(1975)模式

$$\frac{Y_i}{Y_{mi}} = \sum_{t=1}^n \lambda_{it} \frac{(ET_{ai})_t}{(ET_{mi})_t} \dots\dots\dots (9)$$

Howell(1975)模式

$$\frac{Y_i}{Y_{mi}} = 1 - \frac{A_i}{Y_{mi}} \sum_{t=1}^n \lambda_{it} \left[1 - \frac{(ET_{ai})_t}{(ET_{mi})_t} \right]^2 \dots\dots\dots (10)$$

連乘模式則有：

Jensen(1968)模式

$$\frac{Y_i}{Y_{mi}} = \prod_{t=1}^n \left[\frac{(ET_{ai})_t}{(ET_{mi})_t} \right]^{\lambda_{it}} \dots\dots\dots (11)$$

Minhas 等(1974)的模式

$$\frac{Y_i}{Y_{mi}} = \prod_{t=1}^n \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(ET_{ai})_t}{(ET_{mi})_t} \right]^2 \right\}^{\lambda_{it}} \dots\dots\dots (12)$$

上諸式中， $(ET_{ai})_t$ ：i 作物在 t 生育階段的單位面積實際蒸發散量(公分/公頃)； $(ET_{mi})_t$ ：i 作物在 t 生育階段的單位面積最大可能蒸發散量(公分/公頃)； A_i ：每日的水分短缺造成的作物減產值； λ_{it} ：i 作物在 t 生育階段對水份短缺的敏感因子；t 為農作物生長期不同生長階段(以實際生長期為準)；n：每期生育階段數(以實際生長期為準)。

連加模式係將各生育階段中缺水對產量的影響進行簡單的疊加，但沒有考慮連續乾旱的情況，故應較適用於某些在生長期內可多次採收的作物，例如蕃茄、檳榔及牧草等；至於其他作物如水稻等，則應較適合採用連乘模式，因為連加模式在其生長期內某階段受旱致使作物死亡的情況下，仍能算出產量，顯然不夠合理，故這種模式並不適合應用在乾旱地區，而連乘模式則在一定程度上克服了上述缺陷，其中又以 Jensen 模式最廣為應用。本文擬採用連加模式中的 Blank 模式與連乘模式中的 Jensen 模式分別推導農業缺水損失，並進行分析比較。

在乾旱缺水時期，假設作物產量及耕種面積會受影響而減少，作物售價則不變；又假設乾旱不會使農民轉作其他作物，同時因為國內農業用水水費係由政府全額補助，故可不考慮水價部份，則缺水經濟損失可以淨收益之損失表示如(13)式：

$$L_i = (P_i - V_i)Y_{mi}A_{mi} - (P_i - V_i)Y_iA_i - (A_{mi} - A_i)f_i \dots\dots\dots (13)$$

式中， L_i ：i 作物之總缺水損失(元)； A_{mi} ：i 作物正常年最大耕種面積(公頃)； A_i ：i 作物乾旱年實際耕種面積(公頃)。

如將農業灌溉效率列入考慮，則全生育期水分生產函數的缺水量可表示為

$$E_i = \frac{A_{mi}[(ET_{mi}) - (ET_{ai})]}{e_i} \dots\dots\dots (14)$$

式中， E_i ：i 作物的缺水量； e_i ：i 作物的灌溉效率。

而階段生育期水分生產函數的缺水量可表示為

$$E_{it} = \frac{A_{mi}[(ET_{mi})_t - (ET_{ai})_t]}{e_{it}} \dots\dots\dots (15)$$

式中， E_{it} ：i 作物在 t 時期的缺水量； e_{it} ：i 作物在 t 時期的灌溉效率。

利用前面所述之缺水量及作物產量函數，配合(13)式便可以分別推導出各種不同水分生產函數的缺水損失函數，並簡述如后：

(一) 全生育期水分生產函數之缺水損失

本研究擬利用 Hanks(1974)模式推導全生育期水分生產函數之缺水損失，由(6)及(14)式可得：

$$Y_i = Y_{mi} \left[1 - \frac{e_i E_i}{A_{mi} (ET_{mi})} \right] \dots\dots\dots (16)$$

將(16)式代入(13)式中可得 i 作物的總缺水損失為：

$$L_i = (P_i - V_i) Y_{mi} \left\{ A_{mi} - A_i \left[1 - \frac{e_i E_i}{A_{mi} (ET_{mi})} \right] \right\} - (A_{mi} - A_i) f_i \dots\dots\dots (17)$$

故總缺水損失函數為：

$$L = \sum_i^m L_i$$

$$= \sum_i^m \left\{ (P_i - V_i) Y_{mi} \left\{ A_{mi} - A_i \left[1 - \frac{e_i E_i}{A_{mi} (ET_{mi})} \right] \right\} - (A_{mi} - A_i) f_i \right\} \dots\dots\dots (18)$$

(二) 階段生育水分生產函數之缺水損失

1. 連加模式

本文擬利用連加模式中的 Blank(1974)模式推導階段生育水分生產函數之缺水損失，由(9)及(15)式可得：

$$Y_i = Y_{mi} \sum_{t=1}^n \lambda_{it} \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right] \dots\dots\dots (19)$$

將(19)式代入(13)式中可得 i 作物的總缺水損失為：

$$L_i = (P_i - V_i) Y_{mi} \times \left\{ A_{mi} - A_i \sum_{t=1}^n \lambda_{it} \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right] \right\} - (A_{mi} - A_i) f_i \dots\dots\dots (20)$$

故總缺水損失函數為：

$$L = \sum_i^m L_i = \sum_i^m \left\{ (P_i - V_i) Y_{mi} \times \left\{ A_{mi} - A_i \sum_{t=1}^n \lambda_{it} \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right] \right\} - (A_{mi} - A_i) f_i \right\} \dots\dots\dots (21)$$

2. 連乘模式

本文擬利用連乘模式中的 Jensen(1968)模式推導階段生育水分生產函數之缺水損失，由(11)及(15)式可得：

$$Y_i = Y_{mi} \prod_{t=1}^n \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right]^{\lambda_{it}} \dots\dots\dots (22)$$

將(22)式代入(13)式中可得 i 作物的總缺水損失為：

$$L_i = (P_i - V_i) Y_{mi} \left\{ A_{mi} \dots\dots\dots - A_i \prod_{t=1}^n \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right]^{\lambda_{it}} \right\} - (A_{mi} - A_i) f_i \dots (23)$$

故總缺水損失函數為：

$$L = \sum_i^m L_i = \sum_i^m \left\{ (P_i - V_i) Y_{mi} \left[A_{mi} \dots\dots\dots - A_i \prod_{t=1}^n \left[1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_{mi} (ET_{mi})_t} \right]^{\lambda_{it}} \right] - (A_{mi} - A_i) f_i \right\} \dots (24)$$

因此，利用上述模式，運用各項農產品資料及估算作物需水量（勢能蒸發散量）後，即可計算各種缺水率下之農業缺水經濟損失。此處作物需水量之估算可採用白蘭尼-克里德方法（Blaney-Criddle method）。1950年白蘭尼與克里德兩氏首先以此法推估美國西部之作物需水量，作物需水量在此法中與勢能蒸發散量相同，該公式考慮了作物種類、作物生長季節、平均月溫度與太陽輻射在季節及緯度之變化，並經國內學者^[2]研究過，證明該公式亦適用於台灣地區的作物。該公式可以下式表示：

$$CU = k \times F \dots\dots\dots (25)$$

式中，CU：單位面積之作物需水量(吋)；k：作物利用係數；F：作物需水量因子。

五、案例說明

(一) 研究區域簡介

本文擬以明德水庫灌溉區域為本研究案例說明對象。明德水庫於民國 59 年 7 月完工，總設計容量為 1,770 萬立方公尺，有效容量為 1,650 萬立方公尺，年平均供水量為 4,793 萬立方公尺^[7]，依據民國 83 年的水庫淤砂測量結果^[1]顯示，明德水庫累積淤砂量為 361 萬立方公尺。

明德水庫為一中小型水庫，營運標的以灌溉為主，民生及工業用水為輔，由苗栗農田水利會負責營運管理，並設有明德水庫工作站辦理營運操作事宜。明德水庫目前負責供應苗栗縣後龍灌區 1,682 公頃每年兩期的水稻及雜作灌溉用水，除此之外，水庫每日尚供應 41,200 立方公尺的民生及工業用水。

水庫集水區內計有水庫壩址、東三湖、大東勢、新店、紙湖集合星六個雨量站，依據歷年降雨量資料統計結果顯示，水庫集水區的年平均降雨量約為 2,168 公厘，主要分佈於每年的三月至九月，約佔全年總降雨量的 85%，歷年月平均降雨量則如圖 1 所示。灌區內四季氣候並無明顯的變化，歷年年平均溫度約為 21°C。

(二) 農業缺水損失函數的建立

明德水庫供水灌區之作物分為水稻與旱作兩部份，其中水稻灌溉佔水庫供水對象之大部

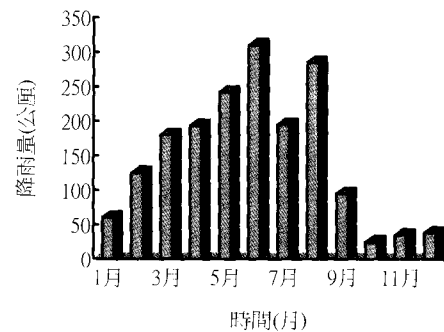


圖 1 明德水庫集水區歷年月平均降雨量(1969-1994)

分。而旱作栽種又可分為兩部份，一是雙期作水稻田在二期作及一期作中間空閒時間，部份農田種植旱作間作，原則上不予供水灌溉；另一是以種植旱作為主之大潭旱作噴灌區，以旱作栽培為主，採用噴灑灌溉。由於水庫供水主要是以水稻灌溉為大宗，故本研究僅先以水稻為計算案例說明模式之適用性，暫未考慮旱作部份。本研究擬分別利用條件估價法及理論推導結果建立本地區之農業缺水損失函數，以下就分別從條件估價法及理論推導兩部分進行討論分析。

1. 條件估價法

(1)問卷調查執行

為使問卷調查之結果能確實反應實際情況並提高回收率，故本文採取實地面訪、當面溝通的作法、即問即答，並與受訪者討教其為何要如此回答，其採用的方法為何？藉以確定受訪者確實明瞭問題，是否能夠達到該答案所定的目標，並於訪問後致贈禮品以提高民眾參與回答的興趣。本調查研究已於民國 84 年 12 月 6 日至 12 月 15 日完成相關問卷調查。明德水庫灌溉區域主要是以後龍地區為主，總灌溉面積為 1,682 公頃，民國 84 年明德水庫灌區專業農戶約為 500 戶，且考慮經費、人力與時間因素，本研究採人員訪問調查方式，而抽樣方式則以判斷抽樣法及滾雪球方式進行，樣本數之決定則參考下列二公式：

$$n_0 = \frac{\bar{n}}{1 + \frac{\bar{n}}{N}} \dots\dots\dots(26)$$

$$\bar{n} = \frac{t^2 S^2}{d^2} \dots\dots\dots(27)$$

式中： n_0 為樣本個數； N 為母體個數； d 為可容忍之誤差值； S^2 為 variance；而 t^2 為 t 分佈函數機率值。

本文取 α (信賴區間)=0.75, $d=0.2$, $S^2=1.0$, 則 $n_0 \approx 11$, 因此，後龍地區農業用戶共訪問 6 戶，另外在苗栗市訪問 3 戶，頭屋鄉則訪問 2 戶，農業用水合計共訪問 11 戶。

在訪問的 11 戶農業用水單元中，因為有一戶認為只要有缺水的情況發生，該農戶將以其他水源代替明德水庫所提供的灌溉用水，對於問卷

中的各項辦法，例如保險、購水及懲罰制度，均不表贊同，因此，本文將其視為無效問卷，故農業用水問卷總計有 10 份有效問卷。

(2)問卷調查結果分析

農業用水問卷調查初步統計結果如表 1 所示，由表 1 可知農業用水戶對於預繳水費以防止乾旱期對其限水的保險制度多表贊同，不過所能接受的保險費用不能太高。對於乾旱期購水以使農作物不至發生缺水情況的購水制度接受程度，則視限水比例而有所不同，以限水 10% 為例，農戶大多認為對作物生長的影響不大或是可以找到其它水源補充此一不足的部份，故多不願意多繳水費購水；限水比例越高，則所願意用來購水的水費也越高。對於乾旱期提高水費以迫使農業用水減少用水量的懲罰制度接受程度，因其多認為目前用水都已經很省，所以能夠節省的比例有限。此外依據問卷結果顯示，受訪的農業用水戶均偏好多次的少量限水，這是因為受訪者認為若是限水量過大將會對農作物收穫造成極大的影響。另外本文擬從限水時農民願意負擔的購水費用探討農業缺水損失函數，以此額外的支出作為限水時農業用水的缺水損失，所建立的農業缺水損失函數如圖 2 所示，其中缺水損失係以民國 84 年物價水準為計算基年。

由圖 2 可知在限水 10% 及 25% 的情況下，仍有農業缺水損失為零的情形發生，此乃是因為部分農民在這兩種限水比例下並不願意負擔購水費用；因此，造成農業缺水損失為零的狀況出現。同時，由於農民在各種限水比例下所願意負擔的購水費用差異極大，使得本文所求出之農業缺水損失差異亦極大，但是由其平均值可以大致看出農業缺水損失呈現一凹向上(convex)的型式，這與國外^[23,27]所建議的型式不謀而合；從水資源管理的角度上來看，少量多次的缺水所造成的損失較多量少次的缺水為少，故較受用水戶的歡迎，此點與真實情況相符合。但各不同限水比例下所造成之損失較分散且其值偏小，推論其原因可能是在各種不同限水比例下，問卷設計的購水比例過低及樣本數較少所造成，故日後宜針對此缺點進行改進。

表 1 問卷調查結果

項 目			所佔百分比	
保險制度 接受程度	以水費計算	多付 0%	10%	
		多付 10%	10%	
		多付 25%	40%	
		多付 50%	30%	
		多付 75%	10%	
	以年產值計算	支出 0%	10%	
		支出 1%	60%	
		支出 2.5%	30%	
購水制度 接受程度	以年產值計算	限水 10%	多付 1%	90%
			多付 2%	10%
		限水 25%	多付 1%	40%
			多付 2%	60%
		限水 50%	多付 2%	80%
			多付 4%	20%
		限水 75%	多付 2%	60%
			多付 4%	40%
懲罰制度 接受程度	水費調漲 年產值比例	調高 1%	節省用水 0%	60%
			節省用水 1%至 10%	40%
		調高 5%	節省用水 0%	10%
			節省用水 1%至 10%	50%
			節省用水 11%至 25%	40%
		調高 10%	節省用水 0%	10%
			節省用水 1%至 10%	50%
			節省用水 11%至 25%	30%
			節省用水 26%至 50%	10%
			多次少量限水	100%
限水制度接受程度		少次大幅度限水	0%	

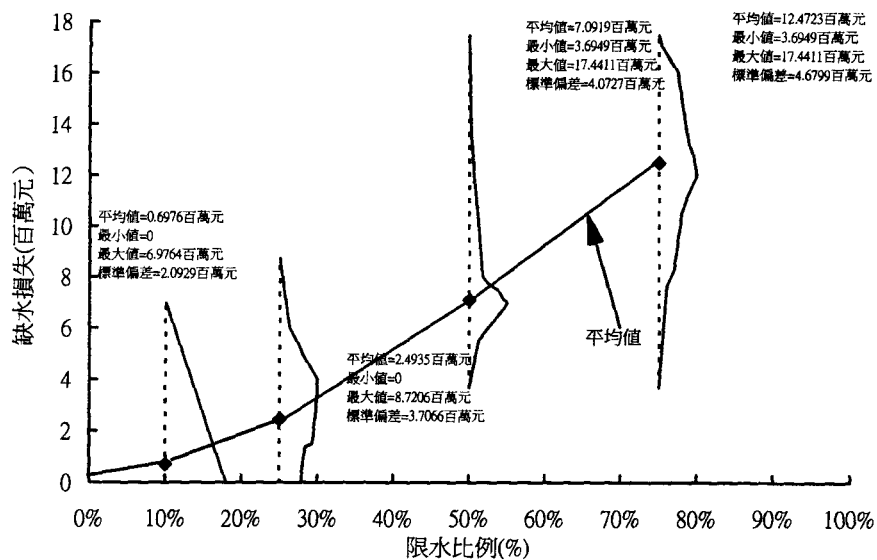


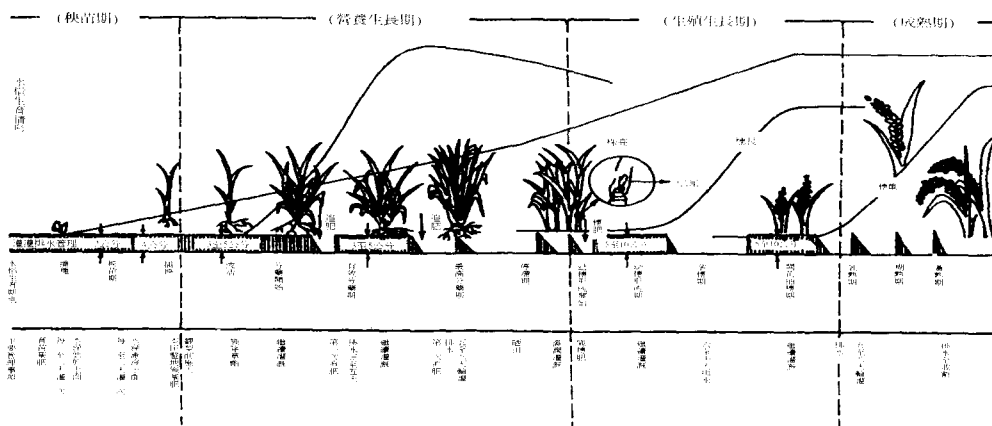
圖 2 問卷調查所獲農業缺水損失函數(以民國 84 年為基準)

2. 理論模式計算

(1) 水稻之用水栽培管理

依據中國農業工程學會^[6]指出，水稻依其生長特性可以分為下列八個階段：①成活至分蘗期；②分蘗始期至分蘗終期；③有效分蘗終期至幼穗形成始期前；④幼穗形成始期至終期；⑤孕穗期；⑥抽穗開花期；⑦乳熟期至糊熟期；⑧黃熟期至完熟期，其栽培管理階段則如圖 3 所示。

而各期作不同月分之水稻勢能蒸發散量如表 2 所示，每一期作合計約為 650 至 670 公釐，與農復會^[23]所建議之台灣地區水稻之蒸發散量每期作大約為 600 至 700 公釐差異不大，故文中採用表 2 所計算的勢能蒸發散量，再考慮苗栗地區之灌溉效率約為 77 %^[2]來估算；另外明德水庫灌區所需的稻米生產費用與收益相關資料列如表 3 所示^[3]。



資料來源：林達雄，“稻作灌溉”，中國農業工程學會編輯，中國農業工程手冊—灌溉·墾植·管理，台北，1990。

圖 3 水稻栽培管理階段示意圖

表 2 明德水庫灌區各期作水稻各月之理論單位面積勢能蒸發散量

水稻	月份	(1)	(2)	(3)	(4)=(2)*(3)/100	(5)	(6)=(4)*(5)	(7)
		月平均氣溫 (°C)	月平均氣溫 (°F)	日照百分率 (%)	F	作物利用 係數 k	單位面積勢能 蒸發散量(inch)	單位面積勢能 蒸發散量(cm)
第一期作	3	14	57.2	8.40	4.80	1.05	5.05	12.81
	4	20	68.0	8.62	5.86	1.05	6.15	15.63
	5	24	75.2	9.34	7.02	1.05	7.37	18.73
	6	26	78.8	9.25	7.29	1.05	7.65	19.44
							第一期作單位面積勢能蒸發散量總和	66.62
第二期作	8	27	80.6	9.08	7.32	1.05	7.68	19.52
	9	26	78.8	8.31	6.55	1.05	6.88	17.46
	10	23	73.4	8.08	5.93	1.05	6.23	15.82
	11	19	66.2	7.40	4.90	1.05	5.14	13.07
							第二期作單位面積勢能蒸發散量總和	65.87

表 3 明德水庫灌區稻米生產費用與收益相關資料

		第一期作	第二期作
稻米單位產量售價 (政府收購價格) (元/公斤)		21	21
單位產量 變動成本 (元/公斤)	種 苗 費	0.96	0.89
	肥 料 費	0.86	0.78
	人 工 費	4.06	3.48
	畜 工 費	0.09	0.30
	機 工 費	5.01	3.98
	農 藥 費	0.61	0.65
	材 料 費	0.07	0.05
	購 水 費	0.08	0.83
合 計		11.74	10.96
單位產量 固定成本 (元/公斤)	常年水利費	0.025	0.008
	農用設施費	0.037	0.018
	農 機 具 費	0.045	0.026
	合 計	0.107	0.052
單位面積最大產量 (公斤/公頃)		6181	7034
灌溉面積(公頃)		1682	1682

資料來源：台灣省政府農林廳，民國八十四年台灣農業年報，南投，1995。

(2) 作物水分短缺敏感因子的推估

在前面所建立之階段生育水分生產函數之農業缺水經濟損失模式中，其中的作物水分短缺敏感因子 λ ，由於目前尚無法以作物生態生理的角度出發求得，而是透過對大量的灌溉實驗，計算在各種不同灌溉水量下所得的作物產量，然後代入上述作物階段生育水分生產函數中，利用統計方法分析獲得不同生長時期的作物水分短缺敏感因子 λ 。楊純明等^[12]、李建鋒^[4]及陳錦松^[11]曾進行土壤水分對稻米產量及品質影響的試驗研究，其結果顯示不同時期的灌溉缺水對於水稻產量的影響亦不同，不過其並未利用作物水分短缺敏感因子，從作物水分生產函數的觀點探討，而是利用迴歸的方式分析土壤水分與水稻產量的關係。黃振昌^[13]雖然會對乾旱時期水稻缺水與產量的關係進行試驗，不過由於其實施缺水率灌

溉期間為一期作自開花期至完熟期，二期作自孕穗期至完熟期，再加上其實施傳統灌溉的區域僅分為正常用水量灌溉一區及缺水率灌溉兩區，因此，若要利用上述資料推導台灣地區水稻作物水分短缺敏感因子有其實際應用上的困難。

蔡煥杰及茆智等人^[5,15]在大陸廣西桂林灌溉試驗中心站，進行水稻水分短缺敏感因子試驗研究，該站位處於東經110°，北緯25°，氣候溫暖，年平均氣溫為19.5°C，年降雨量在1,400至1,700公厘之間，70%的降雨集中在春季，夏、秋兩季降雨較少，土壤為粘壤土，其灌溉方式為傳統方式（漫灌）。而水稻水分短缺敏感因子的計算步驟係採用最小二乘法求出各模式所需參數值。

表4為蔡煥杰及茆智等人所獲第一、二期水稻 Jensen 及 Blank 模式之4不同生育階段之水分短缺敏感因子。表中第二期作 Jensen 與 Blank 模式之 λ 值變化皆以第二階段為最大，而第一與第三階段次之，第四階段最小；而 Jensen 模式再第一期作中以第三階段最大，第二與第三階段次之，第一階段最小。故可知 λ 值的變化是水稻生理特性與氣象條件結合作用之結果，這種變化是合理的。故本研究擬採各期作各階段均值進行試算。

(3) 水稻缺水經濟損失的推估

利用(18)式及相關的實際資料可以獲得水稻 Hanks 全生育期水分生產函數之缺水損失；同時考慮水稻在缺水30天至45天會死亡^[8]，因此將缺水100%的農業損失修正為與實際最大損失值，計算結果如圖4所示，圖中之缺水率則定義如下：

$$\text{缺水率}(\%) = \frac{\text{目標需水量} - \text{實際取水量}}{\text{目標需水量}} \times 100\% \quad (28)$$

而在連加模式中，本研究利用表4的 λ 值帶入模式中計算，而由於研究區域第二期作適合的插秧時間為七月中旬至八月上旬^[16]，以及表4中作物水分短缺敏感因子僅將水稻生長期分為4期並計算其 λ 值；故本研究將水稻生長期概分為

表 4 水稻各生育期之 Jensen 及 Blank 模式缺水敏感參數 λ

作物種類	模式種類	生育階段				資料年份
		成活期至分蘗終期	有效分蘗終期至幼穗形成終期	孕穗期至抽穗開花期	乳熟期至完熟期	
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	
第一期作	Jensen 模式	0.0854	0.3137	0.6287	0.2977	1988 年及 1990-1993 年平均值
第二期作	Jensen 模式	0.1209	0.2376	0.1300	0.0213	1988 年
		0.1940	0.5395	0.2334	-0.0726	1990 年
		0.1359	0.3747	0.1683	-0.0612	1991 年
		0.2090	0.7025	0.2199	0.1523	1992 年
		0.3861	0.5898	0.2889	0.1204	1993 年
		0.2092	0.4888	0.2061	0.0588	1988 年及 1990-1993 年平均值
	Blank 模式	0.8492	-0.2864	0.7601	-0.2661	1988 年
		0.3714	0.7879	0.3722	-0.4889	1990 年
		-0.0348	1.0055	0.3161	-0.3049	1991 年
		0.0525	0.5575	0.2909	0.0607	1992 年
		0.4524	0.3708	0.1626	-0.0268	1993 年
		0.3451	0.5443	0.3804	0.0121	1988 年及 1990-1993 年平均值

資料來源：茆智、崔遠來、李新建，“我國南方水稻水分生產函數試驗研究”，水利學報，9，21-30，1994。

第一期作 3 月至 6 月，第二期作 8 月至 11 月，而由於相關的研究^[5]中僅推算出 Blank 模式第二期作的水分短缺敏感因子 λ ，故本研究僅計算 Blank 模式第二期作的缺水損失，結果如圖 5 所示。而在連乘模式中，由於第一、第二期作的水分短缺敏感因子 λ 均有資料，故本研究分別計算第一、第二期作的缺水損失，結果如圖 6 所示。

(4) 結果分析

由 Jensen 模式與 Blank 模式所得的結果可知，一期作及二期作水稻在插秧整田及成熟時期較能忍受缺水情況，故其缺水損失較小；而在生長、開花及結穗時期較不能忍受缺水情況，故其缺水損失較大，而依據前人研究報告^[13]指出，在水稻生長初期(植株短小)及末期(抽穗後，植株已

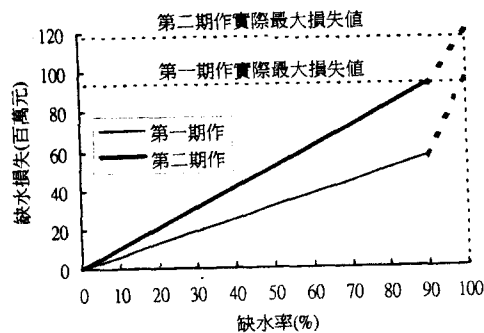


圖 4 水稻 Hanks 全生育期模式在不同缺水率之經濟損失變化(以民國 84 年為基準)

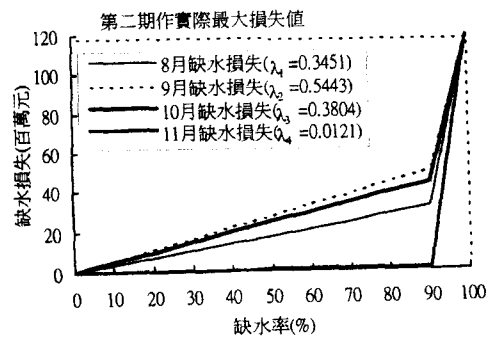
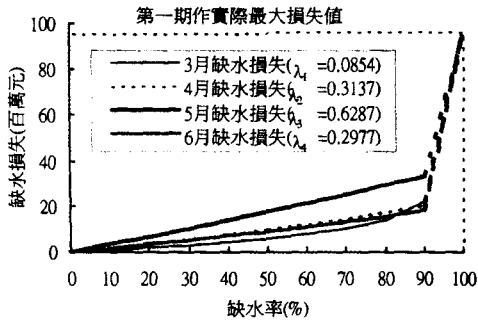
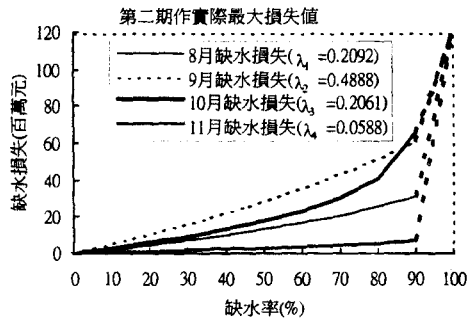


圖 5 Blank 連加模式估算二期作水稻在各月份不同缺水率之經濟損失變化(以民國 84 年為基準)



(a)第一期稻作在不同月份及缺水率之經濟損失變化



(b)第二期稻作在不同月份及缺水率之經濟損失變化

圖 6 Jensen 連乘模式估算一、二期作水稻在各月份之不同缺水率與經濟損失變化(以民國 84 年為基準)

成長) 因需水量較小, 若進行斷水, 罕有枯死現象, 故對其影響不大; 但在中期(分蘗旺盛期及孕穗期) 植株高大, 需水量較大; 若進行斷水, 則極易導致作物死亡, 故本研究經由上述理論推得所得的農業缺水損失函數大致與實際情況相符合。另外, 鑒於水稻係屬階段生育作物, 全生育期模式較不適用, 而在連加與連乘兩種模式中, 連加模式係將各生育階段中缺水對產量的影響進行簡單的疊加, 但沒有考慮連續乾旱的情況; 因此, 在水稻生長期內某階段受旱致使作物死亡的情況下, 仍能算出產量, 連加模式顯然不夠合理, 而連乘模式則在一定程度上克服了上述缺陷。

不過由圖 6 中可以看出經由 Jensen 模式所得的水稻農業缺水損失與一、二期水稻實際最大損失值差異頗大, 此點可能是因為本研究採用的作物水分短缺敏感因子是依據大陸地區實驗分析所得的結果, 故可能與台灣的情況會有些許的差異; 同時氣象條件亦有些微的差距。而由表 4 中可以發現某些時期的作物水分短缺敏感因子為負值, 其原因可能為:

- ① 此階段缺水反而造成增產效益, 這一般是發生在試驗時該階段水分控制狀態並非是最佳狀態;
- ② 利用最小二乘法推求作物水分短缺敏感因子時, 由於多元迴歸數學分配的約束關係所造成。

由於茆智等^[5]的研究區域為廣西桂林灌溉中心試驗站, 其氣溫較明德水庫灌區為低, 降雨量亦較本研究區域為低, 故兩地之間的勢能蒸發散量應有所不同。而茆智等^[5]曾針對第二期水稻生長第二階段作物水分短缺敏感因子與作物勢能蒸發散量的關係進行分析, 結果如(29)式所示:

$$\lambda_2 = 0.01556 \times 1.7554^{ET_{02}} \dots\dots\dots (29)$$

式中, λ_2 : 第二期水稻第二階段的作物水分短缺敏感因子; ET_{02} : 第二期水稻自插秧至第二階段末的勢能蒸發散量(公厘/天)。

由(29)式中可知作物勢能蒸發散量會影響作物水分短缺敏感因子; 因此, 本研究利用上式配合表 2 中研究區域的勢能蒸發散量資料, 可以計算出研究區域內第二期水稻第二階段的作物水分短缺敏感因子為 0.4991, 較原來所獲值大, 然後再利用(24)式估算出研究區域內第二期水稻在第二階段的缺水損失, 並將其結果繪如圖 7。而其他各生長階段則無此公式, 故不能進行此項分析, 但由上可知勢能蒸發散量較大之區域 $\bar{\lambda}$ 值可能也較大, 而在相同缺水率下會造成較大之缺水損失。

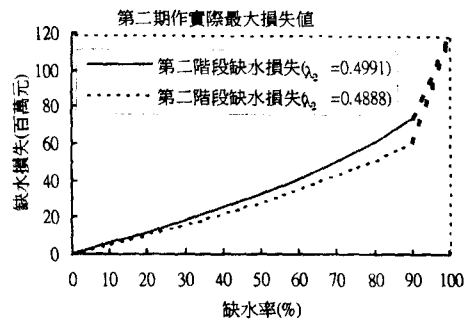


圖 7 Jensen 連乘模式估算二期作水稻第二階段不同 λ_2 值之不同缺水率與經濟損失變化(以民國 84 年為基準)

六、結語與建議

本文已分別利用問卷調查及理論推導建立農業乾旱缺水損失函數，但是由於研究區域內農民對於在各種限水狀況下所願意負擔的購水費用差距極大；因此，經由問卷調查所得的農業缺水損失函數因較分散且偏低，這也可能是樣本數太少或問卷內容不甚完善所致，故日後尚須進一步修正方能使其結果更趨合理。另外透過作物水分生產函數，利用作物需水量與作物產量之關係循序推導，可推導出農業在各種不同乾旱缺水狀況下的經濟損失函數，為嚐試評估此函數之適用性，故本研究乃採用大陸方面所獲之水稻水分短缺敏感因子進行實例說明，其結果變化大致與水稻生理特性及氣象條件變化綜合影響結果相吻合，故該函數應有其一定的適用性，另外此模式亦可應用到其他不同作物之乾旱缺水損失估算。本研究所建立之農業缺水損失函數，除可建立「移用水者」能夠且願意接受用水移轉之補償價格外，亦可供相關專家學者未來從經濟方面探討缺水時期的限水、配水策略。

農業缺水損失函數理論的建立與計算方法一般而言較複雜且較難以量化，也無明確的檢定與驗證方法；因此，如何修正模式，使其配合國內實際灌溉情況，尚需進一步的深入研究其包括之內涵；同時本研究發現作物水分短缺敏感因子對經濟損失之影響極明顯，有鑑於不同灌溉方

式(漫灌或噴灌)的灌溉效率可能會有所不同；故建議國內未來可就不同灌溉方式進行相關的試驗研究。另外本文僅考慮農業缺水直接經濟損失，日後可再依實際情況將缺水所導致間接費用的損失一併加以考慮，或利用問卷調查的方式獲取相關資訊，再加以修正後，以進一步完善農業乾旱缺水損失函數的建立。

七、謝誌

本研究之完成，承蒙 經濟部水資源局提供研究經費，僅致謝忱。

研究期間，多承經濟部水資源局劉主任秘書豐壽及黃科長月娟、行政院農業委員會胡技正文章、林技正尉濤、台灣省苗栗農田水利會洪會長東嶽、苗栗農田水利會管理組謝組長金佑之指導及提供意見，明德水庫工作站蕭站長金生及農業工程研究中心黃副研究員振昌提供資料，謹表由衷之謝意。

八、參考文獻

1. 元裕工程技術顧問有限公司，明德水庫淤積測量與營運操作方式改善規劃研究報告，1995。
2. 台灣省水利局，雜作灌溉手冊，台中，1980。
3. 台灣省政府農林廳，民國八十四年台灣農業年報，南投，1995。
4. 李建鋒，土壤水分境況對水稻生育及稻米品質之影響，碩士論文，國立中興大學農藝學研究所，台中，1993。
5. 茹智、崔遠來、李新建，“我國南方水稻水分生產函數試驗研究”，水利學報，9，21-30，1994。
6. 林達雄，“稻作灌溉”，中國農業工程學會編輯，中國農業工程手冊—灌溉•墾植•管理，台北，1990。
7. 逢甲大學，明德水庫安全評估工作總報告，1990。
8. 張佑芳，“乾旱對臺灣地區水稻及玉米產量之影響”，氣象學報，40(2)，168-184，1994。
9. 陳永祥，極端乾旱的統計分析—以高屏溪為

- 例，碩士論文，國立台灣大學農業工程研究所，台北，1992。
10. 陳佩君、趙寶玉，乾旱災害經濟損失計算方法探討，水利經濟，1994。
 11. 陳錦松，水分管理和施用穀殼對水田氧化還原狀態旱水稻產量的影響，碩士論文，國立中興大學農藝學研究所，台中，1976。
 12. 楊純明、向為民，”土壤缺水對水稻生長與產量之影響”，中華農業氣象，1(4)，143-150，1994。
 13. 黃振昌，乾旱時期嚴重缺水地區水稻灌溉水量及灌溉方法之研究，農業工程研究中心，1997。
 14. 楊純明、向為民，”土壤缺水對水稻生長與產量之影響”，中華農業氣象，2(1)，1995。
 15. 蔡煥杰，”作物水分生產函數與缺水條件下的作物水管理”，康紹忠、蔡煥杰編輯，農業水管理學，大陸，1996。
 16. 農復會等，水稻栽培灌溉管理，1970。
 17. 蕭景楷，防災效益的評估—理論與實際(一)，行政院國科會，台北，1992。
 18. Doorenhob, J., and Kassam, A.H., Yield response to water, Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, 1979.
 19. Ephrath, J.E., and Marani, A., “Simulation of the effect of drought stress on the rate of photosynthesis in cotton”, Agricultural Systems, 42, 327-341, 1993.
 20. Hanks, R.J., “Model for predicting yield as influenced by water use”, Agron J., 66, 660-665, 1974.
 21. Hank, R.J. and Hill, R.W., Modeling crop response to irrigation in relation to soils, climate and salinity, Oxford, Pergamon, 1980.
 22. James, L.D., and Lee, R.R., Economics of water resources planning, McGraw-Hill Book Company, 1971.
 23. Lund, J.R., and Reed, R.U., “Drought water rationing and transferable rations”, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 121(6), 429-437, 1995.
 24. Marani, A. “COTMOD - A model to optimize cotton response to irrigation and Nitrogen”, In: Rymon, D. ed., Optimal yield management, Brookfield, Avebury, 1988.
 25. Rao, A.R., and Voeller, T.L., “Development and testing of drought indicators”, Water Resources Management, 11, 119-136, 1997.
 26. Sharma, T.C., “Estimation of drought severity on independent and dependent hydrologic series”, Water Resources Management, 11, 35-49, 1997.
 27. Sigvaldason, O.T., “A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system”, Water Resources Research, ASCE, 12(2), 263-278, 1976.
 28. Vaux, H.J., and Pruitt, W.O., “Crop-water production functions” In: Hillel, D. ed., Advances in irrigation, Academic Press, New York, 1983.
 29. Wilhite, D.A., “Responding to drought: common threads from the past, visions for the future”, Journal of the American Water Resources Association, 33(5), 951-959, 1997.

收稿日期：民國 87 年 7 月 1 日

修正日期：民國 87 年 11 月 14 日

接受日期：民國 87 年 11 月 23 日