

聖嬰-南方振盪現象氣候預報對臺灣水資源之潛在影響與最適規劃(III)
The Potential Effect of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Forecast on and
Optimal Planning of Taiwan's Water Resources (III)

計畫編號：NSC90-2621-Z-002-016

計畫主持人：徐年盛

國立台灣大學土木工程系副教授

摘要

本研究之目的在於建立一套在反聖嬰-南方振盪現象下推估農業最佳休耕面積的有效方法，以供當預測反聖嬰現象將來臨之前，事先建立農業最佳休耕面積與風險度曲線圖，並據以決定平均最佳休耕面積。本方法可提供決策者當預測反聖嬰現象發生時，在現有水利設施以及發生反聖嬰現象強度不確定因素下，事先決定平均最佳休耕面積，及其所能獲得之效益。本研究建立之方法包括下列各步驟：(1)雨量測站之選定；(2)溫度與雨量之合成；(3)模擬流量之生成；(4)旬缺水量之推估；(5)農業缺水損失之推估；以及(6)平均最佳休耕面積之估算。

本研究將所建立之方法應用於苗栗及部分台中地區以彰顯本方法之實用性。研究中首先模擬 50 組中、強以上反聖嬰現象下研究區域之雨量與溫度，並將上述資料代入水平衡模式產生 50 組河川流量，然後進行研究區域中缺水量之推估，同時將各分區之缺水量代入農業缺水損失模式進行缺水損失計算，並進行風險分析以計算出反聖嬰現象下各灌區之最佳休耕面積及缺水損失，最後估算出反聖嬰現象下研究區域之最佳休耕面積及其所能獲得之效益。

研究結果顯示：(1) 研究區域在中、強以上反聖嬰現象發生時之一期稻作平均最佳休耕面積(即風險度為 0.5 所對應之最佳休耕面積)為 2,772 公頃，且對應之平均缺水損失則約為 1.02×10^8 元；(2)在完全不休耕之條件下平均缺水損失約為 5.21×10^8 元，意即當一期稻作播種之前如預測中強度反聖嬰現象即將來臨，則休耕 2,772 公頃之稻作面積將可獲得 4.19×10^8 元之效益；以及(3)水庫之初始蓄水量對於最佳休耕面積之大小有顯著影響，且即使水庫之初始蓄水量為滿庫情況下，其平均最佳休耕面積仍需達到 1,950 公頃方能得到最小之平均缺水損失 0.74×10^8 元。

關鍵詞：聖嬰-南方振盪、聖嬰、反聖嬰、缺水損失、作物產量-水量函數

Keywords：El Niño-Southern Oscillation、El Niño、La Niña、Lost、Crop production-water function

前言

在 1982-1983 嚴重的聖嬰現象期間，估計當時西太平洋之南亞國家和澳洲，由於乾旱及衍生出來的火災，損失約 35 億美元，而東太平洋區的國家則因水災損失約 25 億美元，全世界總損失約有 81 億美元(柳中明與劉彥蘭，2000)。聖嬰現象的發生除災害所帶來的財產損失外，同時也造成糧食供應減少和飢荒問題。台灣地區受到聖嬰現象及反聖嬰現象的影響雖然沒有赤道附近的國家來的顯著，但仍具有一定程度的影響。

吳明進(1986)指出，聖嬰現象發生時，台灣地區中部初夏梅雨量可能增加；反聖嬰現象發生時則情況相反。涂建翊與余嘉裕(1998)指出在聖嬰發生期間，春季、夏季及秋季降水情況會比正常多，冬季降水會減少；反聖嬰現象發生時則情況相反。徐年盛與林岳岡(2000)，指出聖嬰-南方振盪現象對台灣地區北部和中部的雨量及溫度影響較其他地區顯著，並計算出水資源供水系統在發生聖嬰-南方振盪現象下之可靠度。盧孟明(2000)指出當發生反聖嬰現象時，台灣地區隔年之春雨有偏少的現象。雷浩仁(2001)亦指出聖嬰現象及反聖嬰現象在台灣中部及北部具有較顯著之差異性，並發現中強以上反聖嬰現象造成台灣地區春季降雨減少。由上所述，可知當反聖嬰現象發生時，台灣中部及北部地區之春雨均較正常情況減少。根據過去之經驗，當台灣地區發生缺水時，常於作物生長期間，藉由農業休耕來提供生活與工業用水，而造成農業

投資之損失，因此如能在預測反聖嬰現象來臨之前，事先決定農業最佳休耕面積應可減少臨時休耕所造成之損失。蔡天雄(1996)運用亂數模擬各種可能的休耕情況，研討休耕率與可挪用水率之關係，並進行各個參數影響可挪用水率之靈敏度分析，瞭解各相關因子對可挪用水率之影響程度，做日後決定休耕區域之參考。廖朝軒等(1998)利用問卷調查的方式以及建立農業乾旱缺水損失函數進行流域缺水損失之評估，並發現缺水敏感因子對於缺水損失之影響極明顯。

本研究目的在於建立一套方法以供當預測反聖嬰現象將來臨之前，事先建立農業最佳休耕面積與風險度曲線圖並據以決定平均最佳休耕面積。本方法可提供決策者當預測反聖嬰現象發生時，在現有水利設施以及發生反聖嬰現象強度不確定因素下，事先決定平均最佳休耕面積及其所能獲得之效益。本研究並將本方法實際應用於台灣北部之苗栗及部份台中地區，以彰顯本方法之實用性。

反聖嬰現象下農業最佳休耕面積推估方法之建立

茲將本研究所建立方法之流程列於圖 1，流程圖中之各步驟包括：(1)雨量測站之選定：進行流量站與雨量站之間相關性分析，選出相關性較佳之雨量測站作為後續分析之用；(2)溫度與雨量之合成：利用殘值模式合成出各流域多組反聖嬰現象下之溫度與雨量；(3)模擬流量之生成：將各流域歷史雨量與溫度資料以及各入流點之歷史流量資料代入水平衡模式中進行參數之檢定與驗證，再將各入流點之水平衡模式參數與殘值模式所合成各流域之各組雨量輸入水平衡模式以生成多組各入流點之流量；(4)旬缺水量之推估：由水平衡模式所模擬出來之流量代入多水庫系統操作模擬模式中，並配合現行水庫規線及現有水利設施之放水規則，求出每灌區每旬缺水量；(5)農業缺水損失之推估：以農業缺水損失模式計算出 50 組最佳休耕面積；(6)平均最佳休耕面積之估算：將 50 組最佳休耕面積進行頻率分析以建立農業最佳休耕面積與風險度曲線圖並據以決定平均最佳休耕面積。

1 雨量測站選定

由於歷史發生聖嬰和反聖嬰事件次數較少，且流域中雨量站資料通常記錄不全或遺失，故需先進行雨量站資料篩選及分析。

2 溫度與雨量之合成

聖嬰-南方振盪現象對溫度和雨量又都造成影響，故推測溫度和雨量兩者之間可能會存在較高的相關性，故採用 Matalas(1967)所發展之殘值模式(Residual approach)藉由歷史紀錄資料合成反聖嬰之溫度和雨量。利用殘值模式合成溫度和雨量時，既能保持歷史資料平均值和標準差之統計特性，同時又考慮到溫度與雨量兩者間之相關性。殘值模式可表如下式所示：

$$[X_t] = [A][X_{t-1}] + [B][\varepsilon] \quad (1)$$

上式中，

$[X_t]$ 、 $[X_{t-1}]$ = 標準化後當期(lag zero)與延遲一期(lag one)之溫度及雨量；

$[\varepsilon]$ = 隨機常態變量(random normal deviates)；

$[A]$ 、 $[B]$ = 包含當期(lag zero)與延遲一期(lag one)之交互相關係數。

3 模擬流量之生成

本研究應用美國 Country Study Program 所提供之水平衡概念模式(Water Balance Model, 簡稱 WatBal)來估算河川流量，該模式為在 Microsoft Excel 環境下工作，並以 Visual Basic Applications 設計模式及輸入與輸出功能。WatBal 模式假設有效降雨降(effective precipitation)至地面後，一部份成為直接逕流(direct runoff)流入河川；而另一部份則入滲至土壤中。入滲水進入土壤中，一部份轉變成地表逕流(surface runoff)、伏流(sub-surface flow)以及基流(base flow)而排至河川，另一部份則進入土壤水分；土壤水分亦可經蒸發散(evapotranspiration)的作用離開土壤。而河川流量(streamflow)為直接逕流、地表逕流、伏流以及基流之總和。上述水平衡關係可表示如下：

$$S_{\max} \frac{dz}{dt} = P_{eff} - R_d - R_s - R_{ss} - R_b - E_v \quad (2)$$

$$R = R_d + R_s + R_{ss} + R_b \quad (3)$$

上式中，

S_{\max} =集水區土壤最大含水量；

z =土壤相對含水量(relative storage)，其值介於 0 與 1 之間；

t =時間；

P_{eff} =有效降雨量；

R_d =直接逕流量；

R_s =地表逕流量；

R_{ss} =伏流量；

R_b =基流量；

E_v =蒸發散量；

R =河川流量。

WatBal 模式中之基流量必須由分析歷史資料來決定，本研究選擇各河川超越機率在 90% 以上的歷史低流量作為基流量，其他各相關流量及蒸發散量可由下列諸式求得：

$$R_d = \beta P_{eff} \quad (4)$$

$$R_s = \begin{cases} z^\epsilon (P_{eff} - R_b) & \text{if } P_{eff} > R_b \\ 0 & \text{if } P_{eff} \leq R_b \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{ss} = \alpha z^\gamma \quad (6)$$

$$E_v = PET \times z' \quad (7)$$

上式中，

PET =潛勢能蒸發散量(potential evapotranspiration)；

z' =土壤潮濕狀態(soil moisture state)；

$\alpha, \beta, \gamma, \epsilon$ =參數(parameter)。

WatBal 模式中， S_{\max} 、 α 以及 ϵ 等三個參數必須經由模式之檢定與驗證求得，而 β 與 γ 則由模式自動給定。

4 旬缺水量之推估

本研究將 WatBal 所生成多組河川系統入流點之流量代入多水庫系統操作模擬模式中，即可在符合該區域水庫之操作規線及打折供水規則下，求出每灌區每旬之缺水量。本研究採用黃敏智(2002)所建立之多水庫系統操作模擬模式，進行研究區域各灌區旬缺水量之推估。

5 農業缺水損失之推估

農業缺水損失之估算需考慮作物種類、作物產量、耕地面積、耕地特性、灌溉機制、灌溉缺水量以及政府政策等因素，其中，作物產量因與整個作物生育期中之總水量無關(將利用實際例子說明之)，而與缺水量之時間分佈有關，使得農業缺水損失之推估更形複雜。本研究參照廖朝軒等(1998)所定義之農業缺水損失函數及 Jensen(1968)所定義之作物產量-水量函數以建立農業缺水損失估算模式，此模式可表示出不同缺水情況所造成之損失且較適用於大區域農作缺水損失之估算。

假設在農業不缺水的條件下，作物之耕種面積、單位面積灌溉用水量及單位面積產量皆可達到最大，且其淨收益為最大淨收益，則作物 i 之最大淨收益可表示如下式：

$$I_i^{\max} = (P_i - V_i)Y_i^{\max} A_i^{\max} - f_i A_i^{\max} - \sum_{t=1}^n P_w Q_{it}^{\max} A_i^{\max} \quad (8)$$

上式中，

I_i^{\max} = I 作物最大淨效益(元)；

P_i = I 作物單位產量之售價(元/公斤)；

V_i = I 作物單位產量之變動成本(元/公斤)；

Y_i^{\max} = I 作物之單位面積最大產量(公斤/公頃)；

A_i^{\max} = I 作物之最大耕作面積(公頃)；

f_i = I 作物單位面積之固定成本(元/公頃)；

P_w = 單位水價(元/噸)；

Q_{it}^{\max} = I 作物在 t 生育期之單位面積灌溉用水量(噸/公頃)；

i = 作物種類註標；

t = I 作物之生育期註標；

n = I 作物之生育期總數。

假設在乾旱缺水時期不轉作其他作物，則作物產量及耕種面積會受影響而減少，若假設作物售價及農業用水水價保持不變，則作物 i 所能得到之淨效益為：

$$I_i = (P_i - V_i)Y_i A_i - f_i A_i - \sum_{t=1}^n P_w Q_{it} A_i \quad (9)$$

上式中，

I_i = I 作物淨效益(元)；

Y_i = I 作物之單位面積產量(公斤/公頃)；

A_i = I 作物之實際耕作面積(公頃)；

Q_{it} = I 作物在 t 生育期之單位面積灌溉用水量(噸/公頃)。

令作物 i 在 t 生育期之農業缺水量(E_{it})為最大灌溉用水量與實際灌溉用水量之差，即

$$E_{it} = Q_{it}^{\max} A_i^{\max} - Q_{it} A_i \quad (10)$$

則由式(8)減去式(9)可得出 i 作物之缺水損失函數(L_i)如下：

$$L_i = I_i^{\max} - I_i = (P_i - V_i)Y_i^{\max} A_i^{\max} - (P_i - V_i)Y_i A_i - f_i(A_i^{\max} - A_i) - \sum_{t=1}^n P_w E_{it} \quad (11)$$

式(11)中之 Y_i 與 Y_i^{\max} 可表為灌溉用水量之函數，稱為作物產量-水量函數(crop production -water function)。假設作物 i 在不同生育期面臨不同缺水情況時，其產量均會受到缺水程度之影響，且當缺水程度達到作物生長之凋萎點以下時，產量即為零，則單位面積實際產量與單位面積最大產量可表如下式 (Jensen,1968)：

$$Y_i = \prod_{t=1}^n (ET_{it})^{\lambda_{it}} \quad (12)$$

$$Y_i^{\max} = \prod_{t=1}^n (ET_{it}^{\max})^{\lambda_{it}} \quad (13)$$

上式中，

ET_{it} = i 作物在 t 生育期之實際蒸發散量(公分)；

ET_{it}^{\max} = i 作物在 t 生育期之最大蒸發散量(公分)；

λ_{it} = i 作物在 t 生育期之缺水敏感參數。

將式(12)除以式(13)後可得：

$$\frac{Y_i}{Y_i^{\max}} = \prod_{t=1}^n \left[\frac{ET_{it}}{ET_{it}^{\max}} \right]^{\lambda_{it}} \quad (14)$$

假設 i 作物在 t 生育期之灌溉效率(e_{it})為已知，則式(10)可改寫為：

$$E_{it} = \frac{A_i^{\max} ET_{it}^{\max} - A_i ET_{it}}{e_{it}} \quad (15)$$

將式(15)代入式(14)並經整理可得：

$$Y_i = Y_i^{\max} \prod_{t=1}^n \left[\frac{A_i^{\max}}{A_i} \left(1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_i^{\max} ET_{it}^{\max}} \right) \right]^{\lambda_{it}} \quad (16)$$

式(16)中 i 作物在 t 生育階段之最大蒸發散量可利用下列諸式求得(Hamon,1961)：

$$ET_{it}^{\max} = k_s \cdot k_c^i \cdot PET_t \quad (17)$$

$$PET_t = \frac{0.021 H_t^2 e_{ot}}{T_t + 273} \quad (18)$$

$$e_{ot} = 33.8639 \times [(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 48| + 0.001316] \quad (19)$$

上式中，

K_s = 土壤水份因子；

K_c^i = 作物 i 之覆蓋係數；

PET_t = 第 t 生育期之潛勢蒸發散量(公分)。

H_t = 第 t 生育期之日平均日照時間(Hr)；

T_t = 第 t 生育期之日平均溫度 (°C)；

e_{ot} = 第 t 生育期之飽和蒸氣壓。

將式(16)代入式(11)可得出 i 作物於整個生育期之總缺水損失為：

$$L_i = (P_i - V_i) Y_i^{\max} \left\{ A_i^{\max} - A_i \prod_{t=1}^n \left(\frac{A_i^{\max}}{A_i} \left(1 - \frac{e_{it} E_{it}}{A_i^{\max} ET_{it}^{\max}} \right) \right)^{\lambda_{it}} \right\} - f_i (A_i^{\max} - A_i) - P_w \sum_{t=1}^n E_{it} \quad (20)$$

若將整個灌溉區域分成多個灌溉分區進行分析，則式(20)可改寫如下：

$$L_i = \sum_{a=1}^k \left\{ (P_{i,a} - V_{i,a}) Y_{i,a}^{\max} \left[A_{i,a}^{\max} - A_{i,a} \prod_{t=1}^n \left(\frac{A_{i,a}^{\max}}{A_{i,a}} \left(1 - \frac{e_{it,a} E_{it,a}}{A_{i,a}^{\max} ET_{it,a}^{\max}} \right) \right)^{\lambda_{it,a}} \right] - f_{i,a} (A_{i,a}^{\max} - A_{i,a}) - P_w \sum_{t=1}^n E_{it,a} \right\} \quad (21)$$

上式中， k 為灌溉分區之總數，而各參數之下標 a 則表分區之註標變數。若再令實際耕作面積 ($A_{i,a}$) 為最大耕作面積 ($A_{i,a}^{\max}$) 減去休耕面積 ($\bar{A}_{i,a}$)，即

$$A_{i,a} = A_{i,a}^{\max} - \bar{A}_{i,a} \quad (22)$$

則式(21)可改寫成

$$L_i = \sum_{a=1}^k \left\{ (P_{i,a} - V_{i,a}) Y_{i,a}^{\max} \left[A_{i,a}^{\max} - (A_{i,a}^{\max} - \bar{A}_{i,a}) \prod_{t=1}^n \left(\frac{A_{i,a}^{\max}}{A_{i,a}} \left(1 - \frac{e_{it,a} E_{it,a}}{A_{i,a}^{\max} ET_{it,a}^{\max}} \right) \right)^{\lambda_{it,a}} \right] - f_{i,a} (\bar{A}_{i,a}) - P_w \sum_{t=1}^n E_{it,a} \right\} \quad (23)$$

檢視式(23)可知缺水損失函數為休耕面積之單峰凸函數，亦即可於最小缺水損失條件下求得最佳休耕面積，其步驟如下：

- (1) 設定各灌溉分區全部休耕與全部未休耕為休耕面積之上限與下限。
- (2) 利用等間距法在上限與下限間求得多個休耕面積。
- (3) 在各休耕面積下求得各灌區之需水量。
- (4) 在各休耕面積下利用多水庫操作模擬模式求得各灌區之缺水量。
- (5) 在各休耕面積下利用式(23)求得各灌溉分區之農業缺水損失。
- (6) 繪製農業缺水損失與休耕面積關係曲線並決定最佳休耕面積。

本研究將於實力應用中說明如何求得步驟 3 中各灌區不同休耕面積下之農業需水量。

6 平均最佳休耕面積之估算

本研究之目標為當預測反聖嬰現象將來臨前，在未知反聖嬰強度之情況下，能事先估算農業平均最佳休耕面積並進行休耕，以減少因臨時休耕所造成之缺水損失。故需在所合成之各組不同中強度反聖嬰現象條件下先分別計算其最佳休耕面積及其所對應之缺水損失，然後進行休耕面積之風險度分析以估算平均最佳休耕面積及其所對應之損失。

最佳休耕面積與風險度關係曲線：

顏本琦等(1992)定義風險為系統破壞之機率，在工程應用部份將風險定義為工程達不到預期標準或效果之機率。此一定義在不同之研究範疇則代表著不同之解釋，如就水質系統而言，風險的定義可指水庫、河川污染量超過水體涵容能力之機率；就水壩結構物而言，風險的定義則指發生潰壩之機率。本研究中所討論之最佳休耕面積風險度乃由於發生反聖嬰現象之強度為不確定所造成，故風險度之定義為大於某給定最佳休耕面積之機率，而當所給定之機率為 0.5 時，則所對應之最佳休耕面積即為平均最佳休耕面積。因此，由於發生反聖嬰現象之強度為不確定所造成之最佳休耕面積風險度，可表示如下式所示：

$$R = P_f = P(W > w_g) = \int_{w_g}^{\infty} f_w(w) dw \quad (23)$$

R = 風險度；

P_f = 失敗的機率；

$P()$ = 表示機率的大小；

W = 最佳休耕面積之隨機變數；

w_g = 某給定最佳休耕面積；

$f_w(w)$ = 最佳休耕面積之機率密度函數。

若休耕面積之機率密度函數 $f_w(W)$ 為已知，則可求得其最佳休耕面積與風險度之關係圖。假設機率密度函數符合常態分佈，且令 $Z = (w - \mu_w) / \sigma_w$ ，則可將式(23)改寫如下：

$$P_f = 1 - \Phi\left(\frac{w - \mu_w}{\sigma_w}\right) = 1 - \Phi(Z) \quad (24)$$

上式中，

μ_w = 變數 W 之期望值(expected value)；

σ_w = 變數 W 之標準偏差(standard deviation)；

Z = 變數 W 之標準化變量(standard normal variable)；

$\Phi()$ = 標準常態分佈的累積機率分佈(cumulative probability)，亦即可靠度。

茲將求得最佳休耕面積與風險度關係之步驟敘述如下：

- (1) 利用所生成之多組河川入流點之流量資料計算各組資料之多組最佳休耕面積。
- (2) 將各組資料之最佳休耕面積進行由大至小之排序工作，並求得平均值與標準偏差。
- (3) 將常態分佈之風險度理論曲線繪於機率紙上。
- (4) 利用 Blom 法求得各組資料累積機率之點繪位置。

Blom 法(Blom,1958)累積機率點繪位置可利用下式求得：

$$p = \frac{m - \frac{3}{8}}{n + 0.25} \quad (25)$$

上式中 m =序號， n =總數。由 Blom(1958)法所計算之點繪位置，在常態分佈資料處理上較不易發生偏差(Cunnane,1978))。

- (5) 以累積機率為橫座標，休耕面積為縱座標，將各組資料點繪於機率紙上，以檢驗常態分佈之假設是否恰當。如果恰當則步驟 2 之理論曲線即為風險度曲線。
- (6) 在風險度為 0.5 處所對應之休耕面積即為反聖嬰現象下之平均最佳休耕面積，而其所對應

之缺水損失即為最少缺水損失。

風險度為 0.5 條件下之休耕面積與缺水損失關係：

利用農業缺水損失模式所計算出每組每灌區最佳休耕之比例不盡相同，因此必須經過下列步驟之整理方可求得風險度為 0.5 條件下之休耕面積與缺水損失關係。

- (1) 求出各組資料下各灌區不同休耕面積所對應之缺水損失及最佳休耕面積。
- (2) 將各組資料之休耕面積轉換成休耕比例，即令

$$\mu_{i,a} = \frac{A_{i,a}}{A_{i,a}^{\max}} \times 100 \quad (26)$$

則 $\mu_{i,a}$ 介於 0~100 之間，且最佳休耕面積所對應之休耕比例為 $\mu_{i,a}^*$ 。

- (3) 以最佳休耕面積所對應之比例為基準點，將多組資料之休耕比例進行無因次化，即

$$n_{i,a}^+ = \frac{\mu_{i,a} - \mu_{i,a}^*}{100 - \mu_{i,a}^*} \text{ for } \mu_{i,a} \geq \mu_{i,a}^* \quad (27)$$

$$n_{i,a}^- = \frac{\mu_{i,a}^* - \mu_{i,a}}{0 - \mu_{i,a}^*} \text{ for } \mu_{i,a} < \mu_{i,a}^* \quad (28)$$

上式中， $n_{i,a}^+$ 介於 0~1 之間， $n_{i,a}^-$ 介於 -1~0 之間。

- (4) 將各灌區無因次化後之休耕比例以 0.2 為間隔，即 -1, -0.8, 0.8, 1 所對應的缺水損失分別進行疊加與平均。
- (5) 求出各灌區無因次之休耕將各組資料比例與缺水損失之曲線。
- (6) 求出全區域之休耕面積與缺水損失之關係。

應用實例

本研究選擇以農業為主要經濟活動的苗栗地區為研究區域，又由於苗栗縣之苑裡、三義、卓蘭、後龍、通宵、西湖、銅鑼等地在民國九十年後併入大台中用水系統，故本研究之研究區域尚包括部分台中地區。本研究區域之主要河川包括中港河流域(包括中港溪及其支流峨眉溪)、後龍河流域(包括後龍溪及其支流老田寮溪)以及大安河流域(包括大安溪及其支流景山溪)，圖 2 為研究區域圖。

本研究區域內三個流域位置屬於台灣中部水資源地區，茲將各流域分述如下。

中港河流域發源於鹿場大山西北麓，流經苗栗縣境內，與峨眉溪及南港溪支流會合後，於竹南鎮南界處出海，河川全長 54.15 公里，流域面積 445.58 平方公里，河床坡度 1/150，主要水庫為大埔水庫、永和山水庫。

後龍河流域主流發源於鹿場大山西麓之汶水溪，流經苗栗縣境內，與大湖溪及老田寮溪支流會合後，於後龍鎮出海，河川全長 58.045 公里，流域面積 536.59 平方公里，河床坡度 1/160，主要水庫為明德水庫、天花湖水庫。

大安河流域主流發源於大壩尖山西麓之馬達拉溪，與次高溪、大雪溪會合成大安溪，流經苗栗縣境內陸續會北坑溪、南坑溪、雪山坑溪、烏石坑溪、時水坑溪及景山溪後，於台中縣大安鄉出海，河川全長 95.76 公里，流域面積 758.47 平方公里，河床坡度 1/75，主要水庫為鯉魚潭水庫。

本研究考慮鯉魚潭水庫二期工程完工後之供水情況，此時鯉魚潭水庫除了可供應大台中地區外並可同時供應苗栗地區。則其與明德水庫以及永和山水庫形成並聯水庫聯合供水系統共同供給苗栗地區。另外永和山水庫尚支援新竹部分地區之用水。

研究區域中之重要水利設施包括大埔、永和山、明德、鯉魚潭水庫及田美、士林攔河堰等。本研究只考慮水源為地表水之用水點：農業灌區包括三灣、大埔、頭竹、苗栗、後龍、造橋、

大安溪上游、景山及大安溪下游等灌區，公共用水包括苗栗地區、新竹引水點及鯉魚潭淨水場。因此，本研究區域之系統架構共包括 7 個入流點、4 個水庫點、3 個公共需求點、9 個灌區點以及 2 個攔河堰。

由文獻回顧可知發生反聖嬰現象台灣地區隔年 1~7 月之春、夏季降雨有偏少的情況，由於苗栗及台中地區 1~7 月之農作以一期水稻為主，且分別由一月初與一月底開始播種(農委會,2001)，故本研究針對 1~7 月間該區域一期稻作之缺水損失進行分析。

根據歷史海溫資料統計，從 1950 年到 2000 共發生了 9 次反聖嬰現象，其中，中強度以上者佔了 7 次，如表 1 所示。本研究將發生反聖嬰現象隔年 1~7 月各流域之流量站資料與各個雨量站資料進行相關性分析後決定中港溪、後龍溪及大安溪分別採用南庄、大湖及象鼻三個雨量站之歷史雨量資料作為分析之用，歷史溫度資料分別採新竹和台中兩個測站資料，而歷史蒸發散量資料則採用新竹與台中站之資料。茲將本研究所建立方法之實地應用過程與結果敘述如後。

1 溫度與雨量之合成

為進行最佳休耕面積之風險度分析，本研究必須先模擬多組反聖嬰現象下之溫度和雨量。本研究根據表 1 所列共 7 次之中強以上反聖嬰現象發生時隔年 1~7 月之雨量與溫度值，求得各個流域之雨量與溫度之[A]及[B]，然後利用殘值模式合成 50 組雨量與溫度資料，並計算歷史反聖嬰雨量與溫度與殘值模式所生成雨量與溫度之平均值、標準偏差及相關係數以資比較，其結果列於表 2。

2 入流點流量之生成

本研究將選出之雨量站與流量站所記錄 10 年歷史資料代入水平衡模式中，進行水平衡參數檢定，再以檢定後之參數以及其他 10 年之歷史資料代入水平衡模式中以進行參數驗證，檢定與驗證結果列於表 3。本研究然後將各流域之參數以及前述各流域已合成之 50 組雨量與溫度資料輸入水平衡模式中以生成 50 組各河川入流點之流量資料。

3 各灌區旬缺水量之推估

本研究在利用多水庫系統模擬模式以求得各灌區之旬缺水量時，需依不同休耕面積求得各灌區之旬需水量。蔡天雄(1996)指出影響農業灌溉需水量之因子包括田間滲漏量、田間給水成數、渠道損失、坵塊平均面積及灌溉時間等，其中以實際耕作面積影響最大。本研究乃利用實際耕作面積與全生育期總用水量之歷史資料進行迴歸分析，以求得需水量與實際耕作面積之函數關係。分析結果發現此函數為一線性關係，其迴歸方程式列如圖 3 所示。利用迴歸方程式可得出各耕作面積下各灌區之全生育期需水量，再按照每旬比例分配至各旬，即可得出各休耕面積下各灌區之旬需水量。

本研究然後利用 50 組中強度以上反聖嬰現象下各入流點之流量進行研究區域多水庫操作模擬以計算各灌區之旬缺水量，本研究在利用多水庫系統模擬模式進行模擬時，水庫蓄水量之起始值乃採用歷史上發生反聖嬰現象第一旬水庫容量的平均值。

4 農業缺水損失之計算

本研究在利用 Hamon 公式估算水稻之最大蒸發散量所輸入之參數列於表 4 級表 5，其計算結果則列於表 6。計算結果顯示台中及新竹地區 1~7 月之蒸發散量為 70 公分及 67 公分，其結果與廖朝軒等(1998)之 65~67 公分及農復會(1970)所建議之 60~70 公分差異不大。

本研究在應用所發展之農業缺水損失模式於研究區域以估算水稻休耕損失時，必須先將其相關資料與參數輸入，表 7 及表 8 分別列出研究區域中水稻缺水損失估算之相關參數與水稻對缺水之敏感因子。

本研究將 50 組中強度以上反聖嬰現象下各灌區之旬缺水量輸入水稻缺水損失估算模式中以計算各組資料之最佳休耕面積及其對應之缺水損失後，繪製缺水損失對總缺水量與最佳休耕

面積之三維圖形如圖 4 所示。由圖 4 可知缺水損失與最佳休耕面積成正相關，然與總缺水量之無關，而是與缺水量之時間分佈有關，經分析結果後可將其分成下列三類：

Case 1：水稻生長期中某幾旬缺水量過大，作物容易因缺水死亡，導致總缺水量不大，卻需要休耕較大之面積，且缺水損失較大。

Case 2：缺水情況較平均，即每旬均缺水，但每旬之缺水情況並不嚴重，導致總缺水量較大，但休耕面積及缺水損失並未如預期嚴重。

Case 3：嚴重缺水狀況。

5 平均最佳休耕面積之估算

本研究將各組資料所估算之最佳休耕面積繪製風險度理論曲線圖，同時以 Blom 法排序後之點繪位置點繪於機率紙上，如圖 5 所示。由圖 5 可知在反聖嬰下之最佳休耕面積風險度乃呈常態分佈。同時由圖 5 得知當風險度為 0.5 時，所對應之最佳休耕面積約為 2,772 公頃。

本研究另計算風險度為 0.5 時，休耕面積與缺水損失之關係如表 9 與圖 6 所示。由表 9 可知，在平均最佳休耕面積下其缺水損失可由不休耕之 5.21×10^8 元降至 1.02×10^8 元。

本研究為評估水庫起始容量對平均最佳休耕面積之影響，乃在不同水庫起始容量下計算平均最佳休耕面積，並列如表 10 及繪如圖 7 所示。由表 10 可知，在發生中強度以上之反聖嬰現象條件下，即使水庫為滿庫，仍須休耕 1950 公頃方可獲得最低缺水損失 0.74×10^8 元。

結論與建議

1 結論

- (1) 本研究已建立一套方法以供當預測中強度反聖嬰現象將來臨之前，事先估算農業平均最佳休耕面積以減少由於缺水而採臨時休耕所造成之投資損失。本研究並將所發展之方法實際應用於苗栗及部份台中地區以彰顯本方法之可用性。
- (2) 本研究在分析總缺水量、缺水損失與休耕面積間之關係時，發現缺水損失與總缺水量之相關性不高，但與最佳休耕面積成正相關。本研究又發現雖然缺水損失與總缺水量之相關性不高，但卻與缺水量之時間分佈有關，並據以建立作物生產量－水量函數。
- (3) 本研究在進行研究地區最佳休耕面積之風險度分析時，發現以最佳休耕面積為隨機變數之機率分佈為一常態分佈。又其平均最佳休耕面積(即風險度為 0.5 所對應之最佳休耕面積)為 2,772 公頃，且對應之平均缺水損失則約為 1.02×10^8 元。
- (4) 本研究另外在風險度為 0.5 的條件下建立研究地區之缺水損失與平均休耕面積關係曲線，並得知在完全不休耕之條件下平均缺水損失約為 5.21×10^8 元，意即當一期稻作播種之前如預測中強度反聖嬰現象即將來臨，則休耕 2,772 公頃之稻作面積將可獲得 4.19×10^8 元之效益。
- (5) 本研究在分析不同水庫初始容量對最佳休耕面積之影響時，發現水庫初始容量對於最佳休耕面積有顯著影響，且即使水庫之初始容量為滿庫情況下，其平均最佳休耕面積仍需達到 1,950 公頃方能得到最小之平均缺水損失 0.74×10^8 元。

2 建議

- (1) 台灣地區過去在枯水期面臨缺水時，對於休耕面積之決定常取決於政府之政策考量因而缺乏客觀性，建議未來可利用本研究所發展之方法客觀地於事先決定平均最佳休耕面積。
- (2) 本研究在建立農業缺水損失估算模式時並未考慮價格變動因子，而是假設各種價格均為固定，建議未來可加入農業經濟模型針對價格變動進行評估，使缺水損失之估算更近實際情況。

- (3) 本研究僅考慮農地休耕之缺水應變措施，建議未來可考慮其他不同方式的短期調配或節水措施，如分區輪灌、延長輪灌期距、抽用地下水、實施間歇供水、加強渠道巡視以防止漏水及盜水等，並依各區域之特性進行評估以得到最佳方式。

參考文獻

1. Blom, G, Statistical Estimates and Transformed Beta Variable, Wiley, New York, pp.68- pp.75 and pp.143 - 146, 1958.
2. Cunnane, C., Unbiased Plotting Position –A Review, J. Hydrol., Vol. 37, pp. 205-222 , 1978.
3. Hamon, W. R., “Estimating Potential Evapotranspiration,” Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division 87(HY3), pp. 107-120, 1961.
4. Matalas, N. C., “Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology,” Water Resources Research, 3(4), pp.937 - 945, 1967.
5. 農復會，水稻栽培灌溉管理，1970。
6. 吳明進，聖嬰／南方振盪現象，科學月刊，第 17 卷，第 2 期，pp.107 - 112，1986。
7. 顏本琦、徐享崑、郭振泰，水資源風險與可靠度分析簡介，台灣水利季刊，第 40 卷，第 4 期，pp.1 - 11，1992。
8. 蔡天雄，水田休耕對農業用水量之探討，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1996。
9. 涂建翊、余嘉裕，二十世紀後期聖嬰現象與台灣地區短期氣候變化，華岡地理學報，第十五期，pp.139 - 158，1998。
10. 廖朝軒、朱壽銓、黃文龍、洪英璋，農業之乾旱缺水損失經濟分析-以明德水庫灌區水稻為例，農業工程學報，第 44 卷第 4 期，pp.36 - 51，1998。
11. 柳中明、劉彥蘭，尼諾與妮娜，新新聞文化出版社，2000。
12. 徐年盛、林岳岡，聖嬰-南方振盪現象與台灣地區降雨量之相關性分析，第十一屆水利工程研討會論文集，pp.L1 - L7，2000。
13. 盧孟明，聖嬰現象與台灣異常氣候關係討論，大氣科學，第 28 期，第 2 號，pp.9 - 113，2000。
14. 雷浩仁，聖嬰-南方震盪現象下水資源短期調配措施之經濟效益分析，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，2001。
15. 農委會，台灣地區稻米生產量調查報告-九十年一期，農業統計年報，2001。
16. 黃敏智，多水庫系統最佳聯合操作規線優選模式之建立及求解，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，2002。

表1 歷史上(1950年至2000年)反聖嬰現象發生年份及強度

發生年份	持續時間(月)	強度
1956-5 至 1956-11	7	強
1964-5 至 1965-1	9	弱
1970-7 至 1972-1	19	中
1973-6 至 1974-6	13	強
1974-9 至 1976-4	20	中
1984-9 至 1985-6	10	弱
1988-5 至 1989-6	14	強
1995-9 至 1996-3	7	中
1998-7 至 2000-6	24	強

表2 殘值模式模擬結果與歷史資料比較表

	溫度		雨量		
	平均值	標準差	平均值	標準差	
大安溪	歷史資料	23.043	0.934	189.358	124.201
	模式結果	23.073	0.864	208.132	77.612
	相關係數	0.97975		0.86748	
中港溪	平均值	標準差	平均值	標準差	
	歷史資料	22.235	0.838	135.671	88.692
	模式結果	22.139	0.869	140.607	58.182
相關係數	0.979542		0.75468		
後龍溪	平均值	標準差	平均值	標準差	
	歷史資料	22.235	0.838	160.111	110.207
	模式結果	22.223	0.975	170.662	68.582
相關係數	0.978254		0.810239		

表3 研究區域各河川上游入流點之水平衡模式檢定值以及計算流量與歷史流量之相關係數

	中港溪	後龍溪	大安溪	峨眉溪	老田寮溪	景山溪	
ϵ	1.4	10.5	5.1	0.6	0.5	8.9	
α	22	10	3.6	1	2.4	49.8	
S_{max}	720	212	450	820	427	503	
相關係數	檢定	0.892	0.941	0.878	0.774	0.93	0.67
	驗證	0.869	0.92	0.782	0.726	0.91	0.63

表4 研究區域平均日照時數及月平均溫度

月份	1	2	3	4	5	6	7	
日照時數(Hr)	10.7	11.2	11.9	12.6	13.1	13.4	13.3	
溫度(°C)	台中站	16.2	16.8	19.2	23.3	25.7	27.4	28.6
	新竹站	15.1	15.2	17.2	21.7	24.3	27.4	29.0

表5 台灣地區一期水稻之作物覆蓋係數(K_c)

生育階段	整地期	插秧期	分蘗初期	分蘗末期	開花
生育天數	1~30	31~45	46~60	61~75	76~90
K_c	-	0.5	0.8	1.2	1.3
生育階段	開花末期	成熟初期	成熟中期		
生育天數	91~105	106~120	121~135		
K_c	1.3	1.2	1.1		

表 6 由 Hamon 公式計算每旬蒸發散量(公分)

旬數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
台中	0.46	0.61	0.84	0.87	1.04	1.11	1.81	2.27	2.99	4.19	4.19
新竹	0.43	0.57	0.79	0.79	0.95	1.01	1.61	2.01	2.65	3.82	3.82
旬數	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	總和
台中	4.19	5.17	5.17	5.69	5.50	5.50	5.04	5.30	4.34	3.71	70.01
新竹	3.82	4.79	4.79	5.27	5.51	5.51	5.05	5.43	4.44	3.80	66.85

表 7 水稻缺水損失模式輸入參數值

單位產量售價(P)	18.72 元/公斤
單位產量之變動成本(V)	13.224 元/公斤
最大單位面積產量(Y_m)	6225 公斤/公頃-期
單位面積固定成本(f)	19904 元/公頃
灌溉效率(e_{at})	0.77
單位灌溉水量成本(P_w)	0

資料來源： 1. 廖朝軒等(1998)
2. 農委會(2001)

表 8 水稻在各生育期之缺水敏感因子

生育期	成活期 ~分蘗 終期	分蘗終期 ~幼穗終 期	孕穗期~ 抽穗開花	乳熟期 ~完熟 期
敏感因子 (λ)	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
	0.0854	0.3137	0.6287	0.2977

表 9 風險度為 0.5 時總休耕面積及總缺水損失關係表

總休耕面積(公頃)	總缺水損失(10^8 元)
0	5.21
536	4.87
1026	4.55
1512	4.2
1989	3.18
2772	1.02
6021	1.96
9361	3
12701	4.07
16041	5.12
20925	6.19

表 10 不同水庫初始容量下平均最佳休耕面積及缺水損失

初始容量	休耕面積	損失(10^7)
0.1	4100	15.2
0.2	3900	14.2
0.3	3600	13.3
0.4	3200	11.9
0.5	3000	11.1
0.6	2700	9.8
0.7	2500	9.5
0.8	2300	8.7
0.9	2100	7.9
1	1950	7.4
歷史平均	2772	10.135

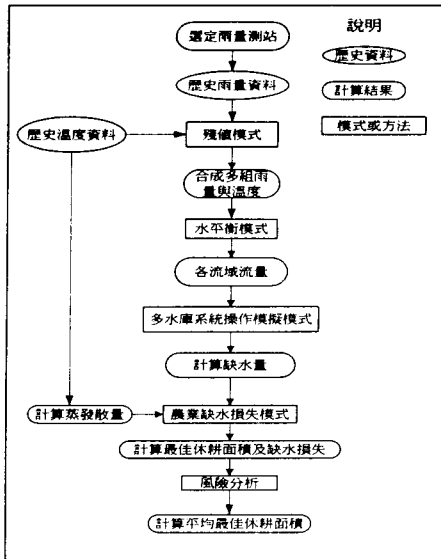


圖 1 研究流程圖

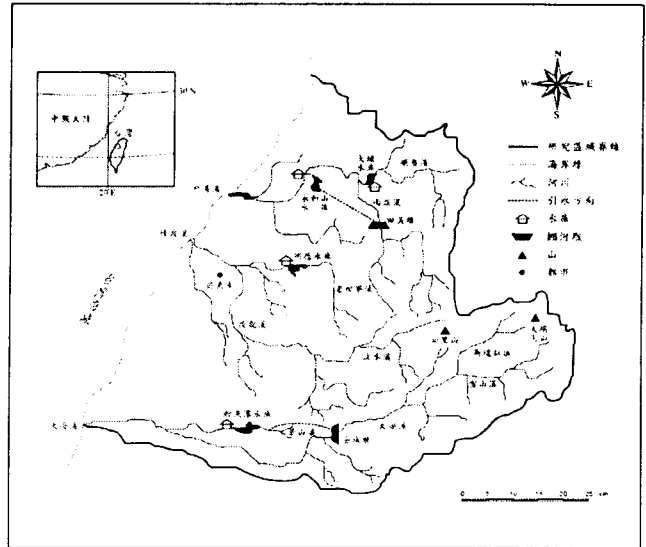


圖 2 研究區域圖

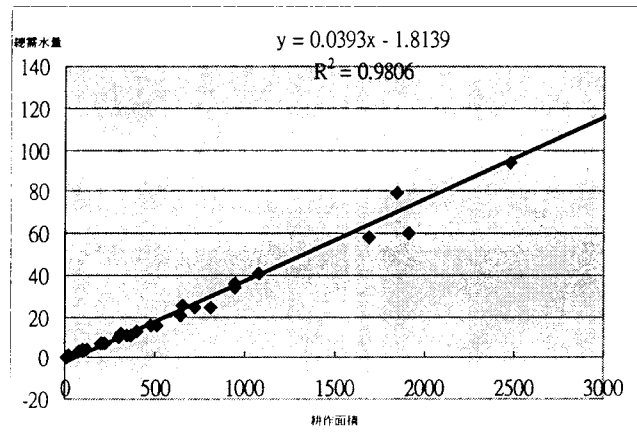


圖 3 實際總需水量與總耕作面積對應圖

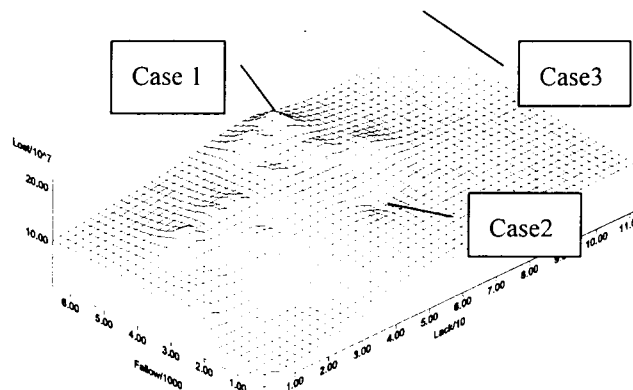


圖 4 缺水損失(Lost/10⁸ 元)-缺水量(Lack/10 百萬立方公尺/旬)-休耕面積(Fallow/1000 公頃)之 50 組資料分佈圖

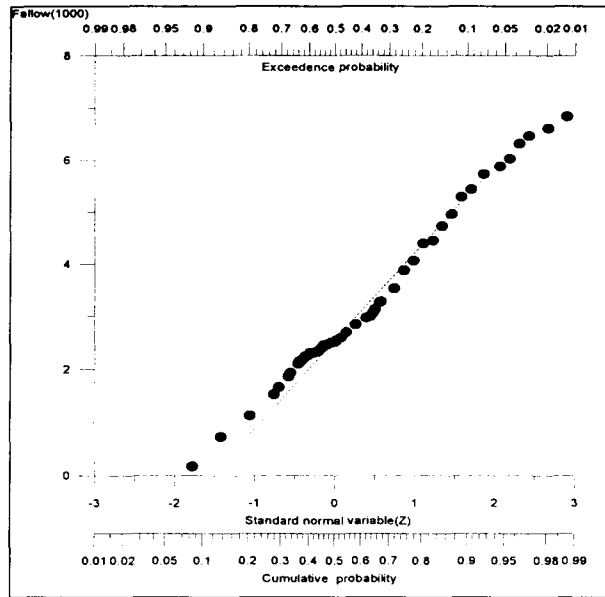


圖 5 反聖嬰現象下最佳休耕面積之風險度曲線圖

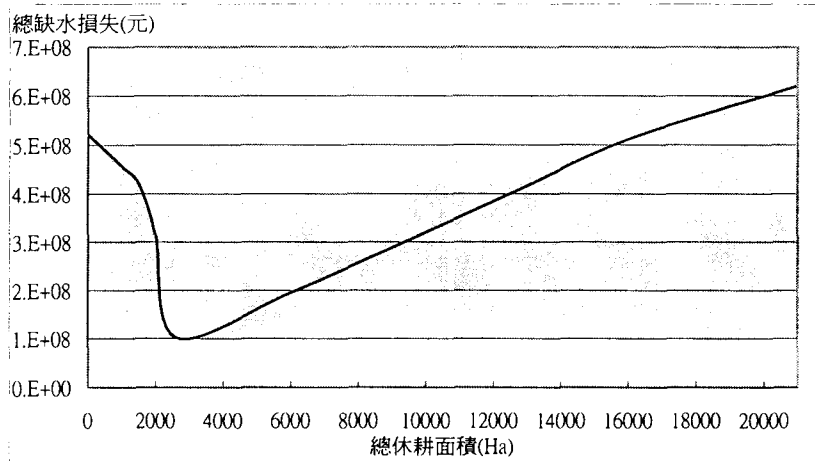


圖 6 研究區域在風險度為 0.5 時總缺水損失與總休耕面積關係圖

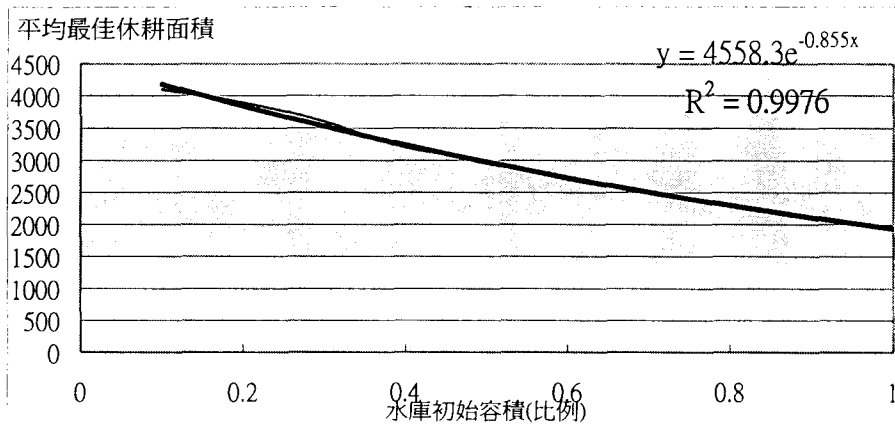


圖 7 不同水庫初始容積與平均最佳休耕面積關係圖