

## 台灣水資源供需動態模型之建構與分析

蕭志同<sup>1</sup>、林佳慧<sup>2</sup>、程瑞祥<sup>3</sup>

收件日期：Jun. 19, 2017

接受日期：Dec. 20, 2017

### 摘要

水是人類生活中不可或缺的必需品，然而水資源是有限的、且隨著經濟發展使需求量不斷增加致使水源過度開發產生破壞自然生態之虞，加上近年來受氣候變遷影響常導致枯水期有缺水危機，因此水資源的有效管理日趨重要。本文應用系統動態學方法論，並以經濟學的角度先建構一個全面性影響台灣水資源供需與管理之系統動態模型(the water resource administrative system in Taiwan, WRAT) 探討台灣水資源供需系統結構與嘗試解釋其系統行為。再進一步探討影響水資源需求面外生變數與政策之情境改變，分析當外在環境變數發生衝擊與政策改變時，對總用水量之影響。本文透過模擬「耕地面積減少」與「豬隻頭數減少」等變數改變後，由模擬結果發現，減少耕地面積對降低農業用水量有顯著影響；另外，大量減少豬隻飼養雖然無法有效降低農業用水量，卻能大幅降低牧業污水排放量，因此減少豬隻飼養確實能有效降低有關水、空氣及豬糞污染等環保問題。此外，本文亦探討「以價制量」之訂價策略是否能達到節約用水之目的，由模擬結果顯示，總用水量會隨價格提昇而減少。目前台灣水價過於低廉，往往在枯水期時面臨缺水之困境，若政府能合理化水價(提高水價)，應能有效達成節約用水之目的。本文之模擬結果可作為政府及各水資源事業單位擬定節水措施與環保政策之參考依據。

**關鍵字：**水資源管理，系統動態學，永續發展，政策分析

---

<sup>1</sup> 東海大學經濟學系，教授。

<sup>2</sup> 東海大學經濟學系，助理教授；通訊作者 E-mail: jhlin1125@thu.edu.tw。

<sup>3</sup> 大葉大學資訊管理研究所，碩士。

## 1. 前言

國際間很早就已關注資源保育的問題，聯合國早在 1992 年舉辦的環境與發展會議 (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) 提出：在面對全球環境變遷及環境問題時必須堅持「要能滿足當代的需要，同時也不可損及後代子孫為滿足其本身需要的發展」的永續發展 (sustainable development) 原則。而且各與會國共同提出的「21 世紀議程 (Agenda 21)」中特別訂定水資源發展行動計畫綱領「水資源的供給及水質的保護：以整合方式應用於水資源開發、管理與利用上」(United Nations, 1992)。由此可見，水資源管理規劃應在符合永續發展原則下考量整體性，並且在追求經濟發展的同時亦須與環境保護相互調和。

雖然過去已有許多國內外相關文獻討論過水資源的相關研究，然而過去的研究多從水文學、水利工程領域為出發點的分析(陳昱君, 2000; 李明益, 2002; 阮威堯, 2003; Yang et al, 2008); 以經濟學角度探討的文獻因受限於研究方法，較少能結合水資源管理供給面與需求面之全面性角度探討水資源管理之策略應用(闕雅文, 2008)。基於水資源管理規劃應在符合永續發展原則下考量整體性，並且著重在提出以經濟學誘因考量下之水資源管理策略。本文之主要貢獻在運用系統動態學之研究方法，先建構出台灣水資源管理模擬系統(the water resource administrative system in Taiwan, WRAT)發展模型，再根據此模型進一步模擬其外生變數可能的變化衝擊，以觀察總供水量、總用水量、調節供需等內生變數的變化。

因此，本文主要目的在探討水資源管理之一般特性及台灣水資源管理特性，並進一步建構 WRAT 模式，模擬相關農業發展管理政策(例如：耕地面積改變)、環保政策(例如：減少豬隻飼養頭數)以及水價訂價策略等，分析是否能達成政策之目的，並探討相關政策模擬及未來可能發展趨勢，此模擬結果亦可作為政府及各水資源事業單位擬定節水措施與環保政策之參考依據。

本文之內容與分析架構如下；第一節為前言，說明本文之研究動機與目的；第二節介紹水資源管理特性與相關文獻探討；第三節說明研究方法；第四節介紹模型建構；第五節說明模擬結果；第六節為結論與建議。

## 2. 水資源管理特性與探討

水資源為天然資源，為人類生存不可或缺者，其重要性自不待言。水雖是一可再生資源，但若涵養水源的水源區不當的開發，將造成涵蓄能力降低；若再加上不合理的使用，將會使得用水量不足；如果水源再遭受污染，不僅增加處理成本，更使用水安全受到威脅，且可用水源將更為減少。再加上工商業發達，都市不斷的發展擴張，人口數量、用水量也不斷的攀升，因此如何有效利用水資源(抑制用水量)，提供穩定的水源以及水資源環境的保護，是水資源管理之重要課題。

針對水資源管理的一般特性而言，已有不少國外文獻提出水資源管理之特性。雖然過去傳統的水資源管理將重心放在供給面的管理上，此種管理策略主要是以開發新的水源來滿足因都市發展擴張而增加的社會用水需求。(Biswas, 1997)然而，水資源開發會因為天然氣候與地理條件而存在許多不確定性，因此在水資源管理特性上無法僅依賴供給面的管理來解決，仍需要配合需求面之管理，甚至應考慮調配水資源之機制才能達到有效管理的目標。Saliba et al. (1987) 以美國西南部六州為例，提出調配水市場有不確定性與資訊不完全的問題，其研究指出適當的談判規則設計與良好的協商機制，有助於提升水市場的價格效率與分配效率。Heltzer (2003) 則提出在水資源嚴重缺乏之中東地區國家，應致力於改善上下游國家用水資訊與協商機制，以促進水資源之分配與利用。

台灣地區雖然在豐水期雨量充沛，但礙於地理條件特殊，部分河川陡峻短促，使得雨量之時空分佈極不均勻，因此在台灣水資源管理之特性上礙於天然地理條件之限制，較無法著重在開發水資源之供給面管理，而如何有效運用水資源及適當的管理策略將影響日後之生存與發展。尤其每到枯水期，可能出現缺水危機，因此在因應未來社會之變遷與需要下，水資源之「量與質」均需有妥善之管理方法。許多台灣水資源管理的相關文獻，大多著重在水資源需求層面之管理策略，陳明健(2003)提出台灣水資源各標的之用水權利目前是以優先權及使用受益權為原則來進行分配，其研究指出農業部門可望成為都市用水者最小成本之部門。闕雅文(2008)以柯諾賽局(Cournot game)為基礎，建立台灣農田水利會調度區域水資源之市場分析模型並以此計算區域水資源調配之市場結構，使需水者能明瞭應向哪一個水利會協商調配水資源。此外，行政院研考會(1994)亦曾提出水資源管理應包括水資源之開發、保育、控制、分配與利用，並且應考慮水害之防範及水域環境之保育，缺一即無法達到妥善規劃與管理之目的與任務。因此，台灣的水資源管理特性，應從「需求」導向及「大型水庫」導向，轉為「節流即是開源」、「質的改善即是量的增加」的新原則之觀念著手。上述觀念最早自1991年興起，而本研究也以1991年為研究模型模擬起始年。

雖然根據台灣水資源管理特性上，應著重在需求面之管理層面，但本文與過去文獻最大不同之處是以更為宏觀的角度，同時考慮水資源供給與需求之層面，先建構一全面性影響台灣的水資源供需與管理之系統動態模型以解決過去文獻中較難以計量方法來進行實證分析之困境。<sup>4</sup>過去國內外文獻中雖然已有少數學者將系統動態學運用在水資源管理之研究，然而過去文獻多是著重在特定地區或是以水文學、水利工程領域為出發點的分析(陳昱君，2000；李明益，2002；阮威堯，2003；Yang et al, 2008)，卻少有從經濟誘因角度<sup>5</sup>去探討水資源管理策略之應用。(Reply Reviewer 2: Q7)本文所建構之完整的水資源管理系統動態模型，主要歸納了過去文獻當中所考量到的內、外生變數所建構而成，其中內生變數主要包含了水資源供給子系統與用水子系統，其中供給子系統又依其功能特性在分為地下水量與總供水量等子系統模型；而總用水量子系統則依據「台灣地區用水來源結構」分為農業用水、民生用水與工業用水等子系統，亦即包含了農牧業部門、工業部門與民生部門等所構成之水資源需求；另外考量透過政府政策操控之調節供需子系統。而影響水資源使用之重要外生變數包括；氣候水文(雨量)、人口總量、耕地面積、豬隻頭數、工廠地面積、地下水抽取量等等。因文章篇幅之考量，無法一一介紹模型中所使用之外生變數，因此僅著重在本文中後續想進一步探討的政策模擬問題有關之外生變數進行討論。<sup>6</sup>本文除了建構一全面性影響台灣的水資源供需與管理系統動態模型之台灣水資源管理模擬系統(the water resource administrative system in Taiwan, WRAT)外，並且以建構實質的決策經驗行為，即了解水利局對於民生、農業與工業用水權調配的實際操作經驗，在考量台灣整體水資源管理之前提下，運用系統動態學方法，考慮影響水資源使用之重要的內、外生變數在WRAT之模型架構下再進一步模擬水資

<sup>4</sup> 過去國內外有關水資源相關文獻中，因完整的水資源管理須同時考量水資源供給面與需求面之各項影響因素，在整體考量下形成一個複雜的系統結構，較難運用一般的計量方法進行實證分析，而多以數學模型進行研究。

<sup>5</sup> 本文所考量之經濟誘因角度乃是在後續章節5.2政策模擬與分析當中，在WRAT模式中模擬以「訂價策略」來改變民眾用水習慣作為達到推動節約用水政策並改善用水結構之政策模擬分析。詳細之討論內容請見後續章節5.2之介紹。

<sup>6</sup> 詳細之討論內容請見後續章節4.1.1與4.1.2之介紹。

源管理之相關政策之影響，並藉由政策模擬結果提供水資源管理與決策單位規劃相關政策之參考依據。

### 3. 研究方法

水資源管理是複雜的動態問題，而且水資源管理在各國環境條件皆不相同；台灣水資源管理亦有其特殊性。影響水資源管理的因素日趨複雜化與多元化，彼此交互作用、環環相扣、互為因果而形成動態複雜(Dynamic Complexity)。其中部分變數可能具非線性(Non-Linear)及高度不確定性(High Uncertainty)之行為特質，或具時間延遲效果。然而一般經濟學聯立模型或產業經濟理論、計量經濟等方法，較難同時處理上述複雜且動態的問題，因此本文採用系統動態學方法進行分析。

系統動態學(System Dynamics; 簡稱 SD)為常用的一種政策與決策模擬之方法論，為強調能幫助決策者瞭解一個複雜系統的結構和行為的方法論，也是一種概念的表達，而在實際操作上主要是在顯示整個系統動態行為隨時間變化的特性，此方法進而被擴展到複雜的物理學、生物學、社會學、經濟學等領域。系統動態學(System Dynamics; 簡稱 SD)之因果回饋環路方法論，本身就是為了解決多因多果且互為因果、變數間交錯複雜之系統問題，它可以從錯綜複雜、交互作用之許多變數中，深入了解系統失序現象，找出關鍵因果環路與敏感變數之系統槓桿點位置；如此也就能較清楚詮釋系統內變數改變或外在環境變化，對系統所造成之衝擊。此外，系統動態學採用差分與微分方程式之觀念，設計動態程式語言，以計算動態過程中變數變化。更有動態系統函數設計：如滯延函數(Delay Function)可處理動態延遲效果及時間落差；而表函數(Table Function)則適合處理非線性關係。更同時考慮流量(Flows)及存量(Stocks)變數特性，兼備了決策上對於控制變數(Control Variables)與狀態變數(State Variables)之操作性，因此系統動態學適合應用在政策或決策之動態分析，亦可作為高階管理之決策參考。(Coyle,1998; Jan and Hsiao, 2004; 蕭志同, 2004; Hsiao and Liu, 2012; Peng et al, 2016; Liu et al, 2016)

系統動態學是以一宏觀的角度，去看待動態複雜系統之分析工具。而目前已有許多的系統動態學模擬軟體相繼被開發出來，如 Stella、Powersim、Vensim<sup>®</sup>、ithink 等(簡菁儀, 2002)。因此 SD 已經被廣泛應用於社會科學與環境資源的管理(Trappey et al, 2012; Hsiao, 2014; Lemoine and Traeger, 2014)。它有別於傳統數學等「邏輯實證論」偏重於演繹法的推導，而它們被公認是站在不同科學哲學的基礎上，並且是互補的科學方法(Forrester and Senge, 1980; Balas and Carpenter, 1990; Skyttner, 1998)，並且也漸漸被統計與經濟學界所接受。(Forrester, 1980; Sterman, 1988; Radzicki, 2003; Lemoine, 2014)。然而，以 SD 的方法論進行相關模擬，討論水價策略與節約用水政策的影響，少有人進行研究。換言之，以此全面性的供需系統模型建構與分析，是本研究的緣起與貢獻。

### 4. 模型建構

本文採用 SD 方法論及 Vensim<sup>®</sup> 模擬軟體進行模擬，此軟體可提供一種簡易且具彈性的方式，以建立包括流量變數(Flow)、存量變數(Stock)、回饋環路(feedback loop)，以及透過系統思考來表現問題方式的因果回饋圖(casual diagram)等相關模式。<sup>7</sup>透過此模擬軟體可進一步了解系統動態學解釋系統行為的觀點。

在同時考量水資源供需結構下，水資源管理系統形成一個複雜的動態架構，本研究採用目前廣泛使用的 SD 專業軟體 Vensim<sup>®</sup> 建立動態模式，先用文獻及專家訪談得到專業

---

<sup>7</sup> Vensim<sup>®</sup>是由美國 Ventana Systems, Inc. 所開發，為一可觀念化、文件化、模擬、分析、與最佳化動態系統模式之圖形介面軟體。

知識，並將各變數之間的關係寫入方程式。接著將各變數、參數間之數量關係以方程式功能進行模式測試，我們可以進一步瞭解變數間的關鍵因果關係與環路。

#### 4.1 水資源管理分析架構

過去許多水資源管理之相關文獻常提到氣候水文、政府政策等因素對水資源管理之影響，亦提到水資源的開發與利用方式，對自然環境更有多方面的重大影響。事實上左右台灣水資源管理模擬系統(the water resource administrative system in Taiwan, WRAT)之因素，還包括幾個十分重要的外生變數(Exogenous Variables)與內生變數(Endogenous Variables)。影響水資源使用之重要外生變數包括；氣候水文(雨量)、人口總量、耕地面積、豬隻頭數、工廠地面積、地下水抽取量等等。而地下水量、總供水量、總用水量、調節供需等為較重要的內生變數。本文以台灣水資源為研究對象，建構WRAT model進行分析，透過模擬測試重要的外生變數產生變動時，以尋找水資源管理系統的槓桿點，並探討其系統行為，進而了解系統中各內生變數的影響。

換言之，台灣水資源管理系統受到上述內生、外生變數交互作用的影響，水質源的開發與利用是環環相扣、互為因果，因此必須以整體性、系統性思考進一步規劃管理，並考量多方面因素，才能找出形成政策槓桿點的關鍵因素。以下先分別介紹 WRAT 模型之內生變數與外生變數：

##### 4.1.1 內生變數

根據經濟部水利署統計資料顯示，自 1991 至 2012 年，台灣水資源的供水來源平均而言約有 42.20% 來自河川、23.52% 來自水庫以及 34.28% 為地下水，由此可知，河川是水資源供給的最大來源。本文主要關心之內生變數探討分別為地下水量、總供水量、總用水量以及調節供需，分別說明如下：

##### 1. 地下水量

地下水為水文循環之一環。地表水自地面進入含水層後即緩慢流動，在不同的地點，經由自然流出、植物蒸散、與人為汲取等不同方式又重回地表。地下水為有限之資源，可利用之地下水遠比地面水少，地下水之開發雖不受時空之限制，但其補注卻受時空之限制，並非取之不盡，用之不竭，地下水經長期超量抽取利用下，已造成沿海地區地下水位持續下降、致使地層下陷、海水倒灌、地下水倒退、海水入侵、地下水鹽化及排水不良等問題，為紓緩這些現象，地下水資源管理之規劃應有效管理地下水之利用，進而配合地面水資源之經營管理，以達到整體水資源永續利用之目標。而在考量了各項影響地下水量之各個變數下，包含水產養殖業、地下水管制政策、地中流、抽地下水、超抽地下水、地盤下陷、地下水倒退、海水倒灌、地下水鹽化等因素之後，建構出台灣地區地下水水量因果環路圖，請見圖 1。

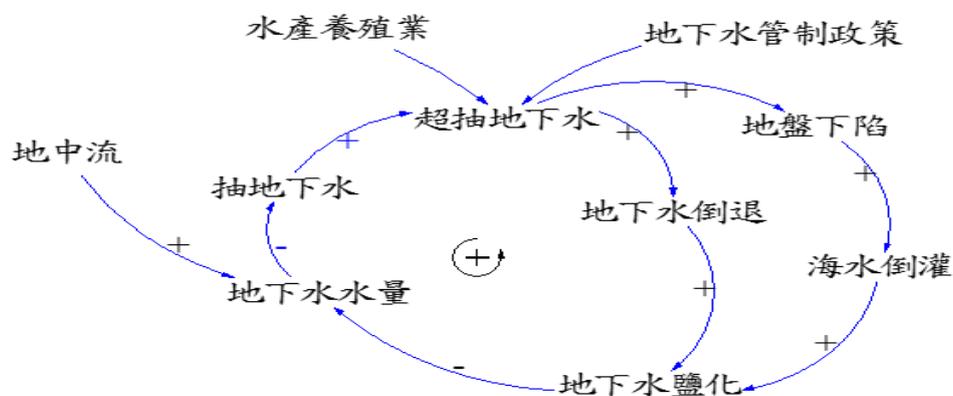


圖 1 台灣地區地下水水量因果圖

資料來源：本研究整理

### 2. 總供水量

在水資源運用與管理方面，水利單位的策略是廣設攔河堰將河川地表水引取到他處利用，但在枯水期時則仰賴水庫或抽用地下水源。本文主要考量地中流、地表流等外生變數對地下水水量、河川截取及水庫水量之影響，進而考量生態保育政策、水權分配政策等因素對總蓄水量之影響，更進一步考量回收水使用、海水淡化、降低漏水率等外生變數對農牧供水量、工業供水量及生活供水量之影響，有關台灣總供水量之因果環路圖請見圖 2。

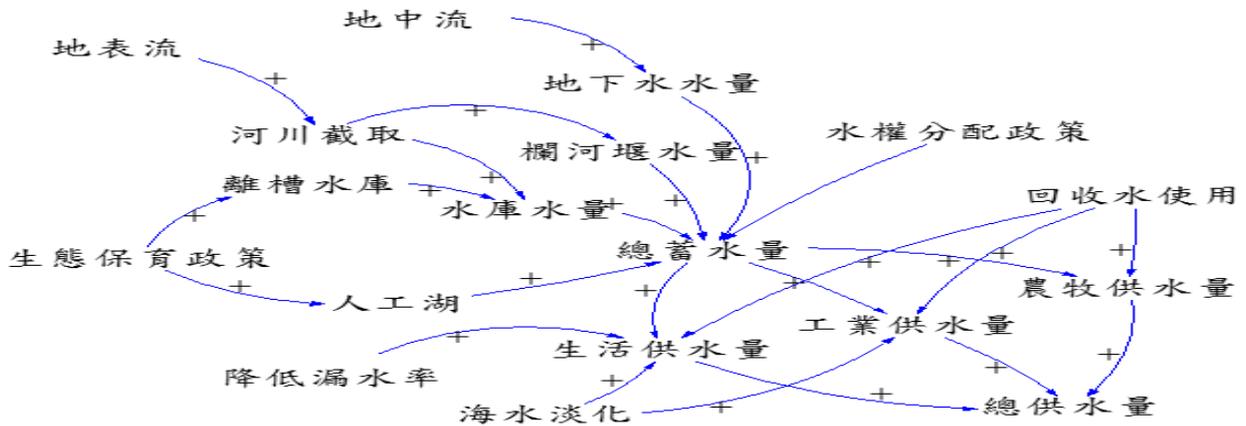


圖 2 台灣地區總供水量因果圖  
資料來源：本研究整理

### 3. 總用水量

台灣近年來缺水問題日益嚴重，名列全世界十八個缺水國家之一。台灣地區年總用水量包括農業用水、生活用水與工業用水，自 1991 至 2012 年間，台灣農業用水逐漸減少，工業用水量無明顯變化，生活用水卻是逐年增加，1991 年至 2001 年間幾乎增加成長 50%，平均每年增加約 4.24%，遠超過人口成長(1%以下)的速率，顯示國人用水習慣浪費；直到近幾年來環保意識抬頭，生活用水量才有緩慢下降之趨勢。各類的用水量隨著社會生產結構的大幅度改變，各項用水量所占比例亦隨之改變，平均而言農業用水量約佔 72.72%、生活用水量約佔 18%、工業用水量約佔 9.28%。首先考量人口成長、農牧成長、工業成長及工業園區數目等外生變數對人口總量、農牧面積(農牧業產值)及廠房面積(製造業產值)之影響，進而考量節約用水政策、訂價策略等因素分別對農牧用水量、生活用水量即工業用水量之影響，並建構出台灣總用水量之因果環路圖，如圖 3。



圖 3 台灣地區總用水量因果圖

#### 4. 調節供需

面對台灣水資源的開發與規劃，應從傳統的「需求」導向及建立「大型水庫」導向，轉為「調節供需」、「節流即是開源」、「質的改善即是量的增加」的新原則。目前台灣水資源管理面臨的問題可粗略分為「供給的問題」及「需求的問題」，若要達到水資源使用不虞匱乏，則應該要使水資源保持超額供給之狀態，因此必須適時調節「供水量」(供給)及「用水量」(需求)。首先，「供給的問題」包括供水不足所造成的需水缺口，此時產生的狀態屬於水資源「供不應求」之狀態，則政府採取「水權分配政策」來因應供水不足時之供水順位，依據民國 103 年修訂後之水利法第十八條及第十九條「家用及公共給水」有優先使用權，農業用水自應予以配合移用支援，而移用部門亦應依據水利法第十九條給予原水權人(即農民)，按其損失情形給予補償。此外，雖然工業用水之用水順序，依水利法第十八條規定，次於農業用水，即使面臨供水的不足情況，依法亦無優先移用農業用水；惟考量當前工業及科學園區用水影響經濟發展至鉅，農業用水在產業用水不足時，均適時配合支援移用，有效避免經濟成長受到水資源開發供應不足之影響。

在「需求」的問題上，台灣更特殊的問題是每人平均用水量過高，依水貧乏指數(Water Poverty Index, WPI)的研究顯示，台灣於水的「使用面」上名列全世界 148 評比國中節水的第 141 名，可見用水浪費為台灣水資源危機主要根源。在此問題上，以經濟學的角度而言，水資源符合一般性正常財貨之性質，因此符合「需求法則」，政府可採取「訂價策略」以價制量，希望透過合理化水價來達到以價(提高水價)制量(減少每人平均用水量)之目的。運用市場機制做為水資源管理手段已是世界趨勢，但台灣水價偏低，無法反應成本。因此建立一套合理水價公式，自動調整機制，並逐步調整，仍有待國內各界建立共識並落實推動；以建立合理的水價調整機制，改變國人用水習慣，並促使台

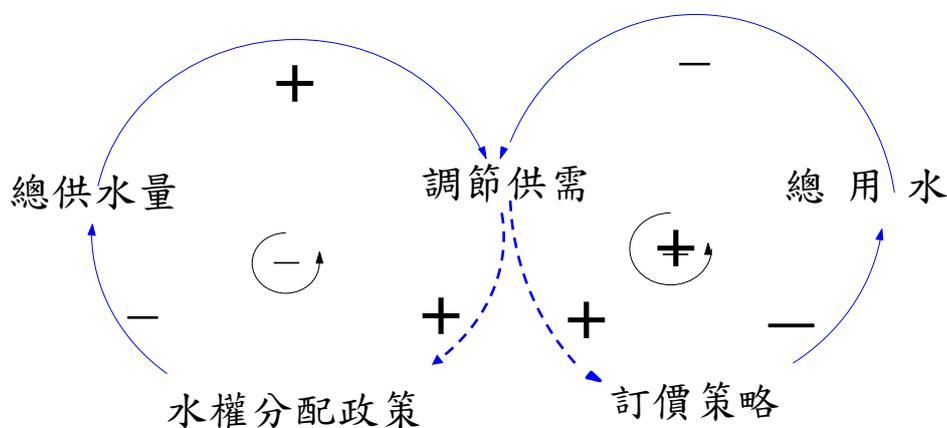


圖 4 政府政策操控對 WRAT model 影響

資料來源：本研究整理

灣有限的水資源永續利用。

因此，在進行調節供需之操作上，政府可透過採取「水權分配政策」來解決供水不足之問題；另外，可運用市場機制採取以價制量之「訂價策略」來降低每人平均用水量，透過政府政策操控來執行「調節供需」(參閱圖 4)。

##### 4.1.2 外生變數

在系統動態學中所指外生變數是位於回饋環路之外的變數，外生變數的改變會影響到回饋環路中之內生變數，但其本身不受其他內生變數的影響，如一般統計、計量分析方法中所謂之「自變數」或「解釋變數」。影響水資源之外生變數眾多，例如：氣候水文、人口總量、耕地面積、工業面積及畜牧業等因素均會分別影響到前述各項內生變數。雖

然本文在建構 WRAT 模型時均已考量以上所述之外生變數，然而，過去文獻中已有許多學者探討過氣候水文與人口總量等外生變數變動之影響分析，因此，本文在後續模擬外生變數變動後，觀察探討水資源管理系統行為時，僅著重在下列本文核心的研究問題進行模擬與探討。

台灣雨量分布相當不平均，不管是空間、時間或是季節上都有極大的落差。事實上，台灣的枯水期大多在十月到隔年二月間，因此，必須在枯水期時就應該先防範可能的缺水危機，才能真正做好水資源管理。農業用水是台灣用水量最大宗，將農業用水保守運用是防範缺水危機最快的方式，因此本文在後續外生變數模擬當中，主要關心影響農業用水量之外生變數變動之影響。農業用水又分為灌溉用水、畜牧用水與養殖用水，圖 5 顯示 1991 年到 2012 年間各項農業用水所佔比例，其中灌溉用水乃是農業用水之大宗，有鑒於台灣的糧食安全問題<sup>8</sup>，仍須保持一定的國產食糧量，而灌溉用水量主要受到灌溉耕地面積影響。此外，台灣在 2002 年 1 月 1 日正式加入世界貿易組織(World Trade Organization, WTO)後，耕地面積持續減少，甚至有些農地開始轉作高經濟作物或工業用地，例如，科學園區的擴建。因此，我們將在後續模擬「耕地面積」此外生變數變動後對農業用水量之變化情況。

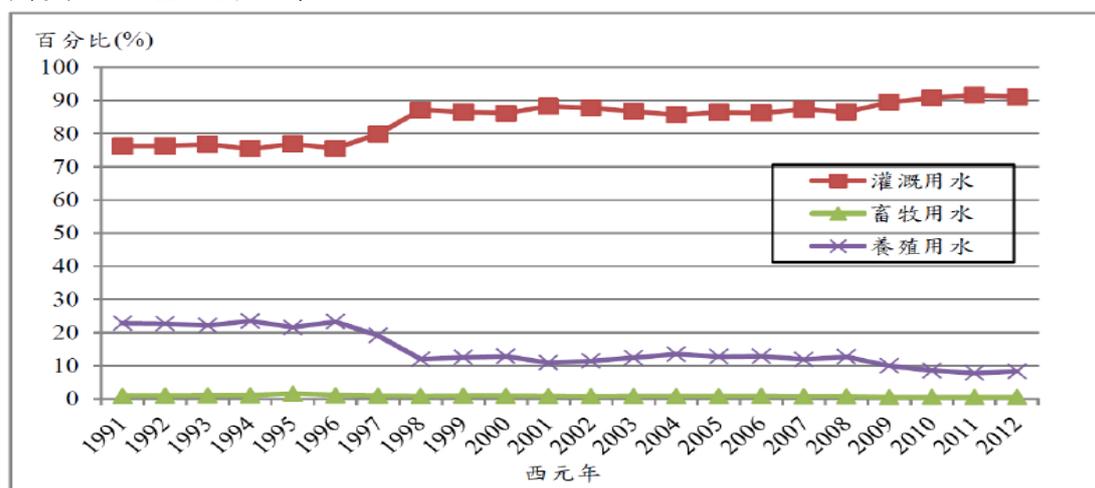


圖 5 台灣地區農業各標的用水分析圖

資料來源：經濟部水利署、本研究整理

近幾年來環保意識抬頭，根據 2007 年美國的「世界觀察研究院」報告中指出，全球溫室氣體總量的 18% 是由牲畜所產生，比起所有飛機、船舶與車輛等交通運輸業所占的 14% 還要高。據世界銀行統計，人類 70% 用水量浪費在餵食肉產動物上，耗水量相當龐大。如果將種植飼料消耗的水包括在內，那麼畜牧業消耗了全球一半的淡水，其中包括牲畜的飲用水及畜牧業排放汙染之清潔用水。自 1970 年以來，世界每人平均水的擁有量減少了 40%，實際上如果我們能減少牲畜飼養，根本不需要耗費那麼多的水，而節約的水資源將是十分可觀的。雖然從圖 5 之統計數據中可知，畜牧用水所佔之比例最小，然而基於環保考量，希望透過探討減少豬隻飼養是否影響牧業汙水排放量進而影響農業用水。因此，我們將在後續模擬「減少豬隻飼養」後牧業汙水排放量與農業用水量之變化情況。

因此本文以探討「耕地面積」與「飼養豬隻」兩個外生變數產生變動時，以尋找系統的槓桿點或觀察探討系統行為，進而了解各內生變數的行為。以下分別就所關心的兩

<sup>8</sup> 若以糧食生產量來檢視台灣糧食安全問題，根據行政院農糧署發布的最新糧食供需年報指出：2012 年以熱量計算之糧食自給率為 32.7%，較 2011 年減少了 1.2%。

個外生變數加以說明:

#### 1. 耕地面積

台灣總面積 360 萬公頃，內含平原地區 95 萬公頃，山坡地區 97 萬公頃及高山地區 168 萬公頃。原有可耕地 100 萬公頃，但因大量轉用於工商業，耕地面積由 1984 年 891,655 公頃逐年下降至 2013 年 799,829.8 公頃。台灣的耕地本來就不多，因都市迅速擴展更大量吞噬周邊的良田，糧食進口的比例愈來愈大，加入 WTO 後農產品開放進口將使耕地面積更為減少，若依照政府農地釋出方案目前的規劃，耕地總面積的持續下降是可預期的趨勢。

#### 2. 豬隻頭數

近年來畜牧業之各項環境問題，已廣受社會各界關注，其中有關水、空氣及豬糞污染問題，更是養豬產業目前必須嚴正面對之環保課題。台灣地區豬隻在養頭數 1991 至 1996 年均維持 1,000 萬頭上下；至 1997 年降低約為 797 萬頭，1998 年更減低約為 654 萬頭；其後 1998 年至 2005 年就一直維持在 750 至 650 萬頭之間；自 2006 年之後呈現緩慢減少之趨勢，至 2013 年降至約 580 萬頭。期間降幅最大為 1997 與 1998 年，這兩年台灣地區發生『口蹄疫』疫情，感染豬隻大量撲殺，總在養頭數由 1,070 萬頭減為 654 萬頭。

### 4.2 WRAT 模型建構

本文考量了前述所關心之內生變數與外生變數建構出台灣水資源管理模擬系統模型(WRAT Model)，本模型之系統邊界包含水資源供給子系統與用水子系統，其中供給子系統又依其功能特性在分為地下水與地面水等子系統模型；而用水子系統則依據「台灣地區用水來源結構」分為農業用水、民生用水與工業用水等子系統，亦即包含了農牧業部門、工業部門與民生部門等所構成之水資源需求；而其他在本文中未討論到之影響因子屬於系統邊界外，則不在本研究的討論中。WRAT 模型總共包含了 6 個積量變數、12 個量變數及 77 條方程式等，並採用 Vensim 軟體繪出台灣水資源管理系統結構之積流圖，請參見圖 6。

水資源供給分為地面水（又再分為河川引水及水庫調節）及地下水兩類，根據前述水資源供給子系統中，包含「地下水水量」與「水庫水量」兩個重要的積量變數，另外四個率量變數分別為「地下水補注量」與「地下水抽取量」、「水庫進水量」與「水庫出水量」等。水資源之需求，又分為消耗性用水及非消耗性用水兩大部分。消耗性用水部分主要包含農業用水（含灌溉、養殖與畜牧用水等）、生活用水（含自來水及自行車取水）及工業用水等三大項；非消耗性用水主要為電力用水（水力發電）。本文中所指水資源僅指消耗性部份之水資源需求，因此在水資源用水子系統結構中，農業用水子系統<sup>9</sup>共包含兩個積量變數，分別為「耕地面積」與「豬隻頭數」，四個率量變數分別為「耕地增加率量」與「耕地減少率量」、「豬隻增加率量」與「豬隻減少率量」；生活用水子系統包含一個積量變數「人口總量」，及兩個率量變數：「出生」為增加率量、「死亡」為減少率量；工業用水子系統則包含一個積量變數「廠房面積」，及兩個率量變數：「廠房面積增量」與「廠房面積減量」。

---

<sup>9</sup> 本文在建構台灣水資源管理模擬系統模型(WRAT Model)時，已將會影響到灌溉用水量與豬隻用水量之影響因子納入農業用水子系統中，此部份可參考圖 6「台灣水資源管理系統結構之積流圖」，因篇幅之考量未特別列出農業用水子系統之系統結構圖。

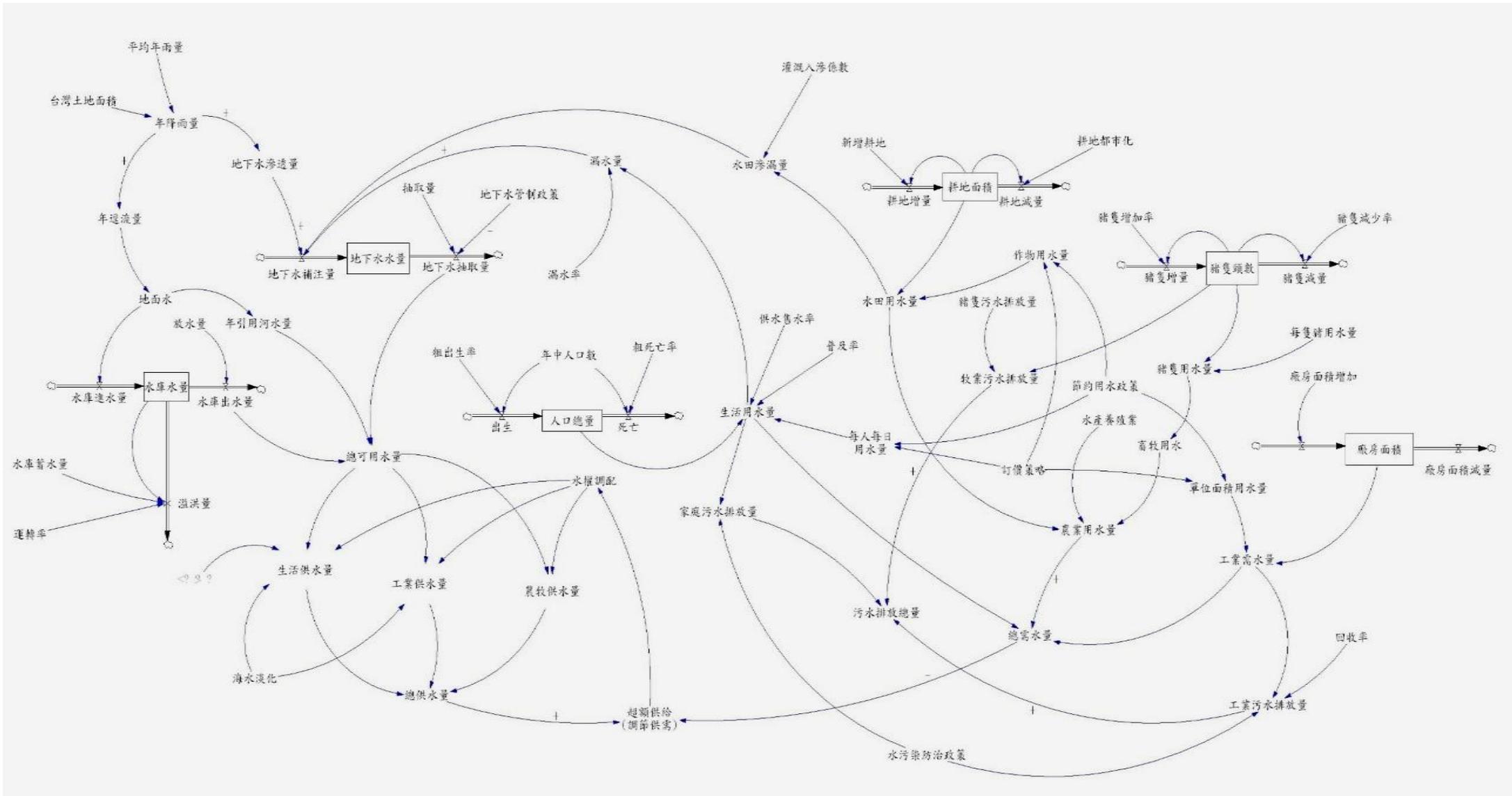


圖 6 台灣水資源管理系統結構之積流圖  
資料來源：本研究整理。

## 5. 結果模擬與政策分析

本文主要目的是以宏觀的角度觀察水資源管理系統整體結構與行為，釐清各關鍵因素間的動態互動關係找出問題關鍵，進而評估關鍵因素之影響；並觀察改變水資源系統整體結構與行為的可能，以研擬最適當的因應政策。本文以年雨量為水資源系統的來源，並以過去台灣歷史經驗；五年一小旱，十年一大旱；推估未來年雨量變化進行推估，此推估假設均為為水資源管理之學界業界所能共同接受之假設(程瑞祥，2006)，並且進行 Group Model Building 的建模步驟與專家對模型建構的檢視(Andersen et al, 1997a, 1997b)。此外，我們以歷年實際值作為模擬結果是否與實際一致，以測試模型的信度與效度(Balas and Carpenter, 1990)。本文將系統範圍界定在台灣地區產業發展、人口成長與水資源管理之動態關係，模擬時間由 1991 年至 2021 年，並以維持現狀做為基底情境，再以外生變數變動做為假設情境進行模擬，因考慮數據資料的一致性與完整性，故選擇 1991 年至 2003 年之實際統計數據作為現況資料，以此為參考比較並觀察模式之效度。

### 5.1 結果模擬

我們主要針對耕地面積、豬隻頭數等外生變數進行模擬，進一步分析其與內生變數交互作用的影響，並作了由 1991 年至 2021 年前述重要變數的動態模擬結果。

假設情境一：耕地面積持續緩慢的降低，本研究假設 2003 年以後情境仍每年下降 2.65%，進一步模擬耕地面積減少對農業用水量之影響。

由於 1995 年 8 月 3 日政府施行「農地釋出方案」使得 1997、1998 年刺激耕地大幅下降；其餘年度耕地結構的改變均保持緩慢下降的趨勢。長久以來，農產品價格偏低、農業經營利潤減少，及市場供需不穩定等因素均嚴重影響耕地非農用情形。另外，政府鼓勵稻田轉作雜糧或休耕之政策開始於民國 73 年，已持續執行近 30 個年頭，最初期作休耕面積僅有 5 千 7 百公頃，然而民國 91 年我國加入世界貿易組織(WTO)之後，貿易自由化使得國內農產品不敵進口農產品的低價行銷，無競爭力的農民只好配合稻作休耕，以致期作休耕面積增至 101 年的 20 萬公頃，其中連續兩期休耕的農地有 5 萬公頃。中研院建議書更指出，此休耕政策不但沒有生產力且未提供任何就業機會，更造成農業耕作環境惡化，破壞農村景觀，同時政府每年必須支付休耕補助款高達新臺幣 100 億元，已成為財政一大負擔。基於上述研究報告之結果，本文不針對「休耕補助」政策進行討論，而著重在依實際值觀察耕地面積減少並模擬其對農業用水量之影響。模擬結果以圖 7 顯示，因「耕地面積」呈現緩慢減少，直接影響「農業用水量」也呈現緩慢減少之變動。以整體農業環境來看，耕地面積將持續緩慢下降，並與本研究系統動態學量化模式模擬結果作比較。假設情境二：台灣地狹人稠不適合發展畜牧業，並配合政府「環保」政策，我們模擬大幅減少豬隻飼養頭數(以每年減少畜養 10% 為模擬數值)對牧業污水排放量之影響。

根據環保署統計指出，養豬產業直接成本包括仔豬費、飼料費及汙染防治費，再加上豬農未負擔的間接成本，包括水體品質接受性效益成本及未去除氮、磷等汙染損害成本，淨值已成負數，是屬於不值得鼓勵的產業。台灣溪水水質惡化，豬糞尿廢水亦為其重要汙染源之一，以環保的角度而言，養豬的社會成本太高且造成環境汙染問題，若能大幅降低牧業污水量應可更有效抑制農業用水量，以期能達到調節水資源供需之管理目的。

自 1991 年到 2005 年期間，豬隻飼養之最大降幅在 1997 年口蹄疫爆發期間達到 25%，而自 2006 年之後至 2013 年間呈現緩慢減少之趨勢，我們計算實際值統計數據期間發現豬隻飼養頭數變化量平均降幅約 5%，因此本文以豬隻飼養頭數變化量為依據，以每年減少豬隻飼養 5% 做為基底情境(維持現狀)，並模擬每年減少豬隻飼養 10% 做為假設情境，模擬結果請參見圖 8 與圖 9。由圖 8 可知，大幅減少豬隻飼養頭數使得牧業

污水排放量也大幅減少；然而由圖 9 發現，若以農業用水量來看，模擬結果顯示豬隻頭數變動對農業用水量影響不顯著，其主要原因可能是因為畜牧用水量之比率僅佔農業用水量約 2%，因此若想有效達到抑制農業用水量，仍應以妥善控制灌溉用水量為主。

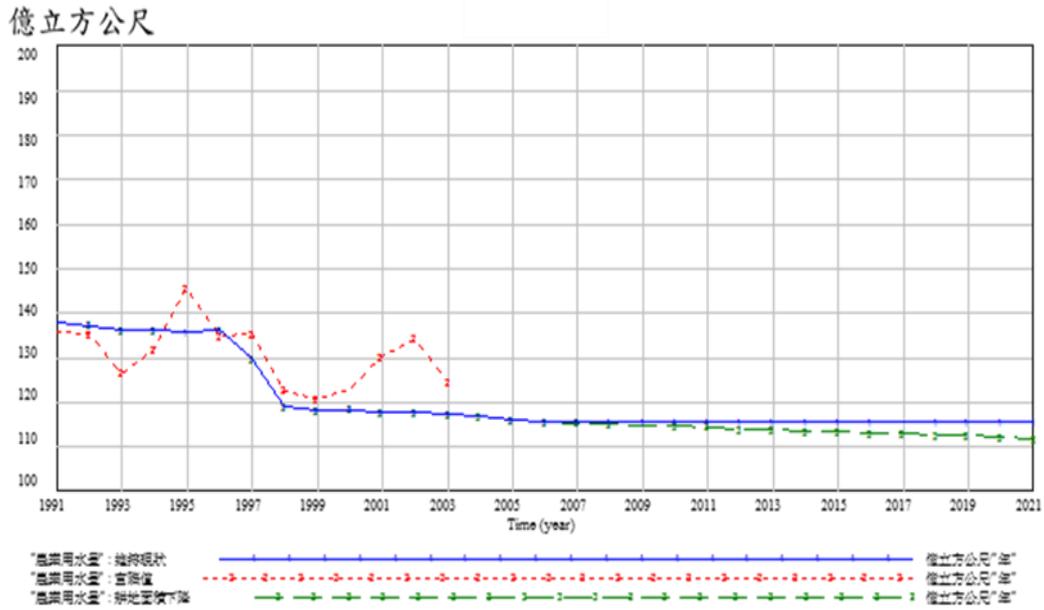


圖 7 WRAT 模擬「耕地面積」緩慢減少、實際「農業用水量」模擬圖  
資料來源：本研究整理

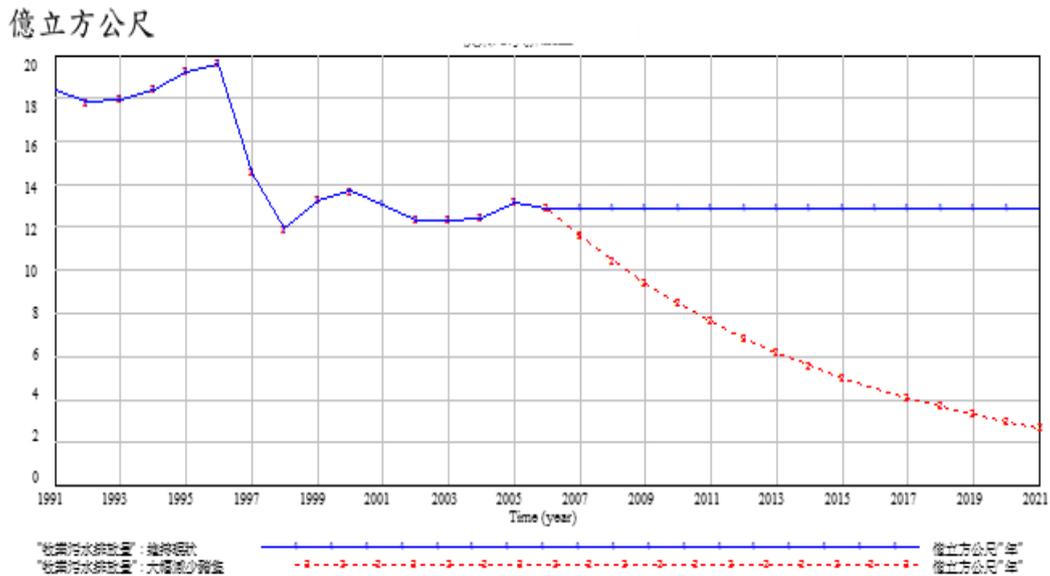


圖 8 WRAT 模擬大幅「減少豬隻」影響「牧業污水排放量」模擬圖  
資料來源：本研究整理

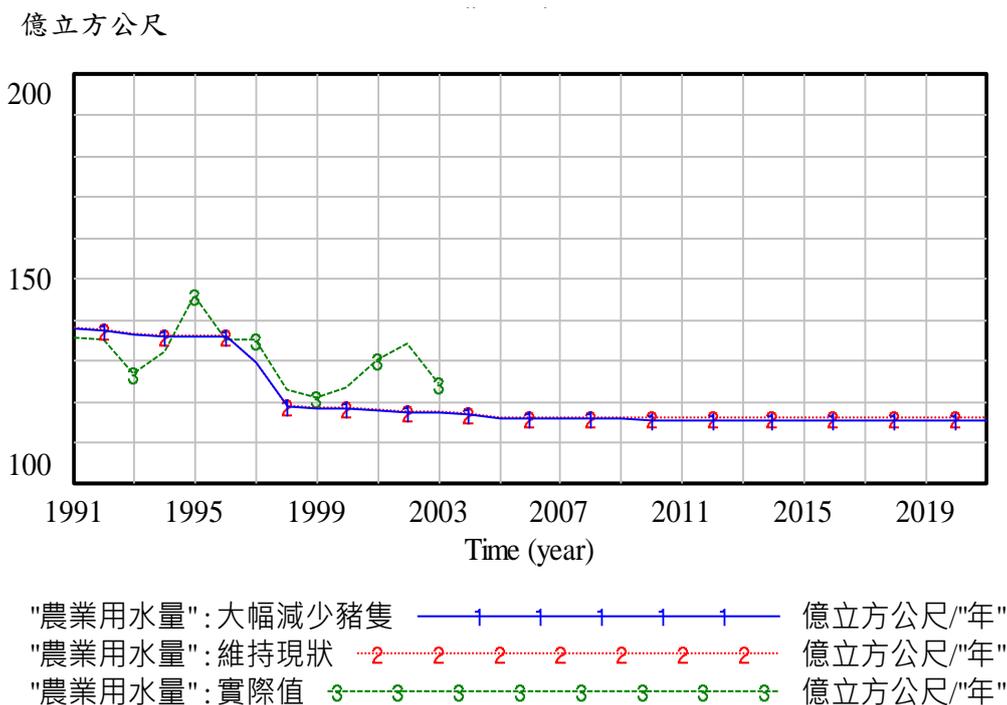


圖 9 WRAT 模擬大幅「減少豬隻」影響「農業用水量」模擬圖  
 資料來源：本研究整理

## 5.2 政策模擬與分析

一般而言，台灣地區雨量分布不均，且多集中在 5~10 月的豐水期，再加上台灣河川坡度大、水資源開發困難、水污染問題日益嚴重、地層下陷問題、海水倒灌、集水區管理問題、水利設施老舊狀況不良等問題，對水資源管理與運用相當不利。而氣候變遷更嚴重影響台灣的降雨量，加上全球暖化效應使台灣的水資源問題更加嚴重。

因此，我們在發展 WRAT 模式中模擬「訂價策略」改變用水習性作為達到推動「節約用水政策」並改善用水結構之政策模擬分析。本文主要以前述建構之 WRAT 模型架構為基礎，首先由模型中得知各項外生變數與主要各項用水量（內生變數）之因果關係（如圖 6 所示），在參數與各項用水量權重設定上，我們依據過去實際的工業用水量、生活用水量、農業用水量之比例做為調配參考值。再根據經濟學理論中「以價制量」之基礎分別探討「未施行訂價策略」、「價格提昇 5%」與「價格提昇 10%」之下，模擬訂價策略如何影響總用水量。台灣長期以來水價偏低，更是整個水資源管理問題之關鍵所在，目前原水開發成本每公噸已達 30 元，但自 1994 年台灣省自來水公司每公噸水價為 9.00 元，台北自來水事業處每公噸水價為 7.50 元，水價明顯偏低。台灣自來水水價從 1994 年迄今，已有 20 年未調整，2013 年平均售水成本每立方公尺 11.12 元，平均售價卻僅有 10.93 元。低廉的水價不僅讓台灣自來水公司營運困難，也沒有足夠的動機使民眾節約用水，因此應建立合理水價做為基準目標，才可能真正解決水資源管理的問題。因此在如此不合理的水價政策下，又如何能期望民眾、各行各業節約用水？而在政府財政日趨困難下，低水價政策又如何能籌措充裕經費，針對供水體系作有效的改善規劃？

運用市場機制做為水資源管理之方法已是世界趨勢，但台灣偏低的水價，無法反應成本，造成水資源的浪費。本文亦以市場機制做為探討之水資源供需管理之機制，如同一般性財貨之性質，水資源亦符合需求法則，本文主要是以經濟學角度探討「以價制量」之訂價策略，分析是否提高水價可達到用水需求量減少之目標，希望能以提高水價之策略誘發使用者能改變用水習性，進而減少用水需求量。<sup>10</sup>因此，未來台灣應建立一套合理水價公式及自動調整機制，在合理的水價調整制度之下，才能有效管理水資源，並促使台灣有限的水資源能永續利用。

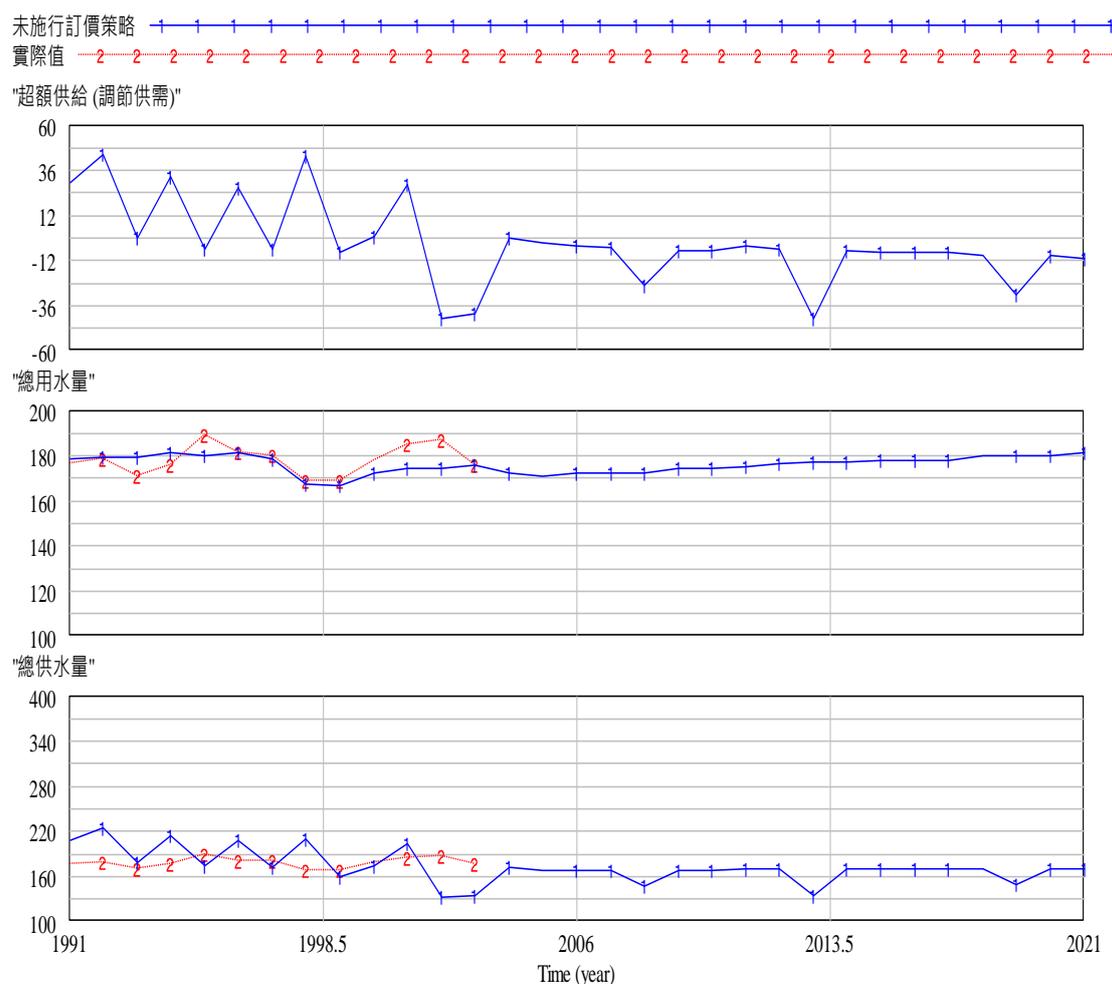


圖 10 WRAT 未施行「訂價策略」模擬圖 (資料來源：本研究整理)

為實行合理化水價政策，有效落實節約用水，本文模擬施行「訂價策略」，並觀察比較系統內較為重要的內生變數「超額供給(調節供需)」、「總用水量」、「總供水量」施行水價調整政策前後之差異(見圖 10 與圖 11)。本文以未施行訂價策略做為維持現況之基底情境，另外分別以價格提昇 5% 與 10% 做為以價制量之模擬情境。<sup>11</sup>在「總供水量」

<sup>10</sup> 本文所採行以價制量之訂價策略乃是以市場機制為分析之前提，並且以平均每單位水價之實際統計數據做為後續模擬水價調整之依據。雖然自來水價調整，亦有可能使得使用者將選擇其他之用水來源，如地下水、河川水等其他供水管道，然而，使用者取用地下水或河川水等統計數據並無法取得，且使用者在取得地下水與河川水等管道之需求並非透過市場機制，因此本文礙於資料取得之限制，僅考慮在以市場機制運作下之自來水水價調整做為訂價策略模擬之分析。

<sup>11</sup> 以台灣自來水公司網站之統計數據得知，若以平均每立方公尺之售水成本與水價達到損益兩平之前提下，則水價應調漲約 3%~5%，因此本文以價格提昇 5% 之訂價策略做為達到損益兩平之訂價參考。另外，更進一步考量以價格提昇 10% 做為模擬大幅提高水價之

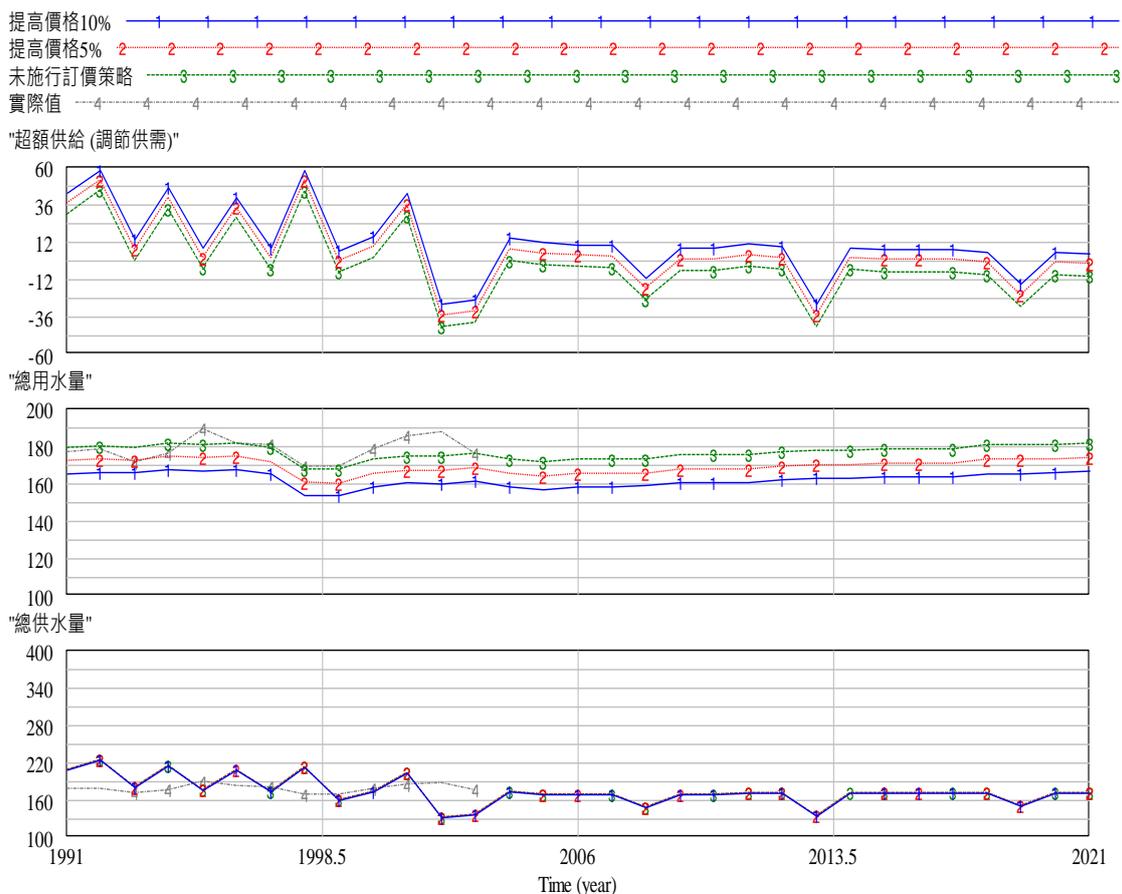


圖 11 WRAT 施行「訂價策略」模擬圖

資料來源：本研究整理

方面，無論是未施行訂價策略、價格提昇 5%、價格提昇 10%，模擬結果值均相同，顯示「訂價策略」對「總供水量」無顯著之因果關係，亦即訂價策略並不影響水資源供給。而在「總用水量」方面，我們觀察價格提昇 5%、價格提昇 10% 與未施行訂價策略的行為，發現各年度總用水量的模擬值當中，以未施行訂價策略的值最大，當價格提昇 5% 次之，價格提昇 10% 的值最小。換言之，在未施行訂價策略下，總用水量能維持在相當高的用量；而價格提昇 5% 之後，總用水量低於未實施訂價策略之總用水量；若將價格大幅提升 10%，總用水量更低於僅提昇 5% 的總用水量。由模擬結果發現訂價策略與總用水量有顯著因果關係存在，且總用水量會隨價格提昇而減少，此結果亦隱含「以價制量」之訂價策略有效。另外，再觀察「超額供給(調節供需)」(總供水量減總用水量)，若為正值表示供水量充裕(水資源有超額供給)，若為負值表示供水量不足(水資源供不應求)，由模擬結果顯示，未施行訂價策略時，「超額供給(調節供需)」的模擬值為負值有 24 個年度；當價格提昇 5% 時，其值為負值有 9 個年度；當價格提昇 10% 時，其值為負值有 5 個年度。換言之，在未實施訂價策略調整水價之下，水資源供需呈現供不應求之期間較長，而實施「以價制量」之訂價策略之後，可明顯改善水資源供需產生供不應求之情況。整體而言，由本文之模擬結果可知，實行「訂價策略」，應可達成水價合理化的目標，並達成節約用水之目的。

## 5. 結論與建議

台灣水資源供需系統是一個複雜且動態的結構，本研究運用系統動態學方法論建構出台灣水資源管理模型，並進行相關變數變化時衝擊的模擬。本研究探討台灣加入 WTO 後，耕地面積減少及推行環保政策下，減少豬隻頭數變數等改變時，水資源之影響情境模擬。本文也探討水資源之「訂價策略」的價格調漲效果模擬。若政府以市場機制「以價制量」之訂價策略，可改變民眾用水習性作為達到推動「節約用水政策」，並改善用水量。

本研究貢獻在建立台灣水資源管理模擬系統發展模型，可反映水資源管理的各相關變數相互作用之綜合效果。但本模型中尚未考量許多其他變數，例如合理化水價後收入增加，汰換舊漏自來水管線，降低漏水率，或者收取水污費或是都市水泥化、森林面積等變數對水資源管理之影響，有興趣的學者可以進一步擴充本模型之系統邊界，使模型的政策效果之實用性價值更提升。

## 參考文獻

1. 李明益(2002)。河川流域水管理系統動力模式之發展與建立。國立中央大學環境工程研究所碩士論文，未出版，桃園。
2. 阮威堯(2003)。系統動態方法在水資源開發政策環境影響評估之應用，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文，未出版，台中。
3. 柯志昌、吳濟華與屠益民(2004)。高屏河流域水資源管理系統動力模型建立與政策模擬分析。都市與計畫，31，167-194。
4. 陳昱君(2000)。應用系統動力學方法探討水資源利用之研究。台北大學資源管理所碩士論文，未出版，台北。
5. 陳明健(2003)。台灣灌溉水權及水市場之經濟分析。農業與經濟，30，1-26。
6. 陳明業(2002)。淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究。國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，未出版，台北。
7. 張光漢(2001)。ERP系統與系統動態學模式結合界面之研究與發展。義守大學管理科學研究所碩士論文，未出版，高雄。
8. 程瑞祥(2006)。台灣水資源管理系統結構之研究。大葉大學資訊管理學系碩士在職專班碩士論文，未出版，彰化。
9. 謝長宏(1980)。系統動態學-理論、方法與應用。台北：中興經營管理叢書。
10. 簡菁儀(2002)。台灣軟體廠商服務績效之系統動態學研究。中山大學資訊管理所碩士論文，未出版，高雄。
11. 蕭志同(2004)。台灣汽車產業發展之探討。國立交通大學管理科學博士論文，未出版，新竹。
12. 闕雅文(2008)。農田水利會調度水資源之市場結構分析。農業與經濟，41，45-72。
13. Andersen, D. & G. Richardson (1997a). Scripts for Group Model Building. *System Dynamics Review*, 13(2), 107-129.
14. Andersen, D., J. Vennix, & G. Richardson (1997b). Group Model Building: Adding More Science to the Craft. *System Dynamic Review*, 13(2), 187-201.
15. Balas, Y. & S. Carpenter (1990). Philosophical Root of Model Validity: Two Paradigms. *System Dynamics Review*, 6(2), 148-166.
16. Biswas, A.K. (1997). *Water Resources-Environmental Planning, Management, and Development*, 1-36, McGraw Hill Inc., New York.
17. Coyle, R. G. (1998). The Practice of System Dynamics: Milestones, Lessons and Ideas from 30 Years Experience. *System Dynamics Review*, 14(4), 343-365.
18. Forrester, J.W. & P.M. Senge (1980). *Tests for Building Confidence in System Dynamics*

- Models in System Dynamics*. North-Holland Publishing Co.
19. Forrester, J.W. (1980). Information Sources for Modeling the National Economy. *Journal of the American Statistical Association*, **75**, 555-556.
  20. Heltzer, G.E. (2003). Stalemate in the Aral Sea Basin: Will Kyrgyzstan's New Water Law Bring the Downstream Nations Back to Multilateral Bargaining Table? *Georgetown International Environmental Law Review*, **15**(2), 291-320.
  21. Hsiao, C.T. (2014). Industrial Development Research by Systems Approach in NICs: The case in Taiwan. *Systems Research and Behavioral Science*, **31**(2), 258-267.
  22. Hsiao, C.T. & C.S. Liu (2012). Dynamic Modelling of the Development of the DRAM industry in Taiwan. *Asian Journal of Technology Innovation*, **20**(2), 277-293.
  23. Jan, T.S., & C.T. Hsiao (2004). A Four-Role Model of the Automotive Industry Development in Developing Countries: A Case in Taiwan. *Journal of the Operational Research Society*, **55**(11), 1145-1155.
  24. Lemoine, D., & C. Traeger (2014). Watch Your Step: Optimal Policy in a Tipping Climate. *American Economic Journal: Economic Policy*, **6**(1), 137-166.
  25. Liu, C.S., C.T. Hsiao, D.S. Chang, & C.H. Hsiao (2016). How the European Union's and the United States' Anti-dumping Duties Affect Taiwan's PV Industry: A Policy Simulation. *Renewable & Sustainable Energy Review*, **53**(1), 296-305. (Forthcoming, Available online: 02. Sep. 2015)
  26. Peng, H.L., C.T. Hsiao, & M.H. Yao (2016). Systemic Analysis of Pensions: the Case of the Taiwanese Primary School Teacher Pension Fund. *Systems Research and Behavioral Science*, **32**(1), 159-172.
  27. Radzicki, M.J. (2003). Mr. Hamilton, Mr. Forrester, and a Foundation for Evolutionary Economics. *Journal of Economics Issues*, **37**(1), 133-173.
  28. Saliba, B.C., D.B. Bush, W.E. Martin, & T.C. Brown (1987). Do Water Market Prices Appropriately Measure Water Values. *Natural Resources Journal*, **27**(3), 617-651.
  29. Skyttner, L. (1998). The Future of Systems Thinking. *Systems Practice and Action Research*, **11**(2), 193-205.
  30. Sterman, J.D. (1988). Modeling the Formation of Expectations-The History of Energy Demand Forecasts. *International Journal of Forecasting*, **4**(2), 243-59.
  31. Trappey, A.J.C., C. V. Trappey, C.T. Hsiao, J.R. Ou, S.J. Li, & K.W.P. Chen (2012). An Evaluation Model for Low Carbon Island Policy: The Case of Taiwan's Green Transportation Policy. *Energy Policy*, **45**(6), 510-515.
  32. Yang, C.C., L.C. Chang, & C.C. Ho (2008). Application of System Dynamics with Impact Analysis to Solve the problems of Water Shortage in Taiwan. *Water Resources Management*, **22**(11), 1561-1577.

# Modeling of the Water Resource Dynamic Demand and Supply Model in Taiwan

Chih-Tung Hsiao<sup>12</sup>, Jia-Huey Lin<sup>13</sup>, Ray-Hsiang Cheng<sup>14</sup>

## Abstract

Water is one of the important resources in our daily life. Since there are many impact factors of water resource and those factors are getting more and more complicated. We need to construct the comprehensive model to analyze and simulate the policies of the water resource management systematically and dynamically. In this paper, we first discuss the general characteristics for the analysis of the water resource management. Second, we use system dynamic analysis method to construct the water resource administrative simulation system in Taiwan (WRAT) model and study the demand and supply of the water resource structure in Taiwan to explain its systematic behavior. We use WRAT model to investigate the changes of the total quantity of water supply, total water consumption and the adjustment of water demand and supply when the environmental variables are changed. Then, we simulate the effects on agricultural water consumption and total water consumption when the two variables – agricultural area and number of pigs are changed. We analyze the results of the simulation and evaluate if the purpose of water conservation can be achieved. The results of simulation can also provide the policy implication for government and water resource administration to formulate the water-saving policy and environmental conservation policy.

Keywords: Water Resource Management, System Dynamics, Sustainable Development, Policy Analysis

---

<sup>12</sup> Dept. of Economics, Tunghai University. Professor.

<sup>13</sup> Dept. of Economics, Tunghai University. Assistant Professor.  
Corresponding Author. E-mail addresses: jhlin1125@thu.edu.tw

<sup>14</sup> Dept. of information Management, Dayeh University. MBA.