

公開密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：040101b116

# 行政院農業委員會九十五年度科技計畫研究報告

資訊庫編號：952644

計畫名稱：**考慮農業用水之中小型蓄水設施多目標經營評估**  
(第1年/全程1年)

(英文名稱) **Study on multi-purpose management of storage facilities considering agriculture demand**

計畫編號：95農科-4.1.1-利-b1(16)

全程計畫期間：95年5月1日至95年12月31日

本年計畫期間：95年5月1日至95年12月31日

計畫主持人：張良正

執行機關：國立交通大學

# 考慮農業用水之中小型蓄水設施多目標經營評估

## Study on multi-purpose management of storage facilities considering agriculture demand

計畫編號：95 農科-4.1.1-利-b1(16)

執行單位：交通大學土木工程學系

主持人：張良正 教授

### 中文摘要

過去台灣以農業為主，為灌溉方便，部分地區設有中小型蓄水設施(滯洪池或埤塘)以利蓄水並提供部分農業用水。但隨著加入 WTO 後，農業用水形態已有不同，若能善加利用這些蓄水設施，並以多目標經營的方式進行適度的改善，不但可涵養水源，亦可就近支援農業及其他用水，甚至可以提供小區域滯洪及更豐富的生態環境，以及作為當地民眾休閒遊憩之用。

有鑑於此，本計畫提出目的在針對中小型蓄水設施進行水源、生態與滯洪等具多功能之多目標經營規劃探討。為充分模擬各標的間互動影響，本計畫將以系統動態學來進行系統模擬，並對各標的定義適切的量化評估指標，作為評估操作方式對各標的影響程度的依據。

### 英文摘要

Traditionally, agriculture areas without large centralized irrigation system may use farm ponds for irrigation in Taiwan. The ponds are used to storage and supply the water to fulfill the agriculture demand. However, after joining the WTO, the impact on agriculture will affects the agriculture demand. Therefore, to increase the efficiency and value of the farm ponds, it should change from the irrigation use only to a multi-purpose facility. The ponds can be used for water supply, flood detention and enhancing the ecological environment. By properly planning and management, the ponds can also be a recreation facility for local residents.

Accordingly, this project is to study the planning practice of multi-purpose management on the farm ponds. Although a ponds posses multiple functions seems attractive, the competition of the pond resources required by the different functions increases the complexity

of the system planning. Therefore, in order to analyze the tradeoff among the functions, this study applies the system dynamic to simulate the dynamic response of the pond system. The assessment indexes are defined to quantitatively indicate the achievement of the system operation on different functions. Basing on the indexes, numerical studies are performed using the dynamic model.

## 一、前言

過去部分的地區為了灌溉方便，設有中小型蓄水設施(如滯洪池及埤塘)，隨著加入 WTO 後，農業用水形態已有不同，若能透過多目標經營的方式善加利用這些蓄水設施，將可就近支援農業及其他用水，亦可提供小區域滯洪及更豐富的生態環境。

另一方面，近來國人逐漸意識到生態環境的重要性，使整個環境及生活品質提高，因此對於環境生態的維護逐漸重視，如生態工法及各種「綠色」措施的推動及宣導等。台灣原本是一個生態多樣及生物豐富的島嶼，但由於過去的快速開發，且均以人類利益為出發點，在擴展人類生存空間之餘，亦使得原有生態大幅縮減。然而，在兼顧生態環境的同時，社會發展的需求仍需適度滿足，因此，如何多方兼顧達到雙贏，乃是值得深思的課題。

有鑑於此，本計畫目的在完成兼具水源運用、生態景觀與滯洪功能的中小型蓄水設施之整體系統規劃構想，並藉由一模擬設計案例展示其功能與效益。此中小型蓄水設施可為新型態水資源永續經營的一環，以平原區的埤塘為例，其水源可為當地地表逕流，或是外來人工渠道引入，視其在水源運用及生態維護之需求而定，若經適當設計，其將可維持合適的水量和水質環境，來提供生態與景觀維護的需求，而提昇當地的生態及景觀的品質，若能適當地推廣，則對整個區域的生態品質應能有實質的提昇。亦可設計具有暫時儲留兩天之地表逕流，而達到降低區域排水量之滯洪效果。

## 二、文獻回顧

### 1. 生態標的

倘若中小型蓄水設施主要扮演提供生態景觀適宜性環境，其水質為其環境中最重要因子之一，而影響水體水質通常來自人類活動的結果，其中產生最嚴重的問題便是優養化問題。對生態景觀標的而言，水質問題導致生態環境破壞進而影響湖泊生存的主要成因經常來自水體發生優養化現象，而其壓力來源便是氮、磷的量而引起。一般而言，內陸水體的光線、二氧化碳是非常豐富的，當下雨過後或者有廢污水排入時，氮、磷的

含量便會增高，而在藻類的生長過程中，氮通常很容易進入到土壤當中，並經由土壤及地下水進入到水體當中，相反的，磷會殘留於土壤當中，然後慢慢釋放，因此，在自然狀態下磷才是藻類生長的決定性因素，在水資源經營管理計畫對於營養鹽的管理中，認為磷才是控制藻類生長的決定性因素（李麗雪等，2002）。此外，在「中國湖泊富營養化」（1990）一書中曾經對中國 25 個湖泊、水庫調查優養化程度，調查發現在沒有污水處理系統情況下，大量廢水排入了這些內陸水體之中，導致城市型湖泊比鄉村型湖泊優養化更為嚴重，由此可知，人類行為（畜牧、農業、民生用水排放等）亦是間接影響水質的原因。

## 2. 水源運用標的

簡傳彬(2006)以桃園大圳第八支線為研究案例，分析水庫、埤塘與攔河堰水資源聯合運用之效益，結果顯示灌區之水庫供水量約 2524.8 萬立方公尺，較原計畫大圳供水量 2855.4 萬立方公尺，水庫可減少供水量 330.6 萬立方公尺。謝勝彥(2004)研究目的在於進行桃園農田水利會埤塘改善，以提升供水能力之探討。根據調查桃園農田水利會目前共有埤塘 285 口，有效蓄水量為 4,653 萬立方公尺，可進行蓄水及調配水量，以補充灌溉水量之不足，因此如能充份運用桃園農田水利會灌區之埤塘進行蓄水調配，將有助於該地區之水資源運用。其研究根據各溪流之旬流量扣除已有之水權量，並考量渠道容量及可列入之水量條件下，計算各溪流剩餘可開發水量；其次以埤塘之入流量進行模擬演算，當原埤塘集水或攔河堰供水已足供埤塘所需之水量時，可由原埤塘集水或攔河堰水源進行供水；當不足時，水庫再放水以供應不足之水量。藉由文獻發現透過埤塘改善方案將可增加埤塘之供水能力，減緩桃園地區供水之壓力，以因應該地區經濟產業繁榮發展及日益迫切的用水等問題。

## 3. 滯洪標的

林文欽(2004)指出利用既有建築物之公有開放空間，如社區公園綠地、停車場、地下室等等，配合實際需求規劃設置雨水貯留的設施；然後選擇合適的地點，再配合集水區的流域路徑做為貯留的系統，並利用雨水截流的方式把雨水貯留下來；當逕流量超過渠道設計流量，則引水排入貯留設施，等逕流量小於渠道設計流量時，再將貯留設施之水排到渠道。亦提到加拿大渥太華市 Lebreton 公園特別設置雨水滯留池以調節暴雨時的都市排水。此雨水滯留池設計貯水量為 76000 公升，雨水由周圍的住家屋頂及公園內引水貯存。此水池可將貯水慢慢排放到都市雨水道系統，貯存水延遲在兩三天內釋放完畢，以降低都市洪峰，而水池在冬天可變成結冰而提供滑冰運動，在夏天則變成戲水池，

為一個多功能的水池。本計畫提出利用中小型蓄水設施雨水貯集之構想，以中小型蓄水設施分散部份洪水體積，藉此使得洪峰消減與延後。

### 三、研究方法

#### 1. 各標的之資料收集

蒐集目前國內外對於水資源和生態永續經營之相關資料，以及中小型蓄水設施之各標的相關資料及其他相關研究報告，如生態景觀、水源運用及滯洪等標的，供後續分析之用。

#### 2. 各標的之關係探討

在此步驟中，將先就生態、水源運用及滯洪之不同標的，就在操作上及時空上的互動或互斥關係，探討不同時期之為達成各標的所需之系統功能。

#### 3. 各標的量化模式之建立

為了驗證上一步驟所建立之整體系統規劃設計原則，在此步驟中，將依次建立針對生態、水源運用及滯洪之量化分析技術。經由量化分析技術之建立，可作為中小型蓄水設施對於不同標的貢獻之量化評估工具。

#### 4. 模擬案例規劃及建立

先依由初步建立之整體系統規劃設計原則初步建立假想案例，透過情境模擬，來量化評估此所建立案例各標的。

#### 5. 案例分析

選用系統動力學可將不同的標的做一連結，觀察之中不同的操作改變時各標的所造成的回應。當不同的操作模式使得考量標的之一超過了系統負荷時，便必須調整操作策略，直到所考量的標的所對應的評估指標值都落於容許範圍內。

### 四、執行情形

#### 一、分析埤塘之多標的經營管理：

一般而言，當未引進任何如河川等其他水源時，內陸水體的主要依賴水源量便是降雨，台灣係屬豐枯時期顯著的氣候型態，且一年之中會有數個颱風來襲，此為內陸水體操作時不可忽略的問題，因此本文將分別說明中小型蓄水設施於水源運用、滯洪與生態景觀為主要標的時，依據豐枯時期區分為平常時期、乾旱時期與洪水時期，中小型蓄水設施為因應其基本需求所反應之操作方式及強調之功能，圖 1 表示在不同時期之下，為

達成多功能各標的需求之系統功能。

(1) 平常時期：

由於本研究中所考量的中小型蓄水設施標的為水源運用、滯洪及生態景觀，因此在平常時期，中小型蓄水設施便可提供水源運用及維持生態景觀環境兩者之功能，在水源運用中，除了經常性水源供應之外，尚可透過入滲單元對地下含水層進行補注，以供乾旱時期使用。

(2) 乾旱時期：

在乾旱時期，水體仍需負有維持基本生態景觀環境之功能，而在水源運用上則可依據平日供水對象及週邊水源支援狀況採取減供或不供的策略來因應。除此以外，倘若在乾旱時期，水體內水位可能因蒸發散等因素低於地下水位，則地下水將由湖底或周圍滲入湖中，產生集水效應，進行供水。整體而言，當乾旱時期長且面臨緊急狀況時，均可以抽取地下水，以解決短期因為乾旱所造成的缺水問題。

(3) 洪水時期：

由於目前土地利用已開發面積越來越多，都市或工業區等鋪面多數已由水泥、瀝青等不透水材料所組成，阻絕了雨水滲透的機會，使得雨水透過地表直接逕流排出。本計畫所提及之中小型蓄水設施除了可以將雨水入滲到地下含水層外，尚可將部份雨水貯存，以減少尖峰逕流量，降低區域排水系統之負擔減少，便可以達到降低洪峰流量之滯洪效果，此亦為滯洪的意義。然而，倘若為了增加滯洪功能，則可以增加可蓄水體積，最直接的作法便是增加中小型蓄水設施之容積或降低滯洪操作時所空出空間以增加滯洪體積，儘管降低中小型蓄水設施的水位將會影響供水，但是若該開發區並無足夠之滯洪能力時，中小型蓄水設施便必須在保護人民生命安全為前提的考量下，以滯洪標的為主要考慮因素，雖然暴雨往往會對於中小型蓄水設施之生態景觀環境造成破壞，而此時對於中小型蓄水設施之水生植物或景觀植栽應選擇當地物種，以利生態景觀環境之容易復原。

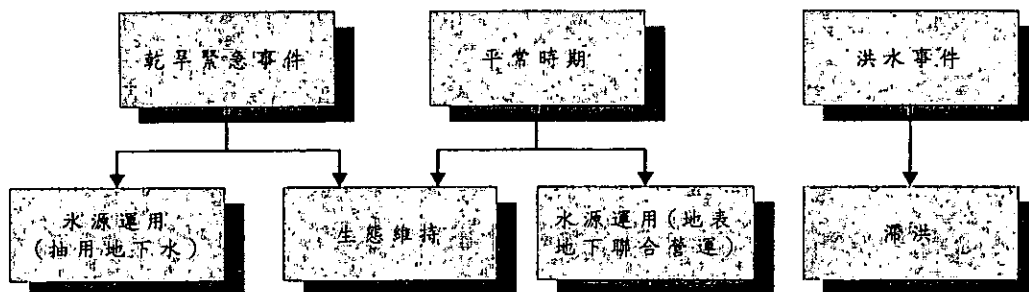


圖 1 不同時期之中小型蓄水設施功能示意圖

## 二、背景描述

本計畫選用桃園大圳第二支線第七號池作為規劃設計之概念為主之模擬案例，並將整個模擬案例的基本條件假設如下：

- (一)面積為 6.65 公頃，最大深度為 1.5 公尺。
- (二)集水區面積為 100 公頃。
- (三)模擬期程為 2004 年。
- (四)雨量資料採用距離桃園大圳最近之雨量站。
- (五)假設多功能埤塘開始操作之起始蓄水量為 50000 立方公尺，大約等於水深 1 公尺。
- (六)忽略蒸發散等損失。

當埤塘同時考量水源運用、滯洪、及生態景觀標的時，所共同的組成單元為引排水單元、地表蓄水單元及入滲單元；倘若將滯洪標的考慮為因暴雨引起之特殊情況所引發，則同時考量生態景觀與水源運用標的時，所共同需要之單元為引排水單元、地表蓄水單元、入滲單元、輔助水源單元及水質處理單元，對於本案例來說，所需要之引排水單元可以為引水渠道、湖體滿水位時或因應暴雨來臨前所需要之排水設施，對於本模擬案例中之水質處理單元，則因所引入之水源以降雨之逕流量為主，且供水目標為非民生用水，因此對水質的要求不需太嚴苛，故假設於地表蓄水單元前端設置一溼地，主要功能用以吸附部分磷，以降低排入湖體之磷體積，而減緩湖體優養化之速度。而入滲單元則可以是砂樁或其他高滲透之地工材料，以提供多餘之水入滲至地下水層，輔助水源單元則主要為因應湖體內水量不足以維護基本生態景觀水量時，所需要使用之抽取地下水設備。

## 三、水源運用標的之量化分析

本研究將評估該埤塘之供水效益，建立多功能埤塘規線的準則，因此本研究規線的建立除了考量水源運用之外，亦兼顧生態景觀之目標，使得該埤塘有不同操作方式：

- (1)當水深高於景觀水深時，則採取完全供水，此時，透過入滲單元則可以涵養地下水層。
- (2)為使水深能滿足在景觀上的舒適度，當水深降至景觀維持水深與生態維持水深之間時，則採取減量供水。
- (3)為維護基本生態需求，當水深降低至生態景觀水深以下（乾旱時期），便啟動輔助水源單元抽取地下水來補充。至於洪水時期則於滯洪標的時再討論。除此以外，當連續降雨發生時，埤塘湖體可能會達到滿水位，故而於接近湖面處設置一排水單元；而本模擬

案例中另設置有一溼地為多功能埤塘前端水質處理單元，在此，假設流經溼地的水量最後都會經由引水單元進入湖體，故忽略溼地內所蓄積的水量。

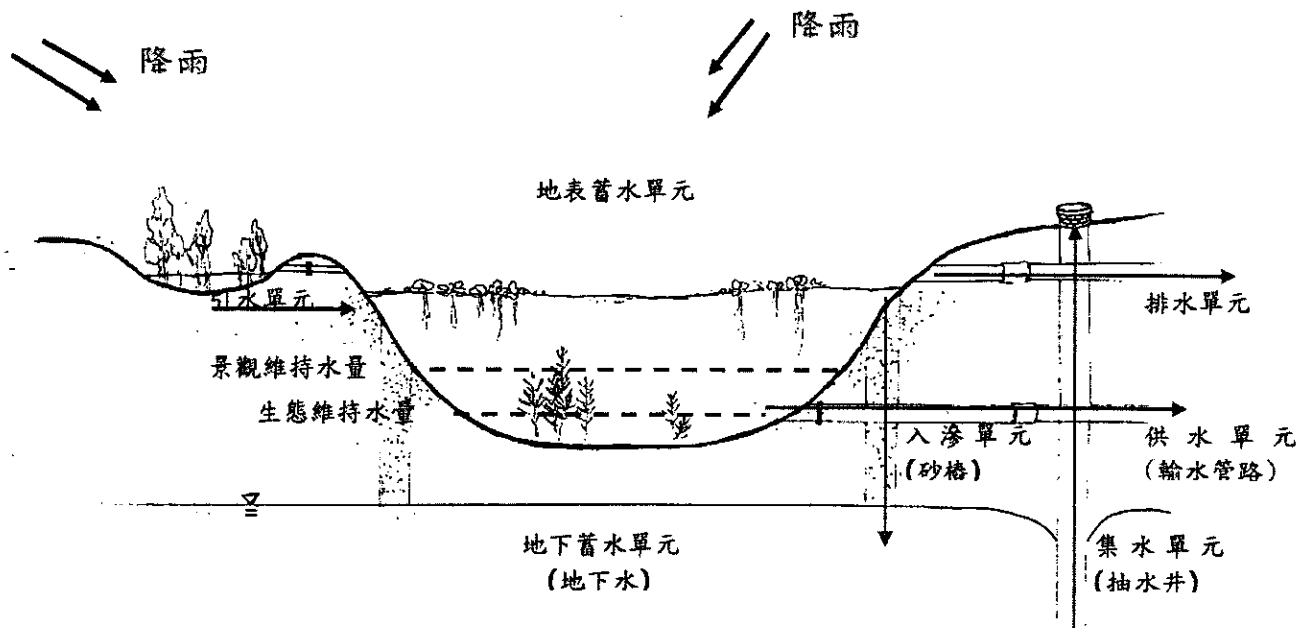


圖 2 水源運用系統描述圖

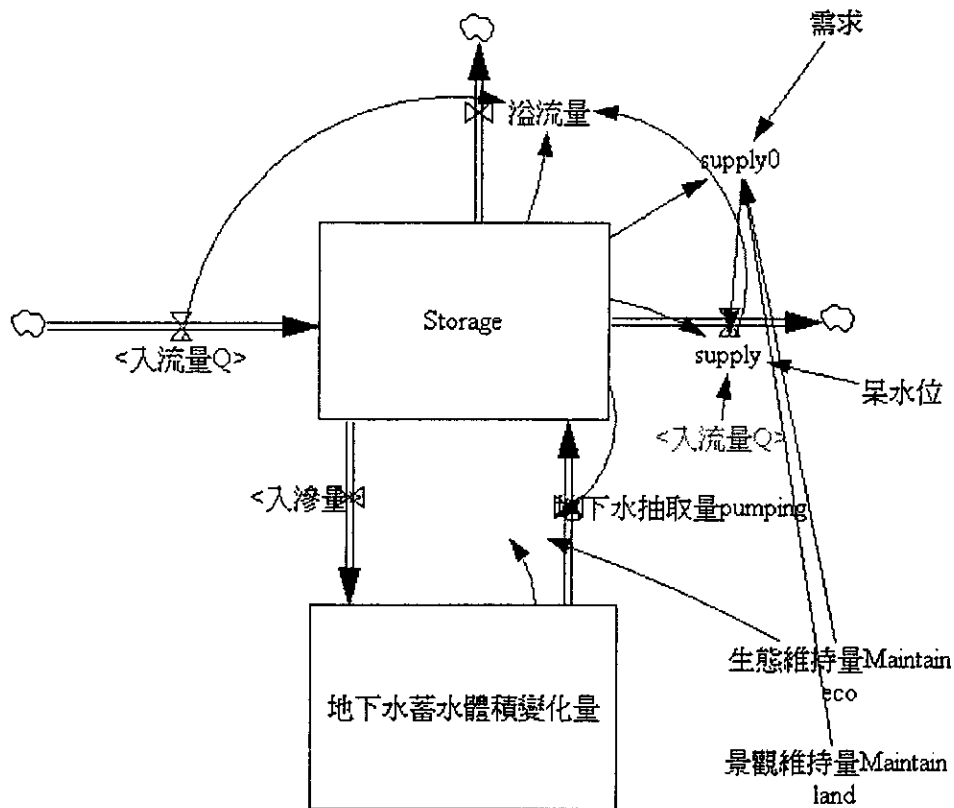


圖 3 水源運用標的之動力模型建置



依據系統描述，將本模擬案例的水源運用標的之動力模型建置如圖 3，而在進行模擬時所需要使用的參數及條件則描述如後。

(1)入流量推估：

由於本案例假設埤塘之主要水源為地表逕流，集水區內之水循環係從降雨開始，當雨水降至地面之後，部份降雨經由入滲至未飽和含水層中；而另一部份則形成地表逕流，並直接流入地表蓄水單元。

本案例採用美國水土保持局(U.S Soil Conservation)開發之 SCS 曲線號碼法估算降雨損失，在此方法的使用上，美國水土保持局已利用多次降雨與超滲降雨紀錄，繪製為累積超滲降雨量與累積降雨量之相關曲線圖，其計算公式如下：

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

其中，Pe 為累積超滲降雨量(mm)，P 是累積降雨量(mm)，S 代表了包括初期扣除量之最大滯流量，由土壤種類、地表覆蓋、耕作方式、土地利用與臨前降雨等條件可以找出適合之曲線號碼如表 1，進而求得 CN、SCS 曲線號碼。

表 1 不同土壤種類、地表覆蓋、耕作方式與土地利用之 SCS 曲線號碼

土地利用情形	土壤分類			
	A	B	C	D
耕地 <sup>1</sup> ：無保護措施	72	81	88	91
有保護措施（如等高耕及台地）	62	78	78	81
牧草地及放牧地：不良情況	68	79	86	89
良好情況	39	61	74	80
草地：良好情況	30	58	71	78
森林：稀疏、少護蓋、無護蓋物	45	66	77	83
良好護蓋 <sup>2</sup>	25	55	70	77
空地、林間空地、公園、高爾夫球場、墓地等：				
良好情況：草地護蓋超過 75% 之面積	39	61	74	80
稍好情況：草地護蓋 50~75% 之面積	49	69	79	84
商業區：(85% 面積不透水)	89	92	94	95
工業區：(72% 面積不透水)	81	88	91	93

表 1 不同土壤種類、地表覆蓋、耕作方式與土地利用之 SCS 曲線號碼 (續)

住宅 <sup>註3</sup> ：					
平均每塊建地大小	平均不透水面積% <sup>註4</sup>				
≤1/8 英畝 (506m <sup>2</sup> )	65%	77	85	90	92
1/4 英畝	38%	61	75	83	87
1/3 英畝	30%	57	72	81	86
1/2 英畝	25%	54	70	80	85
1 英畝	20%	51	68	79	84
鋪石 (混凝土或柏油) 停車場、屋頂、道路等 <sup>註5</sup>		98	98	98	98
街道：					
鋪石 (混凝土或柏油) 道路及雨水下水道 <sup>註5</sup>		98	98	98	98
碎石道路		76	85	89	91
泥土道路		72	82	87	89

註：1.更詳細耕地土地利用之曲線號碼，請參考美國水土保持局之資料。

2.良好護蓋係以牧草、雜物及灌木護蓋土壤。

3.曲線號碼之計算係假設逕流從房子及車道直接流向街道，僅少部分屋頂雨水直接流向草地增加入滲。

4.保持透水面積 (草地) 之曲線號碼視為良好牧草

5.在某些熱帶氣候地區曲線號碼可採用 95。

6.上述土壤分類情形如下表：

土壤分類	最小入滲率 (mm/hr)	土壤質的
A	7.6~11.4	深層砂土、深層黃土、集合沉泥。
B	3.8~7.6	淺層黃土、砂質壤土。
C	1.3~3.8	黏質壤土、淺層砂壤土、低有機含量壤土、高黏土含量壤土。
D	0~1.3	潮濕時膨脹之土壤、高塑性黏土、鹼土。

7.土壤臨前水分情況分類表

情況	說明	5 天前之降雨量	
		冬眠季節	生長季節
I	集水區土壤乾燥，但未乾到凋萎點。	13mm 以下	36mm 以下
II	每年一般情況之洪水。	13mm~28mm	36mm~53mm
III	在前五天下過大雨或在低溫時下過小雨	超過 28mm	超過 53mm

## (2) 埤塘蓄水量推估

在本案例中，埤塘在某時刻之蓄水量可以表示如下：

埤塘蓄水量 = 入流量 + 地下水抽取量 - 入滲量 - 供水量 - 溢流量，其中，埤塘蓄水量為時間 t 時刻之埤塘蓄水量，入流量、地下水抽取量、入滲量、供水量及溢流量皆為時間 t-1 時刻。

## (3) 地下水蓄水變化量推估

在本案例中，在某時刻之地下水蓄水變化量可以表示為該時刻之 (入滲量 - 地下水抽取量)，當埤塘水深高於景觀維持水深，則埤塘內的水將藉由所佈置之入滲單元砂樁入滲至地下含水層以達到補充地下水的目的；若埤塘蓄水量低於生態維持量時，則抽取

地下水來補充埤塘水深，使能達到生態維持水深，此外，為能達到涵養地下含水層目的，本案例之設計原則為在模擬期距內，地下水抽取量不得大於入滲量。

#### (4)操作原則

通常水庫規線之形式有上限，下限及嚴重下限三條，當蓄水量位於上限以下，代表水庫水量正常，此時依照原本需求量放水，當蓄水量位於下限以下與嚴重下限之上，代表水庫水量出現警訊，此時依照原本需求量打折放水，當蓄水量位於嚴重下限之下，代表水庫水量不足供應，此時無法放水。

仿照水庫規線，其埤塘之水源運用操作原則如下所列：

- a、埤塘水深高於上限 (即為埤塘最大蓄水量之水深 1.5 公尺)：當埤塘水深高於上限水深，高於上限水深的水將會從溢流口流出。
- b、埤塘水深介於上限水深與景觀維持水深(下限)之間：此時表示湖體內水量充足，因此工業區內非民生用水則設定為完全供水，本案例假設每日需水量為 3000 立方公尺。此外，埤塘內的水將藉由高透水材質並配合砂樁入滲至地下含水層以達到補充地下水的目的。
- c、埤塘水深介於景觀維持水深(下限)與生態維持水深(嚴重下限)之間：當埤塘水深介於景觀維持水深與生態維持水深之間時，則設定工業區非民生用水以計畫需水量 80% (2400 立方公尺) 供給。
- d、埤塘水深低於生態維持水深：此時表示湖體內水量僅能提供生態基本維持水量所需，因此將停止供應。

(5)對於本模擬案例來說，整個埤塘系統的水源僅依賴逕流量，並無引入其他水源，對於系統動力學而言，只要能釐清欲處理問題和變數間的訊息傳遞架構，藉由系統動力學模擬套件便可將這些元件於適當的地方加入便可，而不需再將其他部分重新建立。此外，本模擬案例亦忽略湖體平日的蒸發散量損失，同理，當瞭解損失速率後在本系統內加入元件並給定計算公式便可。

4、系統動力模式變數及函數說明：系統動力模式內所建置之各項變數及函數說明如表2所示。

表 2 水源運用系統動力模式變數及函數說明表

名稱	變數性質	意義	函數	單位
CN	Variable	Curve number, CN	其值因土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分而不同, 詳見 Tung and Haith (1995)。(本案例中為定值 88)	
S	Variable	簡化用轉換函數	$(25400/CN)-254$	Mm
P	Variable	累積降雨量	GET XLS DATA('雨量資料.xls', '2001 日雨量', 'B', 'D1')	Mm
Pe	Variable	累積超滲降雨量	IF THEN ELSE(累積降雨量 $P > (0.2 \times$ 轉換函數 $S)$ , ((累積降雨量 $P - 0.2 \times$ 轉換函數 $S)^2 / ($ 累積降雨量 $P + 0.8 \times$ 轉換函數 $S)$ , 0)	Mm
超滲降雨量	Variable	超滲降雨量	累積超滲降雨量 Pe-上一時刻的累積超滲降雨量	Mm
Q	Rate	入流量	$($ 超滲降雨量 $Pe / 1000) \times$ 集水區面積 Area	$m^3/day$
埤塘面積	Variable	埤塘面積	66,500	$m^2$
埤塘水深	Variable	埤塘水深	埤塘蓄水量 Storage/埤塘面積	M
Area	Variable	集水區土地面積	800,000	$m^2$
生態水深	Variable	生態水深	0.3	M
Maintain eco	Variable	生態維持量	埤塘面積 $\times$ 生態水深	$m^3$
景觀水深	Variable	景觀水深	1	M
Maintain land	Variable	景觀維持量	埤塘面積 $\times$ 景觀水深	$m^3$
Storage	Level	埤塘蓄水量	入流量 $Q +$ 地下水抽取量 $pumping -$ 入滲量 $-$ 供水量 $supply$	$m^3$
Supply	Rate	實際供水量	$Min($ 入流量 $Q + storage, Supply0)$	$m^3/day$
Supply0	Variable	供水量	IF THEN ELSE(埤塘蓄水量 $Storage >$ 景觀維持量 $Maintain\ land, demand, IF THEN ELSE($ 埤塘蓄水量 $Storage >$ 生態維持量 $Maintain\ eco, demand * 0.8, 0)$	$m^3/day$

表 2 水源運用系統動力模式變數及函數說明表 (續)

名稱	變數性質	意義	函數	單位
入滲量	Rate	入滲量	IF THEN ELSE(埤塘蓄水量 Storage > 景觀維持量 Maintain land, 入滲面積 × 入滲率, 0)	m <sup>3</sup> /day
入滲率	Variable	入滲率	0.15	m/day
入滲面積	Variable	入滲面積	2000	m <sup>2</sup>
Pumping	Rate	地下水抽水量	IF THEN ELSE(地下水蓄水體積變化量 > 0, IF THEN ELSE(埤塘蓄水量 Storage < 生態維持量 Maintain eco, 15000 - 埤塘蓄水量 Storage, 0), 0)	m <sup>3</sup> /day
地下水蓄水體積變化量	Level	地下水蓄水體積變化量	入滲量 - 地下水抽取量 pumping	m <sup>3</sup>
埤塘最大蓄水量	Level	埤塘最大蓄水量	100000	m <sup>3</sup>
溢流量	Rate	溢流量	IF THEN ELSE(入流量 Q + 埤塘蓄水量 Storage - 供水量 supply > 埤塘最大蓄水量, 入流量 Q + 埤塘蓄水量 Storage - 供水量 supply - 埤塘最大蓄水量, 0)	m <sup>3</sup> /day

5、模擬案例分析與說明：

由上述所描述之系統模型、各項假設條件及採用公式，以系統動力學工具 Vensim 模擬後之水源運用標的結果分述如後。

(1)入流量，如圖 4 所示。

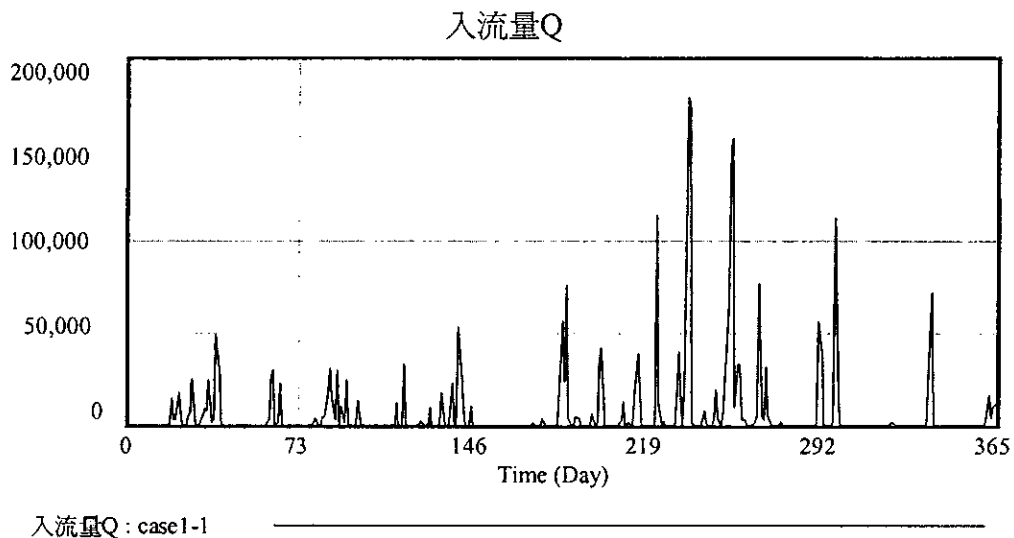


圖 4 入流量模擬結果圖

(2) 埤塘系統若採用規線操作是否可以滿足生態及水源運用之標的，為了評估規線對系統之影響及水源運用之情況，設計四種不同規線包含規線型態 1: 單一規線: 上限: 1.5 公尺，當水位於上限以下，每日需水量為 3000 立方公尺。

規線型態 2: 兩條規線: 上限: 1.5 公尺，生態維持水位: 0.3 公尺，當水位於生態維持水位以上，每日需水量為 3000 立方公尺，生態維持水位以下不供水。

規線型態 3: 兩條規線，但是生態維持水位過高: 上限: 1.5 公尺，生態維持水位: 1 公尺，供水原則與型態 2 相同。

規線型態 4: 多條規線(上限，下限及嚴重下限)之缺水情況，上限: 2 公尺，景觀維持水位: 1 公尺，生態維持水位: 0.3 公尺，當水位位於上限與景觀維持水位之間，每日需水量為 3000 立方公尺，景觀維持水位與生態維持水位之間，每日需水量為 2400 立方公尺，生態維持水位以下不供水。已知台灣地區平均年雨量約為 2600mm，因此以 1999 年降雨型態為平水年之降雨型態，並假設枯水年雨量強度為平水年的 0.6 倍，並以系統動力學模擬各規線型態操作於平水年與枯水年之埤塘年缺水量及供需比例(年供水量與年需求量之比)，如表 3 所示。

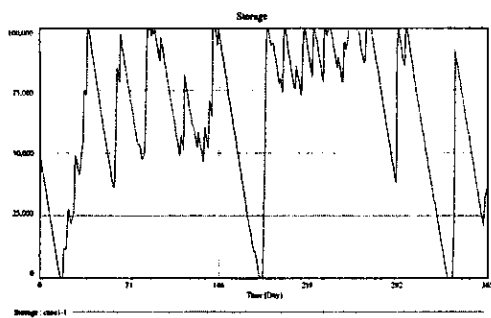
表 3 各規線型態操作的年缺水量

		規線型態 1	規線型態 2	規線型態 3	規線型態 4
平水年	年缺水量	27,165	90,000	363,000	166,000
	供需比例	0.97	0.92	0.66	0.85
乾旱年	年缺水量	154,473	198,000	423,000	213,000
	供需比例	0.85	0.81	0.60	0.80

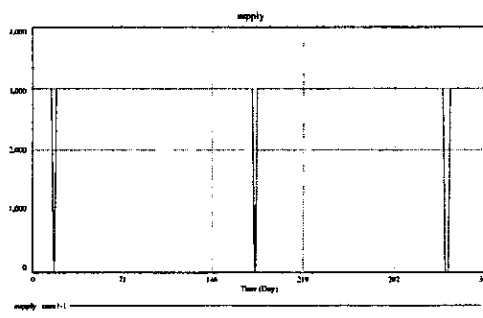
由圖 5(a)顯示各規線型態之平水年逐日蓄水量及供水量變化情況，圖 5(b)顯示枯水年之蓄水量及供水量模擬結果，可得知該埤塘只針對水源運用的標的，單一規線操作(規線型態 1)之缺水量小於多條規線操作下，設訂多條規線將導致增加短暫缺水的風險，所以發生缺水情形較為嚴重，但是若要同時考量水源運用及生態標的，則需要採用多規線操作，系統加入生態維持水位之規線，其蓄水體積明顯維持一定的高度，將可提供生態一個棲息的空間，有助於埤塘週遭生態環境。

對於小型的蓄水設施而言，採用加入生態維持水位之規線操作已經足夠，但是由結果可發現生態維持水位高度之選定相當重要，比較規線操作型態 2 與 3，規線操作型態 3 生態維持水位過高，導致缺水量增加，所以訂定合適的生態維持水位將可降低累積缺

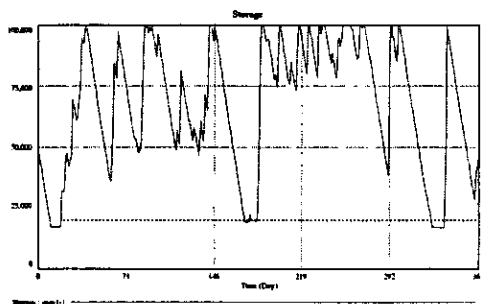
水量。規線操作型態 4 規線除了生態維持水位之外，又增加了景觀維持水位，對缺水量雖然略微增加，但卻有助於供水之穩定性，以減少完全無法供水之天數。



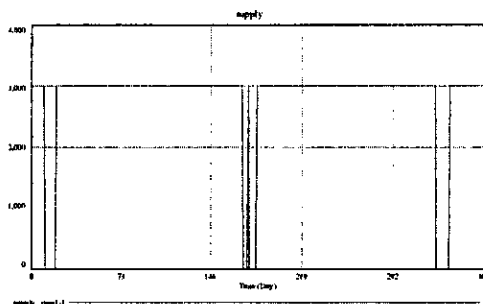
操作型態 1-蓄水量



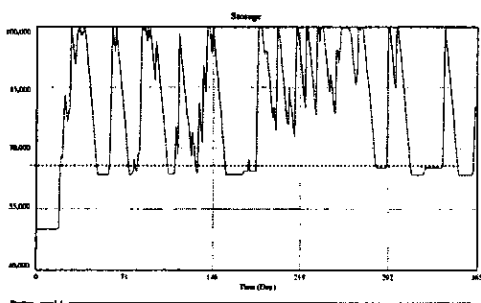
-供水量



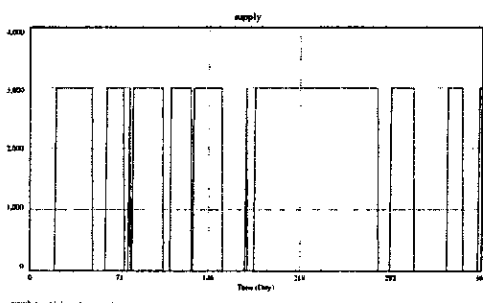
操作型態 2-蓄水量



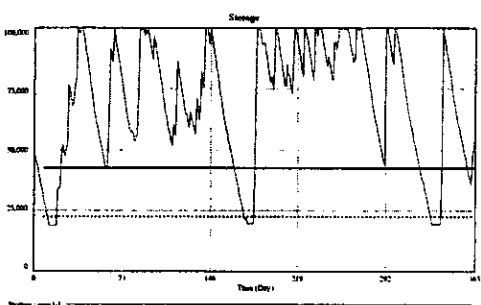
-供水量



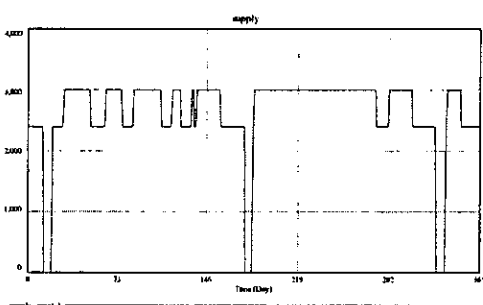
操作型態 3-蓄水量



-供水量

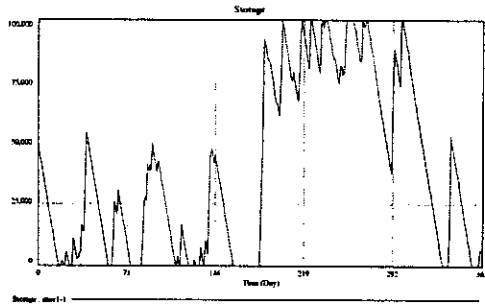


操作型態 4-蓄水量

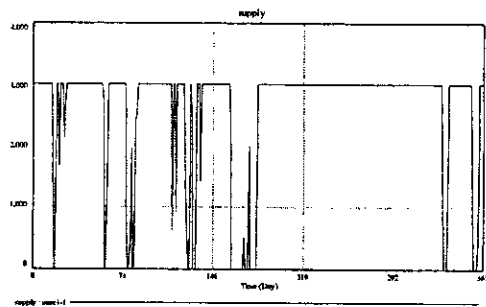


-供水量

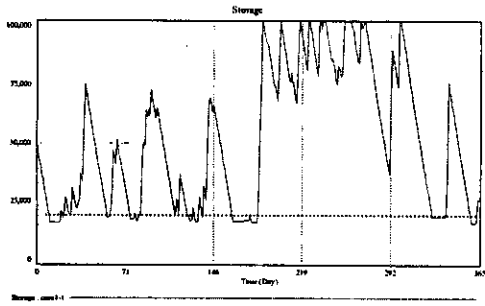
圖 5(a) 各規線型態蓄水量及供水量模擬結果圖 (平水年)



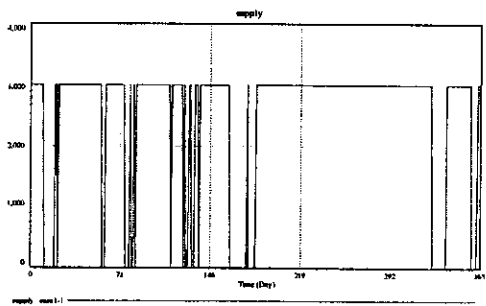
操作型態 1-蓄水量



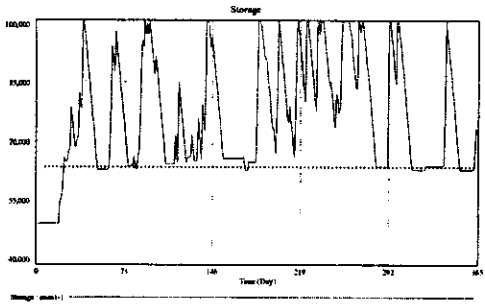
-供水量



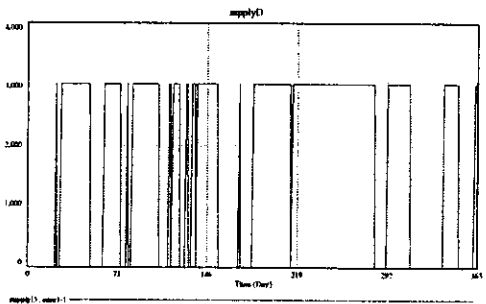
操作型態 2-蓄水量



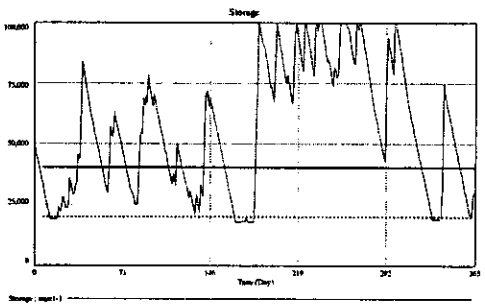
-供水量



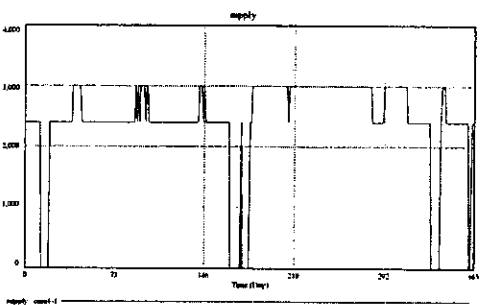
操作型態 3-蓄水量



-供水量



操作型態 4-蓄水量



-供水量

圖 5(b) 各規線型態蓄水量及供水量模擬結果 (枯水年)

(3)每日之供水量操作原則中所述，當埤塘水深低於景觀維持水深時，供水量便減量供給（80%需水量），當逐日降至生態維持水量以下便不再供水，各種操作原則下之供水情況於上圖之右測，圖中之長條形便表示在這段日子中有供水，規線操作型態 3 生態維持水位過高，導致供水最不穩定，規線操作 1 及 2 供水穩定度程度相當，而規線操



作 4 最可以保持連續供水。

(4)對於本模擬案例來說，若採用規線操作方式在水源標的及生態標的上可以被接受的，若採用規線操作 4，根據模擬結果該埤塘每年約可提供 88 萬噸的水。

#### 四、滯洪標的之量化分析

##### 1、問題的定義：

在埤塘操作管理時，倘若面臨豪雨，便可擔負起該區域的滯洪池的功能，當埤塘轉而成為滯洪池時，其存在對於該區域而言便轉而成為防災的考量，所著重的事項便成為對該區域所能提供的滯洪效益為何？一般而言，滯洪池的意義在延遲洪峰到達時間及削減洪峰量，因此本節中便針對埤塘在該場暴雨發生的滯洪功能加以模擬並依循此原則，設計本模擬案例的系統模式。為了便利檢視模擬結果，僅選用全年中一場豪雨為模擬對象，並針對埤塘於豪雨來臨時對區域之滯洪功能進行探討。

##### 2、系統的描述：

如圖 6 所示，在本模擬案例中，滯洪可視為水源運用中的一個特殊狀況，因此在系統設計方面大致與水源標的相同，只要在氣象局發佈豪雨特報時轉換成滯洪操作規則，以及將模擬時之時間單位轉換。如果只考慮水源運用標的，蓄水設施則是要能將水蓄得越滿越好，所以排水系統位置接近湖面為佳；但如果考量滯洪標的，則蓄水設施所能滯洪的體積越大越好，且為了能夠在排洪時能將部份砂量排出，所以將排水設施放置於生態維持量的水深線上方，使得湖體的滯洪量維持在埤塘生態維持量與最大蓄水量(最大滯洪量)之間。物理系統所包含的單元則為進流渠道(引水單元)、雨水下水道或區域排水系統(排水單元)、埤塘(地表蓄水單元)、砂樁(入滲單元)。

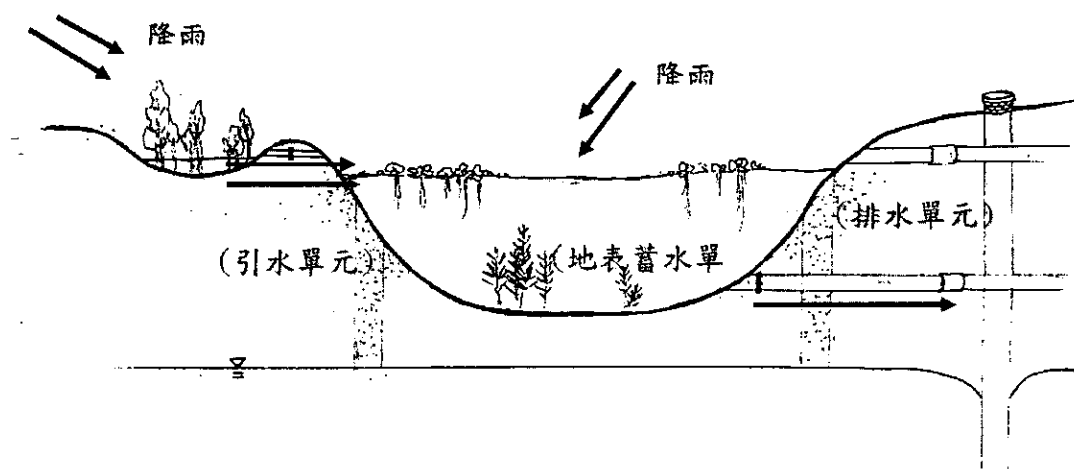


圖 6 滯洪運用系統描述圖

4、動力模型建置：

進一步將以上步驟建置滯洪標的之動力模型，如圖 7 所示。

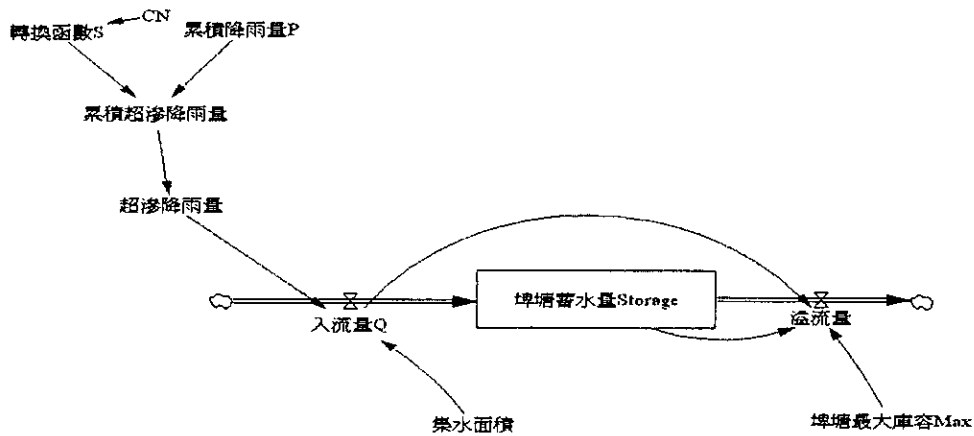


圖 7 滯洪運用系統動力模擬圖

關於圖中的各個主要步驟及估算方式，說明如後。

(1)入流量推估：

本模擬案例於滯洪標的中，所需推估之入流量仍採用美國水土保持局(U.S Soil Conservation)開發之 SCS 曲線號碼法估算，其推估公式和參考表格已列於水源運用標的中。然而在考慮暴雨時，通常由於暴雨時間相當短暫，因此採用小時為模擬時間單位，不再以日為觀察單位。

(2)操作原則：

暴雨時之埤塘蓄水量(即埤塘滯洪量)來源主要為暴雨來臨時所形成的地表逕流，在本案例中，其操作原則是在預知中央氣象局發佈豪雨特報前 24 小時，便將多功能埤塘之操作方式由平時的水源運用標的轉換為滯洪標的，同時進行排水以準備承接洪水。為仍顧及生態景觀基本需求，因此並未將埤塘蓄水量排空，而是將埤塘水深降至生態維持水深，僅以埤塘最大蓄水量與生態維持量的差值做為埤塘可以滯洪的最大體積量，在暴雨來臨時，經由引水單元進入埤塘至最大蓄水量，過程中並配合排水單元將滿水位後多餘水量排至都市雨水系統。此外，在入流量處設置一水閘門操作方式，以降雨量達 20mm 為閘門開啟依據(訂定規則於滯洪效益推估中說明)，當暴雨來臨時可以藉由水閘門的操作來調節滯洪。倘若某觀察時刻之埤塘蓄水量達到湖體最大蓄水量後，所直接溢流排出的流量，亦為該時刻之溢流量。

5、系統動力模式變數及函數說明：系統動力模式變數及函數說明如表 4 所示。

表 4 滯洪系統動力模式變數及函數說明表

名稱	變數性質	意義	函數	單位
CN	Variable	Curve number, CN	其值因土地利用、土壤質地或排水特性、及臨前土壤水分而不同，詳見 Tung and Haith(1995)。(本案例中為定值 88)	
S	Variable	簡化用轉換函數	(25400/CN)-254	Mm
Pe	Variable	累積超滲降雨量	IF THEN ELSE(累積超滲降雨量 P>(0.2×轉換函數 S), ((累積超滲降雨量 P-0.2×轉換函數 S)^2)/(累積超滲降雨量 P+0.8×轉換函數 S), 0)	mm
P	Variable	累積降雨量	GET XLS DATA('2001.xls', '暴雨雨量', 'B', 'D2')	m/hr
超滲降雨量	Variable	超滲降雨量	超滲降雨量 Pe/1000)×集水區面積 Area	m <sup>3</sup> /hr
Q	Rate	入流量 Q	IF THEN ELSE(超滲降雨量>20, (超滲降雨量/1000)×集水區面積 Area, 0)	m <sup>3</sup> /hr
Area	Variable	集水區土地面積	1000000	m <sup>2</sup>
Storage	Level	埤塘蓄水量	入流量 Q-溢流量 OUT, 初始值為 15000	m <sup>3</sup>
OUT	Rate	溢流量	IF THEN ELSE((入流量 Q+埤塘蓄水量 Storage)>=埤塘最大庫容 Max, 入流量 Q+埤塘蓄水量 Storage-埤塘最大庫容 Max, 0)蓄水量 Storage), 0)	m <sup>3</sup> /hr
Max	Variable	埤塘最大庫容 Max	100000	m <sup>3</sup>

6、模擬案例指標評估：

本模擬案例所選用之評估指標為滯洪效益，其公式如下：

$$\text{滯洪效益} = \frac{Q_p - Q_{pb}}{Q_p} \times 100\%$$

其中， $Q_p$  為未利用埤塘蓄洪之最大洪流量， $Q_{pb}$  表示

利用埤塘蓄洪之最大洪流量。倘若該區域內並無其他滯洪設施，而該區域開發程度已無法再承接多餘之洪水時，則必須重新檢討該區域所需要之滯洪量為多少。

7、模擬案例分析與說明：

雖然暴雨來臨時在前面幾個小時的降雨量可能不多，本案例假設暴雨來臨(即中央氣局發布豪雨特報)前一天為放水調節時間，因此延伸模擬時間為兩天，共計 48 小時。

(1)同樣需以入流量估算作為模擬的序曲，因為有水閘門操作，並訂定一門檻值 20mm 當作水閘門操作依據(訂定規則於滯洪效益推估中說明)。所以當雨量大於 20mm 時才打開水閘門讓水流入，在前 39 小時水閘門沒打開所以入流量一直為 0。而入流量激增而埤塘的蓄水量也迅速攀升至埤塘最大蓄水量。到了第 44-48 小時間由於埤塘已達滿水量無法再容納，此時的入流量便直接由排水設施溢流出去。

(2)滯洪效益推估：本模擬案例之滯洪效益如表 5 所示，若以降雨量 20mm 為門檻值，則滯洪效益為 23.95%，符合滯洪效益之容許範圍，因此，為了盡可能讓埤塘發揮作用，本設計模擬案例以降雨量達 20mm 作為閘門開啟依據，並作為此埤塘滯洪標的之操作規則。

表 5 不同門檻值之滯洪效益比較表

雨量門檻值(mm)	入流量(CMS)	溢流量(CMS)	效益%
0	14.61	14.61	0
20	14.61	11.11	23.95
40	14.61	0	100

(3)由於都市化快速變遷，造成不透水率之地面大幅成長，使得地表原有滲透能力下降，於雨季時，排洪設施常無法迅速消散洪流，因此埤塘的滯洪功能對於都市社區或開發區域而言相形重要。

#### 五、系統總體評估

在農業用水之中小型蓄水設施多目標經營評估上，希望能達到永續經營目標，本研究認為中小型蓄水設施的永續經營原則：除了希望能有多方面水涵養及滯洪的功能外，並期待能營造一個健康的水環境，蓄水設施內水的流動而有穩定的循環變化，長久維持水資源質與量，以及生態系統平衡與循環機制，使埤塘本身之生態景觀環境，與週遭自然環境相契合。由於都市開發迅速，造成原本自然水域環境及生態遭到破壞，導致某些水域生物數量大量減少以致瀕臨絕種。而都市通常只有陸域生態系存在，倘若在此種地區創造一健康的水域環境，藉以吸引水域生物及兩棲生物，讓原本只有陸域生物地區多增加了水域生物及兩棲生物的物種，在生態方面不但增加了生物的多樣性，對大自然而言也回復了一些自然景象。對於內陸水體來說，最主要影響因子乃是水質(營養鹽)，故水

質的控制乃是內陸水體最重要的課題，而湖泊最大的問題則是優養化現象，乃是由於水中的營養鹽含量過高，導致藻類大量繁殖、藻類生長太快而引起的問題，而湖泊中總磷（營養鹽）的濃度對於藻類生長有著決定性的關係，故控制優養化問題之主要管理因子為總磷的含量，並藉由降低總磷的含量來減緩藻類的生長，使其不產生優養化。

本案例以系統動力學來建置埤塘系統內水量與水質(總磷)之關係，其中，總磷的循環關係採用 Jørgensen(1994)所介紹的湖泊生態模式，該模式之建置概念敘述如下：湖泊中的藻類生長會受到磷的濃度(營養鹽)與光線的影響，隨著水中磷的濃度及光線增加，藻類生長速率也會隨之增加，等到藻類死亡後形成為碎屑，浮游植物和碎屑則會形成沉積物，在本研究中則不考慮沉積物。部分碎屑會因為存於水中而溶解出來形成溶解磷狀態。該湖泊生態模式以一組聯立微分方程式作描述，主要包括三種狀態變數，分別為浮游植物的濃度(*Phyt*)、碎屑磷濃度(*PDet*)、和溶解磷濃度(*PS*)。

本研究假設洪水為單一事件，不影響長期的系統穩定，所以只以生態景觀結合水源運用標的下，考量水源運用的操作採用規線型態 4，所考量之整體系統描述如圖 8 所示，圖 8 之箭頭方向（水質流動方向）可以瞭解，透過降雨在地表形成地表逕流，而地表在經過逕流的淋洗後，會將地表所蘊藏的營養鹽一併帶走，而這些帶著營養鹽的逕流將被引入溼地中，先透過溼地吸附逕流中的部分營養鹽濃度，然後再進埤塘系統，在一個健康的水環境下，可以有穩定的水循環流動，因此，溶解磷、浮游植物及碎屑磷會隨水流出而流出埤塘，當營養鹽進入埤塘中，經由生物食物鏈的增減關係進而影響湖泊內之營養鹽，如圖 8 所示。在本案例中，由於地表逕流先經過濕地處理後才進入埤塘，故假設進入埤塘的營養鹽只有溶解磷，因此，營養鹽進入埤塘後將會提高湖中溶解磷的濃度，部份溶解磷可以提供浮游植物生長所需之營養，浮游植物死亡後則會形成碎屑磷，且碎屑磷在水中則會溶解成溶解磷，而溶解磷、浮游植物和碎屑磷會因為湖水流流出而流出埤塘。

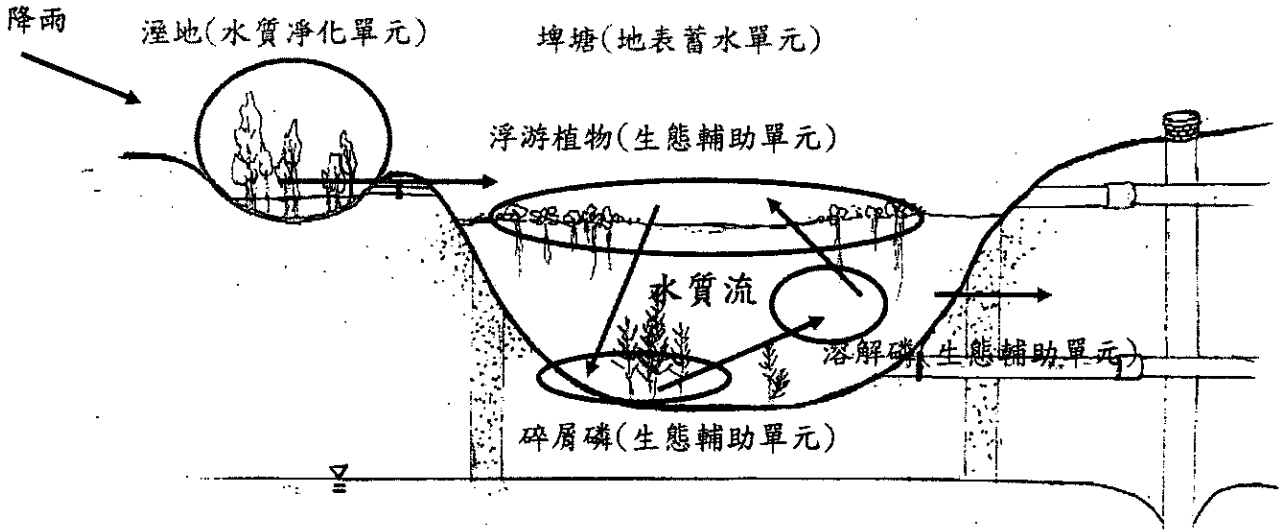


圖 8 生態水環境系統描述圖

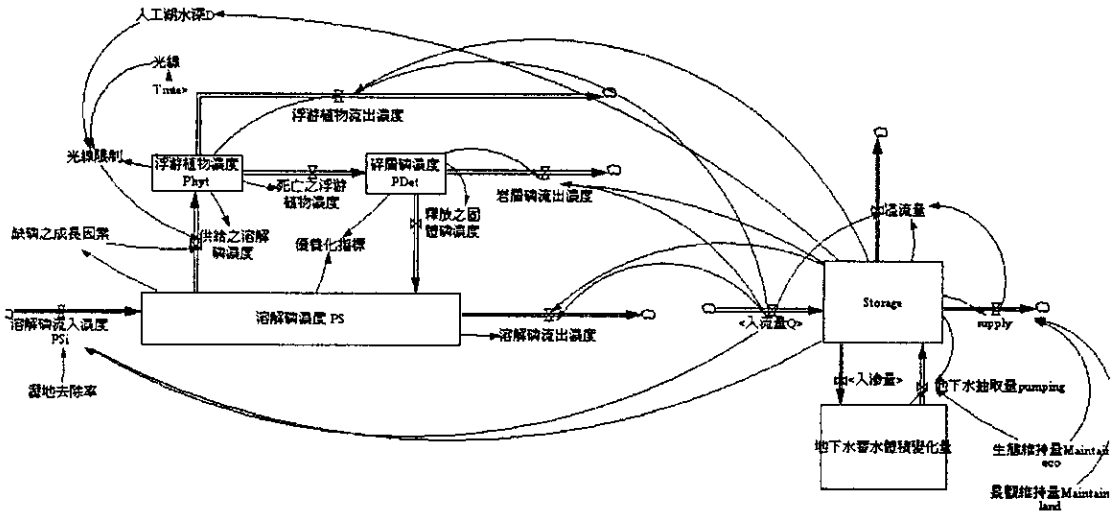


圖 9 生態水環境系統動力模擬圖

圖 9 動態系統針對某一變數輸入不同的參數值，會有不同的模擬結果再從模擬結果的改變情況找出最關鍵的參數，發現需求及溼地去除率等參數數值，特別具有敏感性，調整需求及溼地去除率等參數數的變化，便可反應到其他標的內任何受影響的變數，當需求增加，其缺水量亦隨之增加，因此本案例可選用  $3000\text{m}^3/\text{day}$  為初步設計值。透過分析發現去除率亦為關鍵的變數，經由情境模擬，發現將去除率訂定為 0.5，可減緩埤塘之優養情況。各標的在以上案例操作模擬下，得到的各個評估指標包括供需比例為 85% 以上、以及生態景觀指標則為全年總磷濃度都在  $40\mu\text{g}/\text{L}$  左右，情境模擬結果顯示本案例之系統滿足多個標的。

## 五、結論與建議

本研究經由系統分析，模擬中小型蓄水設施多目標經營的遠景，結果顯示本計畫所模擬的埤塘，均滿足各個標的，所以未來能提供綠建築評估指標以及社區整體營造使用，相信對於小區域之環境改善、水資源調配及防洪減災上，都能發揮較大的功能。

本研究針對中小型蓄水設施埤塘之水源運用操作原則上，發現利用傳統水庫規線操作方式於埤塘，及配合打折供水可滿足水源標的及生態標的，使得系統之供水將會更為穩定，水位維持於生態維持水位之上，對於生態環境將有莫大的助益。

本計畫並針對淺型水體常見的問題-優養化進行探討，以系統動態學同時考量多個狀態變數，包含溶解磷濃度、浮游植物濃度及碎屑磷濃度進行模擬，及分析水質的時間軸變化情況，研究結果發現模擬結果符合自然循環的結果，入流磷的濃度為系統中重要參數之一，但是仍簡化一些可變因素，舉例來說：溼地內的流速、植物及底泥的有機質雖然可以使流經溼地的水中總磷含量減少，然而不同的植物和底泥類型都會有不同的效果，需要經常監測及處理，此外，埤塘中自然形成的生態系及化學物質轉換的過程也會因水生動植物的物種不同而不同，因此在生態景觀標的方面，應較其他標的更重視營運後監測計畫的擬定，才能清楚所建立的生態系是否能趨近一健康的平衡狀態。

## 參考文獻

1. 行政院環境保護署，『流域自然生態環境資源量化基準調查規劃評估-生態環境影響評估空間指標系統之建立計畫（以桃園台地埤塘為例）』，民國 92 年 12 月。
2. 台灣大學農學院農村規劃與發展中心、台灣大學農業工程系鄉村建築與環境研究室，『道路與水域之生態系統規劃-動植物之新生活區』，1998。
3. 簡傳彬、方文村、陳淑貞，『水庫與埤塘水資源聯合調配研究-以桃園大圳八支線灌區為例』，第十五屆水利工程研討會，2006。
4. 謝勝彥，『提升桃園水利會灌區埤塘供水潛能之探討』，桃園大圳水資源暨營運管理學術研討會，2004。
5. 李麗雪、林孟立、陳惠美、葉美智譯，『環境景觀之規劃與應用』，田園城市文化，2002。
6. 吳瑞賢，『工程水文學』，科技圖書股份有限公司，2001。
7. 林幸助、黃俊翰，『湖泊優養化及生態監測』，金門雙鯉湖生態監測研討會，2000。
8. 林鎮洋、邱逸文，『生態工法概論』，國立台北科技大學水環境研究中心，2002。
9. 林文欽、李佩蓉，『近河段都會區利用雨水貯留系統降低逕流量之研究』，第十四屆水利工程研討會論文，2004。
10. 金嵐等編著，『環境生態學』，科技圖書，1997。
11. 郭一羽，『水域生態工程』，中華大學水域生態環境研究中心，2001。
12. 陳明業，『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，2002。
13. 曹先紹，『湖泊與水庫生態』，2003。
14. 陳正炎、洪耀明、吳傳偉，『滯洪池數值水文演算方法之驗證』，九十年度農業工程

- 研討會論文，pp.349-355，2001。
15. 陳正炎、洪耀明，『滯洪池設計之圖解法』，中興大學工學院工程學刊，12 (2)，pp.91-101，2001。
  16. 陳亭玉，『河川流域水土資源承载力與永續力評量模式之發展』，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，1999。
  17. 陳偉、石濤，『環境與生態』，新文京開發出版社，2003。
  18. 黃建智，『流域集水區非點源污染模式之研究』，國立成功大學環工系碩士論文，2002。
  19. 傅奕靜，『應用基地保水指標於大型公共建設滯洪池容量推估之研究-以台南科學園區為例』，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2000。
  20. 鄔建國，『景觀生態學-格局、過程、尺度與等級』，五南圖書出版公司，2003。
  21. 趙羿、賴明洲、薛怡珍，『景觀生態學理論與實務』，地景企業股份有限公司，2003。
  22. 劉鴻亮等，『中國湖泊富營養化』，中國環境科學出版社，1990。
  23. Basha, H. A., "Routing equations for detention reservoirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(12), pp.855-887, 1995.
  24. Guneralp B., Barlas Y., "Dynamic modelling of a shallow freshwater lake for ecological and economic sustainability", *Ecological Modelling*, 167(1-2), pp.115-138, 2003.
  25. Hondzo M., Stefan H.G. "Long-term lake water quality predictors", *Water Research*, 30 (12), pp.2835-2852, 1996.
  26. Jørgensen S.E., "Fundamentals of Ecological Modelling", Elsevier Science Pub. Co., Inc., New York.
  27. Krystyna A. Stave, "A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas", *Journal of environmental management*, 2003.
  28. Maler K.G., "Development, ecological resources and their management: A study of complex dynamic systems", *European Economic Review*, 44(4-6), pp.645-665, 2000.
  29. McEnore, B.M., "Preliminary sizing of detention reservoirs to reduce peak discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(11), pp.1540-1549, 1992.
  30. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), "OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews", 1993.
  31. Patrick C. Kangas, *Ecological Engineering -Principles and Practice*, Lewis Publishers, 2003.
  32. Shutes R.B.E., "Artificial wetland and water quality improvement", *Environment International*, 26(5-6), pp.441-447, 2001.
  33. Shutes R.E, Revitt D.M., Scholes L.N.L, Forshaw M, and Winter B, "An experimental constructed wetland system for the treatment of highway runoff in the UK", *Water Science And Technology*, 44 (11-12), pp.571-578, 2001.
  34. Stefan H.G., Hondzo M, Eaton J.G, and McCormick J.H, "Validation of a fish habitat model for lakes", *Ecological Modelling*, 82 (3), pp.211, 1995.
  35. Wenche E.Dramstad., James D.Olson & Richard T.T.Forman, "Landscape ecology principles in landscape architecture", Harvard.
  36. Xu F.L., Tao S, Dawson R.W., Li P.G., and Cao J, "Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods", *Water Research*, 35(13), pp.3157-3167, 2001.