

國立台灣大學生農學院生物環境系統工程學研究所

博士論文

Graduate Institute of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

機率模型於都會區之雨水貯水設計應用與評估

A probabilistic approach to rainwater harvesting systems

design and evaluation



林俊宏

Chun-Hung Lin

指導教授：蘇明道 教授

Advisor: Ming-Daw Su, Professor

中華民國 98 年 7 月

July, 2009

國立臺灣大學博士學位論文
口試委員會審定書

機率模型於都會區之雨水貯水設計應用與評估

A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design
and evaluation

本論文係林俊宏君（學號：D88622006）在國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所完成之博士學位論文，於民國 98 年 6 月 29 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

蘇明道

（簽名）

（指導教授）

甘俊仁

李光敏

葉一隆

林峰田

系主任、所長

黃宏斌

（簽名）

誌 謝

深深感謝在我學習過程中周遭所有的人，在求學路上，惠我良多。僅將本論文獻給我的奶奶、爸爸與媽媽。最後，感謝一直陪在我身邊、支持我的老婆與即將出生的女兒。

林俊宏

于 國立台灣大學



目 錄

口試委員會審定書.....	i
誌 謝.....	ii
目 錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	viii
摘 要.....	ix
Abstract.....	x
第一章 緒 論.....	1
1-1 研究動機.....	2
1-2 研究目的.....	3
1-3 架構與方法.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2-1 水資源系統規劃.....	7
2-2 雨水貯集系統.....	11
2-3 系統風險分析.....	14
2-4 小結.....	17
第三章 研究區域概述.....	20
3-1 區域簡介.....	20
3-2 氣候與降雨狀況.....	25
第四章 水資源供需分析與推估.....	28
4-1 供給面推估.....	28
4-2 用水需求面推估.....	32
4-3 供需模式.....	37
4-4 機率模型.....	40

第五章 系統分析	42
5-1 貯水容量與缺水率分析	43
5-2 系統評估指標	48
第六章 系統評估與結果討論	63
6-1 貯水容量與缺水率超越機率曲線	63
6-2 貯水容量與系統評估指標關係曲線	67
6-3 結果與討論	73
第七章 結論與建議	81
7-1 結論	81
7-2 建議	83
參考文獻	85



圖 目 錄

圖 1-1 台灣地區近十年用水量分佈圖.....	1
圖 1-2 研究流程圖.....	6
圖 2-1 雨水貯集利用歷史演進示意圖.....	12
圖 2-2 不同缺水特性的比較.....	15
圖 2-3 風險概念的示意圖.....	17
圖 3-1 台北市位置圖.....	22
圖 3-2 台南市位置圖.....	22
圖 3-3 台北盆地河川流域圖.....	24
圖 3-4 台南都會區河川流域圖.....	24
圖 3-5 台北市雨量站分佈圖.....	26
圖 3-6 台南市測站分佈圖.....	27
圖 4-1 台北雨量測站之徐昇多邊形空間分布圖.....	29
圖 4-2 台南雨量測站之徐昇多邊形空間分布圖.....	29
圖 4-3 台北氣象站年降雨資料.....	30
圖 4-4 台北氣象站平均月降雨分布.....	31
圖 4-5 台南氣象站年降雨資料.....	31
圖 4-6 台南氣象站平均月降雨分布.....	32
圖 4-7 台北都會區建物面積統計表.....	34
圖 4-8 台南市中西區建物面積統計表.....	34
圖 4-9 模擬流程圖.....	38
圖 4-10 缺水率與貯水容量之機率分布曲線示意圖.....	41
圖 5-1 貯水容量、缺水率與超越機率示意圖.....	42
圖 5-2 台北都會區不同貯水容量之缺水率機率分布圖.....	45

圖 5-3 台南都會區不同貯水容量之缺水率機率分布圖	47
圖 5-4 台北都會區不同貯水容量之可靠度機率分布圖	49
圖 5-5 台北都會區不同貯水容量之回復度機率分布圖	51
圖 5-6 台北都會區不同貯水容量之易損度機率分布圖	53
圖 5-7 台北都會區不同貯水容量之綜合評估指標機率分布圖	55
圖 5-8 台南都會區不同貯水容量之可靠度機率分布圖	56
圖 5-9 台南都會區不同貯水容量之回復度機率分布圖	58
圖 5-10 台南都會區不同貯水容量之易損度機率分布圖	60
圖 5-11 台南都會區不同貯水容量之綜合評估指標機率分布圖	61
圖 6-1 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-缺水率關係曲線圖	64
圖 6-2 台北都會區貯水容量與缺水率之機率密度曲面示意圖	65
圖 6-3 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-缺水率關係曲線圖	66
圖 6-4 台南都會區貯水容量與缺水率之機率密度曲面示意圖	67
圖 6-5 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-可靠度關係曲線圖	68
圖 6-6 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-回復度關係曲線圖	68
圖 6-7 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-易損度關係曲線圖	69
圖 6-8 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-綜合評估指標關係曲線圖	69
圖 6-9 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-可靠度關係曲線圖	71
圖 6-10 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-回復度關係曲線圖	71
圖 6-11 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-易損度關係曲線圖	72
圖 6-12 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-綜合評估指標關係曲線圖	72
圖 6-13 台北與台南區域雨量比較圖	74
圖 6-14 不同超越機率之台北與台南貯水容量與缺水率圖	75
圖 6-15 不同超越機率之台北與台南貯水容量與綜合評估指標圖	76
圖 6-16 台北都會區不同貯水容量下綜合評估指標與平均缺水率圖	77

圖 6-17 台南都會區不同貯水容量下綜合指標與平均缺水率圖..... 78

圖 6-18 不同單位面積貯水容量下之綜合指標與平均缺水率比較圖..... 80



表 目 錄

表 1-1 年降水量及單位人口分配之降水量統計表.....	2
表 4-1 研究區域各區地理條件之資料.....	33
表 4-2 研究區域各區建物之平均人口數.....	36
表 5-1 台北都會區各貯水容量與平均缺水率及變異數之關係.....	46
表 5-2 台南都會區各貯水容量與平均缺水率及變異數之關係.....	48
表 5-3 台北都會區各貯水容量與可靠度及變異數之關係.....	50
表 5-4 台北都會區各貯水容量與回復度及變異數之關係.....	52
表 5-5 台北都會區各貯水容量與易損度及變異數之關係.....	54
表 5-6 台北都會區各貯水容量與綜合評估指標及變異數之關係.....	56
表 5-7 台南都會區各貯水容量與可靠度及變異數之關係.....	57
表 5-8 台南都會區各貯水容量與回復度及變異數之關係.....	59
表 5-9 台南都會區各貯水容量與易損度及變異數之關係.....	61
表 5-10 台南都會區各貯水容量與綜合評估指標及變異數之關係.....	62

摘要

雨水貯水為一種可使用之水源，但其貯集效率經常受到降雨時空分布之影響，導致可貯集以提供利用之雨水量有限。以往常用最佳化或模擬之方法研討貯水容量設計，並多以平均之貯水容量與缺水程度進行討論；但降雨為一隨機歷程，貯水容量對缺水率之影響應為一連續性分布，以特定貯水容量之平均缺水率大小決定設計容量並不適當。是故，本研究提出機率觀念並導入系統評估之風險分析指標，藉此分析雨水貯集系統設計中之貯水容量設計，建立不同貯水容量之缺水率超越機率曲線與不同缺水狀態下貯水容量之超越機率曲線，同時亦建立系統評估指標之超越機率曲線，冀能藉此建立以機率為觀點雨水貯集系統之不確定性。

研究中首先以台北市都會區為例，模擬單一建物內人口，利用不同大小之雨水貯水容量設計，以替代衛生沖廁用水量之可行性進行分析討論；爾後，選擇台南都會區作為例證，期能透過區域之差異性，除將方法應用於不同區域，亦進一步探討其結果之異同。

研究結果顯示在不同超越機率情況下，當設計之貯水容量達 90 立方公尺時，缺水率以達穩定，即增加貯水容量對改變缺水率已無成效。當貯水容量設計達 20 立方公尺，台北都會區缺水率變化率最大；台南都會區則需達 90 立方公尺才有相當之成效。台北都會區與台南都會區之貯水容量設計分別達 50 立方公尺與 90 立方公尺時，其綜合評估指標呈現穩定。另外，若以單位面積之貯水容量來探討，台北都會區達 $0.2 \text{ (m}^3/\text{m}^2)$ 時，系統之缺水率或綜合評估指標有較佳之結果，台南都會區則需達 $0.6 \text{ (m}^3/\text{m}^2)$ 。結果顯示，當區域之降雨豐枯比較大，系統需要較大之貯水容量。

關鍵詞：雨水貯集、機率分析、水資源、系統評估指標。

Abstract

The imbalance among water supply and demand becomes a more and more serious problem in Taiwan owing to rapid growth of population and socio-economic activities. Rainwater harvest is an alternative water supply source to relieve this water shortage pressure in urban area. Since the effectiveness of Rainwater Harvesting System (RHS) design is heavily dependent on rainfall characteristics, both optimization and simulation were used to approach this problem of storage design for RHS. In the past, most of the studies present the average successful rate under a specific storage capacity.

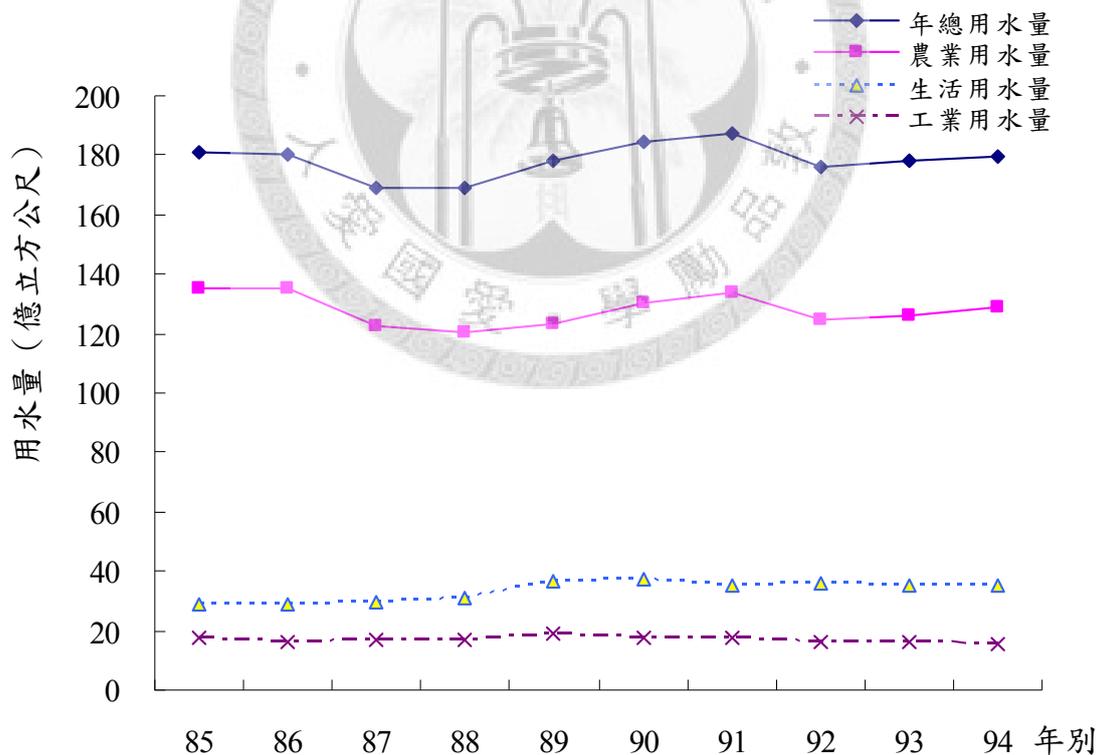
This paper presents a probabilistic analysis approach to construct the supply deficit probability distribution under a designed storage as well as the exceedance probability curve of deficit rate under different storage capacities. The fitted probability density function was transformed into exceedance probability (EP) curve for reliability evaluation on RHS designs. A more effective RHS design may be achieved and relieve regional water supply pressure. This information provides a holistic view of the RHS performance characteristic for more effective RHS design.

In this research, cities of Taipei and Tainan were used as study areas for the demonstration of this methodology. Subsequently the probabilistic distribution curves for relationships between storage capacities and deficit rates as well as the relationships between storage capacities and system evaluation index were presented. The results show that deficit rate and comprehensive evaluation index is lower in Taipei with 0.2 (m^3/m^2) than in Tainan with 0.6 (m^3/m^2). It indicates that the system requires larger storage capacity when ratio of high rainfall to low rainfall is higher.

Keywords: Rainwater harvesting, Probabilistic analysis, Water resources, System evaluation index.

第一章 緒 論

台灣地區歷年（民國 38 年至 95 年）平均年降雨深度約為平均年雨量 2,480 公釐，折算體積約為 890 億立方公尺。各區域年雨量以北部區域為最豐沛（約 2,900 公釐），東部區域次之（約 2,700 公釐），南部區域又次之（約 2,500 公釐），中部區域最少（約 2,080 公釐）（經濟部水利署，2007）。由於水資源分佈不平均及新水源開發不易，經常出現供水不足之情況，各用水標的亦經常發生競爭衝突，以民國 94 年台灣地區用水量為例，總用水量約 179 億立方公尺，其中農業用水量約 129 億立方公尺，占 72%，其次為生活用水約 35 億立方公尺，占 20%，工業及其餘用水共 15 億立方公尺，占 8%。各用水標的使用不均，產生水源調配與用水問題，台灣地區近十年各標的用水量分佈如圖 1-1 所示。



資料來源：經濟部水利署，2007

圖 1-1 台灣地區近十年用水量分佈圖

台灣幅員雖然不大，但降雨在時空上分佈不均，台灣雨量雖然豐沛，約為世界平均值之 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年所分配雨量僅及世界平均值之七分之一（如表 1-1 所示）。又因地形限制，蓄水設施（壩、堰）分佈亦不完全理想，使得八成以上的降雨都直接流入海，可供利用之雨水在全年總降水量中不到兩成，因此常出現部分地區缺水而附近區域卻有多餘水量之情況。水資源經營管理之工作除了需要開發新水源及推廣節約用水雙管齊下外，水源之統籌規劃管理更應加強，尤其應加強推動區域性調配及多水源聯合應用，如此才能將有限之水資源應用至最佳狀況。

表 1-1 年降水量及單位人口分配之降水量統計表

國 家	年降水量 (mm/year)	單位人口分配之降水量 (m ³ /year/person)
台 灣	2,510	4,348
日 本	1,820	6,060
印 度	1,120	6,600
中 國	890	9,720
美 國	830	36,500
泰 國	830	3,650
英 國	800	3,400
加 拿 大	790	34,400
法 國	760	7,810
瑞 典	700	38,400
西 班 牙	660	9,470

資料來源：台灣雨水利用協會，2008

1-1 研究動機

受到人口持續成長，用水需求增加，可利用之水資源漸趨不足等因素，導致各標的用水競爭激烈，透過開源與節流之手段，冀以解決水源短缺。實際上，上述兩者方式容易受到工程成本、現行水權問題及管理效能等限制，短期間無法立即改善缺水情況，然而雨水為目前水資源之重要來源，故藉由雨水貯集系統（Rainwater Harvesting System, RHS）方式，直接利用或收集方式，已被廣泛應用。

以鄉村型態區域或以農業產業為主之國家而言，雨水貯集系統可做為生活用水的主要來源(Yusuf and Yusuf 1999; Handia, Tembo et al. 2003)；在高都市化區域或已開發國家，雨水貯集可作為家庭用水之替代水源(Thomas 1998; Liaw and Tsai 2004)，此外更可被應用於洪峰消減或延遲(Becker and Raasch 2003; Kumar, Singh et al. 2005)。故在水資源利用困難重重與氣候變遷情況下，如何兼顧效率與效能，並提升有限之水資源利用將是重要課題。

降雨乃為最直接可取得水資源之方式，也是台灣最重要之自來水來源，而雨水貯水系統特性在於無牽涉水權、系統設施簡易與經濟實用等，故此法已成為積極尋求代替水源，提升水資源供應措施之一，並於多數國家或區域實行成效甚佳，如日本、香港、新加坡、夏威夷、美國等區域(Chu, Liaw et al. 1997; Thomas 1998; Hatibu 1999; Li, Cook et al. 2000)。在台灣乃根據「雨水與中水利用手冊 (Rainfall Catchment and Dual Water Supply System Handbook)」(經濟部水利署 2000)，針對民生用水節水措施進行討論，並給予屋頂雨水貯水系統(Rooftop Rain Water Harvesting Systems, RRWHSs)一些初步規範，但在 RRWHSs 設計方法於系統風險評估缺乏較完整之描述。受到乾旱頻繁影響，自 1985 年即開始推動節約用水政策，其節水措施主要針對盥廁設施，如沖廁之水量與設備等已達到節流，倘若於政策推動時，加諸雨水貯水系統於開源中，可增加可用水資源，來改善用水不足現象。

1-2 研究目的

雨水貯水係將水文循環中之雨水以天然地形或人工方法予以截取貯存，可作為灌溉用水或雜用水，如沖廁、澆灌、補充空調用水或景觀池及生態池之補充水源，故雨水貯集可視為附加於現有集水設施，以增加水資源利用之一種方式。在降雨期間除了可貯集水量外，尚可發揮減洪功能及增加供水等多目標效能，故雨水貯水系統可做為替代新水源與增加供水量之良策(Hatibu and Mahoo 1999; 陳瑞

鈴 2002; Motsi et al. 2004; 經濟部水利署 2004)。雨水貯水效率經常受到降雨時間與空間分配影響，導致可貯水以提供利用之雨水量有限，此議題經常在水資源管理中備受關注，以往經常使用最佳化方法研討雨水貯水容量設計(Zhang and Cai 2003; Panigrahi, Panda et al. 2005; Wei, Li et al. 2005)；或採用系統模擬方式討論貯水容量限制(Jenkins and Lund 2000; Srivastava 2001; Liaw and Tsai 2004; Panigrahi, Panda et al. 2005)。無論以最佳化模式或模擬方式所決定之貯水容量，多以平均之貯水容量與缺水程度進行討論。但實際上，降雨事件為一隨機過程，受到諸多之不確定性影響，其最佳化模式與模擬無法將所有之不確定性考慮至系統中，且貯水容量對缺水率之影響為一連續性分配，實在難以採用特定貯水容量時平均缺水率為何之觀點來決定其貯水容量。除貯水容量與缺水率間呈現之不確定性關係外，雨水貯集系統設計考量之風險分析亦鮮少被討論，因而本研究期冀以機率觀念來描述單一貯水容量在不同機率下，可能產生之缺水率關係及其風險分析。此外，於解決水資源應用於多標的間衝突之議題上，主要探討資源流動或分配，但就本研究而言，在都市雨水貯集系統中，對單一建築而言，資源是不可流動的，故於人口稠密的都會區，如何將雨水從“非現地 (off-site)”轉變為“現地 (on-site)”可利用之水資源為一項重要的工作(Thomas 1998; Handia, Tembo et al. 2003)。

為了討論上述相關問題，本研究將以雨水貯集系統替代民生用水之沖廁用水部分做為例証，做進一步探討。研究中利用系統模擬之方式，模擬以雨水替代單一建物之沖廁用水量之可行性，研究中並無考慮標的間之轉移、貯水設備之材質、貯留雨水之水質與貯留之時間長短等因素。本研究目的係建立「貯水容量-缺水率關係」，掌握缺水率之機率曲線分配，並導入系統評估指標（彈性度、回復度與脆弱度），經由統計檢定方式，檢定不同貯水容量下之缺水率與系統指標之最適曲線分配，以機率觀念說明設計之貯水容量大小，並以模擬結果建立各貯水容量-缺水

率與貯水容量-系統評估指標之關係，以特定之機率分配曲線建立，以利於瞭解不同貯水容量與缺水狀態之風險影響，臻以上述之方法論與成果以供作為未來設計貯水容量設計之參考依據。

1-3 架構與方法

本研究首先探討不同貯水容量之缺水率的機率密度函數(Probability density function, Pdf)關係，藉由系統模擬方式進行不同貯水容量之缺水率分析，採用水資源之質量平衡 (Mass-balance) (Su et al. 2009)，將歷史之降雨記錄視為模式輸入條件，模擬推估潛在的貯水容量(Potential storage)所對應之缺水率 (缺水量與需水量之比值)，並將缺水率視為系統失敗程度。本研究並引入系統評估指標，做進一步之研討；其次探討模擬結果應用於機率模型上，建立對應之貯水容量、缺水率與系統評估指標之機率密度函數，可展示缺水率的機率分配關係，從中建立貯水容量與缺水率等關係，期能展示缺水程度與系統之變異；最後，利用所建立之超越機率曲線，進而探討雨水貯集系統之風險分析與評估。為研討上述之方法，本研究首先選定台北都會區做為例證，來探討雨水貯集之系統評估機制。接下來選定台南都會區，透過不同降雨型態與區域性之差異，進而研討雨水貯集系統貯水容量設計標準與系統評估，整體架構如圖 1-2 所示。

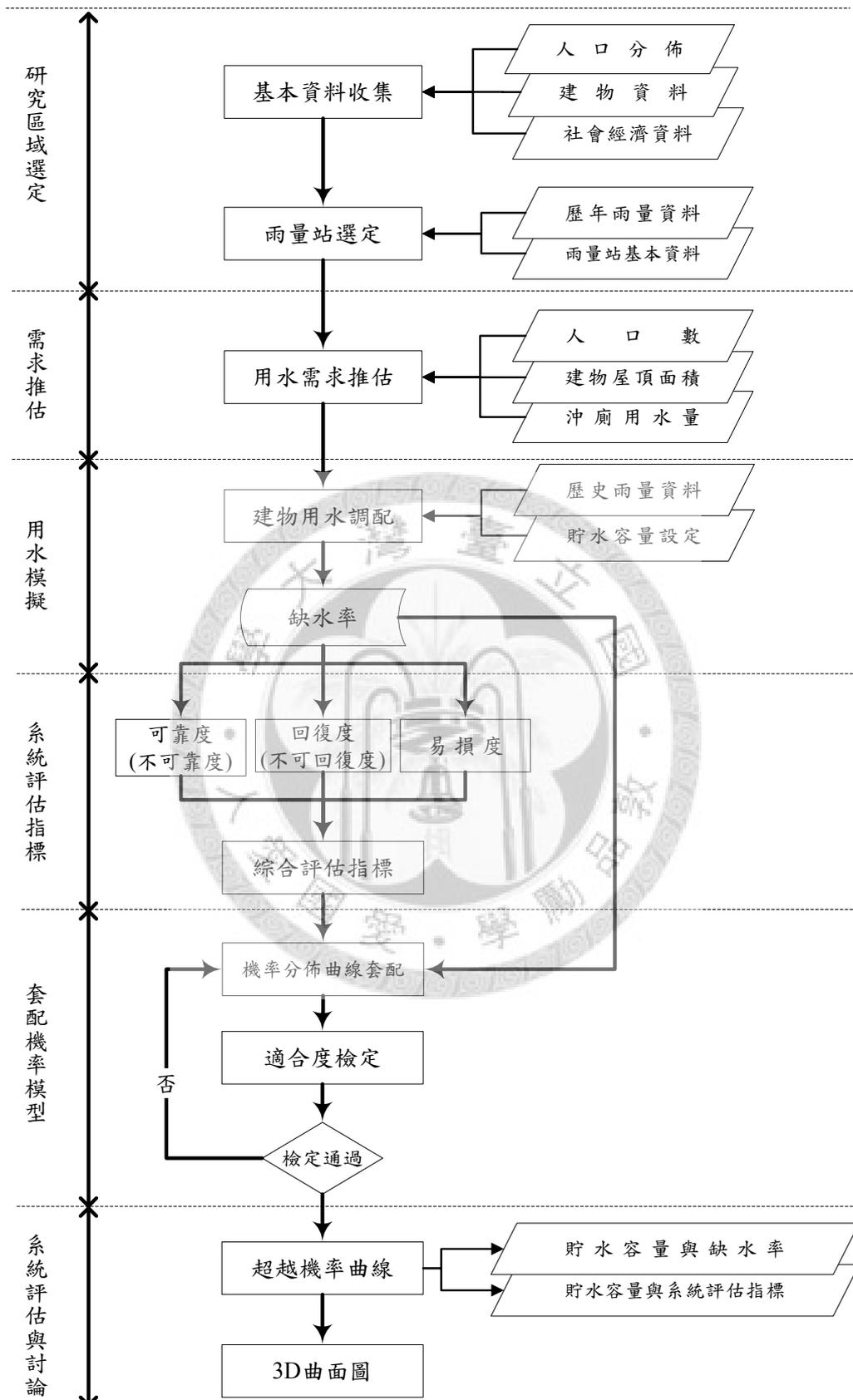


圖 1-2 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究利用模擬方法，模擬各貯水容量下缺水率情形，從中建立貯水容量與缺水率關係，進而描述系統之風險。水資源之研究由於電腦技術蓬勃因此也一日千里，水資源上的研究由早期描述、觀測、歸納與統計而發展至今以數學為主體，將模式以合成或模擬的方式呈現。因此，本章節首先針對水資源系統規劃方法進行描述；爾後針對雨水貯集系統進行描述，並進一步介紹國內外相關研究；最後，系統設計之風險描述與分析以作為本研究最後之系統評估與分析。

2-1 水資源系統規劃

水資源系統分析所採用之工具，其目的主要在於水庫容量大小、開發建造次序、經濟效益分析與制訂水庫操作規則等，所採用的演算工具則依問題的特性而有所不同，大致可分成幾類：

一、模擬法 (Simulation)

此法是以一種利用數學方法描述系統的特徵，以試誤方式逼近系統最佳行為的技術。系統模擬是利用一組預設之系統參數值，經由物理過程之描述，瞭解系統運轉之行為，再經由反覆不斷之模擬，可檢驗或評估系統對參數變化之敏感度。經由上述之過程，系統模擬可用來評估不同的替代方案 (alternatives)。因此系統模擬之重點並不是也無法有效率地求解系統之「最佳決策(optimal decisions)」，其目的在於利用不同組之輸入資料，透過反覆執行模擬程式回答「如果-又如何？」what-if之問題，瞭解各種系統狀況之可能性與造成之衝擊後，進而能夠得到「滿意之答案 (satisfied solutions)」(Nandalal and Sakthivadivel 2002; Rajasekaram et al. 2003)。Hall (1961)針對 1953 年美國陸軍工程兵團對密蘇里河 (Missouri River) 的六座水庫進行模擬分析，而

Maass et al.(1962)亦介紹模擬法可用來進行整個流域的水庫規劃與經濟分析。郭振泰等（1985）提出淡水河流域多水庫系統模擬分析及石門、翡翠水庫聯合供水操作之模擬分析；易任（1970）、朱壽銓等（2000）以模擬方法研究水庫操作規線上之應用等。

二、線性規劃（Linear programming）

為一種最為常用的優選法，有現成之套裝程式軟體可使用，為採用優選法時一種理想的演算工具，但是若處理之系統較大時，則要採用分解法 (decomposition) 以降低問題之維度。在眾多優選方法中，首先被應用在水資源系統分析方面者為線性規劃 (Linear Programming, LP)，Dorfman(1962) 首先以線性規劃解決一個簡化的流域規劃問題。同時 Manne(1962) 假設流量為馬可夫程序 (Markov process) 配合線性規劃求解一假想單一水庫操作案例。國內方面，將線性規劃應用於水庫的規劃與操作，並制訂水庫營運基準線（胡文章 1977；郭振泰等 1988；徐忠寶 1996）。

三、動態規劃（Dynamic programming）

此法適合解決一序列決策問題，但由於無固定通用的套裝軟體可供使用，因此發展模式上較為費時。與線性規劃相同，在處理較大系統時必須利用疊代或分解技巧，以節省電腦記憶空間增快執行速度。動態規劃 (Dynamic programming, DP) 由 Little(1955) 首先應用在求一個發電系統的操作策略上。隨後，Hall and Buras(1961)，Young (1967) 等學者陸續皆應用動態規劃在水庫操作上。國內方面，利用動態規劃進行優選演算，探討如何提高水庫系統營運效益（萬象 1985；徐享崑與李朝晉 1986；黃錦祥 1986；郭錦文 1995）。另外，將動態規劃應用於多水庫系統時之缺失，以及可能之修正策略，以達較完美之操作情況（陳莉 1990；惠士奇 1997；許榮哲 1998）。

由於在處理多水庫問題時，線性規劃與動態規劃都有其實用上的困難，因此一些分解(分群, decomposition)技巧則陸續被提出，例如 Hall et al. (1969) 之增量動態規劃 (Incremental dynamic programming, IDP)、Heidari et al. (1971) 之微分動態規劃，Larson(1968)。

四、非線性規劃 (Non-linear programming)

為一通用的優選方法，可處理任何形式之目標函數與限制式，但是由於其解題方式常採用各種傾度方向 (Gradient direction) 搜尋法，因此對於複雜問題，要收斂至最佳解往往耗時且不易達成為其最大缺點。國外相關應用中，大多利用非線性規劃探討水庫分佈最佳化或水質處理點最佳化問題 (Ghahraman and Sepaskhah 2004; Theodossiou 2004; Nie, Li et al. 2009)。國內部分，郭振泰 (1987) 則利用大型規劃 (Large scale programming) 建立水庫最佳操作模式。

五、網路分析法 (Network analysis)

為線性規劃問題之特殊解法，乃將線性規劃問題之對偶模式 (dual model) 轉化成為網路問題，通常可用對勁法 (out-of-kilter) 來解。其優點在於解同一問題時較線性規劃節省 20 至 30 倍之電腦記憶空間與計算時間。劉佳明 (1986, 1987) 利用線性規劃之對偶問題轉化成網路問題後，利用網路切割法可用來解決水庫規劃之問題。隨後，劉佳明 (1988) 引入標的網路圖的概念，以解釋網路切割法之原理。

六、最佳控制 (Optimal control)

此法將水資源系統問題，利用線性系統理論 (Linear system theory) 與序率控制 (Stochastic control) 理論求其最佳解，雖然其原理牽涉較複雜之數學演算，但未來此法仍極具發展潛力。郭振泰 (1988) 利用線性二次高斯法 (LQG) 理論，加以修正建立一種可處理不等式限制條件的最佳控制模式，並以石門

水庫為演算實例。萬象（1990）亦採用 LQG 理論建立石門水庫防洪操作最佳控制模式。流域性之水資源規劃模式則有水資會與荷蘭戴伏特水工所(Delft Hydraulics) 合作發展之「台灣地區水資源剛領計畫」，分析台灣地區可用地面水之應用模擬。至於流域性水資源分配模擬與應用則有經濟部水資會利用 RIBASIM 模式於大漢溪流域與新店溪流域有效之水源相互應用，雖提供一些決策，但分析之結果並未具視覺化呈現，仍屬於一般用水資源資料之分析。

七、遺傳演算法 (Genetic Algorithms)

遺傳演算法的理論基礎可回溯自 1859 年達爾文 (Charles Darwin) 的「物種演化」(On the Origin of Species by Means of Nature Selection) 中「物競天擇，適者生存」的演化及淘汰觀念。生物遺傳的特質，是由染色體內之基因組合所決定，不同的基因組合會產生不同的生物特性，經過自然淘汰後所存活生物經過交配的過程，將適應環境的特質遺傳至下一代，經過幾代的演化後，可產生極適合環境的品種。遺傳演算法最早由 Holland 於 1975 年所提出，主要是利用簡單的字串結構來解決複雜的系統問題，字串結構經過相關控制及變換後，成為較佳的結構字串，系統問題亦隨之改善。這些字串結構的變換與遺傳基因的改變原理類似，所以稱之為遺傳演算法。

遺傳演算法發展迄今已成為應用範圍十分廣泛的演算法之一，在水資源應用方面則可應用於管線最佳化問題、降雨逕流模式參數率定、地下水問題之優選及水庫系統營運之相關問題（陳莉與張斐章 1993；郭蒼霖 2000；許少瑜 2001；鄭蔚辰 2001）。

八、人工智慧 (Artificial Intelligence)

近年來，人工智慧如類神經網路與模糊理論等已被成功的應用於水資源管理上(黃義銘 1996；張雅婷 2006)，其中類神經網路可同時處理大量資料，且具有優越的非線性映射能力可處理如預測、分類等問題。類神經網路類似

人類神經結構的一個平行計算模式，是「一種基於腦與神經系統研究，所啟發的資訊處理技術」，它可以利用系統的輸入與輸出所組成的資料，建立系統模型。模糊理論在 1965 與 1973 年，由 Zadeh 教授分別提出模糊集合和模糊邏輯理論後，模糊理論就一直受到重視，且廣範運用到各領域，例如：Russell and Campbell(1996)以模糊規劃試圖找出水庫的操作規則，結果顯示，模糊操作系統可提供具彈性與靈活的操作方式，而整體操作概念也易於了解。

2-2 雨水貯集系統

地球上一切水資源都來自降水，人類對水的所有利用方式都可稱為廣義的雨水利用，台灣雨水利用協會也對雨水利用做了這樣的定義：從廣義上講，凡是利用雨水的行為都可以稱為雨水利用如：興建水庫、塘壩和灌溉系統等開發利用地表水的活動、打井開採地下水及人工降雨措施等。從狹義上講，凡是直接利用雨水的活動，如利用一定的集雨面收集雨水用於生活、農業生產和城市環境衛生等。但本研究之雨水利用係指對雨水原始狀態的利用，即直接利用降雨或在降雨轉化為地面逕流或地下水最初階段之利用，而雨水貯集利用是指此利用之一種形式；採取工程或管理措施，收集或蓄存降雨，以進行調節利用，是人類對雨水更進一步的控制方式。簡而言之，將環境中水資源循環再生過程之雨水，以天然地形或人工方法截取貯留，並經簡易處理後加以利用。

一般而言，雨水是相當乾淨之水源，除非是空氣污染嚴重地區，建築物可利用屋頂作為雨水收集面積，再把雨水適當處理與貯存。並設置二元供水系統（即自來水及雨水分別使用之管線），將雨水作為雜用水，如沖廁所、澆灌、補充空調用水或景觀池及生態池之補充水源等。所以雨水利用措施可節省珍貴自來水源並降低水費，更能真正落實水資源有效利用之目標。在國內外的發展現況方面，包括如農業土木的雨水利用、雨水資源化的環境保育、乾旱與半乾旱地區之雨水利

用、農村、市鎮與離島之雨水利用等，都有相當的成果。雨水貯集的實用技術已經擁有數千年的歷史，早期以農業用水為主要目的，因此其相關的功能主要分佈於農業補充灌溉上，近 50 年來，由於民生與工業快速發展，相關應用亦陸續被推出，圖 2-1 為雨水貯集利用歷史之演進示意圖。



資料來源：經濟部水利署(2004)

圖 2-1 雨水貯集利用歷史演進示意圖

關於雨水貯集相關研究，例如：Thomas (1998)利用建物屋頂貯集降雨，探討都會區最大蓄水量與最小蓄水成本，結果利用缺水量與可貯集水量之比值，劃分不同區域之雨水貯集系統，可提供區域用水需求日數，並將結果分為”wet-day”、”wet-season”與”all-year”三個不同之用水區。Yususf (1999)提出貯集大小與需水間之關係，結果提出貯集面積大小直接影響系統成效且由於降雨之不

確定性，使系統亦具有高度之不確定性。Pandey et al. (2003)認為氣候異常，極端水文事件經常性的發生，例如旱災或洪災，研究中並將雨水貯集系統與全球氣候變遷作進一步之探討。

國內部分，為設立雨水貯留之設計標準，針對雨水貯留供水系統之定義、型式、效能演算、裝設等進行詳細的說明（朱壽銓與黃文龍 1997；朱壽銓等 1997；廖朝軒等 1997；鄭政利與廖朝軒 2003）。由於屋頂貯留面積不同，對於系統成效結果也不相同，因此針對公共場所或學校提出研究方案，並具體描述其效益（李士哇等 1997；劉豐壽等 1999；王琪南 2000；李士哇與林敏朝 2002；張近東 2006）。亦有針對北部區域進行平均旬雨量分析，進而分區之研究（黃吉正 2000）。另外尚有雨水貯集與山坡地災害（黃照君 2001）、雨水貯集之滯洪效應（廖朝軒與蔡耀隆 2002）等。

經濟部水利署針對台灣地區雨水貯蓄利用的推動策略—成立台灣雨水利用協會、訂定雨水貯蓄系統設計及用水標準、制定大型建築物節水對策綱領、雨水貯蓄相關技術與套裝設備研發、持續有效的辦理雨水回收利用技術推廣與宣導活動；並針對台灣地區推動雨水利用的成果彙整，藉由實際案例可知，雨水貯蓄設施在台灣地區的推動效果相當良好（黃金山 2002）。

過去尚有部分研究多以離散方式描述貯水容量與缺水率關係(Rahman and Yusuf 2000; Panigrahi, Panda et al. 2001; Machiwal, Jha et al. 2004; Motsi, Chuma et al. 2004; Yue and Wang 2004; Ngigi, Savenije et al. 2005)。以離散描述方式，貯水容量與缺水率以定值呈現系統成果，於實務上難應用此類型之研究結果，同時，該種方式並無機率觀念，因達到某固定之缺水率之說法，理論上發生機率為零。實際上，貯水容量與缺水率呈現某種機率分配(Rahman and Yusuf 2000; Qian et al. 2004; Akintug and Rasmussen 2005; Negri, Gollehon et al. 2005)，故研究中採用機率模型觀念說明雨水貯水系統之貯水容量設計，並描述系統變異之特性。

2-3 系統風險分析

目前為止，風險並沒有一致的定義，一般來說風險的定義可分為事故發生的不確定性(Uncertainty)與事故發生遭受損失的機會(Chance of Loss)。根據韋伯(Webster)線上字典的定義，風險為損失或損害的機率(Possibility of Loss or Injury)。由此可知，風險包含了機率(Probability)與損失(Loss)兩項變數，而後續許多學者也根據此來對風險加以定義。

從水資源規劃的觀點來看，對於規劃中或已進行營運之水資源系統評估其系統發生失敗的風險是必要的。風險之訊息，對於規劃中的水資源系統來說提供了決策者選擇不同替代方案(Alternatives)的考量之一，而對於營運中之水資源系統，則可藉此了解系統失敗之可能性，儘早提出因應措施，藉由硬體工程之補強或軟體如操作、管理方式等之改善來避免系統失敗後帶來的嚴重損害。再以水資源規劃的觀點來看，水庫系統表現的評估指標必須能夠獲取缺水事件的一些基本性質，例如缺水發生的頻率(Frequency)、延時(Duration)以及強度(Intensity)。系統的表現通常可由平均值、變異數來描述，然而這兩個統計量卻無法提供系統一旦失敗(Failure)後的嚴重性及失敗的頻率等資訊。

Hashimoto et al. (1982)以系統評估的風險觀念，提出可靠度(Reliability)、彈性度(Resiliency)以及易損度(Vulnerability)等作為評估水資源系統缺水的指標。這些觀念應用於水庫系統的供需關係，茲敘述如下：

一、供水可靠度 (Reliability, *Rel*)

可靠度在於描述在規劃時程內不缺水的時段所占的比例，故用於評估水資源系統處於不缺水的機率，即：

$$\text{Rel} = \text{Prob.}(\text{供水量} \geq \text{需水量}) \quad (\text{式 2-1})$$

由於系統之可靠度廣泛被使用，因此式 2-1 亦可被改寫如式 2-2：

$$\text{Rel} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (\text{式 2-2})$$

其中， $d(j)$ ：發生缺水之時間長度；
 M ：發生缺水之次數；
 T ：所模擬之時間長度。

由於可靠度是以機率的觀念表示，故其值應介於 0 至 1 之間。然而單藉由可靠度分析無法充分描述區域缺水的特性，如圖 2-2 所示之系統可靠度，A 與 B 兩種狀況皆表示 12 個月中發生缺水五個月的缺水事件，因此其供水的可靠度亦皆為 58%，然而在狀況 A 表示一連續五個月缺水的事件，而狀況 B 表示每個月間隔缺水的狀況，以缺水的嚴重性而言，連續性的缺水將造成較大的衝擊，因此單僅透過可靠度無法充分鑑別與評估水資源的缺水特性。



圖 2-2 不同缺水特性的比較

資料來源：溫在弘（2007）

二、供水彈性度 (Resiliency, *Res*)

區域性缺水的時段，在時間上是否連續發生，對其缺水的嚴重程度造成甚大的影響，因此以彈性度表示系統失敗後，多久能恢復至系統常態。該值可定義為在 t 時刻為缺水情況下， $t+1$ 時刻不缺水的條件機率，即：

$$\text{Res} = \frac{\text{Prob.}(U_t \in \text{缺水} \cap U_{t+1} \in \text{充分供水})}{\text{Prob.}(U_t \in \text{缺水})} \quad (\text{式 2-3})$$

$$\Rightarrow \text{Prob.}(U_{t+1} \in \text{充分供水} | U_t \in \text{缺水})$$

彈性度亦是以條件機率形式表示，故其值介於 0 與 1 之間。系統之彈性度越大，則表示一旦發生缺水狀況，能夠很快恢復正常供水的常態狀況。反之，若系統之彈性度越差，則表示一旦發生缺水狀況，將會延續一段較長的缺水時間。如圖 2-2 所示，儘管 A 與 B 兩種狀況的可靠度皆為 0.58，但若考慮系統彈性度的風險因素，則 A 狀況的彈性度僅 20%，而 B 狀況的彈性度則為 100%。這可說明儘管兩種狀況的可靠度相同，但是由於彈性度的差異，則可有效區隔兩種狀況缺水特性的差異。

三、缺水易損度 (Vulnerability, Vul)

前兩種風險特性，包括可靠度及彈性度，僅將系統各時段的狀態區分成缺水與充分供水等兩種狀態，而無法區別各時段內缺水的嚴重程度，因此易損度用來描述系統缺水的嚴重程度，但其嚴重程度的定義依照管理者不同的考量則有不同的定義，Hashimoto 等人所定義的易損度為每一缺水事件之最大缺水量及其機率乘機之和，即：

$$\text{Vul} = \sum_{j \in \text{缺水}} s_j \times e_j \quad (\text{式 2-4})$$

其中， s_j ：一缺水事件中的某時段最大缺水量

e_j ： s_j 的發生機率

由於易損度在不同之研究內容有不同之定義，包括規劃時程內的最大缺水量、平均缺水量或將缺水量標準化後以機率加權之總和等 (Jinno et al. 1995;

Merabtene , Kawamura et al. 2002)。

Jinno et al. (1995)考慮上述的三種風險特性，以線性加權的方式建立缺水風險指標(drought risk index, DRI)，即：

$$\text{DRI} = w_1 \times (1-\alpha) + w_2 \times (1-\beta) + w_3 \times \gamma \quad (\text{式 2-5})$$

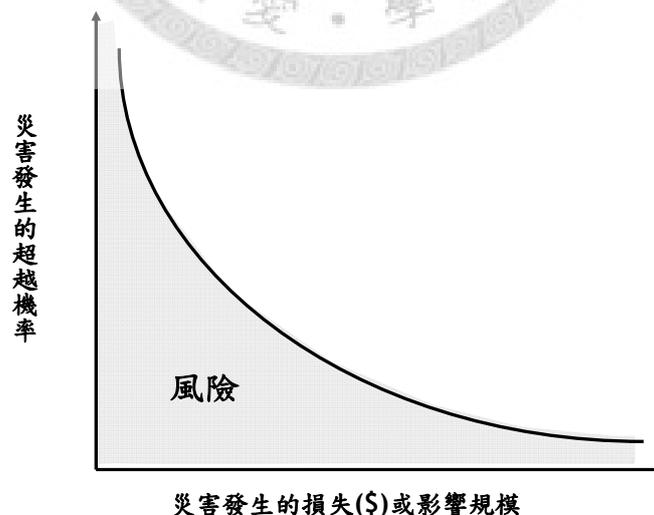
其中， α ：可靠度、 β ：彈性度、 γ ：易損度

w_n ：各項風險因素的加權值， $n=1..3$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

2-4 小結

「風險(Risk)」的定義為「一件有發生可能的事件，而一旦發生會對人類環境造成負面衝擊」，亦即「對人類環境發生負面衝擊的機率與規模大小」所組成的綜合觀念 (Schwing et al. 1980; Fischhoff et al 1984)。換言之，災難必須藉由發生在有人類活動的環境，才會產生負面衝擊，因而造成風險。由上述可知，風險的概念包含「損害事件發生的機率」以及「損害事件造成的影響規模」兩個主要因素(如圖 2-3 所示)。



資料來源：Fischhoff et al 1984

圖 2-3 風險概念的示意圖

由上述可知，於自然資源管理中，「風險」或「風險管理」其發展已臻完整，且其概念被大量應用於各領域中。就水資源系統評估中，雖然「風險」亦被應用於水資源系統中，但就機率概念為探討之系統評估卻鮮少討論，不免令人有見樹不見林之憾。因此，本研究希望就完整系統評估風險分析之觀點，期能透過機率分析，探討雨水貯集系統對於區域水資源管理之效益進行評估。

經由上述，本研究首先利用水平衡方程式建立單一建物之供水調配模式，將選定之雨量站之歷史雨量記錄做為模式之輸入值，透過系統模擬方式得到缺水量。本研究後續所使用之名詞及其相關定義，描述如下：

一、失敗率 (Failure rate, Fr)

係描述系統發生失敗時之嚴重程度，本研究以缺水率做為系統失敗率之描述，其計算是如式 2-6。

$$Fr = \left\{ \sum_{t=1}^{d(t)} [D(t) - R(t)] \right\} / \sum_{t=1}^{d(t)} [D(t)] \quad (\text{式 2-6})$$

其中， $d(t)$ ：發生缺水之時間長度；

$D(t)$ ：發生缺水時之需水量；

$R(t)$ ：發生缺水時之供水量。

二、系統評估指標

為進一步研討雨水貯集系統之系統評估，本研究亦加入 Hashimoto et al. (1982)所提出系統評估之風險觀念，以作為雨水貯集系統之風險指標。為符合本研究之系統，對於指標之描述略加以修正。

(一) 系統可靠性 (Rel)

系統之可靠性乃利用式 2-2 所述之方式，相對於系統可靠性，可定義為不可靠性(Non-Reliability, NRel)，即：

$$NRel = 1 - Rel = \text{Prob.}(\text{供水量} < \text{需水量}) \quad (\text{式 2-7})$$

(二) 系統回復性 (Res)

如式 2-3 之描述，可將該式改寫為如式 2-8。

$$\text{Res} = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (\text{式 2-8})$$

其中， $d(j)$ ：發生缺水之時間長度；

M ：發生缺水之次數。

相對於系統回復性，系統不可回復性(Non-Resiliency, NRes)可定義為如式 2-9。

$$\text{NRes} = 1 - \text{Res} \quad (\text{式 2-9})$$

(三) 系統易損性 (Vul)

由於易損性可解釋為系統於操作過程產生失敗之嚴重程度，為增加指標之可用性，Jinno et al. (1995)將式 2-4 簡化，其中發生事件之機率 $e_1 = e_2 = \dots = e_j = 1/M$ ，其表示如式 2-10。

$$\text{Vul} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Fr(j) \quad (\text{式 2-10})$$

其中， M ：發生缺水之次數；

$Fr(j)$ ：發生第 j 次缺水之缺水率。

(四) 綜合評估指標(Comprehensive Evaluation Index, CEI)

為統一描述系統評估之負向指標，本研究亦將式 2-2、式 2-8 與 2-10，利用線性加權之方式，建立綜合性評估指標(CEI)如式 2-11，亦可將式 2-11 轉換為如式 2-12。

$$\text{CEI} = a*(1 - \text{Rel}) + b*(1 - \text{Res}) + c*\text{Vul} \quad (\text{式 2-11})$$

$$= a*\text{NRel} + b*\text{Nres} + c*\text{Vul} \quad (\text{式 2-12})$$

其中， a , b , 與 c 為一常數係數，且 $a + b + c = 1$ 。

第三章 研究區域概述

本研究探討都會區雨水貯集系統對民生用水中之沖廁用水替代性，因此研究中選用台北市都會區與台南都會區作為例証。

3-1 區域簡介

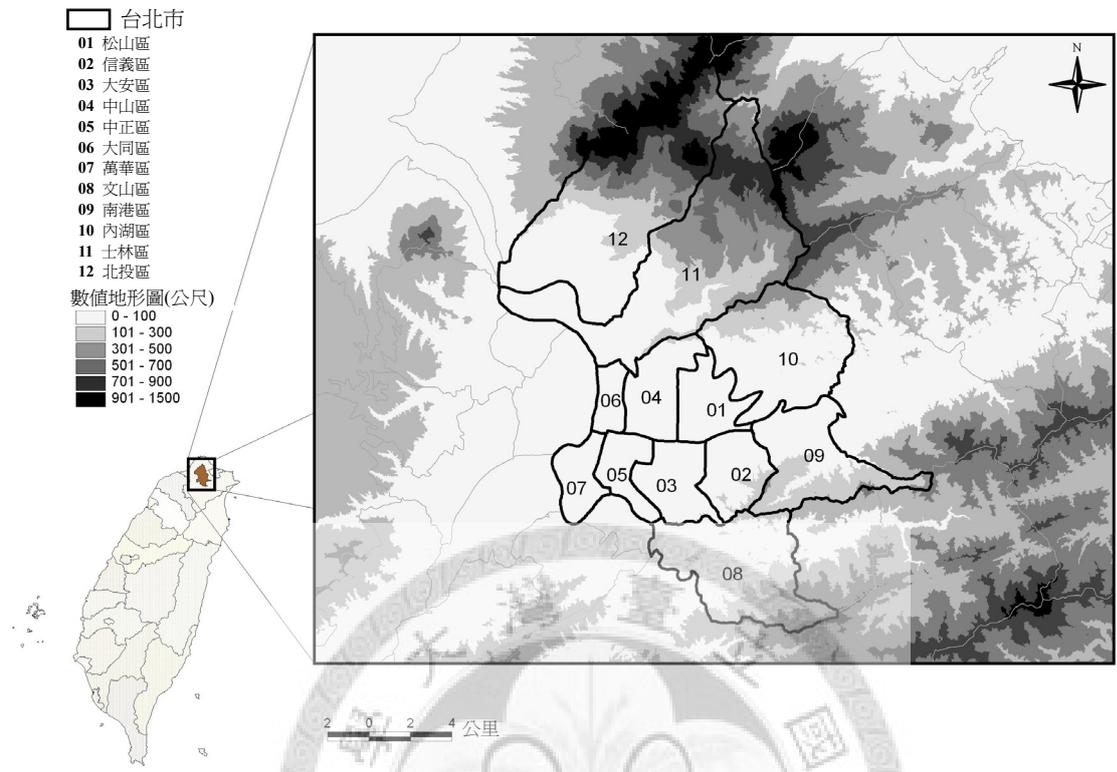
一、區域位置

台北市位於台灣北部的台北盆地，四周均與台北縣接壤，是台灣人口最多的城市，也是台灣政治、文化、商業與傳播等的中心。台北市在台灣經濟體系中，扮演金融、媒體、電信營運中心的關鍵性的角色。產業方面，隨著經濟快速發展、隨著高所得而來的高消費能力及產業結構變遷，統稱為服務業的第三級產業佔台北市整體產業比重近達九成。其中包含批發、零售、貿易、餐飲、金融服務、運輸倉儲、通信、工商服務等。服務業的盛行，讓台北市成為一座生活必需品相當容易取得的城市。統一超商資源整合群總經理曾說：「台北市有一個世界級的特色，就是便利商店密度世界第一名」。

台北市中心區域位於臺北盆地底部，大屯火山群（休眠火山）位於市區北邊與台北縣接壤處，整個山系於市區內大致向南延伸並趨緩，直抵圓山、大直與內湖等地，是台北市境內最大的山系；最高的七星山為 1,120 公尺，次高的大屯山為 1,092 公尺，山系中心地帶與北投側的外緣地帶有不少火山地形。市區東邊的內湖、南港與南邊的木柵多為丘陵地形；標高約 300 多公尺的南港山系（拇指山系）則橫互於信義、南港兩區之間，台北市位置如圖 3-1 所示。

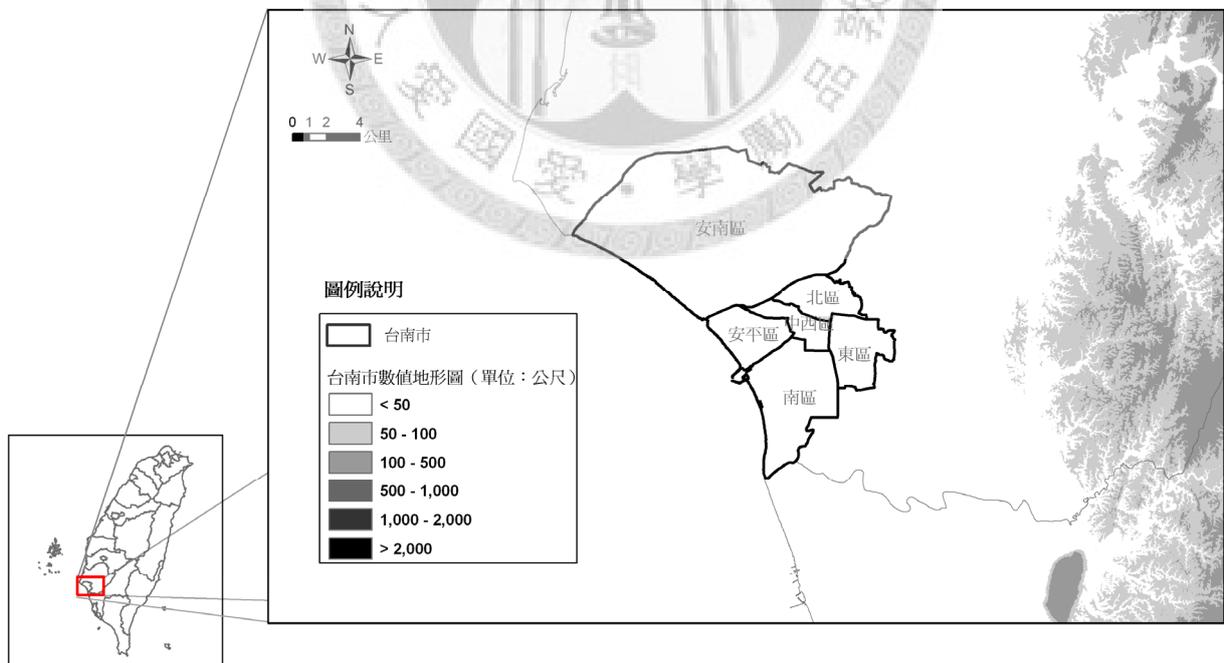
台南市位於台灣西南濱台灣海峽，地處嘉南平原。以人口而言是台灣第四大城市，計約 76.9 萬人，也是台灣五個市之一，亦為百萬人口的臺南都會區之中心都市與南部教育及文化中心。台南市位於嘉南平原，地勢低且平緩。與鄰近台南

縣也沒有明顯分界，市區也擴張至市境以外，組成百萬人口之都會區。全境海拔 10~30 公尺間，最高點海拔不超過 40 公尺。台南台地位於市區東部，為一孤立之橢圓形切割台地，北界有曾文溪、南端有三爺宮溪，於台南縣永康市六合里附近之台地稱橄欖山，東側以明顯的台地崖與大灣低地相接，西方則逐漸降低，而移化為安平平原。地長軸約 12 公里，東西寬 4 公里餘，臺地本稜線均維持在海拔 25~30 公尺的高度，最高點在臺南縣永康市網寮、第一公墓一帶，海拔達 40 公尺；因台南台地目前已開發，對地形的破壞則極大。相較之下，天然河川的切割度甚小，流量也不豐，多已成為道路下的排水道。大灣低地位於臺南臺地東邊，大部分屬臺南縣永康市境，西緣以明顯的南北向臺地崖與臺南臺地相接，其長度約 12 公里半，寬約 3 公里，標高大部分在 10 公尺以下。由於聚落的開發大灣低地與台南台地的分界處已漸模糊。安平平原位於台南市西部濱海處，為新近隆起的海岸平原，平原高度均維持在海拔 2~3 公尺左右，並成為曾文溪三角洲一部分。此區在荷治時期仍為台江內海潟湖，外緣有細長的鯤鯨形砂嘴，之後潟湖逐漸成為海埔新生地，今已為台南新市政中心所在地。台南都會區如圖 3-2 所示。



資料來源：台北市政府(2005)與本研究整理

圖 3-1 台北市位置圖



資料來源：台南市政府(2005)與本研究整理

圖 3-2 台南市位置圖

二、河川

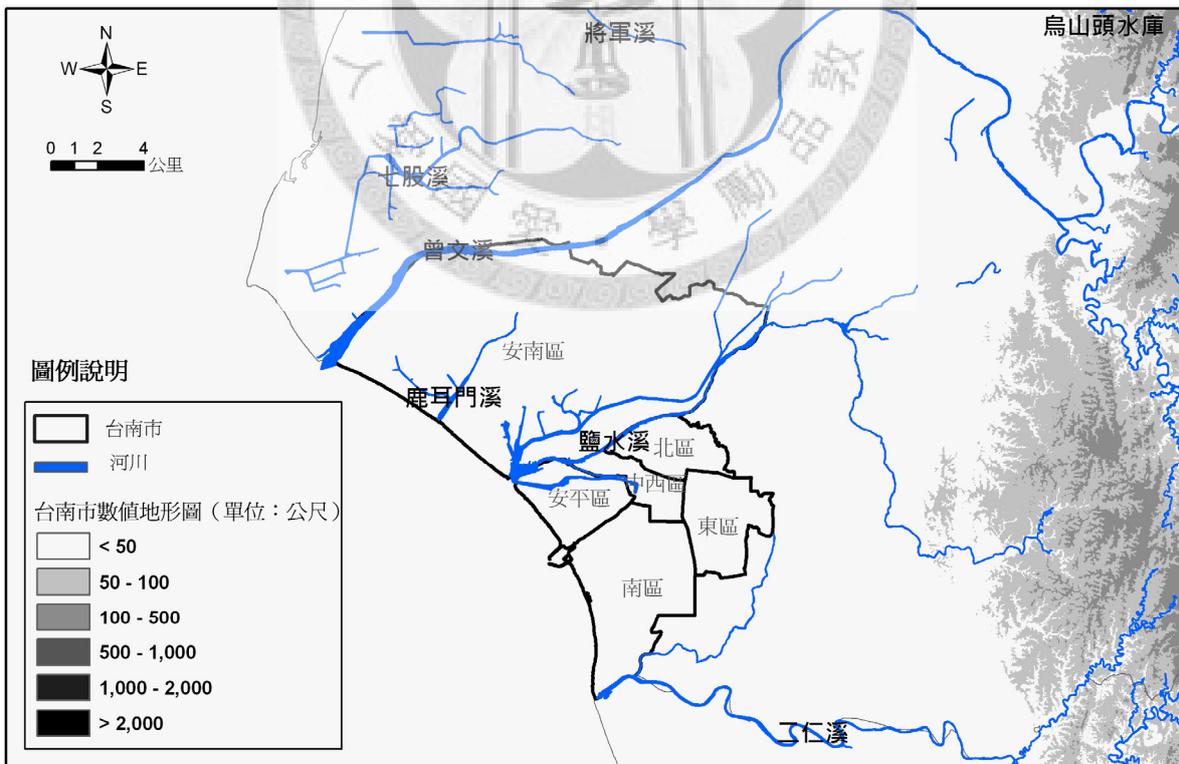
台北市境內的河流絕大部分屬於淡水河流域，淡水河的支流新店溪自台北盆地的南邊流入，與其支流景美溪合流後，形成台北市西南方與台北縣的自然邊界。河道向西北蜿蜒流經景美、公館、古亭等地，至萬華附近與大漢溪合流後，始稱為淡水河。此後向北流經大稻埕、社子，至關渡附近與支流基隆河會合前，亦形成台北市西方與台北縣的自然邊界。基隆河自盆地東北邊流入，經南港、松山、內湖、士林、北投等地，橫貫台北盆地的北半部。過去因河道極為彎曲，每遇大雨常有水患，因此在南港至士林間的部分河道實施過截彎取直工程。景美溪係由盆地東南邊流入，橫貫文山區後於景美注入新店溪。另有發源於盆地北側山區的磺溪、外雙溪等河流，匯集後注入基隆河，台北市河川流域分佈如圖 3-3。

台南市重要河川有曾文溪、二仁溪、鹽水溪和普通河川鹿耳門溪、日新溪，還有德慶溪、福安坑溪、竹溪、柴頭港溪等天然排水幹線，台南市河川流域分佈如圖 3-4。其中曾文溪、二仁溪各為台南市北、南天然市界。由於地勢東高西低，河川均自東向西流入台灣海峽。另外，南台灣夏雨集中，河川水量隨季節差別極大。冬日常見巨石礫礫，夏日則黃水滾滾。台南市大型湖泊不多，較著名為台南公園內之燕潭與巴克禮紀念公園內之夢湖，赤崁樓以西為昔時台江內海所在，今因泥沙淤積而成小湖泊或溼地，如四草湖、鯤鯓湖等，及安南區、安平區與南區內的許多魚塢，是其他省轄市所難見到之景觀。台南運河位於台南市五期重劃區，初期航行尚稱便利，惜當時規劃不週，安平港出口泥沙日漸淤塞，航運功能漸失，爾後家庭或工廠污水都排入運河之中，成為今日之污臭，現在正重新規劃整治中。



資料來源：經濟部水利署(2007)與本研究整理

圖 3-3 台北盆地河川流域圖



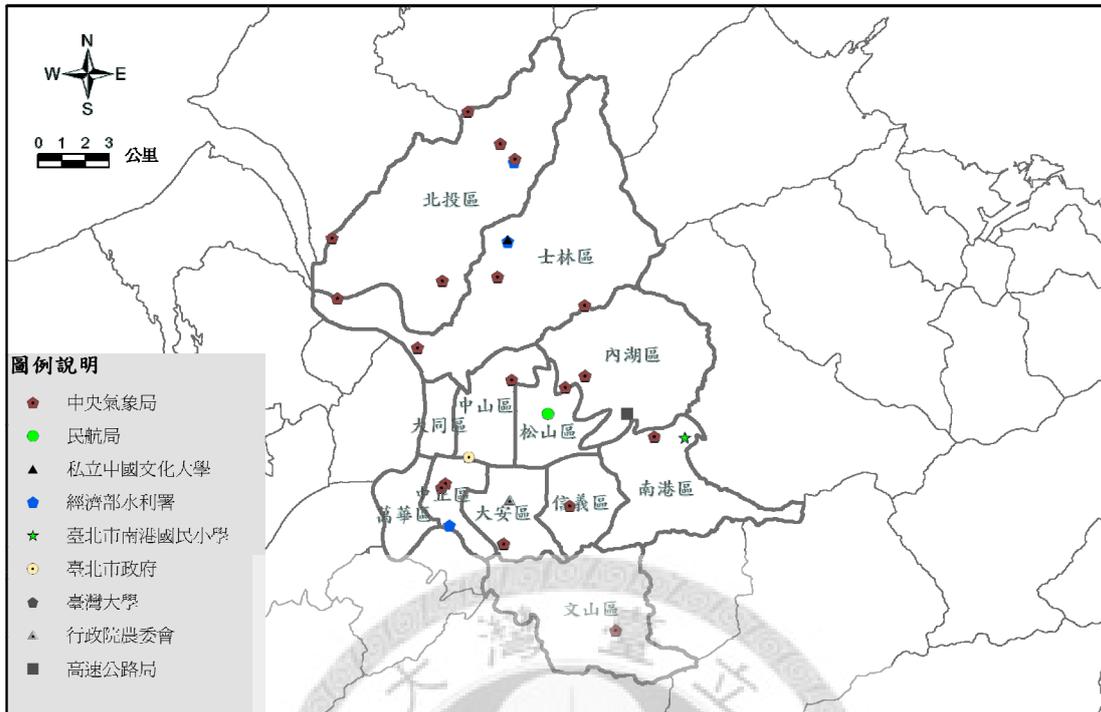
資料來源：經濟部水利署(2007)與本研究整理

圖 3-4 台南都會區河川流域圖

3-2 氣候與降雨狀況

台北市位於北緯 25 度線附近，又因在海島上，地處東亞大陸與太平洋之間，深受乾冷的蒙古高氣壓與暖濕的太平洋高氣壓交互影響，形成了副熱帶季風氣候。四季變化明顯，通常 3~5 月為春季、6~8 月為夏季、9~11 月為秋季、12 月~次年 2 月為冬季。有時受到全球暖化或特殊的氣候變化影響，也會出現較暖和的冬天，或是較冷的春天（如 2005 年 2~3 月蒙古高氣壓帶來的強烈冷氣團，使得台北的溫度少見地降至攝氏 5.6 度，鄰近台北的淡水更出現攝氏 3.9 度的低溫）。由於位在東亞季風帶內，因此氣候也受東北季風（冬季由東北方吹來含有許多水氣的季風，此風也是在冬季帶給台灣北部降水的主要來源）影響。也因為有東北季風的影響，才不致使淡水河有因水量不足而斷流的問題。另外還有一個特殊的氣候特徵，由於市區主要位於台北盆地中，氣候也深受盆地地形影響。夏季由於盆地周圍的高山而不易使熱氣排出，使得市內的氣溫通常較周圍的地區高出攝氏 1~2 度。進入冬季後，市區周圍的山地與丘陵地較容易形成地形雨。每年 5 月前後，由於蒙古高氣壓與太平洋高氣壓交會形成鋒面，使得台灣進入梅雨季節，此時台北的降雨天數也會增加。夏季也經常會因為上升氣流旺盛，形成午後雷陣雨。

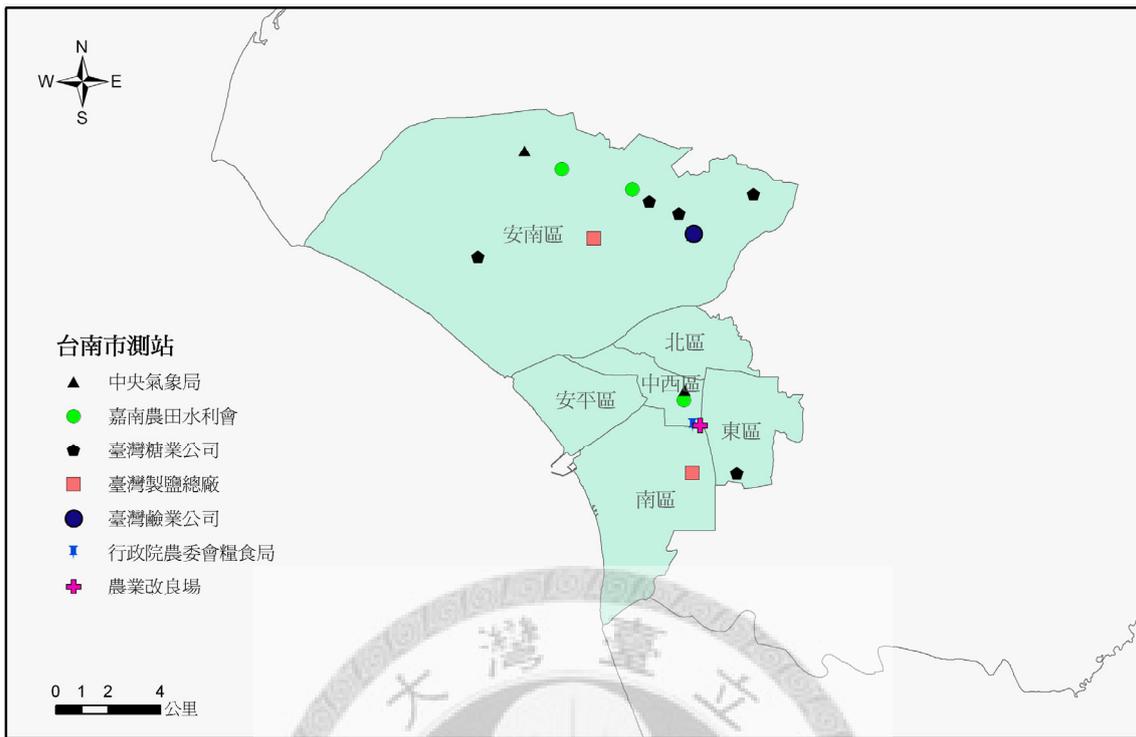
目前在台北都會區內約有 30 處之氣象站與雨量站（如圖 3-5），其中雨量站有 11 站、氣象站數有 17 站及 2 處農業氣象站，其隸屬主管機關有經濟部水利署、中央氣象局、農委會農業試驗所及學校機關等(中央氣象局 1995)。



資料來源：中央氣象局(1995)與本研究整理

圖 3-5 台北市雨量站分佈圖

台南市地處北迴歸線之南，屬亞熱帶氣候與熱帶氣候的過渡帶，亦受季風影響。全年平均氣溫 23.8°C ，最冷月（1月）及最熱月（7月）平均溫度為 17.1°C 及 29.0°C 。大陸冷氣團南下侵台時，降至 10°C 以下亦不罕見。受季風及地形影響，降雨乾濕季分明，雨量多集中於夏季，主要因鋒面及季風影響，佔全年降雨量 80% 以上，且西南季風盛行，及對流作用，午後易生局部性對流雨。夏季為颱風易發生時期，冬季水氣不足南部則為旱季，年平均降雨量約 1570 公釐，降雨日數平均全年約有 94 日，8 月即佔約 16.2 日。目前在台南市內約有 16 處之氣象站與雨量站，如圖 3-6 所示。



資料來源：中央氣象局(1995)與本研究整理

圖 3-6 台南市測站分佈圖

第四章 水資源供需分析與推估

4-1 供給面推估

雨水為雨水貯集系統唯一的來源，本研究首先針對研究區內之雨量站選定，主要考量原因如下：

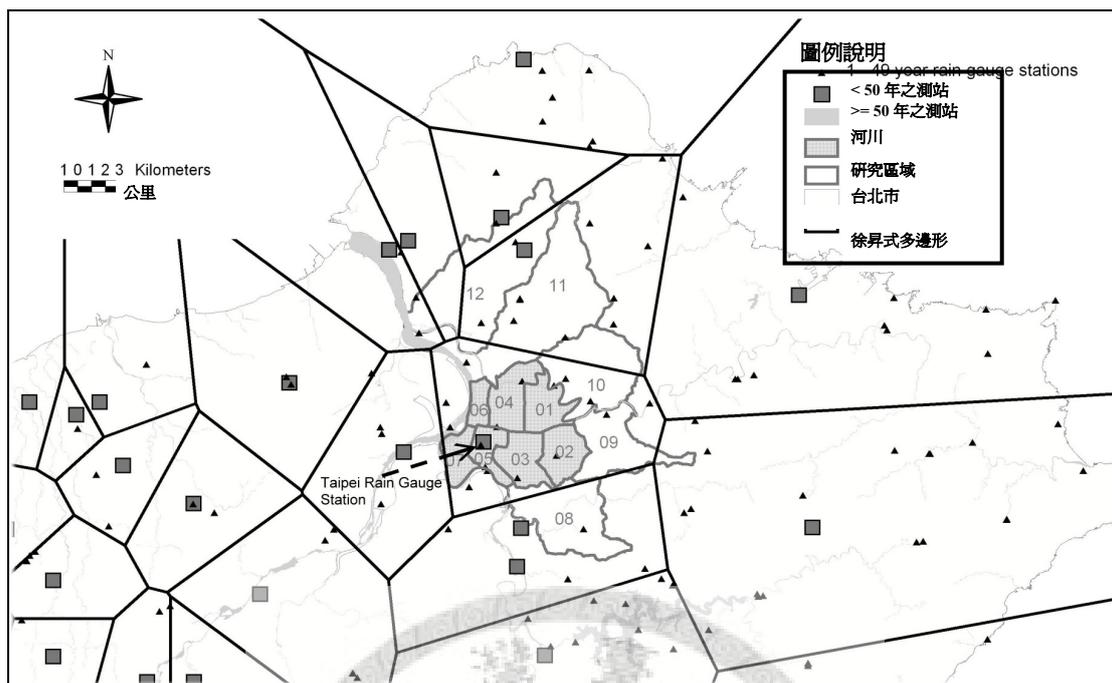
一、雨量記錄長度

縱觀區域之雨量長度約 5 年至 100 年不等，其中約有一半以上（台北：17/30；台南：10/16）之雨量站與氣象站之記錄長度低於 20 年，低於 20 年之雨量站或氣象站多座落於學校機關或為新興之測站處，此種紀錄資料無法充分呈現區域之降雨特性，因此研究中決定雨量記錄長度必須超過 50 年以期能充分展現區域之長期降雨特性(Liaw and Tsai 2004)。

二、考量測站空間分布位置

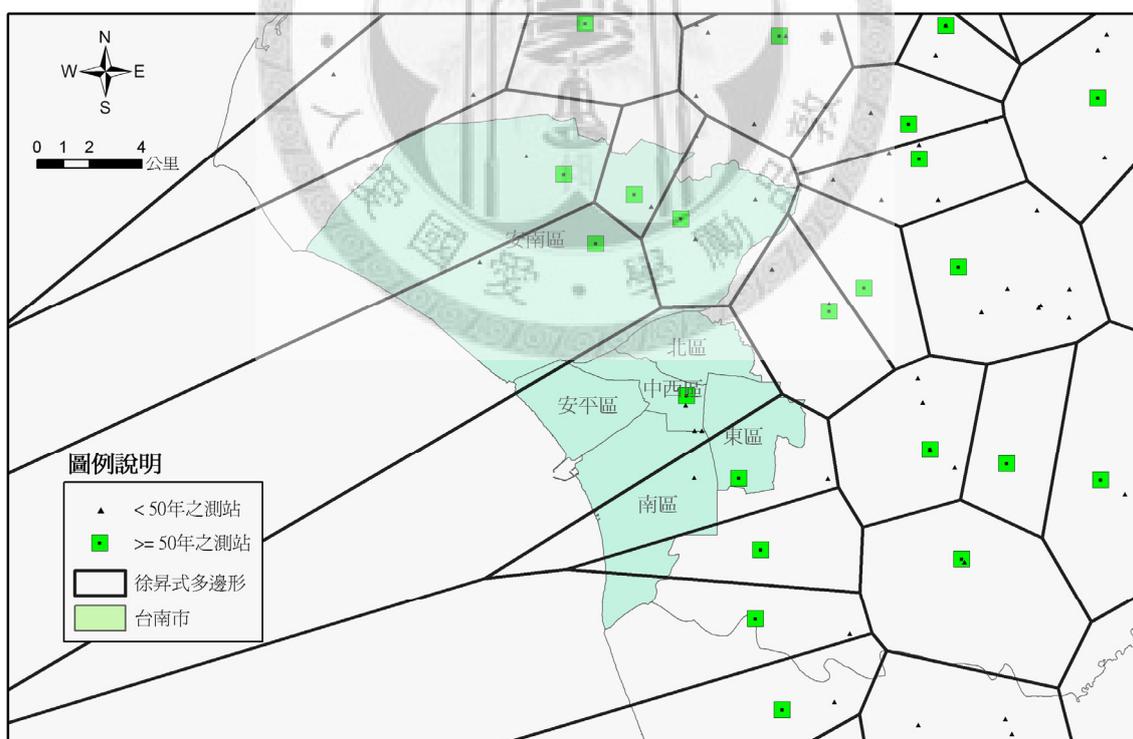
雨量在空間是呈現連續分布，故應研討研究區附近之測站資料可否完整代表區域之降雨型態，其中需要考量測站位置離研討區之距離與測站之座落高程。當測站距離甚遠，降雨變異程度增加；反之，距離較近，所造成之變異偏小(Wung et al. 2006)。

根據上述兩項準則，評估研究區域內之氣象站、雨量站位置及雨量紀錄長度，其中台北市之台北氣象站(466920)、粗坑(41A090)與竹子湖 (466930)；台南市之台南氣象站(467410)、公塹(11N030)與安南(11N020)雨量站、台南鹽場雨量站(60N080)、台灣糖業公司所屬和安(51N040)與糖業研究雨量站(52N110) 記錄長度皆超過 50 年。再依據雨量記錄超過 50 年之雨量站進行高程分析，應用徐昇多邊形法(Thiesson polygons method)繪製各雨量站之含括範圍(如圖 4-1 與 4-2)，依據上述結果，本研究選定台北氣象站與台南氣象站之雨量資料做為模式輸入條件。



資料來源：中央氣象局(1995)與本研究整理

圖 4-1 台北雨量測站之徐昇多邊形空間分布圖



資料來源：中央氣象局(1995)與本研究整理

圖 4-2 台南雨量測站之徐昇多邊形空間分布圖

研究中之雨量站資料乃是採用 1953 至 2002 年之資料做為系統輸入，其中台北年平均降雨量為 2,215 mm，標準偏差為 519 mm，年降雨量之變異如圖 4-3 所示。圖 4-3 結果顯示，台北氣象站 1998 年的累積雨量因受到 1997-1998 年世紀超級聖嬰及隨後反聖嬰現象的影響而高達 4,405 mm，為平常年雨量的二倍多。平均月降雨量為 185mm，其中將近 55 %雨量集中於六月至九月；九月平均降雨量 311 mm 為最多，平均月降雨量分布如圖 4-4 所示。台南年平均降雨量為 1,558 mm，標準偏差為 477 mm，年降雨量之變異如圖 4-5 所示。平均月降雨量為 130 mm，其中將近 87 %雨量集中於五月至九月；八月平均降雨量 371 mm 為最多，平均月降雨量分布如圖 4-6 所示。整體而言，降雨於時間之分布不均，乾濕季之雨量差異甚大，突顯水資源蓄存不易，理應可透過雨水貯集系統方式收集雨量以備不時之需求。

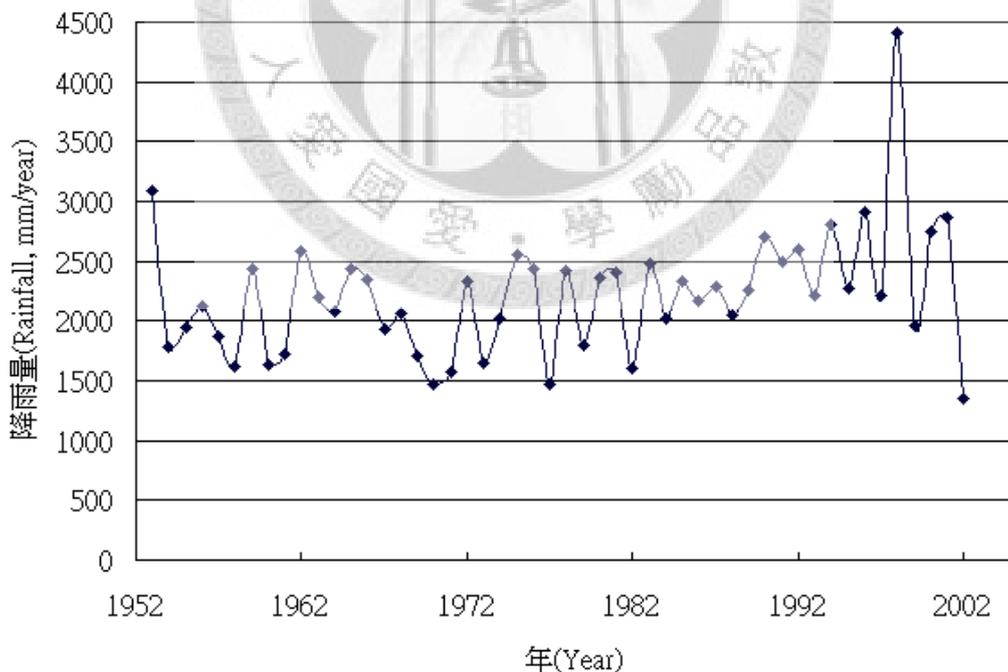


圖 4-3 台北氣象站年降雨資料

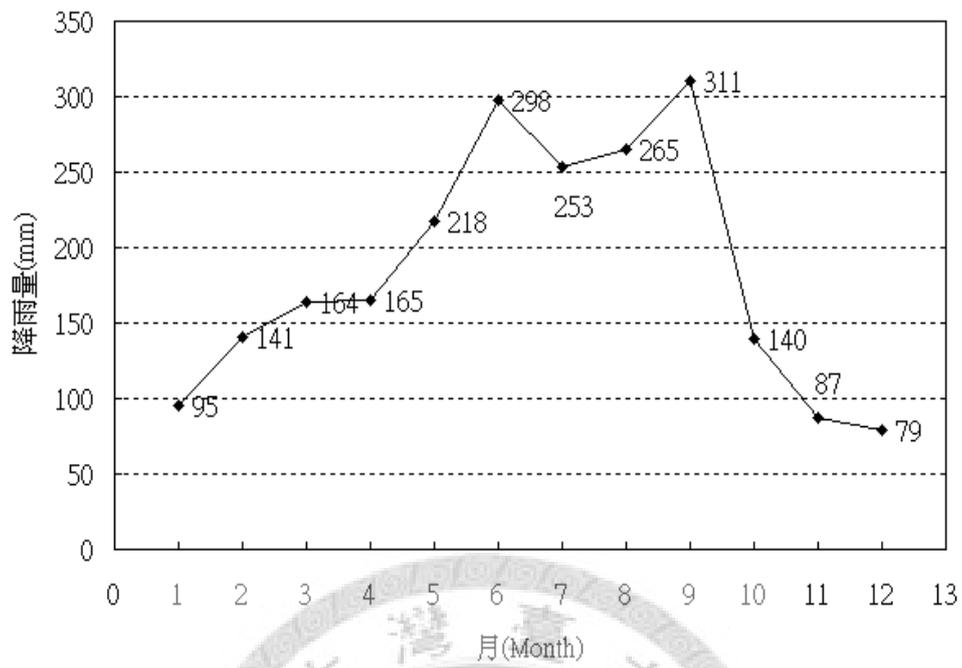


圖 4-4 台北氣象站平均月降雨分布

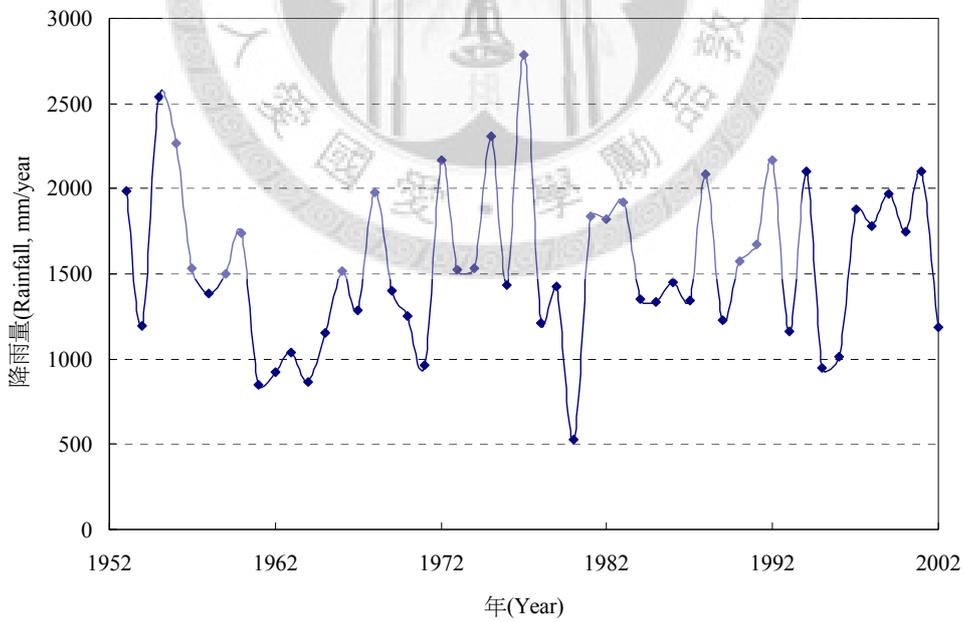


圖 4-5 台南氣象站年降雨資料

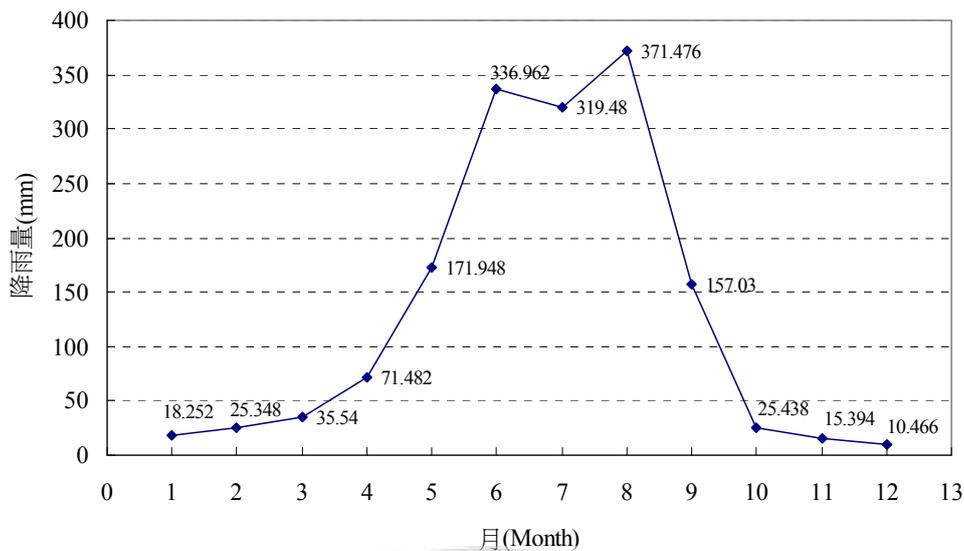


圖 4-6 台南氣象站平均月降雨分布

4-2 用水需求面推估

一、區域選定準則

首先將台北市與台南市各區域與數值地形圖(DTM)套疊後進行高程分析，在估算各區之平均高程（如表 4-1）後，得知台北市之松山區、信義區、大安區、中山區、中正區、大同區與萬華區之平均高程多低於 100 公尺，屬地勢較平坦之區域；台南市位於台灣嘉南平原之腹部，全市地勢平坦，由東而西略呈緩斜，平均高程皆低於 25 公尺。除高程分析外，本研究並針對台北與台南都會區之建物進行區域分析，根據 2005 年台北市政府與台南市政府地政處建物統計資料（台北市政府 2005；台南市政府 2005）得知各區之建物棟數與區域面積，進而推算單位面積之建物棟數，其結果彙整如表 4-1。由表中得知單位面積之建物棟數(第 6 欄)，其中台北市最高區域為中正區，其次為大同區、大安區、萬華區、信義區、松山區、中山區；台南市單位面積之建物棟數較台北市低，以中西區之 7.27 密度最高，其次為東區之 5.30。

本研究透過區域高程分析與單位面積之建物棟數做為判定都會區之簡易指

標，並配合雨量站徐昇式多邊形套疊結果，因此本研究選定台北市之松山區、信義區、大安區、中山區、中正區、大同區與萬華區等七區以及台南市中西區為研究區域。

表 4-1 研究區域各區地理條件之資料

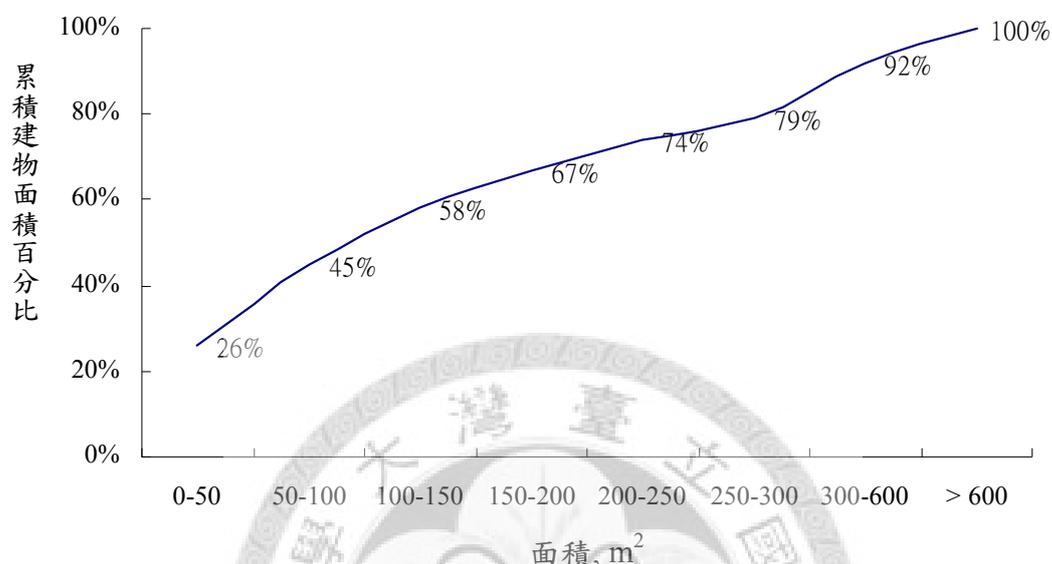
區域位置 Location	區域名稱 Township	平均高程 Elevation (m)	區域面積 (1) Area, ha	建物數 (棟) (2) Buildings	單位面積之建物棟數 (1) / (2) Buildings / Area (ha)
台 北 市	松山區	4.3	929	6,000	6.46
	信義區	81.9	1,121	10,190	9.09
	大安區	46.3	1,136	14,229	12.52
	中山區	42.3	1,368	10,908	7.97
	中正區	8.2	761	12,115	15.93
	大同區	3.7	568	7,386	13.00
	萬華區	4.4	885	9,966	11.26
	文山區	144.4	3,151	10,183	3.23
	南港區	135.6	2,184	4,784	2.19
	內湖區	115.8	3,158	8,365	2.65
	士林區	378.1	6,237	18,743	3.01
北投區	444.1	5,682	16,160	2.84	
台 南 市	東區	23.08	1,342	7,119	5.30
	南區	6.64	2,727	4,799	1.76
	北區	8.39	1,043	6,186	5.93
	安南區	1.65	10,720	12,457	1.16
	安平區	0.43	1,107	2,097	1.89
	中西區	5.51	626	4,551	7.27

資料來源：台北市政府(2005)、台南市政府(2005)與本研究整理

二、建物屋頂面積

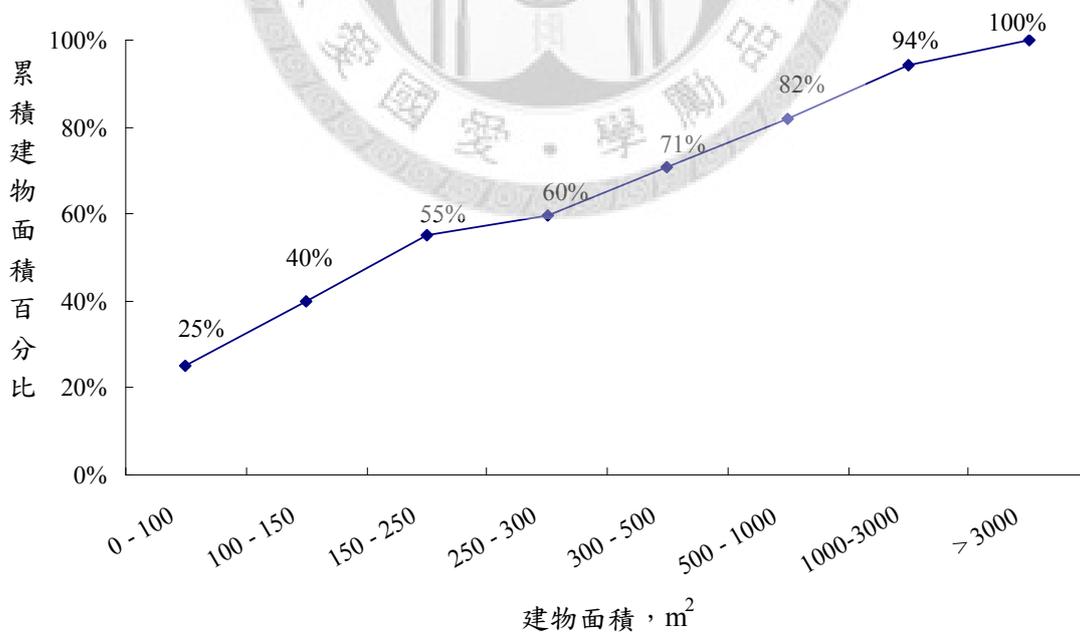
依據 2005 年台北市政府與台南市政府地政處建物統計資料 (台北市政府 2005；台南市政府 2005)，台北市與台南市建物面積統計資料如圖 4-7 與圖 4-8 所示，其中資料顯示台北市研究區域內有 58%的建物面積未達 150 平方公尺；台南

市則有 55%的建物面積小於 250 平方公尺。因此本研究分別以 150 平方公尺與 250 平方公尺做為台北市與台南市建物面積大小之判斷值，用此面積大小視為單一建物屋頂雨水收集面積。



資料來源：台北市政府(2005)與本研究整理

圖 4-7 台北都會區建物面積統計表



資料來源：台南市政府(2005)與本研究整理

圖 4-8 台南市中西區建物面積統計表

在得知單一建物屋頂面積，其每日雨水收集量為日降雨量與建物屋頂面積之乘積，其計算式如式 4-1。

$$V_i = P_i / 1000 \times A \quad (\text{式 4-1})$$

其中， V_i ：可收集之雨水體積(m^3/day)；

P_i ：日降雨量(mm/day)；

A ：屋頂面積(m^2)。

三、沖廁用水量推估

經由台北市政府(2005)與台南市政府(2005)得知各行政區建物棟數之平均人口數如表 4-2 所示，資料顯示台北市之松山區、信義區、大安區、中山區、中正區、大同區、萬華區等各區，其每棟建物平均人口數依序為 34.82 人、22.67 人、22.08 人、20.01 人、13.09 人、17.20 人與 19.50 人，利用上述資料估算研究區域內之平均值，得每棟建物人口數約為 21.34 人，視為每棟建物之人口數；台南市之中西區每棟建物平均人口數為 17.85 人。

表 4-2 研究區域各區建物之平均人口數

區域位置 Location	區域名稱 Township	建物棟數 (1) Buildings	人口數 (2) Persons	單位建物之人口數 (2)/(1) Persons/Building
台北市	松山區	6,000	208,893	34.82
	信義區	10,190	230,986	22.67
	大安區	14,229	314,112	22.08
	中山區	10,908	218,277	20.01
	中正區	12,115	158,607	13.09
	大同區	7,386	127,007	17.20
	萬華區	9,966	194,313	19.50
	文山區	10,183	260,350	25.57
	南港區	4,784	112,715	23.56
	內湖區	8,365	263,560	31.51
台南市	士林區	18,743	287,985	15.36
	北投區	16,160	248,952	15.41
	東區	7,119	193,764	27.22
	南區	4,799	127,750	26.62
	北區	6,186	128,314	20.74
	安南區	12,457	174,309	13.99
	安平區	2,097	59,275	28.27
	中西區	4,551	81,246	17.85

資料來源：台北市政府(2005)、台南市政府(2005)與本研究整理

本研究中沖廁用水推估乃依據工業技術研究院節水服務團(黃金山等 2003)分析之結果，台灣每人每日用水量為 250 公升，其中沖廁用水所佔之比例為 20%，即為 50 公升。於研究區內每棟建物每日沖廁需水推估量為每棟建物之平均人口數與每人每日沖廁用水量之乘積，亦即：

$$\text{台北都會區：} (21.34 * 50) / 1000 = 1.07 \text{ (m}^3\text{/day)}。$$

$$\text{台南都會區：} (17.85 * 50) / 1000 = 0.89 \text{ (m}^3\text{/day)}。$$

4-3 供需模式

本研究主要探討不同貯水容量之缺水率的機率密度函數(Probability density function, Pdf)關係，並以用水調配原則為基準下，當供水量大於需水量之際，則完全滿足需水量，即調配系統之放流量與需水量相等，反之，放流量為可提供之最大供水量，藉由系統模擬方式進行不同貯水容量之缺水率分析，採用水資源之質量平衡(Mass-balance)，將歷史之降雨記錄視為模式輸入條件，模擬推估潛在的貯水容量(Potential Storage)所對應之缺水程度；最後模擬結果應用於機率模型上，建立對應之缺水率的機率密度函數，可展示缺水率的機率分配關係，從中建立貯水容量與缺水率等關係，冀以展示缺水程度之變異。

因貯集系統最主要是蓄存降雨量，當貯水容量漸增時，可收集之水量越多，但是過大之貯水容量未必會改善系統之缺水程度，且貯水容量與缺水率變化為一連續過程，同時貯水容量大小需要符合長期時程之需，因而建立以年為單位之供需模擬系統，配合 50 年之歷史降雨量資料，進行模擬，其模擬過程如圖 4-9。

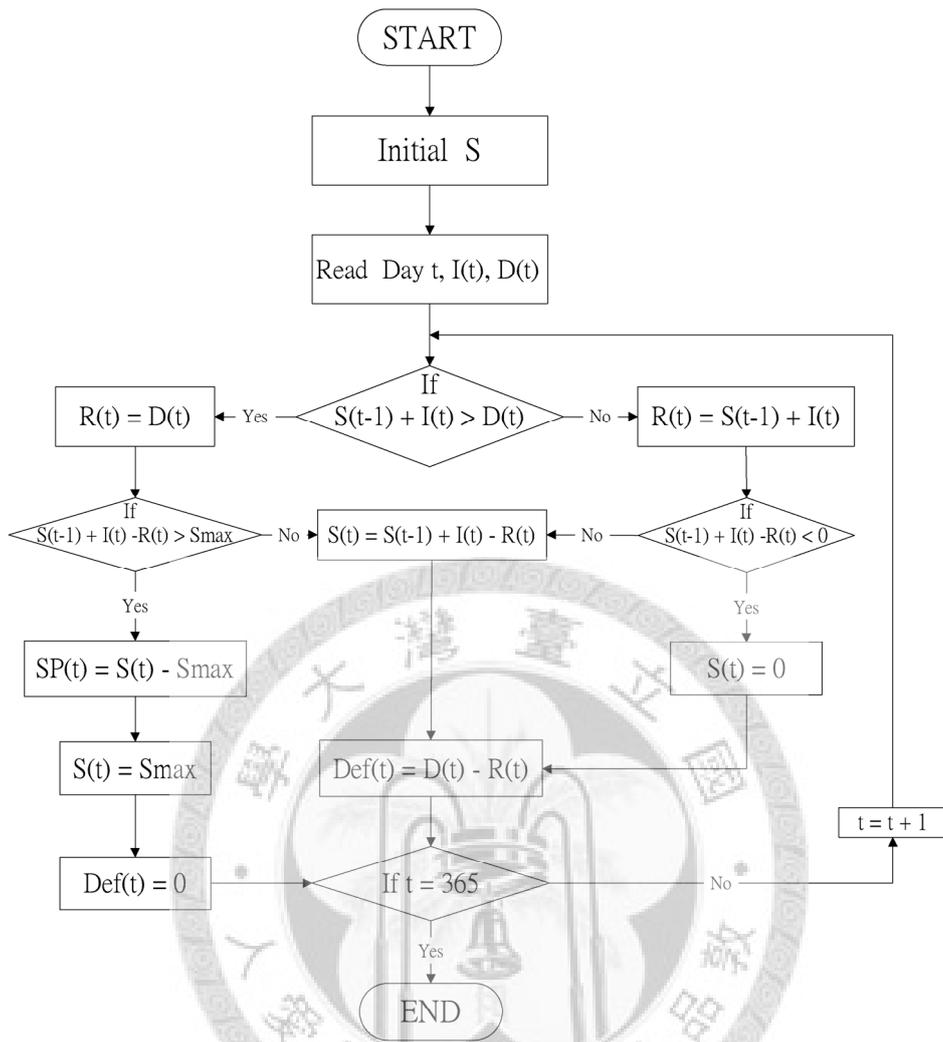


圖 4-9 模擬流程圖

利用歷史雨量資料與需水量來模擬貯水系統之長時間變化，作為雨水貯水容量之設計依據。本研究主要是討論貯水之雨水對家庭沖廁用水之替代可行性，降雨量資料被應用在模擬貯水容量大小，隨著整個降雨的隨機分配，利用模擬方法模擬水量連續方程式。關於模擬系統中所應用之貯水容量連續方程(如式 4-2)與相關之判斷式(如式 4-3 與式 4-4)：

$$S_t = \begin{cases} S_{MAX} & \text{If } SP_t > 0 \\ S_{t-1} + I_t - R_t & \text{If } SP_t \leq 0, \text{ 滿足供水} \\ 0 & \text{If } SP_t \leq 0, \text{ 無法滿足供水} \end{cases} \quad (\text{式 4-2})$$

其中， S_t ：t 時刻之貯水槽容積； R_t ：t 時刻之放流量；
 I_t ：t 時刻之入流量； SP_t ：t 時刻之溢流量；
 S_{Max} ：最大貯水容量。

在連續方程式中，降雨量為入流資料；放流量與溢流量則為出流資料。因集水面積小，故本研究中並無考量蒸發散量與逕流損失量。放流量依據準則包括：(1) 當入流量與前期之貯水量總和高於需求量，則滿足需求量，此時放水量等於需求量；(2) 當入流量與前期之貯水量總和低於需求量，是無法滿足需求量，基於滿足最大需求之目標，故此時之放水量為總水量。數學式描述如式 4-3：

$$R_t = \begin{cases} D_t & \text{If } I_t + S_{t-1} \geq D_t \\ I_t + S_{t-1} & \text{If } I_t + S_{t-1} < D_t \end{cases} \quad (\text{式 4-3})$$

其中， D_t ：t 時刻之需水量；
 R_t ：t 時刻之放流量；
 I_t ：t 時刻之入流量。

溢流量之判斷，則是考量當時間 t 時經供水後之剩餘水量是否大於設計容積，進而判斷是否有溢流量產生。溢流容積則是供水後之剩餘水量與設計之最大貯水容量差值；反之，t 時期經供水後之剩餘水量小於設計容積，則無溢流量產生，其數學式描述如式 4-4：

$$SP_t = \begin{cases} I_t + S_{t-1} - D_t - S_{MAX} & \text{IF } I_t + S_{t-1} - D_t > S_{MAX} \\ 0 & \text{IF } I_t + S_{t-1} - D_t \leq S_{MAX} \end{cases} \quad (\text{式 4-4})$$

模擬用水情況，在系統效率描述上，可使用缺水率作為評斷之指標。缺水率(DR)可定義為缺水量(Def)與總需水量(D)的比值，其中缺水量為供水量無法滿足需求量

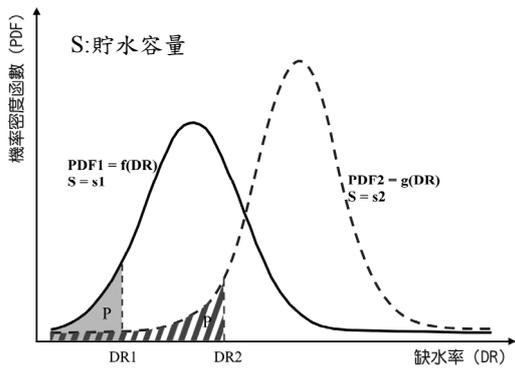
之差值，總需水量乃指全部之需水量總和，該數學描述如下(式 4-5)：

$$DR = \frac{\sum Def}{\sum D} \quad (\text{式 4-5})$$

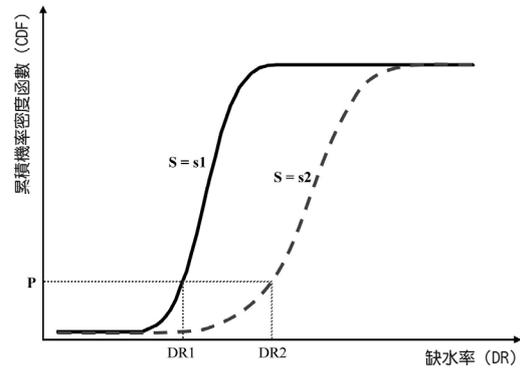
4-4 機率模型

經由前述得知不同貯水容量，會造成缺水率呈現某種分布，如常態分布 (Rahman and Yusuf 2000; Surendran et al. 2005)。透過機率分布方式，則可描述貯水容量對缺水率之變異情況，其貯水容量與缺水率間機率分布概念如圖 4-10 所示。藉由不同貯水容量之模擬結果，可建立各貯水容量下缺水率之機率密度函數(Pdf)圖(如圖 4-10(a))，其橫軸為缺水率；縱軸為機率密度函數。再者，透過曲線下之面積積分方式，可得不同貯水容量下的缺水率之累積機率分布曲線圖(如圖 4-10 (b))，此橫軸為缺水率；縱軸為累積機率。其後，透過累積缺水率之機率分布圖，建立各貯水容量之超越機率曲線(Exceedance Probability, EP)曲線(如圖 4-10 (c))，俟其不同貯水容量下缺水率之超越機率曲線建立完成，根據不同超越機率情形，建立缺水率-貯水容量之關係曲線(如圖 4-10 (d))，即描述基於可接受之超越機率情形下，掌握缺水率與貯水容量兩者關係，得知橫軸為貯水容量；縱軸為缺水率。

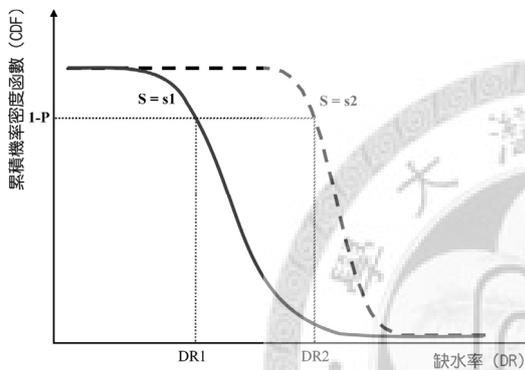
除利用機率方式描述貯水容量與缺水率間之關係，本研究亦針對不同系統評估指標，依據上述之方法，依序建立供水可靠度-貯水容量、供水回復度-貯水容量供水易損度-貯水容量之超越機率曲線，並建立上述三種指標之綜合評估指標超越機率曲線。



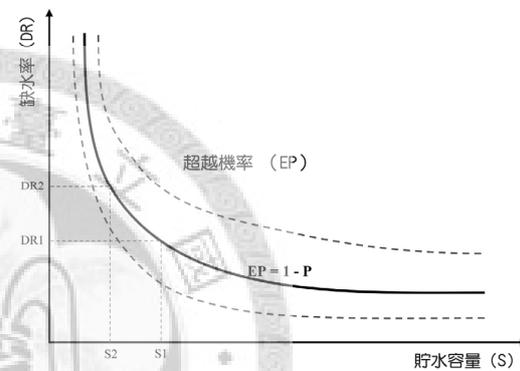
(a)各貯水容量之缺水率機率分布圖



(b)各貯水容量之累積機率分布圖



(c)各缺水率之超越機率曲線



(d)缺水率-貯水容量關係圖

圖 4-10 缺水率與貯水容量之機率分布曲線示意圖

第五章 系統分析

本章將針對本研究所建立之供需調配模式進行不同貯水容量造成之缺水率，逐一分析討論，檢視不同貯水容量所造成不同缺水率與供水系統評估指標之機率密度分佈曲線，從中探討雨水貯水之設計容量。如前章描述，缺水率機率密度函數會呈現某種分布(Jenkins and Lund 2000; Rahman and Yusuf 2000; Panigrahi et al. 2001; Rappold 2005)；依據此一假設，本研究亦針對供水系統評估指標進行機率密度函數之套配。於此，本研究期能將模擬之結果，展示如圖 5-1 所示之貯水容量-缺水率-超越機率三者關係，另外，本研究亦將系統評估指標分析納入討論，讓雨水貯集之系統設計者可以對系統之機率特性有進一步之掌握，協助提升系統設計之效率。

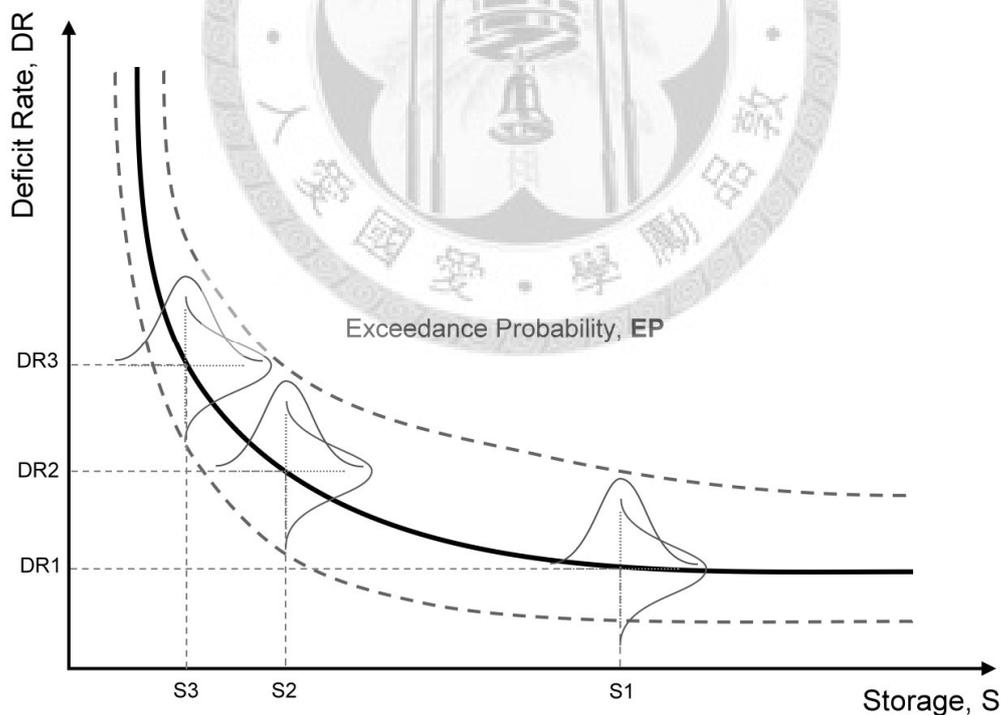


圖 5-1 貯水容量、缺水率與超越機率示意圖

如圖 5-1 中所示，系統平均缺水率之超越機率會隨著系統設計容積增加而降低，但是對每一個貯水容量而言，缺水率事實上應該會呈現某種機率分布。貯水容量與缺水率間關係，建置在以不同超越機率下之連續變化情況，配合統計之分布檢定。

模擬結果發現，不同貯水容量所對應缺水率或系統評估指標之機率函數密度關係，具有含 Weibull、Person5 或常態分布等之連續機率密度函數性質。由於本研究並未針對套配何種機率分布對系統描述之相關研討，因此，本研究中模擬所得之資料則選定常態分布，選定套配之機率分布函數亦均通過卡方檢定(Chi-square test)之適合度檢定(Goodness-of-fit)。

5-1 貯水容量與缺水率分析

研究中利用系統模擬方式，探討在不同貯水容量下之雨水貯集供需情形。文中採用年模式進行逐日模擬研討一年內之缺水率變化，建立缺水率之機率分布曲線，以便瞭解各貯水容量下之缺水率機率分布狀況。研究中先針對 0.5、1、2、5、10、15、20、50、60、90、100 與 150 立方公尺等之貯水容量進行模擬，建立各貯水容量之缺水率機率密度分布曲線，藉由統計方式，檢定各貯水容量下缺水率之機率分布情形。換言之，即針對不同之設計貯水容量下可建立缺水率之機率分布曲線，並以卡方檢定其機率分布套配之適合度。

一、台北都會區

圖 5-2 中顯示，以常態分佈套配不同設計貯水容量下之缺水率分佈均通過卡方檢定，若將圖 5-2 中各機率分布曲線之平均缺水率與缺水率變異彙整如表 5-1，由表中得知貯水容量為 5 立方公尺時，其平均缺水率為 0.5；貯水容量為

20 立方公尺時平均缺水率為 0.32，顯示當貯水容量增大時平均缺水率會逐漸降低，此一結果亦相當合理，但若比較各貯水容量下缺水率之變異數，得知貯水容量 1 立方公尺至 150 立方公尺所產生之缺水率變異數介於 0.04~0.11 之間，雖然提高貯水之設計容積會降低平均缺水率，但缺水率之變異數會隨設計容積之增加而變大，這是因為較大之設計容積雖可收集到較多之雨量，但其貯蓄水量之變異程度亦會增加。



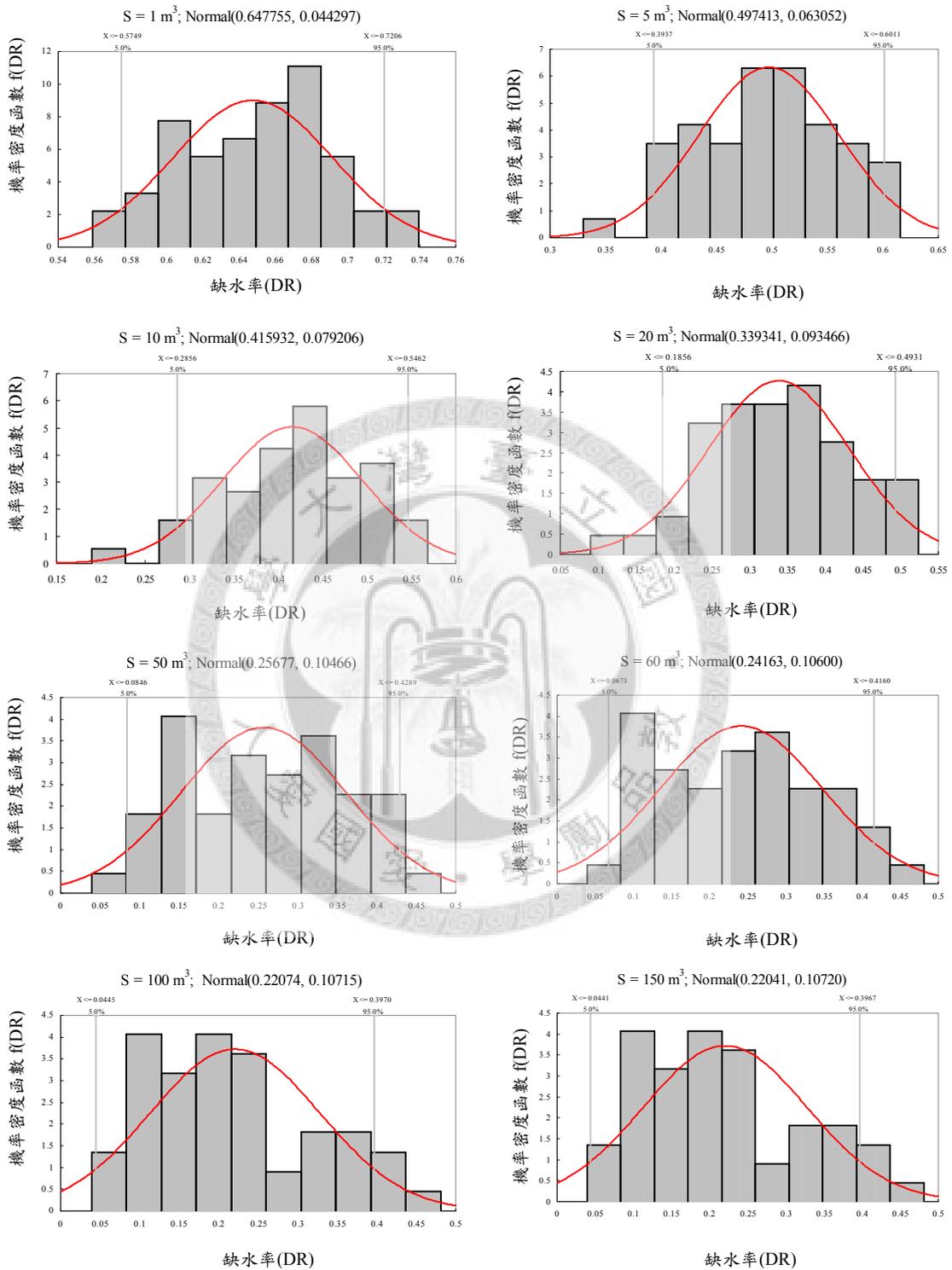


圖 5-2 台北都會區不同貯水容量之缺水率機率分布圖

表 5-1 台北都會區各貯水容量與平均缺水率及變異數之關係

貯水容量 m ³	缺水率		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.65	0.04	0.43
5	0.50	0.06	0.97
10	0.42	0.08	0.87
20	0.34	0.09	0.66
50	0.26	0.10	0.87
60	0.24	0.11	0.37
100	0.22	0.11	0.31
150	0.22	0.11	0.31

表 5-1 顯示，以常態分佈套配不同設計貯水容量下之缺水率分佈透過卡方檢定(Chi-square test)之適合度檢定(Goodness-of-Fit test)。本研究中適合度檢定是假設 $p = 0.05$ 之顯著水準(Significance level)，虛無假設為當 $p \geq 0.05$ 時，接受套配之分佈； $p < 0.05$ 時則拒絕。

二、台南都會區

不同於台北都會區之降雨型態，台南都會區歷史之雨量記錄顯示，豐、枯水期雨量之差異更大。由於台南都會區所選定之台南市中西區，其單位面積之建物數量較台北都會區少（台南：7.27；台北：10.89），但建物屋頂面積大於台北都會區（台南：250 平方公尺；台北：150 平方公尺），所模擬之貯水容量與台北都會區相同，從 0.5 立方公尺至 150 立方公尺。圖 5-3 以模擬貯水容量為 1~150 立方公尺為例，結果顯示以常態分佈套配不同設計貯水容量下之缺水率分佈亦均通過卡方檢定，將圖 5-3 中各機率分布曲線之平均缺水率與缺水率變異彙整如表 5-2，由表中得知貯水容量為 1 立方公尺時，其平均缺水率為 0.76；貯水容量為 150 立方公尺時平均缺水率為 0.28，模擬結果中發現，當設計之貯水容量為 100 立方公尺時，其缺水率即達 0.28。相同於台北都會區之模擬結果，各貯水容量下缺水率之變異數，貯水容量 1 立方公尺至

150 立方公尺所產生之缺水率變異數介於 0.04~0.08 之間，雖然提高貯水之設計容積會降低平均缺水率，但缺水率之變異數會隨貯水容量之增加而變大。

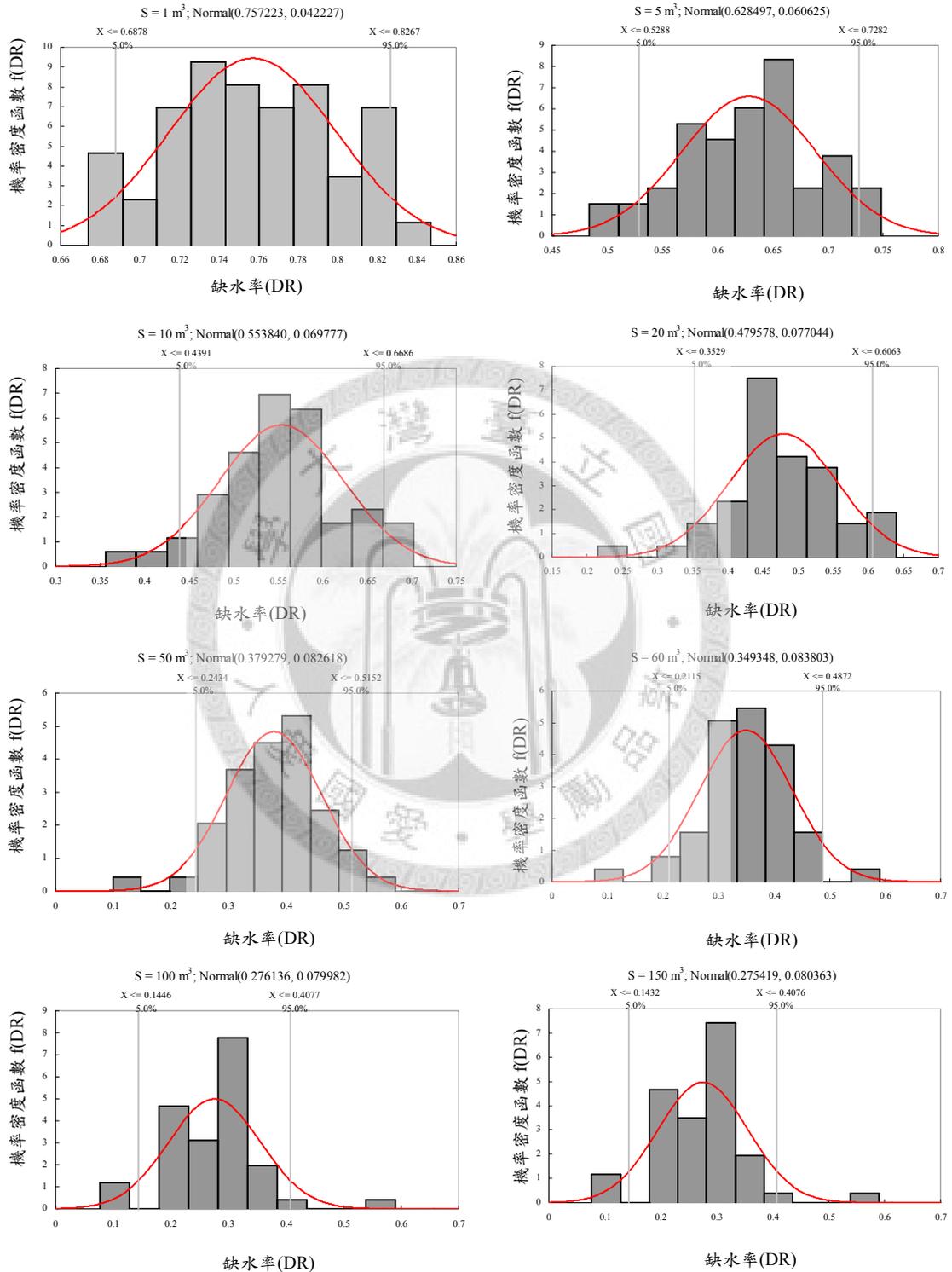


圖 5-3 台南都會區不同貯水容量之缺水率機率分布圖

表 5-2 台南都會區各貯水容量與平均缺水率及變異數之關係

貯水容量 m^3	缺水率		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.76	0.04	0.97
5	0.63	0.06	0.98
10	0.55	0.07	0.81
20	0.48	0.08	0.37
50	0.38	0.08	0.97
60	0.35	0.08	0.97
100	0.28	0.08	0.06
150	0.28	0.08	0.10

5-2 系統評估指標

將前一小節模擬得到之貯水容量與缺水率結果，利用式 2-2、2-8 與 2-10 計算系統供水可靠度、回復度與易損度，並建立不同貯水容量下，各指標之機率分布圖。

一、台北都會區

(一) 可靠度(Reliability, Rel)

系統可靠度係描述設計系統因為失敗(Failure)而對供水穩定度產生之衝擊程度。本研究亦將模擬之結果套配機率分配模式做進一步之研討，套配之結果如圖 5-4 所示，檢定結果整理如表 5-3。

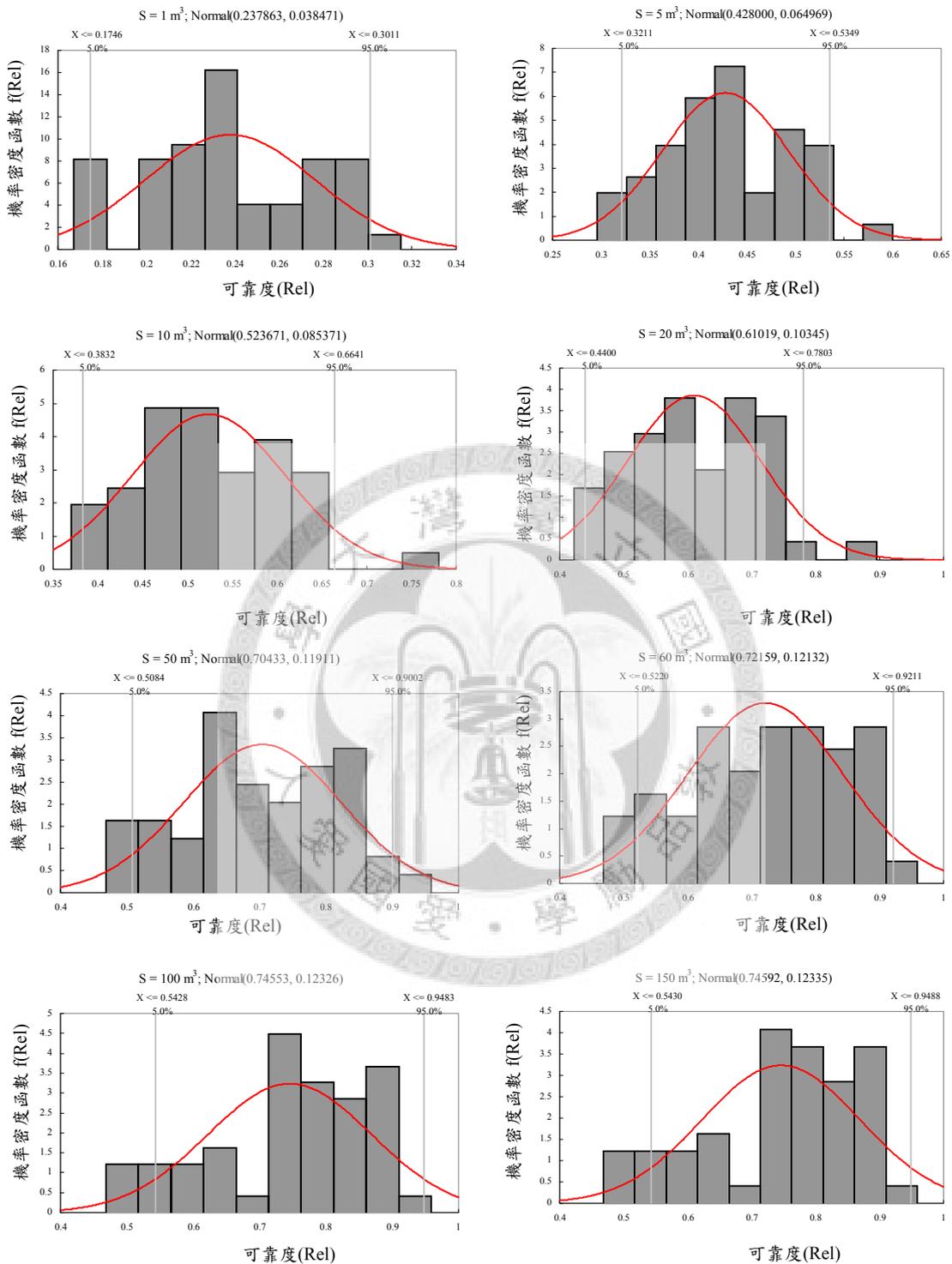


圖 5-4 台北都會區不同貯水容量之可靠度機率分布圖

表 5-3 台北都會區各貯水容量與可靠度及變異數之關係

貯水容量 m^3	可靠度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.24	0.04	0.73
5	0.43	0.06	0.90
10	0.52	0.09	0.62
20	0.61	0.10	0.99
50	0.70	0.12	0.07
60	0.72	0.12	0.50
100	0.75	0.12	0.31
150	0.75	0.12	0.31

(二) 回復度(Resiliency, Res)

回復度係描述系統遭遇系統失敗時，系統回復至正常狀態之彈性，若以系統不可回復度描述系統時，乃為系統回復至正常狀態之疲弱性。關於台北都會區系統回復度之結果描述，如圖 5-5 與表 5-4 所示。

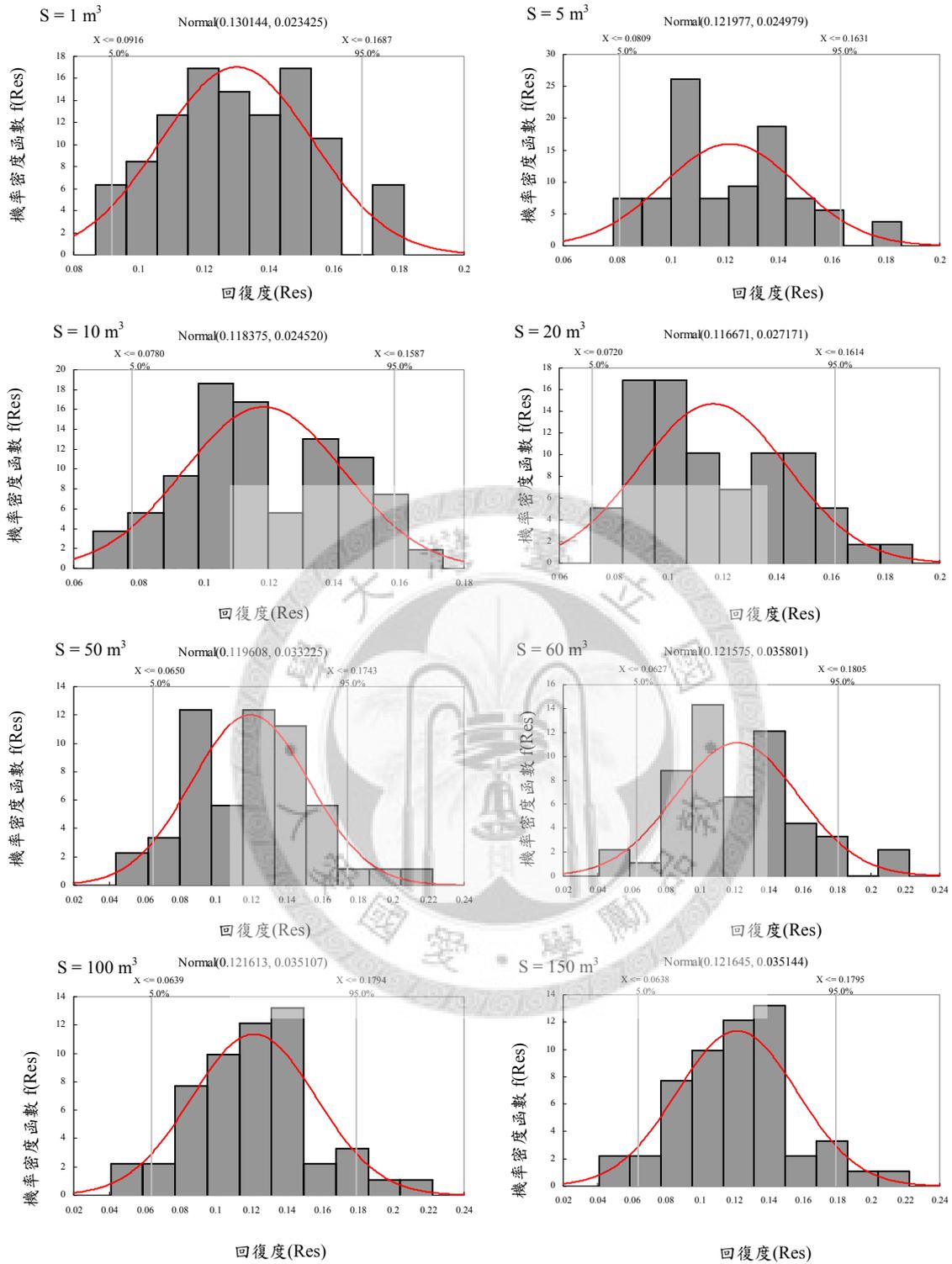


圖 5-5 台北都會區不同貯水容量之回復度機率分布圖

表 5-4 台北都會區各貯水容量與回復度及變異數之關係

貯水容量 m^3	回復度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.130	0.023	0.69
5	0.122	0.025	0.37
10	0.118	0.025	0.69
20	0.117	0.027	0.16
50	0.120	0.033	0.95
60	0.122	0.036	0.62
100	0.122	0.035	0.73
150	0.122	0.035	0.66

(三) 易損度(Vulnerability, Vul)

此一評估指標係描述系統受失敗（缺水率）影響時，其嚴重程度之描述。

關於台北都會區易損性之模擬結果描述，如圖 5-6 與表 5-5 所示。



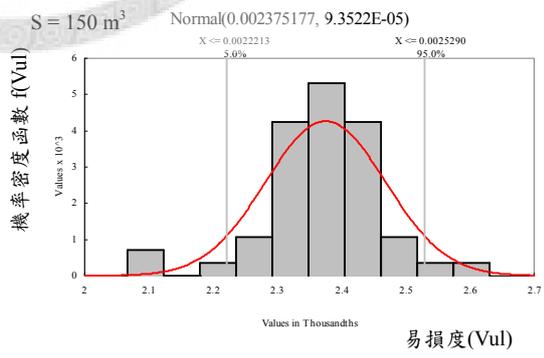
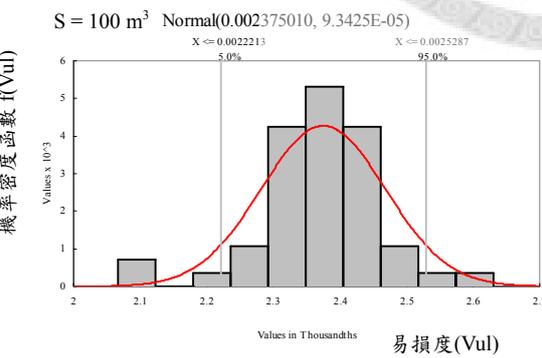
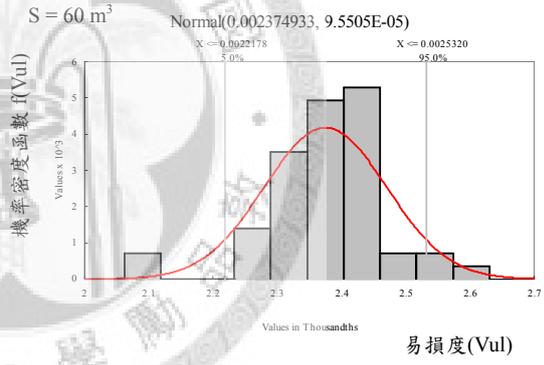
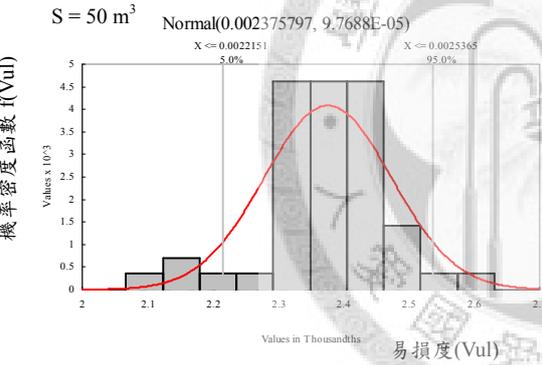
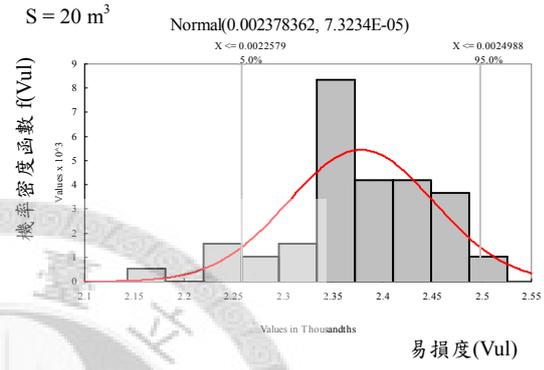
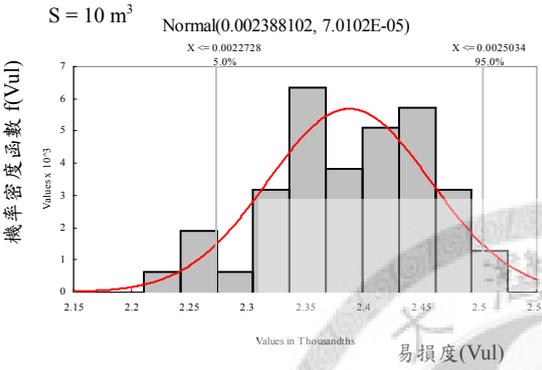
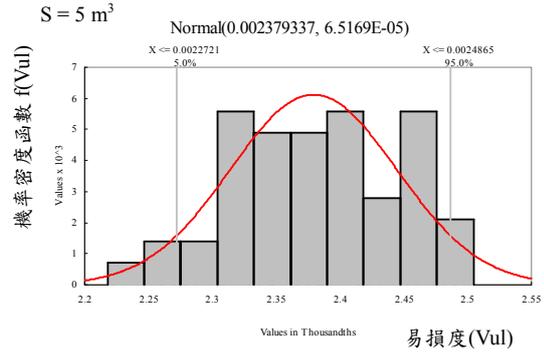
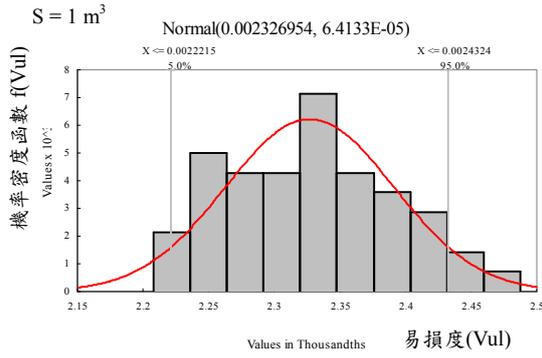


圖 5-6 台北都會區不同貯水容量之易損度機率分布圖

表 5-5 台北都會區各貯水容量與易損度及變異數之關係

貯水容量 m^3	易損度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	2.3E-03	6.4E-05	0.90
5	2.4E-03	6.5E-05	0.93
10	2.4E-03	7.0E-05	0.97
20	2.4E-03	7.3E-05	0.06
50	2.4E-03	9.8E-05	0.50
60	2.4E-03	9.6E-05	0.22
100	2.4E-03	9.3E-05	0.12
150	2.4E-03	9.4E-05	0.12

(四) 綜合評估指標(Comprehensive Evaluation Index, CEI)

綜合評估指標係利用式 2-11，將上述三項指標整合，冀以複合型態之指標來描述雨水貯集系統之系統風險評估。式 2-11 中 $a+b+c=1$ ，本研究假設 $a=b=c=(1/3)$ ，相關結果描述，如圖 5-7 與表 5-6 所示。

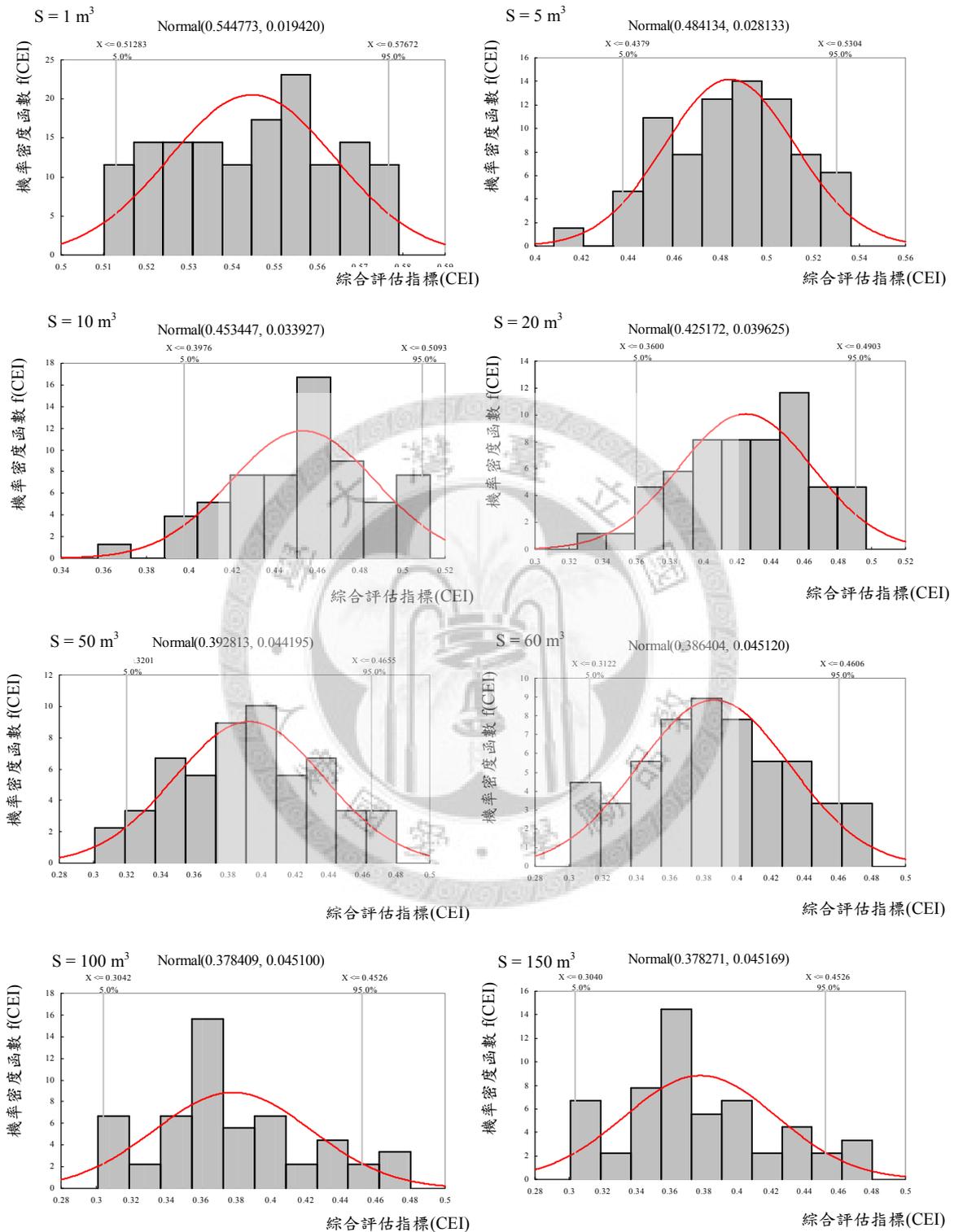


圖 5-7 台北都會區不同貯水容量之綜合評估指標機率分布圖

表 5-6 台北都會區各貯水容量與綜合評估指標及變異數之關係

貯水容量 m^3	綜合評估指標		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.54	0.02	0.93
5	0.48	0.03	0.50
10	0.45	0.03	0.77
20	0.43	0.04	0.62
50	0.39	0.04	0.97
60	0.39	0.05	0.90
100	0.38	0.05	0.26
150	0.38	0.05	0.26

二、台南都會區

(一) 可靠度(Reliability, Rel)

台南都會區模擬之結果套配機率分配模式做進一步之研討，套配之結果如圖 5-8 所示，檢定結果整理如表 5-7。

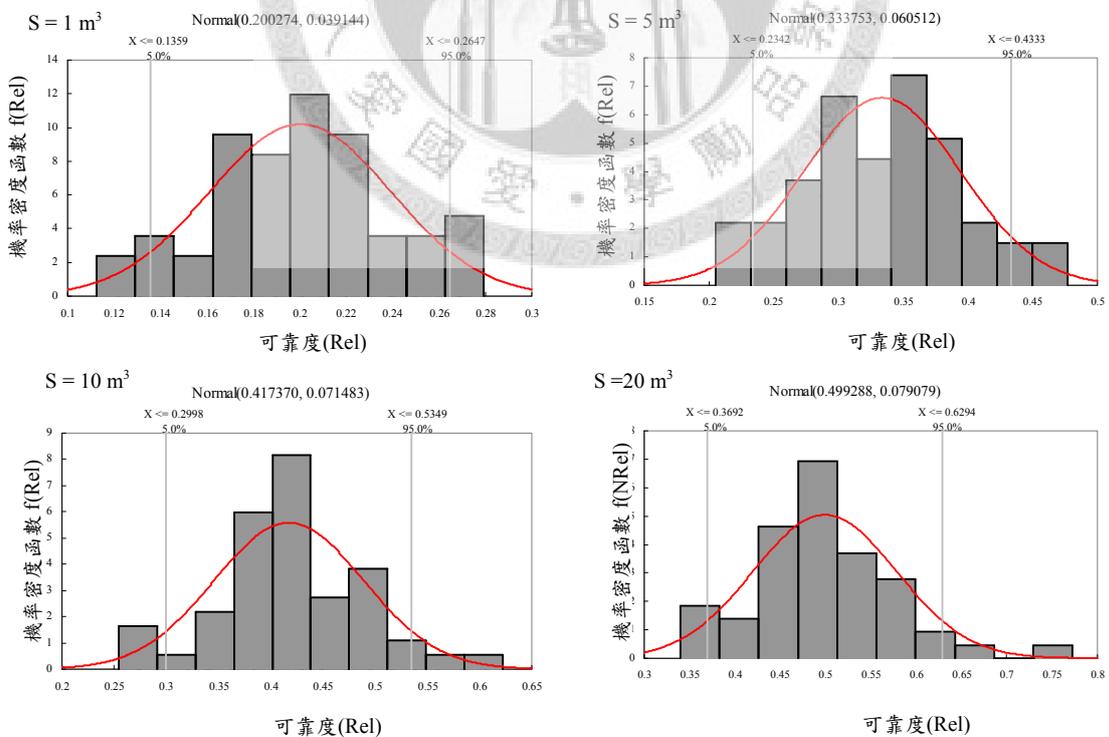


圖 5-8 台南都會區不同貯水容量之可靠度機率分布圖

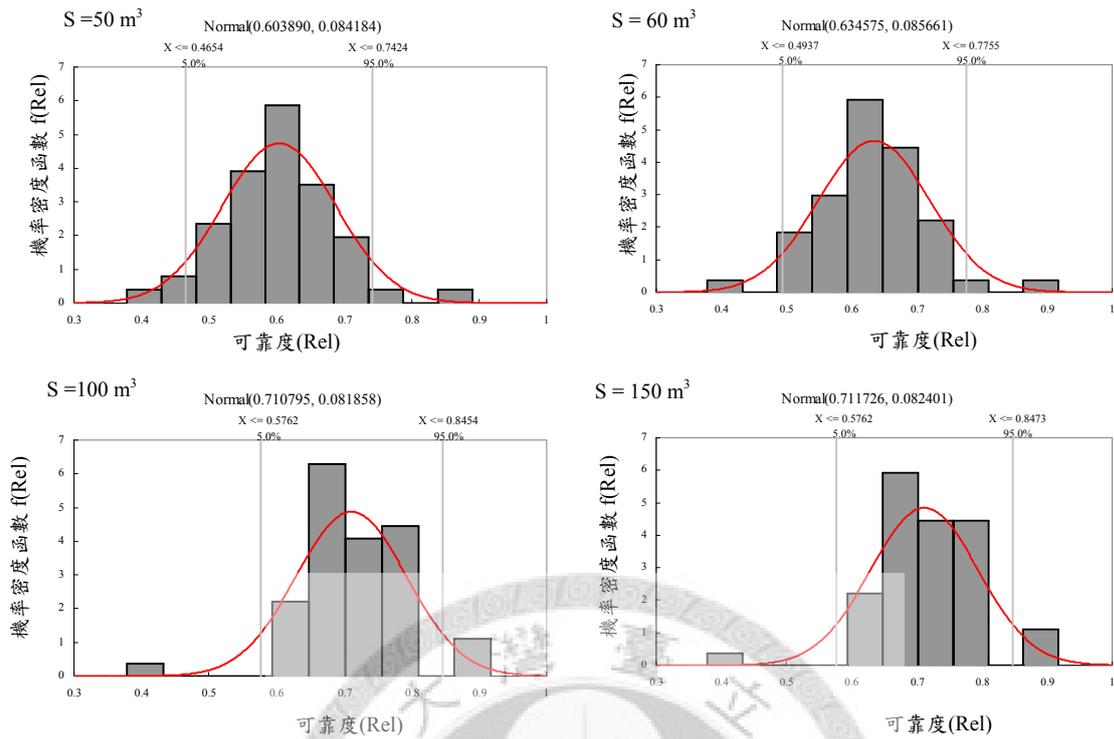


圖 5-8 台南都會區不同貯水容量之可靠度機率分布圖 (續)

表 5-7 台南都會區各貯水容量與可靠度及變異數之關係

貯水容量 m ³	可靠度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.20	0.04	0.99
5	0.33	0.06	0.50
10	0.42	0.07	0.43
20	0.50	0.08	0.66
50	0.60	0.08	0.93
60	0.63	0.09	0.95
100	0.71	0.08	0.12
150	0.71	0.08	0.16

(二) 回復度(Resiliency, Res)

關於台南都會區系統回復度之結果描述，如圖 5-9 與表 5-8 所示。

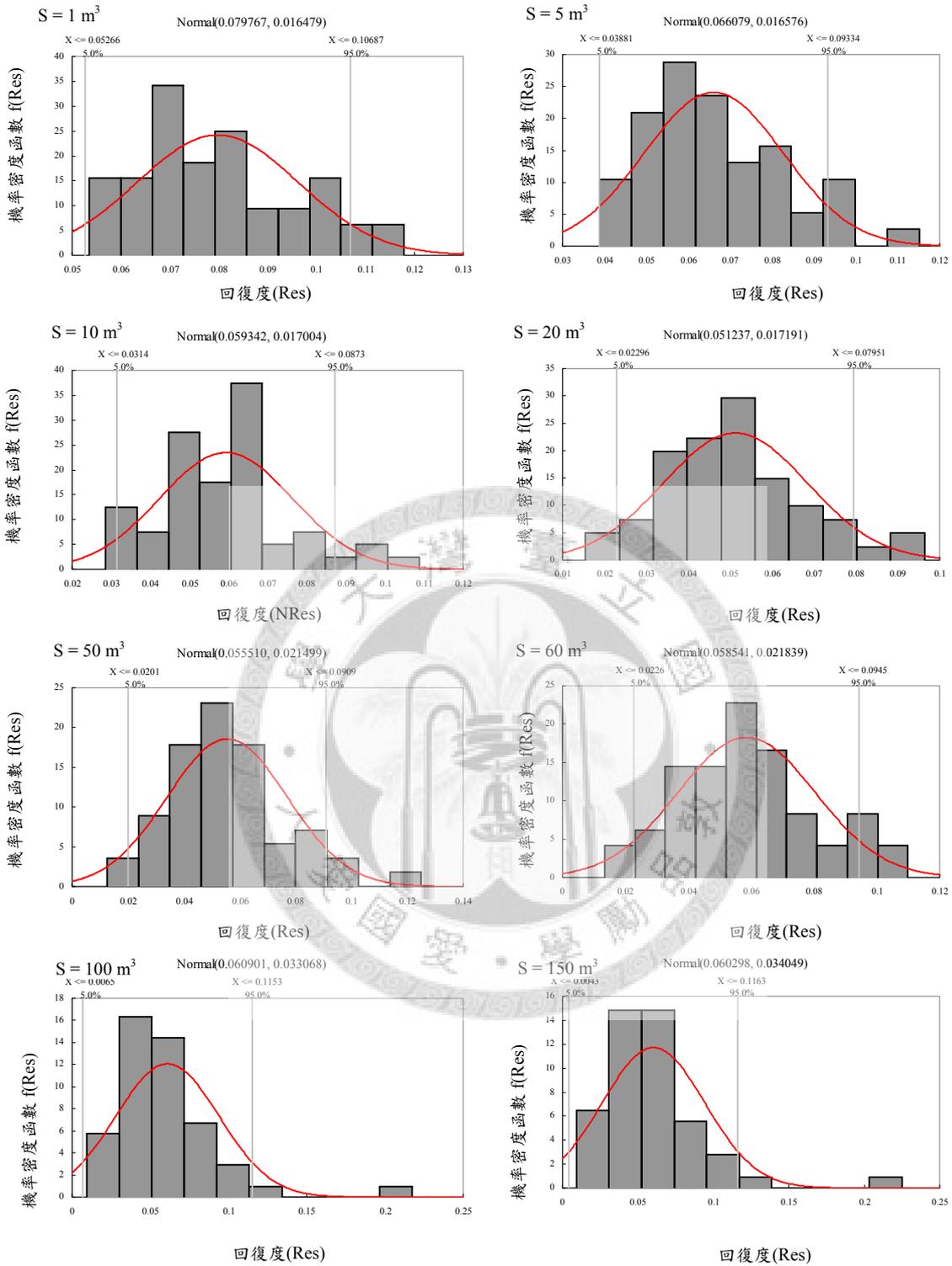


圖 5-9 台南都會區不同貯水容量之回復度機率分布圖

表 5-8 台南都會區各貯水容量與回復度及變異數之關係

貯水容量 m^3	回復度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.080	0.016	0.29
5	0.066	0.017	0.77
10	0.059	0.017	0.43
20	0.051	0.017	0.66
50	0.056	0.021	0.40
60	0.059	0.022	0.18
100	0.061	0.033	0.08
150	0.060	0.034	0.07

(三) 易損度(Vulnerability, Vul)

此一評估指標係描述系統受失敗影響時，其嚴重程度之描述。關於台北都會區易損性之模擬結果描述，如圖 5-10 與表 5-9 所示。



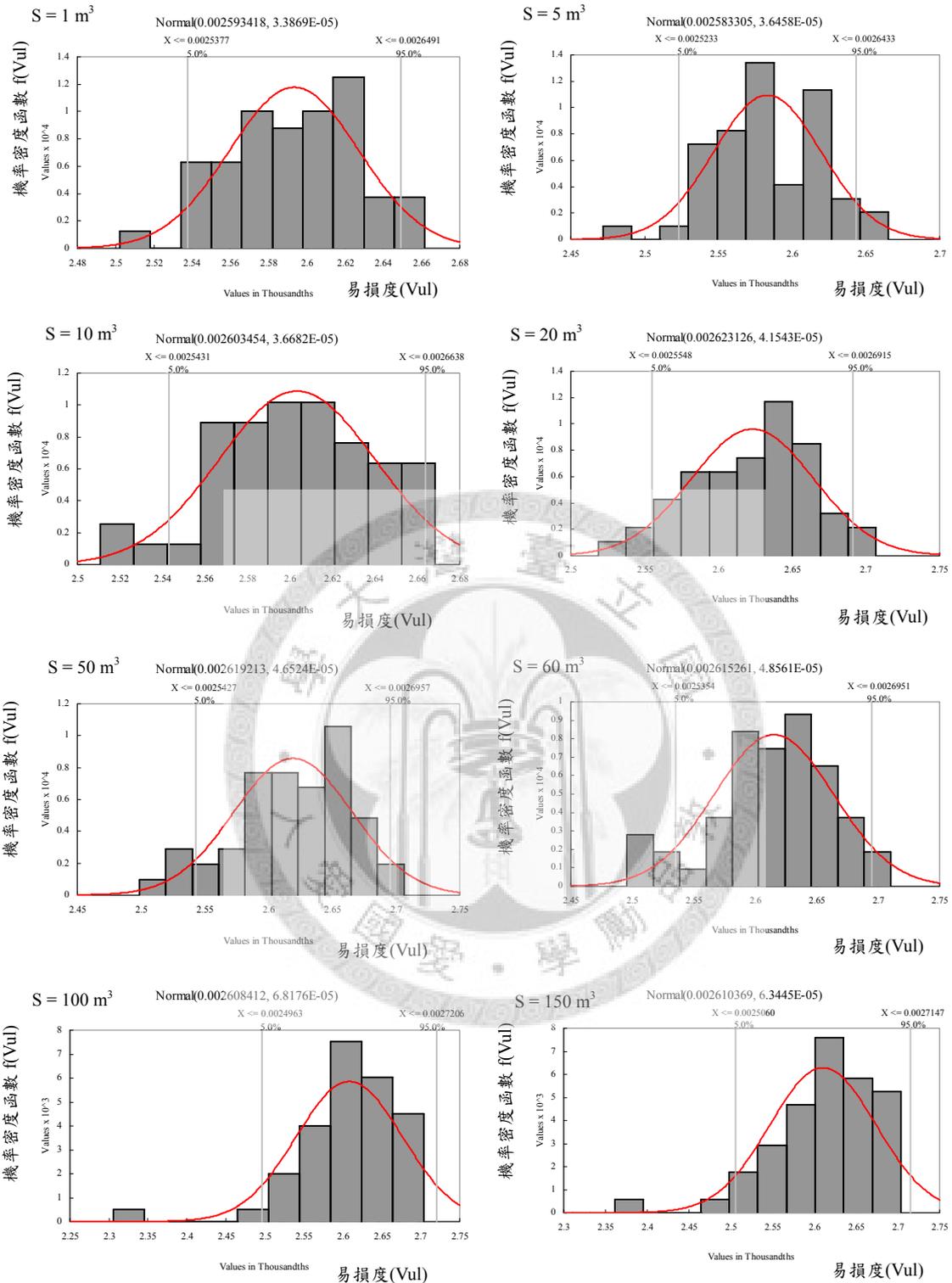


圖 5-10 台南都會區不同貯水容量之易損度機率分布圖

表 5-9 台南都會區各貯水容量與易損度及變異數之關係

貯水容量 m^3	易損度		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	2.59E-03	3.55E-05	0.66
5	2.58E-03	3.65E-05	0.47
10	2.60E-03	3.67E-05	0.66
20	2.62E-03	4.15E-05	0.54
50	2.62E-03	4.65E-05	0.22
60	2.62E-03	4.86E-05	0.58
100	2.61E-03	6.82E-05	0.77
150	2.61E-03	6.34E-05	0.90

(四) 綜合評估指標(Comprehensive Evaluation Index, CEI)

台南都會區之綜合評估指標相關結果描述，如圖 5-11 與表 5-10 所示。

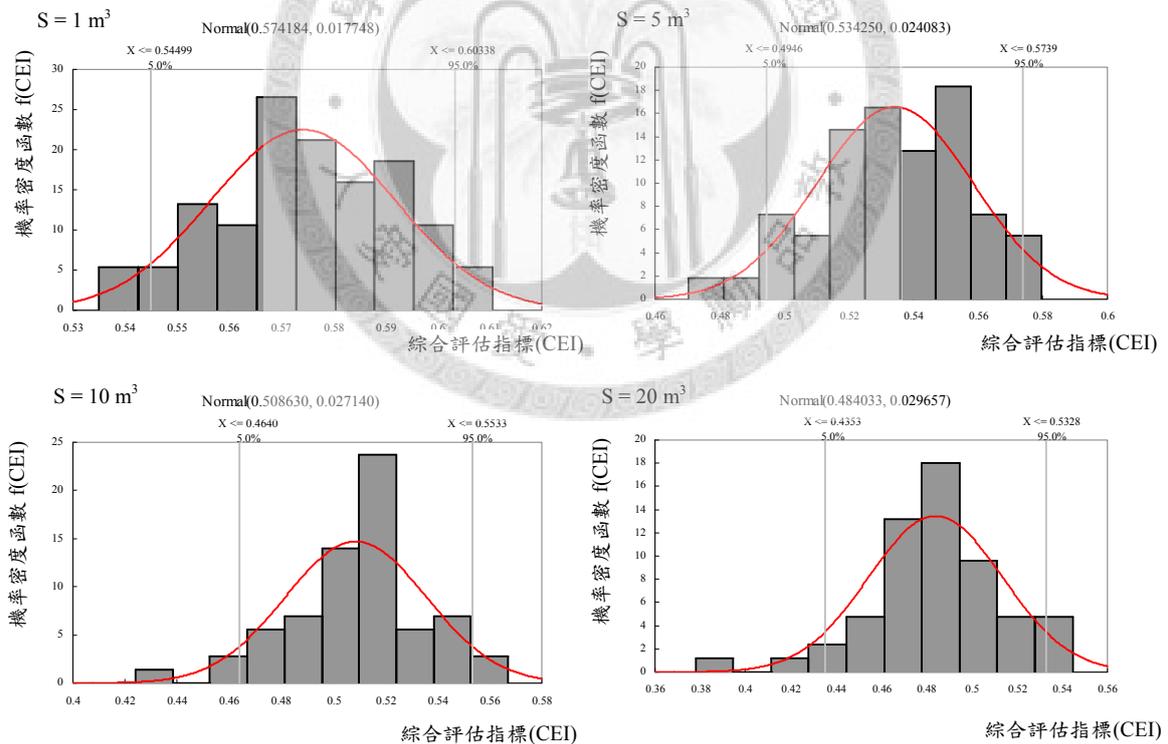


圖 5-11 台南都會區不同貯水容量之綜合評估指標機率分布圖

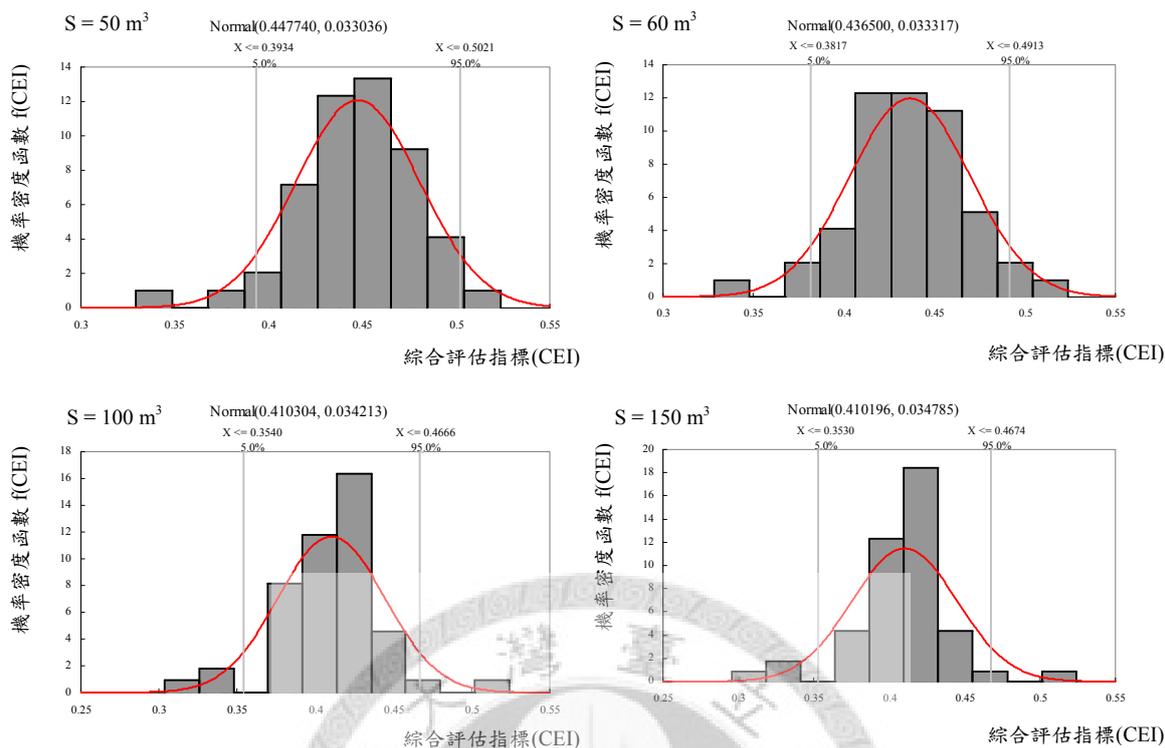


圖 5-11 台南都會區不同貯水容量之綜合評估指標機率分布圖 (續)

表 5-10 台南都會區各貯水容量與綜合評估指標及變異數之關係

貯水容量 m ³	綜合評估指標		Goodness-of-Fit test
	Mean(μ)	Std. Dev. (σ)	P-value
1	0.574	0.018	0.87
5	0.534	0.024	0.98
10	0.509	0.027	0.47
20	0.484	0.030	0.93
50	0.458	0.033	0.90
60	0.437	0.033	0.81
100	0.410	0.034	0.05
150	0.410	0.035	0.05

第六章 系統評估與結果討論

6-1 貯水容量與缺水率超越機率曲線

利用圖 4-10(b)~ 4-10(d)中表示之過程，如前節圖 5-2 與圖 5-3 中所示之各貯水容量下缺水率機率分布之套配結果進行機率密度函數積分，即可建立不同超越機率下貯水容量與缺水率之關係曲線。

一、台北都會區

研究中模擬 0.5 ~ 150 立方公尺貯水容量之缺水機率密度圖，並彙整各缺水率之機率密度圖，建立不同超越機率下之缺水率與貯水容量關係（如圖 6-1 所示）。圖中展示各超越機率下，貯水容量與缺水率之變化情形；由圖可知貯水容量於 0~60 立方公尺間，缺水率變化較大，缺水率變化由 0.75~0.09，但當貯水容量大於 90 立方公尺時，增加貯水容量對改變缺水率之成效較不明顯，亦即以台北之降雨特性而言，設計容積之上限應為 90 立方公尺，當設計的貯蓄容積超過 90 立方公尺時，對於雨水之貯集效率即不會再提升，亦即缺水率不會再隨設計容積加大而降低。

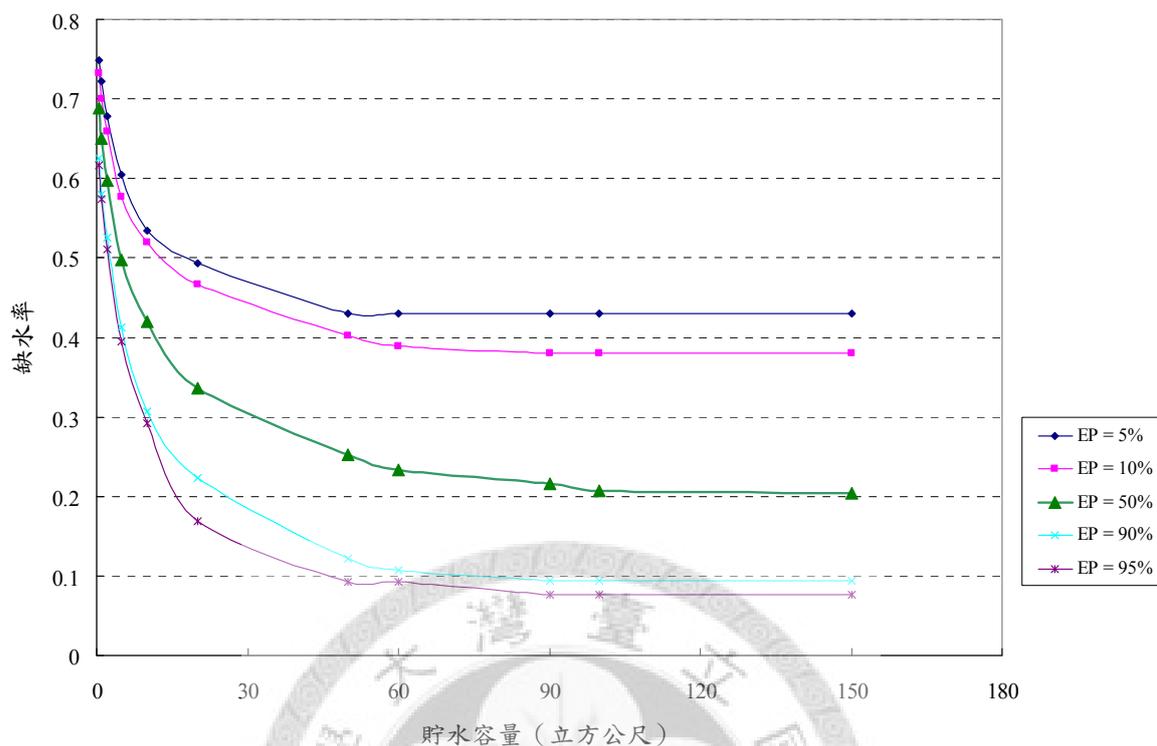


圖 6-1 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-缺水率關係曲線圖

經由上述結果可知，貯水容量與缺水率呈現連續性分布。圖 6-1 描述了不同超越機率下之貯水容量與缺水率變化，但此種透過機率分布之描述方式，並無法完全掌握各別貯水容量與缺水率間機率分布狀況之全貌。因此，本研究進一步建立貯水容量-缺水率-機率之連續曲面圖（如圖 6-2）。在連續曲面下，透過不同平面之剖面圖，瞭解缺水率、貯水容量與機率分布之關係。

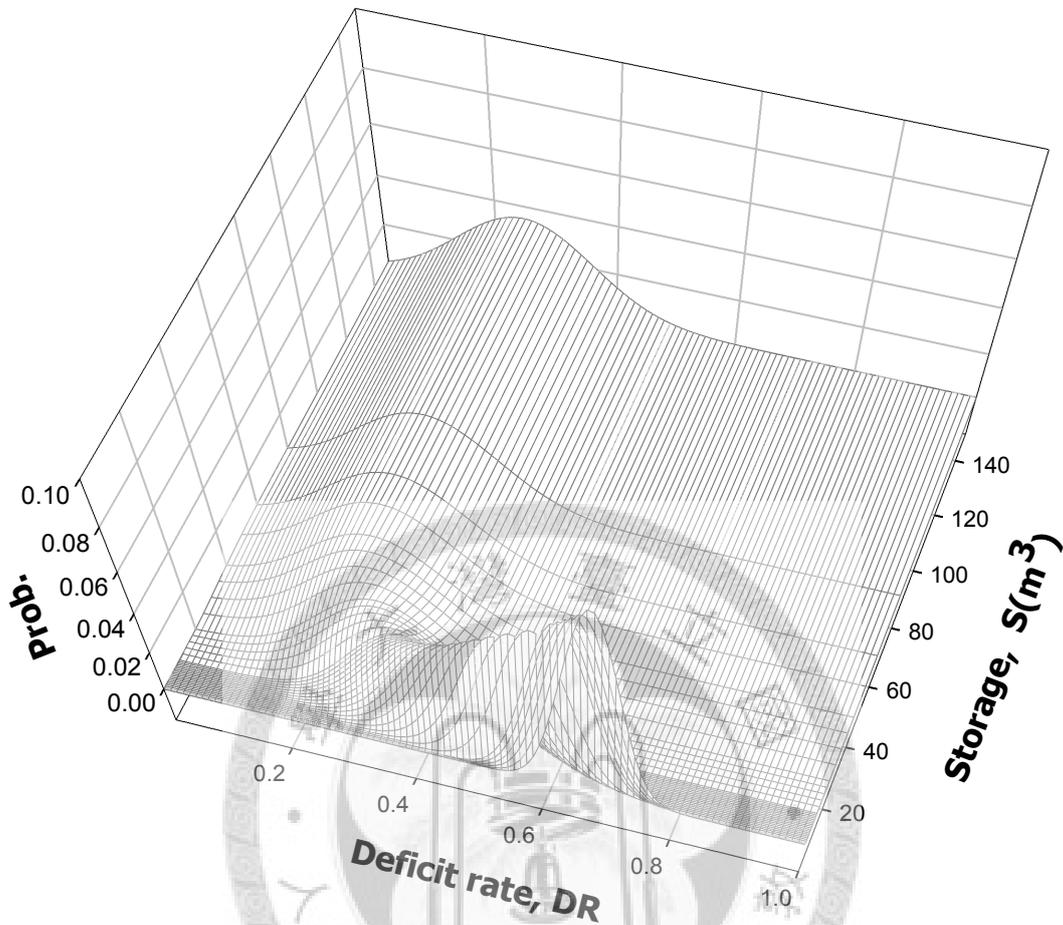


圖 6-2 台北都會區貯水容量與缺水率之機率密度曲面示意圖

二、台南都會區

研究中模擬 0.5~150 立方公尺貯水容量之缺水機率密度圖，並彙整各缺水率之機率密度圖，建立不同超越機率下之缺水率與貯水容量關係（如圖 6-3 所示）。由圖可知貯水容量於 0~90 立方公尺間，缺水率變化較大，缺水率變化由 0.85~0.11，但當貯水容量大於 90 立方公尺時，系統改變缺水率之成效較不明顯；當系統貯水容量達 100 立方公尺時，缺水率維持穩定。以台南之降雨特性而言，設計容積之上限應為 100 立方公尺，亦即當設計的貯蓄容積

超過 100 立方公尺時，對於雨水之貯集效率即不會再提升，亦即缺水率不會在隨設計容積加大而降低。

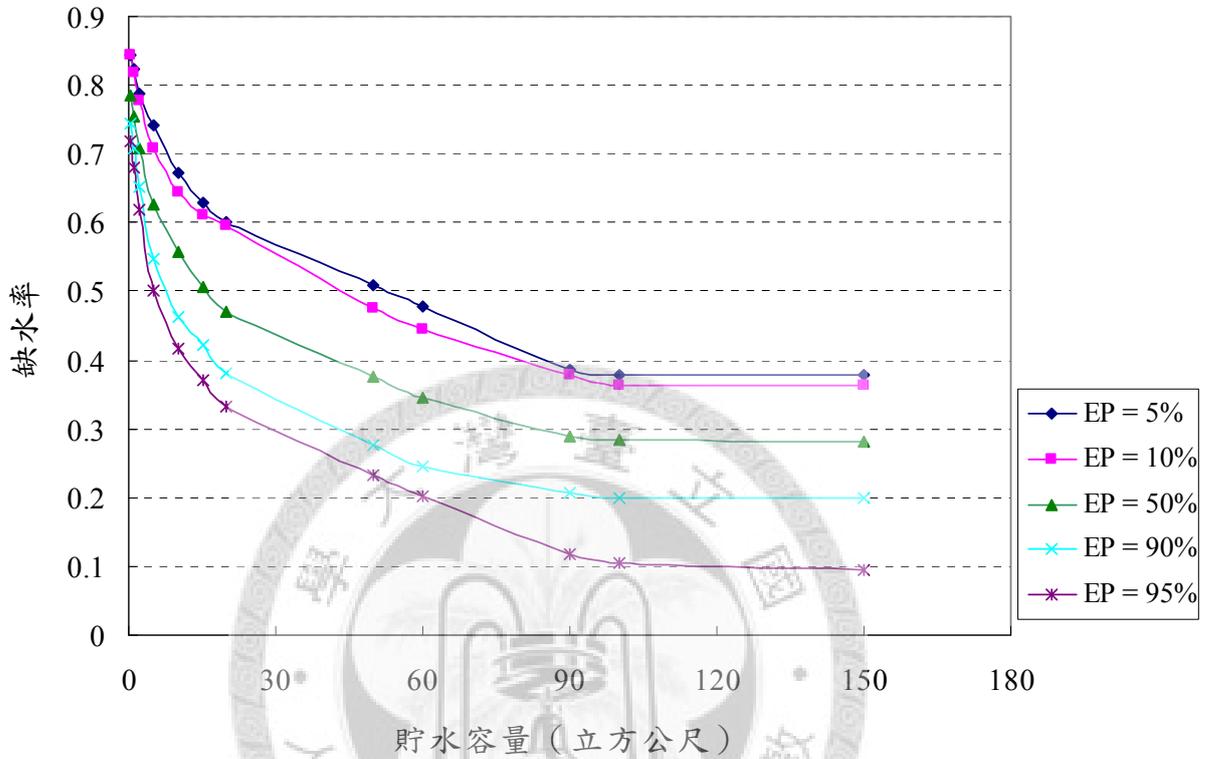


圖 6-3 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-缺水率關係曲線圖

同上描述台北都會區雨水貯集系統方式，本研究亦進一步建立台南都會區貯水容量-缺水率-機率之連續曲面圖（如圖 6-4）。在連續曲面下，透過不同平面之剖面圖，瞭解缺水率-貯水容量、缺水率-缺水率之機率分布圖、貯水容量-缺水率分布圖等關係。

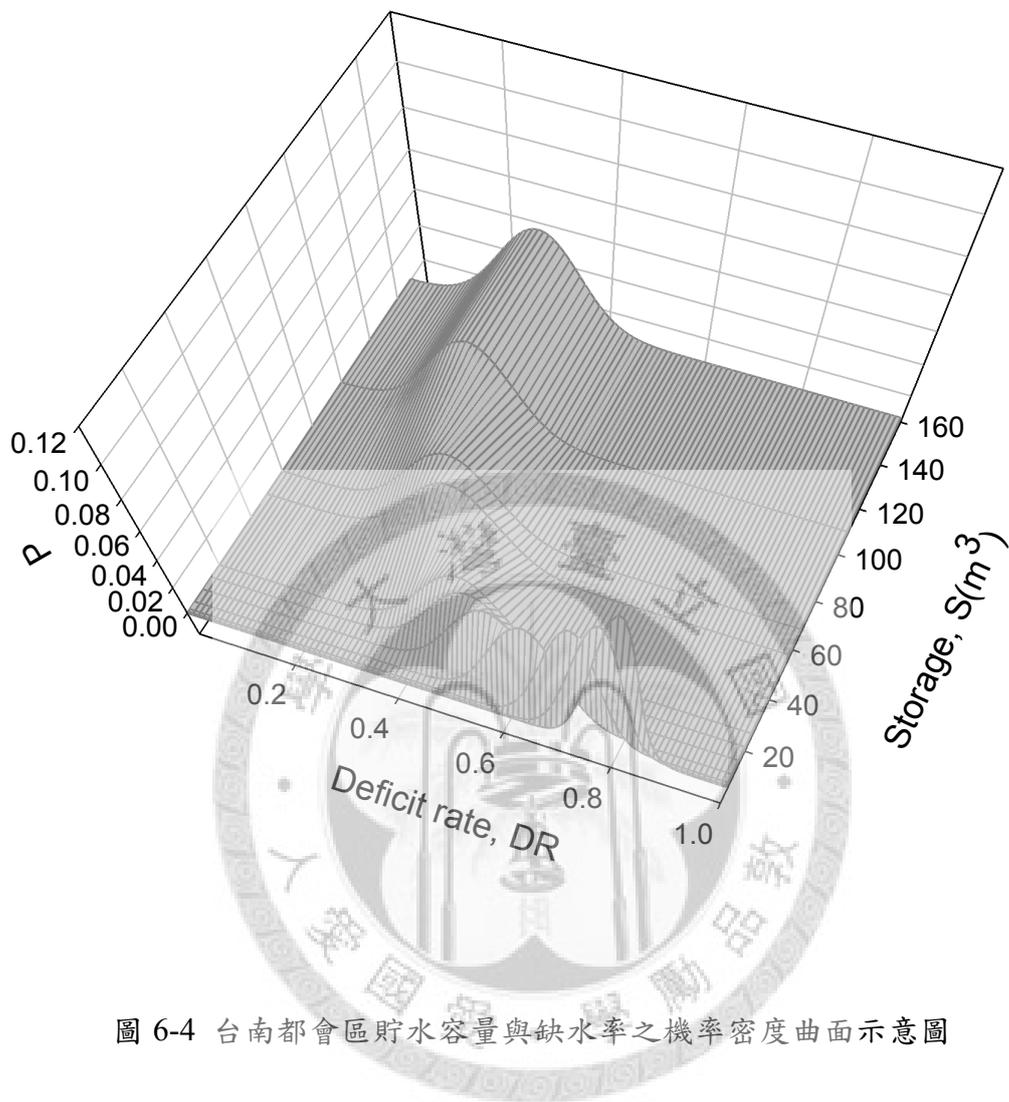


圖 6-4 台南都會區貯水容量與缺水率之機率密度曲面示意圖

6-2 貯水容量與系統評估指標關係曲線

一、台北都會區

貯水容量與系統可靠度、回復度、易損度與綜合評估指標之超越機率圖

如圖 6-5、圖 6-6、圖 6-7 與圖 6-8 所示。

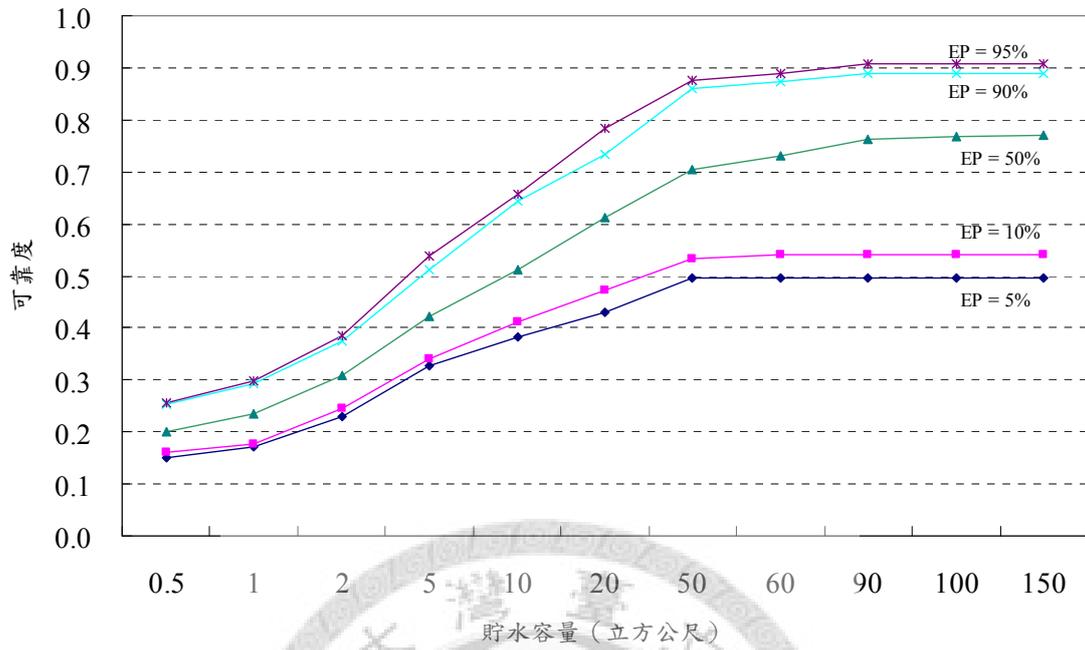


圖 6-5 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-可靠度關係曲線圖

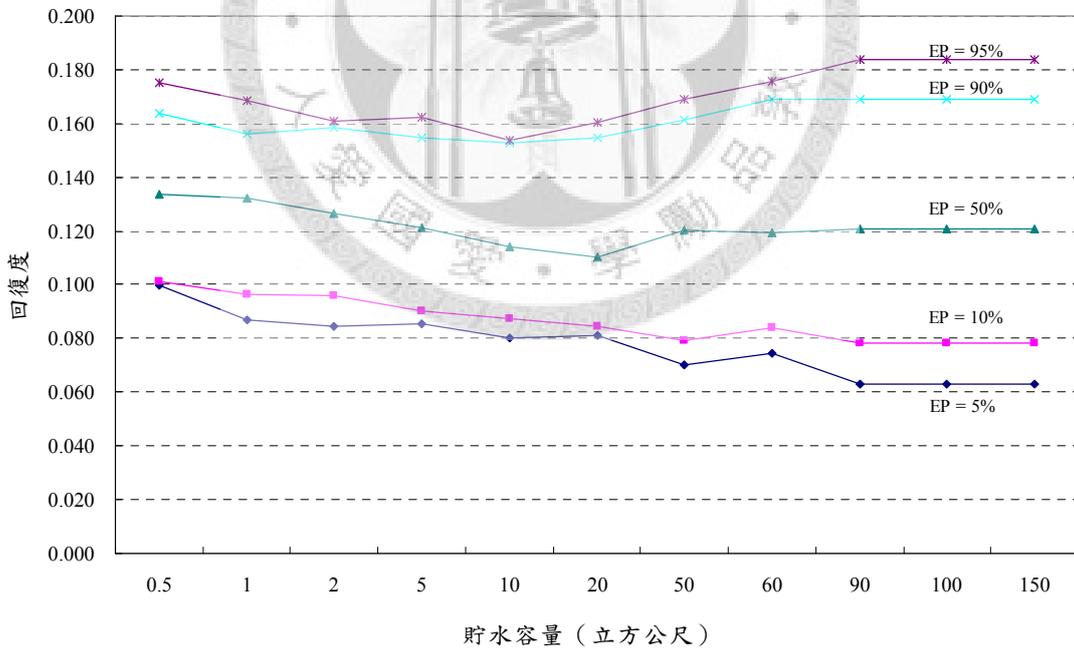


圖 6-6 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-回復度關係曲線圖

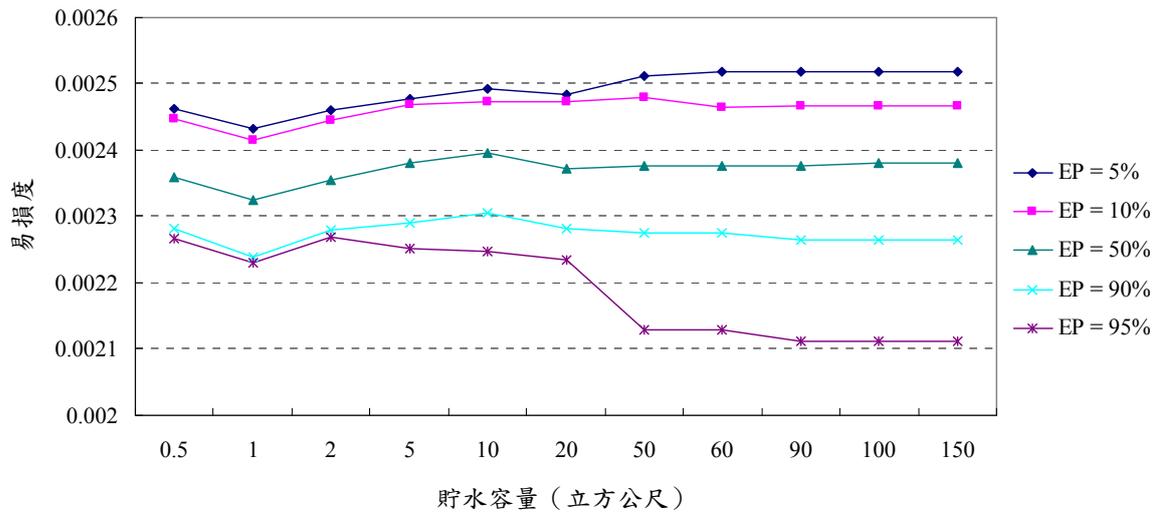


圖 6-7 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-易損度關係曲線圖

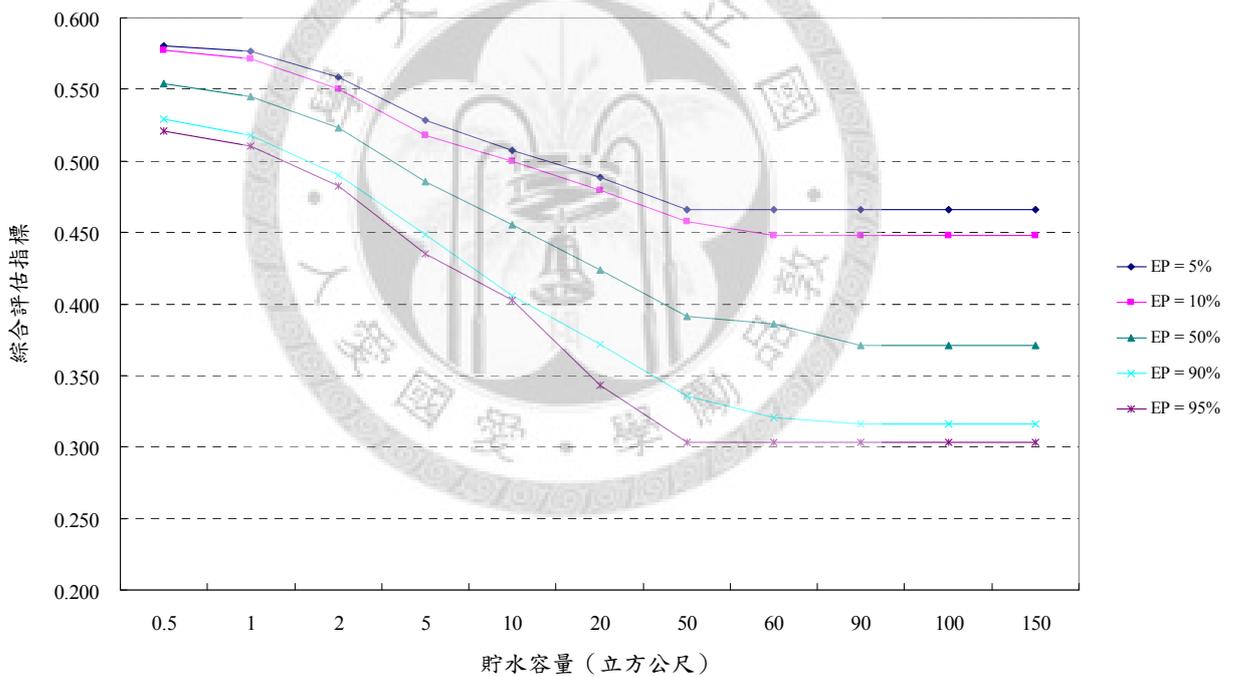


圖 6-8 台北都會區不同超越機率條件下之貯水容量-綜合評估指標關係曲線圖

圖 6-5 顯示，系統設計之超越機率越大，不可靠度越低，亦即欲設計一可靠度高之系統，系統面臨失敗的機率越高，以貯水容量為 50 立方公尺為例，其系統之可靠度在超越機率 5%~95%，其可靠度值為 0.50~0.88，亦即若貯水

容量選擇 50 立方公尺時，可靠度為 0.50 其系統之失敗機率大於 5%；若可靠度選擇 0.88，同樣貯水容量下，系統有超過 95%之機率會失敗。

圖 6-6 系統回復度，其範圍介於 0.061~0.182，若欲設計貯水容量為 50 立方公尺，系統回復度介於 0.065~0.165 間，以百分比表示，若設計之貯水容量為 50 立方公尺，系統之彈性為 6%，其失敗機率超過 5%(超越機率 5%)；系統亦有超越機率 95%之可能(超過 95%會失敗)為 16.5%。

圖 6-7 顯示，貯水容量越大，系統易損度呈現微幅上升，亦即貯水容量越大之系統，其必須承受較大之易損度，但超越機率為 95%時，系統越大系統承受之易損度些微降低。

圖 6-8 為一綜合評估指標圖，其將上述之結果透過線性疊加方式求得，由綜合評估指標可看出，貯水容量越大，指標值越低，亦即越大之貯水容量，雨水貯集系統所面臨之綜合評估指標越低，若將綜合評估指標視為對於雨水貯集系統之負向指標，對系統之描述為被損害之風險程度，則貯水容量越大，承受之風險越低。

二、台南都會區

貯水容量與系統可靠度、回復度、易損度與綜合評估指標之超越機率圖如圖 6-9、圖 6-10、圖 6-11 與圖 6-12 所示。



圖 6-9 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-可靠度關係曲線圖

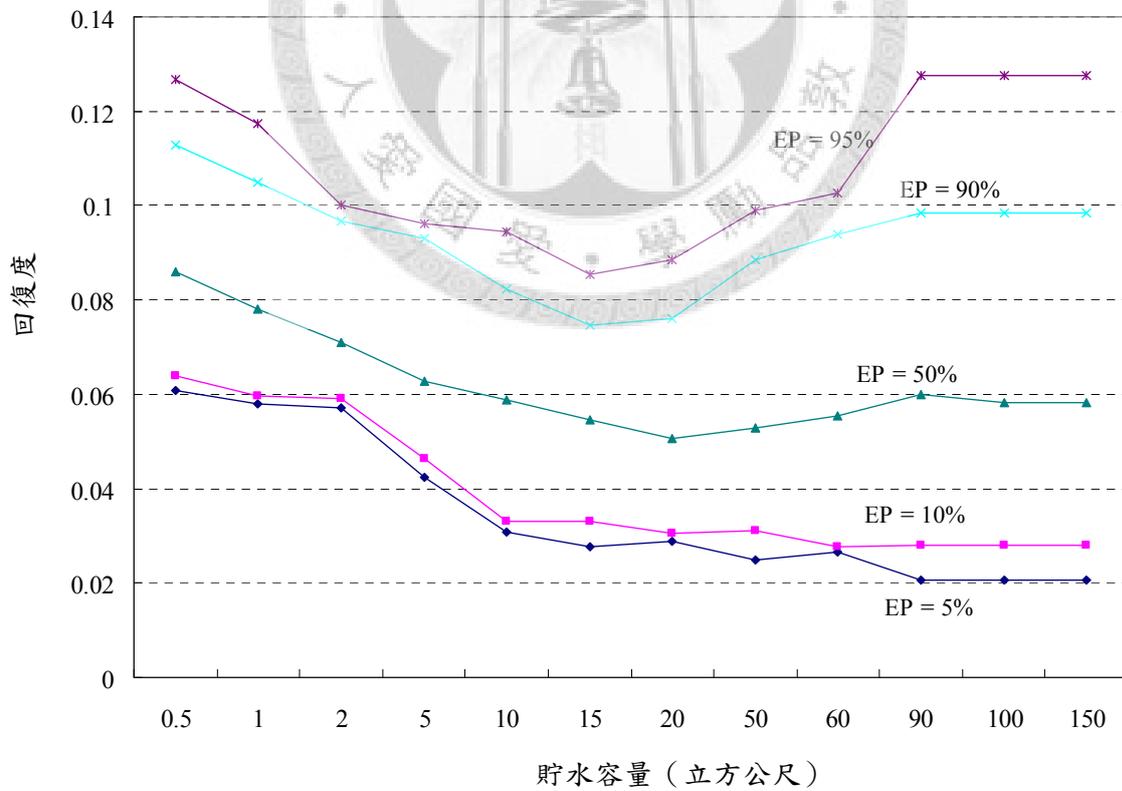


圖 6-10 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-回復度關係曲線圖

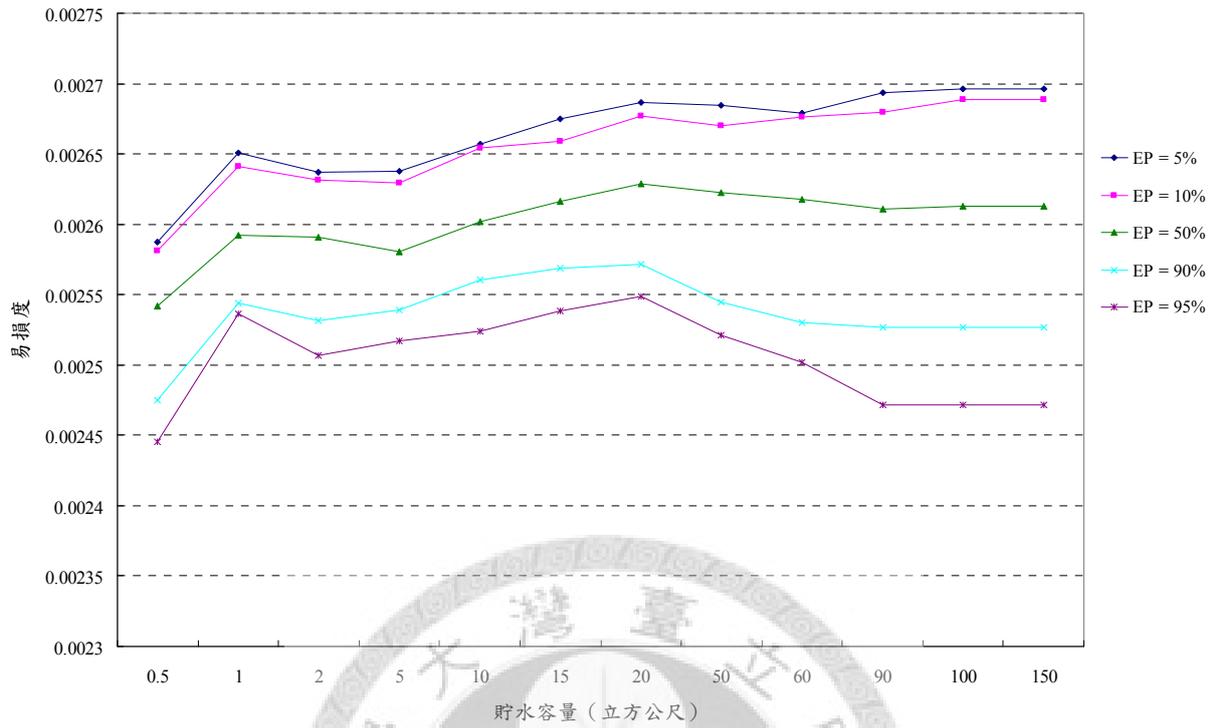


圖 6-11 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-易損度關係曲線圖

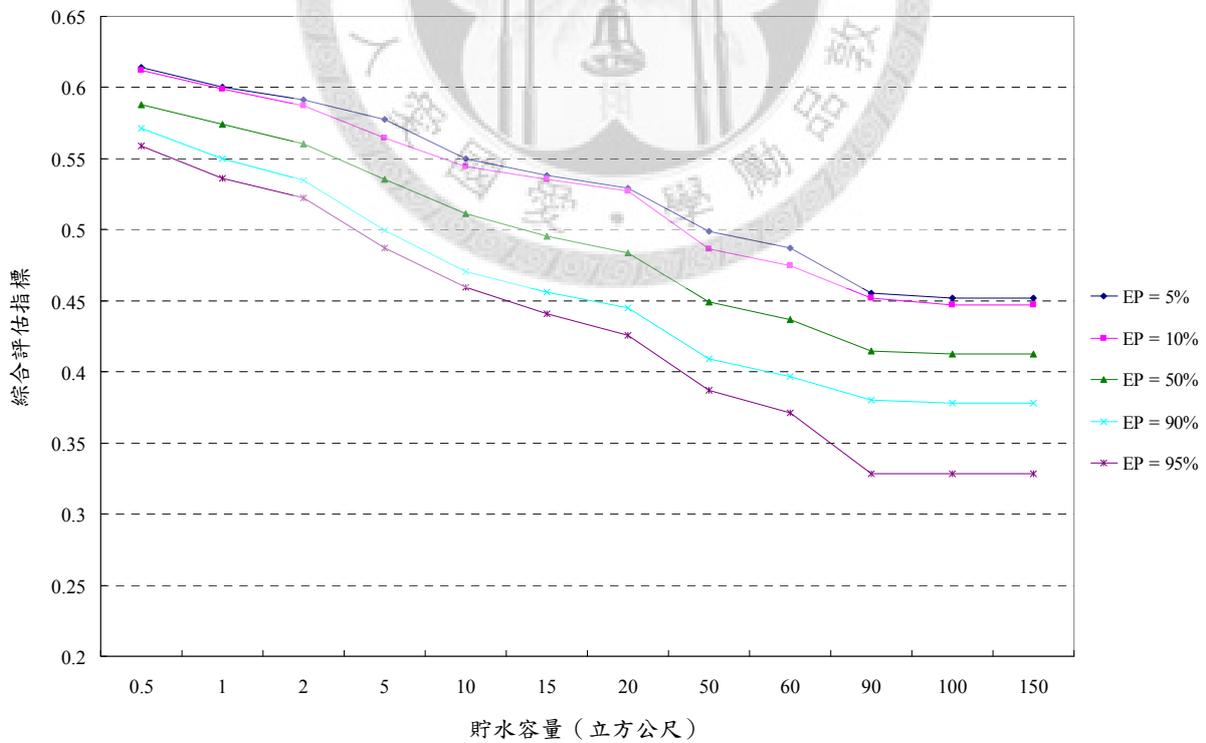


圖 6-12 台南都會區不同超越機率條件下之貯水容量-綜合評估指標關係曲線圖

台南都會區模擬之貯水容量大小由 0.5~150 立方公尺，其指標之變化趨勢與台北都會區之結果類似，可靠性、易損性與綜合評估指標隨著貯水容量越大，指標值有相同之變化趨勢；回復度則異於台北都會區，在超越機率小於 50%時，貯水容量為 15~20 立方公尺時，指標值最小，貯水容量大於 20 立方公尺，則略微回升；超越機率大於 50%時，系統回復度則隨貯水容量越大，回復度越低，但系統於貯水容量達 90 立方公尺時，回復度呈現穩定。由圖 6-12 結果顯示，當系統貯水容量設計為 90 立方公尺時，指標值趨近穩定。

6-3 結果與討論

本研究將缺水率與系統評估指標之模擬結果，套配機率分配模式，建立一組以超越機率為基礎之結果。藉由此一結果可看出雨水貯集系統於規劃設計時，系統設計之範圍，本小節將進一步整理相關結果，做進一步之研討。

一、模擬系統之貯集容量

台北都會區與台南都會區選擇 0.5、1、2、5、10、15、20、50、60、90、100 與 150 立方公尺 12 組之貯集容量進行討論。研究中所建立之模式以年為基準，透過日雨量作為輸入值，研討年平均缺水率。模式執行中，為考量單一年內雨水貯集系統對建物內沖廁用水之取代率，為避免降雨量收集因跨年之影響，本研究貯集容量之初始值設定為 0 立方公尺，藉以瞭解單一年內替代率之結果。

二、不同區域雨水貯集系統之比較

(一) 降雨量

台北都會區位於北緯 25 度線附近之台北盆地內，屬亞熱帶區域；台南都

會區地處北迴歸線之南，屬亞熱帶氣候與熱帶氣候的過渡帶。從歷史雨量中（1953~2002 年），整理兩區域之雨量比較如圖 6-13 所示。由圖中可知，5 月~9 月為兩區域之豐水期，台南之降雨豐枯變化較台北大。

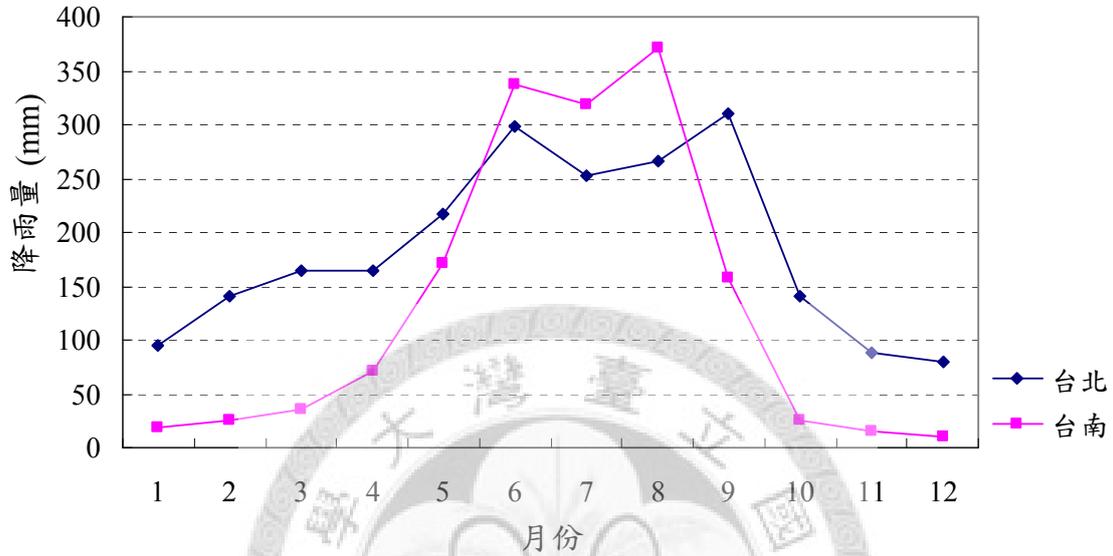


圖 6-13 台北與台南區域雨量比較圖

(二) 缺水率之比較

將圖 6-1 與圖 6-3 之不同超越機率下之貯水容量與缺水率分佈圖，依不同超越機率分別製作缺水率與貯水容量關係圖（如圖 6-14 所示）。

圖 6-14 結果顯示，不管超越機率之變化，當兩地區貯水容量設計達 90 立方公尺時，缺水率已無變化。但台北都會區當貯水容量達 20 立方公尺時，在不同超越機率下之缺水率變化率最大，當貯水容量 20~90 立方公尺，對缺水率之影響僅有些微改善；台南都會區則於 90 立方公尺之貯水容量，對缺水率之影響最大且呈現穩定。

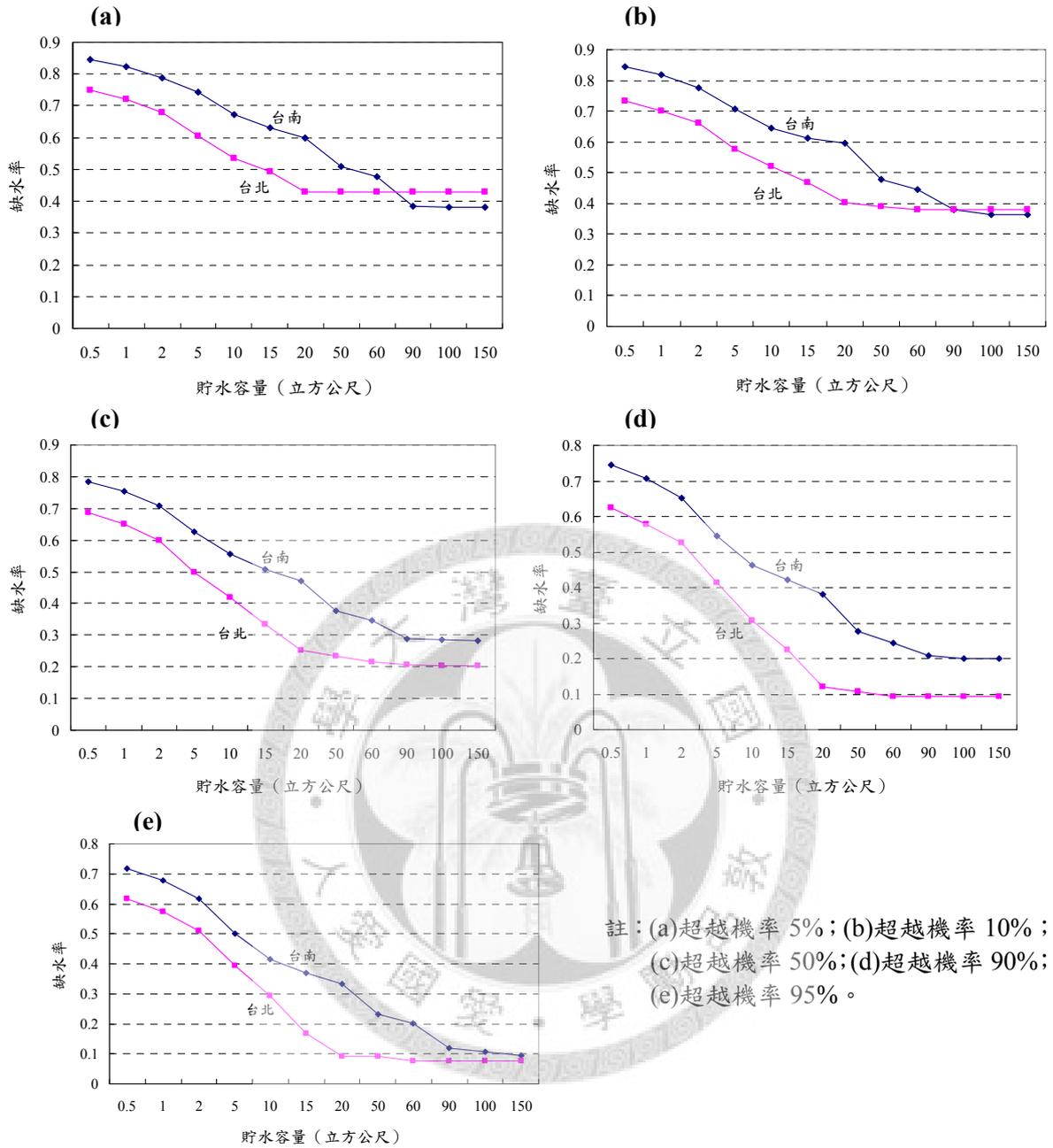


圖 6-14 不同超越機率之台北與台南貯水容量與缺水率圖

(三) 綜合評估指標

不同超越機率之台北與台南都會區貯水容量與綜合評估指標關係，如圖 6-15 所示。

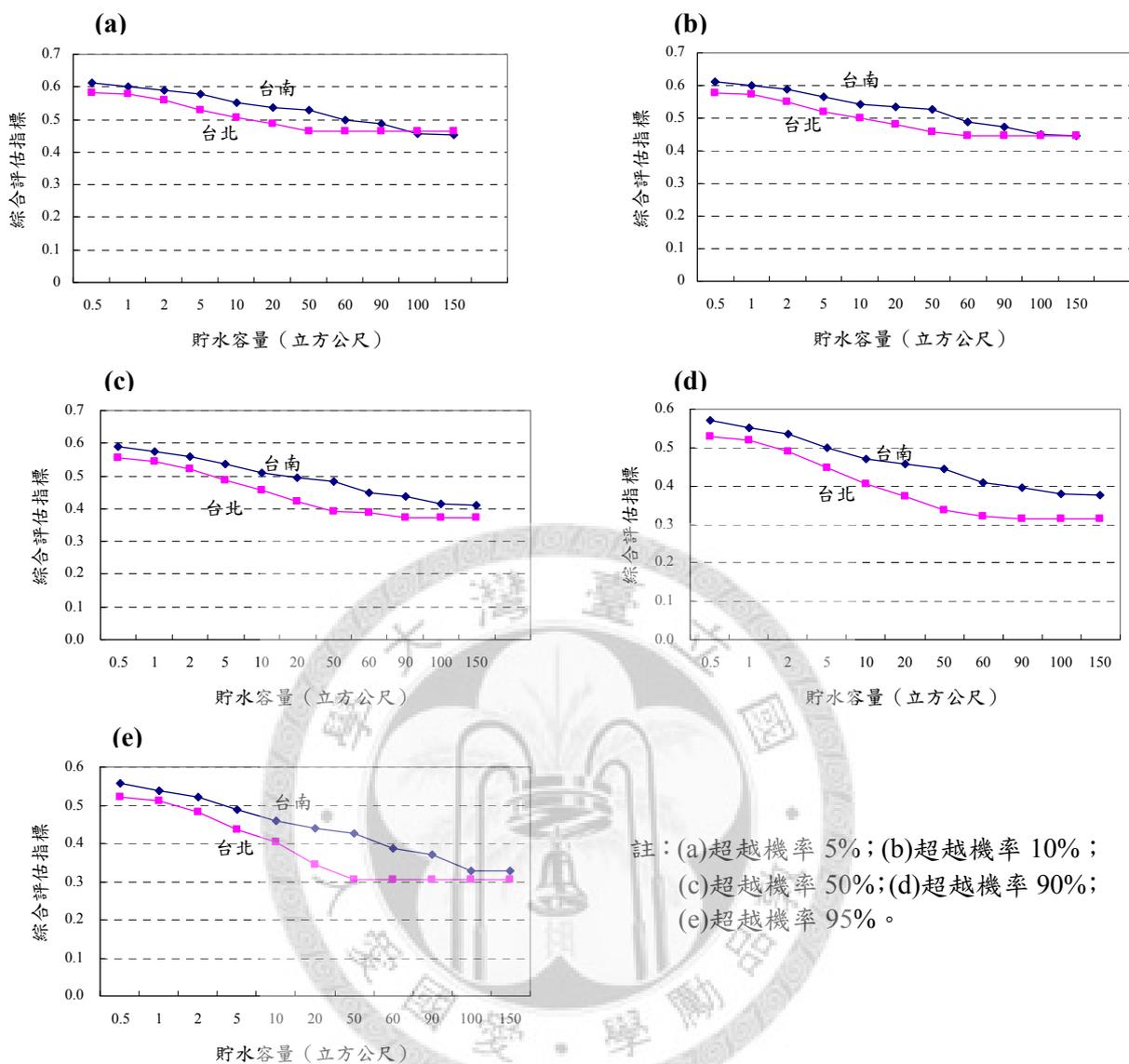


圖 6-15 不同超越機率之台北與台南貯水容量與綜合評估指標圖

圖 6-15 顯示，不同區域於不同之超越機率下，貯水容量由 0.5~150 立方公尺，其綜合評估指標變化為 0.6~0.3 之間。如同缺水率之比較，台北都會區結果表現較台南都會區結果良好，台北都會區與台南都會區之貯水容量設計分別達 50 立方公尺與 100 立方公尺時，對綜合評估指標影響最大。

(四) 缺水率與綜合評估指標之比較

將缺水率與綜合評估指標依不同超越機率繪製比較圖，如圖 6-16 與圖 6-17 所示。

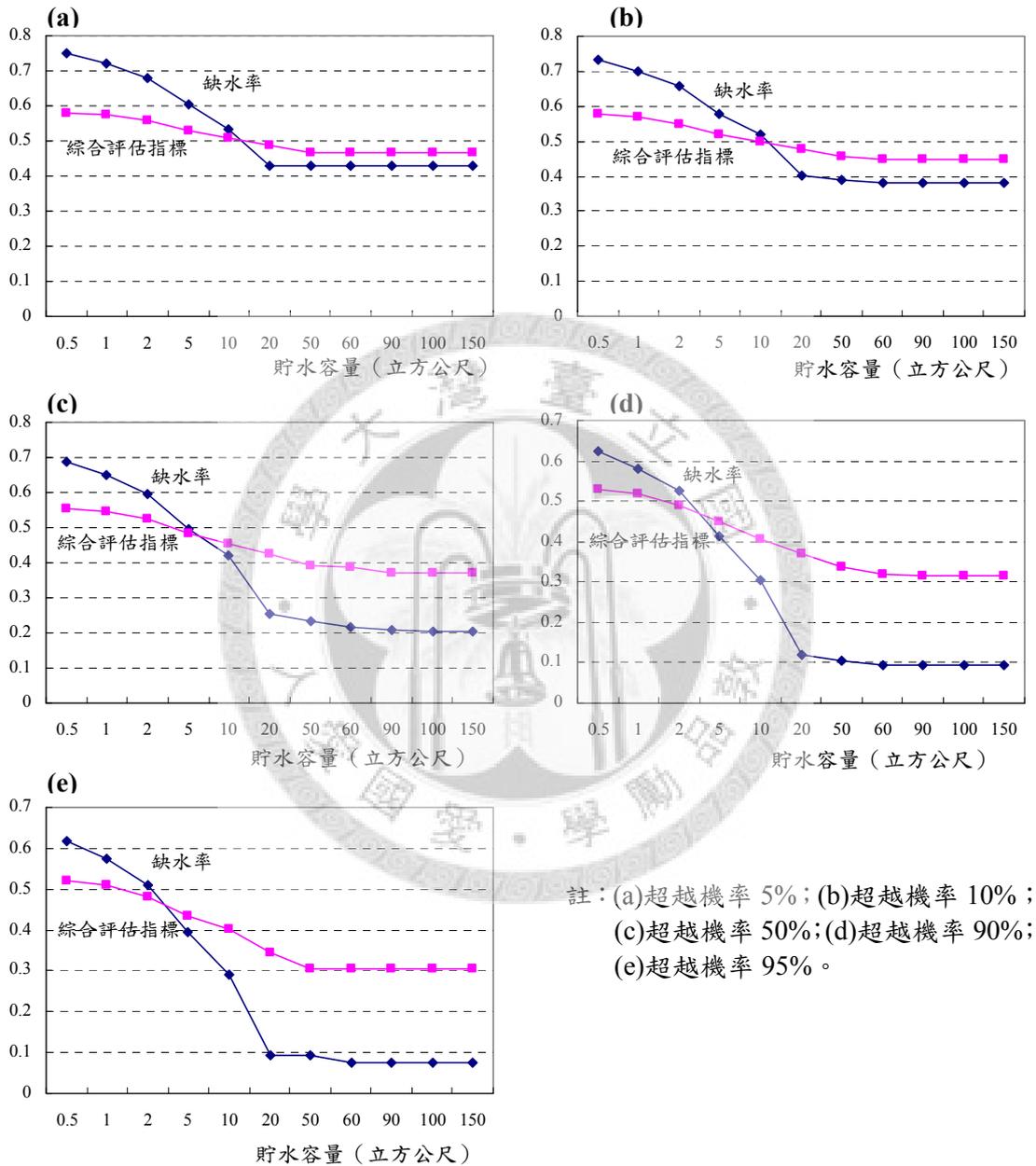


圖 6-16 台北都會區不同貯水容量下綜合評估指標與平均缺水率圖

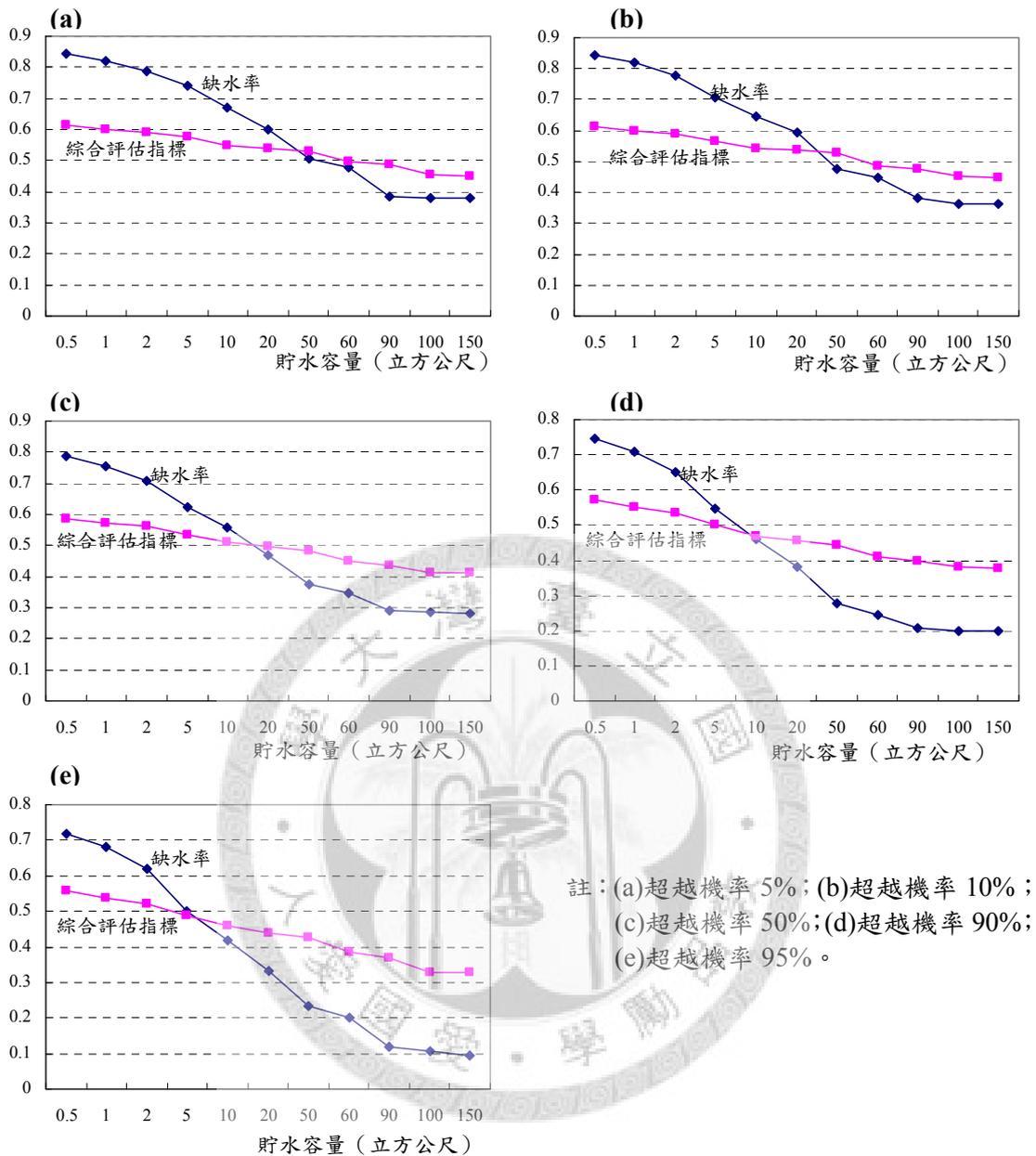


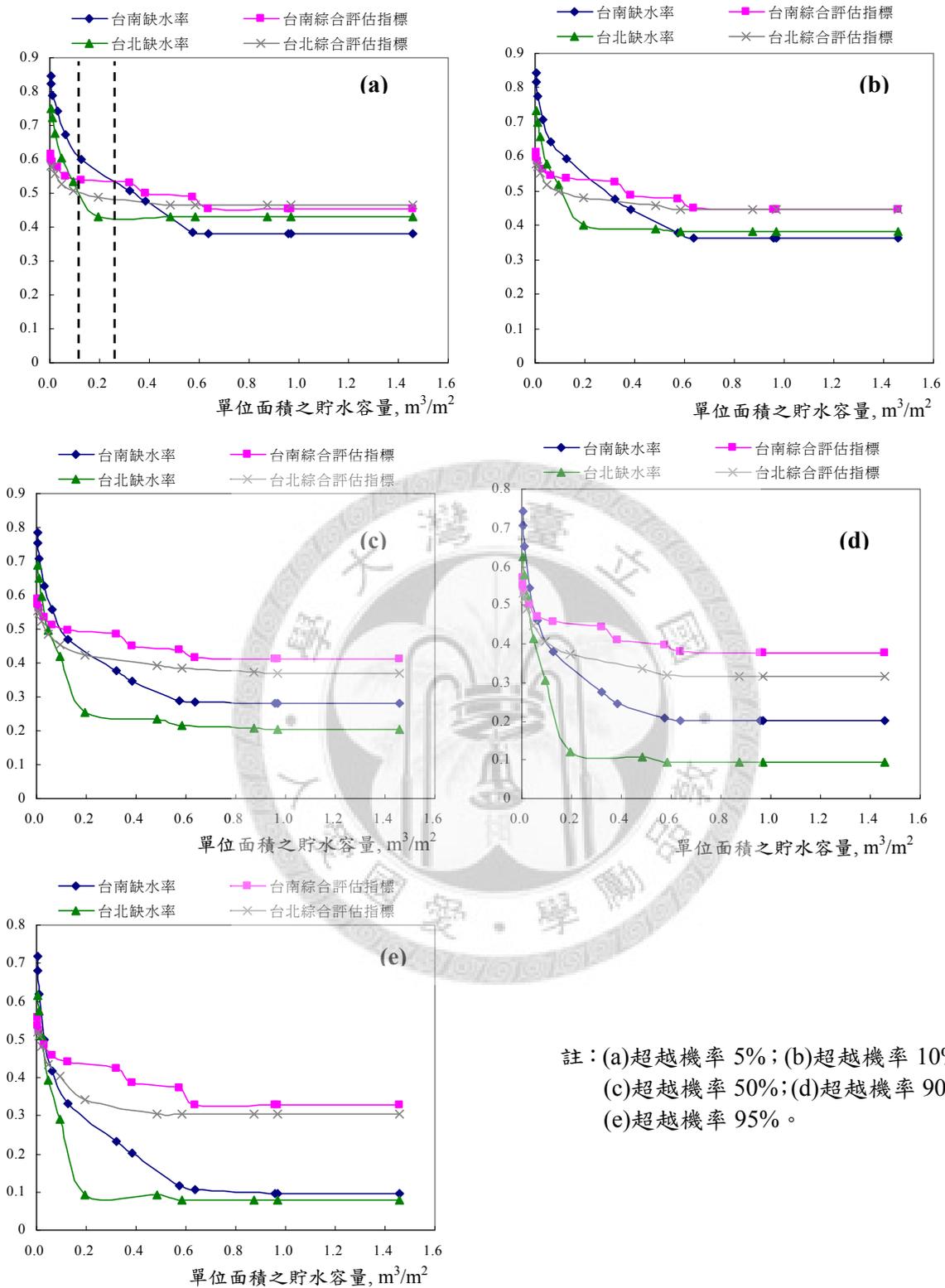
圖 6-17 台南都會區不同貯水容量下綜合指標與平均缺水率圖

圖 6-16(a)顯示，貯水容量 0~20 立方公尺時，其缺水率變化率最大，綜合評估指標變化率較缺水率小，當貯水容量大於 10 立方公尺時，於同一設計之貯水容量下，缺水率指標小於綜合評估指標。如同上述之結果，圖 6-16(b)、圖 6-16(c)、圖 6-16(d) 與圖 6-16(e)分別於貯水容量為 10 立方公尺、5 立方公尺、5 立方公尺與 2 立方公尺時，兩指標呈現交錯。

圖 6-17 台南都會區於 5%、10%、50%、90%與 95%之超越機率下，貯水容量分別為 50 立方公尺、50 立方公尺、20 立方公尺、10 立方公尺與 50 立方公尺時，缺水率與綜合評估指標結果呈現交叉。由圖 6-16 與圖 6-17 結果可知，缺水率對雨水貯集系統較綜合評估指標敏感，缺水率指標較綜合評估指標之變化值大。

另由圖 6-16(c)與圖 6-17(c)結果為例，當貯水容量設計為 20 立方公尺時，台北都會區缺水率達 0.26，其綜合評估指標為 0.41；台南都會區之缺水率則為 0.47，綜合評估指標為 0.50。當缺水率設計為 0.3 時，台北都會區約需 20 立方公尺之貯水容量，其綜合評估指標為 0.41；台南都會區則需約 90 立方公尺之貯水容量，其綜合評估指標為 0.43。此一結果顯示，台南都會區之降雨分佈不均，除該區域需有較大之貯水容量以滿足用水需求，若利用綜合評估指標做為系統設計依據，台南地區要承受比台北地區較高之系統風險。

為將兩區域做進一步之比較，本研究將圖 6-16 與圖 6-17 之橫軸（即貯水容量）轉換為單位面積之貯水容量，並整合如圖 6-18。圖 6-18(a)結果顯示，當超越機率為 5%時，缺水率若需達到穩定，台北都會區單位面積貯水容量需 $0.2 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$ ；台南都會區則需 $0.6 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$ ，但當設計之單位面積貯水容量達 $0.6 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$ 時，台南都會區之雨水貯集系統有較佳之結果。台北都會區當單位面積貯水容量小於 $0.12 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$ 時，綜合評估指標比缺水率指標有較好之系統評估結果；台南都會區則當單位面積貯水容量小於 $0.22 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$ 時，綜合評估指標比缺水率指標有較好之系統評估結果。



註：(a)超越機率 5%；(b)超越機率 10%；
 (c)超越機率 50%；(d)超越機率 90%；
 (e)超越機率 95%。

圖 6-18 不同單位面積貯水容量下之綜合指標與平均缺水率比較圖

第七章 結論與建議

7-1 結論

本研究選定台北都會區與台南都會區作為雨水貯集系統之範例研究，主要目的冀以機率模型來描述雨水貯集系統，並引入系統評估指標作為進一步之系統風險評估研討。藉此，除可看到貯水容量與缺水率間之關係，並建立一完整之雨水貯集系統規劃時之系統風險參考依據。本研究利用歷史之降雨量（1953~2002年），作為系統之入流依據，研究中僅考量屋頂面積可收集之雨量，即僅「量」之考量，關於其他因子如屋頂面積之材質、屋頂逕流係數、蒸發量、雨水水質、貯留時間與貯留材質等，並未納入研究中探討。

經由系統模擬分析後，以機率觀點描述雨水貯集系統設計容積與缺水率間之不確定性關係，可做為未來貯水槽容量大小決定之參考依據。研究中以常態分布之連續性機率方式，描述經模擬後貯水容量與缺水率間之關係，透過建立完成之機率函數曲線，轉換為超越機率曲線，作為系統分析之依據。利用超越機率曲線描述貯水容量、缺水率與機率間之連續性關係，可掌握特定情況下貯水容量之缺水率分布情形、不同超越機率下之貯水容量與缺水率關係以及不同缺水率下之貯水容量超越機率曲線。以圖 6-1 為例，如果現在要設計一個台北都會區之雨水貯集系統，希望該系統有超過一半機率（即 50%之成功率）之平均缺水率不大於 0.22，則由圖 6-1 中可以查得設計容量應為 90 立方公尺。除建立不同超越機率下貯水容量與缺水率之關係曲線外，本研究為描述以機率為概念之全貌，研究中建立了兩都會區之連續機率曲面圖，透過曲面圖之呈現，將有助進一步對於雨水貯集系統不確定性之瞭解。

本研究亦加入系統評估指標，利用系統可靠度、回復度與易損度及其綜合評估指標，進一步探討雨水貯集系統之風險分析。研究中發現，台北都會區系統之可靠度於貯水容量達 50 立方公尺時，即接近穩定，在不同超越機率下所對應之可靠度為 0.50~0.88；台南都會區則需到達 90 立方公尺時，系統之可靠性接近穩定，其可靠度為 0.60~0.88。回復度指標值隨著系統設計之貯水容量越大，在超越機率小於 50%時，回復度呈現減小之趨勢；超越機率大於 50%時，則呈微增之趨勢。此一指標描述了雨水貯集系統之彈性。由於本研究以日為最小時間單元，一年 365 天為模擬之期程，系統因無法滿足替代沖廁用水而產生之缺水，發生連續多日缺水之次數多，導致此一指標之效能不大，無法顯示回復度對系統間之差異及對貯水容量與缺水率間之影響。易損度於研究中定義平均每次缺水時之缺水率大小，由於當系統貯水容量設計越大，發生缺水次數越少，相對之每次缺水之缺水率微幅上升，但對系統之影響並不大。綜合評估指標則將上述三項指標加以線性加權平均，台北都會區於貯水容量為 50 立方公尺時，指標值呈現穩定；台南都會區則需達 90 立方公尺。

研究結果利用缺水率與系統評估指標，描述與貯水容量及超越機率之關係，並選定台北都會區與台南都會區做為例證。研究結果顯示，當系統缺水率達穩定時，台北都會區單位面積之貯水容量較台南都會區小，但當設計之單位面積貯水容量大於 0.6 時，有超過 10%之機率（如圖 6-18(a)、(b)所示）雨水貯集系統對台南都會區之系統效益高於台北都會區。依據此一結果，當降雨時間之豐枯比越大，雨水貯集系統之貯水容量越大，且對區域用水替代性越好。

7-2 建議

本研究已針對有關雨水貯水議題建立滿足日需求之模式，藉以模擬不同貯水容量對缺水率之影響，提出以機率觀點描述其變化，研究中亦建立貯水容量-缺水率-機率函數密度之三維連續曲面圖，改進過去對貯水容量之定量描述。惟本研究尚有許多因子未考量，建議於後續研究中能進一步納入，以臻研究之完整。

一、不同時間尺度之考量

雨水貯集系統相對於水資源供給系統，為一相當小之水資源供給系統。研究中利用模擬方式，以日為時間尺度之供給端（降雨）與用水端（沖廁用水）作為模式基本資料輸入。雨水貯集系統雖為小型系統，但貯水容量之設計應與區域用水特性與氣候條件作為依據，因此，不同時間尺度例如旬、月或季之貯水容量設計，若輔以本研究之模式，將更能適切的描述貯水容量之設計。

二、雨水貯集系統空間分區

直接利用降雨為雨水貯集系統最大之特色，本研究冀以不同型態之都會區，研討雨水貯集系統，但由於本研究主要著重於系統之機率探討，鮮少對於空間歧異性，進行空間分區之討論。由於降雨具空間與時間之變異特性，另外，本研究以黃金山等(2003)所推估之一用水定值做為用水需求推估，由於用水需求量之推估亦存在不確定性，若能輔以降雨之空間與時間變異性所產生之空間分區，配合區域用水特性，進而建立雨水貯集系統容量之設立依據，將有助於系統之落實推動。

三、經濟分析

雨水貯集系統被視為重要替代水源方式之一，就環保議題或永續水資源之角度看待此一系統，並配合政府相關推動或獎勵政策，雨水貯集系統經濟分析將有助於政策之推動。另外，本研究除利用缺水率作為系統評估之指標，亦引入系統評估指標，冀以系統評估之風險概念描述此一系統，但若欲完整描述系統風險，除機率分佈外，經濟分析將為重要一環，若能將雨水貯集系統帶來之效益一併於系統評估時考量，將有助於未來水資源管理議題之運用與參考。



參考文獻

- Akintug, B. and Rasmussen, P. F. (2005). "A Markov switching model for annual hydrologic time series." *Water Resources Research* 41(9).
- Becker, M. and Raasch, U. (2003). "Sustainable stormwater concepts as an essential instrument for river basin management." *Water Science and Technology* 48(10): 25-32.
- Chu, S. C., Liaw, C. H., Houg, W. L., Chien, P. W., Juan, A. H. and Juang, J. C. (1997). "Agricultural Rainwater Catchment System Capacity Design and Simulation." *Journal Of Engineering Environment*(16): 47-57.
- Dorfman, R., (1962)"Mathematic Models: The Multi-Structure Approach", A. Maass, et al. (ed)., *Design of Water-Resource Systems*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts
- Fischhoff, B., Watson, S. and Hope, C. (1984). "Defining Risk." *Policy Sciences* 17:123-139.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A. R. (2004). "Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply." *Irrig. Drain.* 53(1): 39-54.
- Hall, W. A. Bucher, W. S. and Esgbue, A. (1969). "Optimization of the operation of multiple-purpose reservoir by dynamic programming", *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 471-477.
- Hall, W.A. and N. Buras, (1961) "Dynamic Programming Approach to Water Resource Development", *Journal of Geophysical Research*, Vol.66, No.2, pp.571
- Handia, L., Tembo, J. M. and Mwiindwa, C. (2003). "Potential of rainwater harvesting in urban Zambia." *Physics And Chemistry Of The Earth* 28(20-27): 893-896.
- Hatibu, N. and Mahoo, H. (1999). *Rainwater harvesting technologies for agricultural production: A case for Dodoma, Tanzania. Conservation tillage with animal traction*, Harare, Zimbabwe.
- Heidari, M., Chow, V. T., Kotovic, P. V. and Meredith, D. D. (1971). "Discrete differential dynamic programming approach to water resources system optimization", *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 273-283

- Jenkins, M. W. and Lund, J. R. (2000). "Integrating yield and shortage management under multiple uncertainties." *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 126(5): 288-297.
- Jinno, K., Xu, Z.X., Kawamura, A. and Tajiri, K. (1995). "Risk Assessment of a Water Supply System during Drought." *Water Resources Development* 11(2): 185-204.
- Kumar, R., Singh, R. D. and Sharma, K. D. (2005). "Water resources of India." *Current Science* 89(5): 794-811.
- Larson, R. E. (1968). *State Incremental Dynamic Programming*, Elsevier Inc.
- Li, F. R., Cook, S., Geballe, G. T. and Burch, W. R. (2000). "Rainwater harvesting agriculture: An integrated system for water management on rainfed land in China's semiarid areas." *Ambio* 29(8): 477-483.
- Liaw, C. H. and Tsai, Y. L. (2004). "Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use." *Journal of the American Water Resources Association* 40(4): 901-912.
- Little, J.D.C. (1955), "The Use of Storage Water in a Hydro-electric System", *Operation Research*, Vol. 3, pp.197.
- Maass, A., Hufschmidt, M.M., Dorfman, R., Thomas, H.A., Jr., Marglin, S.A., and Fair, G.M.,(1962) "Design of Water-Resource Sys-tems",Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts
- Machiwal D., Jha M.K., Singh P.K., Mahnot S.C, and Gupta A. (2004). "Planning and Design of Cost-effective Water Harvesting Structures for Efficient Utilization of Scarce Water Resources in Semi-arid Regions of Rajasthan, India." *Water Resources Management* 18: 219–235.
- Manne, A.S. (1960). "Linear Programming and Sequential Decisions", *Management Science*, 6
- Merabtene, T., Kawamura, A., Jinno, K. and Olsson, J. (2002). "Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm." *Hydrological Processes* 16(11): 2189–2208.
- Motsi, K. E., Chuma, E. and Mukamuri, B. B. (2004). "Rainwater harvesting for sustainable agriculture in communal lands of Zimbabwe." *Physics and Chemistry of the Earth* 29(15-18): 1069-1073.

- Nandalal, K. D. W. and Sakthivadivel, R. (2002). "Planning and management of a complex water resource system: case of Samanalawewa and Udawalawe reservoirs in the Walawe river, Sri Lanka." *Agricultural Water Managem*
- Negri, D. H., Gollehon, N. R. and Aillery, M. P. (2005). "The effects of climatic variability on US irrigation adoption." *Climatic Change* 69(2-3): 299-323.
- Ngigi, S.N. , Savenije, H.H.G., Gichuki, F.N. Land use changes and hydrological impacts related to up-scaling of rainwater harvesting and management in upper Ewaso Ng'iro river basin, Kenya. *Land Use Policy* Volume 24, Issue 1, January 2007, Pages 129-140
- Nie, S. L., Li, Y. P., Shi, X. Y., Huang, G. H. and Hu, B. (2009). "An IPINP model for the assessment of filter allocation and replacement strategies in a hydraulic contamination control system under uncertainty." *PROC INST MECH ENG C-J MECH E* 223, 999-1015.
- Panigrahi, B., Panda, S. N. and Mull, R. (2001). "Simulation of water harvesting potential in rainfed ricelands using water balance model." *Agricultural Systems* 69(3): 165-182.
- Panigrahi, B., Panda, S. N. and Agrawal, A. (2005). "Water balance simulation and economic analysis for optimal size of on-farm reservoir." *Water Resources Management* 19(3): 233-250.
- Qian, S. S., Schulman, A., Koplos, J., Kotros, A. and Kellar, P. (2004). "A hierarchical modeling approach for estimating national distributions of chemicals in public drinking water systems." *Environmental Science & Technology* 38(4): 1176-1182.
- Rahman, M. and Yusuf, F.-U.-A.M.S. (2000). *Rainwater Harvesting And The Reliability Concept*. 8Th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability.
- Russell, S. O., and Campbell, P. F. (1996). "Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, No.3, pp.165-170.
- Schwing, R. C. and Albers, W. A. (1980). *Societal Risk Assessment—How Safe is Safe Enough?* New York : Plenum Press.
- Srivastava, R. C. (2001). "Methodology for design of water harvesting system for high

- rainfall areas." *Agricultural Water Management* 47(1): 37-53.
- Su, M. D., Lin, C. H., Chang, L. F., Kang, J. L. and Lin, M. C. (2009). "A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation". *Resources, Conservation and Recycling* 53, pp. 393–399.
- Theodossiou, N. P. (2004). "Application of non-linear simulation and optimisation models in groundwater aquifer management." *Water Resources Management* 18(2): 125-141.
- Thomas, T. (1998). "Domestic water supply using rainwater harvesting." *Building Research And Information* 26(2): 94-101.
- Wang, J. W., Yuan, X. H., Zhang, Y. C. and Zhang, Y. Q. (2003). "A reliability and risk analysis system for multipurpose reservoir operation." *Environmental Fluid Mechanics* 3(4): 289-303.
- Wei, H., Li, J. L. and Liang, T. G. (2005). "Study on the estimation of precipitation resources for rainwater harvesting agriculture in semi-arid land of China." *Agricultural Water Management* 71(1): 33-45.
- Wung, T. C., Lin, S. H. and Huang, S. M. (2006). "Rainwater reuse supply and demand response in urban elementary school of different districts in Taipei. " *Resources Conservation and Recycling* 46(2), 149-167.
- Young, G. K. (1967), "Finding reservoir operation rules", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, pp. 297-320.
- Yue, S. and Wang, C. Y. (2004). "Possible regional probability distribution type of Canadian annual streamflow by L-moments." *Water Resources Management* 18(5): 425-438.
- Yusuf, F. M. S. and Yusuf, F.-U.-A. M.S. (1999). *RAINWATER HARVESTING POTENTIAL IN BANGLADESH*. Dhaka, Department of Civil Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology Master. Sc. Engg.
- Zhang, X. Y. and Cai, H. J. (2003). "The development of the model to simulate and optimize the rainwater-harvesting system for irrigation." *Journal Of Experimental Botany* 54: 45-46.

- 中央氣象局 (1995),「專用氣象觀測站基本資料」。
- 王琪南 (2000),「雨水貯蓄設施之成效評估」,國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 台北市政府 (2005),「台北市地政統計年報」。
- 台北自來水事業處 (2007),「臺北自來水事業統計年報」。
- 台南市政府 (2005),「台南市地政統計年報」。
- 台灣雨水利用協會, [http:// www.rainwater.org.tw /](http://www.rainwater.org.tw/)。
- 朱壽銓、黃文政與黃珮貞(2000),「模擬法在水庫操作規線上之應用」,台灣水利, 48(4): 53-63。
- 朱壽銓與黃文龍 (1997),「台灣地區雨水貯留供水系統之研究」,台灣水利, 45(3): 55-60。
- 朱壽銓、黃文龍、陳仁宗與李士畦 (1997),「雨水貯留供水系統最適化設計技術準則之研究」,第三屆水再生及再利用研討會。
- 呂宗達 (1990),「區域開發需水量預測模式」,淡江大學水資源與環境工程研究所碩士論文。
- 李士畦(1997),「三芝國小雨水貯集供水系統」,節約用水季刊, 10。
- 李士畦、林敏朝(2001),「慈濟之建築雨水利用工程規劃與設置實例」,中華水資源管理學會季刊, 4(2)。
- 李士畦、陳仁仲與黃慶光 (1997),「雨水貯集利用暨學校用水回收再利用工作之推廣與評估」,第三屆水再生及再利用研討會。
- 陳惠燕 (1995),「農業土地使用決策支援系統建立之研究-以台中市稻作生產為例」,逢甲大學土地管理所碩士論文。
- 易任 (1970),「烏山頭水庫之應用研究」,農業灌溉水文第十四號研究報告。
- 施國肱 (1984),「序率出水模式之研討」,農業工程學報, 30(3): 27-39。
- 柯木峰 (1998),「克利金法結合地理資訊系統於地下水之研究初探」,國立中興大學環境工程研究所碩士論文。
- 胡文章 (1977),「線性規劃在水庫規劃及操作之應用」,台灣水利, 26(1): 15-29。

- 徐享崑與李朝晉 (1986),「串聯水庫系統離散型微分動態規劃模式之應用研究」, 第三屆水利工程研討會論文集。
- 徐忠寶 (1996),「石門水庫操作規則之推導及評估」, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 張玉送 (1994),「地理資訊及決策支援系統輔助水資源管理模擬研究」, 國立台灣大學地理學研究所博士論文。
- 張近東 (2006),「利用公園雨水貯留澆灌市區綠地研究—以台北市為例」, 中華大學土木與工程資訊學系碩士論文。
- 張雅婷 (2006),「調適性模糊推論系統於水庫操作之研究」, 國立台灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
- 許少瑜 (2001),「水庫操作規線問題的模式與解法」, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 許榮哲 (1998),「灰色模糊動態規劃於水庫即時操作之應用」, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 郭振泰、楊德良與鄭美珍 (1985),「動態規劃優選模式應用於石門及翡翠水庫並聯操作」, 經濟部水資會。
- 郭振泰、鄧志皓與鄭銘欽 (1988),「應用序率線性規劃於翡翠水庫運轉之研究」, 第四屆水利工程研討會論文集。
- 郭蒼霖 (2000),「遺傳演算法於多水庫最佳操作規線優選之應用」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 郭錦文 (1995),「德基水庫操作優選模式之研究」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
- 陳奎麟 (1995),「河川流域水質管理之研究：總量管制管理系統之發展與建立」, 國立中央大學環境工程研究所碩士論文。
- 陳莉 (1990),「動態規劃模式有效應用於多水庫系統操作之研究」, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 陳瑞鈴 (2002),「綠建築評估及標章制度」, 2002 年度生態工法講習會, 交通部高速鐵路工程局。
- 陳慶和 (1997),「河川流域水管理決策理論與決策支援系統之發展」, 國立中央大學環境工程研究所博士論文。

- 惠士奇 (1997),「灰色模糊序率動態規劃於水庫操作之應用」,國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 黃吉正 (2000),「屋頂雨水貯集系統之區域性系統容量設計」,台灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 黃金山、謝政道、陳仁仲、傅孟台與黃珮貞 (2003),「民生用水節水管理」,永續產業發展雙月刊。
- 黃政鴻 (1997),「地理資訊系統網際網路水文模擬之應用」,國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
- 黃照君 (2001),「山坡地區雨水貯集之防洪效益研究—以汐止市為例」,中國文化大學地學研究所地理組碩士論文。
- 黃義銘 (1996),「類神經網路在調配區域水資源之應用」,國立成功大學水利及海洋工程學研究所碩士論文。
- 黃錦祥 (1986),「動態規劃優選模式應用於水庫系統聯合操作之分析」,台大土木工程研究所碩士論文。
- 溫在弘 (2007),「標的間用水移轉對區域乾旱缺水風險分佈之影響」,國立台灣大學生物環境系統工程研究所博士論文。
- 萬象 (1985),「串聯水庫系統最佳操作模式之研究」,國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 萬象 (1990),「水庫即時優選操作與風險分析之研究」,國立台灣大學農業工程研究所博士論文。
- 經濟部水利署 (2000),「雨水與中水利用手冊」。
- 經濟部水利署 (2004),「雨水利用手冊」。
- 經濟部水利署 (2007),「水利統計」。
- 廖朝軒、朱壽銓、蔡耀隆與陳琬渝 (1997),「屋頂雨水貯集供水系統之最佳化設計」,第三屆水再生及再利用研討會。
- 劉佳明 (1987),「水庫容量線性對偶模式與網路解法」,水資源管理研討會。
- 劉佳明 (1988),「水庫標的線性規劃問題之網路切割法簡介」,台灣水利季刊, 36(2)。

劉豐壽、黃月娟與顏幸苑 (1999),「雨水貯留系統發展趨勢與推廣成效」,八十八年度農業工程研討會。

鄭政利與廖朝軒 (2003),「建築基地保水滲透技術設計規範與法制化之研究子計畫二:雨水貯集利用工法性能實驗解析」,內政部建築研究所。

鄭惠丹 (1994),「空間決策支援系統之研究-土地利用模式建構輔助系統之設計」,國立台灣大學地理所碩士論文。

鄭蔚辰 (2001),「應用遺傳演算法探討多目標水資源系統分析-以濁水溪流域為例」,國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。

