

國立臺灣大學生物環境資源暨農學院

生物環境系統工程學系研究所

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

供水系統承載力評估方法與水資源應變機制之研究

Study on Methodology for Carrying Capacity Assessment

and Response Mechanism of Water Supply System

謝佳璇

Chia-Hsuan Hsieh

指導教授：童慶斌 博士

Advisor: Ching-Pin Tung Ph.D.

中華民國 102 年 8 月

August 2013





摘要

永續發展之精神在於不造成環境退化的前提下，善用環境資源以支持經濟社會之持續發展。為符合永續之精神，在掌握現有與規劃中之水利設施下，同時考慮供水系統容忍之缺水風險水準，分析能提供之供水能力，並考量未來供水承载力限制下，規劃區域發展之水資源需求。蘭陽河流域因過去缺水不嚴重，所以尚未興建水庫，又因其地區發展已久，已建置完善之供水系統，此相較台灣其他地區獨特的水資源供水發展，當未來若面臨可能之缺水危機時，正好可以改善台灣過去之水資源系統發展較不考慮環境資源限制與退化等問題，以更符合永續性的概念規劃未來因應缺水之應變機制。本研究分析蘭陽溪水資源系統之供水承载力，並模擬未來需水量可能改變情形。根據未來供水承载力進行敏感度分析，可得到滿足缺水風險下之敏感因子包絡線。此外，以永續利用為願景，在降低缺水與善用環境資源並不造成退化的前提下，探討水資源遇缺水情形之各種應變方法，提出不同缺水情形之供水策略，包括地下水作為備援用水、地下水作為常態用水、與增加蓄水設施進行地表地下水聯合營運。

另外，本研究透過設計案例，根據不同缺水情形之應變機制想法中，提出當缺水程度達到需要增加蓄水設施來增加蓄水，則可結合地下水抽水，將地表水水庫與地下水皆視為常態供水系統進行聯合營運。藉由水庫操作規線之概念，依據地下水累積洩降率加以分區，並透過禁忌演算法優選出同時考慮缺水最少且地下水累積洩降率最小之最佳供水比例，分配地表水與地下水之供水量，建立地表水與地下水之供水規則與聯合營運操作規線。根據研究結果可知，增加地下水累積洩降率分界個數可使目標函數值越來越小，且使用聯合營運優選會得到較只以地表水作為唯一供水來源及使用地表水且將地下水當作備援用水更佳之結果。

關鍵詞：永續發展、供水承载力、禁忌演算法、地表地下水聯合營運、水資源管理



Abstract



The spirit of sustainable development is not only using the environmental resources efficiently for economic and social development but also protecting the environment from degrading. To implement the spirit, analyzing the carrying capacity of water supply due to present and planning facilities and tolerance of water shortage is important. Also, considering the limits of future carrying capacity can scheme the development of future regional water resources. The Lanyang creek watershed is a unique area of water supply development in Taiwan. It rarely has severe water shortage. Therefore, no reservoir is built in the area. However, to support the long-time developments, it has well-built water supply systems. According to the Lanyang creek Watershed's special development, a different development of water resource system with more environmental considerations can be put into practice when it confronts with possible water shortage risks. This study analyzes the carrying capacity of water supply systems of Lanyang creek watershed and future water demands. According to the results of sensitivity analysis on future carrying capacity, the envelopes of key factors can be determined to make sure not exceeding acceptable risks of water shortage. Moreover, with the vision of sustainable development, this study discusses the measures dealing with water shortage and brings up the water supply strategies for different shortage situations. The measures include using groundwater as backup supply, using groundwater as normal supply, and constructing water-storing facilities to conduct conjunctive operation of surface water and groundwater.

Base on the design case study on the measures of conjunctive use of surface water and groundwater, this study proposes constructing water-storing facilities to increase retaining water and pumping groundwater for normal water supply. This study develops conjunctive operation rule curves, which extends the concept of reservoir operation rule curves to the conjunctive use of surface water and groundwater and allows pumping groundwater during the non-drought periods. The rule curve's goal is to minimize the total water shortage and groundwater drawdown and the Tabu search and the stepwise method are applied to fine the optimal operational rule curves. According to the results of design case study, the optimized conjunctive operation rule curves can reduced more water shortagethan using surface water only or using groundwater as backup.

Keywords: Sustainable Development, Carrying Capacity of Water Supply, Tabu Search, Conjunctive Operation of Surface Water and Groundwater, Water Resources Management



目錄



摘要	I
Abstract.....	III
圖目錄	IX
表目錄	XI
第一章、緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究內容與架構	3
第二章、文獻回顧	7
2.1 供水承载力	7
2.2 不同缺水情形之水資源應變機制	9
2.3 地表地下水聯合營運優選	10
第三章、研究方法	13
3.1 研究架構	13
3.2 氣象資料合成模式	14
3.3 GWLF 流量模式	15
3.4 供水承载力	21
3.5 系統動力模式- Vensim	22
3.6 地表水地下水聯合營運	23
3.6.1 地下水模式- MODFLOW	23
3.6.2 聯合營運操作規則	25



3.6.3 最大可抽水率.....	28
3.6.4 禁忌演算法.....	29
3.6.5 逐步法.....	32
第四章、蘭陽溪流域之供水承载力與不同缺水情形之水資源應變機制.....	35
4.1 研究區域.....	35
4.2 蘭陽溪流域供水系統與供水承载力.....	37
4.2.1 蘭陽溪流域水資源系統之建構.....	37
4.2.2 水資源系統動力模式設定與資料輸入.....	44
4.2.3 供水承载力.....	51
4.3 供水承载力之敏感度分析.....	52
4.4 不同缺水情形之水資源應變機制.....	59
4.4.1 地下水-備援用水.....	60
4.4.2 地下水-常態用水.....	61
4.4.3 增加蓄水設施-地表地下水聯合營運.....	61
第五章、地表地下水聯合營運案例設計.....	63
5.1 研究案例之設計.....	63
5.2 優選結果討論.....	65
5.2.1 最大可抽水量.....	65
5.2.2 地表地下水聯合營運操作規線.....	66
第六章、結論與建議.....	75
6.1 結論.....	75

6.2 建議.....	77
參考文獻.....	79
附錄一、供水承载力包絡線對雨量敏感度分析結果.....	85
附錄二、供水承载力包絡線對不同雨量敏感度分析.....	87
附錄三、蘭陽水力發電廠發電用水量統計表.....	91
附錄四、宜蘭水利會灌渠與水源統計表.....	93



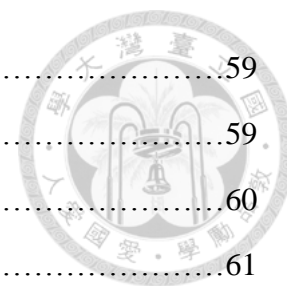


圖目錄



圖 1.1 蘭陽河流域平均降雨量之變化趨勢 (參考來源:童慶斌,2011).....	4
圖 1.2 蘭陽河流域年降雨天數之變化趨勢(參考來源:童慶斌,2011).....	4
圖 1.3 蘭陽河流域日平均降雨量變化趨勢(參考來源:童慶斌,2011).....	4
圖 1.4 研究與章節流程.....	5
圖 3.1 供水承载力研究流程圖.....	13
圖 3.2 地表地下水聯合營運操作規線研究流程圖.....	14
圖 3.3 The GWLF 模式水平衡關係示意圖.....	16
圖 3.4 CN 值與臨前水分關係圖.....	18
圖 3.5 CN 值與臨前水分內插關係圖.....	18
圖 3.6 聯合營運操作規則.....	25
圖 3.7 禁忌演算法演算流程圖.....	33
圖 4.1 蘭陽平原區域範圍圖(參考來源:中央地調所).....	36
圖 4.2 宜蘭縣行政區圖.....	36
圖 4.3 自來水公司第八管理處之供水轄區(參考來源:自來水公司第八管理處).....	37
圖 4.4 宜蘭自來水供水系統圖(參考來源:水資源暨自來水供水系統聯合調度管理系統建置探討,水規所,民國 100 年。)	39
圖 4.5 蘭陽溪水資源系統架構圖.....	40
圖 4.6 水庫系統轉換為系統動力模式之示意圖.....	43
圖 4.7 蘭陽溪水資源系統動力模式架構.....	45
圖 4.8 家源橋流量驗證結果.....	46
圖 4.9 蘭陽河流域農業灌溉渠道示意圖(參考來源:農田水利數位博物館網站) ...	50
圖 4.10 宜蘭農田水利會年灌溉水量之各旬分配比例(參考來源:童慶斌,2011)...	51
圖 4.11 宜蘭地區承载力包絡線(SI=1).....	56
圖 4.12 羅東地區承载力包絡線(SI=1).....	57
圖 4.13 宜蘭地區承载力包絡線.....	58

圖 4.14 羅東地區承载力包絡線.....	59
圖 4.15 不同缺水情形之水資源應變機制階段圖.....	59
圖 4.16 地下水作為備援用水示意圖.....	60
圖 4.17 地下水作為常態用水示意圖.....	61
圖 5.1 MODFLOW 地下水模式網格設定.....	63
圖 5.2 水庫 20 年入流量與需水量資料.....	64
圖 5.3 各口井之優選抽水率結果.....	65
圖 5.4 各抽水井之地下水位變化量.....	66
圖 5.5 聯合營運操作規線圖(二區).....	67
圖 5.6 聯合營運地表水入流量與地表地下水供水量.....	68
圖 5.7 禁忌演算法優選結果.....	71
圖 5.8 聯合營運操作規線圖(三區).....	72
圖 5.9 聯合營運操作規線圖(四區).....	73



表目錄



表 3.1	AM1、AM2 之值(平均溫度大於 10°C 為生長期,反之為休耕).....	17
表 4.1	宜蘭地區主要淨水場供水能力設計、現況及規劃表.....	41
表 4.2	蘭陽河流域支流流量推求方式(資料來源:水規所 2008).....	48
表 4.3	現況供水承载力.....	52
表 4.4	各分區之生活需水量.....	54
表 4.5	宜蘭地區不同的人口成長對每人每日用水量之改變.....	55
表 4.6	羅東地區不同的人口成長對每人每日用水量之改變.....	56
表 5.1	二區變數優選結果.....	67
表 5.2	敏感度分析結果(2區).....	69
表 5.3	不同情境與分區之優選結果.....	70
附表 1.1、	宜蘭地區供水承载力包絡線對雨量敏感度分析.....	85
附表 1.2、	羅東地區供水承载力包絡線對雨量敏感度分析.....	86
附表 3.1、	員山發電廠淨發電用水量統計表.....	91
附表 3.2、	天埤發電廠淨發電用水量統計表.....	92
附表 4.1、	水利會頭城灌區灌渠與水源統計表.....	93
附表 4.2、	水利會礁溪灌區灌渠與水源統計表.....	94
附表 4.3、	水利會壯圍灌區灌渠與水源統計表.....	95
附表 4.4、	水利會員山灌區灌渠與水源統計表.....	96
附表 4.5、	水利會宜蘭灌區灌渠與水源統計表.....	97
附表 4.6、	水利會三星灌區灌渠與水源統計表.....	98
附表 4.7、	水利會羅東灌區灌渠與水源統計表.....	99
附表 4.8、	水利會五結灌區灌渠與水源統計表.....	101
附表 4.9、	水利會冬山灌區灌渠與水源統計表.....	102
附表 4.10、	水利會蘇澳灌區灌渠與水源統計表.....	103



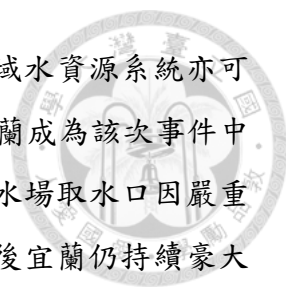
第一章、緒論



1.1 研究動機與目的

永續發展之精神在於不造成環境退化的前提下，善用環境資源以支持經濟社會之持續發展。過去台灣在各水資源分區均已開發完善的水利設施，未來大型水利設施增設不易，如何在掌握現有與規劃中之水利設施下，同時考慮供水系統容忍之缺水風險水準，分析能提供之供水能力，即為環境可支持經濟社會發展之一項重要承载力，為符合永續之精神，需考量未來供水承载力限制下，規劃區域發展。

蘭陽河流域長期仰賴川流取水與抽取地下水作為主要的水資源，根據中央氣象局宜蘭測候站統計，宜蘭是全台灣降雨最豐富的地區之一，因宜蘭平原向東方海面開放，每年秋冬，強烈的東北季風挾帶豐沛的水氣長驅直入，會帶來大量的雨水，此外在春季的梅雨季節也常連下數月的細雨，而夏天也會受颱風影響帶來強降雨，正因為這樣得天獨厚的水資源環境，使得蘭陽溪水資源系統長期不需建造水庫，即可滿足基本用水需求。然而受到了氣候變遷的影響下，宜蘭地區長期的氣候特性可能逐漸發生變化。統計蘭陽河流域歷年來之平均年降雨量，可發現其平均降雨量呈現逐漸增加的趨勢（圖 1.1）。然而就平均降雨日數（圖 1.2）而言，蘭陽溪之年平均降雨日數卻逐年減少，且降雨日平均降雨量（圖 1.3）則有逐漸增加之趨勢。綜合上述結果，現況降雨變化趨勢與未來氣候變遷預測趨於極端化之變化趨勢相似，如果氣候變遷繼續影響，蘭陽溪於未來可能會面臨更強的日常降雨量與更長連續不降雨日，卻缺少水庫系統於豐水時期蓄存使用不到的水資源；年平均降雨天數的減少，隱含除了減少地表水可利用量，同時也減少由地表水補注之地下水量。過去蘭陽河流域之豐沛降雨維持供水系統遠離缺水風險，但考慮未來雨量或需水量變化時，蘭陽河流域是否會遭遇缺水風險，或是其降雨量還是可以滿足供水需求，為現今水資源管理與規劃必需瞭解之資訊。



除了降雨特性的改變外，受到氣候變遷的影響，蘭陽河流域水資源系統亦可能遭受旱災以外的衝擊。例如 2009 年 10 月的芭瑪颱風，讓宜蘭成為該次事件中全台受創最嚴重的區域，台灣自來水公司第八區管理處寒溪淨水場取水口因嚴重土石坍方致使導水管完全流失，雖一度進行搶修，然而因風災後宜蘭仍持續豪大雨，使得緊急搶修而成的取水設施再遭流失，無法供水。由於寒溪淨水廠並未設置替代水資源，使得該區供水發生問題。2010 年的 10 月侵襲台灣的梅姬颱風，讓宜蘭地區遭受近百年來最大的洪災，除了多數鄉鎮出現淹水情形，鐵路、公路交通受到影響而中斷外，蘇澳淨水場甚至被洪水淹沒導致該地區出現無法供水之窘境，影響範圍多達一萬兩千戶，此外宜蘭寒溪地區也因取水口損壞而無法取水，導致該地區出現供水問題。回顧歷史，宜蘭地區歷史上也鮮少發生乾旱事件（僅 1998 年、2002 年、與 2003 年三筆記錄），也幾乎未曾發生過自來水取水口因颱風影響而崩塌的案例，然而接連兩年的颱風事件，卻為宜蘭地區的水資源帶來了前所未有的新型態災害，絕不可等閒視之。

綜上，面對未來氣候型態與需水量改變下，將可能導致蘭陽溪地區供水系統遭受衝擊。有鑑於社會經濟發展須依賴可靠的水資源供給之重要性，本研究之目標為分析蘭陽溪水資源系統之目前與未來供水承载力，並考慮未來人口與需水量變化，進一步討論可能之缺水風險。此外以永續利用為願景，於降低缺水與善用環境資源並不造成退化的前提下，討論水資源可能遭遇缺水情形之各種應變機制，提出不同缺水情形之供水策略，並針對其中應變機制提出可實行規則或透過假設案例進行分析模擬。

水文循環由降水至地表開始，一部分於形成地表逕流，一部分則是向下入滲至地下水，地表逕流與地下水排出水量又會匯集至河川後流入海洋，透過地面與海面之蒸發至大氣，又凝結形成降水。從這過程可看出地表水與地下水為互相影響，由於地表水經入滲補注至地下水為一緩慢過程，而地下水流出至河川形成基流同樣也需花費一段時間，因此可將地下水含水層視為一龐大之地下水庫，若僅將水儲存至地底下卻不使用也是一種浪費。因此，如何妥善抽取使用地下水，並

能配合地表水來做最佳的分配利用，是本研究提出不同缺水情形之應變機制的主要研究項目。

蘭陽河流域因過去缺水不嚴重，所以尚未興建水庫，又因其地區發展已久，已建置完善之供水系統，此相較台灣其他地區獨特的水資源供水發展，當未來若面臨可能之缺水危機時，正好可以改善台灣過去之水資源系統發展較不考慮環境資源限制與退化等問題，以更符合永續性的概念規劃未來因應缺水之應變機制，將可使用且取得容易之地下水資源與地表水結合使用，以合理且最有效率的方法加入供水系統，並根據未來可能遭遇之不同缺水情形有不同的供水應變機制，不僅可增強蘭陽河流域未來對缺水的調適能力，也可供其他尚未興建蓄水設施或與目前蘭陽河流域水資源系統相似之區域作為未來水資源系統設計規劃參考分析方法。

1.2 研究內容與架構

本研究將應用氣象合成模式、Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) 中之水文模式、與水資源系統動力模式分析蘭陽溪水資源系統之供水承载力，並以未來水資源系統可能改善與人口改變情形，評估未來系統之供水承载力，再根據不同缺水情形對未來供水承载力進行敏感度分析，得到不導致超過可接受缺水風險之敏感因子包絡線，希望能提供決策者進行此區域未來發展之決策分析。此外以永續利用為願景，在降低缺水與善用環境資源並不造成退化的前提下，探討水資源遇缺水情形之各種應變方法，提出不同缺水情形之供水策略。

地表水與地下水聯合營運之研究早已發展多年，一般僅討論使用地表水與地下水可減少多少缺水量，並較少建立地表水與地下水之聯合運用規則，因此本研究根據不同缺水情形之應變機制想法中，提出當缺水情形嚴重，需要增加蓄水設施來增加蓄水，並結合地下水抽水，將地表水水庫與地下水皆視為常態供水系統，進行聯合營運。藉由水庫操作規線之概念，依據地下水累積洩降率加以分區，並透過禁忌演算法優選出同時考慮缺水最少且地下水累積洩降率最小之最佳供水比

例，分配地表水與地下水之供水量，建立地表水與地下水之供水規則與聯合營運操作規線。研究章節與研究架構如圖 1.4。

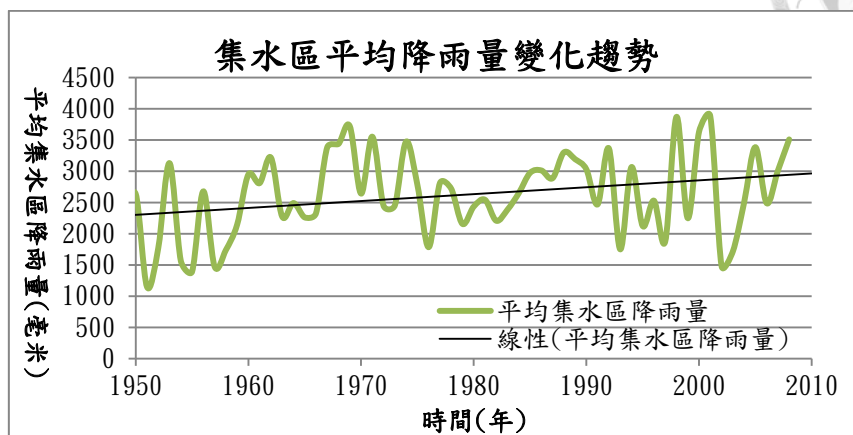


圖 1.1 蘭陽河流域平均降雨量之變化趨勢 (參考來源：童慶斌，2011)

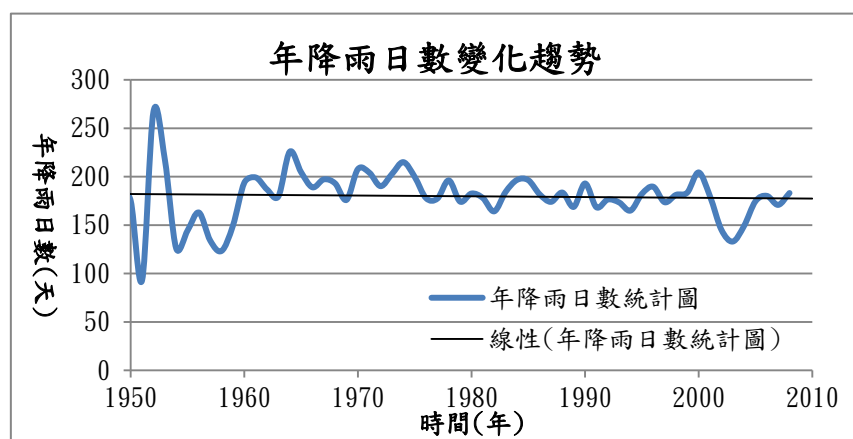


圖 1.2 蘭陽河流域年降雨天數之變化趨勢(參考來源：童慶斌，2011)

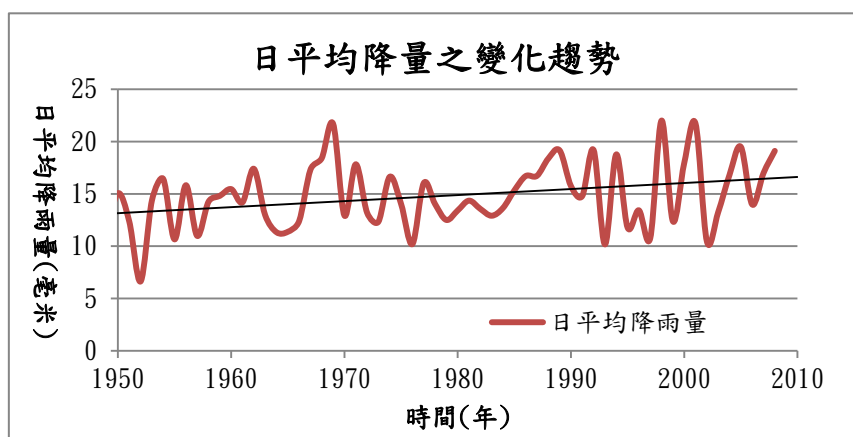


圖 1.3 蘭陽河流域日平均降雨量變化趨勢(參考來源：童慶斌，2011)

本論文共分為六個章節，第二章為相關文獻回顧，第三章介紹本研究之研究方法，包括氣象合成模式、GWLFF 中之水文模式、系統動力模式、承载力評估方法、與地表地下水聯合營運操作規則。第四章針對蘭陽河流域進行供水承载力評估與敏感度分析，並提出相關水資源應變機制。第五章為根據前一章提出之應變機制，討論其中地表地下水聯合營運之操作規則，並設計假設案例進行模擬，並就其結果討論。最後第六章為本研究之結論與建議。

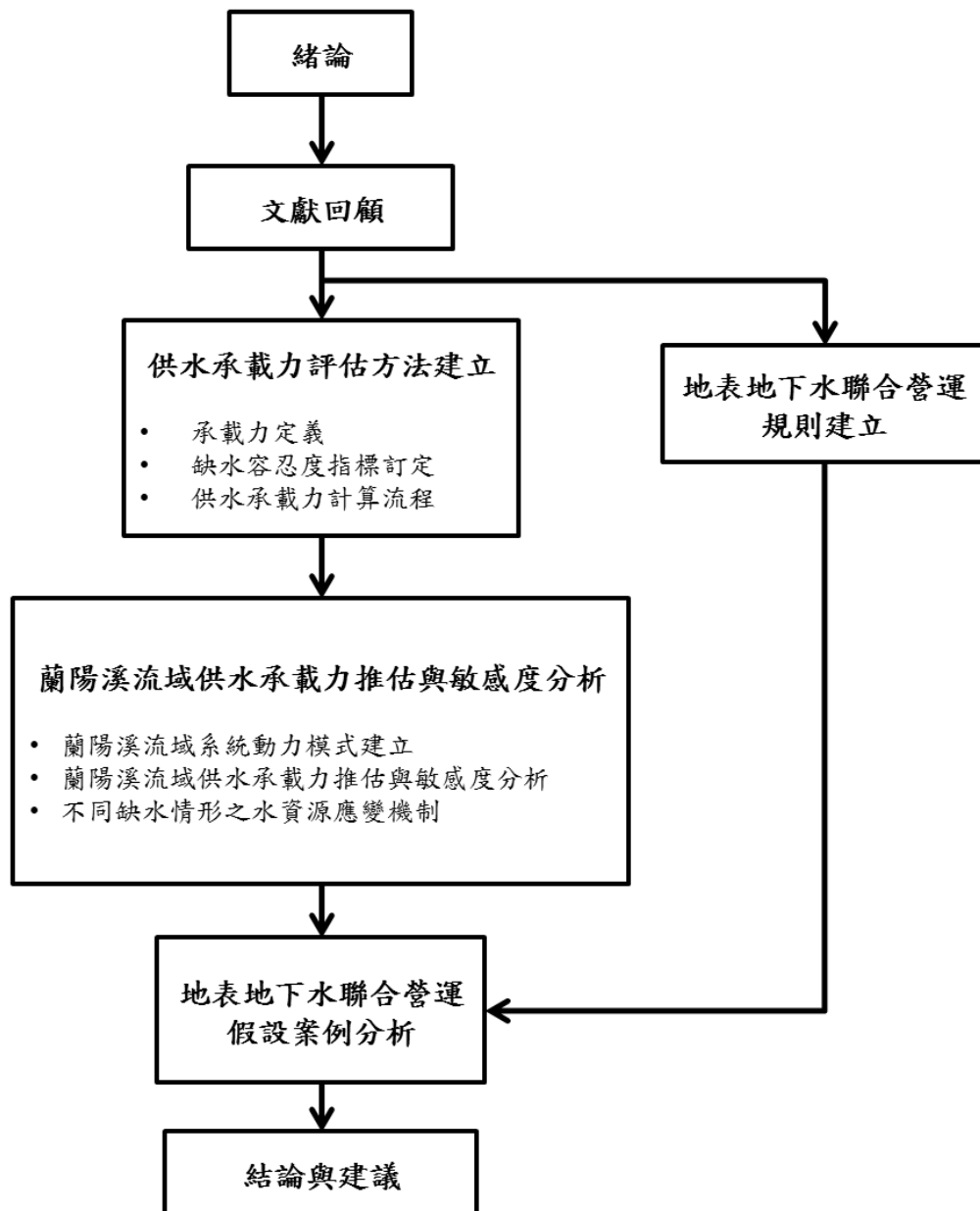


圖 1.4 研究與章節流程



第二章、文獻回顧




本章為相關文獻介紹，主要包含供水承载力之定義與評估方法之研究，與水資源應變機制之相關討論。另外地表水與地下水聯合營運之相關研究，介紹各國學者運用之工具與方式，來分配調整地表水與地下水之使用。本研究根據相關文獻進行整合與修正，做為研究之方法依據與案例設計。

2.1 供水承载力

供水系統之承载力是考量可容忍缺水風險下之最大可供水量，必須同時考量整個供水設施系統與水文條件而推估。因此，缺水指標、缺水容忍度以及系統評估方法乃評估水資源供水承载力之主要關鍵。

選用缺水容忍度指標時，US Army Corps of Engineers (1970) 建議採用缺水指標 SI(Shortage Index)評估供水績效或缺水嚴重度。缺水指標主要在描述年需水量與年計畫供水量間之關係，以缺水率的平方來呈現年缺水之程度，主要之目的是要將不同年間之缺水狀況平均化，對於較嚴重之乾旱狀況給予較高的權重。除了 SI 指標，有學者也利用其他指標評估缺水容忍度。陳鵬旭（2002）藉由系統動力學軟體 STELLA 分別建構需水量預測模式、供水系統模擬模式和供水評量系統。其中供水評量系統包含缺水指數體系、統計參數體系、缺水百分日指標 DPD 及永續指標體系，根據此探討未來不同目標年之需水量在不同供水策略下，各供水系統之供水績效，並依新竹供水區特性比較各種指標適用性。水資源供水承载力以 $SI=0.5$ 為設計標準，而 DPD 分別以 1500%-day、1200%-day、800%-day 做為門檻值，配合供給面與需求面之各種管理策略，作為決策之參考。

模擬供水設施部分，有學者利用系統動力學模式模擬水資源供需平衡，進而評估供水系統承载力。陳亭玉（2000）根據承载力理論基礎，模擬河川流域環境資源與人類活動之交互作用機制，並定義河川流域永續力(sustainability)和承载力(carrying capacity)，應用系統動力學之操作軟體 VENSIM 建立河川流域水土資源承载力評量系統，藉此分析河川流域發展程度與不同管理策略對永續性之衝擊。陳



思瑋（2005）應用系統動力學理論，建立淡水河水資源系統動力模式，評估流域水資源利用之永續性。利用該流域歷史流量資料及水庫歷年放流量驗證模式合理性，接著採用缺水指數 SI (Shortage Index)、農業缺水指數 ASI (Agriculture Supply Index) 作為缺水容忍度指標，求出符合供水規則之下最大可供水量，此最大可供水量可定義為水資源之環境承载力。並訂出水資源永續發展指標，藉由指標的變化，進而探討淡水河流域水資源永續性。Feng and Huang(2008)及 Feng et al. (2008)利用缺水風險評估方式，同時考慮水資源系統內的人口、工業與農業、國民生產總值 GDP、汙水量、污染河川長度、總需水量、環境保護、水土保持、供水容量以及水資源可供水量等發展，利用系統動力學 VENSIM 軟體建立供水承载力評估模式。系統動力學模式裡共有 5 個次模式，分別是人口、農業、工業、環境保護以及水資源等模式，以永續性為目標，定出未來 3 種環境與經濟發展情境，探討未來 20 年的環境承载力變化。其缺水風險乃以年降雨量超越機率來表示，由模式計算出完全滿足系統需水量所需之年降雨量，再由年降雨量反推缺水風險，由此來計算系統環境承载力、缺水風險以及永續性。

劉子明（2010）以臺灣南部之高屏溪流域為研究區域，分析與探討供水系統容忍缺水範圍，進一步建立供水系統承载力分析流程與工具，探討現有水資源供水系統的供水承载力與供水能力，整合評估系統包括了氣候分區降尺度、氣象資料產生器、GWLF 水文模式、水資源系統動力模式等，採用缺水百分日指標 (Deficit Percent Day Index, DPD) 作為缺水容忍度指標，並以 $DPD=1500\% \cdot \text{day}$ 作為缺水容忍值，分析高屏溪供水承载力，並推求對應之缺水指數 (Shortage Index, 簡稱 SI)，最後根據此評估系統探討現有水資源供水系統的供水承载力與供水能力，建立氣候分區降尺度，評估氣候變遷對高屏溪流域水資源供水系統所帶來的衝擊，並評估氣候變遷下水資源供水系統缺水之風險性。

各種指標與評估方法為了解供水承载力與缺水嚴重程度之重要依據，本研究將針對相關文獻提出的方法進行整合與修正，於後續章節中探討。



2.2 不同缺水情形之水資源應變機制

目前蘭陽溪流域供水系統是以地面水優先使用，不足再以地下水輔助，如遇枯旱缺水時，依嚴重程度分為四個階段之限水措施，包含離峰時段降低管壓減量供水、停供次要民生用水、分區輪流或全區定時停水、與依區內用水狀況定量定時供水。另如原水發生高濁度致淨水場無法處理情形時，水公司將暫停地面水進水而改以啟用地下備用水井水源，並依緊急供水應變計畫，辦理緊急供水調度（水規所，2007）。由於蘭陽溪內不具備水庫設施，地面水源會因豐枯不均造成自來水供水系統之供水穩定度問題，需由地下水源於枯旱時期加入供應，相反的，每年豐水時期多餘的河川流量最後直接排入海洋，無法獲得妥善獲得利用。因此，設法增加地面水資源的使用比例為最直接有效使用水資源的想法。欲增加地面水資源的使用比例，興建水庫是經常採用的作法，然而就現今的局勢而言，要在宜蘭地區興建水庫幾乎為不可能採行的決策。除地表水外，可將宜蘭地下水資源視為地下水庫，藉由地下水資源使用時間上的調整來進行水資源時間上的調配。於河川流量供應不足時，使用蘊藏豐富的地下水以有效支應供水區內水資源需求；於河川流量充分供給時，則停用（或減少）地下水的使用量，讓地下水位得以獲得補注而回復（童慶斌，2011）。

賴典章（2003）發表的台灣地區地下水分區特性中，曾依據蘭陽平原的鑽井岩心資料，分析各種粒徑所佔之比例，發現礫石含量以蘭陽溪沖積扇、新城溪沖積扇及大、小礁溪沖積扇區域分布最多（ $>30\%$ ），而平原區幾乎不含礫石；砂之含量以沖積扇區域及局部沿海地區最少，其他地區皆 $>50\%$ ；泥層之分布除順安站外（ $>93\%$ ），以沿海地區之竹安及利澤附近，及蘭陽西北側附近較多（ $>50\%$ ）。經濟部水資源局（2000）進行之台灣地區地下水補注量估算計畫報告中指出，蘭陽平原之地質概況，其西半部主要為礫石所構成，東半部沖積平原大致上為泥砂，主要地下水含水層厚度由數十公尺至一百六十公尺以上不等，透水性良好，蘊含豐富之地下水資源，且補助快速。本研究認為宜蘭地區既有豐富之地下水資源，可

將地下水納入供水來源，透過聯合營運，降低因只仰賴川流水供水所造成的穩定度風險問題。



2.3 地表地下水聯合營運優選

因總需水量的增加，以及另一方面對環境保護的意識抬頭，許多學者開始關注對於水資源利用的有效程度，以及使用水資源時是否可維持環境的永續性，例如是否因河川基流量太低危害生態系統，以及過量抽取地下水危害地下水層等問題。因此為了永續的使用水資源，本研究希望能同時考慮地表水與地下水做為供水方式，希望能以最有效使用水資源且不破壞環境的前提下，找出最好之供水策略。

在大多數的地表地下水系統中，地下水層為一個最大的儲水元件，有了儲水，便可有效的在系統中調配與使用水資源。最初發展地表地下水聯合營運為 1960 年初，主要是為了農業灌溉需求，Spiegel (1962)開始同時考慮地表與地下水系統模擬，Buras(1963)與 Burt(1964) 利用動態規劃優選水庫與地下水含水層之設計與供水運作，此後，開啟地表地下水聯合營運之研究。Chang et al. (2011)將系統動力模式結合 GIS、MODFLOW、和 UCODE，模擬地下水與地表水之間的相互連通關係。

過去的研究都是基於先滿足地表水之水庫需求，在使用地下水做為供水不足時之備援用水，但是地表水與地下水不論在消耗與補注時都基於非常不同之時間尺度，地下水在含水層之間的流動相較降雨流入河川或水水庫需要更久的時間 (Bredehoeft,2011)，一旦地表水在乾季時不足夠供應需水量，發生缺水，傳統的解決方法為抽取地下水來補充缺水，但是在短時間內集中的抽水可會對地下水層負擔過大，造成危害，因此地表水與地下水不同的反應時間為水資源管理一重要問題。地表水之供水量與氣候條件息息相關，也可能因乾溼季變化而變動劇烈，相對的地下水則為一穩定的供水來源，因此地下水除了可提供需水量，也可穩定供水系統，減少因氣候因素而影響供水的風險。(Tsur, 1990)

本研究根據水庫操作規線方法提出新的聯合營運操作規則，將地下水視為常態用水，在非缺水期也允許抽水，同時考慮地下水之洩降量與蓄水設施之蓄水量，繪製地表地下水聯合營運操作規線，於後續章節中詳敘。

一般常用之國外所發展之地下水模擬模式包含 MODFLOW、SUTRA、FEMWATER 等。SUTRA 為飽和與非飽和地下水傳輸模式，以有限元素法中之高斯積分 (Gaussian integration) 結合座標轉換原理，在空間中離散化控制方程式，時間部分則是利用前項差分做運算。SUTRA 主要用在模擬地下飽和與非飽和含水層之水流流動，以及汙染與能量之傳輸現象 (Voss, 1984; Souza, 1987)。國立中央大學葉高次教授發展兩個地下水模式，一為 3D FEMWATER，用來模擬地下水流；另一則為 3D LEWASTE，用於加強模擬地下水溶質傳輸現象。而此二者模式之結合即為 FEMWATER，為地下水流有限元素之數值模式。FEMWATER 除了模擬飽和或非飽和含水層之水流傳輸以外，也常被應用於不定邊界條件、汙染物傳輸等問題 (Lin et al., 1997)。MODFLOW 為模組化三維地下水流模式，是由美國地質調查所以有限差分法發展而成。MODFLOW 本身為模組結構 (modular structure)，可輕易的擴充加入所需之子程式 (Belitz et al., 1993)。

本研究聯合營運中，地下水部分只需模擬地下水流之行為，以及抽水對於水位之變化，並無考慮與溶質傳輸相關現象，因此選擇採用 MODFLOW 作為地下水模擬工具。



第三章、研究方法



3.1 研究架構

本研究中進行之蘭陽溪流域水資源供水承载力模擬，其分析流程乃參考水利署「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」計畫（水利署，2012）之研究方式，並針對本研究加以改善，其研究流程如圖 3.1。將現況模擬透過氣象資料合成模式合成出符合現況統計特性之氣象資料，此合成氣象資料能增加具有相同統計特性之資料筆數，再將氣象資料代入 GWLF 水文模式進行模擬，模擬得到現況之河川流量，河川流量模擬結果再進入系統動力模式，以分析水資源系統之供水承载力，並進行供水承载力之敏感度分析。另一方面，得到供水承载力後，再針對此地區之水文狀況與水資源設施現況，提出根據不同缺水情形之對應的水資源應變機制，包含使用地表水作為備援或常態用水，以及增加蓄水設施進行聯合營運。

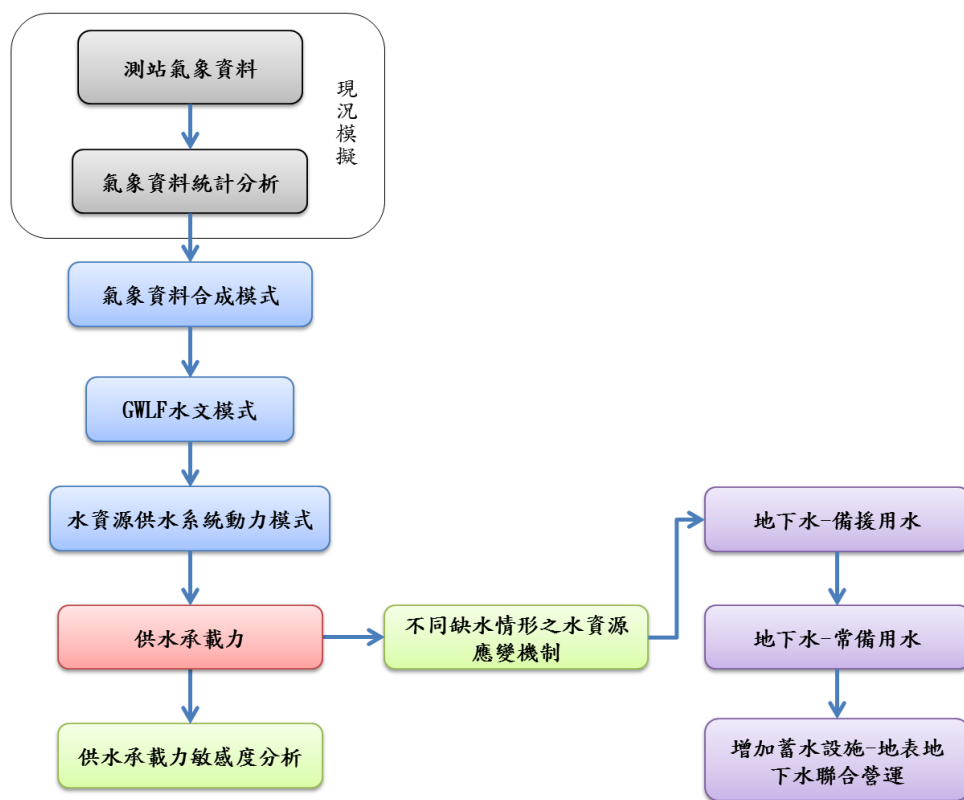


圖 3.1 供水承载力研究流程圖

由供水承載力分析而得之水資源應變機制，本研究另外針對其中「增加蓄水設施-地表地下水聯合營運」項機制進行研究，圖 3.2 為建立地表地下水聯合營運操作規線之分析流程圖。首先得到由 MODFLOW 模式建構完成之地下水模式，對其模式中抽水井進行最大可抽水量優選，得到各時期地下水供水量。再將得到各時期地下水與地表水供水量根據本研究建立之聯合營運規則，透過禁忌演算法優選，得到最佳地表與地下水供水比例，建立聯合營運操作規線。

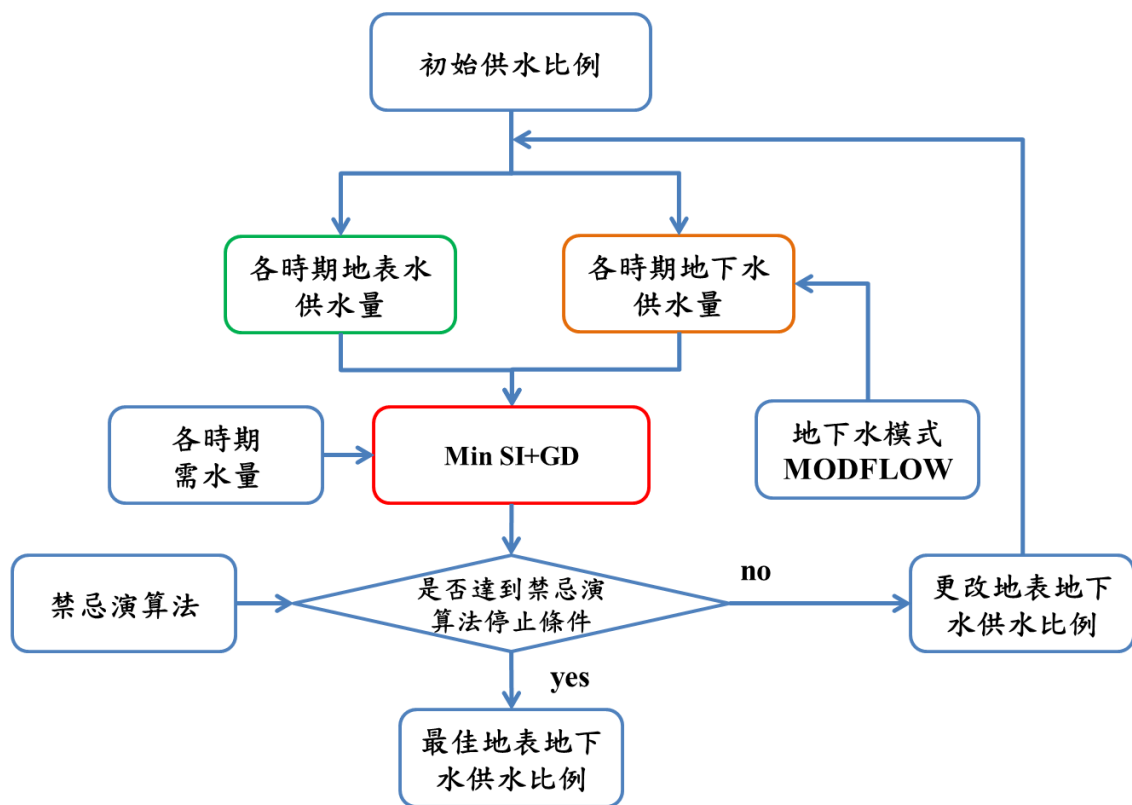


圖 3.2 地表地下水聯合營運操作規線研究流程圖

3.2 氣象資料合成模式

因模式內需要使用日氣象資料作為輸入值，故使用月平均資料及合成模式產生日氣象資料，本研究需使用日降雨量資料進行模擬，採用之降雨合成模式如(Tung and Haith, 1995)，說明如下：



日降水量模擬模式

日降雨量之模擬，可分為降雨事件和降雨發生時之降雨量。降雨事件之模擬以歷史資料為演算依據，統計各月中第 $t-1$ 日降雨時，第 t 日降雨的機率，表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $t-1$ 日不降雨時，第 t 日降雨的機率，表示為 $P(W|D)$ 。當每月第一天，模擬產生 $(0,1)$ 間屬於均勻分佈之亂數 R_N ，當 R_N 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；每月除第一日外，其餘日則利用前一日的降雨情形判定為降雨日或非降雨日，以 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 作為判斷依據，若亂數 R_N 小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日。其第 t 天降雨事件判別式如下：

- (1) 若第 $t-1$ 天降雨量 >0 且 $R_N \leq P(W|W)$ ，則第 t 天有降雨；否則，第 t 天不會降雨
- (2) 若第 $t-1$ 天降雨量 $=0$ 且 $R_N \leq P(W|D)$ ，則第 t 天有降雨；否則，第 t 天不會降雨

降雨量值之模擬，根據洪念民(1996)，由雙參數韋伯分佈可模擬出理想的氣候資料。指數分佈方程式如下：

$$R_t = \mu_R(t) \times [-\ln(1 - R_N)] \quad (3.1)$$

上列方程式中 R_t 為日降雨量(公分)， $\mu_R(t)$ 為對應第 t 月份雨天之平均降雨量(公分)， R_N 為介於 $(0, 1)$ 間屬於均勻分佈的隨機亂數。

3.3 GWLF 流量模式

GWLF 模式中之流量子模式可藉由描述集水區各水文項目及其平衡關係模擬流量，河川流量在模式中考量為地表逕流與地下水排出之基流之和。集水區水平衡肇始於降雨將水帶入集水區系統，當降雨到達地面後，一部份之降雨將會入滲到土壤中，而另一部份之降雨則將形成地表逕流，直接流入河川；入滲之雨水會補充未飽和含水層之含水量，當為飽和含水層土壤水分大於田間含水容量(Field Capacity)，則超過水分會因重力影響向下繼續滲漏到淺層飽和含水層，最後淺層飽和含水層將產生地下排水；逕流量與地下排水量之和即為河川流量，模式水平衡



概念如圖 3.3 所示，我們可將集水區的水平衡模式分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分，分述如下。

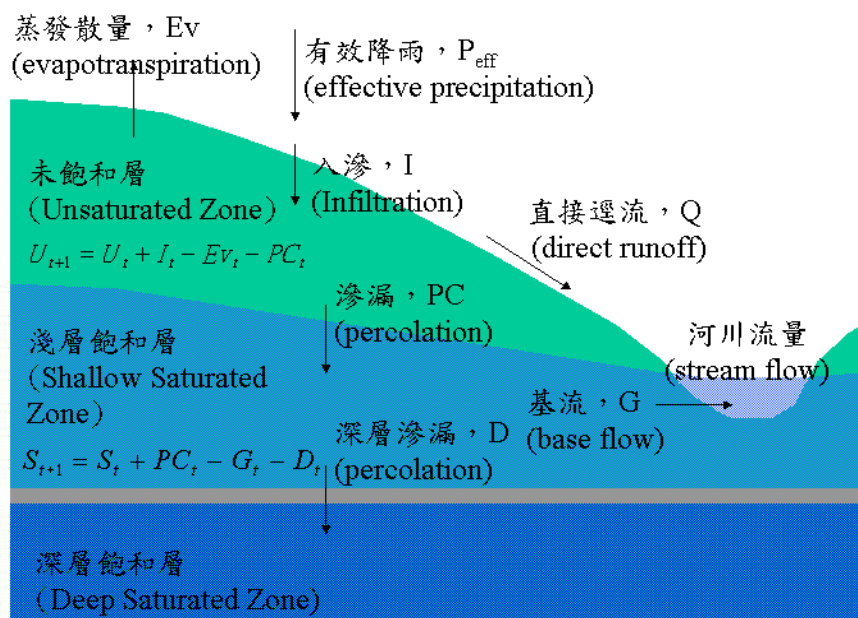


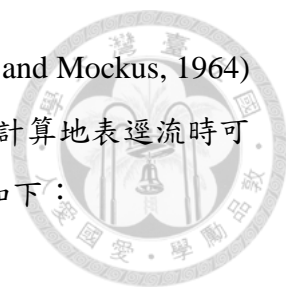
圖 3.3 The GWLF 模式水平衡關係示意圖

1. 地表

集水區之水循環係從降雨開始，當雨水降至地面之後，一部份之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，並直接流入河川。其中降雨、入滲、與地表逕流之關係可以下列方程式表示：

$$I_t = R_t - Q_t \quad (3.2)$$

其中 I_t 是入滲量， R_t 是降雨量，而 Q_t 是地表逕流，式中所用的單位為 cm/day。



估算地表逕流有很多不同的方法，如 Curve Number(Ogrosky and Mockus, 1964) 等。在 GWLF 中，採用 Curve Number 方法，主要是此種方法在計算地表逕流時可合理地反應土地利用方式及土壤水分含量。地表逕流量可計算如下：

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.8W_t)} \quad (3.3)$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN \leq 100 \quad (3.4)$$

上式中， CN_t 即為 Curve Number，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(Tung and Haith, 1995)。

當已知臨前土壤水分愈高則入滲越少，亦即愈多水分可成逕流，此時 CN_t 值愈大。反之，臨前水分少，則入滲較大，逕流較小，所以 CN_t 值較小。SCS 將臨前土壤水分影響之 CN_t 值分成三類， CN_1 為乾燥情況， CN_2 為平均情況， CN_3 為濕潤情況，如圖 3.4 所示。圖 3.4 中臨前水分較難推估，因此常以 5 天臨前降雨量來代替，而 AM1、AM2 會隨季節不同而不同，以表 3.1 所示。臨前水分 A_t 可以式 (3.5) 表示，求得 A_t 值之後可根據圖 3.5 內差求得 CN_t 值。

$$A_t = \sum_{j=-5}^{t-1} R_j \quad (3.5)$$

表 3.1 AM1、AM2 之值(平均溫度大於 10°C 為生長期，反之為休耕)

	休耕	生長期
AM1	1.3cm	3.6cm
AM2	2.8cm	5.3cm

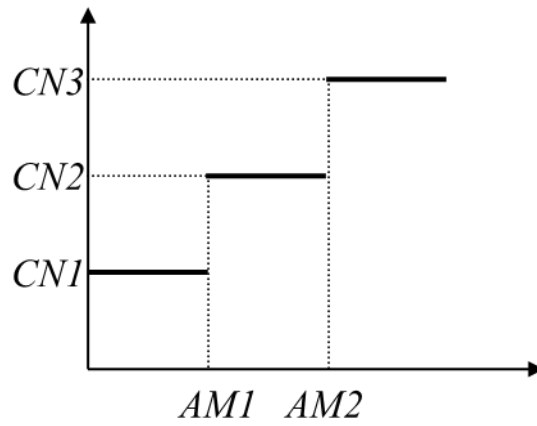


圖 3.4 CN 值與臨前水分關係圖

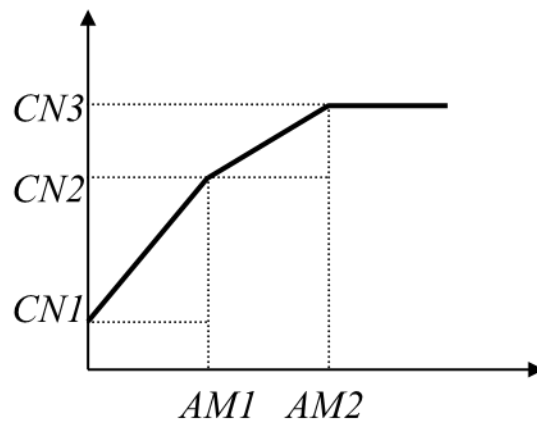


圖 3.5 CN 值與臨前水分內插關係圖

$$CN = CN1 + \frac{(CN2 - CN1)}{AM1}(A_t) \quad \text{if } A_t \leq AM1 \quad (3.6)$$

$$CN = CN2 + \frac{(CN3 - CN2)}{AM2 - AM1}(A_t - AM1) \quad \text{if } AM1 < A_t \leq AM2 \quad (3.7)$$

$$CN = CN3 \quad \text{if } AM2 < A_t \quad (3.8)$$

CN1 與 CN2 之值則是根據 Chow et al.(1988)，以下式決定

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3.9)$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3.10)$$



2. 未飽和含水層

經由入滲之水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，其部分水分將滲漏至淺層飽和含水層。另外，未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而被帶離土壤。未飽和層之水平衡式可以下列方程式表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (3.11)$$

其中 U_t 是未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量， ET_t 是蒸發散量，而 PC_t 是滲漏量，式中所用的單位為 cm/day。

在(3.11)式中之蒸發散量(ET_t)則受大氣、地表覆蓋特性及土壤水分之影響，可由下式決定：

$$ET_t = \text{Min}[k_{st} \times k_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (3.12)$$

發散量(ET_t)估算的方法可以潛勢能蒸發散量(PET_t)乘上一個覆蓋係數(k_{ct})和一個土壤水分因子(k_{st})計算之，但其易受限於未飽和層之可利用之水分，因此本式取計算之蒸發散量與未飽和層水分之較小值，作為估算之蒸發散量。其中覆蓋係數決定於土地利用方式。

在(3.12)式中之土壤水分因子(k_{st})則採用 Boonyatharokol and Walker(1979)之公式進行計算，表示如下：



$$\begin{aligned}
 k_{st} &= 1 && \text{if } U_t \geq 0.5U^* \\
 k_{st} &= \frac{U_t}{0.5U^*} && \text{if } U_t < 0.5U^*
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

其中 U^* 是最大土壤水分容量，即田間含水量減去凋萎點間之水分容量。

一般在潛勢能蒸發散量之計算上常使用 Penman 公式，但其所需資料較多，包含風速及大氣濕度(或露點溫度)等。這些資料在氣候變遷之研究上不易取得或不確定性太高。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 曾對氣候變遷衝擊研究提出建議，當資料不足時，應利用需要參數較少之較簡單模式，在 GWLF 模式中潛勢能蒸發散量便由 Hamon 公式進行計算(1961)：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273}
 \tag{3.14}$$

其中 PET_t 是第 t 天潛能蒸發散量， H_t 是在第 t 天的日照時間(時)， e_{0t} 是飽和蒸氣壓， T_t 是日平均溫度($^{\circ}\text{C}$)。飽和蒸氣壓(e_{0t})是溫度之函數，可由下列方程式決定之：

$$\begin{aligned}
 e_{0t} &= 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 \\
 &\quad - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 4.8| + 0.00136]
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

3. 淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t
 \tag{3.16}$$

其中 S_t 是淺層飽和含水層之土壤水分含量， PC_t 是由未飽和含水層滲漏至飽和含水層之水量， G_t 是由飽和含水層滲漏至河川之水量(G_t 之計算係考慮飽和含水層為一線性水庫，即 $G_t = r \times S_t$)，而 D_t 是入滲至深層侷限含水層之水量，式中所用的單位

為 cm/days。在本研究中將入滲至侷限含水層之水量(D_i)假設為零。未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量(PC_i)可由下式算出：

$$PC_i = \text{Max}[0, U_i + I_i - ET_i - U^*] \quad (3.17)$$

由於 U^* 是最大土壤水分容量，即田間含水容量減去凋萎點乘上根層深度間之水分容量，由此可知滲漏量即是指高於田間含水容量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分。單位為 cm/day。

3.4 供水承載力

供水承載力為三大要素組成，分別為水文條件、水資源供水系統和缺水容忍度。首先，要決定一個系統供水能力的極限，該區域的水文條件必定是影響的原因之一，當水資源越充沛，且時間上均勻分布時，此系統更有機會取得較多的水資源。然而一個系統可供應的水量，並非等同於河川流量、或是淨水場處理容量之總和、亦或是水庫蓄存容量之總和，而是需考慮整個水資源系統整合性供水的能力，因此利用系統動力模式建構各水資源分區之水資源供水系統模組，分析模擬各供水分區之水資源使用情形。

此外決定供水承載力之第三要素為缺水容忍度，在規劃或設計各標的用水量發展或水資源系統時，並不會要求水資源系統時時刻刻都能完全供應所需，而是給予一定的缺水範圍做為臨界值，此臨界值即為缺水可容忍的程度。綜合上述條件，供水承載力為考量水文條件、水資源供水系統後，滿足缺水容忍度要求下，所得到之水資源系統最大可供應水量。

水資源系統評估指標主要目的在於以量化的方式評估供水系統遭受之缺水程度與缺水機率，進而展現缺水嚴重程度，適當之評估指標亦可以做為規劃設計之參考依據，一般常見之水資源系統之缺水評估標有缺水指數、缺水百分率指標、

通用缺水指數等，本研究以缺水指數(SI 值)訂定缺水容忍度門檻，分析各水資源分區之供水系統供水能力。

缺水指數 (Shortage Index, SI) 為美國陸軍工程兵團 (United States Army Corps of Engineers, USACE) 水文工程中心於1975年所提出，該指標的定義如下：

$$SI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\text{缺水量}}{\text{計畫供水量}} \right)^2 \quad (3.18)$$

式中，N 為總計算時期數，缺水指數將缺水率以平方後再加總取其平均值，以表現缺水的嚴重性，反映出缺水嚴重性為缺水程度的平方關係，適合做為水資源系統規劃考慮穩定出水量時之參考。SI 指標可用來表現出供水系長期之缺水狀況及嚴重程度，然而較不易了解某特定年內發生的缺水事件之缺水率以及缺水延時。

3.5 系統動力模式- Vensim

系統動力學起源於 1961 年美國麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology)，Forrester 與其同僚應用回饋控制理論(feedback control theory)分析工業系統。之後於 1969 年 Forrester 最有名之系統動力學應用為 Forrester 的都市動態 (Urban Dynamics)研究，其研究藉由系統動力模式分析整個都市的發展情形，主要考慮工商業的發展及居住與人口之間之相互關係，起初因為社會工商業的發展迅速，人口成長迅速，而由於人口不斷的成長，此區域的有限資源耗盡，使得整個都市發展開始老化，人口逐漸衰退。在 1970 年代初期，Meadows et al.(1972)於其著作 *Limits to Growth* 中，應用系統動力模式分析探討全球未來 1 世紀人口成長與工業發展的關係，若持續目前之發展速度將導致無法控制之環境與人口衰退，即不永續之發展，褒者譽之為警世箴言，讚揚作者們之高瞻遠矚，奉勸各國政府注意環境和資源危機，貶者則斥為新馬爾薩斯主義，而系統動力學則從此揚名立萬，應用系統動力學進行各領域之研究也亦趨廣泛。

系統動力模式為一非常適合應用於水資源之研究方法，系統動力學與時間演進有密切的連動關係，因此非常適合應用在與時間演進有關之課題研究。水資源系統通常是隨著時間性變化，並非是靜態系統，故分析其系統為非常複雜的，而系統動力模式便能有效的幫助解決其問題。

目前市面上已發展許多系統動力學之相關軟體，本研究採用 Vensim 做為研究分析工具，運用其視窗化的圖形操作介面建立系統模式架構圖，並透過圖形清楚的呈現系統的整體架構和連接關係，以數學函數關係方程式即可反映其隨時間之變化特性。

3.6 地表水地下水聯合營運

本研究地表地下水聯合營運部分，需運用 MODFLOW 模式建構地下水模式，對其模式中抽水井進行最大可抽水量優選，得到各時期地下水供水量。再將得到各時期地下水與地表水供水量根據本研究建立之聯合營運規則，透過禁忌演算法優選，得到最佳地表與地下水供水比例，建立聯合營運操作規線，最後再運用逐步法分析，得到最佳分區的操作規線。本節將依序介紹地下水模式、聯合營運操作規則、優選最大可抽水量、禁忌演算法、與逐步法。

3.6.1 地下水模式- MODFLOW

MODFLOW 模式為美國地質調查所 Michael G. McDonald 及 Arlen W. Harbaugh (1988,1996) 二人所發展之數值模式，名稱由「模組化三維地下水流模式」(Modular three-dimensional groundwater flow model)縮寫而來，為利用有限差分法模擬三維地下水流系統之模式。MODFLOW 為目前最廣泛使用之地下水模式之一，可以應用於一維、二維及大部分的三維地下水流問題，亦可模擬穩態(steady)、非穩態(unsteady)、拘限含水層(confined aquifer)、非拘限含水層(unconfined aquifer)、甚至是拘限含水層與非拘限含水層混合而成的多層地下含水層系統。除了地下水系統本身之外，外在的抽水井抽水、區域補注、蒸發散、河床水位變動及區域排

水等，也可模擬，故其模擬對象包括井、地下水補注、河流、溝渠、蒸發及一般性邊界。

MODFLOW 模擬之前需將模擬區域劃分成網格(Cell)，每一網格假設為均勻物質，以網格節點或網格中心之水頭代表網格水頭。MODFLOW 模式對固定密度之地下水流經飽和土層孔隙介質之三維流動可以下列偏微分方程式表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.19)$$

其中， K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 為沿 x、y、z 三座標軸之水力傳導係數(Hydraulic conductivity)；h 為壓力水頭(Potentiometric head)；W 為地下水每單位體積之體積流量(Volumetric Flux)； S_s 為比儲水係數(Specific storage)；t 為時間。

由於地下水流不易有解析解，一般係將該偏微分方程式以有限差分法(Finite difference method)展開近似。而由連續方程式(Continuity Equation)來發展有限差分形式之地下水流方程式，表示網格流入及流出的總和等於網格中儲存量的變化率。在地下水密度固定的假設下，連續方程式表示網格中地下水流平衡方程式為下式表示：

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (3.20)$$

式中 $\sum Q_i$ 為流入及流出網格之地下水流量之總和， S_s 為比儲水係數，定義為每單位含水層結構 體積及每單位壓力水頭變化之抽出或補助地下水的變化， ΔV 表示網格體積大小， Δh 則表示在單位時間間隔壓力水頭的變化。在式(3.20)中等號右邊表示在已知 Δh 的水頭變化及 Δt 的時間間隔中，網格中儲水體積的變化率。因此，式(3-20)等號左邊表示流入及流出網格的體積總和。



3.6.2 聯合營運操作規則

陳奕如 (2011) 研究聯合營運做規線，應用規劃水庫操作規線時，下限、嚴重下限及不同情況會配合採取不同供水規則之概念，於模式中不同來源之可用水量進行分類，分別為地表水與地下水供水比例，並且依照不同方區方式可分為規則分區方式與不規則分區方式。本研究結合其規則分區與不規則分區，運用於地表與地下貯水設施，將操作規線規則分區方法設計如圖 3.6。將地下水累積洩降率之分界 GL_i 固定，決定決策變數，包含地表水水量標準 S_i^v ，地表水供水比例 α_i ，以及地下水供水比例 β_i ，構成聯合營運操作規線。

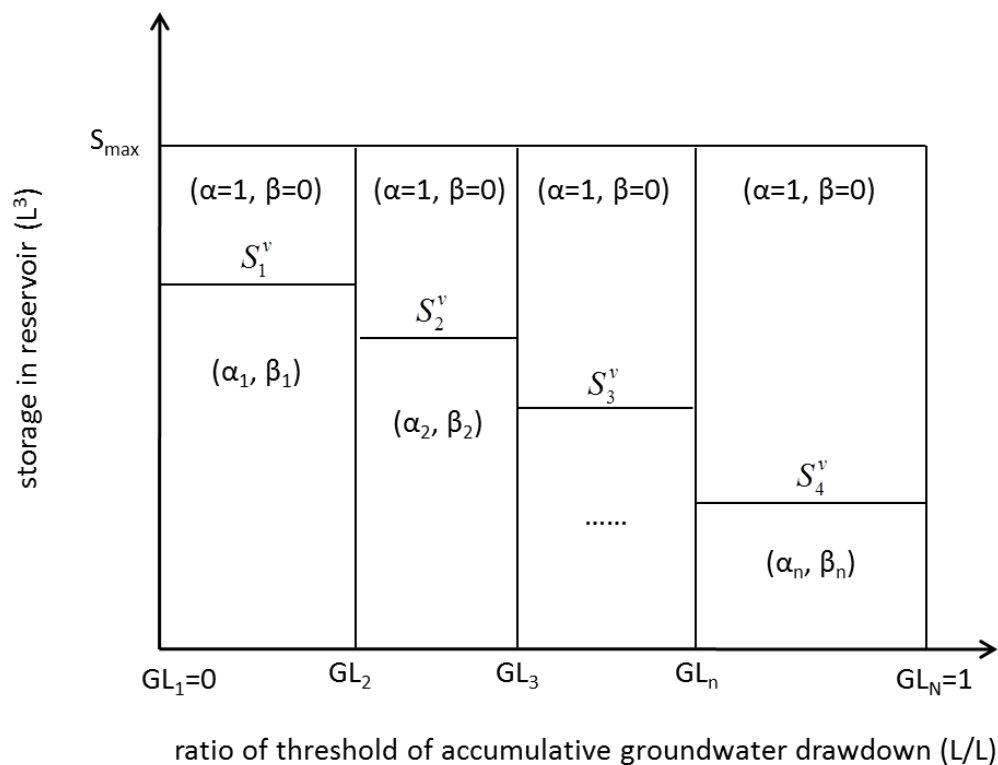


圖 3.6 聯合營運操作規則

本研究之目標為希望缺水量與年平均洩降量能盡量減小，因此目標函數表示希望得到最小的缺水指標與洩降量之總和。

$$\min Z = SI + \omega \cdot GD \quad (3.21)$$

subject to

$$SI = \frac{100}{Y} \sum_{y=1}^Y \left(\frac{\sum_{t=1}^T Def_{y,t}}{\sum_{t=1}^T D_{y,t}} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$GD = \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{N_p} \left[\frac{\sum_{p=1}^{N_p} (h_{p,y,t} - h_p^{ic})}{\sum_{p=1}^{N_p} \Delta h_p^{\max}} \right] \right) \quad (3.23)$$

$$Def_{y,t} = \max \{0, D_{y,t} - (O_{y,t}^s + O_{y,t}^g)\} \quad (3.24)$$

$$O_{y,t}^s = \min \{\alpha_i \times D_{y,t}, S_{y,t-1}\} \quad (3.25)$$

$$O_{y,t}^g = \min \{\beta_i \times D_{y,t}, G_p^{\max}\} \quad (3.26)$$

$$S_{y,t} = S_{y,t-1} + I_{y,t} - O_{y,t}^s \quad (3.27)$$

$$S_{\min} \leq S_i^v \leq S_{\max} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.28)$$

$$\alpha_i + \beta_i = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (3.29)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ 0 \leq \beta_i \leq 1 \end{cases} \quad (3.30)$$





$$\alpha_i = 1, \beta_i = 0 \quad \text{when } S_{y,t} > S_i^v \quad (3.31)$$

$$\alpha_i < 1, \beta_i > 0 \quad \text{when } S_{y,t} < S_i^v \quad (3.32)$$

$$\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_{n-1} \leq \alpha_n \quad (3.33)$$

$$S_1^v \leq S_2^v \leq \dots \leq S_{n-1}^v \leq S_n^v \quad (3.34)$$

其中 SI 為缺水指標，GD 為地下水的年平均洩降量，並以 ω 表示權重指數。式中 $Def_{y,t}$ 為第 y 年第 t 時期之缺水量， $D_{y,t}$ 為第 y 年第 t 時期之需水量， T 為一年之中有幾個時期， Y 為計劃模擬的年份數， $h_{p,y,t}$ 為第 p 口井於第 y 年第 t 時期之地下水位， h_p^{ic} 為第 p 口井支初始水位， Δh_p^{max} 表示第 p 口井的最大可容許洩降量， N_p 為井的個數， $O_{y,t}^g$ 為第 y 年第 t 時期之地下水抽取量， $S_{y,t-1}$ 和 $S_{y,t}$ 為第 y 年第 t 和第 $t-1$ 時期之水庫蓄水量， G_p^{max} 為地下水最大可容許抽取量，為一優選得到之常數， i 表示各分區編號，在第 i 區內， α_i 表示地表水的供水比例， β_i 則為地下水的供水比例， $I_{y,t}$ 為第 y 年第 t 時期之水庫入流量， S_i^v 表示為第 i 分區之地表水啟用聯合營運之水量標準， S_{max} 和 S_{min} 則表示水庫的最大及最小蓄水量。

第(3.24)式說明缺水量，第(3.25)和第(3.26)式則分別表示地表水供水量與地下水供水量，第(3.27)是為各時期的水平衡方程式，第(3.28)式說明地表水啟用聯合營運之水量標準應大於或等於水庫最小蓄水量，並小於或等於最大蓄水量。第(3.29)和(3.30)式表示地表水供水比例 α_i 與地下水的供水比例 β_i 相加之總和應等於 1，而地表水供水比例 α_i 與地下水的供水比例 β_i 需介於 0 到 1 之間，並且不隨時間改變。當水庫蓄水量 $S_{y,t}$ 大於地表水水量標準 S_i^v ，則表示地表水量足夠供應全部的需水量 ($\alpha_i = 1, \beta_i = 0$)；當水庫蓄水量 $S_{y,t}$ 小於地表水水量標準 S_i^v 時，則表示需水量需要同時由地表水與地下水供應 ($\alpha_i < 1, \beta_i > 0$)。第(3.33)和(3.34)式表示分區編號 i



會隨著 x 軸往右嚴格遞增，而地表水啟用聯合營運之水量標準 S_i^p 及地表水供水比例 α_i 則會隨著 x 軸往右嚴格遞減。在圖 3.6 中， GL_i 為地下水累積洩降率之分界，計算方式如下：

$$GL_i = \frac{h_{p,y,t} - h_p^{ic}}{\Delta h_p^{max}} \quad (3.35)$$

圖中 x 軸最右側之 GL_N 表示地下水可容許之最大累積洩降率，其值等於 1；x 軸最左側之 GL_1 則表示地下水可容許之最小累積洩降率，其值等於 0， GL_i 中之 i 值隨著 x 軸嚴格遞增。在優選聯合營運操作規線之前需先決定地下水累積洩降率之分區個數與其分界值，而各地表水啟用聯合營運之水量標準 S_i^p 及地表水供水比例 α_i 則為決策變數，一旦得到決策變數之優選結果，就可依據上述規則得到聯合營運之操作規線。

3.6.3 最大可抽水率

優選聯合營運操作規線之前，首先必須先決定地下水最大可容許抽取量，藉由以下之目標函數希望能得到最大的抽水量與各口井之抽水率：

$$\max G_p^{max} = \sum_{p=1}^{N_p} Q_p \quad (3.36)$$

subject to

$$h_{p,y,t} - h_p^{ic} \leq \Delta h_p^{max} \quad (3.37)$$

其中， Q_p 為第 p 口井之抽水量，在本研究中，假設各個井之抽水量為常數，且每個時期的最大可容許洩降量 Δh_p^{max} 皆相同。第(3.37)式說明第 p 口井的地下水累積洩降量應小於或等於最大可容許洩降量，。



3.6.4 禁忌演算法

禁忌演算法屬於啟發式演算法 (Heuristic Algorithm) 之一，基本概念是由 Fred Glover 於 1977 年所提出 (Glover, 1993、Glover, 1999)，在 1986 年發表其具體的架構，不同於過去處理最佳化問題時所使用之試誤法或梯度搜尋法，禁忌演算法是運用記憶之觀念來導引搜尋，即禁忌名單 (Tabu List) 之設計，禁忌名單於求解問題的過程中，可紀錄曾經走過之步驟，做為往後搜尋或移步之依據，禁忌演算法並設計可跳脫可行解區(feasibility)或是區域最佳(local optimum)之邊界為基礎，避免造成在求解過程中出現無效的搜尋，進而試圖尋找到全域最佳(global optimum)的情況。

禁忌演算法模仿人類大腦中的記憶功能，記憶曾經搜尋過的路徑，有利於避免重複搜尋與跳脫區域最佳解，但是記憶能力的優劣將會影響其搜尋之效率與效能，就如同一套有效率的記憶方式，可以精簡的記憶結構，避免耗費過多的記憶體，反之，冗長的記憶體結構則容易使記憶體負荷過重。

禁忌演算法於應用上，須根據求解問題本身將調適性記憶 (adaptive memory) 和回應性探索 (responsive exploration) 具體化，並以這兩個原則為基礎進行問題的求解，記住已搜尋過之重要參考點已確定未來搜尋之行進方向，避免走回相同之路徑，為適應性記憶功能；於搜尋過程中根據記憶環境特性，前一個不好的決策或解可提供一個比隨機選取一個解之決策更多的訊息，增加執行過程之效率。禁忌演算法之記憶體形式於應用上可分為短期記憶 (short-term memory) 與長期記憶 (long-term memory)，短期記憶之功能主要為避免重複搜尋及搜尋過程落入循環，而長期記憶則記錄過去搜尋過區域之頻率，以提供未來搜尋方向參考。

以演算法處理最佳化問題時，演算法之強化性 (Intensification) 與多樣性 (Diversification) 為一個演算法搜尋效率與效能之指標，強化性主要是指演算法搜尋過程中，對於仔細搜尋目前解之鄰近區域之能力，而禁忌演算法可藉由調整禁忌名單之形式，達到演算法於搜尋過程中兼具強化性與多樣性之目標，當禁忌名單較長或加入短期記憶時，可廣泛的搜尋不同區域，為演算法多樣性之表現；

反之禁忌名單較短或加入長期記憶時，可較仔細地搜尋過去所經過的區域，則為強化性的表現。

禁忌演算法中的記憶屬性可包括下列四種：新近式記憶 (Recency)、頻率式記憶 (Frequency)、品質式記憶 (Quality)、影響式記憶 (Influence) (Glover, 1997)。其中新近式記憶在記錄最近之變動方式，避免重複搜尋相同解；頻率性記憶在記錄解或變動出現之頻率，為均勻搜尋可行解空間頻率小之變動應有較大機率於後續變動中被採用；品質式記憶功能在於能夠區別與記錄搜尋過的解好與壞，如於搜尋過程中記錄曾經找到之最好解，可應用於強化之搜尋策略，導引搜尋回到較佳之區域進行更深入搜尋；影響式記憶則考慮在搜尋過程中所選擇變動方向對搜尋結果之影響，對解有較佳改善效果之變動應較容易被選擇，反之對解有較差改善效果之變動應被盡量禁止選擇。而新近式記憶及品質式記憶之形式，屬於短期記憶，而頻率性記憶與影響式記憶則偏向長期記憶。

禁忌演算法求解問題之演算流程包括設定初始解、移步、禁忌名單、破禁原則、停止原則，介紹如下，其演算流程圖可參考圖 3.7：

1. 初始解

在已知之可行解區域內，隨機選取或直接給定一組解作為搜尋之起點，此即為初始解。

2. 移步

當初始解進行移步時，首先需決定移步量，由最佳化模式中所有決策變數中依序選擇一決策變數移動一個單位稱為移步，而每種決策變數經移步後所形成之解集合定義為此次移步之鄰近解集合，鄰近解數量一決策變數多寡而有所不同。

移步之單位會影響目標函數值，移步單位大小之不同代表搜尋過程解精度之不同，移步單位較大時，可行解空間較小，搜尋效率較高，但搜尋過程中很可能因移步步幅過大而錯失全域最佳解位置，搜尋之正確性較低；反之移步單位較小

時，解空間精密度較高，有較大機率搜尋至全域最佳解，其搜尋正確性較高，但解空間的提升將使搜尋的效率較低。

一般禁忌演算法進行移步時會將所有鄰近解與目標函數比較，目標函數數值改善最為顯著之鄰近解進行移步，若最佳鄰近解已被記憶於禁忌名單中，則選取鄰近解集中目標函數值次佳之鄰近解進行移步，如次佳之鄰近解也位於禁忌名單中，則選取第三佳之鄰近解，以此推類完成移步動作。

3. 禁忌名單

禁忌名單 (Tabu List) 為整個禁忌演算法中之核心，其內容包含名單之形式與長度，記錄過去搜尋過之狀態，避免重複搜尋相同的解及區域。定義完善之禁忌名單可提升搜尋之效率，但若禁忌名單定義不當，則會使禁忌演算法無法導引搜尋路徑往較佳方向前進，使搜尋落入循環。

禁忌名單之定義視問題而定，以禁忌名單之形式來說，如決策變數可變動範圍不大，可將禁忌名單定義為記錄整組解集合之形式；若決策變數較多，問題為度較高時，可將名單形式設定為記憶該次移步所移動之決策變數與其變數值，避免記憶體使用之浪費，且同時有效的達到避免搜尋落入之目的，因為面對高維度最佳化問題時，決策變數移步至完全相同解集合發生機率不高，如記錄整組解集合，可能造成禁忌名單無法發揮其效用。

一般維度較大之問題，其搜尋解空間較大，較容易落入區域最佳解，加上搜尋到相同解集合之機率不高，可設定較長之禁忌名單，而維度較低之問題則適合較短之禁忌名單長度。

4. 破禁原則

破禁原則之目的為破除禁忌名單中之限制，將搜尋路徑帶入未搜尋過的區域，希望能得到較過去搜尋到之最佳解更好的解，禁忌演算法於演算流程中，會一直

紀錄所搜尋過之最佳解，當某一次移步時期最佳鄰近解較所紀錄之最佳解更好，但該最佳鄰近解卻被記錄在禁忌名單中，則該次移步將被限制無法移動，此時便可執行破禁原則，強迫接受此一最佳鄰近解，而同時將此最佳鄰近解由禁忌名單中移除，完成此次移步。

並非所有的禁忌演算法皆須建立破禁原則，破禁原則一般存在於當禁忌名單之記錄形式只記錄變動之決策變數時，當禁忌名單之形式定義為記錄所有決策變數時，便不會出現需要破禁的情形，因為當記錄所有決策變數時，不會存在一個位於禁忌名單中，且目標函數較紀錄之最佳解更好的最佳鄰近解。

除上述之基本破禁原則外，在搜尋過程中，如果目前解落入困境時，也需要因應產生其他破禁原則，一般搜尋落入困境是發生於目前解位在可行解空間之邊界，且所有可移步方向皆位於禁忌名單中，使搜尋過成無法進行移步而落入困境。針對上述狀況，可採用下列幾種不同的破禁原則：(a) 將所有的禁忌名單移除，選取最佳鄰近解進行移步及重新記錄禁忌名單。(b) 由鄰近解集中選取最劣解進行移步。(c) 由鄰近解中選取最佳解進行移步，並將該鄰近解由禁忌名單中移除。(d) 擴大移步單位，直接跳過禁忌名單之限制。(周俊安，2002)

5. 停止原則

演算法之停止原則可視求解問題來設定，一般常用之停止原則有兩種，一為設定最大搜尋次數，若達其次數即可停止，另一則為當目標函數達到預期之收斂精度時，即停止搜尋。

3.6.5 逐步法

當優選各抽水井抽水規則與求取聯合營運操作規線變數之方法已知後，本研究便應用逐步法 (Stepwise Method) 求取聯合營運操作規線。應用逐步法於聯合營運操作規線之步驟可由參考下列式子：



$$\begin{aligned}
 & (S_1^v, S_2^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) \\
 & \rightarrow (S_1^v, S_2^v, S_3^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3) \rightarrow \dots \\
 & \rightarrow (S_1^v, S_2^v, \dots, S_n^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \dots, \alpha_n, \beta_n)
 \end{aligned}
 \tag{3.38}$$

式中 $(S_1^v, S_2^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$ 為當地下水累積洩降率只有一個分界(分兩區)時之聯合營運操作規線變數，而 $(S_1^v, S_2^v, S_3^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3)$ 為地下水累積洩降率有兩個分界(分三區)時之變數， $(S_1^v, S_2^v, \dots, S_n^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \dots, \alpha_n, \beta_n)$ 則表示地下水累積洩降率有 $n-1$ 個分界(分 n 區)，這一連串的聯合營運操作規線由一個分界(兩區)開始，一次增加一個分界，直到收斂至滿意之精度，其中地下水累積洩降率之分界為預先決定之值，並且均勻分布於0到1之間。本研究運用逐步法，可分析當操作規線於不同分區時，其成果與效用的差異，並且可考慮現實上操作的可行性，從中選擇最佳的分區方式。

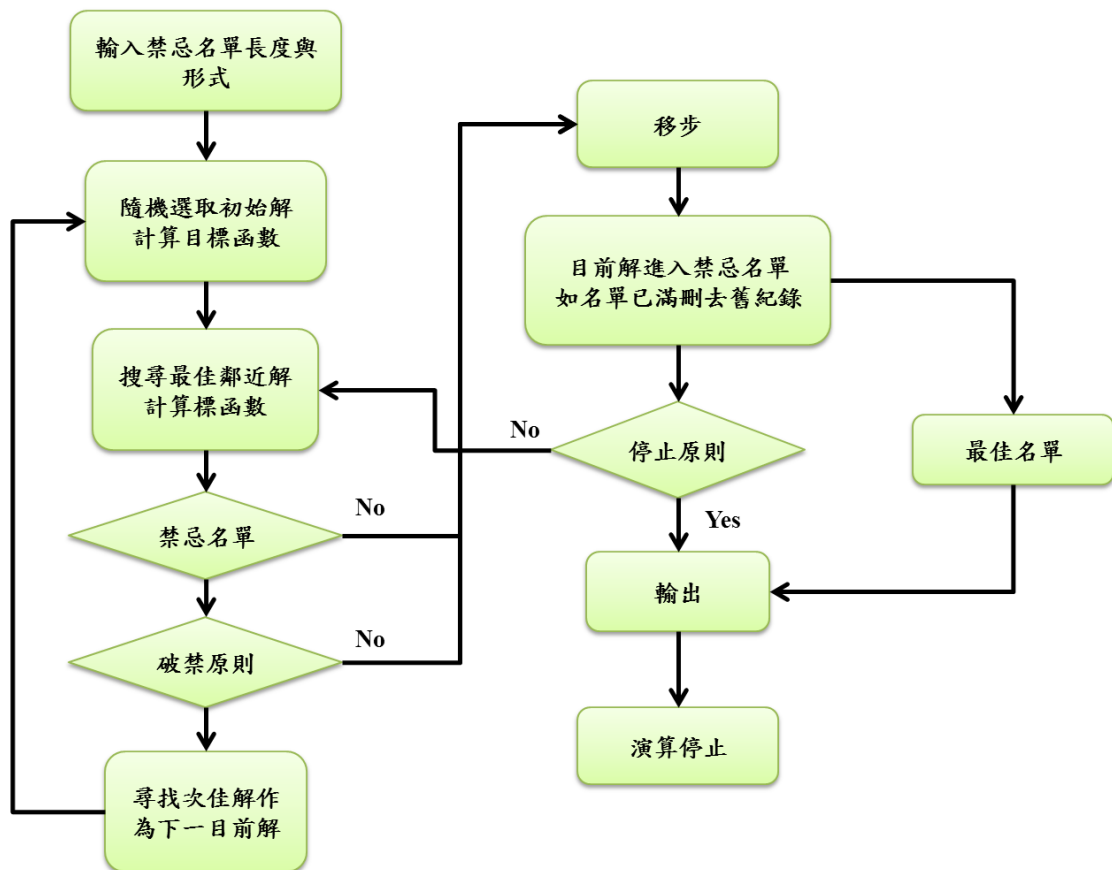


圖 3.7 禁忌演算法演算流程圖



第四章、蘭陽河流域之供水承载力與不同缺水情形之水资源應變機制



4.1 研究區域

蘭陽平原主要範圍西北側連接雪山山脈，南側與中央山脈相連，而東邊則為太平洋，地勢由西南至東北，漸漸由陡峭山谷進入低緩平原，河川攜帶沈積物堆積並形成沖積扇，使蘭陽平原往東地勢漸趨平緩。區域內主要水系為蘭陽溪（經濟部水利署水利規劃試驗所，2007），蘭陽平原區域範圍可參考圖 4.1。

蘭陽平原大部分區域為黏土、粉砂、砂、和礫石組成的現代沖積層，與台灣西部海岸平原、屏東平原相同。北部雪山山脈主要地層屬漸新世的乾溝層、四稜砂岩及漸新世至始新世的西村層，南部中央山脈則為中新世之廬山層，外海的龜山島則屬安山岩。蘭陽平原的大地構造為沖繩海槽張裂作用所產生的盆地，其位置正位在雪山山脈及中央山脈之間，其沉積物主要來自於兩個山脈的岩層。

蘭陽平原為一扇狀三角洲平原，其外型約略為一個等腰三角形，每邊約長 30 公里，海岸線因海蝕影響形成弓型海岸（經濟部水資源局，2002），而由於蘭陽地區地形起伏大，岩層脆弱易受侵蝕，降雨豐沛，縱谷及山麓地帶沖積扇十分發達，在平原地區就有 17 個，蘭陽平原眾多河川沖積而成之聯合沖積扇中，除蘭陽溪主流外，其他較小之沖積扇有位於雪山山脈側之福德坑溪、猴洞溪、得子口溪、大礁溪、小礁溪等沖積扇，而在中央山脈側則有羅東溪、冬山河、新城溪等沖積扇（經濟部水利署，2005）。而蘭陽平原地下水區，均位於宜蘭縣境內，主要包含頭城鄉、礁溪鄉、壯圍鄉、宜蘭市、員山鄉、五結鄉、羅東鎮、三星鄉、蘇澳鎮、冬山鄉等 11 個鄉鎮市，宜蘭縣行政區示意圖可參考圖 4.2。

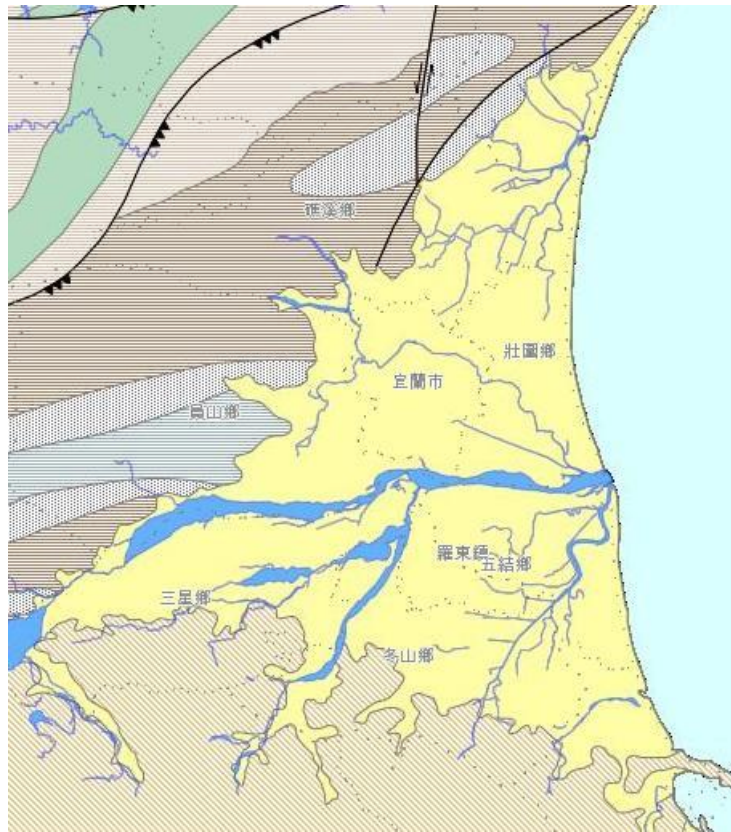


圖 4.1 蘭陽平原區域範圍圖 (資料來源：中央地調所)

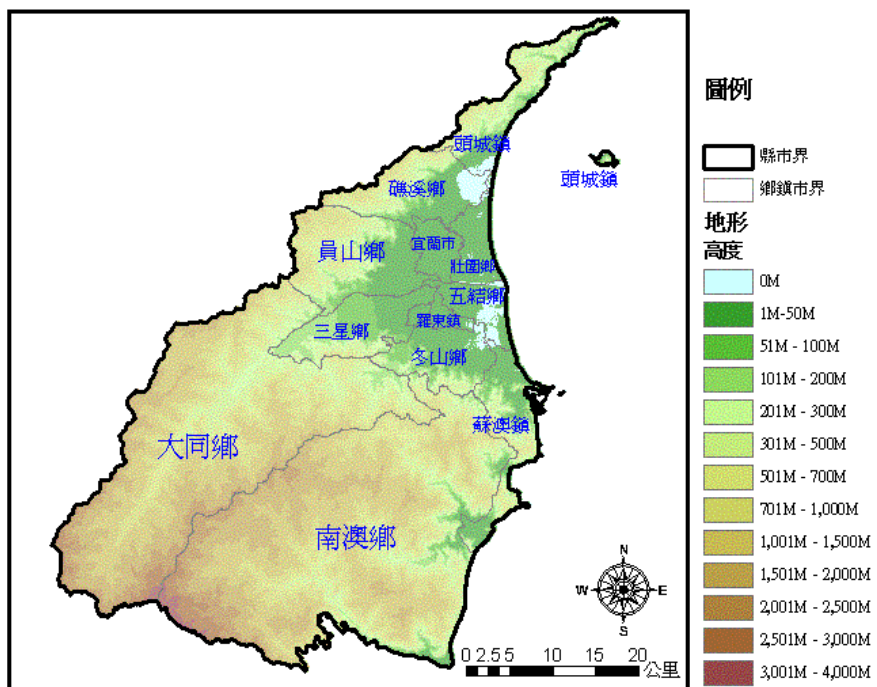


圖 4.2 宜蘭縣行政區圖



4.2 蘭陽河流域供水系統與供水承載力

4.2.1 蘭陽河流域水資源系統之建構

就自來水系統部分，宜蘭地區為自來水公司第八管理處之轄區，其下分別有深溝及廣興二個給水廠，供水範圍概以蘭陽溪為分界，其中深溝給水廠以溪北地區為供水範圍，廣興給水廠以溪南地區為供水範圍，全區共計有十個供水系統（來源：自來水公司第八管理處網站）。其中，深溝淨水場負責宜蘭系統（包含龍潭、大溪、頭城、深溝、枕山、圳頭等淨水場）、松羅系統、英士系統、四季系統、南山系統；廣興給水廠則負責羅東系統（包含廣興、柑子坑、天送埤、大隱、丸山、龍德、寒溪、蘇澳等淨水場）、東澳系統、南澳系統、金洋系統、澳花系統。上述系統中，除宜蘭、羅東為規模較大之供水系統外，其餘系統如：南澳、松羅、英士、四季、南山、東澳、金洋、澳花等 8 區供水系統皆為位於山區之獨立供水系統。下圖 4.3 為自來水公司第八管理處之供水轄區。



圖 4.3 自來水公司第八管理處之供水轄區（參考來源：自來水公司第八管理處）


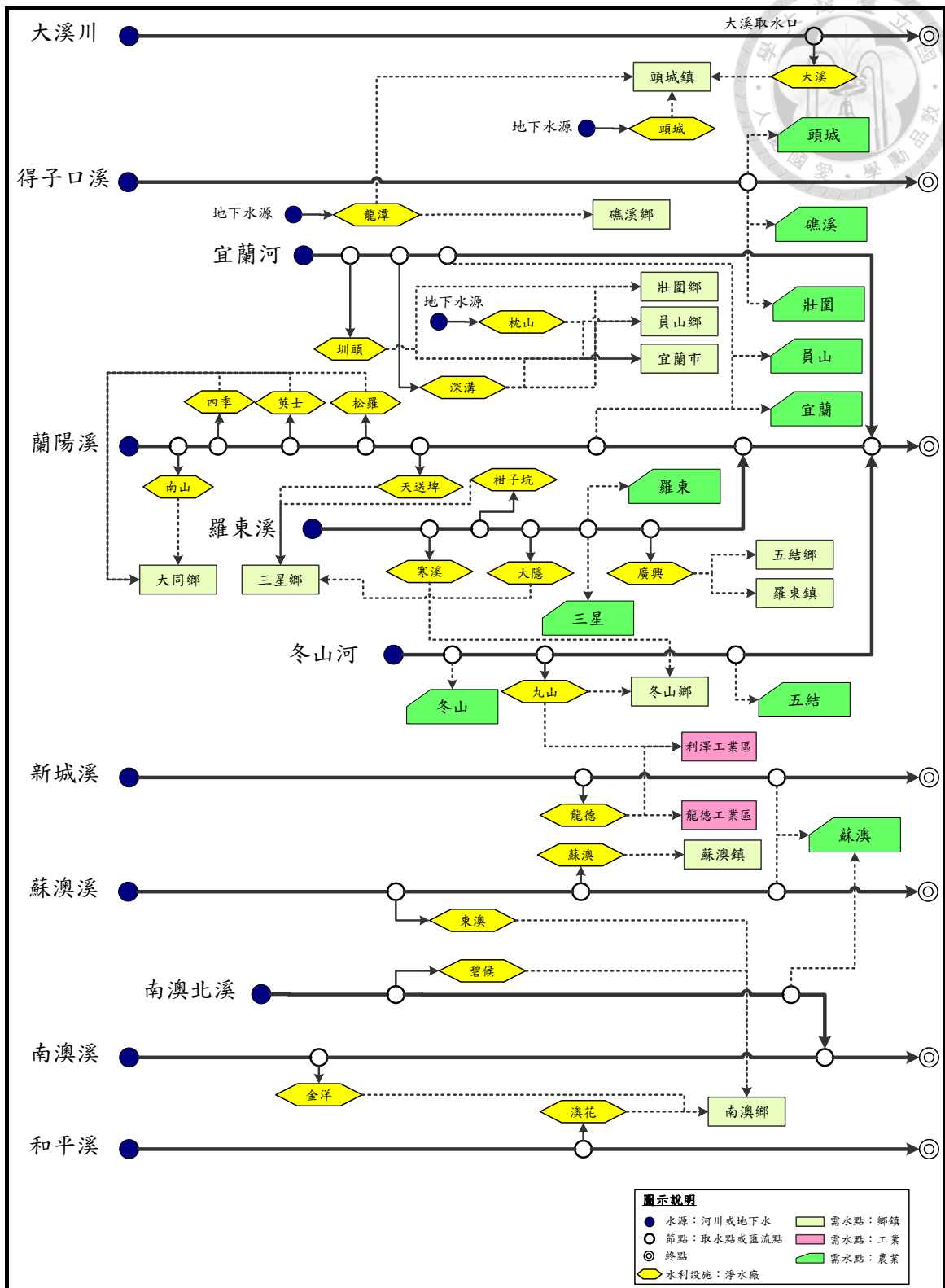


圖 4.4 為本研究供水系統動力模式依據之蘭陽河流域地面水資源系統架構。宜蘭地區水資源系統原本應包含 10 個供水分區，然而根據自來水公司歷年的供水量記錄資料，宜蘭供水區與羅東供水區無論是供水規模與人口數的總和皆已超過全區的 97%，且其餘供水區中有部分處於獨立運作狀態，並未與其他供水區相互連結，本研究為簡化系統動力模式建構上的複雜程度，在供水區上僅先考慮此二大系統，並以蘭陽河流域為中心建構系統動力模式。

本研究考慮之水資源系統以蘭陽溪上游之家源橋流量監測站作為起始點，下游則以蘭陽溪入海口為之終點，中途考慮粗坑溪、清水溪、安農溪、羅東溪等四條支流匯入（系統中並未實際考慮宜蘭河，主要原因乃各淨水場的水源皆非來自宜蘭河，其流量不會對宜蘭、羅東之水區的水資源調配產生影響）。此外，水資源系統中包含員山、天埤兩水力發電廠，員山電廠之取水口位置設定於牛鬥橋之上游，經由管路將水輸送至員山發電廠進行發電後再送至天埤發電廠進行發電，最後將發電尾水排入安農溪，進而匯入羅東溪。

表 4.1 為宜蘭、羅東兩供水區所包含之主要淨水場供水能力整理（水利署，2008），就宜蘭供水區而言，使用地面水之淨水場為深溝（亦使用地下水，地面取水量約為地下水之 1.4-2.2 倍）（顏笠安，2009）、圳頭與大溪淨水場，而羅東地區則有柑子坑、隆德與寒溪淨水場；上述淨水場中，本研究於現階段僅考慮規模較大的深溝、柑子坑與寒溪淨水場，而龍德淨水場雖然設計處理能力高達 24000CMD，但資料顯示新城溪出水量極度不可靠，無法提供穩定之水源，故不納入本水資源系統。除了上述使用地面水源之淨水場外，宜蘭、羅東供水區尚包含更多以地下水為原水之淨水場。本研究為簡化系統，僅先將宜蘭、羅東供水區中的地下水供應量依照實際資料分別加總後，分別視為獨立供水來源進入系統。此外，圖 4.5 中的清洲淨水場為自來水公司目前規劃新建中的淨水設施，預計完工後可增加每日最大 20 萬噸的供水能力，提供宜蘭、羅東地區更多的可用水資源。由於清洲淨水場於現階段尚未啟用，本研究僅將羅東堰與清洲淨水場間的管路，以及清洲淨水場連接宜蘭、羅東供水區的管路以虛線表示，作為示意。



(資料來源:水資源暨自來水供水系統聯合調度管理系統建置探討,水規所,民國100年。)

圖 4.4 宜蘭自來水供水系統圖

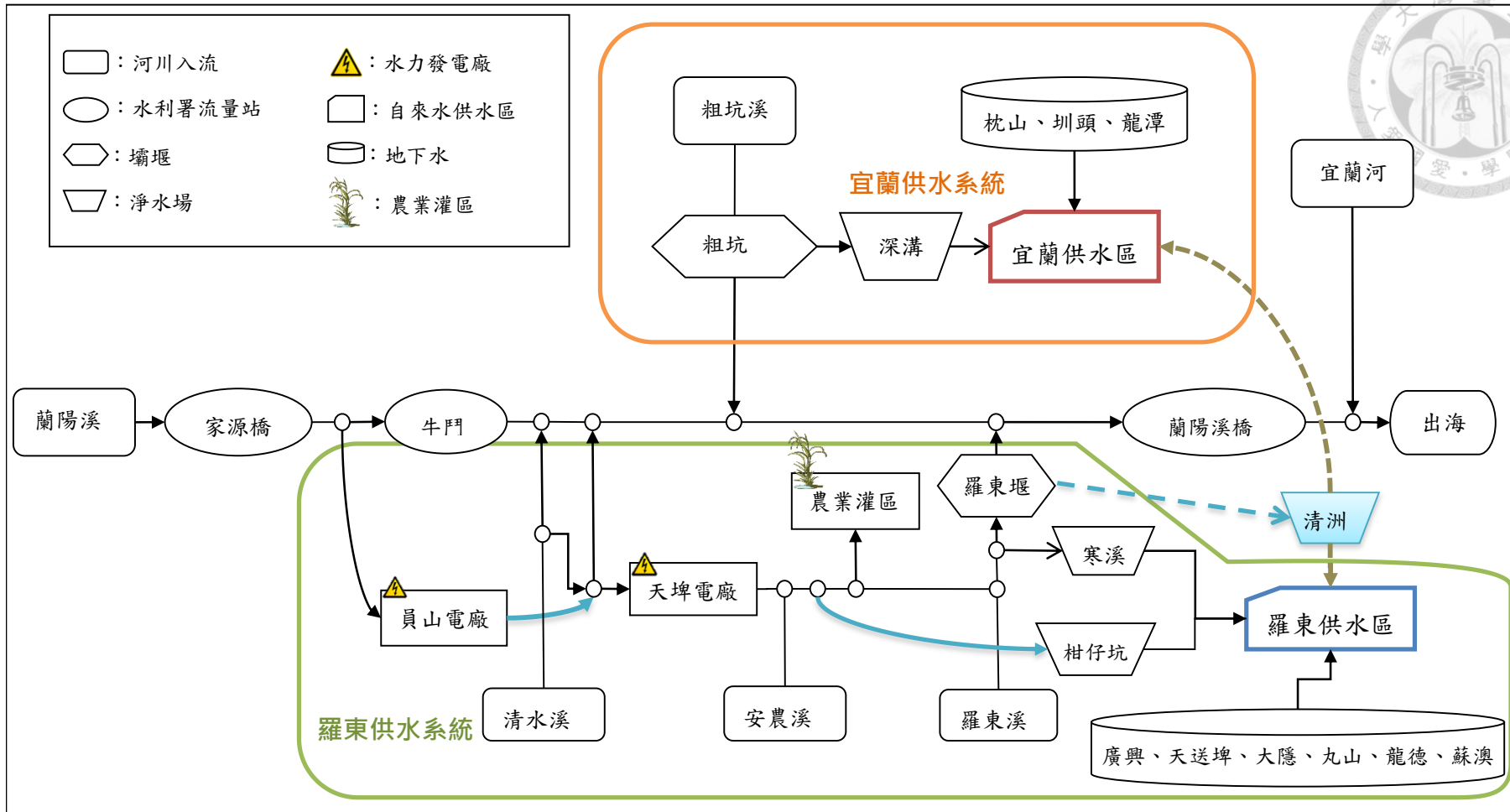


圖 4.5 蘭陽溪水資源系統架構圖

表 4.1 宜蘭地區主要淨水場供水能力設計、現況及規劃表

供水系統	淨水場	水源	設計處理能力(CMD)	現況出水量(CMD)	改善計畫	備註
宜蘭	深溝	粗坑堰及地下水	地面水 43,200 地下水 38,800	45,535	無擴建計畫	
	圳頭	五十溪川流水及地下水	地面水 600 地下水 1,450	399	無擴建計畫	
	枕山	地下水	2,500	1,565	無擴建計畫	
	龍潭	地下水	15,500	14,670	無擴建計畫	
	頭城	地下水	1,100	0	無擴建計畫	目前因水質不佳未出水
	大溪	大溪川	2,800	2,483	無擴建計畫	
	雪隧	隧道湧水	13,000	0	無擴建計畫	
羅東	廣興	地下水	44,800	35,979	無擴建計畫	居民抗爭無法擴建

供水系統	淨水場	水源	設計處理能力(CMD)	現況出水量(CMD)	改善計畫	備註
	柑子坑	地下水與川流水	地面水 3,080 地下水 2,000	4,994	無擴建計畫	
	天送埤	地下水	2,000	996	無擴建計畫	
	大隱	地下水	5,010	1,646	無擴建計畫	
	丸山	地下水	25,500	17,205	提高供水品質	
	龍德	地下水及新城溪	地面水 24,000 地下水 11,300	9,042	已完成新城溪伏流水工程	新城溪水量極度不可靠
	寒溪	羅東溪川流水	4,000	4,729	無擴建計畫	
	蘇澳	地下水	32,800	21,579	無擴建計畫	
	清洲	羅東攔河堰	200,000	0	無擴建計畫	規劃新建中

資料來源：水利署 2008

在蘭陽溪水資源供需模擬的部份，本研究採用系統動力模式作為研究區域水資源系統之模擬之工具。由於系統的研究範圍會根據不同的界定而有所差異，故在作分析前，需針對系統範圍作一個清晰的界定。對於實際的現象找出各個不同之單元後，而各個不同的單元都會有其相關性，並集成成一系統，而過程便稱為系統分析。在系統動力模式中，最主要的三項元件分別為儲存(stock or level)、流量(flow or rate) 與助動(converter or auxiliary) 元件，元件之間則以具有箭頭線段鍵結，以表示元件間相互關係。「儲存」是描述系統中的資源量，也就是描述在特定的時間內，資源量的變化情形，在此研究中便以水庫或攔河堰作為儲存。「流量」則表示儲存變化的情形，故流量會影響儲存量之變化。水庫的入流量、蒸發量與供水量，便是流量。「助動」則是應用於輔助描述儲存或流量，例如攔河堰的操作規則等。下圖 4.6 為將一簡易之水庫系統改以系統動力元件描述之示意圖。

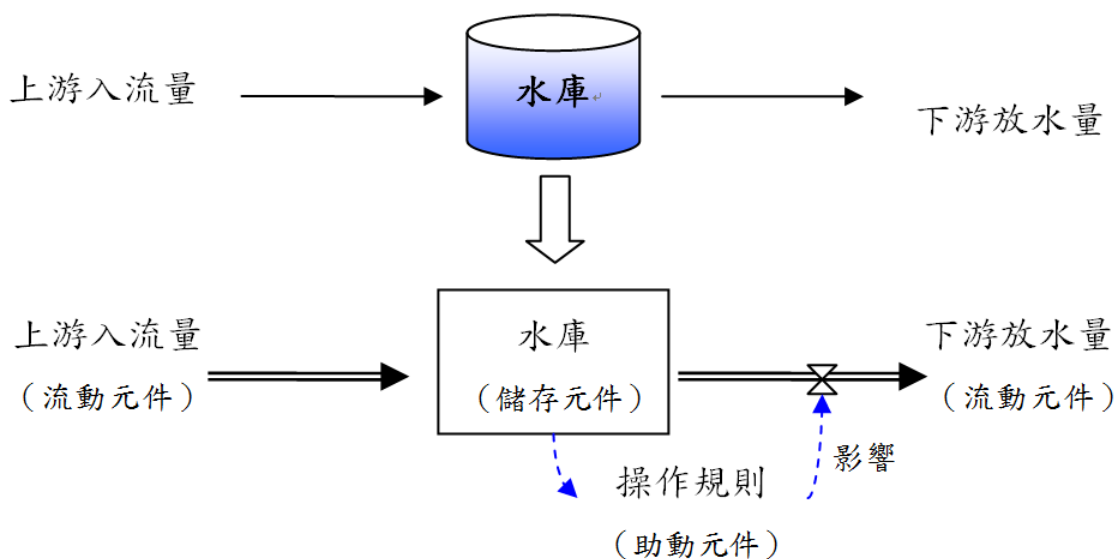


圖 4.6 水庫系統轉換為系統動力模式之示意圖

水資源系統通常都是隨著時間性變化，並非是靜態系統，故分析其系統是非常複雜的，而系統動力學便是解決此問題的最佳工具之一。系統動力學之相關軟

體眾多，其中 Vensim 在操作上較一般的程式簡單，其可運用視窗化的圖形操作介面輕易地建立起所需的系統模式架構圖。另外 Vensim 可透過圖形清楚的呈現系統的整體架構和連接關，同時每一元件亦只需建立其數學函數關係方程式即可反映出其隨時間之變化特性，所以操作起來格外方便且容易，因此本研究便採用 Vensim 作為分析蘭陽溪水資源系統架構之工具。圖 4.7 則為以系統動力學之套裝軟體 Vensim 所建構之蘭陽溪水資源架構圖，其整體架構與圖 4.5 相同，只是改由系統動力學的元件表示，使得圖形表現上較為複雜。

4.2.2 水資源系統動力模式設定與資料輸入

就本研究所建構之宜蘭水資源系統動力而言，須輸入四種類型之資料，以下將針對各類資料逐一進行說明：

(1) 河川流量資料

欲模擬流域水資源之供需情形，則必須輸入水資源系統上游之流量資料。以本研究所建構之蘭陽溪流域水資源系統而言，需要流量資料除包括蘭陽溪主流的流量外，尚包含其他支流之入流量。其中蘭陽溪主流的流量可直接藉由 GWLF 模式進行模擬。然而粗坑溪、清水溪、安農溪、羅東溪等條支流由於未設有流量測站，或測站為新設站點，無法取得長期之流量監測資料作為水文模式之模式檢定與驗證使用，因此難以透過直接模擬的方式獲得流量資料。因此，本研究參考水利署「蘭陽地區地面地下水調配及管理模式整合初步規劃」(水利署，2008) 報告之內容，採用面積流量法的方式，藉由家源橋流量推估上述各支流之流量，其推估方式如表 4.2 所述。

而在 GWLF 的模擬過程中，需輸入氣溫、降雨，CN2 值 (Curve Number) 等參數，其中 CN2 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。針對家園橋的流量模擬，本計畫採用水利署南山雨量站的歷史降雨記錄資料，配合中央氣象局宜蘭氣象站的氣溫記錄資料，由於兩測站的海拔高度不同 (差距約 1000m)，因此需針對宜蘭氣象站的氣溫資料進行修正。在模式 CN2 值的輸入上，家源橋上游的土地利用以農業地為主，本研究參考水規所 (2012) 的研究，將 CN2

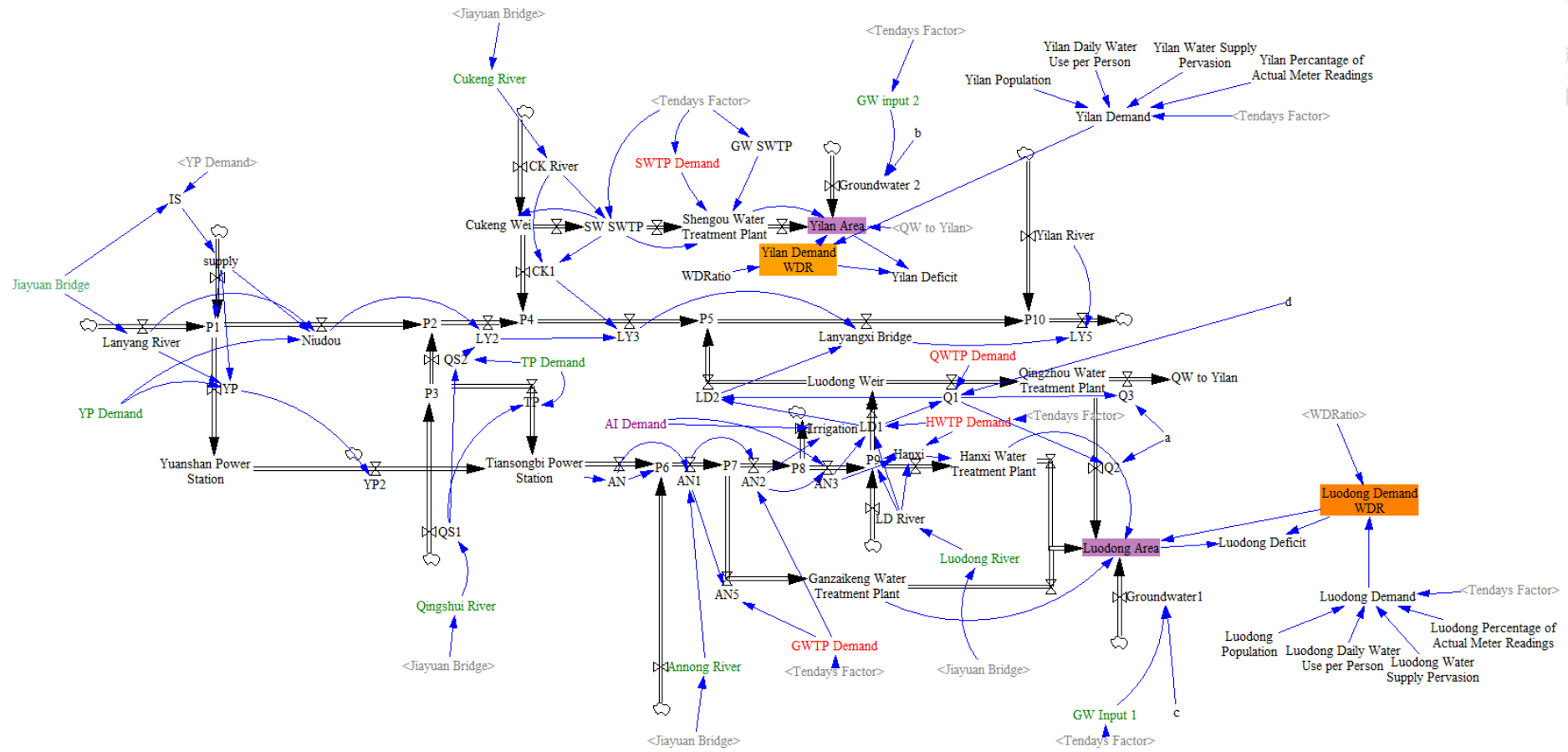


圖 4.7 蘭陽溪水資源系統動力模式架構

值設定為 58。此外在模式資料的檢定與驗證部分，本研究以水利署家源橋流量監測站 1990-1999 的流量資料進行模式驗證，其結果如下圖 4.8。由圖 4.8 可看出 GWLF 所模擬得到之家源橋流量資料，其各月的平均值可合理地反映出歷史資料的月平均特性，模擬值與觀測值之 R2 值為 0.87，Nash-Sutcliffe 係數為 0.69，非常接近預測時間序列與實測時間序列高度吻合之 Nash-Sutcliffe 係數 0.7，因此本研究認為其結果是可接受的。

退水係數 r 為估算地下水排出量之係數，假設在暴雨過後，河川流量在到達峰值之後的 N 天為退水段， N 的計算方式為：

$$N = 0.83A^{0.2} \quad (4.1)$$

其中 A 為集水區面積(km²)，地下水排出量為河川補助的主要來源，從第 N 天開始取連續三天遞減的流量，取其 \log 斜率極為退水係數。經由資料分析，本研究區域之平均退水係數為 0.112。

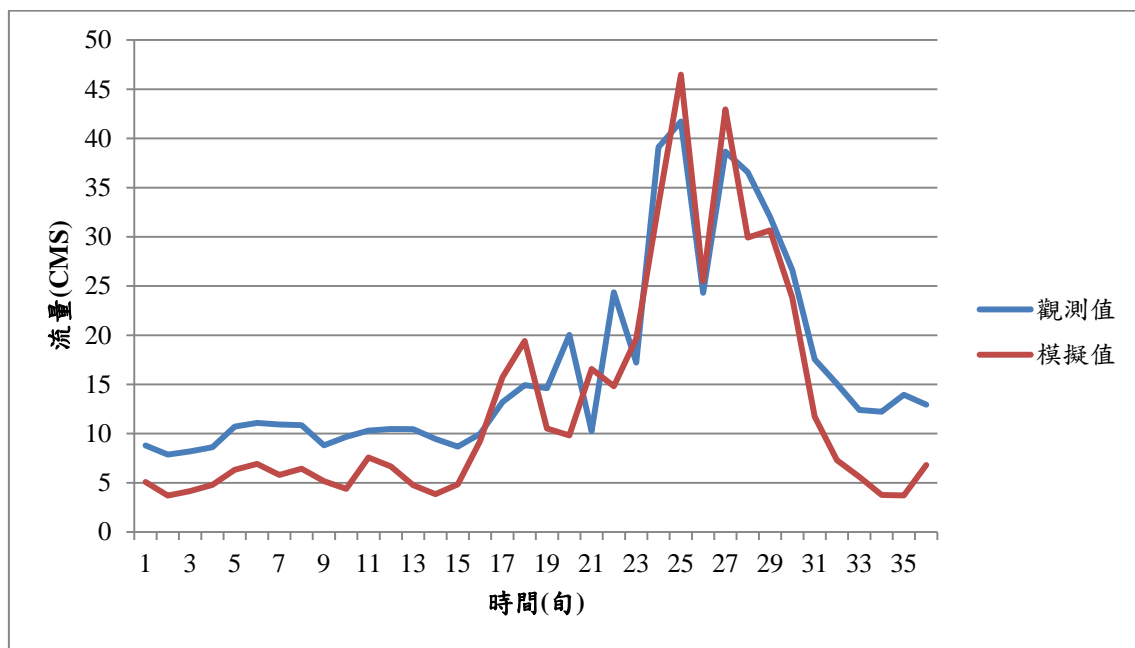


圖 4.8 家源橋流量驗證結果

本系統考慮的河川流量資料除包括蘭陽溪主流的流量外，尚包含粗坑溪、清水溪、安農溪、羅東溪等四條支流之入流量。其中蘭陽溪主流的流量可由 GWLF 流量模式模擬，然而粗坑溪、清水溪、安農溪、羅東溪等四條支流由於未設有流量監測站，無法直接取得其流量資料，因此本研究參考水利署「蘭陽地區地面地下水調配及管理模式整合初步規劃」報告之內容，採用面積流量法的方式，藉由家源橋流量推估上述各支流之流量，其推估方式如下表 4.2 所述。

(2) 自來水需求量與自來水設施處理能力

於系統動力模式中，需輸入個供水分區之自來水需水量以及不同淨水設施的處理能力資料。於自來水需求量部分，本研究參經濟部水利署(2007)區域水資源經理策略擬定之研究資料，使用式(4.2)計算民國 96 年宜蘭地區各水資源系統之自來水需求量，而淨水廠對於地面水資源之處理能力則參考表 4.1 之內容進行設定。

$$\text{自來水配水量} = \text{人口數} \times \text{普及率} \times \text{每人每日用水量} / \text{抄見率} \quad (4.2)$$

(3) 發電用水量

宜蘭地區主要的水力發電廠為蘭陽水力發電廠，該電廠由員山機組與天埤（亦稱為天送埤）機組兩機組所構成。其中，員山機組位於三星鄉員山村的蘭陽溪與清水溪交會處，其取水位置在蘭陽溪牛鬥橋上游約 2300 公尺處，取水後透過隧道輸送至蘭陽機組的前池，再以鋼管送至落差 70.5 公尺之發電機進行發電。於員山機組發電後，其尾水再輸送至下游之天埤機組，配合部份清水溪之流量進行發電，而天埤機組之發電尾水則匯入安農溪，成為安農溪流量的主要來源。

本研究依據蘭陽發電廠所提供之淨發電量統計資料，配合其電/水比（蘭陽機組=0.1639 度/公噸、天埤機組=0.088 度/公噸）參數，即可反推反兩電廠歷年之月發電用水總量，詳見附錄三。本研究於輸入資料時將各月的發電用水總量換算成為流量資料後，再統計個月的平均發電用水量，輸入系統動力模式。

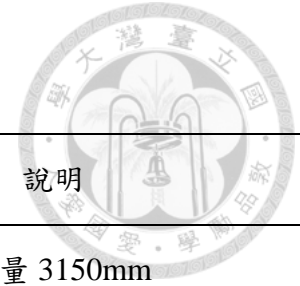


表 4.2 蘭陽河流域支流流量推求方式

編號	控制點名稱	流量推估公式	說明
1	粗坑溪取水口	$Q_{\text{粗坑溪取水口}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{粗坑溪取水口}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{粗坑溪取水口}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 3150mm
2	大溪川取水口	$Q_{\text{大溪川取水口}} = Q_{\text{中山橋}} \times \frac{A_{\text{大溪川取水口}}}{A_{\text{中山橋}}} \times \frac{P_{\text{大溪川取水口}}}{P_{\text{中山橋}}}$	集水區年平均雨量 2925mm
3	圳頭取水口	$Q_{\text{圳頭取水口}} = Q_{\text{中山橋}} \times \frac{A_{\text{圳頭取水口}}}{A_{\text{中山橋}}} \times \frac{P_{\text{圳頭取水口}}}{P_{\text{中山橋}}}$	集水區年平均雨量 3050mm
4	柑仔坑取水口	$Q_{\text{柑仔坑取水口}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{柑仔坑取水口}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{柑仔坑取水口}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 3500mm
5	寒溪取水口	$Q_{\text{寒溪取水口}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{寒溪取水口}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{寒溪取水口}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 3800mm

6	新城溪取水口	$Q_{\text{新城橋}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{新城橋}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{新城橋}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 3800mm
7	松羅攔河堰	$Q_{\text{松羅攔河堰}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{松羅攔河堰}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{松羅攔河堰}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 3400mm
8	羅東攔河堰 (不含發電引水面積)	$Q_{\text{羅東攔河堰}} = Q_{\text{蘭陽大橋}} \times \frac{A_{\text{羅東攔河堰}}}{A_{\text{蘭陽大橋}}} \times \frac{P_{\text{羅東攔河堰}}}{P_{\text{蘭陽大橋}}}$	集水區年平均雨量 3500mm
9	蘭陽電廠取水口	$Q_{\text{蘭陽電廠取水口}} = Q_{\text{家源橋}} \times \frac{A_{\text{蘭陽電廠取水口}}}{A_{\text{家源橋}}} \times \frac{P_{\text{蘭陽電廠取水口}}}{P_{\text{家源橋}}}$	集水區年平均雨量 2700mm

註：家源橋年平均雨量 2600mm、中山橋年平均雨量 3000mm、蘭陽大橋年平均雨量 3070mm。

資料來源：水規所 2008

(4) 農業用水

本研究並未針對農業灌區的部份深入探討水資源的分配情形，然而由於安農溪需提供部分流量支援農業灌溉用水，因此於系統設定中仍須輸入農業灌溉用水需求資料。系統所考量之蘭陽溪水資源系統之農業灌區如下圖 4.9（來源：農田水利數位博物館網站），各渠道之用水資料則參考附錄四（水利署 2008）之各灌渠用水資料，並依照農田水利會年報中，宜蘭農田水利會年灌溉用水比例之分配情形（如圖 4.10），並依照 96 年之灌溉用水量將各灌渠之總用水量依比例分配後輸入系統動力模式。

上述各類資料均轉為統一的單位輸入系統動力模式中以進行模擬，本研究採用之統一單位為立方公尺/秒（CMS）。此外模式中的時間設定以「旬」為基本的時間尺度單位。

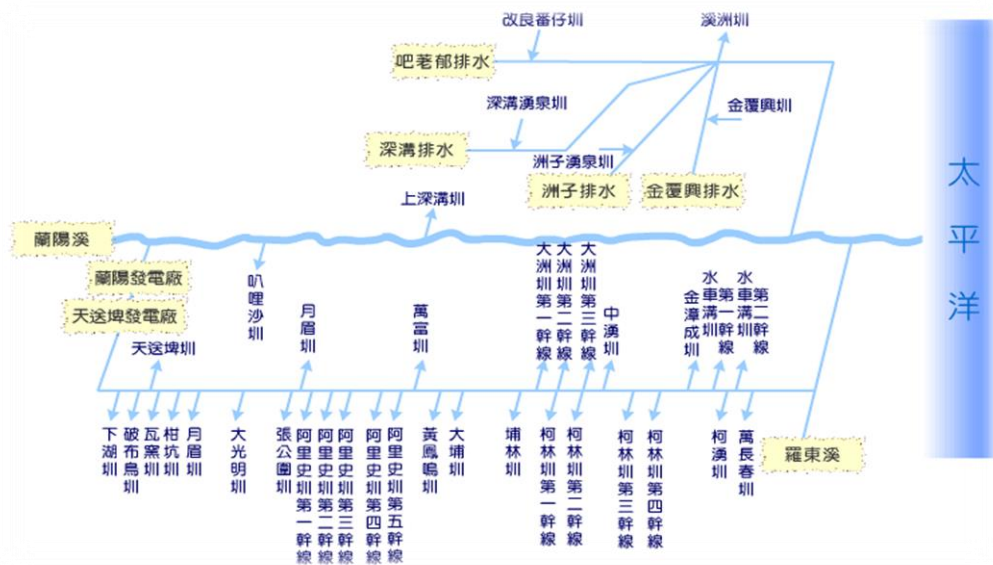


圖 4.9 蘭陽河流域農業灌溉渠道示意圖

(資料來源：農田水利數位博物館網站)

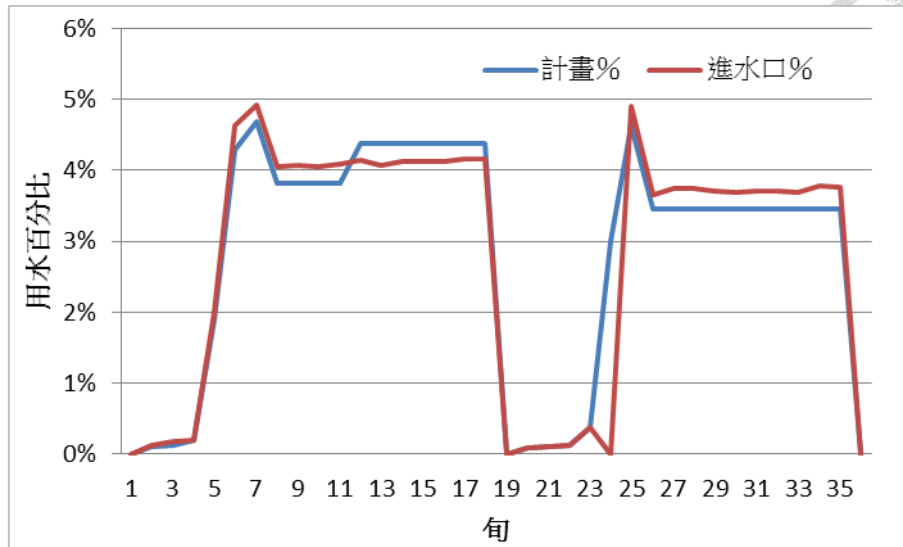


圖 4.10 宜蘭農田水利會年灌溉水量之各旬分配比例

(資料來源：童慶斌，2011)

4.2.3 供水承载力

本研究採用 1980~1999 年之歷史氣象資料，透過氣象合成模式，得到有相同統計特性之 200 年氣象資料，再經 GWLF 流量模式模擬而得 200 年之流量資料，以旬為基本之時間尺度，得到共 7200 旬。將此 7200 旬流量資料輸入系統動力模式，考慮各水利設施之供水能力以及營運規則，可模擬水資源供水系統之供水情形，並根據水利署「區域水資源經理策略擬定之研究」(2008)，以民國 96 當作現況所統計之需水量，且因蘭陽河流域地區無特別定義缺水容忍度指標值，故本研究定義以 $SI=1$ 做為此地區之缺水容忍度指標，以分析現況之供水承载力，分析結果見表 4.3。

以目前使用情況，蘭陽溪供水系統每日分別供給宜蘭地區 7.52 萬立方公尺、羅東地區 7.29 萬立方公尺的水資源，當缺水容忍度 $SI=1$ 時，系統之供水承载力為宜蘭每日 10.68 萬立方公尺，羅東每日 14.37 萬立方公尺，均超過目前之供水量，表示蘭陽溪之水資源供水系統可滿足現況的需求。

表 4.3 現況供水承載力

供水承載力(萬立方公尺)	目前供水	SI=1
宜蘭	7.52	10.68
羅東	7.29	14.37
合計	14.82	25.06

4.3 供水承載力之敏感度分析

為推估未來(民國 120 年)之供水承載力並進行敏感度分析，首先需瞭解各標的年用水需求，本研究則參考水利署「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」計畫(水利署，2012)之推估方式，以蘭陽河流域地區各自來水子系統之 96 年行政人口數、普及率、以及抄見率為基準，再以各縣市已推估出之 120 年行政人口、普及率、抄見率、以及生活需水量加以修正計算出 120 年之各子系統生活需水量，計算方法分別詳述如下：

$$\text{生活用水量} = \text{自來水配水量} + \text{自行取水量} \quad (4.3)$$

$$\text{自來水配水量} = \text{人口數} \times \text{普及率} \times \text{每人每日用水量} / \text{抄見率} \quad (4.4)$$

1.人口成長推估

120 年之行政人口可由下式推算之：



$$\begin{aligned}
 & \text{子系統行政人口}_{120} \\
 &= \text{子系統行政人口}_{96} + \text{各縣市行政人口}_{120} \\
 &\quad \times \frac{\text{子系統行政人口}_{96}}{\text{各縣市行政人口}_{96}}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

由 96 年推算之 120 年宜蘭地區行政人口為 222038 人，羅東地區為 226964 人。

2. 普及率

普及率為各用水分區供水人口數與行政區人口數之比例，120 年之普及率推算可參考下式：

$$\begin{aligned}
 & \text{子系統普及率}_{120} \\
 &= \text{子系統普及率}_{96} + (\text{各縣市普及率}_{120} \\
 &\quad - \text{各縣市普及率}_{96}) \\
 &\quad \times \frac{\prod(\text{子系統普及率}_{96})}{\text{子系統普及率}_{96}} \bigg/ \frac{\sum \frac{\prod \text{子系統普及率}_{96}}{\text{子系統普及率}_{96}}}{\text{子系統個數}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

民國 120 年時宜蘭、羅東地區之普及率分別為 92.4 %、97.3 %。

3. 抄見率

抄見率為自來水系統有效水量中之「計費水量」，為達到使用功能且有收費之水量，而無法計費水量包含表差、消防用水、竊水及漏水等，其中尤以漏水為大宗。因此抄見率之提昇均以減低漏水率(量)為主要策略與措施。民國 120 年抄見率推算方法如下：



$$\begin{aligned}
 & \text{子系統抄見率}_{120} \\
 & = \text{子系統抄見率}_{96} + (\text{各縣市抄見率}_{120} \\
 & \quad - \text{各縣市抄見率}_{96}) \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

民國 120 年時宜蘭、羅東地區之抄見率分別為 70.8 %、78.3 %。

4.每人每日用水量

根據水規所「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」(2012)，未來每人每日用水需求可能受到人均 GDP 與節水推廣之影響，但將宜蘭地區之人均 GDP 與用水量比較，相關性不顯著，故宜蘭地區 120 年之每人每日用水量維持為 247 升。

採用前述人口成長推估之人口數、普及率、抄見率及每人每日用水量推估成果，各用水分區之日生活需水量如表 4.4 所示，民國 120 年時宜蘭、羅東地區之生活用水需水量分別為每日 7.26、7.06 萬立方公尺，皆較 96 年之需水量減少，可能原因為抄見率之提升，使需預留之漏水、竊水、或表差之水量顯著減少，影響 120 年之總需水量下降。

表 4.4 各分區之生活需水量

年份		96 年	120 年
日需水量(萬立方公尺)	宜蘭	7.52	7.26
	羅東	7.29	7.06
	合計	14.82	14.32

根據 96 年與 120 年需水量結果，雖可看出整體變化情形，但實際上會影響供水承載力的因子非常多，包括水文條件、水資源供水系統和缺水容忍度等等，本研究針對其中每人每日用水量、人口成長、與雨量三個因子進行蘭陽溪流域系統之供水承載力敏感度分析，並針對其結果繪製承載力包絡線。

根據蘭陽溪流域 120 年之系統動力模式設定，找出當 SI=1 時，不同情形之人口成長對每人每日用水量之改變，結果如表 4.5、表 4.6，並根據表繪製敏感因子包絡線，如圖 4.11、圖 4.12。若民國 120 年宜蘭地區人口與預期相同（人口成長等於 1），則此地區每人每日用水量可達 402 升，若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則降為 201 升至 100.5 升，若人口較預期減半，則每人每日用水量則可高達 804 升。羅東地區若人口成長與預期相同，則每人每日用水量可達 560 升，若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則為 280 升至 140 升，若人口為預期之一半，則每人每日用水量則可高達 1120 升。由此敏感度分析包絡線可看出宜蘭與羅東地區未來缺水的風險較低，而根據此包絡線之結果，也可提供未來也可在此區域進行如都市開發、紓解都市人口、以及工業區發展等等政策制定之決策分析。

表 4.5 宜蘭地區不同的人口成長對每人每日用水量之改變

宜蘭	SI=1	SI=0.5	SI=0.1
人口成長(倍)	每人每日用水量(L)		
0.5	804	780	730
1	402	390	365
2	201	195	182.5
3	134	130	121.7
4	100.5	97.5	91.3

表 4.6 羅東地區不同的人口成長對每人每日用水量之改變

羅東	SI=1	SI=0.5	SI=0.1
人口成長(倍)	每人每日用水量(L)		
0.5	1120	1080	1040
1	560	540	520
2	280	270	260
3	187.3	180	173.3
4	140	135	130

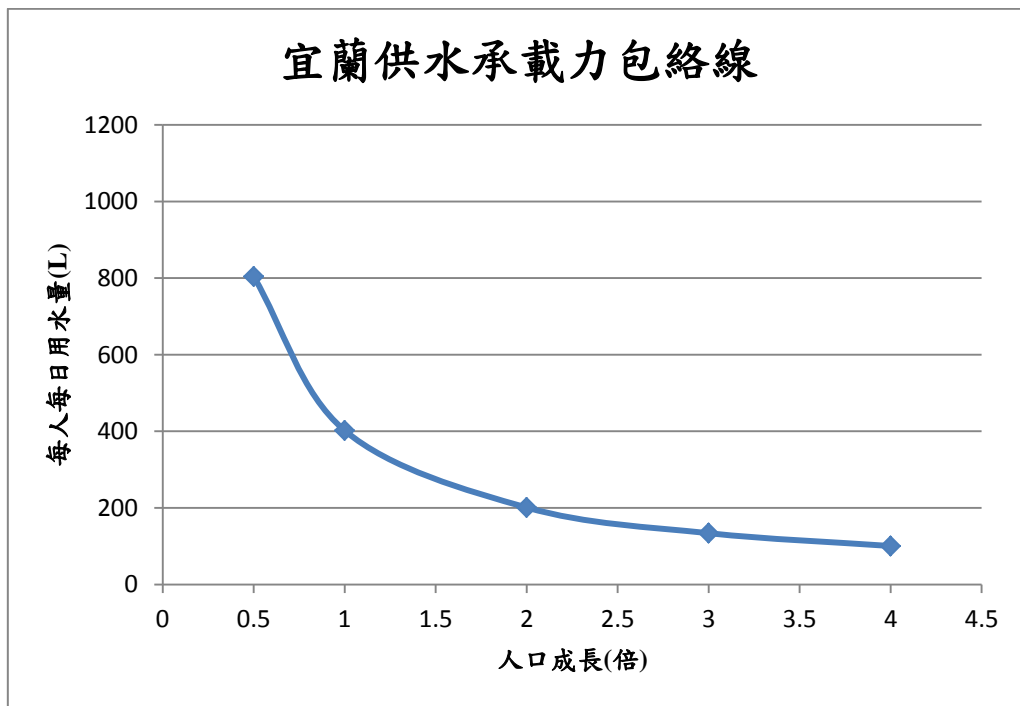


圖 4.11 宜蘭地區承载力包絡線 (SI=1)

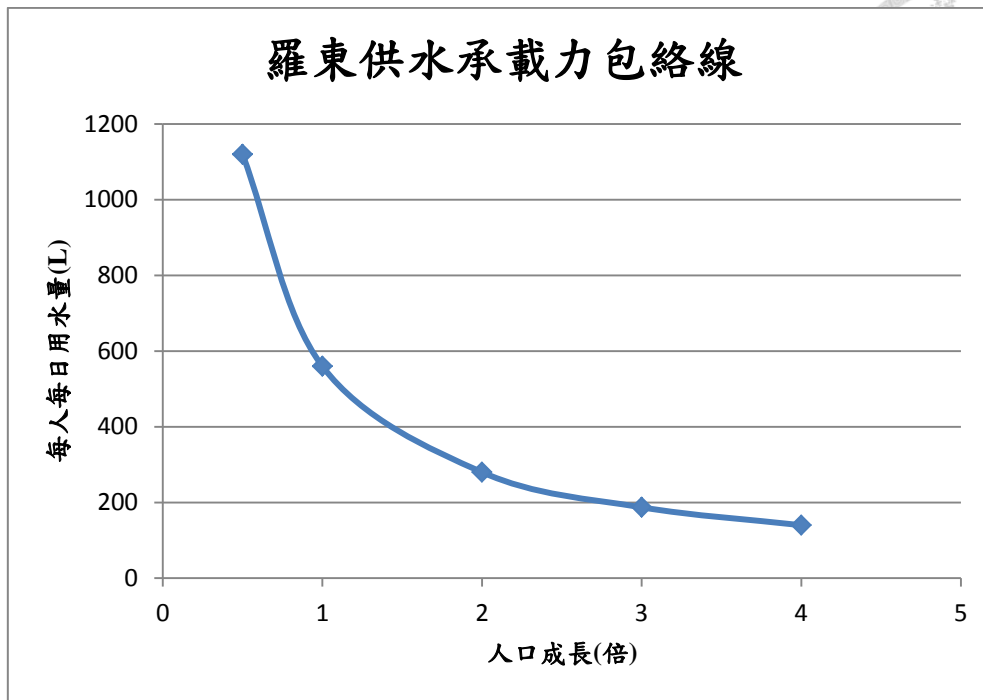


圖 4.12 羅東地區承载力包絡線 (SI=1)

除了 SI=1 時不同情形之人口成長對每人每日用水量之改變，本研究也採用台灣其他地區常用之缺水容忍度門檻 SI=0.1 與 SI=0.5，進行供水承载力敏感度分析與包絡線繪製，結果如圖 4.13 與圖 4.14。當缺水容忍度門檻為 SI=0.5 時，若民國 120 年宜蘭地區人口與預期相同（人口成長等於 1），則此地區每人每日用水量為 390 升，若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則降為 195 升至 97.5 升，若人口較預期減半，則每人每日用水量為 780 升。當門檻值降為 SI=0.1 時，人口成長等於 1，則每人每日用水量為 365 升，若此區人口成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則降為 182.5 升至 91.3 升，若人口較預期減半，則每人每日用水量則為 730 升。羅東地區當缺水容忍度門檻為 SI=0.5 時，若人口成長與預期相同，則每人每日用水量可達 540 升，若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則為 270 升至 135 升，若人口為預期之一半，則每人每日用水量則為 1080 升。當 SI=0.1 時，人口成長等於 1，則每人每日用水量可達 520 升，若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，每人每日用水量則為 260 升至 130 升，若人口為預期之一半，則每人每日用水量則為 1040 升。

當民國 120 年之供水承載力與預期未來每人每日用水量 247 升相比較時，宜蘭地區在 SI=0.1、SI=0.5、與 SI=1 之缺水容忍度門檻時，若每人每日用水量維持 247 升，可提供較預期成長 1.48 倍、1.58 倍、與 1.63 倍人口的用水量。而羅東地區若每人每日用水量維持 247 升，則在 SI=0.1、SI=0.5、與 SI=1 之缺水容忍度門檻時，可提供較預期成長 2.11 倍、2.19 倍、與 2.27 倍人口之用水量。

另本研究也有針對當 SI=1 時，雨量對供水承載力之敏感度分析，如附件一與附件二，由結果可看出蘭陽溪流域系統供水承載力對雨量變化並不敏感，可能原因為供水能力主要受系統設施所限制，雖然雨量改變，但系統內之淨水場之處理能力有限，供水承載力對雨量改變之影響非常小，故認為供水承載力對雨量不敏感。

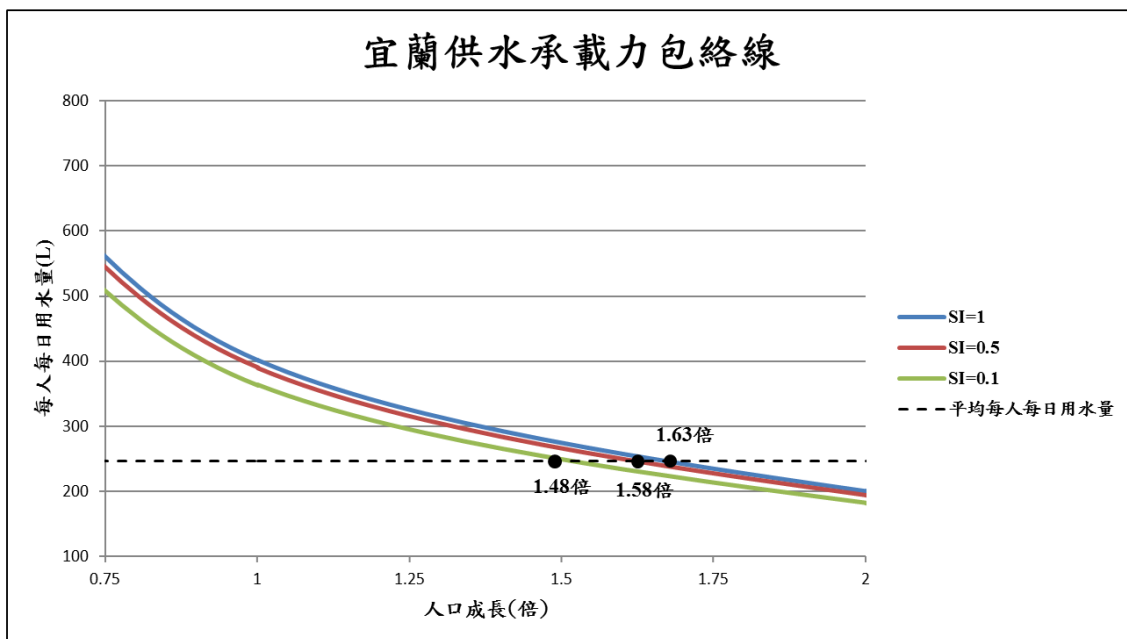


圖 4.13 宜蘭地區承載力包絡線

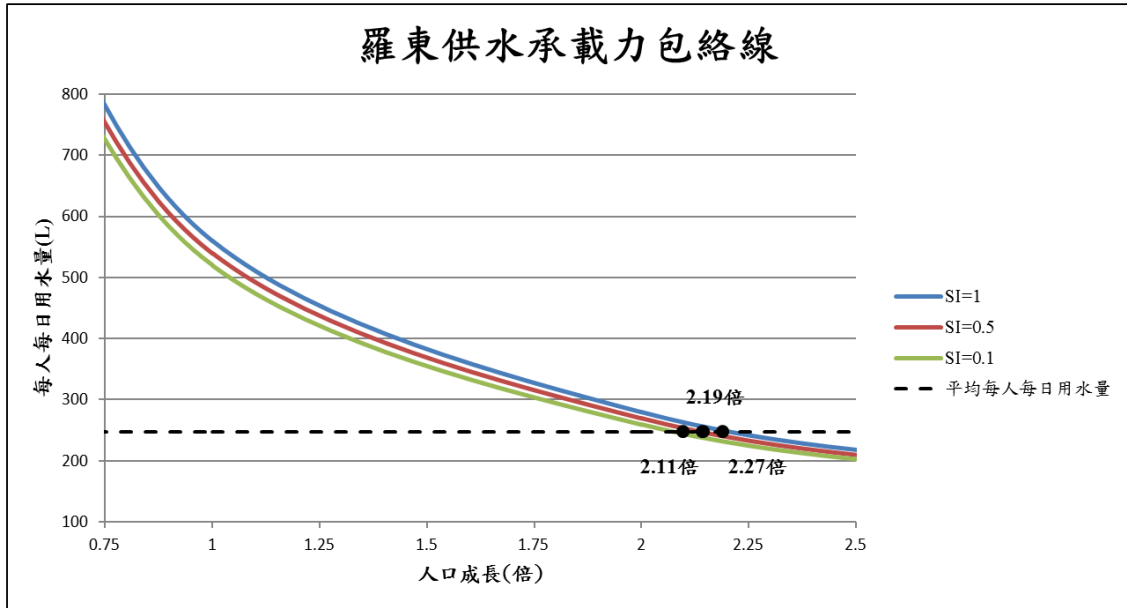


圖 4.14 羅東地區承载力包絡線

4.4 不同缺水情形之水資源應變機制

因宜蘭地區為一個無水庫之水資源供水系統，一旦缺水時，沒有辦法像其他有水庫的地區有其他的調適能力，因此本研究先就前一節水資源供水承载力進行分析，再針對宜蘭地區制訂不同缺水情形時之應變機制。

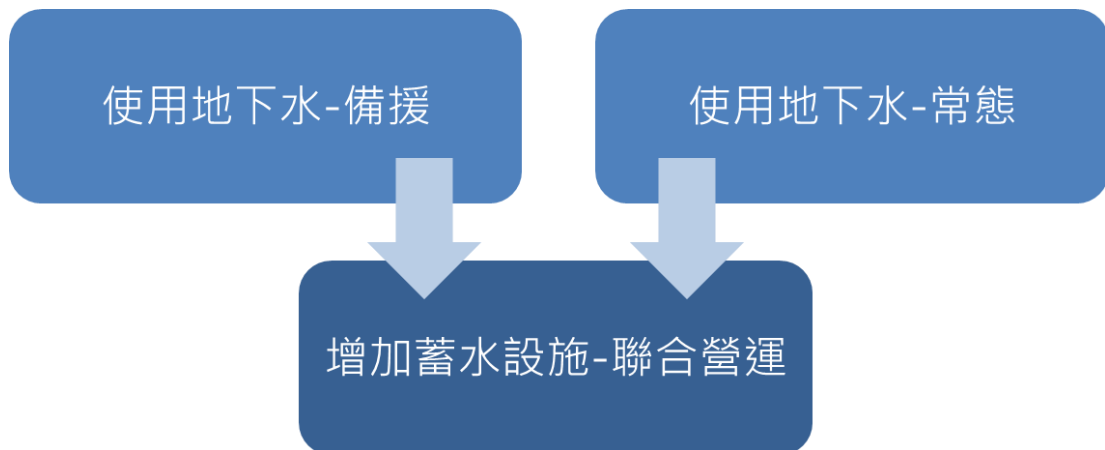


圖 4.15 不同缺水情形之水資源應變機制階段圖

根據宜蘭地區提出之不同缺水情形之水資源應變機制如圖 4.15，第一階段分為兩種，一為使用地下水做為備援用水，當地表水系統遭遇缺水時，才抽取地下



水。第二為地表水一般時期便無法滿足供水時，將地下水做為常態用水，在非缺水時期即抽取地下水，做為供水來源。下一階段為前述方法皆無法滿足供水時，增加蓄水設施，並進行地表地下水聯合營運，有效的使用水資源。

4.4.1 地下水-備援用水

當因為乾季來臨、或雨量不足等原因造成地表水供水量不能滿足需水時，便會發生缺水，宜蘭地區一旦缺水，因無水庫蓄水，可直接使用地下水當作備援用水，如圖 4.16。地下水為方便且水質穩定之供水來源，且成本低，可有效率的降低缺水，但於此階段抽取地下水時須注意，短時間內大量抽取，有可能會因為抽取量超過最大可抽取量時，發生地層下陷或地下水位無法恢復之災害，因此在抽水時，可搭配地下水模式優選抽水量與抽水時程，達到最有效能減少缺水，且不危害地下水之目的。

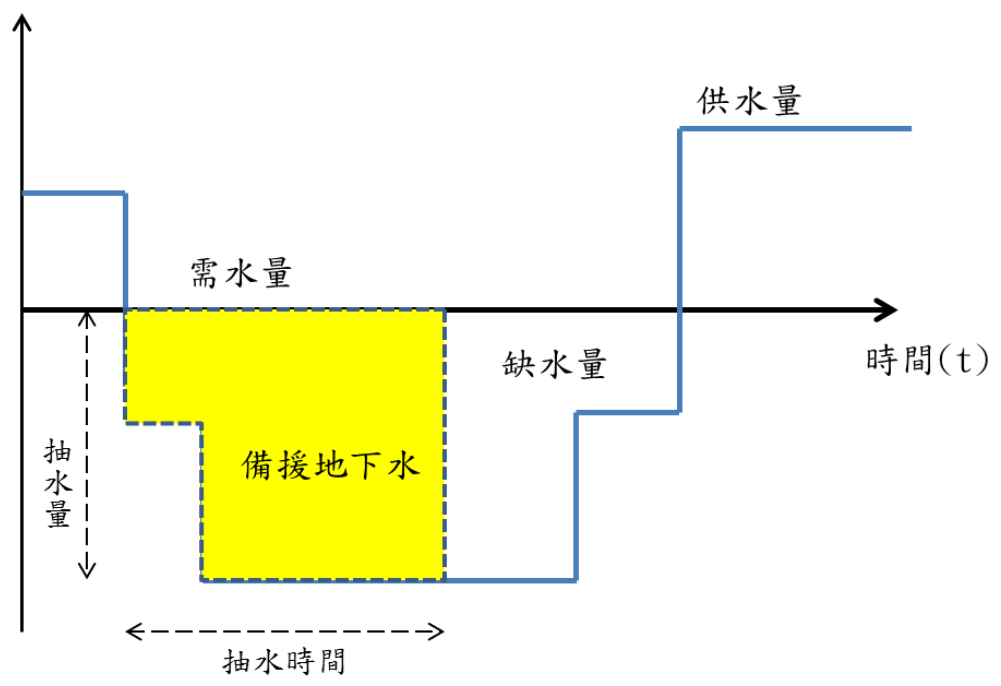


圖 4.16 地下水作為備援用水示意圖



4.4.2 地下水-常態用水

因宜蘭地區地下水補注快速，當地表水平常時期已無法滿足供水量時，可將地下水加入常態供水來源，如圖 4.17。可建立宜蘭地區地下水模式並優選出一最大可抽水量，將此抽水量加入供水，便可滿足地表水供應不足的缺水。當發生嚴重缺水時，雖然無法增加抽水量，但每日最大可抽水量還是可以穩定的提供水資源，減輕缺水之嚴重程度。

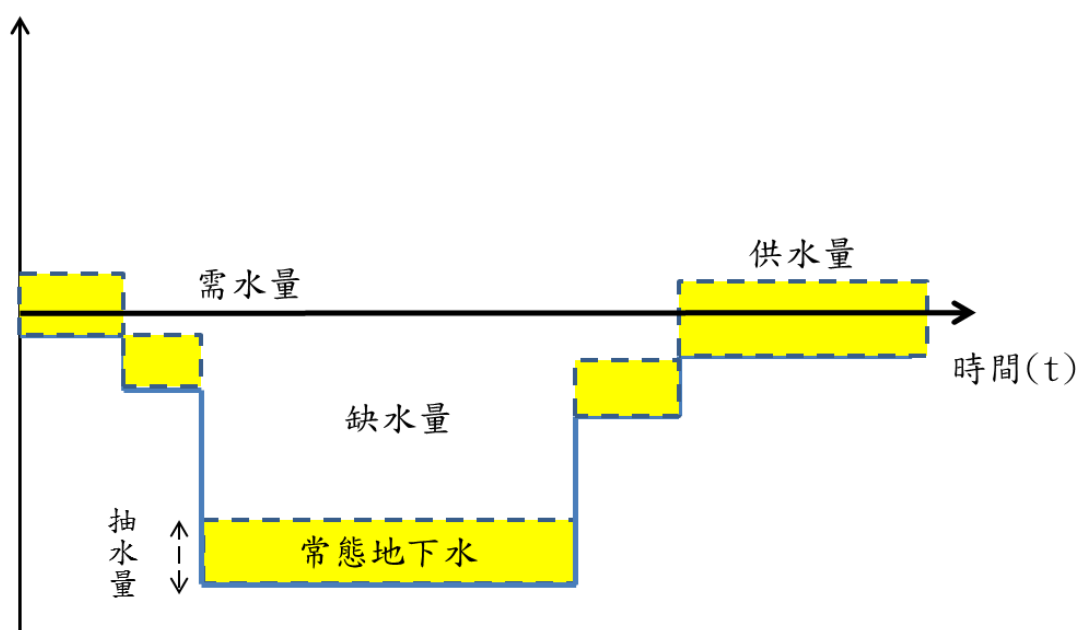


圖 4.17 地下水作為常態用水示意圖

4.4.3 增加蓄水設施-地表地下水聯合營運

若地下水加入常態用水還是無法滿足供水量，則最後可考慮增加蓄水設施，如水庫或堰壩等設施，將豐水期時多餘的水資源保留到乾季時運用。增加如水庫等蓄水設施，可加入之前已建置完成並使用之地下水供水設施，同時考慮水庫蓄水量與地下水洩降量，優選聯合營運操作規線，將水資源合理且有效的運用，關於優選聯合營運操作規線之案例可參考第五章。



第五章、地表地下水聯合營運案例設計



5.1 研究案例之設計

本研究設計一假設案例，用以驗證前一節所提出之增加蓄水設施時，以地表地下水聯合營運操作規則調配供水，達到最有效之降低缺水率與永續使用地下水之目標。本假設案例為一穩態之侷限含水層，並藉由 MODFLOW-2005 地下水模式模擬地下水流。此假設案例設計為一層之侷限含水層，並將模擬區域離散成 30×30 之網格，每個網格大小為 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ，含水層有一固定深度為 45 m 。而模擬時間以月為一模擬時程 (stress period)，並連續模擬 240 個模擬時程 (共 20 年)。

含水層設計部分，在模擬區域之東南方與西南方各有一隨乾溼季改變之定水頭邊界 (constant head boundary) 代表補注區，在溼季與乾季時，水頭各為 65 m 與 60 m 。而在模擬區域之西北方則有另一個定水頭邊界，其水頭值設定為 0 ，代表海洋。其他剩餘之邊界則代表零流量邊界 (no flow boundary)。模式其他參數設定部分，水平水利傳導係數為 140.0 m/day ，垂直水利傳導係數為 1.4 m/day ，而比儲水率係數設定為 0.001 m^{-1} ，本研究模擬不考慮降雨與蒸發散。

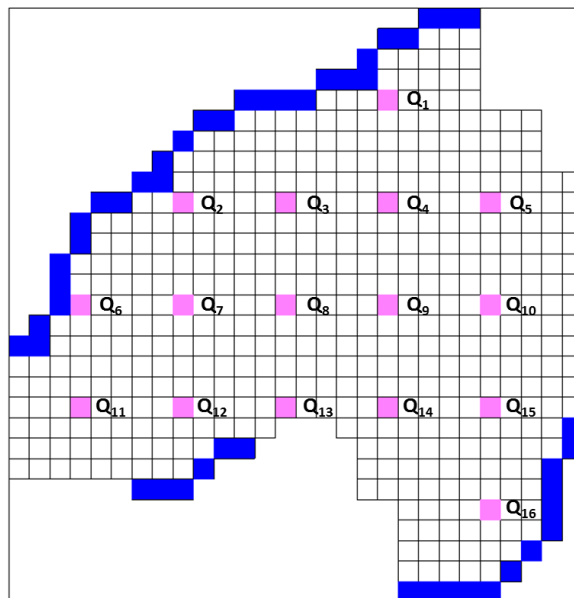


圖 5.1 MODFLOW 地下水模式網格設定

抽水井設定部分，共有 16 口抽水井均勻分布於此模擬區域，抽水井皆用於供水，並設定所有井同時使用，且為穩態模擬，各口井之抽水量由優選最大可抽水量而得。相關模式設定可參考圖 5.1， Q_1 至 Q_{16} 為抽水井位置，右下與左下各有一定水頭補助邊界，而左上角之邊界代表海洋。

為了求出此假設案例之地表地下水聯合營運操作規線，需先有一地表水水庫之供水系統與總需水量，才能結合地下水模式得到供水規則。本研究使用真實水庫之 20 年歷史流量資料作為地表水供水系統資料，以及一預測 2016 年之需水量資料作為總需水量，如圖 5.2 所示。因此，將水庫 20 年之歷史流量資料作為假設案例之地表水供水系統，加上地下水模式系統，希望能滿足將此 2016 年之需水量資料重複 20 年之假設需水量。本研究假設地表水系統與地下水系統是互相獨立的，地下水含水層不會作為地表水水庫設施入流來源，而地表水與地下水系統之間也不會有任何交互作用。

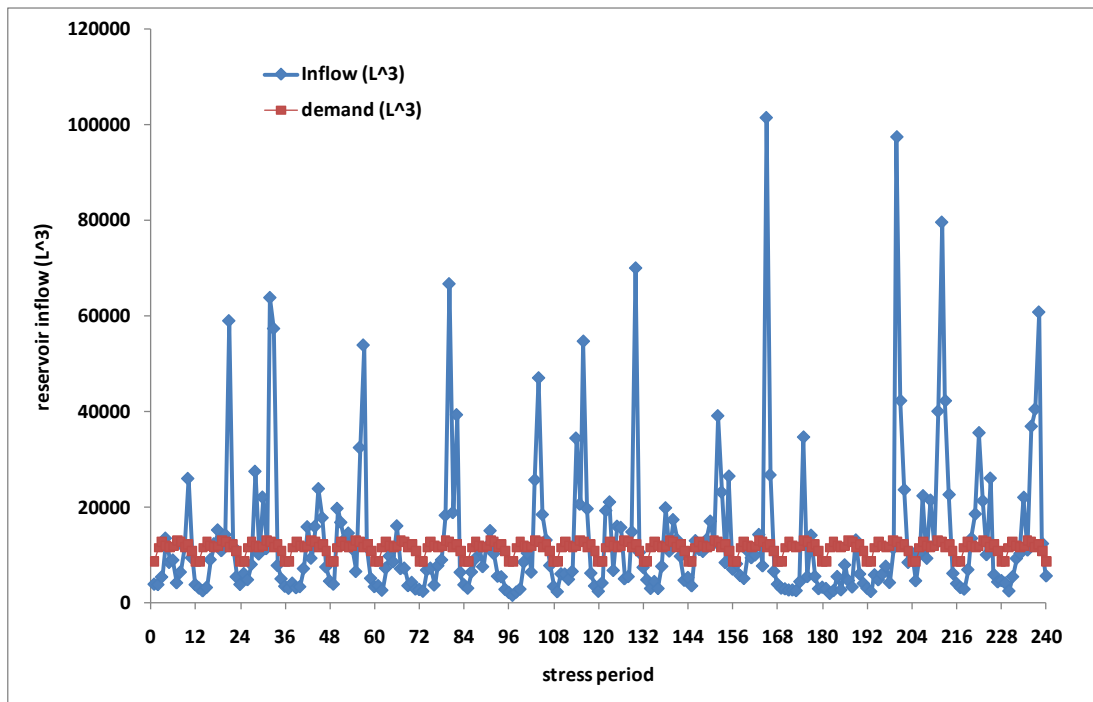


圖 5.2 水庫 20 年入流量與需水量資料



5.2 優選結果討論

5.2.1 最大可抽水水量

各抽水井的地下水最大可抽水水量由禁忌演算法優選而得，優選結果可得十六口井加總之最大總抽水水量為 $2042\text{ m}^3/\text{day}$ ，而各口井抽水水量占總抽水水量之抽水率結果如圖 5.3，其中第 16 號井為最主要的地下水供水來源，占總抽水水量的 35% ($844\text{ m}^3/\text{day}$)，而第 9 號井只提供總抽水水量的 0.02% ($0.48\text{ m}^3/\text{day}$)，為其中抽水率最小的井。

由優選結果可知，在越靠近補注區之區域抽水，因地下水補注快速，較不會影響地下水洩降量，可提供較大的抽水率。反之，越靠近海洋的區域，因其本身之地下水位較低，若進行抽水，對地下水洩降量影響較大，因此此區域之抽水率較其他區域低。

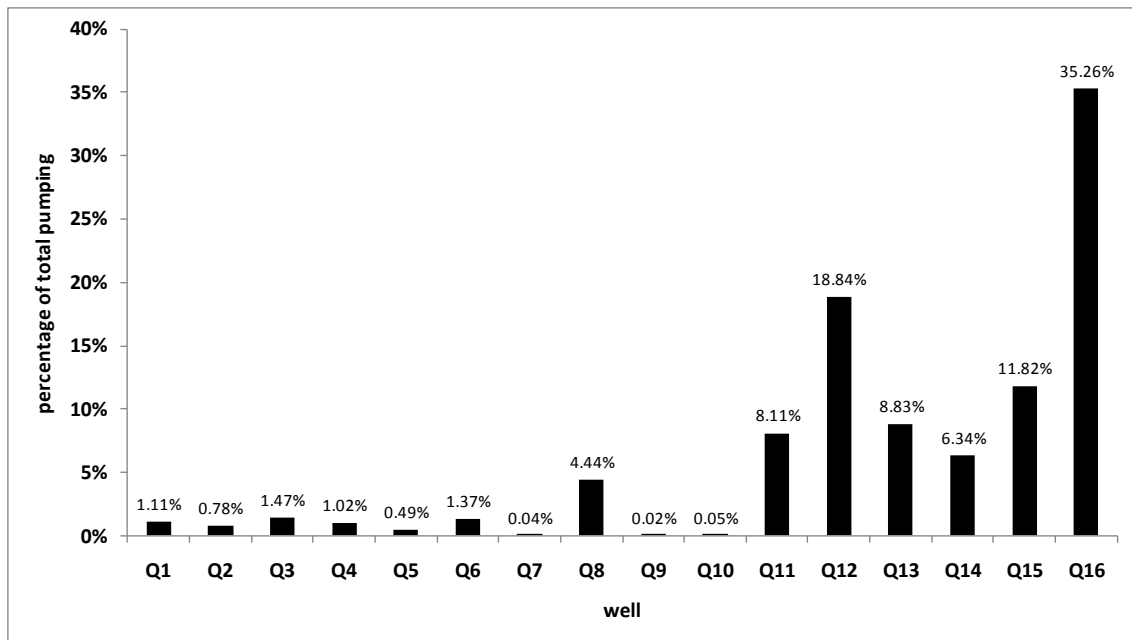


圖 5.3 各口井之優選抽水率結果

而優選後各抽水井之地下水位結果如圖 5.4，由圖中可看出地下水位每年會隨乾濕季而變化。靠近補注區的位置（第 11~第 16 號井），因抽水量及補注量皆多，因此地下水位變化較劇烈，而靠近海洋之區域（第 1、第 2 號井），因抽水、補注量皆少，所以地下水位變化最為平緩。

此優選之最大可抽水量，會作為之後優選地表地下水聯合營運操作規線之抽水率限制條件，而各口井之最大可抽水率也會作為優選規線時之各口井之抽水率。

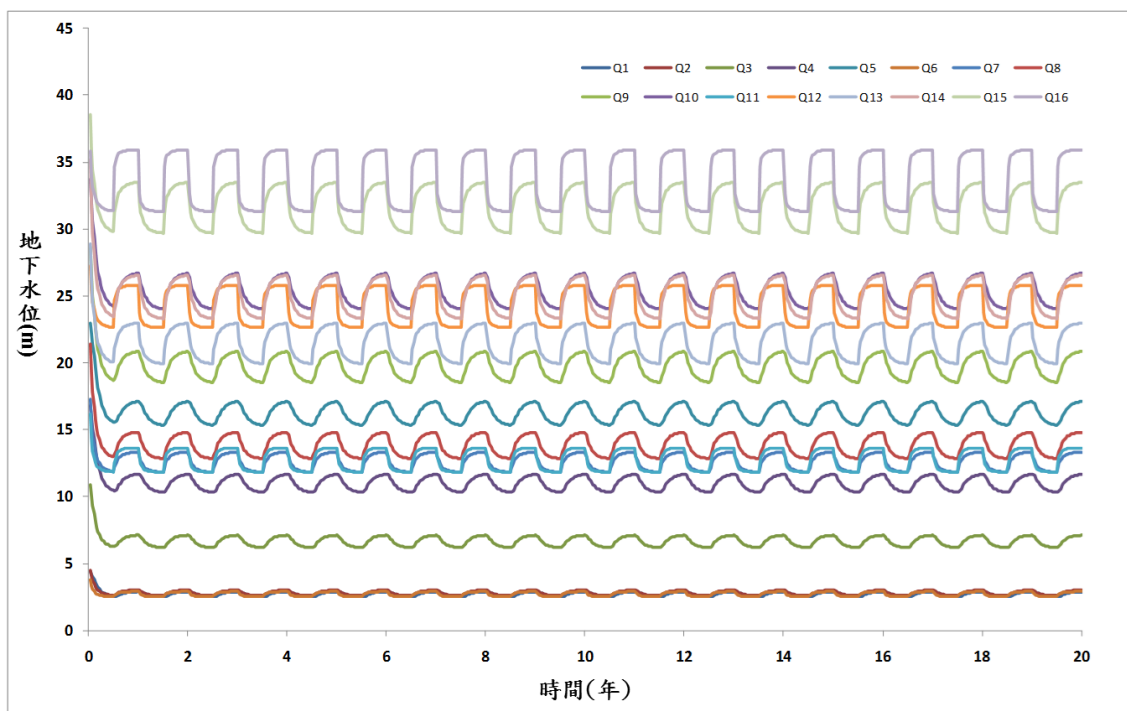


圖 5.4 各抽水井之地下水位變化量

5.2.2 地表地下水聯合營運操作規線

當已知最大可抽水量與聯合營運操作規則，接下來便可使用禁忌演算法優選聯合營運操作規線。首先，先優選只使用一個地下水累積洩降率分界，也就是 $GL_2 = 0.5$ ($GL_1 = 0, GL_3 = 1$) 之結果，此分界將操作規線分為兩區，並產生

$S_1^v, S_2^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2,$ 與 β_2 之變數，經過禁忌演算法 27 次疊代運算後，得到目標函數最小值(min Z)等於 6.03，其中 SI = 4.47, GD = 1.56, 20 年總缺水量為 $4.80 \times 10^8 m^3$ ，其他變數優選結果如表 5.1，而聯合營運操作規線優選結果如圖 5.5。

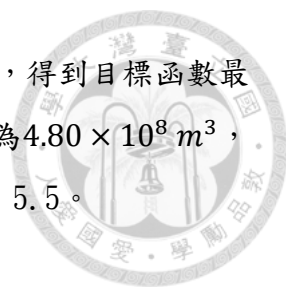


表 5.1 二區變數優選結果

變數	結果
S_1^v	234
S_2^v	196.5
α_1	83%
β_1	17%
α_2	85%
β_2	15%

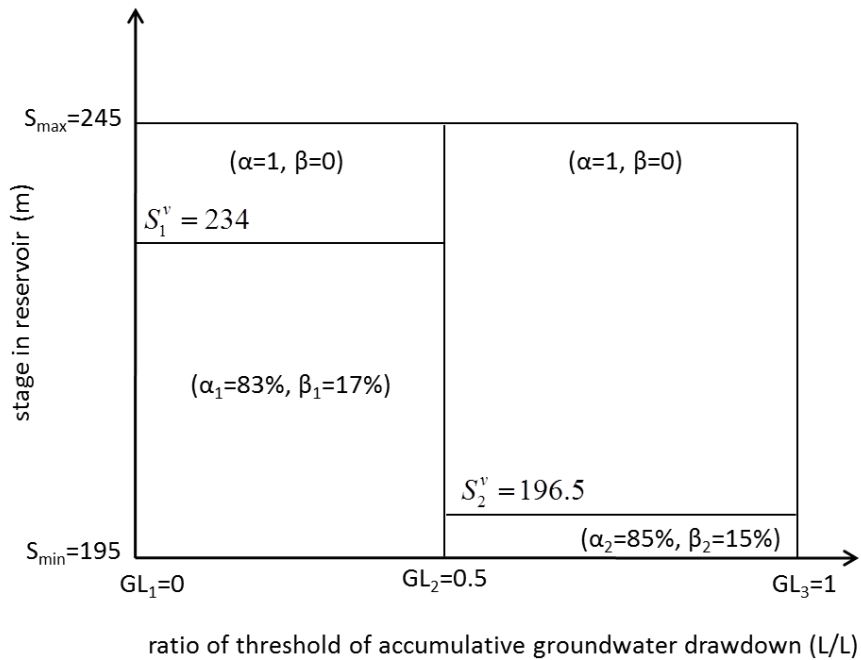


圖 5.5 聯合營運操作規線圖(二區)

各時期之地表水入流量與地表地下水供水量可參考圖 5.6，由此圖可清楚找出可能之缺水事件，在總共 240 個模擬時程內，有 109 時程有缺水情況發生，且大多發生在乾季，水庫入流量較低時。

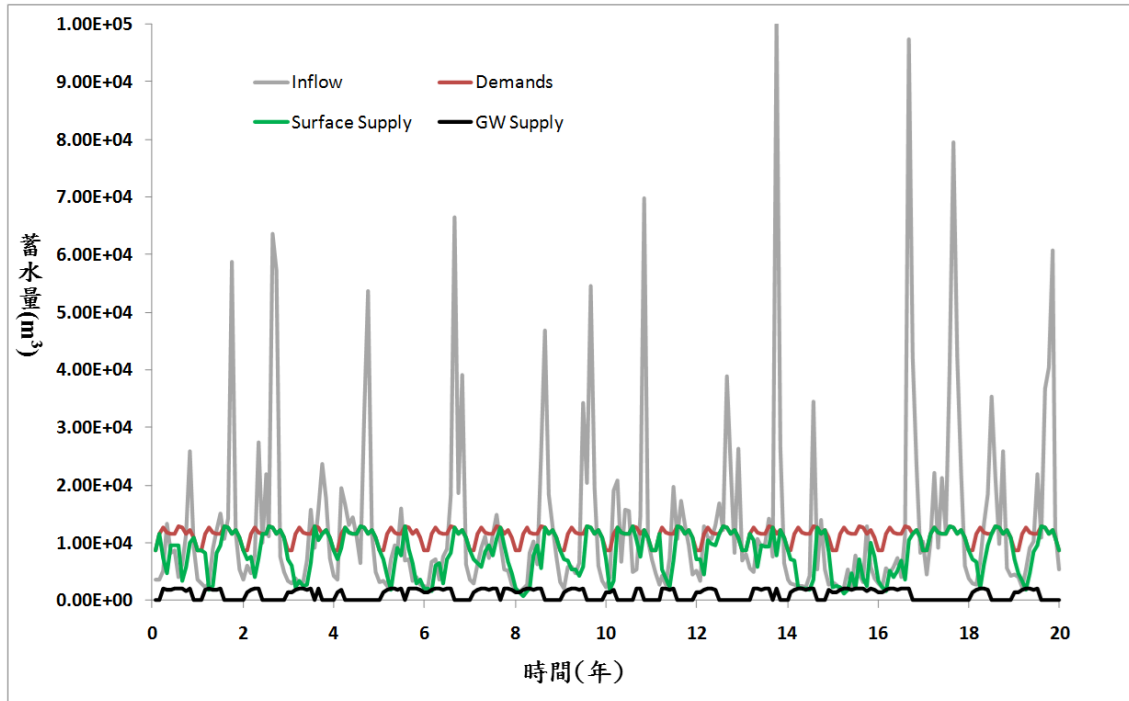


圖 5.6 聯合營運地表水入流量與地表地下水供水量

地下水累積洩降率小於 0.5 時(圖 5.5 左區)，當水庫蓄水量大於 234，可完全依賴地表水供水，當蓄水量小於 234 時，則啟用地表地下水聯合營運，加入地下水做為供水來源，由優選結果可知地表水與地下水之供水比例為 83：17。當地下水累積洩降率大於 0.5(圖 5.5 右區)，聯合營運之啟用蓄水量門檻值為 196.5，非常接近水庫之最小蓄水量限制，地表水與地下水之供水比例為 85：15。由優選結果可知，一旦啟用聯合營運，地表水與地下水的供水比值會接近 5，且地表水為主要的供水來源。雖然地表地下水的供水比值與地下水累積洩降量互相獨立，但可發現啟用聯合營運之蓄水量門檻值與累積洩降率卻是非常相關的，當地下水洩降率大時，洩降嚴重，蓄水量門檻值會較小，延緩啟用聯合營運的時間避免使用地下水；若地下水洩降率在可容許的範圍內，則會有較大的蓄水量門檻值，讓地表水與地下水根據聯合營運之規則一起供水。

為了知道各個變數對聯合營運操作規線的敏感度，本研究針對分兩區情境進行敏感度分析，分析過程中，除了要針對要研究的變數改變外，其餘變數皆保持不變，分析結果如表 5.2。



表 5.2 敏感度分析結果(2 區)

decision variable	objective value (Z)	sensitivity	SI	sensitivity	GD	sensitivity
Base case	6.25	N/A	4.66	N/A	1.59	N/A
$\alpha_1 = 93\%$	6.25	0.00	4.66	0.00	1.59	0.00
$\alpha_1 = 73\%$	6.25	0.00	4.66	0.00	1.59	0.00
$\alpha_2 = 95\%$	7.83	2.10	7.03	4.23	0.80	-4.12
$\alpha_2 = 75\%$	9.93	-4.88	6.19	-2.73	3.73	-11.19
$S_1^v = 195.5$	6.25	0.00	4.66	0.00	1.59	0.00
$S_1^v = 210$	6.23	-0.05	4.64	-0.05	1.59	-0.04
$S_2^v = 224$	6.95	-2.63	5.66	-5.01	1.29	4.34
$S_2^v = 244$	6.41	0.61	4.24	-2.09	2.17	8.54
$GL_2 = 0.4$	6.81	-0.45	5.25	-0.63	1.56	0.08
$GL_2 = 0.6$	6.02	-0.19	6.02	1.46	1.56	-0.10

為了表現聯合營運的優點，本研究另外模擬兩個供水情境與實行聯合營運之結果比較，首先，第一個情境為以地表水作為唯一供水來源，並計算其目標函數(Z)等於 6.49(SI = 6.49, GD = 0.0)，相較於分兩區的聯合營運優選結果(Z=6.03)差，且 20 年之總缺水量為 $5.44 \times 10^8 m^3$ ，也較聯合營運模擬之總缺水量 $4.8 \times 10^{10} m^3$ 嚴重，在 240 個模擬時程內有 99 個時程會發生缺水。第二個供水情境為使用地下水當作備援用水，只在地表水無法滿足供水時才抽水，此情境之目標函數(Z)計算結果為 7.53(SI = 3.13, GD = 4.40)，20 年之總缺水量為 $3.64 \times 10^8 m^3$ ，共有 79 個時程發生缺水，由模擬結果可知，分兩區之聯合營運優選結果還是優於此情境。此兩個供水情境與聯合營運之模擬結果整理於表 5.3，根據結果顯示，地下水於非缺水時期應適量的抽水，且水資源應同時分配，才能永續的使用水資源，且降低缺水。

表 5.3 不同情境與分區之優選結果

Operation rule	objective value (Z)	SI	GD	water shortage (x10 ³ , m ³)	number of water shortages happened
兩區(分界值個數:1)	6.03	4.47	1.56	479775	109
三區(分界值個數:2)	5.82	4.17	1.64	456395	109
四區(分界值個數:3)	5.77	4.08	1.68	451254	109
只使用地表水	6.49	6.49	0.0	543852	99
地表水+備援地下水	7.53	3.13	4.40	364063	79

根據逐步法，除了將地下水累積洩降率 (GD=0.5) 當作分界分為兩區之地下水聯合營運操作規線，本研究還進行了分為三區與四區之研究，以下為分為三區

之優選結果：將地下水洩降率均勻分為三區， $GL_2 = 0.33, GL_3 = 0.67 (GL_1 = 0, GL_4 = 1)$ ，決策變數為 $S_1^v, S_2^v, S_3^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3$ ，經過禁忌演算法 39 次疊代(圖 5.7)，後得到優選結果，最小之目標函數等於 5.82 (SI = 4.17, GD = 1.64)，優選結果可參考圖 5.8， $S_1^v = 239, S_2^v = 218.5, S_3^v = 196.5, \alpha_1 = 83%, \beta_1 = 17%, \alpha_2 = 84%, \beta_2 = 16%, \alpha_3 = 85%, \beta_3 = 15%$ ，而 20 年之總缺水量為 $4.56 \times 10^8 m^3$ ，在總共 240 個模擬時程內，有 109 時程有缺水情況發生，且大多發生在乾季，水庫入流量較低時。當聯合營運啟用時，地表水之供水與地下水之供水比值接近 5，以地表水為主要供水來源，由模擬結果可知，累積地下水洩降率不會影響此供水比值，但與啟用聯合營運之庫容門檻值有高度相關。與分兩區的结果比較，當地下水累積洩降量較嚴重時，兩種分區方法之庫容門檻值都可維持一較低門檻，皆等於 196.5 m；當累積洩降量很小時，兩種分區方式的門檻值介於 234 m 到 239 m 之間；當分三區時，中間分區之門檻值優選結果為 218.5 m。然而分兩區的聯合營運操作規線因固定累積洩降量分界緣故，無法更有效率的調配供水，因此無法得到與分三區之聯合營運操作規線相比較小之目標函數。

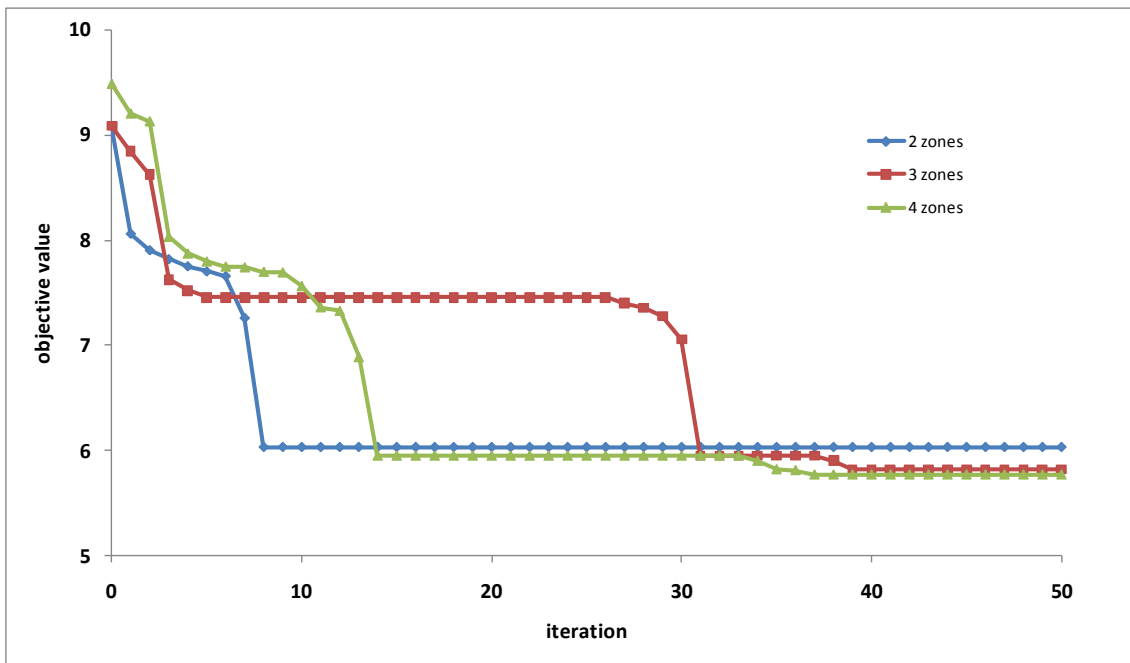


圖 5.7 禁忌演算法優選結果

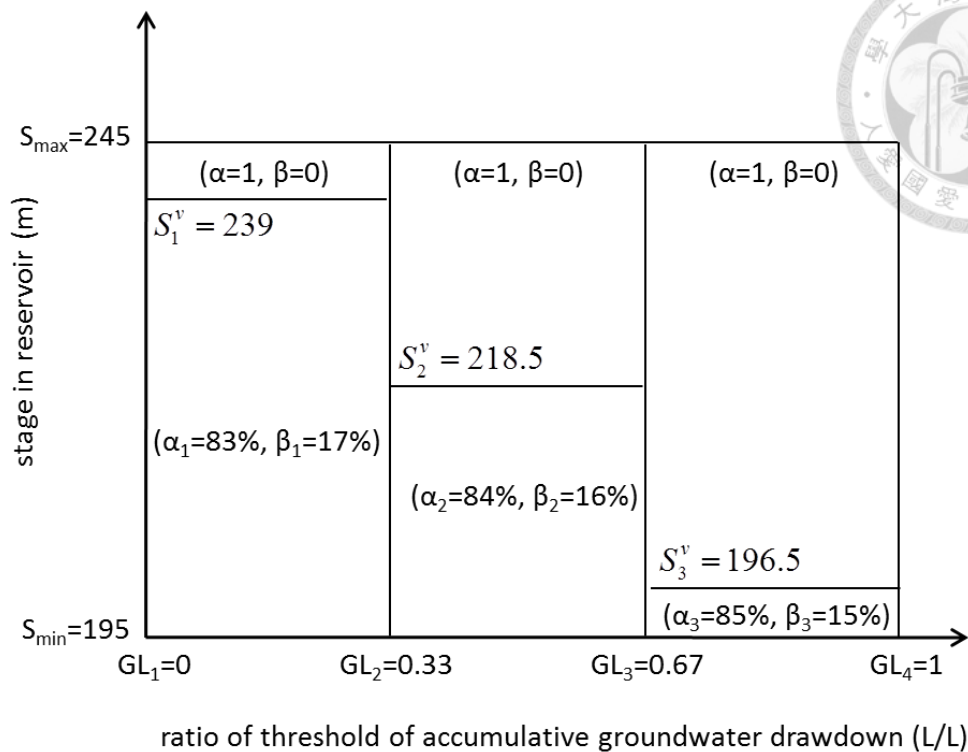


圖 5.8 聯合營運操作規線圖(三區)

接著，本研究繼續增加累積洩降率之分界數，將分界值由兩個增加為三個，分區個數也由三區增加為四區，因此 $GL_2 = 0.25, GL_3 = 0.50, GL_4 = 0.75$ ($GL_1 = 0, GL_5 = 1$)，決策變數為 $S_1^v, S_2^v, S_3^v, S_4^v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3, \alpha_4, \beta_4$ ，經過禁忌演算法 37 次疊代後，得到最小目標函數值等於 5.77 ($SI = 4.08, GD = 1.68$)，見圖 5.7，而聯合營運優選結果可參考圖 5.9， $S_1^v = 241 m, S_2^v = 231.5 m, S_3^v = 219 m, S_4^v = 204 m, \alpha_1 = 83 \%, \beta_1 = 17 \%, \alpha_2 = 84 \%, \beta_2 = 16 \%, \alpha_3 = 85 \%, \beta_3 = 15 \%, \alpha_4 = 85 \%$ ，與 $\beta_4 = 15 \%$ ，20 年缺水量為 $4.51 \times 10^8 m^3$ ，在總共 240 個模擬時程內，有 109 時程有缺水情況發生，且大多發生在乾季，水庫入流量非常低的時期。同樣分四區的聯合營運操作規線還是以地表水為主要供水來源，供水比值與累積洩降量獨立，但累積洩降率與啟用聯合營運之庫容門檻值有高度相關，若累積洩降較嚴重時，會有較小之啟用聯合營運操作規線蓄水量門檻值，延緩啟用聯合營運，使地下水位升高。

不論累積洩降率大(分兩區時， $GL > 0.5$ ；分三區時， $GL > 0.67$ ；分四區時， $GL > 0.75$)或累積洩降率較小時(分兩區時， $GL < 0.5$ ；分三區時， $GL < 0.33$ ；分四區時， $GL < 0.25$)，分四區的啟用聯合營運蓄水量門檻值皆高於其他兩種分區方式，當水庫蓄水量逐漸下降時，可提早開始進入聯合營運之供水階段；當累積洩降率介於 0.25 與 0.75 之間時($0.25 < GL < 0.75$)，蓄水量門檻值則為 219 m 與 231.5 m。而同樣因為累積洩降率分界個數影響供水效率，分四區之優選結果較其他分區結果有較少的總缺水量與較佳的最小目標函數。根據優選結果可知，增加地下水累積洩降率分界個數可使目標函數值越來越小，最終收斂至一近似值。

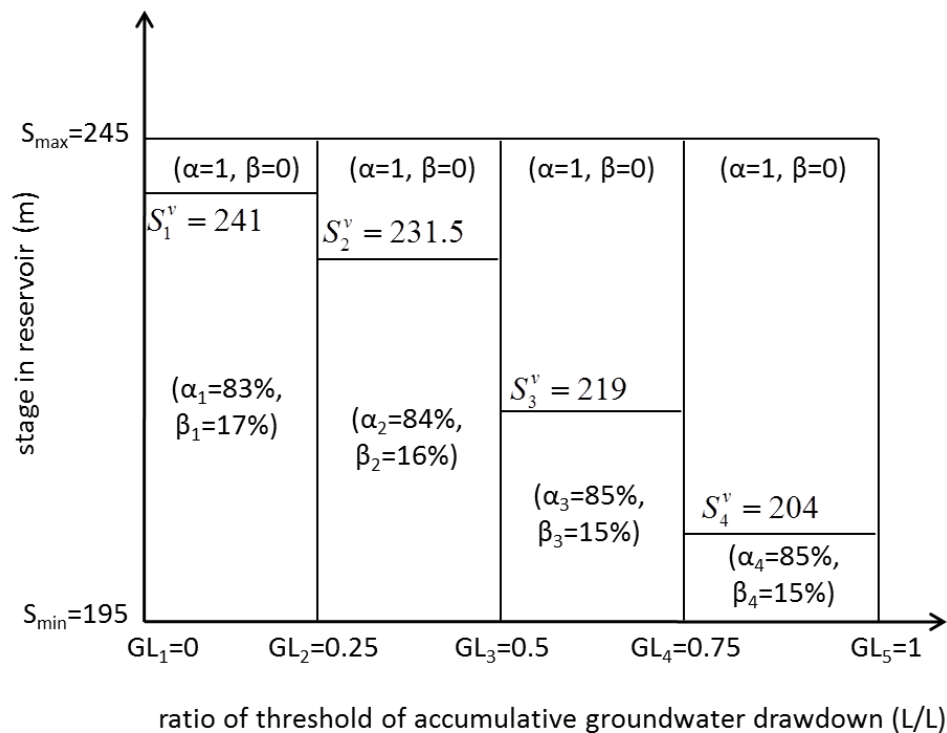
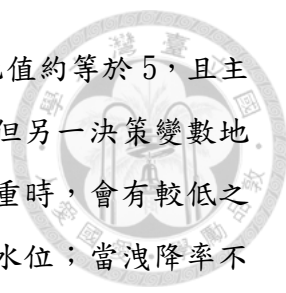


圖 5.9 聯合營運操作規線圖(四區)

本研究將一般使用之水庫操作規線擴展成地表地下水聯合營運操作規線，允許在非缺水時期抽取地下水，並建立根據地表水庫庫容與地下水洩降率而優選得到之操作規線，同時達到降低缺水與永續使用地下水之目的。研究中使用禁忌演算法與逐步法建立操作規線，並建立假設案例測試模擬聯合營運操作規線，證明操作規線可有效降低缺水量且合理有效的抽取地下水。



假設案例中，根據地表水與地下水量進行優選，可得供水比值約等於 5，且主要來源為地表水，此供水比值不受地下水累積洩降率之影響，但另一決策變數地表水蓄水量門檻值則與累積洩降率高度相關，當地下水洩降嚴重時，會有較低之蓄水量門檻值，延緩聯合營運之操作，使地下水位升高，恢復水位；當洩降率不嚴重時，則有較高之蓄水量門檻值，較早啟用聯合營運補充缺水量。另外，增加地下水累積洩降率分界個數可使缺水量越來越小，最終收斂至一近似值。建立地表地下水聯合營運操作規線可作為一有效且可靠的決策依據，同時考慮地表與地下水供水不僅可降低缺水量，更可合理且永續的使用水資源。

第六章、結論與建議

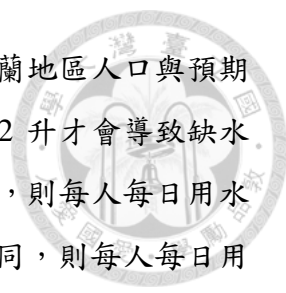


本研究分析蘭陽溪水資源系統之供水承載力，並以未來水資源系統可能改善與人口改變情形，評估未來系統之供水承載力，再根據未來供水承載力進行敏感度分析，得到承載力主要影響因子的包絡線。此外，以永續利用為願景，在降低缺水與善用環境資源並不造成退化的前提下，探討水資源遇缺水情形之各種應變方法，提出不同缺水情形之供水策略。

另外本研究根據不同缺水情形之應變機制想法中，提出當缺水情形嚴重，需要增加蓄水設施來增加蓄水，並結合地下水抽水，將地表水水庫與地下水皆視為常態供水系統，進行聯合營運。藉由水庫操作規線之概念，依據地下水累積洩降率加以分區，並透過禁忌演算法優選出同時考慮缺水最少且地下水累積洩降率最小之最佳供水比例，分配地表水與地下水之供水量，建立地表水與地下水之供水規則與聯合營運操作規線。

6.1 結論

1. 本研究運用氣象資料合成模式、GWLF 中之水文模式、與水資源供水系統動力模式建立供水系統承載力之評估方法，並將供水承載力進行敏感度分析，繪製成敏感因子包絡線，可作為未來決策分析之工具。
2. 以目前使用情況，蘭陽溪供水系統每日分別提供宜蘭地區 7.52 萬立方公尺、羅東地區 7.29 萬立方公尺的水資源，當缺水容忍度 $SI=1$ 時，系統之供水承載力為宜蘭每日 10.68 萬立方公尺，羅東每日 14.37 萬立方公尺，均超過目前之需水量，表示蘭陽溪之水資源供水系統可滿足現況的需求。
3. 民國 120 年時宜蘭、羅東地區之生活用水需水量分別為每日 7.26、7.06 萬立方公尺，皆較 96 年之需水量減少，可能原因為抄見率之提升，使需預留之漏水、竊水、或表差之水量顯著減少，影響 120 年之總需水量下降。

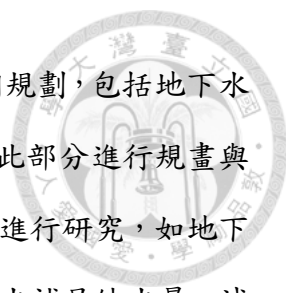
- 
4. 現況蘭陽溪流域每人每日用水量為 247 升，若民國 120 年宜蘭地區人口與預期相同（人口成長等於 1），則此地區每人每日用水量可達 402 升才會導致缺水風險；若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，避免缺水風險，則每人每日用水量需降為 201 升至 101 升。羅東地區若人口成長與預期相同，則每人每日用水量可達 560 升才會導致缺水風險；若此區人口較預期成長為 2 倍至 4 倍，避免缺水風險，則每人每日用水量則為 280 升至 140 升。由此敏感度分析包絡線可知宜蘭與羅東地區未來缺水的風險皆不高。
 5. 根據宜蘭地區提出三階段之不同缺水情形之水資源應變機制，第一階段分為兩種，一為使用地下水做為備援用水，當目前地表水系統遭遇缺水時，才抽取地下水，可搭配地下水模式優選抽水量與抽水時程，達到最有效能減少缺水且不危害地下水之目的。第二種為一般時期地表水便無法滿足供水時，將地下水做為常態用水，在非缺水時期即抽取地下水，做為供水來源，可根據地下水模式優選出一最大可抽水量，將此抽水量加入供水，便可滿足地表水供應不足的缺水。第二階段為前述方法皆無法滿足供水時，增加蓄水設施，並進行地表地下水聯合營運，有效的使用水資源。
 6. 本研究由水庫操作規線之概念提出聯合營運操作規線，結合地下水模式建立詳細聯合營運規則，並透過禁忌演算法優選地下水最大可抽水量、操作規線中之蓄水量門檻值、與地表水地下水供水比例，得到最佳之聯合營運操作規線。
 7. 研究聯合營運操作規線假設案例中，由優選結果分析，在越靠近補注區之區域抽水，因地下水補注快速，較不會影響地下水洩降量，可提供較大的抽水率。反之，越靠近海洋(非補注區)的區域，因其本身之地下水位較低，若進行抽水，對地下水洩降量影響較大，因此，此區域之抽水率較其他區域低。
 8. 由優選結果可知，一旦啟用聯合營運，地表水與地下水的供水比值會接近 5，且地表水為主要的供水來源。雖然地表地下水的供水比值與地下水累積洩降量互相獨立，但可發現啟用聯合營運之蓄水量門檻值與累積洩降率卻是非常相關的，當地下水洩降率大時，洩降嚴重，蓄水量門檻值會較小，延緩啟用聯合營

運的時間避免使用地下水；若地下水洩降率在可容許的範圍內，則會有較大的蓄水量門檻值，讓地表水與地下水根據聯合營運之規則一起供水。

9. 根據逐步法結果，分四區之優選結果較其他分區結果有較少的總缺水量與較佳的最小目標函數，根據此結果可知，增加地下水累積洩降率分界個數可使目標函數值越來越小，最終收斂至一近似值。
10. 將兩個設定的供水情境與實行聯合營運之結果比較，第一個情境為以地表水作為唯一供水來源，第二個供水情境為使用地下水當作備援用水，優選結果不論總缺水量或目標函數皆較分兩區之聯合營運優選結果差。根據結果顯示，地下水於非缺水時期應適量的抽水，且水資源應同時分配，才能永續的使用水資源，且降低缺水。

6.2 建議

1. 蘭陽河流域供水系統因設施能力為主要供水限制，當分析供水承载力敏感度時，若使用 DPD 作為缺水容忍度指標，當一發生缺水，DPD 便會迅速累積至不合理之極大值，而本研究使用之 SI 值因無法看出每次的缺水延時，無法充分顯示缺水事件特性，建議可用其他缺水容忍度指標進行分析，比較各指標之分析結果。
2. 蘭陽河流域已規劃新的清洲淨水場，就規劃上雖可提供 20 萬噸/日之水資源供給能力，然由於水公司規劃設置之水源水質保護區範圍過大，將導致區域內之土地利用與開發受到影響。目前水質水量保護區的範圍仍處於重新協商討論階段，若未來保護區範圍調整縮減，將可能導致清洲淨水場之原水供給量發生變化，進而影響供水能力。建議後續研究需密切關注此議題，以確保水資源系統之設定能接近實際情況。

- 
3. 使用地下水做為備援用水與常態用水屬於水資源用水之長期規劃，包括地下水的抽水時程與抽水量皆需要詳細管理規則，本研究尚未針對此部分進行規畫與模擬，後續討論此部分時，建議可針對供水脆弱度與回復力進行研究，如地下水做為備源用水時，當缺水發生，地下水需於短時間大量抽水補足缺水量，減少脆弱度與增加回復力，或是將抽水量減少、時間拉長等優先考慮脆弱度，此相關問題有待後續研究與模擬。
 4. 蘭陽河流域為地下水補注快速之區域，但還是有其安全出水量，相關研究有實驗出台灣各地之安全出水量，但本研究尚未考慮此部分，若後續研究對於蘭陽河流域有實際之地下水模擬，建議須考量其安全出水量，才能妥善規畫出可永續的水資源管理辦法
 5. 地表水與地下水聯合營運最基本之架構為數理規劃模式，而本研究數理規劃模式以簡單的方程式來描述地表水與地下水供水情況，利用假設而忽略很多因素，包含蒸發、降雨量、乾濕季地下水位變化等問題。建議後續研究可將影響地表水與地下水供水量之因素，如蒸發、降雨、乾濕季變化、溢洪、排洪、河川基流等納入考慮，建立這些因素與水庫及地下水之關係，重新建構數理規劃模式，直接應用於現實地區，例如河川引水與蘭陽平原地下水系統、翡翠水庫與台北盆地地下水系統等，在數據大小尺度上會較為合理，藉此確認地表水與地下水聯合營運是否能應用於實際操作。
 6. 在地表水與地下水聯合營運模式的建立上，就目前聯合營運模式而言，僅有地面水與地下水總水量資料便可進行評估，並無考慮到地面水與地下水互相作用之影響，若後續需做更進一步細項之分析，則需考量地面水與地下水交互影響之因素。

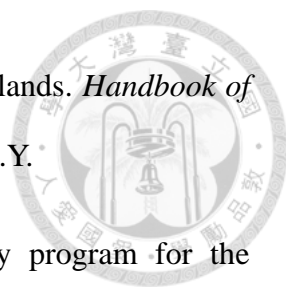
參考文獻



1. Belitz, K. P., P. Steven, J. M. Gronberg, (1993). Numerical simulation of ground-water flow in the central part of the western San Joaquin Valley, *California. Water Supply Paper*.
2. Boonyatharkol, W., W. R. Walker (1979). Evapotranspiration under depleting soil moisture, *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civil Eng.*, 105 , pp. 391–402.
3. Bredehoeft, J. D. (2011). Hydrologic trade-offs in conjunctive use management, *Ground Water*, 49(4), 468-475.
4. Buras, N. (1963). Conjunctive operation of dams and aquifers, *J. Hydrul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, 89(HY6), 111-131.
5. Burt, O. R. (1964). The economics of conjunctive use of ground and surface water, *Hilgardia*, 36(2), 31-111.
6. Chang, L. C., C. C. Ho, M. S. Yeh, and C.C. Yang (2011). An integrating approach for conjunctive-use planning of surface and subsurface water system, *Water Resources Management*, 25: 59-78, DOI 10.1007/s11269-010-9687-8.
7. Chow, V. T., D. R. Maidment, L. W. Mays (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York (1988) 572
8. Feng, L. H., C. F. Huang (2008). A Risk Assessment Model of Water Shortage Based on Information Diffusion Technology and its Application in Analyzing Carrying Capacity of Water Resources, *Water Resources Management*, 22, pp.621-633.
9. Feng, L. H., X. C. Zhang, and G.Y. Luo (2008). Application of System Dynamics in Analyzing the Carrying Capacity of Water Resources in Yiwu City, China.,

Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 79, pp.269-278.

10. Glover, F. (1993). Tabu Thresholding: Improved Search by Nonmonotonic Trajectories, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 7, No. 4, pp.426-442.
11. Glover, F. (1997). A Template for Scatter Search and Path Relinking, *Lecture Notes in Computer Science, 1363*, J.K. Hao, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer, D. Snyers (Eds.), pp. 13-54.
12. Glover F. (1999). Scatter Search and Path Relinking, *D Corne, M Dorigo and F Glover (eds.) New Ideas in Optimisation*, Wiley.
13. Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *J. Hydr. Div., ASCE* , 87 (3), 107–120.
14. Lin, H. C. J., D. R. Richards, G. T. Yeh, J. R. Cheng, H. P. Cheng and N. L. Jones (1997). FEMWATER : A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media.
15. Matsukawa, J., A. B. Finney, and R. Willis (1992). Conjunctive use planning in Mad River Basin, California, *J. of Water Resources Planning and Management*, 118(2), 115-131.
16. Meadows, D. H., et al. (1972). *The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome*, Universe Books, New York.
17. McDonald, M. G., A. W. Harbaugh, (1988). Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Book, 6*, 11-1.
18. McDonald, M. G., A. W. Harbaugh, (1996). User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report 96–485.

- 
19. Ogrosky, H. O., V. Mockus, (1964). Hydrology of agricultural lands. *Handbook of applied hydrology*, V. T. Chow, ed., McGraw-Hill, New York, N.Y.
 20. Souza, W. R. (1987). Documentation of a graphical display program for the saturated- unsaturated transport (SUTRA) finite-element simulation model. *Water-Resources Investigations Report: 122*.
 21. Spiegel, N. (1962). Hydraulics of certain stream-connected aquifer systems. *New Mexico State Engineer Office, Special Report, 105*. Santa Fe, New Mexico: State Engineer Office.
 22. Tsur, V. (1990). The stabilization role of groundwater when surface water supplies are uncertain: the implications for groundwater development, *Water Resources Research*, 26(5), 811-818.
 23. Tung, C. P. and D. A. Haith, (1995). Global Warming Effects on New York Streamflows. *Journal of Water Resources Planning and management* 121(2): 216-225.
 24. US Army Corps of Engineers (1970). Uses of Simulation in River Basin Planning. Hydrologic Engineering Center.
 25. VENSIM, Ventana Systems Inc., <http://www.VENSIM.com/>
 26. Voss, C. I. (1984). A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. *Water-Resources Investigations Report: 409*.
 27. 台灣農田水利數位博物館網站：

"<http://taoyuan.randdf.com/digimuseum/default.htm>."



28. 自來水公司第八管理處網站 <http://www8.water.gov.tw/>.
29. 周俊安 (2002). 禁忌演算法應用於優選地下水模式參數之分區, 生物環境系統工程學研究所碩士論文。
30. 洪念民 (1997). 氣候變遷對大安溪水資源營運之影響, 生物環境系統工程學研究所碩士論文。
31. 陳奕如 (2011). 地表水與地下水聯合營運優選模式之發展, 生物環境系統工程學研究所碩士論文, 2011。
32. 陳亭玉 (2000). 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
33. 陳思瑋 (2005). 淡水河流域水資源永續性評估暨管理之研究, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文
34. 陳鵬旭 (2002). 新竹地區供水系統動力模式與供水評量系統之建構, 國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文
35. 賴典章 (2003). 台灣地區地下水分區特性, 水文地質調查與應用研討會論文集, p1-24
36. 劉子明 (2010). 氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究, 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文
37. 童慶斌 (2011). 發展因應氣候變遷之洪旱災害消滅技術-以蘭陽溪流域為示範區-總計畫暨子計畫: 發展供水系統容忍氣候變化門檻評估技術與調適能力強化策略(II), 行政院國家科學委員會

38. 經濟部水資源局 (2000). 台灣地區地下水補注量估算
39. 經濟部水利署 (2007). 96 年水文年報
40. 經濟部水利署 (2009). 蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃
41. 經濟部水利署 (2008). 區域水資源經理策略擬定之研究
42. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2012). 強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究
43. 經濟部水利署 (2009). 臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討
44. 經濟部水利署 (2009). 蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃
45. 經濟部水利署 (2002). 地下水資源整體營運規劃與綜合評估(1/2).
46. 顏笠安 (2009). 淨水場混凝污泥質量特性與脫水泥餅再利用初步評估, 國立中央大學環境工程研究所碩士論文





附錄一、供水承載力包絡線對雨量敏感度分析結果

針對宜蘭與羅東地區進行不同雨量時供水承載力之敏感度分析，將雨量分別計算變成 0.5、0.75、1、1.25、與 1.5 倍，比較當不同人口成長時，每人每日用水量之改變，作為供水承載力之敏感度分析。由下附表 1.1 與附表 1.2 可見雨量對供水承載力之影響不顯著，因蘭陽溪流域之供水能力主要由設施所限制，雨量改變不會影響目前之供水承載力。

附表 1.1、宜蘭地區供水承載力包絡線對雨量敏感度分析

SI=1	宜蘭-每人每日用水量(L)				
人口成長(倍)	Rainfall*0.5	Rainfall*0.75	Rainfall*1	Rainfall*1.25	Rainfall*1.5
0.5	794	796	804	806	806
1	397	398	402	403	403
2	198.5	197.5	201	201.5	201.5
3	132.3	132.7	134	134.3	134.3
4	99.25	99.5	100.5	100.75	100.75

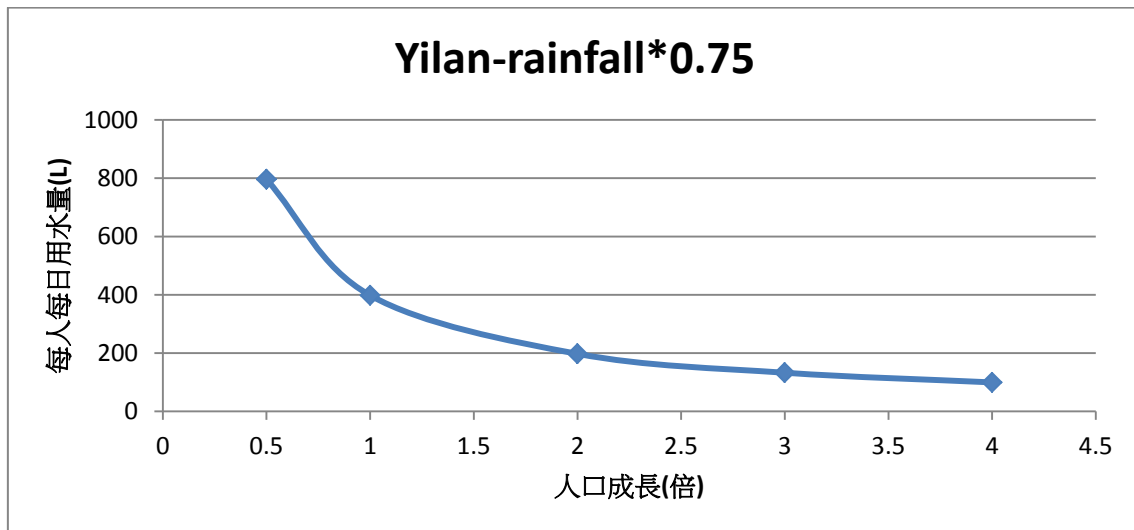
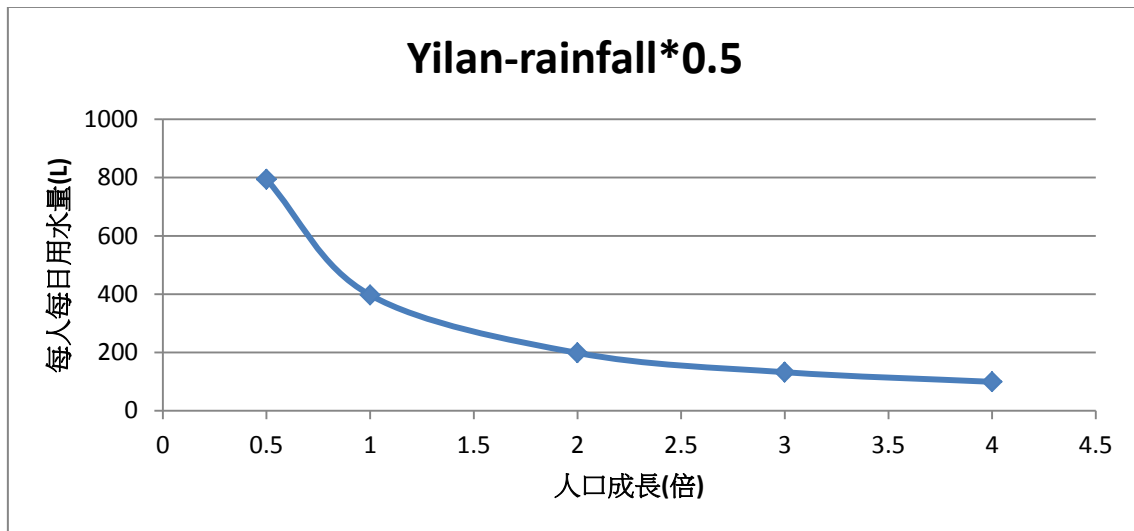
附表 1.2、羅東地區供水承载力包絡線對雨量敏感度分析

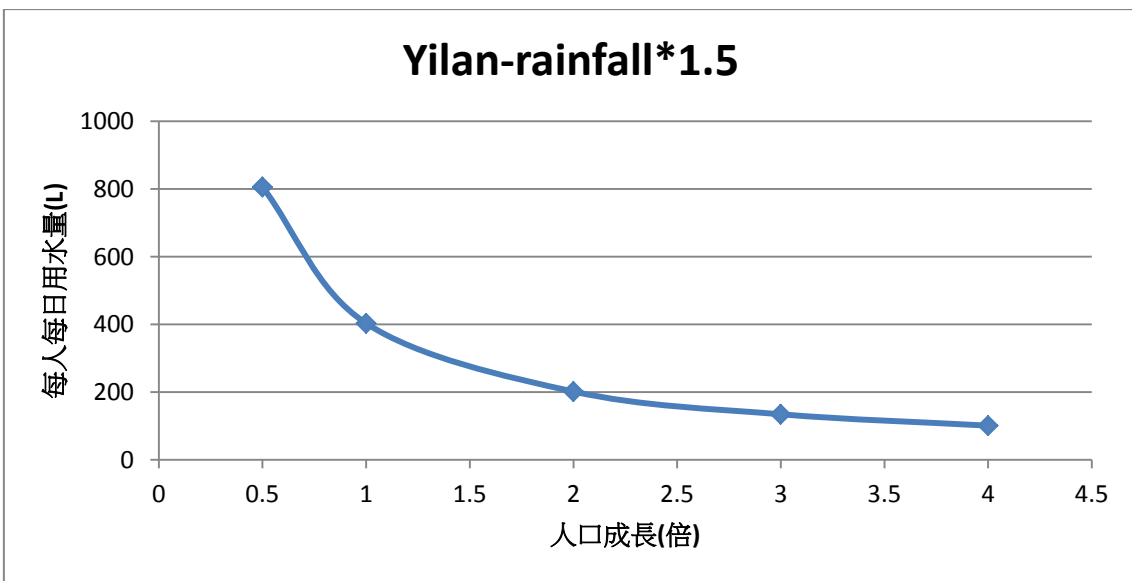
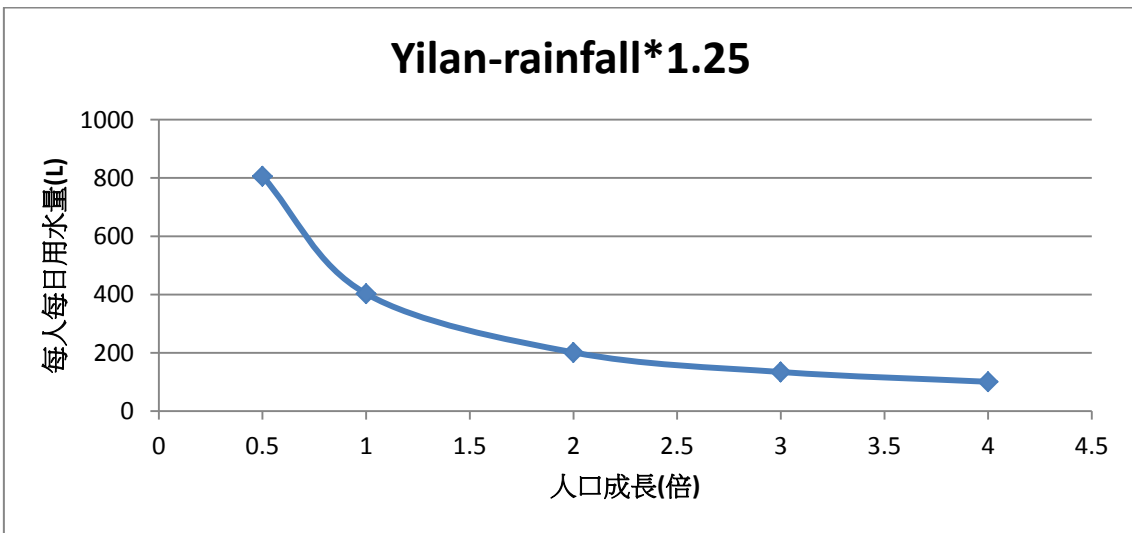
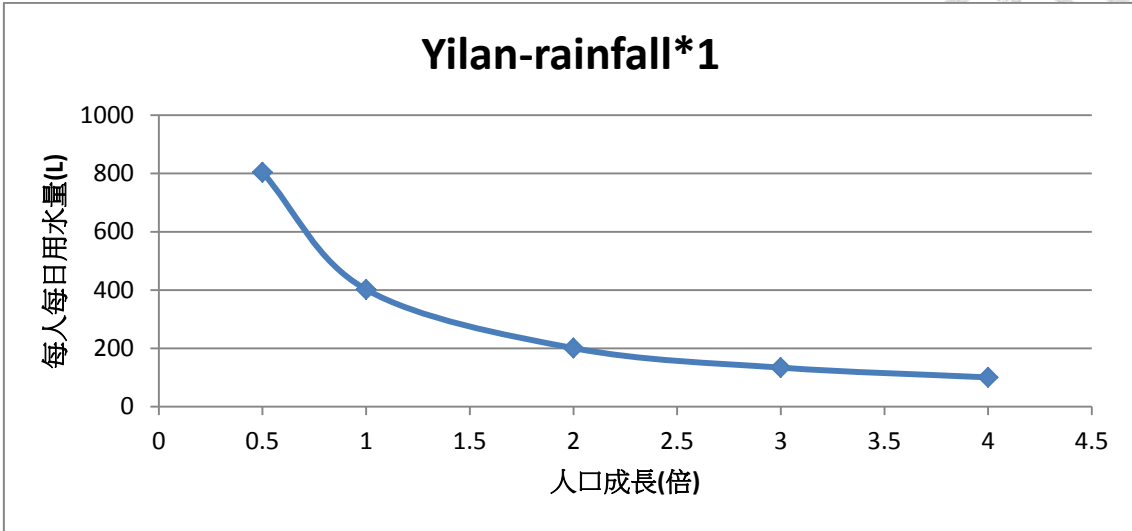


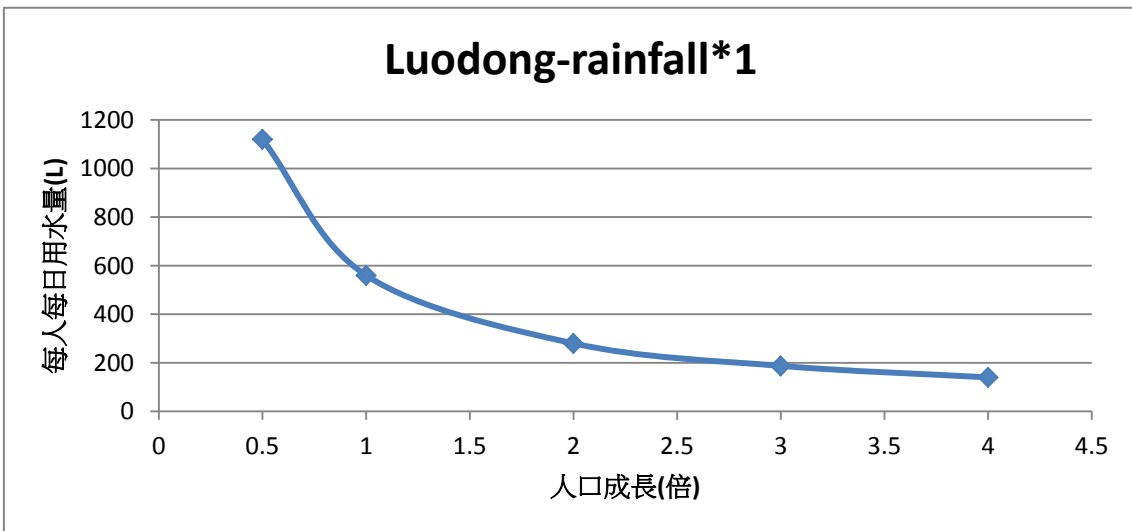
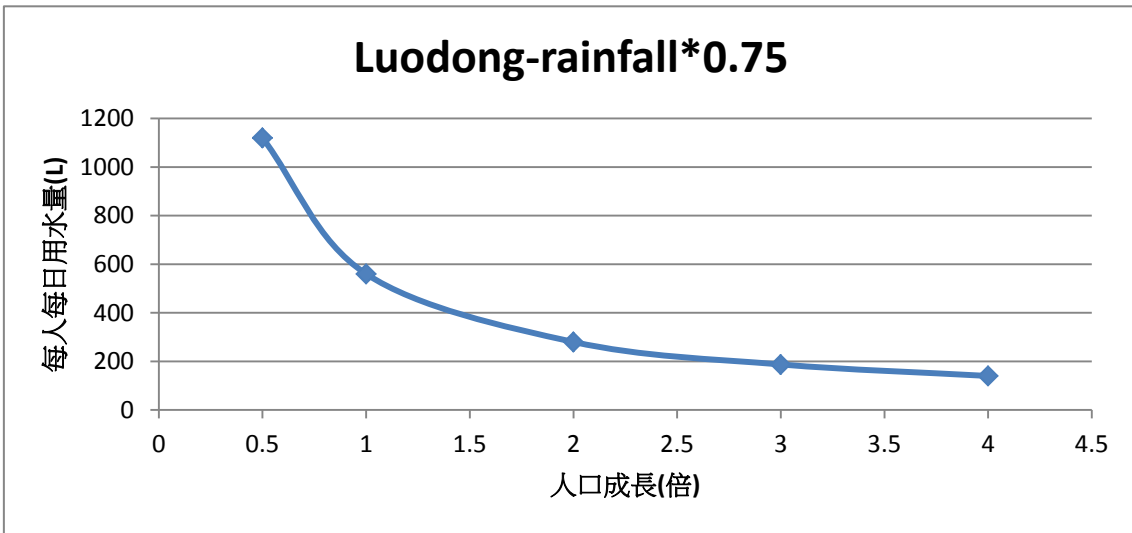
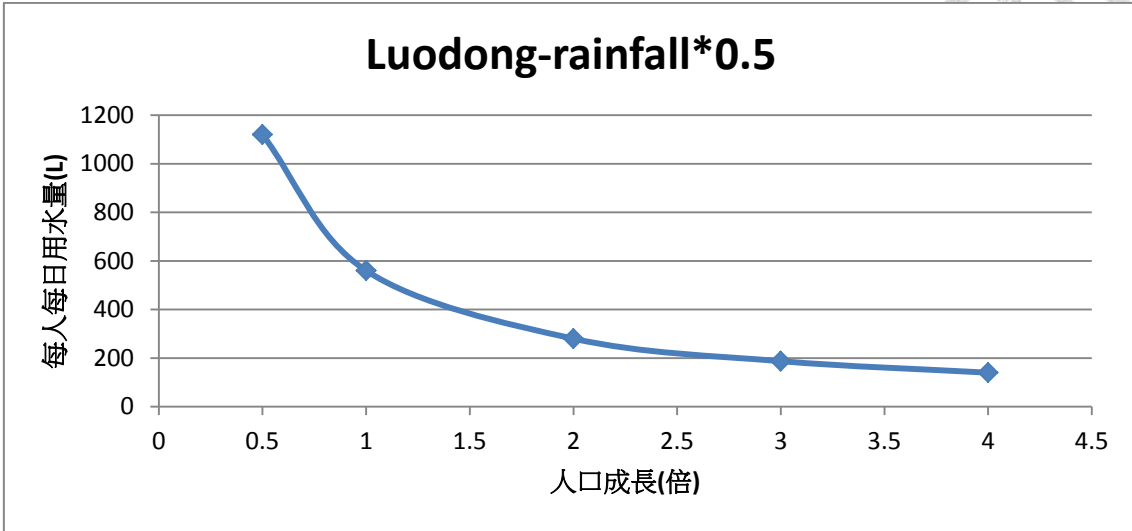
SI=1	羅東-每人每日用水量(L)				
人口成長(倍)	Rainfall*0.5	Rainfall*0.75	Rainfall*1	Rainfall*1.25	Rainfall*1.5
0.5	1120	1120	1120	1120	1120
1	560	560	560	560	560
2	280	280	280	280	280
3	187.3	187.3	187.3	187.3	187.3
4	140	140	140	140	140

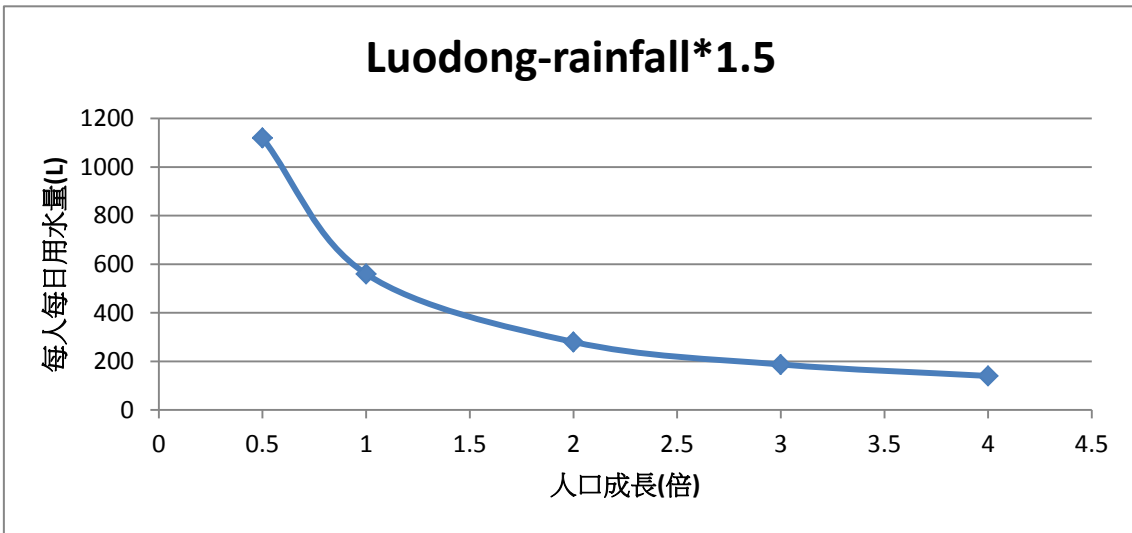
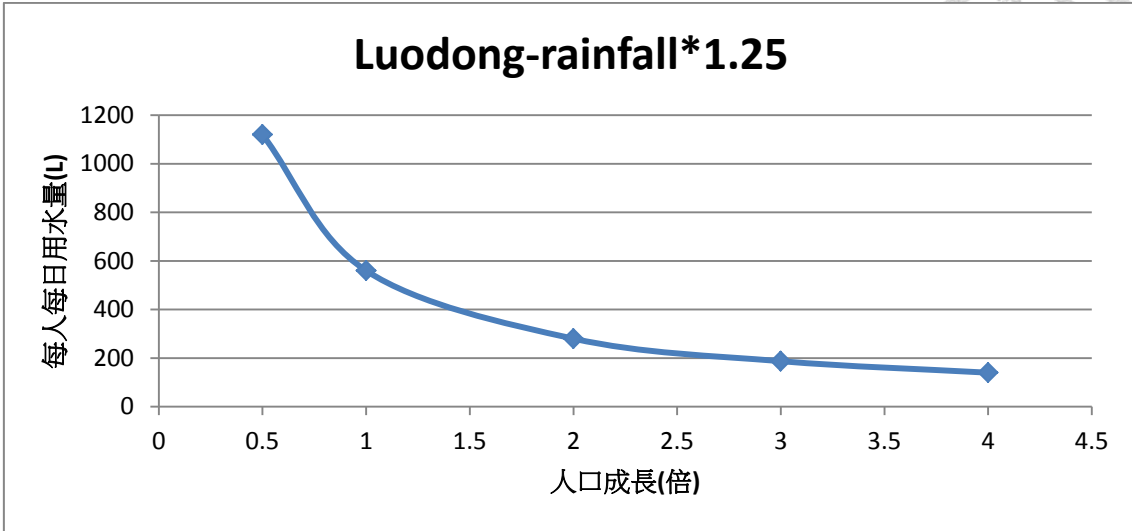
附錄二、供水承載力包絡線對不同雨量敏感度分析

根據附錄一之結果，可得到宜蘭與羅東地區在不同雨量時供水承載力之敏感度分析，將其結果繪製成包絡線，如下圖。宜蘭與羅東分別有雨量變為 0.5、0.75、1、1.25、與 1.5 倍之承載力包絡線，由圖可知雨量對其承載力沒有顯著影響。









附錄三、蘭陽水力發電廠發電用水量統計表

附表 3.1、員山發電廠淨發電用水量統計表



月/年度	83 年	84 年	85 年	86 年	87 年	88 年	89 年	90 年	91 年	92 年	93 年	94 年	95 年	96 年	97 年	平均
1 月	36.4	53.0	32.0	40.5	28.0	66.0	0.0	38.5	32.9	32.7	29.0	48.4	43.0	51.2	37.4	37.9
2 月	42.8	53.9	31.0	39.6	41.1	33.9	0.0	47.4	28.2	18.6	48.9	33.7	41.2	29.0	51.8	36.1
3 月	53.0	54.4	36.6	39.6	57.0	28.0	0.0	33.1	21.3	16.2	36.5	39.7	44.5	27.0	36.8	34.9
4 月	30.9	48.1	54.7	26.5	29.8	20.0	0.0	45.6	23.8	24.2	38.2	44.5	40.8	36.1	31.4	33.0
5 月	36.2	8.1	48.5	26.0	47.2	39.3	0.0	41.5	18.3	16.1	30.3	47.8	55.5	29.3	26.3	31.4
6 月	38.9	36.5	44.7	44.8	52.7	48.7	0.0	65.2	32.2	40.2	39.5	66.4	59.3	55.8	36.5	44.1
7 月	41.7	52.1	36.3	72.4	30.8	70.5	0.0	50.6	41.3	30.3	48.4	32.0	33.4	49.5	36.0	41.7
8 月	39.7	61.3	56.0	42.7	34.5	59.5	0.0	52.4	35.8	26.0	36.4	32.0	44.0	11.0	52.6	38.9
9 月	53.7	52.7	54.0	42.3	48.6	36.9	0.0	32.2	43.2	53.5	61.9	52.0	41.1	45.1	16.9	42.3
10 月	47.0	64.3	66.2	41.8	17.0	30.7	0.0	36.1	56.8	60.7	47.3	37.1	59.1	20.1	28.6	40.9
11 月	56.8	55.0	66.5	33.8	65.4	0.0	0.0	55.5	44.4	53.1	55.6	56.1	58.5	35.3	59.8	46.4
12 月	55.1	41.1	49.2	28.5	73.6	0.0	0.0	45.3	40.4	53.6	51.9	46.1	58.1	41.9	53.6	42.5
合計	532.3	580.5	575.7	478.5	525.7	433.6	0.0	543.4	418.6	425.3	523.8	535.6	578.5	431.3	467.5	464.4

註：88 年 11 月～89 年 12 月未發電（單位：百萬立方公尺）

附表 3.2、天埤發電廠淨發電用水量統計表



月/年度	83 年	84 年	85 年	86 年	87 年	88 年	89 年	90 年	91 年	92 年	93 年	94 年	95 年	96 年	97 年	平均
1 月	39.7	54.7	37.7	50.1	28.1	72.0	56.0	65.2	35.0	44.5	29.3	56.4	50.9	59.9	44.1	48.2
2 月	39.8	60.1	37.2	63.8	41.6	34.9	55.2	56.7	31.2	19.5	50.2	41.7	48.7	31.7	56.4	44.6
3 月	54.8	58.2	42.5	45.8	58.0	26.7	59.6	35.8	20.9	16.0	38.0	53.6	49.1	28.8	38.2	41.7
4 月	32.1	51.5	57.3	33.1	29.2	18.8	41.2	50.4	23.0	23.9	41.2	41.9	49.3	37.3	31.3	37.4
5 月	26.7	8.2	55.6	24.9	49.8	41.2	33.4	37.7	18.4	15.0	32.5	49.2	54.2	27.8	26.2	33.4
6 月	40.8	39.5	45.6	53.4	40.2	55.6	0.0	53.0	32.7	45.9	45.5	63.1	50.1	52.9	43.8	44.2
7 月	46.3	57.1	34.3	70.1	29.1	68.1	42.3	56.7	50.3	31.4	51.0	38.8	50.8	50.7	46.6	48.2
8 月	46.0	62.6	60.6	43.7	30.7	63.0	43.0	57.2	38.5	24.5	44.3	48.9	53.6	32.7	54.1	46.9
9 月	58.8	56.7	57.5	57.9	50.9	59.1	52.6	33.0	52.5	59.3	60.8	50.9	41.3	50.1	30.4	51.5
10 月	54.9	68.1	69.8	53.7	37.0	60.5	41.9	46.2	63.9	60.4	55.6	49.4	59.9	37.7	48.3	53.8
11 月	65.5	66.0	68.7	37.5	66.3	57.2	43.0	63.6	56.5	59.9	64.0	58.7	60.9	49.0	56.6	58.2
12 月	58.2	51.6	60.3	28.7	71.6	49.0	57.6	59.6	44.6	58.7	59.0	52.6	63.8	51.2	58.7	55.0
合計	563.4	634.3	627.2	562.6	532.4	606.3	525.8	615.0	467.6	459.0	571.6	605.3	632.5	509.7	534.8	563.2

(單位：百萬立方公尺)

附錄四、宜蘭水利會灌渠與水源統計表



附表 4.1、水利會頭城灌區灌渠與水源統計表

灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
頭城 灌區	大坑畧圳	大坑畧排水、地下水	104	104	92
	福德坑圳等四圳	福德坑溪	990	951	928
	金面圳等七圳	金面溪	1,368	1,342	1,304
	北門坑圳等二圳	北門溪	1,229	1,180	1,151
	猴洞坑圳等三圳	猴洞溪、地下水	335	321	312
	湯圍湧泉圳等三圳	下埔排水	1,535	1,474	1,357
	得子口圳	山豬窖坑	142	136	139
	淇武蘭圳等五圳	得子口溪、地下水	2,910	2,945	2,430

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.2、水利會礁溪灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
礁溪 灌區	充公圳充公支線	宜蘭河、地下水	2,944	2,961	2,573
	李寶興圳等三圳	得子口溪、地下水	1,441	1,384	1,351
	柴圍佃圳等二圳	大坡排水	1,107	1,115	960
	四結佃圳等二圳	*(四結佃)湧泉、地下水	2,327	2,340	2,012
	金長源圳	小礁溪	383	369	361
	七結湧泉圳	*(七結)湧泉	351	355	306
	林源春圳	武暖大排	164	166	144
	辛永安圳	梅洲排水	456	461	396
	黃德記圳	黃德記排水	340	344	304
	茅埔圳	武暖大排	329	333	287

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.3、水利會壯圍灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
壯圍 灌區	新城圳	*(新城)湧泉	148	148	131
	二結湧泉圳 等五圳	小礁溪	1,113	1,119	985
	金同春圳	大礁溪	2,593	2,609	2,250
	充館圳	宜蘭河	6,167	6,202	5,336
	部后圳	壯東第一大排	273	289	249
	大福圳	古亭排水	688	728	627
	新社二號抽水機	古亭排水	290	293	252
	十三股抽水機	十三股排水	186	187	161
	紅葉抽水機 等二圳	宜蘭河	396	399	344

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.4、水利會員山灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
員山灌區	枕山圳	大礁溪	379	376	365
	雷公埤	雷公埤	586	522	382
	隘界圳	五十溪、地下水	747	662	520
	金大安圳	大湖埤	715	634	466
	鼻仔頭圳	內城一、二排水、地下水	1,290	1,142	839
	大三鬮圳	內城一、二排水、地下水	335	297	218
	內城圳	內城坑	527	468	344
	內湖圳	蘭陽溪、地下水	633	627	569
	上粗坑等三圳	蘭陽溪、地下水	193	190	185
	上深溝	蘭陽溪、地下水	1,367	1,212	891
	改良蕃仔圳	蘭陽溪	817	723	532
	深溝湧泉圳	蘭陽溪	1,300	1,288	1,186
	洲子湧泉圳	蘭陽溪	832	738	543
	金覆興圳	蘭陽溪、地下水	1,294	1,147	844

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.5、水利會宜蘭灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
宜蘭 灌區	三鬮圳	宜蘭河、地下水	8,072	8,212	7,224
	溪洲圳	蘭陽溪	2,668	2,715	2,388

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.6、水利會三星灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
三星灌區	叭哩沙圳	蘭陽溪	1,629	1,565	1,527
	天送埤圳	安農溪	1,378	1,324	1,291
	破布烏圳等五圳	安農溪	1,103	1,058	1,032
	月眉圳	安農溪	3,260	3,131	3,054
	張公園圳	安農溪	1,310	1,258	1,227
	萬富圳	安農溪	4,400	4,225	4,121
	阿里史圳等五圳	安農溪	768	738	719
	黃鳳鳴圳等二圳	安農溪	471	452	443
	大洲湧泉圳等十四圳	*(大洲)湧泉	2,569	2,468	2,407
	金漳成圳等四圳	安農溪	1,874	1,929	1,861

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.7、水利會羅東灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
羅東 灌區	歪仔歪圳	*(歪子歪)湧泉	479	415	424
	打那岸圳	*(打那摩)湧泉	702	607	586
	月眉圳等二 圳	*(月眉)湧泉、地下水	773	668	646
	埔仔圳	*(埔仔)湧泉	248	214	207
	金長安圳	*(金長安)湧泉	680	589	569
	冬螺圳	*(冬螺)湧泉	269	233	226
	大光明圳	安農溪、地下水	2,520	2,728	2,660
	埔林圳	安農溪、地下水	2,156	2,183	1,920
	柯林圳等 一、二幹線	*(柯林一二)湧泉	440	376	369
	柯林圳等 三、四幹線	*(柯林三四)湧泉	363	314	304
	柯湧圳	*(柯湧)湧泉	374	324	314

灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
	北成圳	*(北成)湧泉	154	134	137
	四人埤等二圳	*(四人埤)湧泉	224	195	189
	雷公埤圳	*(雷公埤)湧泉	82	72	71
	柯林圳第五幹線	*(柯林五)湧泉	197	171	166

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.8、水利會五結灌區灌渠與水源統計表

灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
五結 灌區	萬長春圳	安農溪	8,972	9,023	7,938
	猴猴圳	冬山河	430	381	361
	林和源圳	林和源排水	364	307	295
	五股圳	五股排水	373	321	309

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.9、水利會冬山灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
冬山灌區	朱九圳等三圳	*(朱九)湧泉	1,102	953	975
	順安圳	砂仔港排水	579	502	502
	八仙圳等三圳	北富、八仙排水	1,642	1,419	1,420
	八寶圳等三圳	莊錦發排水	2,355	2,037	2,085
	公埔圳等三圳	公埔排水	412	357	367
	冬山圳等二	新城溪、地下水	2,622	2,635	2,371
	珍珠一、二號抽水機	冬山河	590	511	512

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）

附表 4.10、水利會蘇澳灌區灌渠與水源統計表



灌區	灌渠	水源名稱	93 年計畫用水量	94 年計畫用水量	95 年計畫用水量
蘇澳灌區	冀箕湖圳等二圳	新城溪、地下水	1,285	1,292	1,135
	金豐萬圳	新城溪、地下水	1,235	1,243	1,093
	隆恩圳等二圳	新城溪、地下水	570	492	504
	五股圳等二圳	新城溪、地下水	186	161	164
	大南澳圳等二圳	南澳溪	1,893	1,817	1,771

資料來源：蘭陽地區地面地下水聯合運用規劃（水利署，2008）