

國立臺灣大學生物資源暨農學院

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

韌性社區供水系統氣候風險評估與調適能力建構方法  
之發展

Methodology Development on Climate Risk Assessment  
and Adaptive Capacity Building of Water Supply System  
in Resilient Community

李苑華

Yuan-Hua Li

指導教授：童慶斌 博士

Advisor: Ching-Pin Tung, Ph.D.

中華民國 106 年 12 月

December 2017




## 謝誌

在完成博士論文的過程中受到許多人的鼓勵與幫助，謹以此謝誌表達我由衷的感謝。首先非常感謝指導教授童慶斌老師，在博士班期間花費了大量的時間與我討論，給予許多重要的意見，同時訓練我思考問題的邏輯，以及做研究的方法與態度，在我想要放棄時給予鼓勵，感謝人生中能夠遇到童老師，讓我的博士生涯收穫良多。另外非常感謝口試委員游保杉老師、吳瑞賢老師、李明旭老師與詹士樑老師撥空參與論文學位考，給予寶貴的建議，讓這本論文更加完善，也感謝胡明哲老師在博士資格考時提供研究改進的方向。

永續發展研究室的每個人都是我研究生活的好夥伴，當研究遇到瓶頸時互相鼓勵，一起討論問題。謝謝學長姐們子明、宛渝、嘉佑、啾啾，一起進研究室的瀉藥、瓜瓜、柏勳，助理們小黑、浩浩、阿狗、小天才、彭彭、阿璇、鈺涵、秉宸，幫忙處理大小事的玫君學姊，學弟妹們唯瑄、馨儀、郁茹、黃蓉、旭杰、育全、軒德，另外感謝尊麟、宗毅、孟慧協助我口試，以及其他研究室夥伴，很開心有大家相伴，祝福大家未來一切順利。

生工 B96 一起度過人生中最青春的大學四年，感謝大家讓我的大學生活充滿歡樂。在德國研究交流期間，認識其他領域的博士生，讓我增廣見聞，大家一起在德國上課，互相分享國外生活的點點滴滴，而同為博士生更能體會研究的艱辛，大家在研究路上能夠互相鼓勵，是難能可貴的緣分。特別珍惜和蔡思屏、陳柏廷兩位的友誼，一起在歐洲許多國家留下回憶，也感謝二位在我研究遇到挫折時，鼓勵我繼續堅持下去。另外感謝在德國 Stefan、Kerstin、Josi、Theresa 一家人的照顧，接納我融入你們的家庭，讓我能夠深入體驗德國文化，這段時間是人生中難忘的回憶。謝謝我最愛家人，總是在背後默默的支持並包容我，關心我的身體健康，你們的愛是我前進的動力。最後感謝我自己，在無數次想要放棄的時候堅持下來，這一路以來辛苦了。以這本論文感謝求學路上相遇的每個人，並以感恩的心期許自己未來在社會上能發揮所長並貢獻所學。

## 摘要

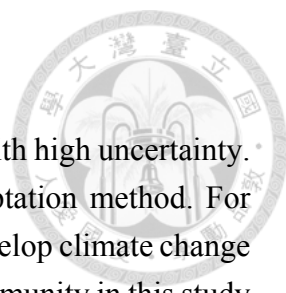


氣候變遷對水資源造成顯著衝擊與高度不確定性，各領域之決策者必須選擇智慧且彈性之調適方法。為了降低氣候變遷的影響，發展氣候變遷調適之標準流程作為基礎。針對水資源面向，本研究韌性社區定義為「氣候變遷下供水系統具有高回復力與低脆弱度之社區」。本研究以新竹縣信勢社區設計為示範案例，執行供水系統之氣候調適流程。首先設定韌性社區之關鍵議題為供水風險，並分析新竹地區之歷史缺水事件以決定主要風險成因。接著建構社區供水系統模式和社區水資源評估指標系統，應用於評估現況供水風險，而兩者進一步應用低頻率氣象合成模式產生之基期與未來氣象資料，評估未來供水風險。對應風險成因提出社區供水調適措施選項，以強化社區之韌性，由調適目標與調適選項價值決定調適路徑圖。最後實行並監視調適路徑，以預防偏離調適路徑，當預料以外的情況發生時，需要調適路徑修正計畫。

本研究應用設計案例測試調適流程並發展工具。發展社區供水系統模式模擬社區供水情形以及與外部供水系統之關聯。評估指標系統評估社區水資源情況，包含節水率、支撐延時、水分利用效率。而評估未來風險所需之基期與未來氣候情境，由低頻率氣象合成模式繁衍出維持月統計和低頻率特性之日氣象資料。由選擇權定價模型量化調適選項建立調適路徑。本研究為韌性社區供水系統所發展之調適流程、評估指標系統和模擬模式，能夠協助決策者評估社區供水風險及建構氣候調適能力。

關鍵詞：韌性社區、低衝擊開發、評估指標系統、調適能力建構、調適路徑

## Abstract



Climate change causes significant impacts on water resources with high uncertainty. Decision makers in all sectors must choose wise and flexible adaptation method. For reducing the impacts of climate change, the standard procedure to develop climate change adaptation is the basis. In the water resources aspect, the resilient community in this study is defines as the water supply system of community with high resilience and low vulnerability in changing climate. This study used a design case which is analogous to the Xingshi village in Hsinchu, Taiwan, to demonstrate the adaptation procedure of water supply system. First of all, the key issue is the risk of water supply in the resilient community, and the historical water shortage events in Hsinchu are analyzed for determining the major causes of risk. The community water supply model and performance indicator system are constructed for assessing the current risk of water supply. And then they are further applied with the low frequency weather generator for generating baseline and future weather data to assess the future risk of water supply. Corresponding to the causes of risk, adaptation options are identified for enhancing the resilience of communities. The adaptation pathway map is decided by the setting target and the values of adaptation options. Finally, the adaptation pathway is implemented and monitored for preventing deviation from the adaptation pathway. When unexpected situations happen, the revision of adaptation pathway is needed.

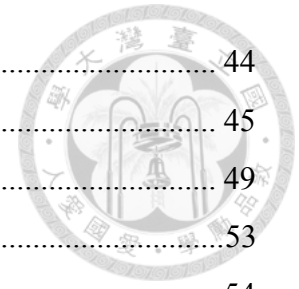
In this study, the design case is used to test adaptation procedure and develop tools. The community water supply model is developed to simulate water supply situation in the community, and its relationship with the external water supply system. The situation of community water resources is evaluated by the performance indicator system, including water saving efficiency, tolerance duration and water use efficiency. The low frequency weather generator is developed to produce daily weather data to hold the monthly statistics and the characteristics of low frequency for baseline and future climate scenarios to evaluate future risks. The adaptation pathways are established by using the option pricing model to qualify the values of adaptation options. The developed adaptation procedure, performance indicator system, and simulation models for the water supply system of a resilient community are proved to be able to help decision makers to assess the risk of water supply and build the adaptation capacity.

**Keywords:** Resilient Community, Low Impact Development, Performance Indicator System, Adaptive Capacity Building, Adaptation Pathway

# 目錄

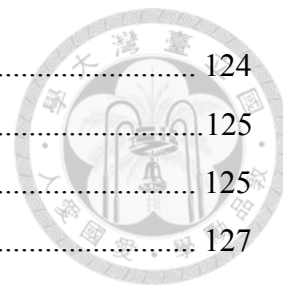


謝誌 .....	I
摘要 .....	II
Abstract .....	III
目錄 .....	IV
圖目錄 .....	VIII
表目錄 .....	X
第 1 章 緒論 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究架構 .....	4
第 2 章 文獻回顧 .....	7
2.1 社區相關定義 .....	7
2.2 社區與區域水資源之關聯 .....	11
2.3 氣象合成模式相關文獻 .....	13
2.4 低衝擊開發設施 .....	15
2.5 社區供水調適選項 .....	18
2.6 調適路徑相關文獻 .....	21
第 3 章 研究方法 .....	25
3.1 應用氣候調適六步驟於社區供水調適 .....	25
3.1.1 界定社區供水問題與設定目標 .....	28
3.1.2 評估與分析社區供水現況風險 .....	30
3.1.3 評估與分析社區供水未來風險 .....	32
3.1.4 界定與評估社區供水調適選項 .....	34
3.1.5 規劃與執行社區供水調適路徑 .....	36
3.1.6 監測與修正社區供水調適路徑 .....	38
3.2 建構社區供水系統模式 .....	40
3.2.1 人工濕地 .....	41
3.2.2 住宅儲存系統 .....	42



3.2.3 雨水儲集系統.....	44
3.2.4 水稻田.....	45
3.2.5 地表逕流.....	49
3.3 建立社區供水風險評估方法.....	53
3.3.1 建立社區水資源評估指標系統.....	54
3.3.2 應用低頻率氣象合成模式.....	56
3.4 分析韌性社區供水調適選項.....	59
3.5 建立韌性社區供水調適路徑.....	64
3.6 監測與修正韌性社區供水調適路徑.....	70
第 4 章 研究案例設計.....	73
4.1 設計案例介紹.....	73
4.2 社區供水系統模式參數設定.....	75
4.3 SWMM 模式參數設定.....	77
4.4 外部區域水資源系統模式介紹.....	82
第 5 章 韌性社區調適能力建構案例.....	85
5.1 界定問題與設定目標.....	85
5.1.1 關鍵議題之界定.....	85
5.1.2 目標之設定.....	86
5.2 評估與分析現況風險.....	88
5.2.1 歷史事件之風險分析.....	88
5.2.2 利用現況資料進行風險模擬.....	90
5.3 評估與分析未來風險.....	95
5.3.1 設定氣候情境.....	95
5.3.2 評估基期風險.....	97
5.3.3 評估未來風險並與基期風險比較差異.....	101
5.4 界定與評估調適選項.....	107
5.4.1 界定調適選項.....	107
5.4.2 評估調適選項.....	109
5.5 規劃與執行調適路徑.....	115
5.5.1 規劃社區供水調適路徑.....	115

5.5.2 制定調適路徑執行計畫 .....	124
5.6 監測與修正調適路徑 .....	125
5.6.1 調適路徑監測計畫 .....	125
5.6.2 調適路徑執行檢覈計畫 .....	127
5.6.3 調適路徑修正計畫 .....	129
第 6 章 結論與建議 .....	131
6.1 結論 .....	131
6.2 建議 .....	133
參考文獻 .....	135







## 圖目錄



圖 1-1 韌性社區供水系統之氣候調適六步驟.....	5
圖 2-1 調適路徑圖示意圖 (Haasnoot et al., 2013) .....	22
圖 3-1 步驟一：界定問題與設定目標.....	28
圖 3-2 步驟二：評估與分析現況風險.....	30
圖 3-3 步驟三：評估與分析未來風險.....	32
圖 3-4 步驟四：界定與評估調適選項.....	34
圖 3-5 步驟五：規劃與執行調適路徑.....	36
圖 3-6 步驟六：監測與修正調適路徑.....	38
圖 3-7 分析韌性社區與區域供水系統關係之流程.....	40
圖 3-8 韌性社區供水系統架構.....	41
圖 3-9 台灣家庭生活用水情形.....	43
圖 3-10 低水質需求之缺水量.....	45
圖 3-11 水稻田水平衡示意圖.....	47
圖 3-12 SWMM 中綠屋頂和透水鋪面之分層 (SWMM manual, 2015) .....	50
圖 3-13 透水鋪面分層示意圖.....	51
圖 3-14 以社區為治理觀點之供水風險成因.....	53
圖 3-15 氣象合成模式流程圖.....	56
圖 3-16 選擇權價值變化圖.....	68
圖 3-17 調適選項價值變化圖.....	68
圖 3-18 不同類型之調適目標曲線.....	69
圖 3-19 調適目標、評估指標和監測指標相互影響之示意圖.....	70
圖 4-1 台灣新竹湖口鄉信勢村空拍圖.....	73
圖 4-2 韌性社區相關模式之資料傳輸關係.....	74
圖 4-3 雨水儲集系統容量與對應之供水可靠度.....	76
圖 4-4 案例社區之 SWMM 模式圖.....	77
圖 4-5 案例社區之綠屋頂與透水鋪面分布.....	80
圖 4-6 頭前河流域供水系統圖 (水利署, 2013) .....	82

圖 4-7 頭前溪系統動力模式架構圖 (黃柏勳, 2013)	83
圖 5-1 新竹縣水資源領域調適行動 (新竹縣地方氣候變遷調適計畫, 2014)	86
圖 5-2 家庭節水率之月平均	92
圖 5-3 連續不降雨日之月平均	92
圖 5-4 歷史與基期之水分利用效率	99
圖 5-5 歷史與基期之農業節水率	100
圖 5-6 歷史與基期之家庭節水率與支撐延時	100
圖 5-7 基期與氣候情境之水分利用效率	103
圖 5-8 基期與氣候情境之農業節水率	103
圖 5-9 基期與氣候情境之家庭非接觸節水率與支撐延時	104
圖 5-10 不同繁衍資料長度之雨量變化	106
圖 5-11 不同繁衍資料長度之農業節水率變化	106
圖 5-12 供水管網改善長程計畫之目標漏水率	113
圖 5-13 各調適選項組合之調適能力	114
圖 5-14 各調適選項組合在不同剩餘時間下之價值變化	118
圖 5-15 不同剩餘時間下各調適選項組合之價值變化	119
圖 5-16 穩定型之調適路徑	120
圖 5-17 不同類型的調適目標	122
圖 5-18 快速達成型之調適路徑	122
圖 5-19 緩慢達成型之調適路徑	123
圖 5-20 高目標型之調適路徑	123
圖 5-21 目標節水率達成情形	128
圖 5-22 轉換不同類型之目標節水率	130
圖 5-23 修正之調適路徑	130

## 表目錄



表 3-1 韌性社區供水系統之氣候調適六步驟工作表單.....	26
表 3-2 氣候調適步驟一之資料、工具與產出表.....	29
表 3-3 氣候調適步驟二之資料、工具與產出表.....	31
表 3-4 氣候調適步驟三之資料、工具與產出表.....	33
表 3-5 氣候調適步驟四之資料、工具與產出表.....	35
表 3-6 氣候調適步驟五之資料、工具與產出表.....	37
表 3-7 氣候調適步驟六之資料、工具與產出表.....	39
表 3-8 水稻不同生長時期之生育度數、作物係數及湛水深.....	46
表 3-9 SWMM 中 LID 設施之分層 (SWMM manual, 2015) .....	50
表 3-10 社區供水系統之調適選項.....	63
表 3-11 選擇權種類.....	65
表 3-12 調適案例對應選擇權之種類.....	66
表 3-13 B-S model 對應調適路徑之參數定義.....	67
表 4-1 案例社區之土地利用情形.....	73
表 4-2 雨水儲集系統之供水可靠度對應容量與家庭節水率.....	76
表 4-3 設計案例之 SWMM 入滲參數.....	78
表 4-4 設計案例之 SWMM 土地利用參數.....	78
表 4-5 設計案例之 SWMM 通用參數.....	78
表 4-6 案例社區綠屋頂之相關參數 (Qin et al., 2013) .....	81
表 4-7 案例社區透水鋪面之相關參數 (Zhanga and Guo, 2014) .....	81
表 5-1 新竹地區近年來遭遇之缺水風險與成因.....	89
表 5-2 韌性社區現況風險評估之設計案例.....	90
表 5-3 韌性社區現況之家庭節水率.....	91
表 5-4 韌性社區現況之農業節水率.....	93
表 5-5 韌性社區現況之支撐延時.....	94
表 5-6 韌性社區現況之水分利用效率.....	94
表 5-7 台灣各氣候分區之推薦環流模式 (林嘉佑, 2016) .....	95

表 5-8 韌性社區未來風險評估之設計案例.....	96
表 5-9 氣象合成模式產生日雨量之統計特性.....	97
表 5-10 氣象合成模式產生之月雨量.....	98
表 5-11 氣象合成模式產生之一期作與二期作總雨量.....	98
表 5-12 氣象合成模式產生之連續不降雨日與年雨量.....	98
表 5-13 比較氣象合成模式之指標結果.....	100
表 5-14 氣候情境下未來雨量變化.....	101
表 5-15 氣候情境下外部系統可供水量與節水率變化.....	101
表 5-16 基期與氣候情境下農業與家庭風險值.....	102
表 5-17 一期作雨量與農業相關指標結果之相關性.....	105
表 5-18 二期作雨量與農業指標結果之相關性.....	105
表 5-19 年雨量與家庭指標結果之相關性.....	106
表 5-20 量化社區供水之調適選項.....	108
表 5-21 一般用水器材與省水器材之節水率比較表.....	110
表 5-22 家庭省水器材之省水量.....	110
表 5-23 各農田水利會轄內平均輸水損失率.....	111
表 5-24 各行政區域轄內自來水管線漏水率.....	112
表 5-25 不同調適選項組合之農業與家庭節水率.....	113
表 5-26 不同調適選項組合之有效期.....	116
表 5-27 B-S model 應用於社區供水調適路徑之參數說明.....	116
表 5-28 各項調適選項可能之主辦與協辦單位.....	124
表 5-29 調適路徑監測計畫之風險監測.....	126
表 5-30 調適路徑監測計畫之調適措施監測.....	126
表 5-31 調適路徑之執行時程.....	128

# 第1章 緒論

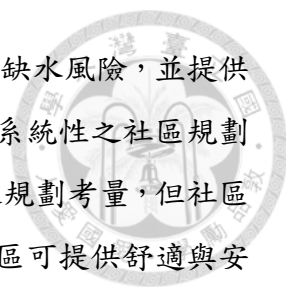


## 1.1 研究動機

全球各地極端天氣發生頻率與強度增加，台灣在 2001 年 9 月納莉颱風造成台北市嚴重淹水，隔年春天北部又發生嚴重乾旱，進入第三階段限水；2004 年艾利颱風為石門水庫帶來高濁度原水，造成桃園地區連續缺水 17 天；2009 年莫拉克颱風除了造成複合型災害，對水資源供給系統及公共衛生也產生衝擊；2015 年乾旱事件導致北區水資源管理進入第三階段限水，民生用水採取供五停二之管理措施，嚴重乾旱地區農業全面休耕，工業生產也必須配合節水，影響層面極大。2015 年 6 月台北市公館地區曾發生時雨量達 131.5 mm 之暴雨，但台北市下水道設計標準為時雨量 78.8 mm，導致台北地區嚴重淹水。極端天氣誘發許多環境災害，影響生態環境之永續性與人類經濟社會之發展，例如乾旱導致民生、農業、工業供水不足，提高水資源分配之困難度；洪水頻率增加則導致財產與生命的直接損失。臺灣需要積極應對如此頻繁的乾旱與淹水災害衝擊，急需科學發展提供系統性方法協助進行風險評估與調適能力建構。

在 2012 年第三次地球高峰會中，地方環境行動國際委員會（International Council for Local Environmental Initiatives, ICLEI）積極地倡議在全球推動韌性（resilience）計畫以因應氣候變遷，而氣候變遷調適研究的重點在於風險評估與調適能力建構。未來氣候變遷可能帶來更大挑戰，為因應氣候變遷對水資源系統之衝擊，必須盡快推動調適措施。聯合國 2030 永續發展議程於 2014 年提出 17 項永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs），其中一項永續發展目標指出永續城市與社區之發展及管理對於人類生活品質相當重要，然而相較於永續城市，更小的社區尺度卻較少研究探討，社區的形式並不僅限於住宅類，也可以是山區與海岸之聚落區域或大型工業區、校園等不同類型的社區。氣候變遷衝擊之調適可分為社區/地方政府尺度、區域/景觀尺度、國家/多個行政體尺度。

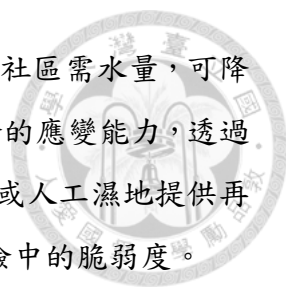
2015 年底臺灣通過之國土計畫法，第一條即聲明氣候變遷之重要性，並將台灣土地分為國土保育地區、海洋資源地區、農業發展地區、城鄉發展地區，當落實國土規劃並加強防災能力，創造寧靜和諧之生活環境及有效率之生產環境。2017 年



臺灣提出前瞻基礎建設計畫，在水環境建設部分，以降低淹水和缺水風險，並提供優質水環境為願景，期望達成穩定供水和防洪治水之目標。過去系統性之社區規劃多著重於都市區域發展，較少從社區觀點針對水資源做系統性之規劃考量，但社區未來水資源需求可能增加，供給卻可能受到限制。規劃完善之社區可提供舒適與安全生活環境，將可吸引居民從都市遷移至都市臨近社區，降低都會人口密度與都市需水壓力，再藉由提高社區水資源使用率，期可降低氣候變遷下傳統中央供水系統之負荷。過去國內研究多注重在中央供水系統之氣候變遷風險評估與調適研究，但從分散式供水系統探討之研究相對較少。由於氣候變遷對供水系統帶來嚴重衝擊，建立同時兼具時間及空間上使用彈性的分散式供水系統成為當務之急，如收集雨水儲存使用，或利用經由濕地淨化處理後之再生水等。如何強化韌性社區供水系統回復力、降低水資源系統脆弱度、提高社區雨水使用率、降低社區系統對外部水資源之需求等氣候變遷調適策略相關議題逐漸受到重視，因此，本研究以社區為研究尺度，以對社區之供水系統進行管理規劃，惟此研究需要評估工具，例如模擬社區供水情形之模式，以及分析社區供水系統回復力之評估指標，才能支援量化決策分析，評估可行之調適選項，提出建議之調適路徑，建構社區在氣候變遷下之調適能力，因此，本研究旨在發展韌性社區供水系統氣候風險評估與調適能力建構方法。

## 1.2 研究目的

本研究建構社區面對氣候變遷衝擊之調適能力，進一步降低社區缺水風險，提升社區供水系統之韌性。根據聯合國氣候變遷小組（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次評估報告（5th Assessment Report, 簡稱 AR5）之風險定義由危害、暴露、與脆弱度組成。本研究以社區治理之觀點出發，危害因子為缺水事件，其中受氣候因子及非氣候因子影響，氣候因子為雨量和溫度，例如降雨量不足，或颱風造成原水濁度增加，供水系統停止供水；非氣候因子為氣候因子以外之影響因素，例如社區所屬之區域供水系統，在輸水途中之損失，可利用水利設施更新與改善，來改善供水系統之漏水率，降低風險中的危害因子；暴露由社區位置決定，取決於社區是否位於高缺水危害區域；脆弱度包含敏感度和調適能力，敏感度可分為民生和農業方面，民生方面可由家庭需水量決定，由人口數和每人每日用水量計算，而農業方面為作物對缺水之敏感度，可由農業需水量評估，利用農田

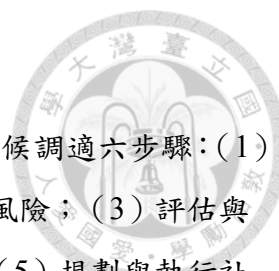


面積和單位面積灌溉水量計算，透過節水灌溉或省水設施，減少社區需水量，可降低風險因子中的脆弱度；調適能力是社區供水系統面對缺水風險的應變能力，透過設置分散式供水系統，例如雨水儲集系統供應家庭低水質需求，或人工濕地提供再生水灌溉使用，提高社區供水系統之調適能力，以降低社區風險中的脆弱度。

針對極端降雨衝擊，提出低衝擊開發設施（Low Impact Development, LID）之暴雨管理概念，利用分散式系統來分擔滯流洪水，其目的為減少暴雨逕流和延遲暴雨逕流之峰值，使開發地區盡量接近開發前之水文循環狀態。本研究進一步考量滯流逕流為可利用之水資源，以低衝擊開發設施同時做為分散式供水系統進行調適，加強社區自身之水資源使用效率，以提高社區對缺水風險之調適能力。透過評估社區整體之水資源使用情形，從社區供水系統著手，分析韌性社區內可能建構之低衝擊開發設施，例如人工濕地、雨水儲集系統及綠屋頂等，探討低衝擊開發設施對社區水資源使用量的影響，藉由強化需求端管理，促使韌性社區有效使用外部供水系統提供之水資源，達到穩定社區供水之效果，進一步降低韌性社區對於外部供水系統之需求，不僅解決社區自身問題，也減輕外部供水系統負荷。

隨著科學研究的進步，因應氣候變遷衝擊之調適逐漸受到重視，而擬定有效調適行動的關鍵在科學與系統性方法的支援，包括研究方法與分析工具、系統整合、科學知識轉移、與應用服務等。為了有效推動調適措施，合理與有系統性的調適計畫是必要的，科技部臺灣氣候變遷調適科技整合計畫（Taiwan Integrated Research Program on Climate Change Adaptation Technology, TaiCCAT）提出氣候調適能力建構六步驟的標準流程。而氣候變遷調適應於不同空間尺度考量，但 TaiCCAT 調適六步驟尚未特別針對社區尺度進行探討，因此，本研究應用氣候調適六步驟於社區供水系統，發展、整合及修正相關工具以進行各步驟的評估，以建構韌性社區供水系統之調適能力。為檢驗調適計畫建構工具的應用性，本研究將氣候調適流程應用於設計案例，根據評估結果進一步強化模式及修正細節，使各步驟的流程應用更貼近實際環境及社會情況。本研究發展之研究方法可支援政府社區政策擬定與社區規劃，例如有助於水利署發展「社區自主防災」與配合農委會「農村發展條例」之農村更新與總體營造等政策推動，也可協助環保署為了減緩氣候變遷所推動的「低碳社區」，進一步納入未來調適策略，並因應氣候變遷衝擊推動「韌性社區」。





### 1.3 研究架構

本研究應用調適能力建構流程於韌性社區供水系統，透過氣候調適六步驟：(1) 界定社區供水問題與設定目標；(2) 評估與分析社區供水現況風險；(3) 評估與分析社區供水未來風險；(4) 界定與評估社區供水調適選項；(5) 規劃與執行社區供水調適路徑；(6) 監測與修正社區供水調適路徑，圖 1-1 為韌性社區供水系統之氣候調適六步驟。本研究共分為六章，第一章為研究動機、目的和架構。第二章為文獻回顧，搜集社區相關定義，針對社區名詞進行釐清，定義韌性社區，並分析韌性社區與區域水資源之關聯；整理氣象合成模式相關文獻，並挑選應用於社區長期供水模擬之氣象合成模式；另外整理低衝擊開發設施相關文獻，以分析低衝擊開發設施做為社區供水調適選項之可行性，並根據風險定義尋找對應之供水調適選項，最後歸納分析調適路徑相關文獻，以利後續提出調適路徑方法論。第三章為研究方法，建構社區供水系統模式，模擬社區內的民生和農業之供水情形。接下來進行社區供水風險評估，其方法包含社區水資源評估指標系統和低頻率氣象合成模式，藉此評估韌性社區供水調適選項，並根據調適路徑建立方法，完成調適路徑圖，執行同時監測調適路徑，在調適路徑偏離原本規劃路線時，提出修正調適路徑計畫。第四章為研究案例設計，參考新竹縣湖口鄉之信勢社區設計而成，提供相關模式之參數設定，設計案例可提供符合臺灣區域特性之社區案例。第五章為韌性社區調適能力建構案例應用，執行氣候調適六步驟，設定關鍵議題為社區供水系統之韌性，首先分析新竹地區之歷史缺水事件，建構社區供水系統模式與外部供水系統之關聯，並且利用現況資料進行社區供水現況風險分析，接著利用低頻率氣象合成模式產生氣象資料，提供社區供水系統模式分析未來風險，再比較基期和未來風險差異。蒐集可行之社區供水調適選項，以選擇權定價模型量化調適選項價值，根據調適選項價值與調適目標決定調適路徑圖，決定最終調適路徑，同時制定調適路徑監測與檢覈計畫，當調適路徑與預期情況出現差異時，即時進行修正。第六章為結論與建議，提出建構韌性社區調適能力之結論，並提供後續研究建議。



圖 1-1 韌性社區供水系統之氣候調適六步驟



## 第2章 文獻回顧



本研究目的在於建構氣候變遷下韌性社區供水系統之調適能力。在文獻回顧方面，依據第一章描述之研究架構，本研究針對以下項目進行文獻回顧與討論：

- 1.社區相關定義，針對社區相關文獻進行蒐集，例如低碳社區、永續社區、生態社區、韌性社區等，以釐清不同社區名稱的定義；
- 2.社區與區域水資源系統之間的關聯，社區供水系統和區域水資源系統密切相關，當區域水資源受氣候變遷影響時，也會進而影響到社區，因此需要了解兩者之間的關聯；
- 3.氣象合成模式相關文獻，蒐集彙整各類型之氣象合成模式，應用合適之氣象合成模式於韌性社區未來供水風險評估；
- 4.低衝擊開發設施，蒐集國內外相關文獻，彙整各種低衝擊開發設施之效用；
- 5.社區供水調適選項，蒐集並彙整可行之調適選項，以利後續進行調適路徑分析；
- 6.調適路徑相關文獻，彙整調適路徑相關文獻，分析調適路徑之研究

### 2.1 社區相關定義

社區代表住在同一空間地理範圍內，由一群有共識和共同行動能力的人，也就是具有社區意識，社區的本意比較接近社群或共同體的涵義（陳其南等，1998）。我國內政部地政司定義鄉村區為調和、改善農村居住與生產環境及配合政府興建住宅社區政策之需要，會同有關機關劃定者。如現有聚落達兩百人以上地區，得斟酌地方情形及需要，就現有建地邊緣為範圍，劃為鄉村區，另依農業主管機關擬訂之農村綜合發展計畫或農漁村社區環境更新規劃指定之農漁村社區，或配合政府農地興建住宅社區政策規劃劃定鄉村區。李永展（1995）指出社區最簡單的定義為一定地理區域內的人以及其社會性活動與現象之總稱。社區營造的目的就是要透過社區民眾的自主參與，使得空間獲得美化，生活品質提升全面性的社區營造過程。劉建哲（2004）指出農村永續發展應著重社區發展、社區營造以及永續發展三個面向，而劉建哲（2001）也提出隨著工商業經濟的快速發展，使得農業生產逐漸式微，而隨著農村角色及結構逐漸改變，農村不再只是以糧食生產為大宗，因此為了使農村能夠適應變遷中的社會經濟發展之需求，未來農村建設的基本目標應該包括：1. 創造經濟力並改善村民的工作條件與生活環境；2. 保存並維護農村傳統風貌與獨

特風格；3. 維護自然之景觀與生態環境。為此需將針對不同層面採取不同規劃方式以及建設手段，才能達到農村永續發展的願景。

從 1990 年開始西方各國開始鼓吹相關社區發展概念，其具體實踐方式可分為三種模式：1. 節約能源的設計方案的推動、積極拓展能源供應多元性；2. 生態建築的研發；3. 社區多樣性的倡導，包含環境及社會面向（李永展，2003）。綜合而言，其推動生態社區之發展趨勢，是結合「發掘地方生態」、「社會歷史的創造性的調查研究」與「環境教育方法」的綜合性策略（張珩等，2004）。而近年來社區發展受到重視，提出許多社區相關名詞，如低碳社區、永續社區、生態社區、韌性社區等。低碳社區在國際上目前尚無統一的定義，低碳字面上的定義，就是目標達到碳排放量低於目前平均排放量，例如單位人均之排放量，即可稱為低碳社區，但低碳和節能往往被劃上等號，因此如現有能源效率提升、增加自有能源供給率、或增加各類廢棄物之循環再利用比例等，都屬於低碳社區的項目。

永續社區（Sustainable Community）的概念來自於 1992 年里約熱內盧地球高峰會會中共同簽署的《21 世紀議程》（Agenda 21），其中提出「為了達到永續的人類居住的目標，有必要展出一種先進的社區模式，並建立它們之間資訊交換的管道」。2012 年之第三次地球高峰會中，ICLEI（地方環境行動國際委員會）積極地倡議在全球推動回復力（resilience）計畫以因應氣候變遷，更強化了永續社區發展存在的必要性。於是永續社區的概念受到啟發，它是一維持經濟效率、環境整合和社會公平下均衡發展的社區模式，與傳統社區三者相互分割獨立規劃有所區別（Young，1992）。依據 Hoff（1998）之分類方式，又分為都市型社區、農村型社區、區域型社區。社區中的環境因素包含供水、能源、衛生、排水和固體廢物等，本研究著重於永續社區環境整合議題中之水資源供需管理。現實中突顯面面俱到的永續社區（林伯勳等，2001），常易造成奠基於環境之特質發展模糊，因此生態社區成為永續社區概念提出後的操作模式，聚焦於「環境優先」的訴求，強調生態在社區營造前期工作的重要性，即從生態的角度落實永續社區的目標，認為人類無法脫離自然生態的基礎，唯有與環境之間和諧共存才能維持自然系統的運作正常，並達到永續性的目標。陳亮全等（2010）則以宜蘭三星地區、桃園中聖、中泰兩里及馬祖南竿鐵板三社區為例，探討綠色城鄉、永續社區實驗計畫，其研究提出應重視永續社區之水資源議題，如藉由保留天送埤地區之水田渠圳以維持三星鄉地區

水文環境之永續性、推動雨水貯留系統、社區水資源整合等，但其研究主要由社會科學角度出發，並未針對水資源進行量化的分析。

生態社區的概念發展至今尚無明確的理論基礎，後續延伸產生了「生態國家」(eco-nation)、「生態城市」(eco-city)、「生態村莊」(eco-village)等名詞，並根據是否納入人文環境決定為廣義或狹義生態社區(Hoff, 1998; Robertson, 1992; Sim and Peter, 1986; 林憲德, 1997)。生態社區考量原則主要包含生態承載量(carrying capacity)(倪進誠等, 2004)、能量得以流動、物質得以回收的「循環原則」，以及加強物種多樣性「保育原則」(廖孟儀, 1999)。Takeuchi 等人(1998)有感於日本農村地區之基礎建設緩慢、人力流失等情況，造成自然環境資源的管理崩解，隨著環保意識的升起，有必要建立一有效管理、使用自然環境資源的再生社區，提出生態村莊(eco-village)的概念，定義生態村莊為以生態復育的技術，滿足具有生產經濟並維持半天然環境系統、自給自足的村莊，期待藉由案例分析、模式建立發展試驗型生態村莊，在實際面，受限於農村社區條件限制，特別強調與區域核心城市的雙向溝通，一方面減少過度集中的都市化情況，一方面重建落沒的村莊地區。東方國家因各地發展不同，策略不盡相同，台灣九二一地震後社區重建有不少生態社區的興起，內政部營建署於民國九十三年亦展開「社區風貌營造計畫」—在台灣選出十九個社區作為生態社區示範案例，透過由下而上的參與機制，推動省能、生態與環保的社區總體營造。由國內外案例可發現生態社區蔚為風潮，每一個地區都有適應當地的作法，生態社區多半走向自然保育與生物多樣性的維護、並順應發展生態旅遊(倪進誠等, 2004)，主要以生態面向為構想出發點。

災害的發生越來越難預期，而任何大小災害首先衝擊的就是社區，當社區面臨未來風險時，如何透過社區力量，建構具回復力的韌性社區，從而可以在災難、危險及反常現象發生後，快速的回復到正常運作狀態。回復力的概念早期從力學領域發展而來，代表系統經過短暫的擾亂回到平衡狀態的能力。Holling(1973)所提出之工程與生態回復力，回復力為遭受擾動之系統回復提供可接受服務水準的能力，或生態系統維持其功能與服務的能力，而氣候變遷研究領域之回復力，可定義為自然與人類社會系統於氣候變遷衝擊下之回復能力。也有學者借用生態學及社會學的詞彙，將恢復力定義為個人、企業或系統，在面臨巨大的環境變化時，維持核心使命與完整性的能力。一般而言，回復力隱含著系統超過承載力時將會面臨的問題，

如遭受衝擊後系統是否能夠恢復原本狀態、系統可承受多大的過載、系統需要多少時間恢復以及恢復之後系統的機能。在面臨氣候變遷造成未來風險增加時，韌性社區是指一個社區面對常態性或非常態性的災害，能夠維持在預定的功能範圍，例如社區供水系統能夠支撐較長時間，等待外部供水系統回復正常，因此本研究定義韌性社區在供水系統面向為「氣候變遷下供水系統具有高回復力與低脆弱度之社區」，並應用調適能力建構流程於韌性社區，提高韌性社區在氣候變遷下之調適能力。




## 2.2 社區與區域水資源之關聯

社區水資源和區域水資源系統密切相關，當區域水資源受氣候變遷影響時，也會進而影響到社區水資源。國外研究部分，Lehner et al. (2006) 分析歐洲地區在氣候變遷下洪水及乾旱的發生頻率，結果指出在歐洲北部及東北部，洪水發生頻率有增加的趨勢，而在歐洲南部及西南部，乾旱發生頻率有增加的趨勢。Mishra et al. (2010) 分析美國中西部地區歷史乾旱，評估未來氣候變化對於乾旱之影響，該研究以標準逕流指標探討水文乾旱，研究結果指出雖然未來總降水量有增加可能，但因降水多發生冬天及春天，乾旱在夏天將可能趨於嚴重。Charlton et al. (2011) 針對氣候變化為英國帶來的水資源進行不確定性研究，並檢討自來水公司因應未來缺水情形的管理計畫等相關政策之可行性檢討及提出修正建議。國內研究中，游保杉 (2000) 評估氣候變遷對高屏河流域水資源之衝擊，結果顯示，溫度於長期趨勢分析上有顯著增加之趨勢，且乾濕日移轉機率為影響降雨之顯著因素，另外配合降雨-逕流之模擬，顯示未來豐枯水期之水資源差異將更為明顯，豐水期之河川流量將增加約 26% 而枯水期則約減少 21%。童慶斌等 (2012) 評估北部水資源分區氣候風險之空間分布，主要工作內容在於分析水資源相關水環境因子之變動趨勢，設定未來水資源需求情境以及可運用之水源，評估氣候變遷對河川流量及各水資源設施之衝擊，推求各標用水缺水容忍度以及定義水資源風險度與分析方法，計算出未來氣候變遷影響下之缺水風險，並依風險地圖擬定水資源調適策略與行動計畫，以強化北部水資源系統。國內外研究均顯示區域水資源可能受氣候變遷之影響，當區域水資源系統無法正常供應社區用水時，將影響社區居民的生活，因此在評估社區水資源情況時，需要將區域水資源系統納入考量，然而區域水資源如何與社區尺度連結，亦為本研究之重點。

韌性社區供水系統模式和區域水資源系統動力模式需要進行整合，透過區域水資源模式模擬外部農業與民生供水資料，做為社區水資源模式的輸入資料。應用於實際案例時，需要先蒐集社區水資源現況的資料，再根據社區水資源現況建構水資源系統，評估加入綠屋頂、雨水儲集或濕地之可行性，另外，藉由區域水資源系統之建構，提供外部供水資料。在整合區域水資源模式與社區水資源模式時，銜接兩模式之間之資訊流通需要定義通訊協定 (protocol)，將輸入和輸出資料統一規





格，以提升資料使用效率，管理兩個模式間之資訊流通，以利後續利用區域水資源模式，模擬社區分散供水設施對區域供水風險之影響。利用評估社區供水系統對區域水資源系統風險的影響，可更確切了解到整合社區供水系統做為分散式的調適措施的效用。韌性社區供水系統可有效減少社區對外部供水系統的需水量，藉由每個社區減少民生與農業需水量，可減少區域水資源系統的負荷，降低區域水資源系統在未來氣候變遷下水資源短缺的風險。建構韌性社區與區域水資源系統之關聯性，透過社區分散供水設施情境設定，可模擬家庭與農業用水之節水率。




## 2.3 氣象合成模式相關文獻

進行氣候變遷未來風險評估時，需要未來氣象資料，因此透過氣象合成模式繁衍未來氣象資料。在氣候變遷相關研究中，未來月氣象資料的統計特性較合理且容易取得，但無可直接使用之日氣象資料，因此必須根據月氣象資料的統計特性，透過氣象合成模式產生日氣象資料。利用各大氣環流模式（General circulation model, GCM）所提供之預測修正溫度值與降雨量月平均資料，將修正後未來的溫度及降雨量資料輸入氣象合成模式中，繁衍出日溫度與日降雨量資料。

氣象合成模式可分為參數型和非參數型，WGEN (Weather generator) 和 LARS-WG (Long Ashton research station weather generator) 屬於參數型氣象合成模式；k-NN 法 (k-Nearest Neighbor Neighbors algorithm) 為非參數型氣象合成模式。WGEN 由 Richardson (1981) 提出，隨後相關研究進行改進及應用 (Pickering et al., 1988; Selker and Haith, 1990; Tung and Haith, 1995)，WGEN 利用月平均溫度透過一階馬可夫鏈模擬日溫度，日雨量則計算歷史資料前一天與後一天降雨狀況的條件機率，逐日決定降雨與否，若是發生降雨事件用歷史資料降雨量的機率分布來隨機產生雨量。Racsco et al. (1991) 提出 LARS-WG，使用半分佈經驗公式描述降雨量 (Semenov et al., 1998; Semenov and Brooks, 1999)。而 k-NN 法屬於非參數型氣象合成模式，由 Lall and Sharma (1996) 提出，k-NN 法不需要資料特性參數來繁衍資料，而是透過空間上或時間上與待繁衍資料相鄰近的已知資料，將已知的鄰近資料與鄰近資料本身相對應的歷史資料進行各種特性上的比對，以各種特性與歷史資料的相似度來設定權重，特性越相似的歷史資料權重越高，即越容易被選中，Rajagopalan and Lall (1999) 選用歐氏距離 (the weighted Euclidean distance) 作為權重的評量方式。k-NN 法可以保留住資料的空間特性及時間特性，能將各氣象資料的統計量、延時及測站間相關性有效重現，但 k-NN 法無法產生歷史資料中沒有出現的數據。

傳統型的氣象合成模式往往沒有將雨量時間序列較長週期 (Low-frequency) 的循環納入考慮，所以繁衍出來的氣象資料有可能缺少某些時間序列上連續的特性或週期，影響到了水資源評估時的準確度。透過訊號分析法將雨量時間序列拆解成簡化並去除雜訊狀態下的週期分量，藉由重組、調整這些週期分量，再重新產生



出帶有週期分量的雨量時間序列。Md. Khademul Islam Molla (2006) 利用經驗模態分解法，分析雨量資料，用常態分佈去分析每一個本質模態函數，經驗模態分解法依據數據本身的時間尺度特徵，將任意信號當作多個模態特徵的組合，可依據數據本身的時間尺度進行模態分解，分解過程中保留數據本身的特性，達成信號特徵的量化提取。訊號分析時，有可能會留下一個分量為趨勢項 (trend)，趨勢項為不易觀察到週期性的分量，可以進一步進行訊號趨勢的探討。Steinschneider (2013) 利用小波轉換分析年雨量的時間序列，並且利用自相關模型去產生新的年雨量資料，以 k-NN 法將繁衍出的年雨量分配至日雨量中，產生日雨量之後再依照挑選的氣候變遷情境修正雨量。李沅泓 (2015) 提出低頻率氣象合成模式 (low-frequency weather generator, LF-WGEN)，結合經驗模態分解法和 k-NN 移動視窗法，利用經驗模態分解法來保留雨量中長週期的降雨特性，進而繁衍出保留時間序列之特性的月雨量資料，再以 k-NN 移動視窗法將繁衍之月雨量資料時間降尺度至日雨量。

本研究範疇為評估韌性社區長期水資源系統情況，在評估未來社區風險時，需要能展現中長週期降雨特性之氣象合成模式。而理想的氣象合成模式能夠在維持歷史統計特性的前提下，產生極端值，並且能依照使用目的產生任意長度的氣象資料。相較於傳統氣象合成模式，LF-WGEN 能夠保留時間序列之趨勢與低頻率特性，同時產生更極端的氣象資料，因此本研究應用 LF-WGEN 產生之未來氣象資料，進行韌性社區未來供水風險評估。




## 2.4 低衝擊開發設施

為因應氣候變遷帶來之衝擊，必須從中央與地方等不同層級同時推動調適措施，過去國內研究多注重於大型基礎設施如水庫等集中供水系統，雖然其效用顯著，但需要較多且精確之未來資訊以支持措施推動，而氣候變遷研究之不確定性仍高，因此發展分散性小系統，再加以系統整合，一方面可累積調適能力，另一方面較易隨未來氣候、環境變動而彈性調整。

低衝擊開發 (Low Impact Development, LID) 技術為實踐都市永續發展的暴雨管理技術手段之一。LID 技術是美國東部馬里蘭州的 Prince George's County 和西北方的西雅圖市、波特蘭市同時提出的一種暴雨管理技術，目前在美國已有非常多的實際執行案例。其原理是透過在地的、分散的、小規模的源頭控制機制和設計技術，來達到對暴雨所產生的逕流和污染的控制，使開發地區的水文循環儘量接近於開發前自然水文循環，因此 LID 技術為一師法自然流路的改善水質、分散或降低逕流的方法。目前低衝擊開發設施延遲洪峰時間及減低洪峰流量的功能已被證實 (Lee et al., 2013; Zhenliang et al., 2013)，具體措施包含藉由於適當區域提高社區地表透水面積比例，可以有效增加洪水滯流量，減少滯洪及減輕蓄洪設施之減洪壓力，期可降低氣候變遷下傳統中央集中式排水系統之負荷；除了加強地表滲透性，儲水系統如雨水儲集可供應生活非接觸用水，而人工濕地能提供再生水給農田灌溉使用，達到有效利用雨水之目的。LID 設施不只減少洪澇，同時也可做為分散式供水系統的一環，提高韌性社區之調適能力與回復力。

規劃社區中的 LID 設施配置時，首先面臨的問題即為 LID 設施的挑選，過去許多地區及國家如美國、英國、蘇格蘭、愛爾蘭、澳洲、加拿大、南美、南非等地皆已針對 LID 設施的挑選流程提出相關概念或方法 (Armitage et al., 2012; Blacktown City Council, 2013; City of Edmonton, 2011; Department of Defense, 2004; Dublin City Council, 2005; Pittner & Allerton, 2009; Practicum et al. 2006; Woods-Ballard et al., 2007)，歸納彙整相關研究，可看出選擇 LID 設施的主要依據包含場地適合度 (Site suitability)，LID 設施於水量、水質控制及其他面向的效益 (景觀、生態、休憩等)，及 LID 成本、維護、達成目標的可靠程度。場地適合度 (Site suitability) 包含許多因子，如場地條件類：土地利用種類、當地污染負荷、其他特殊要求如至建築、地基、馬路、水體、其他設施之距離等，因此進行規劃前，須透過向政府當局索取或

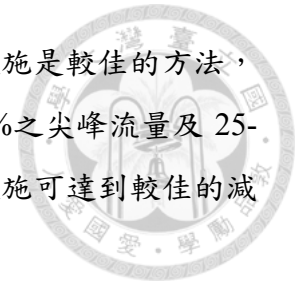


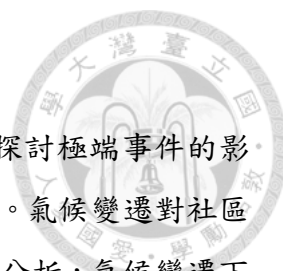
現地調查得到當地土地利用資料。其他條件如土壤特性（種類、深度）、地下水特性（地下水高度、地下水水質）、地形高程、集水區特性（如不透水面積、總排水面積等）、可利用空間等。另外部分相關文獻特別指出選擇 LID 設施時須納入當地的特殊考量，包含當地氣候特性、降雨、土石流風險、對人類健康的影響、公共衛生及安全性、其他相關政策或規範等。綜合考量上述因子，Jia et al. (2013) 提出利用分數表評分，經過加權及加總後得到 LID 適合性的量化數值，惟這類給分方式須依據前人研究之結果，由於每個研究的 LID 設施及其功能、場地條件因子之分類方式不同，其中即存在相當之不確定性，且因過程較複雜費時、容易流於主觀等缺點，因此其適用性仍有待進一步的評估。

在綠屋頂、雨水儲集系統、人工濕地、農田等方面之研究，國內外研究則多就各項目獨立探討，如游保杉(2007)研究水稻田灌區旱情動態監測，吳瑞賢等(2007)設計農業迴歸水再生利用，開發再生水源以解決供水之問題，吳瑞賢等(2011)針對農業區地表水系統之模擬與推估進行研究。廖朝軒等(2001)分析雨水貯留之水資源利用效益與策略，提出雨水在社區做為替代水資源之分析架構(Liaw, 2014a,b)。Villarreal and Dixon (2005) 分析雨水儲集系統做為住宅區民生用水供水來源之效益，包含模式模擬及利用節水率指標做為評估依據；VanWoert 等人(2005)曾分析屋頂特性及斜率與介質厚度後，提出土壤基質的種類與深度是影響綠屋頂儲水與滯洪能力的主要因子而非植被種類；以及荊樹人(2007)針對農業產業型態社區利用人工濕地進行污水自然處理之研究等，林裕彬與王咏潔(2009)利用系統動力模型模擬表面流人工濕地營養物質循環。然而前述相關研究大多未考量其交互影響，且無適當工具將各系統加以整合。

在模擬及評估 LID 水文狀態的部分，Liao et al. (2013)、Qin et al. (2013)、Lee et al. (2013) 及叢翔宇等(2006)使用 SWMM 模擬 LID 設施對基地的減洪效果，包括減少地表逕流量、降低尖峰流量等，其結果顯示草溝的減洪效果較差。Qin et al. (2013) 模擬在深圳某城市 LID 設施對不同降雨型態之減洪量，發現不同設施在不同降雨型態有不同的效能，LID 設施在短時間且強降雨的降雨型態中表現得較佳，其中綠屋頂及透水鋪面的減洪效果皆較草溝佳，而 Liao et al. (2013) 模擬及比較上海某開發區在分別設置五種不同 LID 設施的情境後，除了草溝其餘 LID 設施皆能削減約 70% 地表逕流量。另外，Qin et al. (2013) 及 Lee et al. (2013) 皆

指出不同 LID 設施對減洪有不同的效能，同時結合不同 LID 設施是較佳的方法，於高度都市化之城市同時佈置四種 LID 設施，約可減少 55-66%之尖峰流量及 25-125%之地表逕流量 (Lee et al., 2013)，可見聯合不同 LID 設施可達到較佳的減洪效果。





## 2.5 社區供水調適選項

氣候變遷雖然牽涉到全球尺度的氣溫與降雨型態改變，但探討極端事件的影響範圍仍多為區域或州、省尺度，或範圍更小的城市或社區尺度。氣候變遷對社區的影響仍是有跡可循，根據 IPCC AR5 中針對各領域及各地區之分析，氣候變遷下社區尺度的關鍵脆弱度在於鄉村、偏遠甚至北極海附近低地都市社區，由於基礎設施潛在損壞的可能性而導致受限的社區供水調適能力。關鍵風險為社區及公共衛生基礎設施損壞而導致傳染性疾病蔓延或海水入侵。未來可能風險包含水質逐漸惡化、水量不符需求而導致感染、其他醫療問題及收容問題。以衝擊分布比例而言，弱勢民眾及社區受到的影響最大，其中水資源影響遍布全球，歐、亞、澳、中南美洲皆積極累積相關調適經驗 (Field et al., 2014)。在各面向的氣候變遷衝擊中，水資源系統受到相當高的關注，各地發生的事件證實了氣候變遷造成的影響，根據 Warner and van der Geest (2013) 研究說明氣候驅動力造成的結果主要是洪水或乾旱，部分地區甚至同時受到洪水和乾旱衝擊。


聯合國環境規劃署 (UNEP, 2011) 針對水資源領域建議了 6 種調適途徑與 11 種相對應的調適科技，包含增置地下水水井、海水淡化、居家水資源、增強水井抗洪的回復力、提升人類用水效率、輸水管線健檢、區域水情掌控、地表雨水儲集、屋頂雨水儲集、利用迴歸水資源、保全水資源計畫。而在社區水資源調適部分，美國 EPA (2015) 的「社區氣候變遷調適」中，提到 2008 年愛荷華州水資源管理對於氣候變遷調適。在洪災過後，社區致力於州與聯邦政府計畫重建河邊地區、促進公平發展和處理氣候變遷挑戰，而該計畫稱為” Riverfront Master Plan”。該計畫提出透過綠色公共建設 (Green infrastructure)，在河邊區域建立綠色緩衝區，並重新規劃發展地區以避開洪災易發生地區降低未來洪災風險。在印度地區，R. Chakrabarti et al. (2015) 提出在印度社區受氣候變遷影響而產生的主要問題主要有三點：水資源缺乏增加、水質下降以及洪災風險增加，為了增進氣候變遷調適性，開發 AdaptCap 計畫增進調適方法並解決最迫切的水資源問題。AdaptCap 是印度政府以社區為示範單位進行的氣候變遷調適與災害風險管理計畫，在計畫初期，總共實施 18 個示範地區，將調適、減緩氣候變遷與災害風險管理整合至地區性發展計畫，例如：零排放調適 (zero emission adaptation)，並支持將科技轉移至地區。J.

L. Ivey and others (2004) 整合水資源管理、陸地使用規劃和城市與鄉村利益關係人辨識和參與，並實際於加拿大實施，得到三個結論：第一，跨部門合作氣候變遷調適被政府及管理階層視為較低優先性；第二，有清晰及清楚定位的當地水資源管理組織能提供顯而易見的合作重點內容；第三，短期內在 Credit River Basin 僅能獲得有限的水文資料，造成資料不確定性無法降低。

受到氣候變遷影響，台灣農業問題日趨複雜，而水資源有限，對於農業政策必須適時調整並進行前瞻性之規劃。農委會的因應策略主要可分為四個面向，包含

- (1) 推動農田水利設施更新改善：灌溉用水輸水途中可能因渠道破損而有滲漏情形，其可能的原因為渠道的材質及狀態與輸水效率等等，因此辦理農田水利設施更新改善工程，除維持設施功能外，更可有效降低輸水損失。農委會持續推動「加強農田水利建設計畫」，每年補助各農田水利會辦理約 300 公里之圳路更新改善，圳路經更新改善後每公里約可減少 7 萬立方公尺之輸漏水損失，每年節水量約可達 2,100 萬立方公尺。經統計近期 97 年至 103 年，灌溉圳路累計更新改善 2,468 公里，年節水量估計為 1.8 億噸；
- (2) 推廣旱作管路灌溉：耐旱作物及高効用水灌溉能夠有效節省灌溉用水量，農委會輔導農民施設省水、省工及兼具灌溉、施肥、施藥等多目標管路灌溉設施，每公頃可較傳統漫灌或溝灌方式有效節省 0.5 萬立方公尺的灌溉用水，同時降低生產成本，提高生產競爭能力，增進水土資源有效利用。農委會自民國 72 年起補助各農田水利會辦理「推廣旱作管路灌溉計畫」，截至 104 年底約已補助 4.5 公頃，總節水效益達 2.2 億噸；
- (3) 建置自動水文測報及灌溉系統：可即時獲取灌溉區域降雨及水文資訊，再以遠端遙控方式來控制水門開閉，有效於枯旱時期提高灌溉區域管理效能，節省灌溉用水量及管理人力，在颱風豪雨期間亦能迅速反應以減低災損，彰化農田水利會於荊仔埤圳建置自動化水文測報及閘門遙控設施，掌握灌溉區域水文情勢以調配灌溉用水，估計可節省 20% 之灌溉用水量；
- (4) 健全農田水利會抗旱應變機制：遇乾旱時期，灌溉水資源可因應缺水率情形來加強灌溉管理措施甚至實施停灌，當缺水率低於 50% 時，以加強灌溉管理來克服缺水，但缺水率高於 50% 時，只能辦理停灌，目前已完成「農田水利會旱災災害防救手冊」，作為各農田水利會於抗旱因應之灌溉管理依據，積極應對缺水風險。





在作物部分，耕種日期對於農業需水量有相當程度的影響，陳清田等(2014)的研究成果顯示，當一期作水稻種植日期由1月16日往後調整，水稻生長期距與作物需水量及灌溉用水量皆呈遞減趨勢，在產量與節水效能之綜合評估，一期作水稻種植日期由1月16日調整至2月16日並於抽穗期實施7天之輪灌期距時，則有23.3%~30.5%之節水成效，且對產量影響甚微(0.04%~3.9%)，此稻作灌溉管理策略可提升缺水期水資源之有效調配與利用，有效因應氣候變遷及春季之嚴重缺水問題。廖芳瑾等(2015)則以台南市烏山頭水庫灌區水稻田的田間需水量為指標，調整水稻最適插秧日期，並利用DSSAT模式進行水稻產量的模擬，以了解在RCP 2.6以及RCP 8.5情境，近世紀、遠世紀的HadGEM2-AO模式之下，調整水稻插秧日期對水稻田間需水量與產量的影響，結果顯示一期作插秧日提前10至20天，田間需水量有顯著的下降，二期作則差異不大，水稻產量則無明顯差異。吳瑞賢等(2015)利用CROPWAT模式估算石門水庫供水區的桃園農田水利會與石門農田水利會之灌溉水量，模擬未來農業用水量的變化，以調整耕期為近未來氣項與水文條件變化的因應措施，利用CROPWAT模式模擬未來農業用水量的變化，由於耕期調整主要目的在於減少枯水期的用水量，其結果顯示枯水期用水量佔期作總水量的比例在正常耕期時為59%，若延後一旬則降為51%，延後二旬降為41%，顯示耕期調整對枯水期的水庫用水調度有明顯助益。



## 2.6 調適路徑相關文獻

在氣候變遷的相關研究中，面對未來不確定性，需要完整的強健系統來因應多變的未來。調適路徑圖提供不同路徑供使用者選擇，根據使用者的目標來提供調適行動執行計畫。調適路徑相關研究起源於荷蘭及英國，Haasnoot et al. (2013) 提出利用調適路徑的相關概念找出較強健的決策，以解決荷蘭萊茵河三角洲於氣候變遷衝擊下面臨水資源過剩或不足的問題。英國泰晤士河口治理計畫 (London TE2100 project) 中分析了門檻 (thresholds)、決策生效所需時間 (lead time) 及決策時機點 (triggers) 等發展調適路徑時會遇到的問題，並分別建立短、中、長期因應暴潮洪水之調適路徑。倫敦市的調適策略則著重於更多不同面向，包含洪水、缺水、熱浪風險、空氣汙染、地下水議題及其他跨領域問題，然而其計畫中對於調適路徑如何應用並無進一步的說明。

Moffat et al. (2014) 回顧有關彈性式調適路徑 (flexible adaptation pathway) 之應用，其中包含美國、澳洲及紐西蘭的案例。受到泰晤士河計畫的啟發，紐約州及紐約市也應用調適路徑於調適計畫中，然而關於臨界點 (tipping points) 及觸發點 (triggers) 的判定方式目前仍未有明確的定義。大洋洲許多區域在其調適計畫中也提到調適路徑，如昆士蘭、維多利亞等地，其中澳洲 Turners Beach and Leith 地區的調適路徑最明確，共分為 3 種路徑：撤退、同時維持目前發展與自然價值、維護目前及未來發展，該行動計畫中除了策略以外也針對未來短、中期情境描述了可能的調適選項、相對的責任歸屬及每個選項的成本，其調適路徑為條列式 (Barnett et al., 2014)。

在規劃調適路徑時，需要量化調適選項的價值，才能排出調適選項的優先順序。曹榮軒 (2017) 提出以 Black-Scholes 選擇權定價模型來評估調適選項的價值，量化每個調適選項在不同時間點下，不同的調適價值，即可分析調適選項之時間價值與未來不確定性。以 Black-Scholes 選擇權定價模型建構調適路徑的最大精神，在於每一個調適選項的價值應隨著現有資訊以及不同的時間點而變化，故由調適選項組合而成的調適路徑才能在每個不同的決策點，藉由當下的觀測資訊建構最有利的調適判斷。

在建置氣候變遷調適路徑時，首先面臨調適路徑圖的縱軸與橫軸定義，縱軸多以調適策略為主 (Haasnoot, 2013)，可以清楚的讓決策者或利害相關者了解可行之調適策略，此外，也可以調適行動方案作為調適路徑圖的縱軸，比起調適策略，調適行動方案能夠提供更明確的訊息，但是在目前調適路徑的相關研究上，常常會出現策略與行動方案兩者交互出現的情形，縱軸定義不夠明確，容易造成實際執行上的混淆 (Haasnoot, 2012；Siebentritt, 2014)。在橫軸的設計上，則可以採用時間或是氣候相關參數，以時間作為橫軸的優點在於可以明確對應轉乘的時間，如圖 2-1，圖中橫軸為時間，縱軸列出不同的調適行動，每個行動之有效期可以由專家討論或模式評估；黑色垂直短線代表該調適行動之失效點，代表實施一段特定時間後，系統不能維持在可接受的風險內；圓圈代表切換至其他調適行動之可行性，也就是轉乘點。但是在有關於氣候變遷模擬得到的結果，多是以未來一段時間的平均情形來呈現，縱使藉由大氣環流模式模式有提供逐年的資料，但是這些資料在這樣的時間尺度下有極高的不確定性，這是以時間作為橫軸時會面臨到的最大挑戰。若是以氣候相關參數作為橫軸 (Werners, 2013；Maru, 2014)，則是以可以描述系統風險最主要的狀態變數，如海平面上升高度、洪水回歸頻率、熱浪發生頻率、供水系統乘載力，此類參數型的橫軸利於描述系統的狀態，可與監測系統結合，在調適路徑的規劃上達到預警以及修正的效果。

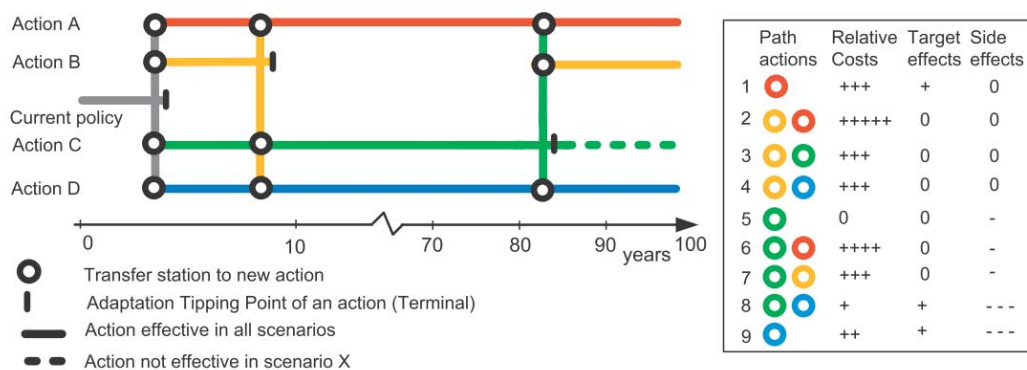
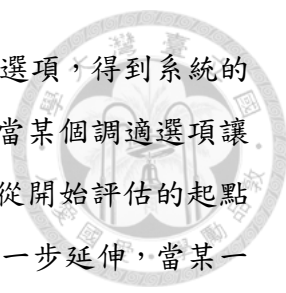


圖 2-1 調適路徑圖示意圖 (Haasnoot et al., 2013)



Haasnoot (2012) 藉由模擬各種不同的情境配合不同的調適選項，得到系統的表現，並將系統的表現分為可以接受、中等和不可接受的狀態，當某個調適選項讓系統表現達到不可接受狀態的時間點，就可稱為系統的臨界點，從開始評估的起點到達臨界點的時間，就是該調適選項的有效期。將這樣的觀念進一步延伸，當某一個調適選項到達臨界點，就可以視為該調適路徑上的轉乘點，代表該路徑已經沒有辦法讓系統維持可接受的狀態到達終點，所以必須要選擇其他的路徑。當把所有可能的調適路徑描繪出來後，可以更進一步地就每一條可行的路徑進行評估，這其中包括所花費的經費以及造成其他領域的副作用，讓最後選擇調適路徑的決策者或是利害相關者獲得足夠的資訊，選擇其中一條調適路徑做為面對氣候變遷調適未來的方針。

調適路徑分析可依循 3 個步驟：1. 找出不同的調適路徑組合；2. 找出候選調適路徑；3. 選擇最適合的調適路徑做為調適行動之依據。不同的調適路徑組合可以近似地圖的概念呈現，地圖的縱軸可能為調適策略、調適行動組合或單一調適行動，而橫軸則通常為時間、氣候變數的數值或待補足的系統服務水準缺口，若調適路徑組合之組合數目不多，或針對較小尺度的研究區域如社區等，調適路徑圖的縱軸使用單一調適行動或許較適合，可以更詳細探討每個調適行動的執行影響及適當行動時機。最後，應該將調適路徑視為整體氣候變遷規劃中的一個環節，從評估現況決定調適路徑的起點，模擬未來決定調適路徑的終點，界定調適選項決定可能的縱軸，最後進入利害相關者討論決定路徑後，輔以監測與修正。



## 第3章 研究方法

本研究應用調適能力建構流程於韌性社區供水系統，首先建構社區供水系統模式，模擬社區內民生與農業之水資源情形。接著根據社區供水風險評估方法，分析社區供水之現況與未來風險，方法中包含社區水資源評估指標系統和低頻率氣象合成模式。並以選擇權定價模型量化韌性社區供水調適選項，建立韌性社區供水調適路徑圖。後續監測與檢覈調適路徑，在調適路徑偏離原本規劃路線時，提出調適路徑修正計畫。

### 3.1 應用氣候調適六步驟於社區供水調適

科技部氣候變遷調適科技整合研究計畫以 IPCC 第五版評估報告書對於風險的定義為核心基礎，彙整國際間與國內氣候變遷調適步驟，包含聯合國氣候變遷調適政策綱領（UNDP APF）、英國氣候衝擊計畫的調適精靈（UKCIP Adaptation Wizard）、歐洲氣候調適平台的調適支援工具（CLIMATE-ADAPT Adaptation Support Tool），同時參考我國氣候變遷地方調適計畫，建立 TaiCCAT 氣候調適六步驟，以幫助組織制定調適策略或政策。本研究以社區水資源觀點，應用氣候調適六步驟：（1）界定社區供水問題與設定目標；（2）評估與分析社區供水現況風險；（3）評估與分析社區供水未來風險；（4）界定與評估社區供水調適選項；（5）規劃與執行社區供水調適路徑；（6）監測與修正社區供水調適路徑。在評估資料分析工具的建立上，除了針對上述六大步驟的流程進行定義外，亦針對了上述步驟所包含的次步驟、細部工作項目進行檢核，如表 3-1。並對各步驟中所需使用到的資料、工具或程序、產出，進行整理以提供上述六大步驟調適流程詳細資訊，以利調適計畫之建構與執行，並作為滾動修正時，重新確認調適流程與資料、工具產出完整性之檢核用途。氣候調適六步驟主要目的在於建立考量氣候變遷風險來源之調適決策步驟之執行政序，以提供決策者、一般民眾與執行團隊等了解氣候變遷調適能力建構應有之步驟，同時可做為檢核氣候變遷調適工作之參考依據。

表 3-1 韌性社區供水系統之氣候調適六步驟工作表單



主步驟	次步驟	工作項目	檢核
一、界定問題與設定目標	1.1 氣候變遷調適專門委員會之組成	1.1.1 確立地方政府部門與承辦人	
		1.1.2 組成負責之專業團隊	
		1.1.3 組成參與的社區利害關係人	
		1.1.4 確立調適專門委員會之運作方式	
	1.2 關鍵議題之界定	1.2.1 蒐集國內外氣候變遷之社區水資源議題	✓
		1.2.2 社區在地問題分析	
		1.2.3 界定擬解決的社區水資源議題及系統範圍	✓
	1.3 跨領域關聯分析	1.3.1 界定社區水資源議題之跨領域影響範圍	
		1.3.2 檢討調適專門委員會之組成	
	1.4 目標之設定	1.4.1 分析及檢討與社區水資源相關之原有策略目標	✓
		1.4.2 建立策略目標之評估項目	✓
		1.4.3 確定目標	✓
二、評估與分析現況風險	2.1 歷史事件之風險分析	2.1.1 蒐集社區水資源相關之歷史事件風險評估結果	✓
		2.1.2 鑑別熱點及風險成因	✓
	2.2 評估模式之驗證	2.2.1 水資源系統模式檢定	
		2.2.2 水資源系統模式驗證	
	2.3 利用現況氣象資料進行風險評估	2.3.1 定義社區水資源評估指標	✓
		2.3.2 輸入歷史資料進行模擬與分析	✓
2.3.3 鑑別熱點及風險成因		✓	
三、評估與分析未來風險	3.1 情境設定	3.1.1 設定氣候情境	✓
		3.1.2 設定社會經濟情境	
	3.2 評估基期風險	3.2.1 合成基期氣象資料	✓
		3.2.2 進行基期風險模擬與分析	✓



主步驟	次步驟	工作項目	檢核
	3.3 評估未來風險	3.3.1 合成未來氣象資料	✓
		3.3.2 進行未來風險模擬與分析	✓
	3.4 比較基期與未來之風險差異	3.4.1 鑑別基期與未來風險差異與成因	✓
四、界定與評估調適選項	4.1 界定調適選項	4.1.1 針對社區水資源風險來源蒐集可能的調適選項	✓
		4.1.2 蒐集社區智慧調適選項	
		4.1.3 彙整社區水資源調適選項	✓
	4.2 評估調適選項	4.2.1 擬定社區水資源調適選項評估準則	✓
		4.2.2 決定社區水資源調適選項評估準則之權重	
		4.2.3 依據各準則評估社區水資源調適選項組合	✓
		4.2.4 產出策略行動計畫	
五、規劃與執行調適路徑	5.1 規劃調適路徑	5.1.1 制定社區供水調適路徑圖	✓
		5.1.2 制定社區供水調適路徑	✓
	5.2 制定調適路徑執行計畫	5.2.1 確定分工與執行單位	✓
六、監測與修正調適路徑	6.1 制定調適路徑監測計畫	6.1.1 決定監測指標	✓
		6.1.2 決定監測方式	✓
	6.2 制定調適路徑執行檢覈計畫	6.2.1 決定檢覈指標	✓
		6.2.2 決定檢覈方式	✓
	6.3 制定調適路徑修正計畫	6.3.1 制定修正計畫	✓



### 3.1.1 界定社區供水問題與設定目標

步驟一主要目的在於界定氣候變遷下社區水資源之關鍵議題（圖 3-1），並設定社區調適目標，其下又細分為四個次步驟，依序為：1.氣候變遷調適專門委員會之組成；2.關鍵議題之界定；3.跨領域關聯分析；4.目標之設定。本研究以專業團隊角色切入，進行後續之調適工作，故不組成氣候變遷調適專門委員會，而本研究範疇為社區水資源系統，跨領域關聯分析為後續研究之討論範圍。本步驟從關鍵議題之界定開始著手，並設定研究目標，表 3-2 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。蒐集國內外氣候變遷之社區水資源相關文獻，並藉由歷史氣候災害資料庫，對應 IPCC AR5 之風險定義，以社區為治理觀點找出氣候變遷關鍵議題與原有規劃內容與目標，透過工作會議來決定調適關鍵議題與系統範圍，並探討關鍵議題之狀態與影響因子。接下來專業團隊分析及探討社區水資源原有之策略目標，提出建議之調適目標，並進一步建議評估項目與系統範圍，最後決定調適目標年與調適目標年。調適目標年之設定，將影響後續調適路徑之期程安排，同時也會影響步驟三進行未來風險評估時，系統風險之模擬時期，以及步驟四調適選項之挑選結果，為相當重要之工作項目，建議由利害關係人會議討論後設定，而本研究以社區為案例，以專業團隊角度切入，因此省略利害關係人會議。



圖 3-1 步驟一：界定問題與設定目標

表 3-2 氣候調適步驟一之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
關鍵議題之界定	蒐集國內外氣候變遷之社區水資源關鍵議題	歷史氣候災害資料庫	IPCC AR5 風險定義	社區水資源之氣候變遷關鍵議題
	界定擬解決的社區水資源關鍵議題及系統範圍	氣候變遷水資源關鍵議題之文獻	由專業團隊決定擬解決之關鍵議題	關鍵議題之狀態與影響因子
目標之設定	分析及檢討與關鍵議題相關之原有策略目標	水資源規劃報告	分析水資源之原有規劃內容與目標	專業團隊建議之調適目標
	建立策略目標之評估項目	專業團隊建議之調適目標	根據調適目標訂定評估項目	調適之評估項目與系統範圍
	確定目標	專業團隊建議之調適目標	利害關係人會議	調適目標、調適目標年

### 3.1.2 評估與分析社區供水現況風險

步驟二為評估與分析現況風險，其主要目的是利用歷史資料與模式現況模擬結果，評估系統目前面臨之風險，並探討風險來源為何（圖 3-2）。本步驟分為三個次步驟，分別為：1.歷史事件之風險分析；2.評估模擬模式之驗證；3.利用現況氣象資料進行風險模擬。本研究建構之社區供水系統模式為水平衡模式，其參數由相關文獻提供，故省略模式之檢定驗證。本步驟評估與分析社區供水系統之現況風險，表 3-3 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。彙整歷史極端氣候事件與災害事件之空間分布或影響程度，再針對風險來源屬性為危害、暴露、與脆弱度進行分類，以彙整出歷史事件之風險成因。整理模擬模式所需之歷史觀測資料，如氣象、水文、土地利用、經驗參數以及其他所需資料，以建構風險評估所需之社區供水系統模式。並根據步驟一設定之評估目標，建立社區水資源評估指標系統，以做為現況、基期與未來風險評估之分析指標，以利後續比較基期和未來風險差異。透過輸入歷史氣象資料，由社區供水系統模式進行模擬與分析，根據輸出結果計算評估指標值，並分析風險成因。

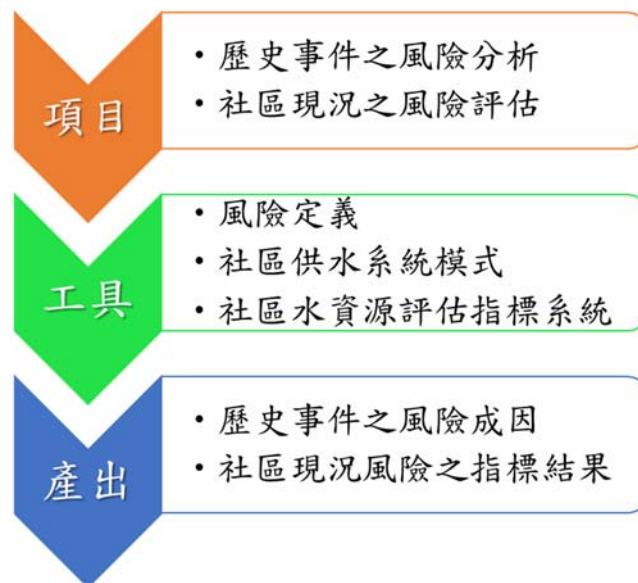


圖 3-2 步驟二：評估與分析現況風險

表 3-3 氣候調適步驟二之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
歷史事件之風險分析	蒐集關鍵議題相關之歷史事件風險評估結果	歷史極端氣候事件與災害事件資料庫	搜尋引擎	歷史極端氣候事件與災害事件之匯整
	鑑別風險成因	歷史極端氣候事件與災害事件之匯整	IPCC AR5 風險定義	區分危害、暴露、與脆弱度因子
利用現況氣象資料進行風險評估	定義社區水資源評估指標	國內外相關文獻之評估指標	評估指標之定義與計算方法	社區水資源評估指標系統
	輸入歷史資料進行模擬與分析	輸入社區供水系統模式之歷史觀測資料	社區供水系統模式、社區水資源評估指標系統	社區現況風險之指標結果
	鑑別風險成因	現況風險之指標結果	IPCC AR5 風險定義	分析現況風險之成因

### 3.1.3 評估與分析社區供水未來風險

步驟三主要目的在於利用模式與氣候情境評估基期與未來之風險，並由基期與未來風險之差異探討氣候變遷所帶來之風險（圖 3-3）。其中包含四個次步驟，分別為：1.情境設定；2.評估基期風險；3.評估未來風險；4.比較基期與未來之風險差異。表 3-4 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。評估基期風險與現況風險之流程相似，主要差別在評估基期風險時，使用氣象合成模式產生之基期氣象資料進行模擬，與未來風險比較時有相同的基準，避免繁衍資料與歷史資料間的差異，造成評估結果的誤差。評估未來風險部份，藉由大氣環流模式（General circulation model, GCM）的輸出結果，並配合氣象站資訊與歷史觀測資料，挑選出合適之 GCM 模式，根據基期氣候平均特性與未來氣候變遷情境，由 GCM 模式提供未來氣候之統計特性，再透過低頻率氣象合成模式產生基期與未來氣象資料。將氣象資料輸入評估模式，計算基期風險與未來風險之指標結果，比較基期與未來風險差異。

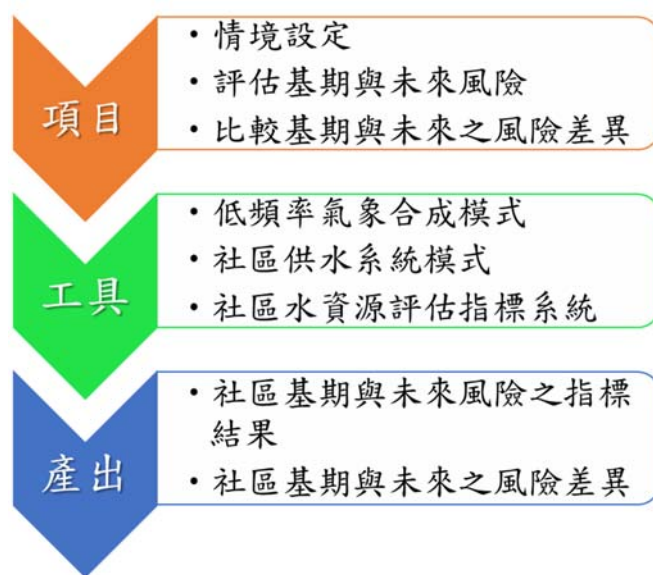


圖 3-3 步驟三：評估與分析未來風險

表 3-4 氣候調適步驟三之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
情境設定	設定氣候情境	GCM 模式輸出結果	GCM 分析與挑選工具	選定之 GCM 未來氣候情境
評估基期風險	合成基期氣象資料	基期氣候情境與氣象合成模式所需之參數	氣象合成模式	合成之基期氣象資料
	進行基期風險模擬與分析	基期之合成氣象資料	社區供水系統模式、社區水資源評估指標系統	基期風險之指標結果
評估未來風險	合成未來氣象資料	基期統計氣候特性、未來氣候情境	氣象合成模式	未來氣象繁衍資料
	進行未來風險模擬與分析	未來氣象合成資料	社區供水系統模式、社區水資源評估指標系統	未來風險之指標結果
比較基期與未來之風險差異	鑑別基期與未來風險差異與成因	基期、未來風險之指標結果	IPCC AR5 風險定義	現況與未來風險差異

### 3.1.4 界定與評估社區供水調適選項

步驟四根據風險來源，界定與評估社區供水調適選項，藉此挑選可行之調適選項，以利後續調適路徑規劃（圖 3-4）。本步驟可細分為兩個次步驟：1. 界定調適選項；2. 評估調適選項。表 3-5 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。根據 IPCC AR5 之風險定義，針對研究區域之關鍵議題，以及步驟一設定之調適目標與系統範圍，蒐集相關歷史災害事件，了解缺水事件發生之頻率和範圍，分析其原因並對應風險類型，蒐集並彙整對應之調適選項。並根據風險類型（危害、暴露、與脆弱度）分類，以作為調適選項之挑選依據，同時分析現況與未來風險成因，彙整出對應風險成因之調適選項清單。最後經專業團隊利用評估準則，量化調適選項之效用，進行後續調適路徑規劃。

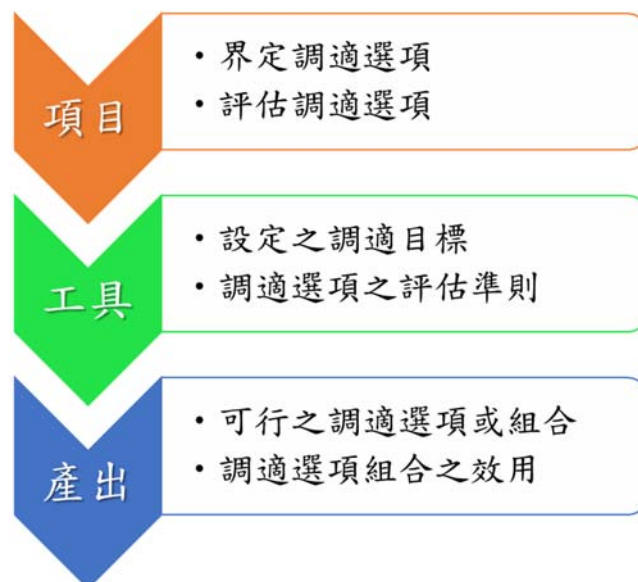


圖 3-4 步驟四：界定與評估調適選項

表 3-5 氣候調適步驟四之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
界定調適選項	針對社區水資源風險來源蒐集可能的調適選項	氣候變遷調適相關報告	風險定義	對應風險成因之調適選項列表
	彙整社區水資源調適選項	對應風險成因之調適選項列表	專業團隊評估	可行之調適選項
評估調適選項	擬定社區水資源調適選項評估準則	可行之調適選項	由調適目標定義評估準則	調適選項之評估準則
	依據各準則評估社區水資源調適選項組合	彙整之調適選項與調適選項之評估準則	社區水資源評估指標系統、調適選項之相關文獻	調適選項之效用



### 3.1.5 規劃與執行社區供水調適路徑

步驟五目的在於規劃與制定調適選項之執行路徑，並且制定出實際執行的順序與時程（圖 3-5）。本步驟共包含兩項次步驟為：1. 規劃調適路徑；2. 制定調適路徑執行計畫，表 3-6 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。調適路徑圖為近年來國際上對於執行氣候調適行動的新觀念，其概念在於透過圖形化之方式，把可能採行之調適選項組合彙整於單一圖形中。由於可行的調適選項眾多，因此產生的路徑，可能具備多種選擇，若將可能的路徑繪製成圖，則將產生類似大眾運輸之路線圖，可在不同調適路徑中轉換。調適路徑圖的重點，除在於安排調適路徑上不同調適選項之先後順序外，亦須安排調適選項的執行時間。然而實務上，如何評估各個調適選項的先後順序，才是建構調適路徑所需克服之問題。目前國際上已經有許多研究機構提出調適路徑的概念，然而對於如何建構調適路徑，在 TaiCCAT 氣候調適六步驟中僅進行概念性之陳述，尚缺乏一套系統性建構調適路徑的方法，本研究應用選擇權定價模型評估調適選項的時間價值與未來不確定性，透過量化調適選項價值，建立韌性社區之調適路徑圖，再經由利害關係人會議決定最終調適路徑。

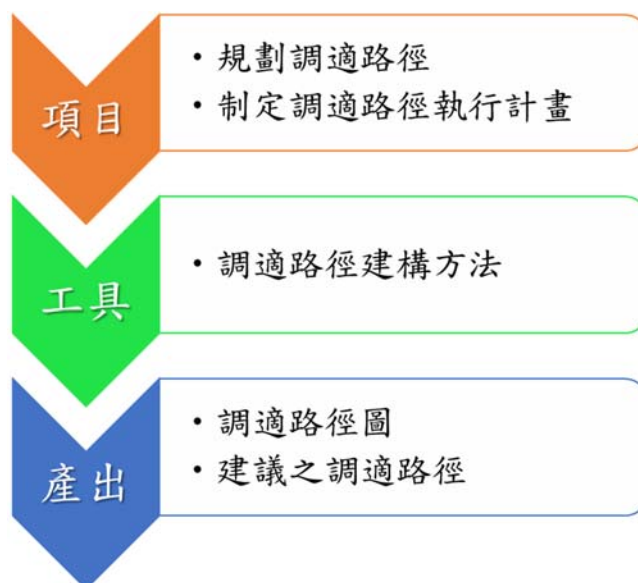


圖 3-5 步驟五：規劃與執行調適路徑

表 3-6 氣候調適步驟五之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
規劃調適路徑	制定社區供水調適路徑圖	可行之調適選項	調適路徑建構方法	調適路徑圖
	制定社區供水調適路徑	調適路徑圖	利害關係人會議	最終之調適路徑
制定調適路徑執行計畫	確定分工與執行單位	調適路徑細節	調適路徑執行計畫	確定調適路徑內所有方案之負責與執行單位

### 3.1.6 監測與修正社區供水調適路徑

步驟六目的在於針對步驟五產生之調適路徑進行監測，以了解與評估整體調適行動是否順利依循預定之調適路徑執行，以及調適路徑之執行成果是否符合預期，監測結果將提供調適路徑的修正建議（圖 3-6）。本步驟共包含三項次步驟依序為：1.制定調適路徑監測計畫；2.制定調適路徑執行檢覈計畫；3.制定調適路徑修正計畫，表 3-7 為各次步驟及其工作項目之資料、工具或程序、產出。調適路徑監測計畫針對關注之系統（例如供水系統、排水系統等）建立監測指標，包含風險監測和調適措施監測，風險監測觀察影響系統狀態相關因子的變化情況；而調適措施監測則是關注影響調適選項效用之相關因子。調適路徑監測計畫首要工作在於針對欲監測的系統決定監測項目，再訂定監測方式、監測頻率及監測單位。調適檢覈計畫針對調適選項的執行期程進行列表，檢覈調適選項的執行進度，以及調適選項是否可達成預定規劃之調適成效。根據調適路徑監測計畫與調適路徑執行檢覈計畫，決定是否需要修正調適路徑，若系統狀態已偏離原本預定的調適路徑，應制定調適路徑修正計畫，以確保達成調適目標。



圖 3-6 步驟六：監測與修正調適路徑

表 3-7 氣候調適步驟六之資料、工具與產出表

次步驟	工作項目	資料	工具或程序	產出
制定調適路徑 監測計畫	決定監測指標	調適目標、評估指標系統	監測指標之定義與評估方法	監測指標（風險監測及調適措施監測）
	決定監測方式	監測指標	制定監測方式、監測頻率及監測單位	調適路徑監測計畫
制定調適路徑 執行檢覈計畫	決定檢覈指標	調適選項執行期程、調適目標	評估調適選項執行進度與成效	檢覈清單
	決定檢覈方式	檢覈清單	制定檢覈方式、檢覈時間	調適路徑執行檢覈計畫
制定調適路徑 修正計畫	制定修正計畫	調適路徑監測計畫、調適路徑執行檢覈計畫	相關主管機關	調適路徑修正計畫

### 3.2 建構社區供水系統模式

透過蒐集國內外社區水資源關鍵議題，因氣候變遷造成極端天氣發生頻率提高，而社區供水系統因為缺乏系統性的管理及規劃，在氣候變遷衝擊下最為脆弱，首先需要分析社區供水系統與外部系統的關係，圖 3-7 為分析韌性社區與區域供水系統關係之流程圖，首先確認韌性社區的所在位置及周圍環境，蒐集韌性社區農業及民生供水來源，透過分析其所屬之區域水資源系統，確認區域水資源系統的供給範圍，並分析其運轉規則，確認韌性社區與區域供水系統之間的關係。



圖 3-7 分析韌性社區與區域供水系統關係之流程

由於氣候變遷對供水系統帶來嚴重衝擊，建立同時兼具時間及空間上使用彈性的分散式供水系統成為當務之急，如收集雨水或將經由濕地淨化處理後之水資源回收加以利用等。而農村社區相較於都市，有更多空間可設置雨水儲集系統或人工濕地。本研究探討農村社區分散式供水系統之效用，包含雨水儲集系統及人工濕地等，將此分散式供水系統結合住宅及農業用水情況之考量，達成充分利用水資源之目的。社區供水系統模式主要包含五個部分，社區住宅儲存系統、雨水儲集系統、人工濕地、水稻田以及地表逕流。韌性社區用水依據用途可分為生活用水及農業用水兩大項，農業用水部分由外部農業供水系統提供，考量社區地表逕流為一可用之水資源，將社區地表逕流蒐集後排入人工濕地，經由人工濕地處理之雨水和逕流，其再生水可做為農業灌溉用水使用，降低農業灌溉系統的負荷，而節省下來的灌溉用水可提供工業或民生使用，以強化社區供水系統在氣候變遷下的回復力；家庭生活用水依照使用之情形，可分為接觸用水與非接觸用水，其中接觸用水主要用於洗

澡、洗衣、洗滌、廚房等用途，因與人體接觸，需要較高之水質標準，由住宅儲存系統供應，而住宅儲存系統負責存放外部民生供水系統提供之用水。非接觸用水如沖廁、洗車等用途，需要之水質標準較低，可由雨水儲集系統提供，藉此提高社區雨水使用率。社區供水系統如圖 3-8 所示，從圖中可以看到社區內各系統之間的連接關係。

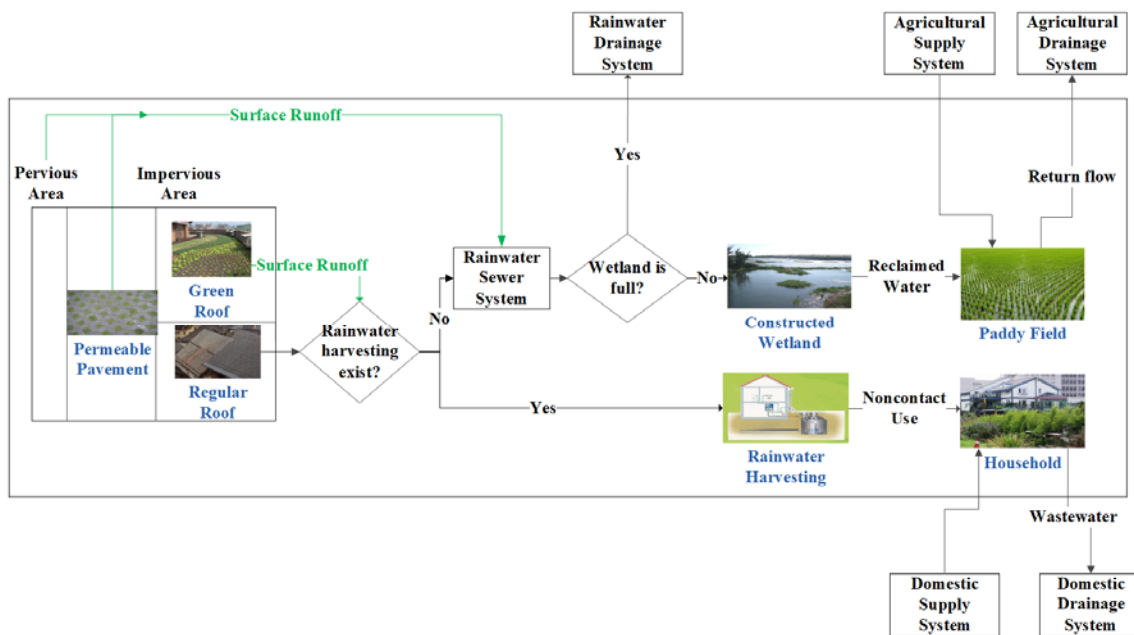


圖 3-8 韌性社區供水系統架構

### 3.2.1 人工濕地

人工濕地仿效天然濕地，利用自然淨化機制淨化水中污染物，亦即將生態工程技術應用在污水處理上的一種自然淨化程序，相較於傳統之廢污水處理系統，具有省能源、省資源、低成本、無二次污染、操作維護簡便等優點，又能提供生態棲息空間、生態復育、自然景觀、凝聚居民意識等功能，因此濕地在污染處理及生態系統中皆扮演著重要角色。人工濕地對水資源的再生能力具有極佳之貢獻。而人工濕地處理污水之效率及程度，主要與污水於濕地中之水力停留時間（Hydraulic Retention Time, HRT）有關，水力停留時間指的是進流水及出流水的平均流量（Kadlec and Knight, 1996），根據相關研究建議，人工濕地之設計水力停留時間應介於 5~14 天為佳（Wood, 1995）。人工濕地主要之入流來源為雨水與社區地表逕流，人工濕地處理過之再生水將用於灌溉農田。以濕地作為控制體積，將所有影響

濕地水平衡之項目列出，濕地水平衡之（+）項為降雨量、逕流，而（-）項則是蒸發散、溢流量。濕地水平衡方程式如下：

$$V_{W,t+1} = V_{W,t} + R_{W,t} + SR_t + [O_{R,t}] - ET_{W,t} - O_{W,t} \quad (3-1)$$

其中  $V_{W,t}$  為人工濕地之體積 ( $m^3$ )， $R_{W,t}$  為直接降雨量 ( $m^3$ )， $SR_t$  為社區地表逕流量 ( $m^3$ )， $O_{R,t}$  為雨水儲集系統溢流量 ( $m^3$ )， $[ ]$ 符號表示此項存在於雨水儲集系統設置時， $ET_{W,t}$  為蒸發散量 ( $m^3$ )， $O_{W,t}$  為人工濕地溢流量 ( $m^3$ )，亦即可灌溉農田之再生水量 ( $m^3$ )。因人工濕地之底層為不透水面，因此忽略滲漏量。蒸發散為濕地水平衡之主要損失項，本研究使用 Hamon 方程式計算潛能蒸發散量，並由潛能蒸發散量乘上作物覆蓋係數得到蒸發散量，如式 (3-2)。

$$ET_{W,t} = k_c \times PET_t \times A_W \times 10^{-2} \quad (3-2)$$

$$PET_t = \frac{0.021 \times H_t^2 \times e_{s,t}}{T_t + 273.2} \quad (3-3)$$

$$e_{s,t} = 33.8639[(0.00738 \times T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8 \times T_t + 48| + 0.001316] \quad (3-4)$$

其中  $k_c$  為人工濕地之覆蓋係數， $PET_t$  為潛能蒸發散量 ( $cm/day$ )， $A_W$  為人工濕地表面積 ( $m^2$ )， $H_t$  為每日平均日照時間 ( $hour$ )， $e_{s,t}$  為  $T_t$  下之飽和蒸汽壓 ( $kPa$ )， $T_t$  為平均日溫 ( $^{\circ}C$ )。超過人工濕地容量之水量將溢流出去，作為灌溉農田使用，人工濕地入流項除了雨水和地表逕流，當裝設雨水儲系統時，過量雨水導致雨水儲系統產生溢流量，將排至人工濕地，轉作農業使用。

$$O_{W,t} = \max(0, V_{W,t} + R_{W,t} + SR_t + [O_{R,t}] - ET_{W,t} - K_W) \quad (3-5)$$

其中  $K_W$  為人工濕地之容量 ( $m^3$ )。

### 3.2.2 住宅儲存系統

住宅儲存系統部分為了確保居民的生活品質，必須確保家庭生活供水無虞，為預估台灣家庭用水的使用情形，本研究蒐集台灣家庭生活之用水情形，台灣家庭依據用途可分為洗澡 (20%)、洗衣 (24%)、洗滌 (8%)、廚房 (16%)、沖廁 (24%) 和其他 (8%)，如圖 3-9 (水利署節約用水資訊網)，顯示台灣家庭生活用水情形，每人每日用水量約為 250 公升，68% 的家庭用水與人體接觸，其餘 32% 為非接觸用水 (內政部營建署，2012)。與人體接觸之用水用途，需要由住宅儲存系統提供之



高水質用水，住宅儲存系統主要儲存外部民生供水系統提供之高水質供水，以提供生活用水之接觸用水使用，剩餘的 32% 非接觸用水，則可由雨水儲集系統供應。

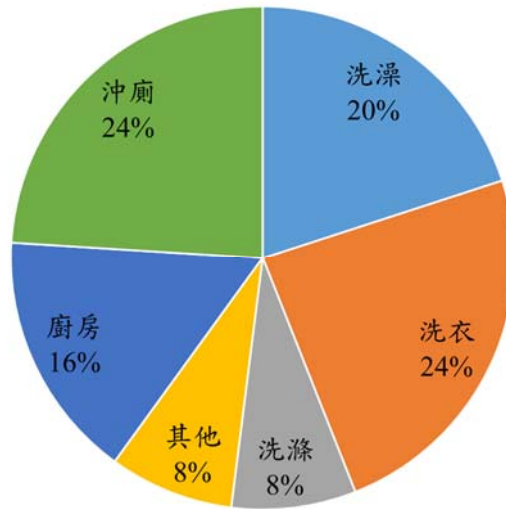
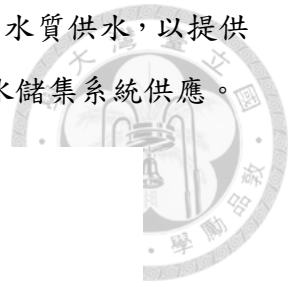


圖 3-9 台灣家庭生活用水情形

此外，當雨水儲集系統無法供給生活次級用水時，住宅儲存系統須提供生活次級用水，也就是生活用水需求扣除雨水儲集系統提供之生活次級用水，即為住宅儲存系統之供水量。

$$V_{H,t+1} = V_{H,t} + S_t - U_{H,t} - Y_t \quad (3-6)$$

其中  $V_{H,t}$  為住宅儲水系統之體積 ( $m^3$ )， $S_t$  為外部民生供水系統提供住宅儲存系統之供水量 ( $m^3$ )， $U_{H,t}$  和  $Y_t$  分別為由住宅儲存系統提供之高水質與低水質用水 ( $m^3$ )。

$$S_t = \begin{cases} 0 & \text{otherwise} \\ \min (S_{\max}, K_H - V_{H,t} + U_{H,t} + Y_t) & \text{if } V_{H,t} - U_{H,t} - Y_t \leq S_T \end{cases} \quad (3-7)$$

$$U_{H,t} = \min (V_{H,t}, D_{H,t}) \quad (3-8)$$

$$Y_t = \max[0, \min (D_{L,t} - U_{L,t}, V_{H,t} - U_{H,t})] \quad (3-9)$$

其中  $S_{\max}$  為外部民生供水系統之最大供水量 ( $m^3$ )， $K_H$  為住宅儲存系統之容量 ( $m^3$ )， $S_T$  為引水門檻 ( $m^3$ )， $D_{H,t}$  為民生之高水質需求， $D_{L,t}$  為民生之低水質需求 ( $m^3$ )， $U_{L,t}$  為雨水儲集系統供應民生之低水質用水 ( $m^3$ )。



### 3.2.3 雨水儲集系統

雨水儲集系統水來源為屋頂上收集到的雨水，利用居住空間收集的雨水，經由過濾設施處理後，提供非接觸用水使用，供應馬桶沖洗、綠地澆灌、景觀水池、地板清潔等用途，可使降至建物的雨水能夠有效的回收再利用，節省寶貴的水資源，同時雨水儲集系統也可進一步減少合流污水的產生，降低社區排水系統因雨水大量進入所造成的水患，具有減少洪峰流量、減輕污染物負荷的好處。雨水儲集系統之水源為一般屋頂或綠屋頂所匯集之雨水，儲存後供應民生之低水質用水。

$$V_{R,t+1} = V_{R,t} + R_{R,t} + [GR_t] - O_{R,t} - U_{L,t} \quad (3-10)$$

其中  $V_{R,t}$  為雨水儲集系統之體積 ( $m^3$ )， $R_{R,t}$  為一般屋頂收集之雨水 ( $m^3$ )， $GR_t$  為綠屋頂提供給雨水儲集系統之逕流量 ( $m^3$ )， $[ ]$  符號表示此項存在於綠屋頂裝設時。雨水儲集系統之效用主要由蒐集之雨水量決定，蒐集之水量由降雨量及屋頂面積決定。雨水儲集系統模式假設先使用再溢流 (yield after spill, YAS)，表示雨水加上雨水儲集系統原有之體積，扣除雨水儲集系統之容量，即為溢流量，如式 (3-11)。

$$O_{R,t} = \max (0, V_{R,t} + R_{R,t} + [GR_t] - K_R) \quad (3-11)$$

$$U_{L,t} = \min (D_{L,t}, V_{R,t} + R_{R,t} + [GR_t] - O_{R,t}) \quad (3-12)$$

其中  $K_R$  為雨水儲集系統之容量 ( $m^3$ )。

雨水儲集系統做為社區的分散式供水系統，而對於供水系統而言，儲存容量是重要的關鍵因子，連續尖峰演算法常用於規劃水庫之容量，國外也有研究使用連續尖峰演算法評估雨水儲集系統之容量 (Jothiprakash et al., 2009)，但台灣年雨量約為世界平均值的 2.6 倍，若是以連續尖峰演算法來規劃容量，將會導致高估的情形，過大的儲存容量造成成本效益低下。本研究提出評估方法決定合適之雨水儲集系統容量，考量雨水儲集系統用來供應家庭之低水質需求，因此以低水質需求和屋頂蒐集雨量之間的差值，分析缺水事件，若能在雨水過多時儲備雨水，以供降雨偏低的時期使用。圖 3-10 之斜線區域表示未能滿足低水質需求之缺水事件，如果雨水儲集系統能滿足這些缺水事件，就能有效提高家庭節水率。雨水儲集系統之容量利用以下步驟分析：(1) 將缺水事件由小到大排序；(2) 決定雨水儲集系統之供水可靠度 ( $p\%$ )，例如 50% 或 75%；(3) 根據選擇之供水可靠度，對應排序之缺水量，找出超越機率等於  $p\%$  之容量大小。

$$NRD_i = \sum_{t=1}^D (DL - R_{R,t}) \quad (3-13)$$

其中  $NRD_i$  為低水質需求之缺水量 ( $m^3$ )， $DL$  為家庭之低水質需求，約佔 32% 的家庭需水量 ( $m^3$ )， $R_{R,t}$  為屋頂蒐集之雨水體積 ( $m^3$ )。

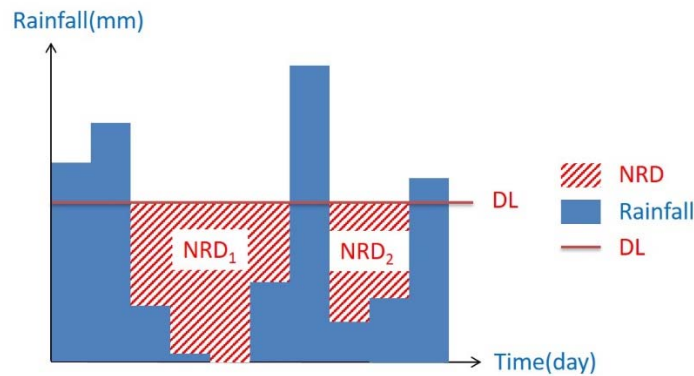


圖 3-10 低水質需求之缺水量

### 3.2.4 水稻田

對於耕種期間之水稻田，其物理水平衡近似於人工濕地，但兩者目的不同，農田以生產為目的，而人工濕地則以污水處理或其他生態服務為目的，因此本研究根據是否具有生產目的來區分農田與人工濕地。作物產量對於韌性社區是關鍵議題，為了有穩定之糧食生產，有必要建立模式以推估灌溉需水量，模式利用田間水平衡之觀念所建構，並且針對水田灌溉特性建立一灌溉用水評估模式。農田之主要利用水源來自於直接降雨與外部農業供水系統。灌溉需水量主要用於滿足作物需水量及輸水損失，作物需水量即為作物蒸發散量，也是田間需水量，而作物蒸發散量可以利用潛能蒸發散量及作物係數估算。本研究利用 Hamon 公式計算作物之潛能蒸發散量。

在灌溉時，灌溉水量除了必須滿足作物的需水量之外，必須提供額外的水量使水稻田的湛水深 ( $D_t$ ) 達到一定高度，根據不同耕作方式，每個時期水稻田中所需要的湛水深都有不同，而不同生長期時作物也會有不同之作物係數。為了決定蒸發散計算中之作物係數及湛水深，需要估計作物生長期。因溫度對作物有相當大的影響，本研究使用累積生育度數法來估計作物生長期及其相對應之作物係數及湛水深。超過基本生育所需溫度之累積溫度量與作物生長日程具有高度相關性，作物生長期可由累積生育度數法 (accumulated growing degree days, AGDD) 來決定。作物係數主要依據不同的生長期來做區分，作物生長期則是以累積的生育度數來決

定。下式代表生育度數的計算方式，由日均溫減去基本生育溫度來計算累積溫度量。表 3-8 可查出水稻不同時期對應之累積生育度數、一期作與二期作的作物係數以及湛水深（連宛瑜，2000）。

$$AGDD_t = \sum (T_t - T_b) \quad (3-14)$$

其中  $AGDD_t$  為累積生育度數 ( $^{\circ}C$ )， $T_t$  為日平均空氣溫度 ( $^{\circ}C$ )，而  $T_b$  為基本生育溫度 ( $^{\circ}C$ )。

表 3-8 水稻不同生長時期之生育度數、作物係數及湛水深

生育天數	生育階段	累積生育度數 ( $^{\circ}C$ )	一期作 作物係數	二期作 作物係數	湛水深 (cm)
1~15	插秧期	185	0.5	0.9	6~8
16~30	分蘗初期	381	0.8	1.2	4~6
31~45	分蘗末期	589	1.2	1.5	排水 (0)
46~60	開花初期	808	1.3	1.6	5~10
61~75	開花末期	1032	1.3	1.5	5~10
76~90	成熟初期	1259	1.2	1.3	5~10
91~105	成熟中期	1487	1	1	2~3
106~120	成熟末期	1715	0.7	0.6	0

為合理模擬水稻田水平衡關係，以土壤表面為分界，水稻田分為兩層(圖 3-11)。第一層為土壤表面之上，其水體積為  $V_{P1,t}$ ，第二層為土壤表面之下，其水體積為  $V_{P2,t}$ ，以下為水稻田之水量平衡方程式：

$$V_{P1,t+1} = V_{P1,t} + R_{P,t} + O_{W,t} + IR_t - ET_{1,t} - Inf_t - O_{P,t} \quad (3-15)$$

$$V_{P2,t+1} = V_{P2,t} + Inf_t - ET_{2,t} - SP_t \quad (3-16)$$

其中  $V_{P1,t}$  為水稻田土壤表面以上之水量 ( $m^3$ )， $R_{P,t}$  為水稻田之直接降雨量 ( $m^3$ )， $IR_t$  表示由外部農業供水系統提供的灌溉水量 ( $m^3$ )， $ET_{1,t}$  和  $ET_{2,t}$  分別為  $V_{P1}$  與  $V_{P2}$  的蒸發散量 ( $m^3$ )， $Inf_t$  為入滲量 ( $m^3$ )， $O_{P,t}$  為水稻田溢流量 ( $m^3$ )， $V_{P2,t}$  為水稻田土壤表面以下之體積含水量 ( $m^3$ )， $SP_t$  為滲漏量 ( $m^3$ )。

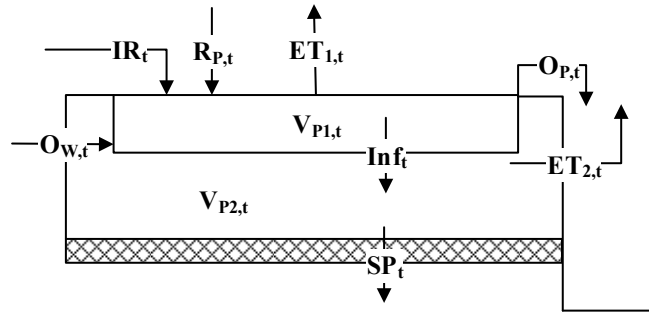


圖 3-11 水稻田水平衡示意圖

外部農業供水量提供水稻田所需之水量，為了合理估計實際外部農業供水系統之灌溉供水量，由外部農業供水系統所能提供之最大供水量，並考量運輸過程中輸水之損失 (Coef<sub>L</sub>)，與田間需水量相比，取最小值即為外部農業供水系統提供的灌溉水量，如下式所示。

$$IR_t = \min \left( IS_{\max} / Coef_L, FWD_t \right) \quad (3-17)$$

其中  $IS_{\max}$  為外部農業供水系統之最大供給量 ( $m^3$ )， $Coef_L$  為農業灌溉系統之輸水損失係數， $FWD_t$  為田間需水量 ( $m^3$ )。水稻田進入休耕或非生長季不需維持湛水深，其水平衡式與生長期不同，休耕及非生長季時，其田間需水量為零。而田間需水量是用來滿足蒸發散、維持土壤表面以上之湛水深和保持土壤飽和，以式(3-18)表示。而有效降雨和人工濕地提供之再生水，可減少田間需水量之需求。在方程式(3-19)中，有效降雨由直接降雨量減去溢流量而得。

$$FWD_t = \begin{cases} 0 & \text{otherwise} \\ \max \left( 0, ET_{1,t} - R_{pe,t} + C_{p1,t} + SWD_t - O_{w,t} \right) & \text{growing season} \end{cases} \quad (3-18)$$

$$R_{pe,t} = \max \left( 0, R_{p,t} - O_{p,t} \right) \quad (3-19)$$

$$C_{p1,t} = \max \left( 0, D_t \times A_p - V_{p1,t} \right) \quad (3-20)$$

其中  $R_{pe,t}$  為有效降雨量 ( $m^3$ )， $C_{p1,t}$  為維持湛水深之需水量 ( $m^3$ )， $SWD_t$  為土壤層之需水量 ( $m^3$ )， $D_t$  為當時水稻田所需之湛水深度 (m)， $A_p$  為水稻田面積 ( $m^2$ )。土壤層之需水量用來滿足蒸發散量、滲漏及保持土壤飽和含水量，以式(3-21)表示，而土壤層之需水量是滿足蒸發散、滲漏並維持土壤飽和，但土層實際需水量受限於最大可入滲量。另外，土壤飽和含水量由孔隙率和凋萎點來決定。

$$SWD_t = \begin{cases} 0 \\ \min (Inf_{max}, ET_{2,t} + SP_t + C_{P2,t}) \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \text{growing season} \end{array} \right\} \text{otherwise} \quad (3-21)$$

$$Inf_{max} = K_s \times 24 \times 10^{-2} \times A_p \quad (3-22)$$

$$C_{P2,t} = \max (0, V_{P2,max} - V_{P2,t}) \quad (3-23)$$

$$V_{P2,max} = (\phi - WP) \times h_{soil} \times A_p \quad (3-24)$$

其中  $Inf_{max}$  為最大之可入滲量 ( $m^3$ )，由飽和水力傳導度計算， $C_{P2,t}$  為土壤表面以下之儲水量 ( $m^3$ )， $K_s$  為飽和水力傳導度 ( $cm/hour$ )， $V_{P2,max}$  為土壤表面以下之最大含水量 ( $m^3$ )， $\phi$  為孔隙率， $WP$  為凋萎點， $h_{soil}$  為土壤層深度 ( $m$ )。

作物蒸發散量由潛能蒸發散量乘上作物係數以決定，如式 (3-25) 所示。本研究假設蒸發散由土壤表面以下的含水量優先損失，如式 (3-26) 所示。若是土壤表面以下之含水量不足以提供蒸發散量，則由土壤表面以上之水提供，如式 (3-27) 所示。

$$ET_{P,t} = k_{c,t} \times PET_t \times A_p \times 10^{-2} \quad (3-25)$$

$$ET_{2,t} = \min (ET_{P,t}, V_{P2,t}) \quad (3-26)$$

$$ET_{1,t} = \min (ET_{P,t} - ET_{2,t}, V_{P1,t} + R_{P,t} + O_{W,t}) \quad (3-27)$$

其中  $ET_{P,t}$  為作物蒸發散量 ( $m^3$ )， $k_{c,t}$  為不同生長時期之作物係數。在  $V_{P1}$  及  $V_{P2}$  之間的入滲量由土壤表面以上之水量和土壤層之需水量決定，如式 (3-28) 所示。湛水深不可超過田埂高度 (排水高度)，超過部分必須排出，即為水稻田溢流量如式 (3-29) 所示。

$$Inf_t = \min (V_{P1,t} + R_{P,t} + O_{W,t} - ET_{1,t}, SWD_t) \quad (3-28)$$

$$O_{P,t} = \max (0, V_{P1,t} + R_{P,t} + O_{W,t} - ET_{1,t} - Inf_t - h_D \times A_p) \quad (3-29)$$

其中  $h_D$  為排水高度 ( $m$ )。

### 3.2.5 地表逕流

SWMM 可模擬雨水降落地面後，流入排水系統前的水量變化歷線，其將實際的集水區概念化為一矩形之集水區，坡度均一且流向垂直集水區寬度。集水區的地表逕流是以非線性蓄水模式表示，由降雨、入滲損失、蒸發散損失描述隨著時間地表逕流的變化量，當雨水降落地面後，其降雨強度超過地表入滲容量時，地面凹陷處將開始積水，而部分水會蒸發散，當積水達窪蓄飽和容量時，水便溢出而形成地表逕流，SWMM 地表逕流模式中的入滲率運算提供三種入滲方法，可依使用者需求選擇，分別為荷頓公式(Horton's Equation)、格林-安普公式(Green-Ampt Equation)及美國水土保持局入滲公式(SCS Curve Number Method)。而進入排水系統中的雨量則可由流量演算描述雨量在管渠中的流動過程，其有穩定流演算、運動波演算及動力波演算可供選擇。

SWMM 由美國環境保護署(U.S.EPA)自 1971 年開發以來，已有發展成熟之模組可精確模擬水流進入下水道系統之水流狀況，在版本 SWMM 5.0 後加入 LID 元件以供使用者選擇，包括透水鋪面、雨水花園、雨水儲集、草溝及植生滯留池等，其可分為表面層、鋪面層、土壤層、儲水層及排水層五種分層，藉由不同層的組成及各層參數來呈現 LID 設施之物理特性(Rossmann, 2010)。SWMM 中各 LID 設施之分層如表 3-9。部分 LID 設施，例如雨水花園和草溝之分層較少，而透水鋪面有較多的分層，因此利用透水鋪面來介紹各分層之間的水文過程，各分層之間的出入流如圖 3-13 所示。

SWMM 5.1.012 中內建的 LID 設施有 8 種，分別為生物滯留池、雨水花園、綠屋頂、入滲溝、透水鋪面、雨水儲集桶、屋面雨水斷接及草溝。在 SWMM 裡，LID 設施由表層、鋪面層、土壤層、儲水層及排水層，五種分層中組合搭配而成，其中有固定組合的分層及依使用者選擇是否使用的分層，各 LID 設施分層組成整理於表 3-9，例如透水鋪面中，表面層、鋪面層、儲水層為固定分層，而土壤層和排水層則是選擇性分層，如圖 3-12，綠屋頂及透水鋪面中排水層加了星號，表示該層可依使用者需求決定是否使用。

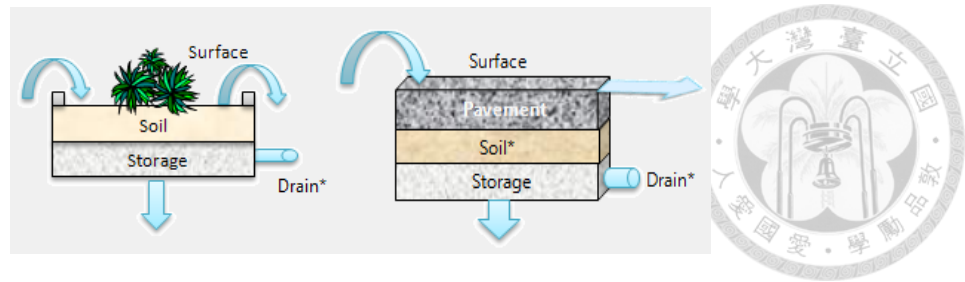


圖 3-12 SWMM 中綠屋頂和透水鋪面之分層 (SWMM manual, 2015)

表 3-9 SWMM 中 LID 設施之分層 (SWMM manual, 2015)

LID 設施	表面層	鋪面層	土壤層	儲水層	排水層
生態滯留池 (Bio-retention cell)	V	--	V	V	*
雨水花園 (Rain garden)	V	--	V	--	--
綠屋頂 (Green roof)	V	--	V	V	V
入滲溝 (Infiltration trench)	V	--	--	V	*
透水鋪面 (Permeable pavement)	V	V	*	V	*
雨水儲集系統 (Rainwater harvesting system)	--	--	--	V	V
屋面雨水斷接 (Rooftop disconnection)	V	--	--	--	V
草溝 (Vegetative swale)	V	--	--	--	--

V: required; \*: optional

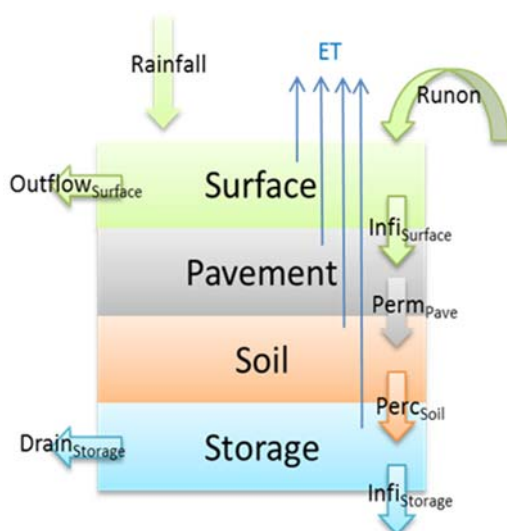


圖 3-13 透水鋪面分層示意圖

在 SWMM 使用手冊中並未針對 LID 設施模擬多做說明，本研究根據 SWMM 原始碼，整理出 LID 之方程式，以下方程式將對各分層之間的流動項目進行介紹，表面層接收雨水及地表逕流，表面層的水透過入滲至鋪面層，而蒸發散和出流導致表面層的水量損失，而蒸發散量計算由 Hargreaves 公式計算，出流量則由曼寧公式計算；鋪面層接收來自表面層的入滲後，透過蒸發散和入滲損失水量；土壤層接受來自鋪面層的入滲後，經由蒸發散和滲漏損失水量，滲漏速率由達西定率計算；儲存層則是接受土壤層之入滲後，經由蒸發散、入滲與出流損失水量，出流部分由排水系統管線流出。

$$\text{Infil}_{\text{Surface}} = \text{Inflow}_{\text{Surface}} + \frac{V_{\text{Surface}}}{T_{\text{step}}} \quad (3-30)$$

$$\text{Perm}_{\text{Pave}} = \min[k_{\text{sat,Pave}} \times (1 - \text{CF}_{\text{Pave}}), \text{Perm}_{\text{Pave,max}}] \quad (3-31)$$

$$\text{PerC}_{\text{Soil}} = \min[k_{\text{sat,Soil}} \times \exp^{-(\Phi-\theta)} \times K_{\text{slope}_{\text{Soil}}}, \text{PerC}_{\text{Soil,max}}] \quad (3-32)$$

$$\text{Infil}_{\text{Storage}} = \min[k_{\text{sat,Storage}} \times (1 - \text{CF}_{\text{Storage}}), \text{Infil}_{\text{native,max}}] \quad (3-33)$$

$$\text{Drain}_{\text{Storage}} = C_d \times H^\eta \quad (3-34)$$

$$\text{Outflow}_{\text{Surface}} = \min\left[\frac{1.49}{n} \times (D_{\text{Surface}} - d_{\text{Surface}})^{\frac{5}{3}}, \frac{D_{\text{Surface}} - d_{\text{Surface}}}{T_{\text{step}}}\right] \quad (3-35)$$

其中  $\text{Infil}_{\text{Surface}}$  為表面層到鋪面層之入滲 (m/day)， $\text{Inflow}_{\text{Surface}}$  為表面層之入流 (m/day)， $V_{\text{Surface}}$  為表面層之單位體積 (m)， $T_{\text{step}}$  為時間間格 (day)， $\text{Perm}_{\text{Pave}}$  為鋪面層到土壤層之入滲 (m/day)， $k_{\text{sat,Pave}}$  為鋪面層之飽和水力傳導率 (m/day)，



$CF_{Pave}$  為鋪面層之壅塞因子， $Perm_{Pave,max}$  鋪面層之最大入滲 (m/day)， $Perc_{Soil}$  為土壤層到儲水層之滲漏 (m/day)， $k_{sat,Soil}$  為土壤層之飽和水力傳導率 (m/day)， $\Phi$  為土壤層之孔隙率， $\theta$  為土壤層之含水量， $K_{slope_{soil}}$  為土壤層之傳導坡度， $Perc_{Soil,max}$  為土壤層到儲水層之最大滲漏 (m/day)， $Infil_{Storage}$  為流出儲存層之入滲 (m/day)， $k_{sat,Storage}$  為儲存層之飽和水力傳導率 (m/day)， $CF_{Pave}$  為儲存層之壅塞因子， $Infil_{native,max}$  為儲存層之最大入滲 (m/day)， $Drain_{Storage}$  為儲存層之出流 (m/day)， $C_d$  為排水係數， $H$  為排水水頭 (m)， $\eta$  為排水指數， $Outflow_{Surface}$  為表面層之出流 (m/day)， $n$  為表面粗糙係數， $D_{Surface}$  為表面層之水深 (m)， $d_{surface}$  為表面層之厚度 (m)。

### 3.3 建立社區供水風險評估方法

根據 IPCC AR5 定義風險乃由危害、暴露與脆弱度的相互作用而產生，本研究將此定義對照社區水資源所面臨之風險，以社區為治理觀點，保全對象為社區之生命、財產、環境與生態，分析社區缺水風險之成因。危害因子來自缺水事件，其中可分為氣候和非氣候因子，氣候因子為雨量和溫度，例如乾旱時期區域供水系統分區供水，或暴雨導致原水濁度增加，淨水場處理不及而停止供水；而非氣候因子為氣候因子以外之影響因素，例如社區所屬的區域供水設施，在氣候變遷下的供水能力，以及根據區域水資源分配規則，社區本身之水資源競爭關係；在暴露方面，社區可能位於遭受不利影響的位置，如高缺水危害地區，而暴露因子在確定社區位置後即固定，因此本研究不討論暴露因子之變化；在脆弱度方面，由調適能力與敏感度所構成，調適能力是指社區內部民生與農業供水系統，面對缺水風險的應變能力，可透過設置雨水儲集系統，供應家庭低水質需求，或者設置人工濕地提供再生水灌溉使用，提高社區之調適能力；敏感度可分為民生和農業兩方面，民生方面的敏感度由家庭需水量估算，可由社區人口數乘上每人每日用水量計算得到，而農業方面的敏感度，為作物對缺水之敏感度，可用農業需水量來評估，由農田面積和作物種類決定，當需水量越高時，社區水資源敏感度也越高。以社區為治理觀點之供水風險成因如圖 3-14。

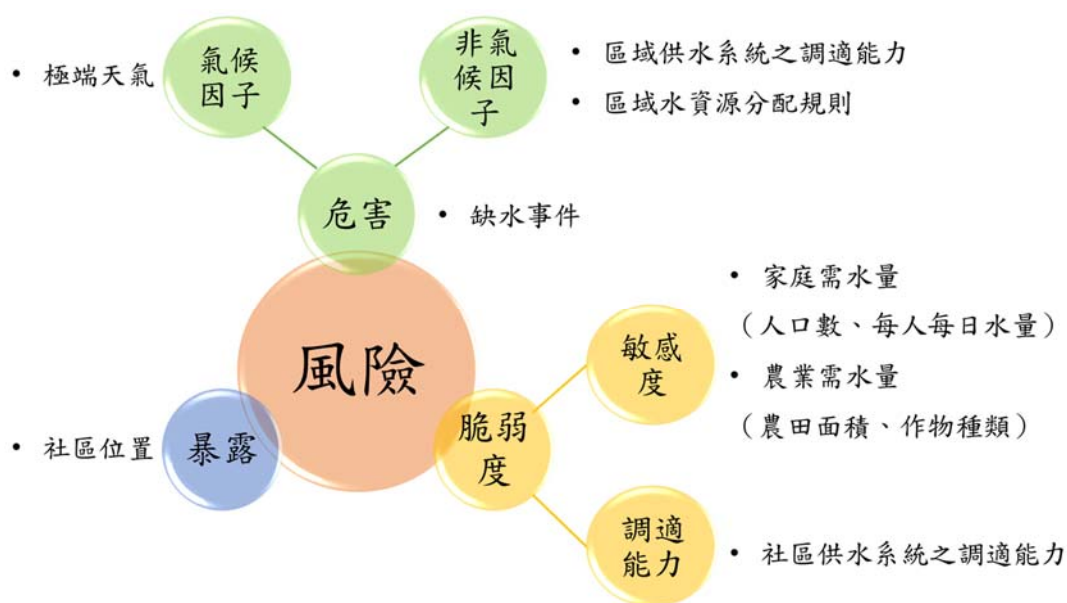


圖 3-14 以社區為治理觀點之供水風險成因

本研究透過建立社區水資源評估指標系統分析社區之現況風險，而現況風險模擬與基期或未來風險模擬之最大差異，在於前者所輸入之氣象資料乃以歷史資料為主，而後二者輸入之氣象資料則來自氣象合成模式（weather generator）之生成結果。使用氣象資料產生器生成氣候變遷下之氣象資料，其前置工作必須先針對考慮地面氣象站之平均氣溫降雨於未來特定時期下之變化情形。

### 3.3.1 建立社區水資源評估指標系統

本研究定義韌性社區在供水系統面向為「氣候變遷下供水系統具有高回復力與低脆弱度之社區」，需要建立社區水資源評估指標以分析是否達到韌性社區的目標。評估指標系統根據用水目的區分為家庭節水率、農業節水率，以及缺水支撐延時、水分利用效率。其中支撐延時為回復力指標，節水率以及水分利用效率為脆弱度指標。

#### 家庭節水率（Water saving efficiency of domestic, WSE<sub>d</sub>）

家庭節水率代表雨水儲集系統提供之水量占低水質需求的比例，代表對外部供水系統的需求減少，表示可以節約的水量（Villarreal and Dixon, 2005）。本研究定義家庭節水率計算雨水儲集系統提供的家庭非接觸用水占家庭低水質需水量之比例，由此指標值可看出雨水儲集系統的效用，其值越高表示對外部民生供水系統的需求越低，可減輕外部民生供水系統之負荷，同時也代表社區自給自足之效益佳，脆弱度越低。

$$WSE_{d,t} = \frac{U_{L,t}}{D_{L,t}} \times 100 \quad (3-36)$$

其中 WSE<sub>d,t</sub> 為家庭節水率（%），U<sub>L,t</sub> 為雨水儲集系統提供之低水質用水（m<sup>3</sup>），D<sub>L,t</sub> 為民生之低水質需求（m<sup>3</sup>）。

#### 農業節水率（Water saving efficiency of agriculture, WSE<sub>agri</sub>）

農業節水率計算人工濕地提供的灌溉用水占田間需水量之比例，由此指標值可看出人工濕地的效用，其值越高表示對外部農業供水系統的需求越低，減輕外部農業供水系統的負荷，而節省的農業用水可用於民生或工業用途。

$$WSE_{agri,t} = \frac{O_{w,t}}{FWD_t} \times 100 \quad (3-37)$$

其中  $WSE_{agri,t}$  為農業節水率 (%)， $O_{w,t}$  為人工濕地溢流量 ( $m^3$ )， $FWD_t$  為水稻田間需水量 ( $m^3$ )。

### 支撐延時 (Tolerance Duration, TD)

在遭遇乾旱事件時，外部供水系統如果突然停止供水，此時社區中之儲存設施必須供應社區中的生活用水，因此家庭系統可忍受外部供水系統停止供水之天數，將由住宅儲存系統和雨水儲集系統之儲存水量共同決定，但考量用水安全，雨水儲集系統只能用來供應非接觸用水，若雨水儲集系統之儲存水量用完後，所有的生活用水仍需由住宅儲存系統提供，其計算方式如下所示。此指標值越高表示家庭系統可忍受之缺水延時越長，代表家庭系統在外部供水系統缺水情況下，可讓社區家庭用水維持較長的正常供應期，同時表示社區供水系統回復力較佳。

$$TD_{R,t} = V_{R,t} / D_{L,t} \quad (3-38)$$

$$TD_{H,t} = V_{H,t} / D_{H,t} \quad (3-39)$$

$$TD_t = \begin{cases} TD_{H,t} & \text{if } TD_{H,t} \leq TD_{R,t} \\ TD_{R,t} + \frac{V_{H,t} - TD_{R,t} \times D_{H,t}}{D_{H,t} + D_{L,t}} & \text{if } TD_{H,t} > TD_{R,t} \end{cases} \quad (3-40)$$

其中， $TD_{R,t}$  為雨水儲集系統之支撐延時 (days)， $V_{R,t}$  為雨水儲集系統之儲存水量 ( $m^3$ )， $TD_{H,t}$  為住宅儲存系統之支撐延時 (days)， $V_{H,t}$  為住宅儲存系統之儲存水量 ( $m^3$ )， $D_{H,t}$  為民生之高水質需求 ( $m^3$ )， $TD_t$  為家庭系統之支撐延時 (days)。

### 水分利用效率 (Water using efficiency, WUE)

水分利用效率用於評估生長期內，作物產量與灌溉水量的比值 (Kang et al., 2000)，本研究利用農業供水指標 (Agriculture supply index, ASI) 作為產量打折率，乘上歷史最大產量，即為作物產量。此指標值越高，表示農業水分利用效率佳。

$$WUE_j = CY_j / IR_j \quad (3-41)$$

其中  $WUE_j$  為水分利用效率 ( $kg/m^3$ )， $CY_j$  為作物產量 (kg)， $IR_j$  表示由外部農業供水系統提供的灌溉水量 ( $m^3$ )。

### 3.3.2 應用低頻率氣象合成模式

本研究範疇為評估韌性社區長期水資源系統情況，在評估未來社區風險時，需要能展現中長週期降雨特性之氣象合成模式，而李沅泓（2015）結合經驗模態分解法和 k-NN 移動視窗法發展低頻率態之氣象合成模式，稱為低頻率氣象合成模式（low-frequency weather generator, LF-WGEN），利用經驗模態分解法適用於呈現非線性、非平穩系統的優點，來保留雨量中長週期的降雨特性，進而繁衍出保留時間序列之特性的月雨量資料，再以 k-NN 移動視窗法將繁衍之月雨量資料時間降尺度至日雨量。相較於傳統氣象合成模式，LF-WGEN 能夠保留時間序列之趨勢與低頻率特性，圖 3-15 為 LF-WGEN 繁衍基期與未來氣象資料之流程圖，LF-WGEN 總共包含六步驟，1.頻率分析(frequency analysis)；2.本質模態函數挑選(IMF selection)；3.本質模態函數重建 (IMF reconstruction)；4.偏差校正 (bias correction)；5.修正月雨量 (modification of monthly rainfall)；6.產生日氣象資料 (daily weather data generation)。以下將對各步驟進行介紹。

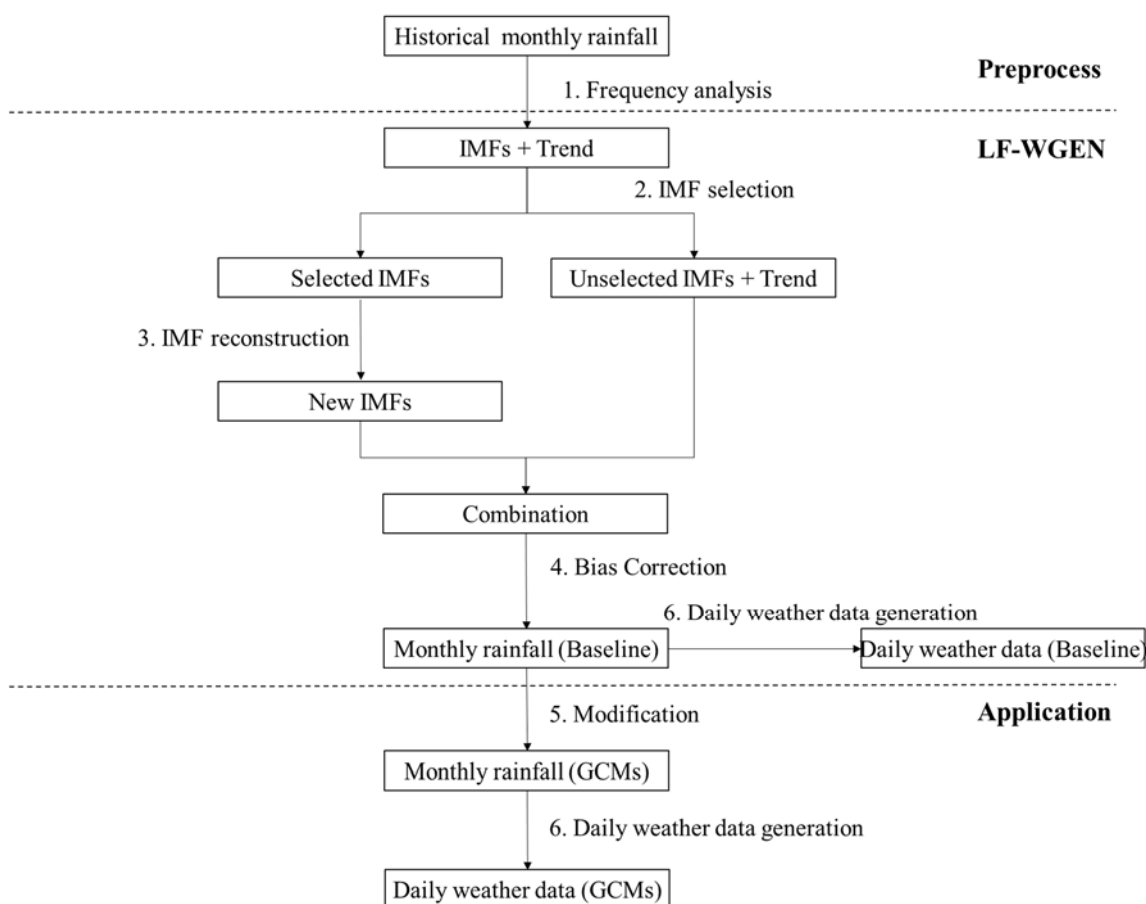


圖 3-15 氣象合成模式流程圖

首先對歷史月雨量進行頻率分析，由中研院院士黃鐸（1998）提出經驗模態分解法（Empirical Mode Decomposition, EMD），把歷史月雨量分解為高頻至低頻的本質模態函數（Intrinsic Mode Functions, IMF）以及一個無法分解的殘值（Trend），高頻的 IMF 將被重建，而低頻的 IMF 和殘值則保留，最後組成新的月雨量資料。當重建之高頻與低頻的極值恰好疊合在一起時，即有可能產生比歷史資料更極端的事件。IMF 必須滿足兩個條件，（1）在整筆資料中，局部最大值與局部最小值的數目之和與跨零點的數目要相等或是最多相差一個；（2）在任一時間點上，由局部最大值所連成的上包絡線與局部最小值所連成的下包絡線，兩者的平均值為零。當 IMF 之包絡線局部極大值和極小值在時間序列之中多於 10 個，IMF 將被挑選重建。為了重建 IMF，須找出 IMF 的包絡線（envelope），紀錄 IMF 對應包絡線之相位比值，並且記錄包絡線的局部極大值與局部極小值在序列上的時間位置。將包絡線的局部極值分別帶入 gamma 分配中，產生隨機亂數  $p$  ( $0 < p \leq 1$ )，再對應 gamma 累積分布函數的累積機率，進一步產生出新的局部極大值和局部極小值在原本的時間序列位置上，連成新的包絡線。再將每一時刻之相位比值乘上新包絡線，產生新的 IMF，即完成了 IMF 的重建。接著將重建之 IMF、未被挑選重建之 IMF 以及無法分解的殘值相加，即為月雨量資料，但某些月份的月雨量資料可能出現負值，因此需要進行偏差校正，根據十二個月份的歷史資料，計算各月月雨量的 gamma 累積分布函數，將月雨量為負的月份挑出，將該月份的月雨量從小到大排序，序位和繁衍資料長度的比值即為累積機率值  $p$ ，將  $p$  對應該月份的 gamma 累積分布函數，即可得到修正後之月雨量。

前述步驟繁衍基期氣象資料，而未來氣象資料則需要根據基期和氣候情境來做修正，其修正值將由 GCM 模式提供。修正後的月雨量需要利用 k-NN 移動視窗法（Steinschneider and Brown 2013）降尺度為日雨量。首先需要篩選適宜歷史資料以建立月雨量資料庫，例如第 M 月份的月雨量為 P，從歷史資料裡面選出 k 年第 M 月份的最接近 P 的月雨量，Lall and Sharma（1996）建議年數 k 的選擇為歷史資料總年數的平方根。從月雨量資料庫，計算月雨量的權重，而 Lall and Sharma（1996）建議利用離散核函數（discrete kernel function）計算資料庫裡月雨量的權重（ $K_1$ ），如式（3-42），若月雨量越接近目標月雨量 P，其權重越高，也越容易被選中。

$$K_1(d) = \frac{1/d}{\sum_{n=1}^s 1/n} \quad (3-42)$$

其中  $K_1$  為月雨量的權重。接著根據月雨量資料庫，計算降雨機率和條件機率來決定降雨事件。產生  $M$  月份第  $D$  天的日雨量時，以  $M$  月第  $D$  天為中心，建立包含前後各 7 天的移動視窗 (Yates et al. 2003)。因為降雨事件已經被產生，所以  $D-1$ 、 $D$ 、 $D+1$  這三天是否降雨皆為已知，於是在視窗內尋找降雨狀況和  $D-1$ 、 $D$ 、 $D+1$  連續三天完全相同的組合，又稱為三連組合。三連組合的權重參考 Karlsson and Yakowitz (1987) 建議的方式，如式 (3-44)，將欲繁衍資料前一天的氣象資料與三連組合內的第一天作比較。

$$K_2(i) = \frac{1/h(i)}{\sum_{n=1}^J 1/h(n)} \quad (3-43)$$

$$h(i) = \sqrt{\sum_{n=1}^R \frac{1}{\text{Std}(X_n)} \times (X_{n,i} - X_{n,D-1})^2} \quad (3-44)$$

其中  $K_2(i)$  為三連組合的權重， $h(i)$  為第  $i$  個三連組合的歐式距離 (Euclidean distance)， $X_{n,i}$  為三連組合  $i$  的氣象參數， $X_{n,D-1}$  為  $D-1$  天的氣象參數， $R$  為氣象參數數目，本研究共利用三個氣象參數，日雨量、日最高溫和日最低溫，因此  $R=3$ 。將月雨量 ( $K_1$ ) 和三連組合的權重 ( $K_2$ ) 相乘，可得到三連組合被選上的機率，根據被選上的三連組合的第二天的氣象資料，當作繁衍  $D$  天的氣象資料，依時間序列逐日完成該月份的日氣象資料。透過重複產生該月 100 組資料，將每筆資料的日雨量各自加總成月雨量後，找出和目標月雨量最接近的資料，並且將該組資料以等比例修正成目標月雨量，即完成當月的日雨量繁衍。

### 3.4 分析韌性社區供水調適選項

根據前述分析之社區供水風險，危害因子中的氣候因子受極端天氣影響，而暴露因子由社區地理位置決定，以上兩者較難利用社區調適手段進行改善，因此本研究之調適選項主要在降低非氣候因子帶來的影響與社區的脆弱度。本研究在文獻回顧的章節已蒐集國內外相關之社區供水調適選項，供水調適選項主要可分為三方面：節約用水、多元開發、有效管理，其中節約用水降低韌性社區之敏感度，多元開發能提高韌性社區之調適能力，有效管理則是降低非氣候因子對社區造成的影響。節約用水的調適選項在農業部分有節水灌溉、調整一期作和二期作耕種日期、種植節水作物，家庭部分可安裝省水器材；多元開發的調適選項，可採用低衝擊開發，包含人工濕地和雨水儲集系統，能提供農業灌溉用水和家庭低水質用水，另外，農業迴歸水可再利用於灌溉用途；有效管理的調適選項，包含更新與改善水利設施、採取輪灌、地面和地下水聯合營運、建立自動水文測報及灌溉系統、農田抗旱應變機制，其調適選項與說明列於表 3-10。後面將對各調適選項之優缺點進行介紹。

#### 節約用水方面

- 節水灌溉：隨著時代變遷及我國加入 WTO 後稻米生產有逐漸轉型為經濟價值較高之農業旱作物之趨勢，目前政府積極推動之節水管路灌溉方法與技術，對於克服農村人口老化及勞力不足現象，有極大之助益。且管路灌溉設施之灌溉均勻度較漫灌、溝灌等傳統方式為高，能將有限之水資源有效地施灌於作物根部，所節省之灌溉水量十分可觀（鄭友誠，2016）。一般而言果樹作物採用噴灌、微噴灌較多，而雜糧作物隨其生長之特性而採用不同之灌溉方式，花卉作物採微噴及滴灌，蔬菜作物則採用滴灌、穿孔管灌溉為主（水利署，2016）。由於節水灌溉的方法很多，各有不同的優缺點，以噴灌為例，系統設計要適當，才能避免水分噴灑不均勻，而灌溉水過濾不當，會有噴頭阻塞的問題，風大處也不宜使用。因此必須因地制宜作出正確的選擇，並採取科學的管理辦法，才能達到最佳效益。
- 調整耕種日期：可提升缺水期水資源之有效調配與利用，對於農業需水量有相當程度的影響，有效因應氣候變遷及春季之嚴重缺水問題。由於耕期調整主要目的在於減少枯水期的用水量，幫助枯水期的水庫用水調度，但有可能影響作



物產量，調整耕種日期除了降雨量，還需考量氣溫，若是因為調整耕種日期而導致產量下降，此調適選項較難讓農民接受。

- 節水作物：如玉米和高粱可降低農業用水量，以彰化地區為例，為了減緩地層下陷，推行黃金廊道農業方案，誘導農民減抽地下水，改種節水作物，輔導農民從事低耗水性農業生產及調整生產措施，同時提高台灣的糧食自給率，但作物的選擇需考量市場行銷情形，台灣農產品市場常因生產過量而導致價格崩跌，將會導致農民改種意願降低（游添榮，2014）。而經濟價值較低的節水作物，則需透過額外補助才能推廣農民改種。
  - 減灌或停灌：近年來，因全球氣候異常暖化，臺灣地區乾旱問題日趨嚴重，調用農業用水支援民生及工業使用之頻率亦增加，從民國 91 年起，為提供民生及高科技科學工業園區穩定供水之需而辦理停灌，而民國 95 年停灌除了因年初降雨量不足外，民國 93 年艾莉颱風為石門水庫所帶來約 2000 萬立方公尺淤積於水庫內之泥沙所引發之後遺症，亦是造成桃竹苗地區缺水之主因，至民國 99 年嘉南農田水利會停灌，亦因莫拉克颱風使曾文水庫淤積 9100 萬立方公尺，水庫有效庫容大幅減少所致。鑑於長時間大面積停灌，灌溉水路若連續未通水，將造成流經市區之水路環境衛生惡化，而且農地缺乏水分滋潤，易造成生態環境惡化，停灌期間，水資源管理單位應考量生態環境維護及長期作物仍需用水之實況，在適當時機釋放保育用水，才能兼顧農村生活環境及生態維護，避免對於停灌區內之生態及環境衛生造成重大衝擊（朱志彬，2015）。
- （5）家庭省水器材：省水器材在不影響原設計功能的條件下，使用最少水量的器材，便叫做省水器材。使用省水器材並改變用水行為，如：改用省水蓮蓬頭、省水龍頭或加裝起泡器、省水馬桶以及擁有省水標章的洗衣機，都可以達到省水效果。

#### 多元開發方面

- 低衝擊開發設施：提出暴雨管理概念，利用綜合性小系統來吸納洪水，其目的為透過分散暴雨所產生的逕流，使開發地區盡量接近開發前之水文循環狀態。低衝擊開發設施目標在於減少暴雨逕流、延遲暴雨逕流之峰值、減輕排水管網系統的壓力、減少回收雨水的成本、降低建築物屋頂的溫度，並同時美化環境，創造舒適的生活空間。低衝擊開發包含雨水花園、生態滯留草溝、透水鋪面、

綠屋頂、雨水儲集系統等設施。具有儲存功能之低衝擊開發設施，可做為社區之分散式供水系統，提高雨水使用率。

- 農田迴歸水：農地迴歸水運用情形可分為灌區內及灌區外（經濟部水利署，2005），灌區內的迴歸水：農業灌溉大多由上游高處開始往下游灌溉，上田多餘的迴歸水可由橫向水路直接攔取再向下田直接灌溉或匯流農塘、河川再取水灌溉下游灌區，其中已多層次重複灌溉使用，此部分之迴歸水已有實際運用，無法提供其他標的使用，屬傳統灌溉的輔助水源；灌區外的迴歸水：係指灌溉系統最下游灌區的灌溉迴歸水，通常會直接由排水路直接流入大海，此部分水源有待污染源改善後，於灌區水路末端設置橫向攔截溝及貯水池，截取為人工湖水源，供其他標的使用，屬於新興水源。缺點是灌溉成本增加，無論是管線設置、設備維護、挖塘蓄水等，皆需要資金投入，以及循環再利用需要時間進行水質處理，避免化學污染。

#### 有效管理方面

- 水利設施更新及改善：農委會每年均於「加強農田水利建設」計畫項下編列計畫經費，逐年辦理老舊破損之灌排水路、構造物及農路之更新改善，補助各農田水利會辦理農田水利設施更新改善。該計畫經費之分配原則，係由農委會全盤考量台灣省 15 個農田水利會現有農田水利設施現況、財務負擔能力、以往執行能力考核及所轄面積大小等因素，將有限之預算作最有效之運用及分配。其計畫效益為維持永續農業生產機能、健全農村基本設施功能、改善農業結構提高農民所得及減輕農民維護工程費之負擔，同時可以減少滲漏水量，有助於農業節水之成效及提高水資源之有效利用（陳衍源，2006）。
- 輪灌：先劃分輪區，輪區內劃分若干單區，各單區內設單區配水箱和小給水路或補給水路，以使各田坵均能直接引水灌溉，執行輪灌時，集中輪區應得的給水量，依單區順序輪流給水，周而復始。輪灌為暫時性方案，針對乾旱時期供水量無法滿足需求水量，缺水率在 30% 以下，農田水利會需採用加強灌溉管理、延長灌溉期距、分區輪灌等措施（水規所，2009）。
- 地面和地下水聯合營運：以整體性概念規劃區域內水源之開發、調配及運用，統籌各地面水及地下水水源來聯合運用，以地面水優先取用，豐水期多餘之水補注於地下水源來聯合運用，在水量不足時再以地下水補充之。訂定地面水與地下水聯合運用方案須考慮供水之需求與時程、各水源之供應潛能、現有水源

設施之供水能力、未來水源設施規劃、經濟效益評估及營運管理法規制度等因素來加以擬定。在地面水與地下水聯合運用及管理上另一個重要工作為積極規劃地下水補注方案，藉由有效利用豐水期無效之河川逕流量及地下含水層儲蓄之特性，以增加地下水資源之效率。

- 自動水文測報及灌溉系統：目前農田水利會水文自動測報系統，可分為雨量測報及水位—流量自動測報等二類，其中自計式雨量計之設置，可了解水庫集水區、灌區降雨量資訊，水位—流量自動測報設施，可充份掌握河川、灌溉系統取水口及重要配水分界點的水位、流量資訊。其優點為提高有效雨量之利用，充分運用水資源；減輕水門分水人力負擔，強化田間配水管理；有助枯旱期能有效調度有限水資源，汛期則能預知洪氾發生，減少災害損失；合理精準分配水量，減少農民用水糾紛（何逸峰，2005）。自動水文測報及灌溉系統之成本較高，且後續維護也需要經費。
- 農田抗旱應變機制：由各農田水利會訂定，水利會除訂定平常水文年之灌溉計畫外，並應事先對各灌溉系統灌區之可忍受缺水程度，分別訂定缺水時期因應不同缺水程度之配水計畫及救旱措施，並報經農委會備查後公告。此外，各農田水利會每年依據實際組織編制及執行救旱工作之需求，修訂災害緊急應變小組作業要點，以整備組織運作並配合各單位抗旱任務需求（鄭友誠，2016）。

表 3-10 社區供水系統之調適選項

策略	調適選項	說明
節約用水	節水灌溉	根據作物需水情況和當地供水條件，高效率利用降雨和灌溉水資源，目前可分為四種灌溉方式：管灌、噴灌、微灌、滲灌。透過發展農業節水灌溉，可提高農業灌溉設備的科技水平。
	調整耕種日期	水田灌溉管理配合區域時空降雨分佈與作物生理特性，在產量和農民耕作方式不變的前提下，調整耕種日期。
	節水作物	在缺水時，需選擇耐旱的作物及品種，如玉米或高粱，並配合適當的節水栽培管理技術，以進行缺水地區的農業生產。
	減灌或停灌	當灌溉水源枯竭至灌溉需水量 40% 以下時，既不能全面積灌溉供水，亦無法按輪區單區順序依時供水時，為減輕災害損失，採用此臨時的灌溉方法以為因應。
	家庭省水器材	針對生活用水的使用和特點去研發生產的，基本設計理念為不影響用水人用水習慣的情形下，來限制水的浪費，例如省水馬桶和省水水龍頭。
多元開發	低衝擊開發設施	採取設置分散式供水系統，例如雨水儲集系統、人工濕地等，可提供雨水或再生水，增加社區供水來源，降低外部供水系統的負荷。
	農田迴歸水	上游之一部份灌溉水回流，出現在下游水溝而可加攔截利用者，即包括由地表面流入於下游水溝、滲入地下在下游湧出流入水溝之上游灌溉水。
有效管理	水利設施更新及改善	灌溉用水輸水途中可能因渠道破損而有滲漏情形，其可能的原因為渠道的材質及狀態與輸水效率等等，因此辦理農田水利設施更新改善工程，除維持設施功能外，更可有效降低輸水損失。
	輪灌	為根據用水計畫在適當時期以適當之水量按照順序供水之灌溉方法，多用於水稻灌溉水源不充裕地區或時期。
	地面和地下水聯合營運	地表水與地下水聯合營運是豐水期有效率的使用地表水及減少或限制使用地下水，並盡可能攔蓄多餘的地表水蓄存於地下含水層中，不但可蓄存多餘水量，有助於地下水超抽地區之涵養，減輕地層下陷或海水入侵。並於枯水期地表水不敷使用時，再依各地區地下水文及地質條件適量抽用，以補地面水之不足。
	自動水文測報及灌溉系統	即時獲取灌溉區域降雨及水文資訊，再以遠端遙控方式來控制水門開閉，有效於枯旱時期提高灌溉區域管理效能，節省灌溉用水量及管理人力，在颱風豪雨期間亦能迅速反應以減低災損。
	農田抗旱應變機制	遇乾旱時期，灌溉水資源可因應缺水率情形來加強灌溉管理措施甚至實施停灌，當缺水率低於 50% 時，以加強灌溉管理來克服缺水，但缺水率高於 50% 時，只能辦理停灌。

### 3.5 建立韌性社區供水調適路徑

根據氣候變遷調適六步驟之步驟一至步驟三，已知研究區域之調適目標，以及現況和未來風險，步驟四則是藉由分析風險成因，界定和評估社區可行之供水調適選項，接下來步驟五規劃韌性社區供水調適路徑，而氣候變遷調適路徑目前仍處於發展階段，在可預見的未來中，勢必會有更多相關的研究提出方法論，藉以降低使用上的不確定性以及增加調適路徑的實用性。本研究提出韌性社區之供水調適路徑規劃方法，透過計算調適選項之有效期與價值，建立調適路徑圖，由調適路徑提供執行調適選項時間點的資訊，並在第五章韌性社區調適能力建構案例，進行示範操作，其設計案例參考位於新竹縣湖口鄉之信勢社區。

在步驟四評估所有可行之調適選項組合後，首先計算調適選項之有效期，即調適選項組合可持續有效到哪一個時間點以前，調適選項有效定義為可達到設定之調適目標。調適選項有效期之重要性在於提供使用者資訊，即當下之調適選項不能達到調適目標時，代表調適選項已經超過有效期，需改變調適方向，並採取下一個調適選項，也就是所謂的轉乘點。在有效期或轉乘點的定義上有許多假設（Siebentritt, 2014），在面對風險與不確定性的問題時，在可接受與不可接受的區域中間增加了一個中等狀態（Haasnoot, 2012），可以用來給予決策者一個緩衝的空間，也可視為系統的一個警戒區域，當系統的狀態進入中等區域時，應該有所警戒並適時採取某些預備行動，而緩衝空間的大小取決於系統的風險接受程度，可以當成一種面對氣候變遷不確定性下的因應方法。

在步驟二和步驟三已建立韌性社區供水風險的評估方法，可量化供水調適選項，但在建立調適路徑時，規劃未來之時間尺度較長，而氣候變遷可能改變降雨量，採取的調適選項執行後是否能發揮預期效用，在有效期前維持系統之調適水準具有不確定性。調適路徑的研究發展至今，雖然企圖在不同的狀況下去建構一個最適合的路徑選項，仍然缺乏一個關鍵性的突破，需要評估每個調適選項在不同時間點下，具有不同的調適價值。曹榮軒（2017）考量時間帶來的未來不確定性，計算每個調適選項於不同時間點執行之價值，提出以 Black-Scholes 選擇權定價模型（以下簡稱 B-S model）來評估調適選項的價值，即可量化調適選項之時間價值，評估未來不確定性。B-S model 是一種為期權或權證等金融衍生工具定價的數學模型，由 Myron Scholes 與 Fischer Black 首先提出，並由 Robert C. Merton 修改模型。由

此模型推導出 B-S 公式，估算出歐式期權的理論價格。B-S 公式問世後帶來了期權市場的繁榮，該公式被廣泛使用。1997 年 Myron Scholes 與 Fischer Black 憑藉 B-S model 獲得諾貝爾經濟學獎。然而 B-S model 假設價格的變動，符合高斯分布，應用時需要注意 B-S 公式的有效性。

選擇權商品分為買權 (Call option) 和賣權 (Put option)，買權為可在約定時間，以約定價格購買標的物；賣權為可在約定時間，以約定價格出售標的物。若對標的物未來看漲為買權；相反若對標的物未來看跌，則為賣權。而買方透過支付權利金而享有權利；賣方收取權利金而須承擔義務。以買方立場，損失有限 (支付之權利金)，但獲利卻無限；賣方立場則是損失無限，但獲利有限 (收取之權利金)，表 3-11 為選擇權商品之種類，共可分為買入買權、賣出買權、買入賣權、賣出賣權四種。

表 3-11 選擇權種類

	買權 (Call option)	賣權 (Put option)
	買入買權 (Buy Call)	買入賣權 (Buy Put)
買方 (Buy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有權利買</li> <li>● 支付權利金</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有權利賣</li> <li>● 支付權利金</li> </ul>
	賣出買權 (Sell Call)	賣出賣權 (Sell Put)
賣方 (Sell)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有義務賣</li> <li>● 收取權利金</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有義務買</li> <li>● 收取權利金</li> </ul>

將選擇權商品的概念應用在調適案例上，根據不同的應用情形，首先確認調適案例屬於買權或賣權，若預期未來調適目標增加，則為買權；若預期未來調適目標下降，則為賣權。接下來確認調適案例屬於買方或賣方，若希望越接近調適目標，不要過度調適，為保守之調適策略，屬於買方；而希望超過調適目標越多越好，為積極之調適策略，屬於賣方。本研究預期未來外部供水系統在氣候變遷下，缺水風險將增加，因此韌性社區需要提高節水率，以降低對外部供水系統的需求，以社區節水率作為選擇權之標的物，為選擇權之買權（Call option），以社區觀點為希望節水率越接近調適目標越好，但資源有限，不希望調適過度造成浪費，屬於選擇權之買方（Buy），表 3-12 為調適案例對應選擇權之種類，而本研究之社區節水率屬於買入買權（Buy Call）之情形。

表 3-12 調適案例對應選擇權之種類

	調適目標看漲 (Call option)	調適目標看跌 (Put option)
接近調適目標 (Buy)	買入買權 (Buy Call)	買入賣權 (Buy Put)
超過調適目標 (Sell)	賣出買權 (Sell Call)	賣出賣權 (Sell Put)

由 B-S model 建構調適路徑的最大精神，在於每一個調適選項的價值應隨著現有資訊以及不同的時間點而變化，故由調適選項組合而成的調適路徑才能在每個決策點，藉由當下的觀測資訊選擇最佳調適選項。B-S model 是用來評估選擇權價格的定價模型，真正完成交易是在未來某一時間點，而由於對未來的不確定與預期性，使得契約亦會具有價值。計算方程式如式 (3-45) ~ (3-47)，符號說明如表 3-13，輸入參數包含 L、S、T、r 與  $\sigma$ ，輸出結果為 C，代表選擇權買權的價格，也就是當決策者願意採用某一個調適選項，相當於在金融市場上買入買權，並等待買權實現價值的情形發生，藉此獲得利益。

$$C = SN(d_1) - Le^{-rT}N(d_2) \quad (3-45)$$

$$d_1 = \frac{\ln\frac{S}{L} + (r + 0.5\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}} \quad (3-46)$$

$$d_2 = \frac{\ln\frac{S}{L} + (r - 0.5\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T} \quad (3-47)$$

其中 C 為選擇權買權價格，L 為履約價格，S 為現貨價格，T 為選擇權到期時間，r 為連續複利計無風險利率，代表時間對價值的影響， $\sigma$  為波動率，N 為常態分布變量之累積機率分布函數， $N(d_1)$  描述股價變動對選擇權價格的影響， $N(d_2)$  描述選擇權履約的機率。

表 3-13 B-S model 對應調適路徑之參數定義

參數	B-S model 定義	調適路徑定義
C	選擇權買權價格	調適選項價值
L	履約價格	調適選項能力
S	現貨價格	調適目標
T	選擇權到期時間	調適剩餘時間
r	連續複利計無風險利率	連續複利計無風險利率
$\sigma$	波動率	波動率

根據 B-S model 定義，選擇權價值為內含價值 (intrinsic value) 與時間價值 (time value) 的總和，內含價值為現貨價格與履約價格的差異，時間價值來自於對未來的不確定與預期心理。選擇權可分為價內、價平和價外，價外選擇權為現貨價格小於履約價格，價平選擇權為現貨價格等於履約價格，而價內選擇權為現貨價格大於履約價格。價外、價平選擇權只有時間價值，而價內選擇權則包括時間價值與內含價值。選擇權價值與現貨價格、履約價格、剩餘時間之關係，如圖 3-16 所示，垂直實線代表時間價值，垂直虛線則代表內含價值，圖中每條線代表不同時刻，在不同的調適剩餘時間下，選擇權當下之價值函數。價平選擇權擁有最大的時間價值，但價內和價外選擇權的時間價值不一定相等，由隱含波動率決定。隱含波動率是將市場上的選擇權價格，代入 B-S model 反推出來的波動率數值，顯示取得該價格所反映出的波動程度，也可以解釋為市場對未來波動程度的看法。

本研究參考曹榮軒 (2017) 之研究方法，應用選擇權定價模型於韌性社區供水調適路徑建構，調適路徑參數對應 B-S model 參數，如表 3-13，調適選項價值由五個參數計算得出，分別為：調適選項能力、調適選項目標、調適剩餘時間、無風險利率以及波動率。當調適目標值高於調適能力值時，具有內含價值與時間價值，但內含價值為調適目標值減去調適選項能力所得的價值，不屬於調適價值，因此本研究只考慮調適選項之時間價值，也就是調適選項價值等於選擇權之時間價值。圖 3-17 為調適選項價值變化圖，每條線代表某個時刻，不同的調適剩餘時間。而調適



選項能力為定值，對應不同調適目標值，可以判定調適選項落於價外、價平或價內，加上設定之調適目標線，即可得到調適選項價值隨時間變化的情況。圖 3-17 為調適選項價值變化圖，價內和價外的時間價值可為對稱或不對稱情況，由對於未來目標值的高低不確定性決定，如同選擇權之隱含波動率。價外調適選項為調適目標值低於調適選項能力，為調適過度之選項；價內調適選項為調適目標值高於調適選項能力，因調適目標值高於調適選項能力，顯示此調適選項無法達成目標，為調適不足之選項；價平調適選項表示調適目標值等於調適選項能力，因為等於調適目標值，而擁有最大的時間價值，因此 B-S model 量化結果將會顯示最接近價平之調適選項有最大價值。

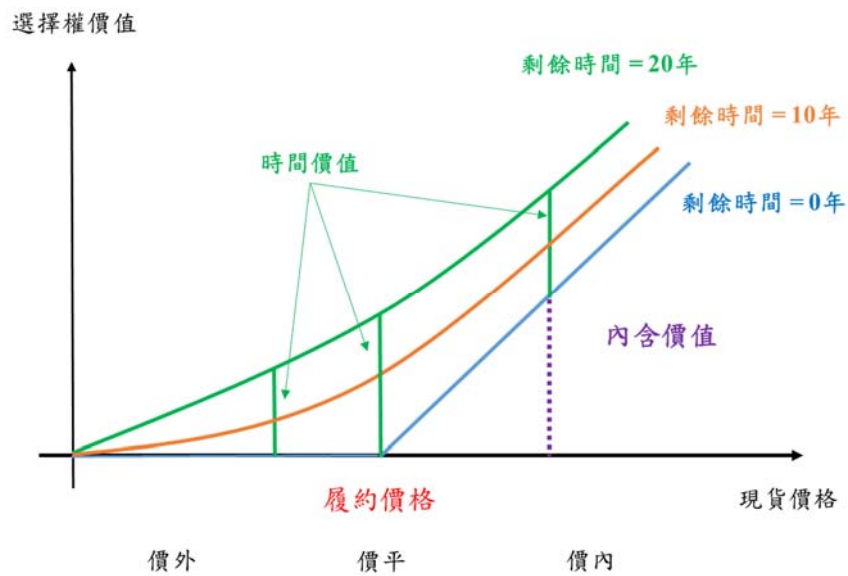


圖 3-16 選擇權價值變化圖

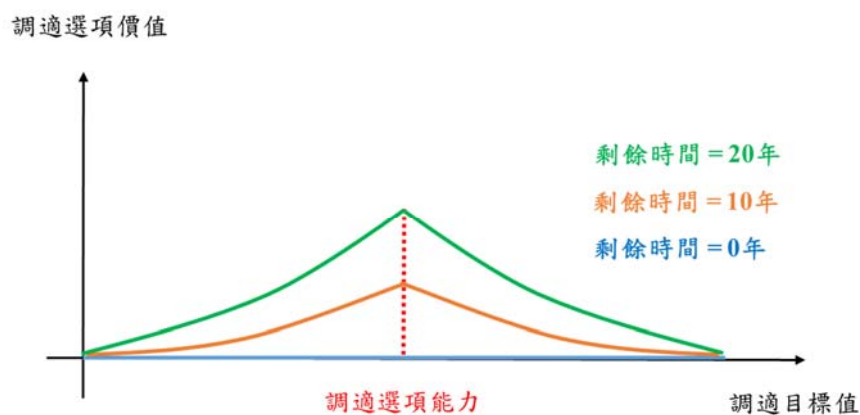


圖 3-17 調適選項價值變化圖

調適剩餘時間和無風險利率計算實現調適選項價值的機率，調適剩餘時間越長代表未來的不確定性越大，或者無風險利率愈高時，未來值與現值的轉換差距就會越明顯。剩餘時間越短時，調適選項價值也隨之下降，因距離目標時間點較近的決策時間點，有較多的資訊，等到目標時間點時，剩餘時間為零，調適選項價值為零。波動率則表示變數變動的範圍大小，若波動率較高，代表時間帶來的不確定性高，則未來調適選項價值變動的可能性高，而達到實現調適選項價值的機率增加，調適選項價值較高。

在利用 B-S model 評估調適選項價值時，需要設定調適目標值，而根據不同的設定方式，會影響調適路徑的結果，圖 3-18 為調適目標可能之類型，如快速達成型、穩定型、緩慢達成型。因此需要召開利害關係人會議，考量成本、可行性、副作用等因素，選擇合適的調適目標類型，才能畫出調適路徑圖。B-S model 量化比較各調適選項在不同時間點下的調適價值，可分析不同時間點更換調適選項的影響，提供決策者相關資訊，以了解調適選項的優先順序，並且知道何時該執行下一個調適選項，才能預先準備，同時也確保不會作出過多的調適，造成資源浪費。調適路徑為整體氣候變遷規劃，提供調適指引，從評估現況決定調適路徑的起點，模擬未來風險決定調適路徑未來的變化，劃出所有可行之調適路徑路線，最後進入利害相關者討論決定調適路徑後，後續輔以監測與修正，即完成氣候調適六步驟。

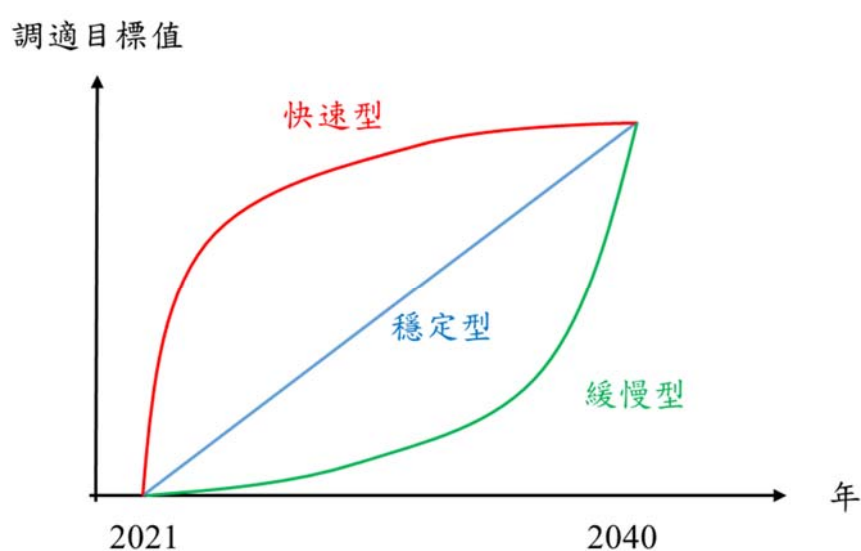


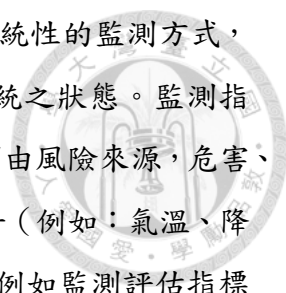
圖 3-18 不同類型之調適目標曲線

### 3.6 監測與修正韌性社區供水調適路徑

監測與修正調適路徑為氣候調適六步驟的最後一個環節，其主要目的在於監測與評估調適選項之執行成果是否符合預期，以及觀察整體調適行動否仍依照預定計畫走在原定之調適路徑上，並提出調適路徑的修正建議。在步驟一界定關鍵議題和系統範圍時，決定韌性社區之調適目標為提高社區供水系統之韌性，因此評估社區供水風險時，建立社區水資源評估指標系統，例如家庭節水率和農業節水率等。調適目標、評估指標和監測指標三者之間為環環相扣，如圖 3-19 所示。監測指標包含風險監測和調適措施監測，監測結果將決定調適路徑是否需要修正。監測與修正韌性社區供水調適路徑包含三個子計畫：制定調適路徑監測計畫、調適路徑執行檢覈計畫、調適路徑修正計畫三部分，以下介紹各計畫內容。



圖 3-19 調適目標、評估指標和監測指標相互影響之示意圖

- 
- (1) 調適路徑監測計畫：目的在於針對社區供水系統，建構系統性的監測方式，以掌握環境影響因子隨時間之變化情形以及社區供水系統之狀態。監測指標可分為風險監測以及調適措施監測兩大部分。風險監測由風險來源，危害、脆弱度與暴露來釐清可能影響風險的因子，例如環境因子（例如：氣溫、降雨等），並且進行監測；調適措施監測則反應系統狀態，例如監測評估指標之變化可觀察調適措施是否成功發揮效用，例如農業節水率、民生節水率、支撐延時、水分利用效率等。對於調適路徑監測計畫之定義，在於針對關注之社區系統，例如農田生產狀態、灌溉系統漏水情況、家庭用水使用情形等，建立監測方式進而透過監測指標評估系統之狀態，以及了解影響系統狀態的相關因子之變化情況。選擇適當之監測指標後，再針對各監測指標列出監測方式、監測頻率以及監測單位，並集結上述資訊即成為完整的監測計畫。經過專業團隊或利害關係人工作會議討論後，訂出最終之調適路徑監測計畫。
- (2) 調適路徑執行檢覈計畫：目的在於確保調適選項是否確實依照當初之調適規劃流程與工作項目執行，包含兩個檢核項目：1.調適選項執行期程；2.目標達成率。林嘉佑（2016）建議檢覈計畫須包含程序指標和成效指標。程序指標針對調適選項的工作項目或是期程進行列表，進而作為後續調適行動是否完整執行之檢覈依據；成效指標則是觀察調適選項是否達到預期調適目標。
- (3) 調適路徑修正計畫：其目的在於設定調適路徑之修正機制，並於系統之狀態或是環境影響因子發生顯著變化，或是調適選項之執行進度或成效明顯不如預期時，啟動調適路徑之修正計畫，以針對現有之調適路徑重新進行評估與規劃。調適路徑檢覈針對調適路徑的工作期程進行列表，並檢覈調適選項是否可達成預定規劃之調適成效。調適路徑修正計畫應設定啟動條件，以決定何時應啟動調適路徑之修正機制，調整或重新安排調適路徑，甚至視情況重新評估未來風險。



## 第4章 研究案例設計

本研究以社區案例建構氣候變遷調適能力，考量設計案例較能掌握全面性之資訊，因此應用氣候調適六步驟於設計案例，透過韌性社區供水系統模式模擬社區供水情形，並利用指標系統評估社區水資源情形。設計案例可提供符合台灣區域特性之社區案例，供相關研究參考或與其他社區進行比較。

### 4.1 設計案例介紹

案例研究參考實際社區設計而成，參考之社區為新竹縣湖口鄉之信勢村。信勢社區面積約為 600,000 平方公尺，表 4-1 為案例社區之土地利用情形，其土地利用分配為住宅區域（40%）、水稻田（56.67%）、濕地（1.67%）、公園（1.67%）。圖 4-1 為台灣新竹縣信勢社區之空拍圖，圖中可看到台灣農村住宅集中在一處，而農田面積約占一半以上的面積，另外還有大型埤塘，農民利用埤塘儲水灌溉農田，埤塘的功能如同人工濕地一樣，有自然淨化水質之功效。另外韌性社區可設置人工濕地及雨水儲集系統，作為氣候變遷下之分散式供水系統，同時達到韌性社區對外部供水系統之需求最小化。

表 4-1 案例社區之土地利用情形

土地利用種類	平方公尺
住宅	240,000
水稻田	340,000
人工濕地	10,000
公園	10,000

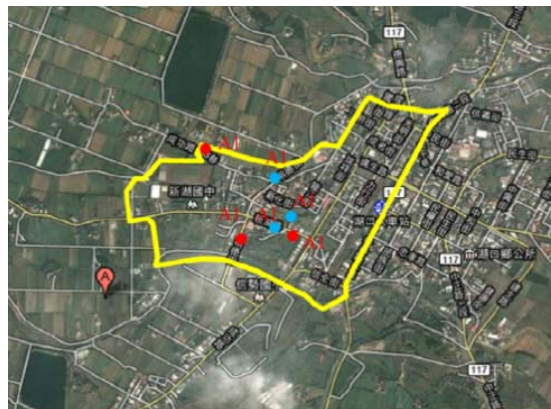


圖 4-1 台灣新竹湖口鄉信勢村空拍圖

低頻率氣象合成模式由 Matlab 撰寫而成，產生基期與未來氣象資料，作為地表逕流模式、外部供水系統模式以及韌性社區供水系統模式之輸入資料，再透過地表逕流模式和外部供水系統模式分別計算社區逕流量和外部供水量，輸入到韌性社區供水系統模式，以計算社區水資源評估指標值，各模式間之資料傳輸關係如圖 4-2 所示。本研究使用 Matlab 軟體撰寫研究方法中所提出之韌性社區供水系統模式，並利用 SWMM 5.1012 模擬社區地表逕流，並且本研究根據新竹地區研究案例，將韌性社區供水系統模式結合以系統動力模式 Vensim 建立之新竹頭前溪流域水資源系統。

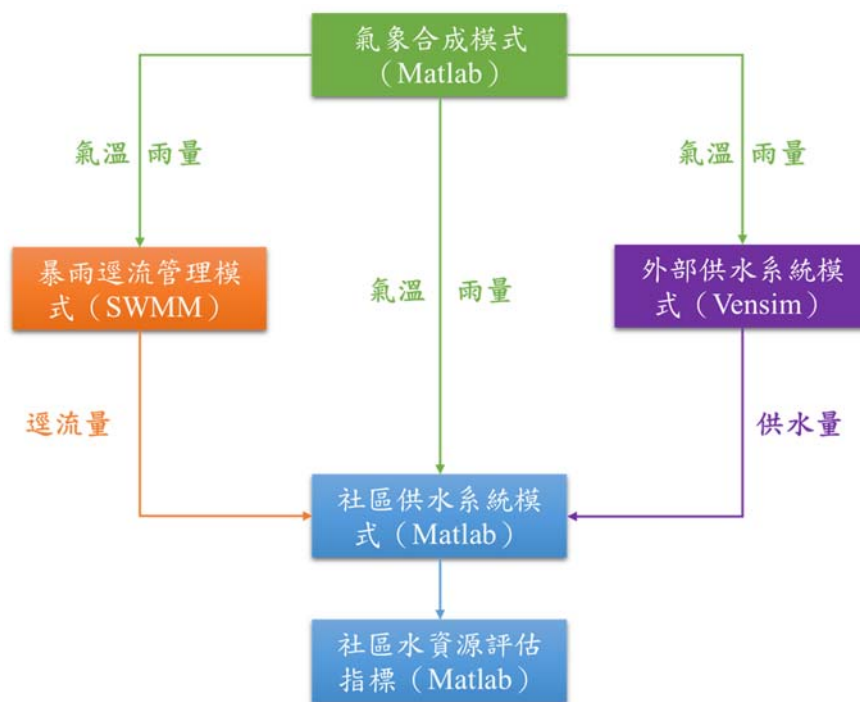


圖 4-2 韌性社區相關模式之資料傳輸關係



## 4.2 社區供水系統模式參數設定

本研究根據新竹信勢社區的基本資料，設定社區供水系統模式參數，例如社區總人口數為 6000 人，每戶平均 4 人，約 1500 戶。每人每日用水量為 250 公升，由此估算社區內之家庭需水量，而接觸用水量占 68%，非接觸用水則占 32%，即可推估家庭高水質用水需求與低水質用水需求。在台灣考量用水安全，存放於住宅儲存系統的水不可超過 2 日，因此根據每戶平均人口為 4 人，每戶住宅儲存系統之容量設為 2 立方公尺。另外，社區供水系統模式須設定雨水儲集系統容量和人工濕地面積。人工濕地面積部分，林瑩峰等人（2004）根據需處理之汙水量，提出當人工濕地應用於家庭污水二級處理時，主要的操作參數及建議值範圍：每日每立方公尺的汙水量，人工濕地之面積需求為  $20\sim 72\text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{day})$ ，而根據統計台灣表面流人工濕地之平均面積約為 4 公頃（張文亮，2005），本研究考量社區用地取得，設定人工濕地面積為 1 公頃。雨水儲集系統容量部分，因台灣各區降雨型態不同，需要考量各地降雨情形選擇合適的雨水儲集系統容量，利用新竹氣象站二十年的氣象資料（1986-2005），計算得出 528 筆的缺水事件，將其缺水量由小到大排序後如圖 4-3 所示，本研究設定雨水儲集系統之供水可靠度為 75%，對應之雨水儲集系統容量為 7,140 立方公尺，以社區 1500 戶計算，平均每戶需裝設 4.76 立方公尺的雨水儲集桶。表 4-2 為雨水儲集系統供水可靠度與容量之對照表，較大的容量有較高的家庭節水率，但雨水儲集桶處於滿水位的時間短，選擇最大之雨水儲集容量不符合最佳經濟效益，關於供水可靠度和成本之間的衡量需要後續研究討論。



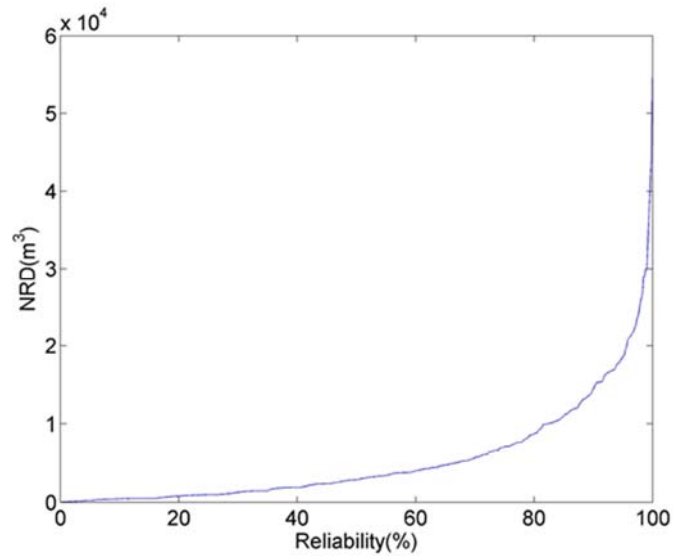


圖 4-3 雨水儲集系統容量與對應之供水可靠度

表 4-2 雨水儲集系統之供水可靠度對應容量與家庭節水率

供水可靠度	容量 (m <sup>3</sup> )	家庭節水率 (%)
50%	2,880	49.5
70%	5,783	63.2
75%	7,140	67.5
80%	8,848	72.1
99%	30,863	93.7

### 4.3 SWMM 模式參數設定

本研究利用 SWMM 模擬社區地表逕流，包含 LID 設施之逕流量。案例社區面積為 600,000 平方公尺，住宅區面積（藍色）為 240,000 平方公尺，人工濕地面積為（綠色）10,000 平方公尺，公園面積（橘色）為 10,000 平方公尺，圖 4-4 為案例社區之土地利用分布，每單位面積為 100 公尺乘 100 公尺，圖 4-4 中不包含水稻田面積（340,000 平方公尺），因水稻田有湛水深，並且作物會消耗水量，無法利用 SWMM 模擬，將由 3.2.4 節建立之水稻田水平衡模式計算，因此不在 SWMM 模擬項目中。

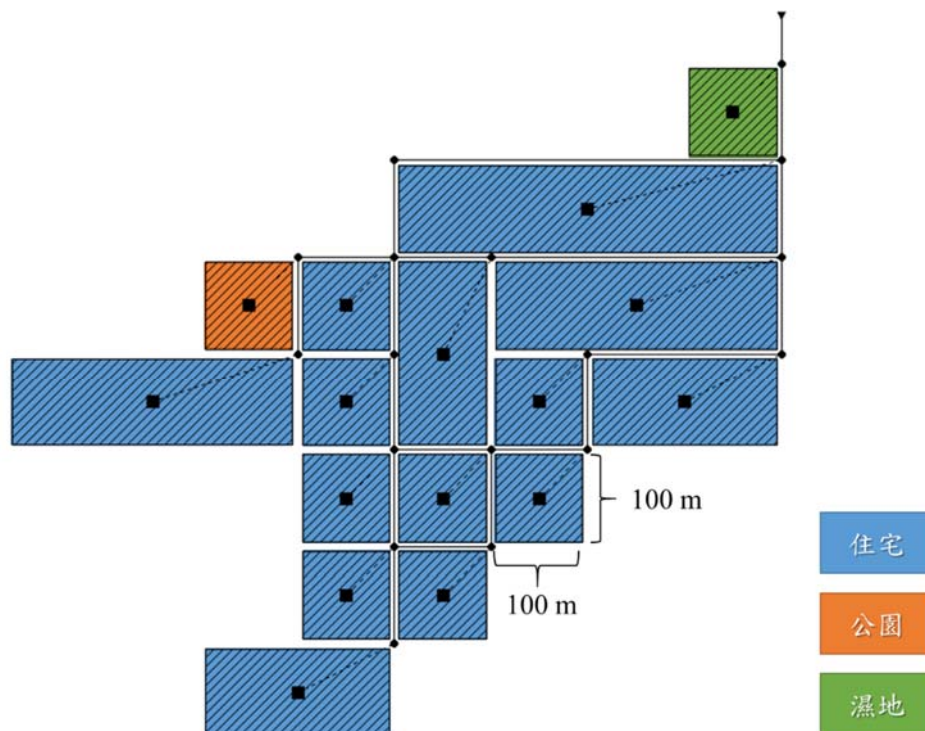


圖 4-4 案例社區之 SWMM 模式圖

LID 設施於 SWMM 模式中以分層方式進行水文機制之模擬，包含表面層、鋪面層、土壤層、儲水層、排水層等，以描述雨水落至地面後，經由入滲、滲漏等過程，並形成地表逕流，最後透過下水道管線集中進入排水系統之過程。目前採用的 LID 設施包含綠屋頂、透水鋪面、雨水儲集系統、人工濕地，然而目前 SWMM 最新版本 5.1012 中無法於同一個子集水區中將一個 LID 設施的出流量設定成另一個 LID 設施的入流量，也就是無法讓綠屋頂之逕流流入雨水儲集系統，若需要描述上述情況，則必須將子集水區整區面積設置一種 LID，再將子集水區的出流量設為另

一個子集水區的入流。考量本研究目的為應用氣候調適六步驟建構調適能力，案例社區採用簡化方式，設定一個子集水區中僅設置單一種類之 LID 設施。

SWMM 提供五種入滲量的計算方法，包含 Horton、Modified Horton、Green-Ampt、Modified Green-Ampt 及 Curve Number。以社區尺度而言，本研究建議使用 Horton 計算入滲量，參數整理於表 4-3，因其需要的土壤參數較 Green-Ampt 少，且相較於 Curve Number 較適用小尺度區域模擬。案例社區根據土地利用種類需輸入相關參數，表 4-4 為 SWMM 中之土地利用參數，如不透水率 (Imperv) 和透水面之曼寧 N 值 (N-perv)，隨土地利用方式而改變。而表 4-5 列出子集水區通用參數，如坡度 (Slope)、不透水面之曼寧 N 值 (N-Imperv)、不透水面之窪蓄深度 (Dstore-Imperv)、透水面之窪蓄深度 (Dstore-Perv)。

表 4-3 設計案例之 SWMM 入滲參數

參數	數值	單位
MaxRate	67.2 <sup>a</sup>	mm/hr
MinRate	0.69 <sup>a</sup>	mm/hr
Decay	2 <sup>a</sup>	1/hr
DryTime	7 <sup>b</sup>	days
Max Volume	0 <sup>b</sup>	mm

a. (Liao et al., 2013) b. (Rossman, 2015)

表 4-4 設計案例之 SWMM 土地利用參數

參數	住宅	人工濕地	公園
不透水率 (Imperv)	85%	10%	30%
曼寧 N 值-不透水面 (N-perv)	0.15	0.35	0.6

表 4-5 設計案例之 SWMM 通用參數

參數	數值	單位
坡度 (Slope)	1.5	%
曼寧 N 值-不透水面 (N-Imperv)	0.013 <sup>a</sup>	—
窪蓄深度-不透水面 (Dstore-Imperv)	1.27 <sup>a</sup>	mm
窪蓄深度-透水面 (Dstore-Perv)	5.08 <sup>b</sup>	mm

a. (Liao et al., 2013) b. (Rossman, 2015)

案例社區設定坡度由西南向東北，因此每個子集水的排水口設置在東北方，逕流透過排水系統重力排水至人工濕地，因此在社區地勢最低的區域為人工濕地的設置地點。圖 4-5 為案例社區之 LID 設施分布，紅色部分代表綠屋頂和透水鋪面逕流由 SWMM 模擬，灰色部分代表雨水儲集系統，因供應家庭低水質用水需求，有消耗水量的情形，SWMM 無法模擬用水情形，因此由社區供水系統模式模擬。因社區逕流匯集到排水系統後，再流入人工濕地，因此綠屋頂和透水鋪面之空間分布，對於逕流量影響不大。台灣住宅建蔽率約為 60%，表示住宅的屋頂面積約為 144,000 平方公尺，假設屋頂面積一半設置綠屋頂，則綠屋頂面積為 72,000 平方公尺，屋頂蒐集的雨水流入雨水儲集系統，供應住宅低水質用水需求，而社區住宅區域的不透水率為 85%，扣除 60% 不透水面積為住宅區，剩餘 25% 面積為鋪面(32,000 平方公尺)，可設置透水鋪面，並提供地表逕流流入排水系統，再流入人工濕地淨化。設置 LID 設施後，子集水區的不透水比例隨之改變，應用綠屋頂及透水鋪面之子集水區計算方式如式 (4-1) 和式 (4-2) 所示，

$$\text{Imperv} = (\text{Imperv}_{\text{Origin}} - P) / (100 - P) \times 100 \quad (4-1)$$

$$P = x/S \quad (4-2)$$

其中 Imperv 為設置 LID 設施後子集水區的不透水率 (%)， $\text{Imperv}_{\text{Origin}}$  為子集水區原本的透水率 (%)，P 為 LID 占集水區之面積比例，x 為 LID 設施數目，S 為 LID 設施在該子集水區的數量上限。

表面層之重要參數為高度、植被覆蓋比例、表面糙度、表面斜率；鋪面層參數包含厚度、孔隙率、不透水表面比率、滲透度、阻塞因子；土壤層參數包含土壤厚度、孔隙率、田間含水量、凋萎點、水利傳導度、水利傳導坡度、吸力水頭；儲存層參數為厚度、空隙比、滲漏率和阻塞因子；而排水層之參數則為排水係數、排水指數、排水管高度。相關參數的設定對於模式模擬結果有極大的影響，因此進行模擬前，須確保模式參數的合理性，本研究整理 SWMM 相關 LID 設施文獻，SWMM 綠屋頂之相關參數設定彙整於表 4-6，透水鋪面之相關參數設定彙整於表 4-7。



表 4-6 案例社區綠屋頂之相關參數 (Qin et al., 2013)

分層	參數	數值	單位
表面層 (Surface)	高度 (Berm height)	20	mm
	植被覆蓋比例 (Vegetation volume fraction)	0.15	-
	表面糙度 (Surface roughness)	0.2	-
	表面斜率 (Surface slope)	2	%
土壤層 (Soil)	厚度 (Thickness)	150	mm
	孔隙率 (Porosity)	0.437	-
	田間含水量 (Field capacity)	0.1	-
	凋萎點 (Wilting point)	0.024	-
	水利傳導度 (Conductivity)	120	mm/hr
	水利傳導坡度 (Conductivity slope)	5	-
排水層 (Drainage Mat)	吸力水頭 (Suction head)	50	mm
	厚度 (Thickness)	75	mm
	空隙比 (Void Fraction)	0.5	-
	粗糙度 (Roughness)	0.05	mm

表 4-7 案例社區透水鋪面之相關參數 (Zhanga and Guo, 2014)

分層	參數	數值	單位
表面層 (Surface)	高度 (Berm height)	1.5	mm
	植被覆蓋比例 (Vegetation volume fraction)	0	-
	表面糙度 (Surface roughness)	0.015	-
	表面斜率 (Surface slope)	1	%
鋪面層 (Pavement)	厚度 (Thickness)	100	mm
	孔隙率 (Void ratio)	0.16	-
	不透水表面比例 (Impervious surface fraction)	0	-
	滲透度 (Permeability)	254	mm/hr
	阻塞因子 (Clogging factor)	0	-
儲存層 (Storage)	厚度 (Height)	450	mm
	空隙比 (Void ratio)	0.63	-
	滲漏率 (Seepage)	3.3	mm/hr
	阻塞因子 (Clogging factor)	0	-
排水層 (Drain)	排水係數 (Flow coefficient)	83	-
	排水指數 (Flow exponent)	2	-
	排水管高度 (Offset height)	200	mm





黃柏勳 (2013) 透過系統動力學應用軟體 Vensim 建立新竹地區頭前溪系統動力模式，頭前溪系統動力模式架構如圖 4-7。頭前溪農業灌溉系統分為八個農業灌區，計算各農業灌區可供水量，根據社區地理位置，可對應到頭前河流域之農業灌區，得到農業可供水量，作為社區供水系統模式的輸入資料。田育全 (2017) 修改頭前溪系統動力模式，更新其取水規則與農業用水量，並將原先的旬模擬尺度修改為日模擬尺度，與本研究之時間尺度相同，以利整合。本研究就發展之韌性社區供水系統模式和區域水資源系統動力模式進行整合，透過區域水資源模式模擬外部農業與民生供水資料，做為社區水資源模式的輸入資料，透過考量實際供水情形，可以更確實管理社區水資源。應用於實際案例時，需要先蒐集社區水資源現況的資料，再根據社區水資源現況建構供水系統，評估加入綠屋頂、雨水儲集或濕地之可行性，韌性社區加入低衝擊開發設施後，可能減少韌性社區對外部供水系統的需水量，藉由每個社區減少民生與農業需水量，區域水資源系統節省下來的供水量，可在後續時期使用，之後如果有缺水事件發生，可降低區域水資源系統的脆弱度。

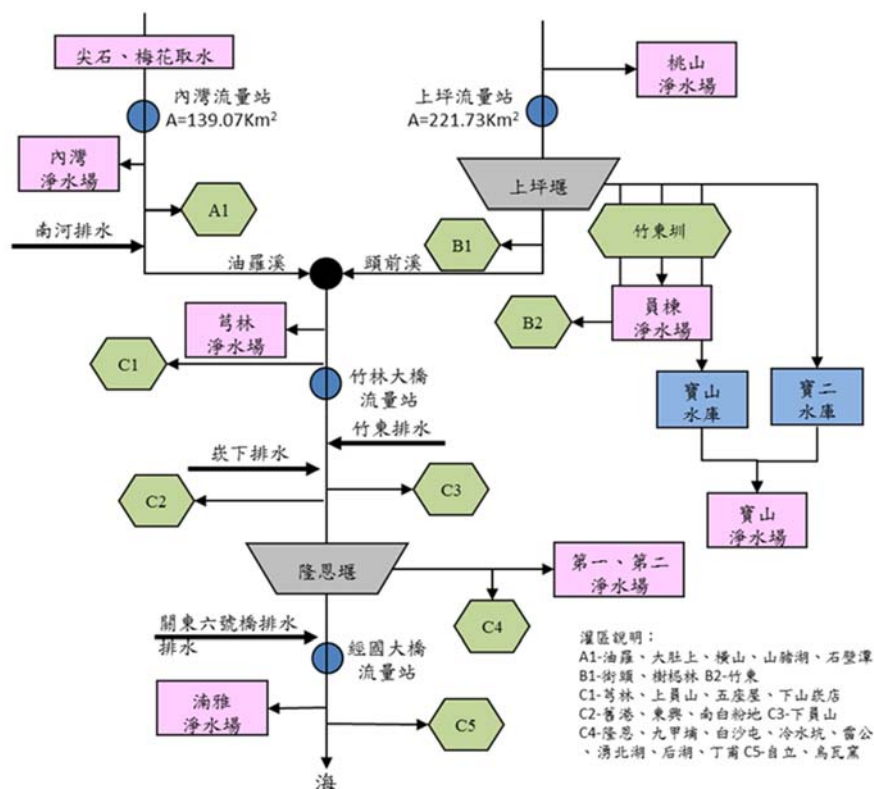


圖 4-7 頭前溪系統動力模式架構圖 (黃柏勳, 2013)





## 第5章 韌性社區調適能力建構案例

本研究挑選新竹社區作為設計案例，配合氣候調適六步驟做為氣候變遷下之調適能力建構方法，依循氣候調適六步驟之內容，逐一進行各項次步驟與工作項目，探討社區在未來氣候變遷下所面臨之水資源風險，以及社區調適能力之建構流程。本研究使用韌性社區供水系統模式來分析設計案例，設計案例提供符合台灣區域特性之韌性社區案例，其結果可供相關研究參考或與其他區域進行比較。

### 5.1 界定問題與設定目標

#### 5.1.1 關鍵議題之界定

根據新竹縣地方氣候變遷調適計畫(2014)列出新竹地區水資源領域的關鍵議題，包含水資源調度、水資源需求增加、水汙染問題，如圖 5-1。根據建議的四個調適策略，其中加強調度管理、落實透水保水、鼓勵低耗水產業與節水，這三個調適策略屬於本研究之範疇。在氣候變遷造成極端天氣發生頻率提高的情況下，水庫在枯早期的蓄水穩定性首先受到衝擊，特別是新竹地區主要兩座水庫(寶山和寶二水庫)屬於中小型水庫，在操作上需要多次蓄滿才能滿足新竹地區的用水需求。而臺灣目前在傳統水資源開發面臨用地取得的問題，考量氣候變遷衝擊的水資源調度與管理，是現在急需解決的問題。當降雨極端化發生時，不只造成新竹地區生活用水調度與管理問題，同時也提高農業用水風險，首先衝擊的第一線是社區居民，而許多社區的供水系統因為缺乏系統性的管理及規劃，在氣候變遷衝擊下最為脆弱。因此，本研究目的為應用氣候調適六步驟於韌性社區供水系統，希冀減少缺水事件帶來的損害，並且提升社區供水系統在氣候變遷下的韌性。本研究即在於發展系統性的方法，包括建立韌性社區供水系統模式、韌性社區供水風險評估方法與提供韌性社區調適路徑，以增進社區對於自然災害及應變機制的認知，同時加強社區之韌性並降低脆弱度。

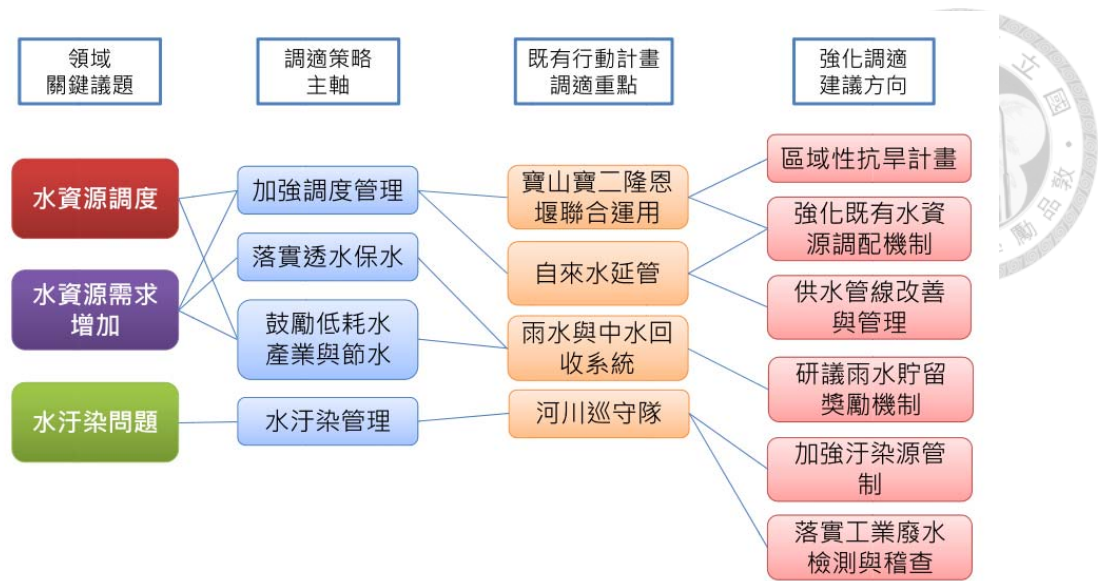
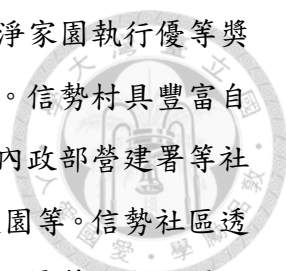


圖 5-1 新竹縣水資源領域調適行動（新竹縣地方氣候變遷調適計畫，2014）

### 5.1.2 目標之設定

在氣候變遷衝擊所帶來的威脅下，社區組織對氣候變遷的應變已經開始行動，而在水資源方面與民眾的日常生活有密切相關性，需要掌握社區水資源之需求與供給情形，為社區調適應變之關鍵議題。本研究設定韌性社區之調適目標，為提高社區水資源循環使用效率，降低對外部供水系統的需求，提高韌性社區在缺水事件下之調適能力，最終提升社區在氣候變遷下之韌性。韌性社區評估項目，則根據兩大用水需求：農業用水需求與民生用水需求，評估農業和民生之節水率。而調適目標年，在經濟部水利署台灣北部區域水資源經理基本計畫（水利署，2017）中，以民國 120 年，也就是 2031 年訂為目標年；而聯合國定義的 17 項永續發展目標（SDGs）則是從 2016 年一直持續到 2030 年，為期 15 年；另外新竹縣地方氣候變遷調適計畫（2014）則是參考 IPCC AR4 設定第一階段調適目標年為 2020~2039 年。本研究為務實控制調適目標之不確定性，參考 IPCC AR5 對近未來之定義，以規劃情境不確定性較小的近未來 2021~2040 年做為現階段之調適目標年。


本研究以新竹湖口鄉信勢社區為設計案例之參考依據，信勢社區鄰近北勢溪，居住人口約 6,000 人左右，男女比例各半。社區屬於傳統農業社區，土地多為住宅區及農業區，居民產業多以務農為主。信勢社區推動環境保護工作組織完整且有豐富的工作成果，如民國 88 年獲得全國環保模範社區資源回收特別獎、民國 91 年



獲得全國環保模範社區綠美化特優獎、民國 98 年獲得環保署清淨家園執行優等獎以及民國 99 年獲得全國低碳示範社區與環保模範社區特優獎等。信勢村具豐富自然生態景觀資源及北勢溪河川流經，社區配合農委會、文建會與內政部營建署等社區營造及農村再造計畫，致力於傳統農村社區風貌及社區有機菜園等。信勢社區透過社區營造來凝聚社區共識使居民參與公共事務並共同維護里內優質的生活環境。社區居民配合參與度高，近年來透過社區的努力將北勢溪沿岸綠美化良好，且有利用濕地處理污水並作為附近社區菜園灌溉用。此外社區內亦有良好資源回收概念與設備，將其廚餘、落葉堆肥應用於社區菜園。未來期盼能將客家文化以及北勢溪附近池沼、綠地、樹林、溪流與公園等區塊串聯成生態休閒網路系統，並結合地方各種相關團體，共同發展與維護社區地方生態環境與拓展地方特色，以社區營造推動使下一代更願意參與公共事務共同營造社區永續發展。

## 5.2 評估與分析現況風險

### 5.2.1 歷史事件之風險分析



臺灣近年來年雨量變化劇烈，2002 年最低年降雨量為 1572 mm，但 2005 年最高年降雨量為 3568 mm，兩者相差一倍之多。豐水年和枯水年之間的差異呈現持續擴大的趨勢，而豐枯水年的循環週期則是呈現縮短的趨勢。新竹地區在 1960~2000 年間豐水年和枯水年的年雨量差異約為 1200 mm，但在 2001~2009 年期間，豐枯現象加劇，差異約增加為 1700 mm(新竹地方氣候變遷調適計畫,2014)。在歷史事件之風險分析上，本研究蒐集近年來新竹地區遭遇之缺水風險與成因，如表 5-1，主要風險成因為危害之氣候因子(降雨量)與非氣候因子(外部供水系統能力)。近年來新竹地區供水系統面臨降雨過少導致水資源系統之水源不足，而近期也常發生短時間的強降雨，導致原水濁度過高，淨水廠受到影響造成進水量降低，導致必須停止出水，等待濁度下降，以上原因都會造成缺水事件，造成民生方面實施停供或減供，農業方面則是停灌和休耕，而工業方面，新竹科學園區為台灣重要產業，遇到嚴重缺水時經常用水車應急，非根本解決之道，要是缺水事件讓園區受到影響，將對台灣經濟有重大影響。面對歷史的教訓，台灣需要更積極的面對氣候變遷帶來的風險。

表 5-1 新竹地區近年來遭遇之缺水風險與成因

時間	區域	缺水風險	風險成因
2002	北台灣	降雨量僅達歷年平均值之 30%，以致地表逕流量銳減。即便由苗栗桃園系統支援每日 17 萬噸用水，與正常水量相較仍不足每日 8 萬噸，以致公共用水缺水率達 20%以上。3 月頭前溪與石門灌區一期作休耕，5 月 3 日起板新、桃園、新竹、苗栗、嘉義及花蓮美崙等地區實施夜間減壓供水。	 <p>危害－氣候因子（降雨量過低）                      危害－非氣候因子（外部供水系統能力不足）                      暴露－高缺水危害地區</p>
2003	北台灣	全台降雨不足，平均年雨量僅 1,689mm，較往年減少 31.5%。桃園、石門、新竹、嘉南農田水利會一期作公告休耕。新竹科學園區水源不足。	
2006	桃竹苗	降雨量偏低，桃竹苗地區缺水情形達旱災一級，公共缺水率達 30%、農業缺水率達 50%。	
2011	北部、中部	2010 年 10 月底，梅姬颱風過後全台面臨少雨，2012 年 1-2 月情況更加明顯。3 月後寶二水庫蓄水僅 40%，4 月起板新、桃園、新竹、苗栗、臺中及彰化等地區，實施第一階段減壓供水措施。	
2015	全台	全台降雨量不足，導致水資源供給問題。經濟部決議於 2 月 26 日起將新竹地區之限水由一級轉為二級，直至 6 月 8 日方解除全臺限水措施。新竹地區則於 1 月進入停灌。	
2017	北台灣	新竹地區因降雨嚴重不足，加上春耕的農業用水需求增加，自來水水源進水量驟降，造成部份地區發生缺水危機，緊急調度桃園地區每天五到六萬噸水、苗栗地區每天四到六萬噸水給新竹地區應急。	
2017	北台灣	受到暴雨侵襲，造成台灣自來水公司第一區管理處五個淨水場原水濁度過高暫停出水，影響淡水、三芝、石門、深坑、金山、萬里約一萬四千戶。	

## 5.2.2 利用現況資料進行風險模擬

本研究利用新竹氣象站 1986-2005 年的歷史氣象資料進行現況風險模擬，以下結果為案例社區之現況風險分析結果，並假設蒐集之雨水與再生水皆符合用水標的之水質需求。此節首先將 LID 設施不同的組合列舉如表 5-2，包含八個設計案例。因為以本研究以社區供水為研究目標，因此在設計案例分析時，以貯留型 LID 設施為主，例如人工濕地和雨水儲集系統，而直接滲透型 LID 設施為輔，例如綠屋頂和透水鋪面，分析兩類型設施之間的結合效益。在現況風險模擬，本研究使用八個設計案例，案例 1 為無任何 LID 設施，用來和其他案例比較 LID 設施的效益，案例 2 設置人工濕地，蒐集社區地表逕流並提供再生水灌溉農田，案例 4 社區加裝綠屋頂提供逕流至人工濕地，案例 6 為透水鋪面提供逕流至人工濕地，案例 7 則是綠屋頂和透水鋪面提供逕流，案例 3 設置雨水儲集系統，蒐集雨水以提供家庭低水質用水需求，案例 5 為雨水儲集系統結合綠屋頂，案例 8 則是設置四種 LID 設施，人工濕地和透水鋪面組合，而雨水儲集和綠屋頂組合，分別提供農業和民生用水，表 5-2 為進行現況風險評估之八個設計案例。

表 5-2 韌性社區現況風險評估之設計案例

設計案例	人工濕地 (WL)	雨水儲集系統 (RB)	綠屋頂 (GR)	透水鋪面 (PP)
1	--	--	--	--
2	V	--	--	--
3	--	V	--	--
4	V	--	V	--
5	--	V	V	--
6	V	--	--	V
7	V	--	V	V
8	V	V	V	V

本研究定義風險為節水率之倒數，當社區節水率越高時，風險越低。案例 1 在沒有任何 LID 設施的情況下，節水率為零，當外部供水系統缺水時，任何程度的缺水都會對社區造成影響，社區面對的風險為無限大，而其他案例則因設置 LID 設施而降低風險，在外部缺水情況不嚴重時，社區自身能夠支撐到外部供水系統恢復正常。分析設置雨水儲集系統之案例 3 和 5，表 5-3 顯示二十年的家庭節水率年平均，根據圖 3-9 台灣家庭用水之非接觸用水約佔總家庭需求的 32%，非接觸用水之需水量可由雨水儲集系統提供，結果顯示案例 3 和 5 之間的差異小，家庭節水率最高為 80.6%，風險值約為 1.2，約佔家庭總需水量 25.8% ( $=80.6\% \times 32\%$ )，顯示雨水儲集系統的效益，確實能夠減少外部民生供水系統的負荷。

表 5-3 韌性社區現況之家庭節水率

家庭節水率 (%)	Min	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Max
3 (RB)	47.6	62.8	68.4	73.2	80.6
5 (RB+GR)	47.5	62.7	68.2	73.2	80.5

Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 和 Q<sub>3</sub> 代表第一、第二和第三四分位數

然而每月的家庭節水率隨著月雨量變化不同，本研究調查降雨型態對於雨水儲集系統的影響，分析家庭節水率之月平均與連續不降雨日關係，圖 5-2 為家庭節水率之月平均，而圖 5-3 為連續不降雨日之月平均。台灣每年五月到六月為梅雨季節，降雨型態為長延時和低雨量；七月到九月為颱風季節，降雨型態為短延時和強降雨，此降雨特性可以由圖 5-3 看出，梅雨季節期間的連續不降雨日低於颱風季節，因此，在梅雨季節期間，雨水儲集系統的入流較為穩定，而有較高的家庭節水率；而在颱風期間，過多的雨量超過雨水儲集系統容量，無法儲存導致家庭節水率下降。在設計雨水儲集系統時，需要將當地的降雨型態納入考慮，才能最大化雨水儲集系統的效益。



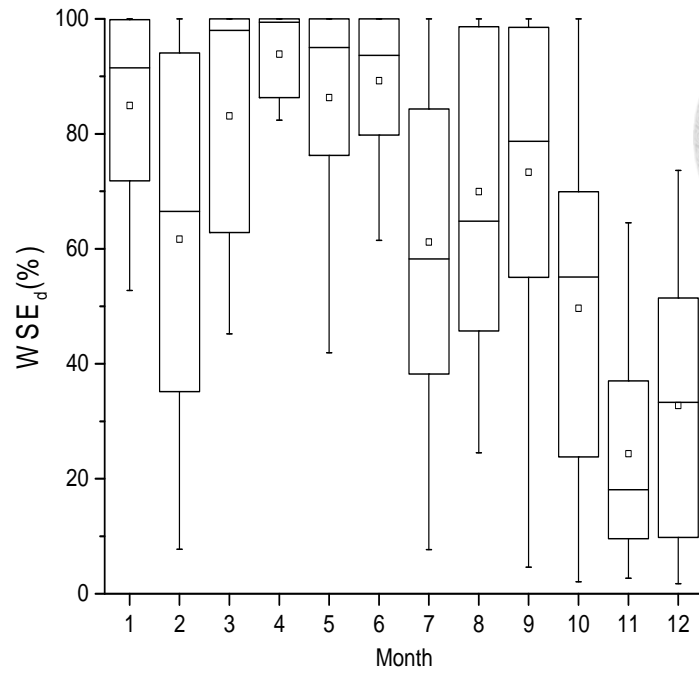


圖 5-2 家庭節水率之月平均

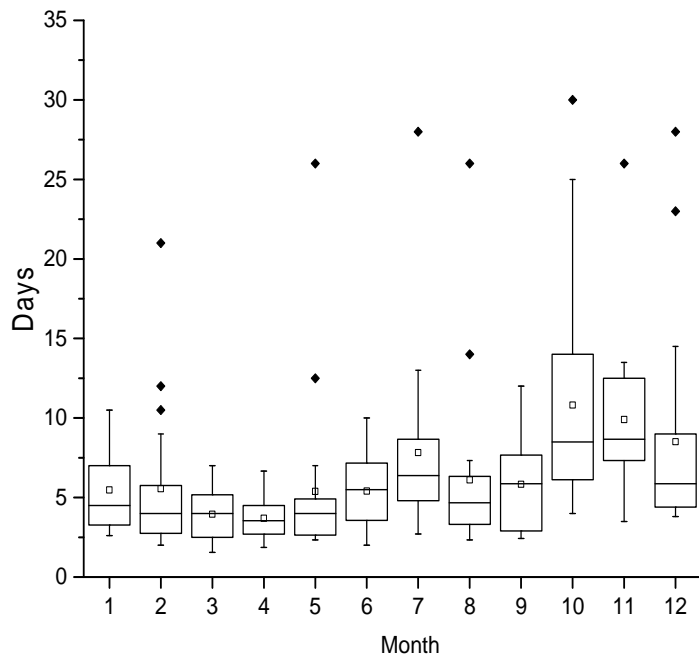


圖 5-3 連續不降雨日之月平均

在台灣灌溉用水約佔 68%的總用水需求，當儲存水量無法滿足所有用水需求時，農業用水往往被轉作民生或工業使用，但灌溉用水不足，將嚴重影響作物產量，而人工濕地藉由蒐集社區地表逕流，經過自然處理後，可提供再生水作為灌溉使用。農業節水率顯示人工濕地的節水效益，設計案例之農業節水率如表 5-4，二十年之農業節水率年平均，案例 2 只設置人工濕地，而案例 4、6 和 7 除了人工濕地，另

外設置綠屋頂或透水鋪面，從表中結果可以看出案例 4~7 有較高的農業節水率，顯示綠屋頂和透水鋪面可以有效調節逕流，降低洪峰流量和延遲洪峰到達時間，顯示不只在滯洪方面有效益，同時在供水方面也有不錯的效果，可以輔助人工濕地，讓暴雨來臨時，地表逕流不會集中進入濕地，而導致濕地無法負荷排出。而案例 8 雖然加裝最多的 LID 設施，但綠屋頂之逕流流入雨水儲集系統，人工濕地和雨水儲集系統之間分散地表逕流量，雖然農業節水率不是最佳，但也能同時提升家庭節水率，設置 LID 設施時，應綜合考量民生與家庭情形。

在台灣稻作可分為兩期，一期作從三月到六月，而二期作從七月到十一月，表 5-4 顯示一期作有較高的農業節水率，新竹地區在一期作和二期作期間，歷史平均總雨量分別為 798 mm 和 469 mm，歷史平均日溫度分別為 24°C 和 25°C，一期作雨量較高和溫度較低，所以作物需水量較低，其農業節水率較高。

表 5-4 韌性社區現況之農業節水率

農業節水率 (%)	Min		Q <sub>1</sub>		Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>		Max	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
生長期										
2 (WL)	12.2	1.7	15.5	6.9	19.9	10.7	23.0	12.9	27.6	19.5
4 (WL+GR)	13.1	1.4	17.9	7.0	21.7	11.8	24.6	15.4	30.4	23.2
6 (WL+PP)	15.5	0.7	21.6	8.6	25.0	13.1	29.5	18.1	37.4	29.0
7 (WL+PP+GR)	16.0	0.5	23.0	9.2	26.7	13.8	31.3	20.0	40.0	32.1
8 (WL+PP+RB+GR)	12.2	0.0	17.7	7.1	19.9	11.3	25.7	14.8	31.1	26.0

Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>和 Q<sub>3</sub>代表第一、第二和第三四分位數

雨水儲集系統儲存雨水並且提供低水質用水，當缺水發生時，外部民生供水系統停止供水，將由住宅儲存系統和雨水儲集系統供應，在台灣住宅儲存系統為了確保儲水符合用水的水質要求，設計容量約為供應兩天的需水量，儲存水不應放置超過兩天，而住宅儲存系統雖有兩天的儲存容量，但並非一直處於滿水位，因此實際上支撐延時不足兩天。表 5-5 為二十年之平均支撐延時，表中整數值代表能完整供應用水的天數，其中案例 3、5 和 8 支撐延時超過兩天，顯示設置雨水儲集系統後，可以增加一天的支撐延時。台灣面臨缺水事件時，民生供水為了有效達成節水成效，延長水庫用水時程，並減少停水次數，經常採取供五停二的輪區供水方式，因此若能在社區內設置雨水儲集系統，使支撐延時增加一天，在供五停二的情況下，即能確保社區兩天用水無虞。

表 5-5 韌性社區現況之支撐延時

支撐延時 (日)	Min	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Max
1	1	1	1	1	1
2 (WL)	1	1	1	1	1
3 (WL+RB)	2	2	2	2	2
4 (WL+GR)	1	1	1	1	1
5 (RB+GR)	2	2	2	2	2
6 (WL+PP)	1	1	1	1	1
7 (WL+PP+GR)	1	1	1	1	1
8 (WL+PP+RB+GR)	2	2	2	2	2

水稻田產量是社區居民關心的重點，而水分利用效率能夠反映出每單位的灌溉用水對應的產量，在本研究中作物產量利用歷史最大產量乘上產量打折率計算得出，歷史產量可於政府相關網站查得，而產量打折率則是用實際灌溉供水量除以灌溉用水需求。表 5-6 顯示二十年之年平均水分利用效率，可以看到案例 1、3、5 結果一致，這是因為雨水儲集系統只用於供應農業需求，而案例 2、4、6、7、8 因為設置人工濕地有較高的水分利用效率。另外一期作的水分利用效率高於二期作，這是因為一期作的總雨量較高，有較多的地表逕流流入濕地，因此濕地能夠提供更多的再生水給水稻田灌溉使用。

表 5-6 韌性社區現況之水分利用效率

水分利用效率 (kg/m <sup>3</sup> )	Min		Q <sub>1</sub>		Q <sub>2</sub>		Q <sub>3</sub>		Max	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
期作										
1	0.15	0.18	0.30	0.29	0.35	0.47	0.41	0.53	0.51	0.58
2 (WL)	0.21	0.22	0.41	0.36	0.46	0.49	0.58	0.54	0.75	0.70
3 (RB)	0.15	0.18	0.30	0.29	0.35	0.47	0.41	0.53	0.51	0.58
4 (WL+GR)	0.22	0.22	0.43	0.35	0.47	0.49	0.59	0.55	0.77	0.73
5 (RB+GR)	0.15	0.18	0.30	0.29	0.35	0.47	0.41	0.53	0.51	0.58
6 (WL+PP)	0.25	0.21	0.45	0.35	0.49	0.52	0.61	0.57	0.84	0.78
7 (WL+PP+GR)	0.25	0.21	0.45	0.35	0.50	0.52	0.63	0.58	0.86	0.80
8 (WL+PP+RB+GR)	0.21	0.19	0.40	0.30	0.45	0.49	0.57	0.56	0.79	0.73

### 5.3 評估與分析未來風險

#### 5.3.1 設定氣候情境

政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在 2013 年公布第五次 (Fifth Assessment Report, AR5) 報告書之相關內容，而 AR5 報告書對於未來氣候之趨勢分析採用第五期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 之結果。CMIP5 中蒐集彙整了來自世界不同國家或研究機構，超過 40 個大氣環流模式 (GCM) 之輸出結果，如此多種的 GCM 模式，需要選擇合適之 GCM 模式才能進行未來風險評估與分析。根據林嘉佑 (2016) 建立之區域性 GCM 模式挑選流程，包含環流模式排序、地面氣象站分區，以及模式相似性檢測，可協助使用者針對研究區域找出適用之 GCM 模式。根據氣象站之降雨特性預先予以分區，應用權重平均法 (weighted average ranking method, WAR) 針對各氣象分區推薦適用之 GCM 模式，如表 5-7，未來進行水資源系統之風險評估時，對於位在相同氣象分區之氣象站，即可參考相同之 GCM 模式進行評估。

表 5-7 台灣各氣候分區之推薦環流模式 (林嘉佑, 2016)

分區	氣象站	排名 1	排名 2	排名 3
北部	淡水、彭佳嶼、 新竹、梧棲、台 北、台中	HadGEM2-AO	NorESM1-ME	CSIRO-Mk3-6-0
東北	基隆	MRI-CGCM3	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5
東部	宜蘭、恆春、成 功、台東	CESM1-CAM5	GISS-E2-R	CCSM4
西南部	嘉義、台南、 高雄	HadGEM2-AO	MIROC5	bcc-csm1.1m
南部	大武、恆春	MIROC5	GISS-E2-R	CCSM4
北部山區	鞍部、竹子 湖、蘇澳	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME
中部山區	玉山、日月潭	MIROC5	CCSM4	HadGEM2-AO
南部山區	阿里山	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MIROC5
西部離島	東吉島、澎湖	HadGEM2-AO	MIROC5	CESM1-CAM5
東部離島	蘭嶼	GISS-E2-R	CSIRO-Mk3-6-0	CESM1-CAM5
全台		HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4

在溫室氣體排放情境設定部分，參考 IPCC AR5 所公布之代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathways, RCPs) 作為未來氣候變遷之假設情境，以輻射強迫力 (radiative forcing) 在 2100 年與 1750 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。被命名為 RCP 2.6 的情境代表每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP 4.5、RCP 6.0 與 RCP 8.5 則代表每平方公尺的輻射強迫力分別增加 4.5、6.0 與 8.5 瓦。RCP 2.6 用於表現樂觀的未來氣候走向，RCP 4.5 與 6.0 則是較為中庸的未來趨勢，而 RCP 8.5 則象徵較為悲觀或是嚴重之未來趨勢。由於 RCP 4.5 與 RCP 6.0 在趨勢表現上較為相似，且提供 RCP 4.5 輸出結果的 GCM 模式較多，因此部分歐洲大型氣候變遷研究計畫如 IMPRESSIONS (Impacts and risks from higher-end scenarios: Strategies for innovative solutions) 建議採用 RCP 4.5 代表中庸趨勢之代表情境 (IMPRESSIONS, 2015)。本研究選取 RCP 2.6、4.5、8.5 三項溫室氣體排放情境進行未來風險之模擬。此外依據目標年為 2040 年之設定，將參考 IPCC AR5 對於未來短期 (2021-2040) 年之模式輸出結果來進行未來風險分析。

在上一節進行現況風險評估之設計案例共有八個，因其設計案例在未來風險評估時，考量氣候情境種類眾多，不利比較分析，因此在進行未來風險評估時，去除與其他案例有重疊之設計案例，只保留四個設計案例，案例 1 無 LID 設施，和其他案例比較以了解 LID 設施的效用，案例 4 為人工濕地與綠屋頂，案例 5 為雨水儲集和綠屋頂，案例 4 和 5 可比較綠屋頂提供的逕流效用，案例 8 則是四種 LID 設施皆裝設，進行未來風險評估之設計案例如表 5-8。

表 5-8 韌性社區未來風險評估之設計案例

設計案例	人工濕地 (WL)	雨水儲集系統 (RB)	綠屋頂 (GR)	透水鋪面 (PP)
1	--	--	--	--
4	V	--	V	--
5	--	V	V	--
8	V	V	V	V

### 5.3.2 評估基期風險

在評估基期風險之前，需要比較歷史與氣象合成模式之基期資料，驗證氣象合成模式是否能夠重現歷史特性。首先本研究依據 IPCC AR5 之定義，將基期 (Baseline) 設定為 1986-2005 年，並且利用傳統型氣象合成模式 (WGEN) 和低頻率氣象合成模式 (LF-WGEN) 產生 50 組 20 年的氣象資料，兩種氣象合成模式根據蒙地卡羅法隨機產生一系列日降雨資料，來維持氣象統計特性。理想的氣象合成模式能夠在維持歷史統計特性的前提下，產生更多的極端事件。WGEN 和 LF-WGEN 兩種氣象合成模式產生的日平均溫度皆接近歷史日均溫，而在雨量方面整理在表 5-9，顯示 LF-WGEN 能夠更好的呈現歷史日雨量的平均值和標準差，同時產生更極端的日雨量，歷史最大日雨量為 397 mm，而 WGEN 產生最大日雨量為 382 mm，僅能重現 96% 的歷史資料，結果顯示 WGEN 較難產生極端的日雨量。另外，表 5-10 顯示氣象合成模式之各月雨量與歷史月雨量相比，LF-WGEN 的相關係數 (correlation coefficient,  $r$ ) 較高，而均方根誤差 (root mean squared error, RMSE) 較低，顯示 LF-WGEN 表現較好。

因台灣農業分為兩期作，因此一期作與二期作之總雨量對於農業灌溉相當重要，表 5-11 比較氣象合成模式之各期作雨量與歷史期作雨量，而 LF-WGEN 產生之一期作與二期作總雨量，其平均值較為接近歷史值，而標準差方面，在一期作，WGEN 較為接近歷史值，二期作則是 LF-WGEN 比較接近歷史值，以上結果證明 LF-WGEN 在重現雨量資料之統計特性上有較佳的能力。另外，表 5-12 顯示氣象合成模式之連續不降雨日和年雨量，為影響家庭節水率和支撐延時的重要因子，因此需要分析氣象合成模式產生之日降雨資料，其連續不降雨日和年雨量是否接近歷史值，才能避免繁衍之雨量資料影響指標結果。WGEN 和 LF-WGEN 產生之日降雨資料，其連續不降雨日之平均和標準差，皆與歷史連續不降雨日接近，但年雨量方面，LF-WGEN 產生之年雨量，不論在平均和標準差方面，都較為接近歷史年雨量。

表 5-9 氣象合成模式產生日雨量之統計特性

日雨量 (mm)	最大值	平均值	標準差
His	397	4.6	16.5
LF-WGEN	909	4.7	17.0
WGEN	382	4.8	13.9

表 5-10 氣象合成模式產生之月雨量

月雨量 (mm)	His	LF-WGEN	WGEN
1	69	77	69
2	126	133	175
3	183	173	212
4	189	171	192
5	249	243	285
6	237	265	256
7	109	142	138
8	200	204	188
9	199	164	112
10	60	50	37
11	34	49	41
12	37	53	40
r		0.97	0.91
RMSE		18.9	27.7

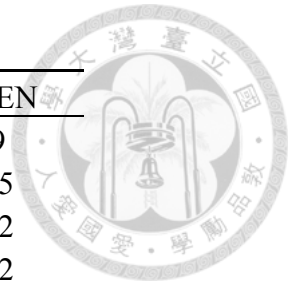


表 5-11 氣象合成模式產生之一期作與二期作總雨量

總雨量 (mm)	一期作		二期作	
	平均	標準差	平均	標準差
His	798	248	469	348
LF-WGEN	807	304	426	295
WGEN	887	225	343	131

表 5-12 氣象合成模式產生之連續不降雨日與年雨量

	連續不降雨日		年雨量 (mm)	
	平均	標準差	平均	標準差
His	5.2	5.4	1691	460
LF-WGEN	4.7	4.1	1723	354
WGEN	4.7	4.7	1742	289

利用氣象合成模式產生之氣象資料，輸入社區供水系統模式，並利用比較歷史與基期之指標是否有差異。圖 5-4 為歷史與基期之水分利用效率，由 LF-WGEN 基期資料計算之一期作水分利用效率較為接近歷史資料，而在二期作部分，WGEN 和 LF-WGEN 則是差異不大。圖 5-5 為歷史與基期之農業節水率，顯示 LF-WGEN 基期資料計算之一期作與二期作的農業節水率都較為接近歷史值。圖 5-6 (a) 為歷史與基期之家庭節水率，WGEN 和 LF-WGEN 基期之家庭節水率都比歷史值高，原

因在於 WGEN 和 LF-WGEN 產生之日降雨資料的連續不降雨日比歷史資料低。圖 5-6(b) 為歷史與基期之支撐延時，歷史值和 WGEN 和 LF-WGEN 基期結果接近。最後，表 5-13 總結 WGEN 和 LF-WGEN 兩個氣象合成模式，產生之基期日降雨資料對於指標結果的影響。LF-WGEN 在案例 1、4、8 中，一期作水分利用效率、一期作農業節水率、二期作農業節水率、家庭節水率以及支撐延時，其平均值較為接近歷史值。而 WGEN 只有在案例 1 中，二期作水份利用效率的平均值比較接近歷史值。綜合以上的指標結果，可看出 LF-WGEN 基期資料，各項指標值的平均和中位數都和歷史指標值比較接近，顯示 LF-WGEN 重現歷史特性之能力較佳，因此在後續未來風險評估，本研究使用 LF-WGEN 產生之氣象資料進行未來風險評估。

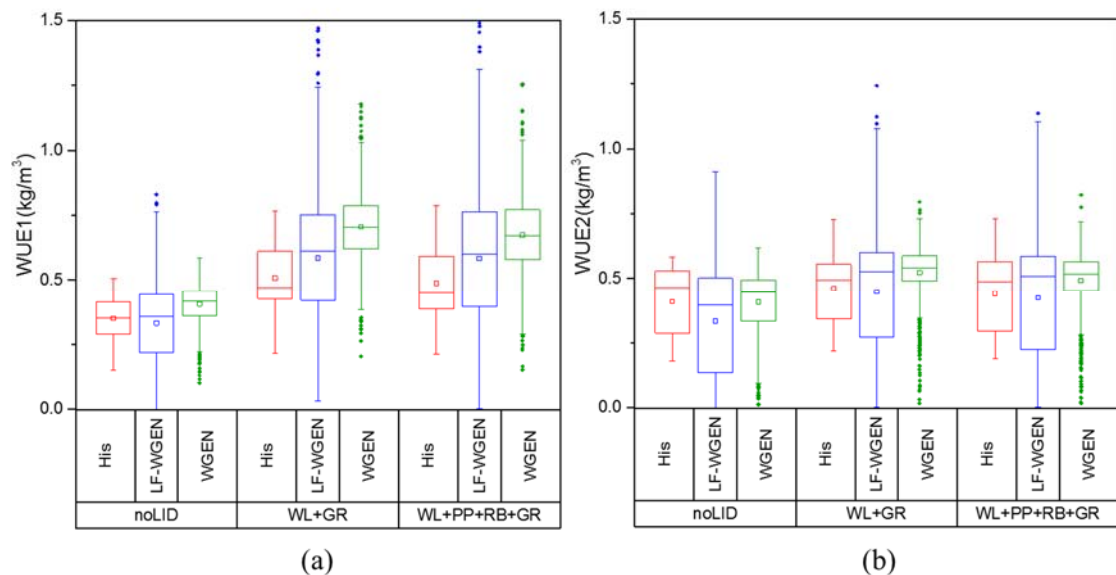


圖 5-4 歷史與基期之水分利用效率



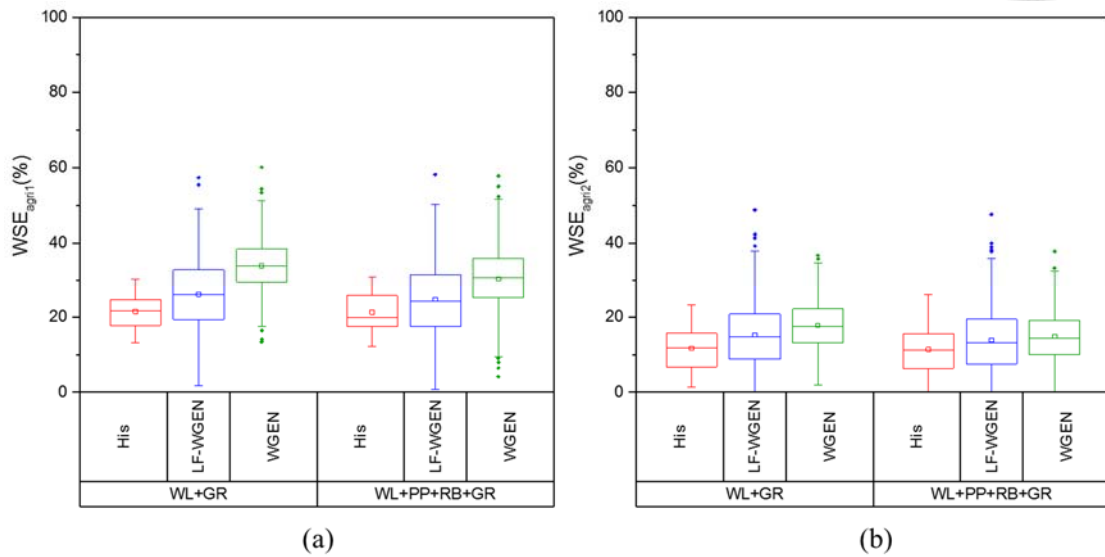


圖 5-5 歷史與基期之農業節水率

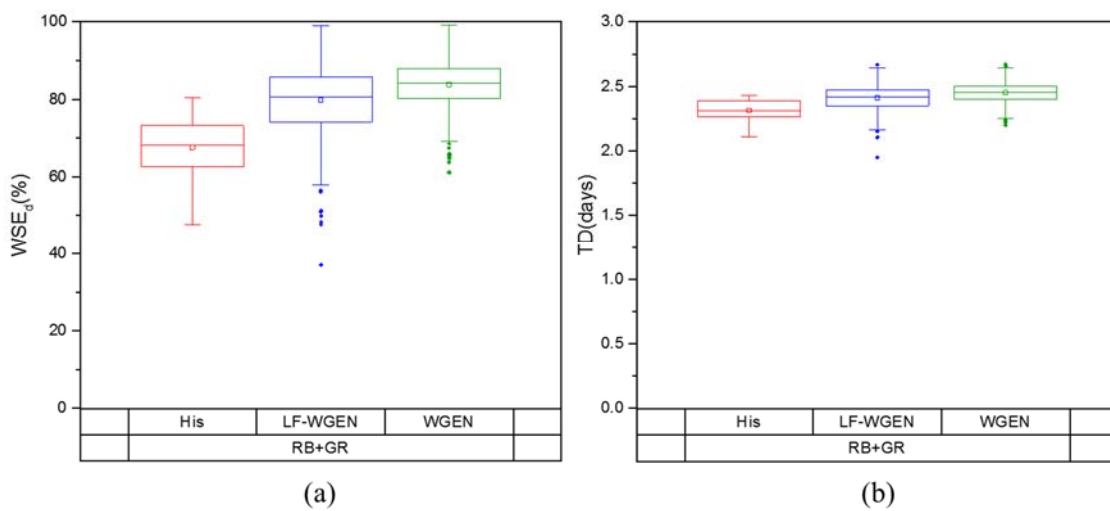


圖 5-6 歷史與基期之家庭節水率與支撐延時

表 5-13 比較氣象合成模式之指標結果

指標	LF-WGEN	WGEN
水分利用效率 (一期作)	案例 1、4、5、8	
水分利用效率 (二期作)	案例 4、8	案例 1
農業節水率 (一期作)	案例 1、4、5、8	
農業節水率 (二期作)	案例 1、4、5、8	
家庭節水率	案例 1、4、5、8	
支撐延時	案例 1、4、5、8	

### 5.3.3 評估未來風險並與基期風險比較差異

本研究利用低頻率氣象合成模式產生之氣象資料進行未來風險模擬，並與基期風險比較差異。根據表 5-7 推薦之 GCM 模式，新竹氣象站屬於北部區域，挑選出前三名之 GCM 模式為 HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3-6-0，本研究根據 GCM 模式的 RCP 4.5 氣候情境進行未來風險評估。基於地面氣象站之平均氣溫與降雨特性進行氣候變遷下之變化修正，再應用低頻率氣象合成模式產生日尺度之氣象資料。為了比較基期與未來的風險差異，需要了解氣候情境下總雨量的變化情形，前三名 GCM 模式的年雨量變化整理於表 5-14，與基期相比，HadGEM2-AO 的年雨量減少，但 CSIRO-Mk3-6-0、NorESM1-ME 則是年雨量增加。另外，前三名 GCM 模式的一期作與二期作雨量變化整理於表 5-14，與基期相比，CSIRO-Mk3-6-0、HadGEM2-AO 的一期作雨量減少，而二期作雨量增加，但 NorESM1-ME 則是一期作和二期作雨量皆增加。

表 5-14 氣候情境下未來雨量變化

GCM 模式	年雨量變化 (%)	一期作雨量變化 (%)	二期作雨量變化 (%)
CSIRO-Mk3-6-0	14	-1	44
HadGEM2-AO	-15	-20	8
NorESM1-ME	13	8	17

氣候情境下未來的雨量變化，將影響外部與社區供水系統可取得之水資源，氣候情境下外部系統可供水量與節水率平均變化幅度如表 5-15。外部供水變化代表外部風險變化，而社區之節水率變化則反應社區的風險變化。在雨量減少的氣候情境中，節水率的變化幅度小於外部供水量的變化幅度，而在雨量增加的氣候情境中，節水率的變化幅度大於外部供水量的變化幅度，顯示當外部風險增加時，社區透過 LID 設施的調適，可以降低外部風險對社區造成的影響，穩定社區供水。

表 5-15 氣候情境下外部系統可供水量與節水率變化

GCM 模式	外部系統可供水量變化 (%)	節水率變化 (%)
CSIRO-Mk3-6-0	8	21
HadGEM2-AO	-18	-10



接下來由指標結果分析 LID 設施在基期與氣候情境下的風險差異，一期作與二期作的水分利用效率如圖 5-7、農業節水率如圖 5-8、家庭節水率與支撐延時如圖 5-9，並以節水率之倒數為風險值，表 5-16 為基期與氣候情境下農業與家庭風險值。HadGEM2-AO 下的家庭風險值和一期作之農業風險值相對基期較高，因 HadGEM2-AO 預測未來雨量趨勢減少，家庭節水率從基期 80%降低到 75%，而一期作的農業節水率約 20%，二期作的農業節水率約 15%。CSIRO-Mk3-6-0、NorESM1-ME 模式因預測未來雨量趨勢增加，其家庭與農業風險值相較基期低，人工濕地可提供農田更多灌溉用水，農業節水率微幅增加，顯示 LID 設施在氣候變遷影響下能夠維持一定的節水效用。

表 5-16 基期與氣候情境下農業與家庭風險值

	農業風險值(一期作)	農業風險值(二期作)	家庭風險值
基期	4.1	7.4	1.3
CSIRO-Mk3-6-0	3.9	5.2	1.2
HadGEM2-AO	5.6	6.6	1.4
NorESM1-ME	3.4	6.1	1.2

支撐延時部分和家庭節水率變化情況相同，若未來雨量減少，支撐延時也隨之下降，此結果顯示家庭節水率和支撐延時皆受未來雨量變化趨勢影響，若未來雨量減少，可能導致 LID 設施的供水效益降低，因此在未來或許需要增加 LID 設施數量，以維持原本的供水效益水準。另外比較不同 LID 設計案例之情形，在案例 4 和案例 8 有較高的水分利用效率，因為人工濕地提供再生水而降低灌溉需水量，而案例 8 因為部分逕流流入雨水儲集系統，水分利用效率比案例 4 略差。另外因一期作雨量較高，LID 設施供水效益較佳，一期作的水分利用效率、農業節水率，在氣候情境間有較大的差異。

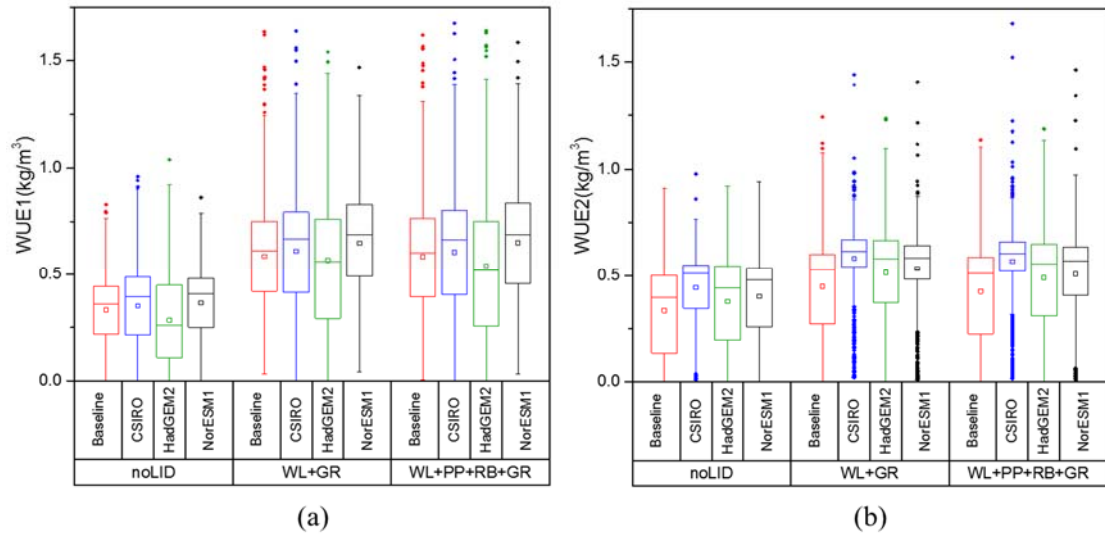


圖 5-7 基期與氣候情境之水分利用效率

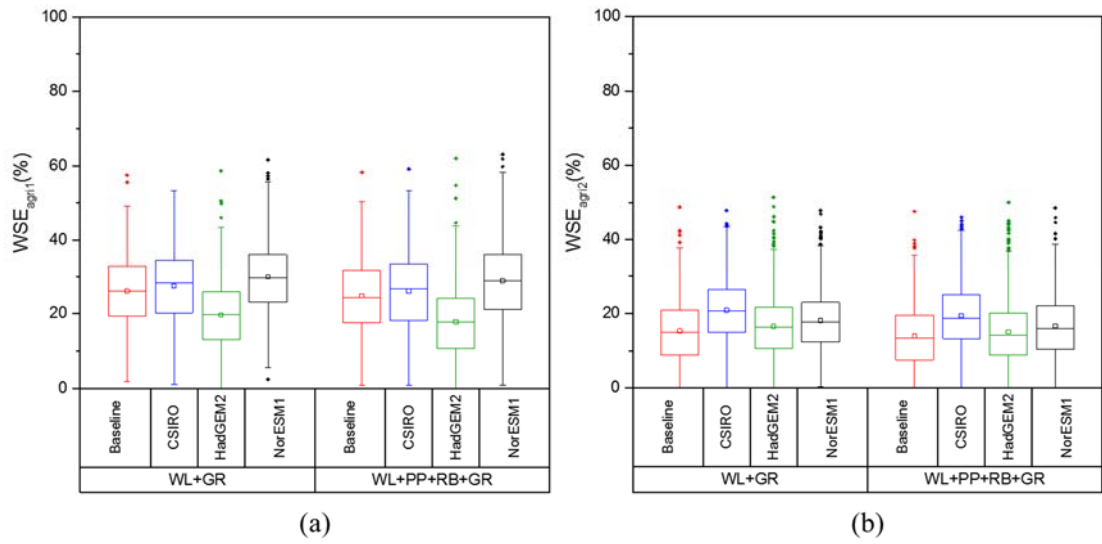


圖 5-8 基期與氣候情境之農業節水率

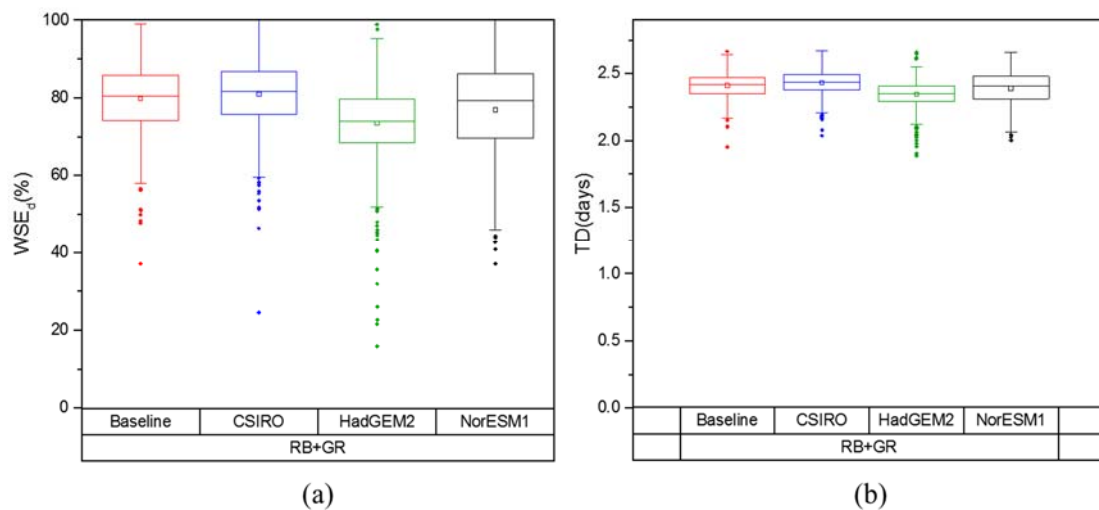


圖 5-9 基期與氣候情境之家庭非接觸節水率與支撐延時

為了分析雨量和各項指標之相關性，並討論不同氣候情境以及繁衍之氣象資料長度對於指標結果的影響，本研究利用 LF-WGEN 產生 50 組 20 年的氣象資料，透過包含四種 LID 設施之案例 8，計算各項指標，並比較基期與未來氣候情境下雨量和指標變化之相關性。表 5-17 為一期作雨量與水分利用效率、農業節水率之相關性，表 5-18 為二期作雨量與水分利用效率、農業節水率之相關性，從這兩張表中可以看出大部分的氣候情境下，水分利用效率、農業節水率和雨量為正相關，除了 RCP 4.5 CSIRO-Mk3-6-0 情境下，水分利用效率、農業節水率和雨量為負相關，還有 RCP 2.6 HadGEM2-AO 情境下之水分利用效率也為負相關。在這兩個氣候情境中（RCP 4.5 CSIRO-Mk3-6-0 和 RCP 2.6 HadGEM2-AO），因為氣候情境預測未來雨量微幅下降，但因 LF-WGEN 產生之連續不降雨日較低，降雨日增加，人工濕地入流量也微幅增加，可提供較多的再生水灌溉農田，灌溉需水量下降，才導致水分利用效率、農業節水率增加，呈現指標和雨量為負相關。

表 5-19 為年雨量與家庭節水率、支撐延時之相關性，大部分氣候情境呈現家庭節水率、支撐延時和年雨量為正相關。但少部分氣候情境顯示為負相關，原因在於增加的雨量讓雨水儲集入流量變大，雨水儲集桶在滿水位的狀態下，出流量增加，過量的雨水無法儲存供後續使用。將 LF-WGEN 繁衍之 50 組 20 年的氣象資料分別取 10、20、30、40、50 組出來（200、400、600、800、1000 年），以 RCP 2.6 HadGEM2-AO 二期作之農業節水率為例，雨量變化如圖 5-10，農業節水率變化如圖 5-11，兩圖中隨著繁衍資料長度的增加而逐漸收斂。在不同繁衍長度下，雨量變

化與基期相比皆為減少，但農業節水率在 200 年和 400 年的長度下，與基期相比有增加也有減少的情形，但隨著繁衍長度的增加而收斂，在 1000 年的繁衍長度下，農業節水率與基期相比為減少。以上結果顯示繁衍的資料長度對於指標結果有相當程度的影響，在討論雨量變化和指標結果的相關性時，需要足夠長的繁衍長度才能反映出兩者之間的相關性。

表 5-17 一期作雨量與農業相關指標結果之相關性

一期作	雨量	水分利用效率	相關性	農業節水率	相關性
<b>RCP 2.6</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↓	↓	+	↓	+
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+
<b>RCP 4.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↓	↑	-	↑	-
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+
<b>RCP 8.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↑	+	↑	+
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+

表 5-18 二期作雨量與農業指標結果之相關性

二期作	雨量	水分利用效率	相關性	農業節水率	相關性
<b>RCP 2.6</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↑	+	↑	+
HadGEM2-AO	↓	↑	-	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+
<b>RCP 4.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↑	+	↑	+
HadGEM2-AO	↑	↑	+	↑	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+
<b>RCP 8.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↑	+	↑	+
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+

表 5-19 年雨量與家庭指標結果之相關性

	年雨量	家庭節水率	相關性	支撐延時	相關性
<b>RCP 2.6</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↓	—	↓	—
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↓	—	↓	—
<b>RCP 4.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↑	+	↑	+
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↑	+	↑	+
<b>RCP 8.5</b>					
CSIRO-Mk3-6-0	↑	↓	—	↓	—
HadGEM2-AO	↓	↓	+	↓	+
NorESM1-ME	↑	↓	—	↑	+

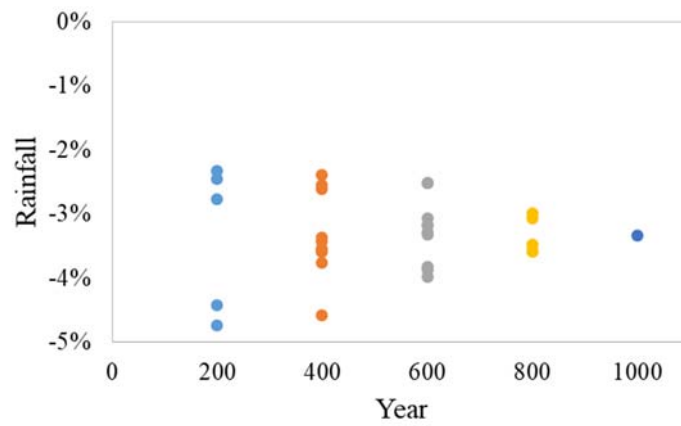


圖 5-10 不同繁衍資料長度之雨量變化

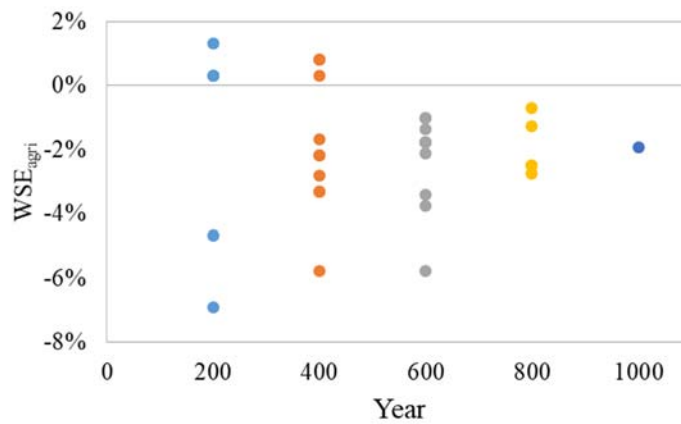



圖 5-11 不同繁衍資料長度之農業節水率變化

## 5.4 界定與評估調適選項

### 5.4.1 界定調適選項



研究方法建立之社區水資源評估指標系統，其中節水率評估家庭和農業兩面向，支撐延時評估家庭面向，水分利用效率則是農業面向，考量節水率評估的面向較多，且數值呈現上較為直觀，步驟四以節水率作為調適選項的量化項目，最後提供調適路徑規劃使用。根據研究方法彙整之社區調適選項，為了量化分析調適選項，需要調適選項之相關數據，其調適選項之參考文獻與節水效用列於表 5-20。本研究以新竹信勢村為案例，蒐集調適選項之相關數據，以供後續評估調適選項使用。因量化調適選項需要輸入節水率，根據節水率相關資料是否容易取得，將調適選項分類為可量化和難量化兩類。可量化之調適選項屬於定量型調適選項，須蒐集相關文獻或透過評估模式計算調適選項之節水率，再以 B-S model 進行量化評估。可量化之調適選項例如節水灌溉、家庭省水器材、低衝擊開發設施、水利設施改善與更新等，可透過文獻蒐集或者模式評估節水率；調整耕種日期、節水作物、農業迴歸水輪灌、輪灌等調適選項，需要蒐集區域性的數據，受限於資料取得，目前較難量化，若有後續研究能夠補足數據缺口，即可進行量化分析。調適選項除了可能因為數據取得不易，也會因本身特性屬於定性型之調適選項，只能分析調適選項的特性，例如地面和地下水聯合營運、自動水文測報及灌溉系統、農田抗旱應變機制等，通常以專家之意見來評估調適選項的成效，為主觀的分析方法。另外，減灌或停灌因對產量有不可回復的影響，應為臨時方法，不應作為長期之調適選項，故無法列入調適路徑中。本研究挑選可量化之調適選項進行評估，包含節水灌溉（選項 A）、家庭省水器材（選項 B）、低衝擊開發設施（選項 C）和水利設施改善與更新（選項 D），由 B-S model 量化調適選項價值後，畫出調適路徑圖。



表 5-20 量化社區供水之調適選項

策略	調適選項	參考文獻	節水效用	目前可/難 量化 (O/Δ)
節約用水	節水灌溉	推廣旱作管路灌溉計畫	每公頃可較傳統漫灌或溝灌方式有效節省 0.5 萬立方公尺的灌溉用水	O
	調整耕種日期	陳清田 (2014)	一期作水稻種植日期由 1/16 調整至 2/16 並於抽穗期實施 7 天之輪灌期距時，則有 23.3%~30.5%之節水成效	Δ
	節水作物	游添榮 (2014)	玉米生長所需的水量約為每公頃 3000 立方公尺，為水稻的 30%，而高粱約為水稻的 20%	Δ
	減灌或停灌	臺灣農田水利史-灌溉方法與灌溉用水型態		Δ
	家庭省水器材	水利署省水標章資訊服務網	省水水龍頭節水率約 50%、兩段式馬桶節水率約 30%-65%	O
多元開發	低衝擊開發設施	廖朝軒等 (2001)、荊樹人 (2007)	由本研究供水系統模式模擬	O
	農田迴歸水	水利署北水局 (2007)、吳瑞賢等 (2011)		Δ
有效管理	水利設施更新及改善	加強農田水利建設計畫	每公里約可減少 7 萬立方公尺之輸漏水損失	O
	輪灌	臺灣農田水利史-灌溉方法與灌溉用水型態		Δ
	地面和地下水聯合營運	中區水資源局 (2007)		Δ
	自動水文測報及灌溉系統	林永傳等 (2014)	彰化農田水利會於荊仔埤圳建置自動化水文測報及閘門遙控設施，掌握灌溉區域水文情勢以調配灌溉用水，估計可節省 20%之灌溉用水量	Δ
	農田抗旱應變機制	農田水利會旱災災害防救手冊		Δ

#### 5.4.2 評估調適選項

選項 A (節水灌溉)：為維護糧食安全與農業永續發展，透過推廣耐旱作物及研發高效用水灌溉等方式，有效節省灌溉用水量，滿足缺水地區之灌溉需求。根據 104 年農業用水量統計報告，由灌溉用水量和實際灌溉面積計算得出，台灣水稻田年平均灌溉水量每公頃約 2.3 萬立方公尺 (水利署，2015)，農委會輔導農民施設省水、省工及兼具灌溉、施肥、施藥等多目標管路灌溉設施，每公頃每年可較傳統漫灌或溝灌方式有效節省 0.5~1 萬立方公尺 (水利署，2016；農委會，2002) 的灌溉用水，同時降低生產成本，提高生產競爭能力，增進水土資源有效利用。彰化地區提出黃金廊道計畫，推行節水型農業，目前果菜節水灌溉之省水效率研究以番茄及胡瓜居多，主要因其植株需水明顯高於其它種果菜作物。臺灣番茄栽培從定植至採收期結束，生育期約 8~9 個月，每公頃淹灌用水量估計約 4,020~6,030 立方公尺，滴灌約為 860~1,300 立方公尺，節水率約 21.6% (謝明憲，2014)。農委會自民國 72 年起補助各農田水利會辦理「推廣旱作管路灌溉計畫」，每年度預計辦理面積為 2,000 公頃。本研究案例水稻田面積為 34 公頃，由社區供水系統模式模擬之水稻田灌溉用水量約為每公頃 2.9 萬立方公尺，假設每公頃可減少 0.5 萬立方公尺的灌溉用水，則農業節水率為 17.4%。

選項 B (家庭省水器材)：在民生需水量部分，透過省水水龍頭、兩段式馬桶和省水蓮蓬頭等省水器材，可有效降低民生需水量，同時不影響使用者感受，一般器材與省水器材之節水率比較如表 5-21 (水利署省水標章資訊服務網)。根據調查省水馬桶市占率已達 87%，顯見技術能力足以滿足市場需求，但統計結果顯示台灣地區 6 公升省水馬桶普及率僅有 11.3%，相較於先進國家仍屬偏低，顯示仍有推廣的空間。而洗衣機家庭普及率超過九成，市場飽和度高，成長空間已有限，推廣上較為不易 (周育似，2011)。本研究選取較容易推廣之省水器材，如省水水龍頭、省水蓮蓬頭以及兩段式馬桶，並根據表 5-21 的節水率推估省水量，配合每人每日之各種用途使用水量，如表 5-22 (內政部營建署，2012)，推估每人每日約可省下 65 公升，計算得出每人每日用水量由 250 公升減少為 185 公升，則家庭節水率為 26%。

表 5-21 一般用水器材與省水器材之節水率比較表

類型	一般型器材	省水器材	平均節水率 (%)
水龍頭	15~20 公升/分鐘	9 公升/分鐘以下	50%以上
蓮蓬頭	15~20 公升/分鐘	10 公升/分鐘以下	50%以上
一段式馬桶	12~14 公升/次	6 公升/次以下	50%以上
兩段式馬桶	-	第一段 9 公升/次以下 第二段 4.5 公升/次以下	30%~65%
兩段式沖水器	-	小號用水量約為大號的 一半	30%~50%
省水器材配件	-	馬桶相關配件/水龍頭/蓮 蓬頭配件	20%~70%
洗衣機	35 公升/每公斤 衣物	22 公升/每公斤衣物	35%以上

表 5-22 家庭省水器材之省水量

用途 (公升/人/日)	接觸用水 (占 68%)			非接觸用水 (占 32%)			總和
	洗澡	洗衣	洗滌	廚房	沖廁	其他	
需水量	50	60	20	40	60	20	250
省水百分比	50%	-	50%	-	50%	-	-
省水量	25	-	10	-	30	-	65

選項 C (低衝擊開發設施)：本研究以新竹湖口鄉信勢村為設計案例之參考依據，信勢村鄰近北勢溪，居住人口約 6,000 人，面積約為 680,000 平方公尺，其土地利用分配為居住區域(40%)、水稻田(56.67%)、濕地(1.67%)、公園(1.67%)。本研究案例總共裝設了四種低衝擊開發設施：雨水儲集系統、人工濕地、綠屋頂和透水鋪面。社區住宅區域的不透水面積為 85% (包含建築、道路和公共空間)，其餘 15%住宅區域為透水面積 (包含公園)，在台灣住宅建蔽率為 60%，表示屋頂面積占住宅面積的 60%，而綠屋頂面積比例占屋頂面積的 50%，屋頂蒐集的雨水流入雨水儲集系統，供應住宅低水質用水需求，另外，其餘 25%的鋪面面積可裝設透水鋪面，蒐集之逕流降流入人工濕地。根據本研究提出之社區供水系統模式與評估指標系統，計算家庭節水率為 23.5%，而農業節水率為 16.6%。

選項 D (水利設施更新與改善)：灌溉用水自水源取水後，透過渠道引入農田灌溉，渠道的材質及狀態與輸水效率有明顯關聯性，輸水途中可能因渠道破損而有滲漏情形，因此辦理圳路更新改善工程，除維持設施功能外，更可有效降低輸水損

失。農委會持續推動「加強農田水利建設計畫」，每年補助各農田水利會辦理約 300 公里之圳路更新改善，圳路經更新改善後每公里約可減少 7 萬立方公尺之輸漏水損失，每年節水量約可達 2,100 萬立方公尺。根據各農田水利會 93、94 年灌溉計畫書，表 5-23 列出各農田水利會轄內之平均輸水損失率，新竹地區農業漏水率約為 30%；而根據台灣自來水公司及臺北自來水事業處 103 年統計年報，表 5-24 為各行政區的自來水管線漏水率，新竹地區排名第十，漏水率約為 15%。透過水利設施的更新與改善，能夠降低漏水量。台北自來水事業處於民國 92 到 95 年間，辦理供水管網改善中程計畫，執行完成後，漏水率已從 91 年底的 28.43%，下降到民國 95 年底的 25.77%。因成效良好，於民國 95 年啟動 20 年供水管網改善長程計畫，預計至民國 114 年，將管網漏水率降低至 10% 以下，民國 95 年到 114 年，在二十年內，採四階段執行，每一階段以 5 年期，各階段之目標漏水率如圖 5-12（臺北自來水事業處，2006）。本研究參考供水管網改善長程計畫，將新竹地區之農業目標漏水率設定為 25%，而民生目標漏水率設定為 10%，則新竹地區農業節水率為 5%，家庭節水率則為 5%。

表 5-23 各農田水利會轄內平均輸水損失率

農田水利會	平均輸水損失率 (%)
宜蘭	26
桃園	17
石門	16
新竹	30
苗栗	32
臺中	39
南投	27
彰化	35
雲林	42
嘉南	25
高雄	18
屏東	22
臺東	44
花蓮	29

表 5-24 各行政區域轄內自來水管線漏水率

漏水率排序	自來水管理處	供水範圍	101 年度漏水率 (%)	103 年度漏水率 (%)	降漏幅度 (%)
1	第一區	基隆市、新北市部分行政區	32.3	29.00	3.3
2	第十區	臺東縣	28.65	26.63	2.02
3	第九區	花蓮縣	26.12	23.80	2.32
4	第四區	臺中市、南投縣	28.49	23.38	5.11
5	第八區	宜蘭縣	19.70	18.59	1.11
6	第二區	新北市林口區、桃園市	19.48	17.62	1.86
7	第十一區	彰化縣	18.87	16.82	2.05
8	臺北	臺北市、新北市部分行政區	19.70	16.71	2.99
9	第五區	雲林縣、嘉義縣市	18.95	16.17	2.78
10	第三區	新竹縣市、苗栗縣	17.91	15.36	2.55
11	第七區	高雄市、屏東縣、澎湖縣	15.45	14.70	0.75
12	第十二區	新北市部分行政區	15.56	11.91	3.65
13	第六區	臺南市	10.30	10.70	-0.4 <sup>a</sup>

a 臺南市 103 年度因乾旱造成供水量降低，致漏水率略高於 101 年度

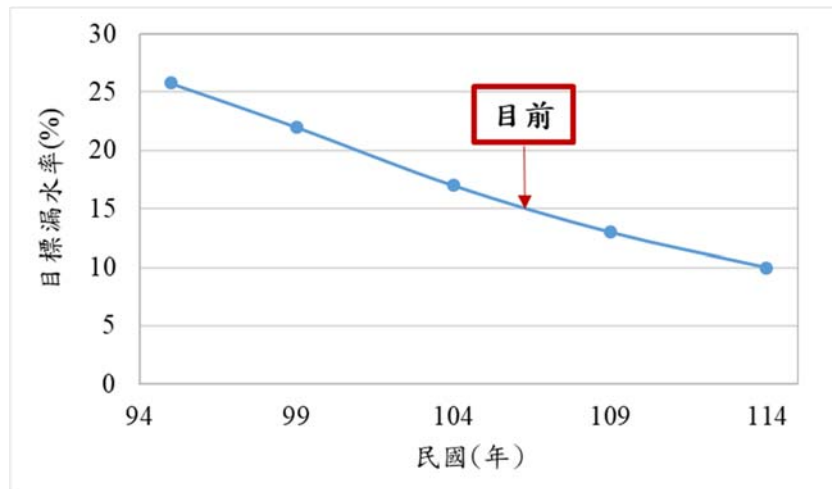


圖 5-12 供水管網改善長程計畫之目標漏水率

根據前述列出 A (節水灌溉)、B (省水器材)、C (低衝擊開發)、D (水利設施改善) 四個調適選項之家庭節水率與農業節水率。整理於表 5-25，而新竹地區的家庭需水量和農業需水量比例為 36%:64%，根據此比例設定家庭與農業節水率之比重，即可算出總節水率，如圖 5-13 所示。因部分調適選項的節水率較低，單獨執行無法達到目標節水率，可透過結合不同的調適選項來達到目標節水率，共有 15 種可能之組合情形，各調適組合之節水率如表 5-25 所示，以供步驟五規劃調適路徑時，根據設定的調適目標，選擇合適的調適組合。

表 5-25 不同調適選項組合之農業與家庭節水率

調適選項代號	家庭節水率 (%)	農業節水率 (%)
A	0	17.4
B	26	0
C	16.6	23.5
D	5	5
A+B	26	17.4
A+C	16.6	40.9
A+D	5	22.4
B+C	42.6	23.5
B+D	31	5
C+D	21.6	28.5
A+B+C	42.6	40.9
A+B+D	31	22.4
B+C+D	47.6	28.5
A+C+D	21.6	45.9
A+B+C+D	47.6	45.9

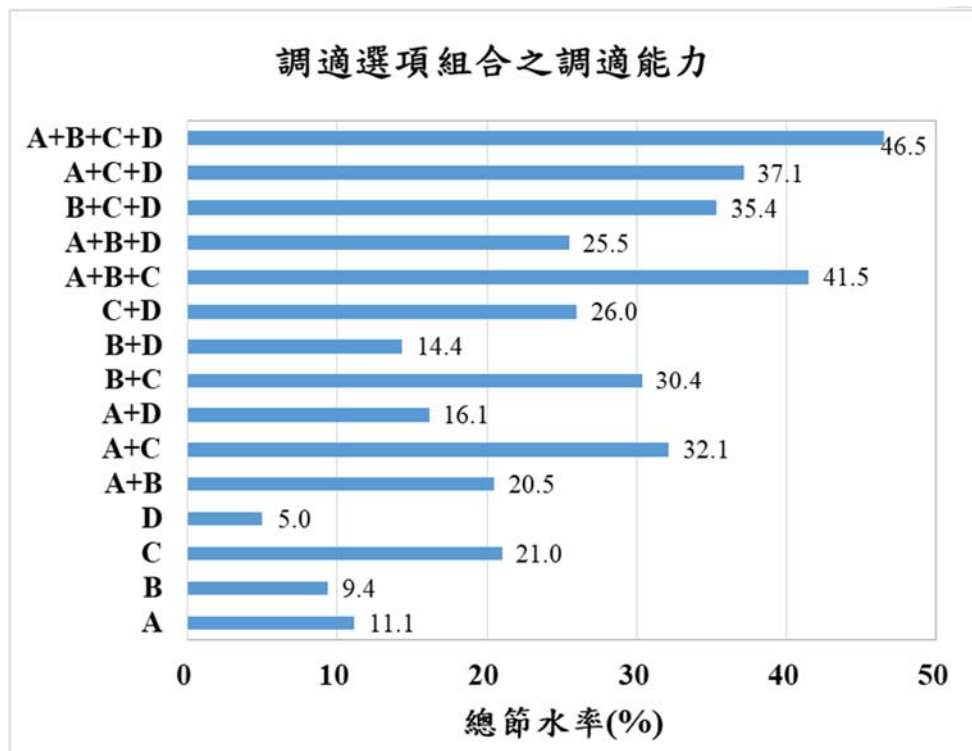



圖 5-13 各調適選項組合之調適能力

## 5.5 規劃與執行調適路徑

### 5.5.1 規劃社區供水調適路徑



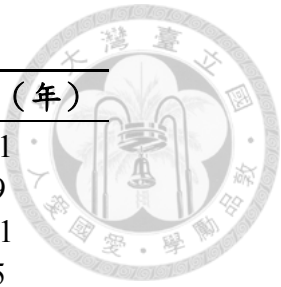
本研究發展社區尺度之調適路徑規劃方法，並以設計案例之調適路徑規劃進行示範操作。研究案例區域為設計案例，參考社區為新竹縣湖口鄉信勢村，此社區過去積極參與政府的農村再生計畫，且著重其環境改造之發展（環保署，2012）。由調適六步驟之步驟一至步驟三，可知研究對象區域之調適目標與現況及未來風險，於步驟四則藉由分析風險成因，界定可行之調適選項，並設定調適選項的評估準則與權重，據以找出適用之調適選項。接著，以量化方法評估不同調適選項於不同時間點施行之價值，評估結果供規劃調適路徑使用。規劃社區供水調適路徑之次步驟包含制定調適路徑圖和制定調適路徑等兩項工作項目。由於調適路徑圖提供執行調適選項時間點的資訊，列出所有可行之選項組合後首先需計算其有效期，即每個選項組合可持續到哪一個時間點以前有效，此處選項有效定義為可維持系統於可接受的服務水準，有效期的重要性在於提供決策者資訊，即當前一個調適選項不再能使系統維持可接受的服務水準時，就要採取下一個調適選項。根據步驟四調適選項效用評估之結果，計算調適選項之有效期。

計算有效期之前需要設定調適目標，在步驟一參考 IPCC AR5 對近未來之定義，以規劃情境不確定性較小的近未來 2021~2040 年做為現階段之調適目標年。本研究設定調適從 2021 年開始執行，逐年增加 1% 的節水率，在調適目標年 2040 年時達到節水 20%。根據步驟四評估之調適選項結果，選項 C 本身單獨執行，即可達成最終調適目標，因此分析調適選項組合效用時，列出其他選項之可能組合，如表 5-26，即找出調適選項或組合可有效調適到哪一年。另外，調適選項之有效期也可由決策者和利害關係人，透過調適會議討論的方式決定。



表 5-26 不同調適選項組合之有效期

代號	調適選項	有效期 (年)
A	節水灌溉	11
B	省水器材	9
C	LID 組合	21
D	水利設施改善	5
A+B	節水灌溉+省水器材	20
A+D	節水灌溉+水利設施改善	16
B+D	省水器材+水利設施改善	14
A+B+D	節水灌溉+省水器材+水利設施改善	25



根據文獻回顧中整理之調適路徑種類，本研究選用以調適選項組合為縱軸，時間為橫軸之調適路徑類型，接著根據 B-S model 量化評估每個調適選項組合於不同時間點之價值。本研究案例為韌性社區供水系統之調適路徑，以節水率作為選擇權變數與選擇權價值，即以「提高韌性社區之節水率」作為調適選項效用之量化指標，屬於選擇權中買進買權 (Buy Call) 的概念，選擇較低價格的調適選項，預期未來上漲後能夠實踐。B-S model 中的參數定義如表 5-27，選擇權履約價格 (L) 代表調適選項能力，現貨價格 (S) 代表調適選項目標，選擇權價格 (C) 代表調適選項之價值。

表 5-27 B-S model 應用於社區供水調適路徑之參數說明

	B-S model 參數定義	說明
輸入值	調適選項能力 (L)	調適選項之節水率，由社區供水模式或文獻蒐集計算得出
	調適目標 (S)	設定之目標節水率，本研究設定每年增加 1% 節水率，最終目標節水率 20%
	調適剩餘時間 (T)	決策點和目標點之時間距離，本研究假設決策點為 2021~2040 年初，而目標點為 2040 年末。分別探討 T=0、1、5、10、15、20 年時調適選項價值變化
	無風險利率 (r)	無風險利率，本研究設定為定存利率 1%
	波動率 ( $\sigma$ )	根據新竹氣象站歷史日雨量之標準差/平均值，設為 114%
輸出值	調適選項價值 (C)	實行調適選項的節水價值

本研究利用 B-S model 分析八個調適選項組合在不同剩餘時間下之價值，如圖 5-14，當  $T=20$  年時，隨著剩餘時間的減少，時間價值會迅速的消逝，最後當  $T=0$  年時，代表決策點和目標點重合，因此調適選項已無價值。而波動率將會影響時間價值，若波動率越大，則不同剩餘時間之時間價值差異也越大，圖 5-14 中不同選項之波動率皆相同，因此不同剩餘時間的時間價值差異也一樣，後續研究應討論波動率之設定方法，討論不同的調適選項是否有不同的波動率，以及波動率的計算方式。圖 5-15 顯示在剩餘時間長的情況下，各調適選項的價值接近，顯示在未來不確定性影響下，調適選項間的差距小，但隨著剩餘時間的減少，未來資訊明確的情況下，調適選項價值也逐漸消逝。

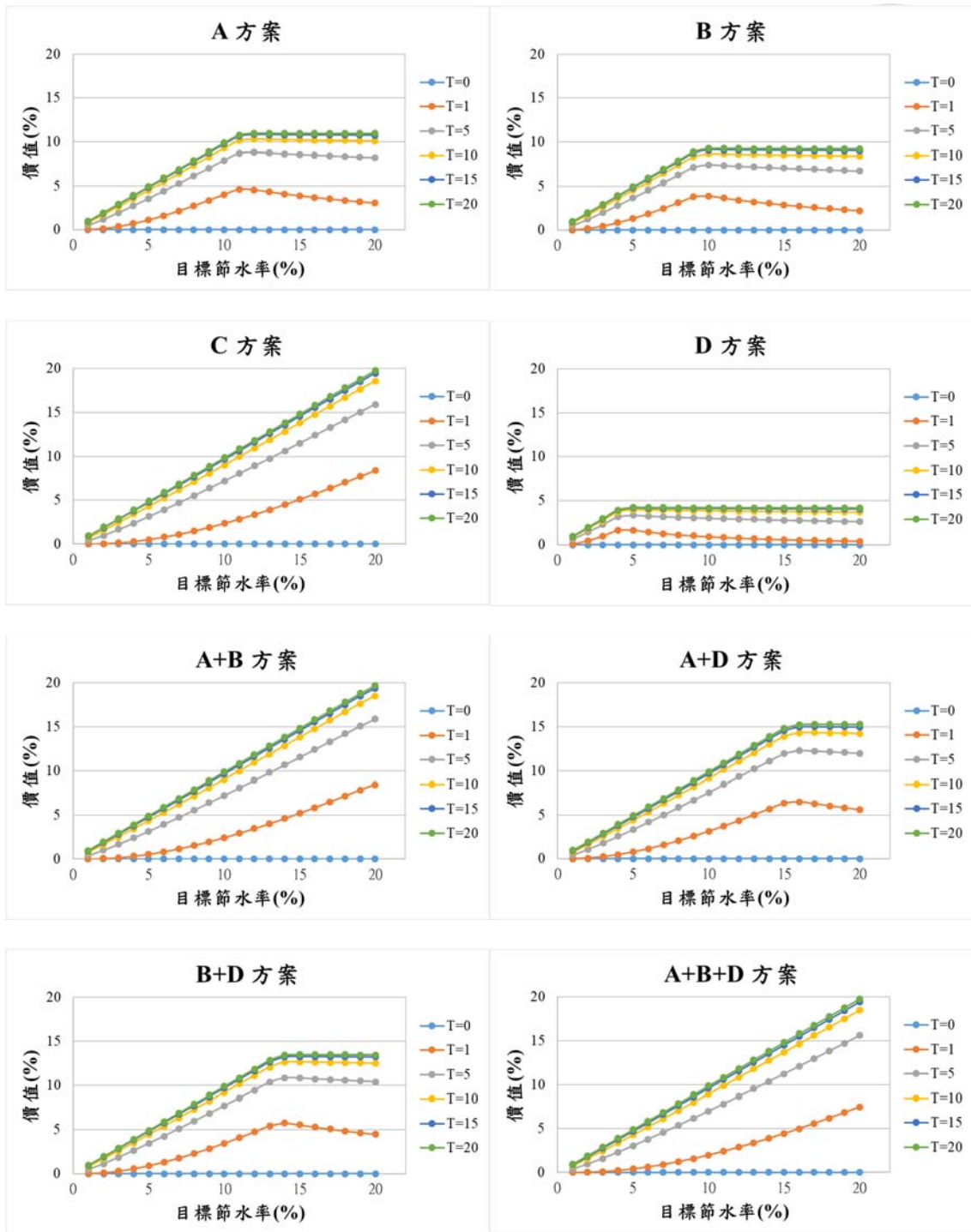


圖 5-14 各調適選項組合在不同剩餘時間下之價值變化

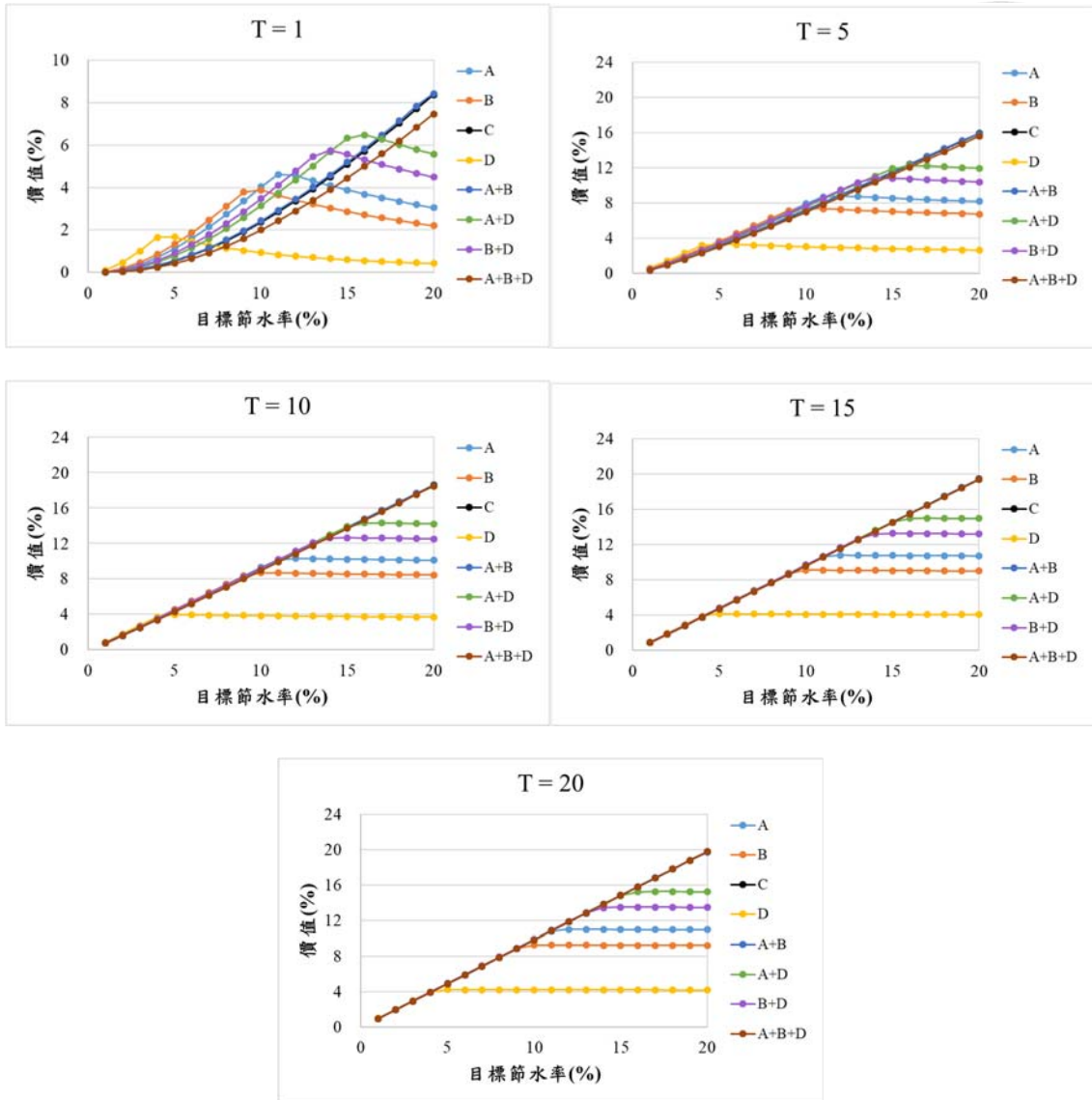


圖 5-15 不同剩餘時間下各調適選項組合之價值變化

圖 5-16 為根據 B-S model 量化分析後之調適路徑，在決策點 2021 年時，選擇執行選項 D（水利設施更新與改善），執行到 2025 年時，選項 D 之調適能力等於目標節水率，因此在 2026 年選擇執行選項 B（家庭省水器材），一直執行到 2035 年時，選項 B+D 無法滿足目標節水率，選擇增加執行選項 A（節水灌溉），選項 A+B+D 有效期為 2045 年，因此到目標年 2040 年為止，依序執行選項 D、B、A。

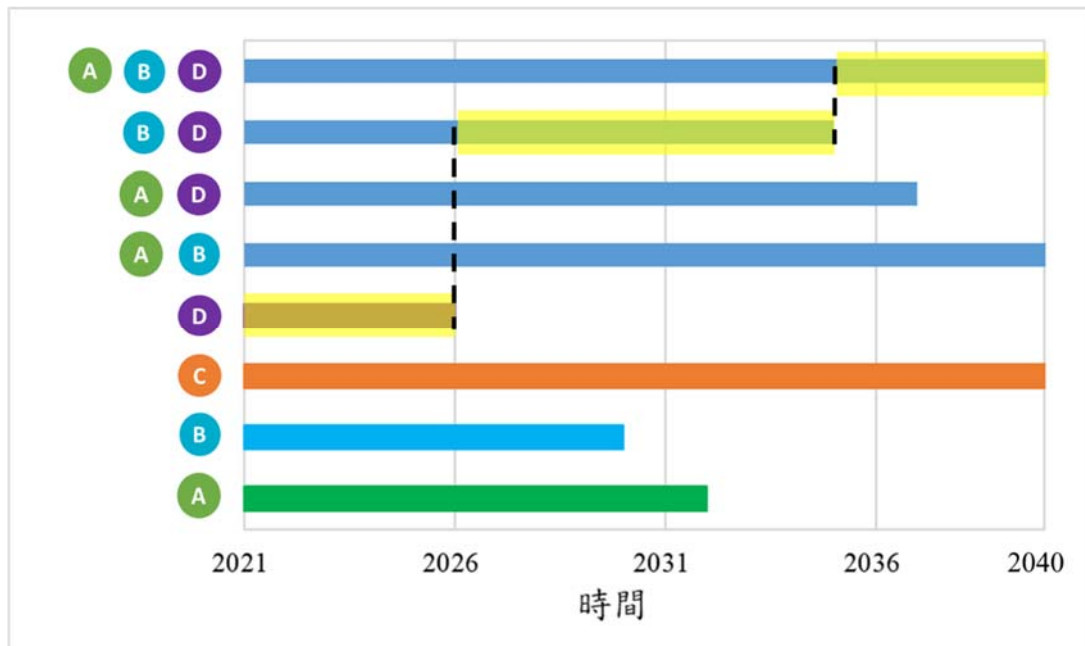


圖 5-16 穩定型之調適路徑

根據設定之調適目標，會選擇不同的調適路徑，前述調適路徑之調適目標假設每年增加 1% 節水率，屬於穩定型。圖 5-17 設定不同類型的調適目標，包含快速達成型和緩慢達成型，皆在 2040 年預計達到 20% 的節水率。圖 5-18 為快速達成型之調適路徑，在第一年達成目標節水率 20% 的一半，因此選擇選項 A（節水灌溉），剩下的時間以線性增加的速率達成目標節水率，在 2023 年增加選項 D（水利設施改善與更新），2033 年再新增選項 B（家庭省水器材），依序執行選項 A、D、B。圖 5-19 為緩慢達成型之調適路徑，前期目標節水率較低，後期目標節水率增加較快，第一年選用選項 D（水利設施改善與更新），在 2034 年增加選項 B（家庭省水器材），最後 2039 年新增選項 A（節水灌溉），依序執行選項 D、B、A，和穩定型之調適路徑相同，差別在於新增調適選項之時間點，因緩慢達成型的前期目標節水率較低，因此調適選項有效期較長，較晚增加調適選項。從穩定型、快速達成型和緩慢達成型，三種類型中可以看到選擇的調適選項皆為選項 A、B、D，但有

先後順序和有效期的差異，因三種類型最終目標節水率相同，最終選擇的調適選項組合相同。

另外，高目標型之調適路徑設定在 2040 年達到 25% 的節水率，並且在第一年就達到 20% 以上的節水率。圖 5-20 為高目標型之調適路徑，選項 C（低衝擊開發設施）單獨執行無法達成最終 25% 的目標節水率，因此須和其他選項組合，可能之調適選項組合共有 15 種，如表 5-25。而第一年目標節水率設定超過 20%，只有選項 C 能夠達成目標，到 2022 年增加選項 D（水利設施改善與更新），依序執行選項 C 和 D。高目標型之調適路徑適用於當外部供水系統遭遇預期外的突發事件，無法維持原本的供水能力，因此需要韌性社區快速達成高節水率，而低衝擊開發設施的節水效用較高，在此時成為優先挑選之調適選項。需要特別注意的是，在前期即達成高節水率之調適路徑，可能出現執行調適選項的時程無法跟上的問題，需要考慮到調適選項實施所需的時間。

考量不同調適選項的成本，選項 A（節水灌溉）根據推廣旱作管路灌溉作業要點，水源調控設施及末端管路灌溉系統每公頃成本約 25 萬元。選項 B（家庭省水器材）由家庭用水之節水用水技術手冊，彙整市面上家庭省水器材合理價格，社區 1500 戶皆設置家庭省水器材，如省水馬桶 8000 元，省水蓮蓬頭 500 元，省水水龍頭 300 元。選項 C（低衝擊開發設施）根據水環境低衝擊開發設施操作手冊，大型雨水儲集桶成本為 28000 元，綠屋頂每平方公尺成本為 3000~9000 元，透水鋪面每平方公尺成本為 2000~3000 元。選項 D（水利設施改善與更新）由台灣自來水公司評估每度水之省水成本為 53 元。分析以上調適選項的成本資料，選項 B（家庭省水器材）最低，其次依序為選項 A（節水灌溉）、選項 D（水利設施改善與更新）、選項 C（低衝擊開發設施）。

根據調適選項成本，可了解不同類型調適路徑的總成本，穩定型、快速達成型和緩慢達成型調適路徑，總成本較低，而高目標型調適路徑，總成本較高，後續研究可利用多準則分析，給予不同的權重，同時考量調適路徑的效用與成本。而依照氣候調適六步驟之流程，應邀請利害關係人於調適會議中討論多準則分析之權重，以荷蘭案例（Haasnoot, 2013）為例，從洪災的調適選項中，若挑選預先降低湖水之調適選項，可能造成當地缺水風險上升，顯示洪災之調適選項可能影響供水。因此需要根據每個路徑的所有資訊，例如效用、成本、副作用等，召集所有不同立場

的利害關係人，在盡可能維護自身的權益下，由利害關係人和決策者選擇最適合的調適路徑。

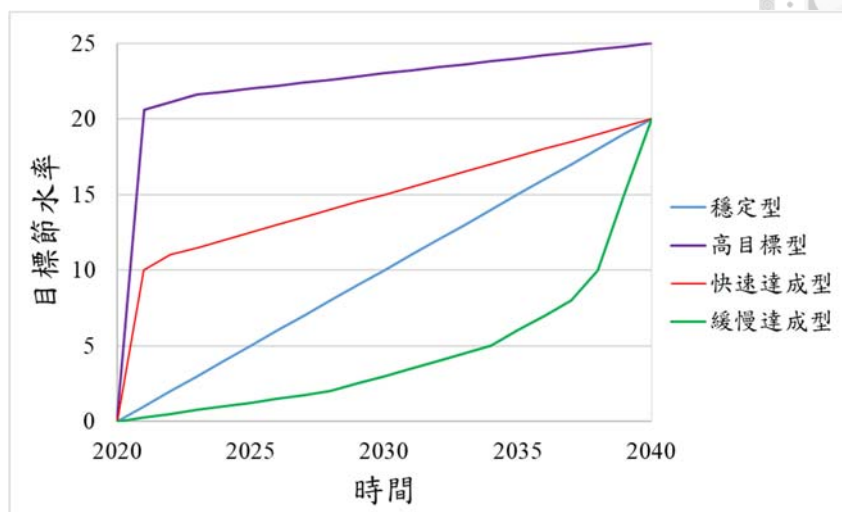


圖 5-17 不同類型的調適目標

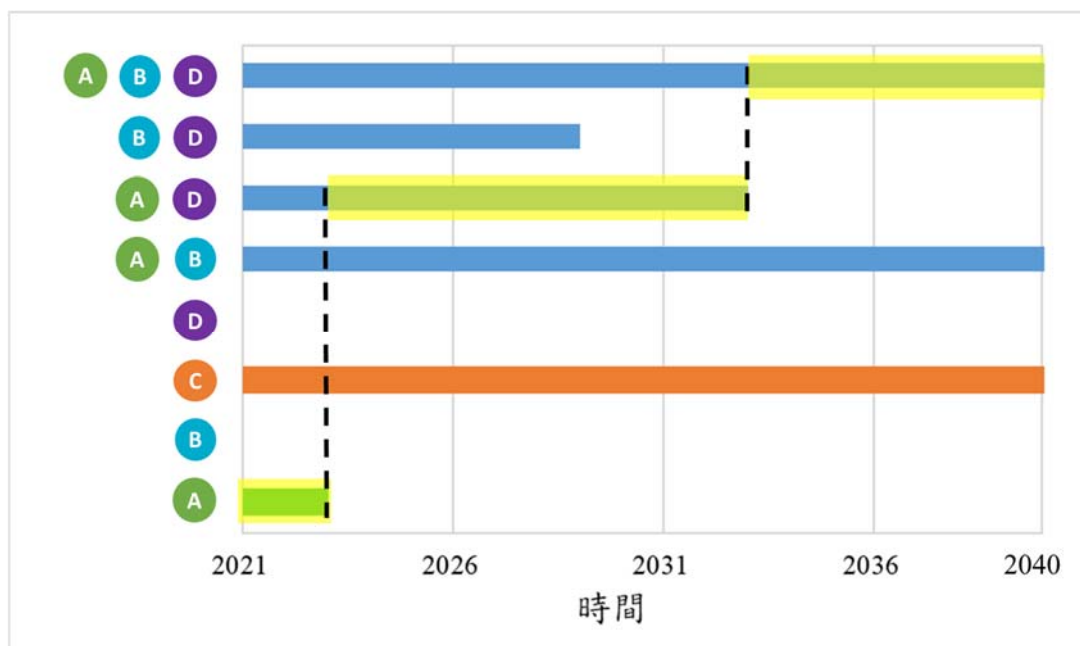


圖 5-18 快速達成型之調適路徑

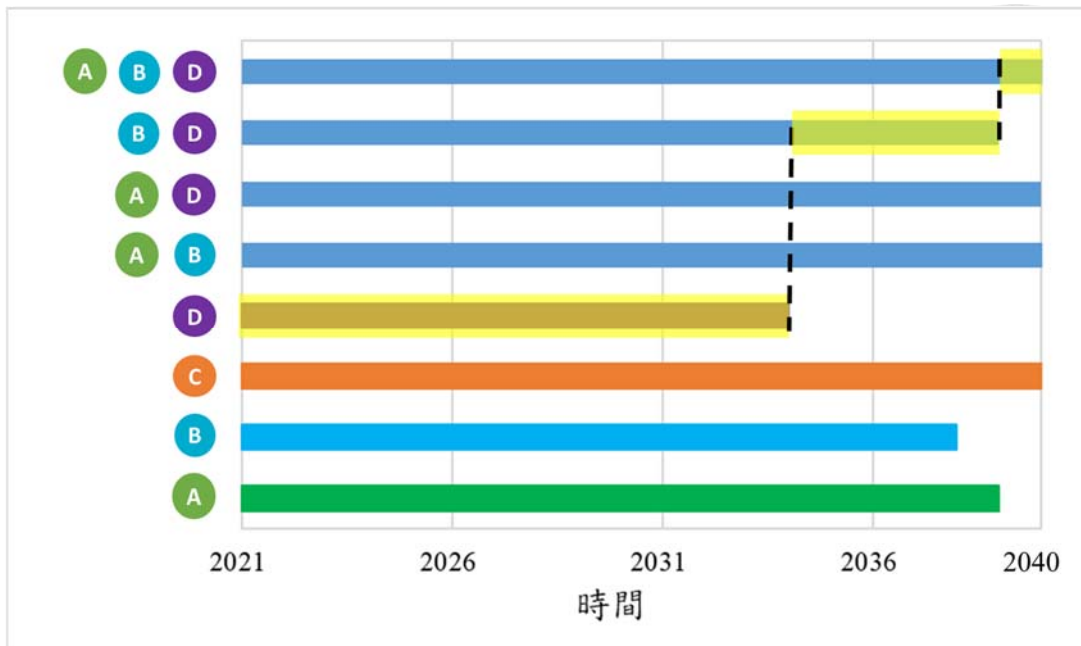


圖 5-19 緩慢達成型之調適路徑

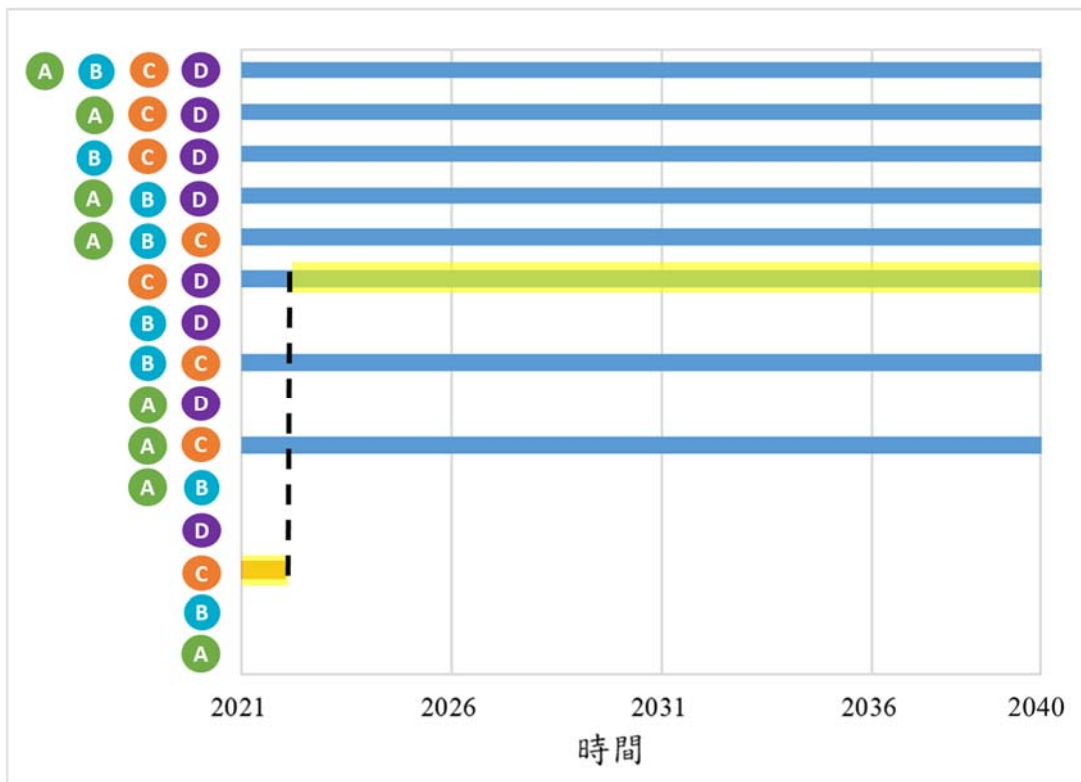


圖 5-20 高目標型之調適路徑



### 5.5.2 制定調適路徑執行計畫

調適路徑執行計畫提供使用者指引，以確保調適目標的達成。在前面步驟已決定調適目標與採取的調適行動後，需要組織相關單位進行調適行動，並確定分工與執行單位。以新竹信勢社區為例，由新竹縣政府組織顧問團隊、規劃團隊和縣府團隊組成工作小組，召開社區氣候變遷調適會議，參與成員包括新竹縣政府相關局處、中央部會及其附屬相關單位，以及社區委員會與專家學者，共同參與制定調適路徑執行計畫。在社區水資源領域方面，政府相關單位如水利署和新竹縣政府相關局處，包含工務處、環保局、農業處和國際產業發展處等，而地方政府以外的單位，則包含北區水資源局、自來水公司和新竹農田水利會。表 5-28 為各項調適選項可能之主辦與協辦單位，詳細之分工與執行單位，則須根據各地方政府之情形而進行調整。完整之調適路徑執行計畫應包含實施方法、執行方式、主協辦機關、利害關係人、地點、執行期程、資源需求、注意事項等。

表 5-28 各項調適選項可能之主辦與協辦單位

調適選項	主辦單位	協辦單位
節水灌溉	農田水利會	新竹縣政府相關局處、 社區委員會
省水器材	新竹縣政府相關局處	經濟部水利署、社區委員會
LID 組合	新竹縣政府相關局處	社區委員會
水利設施改善與更新	自來水管理處	各級政府部門

## 5.6 監測與修正調適路徑

### 5.6.1 調適路徑監測計畫

建立調適路徑的目的，在於因應未來可能遭受之風險，預先擬定好對應之調適選項，並且決定調適選項的執行先後順序，並評估調適成效。在步驟五制定調適路徑圖後，由利害關係人會議從中挑選一條調適路徑，但在未來不確定性影響下，為了確保整體調適行動依循預定之調適路徑執行，需要監測調適路徑，才能在調適路徑偏離原本規劃時即時修正。

調適路徑監測計畫包含風險監測和調適措施監測。根據 IPCC AR5 對於風險之定義，將風險來源為危害、暴露、與脆弱度三項因子，並對應各項因子設定風險監測項目。1.危害因子：分為氣候因子與非氣候因子，氣候因子為降雨量，而非氣候因子為外部供水系統，因社區供水系統仰賴外部供水系統，當外部供水系統因為降雨不足導致河川流量降低，或者因為降雨量過大導致原水濁度過高，導致供水能力受到影響，發生缺水事件時，即對社區造成危害，因此需監測降雨量、外部供水系統之可供水量；2.暴露因子：由社區位置決定暴露因子的影響程度，屬於地理條件而不須監測；3.脆弱度因子：調適能力取決於外部供水系統之供水能力，因有效庫容、漏水率等皆會影響供水能力，需要進行觀測。敏感度由需水量決定，民生需水量由每人每日用水量 and 人口數決定，而農業需水量則由單位面積灌溉水量和農田面積計算得出，人口增長、生活用水浪費、種植高耗水之農作物和農田面積增加，會導致民生及農業用水需求加大，進一步造成供水系統的負荷增加，提高缺水風險，因此需監測人口數量、農田種植種類和面積。表 5-29 為對應風險因子之風險監測項目，描述監測方式、監測單位、監測頻率。

調適措施監測可針對設定之調適目標找出可能的阻礙，以尋找對應之監測項目。根據韌性社區設定之調適目標為提高社區節水率，以降低對外部供水系統之需求，監測評估指標系統是監測節水率的相關項目，例如雨水儲集系統提供之非接觸用水量、人工濕地提供之灌溉水量、節水灌溉後之省水量等。此部分和調適選項相關，根據不同調適選項會對應不同的監測項目，根據前述步驟五所列之調適選項，其監測項目如表 5-30，而調適措施監測可能和風險監測項目重複，重複的項目為調適路徑監測計畫之重點觀察對象。

表 5-29 調適路徑監測計畫之風險監測

風險來源		監測項目	監測方式	監測單位	監測頻率
危害	氣候因子	降雨量	自動氣象/雨量站	中央氣象局	日
	非氣候因子	外部供水系統之可供水量	流量測站	經濟部水利署（政府資料開放平台）	日
脆弱度	調適能力	有效庫容	水庫管理單位測量	經濟部水利署（政府資料開放平台）	年
		自來水漏水率	自來水公司統計	台灣自來水公司、臺北自來水事業處	年
		灌溉系統漏水率	農田水利會統計	農田水利會	年
	敏感度	每人每日用水量	自來水公司統計	經濟部水利署	年
		人口數量	戶口普查、戶籍統計	內政部戶政司	年
		單位面積灌溉水量	農田水利會統計	農田水利會	年
		農田面積	農田水利會統計	農田水利會	年

表 5-30 調適路徑監測計畫之調適措施監測

調適措施	監測項目	監測方式	監測單位	監測頻率
節水灌溉	灌溉用水量	水位—流量自動測報	農田水利會	年
	農田種植種類	農田水利會統計	農田水利會	年
	農田面積	農田水利會統計	農田水利會	年
家庭省水器材	每人每日用水量	自來水公司統計	台灣自來水公司、臺北自來水事業處	年
低衝擊開發	雨水儲集系統水位	水位—流量自動測報	地方政府主管機關	日
	人工濕地提供之灌溉水量	水位—流量自動測報	地方政府主管機關	日
	社區排水系統流量	流量計	地方政府主管機關	日
水利設施更新與改善	自來水管線替換率	自來水公司統計	台灣自來水公司、臺北自來水事業處	年
	灌溉系統管線替換率	農田水利會統計	農田水利會	年

## 5.6.2 調適路徑執行檢覈計畫

調適路徑執行檢覈計畫主要目的在於監測與評估調適選項之執行成果是否符合預期，觀察整體調適行動是否依照預定計畫走在原定之調適路徑上，並讓使用者了解執行成效表現良好與否，以及回饋資訊，在調適路徑偏離原本規劃時，提供資訊以利後續制定調適路徑修正計畫，有助於修正調適選項，並有機會對執行成效與問題缺失進行分析、檢討及矯正。

調適路徑執行檢覈計畫包含檢覈時間點和檢覈項目，本研究之調適路徑預定於 2021 年開始進行，為期 20 年。而林嘉佑（2016）應用調適六步驟於新竹地區供水系統，建議每五年檢覈調適路徑，但區域供水系統之調適選項作業時間較長，本研究範疇為社區供水系統，屬於小尺度系統，因此調適選項作業時間較短，建議每一年對調適路徑進行檢覈。檢覈項目包含：1. 調適選項執行期程，根據調適路徑安排之調適選項起始順序，設定調適選項工作項目執行期程，並且逐一執行，針對調適選項的工作項目和期程進行列表，作為調適行動是否完整執行之檢覈依據；2. 目標達成率，根據利害關係人會議決定每年的目標節水率，透過每年檢覈韌性社區供水系統之節水率，計算目標節水率的達成率。

以穩定型之調適路徑為例，依序執行調適選項 D、B、A，選項 D 預定執行五年達成 5% 的節水率，選項 B 預定執行九年達成 9% 的節水率，選項 A 預定執行 6 年達成 6% 的節水率，達成最終目標 20% 的節水率，因此根據調適路徑可列出執行時程，如表 5-31 之甘特圖，為調適路徑之執行時程，顯示預定期程（黑色）和實際執行的進度（灰色），透過檢覈實際執行之進度，和預定期程相比，即可了解執行期程是否落後。成效指標為每年實際之節水率，和目標節水率相除，而成效指標小於一的年份，需要分析其原因並進行檢討。圖 5-21 為目標節水率達成情形之示意圖，假設發生第一次未達標發生在 2027 年，此時正在執行調適選項 B（家庭省水器材），可能因為民眾對家庭省水器材之接受度不高或者宣傳不足，普及率無法上升，而導致節水率無法達到預期目標，可透過增加家庭省水之獎勵辦法，提高民眾裝設家庭省水設施之意願，以盡快達成目標節水率。另外，當調適路徑的執行期程嚴重落後，預期進度無法完成，或者執行調適選項之成效遠低於目標時，需要考慮對調適選項進行修正。

表 5-31 調適路徑之執行時程

調適選項	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
A																					
B																					
C																					
D																					

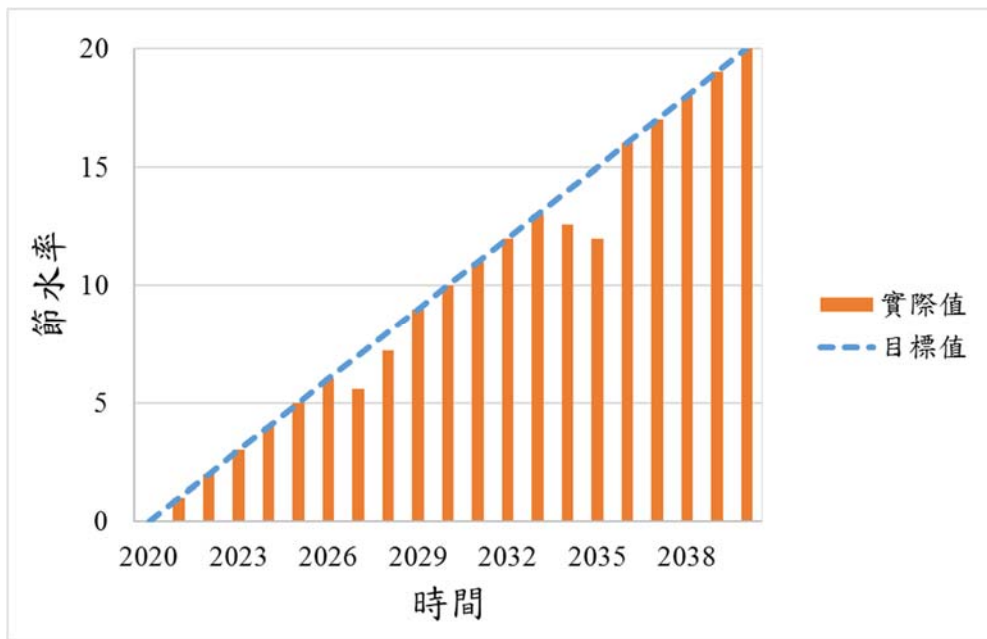


圖 5-21 目標節水率達成情形

### 5.6.3 調適路徑修正計畫

在未來充滿不確定性的情況下，透過調適路徑檢覈計畫確認調適路徑是否按照原本預想的情形執行，當未來情況比原本預計還要嚴重時，或許需要採取更有力的調適措施，但未來也有可能比原本預期更樂觀，造成原訂的調適路徑變成過度調適，此時可以調整後續調適措施的強度，例如未來社區因人口移出或農田種植面積減少，脆弱度下降，韌性社區調適強度不需達到原本規劃的目標。調適路徑修正計畫應設定啟動條件，以決定何時應啟動調適路徑之修正機制，調整或重新安排調適路徑，甚至視情況重新評估未來風險。

依據監測計畫與檢覈計畫的結果，決定是否制定調適路徑修正計畫，若監測指標與檢覈指標顯示，調適路徑仍和原本規劃預估情形相同，則不須進行修正。調適路徑可能碰到突發狀況，在監測過程中，關注系統在監測過程未出現特別警示的狀況下遭遇預期之外的風險，調適工作之決策者應檢視現行之調適路徑是否可藉由調整調適選項，或是切換其他調適路徑之方式，以應對系統遭遇之風險，相當於回歸至步驟五重新選擇調適路徑。若決策者經過評估，認為現行調適路徑已無法藉由微調調適選項或是切換路徑應對當下風險，則視同調適失敗，此時須回到步驟四，重新針對系統風險評估調適選項。

突發狀況包含未來氣候變遷影響急遽增加，導致原有調適路徑變成調適不足之情形，因此需改變原有之調適目標，如圖 5-22，由穩定型之調適目標切換為高目標型的調適目標，在不同類型的調適路徑間切換，在 2030 年調適目標為 10%，而 2031 年急速提升為高目標型目標 23%，因此在路徑方面，2021~2030 年間，穩定型之調適路徑，正在執行調適選項 B，但下一年調適目標急速增加，進行中的調適選項能力不足無法達成目標，因此 2031 年提早執行調適選項 A，才能在 2031 年時達成 23%的目標節水率，修改後的調適路徑如圖 5-23。不過需特別注意提高原本設定之調適目標，要考量新增調適選項之作業時間是否充足，還有原有調適選項是否能夠中途停止，以上考量需要列入調適路徑修正計畫。

另一種情況為調適過度，也就是調適路徑中所採行之調適選項，其調適能力遠大於調適目標，可能是在風險評估階段高估未來風險，進而導致調適階段出現過度規劃之情形。過度調適雖然不致於造成系統之風險，卻會耗用過多的經費與相關資源，決策者需要判斷是否移除過度調適的選項，但移除過程也會耗費成本，因此前

面檢覈計畫的目的就是及早發現調適路徑偏離，即時停止後續調適，並重新選擇下一步，以避免依照調適路徑原本規劃，造成過度調適。

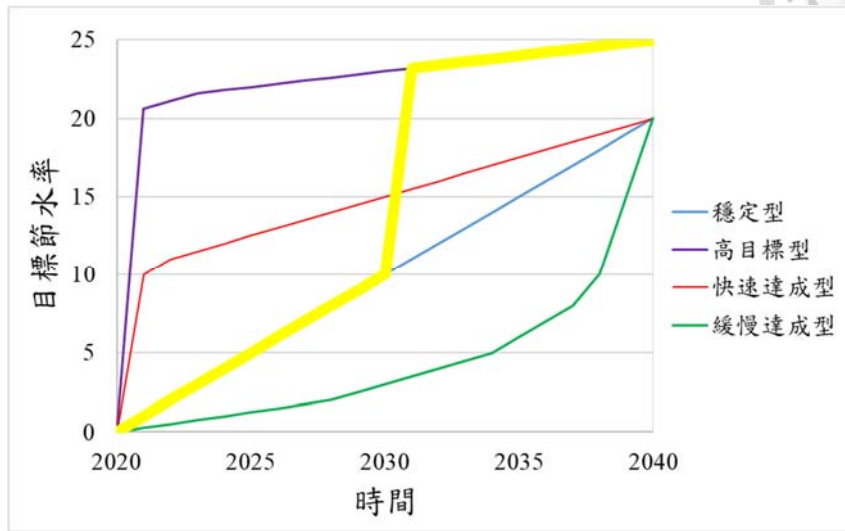


圖 5-22 轉換不同類型之目標節水率

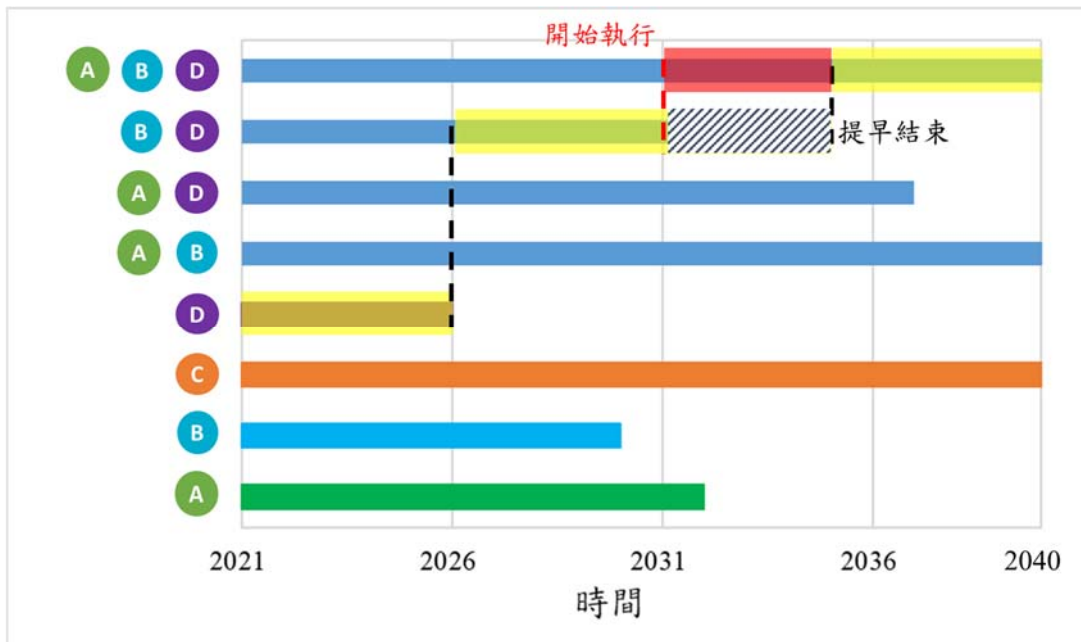


圖 5-23 修正之調適路徑

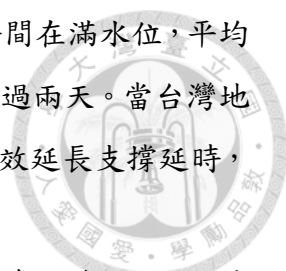
## 第6章 結論與建議

本研究應用氣候調適六步驟於社區供水系統，發展、整合及修正相關工具以進行各步驟之流程，其中研究方法包含社區供水系統模式、社區水資源評估指標系統、低頻率氣象合成模式、調適路徑規劃方法以及監測與修正調適路徑方法，用來建構韌性社區供水系統之調適能力。為檢驗氣候調適相關工具之可應用性，本研究應用氣候調適六步驟於設計案例，使各步驟之工具符合社區情形。以下說明相關之結論與建議。

### 6.1 結論

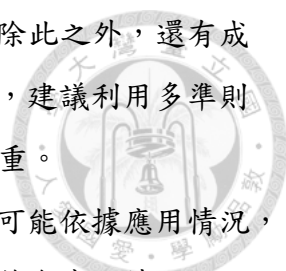
1. 對於開發地區之水文狀況模擬，包括降雨、地表逕流、下水道系統等，SWMM 已有成熟的模組可合理模擬，並已應用於許多地區之研究案例中，且在最新版中加入低衝擊開發設施之模擬模組，對於社區之地表逕流模擬，SWMM 為合適之水文模式。
2. 根據本研究結果，傳統氣象合成模式僅能重現約 96% 的歷史日雨量，低頻率氣象合成模式能夠產生超越歷史資料之極端值，並且保留時間序列之趨勢與低頻率特性，適用於合成未來長期氣象資料，可應用於社區供水系統之未來風險評估。
3. 台灣梅雨季降雨型態為長時間之低強度降雨，而颱風季降雨型態為短時間之高強度降雨。梅雨季之連續不降雨日較短，雨水儲集系統之入流量較為穩定，而在颱風季，因短時間內大量雨水流入，無法儲存過量雨水，颱風季之家庭節水率表現較差。
4. 綠屋頂可降低逕流的峰值，並增加逕流的滯留時間，本研究結果顯示綠屋頂不只可以提高滯留洪水的時間，同時也可穩定供應人工濕地或雨水儲集入流，提高農業或家庭節水率。
5. 人工濕地和雨水儲集系統同為社區內的分散式供水設施，兩者之間競爭社區逕流，評估指標結果顯示同時裝設人工濕地、綠屋頂、透水鋪面和雨水儲集系統，無法達到最佳的農業和家庭節水率，應根據區域特性分析地區性的 LID 設施組合，才能發揮其最佳效用。



- 
6. 住宅儲存系統容量一般設計為兩天用水量，因為沒有全部時間在滿水位，平均支撐延時不到兩天，但加入雨水儲集系統後，支撐延時可超過兩天。當台灣地區面臨缺水時，民生用水供五停二，利用雨水儲集系統可有效延長支撐延時，增加社區供水系統之韌性，等待外部系統恢復供水。
  7. 新竹地區一期作期間之降雨量高於二期作，高降雨量產生更多逕流，人工濕地入流量較大，因此能夠提供更多再生水給農田灌溉使用，結果顯示一期作之農業節水率較佳。
  8. 在未來降雨量增加的氣候情境中，因雨水儲集系統容量無法儲存增加的雨水，家庭節水率並未顯著提升，可考慮擴大容量，但需考量成本與效益；在未來降雨量下降的氣候情境中，家庭節水率雖然從基期 80%降低到 75%左右，顯示雨水儲集系統在氣候變遷下依然能發揮效用，影響幅度並不大。
  9. 在未來降雨量增加的氣候情境中，人工濕地可提供農田更多灌溉用水，降低對外部農業供水系統之灌溉需水量；在未來降雨量下降的氣候情境中，農業節水率隨之降低，但一期作仍能維持在 20%左右，而二期作約 15%左右，顯示人工濕地在氣候變遷影響下依然能夠維持一定的功用。
  10. 低衝擊開發設施屬於高節水率之調適選項，因此在穩定或緩慢達成之調適目標曲線下，不會被選用，但在高目標型之調適目標曲線下，因前期之調適目標較高，被選入調適路徑中，顯示在未來較為悲觀之情況下，需盡快達到一定調適水準時，低衝擊開發設施為合適之調適選項。
  11. 量化調適選項時需要根據調適目標設定調適選項評估方法，本研究設定韌性社區供水系統目標為高回復力與低脆弱度，因此以節水率為評估指標，對各調適選項進行量化分析，若社區節水率越高代表風險越低。
  12. 決定調適路徑後，透過調適路徑監測計畫確保出現預期外之情形時能夠及時修正調適路徑，而執行檢覈計畫則是定期檢查調適是否符合預期，當監測計畫和檢覈計畫顯示調適路徑需要修正時，透過調適路徑修正計畫重新安排調適路徑。

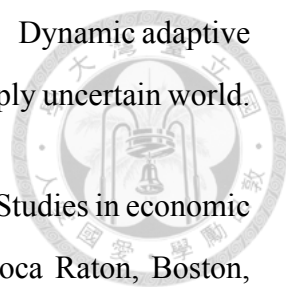
## 6.2 建議


1. SWMM 限制各子集水區內不同種類 LID 設施的串連，即逕流在 LID 設施之間無法相互流動，然而實際規劃中各 LID 設施之間可能相互串連。另外 SWMM 之貯留型 LID 設施無法模擬供水情形，後續研究可針對 LID 相關模擬進行更深入的探討。
2. 本研究彙整相關文獻提出之 SWMM 參數做為輸入值，引用之參數可能對評估結果產生影響，後續可進行相關實驗，以獲取台灣特性之 SWMM 參數，合理模擬社區逕流情形。
3. 本研究將發展氣候調適六步驟之相關工具應用於案例社區中，其中社區供水系統評估模式為水平衡模式，模式相關參數由信勢社區資料或相關文獻提供，因此無驗證模式。建議後續研究採用實際社區資料進行調適步驟及工具之應用，並藉由量測資料進行模式檢定及驗證。
4. 降雨型態對雨水儲集系統極大的影響，需計算連續不降雨日分布，評估是否適合裝設雨水儲集系統，例如南部地區豐枯水期水量差異懸殊，在枯水期雨水儲集系統無法發揮作用。應根據不同地區提出區域性的 LID 設施組合，建議將本研究之研究方法應用於南部社區，挑選適用於南部社區之調適選項。
5. 本研究利用歷史資料設計雨水儲集系統的容量，後續研究可利用氣象合成模式產生的雨量資料，再次評估雨水儲集系統的容量，評估是否需要增加雨水儲集桶的尺寸或數量。
6. 社區供水系統並非獨立於外界，本研究社區供水系統模式已結合區域水資源模式，計算農業及家庭可供水量，確實管理水資源。後續研究應建立社區供水系統和區域水資源系統關係之分析方法，制定資料傳輸之通訊協定，以提供標準化資料，加快整合區域供水系統與社區供水系統模式。
7. 目前 LID 挑選流程仍僅限於區域性，尚無完整的流程可以普遍應用於各地，然而對於 LID 規劃決策者來說，一個詳細且可行的 LID 挑選流程須具備相關子步驟之目標、需要執行的項目及所需的資料等，後續相關研究應針對現有之挑選流程及程序不足之處進行補強，建立一個具有效率並透過 LID 規劃達成社區水資源管理目標的執执行程序。

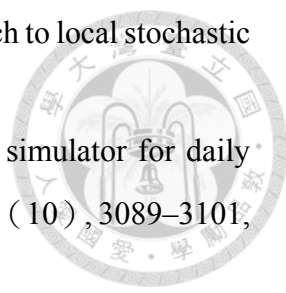
- 
8. 調適選項之普及率和接受度會影響調適選項的能力範圍值，除此之外，還有成本和即時性的問題，在評估調適選項價值時，除了考量效用，建議利用多準則分析，考量成本、即時性、副作用等因素，並給予不同的權重。
  9. 本研究選取可量化之調適選項進行評估，然其調適選項能力可能依據應用情況，而為一範圍值，後續研究可調整量化方式，讓調適路徑圖更符合實際情況。另外，無法量化之調適選項，須透過定性型分析方法評估，惟其定量與定性之調適選項如何放在一起比較，是後續需要進一步探討的研究重點。
  10. 調適目標年的設定將直接影響後續調適路徑之期程安排，也會影響步驟三進行未來風險評估時，風險模擬的目標時期，以及步驟四調適選項的選擇，是相當之影響因子。另外，不同類型的調適目標曲線對挑選調適路徑有決定性的影響，因此在設定調適目標年和調適目標時，建議召集利害關係人討論調適目標年、最終調適目標，以及調適目標曲線的變化率。
  11. 選擇權定價模式中之波動率代表時間帶來的不確定性，越高的波動率代表未來調適選項價值變動之可能性大，而本研究將波動率設為日雨量之標準差除平均值，由日雨量的波動幅度代表未來的不確定性，然而波動率之計算方式對調適選項的量化結果有很大的影響，考量各調適選項之未來不確定性不盡相同，是否需設定不同的波動率，後續研究應加以討論。
  12. 調適路徑執行計畫需要考量不同領域是否有衝突，例如社區排水系統設計逕流越快排除越好，但以供水角度而言，則是希望有效控制雨水徑流，延長逕流在社區的流動時間，以利儲存後使用。最終需要召開相關利害關係人會議，以確認調適路徑執行計畫是否完善。
  13. 供水與排水系統兩者之間關係密切，若後續研究考慮結合供水與排水模擬，須注意兩者使用不同的氣象資料時間尺度，供水系統為日尺度，而排水系統為小時尺度，因此需要不同類型的氣象合成模式，如何結合不同時間尺度之模擬，為後續研究重點之一。

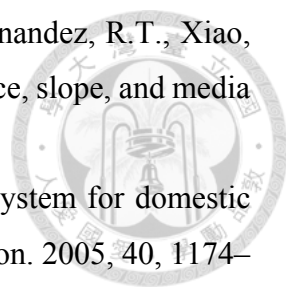
## 參考文獻

1. Armitage, N., Vice, M., Fisher-Jeffes, L. (2012) South African Guidelines for Sustainable Drainage Systems. Cape Town: Water Research Commission.
2. Barnett, J., Graham, S., Mortreux, C., Fincher, R., Waters, E., & Hurlimann, A. (2014) A local coastal adaptation pathway. *Nature Climate Change*, 4 (12) , 1103–1108. <http://doi.org/10.1038/nclimate2383>.
3. Blacktown City Council (2013) , Developer Handbook for Water Sensitive Urban Design.
4. Chao-Hsien Liaw, Yu-Chuan Chiang, 2014a, Framework for Assessing the Rainwater Harvesting Potential of Residential Buildings at a National Level as an Alternative Water Resource for Domestic Water Supply in Taiwan , *WATER*, 6( 10) , 3224-3246.
5. Chao-Hsien Liaw, Yu-Chuan Chiang, 2014b, Dimensionless Analysis for Designing Domestic Rainwater Harvesting Systems at the Regional Level in Northern Taiwan, *WATER*, 6 ( 12 ) , 3913-3933.
6. Charlton and Arnell, 2011, Global Environmental Change, Adapting to Climate Change impacts on water resources in England – An Assessment of draft water resources management plans.
7. DoD (Department of Defense) . (2004) The low impact development manual, UFC-3-210-10.
8. Field C et al. (2014) Technical summary Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change:35-94
9. Greater Dublin Strategic Drainage Study (2005) New Development Policy – Technical Guidance Document.
10. Haasnoot M, Middelkoop H, Offermans A, van Beek E, van Deursen WPA (2012) Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Clim Chang* 115 (3–4) :795–819. doi:10.1007/s10584-012-0444-2  
View Article


- 
11. Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., ter Maat, J. ( 2013 ) Dynamic adaptive policy pathways: a method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23, 485-498.
  12. Hoff, Marie D. ( 1998 ) , Sustainable community development - Studies in economic environmental and cultural revitalization, Lewis Publishers, Boca Raton, Boston, London, New York, Washington D.C.
  13. Holling, C. S. ( 1973 ) Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1-23.
  14. Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen N-C, Tung CC, Liu HH ( 1998 ) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Lond Ser A: Math Phys and Eng Sci* 454:903-995. doi:10.1098/rspa.1998.0193
  15. Hua-peng Qin, Zhuo-xi Li, Guangtao Fu ( 2013 ) , The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, *Journal of Environmental Management* 129, 577-585
  16. J. L. Ivey and others ( 2004 ) , Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors
  17. Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Shaw, L. Y., Zhen, J. X., & Lu, Y. ( 2013 ). Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental monitoring and assessment*, 185 ( 9 ) , 7915-7933.
  18. Jothiprakash, V.; Sathe, M.V. Evaluation of Rainwater Harvesting Methods and Structures Using Analytical Hierarchy Process for a Large Scale Industrial Area. *J. Water Resour. Prot.* 2009, 1, 427–438.
  19. Kadlec, R.H., and R. L. Knight. ( 1996 ) *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers. U.S.A.
  20. Kang, S.; Shi, W.; Zhang, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crop. Res.* 2000, 67, 207–214.
  21. Lall U, Sharma A ( 1996 ) A Nearest Neighbor Bootstrap For Resampling Hydrologic Time Series. *Water Resour Res* 32:679-693. doi:10.1029/95WR02966


- 
22. Lee, J.-m., Hyun, K.-h. & Choi, J.-s. (2013) Analysis of the impact of low impact development on runoff from a new district in Korea. *Water Science & Technology*, 68, 1315-1321.
23. Lehner, B., P Döll, J Alcamo, T Henrichs, F Kaspar, 2006, "Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis." *Climatic Change*.
24. Lewis A Rossman (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH.
25. Low Impact Development Best Management Practices Design Guide Edition 1.0 (2011) City of Edmonton. Edmonton, Alberta.
26. Md. Khademul Islam Molla, M. Sayedur Rahman, Akimasa Sumi, and Pabitra Banik (2006) Empirical mode decomposition analysis of climate changes with special reference to rainfall data, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2006, Article ID 45348, 17 pages. doi:10.1155/DDNS/2006/45348.
27. Mishra, Vimal, Keith A. Cherkauer, Shraddhanand Shukla, 2010, Assessment of Drought due to Historic Climate Variability and Projected Future Climate Change in the Midwestern United States. *J. Hydrometeor*, 11, 46–68.
28. Moffat AJ, Ellis C, Moss A, Nicoll B, Martin S, Beauchamp K (2014) Scottish Native Woodland Adaptation—the potential use of a Flexible Adaptation Pathways (FAP) Framework
29. Pickering, N. B., Stedinger, J. R., & Haith, D. A. (1988) . Weather input for nonpoint-source pollution models. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 114 (4) , 674-690.
30. Pittner, C., & Allerton, G. (2009) . SUDS for roads. Edinburgh: WSP Development and Transport.
31. Practicum, S. P., Barboza, N., Bedard, M., & Jensen, R. (2006) . The Study of Impervious versus Pervious Surfaces, and Low Impact Development (LID) Designs Within the City of Trinidad.
32. R. Chakrabarti et al. (2015) , Addressing climate change impacts through community-level water management: case studies from the south-eastern coastal region of India

- 
33. Racsko, P., Szeidl, L. and Semenov, M. (1991) A serial approach to local stochastic weather models. *Ecol. Modelling*, 57: 27-41.
34. Rajagopalan, B., and U. Lall (1999) A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables, *Water Resour. Res.*, 35 (10), 3089–3101, doi:10.1029/1999WR900028.
35. Robertson, R. (1992), *Globalization : Social theory and global culture*, Stage, London.
36. Selker J.S., Haith D.A. (1990) Development and Testing of Single-Parameter Precipitation Distributions. *Water Resour Res* 26:2733-2740. doi:10.1029/WR026i011p02733
37. Semenov, M. A., & Brooks, R. J. (1999) . Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Clim Res*, 11 (2) , 137-148.
38. Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., & Richardson, C. W. (1998) . Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Clim Res*, 10 (2) , 95-107.
39. Siebentritt M, Halsey N, Stafford Smith M. (2014) Regional climate change adaptation plan for the Eyre Peninsula. Seed Consulting Services, Adelaide.
40. Sim Van der Ryn, Peter Calthorpe. (1986), *Sustainable communities: A new design synthesis for cities, suburbs, and towns*, Sierra Club Books, San Francisco.
41. Steinschneider S, Brown C (2013) A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. *Water Resour Res* 49:7205-7220. doi:10.1002/wrcr.20528
42. Steinschneider, S., and C. Brown (2013) A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments, *Water Resour. Res.*, 49, 7205–7220, doi:10.1002/wrcr.20528.
43. Takeuchi, K., Namiki, Y., Tanaka, H. (1998) . Designing eco-villages for revitalizing Japanese rural areas, *Ecological Engineering* 11, pp 177–197.
44. Tung, C. P. and D.A. Haith, "Global Warming Effects on New York Streamflows." *Journal of Water Resources Planning and Management* 121 (2) : 216-225, 1995.
45. United Nations Environment Programme (UNEP) — Risoe Centre (2011) *Technologies for Climate Change Adaptation-Water Sector*, Denmark: UNEP-Riso.

- 
46. VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., Xiao, L., 2005. Green roofs stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *J. Environ. Qual.* 34, 1036–1044.
  47. Villarreal, E.L.; Dixon, A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Build. Environ.* 2005, 40, 1174–1184.
  48. Warner, K. and van der Geest, K. (2013) Loss and damage from climate change: local-level evidence from nine vulnerable countries. *International Journal of Global Warming*, 5, 367-386.
  49. Werners, S. E., Pfenninger, S., van Slobbe, E., Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., and Swart, R. J. (2013) Thresholds, tipping and turning points for sustainability under climate change. *Current opinion in environmental sustainability*, 5 (3) , 334-340.
  50. Wood A (1995) Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology*, 32 (3) , 21-29.
  51. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007) . *The SUDS manual (Vol. 697)* : Ciria London.
  52. Y.T. Maru, M. Stafford Smith, A. Sparrow, P.F. Pinhoc, O.P. Dube (2014) . A linked resilience and vulnerability framework for adaptation pathways in remote disadvantaged communities. *Global Environmental Change*, 28, pp. 337–350
  53. Young, M. D. (1992) , *Sustainable Investment and Resource Use*, Great Britain: The Parthenon Publishing Group.
  54. Z.L.Liao, Y.He, F.Huang, S.Wang and H.Z.li (2013) , Analysis on LID for highly urbanized areas' waterlogging control: demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai, *Water Science & Technology*, 68.12.
  55. Zhenliang, L., Ying, H., Fei, H., Sheng, W. & Huaizheng, L. (2013) Analysis on LID for highly urbanized areas' waterlogging control: demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai.
  56. 內政部營建署 (2012) , 建築物雨水貯留利用設計技術規範。
  57. 田育全 (2017) , 結合季長期天氣展望發展乾旱預警與支援決策系統, 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。



- 
58. 朱志彬 (2015), 104 年第一期稻作停灌補償作業說明, 第 272 期, 農政與農情。
  59. 朱容練、朱吟晨、林士堯、劉俊志、陳永明 (2015), 2014-2015 年乾旱事件概述, 國家災害防救科技中心災害防救電子報第 124 期。
  60. 何逸峰 (2005), 現代化灌溉自動測報與控制系統設施推廣成效, 第 155 期, 農政與農情。
  61. 吳瑞賢、李明旭、陳世偉 (2011), 農業區地表水系統之模擬與推估, 農業工程學報, vol.57 No.1: 76-91。
  62. 吳瑞賢、溫博文、李明旭 (2007), 農業回歸水回收再利用研究-雲林地區為例, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
  63. 李永展 (1995), 環境態度與環保行為: 理論與實證, 胡氏圖書出版社。
  64. 李永展 (2003), 《永續發展—大地反撲的省思》。巨流圖書出版公司。
  65. 李沅泓 (2015), 結合經驗模態分解法與 k-NN 移動視窗法之低頻率態氣象繁衍模式與應用於新竹供水系統之氣候變遷風險評估, 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
  66. 周育似 (2011), 省水標章產品補助政策節水效益分析, 台灣自來水公司第七區管理處業務課。
  67. 林永傳、鄒元燈 (2014), 淺析彰化農田水利會水文自動測報系統於灌排管理之應用與未來展望, 農田水利雜誌, 第 61 卷第 1 期。
  68. 林伯勳、李永展 (2001), 〈台北市都市指標系統之研擬〉, 《第五屆國土規劃論壇研討會論文集》, 台南成功大學。
  69. 林嘉佑 (2016), 因應氣候變遷之供水系統調適能力建構與調適監測修正之研究, 臺灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文。
  70. 林瑩峰、荊樹人、李得元、王姿文、錢紀銘 (2004)。人工溼地應用於硝酸鹽污染之地下水整治技術之開發研究 (3/3)。國科會專題研究計畫成果報告。
  71. 林憲德 (1997), 《綠建築社區的評估體系與指標之研究—生態社區的評估指標系統》, 內政部建築研究所。
  72. 政府重大公共建設-農業建設次類別加強農業水利建設 (中長程) 計畫 (2013-2016), 農委會。

- 
73. 倪進誠、林冠慧、張長義（2004），生態社區之理念探究與城鄉新風貌的架構初擬，環境與世界第十期。
  74. 荊樹人（2007），農業產業型態社區污水自然處理之研究，科技部研究計畫。
  75. 馬家齊、吳瑞賢（2015），氣候變遷與耕期調整對農業用水管理的影響，台灣水利。
  76. 張文亮（2005），台灣河川水質淨化工法成效之普查，2005年台灣環境資源永續發展研討會論文集，p.A01-1。
  77. 張珩、刑志航（2004），生態社區理念於社區環境落實之研究—以台南縣鄉村社區為例，建築與規劃學報，第五卷，第一期，第29-47頁。
  78. 曹榮軒（2017），面對氣候變遷水資源跨領域調適策略與調適路徑評估方法之建立，臺灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文（初稿）。
  79. 陳其南、陳瑞祥（1998），社區總體營造，行政院文化建設委員會。
  80. 陳亮全、黃瑞茂、張良真（2010），綠色城鄉、永續社區實驗計畫—以宜蘭三星地區、桃園中聖中泰兩里、馬祖南竿鐵板三社區為例--綠色城鄉、永續社區實驗計畫總計畫，行政院國家科學委員會專題研究計畫。
  81. 陳衍源（2006），6年來農田水利工程建設成果與展望，第174期，農政與農情。
  82. 陳清田、林羿汝、李振誥（2014），缺水期稻作灌溉管理操作策略之研究，臺灣水利第62卷第2期，50-58。
  83. 游保杉（2000），高屏流域區域日降雨-逕流之研究（III）-氣候變遷對高屏流域水資源衝擊之探討，行政院國家科學委員會。
  84. 游保杉（2007），水稻田灌區旱情動態監測與預警決策支援系統之研究，行政院農業委員會。
  85. 游添榮（2014），缺水地區作物選擇與節水栽培-節水作物硬質玉米與高粱之栽培技術，水資源管理會刊，頁9-17。
  86. 童慶斌、蘇明道、李明旭、李惠平（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，經濟部水利署水利規劃試驗所。
  87. 新竹縣政府（2014），101年度新竹縣地方氣候變遷調適計畫，委辦計畫。
  88. 經濟部水利署（2005），多元化水資源經營管理方案-農地迴歸水開發利用研究。

- 
89. 經濟部水利署(2007),濁水溪沖積扇地面地下水聯合運用管理模式建立與機制評估,中區水資源局。
  90. 經濟部水利署(2009),桃竹地區灌溉配水與停灌對灌溉用水影響研究,水利規劃試驗所。
  91. 經濟部水利署(2015),104 農業用水量統計報告。
  92. 經濟部水利署(2016),因應氣候變遷調適水利與農業跨域合作之探討,委辦計畫。
  93. 經濟部水利署(2017),台灣北部區域水資源經理基本計畫(第1次檢討)。
  94. 經濟部水利署北區水資源局(2013),寶山寶二隆恩堰聯合營運檢討。
  95. 農委會(2002),推廣省水管路節省農業灌溉用水效益顯著,農業新聞。
  96. 廖孟儀(1999),《建立生態社區準則之研究:以苗栗縣獅潭鄉聚落為例》,國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。
  97. 廖芳瑾、林盈廷、姚銘輝、盧虎生(2015),氣候變遷下農業耕作制度或空間分布對農業需水量之影響,氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域評估組示範計畫工作報告。
  98. 廖朝軒(2001),雨水貯留收集之水資源利用效益及策略,國立台灣海洋大學河海工程學系雨水貯集與入滲研究中心。
  99. 臺北自來水事業處(2006),管網改善中程計畫與長程計畫摘要。
  100. 劉建哲(2001),農村地區更新與農村發展,農訊雜誌,18(10):84-89。
  101. 劉建哲(2004),台灣農村永續發展之研究,農業金融論叢,50:53-80。
  102. 鄭友誠(2015),推廣旱作管路灌溉作業要點,第13期,農政與農情。
  103. 鄭友誠(2016),氣候變遷下農業灌溉水資源調適因應策略,第285期,農政與農情。
  104. 謝明憲(2014),黃金廊道設施果菜節水栽培之應用,87期,台南區農業專訊。
  105. 叢翔宇、倪廣恆、惠士博、田富強、張彤(2006),基於SWMM的北京市典型城區暴雨洪水模擬分析,水利水電技術,第3卷,第4期。