



國立臺灣大學生物環境資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

博士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

氣象合成與水文模式之發展及

因應氣候變遷之供水系統調適能力建構

Development of Novel Weather Generator and Hydrological Model and
Adaptive Capacity Building of Water Supply System to Climate Change

連宛渝

Wan-Yu Lien

指導教授：童慶斌博士


Advisor : Dr. Ching-Pin Tung

中華民國 102 年 7 月

July 2013




摘要



臺灣地區地形特殊導致 80% 左右之逕流量直接入海，加上豐水期及枯水期雨量比例差異大，使得水資源之調配相當不易，氣候變遷可能導致豐枯水期降雨量改變，造成豐枯水期流量差異擴大，更加劇了供給足夠水量的困難度。為了評估氣候變遷對供水系統造成的影響，並提出調適措施以降低氣候變遷可能帶來的衝擊，必須發展氣候變遷對供水系統衝擊評估與調適能力建構之流程與工具。本研究在流程上依據聯合國發展規劃署所提出的「氣候變遷調政策略綱領」分成五大步驟，由問題界定開始，系統性的評估現況與未來的脆弱度與風險，接著提出解決問題之可能之調適策略及其評估方式，最後並持續調適措施之落實與修正。評估工具方面，本研究注重於發展可同時繁衍產生日間尺度及小時時間尺度之氣象合成模式與可同時模擬日時間尺度及小時時間尺度之水文模式，配合研究區域之水資源供水系統模式，可分析氣候變遷對供水系統之衝擊。

本研究中建立雙機率分佈之氣象合成模式，將降雨事件分為暴雨事件及一般降雨事件，利用暴雨事件發生機率決定降雨日之降雨量是否為暴雨事件，並採用不同的機率分佈描述暴雨及非暴雨事件之降雨，模式中利用 Huff 法建立兩型，當發生暴雨事件時可配合兩型之挑選決定 24 小時之雨量。此外，研究中建立以 Green-Ampt 法計算入滲量與結合水平衡運算之水文模式，該模式可計算以日為時間尺度之河川流量，亦可配合雙機率分佈之氣象合成模式提供之含有日及小時時間尺度之氣象資料，在非暴雨事件時以日為時間尺度模擬河川流量，而在暴雨事件發生時則以小時時間尺度模擬小時河川流量。配合不同時間尺度之流量資料，建立同時考慮日及小時時間尺度之水庫操作模式，在暴雨事件發生時以防洪操作進行水庫放水，而非暴雨時期為一般放水操作之水庫操作模式。

根據分析顯示，氣候變遷將使得石門水庫上游河川流量在豐水期呈現增加趨勢而枯水期呈現減少趨勢，且造成未來水庫水位之 50 百分位之水庫水位低於下限的旬數情況將較歷史情況為多，而各旬最大水位分析結果指出在豐水期時水庫最大水位可能超過水庫大壩安全容許之最高水位，顯示未來水庫不論是在水資源調配或是防洪操作上將面臨

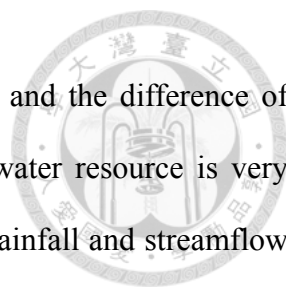


更加嚴格的挑戰。而氣候變遷對臺北供水區衝擊影響不大，可維持正常供水且有多餘水量可提供其他地區使用，板新供水區雖可滿足在容忍度 SI 為 0.5 之供水情形，但偶爾會有缺水事件發生，而在桃園供水區在容忍度 SI 為 0.5 的條件下，供需缺口最高達 44 萬噸/日，且由回復力指標可發現桃園供水區長期處在缺水的情況，加入既有策略後可提供之水量可滿足桃園供水區之需水量，但仍可能面臨短期缺水事件之風險，因此可採取埤塘、水庫清淤、淨水場供水能力增加與汰換舊漏自來水管線等慮強化方案以降低未來面臨之風險。

本研究所建立之氣象合成模式可適切的繁衍產生氣候變遷情境下之氣象資料，透過本研究建立之水文模式可模擬未來河川流量，再利用水庫操作模式可評估氣候變遷對水庫功能與供水系統之衝擊。而利用本研究之調適策略評估流程，則可有系統的分析及評估可能的衝擊與挑選可能之調適策略，以降低氣候變遷可能造成的衝擊。

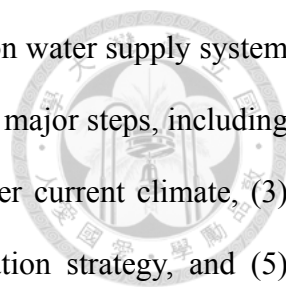
關鍵字：氣候變遷、氣象合成模式、水文模式、水資源、脆弱度、調適能力建構

Abstract



Because of the 80% of stream flow runs into the ocean directly and the difference of rainfall among wet and dry seasons is significant, the allocation of water resource is very challenge. In addition, the climate change may lead to the changes of rainfall and streamflow and enlarge the difference among wet and dry seasons. These may exacerbate the difficulty of supplying sufficient water. To reduce the impacts of climate change on the water supply system and to develop effective adaptation measures, this study follows Adaptation Policy Frameworks for Climate Change (APF) proposed by United Nations Development Programme (UNDP) and focuses on the development of novel weather generator and hydrological model. The developed weather generator can provide daily series with embeded hourly rainfall data for storm events. The proposed hydrological model can run in daily and hourly time steps depending on its input weather data. The simulated streamflows can be used as inputs for reservoir operation model and water resource system dynamics model to assess the climate change impacts.

The novel weather generator built in this study uses dual probability distributions to describe the extreme rainfall and normal rainfall events respectively. The probability of extremely rainfall event for each month is further used to decide if the rainy day is a strom event or not. Besides, the hyetographs are described by the Huff method and the 24 hourly rainfalls are generated by a selected hyetograph. On the other hand, the Green-Ampt method and water balance equations are used to develop NTU_Wtaershed Hydrological Model (NTU_WH). Not only the daily stremaflow but also the hourly dstreamflow in the extremely rainfall event days can be calculated by the NTU_WH. The reservoir operation model is also developed in this study, which can be run with different time scales. This reservoir operation model release houly flood water in the extreme rainfall event days and daily water supply in non-extreme rainfall event days.



To assess the impact and the adaptive capacity of climate change on water supply system, the adaptation strategies assessment process follows APF. APF has five major steps, including (1) defining project scope and design, (2) assessing vulnerability under current climate, (3) characterizing future climate related risks, (4) developing an adaptation strategy, and (5) continuing the adaptation process. According to the simulations of streamflow and water usage under different climate change scenarios, the vulnerability of water supply systems for different districts can be estimated. Furthermore, the adaptive strategies can be evaluated to reduce the deficits of water supply and the vulnerability for different water usages.

According to the results, the inflow of Shihmen Reservoir may increase in wet season and decrease in dry season under different future climate change scenarios. These results lead to the lower reservoir storages in dry season and the maximal reservoir storage for each 10-days in the wet season may be higher than the permitted maximal storage of dam safety. The water resource reallocation or the flood mitigation may become severe in future. However, the impact of climate change on carrying capacity of Taipei city is not significant. The carrying capacity of water supply with the criterion of Shortage Index (SI) =0.5 for Banshin area is enough to meet water demands, but the events of water shortage can still be expected. In Taoyuan water District, under the criterion of SI=0.5, the maximal deficits of water supply and demand is 440,000 tons / day. Besides, the Taoyuan area is always in the condition of insufficient water supply according to the index of resilience. Fortunately, if the planned water strategies for the Taoyuan area can be implemented, the gap between water supply and demand can be bridged. Although the gap could be filled, the risk of short-term water shortage in the Taoyuan area is still higher. The strengthening strategies could be adopted in this area are ponds, reservoirs desilting, increasing the capacity of water purification plant, and the replacement old water pipeline.

The weather generator built in this study can generate the weather series for different climate change scenarios. The streamflows can be simulated by the NTU_WH which is also

developed in this study. Then, the impacts of climate change on reservoir functions can be evaluated by the reservoir operation model. Besides, the adaptation strategy assessment process used in this study can assess the impacts of water supply system on climate change and evaluate the possible adaptation strategies to reduce the potential impacts of climate change.

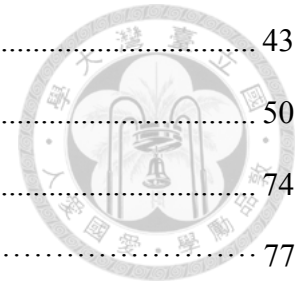
Key words: Climate Change, Weather Generator, Hydrological Model, Water Resources, Vulnerability, Adaptive Capacity Building



目錄



摘要	.....	i
Abstract	.....	iii
目錄	.....	vii
表目錄	.....	xi
圖目錄	.....	xv
第一章 前言	.....	1
1.1 緣起	.....	1
1.2 研究目的	.....	3
1.3 研究架構	.....	4
第二章 文獻回顧	.....	7
2.1 氣候變遷對水文與水資源之影響	.....	7
2.2 氣候變遷對水庫之影響	.....	9
2.3 氣候變遷下水資源的調適策略	.....	11
2.4 氣象合成模式	.....	15
2.5 水文模式	.....	17
第三章 氣象合成模式建立	.....	21
3.1 氣候變遷情境說明	.....	21
3.2 GCMs 挑選	.....	25
3.3 空間降尺度	.....	27
3.4 氣象合成模式	.....	29
3.4.1 日溫度模擬模式	.....	30
3.4.2 日降水量模擬模式	.....	31
3.4.3 不同時間尺度降水量模擬	.....	34
3.5 結果討論	.....	42



3.5.1	GCMs 挑選結果	43
3.5.2	氣象合成模式結果討論	50
3.5.3	小結	74
第四章	水文模式	77
4.1	GWLF 水文模式	78
4.2	NTU_WH 模式	81
4.3	NTU_WH_DH 模式	87
4.4	模式參數設定	89
4.4.1	GWLF 模式參數說明	89
4.4.2	NTU_WH 模式參數說明與檢定方法	90
4.5	模式檢定驗證	93
4.5.1	GWLF 模式驗證	93
4.5.2	NTU_WH 模式	94
4.6	討論	98
4.6.1	GWLF 模式與 NTU_WH 模式比較	98
4.6.2	不同模式連續七天低流量比較	101
4.6.3	不同時間尺度水文模式模擬比較	103
4.6.4	不同氣象合成模式對流量模擬之影響	104
4.6.5	小結	107
第五章	氣候變遷對水庫操作及供水系統衝擊、脆弱度與調適策略評估方法	109
5.1	氣候變遷對水庫操作影響評估方法	109
5.2	水資源供水系統建立	113
5.2.1	系統動力模式	113
5.2.2	供水承载力評估	115
5.3	暴露度及脆弱度分析	120
5.3.1	缺水之災害脆弱度量化的	120

5.3.2	氣候變遷之下各供水分區缺水脆弱度地圖製作.....	122
5.4	水資源調適策略訂定.....	127
5.4.1	UKCIP 調適精靈.....	127
5.4.2	多準則排序評估法.....	132
第六章	氣候變遷對水庫操作與供水系統衝擊、脆弱度評估與調適策略分析.....	135
6.1	研究區域.....	135
6.1.1	區域水資源供需情況.....	137
6.1.2	水資源設施.....	138
6.2	氣候變遷對水庫操作之衝擊評估.....	141
6.2.1	氣候變遷對石門水庫入流量之影響.....	141
6.2.2	氣候變遷對石門水庫石門水庫操作衝擊評估.....	143
6.3	氣候變遷對各供水分區供水情形之影響評估.....	149
6.3.1	未來水資源需求情境設定.....	149
6.3.2	供水分區系統動力模式建立與驗證.....	158
6.3.3	氣候變遷對水資源設施之衝擊評估.....	162
6.3.4	氣候變遷之下各供水分區暴露度、敏感度及脆弱度地圖.....	166
6.4	調適策略分析.....	186
6.4.1	未來面臨問題分析.....	186
6.4.2	調適方案規劃.....	191
第七章	結論與建議.....	213
7.1	結論.....	213
7.2	建議.....	215
	參考文獻.....	219
	附錄一、GWLF 模式及 NTU_WH 模式參數.....	227
	附錄二、不同 GCMs 公共給水暴露度地圖.....	233
	附錄三、不同 GCMs 農業用水暴露度地圖.....	241

附錄四、不同 GCMs 生活用水脆弱度地圖	249
附錄五、不同 GCMs 工業用水脆弱度地圖	257
附錄六、不同 GCMs 農業用水脆弱度地圖	265
附錄七、不同 GCMs 水資源水脆弱度地圖	273



表目錄

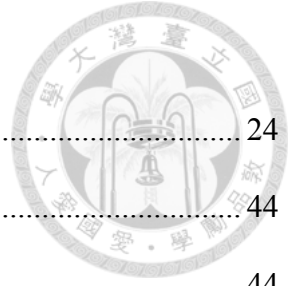
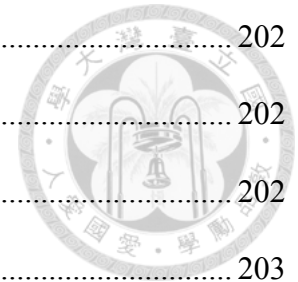


表 3-1	4 個 RCPs 說明(Moss et al., 2010)	24
表 3-2	測站與不同 GCMs 之相關性與 RMSE 分析	44
表 3-3	排名法挑選 GCMs 之分析結果	44
表 3-4	不同 RMSE 且相關係數門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果	45
表 3-5	不同相關係數且 RMSE 門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果	46
表 3-6	缺點扣分法 GCMs 挑選結果	46
表 3-7	GCMs 與提供情境說明	47
表 3-8	測站與 GCMs 之基期雨量資料比較	49
表 3-9	排名法挑選 GCMs 結果	49
表 3-10	缺點扣分法挑選 GCMs 結果	50
表 3-11	各月份最適度檢定結果	51
表 3-12	各月份降雨機率分析	53
表 3-13	小於 13 公分雨量各月份最適度檢定結果	54
表 3-14	連續性氣象合成模式各月份降雨機率分析	56
表 3-15	雨型分析結果	58
表 3-16	霞雲站平均雨量、發生機率及降雨比值資料	59
表 3-17	三個時期求解 μ_2 所需之參數及 μ_2 推估結果	61
表 3-18	不同資料長度月平均溫度誤差百分比	66
表 3-19	不同資料長度非暴雨事件各月濕天平均雨量誤差百分比	67
表 3-20	不同資料長度暴雨事件平均雨量(單位：公分)	68
表 3-21	不同資料長度 P(W)差值	68
表 3-22	不同資料長度各月份最大雨量	70
表 3-23	不同門檻值之歷史與模擬雨量非暴雨事件各月之濕天平均雨量	71

表 3-24	不同門檻值之歷史與模擬暴雨事件平均雨量.....	72
表 3-25	不同門檻值之歷史與模擬各月份最大雨量.....	74
表 4-1	AM1 與 AM2 值.....	79
表 4-2	NTU_WH 模式所需參數.....	91
表 4-3	入滲優先水文模式參數檢定.....	94
表 4-4	不同模式流量模擬之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數.....	105
表 5-1	石門水庫計畫配水量(單位：cms)(財團法人農業工程研究中心, 2003).....	113
表 5-2	系統動力模式元件說明與設定方式.....	114
表 5-3	公共給水暴露度等級劃分(水規所，2012).....	120
表 5-4	農業用水暴露度表(水規所，2012).....	121
表 5-5	人口密度分級(水規所，2012).....	121
表 5-6	工業產值分級(水規所，2012).....	121
表 5-7	農田面積分級(水規所，2012).....	122
表 5-8	脆弱度矩陣分級表(水規所，2012).....	122
表 5-9	臺北系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012).....	124
表 5-10	板新系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012).....	124
表 5-11	桃園系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012).....	125
表 5-12	水資源面對氣候變遷脆弱評估與強化調適能力推動流程.....	131
表 6-1	水庫及壩堰設施說明.....	139
表 6-2	淨水場處理能力.....	140
表 6-3	現有工業區(經濟部水利署，2009).....	154
表 6-4	現有工業用地之目標年用水需求量(經濟部水利署，2009).....	154
表 6-5	開發中工業區目標年需水量(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009).....	155
表 6-6	編訂及規劃中工業區目標年需水量(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009).....	155

表 6-7	台電公司電廠營運用水需水計畫(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009)	155
表 6-8	標的用水量與氣候變遷情境對應關係	158
表 6-9	氣候變遷對臺北供水系統供水承载力之衝擊評估(單位：萬噸/日)	162
表 6-10	氣候變遷對板新地供水系統供水承载力之衝擊評估(單位：萬噸/日)	163
表 6-11	氣候變遷對臺北供水系統回復力之衝擊評估	164
表 6-12	氣候變遷對板新供水系統回復力之衝擊評估	164
表 6-13	氣候變遷對桃園供水系統供水承载力之衝擊評估(單位：萬噸/日)	165
表 6-14	氣候變遷對桃園供水系統回復力之衝擊評估	166
表 6-15	供水系統對應大臺北地區供水區域	167
表 6-16	臺北市不同情境下各區之水資源脆弱度改變說明	168
表 6-17	新北市屬於臺北、板新及桃園供水區之不同情境各區水資源脆弱度改變說明	169
表 6-18	桃園縣不同情境下各鄉鎮市區之脆弱度	178
表 6-19	水資源調適方案列表	192
表 6-20	臺北供水系統需水量分析	194
表 6-21	板新供水系統需水量分析	194
表 6-22	板新供水系統既有方案評估說明	195
表 6-23	臺北供水系統既有方案評估後之供需缺口(單位：萬噸/日)	195
表 6-24	板新供水系統既有方案評估後之供需缺口(單位：萬噸/日)	196
表 6-25	臺北市面臨問題與調適策略評估表	199
表 6-26	新北市面臨問題與調適策略評估表	200
表 6-27	新北市選定之強化方案及說明	201
表 6-28	新北市調適方案效用性成對比較矩陣	201
表 6-29	新北市調適方案永續性成對比較矩陣	201

表 6-30	新北市調適方案可行性成對比較矩陣.....	202
表 6-31	新北市調適方案即時性成對比較矩陣.....	202
表 6-32	新北市多準則調適策略綜合評量表.....	202
表 6-33	桃園地區需水量分析.....	203
表 6-34	桃園地區既有方案評估說明.....	204
表 6-35	桃園地區既有方案評估後之供需缺口(萬噸/日).....	205
表 6-36	桃園地區面臨問題與調適策略評估表.....	208
表 6-37	桃園地區選定之強化方案及說明.....	209
表 6-38	桃園地區效用性成對比較矩陣.....	210
表 6-39	桃園地區永續性成對比較矩陣.....	210
表 6-40	桃園地區可行性成對比較矩陣.....	210
表 6-41	桃園地區即時性成對比較矩陣.....	211
表 6-42	桃園多準則調適策略綜合評量表.....	211



圖目錄



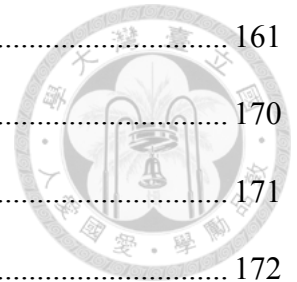
圖 1-1	氣候變遷造成之衝擊影響及調適策略評估架構.....	5
圖 1-2	氣候變遷對水庫操作及水資源之衝擊評估研究架構及調適策略評估架構.....	5
圖 2-1	氣候變遷之脆弱度與調適整合至規劃的計畫中流程(USAID,2007).....	12
圖 2-2	國家水資源調適行動方案推動架構(經濟部水利署,2012b).....	15
圖 2-3	SWAT 模式架構(Arnold et al., 1998)	18
圖 2-4	SHE 模式架構(Abbott et al., 1986a).....	19
圖 3-1	各種 SRES 情境之不同溫室氣體排放情境(IPCC, 2007)	23
圖 3-2	各種 SRES 情境不同溫室氣體排放情境溫度上升趨勢(IPCC , 2007)	23
圖 3-3	GCMs 挑選流程	26
圖 3-4	雨量資料繁衍架構.....	30
圖 3-5	不同時間尺度之氣象資料合成模式概念圖.....	35
圖 3-6	臺灣北部地區長延時雨型均一區(經濟部水資源局, 2001).....	38
圖 3-7	GCMs 模式分類依據之示意圖	48
圖 3-8	7 個 GCMs 模式三測站豐枯水期平均降雨變化.....	48
圖 3-9	測站與 GCMs 之基期雨量資料比較圖	50
圖 3-10	2 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈	52
圖 3-11	6 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈	52
圖 3-12	各月份濕天平均雨量.....	53
圖 3-13	9 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈	55
圖 3-14	暴雨事件降雨量與累積機率分佈曲線.....	55
圖 3-15	各月份濕天平均雨量.....	57
圖 3-16	模擬暴雨平均雨量.....	57
圖 3-17	雙機率分佈氣象合成模式模擬之月平均雨量.....	58

圖 3-18	方法一之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果.....	60
圖 3-19	方法一之暴雨事件平均雨量修正結果.....	60
圖 3-20	方法一之未來各月份濕天平均雨量推估.....	61
圖 3-21	方法二之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果.....	62
圖 3-22	方法二之暴雨事件雨量修正結果.....	63
圖 3-23	方法三之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果.....	64
圖 3-24	方法三之暴雨事件雨量修正結果.....	64
圖 3-25	6 月份採用單分佈描述小於 13 公分之降雨累積機率.....	65
圖 3-26	6 月份採用雙分佈描述小於 13 公分部分之降雨累積機率.....	65
圖 3-27	不同資料長度之 8 月份非暴雨事件降雨量累積機率分佈曲線，(a)10 年，(b)30 年，(c)50 年，(d)100 年，(e)300 年，(f)500 年.....	69
圖 3-28	不同暴雨門檻值之 8 月份降雨量累積機率分佈曲線及 7-10 月暴雨事件降雨量與累積機率分佈曲線，(a)門檻值為 5 公分非暴雨事件累積機率，(b)門檻值為 5 公分暴雨事件累積機率，(c)門檻值為 13 公分非暴雨事件累積機率年，(d) 門檻值為 13 公分非暴雨事件累積機率，(e)門檻值為 20 公分非暴雨事件累積機率，(f)門檻值為 20 公分非暴雨事件累積機率.....	73
圖 4-1	水文模式水平衡關係示意圖.....	77
圖 4-2	CN 值與臨前水分內插關係圖.....	79
圖 4-3	Green-Ampt 入滲模型(Chow et al., 1988).....	83
圖 4-4	不同時間尺度水文模式模擬流程.....	87
圖 4-5	GWLF 模式旬平均流量與歷史旬平均流量比較.....	93
圖 4-6	參數優選結果之逐旬流量與逐旬流量比較.....	95
圖 4-7	參數優選結果之旬平均流量與歷史旬平均流量比較.....	95
圖 4-8	參數優選結果之小時流量與歷史小時流量比較.....	96
圖 4-9	NTU_WH 模式旬平均流量驗證.....	96
圖 4-10	馬莎颱風流量驗證.....	97

圖 4-11	泰利颱風流量驗證.....	97
圖 4-12	GWLF 與 NTU_WH_DO 模式於降雨時蒸發散視為 0 之模擬流量.....	98
圖 4-13	GWLF 與 NTU_WH_DO 模式不論是否降雨均計算蒸發散量之模擬流量.....	99
圖 4-14	入滲量比較.....	100
圖 4-15	地表逕流量比較.....	100
圖 4-16	蒸發散量比較.....	101
圖 4-17	GWLF 與 NTU_WH_DO 模式於不同蒸發散機制考量下之連續七天低流量 CDF， (a)降雨時蒸發散視為 0，(b)不論是否降雨接計算蒸發散量.....	102
圖 4-18	GWLF 模式計算之滲漏量與淺層飽和層含水量.....	103
圖 4-19	NTU_WH_DO 模式計算之滲漏量與淺層飽和層含水量.....	103
圖 4-20	不同時間尺度水文模式模擬之旬平均流量.....	104
圖 4-21	以單一機率分佈氣象合成模式繁衍之氣象資料模擬旬流量.....	105
圖 4-22	以雙機率分佈氣象合成模式繁衍之氣象資料模擬旬流量.....	105
圖 4-23	以 GWLF 模式模擬不同氣象合成模擬之輸出結果.....	107
圖 4-24	以 NTU_WH 模式模擬不同氣象合成模擬之輸出結果.....	107
圖 5-1	水庫操作評估流程.....	110
圖 5-2	連續性水庫操作評估流程.....	111
圖 5-3	石門水庫運用規線圖(經濟部水利署, 2011).....	111
圖 5-4	系統動力模式各元件建立示意圖.....	115
圖 5-5	供水量與需水量關係圖.....	116
圖 5-6	缺水容忍度高於設計缺水容忍度時降低需水量情形.....	116
圖 5-7	缺水容忍度低於設計缺水容忍度時降低需水量情形.....	117
圖 5-8	回復力分析簡例圖.....	119
圖 5-9	農業配水率評估流程圖.....	126

圖 5-10 UKCIP 調適精靈評估流程(UKCIP,2010).....	128
圖 6-1 淡水河流域概圖.....	136
圖 6-2 豐水期入流量改變率.....	142
圖 6-3 枯水期入流量改變率.....	142
圖 6-4 全年入流量改變率.....	143
圖 6-5 石門水庫歷史水位圖.....	144
圖 6-6 日時間尺度水庫操作水位.....	145
圖 6-7 不同時間尺度水庫操作水位.....	145
圖 6-8 特定年不同時間尺度水庫操作水位.....	146
圖 6-9 A1B 情境水庫水位分析.....	147
圖 6-10 GFCM21 模式之水庫各旬最大水位.....	147
圖 6-11 A2 情境水庫水位分析.....	148
圖 6-12 B1 情境水庫水位分析.....	148
圖 6-13 大臺北地區生活用水與人均 GDP 關係圖(水規所，2012).....	150
圖 6-14 桃園地區生活用水與人均 GDP 關係圖(水規所，2012).....	151
圖 6-15 社經條件修正後之每人每日用水量.....	151
圖 6-16 大臺北地區生活用水與溫度關係圖，(a)門檻值 23°C，(b) 門檻值 21°C	152
圖 6-17 桃園地區生活用水與溫度關係圖.....	153
圖 6-18 氣溫與降雨的改變造成灌溉需水量改變示意圖.....	156
圖 6-19 CSMK35 之 A1B 情境下各旬灌溉需水量改變率.....	157
圖 6-20 氣候變遷下桃園、石門灌區灌溉需水量改變率.....	158
圖 6-21 大漢溪水資源系統動力模式.....	159
圖 6-22 新店溪水資源系統動力模式.....	160
圖 6-23 秀朗站旬流量驗證結果.....	161

圖 6-24	三鶯橋站流量驗證結果.....	161
圖 6-25	大臺北地區敏感度地圖.....	170
圖 6-26	大臺北地區公共給水暴露度地圖.....	171
圖 6-27	大臺北地區農業用水暴露度地圖.....	172
圖 6-28	大臺北地區生活用水脆弱度地圖.....	173
圖 6-29	大臺北地區工業用水脆弱度地圖.....	174
圖 6-30	大臺北地區農業用水脆弱度地圖.....	175
圖 6-31	大臺北地區水資源脆弱地圖.....	176
圖 6-32	桃園供水區敏感度地圖.....	179
圖 6-33	桃園供水區公共給水暴露度地圖.....	180
圖 6-34	桃園供水區農業用水暴露度地圖.....	181
圖 6-35	桃園地區生活用水脆弱度地圖.....	182
圖 6-36	桃園供水區工業用水脆弱度地圖.....	183
圖 6-37	桃園供水區農業用水脆弱度地圖.....	184
圖 6-38	桃園供水區水資源脆弱地圖.....	185
圖 6-39	淡水河流域豐水期、枯水期及全年流量改變情況.....	187
圖 6-40	臺灣地區(含離島)生活用水量與人口趨勢圖(經濟部水利署, 2009b).....	188
圖 6-41	大臺北地區考慮既有策略對公共給水暴露度之改變.....	197
圖 6-42	桃園地區考慮既有策略對公共給水暴露度之改變強化方案評估.....	206





第一章 前言



1.1 緣起

水資源長久以來就是人類不可或缺的資源之一，然而臺灣地區河流短且地勢陡，因此雖然年平均降雨量約有 2,500 毫米，但是雨量在集水區停留時間短，降雨大量多直接流入海洋，可利用的水量並不充足，以民國 99 年為例，該年年降雨量為 852.5 億立方公尺，其中年逕流量為 624.9 億立方公尺，年入海的水量為 511.6 億立方公尺，直接入海之水量佔年雨量之 60%，佔年逕流量之 81.9%(經濟部水利署, 2012a)，再加上豐水期及枯水期雨量比例差異大，因此若枯水期降雨不足容易直接影響枯水期之可供應水量，而豐水期降雨量不足亦可能導致隔年枯水期之可用水量不足，而氣候變遷可能導致豐枯水期降雨量改變，使得豐枯水期流量差異擴大，更加劇了取得足夠水量的困難度。為了評估氣候變遷對供水系統造成的影響，並提出調適措施以降低氣候變遷可能帶來的衝擊，必須發展氣候變遷對供水系統衝擊評估與調適能力建構之流程與工具。本研究在流程上依據聯合國發展規劃署所提出的「氣候變遷調政策略綱領」分成五大步驟，由問題界定開始，系統性的評估現況與未來的脆弱度與風險，接著提出解決問題之可能之調適策略及其評估方式，最後並持續調適措施之落實與修正。評估工具方面，本研究注重於發展可同時繁衍產生日間尺度及小時時間尺度之氣象合成模式與可同時模擬日時間尺度及小時時間尺度之水文模式，配合研究區域之水資源供水系統模式，可分析氣候變遷對供水系統之衝擊。

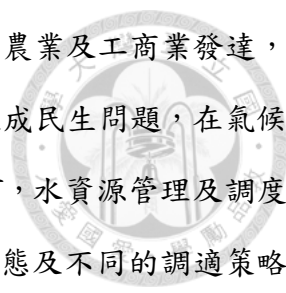
近幾年來，氣候異常造成極端的水文事件發生之頻率增加，導致臺灣地區水資源供需受到氣候異常影響而呈現極不穩定的狀態，極端乾旱事件則會使得水資源的供需失調，造成農業、工業及民生用水的缺乏，使得社會經濟動盪不安。舉例來說，2001 年納莉颱風侵襲臺灣，造成臺北地區多處淹水且捷運系統癱瘓，2004 年之敏督利颱風及七二水災與艾利颱風帶來之大降雨，夾帶大量泥砂進入水庫，導致水庫原水濁度過高，造成淨水場無法處理，使得桃園地區無法獲得正常之供水；然而 2002 年及 2003 年年初，臺灣北

部因為面臨久旱影響，除了農田遲遲無法進行灌溉犁田插秧外，甚至新竹科學園區也深受其害，對整體國家經濟衝擊之大顯而易見。

氣候變遷指的是長期天氣特性改變，並可能導致短期氣候變異加劇與極端天氣頻率增加，根據童慶斌等(2002)之研究報告顯示，全球暖化導致臺灣地區氣候與水文有極端化之趨勢，暴雨與乾旱事件均將更加頻繁，全球暖化與氣候變異顯著增加對生態環境、水資源與農業環境等均會產生影響；童慶斌等(1999)與林俊成及李國忠(2000)藉由模式模擬評估氣候變遷對河川流量之衝擊影響，發現衝擊影響有極端化之現象，即豐水期流量增加枯水期流量減少，極端乾旱事件發生更加頻繁與豐枯水期流量差異擴大等現象將使得水資源調配更加困難。為了評估氣候變遷對水資源調配之影響，需以氣象合成模式繁衍產生未來氣候變遷情境下之日溫度及日雨量資料，配合水文模式模擬產生未來之河川流量，再透過水資源供水系統模式分析模擬未來之供水情況，以了解在氣候變遷情況下水資源調配情況。

過去分析水庫功能時，往往以日、旬或月之時間尺度，配合水庫操作規線分析水庫之供水功能，而以小時之時間尺度分析水庫在暴雨時之操作情形，然而，氣候變遷將導致豐枯水期流量改變，並使得極端暴雨與極端乾旱事件發生頻率增加，因此，分別探討水庫供水功能或減洪功能並不能全面性的討論氣候變遷對水庫可能造成的影響，研究中考慮不同時間尺度之水庫操作情形，當暴雨事件發生時以小時為時間尺度分析水庫減洪功能，而在一般情況則以日為時間尺度分析水庫之供水功能，為了配合水庫考慮不同時間尺度之操作情形，研究中發展可同時產生日流量及小時流量不同時間尺度之水文模式，以提供水庫供水與減洪功能評估時之用，為了配合不同時間尺度水文模式之需求，研究中亦發展可同時產生不同時間尺度雨量資料之氣象合成模式，以提供水文模式所需之氣象輸入資料。

越來越多證據顯示氣候變遷已在發生，近年來世界各地與臺灣地區氣象災害頻傳且衝擊程度加劇，極可能是一明顯徵兆與開端，因此，如何因應氣候變遷為刻不容緩推動之工作，美國、加拿大、英國及德國等國家近年來均投資相當人力與經費成立專屬研究機構，針對氣候變遷可能造成的衝擊進行分析評估，並分析可採行之調適策略以減緩氣



候變遷所帶來的衝擊。本研究所探討之大臺北及桃園地區人口稠密，農業及工商業發達，因此當極端缺水事件發生時，非僅僅只有經濟受到衝擊，更直接造成民生問題，在氣候氣候變遷可能造成極端事件發生頻率且流量時間分配改變的情況下，水資源管理及調度更加困難，調適策略之研議及實行更為重要，而不同的區域發展型態及不同的調適策略都可能導致不同的缺水損失，故研究中針對調適策略的挑選及評估架構進行討論，根據建構之評估架構建議適合之調適策略。

1.2 研究目的

氣候變遷可能導致豐枯水期流量差異變大以及極端事件發生頻率提高等，進而影響水庫的操作程序而衝擊水庫的供水與減洪能力，再加上人口持續增加以及產業發產以及全球暖化等因素，使得用水型態以及用水需求等可能會有所改變，這些因素的改變除了造成區域供水的改變之外，對於水庫所能提供的減洪功能勢必造成衝擊，並且對下游供水系統之供水能力造成影響。為分析氣候變遷對水庫供水及減洪功能之影響，研究中發展可同時繁衍不同時間尺度之氣象合成模式，產生暴雨事件時之小時雨量及非暴雨事件之日雨量，並建立可同時模擬不同時間尺度之水文模式，以模擬產生所需之流量資料，代入於暴雨時期以防洪操作而非暴雨時期為一般放水操作之水庫操作模式中，分析評估氣候變遷對水庫功能之影響。此外，在氣候變遷對整體水資源調配亦可能造成影響，因此，為分析氣候變遷對整體供水之影響，研究中依據聯合國發展規劃署所提出的「氣候變遷調政策略綱領」評估流程，由問題界定開始，系統性的評估現況與未來的脆弱度與風險，接著提出解決問題之可能之調適策略及其評估方式，最後並持續調適措施之落實與修正。

在調適流程評估所需之現況及未來水資源系統受到之衝擊分析，則透過不同氣候變遷情境下之流量資料以及各標的用水現在及未來使用情形，分析各供水區所遭受之衝擊與其可能面臨之脆弱度，依據各標的用水之脆弱度空間分佈結果，及氣候變遷情況下之

供需水量缺口，建立強化方案選擇及評估方式，並據此擬訂氣候變遷影響下可能之強化方案優先順序。



1.3 研究架構

本研究主要分為兩大架構，在分析氣候變遷造成之衝擊影響及調適策略與強化方案之決定時，以圖 1-1 之之評估架構進行分析，在分析時，首先確定系統範圍並確定系統管理目標，針對可能的影響因子進行分析，接著針對現況條件脆弱度及未來脆弱度進行分析，配合現況條件脆弱度及未來脆弱度，則可進行策略之挑選及評估。

在分析不同氣候變遷情境下之脆弱度時，透過圖 1-2 之評估架構，取得環流模式 (General Circulation Model, GCM) 之輸出資料，利用空間降尺度與時間降尺度(氣象合成模式)獲得研究區域之日時間及小時時間尺度之氣候資料，再透過水文模式進行流量模擬，將不同時間尺度之流量資料代入水庫操作模式，可針對氣候變遷對水庫供水及減洪功能之影響進行評估，而將流量資料代入利用系統動力模式建立之水資源供水系統模式，則可分析不同氣候變遷情境下之供水承载力以及供需缺口，再進行調適策略之評估與挑選。

依據研究架構，第二章針對文獻回顧進行說明，文獻回顧包括氣候變遷對水文及水資源之影響、氣候變遷對水庫供水之影響、氣候變遷的調適策略等，由於研究中建立不同時間尺度之氣象合成模式與水文模式，因此亦針對氣象合成模式與水文模式進行文獻回顧。第三章針對氣象合成模式進行說明，在氣象合成模式建立前，首先說明氣候變遷情境，並說明如何挑選 GCMs 模式，配合空間降尺度與時間降尺度建立氣象合成模式，最後討論 GCMs 挑選結果與不同氣象合成模式之分析結果。第四章針對水文模式進行討論，首先說明使用之水文模式，並說明水文模式建構方式，接著說明水文模式檢定驗證結果，最後說明使用不同水文模式及不同氣象合成模式產生之氣象資料對水文模擬結果之影響。第五章針對氣候變遷對淡水河流域之衝擊評估方法進行說明，首先說明水庫操作模式建構方式，以作為後續氣候變遷對水庫操作之影響評估方法，接著利用系統動力

模式建構水資源供水系統，並以供水能力評估指標，建立氣候變遷對供水系統之影響評估方法，接著說明如何建立具有空間分佈之暴露度及脆弱度地圖，並說明如何應用暴露度、敏感度及脆弱度地圖與不同氣候變遷情境下之供需缺口，分析評估強化策略。第六章則針對第五章提出之方法，分別討論氣候變遷對水庫操作之衝擊評估、氣候變遷對各供水分區影響評估，最後分析可能之調適策略，第七章則為最後之結論與建議。



圖 1-1 氣候變遷造成之衝擊影響及調適策略評估架構

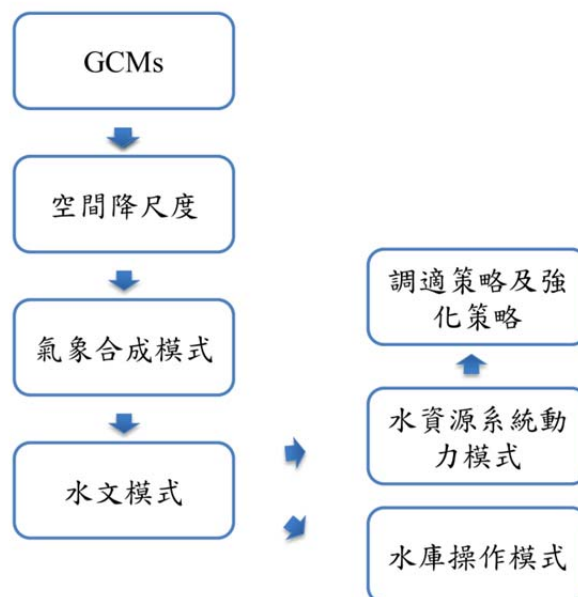


圖 1-2 氣候變遷對水庫操作及水資源之衝擊評估研究架構及調適策略評估架構



第二章 文獻回顧



近幾年來，不論是模式預測結果或是觀測資料都顯示已有氣候變遷的趨勢，而有關氣候變遷的相關研究逐漸受到重視，且已從單純的科學性研究擴展到同時考量衝擊與調適脆弱度評估之應用性研究。氣候變遷對於水庫系統的衝擊影響與調適策略等正在起步階段。影響水庫的功能最重要是水文特性的改變與泥砂量淤積導致水庫的壽命減短。以下針對臺灣的水庫狀況及相關氣候變遷對水文與水資源影響及水庫功能衝擊之相關研究、水資源調配之系統動力模式與因應氣候變遷之調適策略提出說明。

2.1 氣候變遷對水文與水資源之影響

Tung and Haith (1995)曾就氣候變遷對不同區域之水資源衝擊進行評估，研究結果顯示水資源對氣候變遷之敏感度非常高。童慶斌與李宗祐(2001)則是應用於評估七家灣溪河川流量的衝擊，其結果顯示雖然平均年流量均有增加的趨勢，但豐枯水期流量極端化。Loukas 等人(2002)以加拿大西南部 Campell 及 Illecillewaet 兩個集水區為例，應用 CGCMA1 模式模擬集水區未來溫度及降雨量之變化潛勢，並利用 UBC 集水區水文模式模擬氣候變遷情境下集水區洪水量及發生頻率，研究結果說明 Campell 集水區平均洪水量及發生頻率有增加之趨勢；而相反地，Illecillewaet 集水區卻是減少的趨勢，Christensen 等人(2004)利用 PCM 模式(U.S. Department of Energy/National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model)輸出資料模擬科羅拉多流域水資源之影響，根據研究結果顯示，未來溫度將會增加而年降雨量減少，因此在年逕流量的部分也將因此減少。而研究中利用水管理模式(water management model)模擬水管理的操作情形，結果顯示未來流域可儲存水量最多可能減少 40%，且可能造成 Glen Canyon Dam 放至下游平原的水量減少，亦可能造成發電量的降低。

Wilby(2006)等人研究氣候變遷下英國 Kennet River 之河川流量與水質所遭受之衝擊，結果顯示在氣候變遷的影響之下，Kennet River 在乾季流量將減少，而雨季流量則有增

加之趨勢。Thodsen(2007)探討丹麥境內五條主要河川受氣候變遷影響下之流量變異，其結果顯示，各流域內無論是平均降雨量或平均流量皆有增加之趨勢。除此之外，Kang 等人(2007)結合環流模式與水文模式，探討美國科羅拉多 South Platte 流域受氣候變遷影響下的流量變化，亦顯示河川尖峰流量對於氣候變遷的反應相當敏感。

Mimikou 等人(2000)應用 UKHI (UK Meteorological Office High Resolution Model)平衡模式與 HadCM2 (Hadley Centre Couple Model v2)漸變模式，以 WBUDG 水平衡模式結合 R-Qual 水質模式，模擬河川地表逕流量以及水質項目中 BOD₅、DO 與 NH₄ 之影響，研究顯示在氣候變遷下，水量方面，因降雨減少，逕流亦減少，溫度增加，使得蒸發散量增加；在水質方面，則因夏季流量明顯減少許多，河川的稀釋能力降低，水質受到嚴重的衝擊；流量減少，流速降低，河川的曝氣作用亦下降，此外，高溫也導致河川的飽和溶氧較低。Senhorst and Zwolsman (2005)分析在氣候變遷下，低流量與高溫發生的頻率及強度增加對水質的影響，結果顯示在暴雨或是乾旱等極端事件上，其衝擊較大，但若是在平均的河川流量下，非極端事件，則相對水質而言是較無變化。Feyen 及 Dankers(2009)應用水文模式及高解析度區域氣候模式來探討全球暖化對於歐洲水文乾旱的影響，研究結果指出在 A2 情境下，21 世紀末歐洲大部分地區(除最北邊與東北區域外)在無霜季節的水文乾旱會更加嚴重與持久，Wegehenkel 與 Kersebaum (2009)研究氣候變遷對於德國東北部集水區河川低流量的影響，假設未來年平均氣溫增加 1.4°C 而年平均雨量減少 8%的氣候變遷情境，結果發現低流量情形有增加的趨勢而森林區的地下水補助量有減少的趨勢。

氣候變遷的影響將對河川流量造成影響，進而對水資源造成衝擊，因此亦使得全球皆關注於永續水資源利用的議題。2007 年 12 月聯合國在印尼峇里島舉行氣候變遷會議之際，世界自然基金會(WWF)指出，2007 年全球氣候創下多項紀錄，極端天氣事件也更加嚴重，從澳洲、歐洲、北美洲、非洲到亞洲都出現了嚴重的乾旱，造成水源短缺和森林火災，除了乾旱，在歐、亞、非等城市出現了極端洪水事件。而 IPCC(2007)之「衝擊、調適與脆弱度」(Impacts, Adaptation and Vulnerability)報告書中，以不同的面向以及地區分別為出發點，探討氣候變遷可能產生之影響，就水資源管理面向而言，到了 21

世紀中葉高緯度地區以及某些溼熱帶地區的年平均雨量、逕流量以及水資源的可得性預計將增加 10-40%，但是在中緯度的某些乾燥地區以及乾熱帶地區卻會減少 10-30%，此外，極端氣候現象影響的範圍將擴大，除了受乾旱影響的區域會增多以外，部份區域發生暴風雨事件的頻率將有所提升，發生洪水的風險亦隨之提高。

根據前人研究在在顯示氣候變遷導致溫度增加及雨量改變，將直接衝擊河川流量，並進而對水資源造成衝擊，水資源為維持基本生活之重要資源之一，若可利用水資源量發生改變，將直接或間接對民生、工業及農業造成衝擊，因此，探討氣候變遷對河川流量之影響，進而討論氣候變遷對可用水資源之衝擊為一重要之課題。

2.2 氣候變遷對水庫之影響

對大型水庫而言，進入到水庫的流量等於上游集水區的河川流量加上直接降落在水庫表面的雨量，而氣候條件則決定可能的降雨情況，並直接影響可能的水庫入流量；水庫的輸出包含水庫的放水量與水庫表面的蒸發量。是故水庫供水可靠度將與水庫入流量、蒸發量、水庫儲水容量、放水規則有關，氣候變遷將會影響這些因子的變化，進而衝擊供水能力。

Cole 等(1991)指出在已知河川流量的變化下，水庫供水可靠度與水庫的容量與平均河川流量及出水量的比率有關。Nash and Gleick(1991, 1993)利用流域尺度水文模式模擬美國科羅拉多河支流的河川流量，並模擬多目標水庫的供水可靠度的變化。研究中利用現有水庫操作程序與水權的分配，評估現有的水庫系統的衝擊影響。在不同情境的變化下水文特性有所改變，但是研究中顯示經過時間的累積，水文特性雖只有少許的減少但高流量的頻率卻增加，導致水庫的系統特性嚴重影響。

Halmova 及 Melo(2006)以 IPCC 所提供之 IS92a 溫室氣體排放情境，結合 CCCM2000 及 GISS1998 兩種大氣環流模式模擬之輸出資料，模擬氣候變遷對斯洛伐克的 Vihorlat 水庫入流、放水量及供水情況之影響，研究結果顯示在假設該區用水需求不會增加的情況下，利用不同大氣環流模式輸出資料所模擬之水庫供水能力只有少數情境下會低於

95%，而最低之情況其供水仍能維持 80%左右，顯示氣候變遷對此該區域之水資源衝擊較不明顯。

Park 等人(2009)利用 IPCC 所提供 CCCma 及 CGCM2 兩個大氣環流模式之 A2 與 B2 情境，探討氣候變遷對韓國兩座提供農業用水量之水庫入流及出流量衝擊，根據評估結果顯示，水庫於未來夏季及秋季時入流量將會因降雨量減少而降低，進而導致水庫儲水量減少，可能會造成春季時產生缺水之情況，因此於灌溉之操作上需更加保守。

Lettenmaier 等(1999)分析包含單一水庫系統及大型的多個水庫系統等六個水庫，並模擬現況與未來三種不同氣候變遷預設情境下的河川流量與水資源系統的供水情形，並評估在 2050 年氣候變遷的情境下，六個集水區的不同水資源指標的衝擊程度；研究中同時也考慮了在供水方面可能改變的範圍的影響，或是不同的操作方式的衝擊影響。研究發現大部分流域與氣候變遷的情境，氣候變遷的影響在水庫的操作與供水改變的影響是相似的。研究中也發現水庫系統的供水量與水庫操作的改變得衝擊影響與入流量的改變的影響相比則是較小。童慶斌等人(2001)利用一整合型系統動力模式評估氣候變遷對鯉魚潭水庫系統的衝擊，結果顯示在氣候變遷條件下，河川流量呈現極端分佈現象，如豐水期水量增加，枯水期水量減少，其對目前之民生用水需求量影響不大，但當民生用水從目前之 90 萬噸增加至 100 萬噸時，其缺水風險將因氣候變遷的影響而增加。Fowler 等人(2007)利用 UKCIP02 Medium-High(SRES A2)情境資料模擬氣候變遷對西北英格蘭之聯合供水系統之操作衝擊，研究結果顯示，在未來可能減少 18%的供水量。Payne 等人(2004)以美國能源部所發展之 PCM(Parallel Climate Model, PCM)氣候模擬模式，評估短期、中期及長期氣候變遷情況對國哥倫比亞河集水區(Columbia River Basin)之水資源系統進行衝擊，結果顯示冬季平均溫將分別上升 0.5°C、1.3°C 及 2.1°C，降雨則減少 3%、增加 5%及增加 1%。冬季平均溫度上升，將導致融雪時間提早，部分於夏季進入水庫之流量將提早於冬季或春季進入水庫，將可能造成水庫在供水、發電及生態保育上之問題，針對入流量改變將使得水資源需重新分配，因此需探討改變水庫蓄水時間，而亦須考慮降低水庫水位以提供防洪空間之時間。

水庫為臺灣地區重要之蓄水設施，由於臺灣地區河川短且地勢陡，雨量停留在地表的時間短，且豐枯水期流量差異大，因此由河川直接取水並無法確保可獲得足夠之水量，需要水庫設施攔蓄水量，調節洪水及枯旱以提供所需水量，在臺灣地區平均每座水庫年運用次數必須超過 2 次以上方能滿足用水需求，而石門水庫甚至超過 4 次才能提供下游足夠之水量(徐享崑, 2006)，然而，由上述研究可知，氣候變遷將影響降雨特性導致河川流量改變，進一步對水庫供水及防洪功能造成衝擊，因此針對氣候變遷對水庫功能之衝擊評估時為刻不容緩之重要課題。

2.3 氣候變遷下水資源的調適策略

He 等人(2006)提出，過去在設計排水系統時多以歷史降雨資料進行分析而沒有考慮未來氣候情境，因此在未來氣候發生變異或是可能發生氣候變遷時，可能造成排水系統無法負荷的情形產生，然而，氣候變遷或氣候變異將可能對溫度及極端降雨事件造成影響，尤其氣候變遷亦可能對對降雨頻率及降雨強度造成影響，因此在未來設計水供構造物時應該加入氣候變遷的考量，以確保在未來水供構造物的可使用性。而幾個研究建議水資源系統的設計應該著重於門檻值的設定，例如設定水庫蓄水容量超過的門檻值而不是設定平均情況(Allen & Ingram, 2002; Murdoch et al., 2000)。在一些調適氣候變遷的衝擊的案例中，針對現有的公共建設多是以修改操作運轉的方式以調適衝擊，是較有效的調適選擇，反而不是加入新的結構物(Lettenmaier et al., 1999)。

美國國際開發援助署(USAID)(2007)提出的氣候變遷與變異的調適報告中，以六個步驟評估脆弱度(Vulnerability)與確立與實行氣候變遷的調適(Adaptations)方法，其流程如下圖 2-1，評估流程包含脆弱度篩選(Screen for Vulnerability)、確定調適策略(Identify Adaptations)、執行分析(Conduct analysis)、選擇行動的方向(Select Course of Action)、實行計畫(Implementation Plan)與評估調適(Evaluation)等六大步驟，並藉由建立一個調適策略的評估矩陣，評估此調適策略是否該執行。

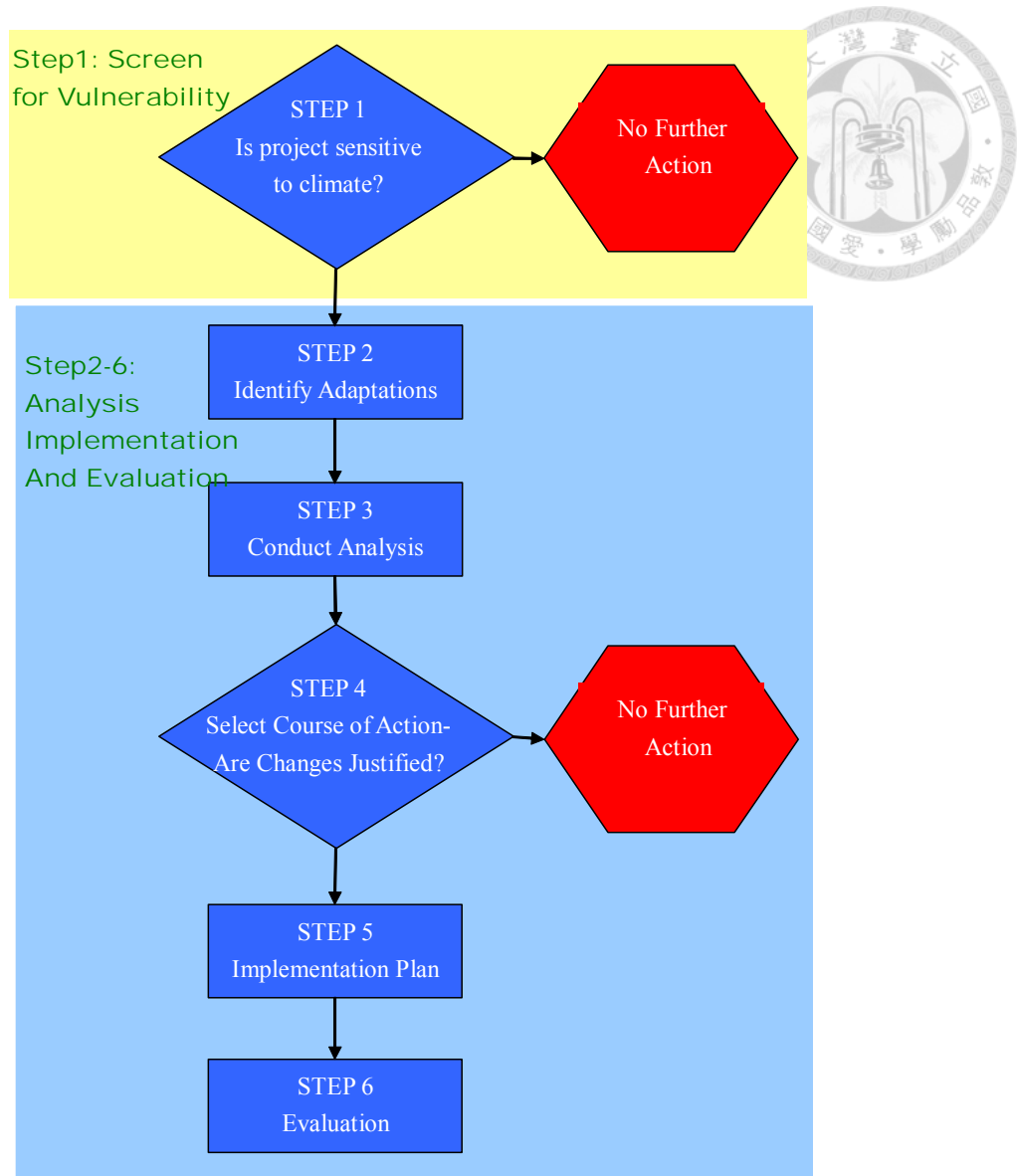


圖 2-1 氣候變遷之脆弱度與調適整合至規劃的計畫中流程(USAID,2007)

印度於 2008 年 6 月公布印度第一個「氣候變遷國家行動計畫」(National Action Plan on Climate Change, NAPCC)，訂定印度在 2017 年前實施的 8 大國家核心計畫，而在水資源部分，印度政府分別於 2008、2009 及 2011 年提出「氣候變遷國家行動計畫-國家水任務(草案)」(National Water Mission under National Action Plan on Climate Change)(Government of India Ministry of Water Resources,2008, 2009,2011)明確指出水任務將進行包括完整資料庫與氣候變遷對水資源衝擊的評估、促進國民與各邦保護水資源

與開源節流行動、注意過度用水地區、增加 20%用水效率及促進流域整合水資源管理 5 個目標。

水資源為人民生活重要資源之一，為了確保可以提供足夠的水資源，政府單位亦提出關於水資源調適之政策、策略與計畫，如民國 85 年核定之「現階段水資源政策綱領」及民國 91 年擬訂「臺灣地區水資源開發綱領計畫」等，而為了因應臺灣加入 WTO 對農業產生之影響以及京都議定書生效之衝擊，於民國 95 年擬定「新世紀水資源政策綱領」。在民國 101 年為了氣候變遷對我國的衝擊，健全與提升國家調適能力，並降低社會脆弱度，進而建立我國整合性的運作機制，經濟建設委員會訂定「國家氣候變遷調適政策綱領」，作為政策架構與計畫推動的實施基礎(行政院經濟建設委員會, 2012)，「國家氣候變遷調適政策綱領」指出水資源領域面對氣候變遷主要有 6 個主要挑戰，包括：

- (1) 水文的衝擊：降雨量、逕流量及蒸發散量有增加趨勢，逕流量與蒸發散量增加幅度大於降雨量增加幅度，因此，地下水入滲量呈漸減趨勢。
- (2) 河川流量的衝擊：來河川豐枯差異更加明顯，其中豐水期流量多為增加趨勢，枯水期流量多為減少趨勢。
- (3) 供水系統的衝擊：因為豐枯差異的增加，水庫供水及減洪能力受到影響，也影響供水系統的供水能力，使得供水承载力降低，加上未來需水量增加，使未來缺水風險提高。
- (4) 複合型災害風險提高：水工結構物遭受大洪水侵襲、破壞，將造成供水困難之風險提高。未來颱風等極端天氣事件頻率有可能增加，洪水、土砂與浮木等結合產生的複合型災害風險將相對提高，進而提高缺水風險。
- (5) 農業灌溉型態的衝擊：氣溫及雨量的改變將影響灌溉需水量，一期稻作初期恰逢枯水期，但未來枯水期流量可能更少，將對未來水資源調配造成衝擊。
- (6) 河川污染問題：枯水期時河川流量低，河川自淨能力及容受能力下降；豐水期時河川雖然擁有較大的涵容污染能力，但暴雨引發流域內泥沙沖刷、土石崩坍，也

加速河床沖蝕，反而使河流中懸浮微粒濃度及河川濁度增加，除影響河川生態外，高濁度之原水將使得供水系統惡化。

針對將來面臨的問題，「國家氣候變遷調適政策綱領」中明訂水資源領域調適總目標為「在水資源永續經營與利用之前提下，確保水資源量供需平衡」，並針對水資源領域訂定 4 大項調適策略：

1. 水資源永續經營與利用為最高指導原則，並重視水環境保護工作

- (1) 開發與建設行為，進行成本效益分析與環境影響評估時，應考量氣候變遷，以避免造成水環境之衝擊。
- (2) 河川流域應進行整體治理規劃與管理，並以各流域之特有條件為基礎，將水環境污染控制、淡水水資源永續利用、生物多樣性維護與生態環境保護列入範圍。

2. 由供給面檢討水資源管理政策以促進水資源利用效能

- (1) 活化現有蓄水容量，適時更新改善與維護水資源相關設施，並降低現有供水設施之漏水、輸水損失。
- (2) 落實水庫集水區土地使用管理，妥善運用水資源作業基金，推動水庫集水區保育工作。區內合法使用之農牧用地，應優先輔導造林，並減少肥料及農藥等污染物隨降雨進入水庫。
- (3) 強化且妥善利用跨區域地表、地下水資源之聯合運用，並獎勵雨水、再生水等替代水資源之開發、推動與應用。
- (4) 強化異常缺水時之緊急應變措施。
- (5) 落實水權管理。

3. 建立區域供水總量資訊，由需求面檢討水資源總量管理政策以促進水資源使用效益

- (1) 導正自來水合理費率，調整用水型態，建立合理公平且彈性用水轉移機制，獎勵節水措施，檢討現有建築法規，加強規範公有建築及公共設施之節水裝置之推動。
- (2) 鼓勵低耗水產業之發展，並考慮由其他不缺水國家輸入高耗水產品。
- (3) 調整農業耕作制度，並在考量維持環境永續性與農地生產力下，推廣精密灌溉與提升灌溉管理技術，以提高雨水利用率與減少灌溉用水需求。

4.以聯合國推動之水足跡（water footprint）概念促進永續水資源經營與利用

- (1) 推動標示產品之耗水量，提供參考以減少高耗水產品之消費。
- (2) 推動產業建立節水製程，在單位產能下有效降低耗水量。
- (3) 推動水資源回收再利用及節約用水獎勵機制。
- (4) 透過物質流與水平衡之概念與系統性分析方法計算水資源帳，並檢視不同政府部門流域各類監測資料之合理性，充分掌握氣象、水量與水質等關鍵環境資訊，合理分析水足跡與水資源善用。



經濟部水利署亦推動完成「國家氣候變遷調適行動方案-水資源領域」(經濟部水利署, 2012b)，依據「國家氣候變遷調適政策綱領」擬定之調適策略，以圖 2-2 之水資源調適行動方案推動架構，研提對應的水資源調適行動計畫。



圖 2-2 國家水資源調適行動方案推動架構(經濟部水利署,2012b)

2.4 氣象合成模式

最近極端天氣引發的災害已經引起了相當的關注，因此很多研究針對氣候變遷導致的影響進行評估，氣候變遷影響的領域不僅僅包括氣象，亦包含水文、農業產量、生態以及水資源管理，然而在評估氣候變遷的影響時，往往需要氣象資料作為輸入資料進行

評估。由於未來的氣象資料無法取得，因此大部分的研究多以基於特定假設下之環流模式(General Circulation Models,GCMs)輸出資料進行模擬。此外，由於環流模式之解析度較大，因此降尺度及氣象合成模式被使用來產生具有較好的空間及時間分佈的氣象資料(Dubrovsky et al., 2005; Hansen, 2002; Wilks & Wilby, 1999)，而透過降尺度或氣象合成模式產生的氣象資料則必須保持氣象資料在極端事件及季節上的統計特性(Kilsby et al., 2007)。鑑於此，許多學者發展了可以產生同一個時間尺度氣象資料之氣象合成模式，目前，被廣泛採用的的氣象合成模式包括 WGEN、LARS-WG 和 K-Nearest Neighbor(K-NN)等三種氣象合成模式。

WGEN 及 LARS-WG 是屬於參數型式之氣象合成模式，WGEN 由 Richardson 於 1981 提出之描述溫度及雨量資料產生之氣象合成模式，Richardson 及 Wright(1984)利用 WGEN 模式，並以雙參數伽瑪分佈產生日降雨量；LARS-WG 為 Racsco 等人(1991)提出之方法，在 LARS-WG 中使用半分佈經驗公式描述降雨量(Semenov & Brooks, 1999; Semenov et al., 1998)。K-NN 氣象合成模式避免了在參數天氣發生器避免了參數決定的相關問題，但該模式由觀測資料隨機產生第一天的參數，且特定日之模擬值則與歷史值及前後數天之值比較(Eum & Simonovic, 2010)，雖然 K-NN 法可以避免在決定參數上的問題，但是這個方法所需要的資料長度較長。此外，利用這個方法不會產生較歷史最大雨量為大之降雨事件，而在氣候變遷的情況下，極端事件的強度及發生頻率可能增加(Solomon et al., 2007)，因此利用 K-NN 可能低估極端事件之雨量值。

上述之氣象合成模式皆僅產生日時間尺度之氣象資料，且無法針對暴雨事件進行分析，產生符合暴雨事件之降雨特性之雨量，然而，臺灣地區在 5 月及 6 月之梅雨與 7 月-10 月之颱風事件降雨量皆偏高，若無法產生符合暴雨事件降雨特性之雨量，將可能導致後續水文分析上的誤差，研究中針對此一問題，建立可同時產生暴雨事件及非暴雨事件之氣象合成模式，繁衍產生具有暴雨事件統計特性之降雨量以及非暴雨事件統計特性之降雨量，以提供後續研究使用。

2.5 水文模式

為模擬水文歷程，國外許多研究機構亦研發許多不同的水文模式，如本研究所採用 Haith and Shoemaker(1987)所發展之 GWLF(Generalized Watershed Loading Functions)模式與國外研究經常採用之 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模式、SHE(European Hydrological System)模式及 HBV(Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)模式。

SWAT 模式為美國農業部農業研究中心 Arnold 等人(1998)所開發，目前已被廣泛應用(Faramarzi et al., 2013; Narasimhan et al., 2005; Wu & Johnston, 2007; Xu et al., 2013)。SWAT 模式(圖 2-3)為集水區尺度且具有空間分佈參數的水文及水質模式，模式中考量集水區中不同的土地利用及多種的土壤類別分佈，以水文反應單元(Hydrologic Response Unit, HRU)為單位，以土地利用及土壤類別為基礎劃分個子集水區之反應單元，由於各反映單元中僅有單一種類之土地利用與土壤類別，因此各反映單元中之水文反映相同的，以便計算後續水文及水質傳輸，模式以日為基本時間單位，模擬評估不同土地利用與土壤分佈對集水區之水文、泥砂及營養鹽之影響。在水文計算上，模式中利用 Curve Number 法來計算地表逕流量，尖峰流量的部分則採用修正行合理化公式計算。由於雨水降至地面後，並不一定會直接流到河川，而可能在地表暫留，因此 SWAT 模式考慮逕流延遲的現象(surface runoff lag)，以逕流延遲係數(surface runoff coefficient)與集流時間，推求實際流入河川之地表逕流量；在滲漏量的部分，會先利用水力傳導係數、飽和含水量及田間含水量決定滲漏移動時間(travel time of percolation)，再利用滲漏移動時間可滲漏水份，決定最後的滲漏量。

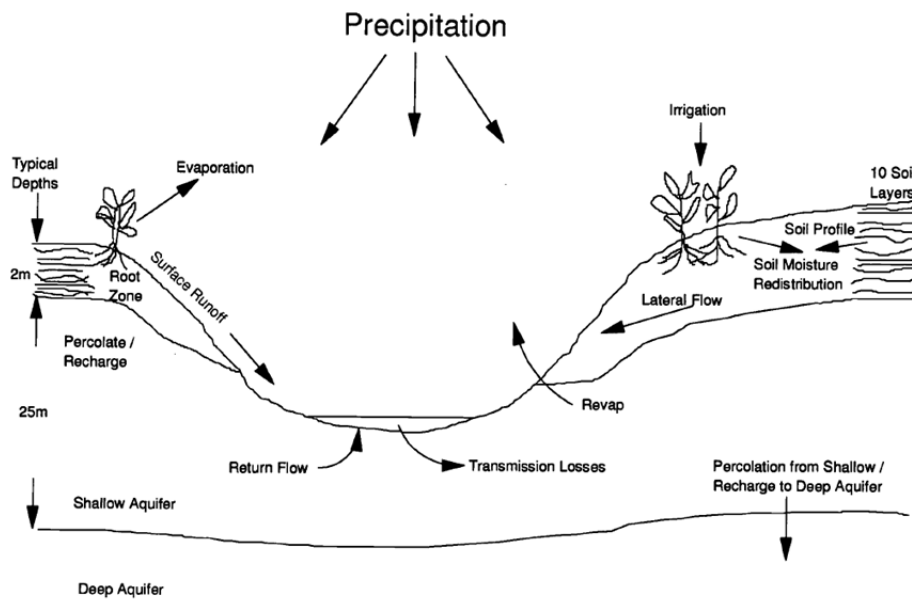


圖 2-3 SWAT 模式架構(Arnold et al., 1998)

SHE 為 Danish Hydraulic Institute、the British Institute of Hydrology 以及 SOGREAH (France) 在歐洲共同體(the European Communities)的支持下所研發的具有物理性的分散性模式，模式中除考慮降雨對河川流量的影響之外，亦考量融雪對河川流量的影響。Abbott 等人(1986a, 1986b)提到 SHE 模式(圖 2-4)中包括蒸發散與截留、漫地流與河川流、未飽和層、飽和層以及融雪等五大部分。在蒸發散與截留部分，模式中首先考量當降雨發生到達地面時，可以儲存在樹冠層的水量以及其蒸發散量。模式中利用修正的 Rutter model(Rutter et al., 1972)視樹冠層為一具有表面儲水能力的構造，可透過降雨補充儲水量，而水分的減少則透過蒸發及排水，藉此可模擬樹冠層的水分改變情況；在蒸發散的部分則透過 Penman-Monteith equation (Monteith, 1965)模擬實際蒸發散量。由於模式中考量截留項，因此 SHE 模式中總蒸發散量為潛能蒸發散量、地表蒸發量以及透過植物根系提供的水分的蒸散量之總和；河川流量及漫地流則透過迪聖凡南(St. Venant)連續方程式及動量方程式進行模擬。未飽和含水層透過考慮土壤水體積改變的情況，飽和層水量透過 Boussinesq 方程式模擬每個網格的水量。

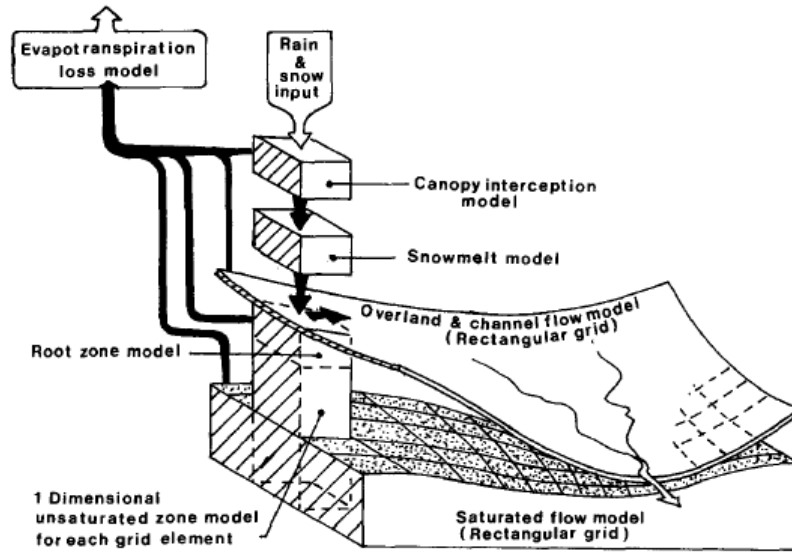


圖 2-4 SHE 模式架構(Abbott et al., 1986a)

上述之水文模式皆為廣泛使用之水文模式，然而，模式在模擬時是以相同的時間尺度進行模擬，為了模擬水庫於非暴雨事件採用一般放水而暴雨事件採用防洪操作的情形，流量序列資料須包含非暴雨事件之日雨量及暴雨事件之小時雨量，因此研究中發展可同時模擬不同時間尺度之水文模式，配合研究中發展之可同時產生暴雨事件及非暴雨事件之氣象合成模式，不但可模擬產生日流量資料亦可模擬產生不同時間尺度之流量資料，以提供後續研究使用。



第三章 氣象合成模式建立



在討論氣候變遷所帶來之衝擊影響時，首先需要未來之氣象資料以進行各項分析，然而，目前之環流模式(General Circulation Model, GCM)雖已十分複雜，但仍無法包含所有可能影響的因子，再加上 GCM 模式提供的是全球尺度網格點的資料，模擬大空間尺度之氣候資訊的合理性較高，提供小空間尺度區域的氣候特性之不確定性較高，且模擬百年氣溫變化趨勢與溫室氣體、懸浮微粒的變化趨勢相當一致，但模擬數十年內的氣候變化則變異仍大(徐嘉君 & 林淑華, 2008)，顯示 GCMs 尚不能確保提供合理推估短時間及小區域之氣象資料，然而，在分析氣候變遷對水資源系統之衝擊評估時，需要日時間尺度與集水區尺度之氣象資料，故必須將大尺度之 GCMs 輸出資料降尺度至集水區之空間尺度之氣象資料，亦須將月平均資料降尺度至日或小時之時間尺度資料，因此需先挑選適當的 GCM 模式進行空間降尺度後，再利用氣象合成模式進行時間降尺度，以獲得所需之日氣象資料。

本章首先針對氣候變遷情境進行說明，接著說明如何挑選不同之 GCMs 模式，在挑選 GCMs 模式時，考慮 IPCC 提供之 GCMs 輸出資料以及「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」提供之輸出資料進行分析，並說明空間降尺度之必要性及方法，在 3.4 節中說明氣象合成模式建立之方法，除針對以單一機率分佈繁衍降雨量之日時間尺度之氣象合成模式進行說明外，研究中建立考慮不同時間尺度之氣象合成模式，該模式以雙機率分佈分別描述非暴雨及暴雨事件之降雨量，最後於 3.5 節說明 GCMs 挑選結果，並針對兩個不同氣象合成模式之氣象資料繁衍結果進行討論。

3.1 氣候變遷情境說明

過去在氣候變遷相關研究設定未來氣候情境包括假設、空間或時間類比、與物理性環流模式(General Circulation Model, GCM)模擬，近年來，環流模式發展已有顯著改善，因此，現今氣候變遷衝擊研究多以採用 GCMs 模擬結果做為未來氣象條件設定之依據，GCMs 模式考量氣候系統中大氣、海洋、陸地、海冰以及生物圈各單元之交互作用，以

網格化的方式推估全球氣候的變化，GCMs 屬於全球尺度分析，其模擬值直接應用於小區位仍有相當之不確定性，因此目前在衝擊影響評估應用上，其預測值一般只應用於設定氣候變遷預設情境，再配合氣象資料合成模式，產生評估模式所需之輸入資料。

目前許多國家已自行發展環流模式，但在模擬時皆採用 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2000 年提出之排放情境特別報告(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)中 A1、A2、B1 與 B2 等 4 類溫室氣體排放情境，4 類情境闡述未來不同經濟發展可能導致的溫室氣體排放情形，各情境所代表意義說明如下：

1.A1：描述一個經濟快速成長的未來世界，全球人口在 21 世紀中葉達到高峰之後開始下降，並且發展了更新更有效率的科技技術。A1 情境分為三種情況描述能源系統中技術變化的方向，包括石化燃料密集型的 A1FI，非化石燃料能源型的 A1T，以及不過分依賴某種特定能源的各種能源平衡的 A1B 情境。

2.A2：描述一非常多變異性組成的世界，全球人口不斷增加，但各國自力更生並維持地方發展，以區域經濟成長為主，且經濟成長率與技術改進比起其他情境更加緩慢且零碎。

3.B1：人口情境與 A1 情境相同，在 21 世紀中時期達到尖峰後開始下降，但經濟結構轉向以服務與資訊產業為主，能源使用減少，注重經濟、社會與環境的永續性。

4.B2：描述一個全球人口持續成長(但比 A2 情境成長速度緩慢)，且為地方性經濟及社會與環境永續性的情境。B2 情境是以環境保護與社會公平為目標，經濟屬於中度發展，而比起 A1 及 B1 情境科技的改變較緩慢且差異性較大。

雖然在 IPCC 的報告中一再提及上述 6 種氣候變遷情境在推估未來情況具同等重要性，然目前 IPCC 網站上僅提供 A1B、A2 及 B1 等 3 種情境之資料供下載，因此以此 3 種情境進行分析。A2、A1B 及 B1 等 3 種情境分別代表的是較悲觀、持平及較樂觀的溫室氣體排放情境，但溫室氣體排放情境大致以 2030 年為界，在 2030 年之前 A1B 情境溫室氣體排放量較 A2 情境高，而在 2030 年之後 A2 情境的溫室氣體排放量方開始高於

A1B 情境，且在 2060 年之前 A1B 情境氣溫上升的速度亦較 A2 情境為快，因此雖然 A1B 情境表示的是較持平的溫室氣體排放情境，但在短期(2020-2039 年)A1B 情境之溫度及雨量改變情形可能較 A2 情境為嚴重，可能導致後續分析短期氣候變遷情境流量與供水系統衝擊時，利用某些 GCMs 模式之輸出資料所模擬的結果會有 A1B 情境造成氣候變遷衝擊影響比 A2 來得嚴重的狀況。

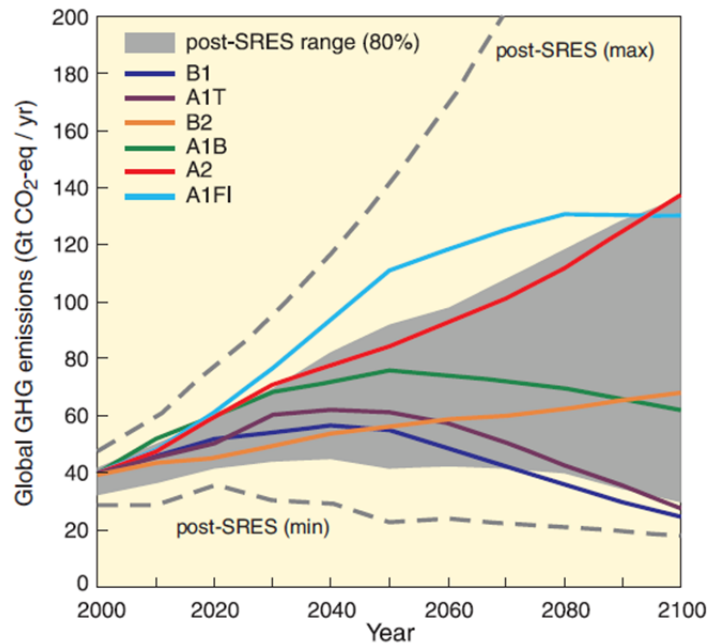


圖 3-1 各種 SRES 情境之不同溫室氣體排放情境(IPCC, 2007)

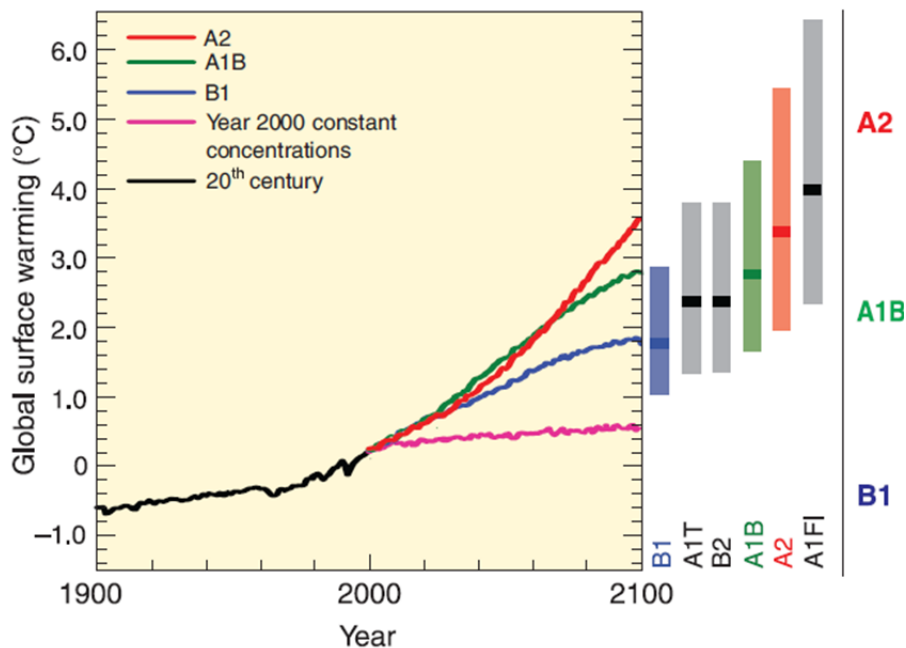



圖 3-2 各種 SRES 情境不同溫室氣體排放情境溫度上升趨勢(IPCC, 2007)

SRES 情境是建立在假設沒有任何的政策行動以減緩氣候變化，但近十年來新的經濟資料、新興技術以及如土地利用與土地覆蓋改變之環境觀測因子等資訊亦應反映至新的情境資料中，再加上氣候變遷的衝擊以及需要的調適策略日益被重視，因此 IPCC 催生了針對未來二、三十年具有高空間與時間解析度以及改善極端事件的新的氣候情境，依據輻射驅動力(radiative forcing)來設定情境(Moss et al., 2010)。輻射驅動力是一個定量比較人類和自然作用力對氣候變遷影響的概念(林能暉, 2007)，源自能源平衡的概念，也就是考慮大氣層頂層太陽短波與地球長波的進出能量的平衡，若大氣層頂層的淨輻射量不為零就會有輻射驅動力的產生，也就是說輻射驅動力是以單位面積內能量進出變化情形來表示，由此可知，若輻射驅動力大於零表示有多餘的能量留在大氣內，將可能導致地表附近的氣溫上升，若輻射驅動力小於零則可能導致溫度降低(柳中明，<http://taiwanpedia.culture.tw/web/content?ID=100572>)，輻射驅動力軌跡(radiative forcing trajectories)並不與單一的社會經濟或排放情境有關而是受到不同的經濟、科技、人口、政策及排放期貨交易組合的影響。IPCC 之 AR5 報告中，將以「代表濃度過程」(Representative Concentration Pathway, RCP)來表示不同的情境，其中”R”表示每個 RCP 都提供了導致特定大氣輻射力特性之許多情境中的一個，而”P”則強調並不只對長期濃度水準有興趣，而且也考慮隨著時間的演進到特定濃度的過程，總而言之，IPCC 在 AR5 情境中將提出 4 個 RCPs，而每一個 RCP 都會代表特定的輻射驅動力路徑(radiative forcing pathway) (Moss et al., 2010)，4 個 RCPs 所代表的情境及對應的 CO₂ 濃度與輻射驅動力路徑列於表 3-1，而 AR5 情境詳細說明及資料 IPCC 將於 2013/2014 年提供。

表 3-1 4 個 RCPs 說明(Moss et al., 2010)

名稱	輻射驅動力	CO ₂ 濃度	路徑
RCP8.5	在 2100 年達 8.5Wm ⁻² ，	在 2100 年 CO ₂ 濃度相當於 1370ppm	持續上升
RCP6.0	在 2100 年後穩定至 6Wm ⁻²	CO ₂ 濃度相當於 850ppm，且在 2100 年後達穩定	穩定無超過
RCP4.5	在 2100 年後穩定至 4.5Wm ⁻²	CO ₂ 濃度相當於 650ppm，且在 2100 年後達穩定	穩定無超過
RCP2.6	在 2100 年之前尖峰值達 3Wm ⁻² 而後下降	2100 年之前最大 CO ₂ 濃度相當於 490ppm，而後下降	到達尖峰後減少

3.2 GCMs 挑選



卓盈旻及盧孟明(2009)針對 GCMs 模式對亞洲季風的季節和年際變化之模擬情形進行分析，根據其研究顯示，模式對亞洲季風有一定的模擬能力，且基本上都能模擬出亞洲夏季季風環流和降雨空間分佈，但是模式之間的差異度甚大，此外，在針對南亞、東亞、西北太平洋三個次季風區環流和雨量的模擬能力分析上，發現模式對於南亞季風有比較好的模擬能力，而大多數模式在三個季風區中對於風場空間特性的掌握比雨量更好。而根據陳正達等(2011)之研究結果顯示，依照多個氣候模式系集分佈情形推估，臺灣的 4 個主要分區未來冬季平均雨量多半都是減少的，未來夏季平均雨量百分比變化，除了北臺灣之外，則有超過 3/4 的模式推估降水都是增加的，而約有一半的模式認為未來夏季平均主要介於 2%~26%之間；然而，在多數氣候模式推估未來降水會增加的 6 月到 10 月，仍有少數模式模擬的未來月平均會減少至-20%以上。由此可知，GCMs 尚不能確保提供合理推估小區域之氣候，此外，不同 GCMs 對臺灣地區之模擬結果並不相同，然而，後續針對氣候變遷對水文、水資源管理及水庫供水與減洪功能之評估均須使用 GCMs 所提供之輸出資料進行分析，因此挑選適合之 GCMs 為首要之工作。根據經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)研究顯示，不同 GCMs 在基期之模擬溫度與歷史實際溫度之相關性皆高達 0.99，然而，不同 GCMs 在雨量上模擬差異較大，且模擬雨量與歷史雨量之趨勢並不一致，由此可知，GCMs 在降雨量之模擬能力為 GCMs 為挑選 GCMs 模式與否之重要關鍵之一。

GCMs 挑選利用連宛渝等(2013)提出之方法進行挑選，GCMs 挑選流程如圖 3-3 所示，利用最靠近研究區域之 GCMs 網格點之資料進行分析，分析 GCMs 基期模擬值之月平均雨量與歷史月平均雨量資料之相關係數(R)，評估 GCMs 模式之基期模擬結果是否能反映歷史豐水期與枯水期之變化趨勢，若相關係數越高模式越能表現研究區域季節變化的特性，但由於相關係數僅代表模擬值與實際值有相似的趨勢，模擬值與實際值間不一定具有相近值，因此加入均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)之考量，探討 GCMs 模擬之基期雨量與實際雨量之間量值之差異性，RMSE 越小代表模擬值越接近真

實的降雨情形，模式亦越具備模擬研究區域氣候的能力，並依照時間尺度分別計算豐水期及枯水期之 RMSE，RMSE 正規化(Normalize)公式如式(3-1)所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{simi} - Q_{obsi}}{Q_{obsi}} \right)^2}{N}} \quad (3-1)$$

其中 Q_{simi} 為第 i 筆模擬值， Q_{obsi} 為第 i 筆觀測值， N 為資料總數，若由式(1)所計算之 RMSE 為 0 時，代表模擬值與觀測值之間並無誤差，而若 RMSE 計算結果越大則表示模擬值與觀測值之誤差越大。而用於評比 GCMs 模擬能力之評估項目為年相關係數、枯水期之 RMSE 與豐水期之 RMSE 三項。

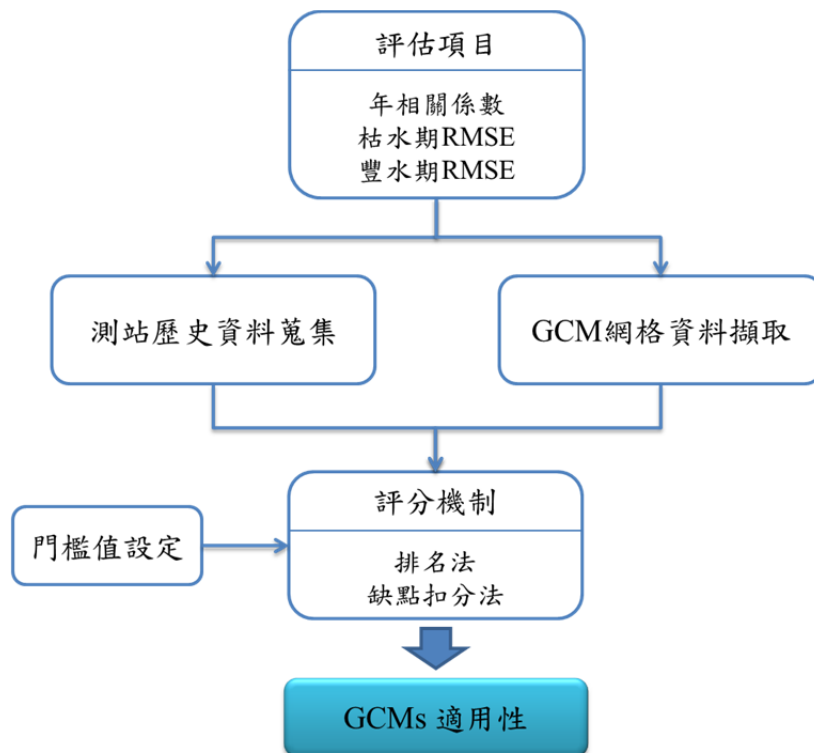


圖 3-3 GCMs 挑選流程

在模式評比上，參考國內外研究訂定兩種評分方式。排名法(式(3-2))為將各分析結果直接排序，以相關係數分析結果來說，若相關性分數越高表示其變化趨勢越接近，因此排名較佳，而在 RMSE 之評估結果上，若 RMSE 值越低表示模擬結果與實際結果之誤差越低，因此排序較佳，累積所有分析結果之排序值後，則可得最後名次。

$$S_j = \sum_{i=1}^3 \text{order}_i \quad (3-2)$$

式(3-2)中 S_j 為模式 j 之排名法得分， order_i 表示該模式在第 i 項門檻值之排名，當 $i=1$ 及 $i=2$ 時，分別表示該模式枯水期與豐水期之 RMSE 在所有模式中的排名，而 $i=3$ 時表示該模式之相關係數在所有模式中之排名。

第二種為應用 Whetton 等人(2005)提出之缺點扣分法(demerit point system)，缺點扣分法係設定一固定之門檻值，若模擬結果不符合設定之門檻值則扣分，以豐水期及枯水期之 RMSE 分析結果來說，若 RMSE 值高於門檻值時(式(3-3))則扣分，而若相關係數低於門檻值時(式(3-4))，則模式將被扣分，累加總扣分並排名後，則可挑選出適當之 GCMs。由於缺點扣分法主要係依據設定之門檻值進行扣分，因此門檻值之設定對分析結果將造成影響，故在應用時須針對門檻值進行敏感度測試，以挑選出適當之門檻值。

$$C_i = \begin{cases} 1, & x > \text{threshold of RMSE} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-3)$$

$$C_3 = \begin{cases} 1, & x < \text{threshold of } R \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^3 C_i \quad (3-5)$$

式(3-3)中，當 $i=1$ 及 2 時表示模式在枯水期與豐水期之 RMSE 是否高於門檻值而扣分，式(3-4)中之 C_3 則說明模式之相關係數是否低於門檻值而扣分，式(3-5)之 D_j 為模式 j 之總扣分值，計算出各模式之扣分值後，則可據此挑選適當之評估模式。

3.3 空間降尺度

近年來全球大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs)在空間解析度(spatial resolution)上已有顯著改善，以 IPCC 報告為例，第一期報告使用的數值模式水平解析度約為 500 公里，2007 年發布之第四期報告數值模式水平解析度最高已提升至約 150 公里，然而盧孟明等(2007)認為這樣的解析度對臺灣而言還是太粗，由於每個 GCM 模式對氣候系統各單元的交互作用均有不同的考量，且全球各地的氣候變化可能因經緯度、地形、

海陸分佈的不同而有所差異，因此不同的 GCM 模式模擬之結果亦可能有所差異。由於 GCMs 輸出資料提供的是大範圍的平均特性，因此挑選完適當之 GCMs 後，仍須將 GCMs 之輸出資料降尺度至集水區空間尺度之資料。

空間降尺度方法主要分為動力降尺度、統計降尺度以及簡易降尺度，動力降尺度係以 GCMs 的區域結果以及邊界條件，進行區域氣候模式(regional climate model, RCM)的模擬(徐嘉君及林淑華, 2008);統計降尺度利用流域歷史氣象資料與大區域氣候型態建立統計關係，再以 GCMs 模擬大區域之氣候型態進行降尺度(童慶斌, 2012);簡易降尺度考慮因 GCMs 模擬結果與地面測站資料存在著誤差，故先藉由誤差修正(Bias Correction)(Li et al., 2010; Murphy, 1999; Takara et al., 2009)去除模式與地面測站之間的系統誤差後，再將氣候模式推估改變量加至觀測資料，或利用氣候模式推估改變量修正氣象合成模式參數再合成資料(童慶斌, 2012)。研究中採用簡易降尺度作為空間降尺度方法，並先針對誤差修正方法進行說明，再說明如何以誤差修正結果修正未來溫度及雨量統計特性。

誤差修正主要假設為 GCM 資料與地面測站資料有相同之統計特性，亦即具有相同之機率值，如式(3-6)：

$$\frac{X_{m,OBS} - \mu_{m,OBS}}{\sigma_{m,OBS}} = \frac{X_{m,GCM} - \mu_{m,GCM}}{\sigma_{m,GCM}} \quad (3-6)$$

式中， X_m 為第 m 月的逐年資料， μ_m 為第 m 月的平均值， σ_m 則為第 m 月的標準偏差，而下標之 OBS 與 GCM 分別代表觀測值或 GCM 之輸出值，為了降尺度至地面測站，須將 GCM 的輸出值進行修正，再將修正值 X_m^{BC} 取代上式之 $X_{m,OBS}$ (式(3-7))，基期之修正值 $X_{m,baseline}^{BC}$ 則可透過式(3-8)表示，假設未來的修正量與過去一致，則未來氣候變遷情境預測值之修正值 $X_{m,projected}^{BC}$ 可以式(3-9)表示。

$$X_m^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,GCM}} (X_{m,GCM} - \mu_{m,GCM}) + \mu_{m,OBS} \quad (3-7)$$

$$X_{m,baseline}^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}} (X_{m,baseline}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM}) + \mu_{m,OBS} \quad (3-8)$$

$$X_{m,projected}^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}^{GCM}} \left(X_{m,projected}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM} \right) + \mu_{m,OBS} \quad (3-9)$$

GCM 基期與氣候變遷情境修正後的平均值 $\mu_{m,baseline}^{BC}$ 及 $\mu_{m,projected}^{BC}$ 可由式(3-10)及式

(3-11)表示，修正後氣溫差值 ΔT_m^{BC} 及降雨量比值 $Rprec_m^{BC}$ 則以式(3-12)及式(3-13)表示。

$$\mu_{m,baseline}^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}^{GCM}} \left(\mu_{m,baseline}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM} \right) + \mu_{m,OBS} = \mu_{m,OBS} \quad (3-10)$$

$$\mu_{m,projected}^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}^{GCM}} \left(\mu_{m,projected}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM} \right) + \mu_{m,OBS} \quad (3-11)$$

$$\Delta T_m^{BC} = \mu_{m,projected}^{BC} - \mu_{m,baseline}^{BC} = \frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}^{GCM}} \left(\mu_{m,projected}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM} \right) \quad (3-12)$$

$$Rprec_m^{BC} = \mu_{m,projected}^{BC} / \mu_{m,baseline}^{BC} = \left(\frac{\sigma_{m,OBS}}{\sigma_{m,baseline}^{GCM}} \left(\mu_{m,projected}^{GCM} - \mu_{m,baseline}^{GCM} \right) + \mu_{m,OBS} \right) / \mu_{m,OBS} \quad (3-13)$$

應用誤差修正於簡易降尺度上，則各月份之月平均溫度及平均雨量之修正可由式(3-14)及式(3-15)表示。

$$T'_{t,m} = T_{t,m} + \Delta T_m^{BC} \quad \forall t \in m, m=1 \text{ to } 12 \quad (3-14)$$

$$P'_{t,m} = P_{t,m} \times R_{prec_m}^{BC} \quad \forall t \in m, m=1 \text{ to } 12 \quad (3-15)$$

3.4 氣象合成模式

簡易降尺度是以月為時間單位，修正各月份之溫度及雨量統計特性，以獲得在氣候變遷情境下，未來各月份之溫度及雨量之統計特性，但在應用氣象資料於各領域之分析時，往往需要日時間尺度之氣象資料，因此利用氣象合成模式進行時間降尺度，產生日時間單位之氣象資料。

一般氣象資料合成模式產生連續性降雨資料時，多為日時間尺度之降雨資料且不易產生暴雨事件，不但無法提供暴雨事件之小時雨量資料外，亦無法產生具有歷史統計特性之暴雨事件雨量，因此本研究建構一可同時產生暴雨及非暴雨事件之氣象合成模式，

模式中以歷史統計特性決定降雨日之降雨量為暴雨事件或非暴雨事件，若為暴雨事件則再以機率方式決定雨型，以決定小時雨量，當降雨決定後，則決定第 i 日之日溫度。研究中將以 Pickering 等人於 1988 年所發展之溫度及降雨合成模式為基礎，修正該模式降雨繁衍部分之機制，發展可產生暴雨及非暴雨事件雨量及不同時間尺度氣象合成模式。

降雨特性隨著地區而有不同，因此描述降雨分佈之函數亦可能因地區差異而有不同，故在繁衍雨量資料之前，需先透過最適度檢定(Goodness of Fit Test, GOF)檢測用來描述降雨之分佈函數是否符合歷史降雨之分佈情形，挑選通過 GOF 檢定之分佈函數後，再配合歷史雨量之統計特性進行雨量繁衍，分析架構如圖 3-4。在本節中，首先針對日溫度模擬模式進行說明，接著說明日降雨量模擬模式及不同時間尺度之降水量模擬方式，在僅考慮日時間尺度之雨量模擬是以單一機率分佈繁衍降雨量，而在不同時間尺度之雨量模擬則以雙機率分佈分別描述非暴雨及暴雨事件之降雨量。

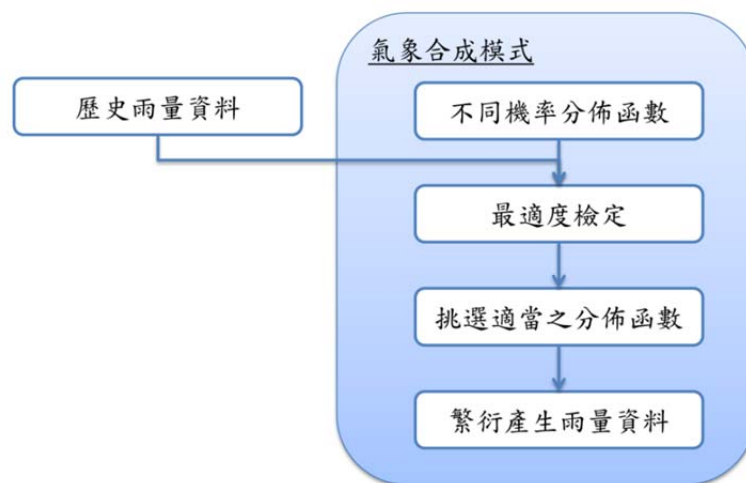


圖 3-4 雨量資料繁衍架構

3.4.1 日溫度模擬模式

未來氣候條件下日溫度資料合成可由月平均溫度透過一階馬可夫鏈模擬(Pickering et al., 1988; Tung, 1995)，其方程式如式(3-16)所示：

$$T_i = \mu_{T_m} + \rho_m (T_{i-1} - \mu_{T_m}) + v_i \sigma_{T_m} \sqrt{1 - \rho_m^2} \quad (3-16)$$

式(3-16)中 T_i 為第 i 天的溫度， μ_{T_m} 為對應第 m 月平均溫度， ρ 為第 m 月 T_i 與 T_{i-1} 之一階自相關係數(First order autocorrelation coefficient)。 v_i 屬於標準常態分佈 $N(0,1)$ 之隨機變數， σ_{T_m} 為歷史資料對應第 m 月之標準偏差。模擬時，各月份第一天的溫度假設為該月之月平均溫度，其後的每一天則由前一天之溫度及該月月平均溫度繁衍新的日溫度。

3.4.2 日降水量模擬模式

1. 降雨事件發生與否

降雨與否是降雨模式模擬時第一個需要決定的項目，決定降雨與否的機制與 Richardson(1981)提出之模擬方法相同，亦即以歷史資料為演算依據，統計各月中第 $I-1$ 日降雨時，第 I 日降雨的機率，表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $I-1$ 日不降雨時，第 I 日降雨的機率，表示為 $P(W|D)$ 。當每月第一天，模擬產生均勻分佈之 $(0,1)$ 間亂數 RN ，當 RN 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；每月除第一日外，其餘日則利用前一日的降雨情形判定為降雨日或非降雨日，依照 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 的歷史資料平均值，若亂數 RN 小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日。其第 I 天降雨事件判別式如下：

- (1) 若第 $I-1$ 天降雨量 >0 ，則當 $RN \leq P(W|W)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。
- (2) 若第 $I-1$ 天降雨量 $=0$ ，則當 $RN \leq P(W|D)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。

2. 降雨量

降雨量主要透過降雨累積機率(CDF)的反函數來求得，過去研究中，降雨量的決定常採用指數分佈(Exponential distribution) (洪念民, 1997)，然而根據吳至剛(2000)之研究認為，臺灣地區指數分佈不易掌握極端降雨事件發生，因此建議可採用雙參數之韋伯分

佈，而由於雙參數韋伯分佈之參數計算較複雜，因此模式中亦納入單參數韋伯分佈描述降雨量，而在國外亦有許多學者應用 Gamma 分佈描述降雨(Bridges & Haan, 1972; Castellvi et al., 2004; Vlcek & Huth, 2009)，因此模式中亦納入 Gamma 分佈描述降雨量，此外，雖然各月份採用的機率分佈是相同的，但是應用於推估各月份之降雨資料時，則分別以各月份之歷史資料求得之平均值及標準偏差等數值代入挑選之機率分佈。而在 4 種機率分佈函數中，則利用 GOF 檢定挑選最適合之機率分佈函數，依據挑選後之機率分佈函數繁衍產生日雨量資料。

(1) 指數分佈

指數分佈之累積機率函數可由式(3-17)表示，在計算降雨量時，則以指數分佈之反函數(式(3-18))求得降雨量之模擬值。

$$F(x; \mu) = 1 - e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (3-17)$$

$$P = \mu_m \times [-\ln(1 - RN)] \quad (3-18)$$

式(3-17)中， μ 為平均雨量(cm)，而在式(3-18)中 P 為日降雨量(cm)， μ_m 為第 m 月份雨天之平均降雨量(cm)， RN 為介於(0, 1)間均勻分佈之隨機亂數。

(2) 雙參數韋伯分佈

雙參數韋伯分佈之累積機率函數可由式(3-19)表示，在式(3-19)中， α 及 β 分別為尺度參數與形狀參數，其計算方式列於式(3-20)及式(3-21)，可透過各月份之平均值(μ)及標準偏差(σ)求得，而降雨量則可以雙參數韋伯分佈之反函數(式(3-22))求得。

$$F(x; \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3-19)$$

$$\mu = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3-20)$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \mu^2 \quad (3-21)$$

$$P = \alpha \times [-\ln(1 - RN)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3-22)$$

式(3-20)及式(3-21)中， $\Gamma(\bullet)$ 為 Gamma 函數，由於 Gamma 函數計算複雜，因此 α 及 β 兩參數無法直接計算，故透過優選方式搜尋各月份最佳之 α 及 β 兩參數。將式(3-20)之 α 值以平均值之形式表示，並代入式(3-21)，則式(3-21)可改寫為式(3-23)。

$$\sigma^2 = \frac{\mu^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} - \mu^2 \quad (3-23)$$

令 $1 + \frac{1}{\beta} = z$ ，以式(3-24)為優選時之目標函數，以目標值越接近零越佳，透過優選方式，可決定各月份之 α 及 β 兩參數。

$$F(z) = \frac{\Gamma(2z-1)}{\Gamma(z)^2} \mu^2 - \mu^2 - \sigma^2 \quad (3-24)$$

(3) 單參數韋伯分佈

單參數韋伯分佈之累積機率函數與雙參數韋伯分佈之機率密度函數相同，為了簡化雙參數韋伯分佈計算上之複雜性，可採用單參數韋伯分佈，而在計算降雨量時所需之單參數韋伯分佈之反函數則以式(3-25)表示。

$$P = \frac{\left\{ \lambda_m \times [-\ln(1-RN)]^{0.75} \right\}}{1.191} \quad (3-25)$$

式(3-25)中， λ_m 為各月份之平均雨量，而 0.75 及 1.191 兩係數則為 Selker 及 Haith (1990) 檢定之係數。

(4) Gamma 分佈

Gamma 分佈之累積機率函數可由式(3-26)表示：

$$F(x; k, \theta) = \frac{r\left(k, \frac{x}{\theta}\right)}{\Gamma(k)} \quad (3-26)$$

式(3-26)中， $r\left(k, \frac{x}{\theta}\right)$ 為低階不完整 Gamma 函數(lower incomplete gamma function)， $\Gamma(\bullet)$ 為 Gamma 函數， θ 及 k 分別為尺度參數及形狀參數，可透過平均值(μ)及標準偏差(σ)表示，其計算方式列於式(3-27)及式(3-28)，而低階不完整 Gamma 函數($r(k, x)$)之展開式則可以式(3-29)表示。

$$\mu = k\theta \quad (3-27)$$

$$\sigma^2 = k\theta^2 \quad (3-28)$$

$$r(k, x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^k e^{-x} x^i}{k(k+1)\cdots(k+i)} = x^k \Gamma(k) e^{-x} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{\Gamma(k+i+1)} \quad (3-29)$$

由於 Gamma 分佈之反函數不好求得，因此在計算日雨量時則以移步優選之方式，待決定好一隨機機率(RN)後，先給定一任意之雨量值，將任意雨量值代入式(3-26)中，以式(3-30)為零為目標計算出雨量值。

$$g(x) = F(x; k, \theta) - RN \quad (3-30)$$

3. 氣候變遷情境下溫度及雨量統計特性修正

研究中採用之空間降尺度方式為簡易降尺度，在氣候變遷的情境下研究區域統計特性改變情況與 GCM 最鄰近網格點之預測情況相同，在溫度及降雨之統計特性修正上，利用氣候變遷預測之月平均特性之改變，直接修正歷史氣象序列，其修正方式如式(3-14)與(3-15)所示，再透過氣象合成模式繁衍產生氣候變遷情境下之氣象資料。

3.4.3 不同時間尺度降水量模擬

一般氣象合成模式產生之降雨資料不易產生暴雨事件，但在氣候變遷情境下極端事件發生頻率可能提高，若無法產生極端之暴雨事件，可能低估氣候變遷所造成的衝擊，此外，應用極端事件氣象資料進行水庫洪水操作分析或淹水評估時，往往需要小時時間尺度之雨量資料，因此研究中建構可同時產生暴雨及非暴雨事件之氣象合成模式，在暴

雨事件及非暴雨事件時採用不同之機率分佈描述雨量，而於暴雨事件發生時配合雨型之決定，產生小時之雨量資料，其分析流程如圖 3-5 所示。當降雨日不為暴雨事件時產生日雨量，但當降雨日為暴雨事件時，利用挑選之雨型產生小時之降雨量。以下針對降雨事件之產生、降雨量產生、雨型及未來降雨量修正等進行說明。

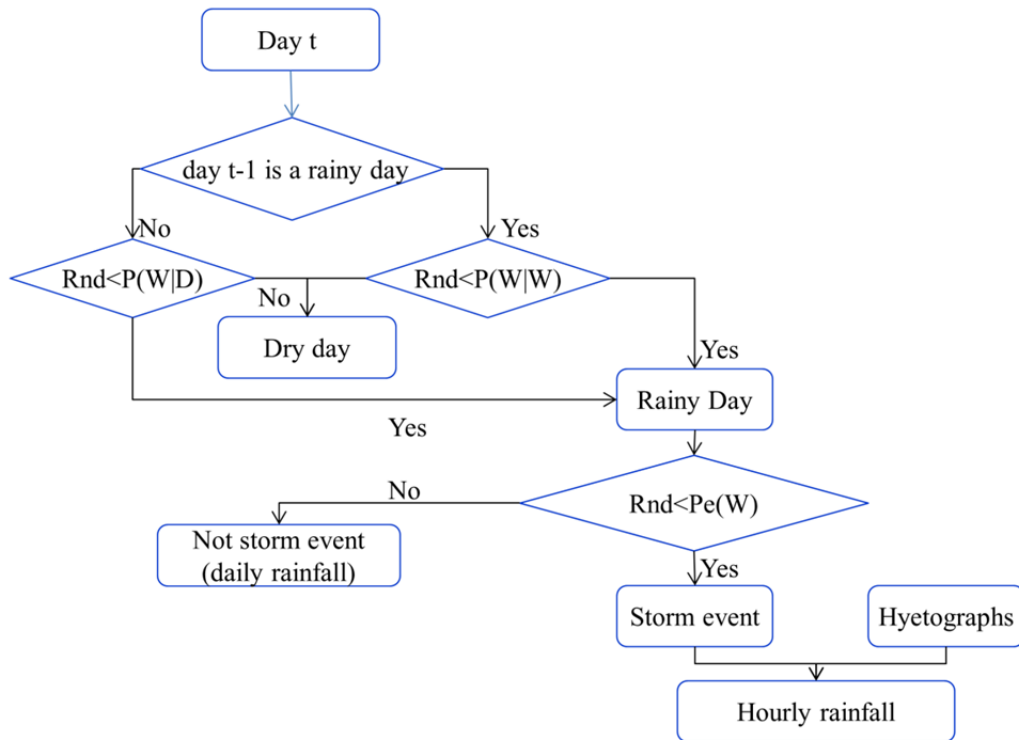


圖 3-5 不同時間尺度之氣象資料合成模式概念圖

1. 降雨事件

降雨與否決定方式是以 $P(W)$ 、 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 決定該日是否為降雨日，如果該日為降雨日，則判斷該日是否發生暴雨事件，暴雨事件發生與否可透過式(3-31)決定。

$$\varepsilon = P_{sm}(S) \text{ for each month} \quad (3-31)$$

式(3-31)中， ε 為(0,1)間之亂數， $P_{sm}(S)$ 表示 m 月之暴雨發生機率，研究中引用中央氣象局的定義，設定當日總降雨量大於 13 公分時為暴雨事件，因此若判斷該日之降雨為暴雨事件時，將產生超過 13 公分之雨量，而若該日為非暴雨事件則產生低於 13 公分之降雨量。

2. 降雨量

若該日為非暴雨事件，需先透過 GOF 檢定，由 3.4.2 節所描述之 4 種機率分佈函數中挑選適當之機率分佈，以產生降雨量小於 13 公分之降雨量，而若該日為暴雨事件時，則以第三類皮爾遜分佈(Pearson type III distribution, PT3)或對數皮爾遜第三類分佈(Log Pearson type III distribution, LPT3)描述降雨量。此外，由於暴雨事件資料數較少，因此分為 5-6 月、7-10 月及 11-4 月等 3 個時期，分別分析適合用於描述各時期降雨量之機率分佈。

(1) 第三類皮爾遜分佈(Pearson type III distribution, PT3)

第三類皮爾遜分佈之機率密度函數可以式(3-32)表示，當應用第三類皮爾遜分佈產生降雨量時，可透過頻率因子(K_T)與降雨量之關係以式(3-33)求得。

$$f(x) = \frac{1}{\theta \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\theta} \right)} \quad (3-32)$$

$$X_T = \bar{X} + K_T S \quad (3-33)$$

式(3-32)中， θ 為尺度係數， β 為形狀係數， γ 則為位置係數，式(3-33)中， \bar{X} 為平均雨量， S 為標準偏差，頻率因子可透過降雨累積超越機率及偏度係數求出。

(2) 對數皮爾遜第三類分佈(Pearson type III distribution, PT3)

對數皮爾遜第三類分佈之機率密度函數可以式(3-34)表示，與第三類皮爾遜分佈相同，當應用於產生降雨量時，可透過可透過頻率因子(K_T)與降雨量關係以式(3-33)求得。

$$f(x) = \frac{1}{\theta_y \Gamma(\beta_y)} \left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y} \right)^{\beta_y-1} e^{-\left(\frac{\ln x - \gamma_y}{\theta_y} \right)} \quad (3-34)$$

式(3-34)中， y 表示對數型態之 x 值， θ_y 為尺度係數， β_y 為形狀係數， γ_y 則為位置係數。

3. 雨型

國內外都有學者針對雨型分析進行研究，包括 Huff(1967)提出之平均法，Pilgrim 及 Cordery(1975)提出之級序平均法，Yen 與 Chow(1980)提出之三角形法，Powell 等人(2007)將降雨分為長延時以及短延時兩種，利用無因次方法，建立長延時(延時大於 10 小時)及短延時(延時小於 7 小時)之兩種不同類型之雨型；在臺灣，也有葉弘德等(1990)所提出之尖峰對齊法雨型，以及許恩菁(1999)利用序率模式建構暴雨雨型。水文設計應用手冊(經濟部水資源局, 2001)，利用層集分法及主成份分析，將北部地區分為如圖 3-6 所示之三個雨型區，並針對不同的雨型區分別建立其雨型，然而，若流域跨越三個雨型區，則在雨型的挑選上並不容易。因此，研究中採用 Huff 法進行雨型分析，由於 Huff 法在分析雨型前會先針對尖峰降雨出現的時機進行分析，而不同天氣型態發生時期降雨尖峰出現情形並不相同，因此利用 Huff 法進行雨型分析時，不同降雨尖峰發生時刻亦可大致視為不同天氣型態所造成之降雨情形。

Huff 法將降雨延時分為 4 等份，因此其第一分點、第二分點及第三分點分別為於總降雨延時 25%、50%及 75%處，以 Huff 法進行雨型設計計算時，應針對同一類別進行分析，故分析前需依照尖峰降雨出現時刻，區分不同類型之降雨事件，避免平均後一些較極端的降雨事件反而會因平均而削減其特性，造成雨型進度對稱平滑(許恩菁, 1999)。Huff 雨型推求方法為：(Huff, 1967; 許恩菁, 1999)

- (1) 求出每場事件之總降雨量(P_T)，將降雨量及降雨時間無因次化。
- (2) 求各降雨事件之累積無因次雨型。
- (3) 將各降雨事件無因次累積雨型在時間軸上分為 24 個等份(t_1 、 t_2 、...、 t_{24})，各等份點對應的無因次累積降雨量(P_1 、 P_2 、...、 P_{24})則由實際降雨事件的無因次累積雨型內插求得。

(4) 假設該雨量站找到 n 場降雨事件，則可求出每一個時間的平均降雨累積百分值

$$\overline{P}_1^i = \frac{1}{n} \left[(P_1^i)_1 + (P_1^i)_2 + \cdots + (P_1^i)_n \right]$$

$$\overline{P}_2^i = \frac{1}{n} \left[(P_2^i)_1 + (P_2^i)_2 + \cdots + (P_2^i)_n \right]$$

⋮

$$\overline{P}_{24}^i = \frac{1}{n} \left[(P_{24}^i)_1 + (P_{24}^i)_2 + \cdots + (P_{24}^i)_n \right]$$

則 $(\overline{P}_1^i, \overline{P}_2^i, \dots, \overline{P}_{24}^i) \sim (t_1, t_2, \dots, t_{24})$ 即為 Huff 法所得到的雨型。

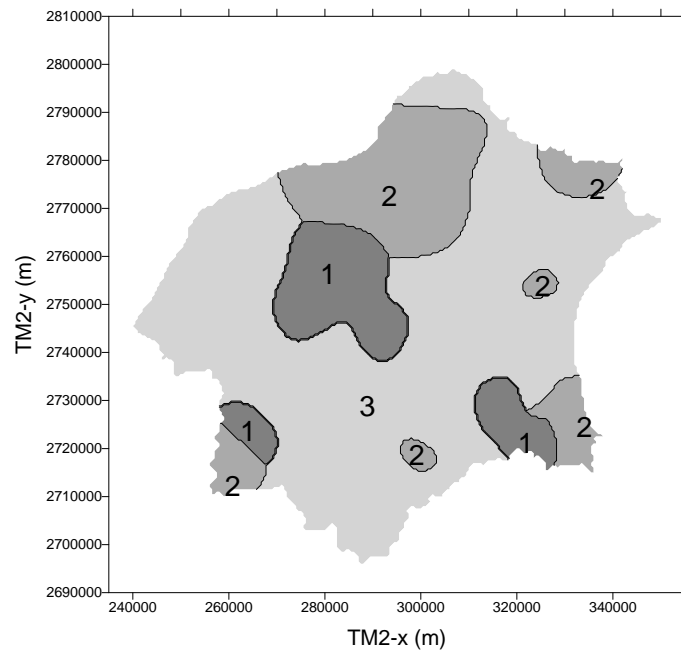


圖 3-6 臺灣北部地區長延時雨型均一區(經濟部水資源局, 2001)

4. 氣候變遷情境下溫度及雨量統計特性修正

研究中採用簡易降尺度，在空間降尺度上，假設在氣候變遷的情境下，研究區域統計特性改變情況與 GCM 最鄰近網格點之預測情況相同，在溫度統計特性修正上，利用氣候變遷預測之月平均特性之改變，直接修正歷史氣象序列，其修正方式如方程式(3-14)所示，而在不同時間尺度降雨量模擬上，由於同時考慮暴雨事件及非暴雨事件，因此在未來氣候發生改變時，不能僅針對非暴雨事件進行雨量修正，也需要同時考量暴雨事件之修正，修正後之統計特性再透過氣象合成模式繁衍產生氣候變遷情境下之氣象資料。

假設未來暴雨事件及非暴雨事件發生機率不變，則未來各月份之暴雨事件及非暴雨事件之平均雨量(μ'_1 及 μ'_2)及發生機率(P_1 及 P_2)乘積和，應與未來之月平均雨量(μ_f)相符(式(3-35))。然而，在式(3-35)中，面對兩個未知的 μ'_1 及 μ'_2 ，但卻沒有足夠的方程式可以求解 μ'_1 及 μ'_2 ，因此設計三種不同修正方法進行評估，討論以不同的修正方法推估 μ'_1 及 μ'_2 之結果，最後依據分析結果挑選適合之修正方式。

$$\mu'_{i1}P_{i1} + \mu'_{i2}P_{i2} = \mu_{if} \quad i = 1 \text{ to } 12 \quad (3-35)$$

(1) 修正比例相同

由於暴雨事件之雨量分為三個時期(11~4月、5~6月及7~10月)討論，因此假設在同一個時期內，各月份暴雨事件平均雨量之修正比例及非暴雨事件平均雨量之修正比例相同，即為式(3-36)，在同一個時期內各月份暴雨及非暴雨之平均雨量修正比例可表示為式(3-37)，而同一個時期內各月份之 μ'_1 及 μ'_2 則以式(3-38)及式(3-39)表示。

$$\sum \mu_{i1} \times R \times P_{i1} + \sum \mu_{i2} \times R \times P_{i2} = \sum \mu_{if} \quad (3-36)$$

$$R = \frac{\sum \mu_{if}}{\sum \mu_{i1} \times P_{i1} + \sum \mu_{i2} \times P_{i2}} \quad (3-37)$$

$$\mu'_{i1} = \mu_{i1} \times R \quad (3-38)$$

$$\mu'_{i2} = \mu_{i2} \times R \quad (3-39)$$

(2) 利用平均值及標準偏差回歸關係進行修正

此方法主要係透過平均值及標準偏差之回歸關係進行分析。首先以各月份非暴雨事件之平均值及標準偏差推求回歸式，則各月份之平均值及標準偏差可以式(3-40)表示，接著推求暴雨事件之平均值及標準偏差回歸式，由於暴雨僅分為三個時期(11~4月、5~6

月及 7~10 月)討論，因此不同時段之暴雨平均值及標準偏差則可以式(3-41)表示，而由於暴雨僅分為三個時段討論，因此非暴雨事件亦依據暴雨事件區分之三個時段，以平均之平均值及標準偏差進行回歸，其回歸式可以式(3-42)表示。

$$\sigma_{i1} = a_1 \times \mu_{i1} + b_1 \quad i=1 \text{ to } 12 \quad (3-40)$$

$$\sigma_{i2} = a_2 \times \mu_{i2} + b_2 \quad i=1 \text{ to } 3 \quad (3-41)$$

$$\frac{\mu_{i2}}{\sigma_{i2}} = a_3 \times \frac{\mu_{i1}}{\sigma_{i1}} + b_3 \quad i=1 \text{ to } 3 \quad (3-42)$$

式(3-40)中， a_1 及 b_1 為回歸後所求得之係數，式(3-41)中， a_2 及 b_2 為回歸後所求得之係數，而式(3-42)中， a_3 及 b_3 為回歸後所求得之係數。

以 7-10 月為例，說明暴雨及非暴雨事件之雨量修正方程式推導，假設各月份之非暴雨及暴雨發生機率不變，且平均值與標準偏差之關係式在未來沒有改變，則 7-10 月之各月份未來月平均雨量與暴雨及非暴雨之關係可表示為式(3-43)~式(3-46)：

$$\mu'_{71}P_{71} + \mu'_{72}P_{72} = \mu_{7f} \quad (3-43)$$

$$\mu'_{81}P_{81} + \mu'_{82}P_{82} = \mu_{8f} \quad (3-44)$$

$$\mu'_{91}P_{91} + \mu'_{92}P_{92} = \mu_{9f} \quad (3-45)$$

$$\mu'_{101}P_{101} + \mu'_{102}P_{102} = \mu_{10f} \quad (3-46)$$

由於在未來 7-10 月的 μ'_2 及 P_2 相同，因此後續推導過程直接以 μ'_2 及 P_2 取代 μ'_{i2} 及 P_{i2} 。將式(3-43)~式(3-46)代入式(3-42)，則式(3-42)可改寫為式(3-47)，式(3-47)右式括弧內之分子則可轉為式(3-48)之形式。

$$\frac{\mu'_{72}}{\sigma'_{72}} = a_3 \times \left[\frac{\left(\frac{\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101}}{4} \right)}{\left(\frac{\sigma'_{71} + \sigma'_{81} + \sigma'_{91} + \sigma'_{101}}{4} \right)} \right] + b_3 = a_3 \times \left[\frac{\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101}}{\sigma'_{71} + \sigma'_{81} + \sigma'_{91} + \sigma'_{101}} \right] + b_3 \quad (3-47)$$

$$\begin{aligned}\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101} &= \frac{\mu_{7f} - \mu'_2 P_2}{P_{71}} + \frac{\mu_{8f} - \mu'_2 P_2}{P_{81}} + \frac{\mu_{9f} - \mu'_2 P_2}{P_{91}} + \frac{\mu_{10f} - \mu'_2 P_2}{P_{101}} \\ &= \sum_{i=7}^{10} \frac{\mu_{if}}{P_{i1}} - \mu'_2 P_2 \sum_{i=7}^{10} \frac{1}{P_{i1}}\end{aligned}\quad (3-48)$$

令 $A = \sum_{i=7}^{10} \frac{\mu_{if}}{P_{i1}}$ ，且 $B = P_2 \sum_{i=7}^{10} \frac{1}{P_{i1}}$ ，則式(3-48)可改為式(3-49)，而式(3-47)右式括弧內

之分母可轉為式(3-50)之形式。

$$\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101} = A - B\mu'_2 \quad (3-49)$$

$$\begin{aligned}\sigma'_{71} + \sigma'_{81} + \sigma'_{91} + \sigma'_{101} &= a_1 (\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101}) + 4b_1 = a_1 (A - B\mu'_2) + 4b_1 \\ &= (a_1 A + 4b_1) - a_1 B\mu'_2\end{aligned}\quad (3-50)$$

將式(3-49)及式(3-50)代回式(3-47)，則式(3-47)可改寫如式(3-51)，式(3-51)整理過後，可得式(3-52)。

$$\begin{aligned}a_3 \times \left[\frac{\mu'_{71} + \mu'_{81} + \mu'_{91} + \mu'_{101}}{\sigma'_{71} + \sigma'_{81} + \sigma'_{91} + \sigma'_{101}} \right] + b_3 &= a_3 \times \left[\frac{A - B\mu'_2}{(a_1 A + 4b_1) - a_1 B\mu'_2} \right] + b_3 \\ &= \frac{(a_3 A + a_1 a_3 A + 4b_1 b_3) - (a_3 B - a_1 b_3 B) \mu'_2}{(a_1 A + 4b_1) - a_1 B\mu'_2} \\ &= \frac{\mu'_2}{\sigma'_2} = \frac{\mu'_2}{a_2 \sigma'_2 + b_2}\end{aligned}\quad (3-51)$$

$$\begin{aligned}(a_2 a_3 B + a_1 b_3 B - a_1 B) (\mu'_2)^2 \\ + (a_1 A + 4b_1 - a_2 a_3 A - a_1 a_2 b_3 A - 4a_2 b_1 b_3 + a_3 b_2 B + a_1 b_2 b_3 B) \mu'_2 \\ - (a_3 b_2 A + a_1 b_2 b_3 A + 4b_1 b_2 b_3) = 0\end{aligned}\quad (3-52)$$

透過式(3-52)可求解 μ'_2 ，再代入式(3-43)~式(3-46)即可求解各月份之 μ'_1 。此外，式(3-52)中之 $4b_1$ 、 $4a_2 b_1 b_3$ 及 $4b_1 b_2 b_3$ 的“4”為該時段內的月份數“4”，因此應用至其他時期時，可直接取代為該時期之月份數目。

(3) 利用比值相同修正平均雨量

目前每一個時段內之暴雨及非暴雨之雨量比值為定值式(3-53)，假設在未來氣候變遷時，每一個時段內之暴雨及非暴雨之雨量比值與歷史情況相同，且假設未來暴雨事件及非暴雨事件發生機率不變，因此未來暴雨及非暴雨之雨量比值可以式(3-54)表示。

$$\frac{\sum \mu_{i1} \times P_{i1}}{\sum \mu_{i2} \times P_{i2}} = k \quad (3-53)$$

$$\frac{\sum \mu'_{i1} \times P_{i1}}{\sum \mu'_{i2} \times P_{i2}} = k \quad (3-54)$$

以 7~10 月為例應用此法之修正方式，式(3-55)為式(3-43)~式(3-46)之累加，將式(3-55)代入式(3-54)後，整理可得式(3-56)，解出 μ'_2 。

$$\left(\sum_{i=7}^{10} \mu'_{i1} P_{i1} \right) + 4\mu'_2 P_2 = \sum_{i=7}^{10} \mu_{if} \quad (3-55)$$

$$\mu'_2 = \frac{\sum_{i=7}^{10} \mu_{if}}{4(k+1)P_2} \quad (3-56)$$

解出 μ'_2 後，代入式(3-43)~式(3-46)即可推求各月份之 μ'_i ，而式(3-56)分母之“4”是該時段內的月份數“4”，因此，若在其他時期使用式(3-54)時，可直接取代為該時期之月份數目。

3.5 結果討論

GCMs 模式挑選分別以 IPCC 網站上提供之資料與「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」提供之資料進行 GCMs 模式挑選，而在氣象合成模式繁衍資料討論部分，則針對利用單一機率分佈及利用雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式繁衍之氣象資料盡興討論，並說明採用雙機率分佈描述降雨之必要性，此外亦討論繁衍資料長度對降雨統計特性之影響，最後針對暴雨事件門檻值設定對結果的影響進行討論。

3.5.1 GCMs 挑選結果

1. 以 IPCC 網站提供資料進行分析

IPCC 網站提供多國研究單位研發的 GCMs 的推估資料，研究中選用 IPCC 網站完整提供 A1B、A2 與 B1 三種情境的 10 個 GCMs 進行分析，分別為 CSIRO-MK3(CSMK3)、GFDL-CM2.0(GFCM20)、GFDL-CM2.1(GFCM21)、NIES:MIROC3_2-MED(MIMR)、INM-CM3(INCM3)、IPSL-CM4(IPCM4)、MRI-CGCM2_3_2(MRCGCM)、MPIM-ECHAM5(MPEH5)、NCAR-CCSM3(NCCCSM)及 UKMO-HADCM3 (HADCM3)，以上 10 個 GCMs 之推估值資料均可由 IPCC Data Distribution Center (IPCC DDC)獲得。

GCMs 模擬之基期雨量與測站歷史實際雨量相關性分析上(表 3-2)可發現，IPCM4 與 MIMR 模式於 3 個雨量測之降雨趨勢分析結果為現負相關，表示 IPCM4 與 MIMR 模式模擬降雨趨勢與測站實際降雨情形並不一致，此外，GFCM20 模式與秀巒站之相關性亦僅有 0.27，顯示該模式之月平均雨量與秀巒站之月平均雨量屬於低度相關或無相關性，在模式挑選時應特別加以注意。而在 RMSE 分析結果(表 3-2)顯示，坪林及福山測站其枯水期與豐水期之 RMSE 大致相近，且枯水期之 RMSE 大致較豐水期之 RMSE 為低，而在秀巒站則僅在 INCM3 及 MRCGCM 兩模式在枯水期之 RMSE 值較低，在 MIMR 模式之所模擬之枯水期雨量與歷史實際雨量 RMSE 值卻高達 2.7，顯示 MIMR 模式所模擬之枯水期雨量與歷史雨量間之差異極大。

以排名法篩選 GCMs 之結果(表 3-3)顯示，MPEH5 與 NCCCSM 模式表現較佳，尤其是 MPEH5 在 3 個測站均為最佳之模式。但 MIMR 模式在坪林及福山之相關性分別僅有 0.1 及 0.03(表 3-2)，顯示 MIMR 模式模擬雨量與坪林及福山站之實際雨量並無相關性，然而，最後卻因為其 RMSE 值較低，使得挑選名次卻分別為第 3 名及第 6 名，這說明了排名法雖然可以初步的篩選出適合的模式，但雨量趨勢模擬的準確與否對於後續的相關研究可能造成影響，因此仍須參考其他方法所挑選出來之模式進行綜合評比。

表 3-2 測站與不同 GCMs 之相關性與 RMSE 分析

測站	坪林			福山			秀巒		
	R	RMSE (dry)	RMSE (wet)	R	RMSE (dry)	RMSE (wet)	R	RMSE (dry)	RMSE (wet)
CSMK3	0.50	0.54	0.64	0.45	0.51	0.61	0.31	1.52	0.42
GFCM20	0.65	0.71	0.77	0.59	0.66	0.75	0.27	0.89	0.66
GFCM2.1	0.63	0.52	0.68	0.62	0.44	0.65	0.53	0.91	0.47
HADCM3	0.45	0.49	0.67	0.46	0.42	0.64	0.66	0.64	0.43
INCM3	0.46	0.68	0.60	0.49	0.63	0.61	0.71	0.37	0.41
IPCM4	-0.13	0.51	0.73	-0.15	0.47	0.73	0.02	0.85	0.59
MIMR	0.10	0.47	0.53	0.03	0.65	0.50	-0.28	2.69	0.76
MPEH5	0.74	0.42	0.57	0.75	0.34	0.54	0.88	0.76	0.32
MRCGCM	0.36	0.59	0.71	0.46	0.53	0.69	0.75	0.31	0.52
NCCCSM	0.67	0.49	0.63	0.74	0.41	0.61	0.85	0.62	0.37

表 3-3 排名法挑選 GCMs 之分析結果

測站	坪林	福山	秀巒
CSMK3	4	6	6
GFCM20	8	9	9
GFCM2.1	4	3	6
HADCM3	4	4	5
INCM3	7	5	3
IPCM4	9	9	8
MIMR	3	6	10
MPEH5	1	1	1
MRCGCM	9	8	4
NCCCSM	2	2	1

以缺點扣分法篩選時，需要先設定扣分門檻值，不同的門檻值設定對模式挑選結果造成影響，因此需先分析評估適合之門檻值。表 3-4 為相關係數門檻為 0.7 但考量不同 RMSE 門檻值的分析結果，在表中若數值為 0 表示所有項目均高於門檻值，而數值為 1 則表示 3 個評比項目中有 1 項是不符合門檻標準，當 RMSE 之門檻值為 0.4 時，不同的 GCMs 在所有測站皆有扣分的情況發生，而當 RMSE 之門檻為 0.7 時，則 3 個測站皆有

1 至 2 個 GCMs 是沒有被扣分的，顯示當 RMSE 的門檻值過高或過低時，會導致所有的模式之 RMSE 都高於或低於門檻，造成鑑別不佳的情況發生，因而無法挑選出適合之模式，因此 RMSE 之門檻值以介於 0.4 及 0.7 間之 0.6 或 0.5 為較佳之門檻值。表 3-5 為考慮 RMSE 門檻值為 0.7 但不同相關係數門檻值之 GCMs 挑選結果，由於在坪林與福山兩站，GCMs 與測站之雨量相關係數介於 0.7-0.4 之間，因此，當相關係數為 0.7 及 0.4 時，會因為門檻值過高或過低較缺乏鑑別度，較無法挑出適當之模式，因此在本研究中相關係數為 0.6 或 0.5 為較佳之門檻值。

表 3-6 為依據上述分析，以 RMSE 與相關係數門檻值分別為 0.5 及 0.6 之情況挑選適合之 GCMs，根據表 3-6 之模式挑選顯示，坪林與福山的結果較為相似，而較適合使用在坪林及福山兩個雨量測站之 GCMs 分別為 NCCCSM、MPEH5 及 GFCM2.1；在秀巒站則可挑選 INCM3、MRCGCM、MPEH5 與 NCCCSM 等 4 個模式，雖然三測站所挑選之 GCMs 模式並不一致，但是 MPEH5 與 NCCCSM 兩模式可同時使用在不同測站。

表 3-4 不同 RMSE 且相關係數門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果

RMSE	0.7			0.6			0.5			0.4		
	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒
CSMK3	1	1	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3
GFCM20	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
GFCM2.1	1	1	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3
HADCM3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
INCM3	1	1	0	3	3	0	3	3	0	3	3	1
IPCM4	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3
MIMR	1	1	3	1	2	3	2	2	3	3	3	3
MPEH5	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	1
MRCGCM	2	1	0	2	2	0	3	3	1	3	3	1
NCCCSM	1	0	0	2	1	1	2	1	1	3	2	1

表 3-5 不同相關係數且 RMSE 門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果

R	0.7			0.6			0.5			0.4		
	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒
CSMK3	1	1	2	1	1	2	1	1	2	0	0	2
GFCM20	3	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2
GFCM2.1	1	1	2	0	0	2	0	0	1	0	0	1
HADCM3	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
INCM3	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
IPCM4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
MIMR	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3
MPEH5	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
MRCGCM	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	0	0
NCCCSM	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3-6 缺點扣分法 GCMs 挑選結果

R	0.6						0.5					
	0.6			0.5			0.6			0.5		
測站	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒	坪林	福山	秀巒
CSMK3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2
GFCM20	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	3
GFCM2.1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1
HADCM3	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1
INCM3	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0
IPCM4	2	2	2	3	2	3	2	2	2	3	2	3
MIMR	1	2	3	2	2	3	1	2	3	2	2	3
MPEH5	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
MRCGCM	2	2	0	3	3	1	2	2	0	3	3	1
NCCCSM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2. 以「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」提供之輸出資料進行分析

IPCC 網站上提供之不同 GCMs 輸出資料之網格點水平解析度最高為 150 公里，但臺灣地區因面積狹小，往往僅落於單一網格，因此國家災害防救科技中心執行國科會計

畫「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project, 以下簡稱 TCCIP 計畫)(國家災害防救科技中心, 2010)依據 IPCC 所提供之 24 個 GCMs 之情境資料進行空間降尺度, 產出空間解析度為 25 公里×25 公里之不同情境之輸出資料。TCCIP 計畫依據 GCMs 模擬東亞區域的降雨型態及季風特性等相關的氣候特性之相關係數, 評選各 GCM 模式模擬歷史東亞季風特性之優劣後, 挑選 9 個模擬東亞區域降雨型態及季風特性較佳之 GCMs 模式(表 3-7), 研究中再由這 9 個 GCMs 模式中挑選同時提供 A1B、A2 及 B1 等三種情境之 7 個 GCMs 模式(表 3-7), 依據其豐枯水期平均降雨改變情形挑選適合之模式。

表 3-7 GCMs 與提供情境說明

研發單位	國家	模式	簡稱	A1B	A2	B1
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia	Mk3.5	CSMK35	◎	◎	◎
		Mk3.0	CSMK30	◎	◎	◎
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	CM2.0	GFCM20	◎	◎	◎
		CM2.1	GFCM21	◎	◎	◎
INGV, National Institute of Geophysics and Volcanology	Italy	ECHAM 4.6 Model	-	◎	◎	
National Institute for Environmental Studies	Japan	MIROC3.2 hires	MIHR	◎		◎
		MIROC3.2 medres	MIMR	◎	◎	◎
Max-Planck-Institut for Meteorology	Germany	ECHAM5-OM	MPEH5	◎	◎	◎
Meteorological Research Institute	Japan	CGCM2.3.2	MRCGCM	◎	◎	◎

豐枯水期改變率的變化分為四類特性(圖 3-7), 研究中挑選選落在第 2 類特性、第 3 類特性及第 4 類特性的 GCMs 模式, 其所代表的降雨特性分別為豐水期平均降雨改變率為增加(+); 而枯水期平均降雨改變率為減少(-)、枯水期及豐水期雨量皆減少與豐水期雨量減少枯水期雨量增加之情形, 所挑選之模式(圖 3-8)為落在第 2 類特性之 CSMK35 模式及 MRCGCM 模式、落在第 3 類特性之 MIMR 模式以及落在第 4 類特性之 GFCM21 及 MPEH5 模式。

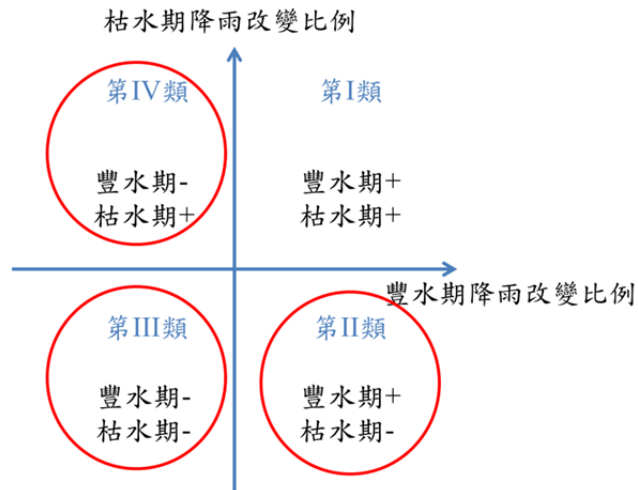


圖 3-7 GCMs 模式分類依據之示意圖

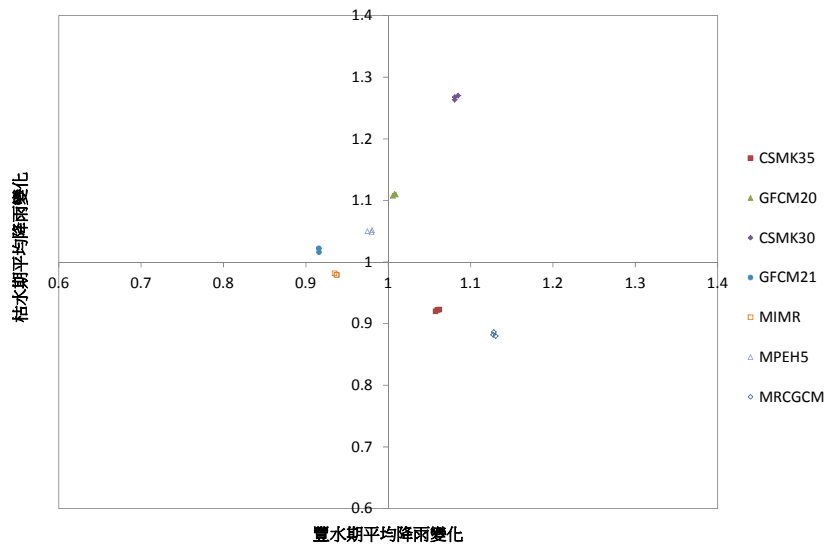


圖 3-8 7 個 GCMs 模式三測站豐枯水期平均降雨變化

以新店溪流域及大漢溪流域內擇一雨量站代表該流域之氣候特性進行分析，然而因位於新店溪之翡翠水庫其供水方式主要係以南勢溪為主，當南勢溪流量不足以提供下游需水時，則由水庫放水提供下游需水，因此在新店溪流域採用北勢溪之坪林雨量站及南勢溪之福山雨量站，而在大漢溪流域則採用秀巒雨量站。根據分析結果顯示(表 3-8、表 3-9、表 3-10 及圖 3-9)，3 測站與 GCMs 之相關係數則大部分皆大於 0.6；除了秀巒站歷史資料與 GCMs 之基期資料在枯水期在 RMSE 大於 1 之外，其他地區測站與 GCMs

之豐水期與枯水期之 RMSE 皆小於 0.6，而由圖 3-9 可看到，大部分的點皆落於橘色區域，顯示以 0.6 作為相關係數及 RMSE 之門檻值時，大部分的模式都不會被扣分。

由於 TCCIP 計畫提供之不同 GCMs 基期資料已利用 Bias Correction Statistical Downscaling (BCSD)方法進行統計降尺度，因此不同 GCMs 之間的差異並不大，因此並無法再進一步由 5 個 GCMs 中挑選出表現更佳的 GCMs 來，因此，在後續進行氣候變遷之各項評估時，以 CSMK35、GFCM21、MIMR、MPEH5 及 MRCGCM 5 個 GCMs 進行分析評估。

表 3-8 測站與 GCMs 之基期雨量資料比較

測站	項目	CSMK35	GFCM21	MIMR	MPEH5	MRCGCM
坪林	R	0.84	0.82	0.83	0.93	0.91
	RMSE(dry)	0.27	0.25	0.23	0.27	0.32
	RMSE(wet)	0.42	0.43	0.41	0.45	0.44
福山	R	0.73	0.73	0.73	0.85	0.84
	RMSE(dry)	0.21	0.26	0.20	0.24	0.24
	RMSE(wet)	0.40	0.41	0.39	0.43	0.42
秀巒	R(全年)	0.47	0.66	0.65	0.73	0.66
	RMSE(dry)	1.26	1.54	1.18	1.18	1.05
	RMSE(wet)	0.51	0.29	0.47	0.26	0.36

表 3-9 排名法挑選 GCMs 結果

測站	坪林	福山	秀巒
CSMK35	2	2	5
GFCM21	3	5	3
MIMR	1	1	3
MPEH5	3	4	1
MRCGCM	5	3	2

表 3-10 缺點扣分法挑選 GCMs 結果

測站	項目	CSMK35	GFCM21	MIMR	MPEH5	MRCGCM
坪林	R	0	0	0	0	0
	RMSE(dry)	0	0	0	0	0
	RMSE(wet)	0	0	0	0	0
	排名	1	1	1	1	1
福山	R	0	0	0	0	0
	RMSE(dry)	0	0	0	0	0
	RMSE(wet)	0	0	0	0	0
	排名	1	1	1	1	1
秀巒	R(全年)	0	0	0	0	0
	RMSE(dry)	1	1	1	1	1
	RMSE(wet)	0	0	1	0	0
	排名	1	1	5	1	1

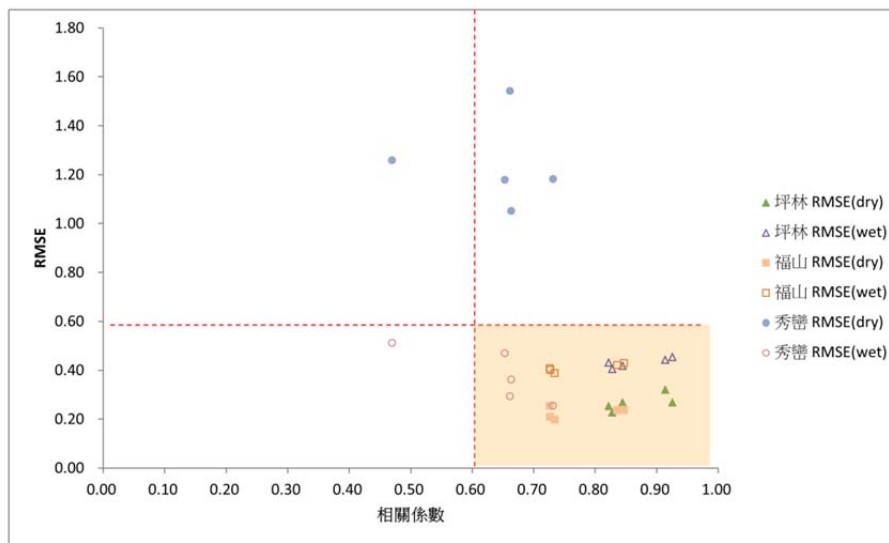


圖 3-9 測站與 GCMs 之基期雨量資料比較圖

3.5.2 氣象合成模式結果討論

TCCIP 計畫提供之未來氣候變遷情境資料以 1980~1999 年為基期進行分析，研究採用與 TCCIP 計畫基期相同之 1980~1999 年高義站之歷史溫度雨量資料進行分析，利用氣象合成模式模擬合成產生基期與未來不同氣候變遷情境下之溫度及雨量資料，此外，

在進行雨量合成前，以歷史降雨資料配合最適度檢定法，挑選適合研究區之降雨機率分佈函數。



1. 單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式

(1) 降雨機率分佈

在產生氣象資料之前，先透過最適度檢定(Goodness of Fit test, GOF)判斷歷史雨量資料適合使用何種機率分佈描述，由表 3-11 各月份不同分佈最適度檢定結果可以發現，不論何種分佈都無法在每個月都通過最適度檢定，因此以最適度檢定通過月份最多之分佈描述降雨量，根據表 3-11 分析結果，選擇雙參數韋伯分佈作為後續降雨量推估所採用之機率分佈。

表 3-11 各月份最適度檢定結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
指數分佈	No	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No
單參數韋伯分佈	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No
雙參數韋伯分佈	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No
Gamma 分佈	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No

圖 3-10 及圖 3-11 分別為 2 月及 6 月降雨量累積機率與雙參數韋伯分佈及指數分佈之比較，在這兩個月份雙參數韋伯分佈皆通過 GOF 檢定，而指數分佈在 2 月份通過 GOF 檢定，但在 6 月則沒有通過 GOF 檢定。由圖 3-10(a)中可以看到，雙參數韋伯分佈與歷史之累積機率分佈較為一致，且雙參數韋伯分佈可以產生與 2 月份歷史最大雨量 9.9 公分接近的雨量，而在指數分佈的部分(圖 3-10(b))，雖然指數分佈在 2 月亦通過 GOF 檢定，產生之雨量機率分佈與歷史雨量機率分佈亦接近，但是指數分佈卻無法重現歷史上 2 月最大降雨量之情形。圖 3-11 之雙參數韋伯分佈 6 月降雨累積機率分佈曲線與 2 月份有類似的結果，由於通過 GOF 檢定，因此能描述歷史情況，而指數分佈由於沒有通

過 GOF 檢定，因此在雨量較低的時候產生的雨量較無法反映歷史機率分佈，且指數分佈產生之最大雨量僅 17.85 公分，遠遠不及歷史曾經發生之 39.8 公分之降雨事件。

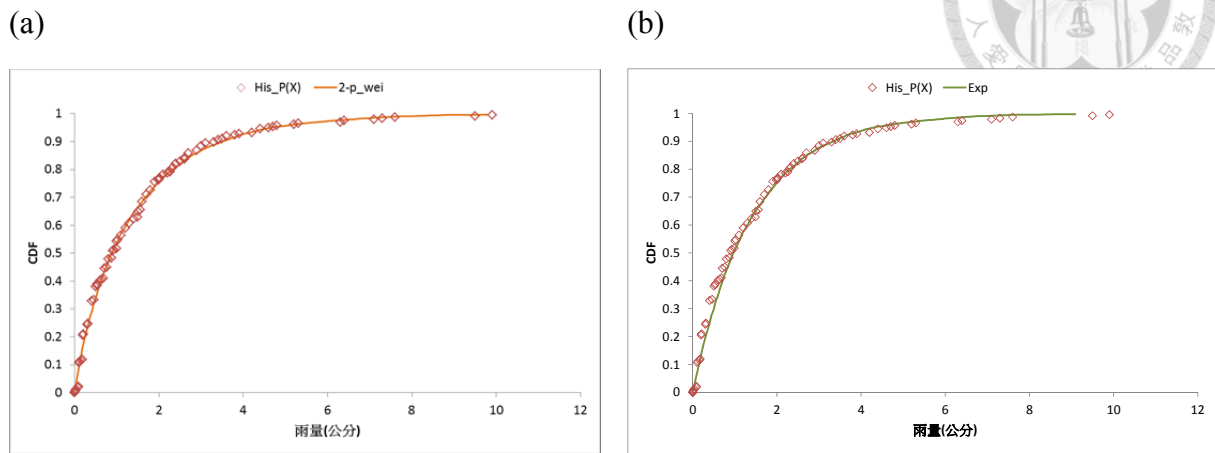


圖 3-10 2 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈

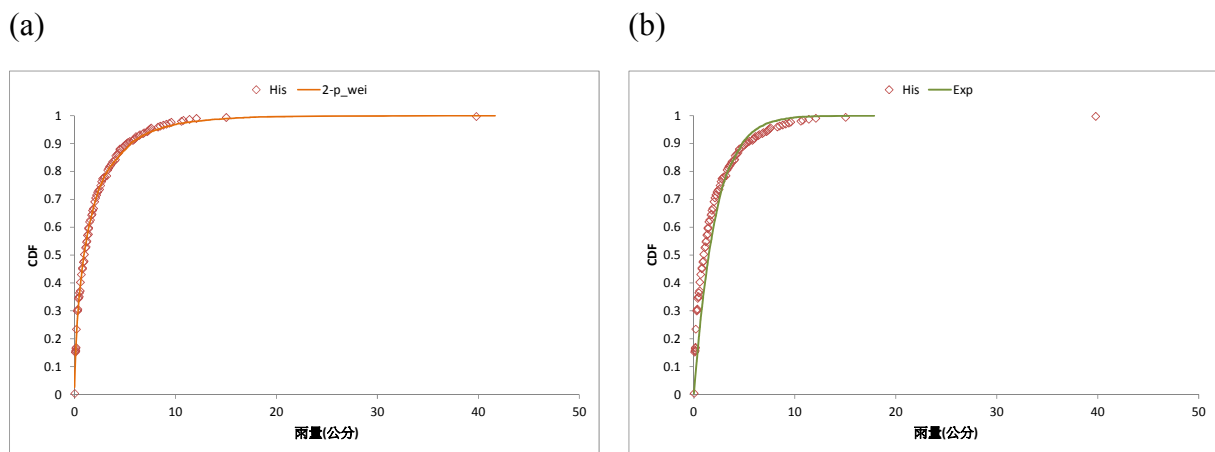


圖 3-11 6 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈

(2) 降雨機率

降雨機率分析針對歷史降雨量與氣象合成模式所模擬之基期降雨機率進行比較，評估氣象合成模式是否可以重現歷史降雨發生情形。表 3-12 為歷史資料及模擬結果各月份之 $P(w)$ 、 $P(w|w)$ 及 $P(w|d)$ 比較，由表中可以發現，由於模式中假設降雨發生機率不變，因此不論是 $P(w)$ 、 $P(w|w)$ 或 $P(w|d)$ ，氣象合成模式模擬產生之降雨機率與歷史降雨機率大致上是相同的，最大的機率差值僅 0.06，顯示模式可重現歷史之降雨發生機率。

表 3-12 各月份降雨機率分析

月份	歷史			模擬		
	P(w)	P(w|w)	P(w|d)	P(w)	P(w|w)	P(w|d)
1	0.24	0.46	0.17	0.25	0.45	0.18
2	0.41	0.71	0.2	0.42	0.7	0.21
3	0.4	0.66	0.23	0.41	0.64	0.24
4	0.38	0.59	0.25	0.37	0.57	0.25
5	0.46	0.64	0.32	0.46	0.62	0.32
6	0.48	0.67	0.31	0.48	0.66	0.32
7	0.38	0.57	0.26	0.34	0.51	0.25
8	0.42	0.6	0.29	0.4	0.56	0.29
9	0.4	0.67	0.22	0.4	0.65	0.24
10	0.2	0.55	0.11	0.19	0.5	0.11
11	0.18	0.47	0.11	0.17	0.45	0.11
12	0.19	0.49	0.12	0.19	0.46	0.13

(3) 降雨量

圖 3-12 為各月份降雨天平均雨量比較，除了 7 月~10 月之外，模擬產生各月份之降雨天平均雨量皆與歷史降雨天平均雨量之差值皆小於 0.05 公分，顯示模擬可重現歷史之降雨天平均雨量，誤差最大之月份落在 10 月，該月份模擬及歷史之降雨天平均雨量差值為 0.26 公分(誤差為 9.5%)與 10 月份並未通過 GOF 檢定，因此雙參數韋伯分佈較無法適當的描述歷史雨量分佈，故其降雨天平均雨量與歷史差異較大。

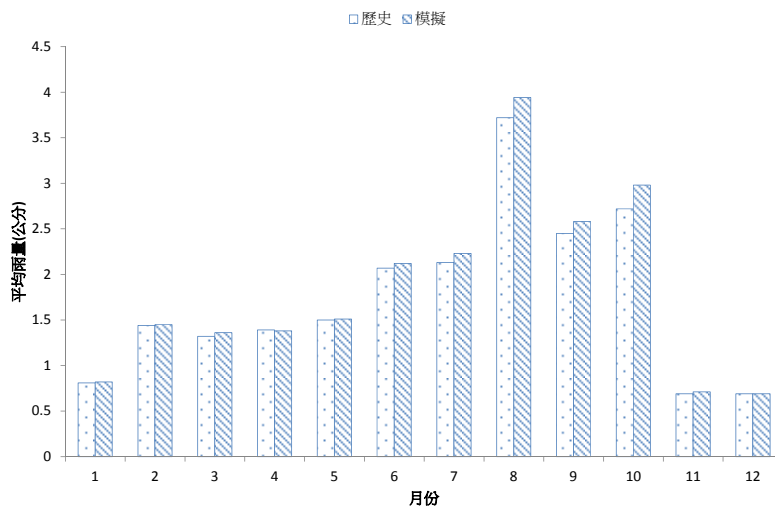


圖 3-12 各月份濕天平均雨量

2. 雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式

在連續性氣象合成模式中以 13 公分為門檻值，在分析時若當日雨量大於 13 公分視為暴雨事件，而日雨量低於 13 公分則視為非暴雨事件，而在繁衍產生降雨資料之前，先利用歷史資料透過 GOF 檢定，由皮爾遜第三類分佈或對數皮爾遜第三類分佈挑選適合暴雨事件使用之機率分佈，再由指數分佈、單參數韋伯分佈、雙參數韋伯分佈或 Gamma 分佈中挑選一個適合使用於非暴雨事件之機率分佈，而在繁衍產生降雨資料時，若該日為暴雨事件，則產生超過 13 公分之暴雨事件雨量，而若該日為非暴雨事件時，則產生小於 13 公分之雨量。

(1) 降雨機率分佈

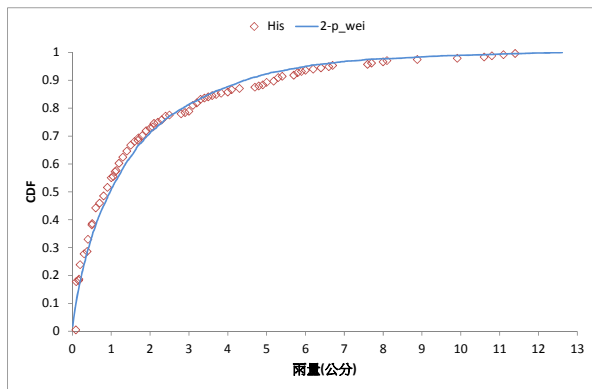
表 3-13 為各月份小於 13 公分降雨量之不同分佈最適度檢定結果，與表 3-11 有類似之情形，並沒有一個分佈可以在每個月都很適切地描述過去降雨量，以雙參數韋伯分佈有最多月分通過 GOF 檢定為最佳之分佈，因此雙參數韋伯分佈作為後續降雨量推估所採用之機率分佈，而在暴雨事件部分，根據 GOF 檢定結果，不論是第三類皮爾遜分佈或對數皮爾遜第三類分佈適合描述大於 13 公分之降雨量，

圖 3-13 為 9 月份雙參數韋伯分佈及指數分佈所描述之降雨情形，由於指數分佈(圖 3-13 (b))並未通過 GOF 檢定，因此雖然指述分佈亦可以產生接近 13 公分的非暴雨事件的最大降雨量，但是，並無法合理的描述歷史降雨情形，而雙參數韋伯分佈，除了可以產生接近 13 公分之雨量外，該分佈亦可適當地描述降雨量的分佈情況，在暴雨事件與量上，利用第三類皮爾遜分佈(圖 3-14)可適當地描述其降雨特性。

表 3-13 小於 13 公分雨量各月份最適度檢定結果

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
指數分佈	No	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No	Yes	Yes	No
單參數韋伯分佈	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
雙參數韋伯分佈	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
Gamma 分佈	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No

(a)



(b)

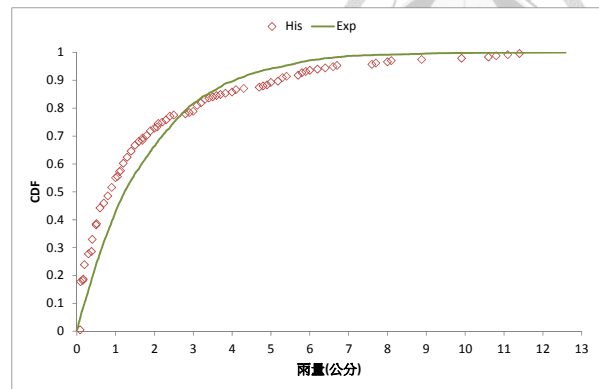


圖 3-13 9 月份降雨量與累積機率分佈曲線，(a)雙參數韋伯分佈，(b)指數分佈

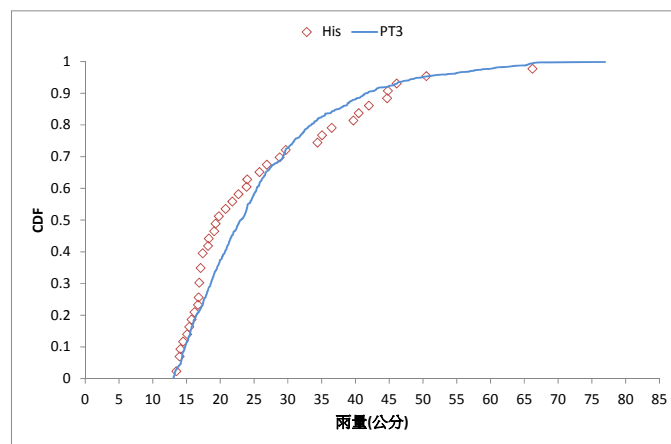


圖 3-14 暴雨事件降雨量與累積機率分佈曲線

(2) 降雨機率

表 3-14 為歷史資料及連續性氣象合成模式模擬之各月份 $P(w)$ 、 $P(w|w)$ 及 $P(w|d)$ 比較，由於單一機率氣象合成模式與雙機率分佈氣象合成模式皆假設降雨發生機率不變，因此與前節提到之單一機率分佈氣象合成模式相同，不論是 $P(w)$ 、 $P(w|w)$ 或 $P(w|d)$ ，雙機率分佈氣象合成模式繁衍產生之降雨機率與歷史降雨機率接近，最大的機率差值僅 0.04，顯示模式可重現歷史之降雨發生機率。

在暴雨事件部分，根據歷史資料顯示，1980 年~1999 年間高義站在 11~5 月並沒有發生日降雨量超過 13 公分的情形，因此氣象合成模式繁衍結果亦顯示在 11~5 月亦無暴

雨事件發生的情形，而在 6~10 月間，根據歷史資料顯示，最大暴雨機率为 8 月之 0.081，根據合成模式繁衍結果亦顯示，最大暴雨機率發生在 8 月且其機率为 0.088，再比較歷史暴雨機率與繁衍之各月份暴雨機率可發現，最大之暴雨機率差異僅為 0.008，顯示模式可重現歷史暴雨發生機率，由此可知，雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式可合理產生暴雨及非暴雨事件之降雨機率，可適當地重現歷史暴雨事件及非暴雨事件發生情形。

表 3-14 連續性氣象合成模式各月份降雨機率分析

月份	歷史				模擬			
	P(w)	P(w|w)	P(w|d)	Ps	P(w)	P(w|w)	P(w|d)	Ps
1	0.24	0.46	0.17	0.000	0.24	0.45	0.18	0.000
2	0.41	0.71	0.20	0.000	0.40	0.69	0.21	0.000
3	0.40	0.66	0.23	0.000	0.41	0.65	0.24	0.000
4	0.38	0.59	0.25	0.000	0.38	0.59	0.26	0.000
5	0.46	0.64	0.32	0.000	0.46	0.63	0.32	0.000
6	0.48	0.67	0.31	0.007	0.49	0.66	0.33	0.008
7	0.38	0.57	0.26	0.017	0.36	0.54	0.26	0.014
8	0.42	0.60	0.29	0.081	0.40	0.57	0.29	0.088
9	0.40	0.67	0.22	0.041	0.40	0.66	0.23	0.046
10	0.20	0.55	0.11	0.056	0.20	0.54	0.11	0.064
11	0.18	0.47	0.11	0.000	0.18	0.47	0.11	0.000
12	0.19	0.49	0.12	0.000	0.18	0.45	0.12	0.000

(3) 降雨量

圖 3-15 為各月份降雨天平均雨量比較，除了 7 月、8 月及 9 月之外，模擬產生各月份之降雨天平均雨量皆與歷史降雨天平均雨量之差值皆小於 0.05 公分，顯示模擬可重現歷史之濕天平均雨量。而在暴雨事件的部分(圖 3-16)，在 11 月~4 月暴雨發生機率为零，因此在不論歷史或模擬值，該時期之暴雨平均雨量為零，而在 5 月~6 月及 7 月~10 月兩個時期的暴雨平均雨量，氣象合成模式所產生之平均雨量與歷史平均雨量接近，在誤差較大的 7~10 月亦僅有 0.5 公分的誤差。

在月平均雨量上(圖 3-17)，除了 7~10 月模擬值與歷史值有較大的差異之外，模擬產生之各月份月平均雨量皆與歷史月平均雨量接近，在 7~10 月時，雖然暴雨發生機率是與歷史發生機率符合的，且 7~10 月暴雨事件平均雨量與歷史暴雨事件平均雨量接近，但暴雨雨量是 7~10 月的所有暴雨事件平均雨量，因此在 7~10 月的各月份採用相同的平均雨量進行模擬，然而對應到各月份時，7~10 月的暴雨平均雨量與各月份分別之平均雨量並不相同，因此導致在 7~10 月之月平均雨量與歷史月平均雨量的差異。

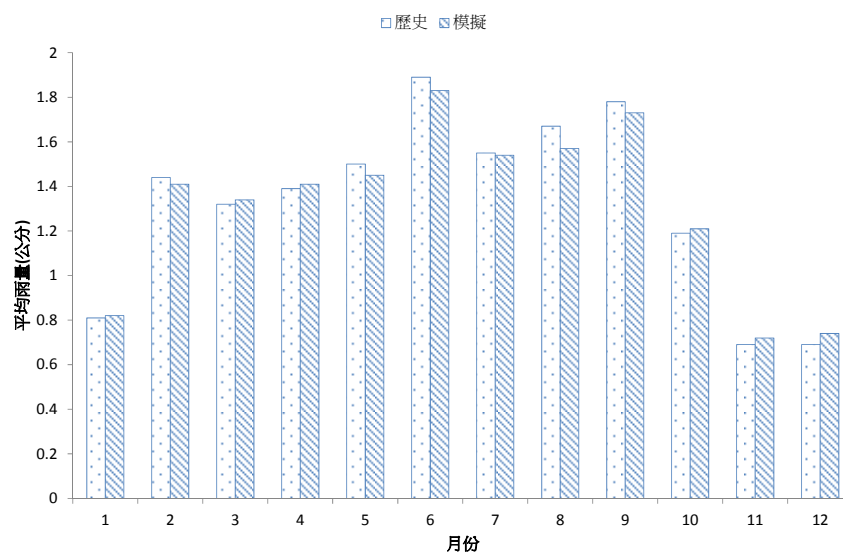


圖 3-15 各月份濕天平均雨量

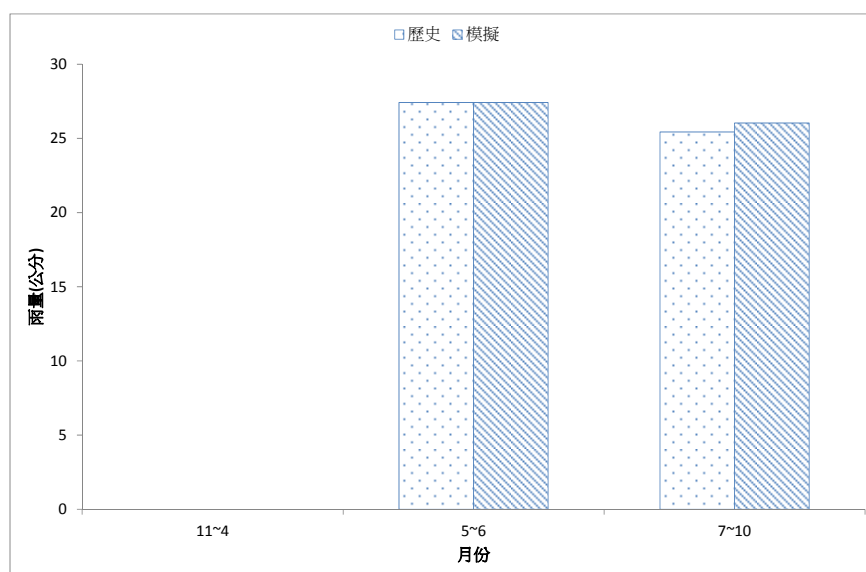


圖 3-16 模擬暴雨平均雨量

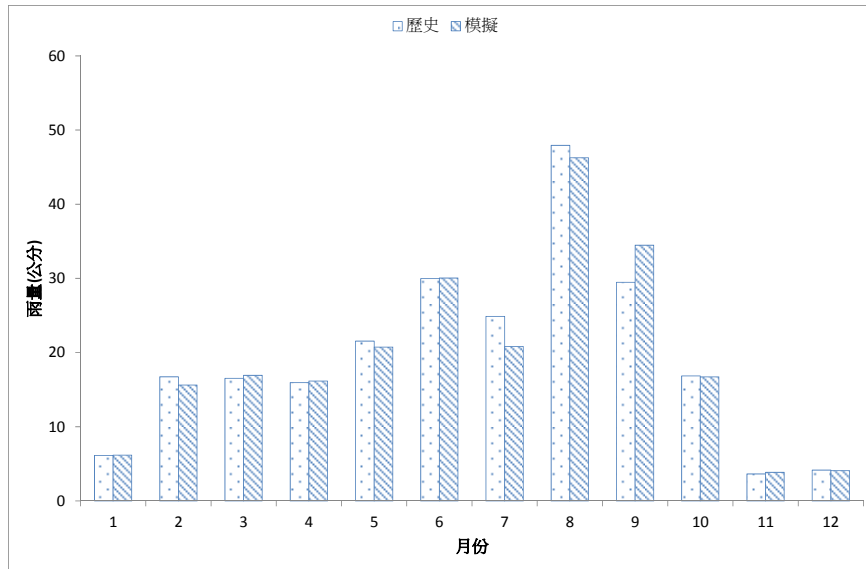


圖 3-17 雙機率分佈氣象合成模式模擬之月平均雨量

(4) 雨型

利用 Huff 方法分析之雨型如表 3-15，第一型之雨型表示降雨尖峰落在前 25%也就是前 6 小時之降雨情況，第二型、第三型及第四型之雨型則分別表示降雨尖峰落在前 50%、75%及最後 25%之降雨型態，配合雨型分析結果，將模式產生之降雨量帶入挑選之雨型，即可求得小時之降雨量。

表 3-15 雨型分析結果

小時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
第一型	4.63	5.07	8.18	10.26	10.22	6.07	4.55	4.38	3.36	3.98	3.73	3.4
第二型	1.98	2.62	3.5	4.25	4.21	5.86	7.74	8.96	8.26	7.04	6.43	6.34
第三型	1.48	2.18	1.56	2.11	2.08	2.48	3.09	3.3	4.14	3.99	4.84	5.83
第四型	0.77	1.66	2.09	2.42	2.41	3.13	3.2	2.13	3.42	3.67	2.4	2.21
小時	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
第一型	4.36	4.42	3.86	3.33	3.15	2.8	1.95	2.11	1.42	1.65	1.99	1.13
第二型	4.42	4.08	4.17	3.43	2.9	2.72	2.63	2.43	2.34	2.05	0.87	0.79
第三型	6.69	7.69	8.13	7.68	6.99	7.25	5.35	3.96	2.83	2.9	1.93	1.53
第四型	1.64	2.47	3.24	5.78	6.6	7.58	9.32	12.53	8.71	6.92	4.2	1.48

(5) 未來降雨量修正

由於高義站之 1980~1999 年之歷史資料在 11-4 月之暴雨發生機率為 0，在利用平均值及標準偏差關係計算暴雨及非暴雨雨量修正時會發生除以零的情況，因此在雨量修正小節改以霞雲 1968~2008 年之雨量資料及 CSMK35 之 A1B 情境之降雨修正比值說明不同修正方法對未來暴雨及非暴雨之雨量修正情形，表 3-16 為計算所需霞雲站之相關資料與 CSMK35 模式 A1B 情境之降雨修正比值。

表 3-16 霞雲站平均雨量、發生機率及降雨比值資料

	u_1	u_2	P_1	P_2	降雨比值
1	0.89	17.51	1.0000	0.0016	0.752
2	1.35	17.51	0.9979	0.0016	0.903
3	1.40	17.51	1.0000	0.0016	0.910
4	1.39	17.51	0.9962	0.0016	1.007
5	1.73	17.45	0.9938	0.0125	1.091
6	2.17	17.45	0.9812	0.0125	1.035
7	1.86	25.49	0.9713	0.0494	1.081
8	2.09	25.49	0.9455	0.0494	1.280
9	2.11	25.49	0.9368	0.0494	0.878
10	1.48	25.49	0.9476	0.0494	0.995
11	0.83	17.51	0.9967	0.0016	0.989
12	0.86	17.51	1.0000	0.0016	0.972

A. 修正比例相同

圖 3-18 及圖 3-19 之非暴雨事件各月份濕天平均雨量修正及暴雨事件雨量修正結果可發現，在暴雨事件平均雨量的修正上，未來的暴雨事件平均雨量在 5-10 月略高於歷史之暴雨事件平均雨量，11-4 月之暴雨事件平均雨量則略低於歷史情況，而在非暴雨事件之濕天平均雨量之推估上，不論在哪一個月份，推估之 μ_1' 皆與歷史 μ_1 接近，顯示利用此法修正之是以修正暴雨時之雨量為主。此外，依據表 3-16 中 CSMK35 之 A1B 情境降雨修正比值來看，在 1-3 月及 9-12 月降雨量在未來都是減少的情形，然而，在非暴

雨平均雨量修正結果中，9 月及 10 月的 μ_1' 較 μ_1 為高，與未來 9 月及 10 月之降雨應減少的情況並不一致。

再由圖 3-20 來看，在各月份濕天平均雨量上，利用此法修正後之各月份濕天平均雨量 (μ_{f_cal}) 量與未來之濕天平均雨量 (μ_{f_real}) 並不符合，在 1-3 月時，推估之濕天平均雨量較未來情況為高，而在 7-10 月時除了與未來情況不符合外，趨勢亦不相同，顯示此方法並不適用於推估未來暴雨平均雨量及不包含暴雨事件之平均雨量。

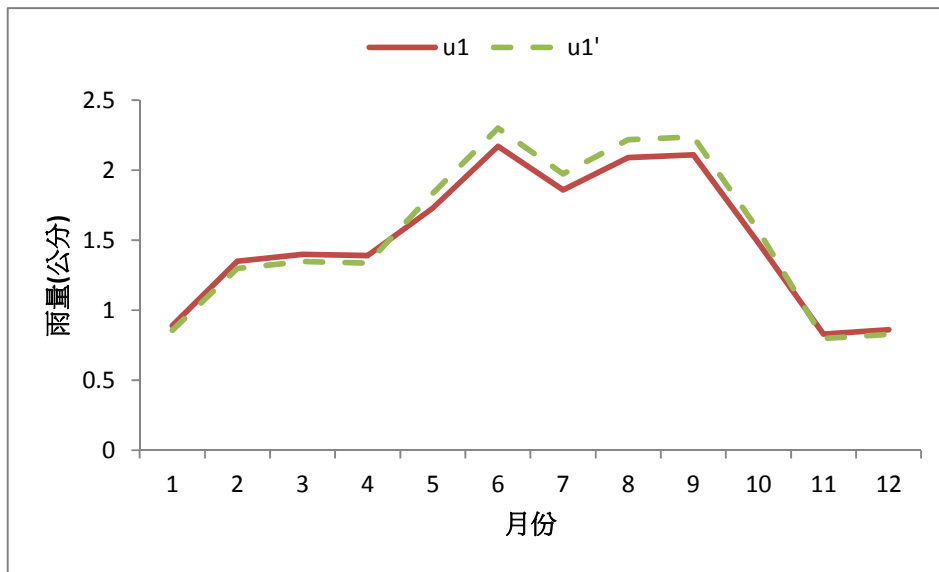


圖 3-18 方法一之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果

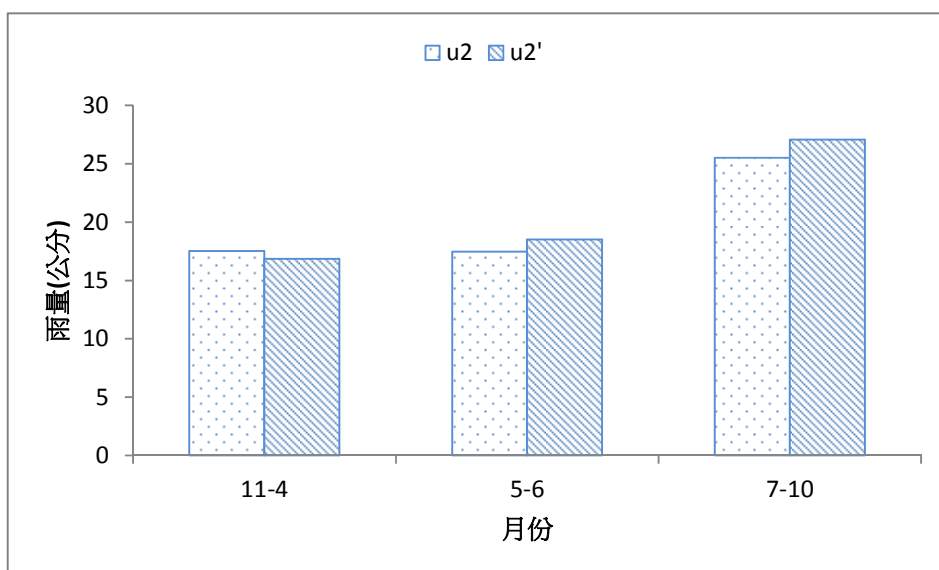


圖 3-19 方法一之暴雨事件平均雨量修正結果

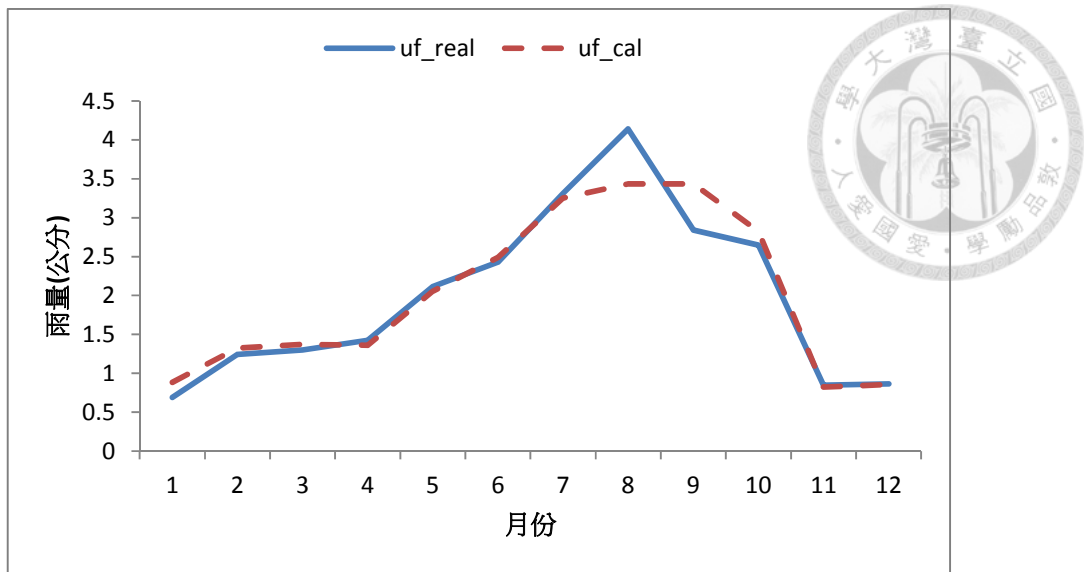


圖 3-20 方法一之未來各月份濕天平均雨量推估

B. 利用平均值及標準偏差回歸關係進行修正

表 3-17 為利用三組平均雨量與標準偏差回歸方程式之係數所推求出之參數 A 及參數 B 之值，以及將所有參數代入式(3-38)後，各時期所計算 μ_2' 之方程式，由於 μ_2' 之求解方程式為一元二次方程式，因此會有兩組不同之 μ_2' 值，利用推估出之 μ_2' 即可推求各月份之 μ_1' 。

表 3-17 三個時期求解 μ_2' 所需之參數及 μ_2' 推估結果

	A	B	方程式	μ_2' (公分)	
				Set 1	Set 2
11-4	7.85	0.0096	$0.05(\mu_2')^2 - 14.32\mu_2' + 294.10 = 0$	50.81	63.53
5-6	4.70	0.0253	$0.14(\mu_2')^2 - 18.2\mu_2' + 270.17 = 0$	17.20	108.14
7-10	15.04	0.2079	$1.16(\mu_2')^2 - 80.88\mu_2' + 1007.22 = 0$	16.54	26.42

配合各月份非暴雨事件之濕天平均雨量修正結果可發現(圖 3-21)，以第二組之暴雨平均雨量修正結果代入所求得各月份非暴雨事件之濕天平均雨量在豐水期可能比枯水期為低，這與歷史情況並不相同，因此第二組之暴雨平均雨量並不適用。而以第一組暴雨平均雨量之修正結果所求得之結果反映出與 CSMK35 之 A1B 降雨修正之類似情況，亦即在 1-3 月及 9-12 月降雨減少，而 4-8 月降雨增加的情況，顯示第一組暴雨平均雨量修正結果較符合未來可能情況。

圖 3-22 及表 3-17 為 μ_2' 推估結果，結果顯示與歷史暴雨平均雨量比較，第二組解會使得暴雨平均雨量增加的幅度過大，而第一組解在 11-4 月易發生暴雨平均雨量增加幅度過大之情形，且在 7-10 月之暴雨平均雨量較歷史情況降低。由於 11-4 月為枯水期，發生暴雨事件之機率在歷史上本來就比較低，且暴雨平均雨量高達 50.81 公分及 63.53 公分較豐水期之 7-10 月之暴雨平均雨量 16.5 公分或 26.4 公分為高並不合理。

分析其原因在於式(3-26)~式(3-28)之間並非獨立之方程式，在方程式具有相依關係的情況下，使得結果出現較大的誤差。綜合來看，利用此方法在枯水期有高估暴雨平均雨量且低估豐水期暴雨平均雨量的情形，再加上枯水期之暴雨平均雨量較豐水期為高，這種現象並不合理，因此雖然在非暴雨之各月份濕天平均雨量上之推估合理，但整體來說，此法並不適合用於後續研究之雨量修正。

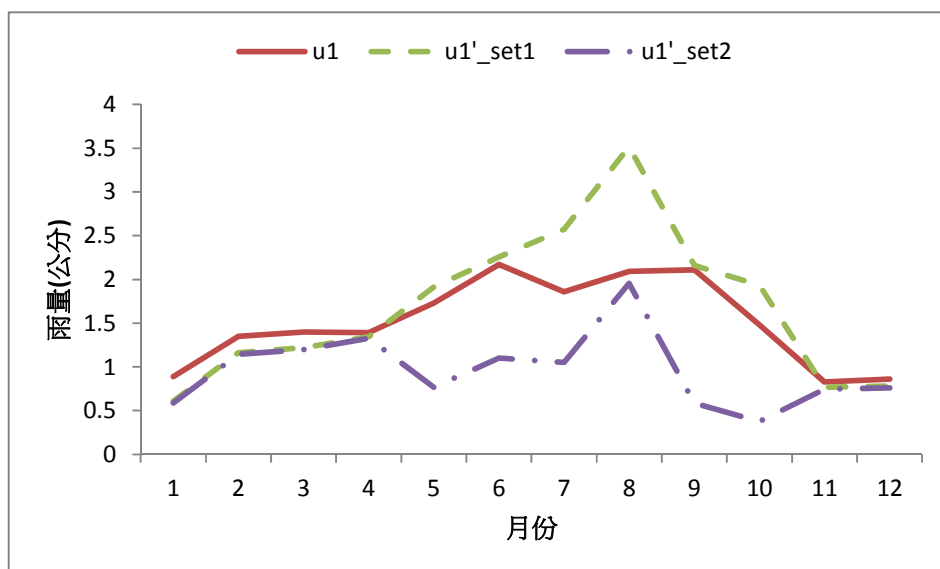


圖 3-21 方法二之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果

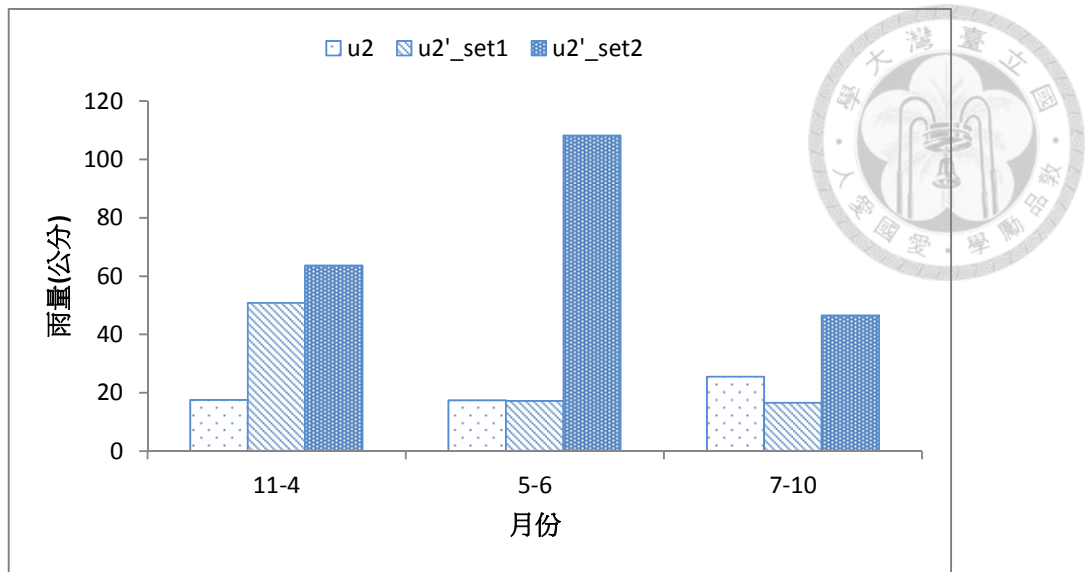


圖 3-22 方法二之暴雨事件雨量修正結果

C. 比值相同

圖 3-23 及圖 3-24 之非暴雨事件各月份濕天平均雨量修正及暴雨事件雨量修正結果可發現，非暴雨事件雨量修正結果與 CSMK35 之降雨修正情境相似，在 1-3 月及 9-12 月未來非暴雨事件平均雨量低於歷史情況，而在 4-8 月則略高於歷史情況，而在暴雨事件平均雨量修正上，在 5-10 月之暴雨事件平均雨量均高於歷史實際情況，符合未來氣候變遷情況下，除了非暴雨事件之平均雨量會增加之外，暴雨事件平均雨量亦隨之提高。由於方法三之修正結果與未來氣候變遷下之情況各月份整體降雨修正情況不論在非暴雨事件平均雨量或暴雨事件平均雨量均較符合，因此在後續研究中，採用方法三修正不同 GCM 模式下不同情境之降雨修正比值，以合成產生未來之日雨量及小時雨量。

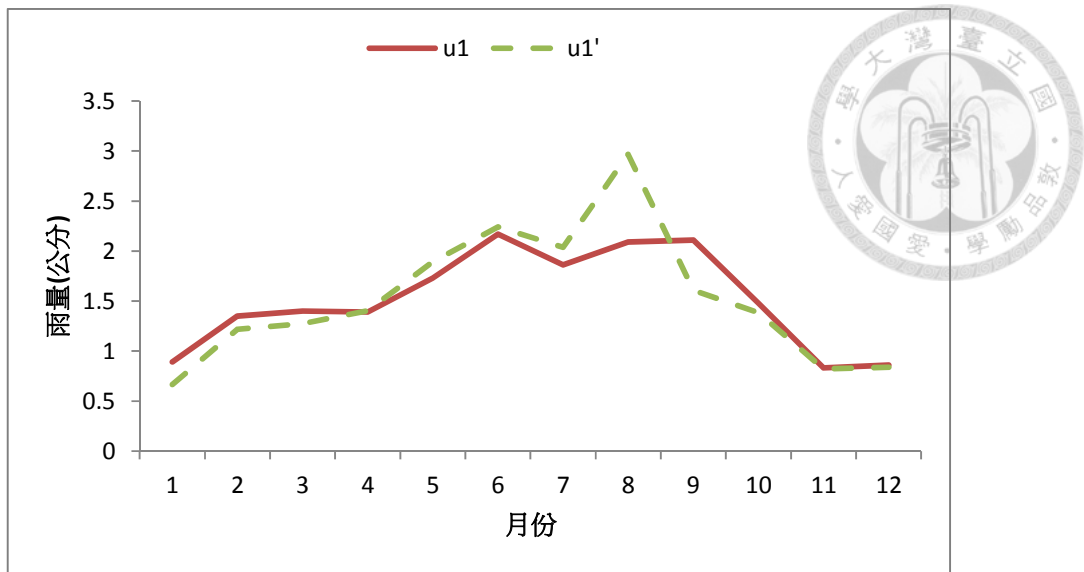


圖 3-23 方法三之非暴雨事件濕天平均雨量修正結果

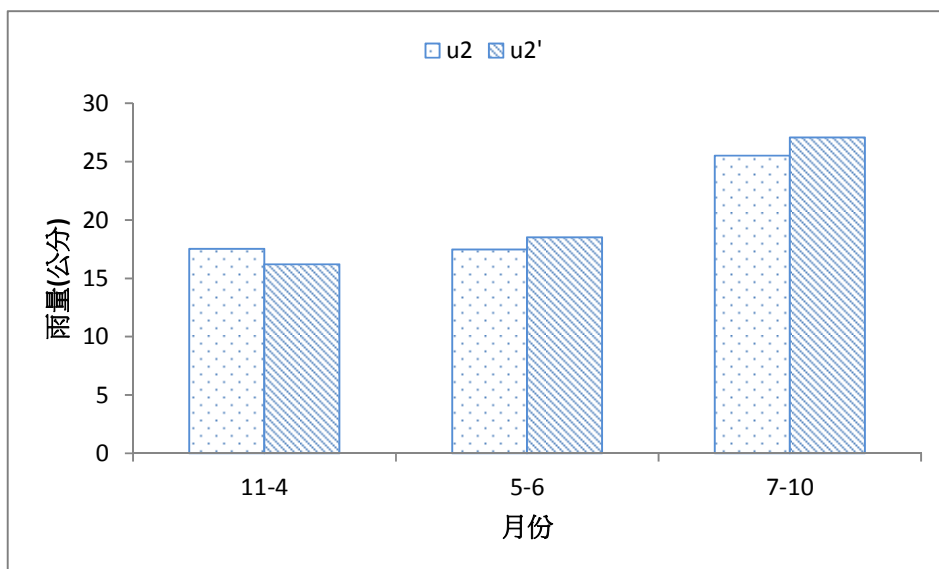


圖 3-24 方法三之暴雨事件雨量修正結果

3. 採用雙機率分佈描述降雨之必要性

由於暴雨降雨機率分佈與非暴雨事件之降雨量機率分佈並不相同，因此採用單一機率分佈來描述降雨事件可能使得為了滿足大雨量而犧牲了較小雨量的機率分佈特性。圖 3-25 為 6 月份採用單一機率分佈之描述結果，單一分佈是用來描述整個 6 月份之降雨累積機率，在圖 3-25 中僅針對小於 13 公分之降雨進行討論，在 6 月時指數分佈並沒有通

過 GOF 檢定，因此可以看出指數分佈在機率較低時會高估雨量而在發生機率較高時則會高估其雨量值，而雙參數韋伯分佈通過 GOF 檢定，但會低估高雨量的部分。圖 3-26 為採用雙分佈描述小於 13 公分部分降雨累積機率，其中指數分佈雖然仍沒有通過 GOF 檢定，但是其描述高估低雨量的情況已經減少，而在高雨量的部分低估的情況也降低了，雙參數韋伯分佈則與採用單一份部描述類似，由於通過 GOF 檢定，因此其可適切地描述小於 13 公分的降雨事件。

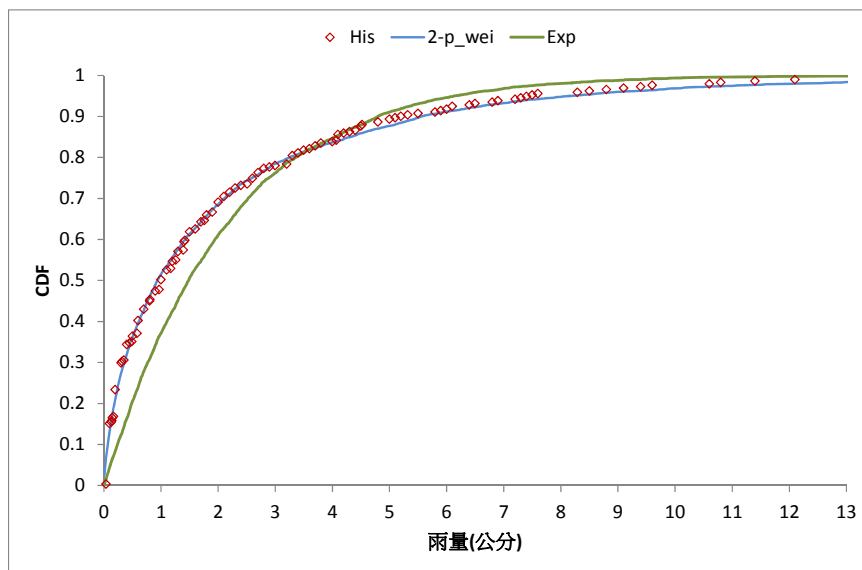


圖 3-25 6 月份採用單分佈描述小於 13 公分之降雨累積機率

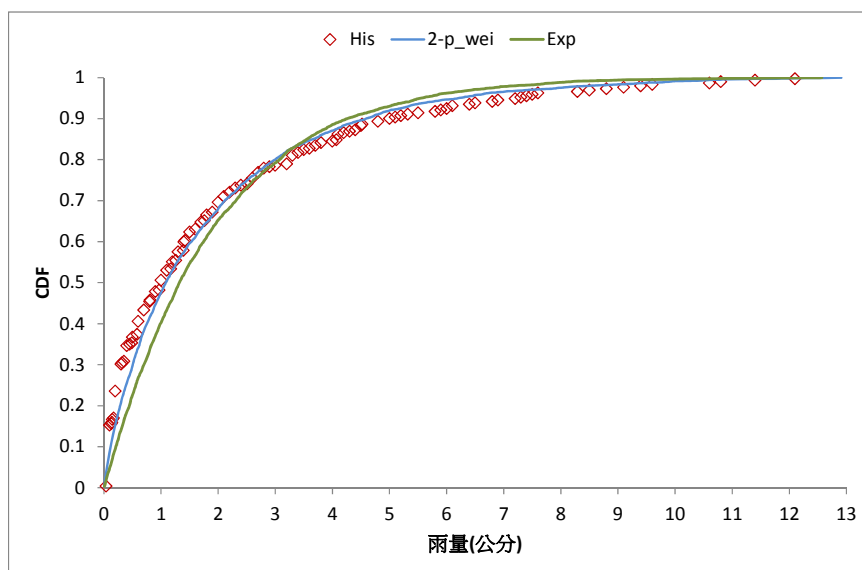


圖 3-26 6 月份採用雙分佈描述小於 13 公分部分之降雨累積機率

4. 氣象合成資料長度分析

在產生氣象合成資料時是藉由歷史資料的統計特性來繁衍產生氣象資料，因此若資料長度太短，則可能因為產生的資料數量不夠而無法維持歷史氣象資料之統計特性，因此研究中利用氣象合成模式繁衍產生資料長度為 10 年、30 年、50 年、100 年、300 年及 500 年共 6 組氣象資料，探討不同資料長度之氣象資料其溫度及降雨統計特性與歷史統計特性之差異。

(1) 平均溫度

表 3-18 為不同資料長度繁衍資料月平均溫度與歷史月平均溫度誤差百分比，當資料長度僅為 10 年時，模擬之月平均溫度與歷史月平均溫度差異較大，最大誤差為 6%，而隨著繁衍資料長度增加，繁衍資料之月平均溫度與歷史溫度逐漸接近，誤差逐漸減少，當資料長度達到 300 年時，各月份之誤差皆小於 2%，可見隨著繁衍資料長度增加，亦即產生的資料數目增加，將使得模擬資料愈能重現歷史資料之統計特性。

表 3-18 不同資料長度月平均溫度誤差百分比

資料長度	10 年	30 年	50 年	100 年	300 年	500 年
1	-3%	1%	0%	1%	1%	0%
2	6%	-5%	1%	0%	-1%	0%
3	-2%	1%	-2%	-1%	-1%	-1%
4	2%	-3%	0%	-1%	-2%	-1%
5	0%	0%	-2%	-1%	-1%	-1%
6	-2%	-1%	0%	-1%	-1%	-1%
7	0%	0%	-1%	0%	0%	0%
8	1%	0%	1%	0%	0%	0%
9	1%	2%	0%	1%	1%	1%
10	0%	-1%	3%	2%	1%	1%
11	1%	2%	0%	1%	1%	1%
12	-4%	-2%	5%	3%	2%	2%

(2) 平均雨量及降雨機率

表 3-19 為不同資料長度下，非暴雨事件各月份濕天平均雨量誤差百分比，隨著繁衍資料長度增加，各月份非暴雨事件之濕天平均降雨量與歷史情況相比較之誤差有逐漸減少的情況，在資料長度僅為 10 年時，最大誤差高達 29.6%，且有 6 個月的誤差超過 10%，而當資料長度為 300 年時，各月份之誤差皆小於 10%，最大誤差僅有 7.2%。在暴雨事件平均雨量部分(表 3-20)，由於在歷史情況中，11-4 月沒有發生日雨量超過 13 公分的情況，因此在模擬時也不會產生暴雨事件，而由於 5-6 月在歷史上僅有兩場暴雨事件，發生暴雨事件之機率並不高，且因暴雨次數較少，因此無法計算暴雨事件之標準偏差，因此 5-6 月份之暴雨事件雨量是以歷史之暴雨事件平均雨量直接推估，不論資料長度為何，其暴雨平均雨量皆相同。而在 7-10 月時，不同資料長度產生之暴雨事件平均雨量差異並不大，最大誤差也僅有 5%。

再由降雨機率來看(表 3-21)，與月平均溫度與各月份濕天及暴雨事件平均雨量有相似的結果，當不論是 $P(W)$ 、 $P(W|W)$ 或是 $P(W|D)$ 皆隨著資料長度的增加而降低與歷史上之 $P(W)$ 、 $P(W|W)$ 或是 $P(W|D)$ 之差值，顯示隨著繁衍資料長度增加，繁衍產生之降雨平均值及降雨機率皆較符合歷史統計特性。

表 3-19 不同資料長度非暴雨事件各月濕天平均雨量誤差百分比

資料長度	10 年	30 年	50 年	100 年	300 年	500 年
1	-29.6%	-7.4%	9.9%	-1.2%	1.2%	3.7%
2	13.2%	6.3%	-11.1%	2.8%	-2.1%	0.7%
3	6.8%	2.3%	-0.8%	-5.3%	1.5%	-1.5%
4	8.6%	1.4%	-1.4%	2.2%	1.4%	-1.4%
5	-8.7%	-2.7%	-2.7%	3.3%	-3.3%	-2.7%
6	-13.8%	-5.3%	-3.7%	-2.1%	-3.2%	-1.1%
7	11.0%	1.3%	-8.4%	-9.0%	-0.6%	-1.3%
8	1.8%	2.4%	3.0%	4.2%	-6.0%	-3.0%
9	-3.9%	-7.3%	-3.4%	6.2%	-2.8%	-3.9%
10	-6.7%	-5.9%	4.2%	-7.6%	1.7%	0.8%
11	17.4%	4.3%	-2.9%	5.8%	4.3%	0.0%
12	-11.6%	5.8%	11.6%	5.8%	7.2%	7.2%

表 3-20 不同資料長度暴雨事件平均雨量(單位：公分)

	His	10 年	30 年	50 年	100 年	300 年	500 年
11-4	0	0	0	0	0	0	0
5-6	27.42	0.00	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42
7-10	25.44	25.60	26.82	24.67	25.85	26.04	26.59

表 3-21 不同資料長度 P(W)差值

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P(w)	10	-0.01	0.00	-0.05	0.02	0.03	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.01
	30	0.01	0.02	0.00	0.02	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	0.01	0.00	-0.02	-0.02
	50	0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.02	0.02	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	0.01	0.00
	100	0.00	-0.01	0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
	300	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.02	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01
	500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01
P(W|W)	10	-0.07	-0.05	-0.06	0.04	-0.01	-0.01	-0.05	-0.07	0.01	0.04	0.08	0.03
	30	0.00	-0.02	0.01	0.00	-0.04	-0.03	-0.05	0.00	-0.02	-0.05	-0.03	-0.08
	50	0.02	-0.04	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.04	-0.02	-0.03	0.01	0.00	-0.02
	100	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01	-0.04	-0.02	-0.01	-0.01
	300	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.03	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	-0.04
	500	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.04
P(W|D)	10	0.01	0.03	-0.02	-0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.00
	30	0.01	0.03	-0.01	0.02	-0.01	-0.01	0.02	-0.01	0.02	0.01	-0.01	0.00
	50	0.01	0.03	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.03	-0.01	0.01	0.00
	100	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
	300	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	500	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00

(3) 降雨量累積機率分佈

而在降雨量之累積機率分佈上(圖 3-27),以 8 月份之非暴雨事件降雨累積機率為例,說明資料長度對降雨累積機率之影響,當資料長度為 10 年時(圖 3-27(a)),由於資料數目少,因此並無法完整描述整個降雨機率,所產生之最大降雨量也僅有 9.08 公分,遠低於非暴雨事件最大降雨量 13 公分,隨著資料長度增加(圖 3-27(b)~ 圖 3-27(f)),模擬產生之降雨累積機率分佈與歷史機率分佈愈來愈接近,且最大降雨量也越接近 13 公分,

當資料長度為 300 年時，最大降雨量為 12.9 公分與，且降雨累積機率分佈也與歷史降雨累積機率符合，顯示模擬資料長度越長越能符合歷史特定，亦說明模擬資料長度至少應超過 100 年。

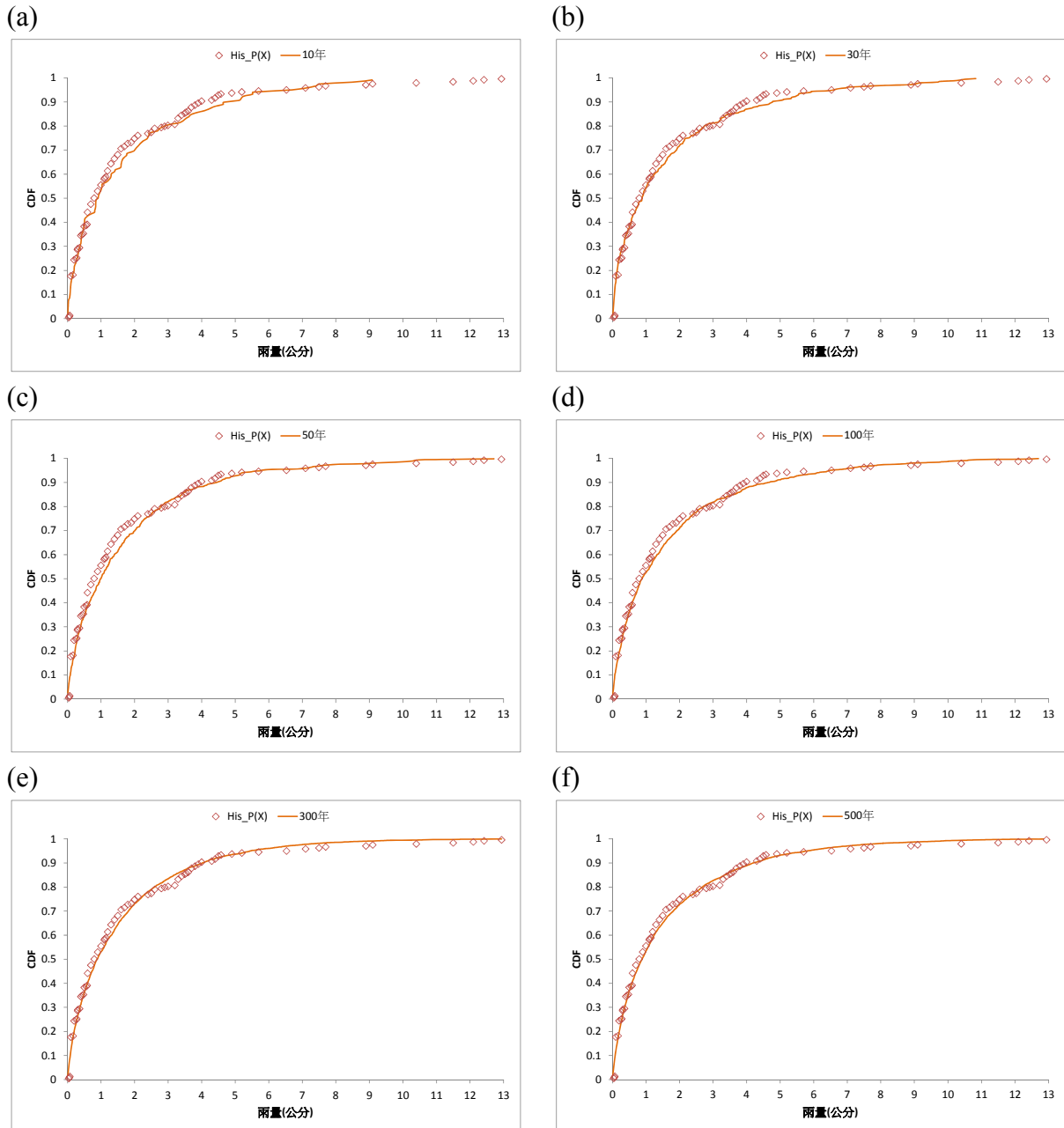


圖 3-27 不同資料長度之 8 月份非暴雨事件降雨量累積機率分佈曲線，(a)10 年，(b)30 年，(c)50 年，(d)100 年，(e)300 年，(f)500 年

(4) 各月份最大雨量

表 3-22 為同時考慮暴雨及非暴雨事件時，各月份最大雨量資料，由前述之討論可知在 11-5 月歷史上並沒有發生日降雨量超過 13 公分之暴雨事件，因此模擬產生之最大雨量則至少應重現歷史之最大降雨量，然而，當資料長度為 10 年時，1 月份之最大雨量為 2.9 公分，而在其他月份亦有相同之情形發生，顯示資料長度過短無法重現歷史上可能發生過的降雨情形。而在 6-10 月，是可能發生暴雨事件的，因此最大的降雨量可能超過歷史上曾經發生過的降雨量，配合表 3-20 可看出，除了資料長度為 10 年無法產生暴雨事件外，其他不同之資料長度皆可產生暴雨事件，且最大雨量為歷史與事件之平均雨量；在 7-10 月時，當資料長度過短時，亦無法重現歷史上曾經發生過之最大雨量，而當資料長度增加時，除了可重現歷史上可能發生的最大雨量外，亦產生歷史未曾發生但可能發生之極端降雨量。

表 3-22 不同資料長度各月份最大雨量

	歷史	10 年	30 年	50 年	100 年	300 年	500 年
1	7.4	2.9	4.3	8.5	7.5	8.0	9.8
2	9.9	9.0	10.5	12.9	12.6	12.8	12.5
3	8.8	6.6	10.7	9.2	9.2	12.5	12.9
4	7.8	10.7	9.8	10.1	10.6	12.9	11.0
5	11.3	11.2	9.8	10.6	11.9	12.8	13.0
6	39.8	8.5	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4
7	66.2	34.3	51.7	65.5	51.1	62.5	72.8
8	50.5	65.6	66.7	91.0	68.1	77.0	90.5
9	19.1	32.1	70.7	41.8	67.4	66.4	149.5
10	44.7	29.8	54.0	48.8	72.4	60.1	79.1
11	5.1	3.6	4.1	6.8	5.5	7.8	7.1
12	8.2	4.7	6.8	8.0	11.6	10.5	12.8

5. 暴雨事件雨量門檻值設定

目前研究中採用之暴雨事件標準為日雨量 13 公分，當日雨量超過 13 公分時則視為暴雨事件，然而，採暴雨事件雨量門檻值設定對結果可能造成影響，因此研究中以中央

氣象局定義之 24 小時累積雨量達 50 毫米以上，且其中至少有 1 小時雨量達 15 毫米以上之降雨現象之大雨事件及 24 小時累積雨量達 200 毫米以上之大豪雨事件為基礎，設定暴雨事件雨量門檻值為日雨量超過 5 公分及 20 公分之情況，產生 300 年長度之氣象資料，討論不同門檻值對結果之影響。

(1) 平均雨量

在非暴雨事件各月份濕天平均雨量分析結果上(表 3-23)，不同門檻值之影響差異並不大，原因在於資料長度相同，因此皆可反映歷史特性，此外，門檻值的設定影響較大的是暴雨事件之統計特性，對於非暴雨事件之統計特性之影響較低。而在暴雨事件上(表 3-24)，當門檻值為 5 公分時，表示超過日雨量 5 公分之降雨事件皆視為暴雨事件，因此在 11-4 月亦可能發生暴雨事件，此外不論是門檻值為何，暴雨事件之平均雨量皆與歷史事件相近。

表 3-23 不同門檻值之歷史與模擬雨量非暴雨事件各月之濕天平均雨量

	crireria=5		crireria=13		crireria=20	
	his	sim	his	sim	his	sim
1	0.77	0.70	0.81	0.82	0.81	0.84
2	1.21	1.01	1.44	1.41	1.44	1.44
3	1.18	0.98	1.32	1.34	1.32	1.33
4	1.23	1.01	1.39	1.41	1.39	1.42
5	1.14	0.99	1.50	1.45	1.50	1.49
6	1.25	1.00	1.89	1.83	1.94	1.93
7	1.11	0.94	1.55	1.54	1.63	1.61
8	1.22	0.98	1.67	1.57	2.14	2.01
9	1.10	0.97	1.78	1.73	2.45	2.34
10	0.95	0.86	1.19	1.21	1.57	1.55
11	0.65	0.64	0.69	0.72	0.69	0.71
12	0.63	0.60	0.69	0.74	0.69	0.72

表 3-24 不同門檻值之歷史與模擬暴雨事件平均雨量

	門檻值=5		門檻值=13		門檻值=20	
	his	sim	his	sim	his	sim
1	6.79	6.76	0	0	0	0
2	8.30	8.13	27.42	27.42	39.80	39.80
3	15.22	16.73	25.44	26.04	35.24	35.72

(2) 降雨累積機率分佈

圖 3-28 為不同門檻值之 8 月之暴雨及非暴雨事件之降雨累積機率分佈，由於繁衍產生之氣象資料長度為 300 年，因此不論是何種門檻值應該皆可產生符合歷史特性之降雨累積機率曲線。由圖 3-28(a)及圖 3-28 (b)門檻值為 5 公分之結果來看，由於門檻值較低，因此在非暴雨事件之降雨數目較低，因此較無法產生符合歷史特性之累積機率曲線，反之暴雨事件則因為資料數目較多，因此繁衍產生之暴雨事件資料較符合歷史特性。圖 3-28(a)、圖 3-28(c)及圖 3-28 (e)門檻值分別為 5 公分、13 公分及 20 公分之非暴雨事件降雨累積機率分佈結果顯示，門檻值過低將可能使得非暴雨事件資料過少，導致無法適切地描述歷史降雨情形；而圖 3-28(b)、圖 3-28(d)及圖 3-28 (f)門檻值分別為 5 公分、13 公分及 20 公分之暴雨事件降雨累積機率分佈結果則顯示，當門檻值較高時，暴雨事件資料數目將隨之降低因此可能造成挑選適當機率分佈上的困難，且可能因為資料數目過少而無法挑選適合之機率分佈。

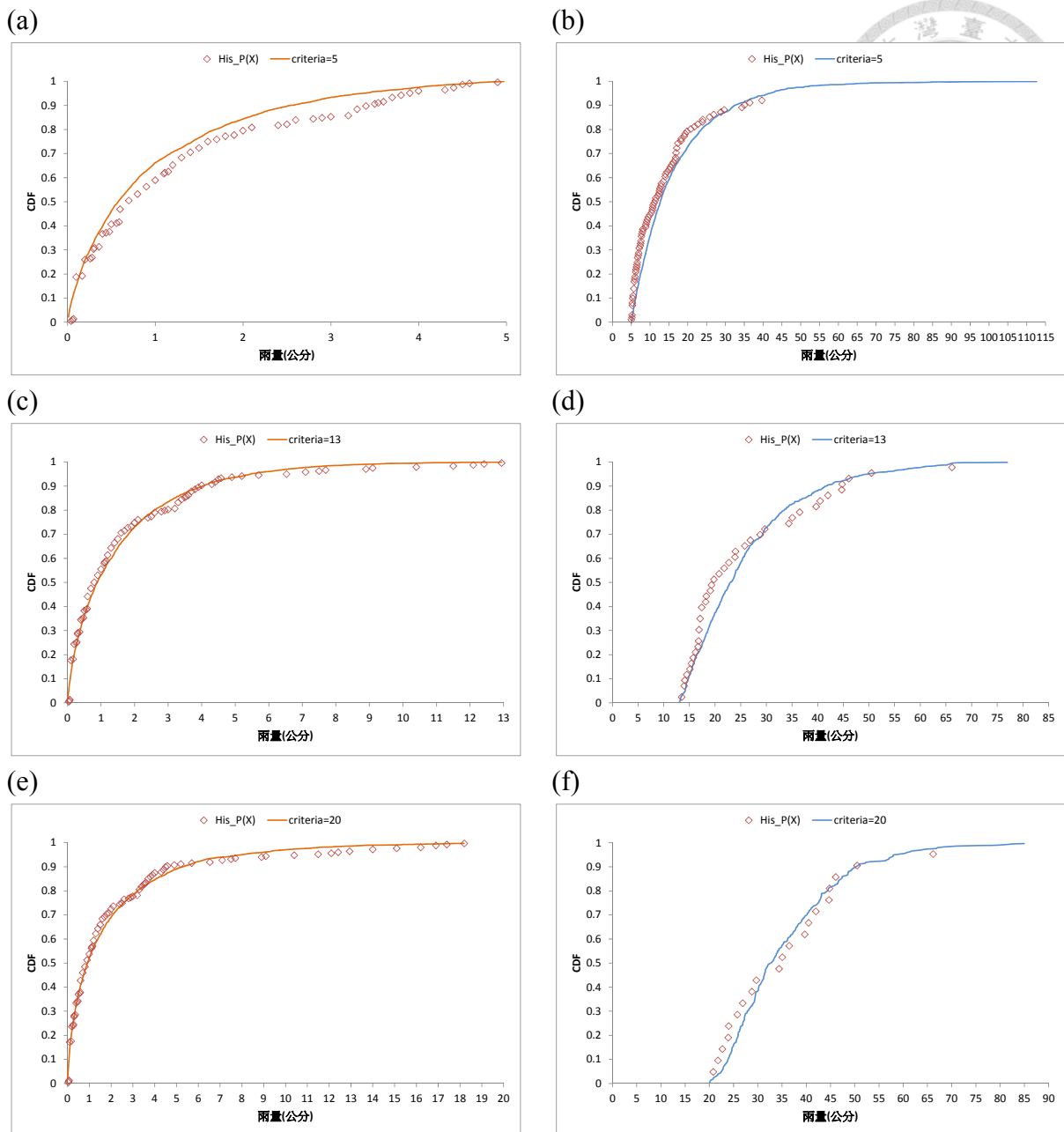


圖 3-28 不同暴雨門檻值之 8 月份降雨量累積機率分佈曲線及 7-10 月暴雨事件降雨量與累積機率分佈曲線，(a)門檻值為 5 公分非暴雨事件累積機率，(b)門檻值為 5 公分暴雨事件累積機率，(c)門檻值為 13 公分非暴雨事件累積機率年，(d) 門檻值為 13 公分非暴雨事件累積機率，(e)門檻值為 20 公分非暴雨事件累積機率，(f)門檻值為 20 公分非暴雨事件累積機率

(3) 各月份最大雨量

表 3-25 同時考慮暴雨及非暴雨事件時各月份最大雨量資料，當門檻值為 5 公分時，依據歷史各月份最大雨量分析結果可知，各月份皆可能發生暴雨事件，因此各月份之最大雨量皆大於歷史最大雨量，而當門檻值為 20 公分時，11-5 月及 9 月皆不可能發生暴雨事件，因此各月份之最大降雨有可能與歷史最大降雨接近，亦可能高於歷史最大雨量，然而，當門檻值較低時，表示發生暴雨事件的機率較大，發生暴雨事件的次數較多，因此可能產生的各月份最大雨量可能遠超過歷史可能發生的雨量，以門檻值為 5 公分為例，根據分析結果顯示在 5 月份之最大可能雨量為 57.6 公分，然而歷史最大雨量僅有 11 公分遠遠大於門檻值為 13 公分及 20 公分之最大雨量為 12.8 公分及 16.2 公分，顯示門檻值之挑選對最大雨量為相當重要的因素。

表 3-25 不同門檻值之歷史與模擬各月份最大雨量

	his	crireria=5	crireria=13	crireria=20
1	7.4	9.94	8.04	8.81
2	9.9	10.85	12.79	16.41
3	8.8	9.77	12.54	13.5
4	7.8	12.81	12.91	12.91
5	11.3	57.63	12.84	16.18
6	39.8	101.22	27.42	39.8
7	66.2	84.49	62.53	64.48
8	50.5	98.21	76.95	84.98
9	19.1	112.62	66.39	19.64
10	44.7	94.02	60.05	68.87
11	5.1	8.8	7.79	10.11
12	8.2	11.03	10.45	10.62

3.5.3 小結

1.GCMs 挑選

GCMs 輸出資料為進行氣候變遷衝擊評估之重要依據，但 GCMs 提供之輸出資料為大範圍平均特性，因此需先分析 GCMs 提供之輸出資料是否可符合研究區域之統計特性


或降雨趨勢，因此以最靠近研究區域之網格點資料為主，分析不同 GCMs 與研究區域雨量站之關係，以挑選適當之 GCMs 模式。

根據研究結果顯示，若以 IPCC 網站上提供之各 GCMs 之輸出資料進行分析時，能提供新店溪流域合理現況推估之環流模式排序前三名為 NCCCSM、MPEH5 及 GFCM2.1 三個模式；而能提供大漢溪與頭前溪流域合理現況推估之環流模式排序前四名則為 INCM3、MRCGCM、MPEH5 與 NCCCSM。綜合而言，排名法與缺點扣分法均能挑選出適合研究區域之大氣氣環流模式，但若僅使用排名法評析 GCMs 的良劣，結果將有可能出現盲點，如 MIMR 模式在全年相關性表現不佳，卻因枯豐水期 RMSE 表現良好，進而成為具有反映研究區域特性之模擬能力的模式；而缺點扣分法之門檻值的設定將為一重要關鍵，結果顯示，若門檻值設定過高或過低將可能因所有的相關係數或 RMSE 都高於或低於門檻值，若門檻值鑑別力不佳將導致無法挑選出適合之 GCMs。

而利用「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」提供之 GCMs 進行挑選時，先由 TCCIP 計畫依據東亞季風特性所挑選之 9 個模式中進行挑選，再依據豐枯水期雨量改變特性分成四類之後，挑選豐水期雨量減少、枯水期雨量增加，豐枯水期雨量皆減少，豐水期雨量增加、枯水期雨量減少之 GCMs 模式。再由排名法及缺點扣分法挑選 GCMs 模式，分析結果顯示排名法雖然可以訂出不同 GCMs 模式之排序，但由缺點扣分法卻無法再進一步挑選，原因在於 TCCIP 計畫所提供之 GCMs 基期資料已經經過誤差修正，不同 GCMs 之間的差異並不大，由 GCMs 輸出資料與測站之相關性以及豐水期與枯水期 RMSE 亦可看出不同的 GCMs 間之差異並不大，因此，並無法再進一步由 5 個 GCMs 中挑選出表現更佳的 GCMs，而在未來進行氣候變遷之各項評估時，以 CSMK35、GFCM21、MIMR、MPEH5 及 MRCGCM 共 5 個模式進行後續分析評估。

由於經過誤差修正後，不同 GCMs 之溫度及雨量資料會校正至與歷史溫度及降雨特性相同，因此不同 GCMs 與測站之相關性極 RMSE 值均接近，故無法透過此法進行 GCMs 模式之挑選，然而網格點之歷史氣象資料與測站之歷史氣象資料間是否亦具有相同之統計特性仍須加以考量，因此建議在未來研究中，可先挑選出 GCMs 後，再針對網格點之資料與測站資料之資料進行誤差修正，以獲得未來氣象資料的改變情境。

2. 氣象合成模式



傳統的氣象合成模式僅能利用單一分佈的函數描述降雨，研究中所發展之不同時間之尺度氣象合成模式，將暴雨事件及非暴雨事件分別利用不同函數描述降雨，在暴雨事件發生時，亦納入雨型考量，產生小時時間尺度之雨量資料。利用不同函數描述降雨雖然可以維持降雨的統計特性，繁衍產生之氣象資料其濕天平均雨量與歷史濕天平均雨量之誤差並不大，但在各月份之最大雨量上卻有極大之差異，因此應先以最適度檢定，分析何種函數可較適切之描述歷史雨量，再以通過最適度檢定之函數繁衍產生雨量，以獲得更符合歷史特性之雨量資料。研究中在描述雨量資料時，以 12 個月分中通過最多月份通過最適度檢定之函數來描述各月份的降雨情形，未來建議可依據最適度檢定結果，各月份採用不同之機率函數描述降雨情形。

研究中以 13 公分為門檻值區分降雨事件為暴雨事件或一般降雨事件，然而，不同的門檻值對結果造成影響，且不同地區的門檻值也可能有所不同，此外，由於模式的假設與資料數目不足，因此連續兩天雨量皆超過 13 公分的情況在研究中視為兩場不同之降雨事件。研究中假設暴雨事件開始時間為每日零時，且延時為 24 小時之暴雨事件，然而暴雨事件起始時間並不一定為每日零時，持續時間也不一定為 24 小時，因此未來之氣象合成模式建議可納入可決定暴雨開始時間及暴雨延時，以更符合真實之降雨情形。此外，由於模式中需要兩個隨機變數產生暴雨事件，因此若繁衍產生之資料年限較短，如 10 年或 30 年之資料，則可能因為產生資料數目較少而無法維持歷史雨量之統計特性，建議繁衍資料長度至少應為 100 年。

第四章 水文模式



水文模式主要以水平衡進行流量計算，其水平衡收支關係如圖 4-1。當降雨發生後，一部分之降雨會入滲至土壤中，另一部分之降雨則形成地表逕流直接流入河川，入滲至土壤之雨量可補充為未飽和含水層之含水量，若淺層未飽和層含水量超過田間含水量則有滲漏量產生，最後淺層飽和含水層將產生基流量，地表逕流量與基流量之和即為河川流量。

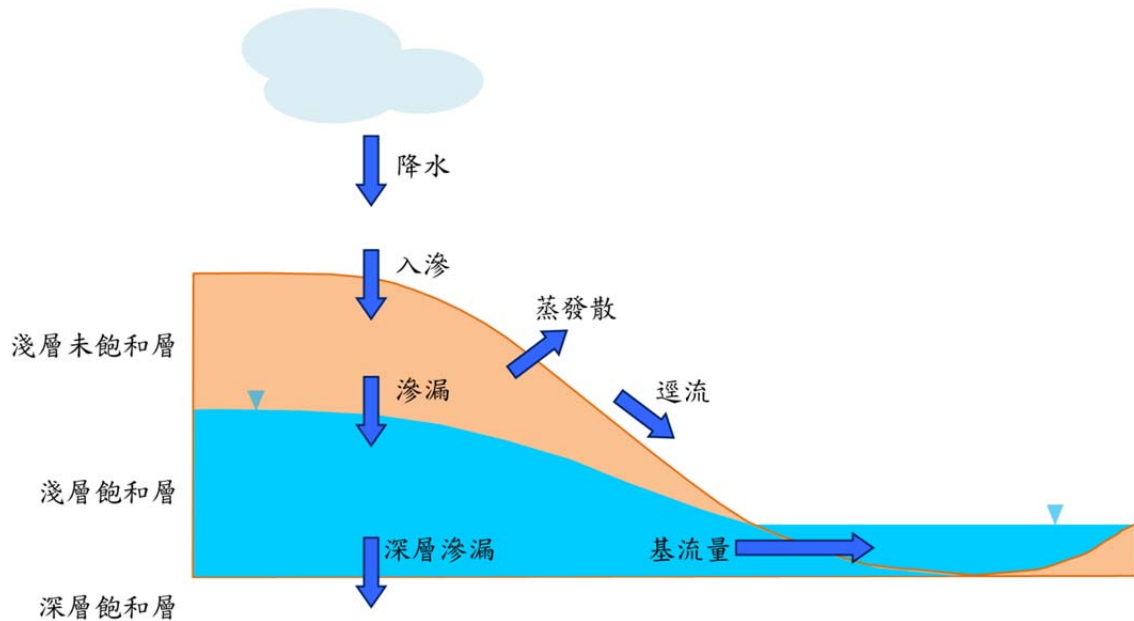


圖 4-1 水文模式水平衡關係示意圖

為了分析不同水文歷程描述方法對河川流量之影響，研究以先計算地表逕流再計算入滲量之逕流優先計算模式及先考慮入滲再計算地表逕流之入滲優先計算模式分別模擬河川流量，逕流優先計算模式採用 GWLF(Generalized Watershed Loading Functions)模式，GWLF 先計算地表逕流量，多餘之水量視為入滲量進入土壤，透過水平衡關係計算土壤中水量流動情形；入滲優先計算模式採用本研究發展之 NTU_WH (NTU-Watershed Hydrological Model)模式，NTU_WH 模式先計算入滲量，多餘之水量則為地表逕流量，透過水平衡關係描述土壤中水分流動情形。此外，研究中亦以 HTU_WH 為基礎，建立

不同時間尺度之水文模式，當暴雨事件發生時，配合小時雨量資料模擬小時流量，而非暴雨事件時，則模擬產生日流量資料。

GWLF 水文模式、入滲優先模式與不同時間尺度之入滲優先模式分別說明如 4.1 節、4.2 節及 4.3 節，而不同模式所需參數以及參數檢定方法說明於 4.4 節，4.5 節則針對模式參數檢定驗證結果進行說明，4.6 節針對兩個模式模擬結果進行比較、連續七天低流量比較、不同時間尺度水文模式模擬結果比較及不同氣象合成模式對流量影響比較。

4.1 GWLF 水文模式

GWLF(Generalized Watershed Loading Functions)模式為 Haith 及 Shoemaker(1987)所發展之模式，該模式為考慮影響流量物理因素之流量分析模式，能反映氣候及土地利用改變對流量之影響，其參數決定可依據集水區土地利用以及土壤特性決定，並不需要檢定過程，因此可降低結果之不確定性。在 GWLF 模式中將集水區由上而下分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分之水平衡關係求得。

1. 地表

當雨水降至地面之後，一部份則形成地表逕流，並直接流入河川；另一部份之降雨經由入滲至未飽和含水層中。其中降雨、入滲、與地表逕流之關係可以式(4-1)表示：

$$I_t = R_t - Q_t \quad (4-1)$$

其中 I_t 是入滲量(cm/day)， R_t 是降雨量(cm/day)， Q_t 則為地表逕流(cm/day)。在 GWLF 中，採用 Curve Number 方法(Ogrosky and Mockus,1964)計算地表逕流，合理地反應土地利用方式及土壤水分含量對地表逕流之影響。地表逕流量可透過式(4-2)及式(4-3)計算：

$$Q_t = \frac{(R_t - 0.2W_t)^2}{(R_t + 0.8W_t)} \quad (4-2)$$

$$W_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad CN_t \leq 100 \quad (4-3)$$

式(4-3)中，CN 為 Curve Number，其值因土地利用、土壤質地或排水特性及臨前土壤水分而不同(Tung & Haith, 1995)。當已知臨前土壤水分愈高則入滲越少，亦即愈多水分可形成逕流，此時 CN 值愈大；反之，臨前水分少，則入滲較大，逕流較小，所以 CN 值較小。SCS 將臨前土壤水分影響之 CN 值分成三類，CN1 為乾燥情況，CN2 為平均情況，CN3 為濕潤情況，而 CN2 值可由附錄 1 表 1 土壤分類，表 2 不同土壤對應之 CN 值查詢得，由於臨前水分較難推估，常以 5 天臨前降雨量(A_t)來代替，求得 A_t 值之後可根據圖 4-2 內差，透過式(4-4)求得 CN 值，圖 4-2 中 AM1 及 AM2 會隨季節不同而不同，生長期及非生長期之 AM1 及 AM2 列於表 4-1，CN1 與 CN3 之值則可根據 Chow et al.(1988)，以式(4-5)及式(4-6)決定。

表 4-1 AM1 與 AM2 值

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

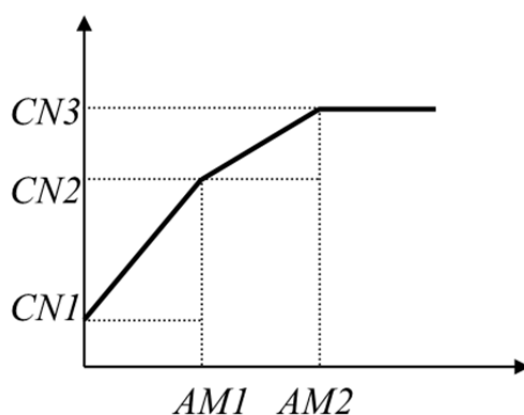


圖 4-2 CN 值與臨前水分內插關係圖

$$CN = \begin{cases} CN1 + \frac{(CN2 - CN1)}{AM_1} A_t & \text{if } A_t \leq AM1 \\ CN2 + \frac{(CN3 - CN2)}{AM2 - AM1} (A_t - AM1) & \text{if } AM1 < A_t \leq AM2 \\ CN3 & \text{if } AM2 < A_t \end{cases} \quad (4-4)$$

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (4-5)$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (4-6)$$



2. 未飽和含水層

經由入滲之水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層之土壤水分超過土壤最大含水量時，其部分水分將滲漏至淺層飽和含水層。未飽和層之土壤水分亦可能因蒸發散而被帶離土壤。未飽和層之水平衡式可以式(4-7)表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (4-7)$$

式(4-7)中 U_t 是未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量(cm/day)， ET_t 是蒸發散量(cm/day)，而 PC_t 則為滲漏量(cm/day)，亦即由未飽和含水層滲漏至飽和含水層之水量。

(1) 蒸發散量

蒸發散量(ET_t)估算的方法可以潛勢能蒸發散量(PET_t)乘上一個覆蓋係數(K_{ct})，但其易受限於未飽和層之可利用之水分，因此取計算之蒸發散量與未飽和層水分之較小值作為估算之蒸發散量(式(4-8))。

$$ET_t = \text{Min}[K_{ct} \times PET_t, U_t + I_t] \quad (4-8)$$

一般在潛勢能蒸發散量之計算上常使用 Penman 公式，但其所需資料較多，包含風速及大氣濕度(或露點溫度)等，然而在未來考量氣候變遷情況下所需資料取得不易或不確定性太高，再加上 IPCC 提出在氣候變遷衝擊研究中，若資料不足應利用需要參數較少之較簡單模式，因此由 Haman 公式(Haman, 1961)(式(4-9))計算潛勢能蒸發散量。

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{0t}}{T_t + 273} \quad (4-9)$$

式(4-9)中 PET_t 是第 t 天潛能蒸發散量, H_t 是在第 t 天的日照時間(時), e_{0t} 是飽和蒸氣壓, T_t 是日平均溫度($^{\circ}\text{C}$)。飽和蒸氣壓(e_{0t})是溫度函數, 可由式(4-10)決定之:

$$e_{0t} = 33.8639 \left[(0.00738T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8T_t + 4.8| + 0.00136 \right] \quad (4-10)$$

(2) 滲漏量

未飽和含水層滲漏至淺層飽和含水層之水量(PC_t)可由式(4-11)算出:

$$PC_t = \text{Max} \left[0, U_t + I_t - ET_t - U^* \right] \quad (4-11)$$

U^* 是最大土壤水分容量, 即田間含水量減去凋萎點間之水分容量, 由此可知滲漏量即是指高於田間含水量經由重力向下排出至淺層飽和層之水分。

3. 淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之土壤水分含量(S_t), 可由飽和含水層排出至河川之基流量(G_t)、滲漏量、及深層滲漏量(D_t)決定(式(4-12)), 此外, 在模式中假設淺和飽和層為一線性水庫, 因此基流量可以式(4-13)計算求得, 而深層滲漏量則假設為零。

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (4-12)$$

$$G_t = \gamma \times S_t \quad (4-13)$$

4.2 NTU_WH 模式

NTU_WH (NTU-Watershed Hydrological Model)模式為入滲優先計算水文模式, 模式分為模擬日流量之 NTU_WH_DO (NTU-Watershed Hydrological Model_Daily Only)及模擬小時流量之 NTU_WH_HO (NTU-Watershed Hydrological Model_Hourly Only)兩個模式, NTU_WH_DO 及 NTU_WH_HO 除了在時間尺度上考慮不同外, 在水平衡考量之模擬機制皆相同。模式中利用 Green-Ampt 法計算入滲量, 扣除入滲量之降雨量則形成地表逕

流直接進入河川，入滲至土壤之雨量則可補充未飽和層之含水量，而淺層非飽和層之水量若超過田間含水量時，則透過滲漏方式補充淺層飽和含水層之含水量，淺層飽和層之排水量則為基流量，河川流量則為地表逕流量與基流量之和，此外，在 NTU_WH 模式中並未考慮窪蓄與截留對流量之影響。NTU_WH 模式與 GWLF 模式相同，將集水區由上而下分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分之水平衡關係求得。

1. 地表

當雨水降至地面之後，NTU_WH 模式首先利用 Green-Ampt 入滲模式計算入滲量，考慮土壤含水量與最大可入滲量決定入滲量後，未成為入滲量之降雨量則視為地表逕流量，降雨、入滲、與地表逕流之關係可以式(4-14)表示：

$$Q_i = R_i - I_i \quad (4-14)$$

其中 I_i 是入滲量(cm/day)， R_i 是降雨量(cm/day)， Q_i 則為地表逕流(cm/day)。

(1) 入滲量

入滲量以 Green 及 Ampt (1911)推導出具有物理觀點之入滲方程式計算，其入滲模型如圖 4-3 所示，根據圖 4-3 可知 Green-Ampt 公式假設濕鋒(wetting front)下降為一平整的邊界，且濕鋒通過的土層(濕鋒與土壤表層之間的土層)即為飽和土壤。

Green-Ampt 模式中所計算的入滲率(infiltration rate, f)可以利用如式(4-15)之達西定律(Darcy's law)來推導，而若以若入滲率以 f 表示，則式(4-15)可改寫為式(4-16)。

$$q = -K_{sat} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4-15)$$

$$f = \frac{dF(t)}{dt} = K_{sat} \frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \quad (4-16)$$

式(4-15)中， q 為單位面積之通量， h 為水頭， K_{sat} 為飽和水力傳導係數。假設濕鋒通過之土層為飽和，且土表並未積水之情況，則式(4-16)可改寫為式(4-17)之形式。

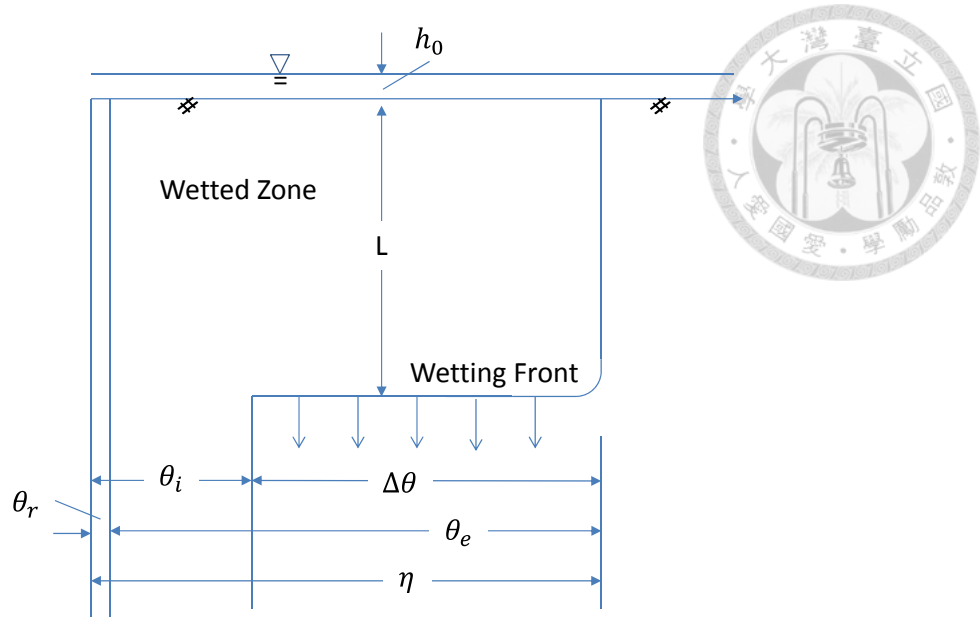


圖 4-3 Green-Ampt 入滲模型(Chow et al., 1988)

$$\frac{dF(t)}{dt} = K_{sat} \left(\frac{\psi \Delta \theta + F(t)}{F(t)} \right) \quad (4-17)$$

式(4-17)中， $\Delta \theta$ 為飽和含水量與初始含水量之差值， ψ 為吸力水頭(suction head)，對 t 積分，以求出在 $t + \Delta t$ 時刻之累積入滲量，積分後則以式(4-18)表示。

$$F(t + \Delta t) = F(t) + K_{sat} \Delta t + \psi \Delta \theta \left\{ \ln [F(t + \Delta t) + \psi \Delta \theta] - \ln [F(t) + \psi \Delta \theta] \right\} \quad (4-18)$$

透過 t 時刻之累積入滲量 $F(t)$ 推求出 $t + \Delta t$ 時刻之累積入滲量 $F(t + \Delta t)$ ，但式(4-18)之累積入滲量 $F(t + \Delta t)$ 為非線性之方程式不能直接求出，因此透過牛頓法求解 $t + \Delta t$ 時刻之累積入滲量，再推求 $t + \Delta t$ 時刻之最大可入滲量 (f_{GA})，透過式(4-19)可分別決定不同降雨情況及土壤水分含量時之入滲量。

$$I_t = \begin{cases} 0 & \text{if } R_t = 0 \\ \text{Min}(K_{sat}, R_t) & \text{if } R_t > 0 \text{ and } \theta = \eta \\ \text{Min}(f_{GA}, R_t) & \text{if } R_t > 0 \text{ and } WP \leq \theta < F_f \end{cases} \quad (4-19)$$

由式(4-19)中可知，當降雨量為 0 時入滲量亦為 0；而若降雨量不為 0 且土壤水分等於土壤飽和含水量時，則入滲量為飽和水力傳導係數 (K_{sat}) 與降雨量較小之值；若降雨

量不為 0 且土壤水分介於田間含水量(F_f)及凋萎點(WP)之間,入滲量為透過 Green-Ampt 法求得之最大可入滲量(f_{GA})與降雨量之較小值。

為了考慮不同土地利用對入滲量的影響,模式中以 Nearing 等人(1996)發展之公式利用 CN 值及飽和水力傳導係數(K_{sat})計算有效水力傳導係數(K_e),有效水力傳導係數計算公式如式(4-20)所示,式(4-20)中之 CN 值計算方式與 GWLF 模式中 CN 值計算方式相同,可利用土壤分類及土地利用類型由附錄 1 表 1 至表 5 查詢,再由式(4-4)至式(4-6)決定 CN 值。

$$K_e = \frac{56.82K_{sat}^2}{1 + [0.051 \exp(0.062CN)]} \quad (4-20)$$

(2) 地表逕流量

在地表逕流的部分,NTU_WH 模式參考 SWAT (Soil and Water Assessment Tool, SWAT) (Neitsch et al., 2009)模式之假設,加入地表逕流儲存項來描述地表逕流延遲進入到河道的部分。當天所產生之地表逕流量(Q_t)採用(4-14)式計算,但由於地表逕流量進入河川的時間會因為距離河川的遠近而有不同,因此第 t 日當日所產生的逕流量並非全部匯入河川成為河川流量(Q'_t),河川流量(Q'_t)包含部分在第 t 日當日產生的地表逕流外,亦包括第 t 日之前尚未匯入河川而儲存在地表之地表逕流量 $Q_{stor,t}$,匯入河川之逕流量及儲存的流量可分別由式(4-21)及式(4-23)表示,地表逕流延遲因子(Q_{lag})則可由式(4-22)計算求得。

$$Q'_t = (Q_t + Q_{stor,t}) \times Q_{lag} \quad (4-21)$$

$$Q_{lag} = 1 - \exp\left(\frac{-sflag}{t_c}\right) \quad (4-22)$$

$$Q_{stor,t} = (Q_{stor,t-1} + Q_t) \times (1 - Q_{lag}) \quad (4-23)$$

式(4-22)中， $sflag$ 為地表逕流延遲係數， t_c 則為集流時間，隨著地表逕流延遲係數與集流時間不同，儲存於地表之逕流量也會有所不同，若地表逕流延遲係數越小，則表示流域內有較多的逕流量儲存在地表。



2. 未飽和含水層

入滲水量將先行補充未飽和層之土壤水分，當未飽和層土壤水分超過田間含水量時，部分水量將滲漏至淺層飽和含水層，而未飽和層中土壤水分亦可能因為蒸發散而被帶離土壤，而淺層未飽和層之水平衡式可以式(4-24)表示：

$$F_{t+1} = F_t + I_t - ET_t - PC_t \quad (4-24)$$

其中， F_t 為未飽和層高於凋萎點之土壤水分含量(cm/day)， ET_t 是蒸發散量(cm/day)，而 PC_t 則為滲漏量(cm/day)。

(1) 蒸發散量

在入滲優先模式中，蒸發散量計算方式由式(4-25)決定，其中潛能蒸發散量與 GWLF 模式相同透過皆式(4-10)之 Hamon 公式求得，而覆蓋因子則與 GWLF 模式考量方式相同。此外，降雨事件發生時空氣中的水氣為飽和狀態，因此蒸發散量可忽略，故在模式中當降雨事件發生時之蒸發散量設定為零。

$$ET_t = \begin{cases} \text{Min}[K_{ct} \times PET_t, F_t + I_t] & \text{if } R_t > 0 \\ 0 & \text{if } R_t = 0 \end{cases} \quad (4-25)$$

(2) 滲漏量

滲漏量分為淺層未飽和層土壤水分為飽和情況及淺層未飽和層土壤水分為非飽和兩種情況討論，當未飽和含水層土壤水分為飽和情況時，若降雨量大於 0，則滲漏量可為有效水力傳導係數與累積入滲量加上該時期之入滲量扣掉田間含水量之水量之小值

(式(4-26))，而若沒有發生降雨時，則先決定土壤中最大可滲漏量 $Max[0, F_t - ET_t - F_f]$ ，以避免在計算時發生土壤中水分不足以提供滲漏之情形，而滲漏量(PC_t^*)則為最大可滲漏量與推估滲漏量(PC_r)之小值(式(4-25))，推估滲漏量(PC_r)則參考 She et. al(2010)之設定，以式(4-27)表示。

$$PC_t^* = \begin{cases} Min[K_e, F_t + I_t - F_f] & \text{if } R_t > 0 \\ Min[PC_r, Max[0, F_t - ET_t - F_f]] & \text{if } R_t = 0 \end{cases} \quad (4-26)$$

$$PC_r = a(F(t) - F_f)^b \quad (4-27)$$

式(4-26)中，a 及 b 為待定之參數。當未飽和含水層土壤水分為非飽和狀態時，先決定土壤中最大可滲漏量 $Max[0, F_t + I_t - ET_t - F_f]$ ，避免在計算時發生土壤中水分不足以提供滲漏之情形，而滲漏量則為最大可滲漏量與推估滲漏量(PC_r)之小值(式(4-28))。

$$PC_t^* = Min[PC_r, Max[0, F_t + I_t - ET_t - F_f]] \quad (4-28)$$

滲漏量傳輸至飽和含水層所需的時間會因為土壤特性與地下水位高低而有所不同，並不一定在當日可以完全滲漏至飽和含水層，因此參考 SWAT 模式(Neitsch et al., 2009)以式(4-29)計算實際滲漏量(PC_t)，式中以滲漏比例因子(PC_{ratio})描述滲漏量無法在一天內直接進入飽和含水層之情形，滲漏比例因子(PC_{ratio})可由式(4-30)計算求得。

$$PC_t = PC_t^* \times PC_{ratio} \quad (4-29)$$

$$PC_{ratio} = 1 - \exp\left(\frac{-1}{TT_{prec}}\right) \quad (4-30)$$

式(4-30)中， TT_{prec} 為水分滲漏至淺層飽和層的傳輸時間，可透過含水層之平均厚度與孔隙率求得。

3. 淺層飽和含水層

淺層飽和含水層之水平衡關係與 GWLF 模式考量方式相同，透過淺層飽和含水層之土壤水分含量 S_i 、滲漏量 PC_i 、基流量 G_i 及入滲至深層侷限含水層水量 D_i 之水平衡方程式求得，其水平衡方程式可由式(4-12)表示，而基流量可由式(4-13)計算。

4.3 NTU_WH_DH 模式

NTU_WH_DH(NTU-Watershed Hydrological Model_Daily&Hourly)模式為同時考慮不同時間尺度之水文模式，其水文歷程描述與 NTU_WH 模式相同，但是 NTU_WH_DH 同時分析暴雨及非暴雨情況下之水文情況，模式預先設定以日時間尺度為主進行各項水文因子計算，但若該日為暴雨事件，則改為以小時之時間尺度進行計算(圖 4-4)，而小時模擬之流量資料除了輸出小時流量之外，亦輸出該日累加之日流量。

在模擬時將集水區由上而下分為地表、未飽和層及淺層飽和含水層三個主要部分之水平衡關係求得，在蒸發散量的計算上 NTU_WH 模式與 NTU_WH_DH 模式皆假設降雨時蒸發散為 0，NTU_WH_DH 模式與 NTU_WH 模式之差異在於入滲量、地表逕流量、滲漏量及基流量的計算。

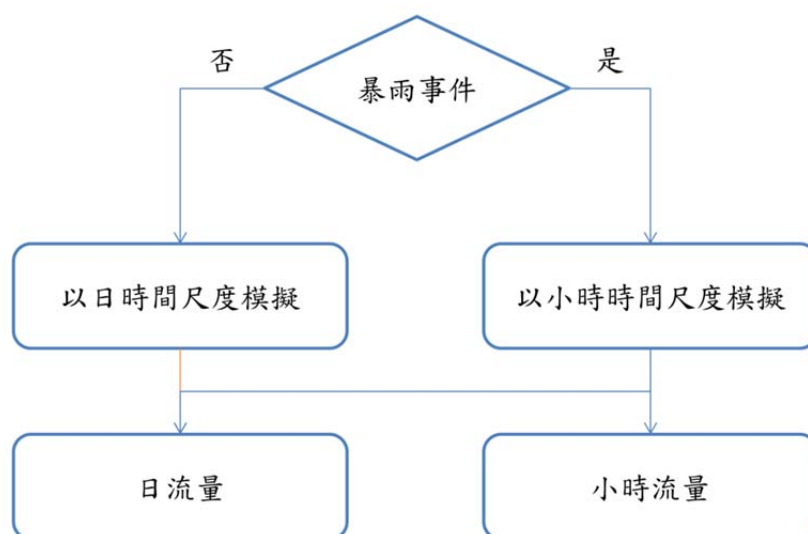


圖 4-4 不同時間尺度水文模式模擬流程



1. 入滲量

NTU_WH_DH 模式亦以 Green-Ampt 入滲模式計算入滲量，但在計算 $t + \Delta t$ 時刻之累積入滲量時(式(4-18))，當考慮日時間尺度時 Δt 為 1，而當考慮小時時間尺度時 Δt 則為 1/24，入滲量、雨量與土壤水分的水平衡關係，在 NTU_WH_DH 模式中亦以式(4-19)計算。

在計算有效水力傳導係數(K_e)之計算時需考慮 CN 值，在日時間尺度的情況下，計算 CN 值所需要之 5 天臨前降雨量(A_t)可由前 5 天之降雨量($R_1 \sim R_5$)計算，但在小時時間尺度情況下，則假設 5 天前之雨量為均勻降雨，第 j 小時之 5 天臨前降雨量可由前 5 天之雨量及暴雨事件個小時之雨量值($R_{H,i}$)，以式(4-31)決定 5 天臨前降雨量，再由 5 天臨前降雨量決定模擬小時流量時之 CN 值。

$$A_t = \frac{(24 - (j - 1))R_5}{24} + R_4 + R_3 + R_2 + R_1 + \sum_{i=1}^{j-1} R_{H,i} \quad (4-31)$$

2. 地表逕流量

在地表逕流的部分，NTU_WH_DH 模式亦加入地表逕流儲存項描述地表逕流延遲進入到河道的情形，由於日時間尺度之地表逕流延遲因子($Q_{lag,D}$)與小時時間尺度之地表逕流因子($Q_{lag,H}$)並不相同，因此利用式(4-21)至式(4-23)推估地表逕流量時，若為非暴雨事件，則公式中之 Q_{lag} 以 $Q_{lag,H}$ 取代，計算暴雨事件之小時流量時，則以 $Q_{lag,D}$ 取代 Q_{lag} 。

3. 滲漏量

NTU_WH_DH 模式計算滲漏量時，亦分為淺層非飽和層土壤水分為飽和及不飽和兩種情況分別討論，其平衡方程式與 NTU_WH 模式相同，主要差異在於 NTU_WH_DH

模式模式中滲漏比例因子(PC_{ratio})與地表逕流延遲因子(Q_{lag})相同，區分為日時間尺度之滲漏比例因子($PC_{ratio,D}$)與小時時間尺度之地表逕流因子($PC_{ratio,H}$)，在利用式(4-29)決定滲漏量時，若計算小時滲漏量時以 $PC_{ratio,H}$ 取代 PC_{ratio} ，而在計算日滲漏量時則以 $PC_{ratio,D}$ 取代 PC_{ratio} 。

4. 基流量

在基流量的部分，NTU_WH_DH 模式在考慮日時間尺度的情況下，基流量可由式(4-13)計算，然而，在小時時間尺度上，淺層飽和層之含水量會因為小時滲漏量補充較多的水量，造成小時基流量過高，使得淺層飽和層的水量迅速的減少，然而基流量應為變動較小之流量，因此短時間內快速急遽的變動並不合理，因此在小時時間尺度的情況下計算基流量時，假設每個小時的基流量相同，因此以式(4-13)與前一日之淺層飽和層水量計算日基流量，再平均成 24 個小時之基流量。

4.4 模式參數設定

本節說明 GWLF 模式及 NTU_WH 模式中使用之參數取得方式與推估方式，在 GWLF 模式中所使用之參數較少，可由查表或簡單的計算推估得到，而在 NTU_WH 模式中，除了需水集水區之土壤資料之外，有些參數需進行檢定驗證，因此在 NTU_WH 模式中以歷史流量與模擬流量之最大 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為目標函數，以各參數之範圍為限制是建立優選模式，並以模擬退火法(Simulated Annealing)優選所需參數。

4.4.1 GWLF 模式參數說明

GWLF 模式所需之參數為退水係數、CN2 值、生長季節決定與日照時數設定。CN2 值可由土壤類型及土地利用情形，由附錄 1 之表 1 至 5 中查詢得到，然而，在一個集水

區內，並不會只單一土壤類型及單一土地利用型態，因此需先找出不同土地利用之 $CN2$ 值，再透過式(4-32)計算集水區整體之 $CN2$ 值。

$$CN2 = \frac{\sum_{i=1}^N CN2_i \times A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (4-32)$$

式(4-32)中， $CN2_i$ 為不同土地利用之 $CN2$ 值，而 A_i 則為對應該土地利用之面積。經由式(4-31)計算出集水區之 $CN2$ 值後，配合臨前土壤水分含量，則可利用式(4-4)至式(4-6)求出 CN 值。

此外生長期與非生長期所對應之 $AM1$ 及 $AM2$ 並不相同，因此不適當的生長期設定也可能對 CN 值的推求造成影響，研究中以月平均溫度 10°C 為判斷依據，若月平均溫度超過 10°C ，則視該月落於生長期，若月平均溫度低於 10°C 則視為非生長期。日照時數與緯度有關，可以依據研究區域所在緯度，由附錄 1 中表 6 查出，退水係數可利用歷史河川流量計算求得。

4.4.2 NTU_WH 模式參數說明與檢定方法

NTU_WH 模式所需參數說明如表 4-2，模式中之參數如田間含水量、凋萎點含水量、飽和水力傳導係數可由附錄 1 中之表 7 查詢得到， $CN2$ 值可透過由附錄 1 之表 1 至 5 中查詢得到，若集水區非單一土地利用，則先找出各土地利用之 $CN2$ 值與對應之面積，透過式(4-32)求出集水區之 $CN2$ 值，再由式(4-4)至式(4-6)配合 5 天臨前降雨量情形決定 CN 值，因此需要檢定的參數有退水係數、土壤飽和含水量、吸力水頭、 Q_{lag} 及 PC_{ratio} ，其中退水係數可利用歷史流量計算求得，而土壤飽和含水量、吸力水頭、 Q_{lag} 及 PC_{ratio} 以優選方式決定。

表 4-2 NTU_WH 模式所需參數

參數	決定方法
土壤初始含水量	依據土壤初始條件設定。
凋萎點含水量	依據土壤類型，由附錄 1 表 7 中查詢。
田間含水量	
飽和水力傳導係數	
土壤飽和含水量	依據土壤類型，由附錄 1 表 7 中查詢，但表格中土壤飽和含水量為一範圍，因此需透過參數檢定求得，但檢定值應落於範圍內。
吸力水頭(suction head)	
含水層厚度	含水層厚度為根層深度，模式中預設為 100 公分。
CN 值	由附錄 1 表 1 以至表 5 查詢，透過式(4-32)求出集水區之 CN2 值，再由式(4-4)至式(4-6)決定 CN 值。
退水係數	由 GWLF 模式推估退水係數方法求得。
Q_{lag}	待檢定之參數。
PC_{ratio}	

由於模式分為日時間尺度及小時時間尺度兩種不同時間尺度，因此在進行參數優選時先以日雨量及日流量優選孔隙率、吸力水頭、 Q_{lag} 及 PC_{ratio} ，當日時間尺度之參數確定後，再進行小時時間尺度之模式參數優選，而在小時時間尺度之模式參數優選時，由於土壤之孔隙率及吸力水頭並不會因為不同時間尺度而有不同，因此僅針對 Q_{lag} 及 PC_{ratio} 兩參數進行優選。

研究中以模擬退火法(Simulated Annealing)進行，模擬退火法為 Metropolis(1953)於 1953 年模仿物體從高溫狀態下退火結晶的過程提出之模擬退火法之理論，Metropolis 認為在結晶過程中，每一次結晶出來之形體，都是以前一次之結晶為基準改變而成，故每一時期之狀態，皆與前一時期有關之現象，Kirkpatrick 等人(1983)將模擬退火法應用在大尺度組合優選之問題上，其後模擬退火法陸續地被應用於不同領域之優化求解問題上。相對應於物理的退火過程，解的集合就好像是固體的型態，最佳解之搜尋，也就是固體重新結晶成最穩定的型態，在高溫狀態下固體內的粒子擁有高活性，隨意重組型態，便

如同演算搜尋解初期設定系統處於高溫狀態，其解集合內欲最佳化之參數擁有高度的可變性，形成之解集合較不受解集合於系統目標函數中表現出之目標函數值優劣影響，可有各種不同的組合型式；在慢慢降低溫度的過程中，粒子活性隨之漸漸減弱，慢慢結晶成為穩定固體型態，直到最後溫度冷卻至固態穩定晶體析出，其解集合也在系統溫度慢慢下降時，漸漸無法接受任意組合解集合之型式，而傾向往表現出之目標函數值較優良的方向搜尋，接受其解集合，直到系統溫度達到設定之最終溫度停止搜尋，其解集合也將會收斂至一極佳值。

優選之目標函數為模擬之逐旬流量與實際逐旬流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數 (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)，Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 Nash 與 Sutcliffe(1970)提出之評估模式效率之係數，其計算方式如式(4-33)：

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (4-33)$$

Nash-Sutcliffe 模式效率係數越接近 1 表示模擬值與實際值越接近，因此以最大之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為目標函數值(式(4-34))進行優選，在限制式的設定上則以參數的範圍為限制條件，土壤飽和含水量及吸力水頭之範圍係依據不同土壤類型決定，而 Q_{lag} 及 PC_{ratio} 之範圍則介於 0~1 之間，當 Q_{lag} 及 PC_{ratio} 為 1 時，表示地表逕流及滲漏沒有延遲的現象， Q_{lag} 及 PC_{ratio} 越小，表示地表逕流及滲漏延遲效應越大。

$$Z = \text{Max} \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \right) \quad (4-34)$$

在優選過程中，由定義之鄰近解隨機挑選一解，代入模式模擬河川流量，計算其與實際流量比較之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數再與目前解比較，如鄰近解較目前解為佳則無條件移到此鄰近解，然如鄰近解較目前解為差，則由移步機率決定是否移步至鄰近解，移步機率決定方式以式(4-35)計算。



$$B_{ij}(\beta) = \begin{cases} \exp\left(\frac{\Delta C_{ij}}{\beta}\right) & \text{if } \Delta C_{ij} < 0 \\ 1 & \text{if } \Delta C_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (4-35)$$

式(4-35)中 B_{ij} 為移步機率， ΔC_{ij} 為鄰近解與目前解差值， β 為溫度參數。當 $\Delta C_{ij} < 0$ 時， β 越小則接受劣解之機率越小。溫度參數 β 由最高溫(T_{max})、最低溫(T_{min})與降溫梯度(γ)決定，最高溫為搜尋時設定之初始溫度，最低溫則為演算停止條件，當溫度降低至最低溫或低於最低溫則停止優選，溫度降低的過程則由 $\gamma^n \times T_{max}$ 決定，其中 n 表示降溫次數。

4.5 模式檢定驗證

4.5.1 GWLF 模式驗證

GWLF 模式需要推估之參數為退水係數，研究中引用何宜昕(2010)針對石門水庫上游集水區退水係數推估之 0.073，並利用高義站 1980-1999 年之雨量資料及霞雲站 1980-1999 年之流量資料進行模式驗證。根據模擬結果顯示，GWLF 模式模擬之逐旬流量與歷史流量比較之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 0.78，且由旬平均流量圖(圖 4-5)亦可發現模擬流量與歷史流量亦相當接近，退水係數為 0.073 為合理之參數。

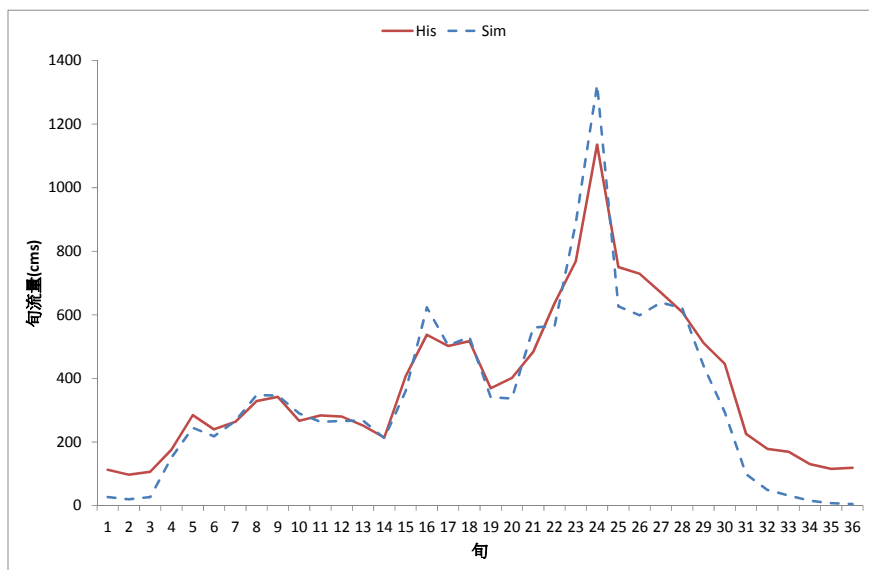


圖 4-5 GWLF 模式旬平均流量與歷史旬平均流量比較

4.5.2 NTU_WH 模式



1. 模式檢定

根據研究顯示，石門水庫集水區西北部丘陵地為黃棕色紅壤，而在山區大部分因地勢陡峭又多風雨，表層沖蝕劇烈，因此土壤皆為石質土，僅少部分山岳、丘陵交界區，化育成紅黃色準灰壤(許振崑 et al., 2009)。在模式參數檢定時，以該區之土壤特性為基礎，配合歷史雨量及流量利用優選方式進行參數優選。

在日時間尺度上，利用高義站 1969~1979 之雨量及霞雲站 1969-1979 年流量資料進行參數優選，最佳逐旬之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 0.73，其對應優選之參數列於表 4-3，圖 4-6 為 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為最佳解時之參數所模擬之逐旬流量，由圖 4-6 中可以發現模擬流量可以反映出歷史上發生較大雨量的情形，而模擬之逐旬流量亦可反映低流量的情形，以旬平均流量來分析(圖 4-7)，模擬旬平均流量與歷史旬平均流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 0.90，結果顯示利用優選之參數模擬之平均旬流量與歷史平均旬流量趨勢相同且模擬結果接近，顯示 NTU_WH 入滲優先模式可合理模擬歷史流量。

在小時時間尺度上，以 2004 年艾利颱風之石門水庫小時雨量與小時入流量進行參數優選，由於模式皆應用於石門水庫集水區，因此在優選時控制孔隙率及吸力水頭與日時間尺度之參數相同，僅針對 Q_{lag} 及 PC_{ratio} 兩參數進行優選，根據優選結果(表 4-3 及圖 4-8)，小時時間尺度之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 0.96，相關係數為 0.987，顯示優選之參數可合理的模擬歷史流量。

表 4-3 入滲優先水文模式參數檢定

	Nash-Sutcliffe 模式效率係數	飽和含 水量	SuctionHead	Q_{lag}	PC_{ratio}
日時間尺度參數	0.73	0.42	59.2	0.76	0.96
小時時間尺度參數	0.96			0.16	0.14

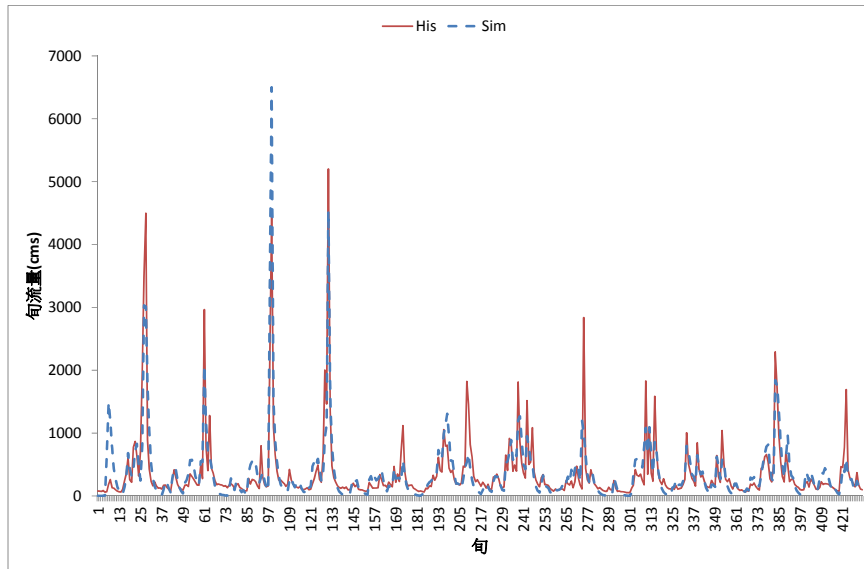


圖 4-6 參數優選結果之逐旬流量與逐旬流量比較

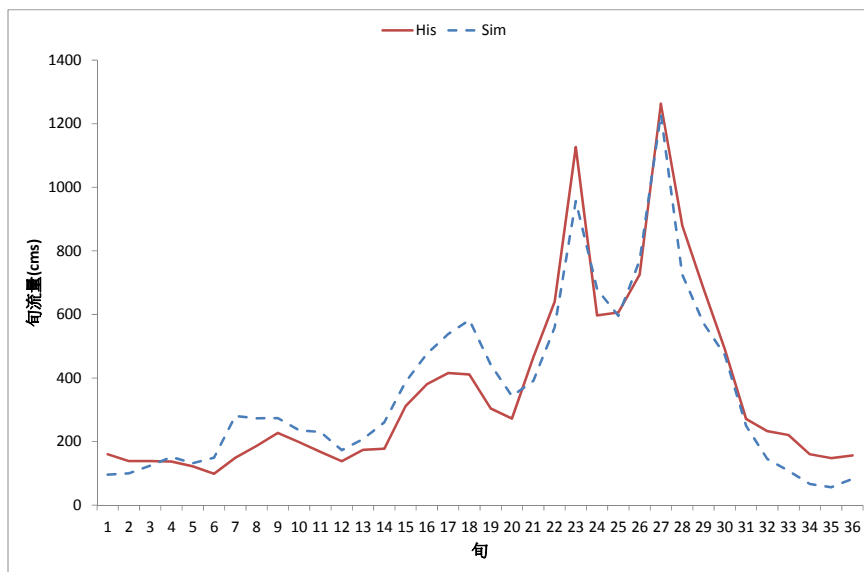


圖 4-7 參數優選結果之旬平均流量與歷史旬平均流量比較

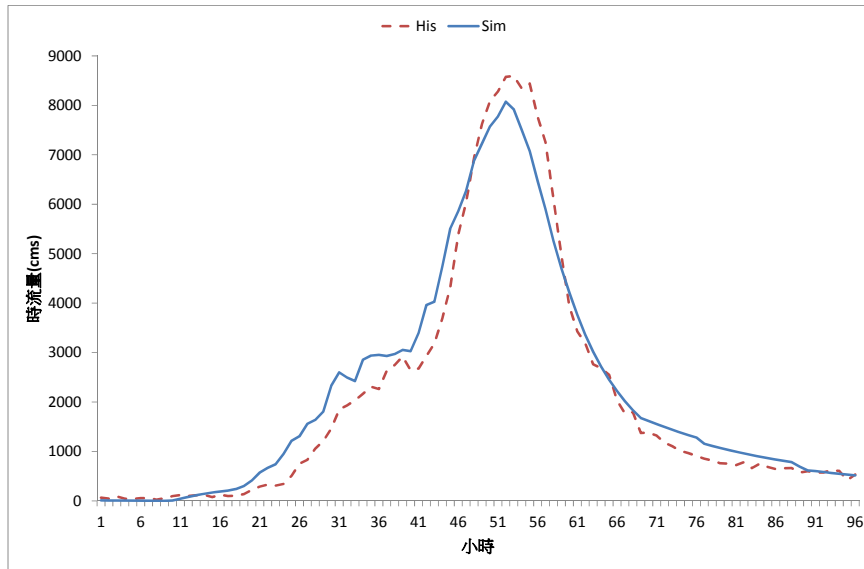


圖 4-8 參數優選結果之小時流量與歷史小時流量比較

2. 模式驗證

利用優選出之參數，以高義站 1980-1999 年之流量資料及霞雲站之 1980-1999 年之流量資料進行日流量驗證，模擬之旬平均流量如圖 4-9，逐旬流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數則為 0.82，顯示優選出之參數可合理模擬日流量資料，因此可以此組參數進行後續之研究。



圖 4-9 NTU_WH 模式旬平均流量驗證

在小時流量部分，亦以優選所得之參數配合瑪莎及泰利颱風之石門水庫雨量及入流量進行驗證，模擬結果如圖 4-10及圖 4-11所示，雖然在小時流量上有略為高估的情況，其 Nash-Sutcliffe 模式效率係數分別為 0.87 及 0.68，顯示利用優選所決定出之參數可合理模擬小時流量。

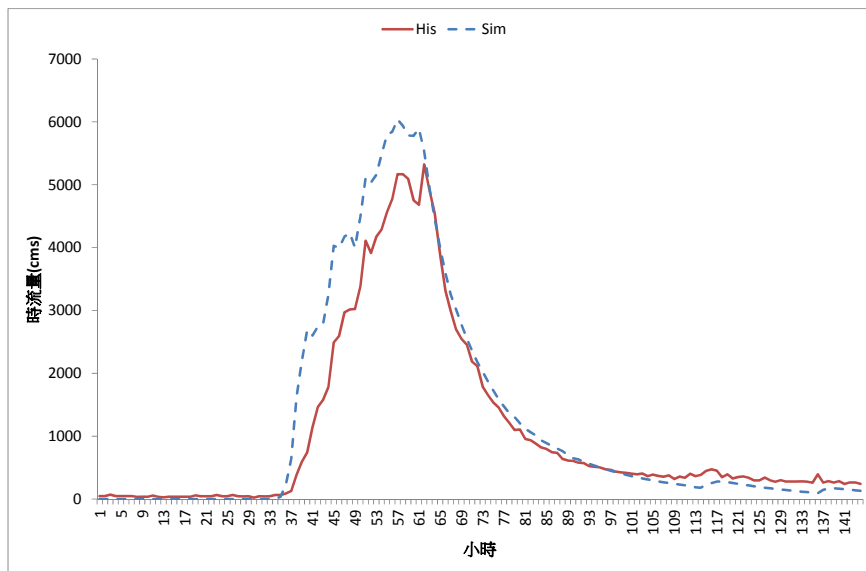


圖 4-10 馬莎颱風流量驗證

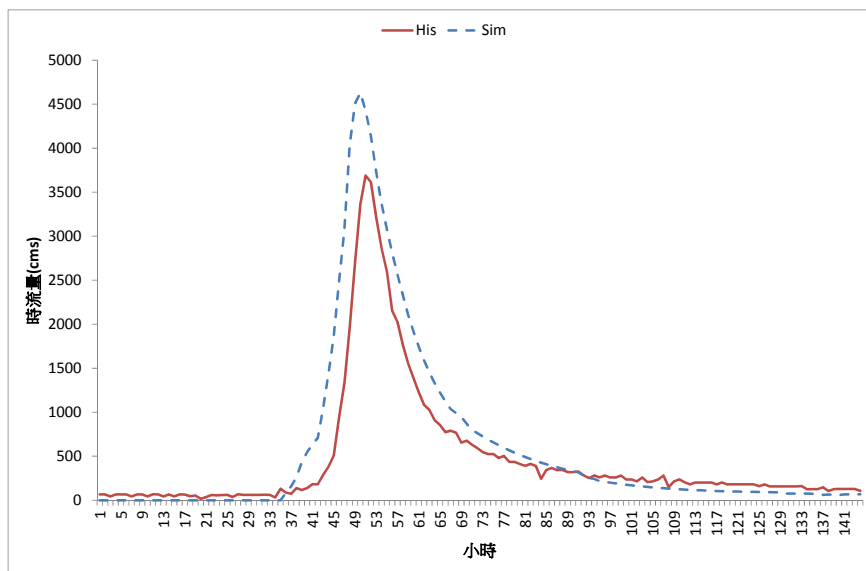


圖 4-11 泰利颱風流量驗證

4.6 討論

本節分別討論兩種不同氣象合成模式與兩種不同之水文模式對流量模擬結果造成的影響，依據不同水文模式在入滲量、蒸發散量及地表逕流量等因子推估結果，評估可能的差異來源，並以連續七天低流量做為評估因子，討論 GWLF 及 NTU_WH 模式在低流量的推估情形，此外，亦探討 NTU_WH_DH 模式與 NTU_WH_DO 模式之差異，並分析利用雙機率分佈氣象合成模式產生之日時間尺度氣象資料及不同時間尺度氣象資料所模擬流量之差異，亦討論不同氣象合成模式及不同水文模式對流量之影響。

4.6.1 GWLF 模式與 NTU_WH 模式比較

由於 GWLF 模式在蒸發散之考量上與 NTU_WH 模式不同，可能造成流量比較之誤差，因此調整 GWLF 模式與 NTU_WH_DO 模式之蒸發散設定方式，利用高義站 1980~1999 年歷史氣象資料，比較 GWLF 模式與 NTU_WH_DO 模式模擬流量(圖 4-12 及圖 4-13)，結果顯示在降雨事件發生視蒸發散量為 0(圖 4-12)或兩模式於降雨時皆考慮蒸發散時(圖 4-13)之情況下，兩模式模擬之河川流量接近，且兩模式在降雨時蒸發散不為 0 的情況下所模擬之河川流量均較降雨時蒸發散為 0 的情況為低，為了分析可能的差異來源，由入滲量、蒸發散量及地表逕流量進行討論。

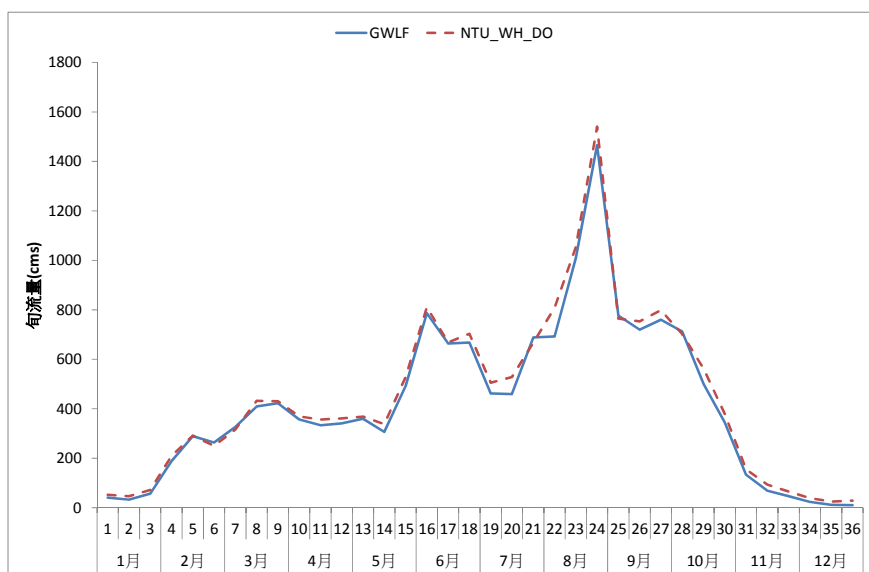


圖 4-12 GWLF 與 NTU_WH_DO 模式於降雨時蒸發散視為 0 之模擬流量

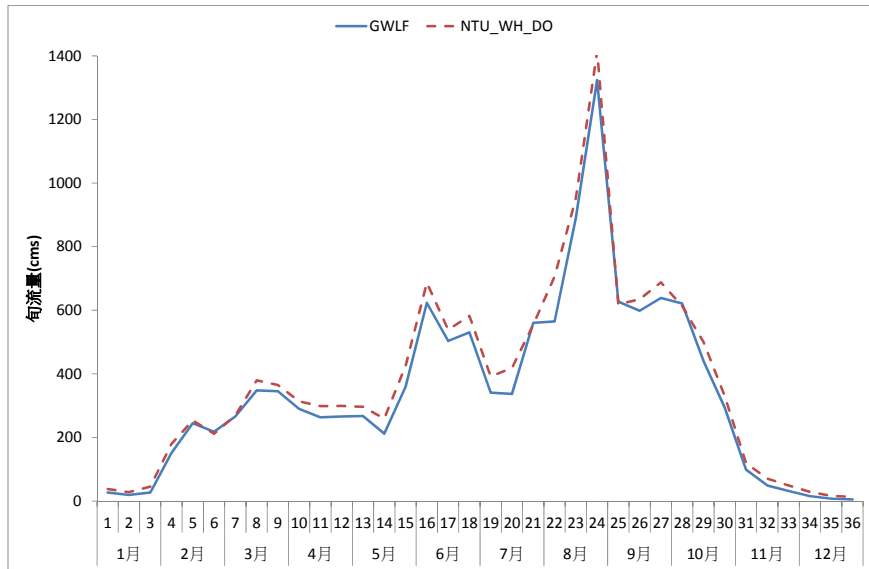


圖 4-13 GWLF 與 NTU_WH_DO 模式不論是否降雨均計算蒸發散量之模擬流量

入滲量主要受降雨量、地表逕流量及淺層為飽和層中土壤水分的影響，因此在降雨時蒸發散量是否為 0 對入滲量的影響並不大，因此以 GWLF 模式及 NTU_WH_DO 模式在降雨時蒸發散為 0 之情況，討論兩模式在入滲量計算上之差異，圖 4-14GWLF 模式及 NTU_WH_DO 模式分別計算之入滲量，由圖中可發現大部分的時間 GWLF 模式模擬之入滲量皆高於 NTU_WH_DO 模式所模擬之入滲量，其原因在於 NTU_WH_DO 模式在計算入滲量時，除了考慮最大可能入滲量外，亦將土壤中可容許入滲水量空間加入考慮，無法入滲之水量直接成為地表逕流，而在 GWLF 模式中先計算地表逕流，未能成為地表逕流的雨量不論多少都視為入滲量進入土壤中，當雨量較低且土壤含水量較低時，未能成為地表逕流量的雨量是可能全部進入土壤中的，但是當雨量較大且土壤含水量高時，未能成為地表逕流量的雨量並不一定可以全部入滲至土壤，GWLF 模式中並未將土壤中可入滲水量的空間加入考量，因此高估入滲量。由地表逕流分析結果亦可發現，NTU_WH_DO 模式模擬之地表逕流量在大部分的旬別均較 GWLF 模式為高(圖 4-15)，雖然是因為兩個模式計算地表逕流及入滲量的先後順序不同而造成的影響，但 GWLF 模式低估地表逕流量高估入滲量的情形也可以由此看出。

在蒸發散量的部分(圖 4-16))，當降雨時不考慮蒸發散量其蒸發散量是一定會低於不論是否降雨都考慮蒸發散的情形，尤其是在降雨機率較高的旬別，由於蒸發散量會影響淺層未飽和層含水量水分改變狀況不同，造成滲漏量的不同，進一步將影響淺層飽和層之土壤水分含量，造成最後之河川流量評估之差異。

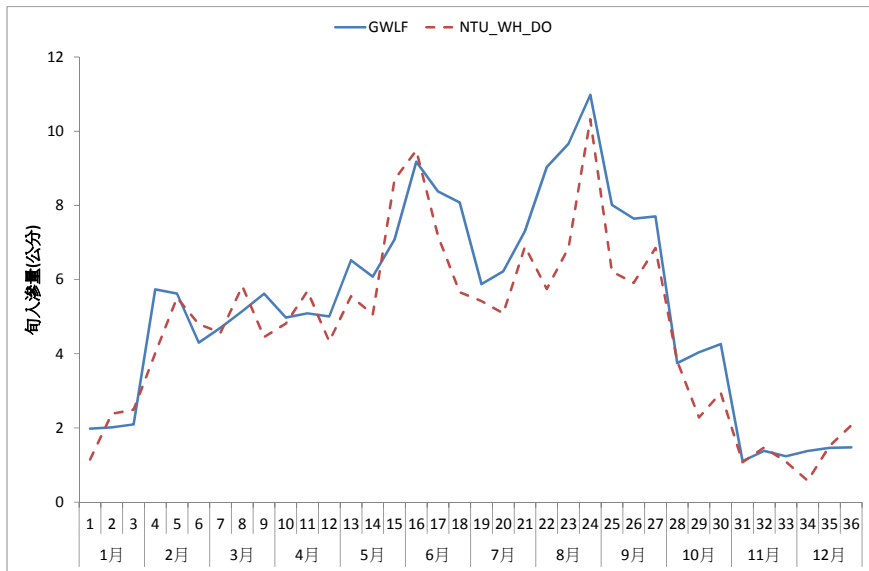


圖 4-14 入滲量比較

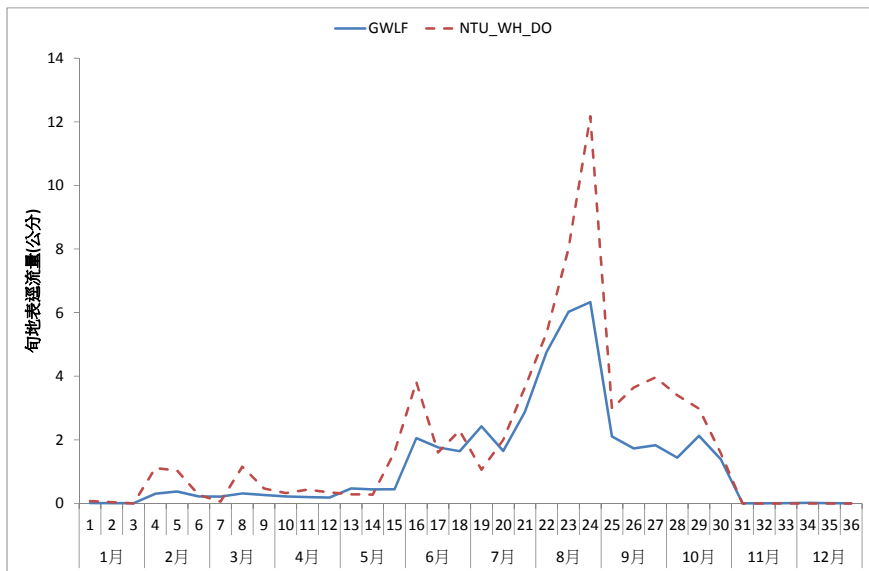


圖 4-15 地表逕流量比較

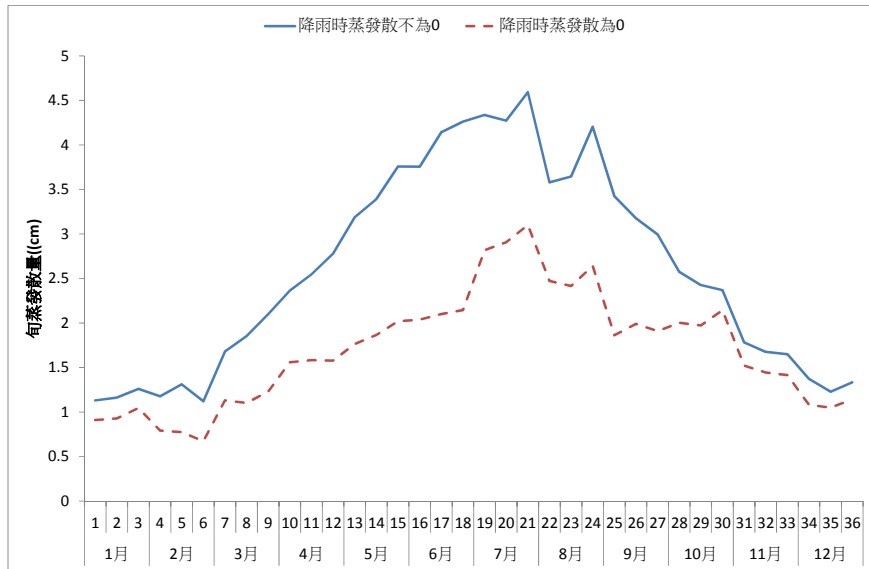


圖 4-16 蒸發散量比較

4.6.2 不同模式連續七天低流量比較

在連續七天低流量比較上，為了合理討論 GWLF 模式與 NTU_WH_DO 模式之差異，亦分別討論不同蒸發散考慮機制對低流量之影響進行分析，根據前節分析可知，GWLF 模式由於未考慮土壤中可入滲空間，模擬之入滲量較 NTU_WH_DO 模式為高，而入滲至土壤中之水量若超過田間含水量，將直接滲漏之淺和飽和層，進一步使得模擬之基流量較高，因此 GWLF 模式所計算出之連續七天低流量應較 NTU_WH_DO 模式為高，但根據模擬結果顯示，不論降雨時是否考慮蒸發散量的情況(圖 4-17(a)及圖 4-17(b))，NTU_WH_DO 模式所計算出之連續七天低流量均較 GWLF 模式為高。

由圖 4-18 及圖 4-19 GWLF 模式與 NTU_WH_DO 模式於同一年所計算出之滲漏量與淺層飽和層含水量關係可看出，GWLF 模式之單日滲漏量的確較 NTU_WH 模式為高，在 GWLF 模式中當淺層未飽和層之土壤水量高於田間含水量時，超過田間含水量之土壤水分會直接成為滲漏量進入淺和飽和層，但當淺層非飽和層土壤水分低於田間含水量時不會有滲漏發生，因此淺層飽和層之土壤水分含量會逐漸減少；NTU_WH_DO 模式在估算滲漏量上均較 GWLF 模式為低，除了因為 NTU_WH_DO 模式所推估之入滲量較 GWLF 模式為低，使得淺層未飽和層含水量較 GWLF 模式為低之外，NTU_WH_DO 模

式在滲漏量之計算上考慮了滲漏延遲因子，因此可連續數天緩慢的補充淺層飽和層之土壤水分，比起 GWLF 模式 NTU_WH_DO 模式之淺層飽和層土壤水分減少速度較慢，因此 NTU_WH_DO 模式所推估之基流量較 GWLF 模式為高，故在分析連續七天低流量時，NTU_WH_DO 模式所模擬之連續七天低流量均較 GWLF 模式所模擬之結果為高。

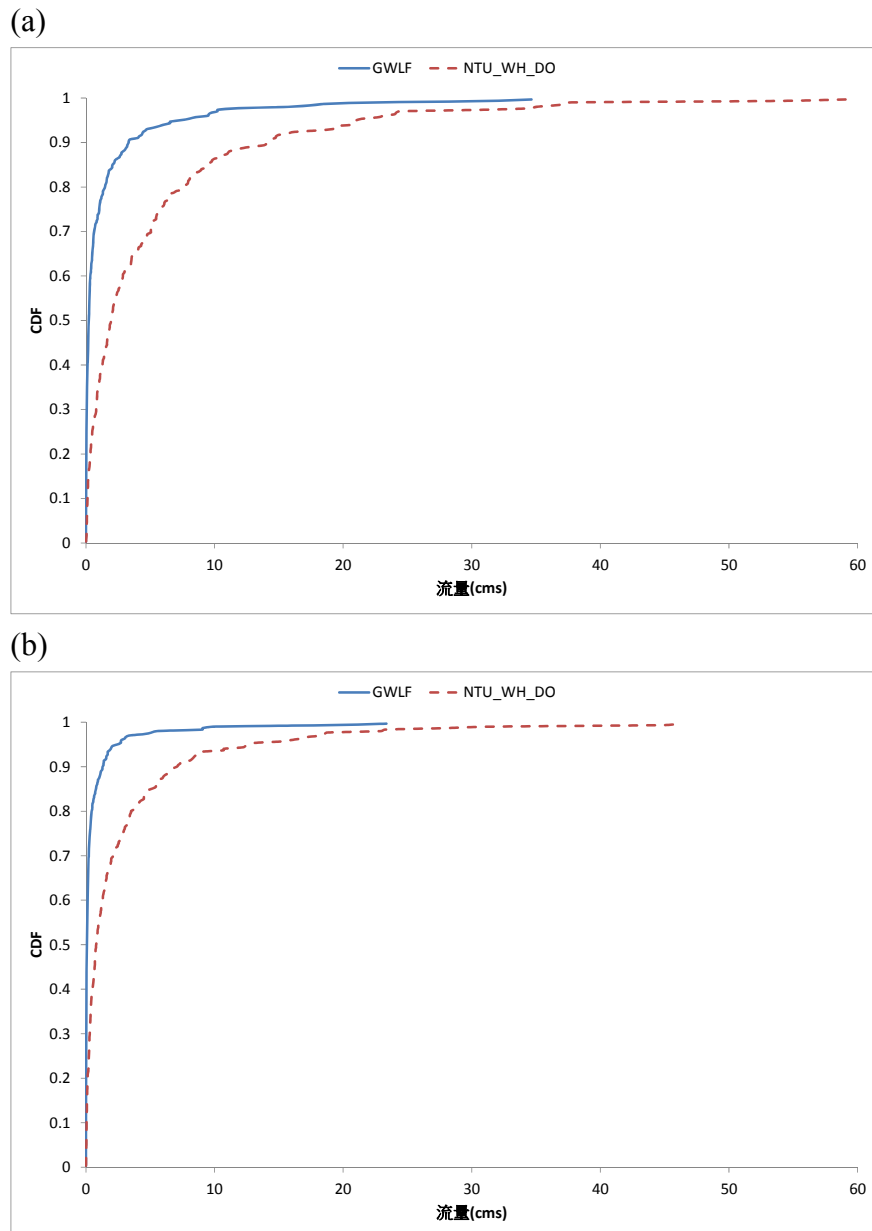


圖 4-17 GWLF 與 NTU_WH_DO 模式於不同蒸發散機制考量下之連續七天低流量 CDF，(a)降雨時蒸發散視為 0，(b)不論是否降雨接計算蒸發散量

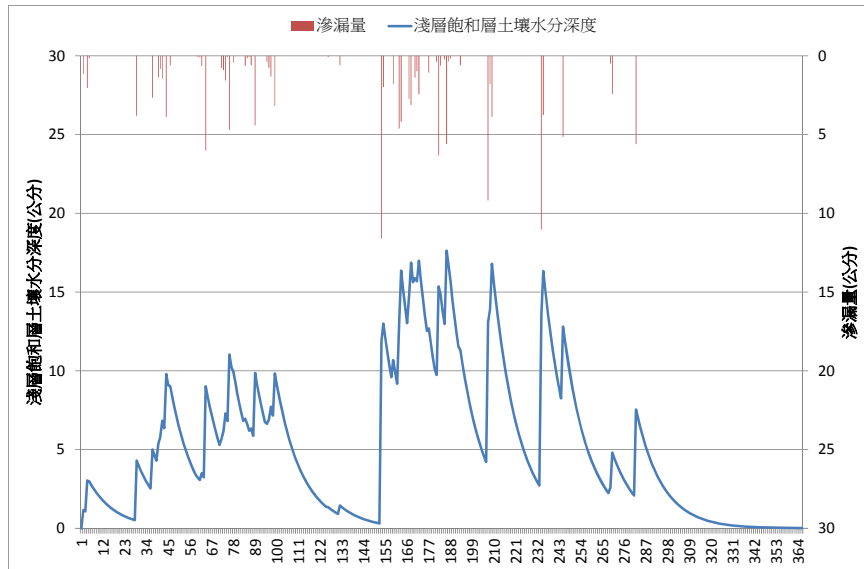


圖 4-18 GWLF 模式計算之滲漏量與淺層飽和層含水量

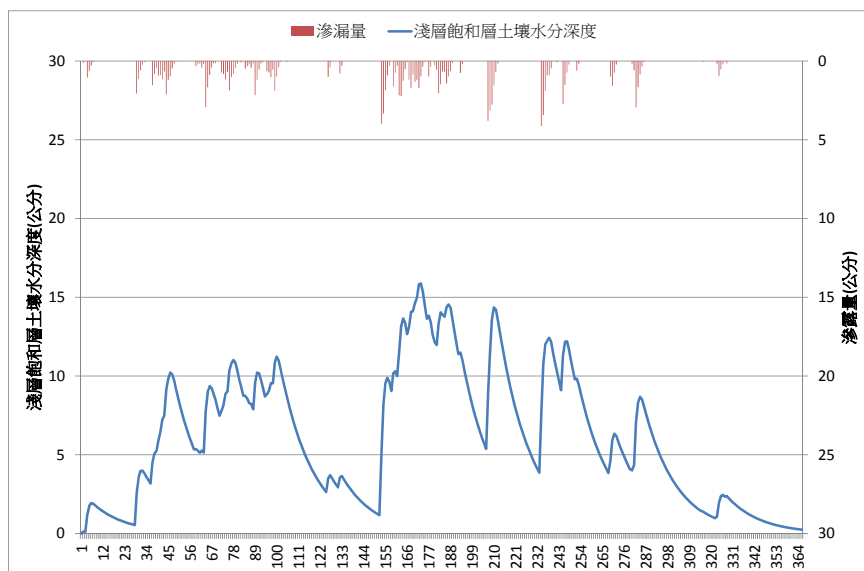


圖 4-19 NTU_WH_DO 模式計算之滲漏量與淺層飽和層含水量

4.6.3 不同時間尺度水文模式模擬比較

圖 4-20 為 NTU_WH_DO 模式與 NTU_WH_DH 模式模擬之旬平均流量，由於兩種模式描述水文歷程僅在時間尺度上略有不同，因此在旬平均流量上模擬結果相近，Nash-Sutcliffe 模式效率係數分別為 0.88 及 0.83，而在年總流量上，兩種時間尺度之水文模式模擬之總流量也接近，分別為 13055cms 及 13043cms，亦與歷史之年總平均流量

接近。由於不同時間尺度之水文模式與僅考慮日時間尺度之水文之模擬結果接近，因此可以說明不同時間尺度之水文模式亦可適切模擬歷史流量情況。

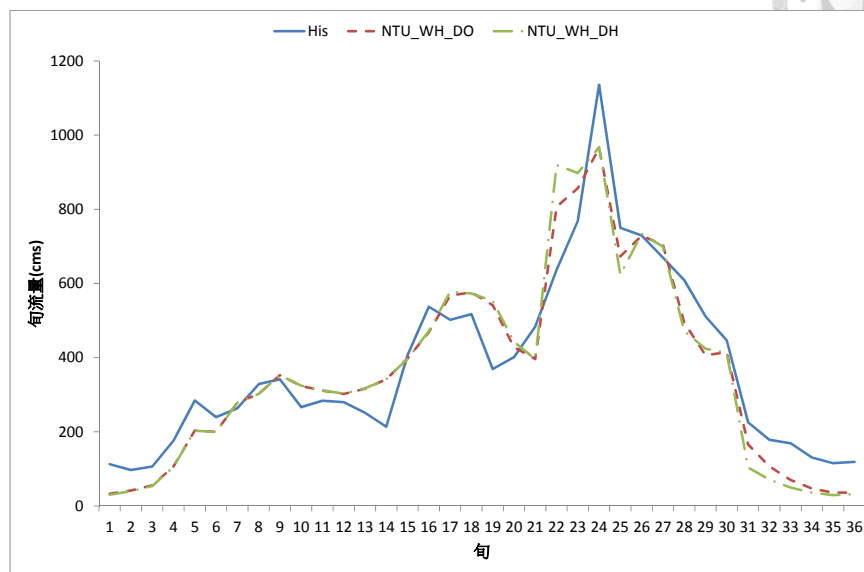


圖 4-20 不同時間尺度水文模式模擬之旬平均流量

4.6.4 不同氣象合成模式對流量模擬之影響

在水文模式比較部分，分別利用兩種不同氣象合成模式，以高義站 1980-1999 年之氣象資料，合成產生 300 年之氣象資料資料，再分別利用 GWLF 模式及 NTU_WH 模式模擬日流量，分析不同氣象合成模式繁衍之氣象資料對模擬流量之影響。圖 4-21 為利用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式所產生之降雨資料模擬之流量情形，由結果可發現，雖然氣象資料相同，但由於水文模式描述水文歷程並不相同，因此在旬平均流量上亦有差異存在，不過，兩模式之模擬旬平均流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數皆高達 0.86(表 4-4)，顯示兩模式皆可合理的模擬水文歷程，此外，GWLF 模式模擬之年平均總流量為 12273cms，而 NTU_WH 模式模擬之年平均總流量為 13135cms，與歷史年平均流量 13657cms 比較，NTU_WH 模式在總量上之模擬結果較 GWLF 為佳。

表 4-4 中顯示，利用雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式產生之氣象資料進行水文模擬時，兩模式模擬之旬平均流量 Nash-Sutcliffe 模式效率係數為 0.85 及 0.88，與利用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式所產之氣象資料模擬結果類似，NTU_WH 模式

與 GWLF 模式模擬之流量在旬平均流量有差異，且 NTU_WH 模式所模擬之旬平均流量較 GWLF 模式所模擬出之旬平均為高，GWLF 模式模擬之年平均總流量為 11619cms，而 NTU_WH 模式模擬之年平均總流量為 13055cms，比較歷史年平均流量可發現，GWLF 模式在總量的模擬上有低估的現象。

表 4-4 不同模式流量模擬之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數

氣象合成模式	單一機率分佈	雙機率分佈
GWLF	0.86	0.85
NTU_WH	0.86	0.88

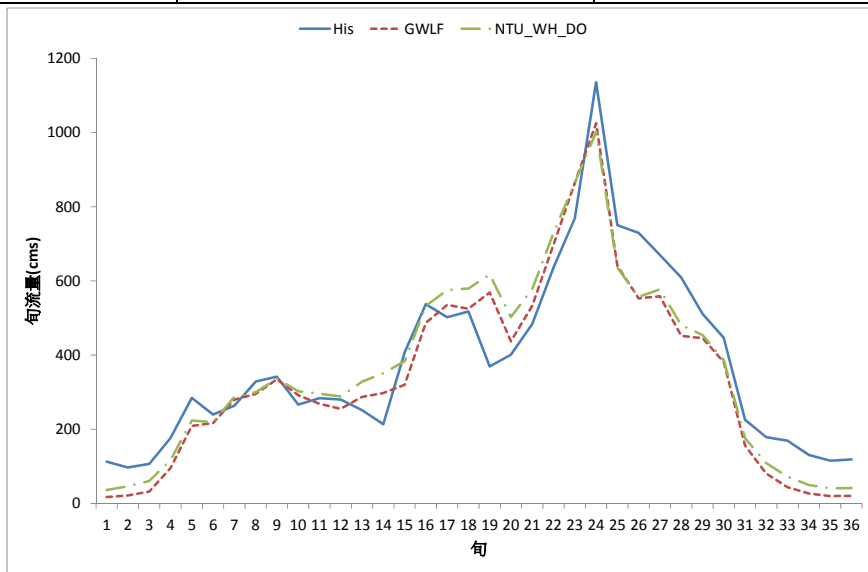


圖 4-21 以單一機率分佈氣象合成模式繁衍之氣象資料模擬旬流量

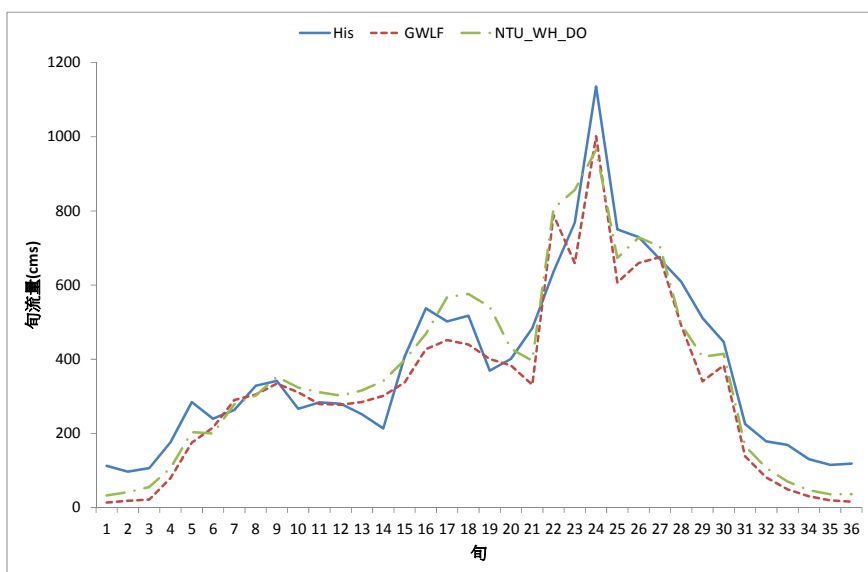


圖 4-22 以雙機率分佈氣象合成模式繁衍之氣象資料模擬旬流量




圖 4-23 及圖 4-24 為 GWLF 模式及 NTU_WH_DO 模式分別模擬不同氣象合成模式所產生之旬平均流量，由於氣象合成模式使得降雨量結果不同，因而就算利用相同的水文模式模擬，在河川流量推估上也有差異。主要的原因在於在使用單一機率分佈描述降雨時，在 5-6 月繁衍產生的雨量分別為 20.4 公分及 41.7 公分，5 月之最大雨量大於歷史上之最大雨量，而以雙機率分佈描述降雨事件之氣象合成模式繁衍雨量時，由於歷史 5 月並未發生暴雨事件，產生暴雨事件之機率為 0，故 5 月最大降雨依據假設不會超過 13 公分，繁衍產生之最大雨量為 12.8 公分，而在 6 月雖有暴雨事件發生，但依據 3.3 節討論結果可知，其最大雨量為 27.4 公分，遠低於使用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式所產生之雨量，因此在流量評估上利用雙機率分佈描述降雨事件之氣象合成模式繁衍產生之氣象資料所模擬之河川流量會低於利用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式繁衍產生之氣象資料所模擬之河川流量。而在 7-10 月與 5-6 月有類似之情形，利用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式繁衍產生之氣象資料在 7-10 月最大雨量分別為 85.2 公分、145.4 公分、50.7 公分、及 87.4 公分，皆較利用雙機率分佈描述降雨事件之氣象合成模式繁衍產生之雨量資料 62.5 公分、77 公分、66.4 公分及 60.1 公分為高，因此利用單一機率分佈描述降雨之氣象合成模式繁衍產生之雨量資料模擬之旬平均流量是可能高於利用雙機率分佈描述降雨事件之氣象合成模式繁衍產生之雨量資料模擬之旬平均流量。而根據分析結果亦可說明，不同的氣象合成模式在繁衍資料時，雖然可以依據歷史特性產生符合歷史特性之雨量資料，但是，由於不同的氣象合成模式其假設不同，所產生出來的雨量資料在特性上並不相同，因此將導致不同之流量模擬結果。

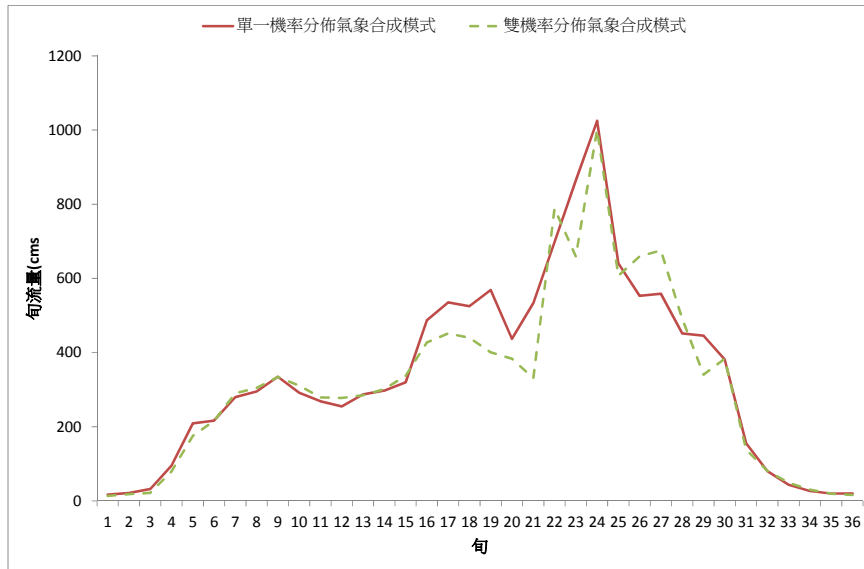


圖 4-23 以 GWLF 模式模擬不同氣象合成模擬之輸出結果

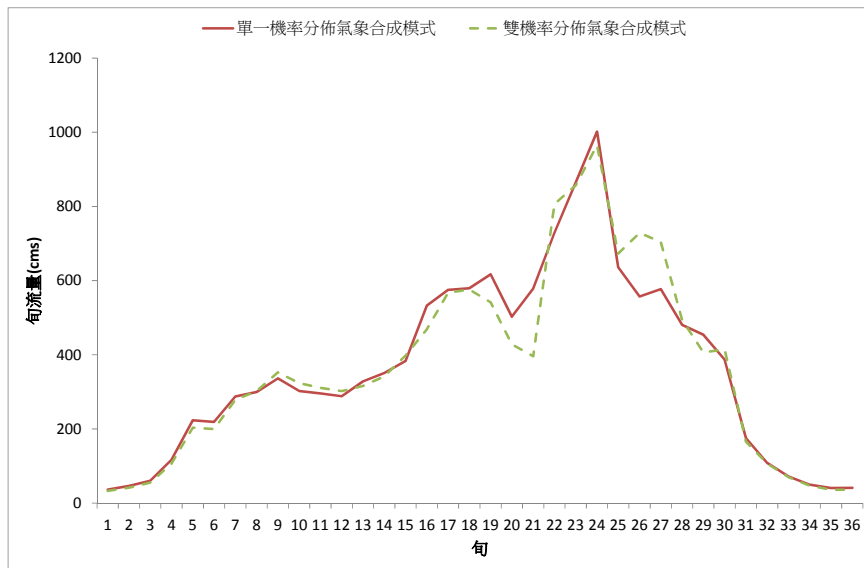


圖 4-24 以 NTU_WH 模式模擬不同氣象合成模擬之輸出結果

4.6.5 小結

以歷史氣象資料帶入水文模式，比較不同水文模式模擬之旬平均流量與歷史旬平均流量可發現，雖然氣象資料相同，但由於水文模式描述水文歷程並不相同，因此在旬平均流量模擬上亦有差異存在，進一步比較造成兩模式流量模擬之差異可發現，GWLF 模

式在計算入滲量時並未考慮土壤中可入滲的空間，只要是未能成為地表逕流的雨量不論多少都視為入滲量進入土壤中，導致高估了入滲量，而低估了地表逕流量。

在連續七天低流量比較上，NTU_WH_DO 模式所計算出之連續七天低流量較 GWLF 模式為高，雖然 GWLF 模式之單日滲漏較 NTU_WH 模式為高，但當未飽和層含水量低於田間含水量時並不會有滲漏發生，因此淺層飽和層之土壤水分含量會逐漸減少，而 NTU_WH_DO 模式所計算之入滲量雖然較 GWLF 模式為低，但因 NTU_WH_DO 考慮了滲漏延遲因子，會連續數天皆有滲漏發生，因此淺層飽和層土壤水分減少速度較慢，故 NTU_WH_DO 模式所模擬之連續七天低流量較 GWLF 模式所模擬之結果為高。

而比較 NTU_WH_DO 模式與 NTU_WH_DH 模式模擬結果可發現，兩種模式模擬之旬平均流量 Nash-Sutcliffe 模式效率係數接近，且年總流量除與歷史年總流量接近，兩模式模擬之年總流量亦接近，NTU_WH_DH 模式亦可適切模擬歷史流量情況。

在討論不同氣象合成模式繁衍產生之氣象資料對流量的影響時，不論是利用單一分佈描述降雨之氣象合成模式或雙分佈描述降雨之氣象成模式繁衍產生之氣象資料進行模擬，GWLF 模式與 NTU_WH_DO 兩模式模擬之旬平均流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數皆超過 0.85，顯示兩模式皆可合理的模擬水文歷程，然而，NTU_WH_DO 模式模擬之年平均總流量較接近歷史之年平均總流量，而 GWLF 模式在年平均總量的模擬上較 NTU_WH 模式為低。

水文模式模擬之流量資料往往提供做為後續研究之輸入條件，因此挑選適合之水文模式以適當模擬流量情況為一重要之課題，根據前述分析結果顯示，GWLF 模式與 NTU_WH_DO 及 NTU_WH_DH 模式皆可適切模擬歷史流量情形，且 Nash-Sutcliffe 模式效率係數都超過 0.75，但是考量 GWLF 模式有低估低流量的情況，可能低估乾旱事件時之流量，而在未來氣候變遷豐枯水期流量差異可能增加的情況下，過分低估枯水期流量亦可能擴大未來峰枯水期流量之差異，因此建議後續評估若不需同時考慮不同時間尺度時可以 NTU_WH_DO 模式進行評估，而若欲同時模擬日流量及小時流量時，可採用 NTU_WH_DH 模式模擬流量，以提供後續研究所需之流量資料。

第五章 氣候變遷對水庫操作及供水系統衝擊、脆弱度與調適

策略評估方法



在臺灣豐枯水期流量差異大，因此可調節水資源量之水庫為提供穩定之供水能力之重要設施，而在洪水來臨時，水庫亦肩負著蓄存洪水量延緩並降低洪峰流量的功能，然而氣候變遷將造成豐枯水期流量差異擴大，極端事件發生頻率與強度亦可能增加，更需要靠水庫進行調豐蓄枯，確保能獲得足夠之可用水資源。

研究中首先建立氣候變遷對水庫操作影響評估方法，配合日時間尺度之流量資料以及同時考慮日時間及小時時間尺度之流量資料，分別建立僅考慮日時間尺度操作之水庫操作模式以及同時考慮日及小時時間尺度之水庫操作模式；為分析氣候變遷對供水系統之影響，研究中建構調適策略評估流程，透過問題界定，系統性的評估現況與未來的脆弱度與風險，並提出解決問題之可能之調適策略及其評估方式。在調適流程評估中，透過不同氣候變遷情境下之流量資料，以及各標的用水現在及未來使用情形，可分析各供水區所遭受之衝擊與其可能面臨之脆弱度，依據氣候變遷情況下之供需水量缺口及各標的用水之脆弱度空間分佈結果，進一步擬訂氣候變遷影響下可能之強化方案優先順序。

5.1 氣候變遷對水庫操作影響評估方法

水庫操作評估需以入流量、需水量及水庫操作規線建構水庫水平衡關係，以模擬水庫操作情形。研究中建立之日為時間尺度之水庫操作流程如圖 5-1，配合下游需水量及水庫操作規線，決定水庫之日放水量，若水庫提供下游需水量後，水庫水位仍超過滿水位，則增加放水量使水庫水位降至滿水位或水庫操作規則中訂定之洪水事件結束後水庫應維持之水位，然而，水庫最大放水量為水庫最大可洩洪量，若水庫以最大可洩洪量放水然無法降低水位至滿水位或水庫操作規則中訂定之洪水事件結束後水庫應維持之水位時，則水庫水位將超過滿水位或水庫操作規則中訂定之洪水事件結束後水庫應維持之水位。

此外，配合 NTU_WH_DH 模式可同時模擬產生日及小時兩種不同時間尺度之流量資料，研究中亦發展不同時間尺度之水庫操作模式，在模式中若為非暴雨事件時，水庫操作配合水庫下游需水量、水庫操作規線與水庫蓄水量決定水庫之放水量，若發生暴雨事件則優先考慮水庫減洪功能，以小時之時間尺度進行水庫防洪操作，且該日所需之供水將不另外提供，水庫不同時間尺度操作模式架構如圖 5-2。

研究中以石門水庫為例說明水庫操作模式建立方法，當颱風事件或暴雨事件發生時，石門水庫減洪的操作主要係依據降雨量與水庫入流量進行水庫放水(國立台灣大學水工試驗所, 1990; 經濟部水利署, 2011)；而在非暴雨事件時，水庫操作則配合水庫下游需水量，討論水庫蓄水量是否足夠供應下游需求，因此在水庫操作時亦同時將暴雨事件放水與供水事件納入考量。

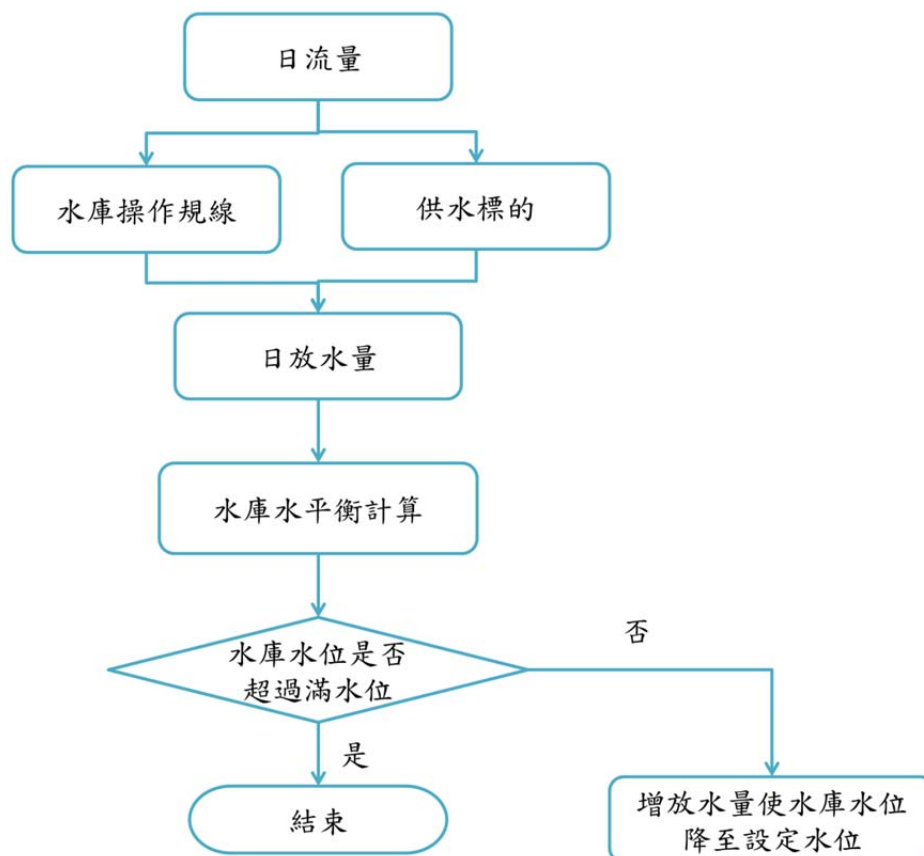


圖 5-1 水庫操作評估流程

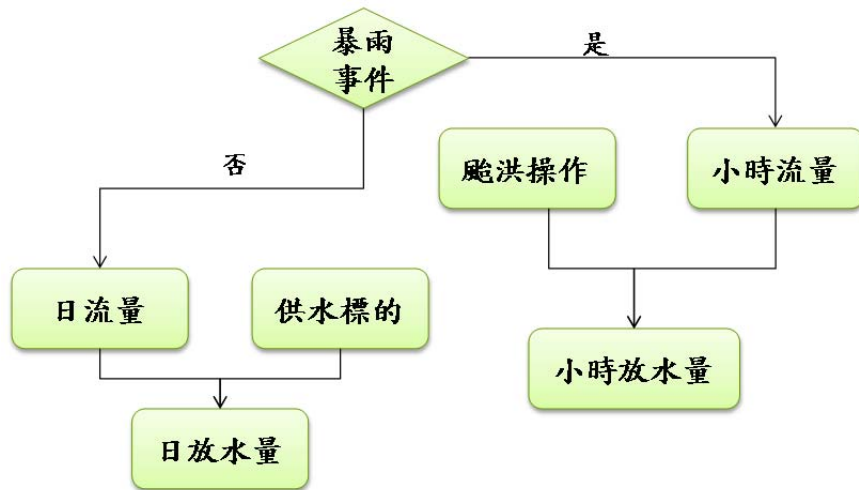


圖 5-2 連續性水庫操作評估流程

1. 水平衡考量

水庫水平衡操作係依據石門水庫運用要點(經濟部水利署, 2011)之石門水庫蓄水利用運轉原則與水庫防洪運轉規則, 配合石門水庫之操作規線(圖 5-3)進行水庫操作, 石門水庫蓄水利用運轉原則與水庫防洪運轉規則說明如後。

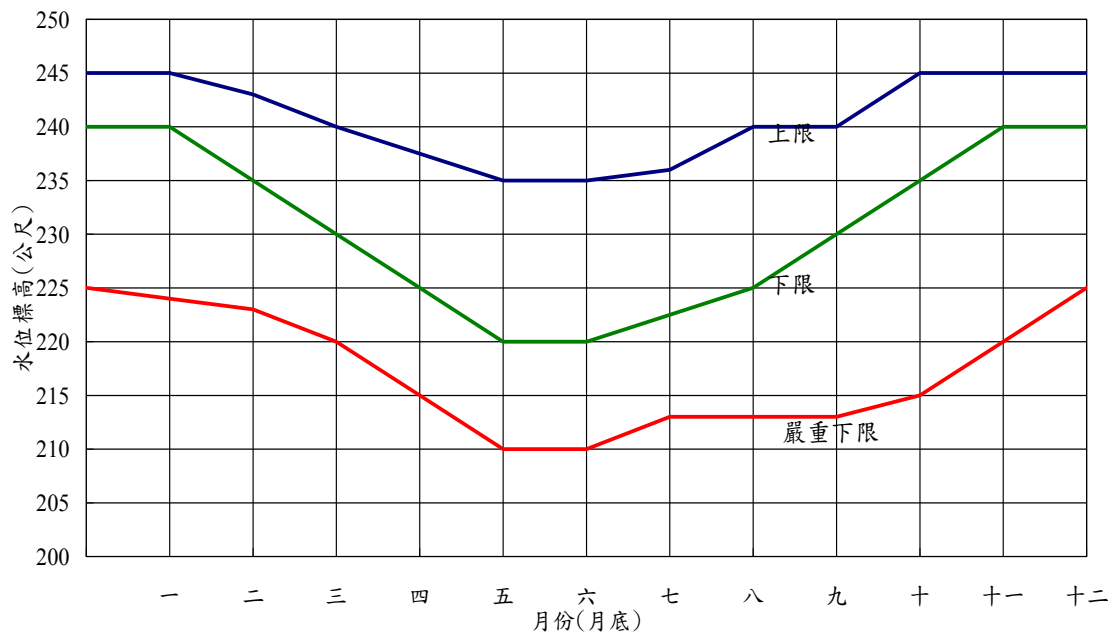


圖 5-3 石門水庫運用規線圖(經濟部水利署, 2011)



(1) 石門水庫蓄水利用運轉原則

- A. 水庫水位標高在上限以上時，依據計畫配水量供水，並得視各標的用水需求增加調配之。
- B. 水庫水位標高在上限與下限之間時，最高依據計畫配水量供水。
- C. 水庫水位標高在下限與嚴重下限之間時，農業用水依據計畫配水量 75%供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量 90%供水為原則。
- D. 水庫水位標高在嚴重下限以下時，農業用水依據計畫配水量 50%供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量 80%供水為原則。

(2) 水庫防洪運轉規則

- A. 洪水來臨前：集水區開始明顯降雨，水庫進水流量未達每秒 1000 立方公尺前，進行調節性放水，優先以發電、河道放水口及排洪隧道降低水庫水位。若水庫水位於標高 237.5 公尺以上水位仍持續上升時，得視水庫水位、雨量及流量狀況，增加溢洪道洩洪調降水庫水位。每年洪水期第一次颱風情況發生後，水庫水位標高應儘可能降至上限以下，如水位因攔蓄洪水而升高至標高 240 公尺以上時，在次一颱風情況發生後，應儘可能降低至標高 240 公尺以下。
- B. 洪峰發生前階段：當水庫進水流量大於每秒 1000 立方公尺以上至洪峰後之退水曲線流量為洪峰流量 90%前，其最高放水流量，不得大於流入水庫之最高流入量；水庫放水流量之增加率，不得超過該水庫流入量之最高增加率。
- C. 洪峰發生後階段：當集水區降雨量明顯降低且水庫進水量逐漸減少，經研判洪峰已過時，洩洪量不得大於洪峰流量。

2.水庫供水標的

石門水庫每年之計畫供水量並不完全相同，研究中採用農業工程研究中心(2003)年針對石門水庫之計畫供水量所作之研究作為評估之依據(表 5-1)，在未來氣候變遷情境

下之計畫供水量，並沒有討論需水量因人口增加或是產業發展改變，而有增加或減少的情形，亦即未來之計畫供水量仍以表 5-1 為準，配合連續性水文模式模擬不同氣候變遷情境下之水庫可能入流量，評估在不同氣候變遷情境下，水庫未來可能的供水情勢。

表 5-1 石門水庫計畫配水量(單位：cms)(財團法人農業工程研究中心, 2003)

月別	灌溉			公共
	石門	桃園	下游	
1	0.00	0.00	0.08	12.33
2	3.90	11.71	1.10	10.65
3	5.21	11.55	2.55	13.79
4	4.91	11.73	2.15	10.10
5	3.06	9.47	1.32	10.46
6	4.24	11.67	1.40	9.40
7	6.49	14.44	2.15	10.60
8	6.49	15.53	2.46	9.53
9	5.28	14.20	1.68	9.91
10	6.20	13.06	1.90	10.65
11	4.51	9.84	1.68	11.77
12	0.00	0.00	0.08	13.66

5.2 水資源供水系統建立

5.2.1 系統動力模式

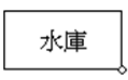


Forrester 教授於(1961)年所著之 Industrial Dynamics 書中提出系統動力學，並應用於回饋控制理論分析工業系統，而後 Forrester 於 Urban Dynamics 書中(1969)應用系統動力模式分析工商業發展及居住與人口之間相互關係，在發展初期，由於社會工商業的發展迅速因此人口迅速成長，區域內資源消耗速度增快，但隨著人口不斷成長，區域內資源耗盡，人口逐漸外移及衰退，由此可知，系統動力學可用來描述與時間演進具有密切的連動關係之現象，由於水資源系統並非靜態系統而是會隨著時間變化，因此亦有學者應用系統動力學於水資源相關問題之研究，南內華達州政府(Southern Nevada Water Authority)以針對當地的水資源系統為例，在了解當地的整個水資源歷史後，預測當地未

來人口的成長，進而推估出未來之需水量，並利用系統動力模式分析不同地下水管理、都市廢水處理回收系統、逕流量、回流水系統(Return Flow System)等因子對水資源管理之影響。陳明業(2002)「淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究」、詹麗梅(2001)「區域供水系統系統動力模型建立與策略評估-以大基隆供水區為例」，都採用系統動力模式來建構水資源系統，可見系統動力學近年來受到重視之程度。

在系統動力模式中，最主要的三個原件分別為儲存(Stock or Level)、流量(Flow or Rate)與助動原件(Converter or Auxiliary)(如表 5-2)，儲存是描述系統中的資源量，也就是描述在特定的時間內資源量的變化情形，因此水庫或攔河堰即以「儲存」描述，流量表示儲存變化的情形，藉由流量的流動可說明儲存量變化之情形，系統中水庫的入流量、蒸發量與供水量等項目便可以「流量」表示，「助動」則是應用於輔助描述儲存或流量，例如水庫或攔河堰的操作規則等。以水庫為案例建構如圖 5-4 之水庫之入流量與出流量之關係，圖 5-4 中水庫是以「儲存」元件設定，水庫入流量、放流量及溢流量則以「流量」元件設定，至於水庫之操作規線、下游需水量與水庫庫容等影響放水量及溢流量的因子，則以「助動」元件說明。

系統動力學之相關軟體相當多，其中 Vensim 在操作上較一般的程式簡單，藉由視窗化的圖形操作介面，可建立起所需的系統模式架構圖，並可清楚呈現系統整體架構和連接關係，不同元件間之連結關係可透過數學方程式建立其關係函數，以反映元件之間模擬之先後關係以及隨時間變化之特性，故研究中將以 Vensim 作為建立水資源系統架構之工具。

表 5-2 系統動力模式元件說明與設定方式

元件	名稱	說明	設定方式
	儲存	系統中的資源量	水庫或攔河堰等設施
	流量	描述儲存量變化情形	入流量、出流量及蒸發散量等
	助動	輔助描述儲存或流量	水庫操作規線等

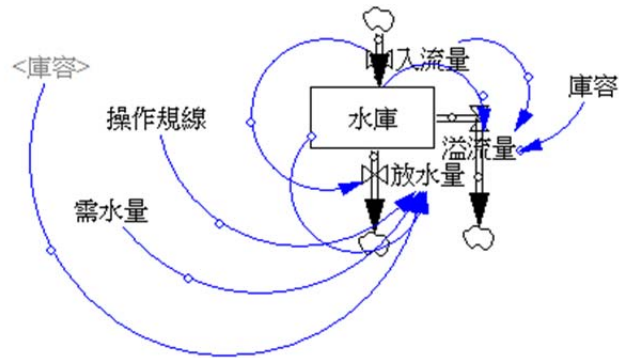


圖 5-4 系統動力模式各元件建立示意圖

5.2.2 供水承载力評估

供水承载力是考慮河川流量以及水資源設施可供水量，根據設定之缺水容忍程度推估之最大可供應水量，由於每個地區供水特性並不一定相同，因此各地區之缺水容忍程度亦有不同，此外，水資源設施可供水量並不等於河川流量或等於水庫蓄水量抑或是淨水場可處理能力，而是必須以整個系統供水的角度，同時考量河川可取水量、攔河堰攔蓄之可取水量、水庫蓄水情況以及淨水場處理能力，因此，在計算承载力時，以水資源供水系統模式模擬水資源系統供水情形，藉由模式討論不同河川流量情況下供水系統之供水情形。

水資源供水系統模式建立完成後，以現況需水量作為供水系統之目標供水量，分析系統供水情形，供水系統之供水量與需水量關係如圖 5-5 所示，由於供水量不足因此有缺水情況發生，根據缺水量及缺水延時配合缺水容忍度之計算指標缺水指標或缺水百分日數，若計算之缺水容忍度指標較設計之缺水容忍度指標為高，則調降需水量(圖 5-6)重新計算缺水容忍度指標，反之，若計算之缺水容忍度指標較設計缺水容忍度指標為低，表示供水量可滿足需水量增加的情況，因此提高需水量(圖 5-7)，計算缺水容忍度指標，如此反覆迭代計算，則可求得滿足設計缺水容忍度之供水承载力。由於發生短時間少量之缺水情形是普遍會存在的，因此在訂定缺水容忍度指標時不宜故於嚴苛，希望沒有發

生缺水的情況，要關注的問題是缺水情況是否在容忍範圍之內，在研究中以缺水指標及缺水百分日指標作為分析評估缺水容忍情況之評估指標，此外，研究中採用回復力指標進行分析供水系統發生缺水的頻率以及缺水的延時。

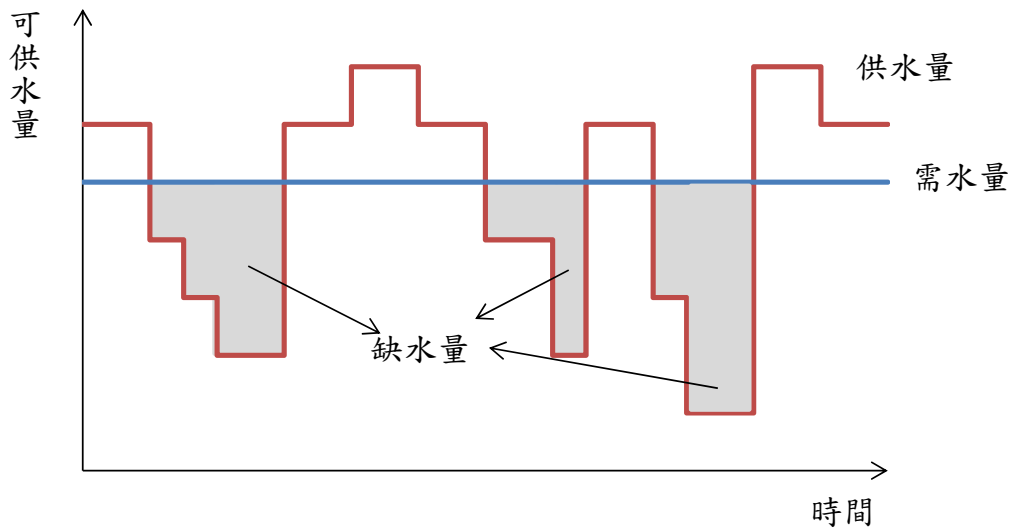


圖 5-5 供水量與需水量關係圖

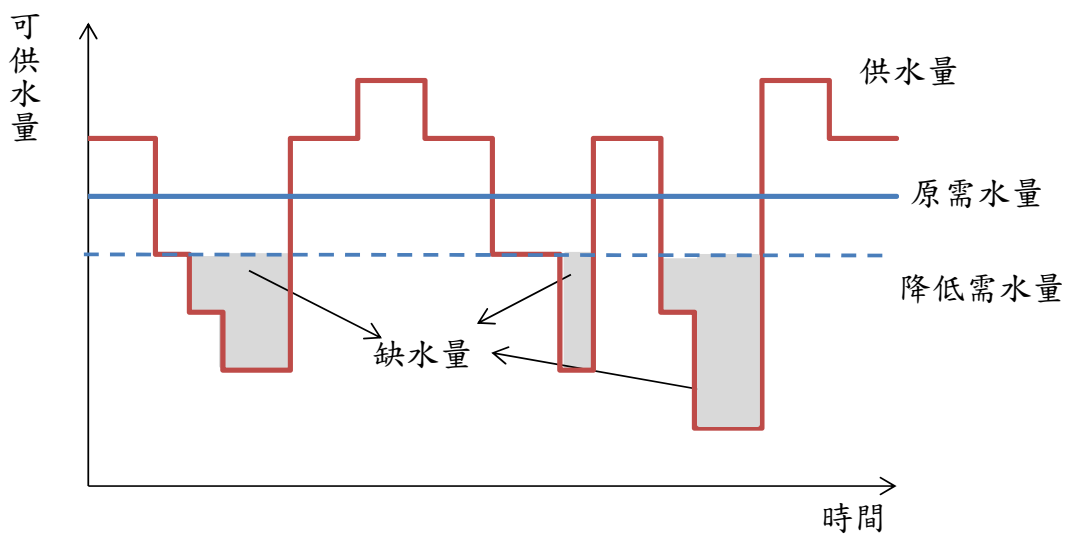


圖 5-6 缺水容忍度高於設計缺水容忍度時降低需水量情形

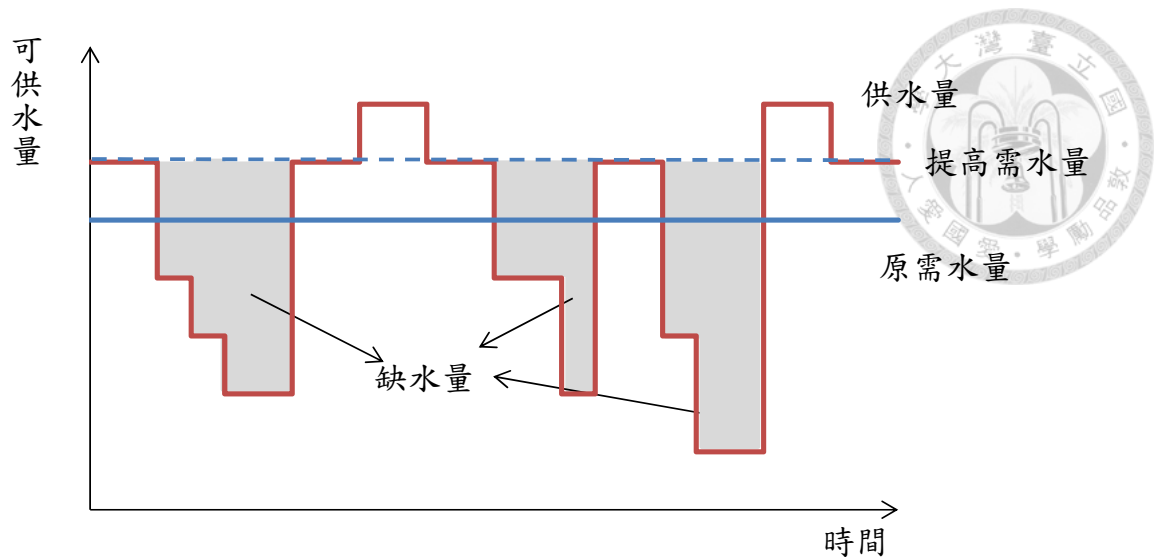


圖 5-7 缺水容忍度低於設計缺水容忍度時降低需水量情形

1. 缺水指標(Shortage Index, SI)

缺水指數(Shortage Index, SI)是將計算期距內各年缺水率平方後再加總，以凸顯缺水的嚴重性，如平均年度缺水率為 20%時缺水指數為 4，是缺水率為 10%時指數為 1 的 4 倍而非 2 倍，缺水指數如式(5-1)：

$$SI = \frac{100}{N} \times \sum_{y=1}^N \left(\frac{D_y}{S_y} \right)^2 \quad (5-1)$$

其中，N 為模擬總年數， D_y 與 S_y 分別為第 y 年之缺水量與計畫供水量。

2. 缺水百分日指標(Deficit Percent Days Index, DPD)

缺水指數描述長期缺水狀態，但無法考慮每年缺水事件發生次數、強度與延時，且缺水指數並非一對一函數關係，亦即當缺水指數為 1 時，有可能是 100 年內發生 4 次缺水 50%的情況或每年皆缺水 10%的情況，但是即使是相同的缺水指數，其缺水特性可能完全不同，亦無法適切的反應水資源系統之供水特性，因此研究中加入由日本的 Water Resources Development Public Corp. 於 1977 年提出之缺水百分日指標(%-days)(Deficit

Percent Days Index, DPD), DPD 指標可表現連續缺水天數之影響, 反映缺水事件之缺水強度與延時, 作為界定單一缺水事件忍受程度的依據, 彌補其缺水指數 SI 之不足。針對單一缺水事件, DPD 指標利用每天之缺水率之累加來評估(式(5-2)):

$$DPD_k(\% - day) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{D_i - S_i}{D_i} \right) \times 100 \quad (5-2)$$

其中 DPD_k 為第 k 場缺水事件之 DPD 值, N 為缺水事件之連續缺水日數, D_i 為第 i 日需水量, S_i 為第 i 日供水量, 而在評估系統整體之缺水情況時, 則以式(5-3)之年最大缺水事件之之 DPD 值 (式(5-3))為依據進行評估。

$$DPD(\% - day) = \text{Max}(DPD_1, \dots, DPD_k) \quad (5-3)$$

3. 回復力指標

某一時間長度下, 系統處於失敗之總天數與系統恢復正常狀態次數之關係, 即為系統回復力, 回復力值越大表示系統復原能力越佳, 反之, 系統則越脆弱(Hashimoto, 1982)。在工業製程管理領域中的常用平均失效時間(Mean Time to Failure)表示系統或元件之可靠度, 而將 MTTF 概念應用在水資源管理上, 以供水不足之情況代表失敗事件, 而成功事件則表示為充分供水事件, 因此 MTTF 可表示為供水系統平均正常供水時間。Kjeldsen(2004)進一步將所有關於失效「時間」的數值視為回復力指標, 所有有關於失效「程度」的數值視為脆弱度指標。研究中以水資源系統為範圍, 選用 MaxTTR (Max Time to Repair, Max TTR)、MTTR (Mean Time to Repair, MTTR)、MTTF (Mean Time to Failure, MTTF)及 Availability 4 個指標評估系統之回復力, 各項指標之定義與說明如後所述。

- (1) MaxTTR (Max Time to Repair, Max TTR): 表示 DPD 超過 1500 缺水事件中之最大缺水事件之缺水延時, 由於極端缺水事件可能對供水系統造成重大影響, 並可能無法回復到正常狀態, 因此透過 MaxTTR 指標判斷是否有極端缺水事件發生。
- (2) MTTR (Mean Time to Repair, MTTR): 代表平均缺水的延時, 可描述供水系統之缺水事件平均缺水強度。

- (3) MTTF (Mean Time to Failure, MTTF)：代表平均正常運作的延時，但在研究中定義之正常運作並非完全滿足供水，而是以 DPD 值為 1500(%-days)為判斷依據，若系統之單一缺水事件之 DPD 值低於 1500(%-days)仍視系統為正常運作。
- (4) Availability：Availability(式(5-4))表示在每一次的供水-缺水循環之後，平均正常運作的時間所佔比例，Availability 值越高表示系統可用度越高，系統之供水情形穩定。

$$Availability = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF} \quad (5-4)$$

回復力指標計算方式及其意義可以圖 5-8 為例說明，圖 5-8 中一維的橫座標軸代表水資源系統運作的時間進行，綠色的部份代表供水量等於需水量，即系統能夠正常的運作(Function)，此外，綠色部分之時間長短亦表示兩次失效狀態之時間間隔(Time to Failure)；紅色的部份表示供水量小於需水量，表示供水不足因此導致系統失效(Failure)的情況，而紅色部分之時間長度亦表示系統失效延時(Time to Repair)。圖 5-8 中，總共有 4 次的缺水事件，每次缺水事件的時間長度分別為 4、3、1 及 2 旬，總缺水時間則為 4 次缺水時間之累積共 10 旬，因此其平均缺水延時(MTTR)為 2.5 旬；系統正常供水的时间長度為 6、2、3 及 1 旬，則系統平均正常運作時間(MTTF)則為 3 旬，而最大缺水延時(Max TTR)則為 4，而系統之 Availability 為 0.55，表示系統僅有 55%的時間可正常運作。



圖 5-8 回復力分析簡例圖



5.3 暴露度及脆弱度分析

5.3.1 缺水之災害脆弱度量化

缺水脆弱度主要考量在暴露於氣候威脅下，現有供水系統無法提供所需水量所造成的缺水暴露度，以及對於此缺水危害可能造成影響之敏感對象，因此脆弱度可以暴露度及敏感度表示(式(5-5))。

$$\text{脆弱度} = \text{暴露度} \times \text{敏感度} \quad (5-5)$$

暴露度與敏感度之分級與脆弱度矩陣以水利規劃試驗所於 2012 年完成之「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」中所訂定之標準為依據，而各供水標的之暴露度與敏感度及脆弱度矩陣定義說明如後。

1. 暴露度

(1) 公共給水暴露度

水規所(2012)之研究在公共給水暴露度，主要參考依田憲彥(2010)之研究，該研究認為缺水容忍度介於 1500%-days~2000%-days 間，以此缺水危害為常態威脅，利用 2 年重現期之 DPD(50%超越機率)為劃分依據，分為表 5-3 之 5 個等級缺水災害暴露度。

表 5-3 公共給水暴露度等級劃分(水規所，2012)

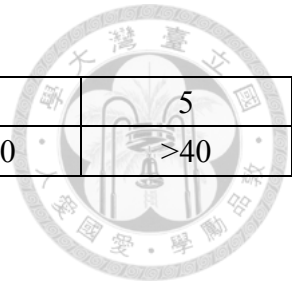
暴露度	1	2	3	4	5
2 年重現期 DPD	<100	100~600	600~1500	1500~3500	>3500

(2) 農業用水暴露度

水規所(2012)之研究在農業用水暴露度上，以農田水利會在面臨不同缺水率的情況設定暴露度等級(表 5-4)，由於 15%~20%缺水率為影響產量之臨界點，因此訂為等級 2 之暴露度，低於此缺水率仍可正常運作，高於 40%則視為相當嚴重等級。

表 5-4 農業用水暴露度表(水規所，2012)

暴露度	1	2	3	4	5
缺水率(%)	<15	15~20	20~30	30~40	>40



2. 敏感度

敏感度為各標的用水於缺水災害事件發生時之敏感因子，由於供水對象的不同，其所考量之暴露於缺水災害之敏感對象亦不相同，生活用水、工業用水以及農業用水討論之敏感對象說明如下。

(1) 生活用水

水規所(2012)之研究中認為，人口越高其所面臨之供水壓力越嚴重，當缺水事件發生時暴露於缺水災害之敏感度越大，因此生活用水以人口密度為因子，表示其暴露於缺水災害之敏感度，以行政院主計處提供之全省鄉鎮市區人口密度資料為依據，利用人口密度超越機率進行分級，以超越機率 80%、60%、40%及 20%區分為表 5-5 之 5 等級。

表 5-5 人口密度分級(水規所，2012)

人口密度分級	1	2	3	4	5
人口密度(人/平方公里)	<174	174~468	468~967	967~2771	>2771

(2) 工業用水

水規所(2012)以工業產值作為工業用水之敏感度評估指標，利用行政院主計處民國 95 年工商及服務業普查之全省鄉鎮市區製造業生產毛額結果進行敏感度分級，並以超越機率 80%、60%、40%及 20%區分為 5 等級，分級對照表詳如表 5-6。

表 5-6 工業產值分級(水規所，2012)

分級	1	2	3	4	5
產值(百萬元)	<619	619~2,400	2,400~8,944	8,944~25,456	>25,456

(3) 農業用水

在農業用水部分，水規所(2012)以水稻面積作為農業用水之敏感度評估因子，該研究利用行政院主計處網站公布之單期作水田(第一期作、第二期作)及兩期作水田以兩者之合計面積進行分級，並以超越機率 80%、60%、40%及 20%區分為 5 等級，分級對照表詳如表 5-7。

表 5-7 農田面積分級(水規所，2012)

分級	1	2	3	4	5
水田面積(公頃)	<97	97~607	607~1387	1387~2221	>2221

3.脆弱度矩陣

水規所(2012)之脆弱度矩陣採用採用半定量矩陣定義脆弱度，不論各標的用水皆採用 5×5 矩陣(如表 5-8)，配合表 5-8 則可得知當脆弱度為 1~4 時為第 1 級，5~9 為等級 2，10~14 為等級 3，15~19 為等級 4，20~25 為等級 5。

表 5-8 脆弱度矩陣分級表(水規所，2012)

		敏感度				
		1	2	3	4	5
暴露度	1	1	1	1	1	2
	2	1	1	2	2	3
	3	1	2	2	3	4
	4	1	2	3	4	5
	5	2	3	4	5	5

5.3.2 氣候變遷之下各供水分區缺水脆弱度地圖製作

公共給水包括生活用水及工業用水，因此在暴露度僅考慮公共給水暴露度，但考量不同的暴露因子則可求得生活用水脆弱度及公共用水脆弱度，農業用水部分則可推求農業用水暴露度及脆弱度地圖，最後將生活用水、工業用水以及農業用水脆弱地圖合併，獲得水資源脆弱地圖。



1. 公共給水脆弱度

生活與工業用水之多數供水量來自於自來水公司，其主要末端設施為淨水場，因此，淨水場處理能原水能力大小對其供水區域之供水量將造成影響，若水源充足但淨水場處理能力不足時，亦可能發生缺水的情況。配合前述建立之系統動力模式，在模式中考量淨水場處理能力及其供水區域之需水量與上游河川流量及水庫放水量等，以缺水百分率 (DPD) 作為指標，計算公共給水之脆弱度。公共給水脆弱度建立方式說明如下：

(1) 各鄉鎮區之需水量資料蒐集與資料建立

各鄉鎮區需水量資料可由臺灣自來水年報統計資料，以自來水公司所劃分之供水區系統對應之鄉鎮市區，估算鄉鎮市區之生活及工業用水量。並於系統動力模式中建置所蒐集之需水量資料，完成供水系統與各子系統之關係建置。

(2) 模擬各區配水比例

當供水量不足時，不同的行政區由於距離淨水場之距離及不同需水量等因素，使得配送至各行政區域之水量不一定相同，如何將系統的缺水量有效且最佳地分配到各個行政區，並使得缺水對整個系統的傷害降到最低，可透過不同的配水策略來決定。研究中利用水規所(2012)之分析架構，以禁忌演算法優選缺水情境發生時，系統對內部行政區的最佳配水策略，最佳配水策略考量系統內各行政區之缺水率、各個行政區的人口數量和距離淨水場的遠近，給定不同行政區適當的配水量，讓缺水對系統造成的傷害降到最低，當最小缺水發生時表示缺水事件對整個系統所造成的傷害為最小，而此時的配水比例為系統的最佳配水策略，根據其結果，臺北、板新及桃園系統不同打折供水率優選結果如表 5-9~表 5-11。

表 5-9 臺北系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012)

供水情境	90%	80%	70%	60%	50%
松山區	99.88%	99.92%	70.00%	60.00%	50.00%
信義區	99.99%	99.98%	99.96%	99.95%	75.85%
大安區	99.93%	99.96%	100.00%	99.92%	99.96%
中山區	99.85%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
中正區	99.91%	99.81%	99.93%	99.84%	99.96%
大同區	99.86%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
萬華區	99.96%	99.91%	99.87%	72.23%	50.00%
文山區	99.89%	99.91%	86.83%	60.00%	50.00%
南港區	99.76%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
內湖區	99.88%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
士林區	77.47%	38.78%	19.29%	0.04%	0.11%
北投區	0.03%	0.12%	0.07%	0.02%	0.11%
新店區	99.96%	96.84%	70.00%	60.00%	50.00%
淡水區	99.92%	80.00%	70.00%	59.74%	5.90%
三芝區	0.95%	1.17%	1.39%	0.15%	0.37%
深坑區	99.27%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
石碇區	98.79%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
永和區	99.91%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
中和區	99.61%	99.64%	99.67%	99.69%	99.72%

表 5-10 板新系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012)

供水情境	90%	80%	70%	60%	50%
板橋區	99.97%	99.98%	99.99%	99.96%	90.46%
三重區	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
新莊區	99.95%	99.97%	70.00%	60.00%	50.00%
土城區	99.98%	99.97%	99.13%	64.89%	50.00%
蘆洲區	99.88%	80.00%	70.00%	60.00%	37.55%
樹林區	99.91%	86.50%	70.00%	60.00%	50.00%
鶯歌區	99.71%	99.75%	99.79%	99.83%	99.86%
五股區	88.93%	0.07%	0.17%	0.05%	0.15%
泰山區	99.84%	66.52%	12.43%	0.24%	0.08%
八里區	0.11%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%
中和區	98.70%	98.86%	99.01%	99.17%	99.32%
三峽區	100.00%	80.00%	70.00%	27.44%	0.02%

表 5-11 桃園系統不同打折供水率優選結果(水規所，2012)

供水情境	90%	80%	70%	60%	50%
桃園市	99.65%	99.95%	99.60%	99.89%	99.55%
中壢市	99.97%	99.94%	99.91%	99.88%	99.85%
平鎮市	99.97%	99.95%	99.92%	99.90%	99.87%
八德市	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
楊梅市	98.55%	99.96%	98.51%	99.92%	98.47%
大溪鎮	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
蘆竹鄉	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
大園鄉	64.31%	28.28%	0.02%	0.16%	0.14%
龜山鄉	99.71%	99.42%	99.78%	99.48%	92.72%
龍潭鄉	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
新屋鄉	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
觀音鄉	99.99%	99.98%	80.43%	0.05%	0.04%
林口區	99.98%	99.97%	99.95%	87.35%	0.08%

(3) 鄉鎮區配水量決定

透過系統動力模式可模擬分析各供水系統可提供之供水量，而系統內各鄉鎮區之配水量則可由各鄉鎮區之配水率乘上系統供水量求得。

(4) 各鄉鎮市區暴露度計算

決定各區配水情形後，可計算各區缺水量，並以 2 年頻率年最大 DPD 為評估指標，分析系統中各鄉鎮市區公共給水之暴露度。

(5) 計算各鄉鎮區之生活用水及工業用水脆弱度

由各鄉鎮區暴露度，分別乘上各鄉鎮之人口密度與工業產值，即可求得各鄉鎮區之生活用水脆弱度與工業用水脆弱度。

2. 農業用水脆弱度

農業用水脆弱度透過農業用水敏感度及農業用水暴露度計算而得，農業用水敏感度係以行政區中水稻面積為考量因子，而農業用水暴露度則以缺水率作為分級依據。在系統動力模式中，農業供水量以灌區需水量進行考量，各行政區可取得之農業用水量則以配水率進行分配，在一個水源系統中，配水率的總和為 1。配水率係以依據最小輸水損失以及最佳灌溉成效為原則進行農業用水配水演算，亦即缺水時期輸水損失較小之圳路及面積越大之農地將分配較多之水量，以達到較高之灌溉效益。農業用水脆弱度之計算方式說明如後：

(1) 農業用水配水率計算

農業用水配水率主要考量因子為灌溉面積、渠道輸水損失與渠道長度，配水率計算流程如圖 5-9 所示，由流程圖中可知，計算時須先分類灌區內水源，接著找出經過各灌區之渠道，計算出於該灌區面積及灌區內渠道長度後，再計算各灌區之面積比與渠道輸水量比，求出兩者權重和後，最後可找出其與各分類之總權重關係即為配水率。

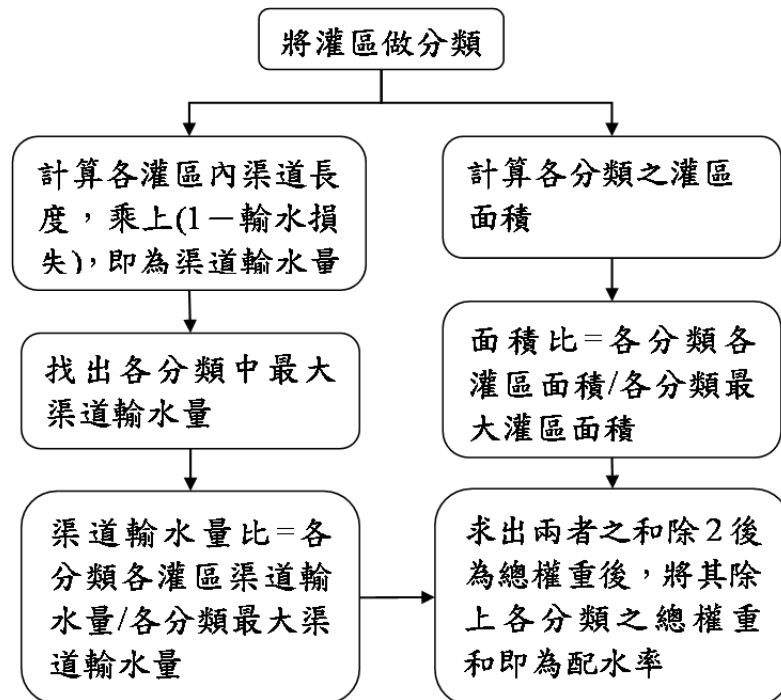


圖 5-9 農業配水率評估流程圖

(2) 行政區農業用水暴露度計算

農業用水暴露度在計算初期係以灌區為單位進行考量，然而，農業敏感度係為行政區之敏感度，因此須將灌區之暴露度轉換為行政區之暴露度，考慮各灌區在不同行政區內之面積比例，依此比例作為灌溉暴露度之權重值，求得各行政區農業用水暴露度。

5.4 水資源調適策略訂定

水資源調適策略訂定與調適策略各項方案之執行先後順序有關，各方案之時間性、有效性、效益、對環境之衝擊及不確定性等都可能影響調適策略的訂定，必須通盤考量才能提供各策略方案之優先順序，然而，在訂定調適策略之前必須先針對研究趨近進行一系列之評估，以分析造成各項因子造成之衝擊為何，本研究在流程上依據聯合國發展規劃署所提出的「氣候變遷調政策略綱領」(Adaptation Policy Frameworks for Climate Change)(Burton et al., 2004)為基礎，利用英國 UKCIP(UK Climate Impacts Programme)之調適精靈(Adaptation Wizard)(UKCIP, 2010)架構為基礎建立供水系統評估架構，由問題界定開始，針對各項評估因子所需之資料及產出提出說明，配合完成之各項用水標的現況及氣候變遷情境下之敏感度地圖、暴露度地圖及脆弱度地圖，接著提出解決問題之可能之調適策略，並採用多準則排序評估法(multicriteria ordering method)排序各調適方案，最後並持續調適措施之落實與修正。

5.4.1 UKCIP 調適精靈

英國 UKCIP(UK Climate Impacts Programme)調適精靈(Adaptation Wizard)提出評估調適策略的五大步驟(圖 5-10)，在進行策略評估之前，首先必須確定系統範圍並確定系統管理目標，針對可能的影響因子進行分析(步驟 1)，接著針對現況條件脆弱度(步驟 2)及未來脆弱度(步驟 3)進行分析，配合現況條件脆弱度及未來脆弱度，則可進行策略之挑選及評估(步驟 4)，當未來脆弱度並未明顯提升，或是已挑選的策略是否需要進行修改或調整以及調整的時機判斷，則透過步驟 5 進行評估。UKCIP 調適精靈評估流程各步

驟之工作項目、準備資料與工具及產出則列於表 5-12。配合圖 5-10 及表 5-12，UKCIP 各步驟說明如下：



圖 5-10 UKCIP 調適精靈評估流程(UKCIP,2010)

1. 步驟 1：開始評估

步驟 1 最主要之工作內容為確認系統範圍，並確定系統管理目標，針對可能的問題與影響因子進行分析，在此部份工作完成之時，應有之產出包括：問題界定、所需資料彙整、歷史氣象資料、管理目標與評估指標、水環境變動趨勢及未來氣候推估情境。

2. 步驟 2：現況風險評估

步驟 2 針對現況水資源供水系統脆弱度進行評估，主要工作項目包括河川流量分析、敏感度分析、暴露度分析及脆弱度分析，此外，利用現況河川流量配合現況需水量，分

析現況水資源供水系統之暴露度，配合現況敏感度地圖分析結果，完成現況脆弱度地圖，並說明現況可能之供水缺口。



3. 步驟 3：未來風險評估

步驟 3 針對未來水資源供水系統脆弱度進行評估，討論未來氣候變遷可能帶來的衝擊之外，亦針對不考量氣候變遷情境下對水資源系統所造成之脆弱度進行分析討論，其主要評估項目與步驟 2 之現況水資源供水系統脆弱度評估時工作項目相同，分析不同氣候變遷情境下之河川流量，分析未來各標的用水之敏感度、暴露度及脆弱度地圖，說明未來可能之供水缺口，探討現況現況與未來供水系統脆弱度之差異，並作為後續調適策略分析及挑選之依據。

4. 步驟 4：確認、評估與實施調適方案

步驟 4 針對確認、評估與實施調適方案進行評估，依據步驟 1~步驟 3 之分析結果，可進行調適方案需求分析及未來供水缺口改善分析，由於可採行之調適方案可能很多，因此透過多則分析可進行調適方案之優先順序分析，最後訂定調適方案實施計畫。

在調適策略比較準則選定上，英國 UKCIP(UK Climate Impacts Programme)調適精靈(Adaptation Wizard)建議可包含之準則有：

- (1) 效用(Effectiveness)：方案是否可達到預計目標
- (2) 效益(Efficiency)：經濟上是否利益大於花費
- (3) 公平性(Equity)：該區域調適方案不應該對其他區域造成負面影響
- (4) 彈性(Flexibility)：方案後續是否有增加或調整空間
- (5) 永續性(Sustainability)：調適方案是否可幫助達到永續性目標
- (6) 實用性(Practical)：方案是否在不同的時間尺度上依然可以被執行
- (7) 可行性(Legitimacy)：調適方案是否為法律或社會可接受
- (8) 即時性(Urgency)：方案多快可以被執行

(9) 強健性(Robust)：在氣候變遷不確定性下，方案是否依然強健

(10) 協同(Synergies/ coherence with other strategic objectives)：該調適方案可否幫助其他調適方案達到目標

為了適當評估可採行之調適方案，研究中選用效用、永續性、可行性與即時性 4 個評估準則作為調適方案挑選之評估準則，4 個評估準則評代表之定義與其在 UKCIP 之調適精靈中定義並不完全相同，其定義分別說明如下：

- (1) 效用：評估調適方案每單位成本可增加水量或節約水量，或可以降低缺水脆弱能力。
- (2) 永續性：評估方案對現況環境之影響與衝擊。
- (3) 可行性：評估是否符合現有政策制度、民眾對於方案之接受度及方案執行難易度，亦可評估經濟性可行。
- (4) 即時性：評估方案從規劃設計到執行階段所需花費的時間。

確立評估準則後，透過多準則排序評估法分別分析各項方案於不同準則下之優先順序，藉此挑選出適當之調適方案，多準則排序評估法將說明於下一小節。然而，單一調適方案可能無法完全滿足未來水資源供需平衡，因此可依照調適方案之優先順序，以調適方案組合之方式達到水資源供需平衡。

5. 步驟 5：監測及檢核

步驟 5 主要的工作重點在於檢核調適策略是否有效、策略重新檢視之時機以及調整或改變策略之時機，藉由分析個策略執行之成效報告，調整及修正調適策略或調適方案，並建立檢核頻率與檢核方式。



表 5-12 水資源面對氣候變遷脆弱評估與強化調適能力推動流程

評估步驟	工作項目	準備資料與工具	產出
開始評估	確定系統範圍 確定系統管理目標 可能問題與影響因子分析	建立評估所需知識 蒐集所需資料	所需資料彙整 管理目標與評估指標 問題界定 歷史氣象資料 水環境變動趨勢分析 未來氣候推估情境
評估現況風險	河川流量分析 敏感度分析 暴露度分析 脆弱分析	歷史氣象資料 歷史極端事件與處理方式 水資源系統分析模式 人口、工業產值、農業面積	現況生活、農業、工業敏感度圖 現況公共、農業之暴露度圖 現況生活、農業、工業之脆弱圖 供水缺口 脆弱度因子確定
評估未來風險	河川流量分析 敏感度分析 暴露度分析 脆弱分析	氣候推估情境 水資源系統分析模式 未來人口、工業產值、農業面積	以下包括不考慮與有考慮氣候變遷兩類 生活、農業、工業之敏感度圖 未來公共、農業之暴露度圖 未來生活、農業、工業脆弱度圖 不考量氣候變遷之供水缺口 考量氣候變遷之供水缺口 脆弱因子確定
確認、評估與實施調適方案	調適方案需求分析 未來供水缺口改善分析 調適方案多準則分析 訂定調適方案實施計畫	可能調適方案知識庫 水資源系統分析模式 多準則評估模式	對應脆弱度因子之調適方案 調適方案推動之優先順序
監測及檢核	1.調適策略是否有效 2.檢視策略的時間 3.改變策略的時機	持續氣象、水文、水資源供水紀錄 支援決策工具	提出執行成效報告 檢核頻率與機制建立 調適行動預警與修正

5.4.2 多準則排序評估法



若決策問題有 n 項可行之調適方案 A_i ， m 個評估準則 C_j ，決策目的在決定調適方案執行優先順序。就每一評估準則 C_j ，任意兩個方案 A_i 與 $A_{i'}$ 之比較只有兩種情況，即 A_i 優於 $A_{i'}$ 或 $A_{i'}$ 優於 A_i ，成對比較較佳之計畫可得 1 分，較差之計畫則得 0 分，即 $S_j(i, i')$ 表在評估準則 C_j 下，計畫 A_i 與 $A_{i'}$ 比較後之得分，表示如式(5-6)，經 n 項方案成對比較後，可得優劣成對比較矩陣 S_j ，即可以式(5-7)表示。

$$S_j(i, i') = \begin{cases} 1 & \text{if } A_i \text{ 優於 } A_{i'} \\ 0 & \text{if } A_{i'} \text{ 優於 } A_i \end{cases} \quad \forall i, i', i \neq i' \quad (5-6)$$

$$S_j = [S_j(i, i')]_{n \times n} \quad \forall j \quad (5-7)$$

由於方案 A_i 不與自己比較，矩陣 S_j 對角線無數值，由於方案優劣比較為該放棄優於其他方案之次數，因此在對角線填入 0 以利後續統計。依據 C_j 評估準則下 n 項調適方案成對比較後，可計算 A_i 計畫優於其他計畫之總次數，以 RS_{ij} 表示此總優勢次數，則以式(5-8)說明。

$$RS_{ij} = \sum_{i'=1}^n S_j(i, i') \quad \forall i, j \quad (5-8)$$

根據 RS_{ij} 值之大小，即可排列於 C_j 準則下之方案優先順序(如式(5-9)所示)， RS_{ij} 值越大表示方案越佳應排序在前。

	A1	A2	A3	A4	A5	得分	排序	
$S_1 =$	A1	0	1	1	1	0	3	1
	A2	0	0	0	1	1	2	2
	A3	0	0	0	1	0	1	4
	A4	0	0	0	0	1	1	5
	A5	1	0	1	0	0	2	3

(5-9)

當計算出各方案優勢次數後，可能出現兩個或三個以上方案優勢次數相同情形，如上式，若兩方案有相同之得分，則可直接判斷兩者之優先順序，若三個以上之方案得分相同，此時需在針對這幾個方案建立優劣比較之次矩陣(sub-matrix)，統計其優勢次數，再據以排列這些計畫之優先順序。若有 n' 項計畫的總優勢次數相同，則此 n' 項計畫在 C_j 評估準則下優劣成對比較矩陣表示如式(5-10)，根據成對比較矩陣，可計算 A_i 計畫優於其他計畫的次優勢次數(式(5-11))。

$$S_j^b = [S_j(i, i')]_{n' \times n'} \quad i, i' \in A' \quad (5-10)$$

$$RS_{ij}^b = \sum_{i'=1}^{n'} S_j(i, i') \quad i, i' \in A' \quad (5-11)$$

依據 RS 值的大小，可再進一步對 n' 項方案優先順序進行排序，排序方式同總優勢次數排序方法， m 個評估準則下的 n 項方則利用排序合法(ranking summation method)，將各方案於各準則下之排序名次加總比較，推求 n 項方案之總排序(overall ranks)。



第六章 氣候變遷對水庫操作與供水系統衝擊、脆弱度評估與 調適策略分析



本章節利用第五章建立之氣候變遷對水庫操作衝擊評估之方法，針對氣候變遷對水庫操作衝擊評估與氣候變遷對供水系統衝擊、脆弱度與調適策略進行分析，討論首先討論研究區域內河川流量受到氣候變遷之衝擊，再針對不同氣候變遷情境下水庫功能受到之衝擊進行分析評估；而在氣候變遷對供水系統衝擊、脆弱度與調適策略評估方法上，首先建立水資源供水模式以缺水指標、缺水百分日指標與回復力指標分析氣候變遷對供水系統之衝擊，並分析供水區域內各鄉鎮(區)不同用水標的之暴露度、敏感度及脆弱度，並利用第五章建立之調適策略評估方法，提出並分析各供水區域可能之調適策略。

6.1 研究區域

本研究主要針對氣候變遷對水庫操作衝擊評估與氣候變遷對供水系統衝擊、脆弱度與調適策略分析，在兩個討論主題上其研究區域並不相同，在氣候變遷對水庫操作衝擊評估部分主要以石門水庫為探討對象，利用不同時間尺度之水庫操作模式分析氣候變遷對水庫操作之衝擊；而在氣候變遷對供水系統衝擊、脆弱度與調適策略分析時，則以淡水河流域之臺北、板新及桃園供水區域為主進行分析評估。

淡水河為發源於品田山(標高 3,529 公尺，位於新竹縣及台中市交界)，平均坡降為 1:122，主流長度為 158.70 公里，集流面積為 2,726 平方公里，主流及各主要支流流經新竹縣、宜蘭縣、桃園縣、新北市、基隆市及臺北市，於新北市淡水及八里區交界處注入臺灣海峽，淡水河西與鳳山溪及頭前溪交界，南接大安溪及大甲溪，東鄰蘭陽溪，全區年均降雨量為 2,966 毫米，乾溼季降雨差異較小，年均逕流深度 2,419 毫米。區內重要水工設施包括：西勢(基隆河)、新山(基隆河)、石門(大漢溪)及翡翠(新店溪)4 座水庫及直潭壩、青潭堰(新店溪)與鳶山堰(大漢溪)。主要支流包括新店溪、大漢溪及基隆河，流域概圖如圖 6-1 所示。

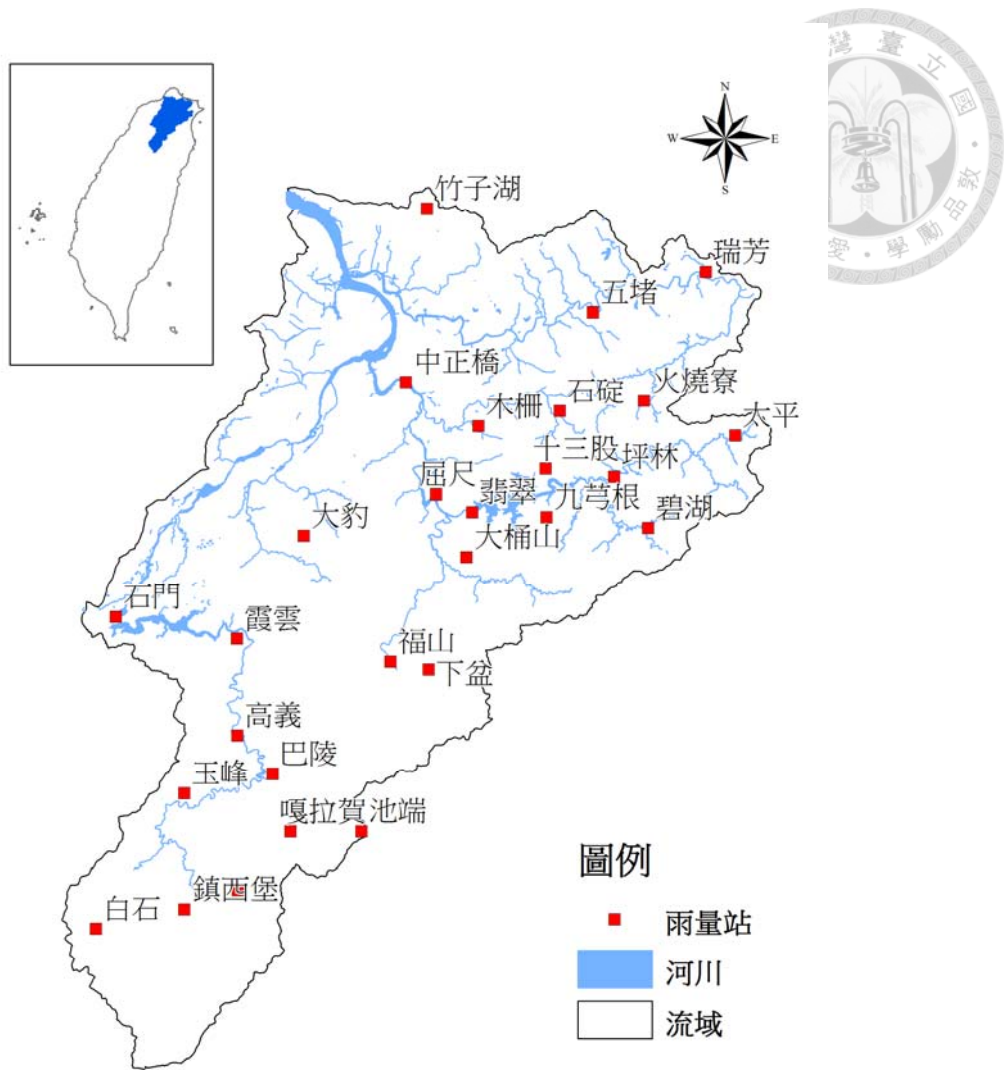
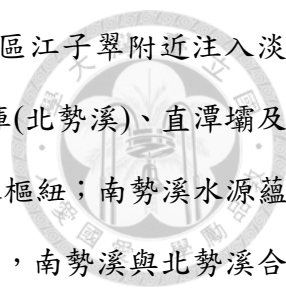


圖 6-1 淡水河流域概圖

大漢溪發源於品田山(標高 3,529 公尺)，於新北市板橋區江子翠附近注入淡水河，流長 135 公里，集流面積 1,163 平方公里，主流有石門水庫及鳶山堰兩座重要水利設施；最大支流三峽河發源於桃園縣喀博山(標高 1,582 公尺)，流長約 22.6 公里，集流面積 125.34 平方公里，於新北市樹林及土城區交界匯入大漢溪，三峽河設有三峽堰(三峽抽水站)亦為一重要水利設施。

新店溪發源於大溪山(標高 620 公尺，新北市與宜蘭縣交界)及塔曼山(標高 2,130 公尺，位於新北市與桃園縣交界)，其兩大支流北勢溪(流長約 50 公里)及南勢溪(流長約 45



公里)於新北市新店區龜山附近合流後始稱新店溪，於新北市板橋區江子翠附近注入淡水河，流長為 82 公里，集流面積 921 平方公里，流域內有翡翠水庫(北勢溪)、直潭壩及青潭堰 3 座重要水利設施，其中直潭壩為大臺北地區最重要的供水樞紐；南勢溪水源蘊藏豐富，由上游至下游設有阿玉壩、羅好壩及桂山壩攔蓄溪水發電，南勢溪與北勢溪合流後流經的粗坑壩也是重要的水力發電站。

基隆河發源於新北市平溪區菁桐附近，主流往東北東流經新北市瑞芳區，在基隆市暖暖附近轉向西流，流經臺北盆地北側後，於社子北端匯入淡水河，為淡水河水系三大支流之一，流長為 86 公里，集流面積 490 平方公里。集水區內有新山和西勢兩座水庫，以及瑪陵坑及東勢坑攔河堰。

6.1.1 區域水資源供需情況

臺北地區主要水源為新店溪及地區性水源，目前自來水水源供水能力約每日 262.8 萬立方公尺，民國 110 及 120 年中成長用水需求預估為每日 182.5 及 176.3 萬立方公尺，現況水源供給能力已能提供所需。

板新地區水源主要靠大漢溪及調配新店溪水源供給，現況水源供給能力約每日 86.0 萬立方公尺，民國 110、120 年中成長用水需求預估為每日 88.8、89.4 萬立方公尺，不足量分別為每日 2.8、3.4 萬立方公尺。板新供水改善計畫二期工程完工後，可規劃將部分新店溪水源移用至北桃園供水系統，減輕石門水庫供水壓力。

桃園地區現況水源供給能力約每日 100.0 萬立方公尺，主要來源為大漢溪水源，民國 110 及 120 年中成長用水需求預估為每日 148.1 與 151.5 萬立方公尺，不足量分別為每日 48.1 與 51.5 萬立方公尺。若可建立「新店溪與大漢溪共同調度供水機制」，興建桃園、新竹雙向供水，增加本地之備援水量；完成板新供水改善計畫二期工程及板新大漢溪水源南調桃園計畫，使北至臺北地區，南至新竹地區形成管網聯結，便利於臺北、板新、桃園地區之水資源整體有效利用。

6.1.2 水資源設施

水資源設施包括取水設施、淨水場、取水管路及海水淡化廠等，臺北、板新及桃園地區之水資源設施明如下：



(1) 水庫及壩堰設施

研究區域內營運中之水庫及堰壩設施如表 6-1 所示，共有 2 座水庫及 4 座堰壩，詳細說明列於表 6-1。研究區域內兩座重要水庫為石門水庫及翡翠水庫，石門水庫位於桃園縣境內，水源來自於大漢溪，集水區範圍廣及桃園、新竹、宜蘭三縣，有效集水面積 763.4 平方公里，滿水位標高 245 公尺，最高洪水位標高 249.5 公尺，民國 97 年實測蓄水總容量為 21963 萬立方公尺。石門水庫具有灌溉、防洪、給水、發電及觀光等功能，是為一多目標水庫，平時調蓄運用大漢溪水源，發電尾水可供應桃園台地及水庫下游灌溉用水，並供給桃園及板新地區之公共給水與工業用水，在颱風期間水庫可降低並延緩洪峰流量，確保下游民眾生命財產安全。

石門水庫主要提供桃園農田水利會與石門水利會灌溉用水量，並提供桃園供水系統及板新供水系統之公共給水，其中二區處主要為石門及龍潭供水系統，在防洪功能上，水庫原規劃設計之最大可能洪水量為 10900cms，其相應溢洪道之設計排洪量為 10000 cms，水庫最高洪水位為 249.5 公尺，但民國 52 年葛樂禮颱風帶來破紀錄之洪水後，大壩壩頂加高及溢洪道上游欄杆改建後，水庫最高洪水經提高為標高 251 公尺，其相應之溢洪道最大可能排洪量為 11400cms，後又經規劃研究分析石門水庫最大可能洪水，依據颱風模式法推算為 14500 cms，相應之水庫排洪量為 13800 cms。

石門水庫及其上游有石門與義興兩座電廠，其中石門電廠屬水庫式發電，兼顧長期性系統供電安全，以石門水庫操作規線為其運用準則，義興電廠位於榮華攔砂壩下游，屬於調整池式發電廠，由於義興電廠位於石門水庫上游，故發電後水量仍可留在庫區內作為其他供水之用途。

翡翠水庫新北市境內，水源來自於於新店溪支流北勢溪，水庫集水面積為 303 平方公里，總蓄水量為 40,600 萬立方公尺，目前有效蓄水量則有 34,011.7 萬立方公尺，水庫

主要供水標的為供應民生用水並兼具發電與防洪功能，翡翠水庫供水範圍包括臺北市全區及新北市部分區域，其供水方式以南勢溪天然流量為主，當南勢溪天然流量不足以供應下游需求時，再由翡翠水庫放水提供不足之需水量。翡翠水庫之下游依序有直潭壩與青潭堰，直潭壩引水至直潭淨水場，青潭堰則攔蓄水量引水至長興淨水場與公館淨水廠。翡翠水庫之附有翡翠電廠，翡翠電廠位於大壩下游，翡翠水庫放水量會先引至翡翠電廠發電，發電尾水放流至北勢溪，與南勢溪流量匯合後流再提供下游需求量。

表 6-1 水庫及壩堰設施說明

水工設施	位置	形式	水源	供水標的
石門水庫 (763.4 km ²)	桃園縣龍潭鄉	本槽水庫	大漢溪	1.灌溉 2.公共給水 3.發電
鳶山堰 (869.4 km ²)	新北市三峽、 鶯歌區交界	攔河堰	大漢溪	1.公共給水 2.灌溉
翡翠水庫 (303 km ²)	新北市新店、 石碇區交界	本槽水庫	北勢溪	1.公共給水 2.發電
直潭壩 (679.8 km ²)	新北市新店區	攔河堰	新店溪	公共給水
青潭堰 (716.8 km ²)	新北市新店區	攔河堰	新店溪	公共給水
三峽堰	新北市三峽區	攔河堰	三峽河	公共給水

(2) 淨水場

臺北供水區主要淨水場計有直潭淨水場、公館淨水場與長興淨水場，板新用水區主要之淨水場為板新淨水場，桃園供水區主要之淨水場為龍潭、石門、平鎮及大湳淨水場，各淨水場處理能力則列於表 6-2。

表 6-2 淨水場處理能力

系統名稱	淨水場	處理能力(噸/日)
臺北	長興淨水場	543000
	公館淨水場	416000
	直潭淨水場	2700000
板新	板新淨水場	1200000
桃園	龍潭淨水場	50000
	平鎮淨水場	600000
	石門淨水場	120000
	大湳淨水場	300000

(3) 自來水供水系統

臺北市屬於臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)所管轄，板新及桃園則分屬臺灣自來水公司(以下簡稱台水公司)第十二區處及第二區處管轄，臺北用水區主要以臺北供水系統為主，其由直潭淨水場、公館淨水場、長興淨水場等供應臺北市全部行政轄區、新北市三重區(二重疏洪道以東)、中和區(員山路以東)、永和區、新店區及汐止區(7里)，新北市由板新淨水場供水之地區包括板橋區、新莊區、蘆洲區、樹林區、土城區、鶯歌區、三峽區、泰山區、五股區及八里區等區域全區以及三重區與中和區部分區域。

桃園用水區可分為桃園南及北區，主要由大湳淨水場、平鎮淨水場、石門淨水場與龍潭淨水場供應桃園縣(市)、蘆竹鄉、八德市、龜山鄉、中壢市、平鎮市、大園鄉、大溪鎮、龍潭鄉、楊梅鎮、觀音鄉、新屋鄉、復興鄉、新竹縣湖口鄉及新北市林口區。

(4) 農業灌溉系統

研究區內有瑠公、七星、桃園及石門農田水利會，除調配用農業水外，並負責維護管理其轄內之灌溉設施，以維持農田灌溉用水之供應。瑠公農田水利會灌溉水源來自淡水河系新店溪，灌溉區域包括臺北市基隆河以南部分區域，以及新北市新店區、深坑區、石碇區及坪林區，設有新店及社子 2 個工作站，灌溉面積約為 265 公頃，大多種植旱作。七星農田水利會灌溉水源引自基隆河、磺溪、雙溪、貴子坑溪與水磨坑溪，灌溉渠道多

細小短促且星散迴流，目前因大臺北都會演進，僅餘 33 條灌溉渠道，灌溉區域為臺北市北投、士林、南港、內湖等區及新北市汐止區，總計面積約 752 公頃，大多種植旱作。

桃園農田水利會灌溉水源主要由桃園大圳、光復圳、大漢溪流域及各埤塘、攔河堰組成，灌溉區域跨臺北、桃園、新竹三縣，區分為桃園、湖口、大溪、海山四個灌溉區，並設有桃園、大竹、大園、大崙、草漯、新坡、觀音、新屋、湖口、大溪、新莊、海山等 12 個工作站，灌溉面積約 24,721 公頃。

石門農田水利會灌溉水源主要為石門水庫，次為埤塘蓄灌水量，攔河堰回歸引灌，以及地下水源之深井抽灌(適用於枯早期)，灌溉區域跨越臺北、桃園、新竹縣，涵蓋鶯歌、八德、大溪、龍潭、觀音、中壢、新屋、楊梅、湖口及新豐等 12 鄉鎮市，有八德、中壢、過嶺、楊梅、富岡、湖口等工作站，灌溉面積約 12,085 公頃。

6.2 氣候變遷對水庫操作之衝擊評估

6.2.1 氣候變遷對石門水庫入流量之影響

討論氣候變遷對石門水庫入流量影響時，以雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式繁衍之氣象資料，配合 NTU_WH_DH 模式模擬之河川流量，分析氣候變遷對石門水庫上游入流量之影響，評估方式則分別討論不同氣候變遷情境下所有 GCMs 結果之流量改變平均結果進行說明。

圖 6-2、圖 6-3 及圖 6-4 分別為豐水期、枯水期及全年各情境之石門水庫入流量改變量，由圖 6-2 中可以發現在豐水期時，在 A1B 及 B1 情境下，除了 MIMR 模式外，其他情境入流量都是增加的情形，而在 A2 情境中，CSMK35、MIMR 及 MRCGCM 模式之外入流量是減少的，不過整體來說，除了 B1 情境之 MIMR 模式流量減少幅度較大之外，其他的情境就算流量減少，幅度也不超過 5%，因此大致上來說在豐水期河川流量是增加的；而在枯水期河川流量改變的情況就比較明顯(圖 6-3)，由於枯水期河川流量本來就比較少，因此只要有些許的變動就可能造成河川流量較大的改變情況，而根據分析結果顯示，在大部分的模式及情境中，枯水期的河川流量都是減少的情況；而在全

年流量部分，雖然在枯水期流量改變的情況很明顯，但是由於枯水期流量比起豐水期為少，因此全年流量改變的情況大致和豐水期流量改變情況相同，整體來說，雖然在不同的模式及不同的情境下，未來河川流量可能有減少的情況發生，最大減少幅度約為 9%。

根據上述分析結果可知，未來全年河川流量有減少的可能，但減少的幅度最大僅約 9%，然而，在未來豐水期的河川流量大部分是增加的，而枯水期的河川流量大部分是減少的情況下，顯示未來豐水期及枯水期河川流量差異將會擴大，對於未來水資源調配將造成一定程度的影響。

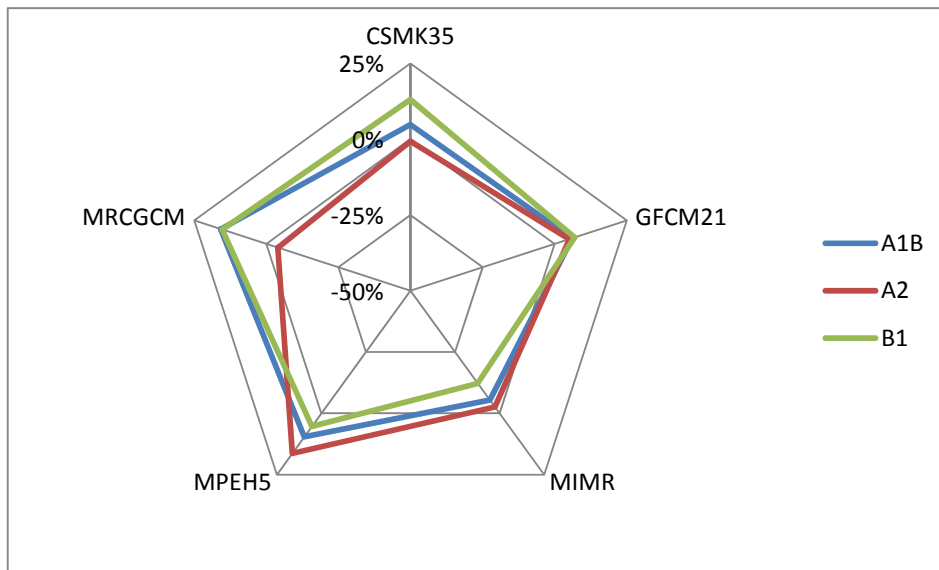


圖 6-2 豐水期入流量改變率

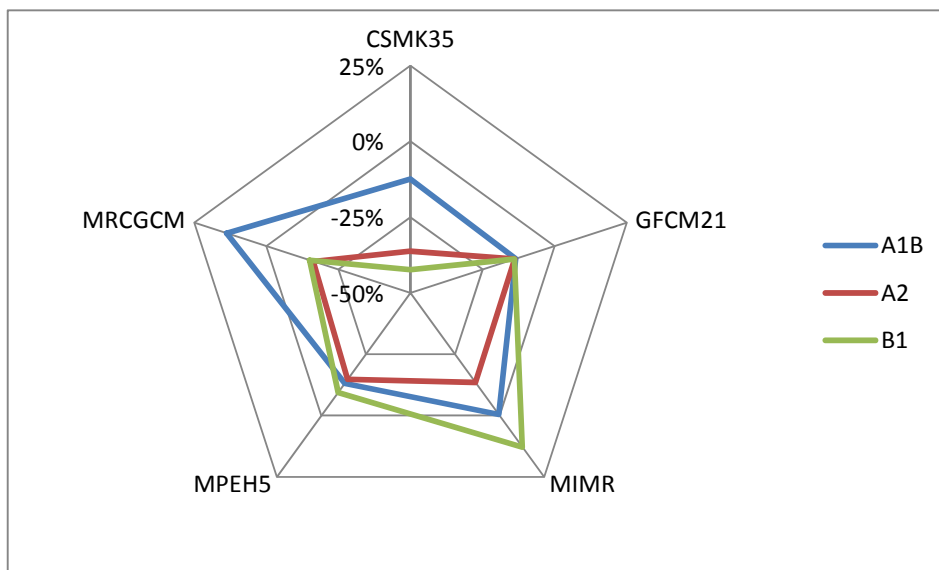


圖 6-3 枯水期入流量改變率

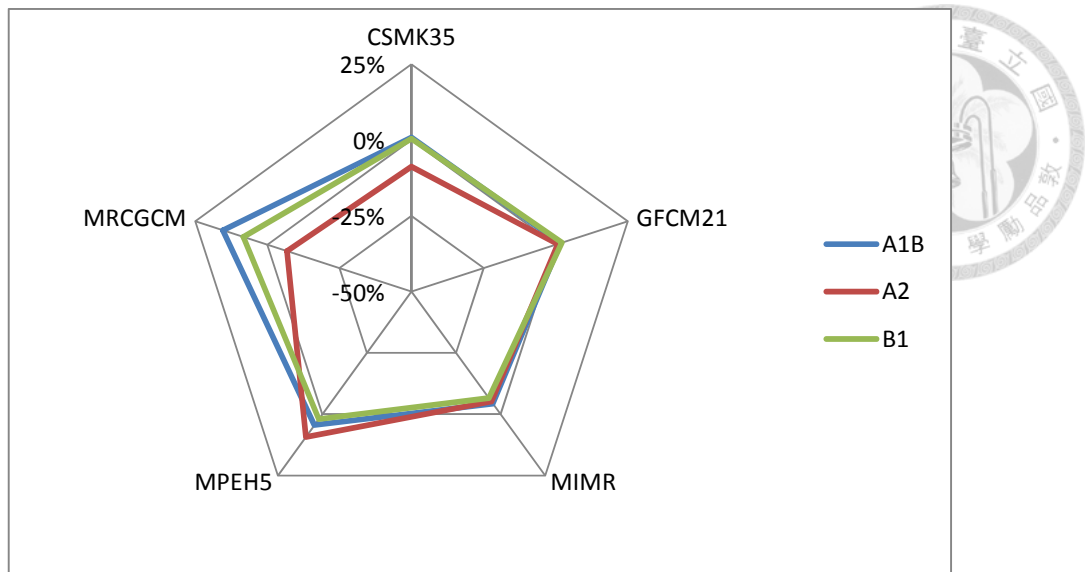


圖 6-4 全年入流量改變率

6.2.2 氣候變遷對石門水庫石門水庫操作衝擊評估

本小節首先針對水庫操作模式進行驗證，說明研究中建立之模式模擬水庫操作情形與歷史水庫水位之差異，並說明不同氣候變遷情境對對石門水庫供水及減洪功能之衝擊評估。

1. 水庫操作模式驗證

圖 6-5 為石門水庫 1980~1999 年之歷史水位歷線圖，由圖中可以看出石門水庫在這段期間，50 百分位的水庫水位大致落在上限至下限範圍內，而 75 百分位的水庫水位則大致與上限水位符合，但在某些時期仍可能超過上限水位。與圖 6-6 以日為時間尺度及基期流量資料模擬之水庫水位比較，由於模擬水位是以氣象合成模式所產生之氣象資料，利用 NTU_WH_DH 模式模擬之基期流量資料代入水庫操作模式進行模擬，因此並不能完全與歷史水庫水位相同，但模擬之水庫水位趨勢與歷史水位趨勢相近，顯示水庫操作模式可合理重現水庫操作情形。

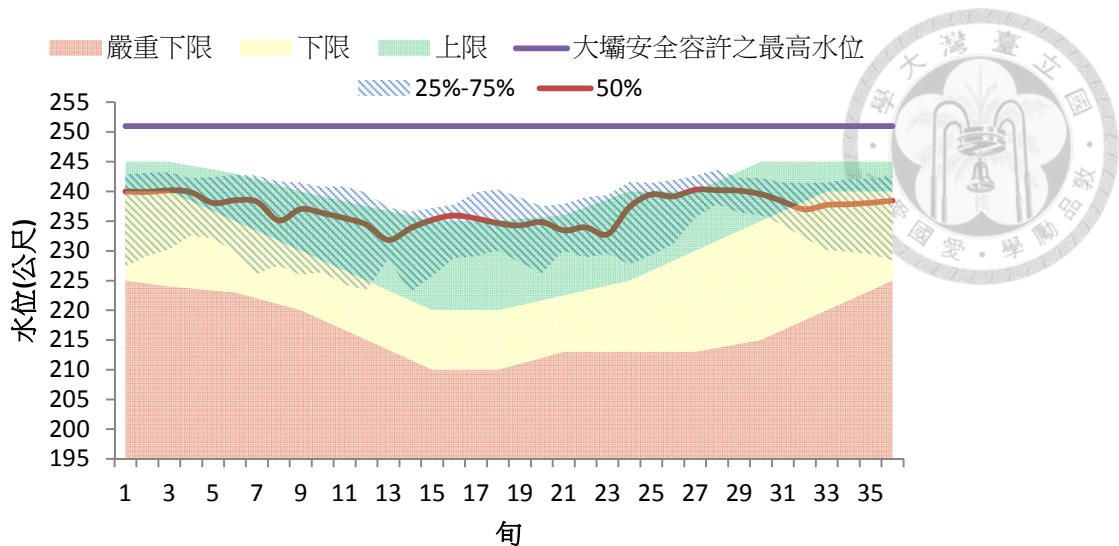


圖 6-5 石門水庫歷史水位圖

在不同時間尺度水庫操作模式比較上，圖 6-6 為以日時間尺度操作之水庫水位圖，由於在日操作情況下，當暴雨事件發生時，水庫最多放水至 245 公尺，因此，可以發現 7-9 月的 75 百分位的水庫水位有高於上限的情況發生。在豐水期時，三種不同百分位之水庫水位均落於上限至下限之間，顯示在豐水期時水庫供水情形是充足的；而在枯水期時，25 百分位的水庫水位落在嚴重下限之下共有 10 旬，顯示在枯水期時，水庫供水可能較為嚴峻。

圖 6-7 為考慮不同時間尺度之水庫操作情形，在暴雨事件時，水庫放水量是以小時入流量進行考慮，因此在暴雨事件結束之後，水庫水位不一定會與僅考慮日時間尺度操作之水位一樣維持在 245 公尺，會因為不同的入流量及雨量使得水庫水位落在不同的區間，75 百分位的水庫水位大致上皆與上限水位接近，但較僅考慮日操作之水庫水位為低。在豐水期時，三種不同百分位之水庫水位皆落於下限之上，顯示水庫蓄水較豐沛供水情況較佳，而在枯水期時，50 百分位的水位已出現低於嚴重下限的情況，而 25 百分位之水庫水位有 10 旬低於嚴重下限，顯示供水在枯水期面臨很大的挑戰。

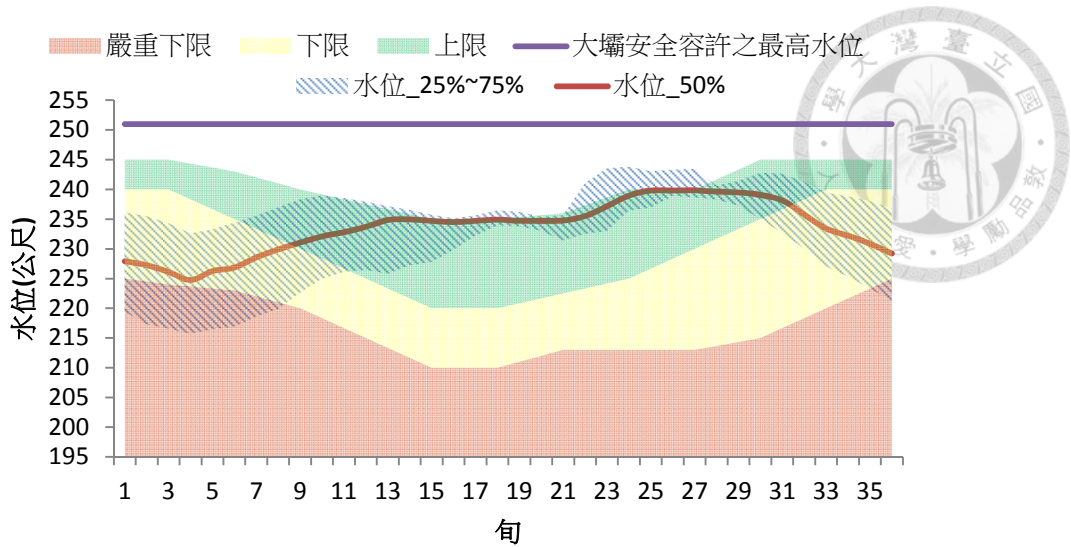


圖 6-6 日時間尺度水庫操作水位

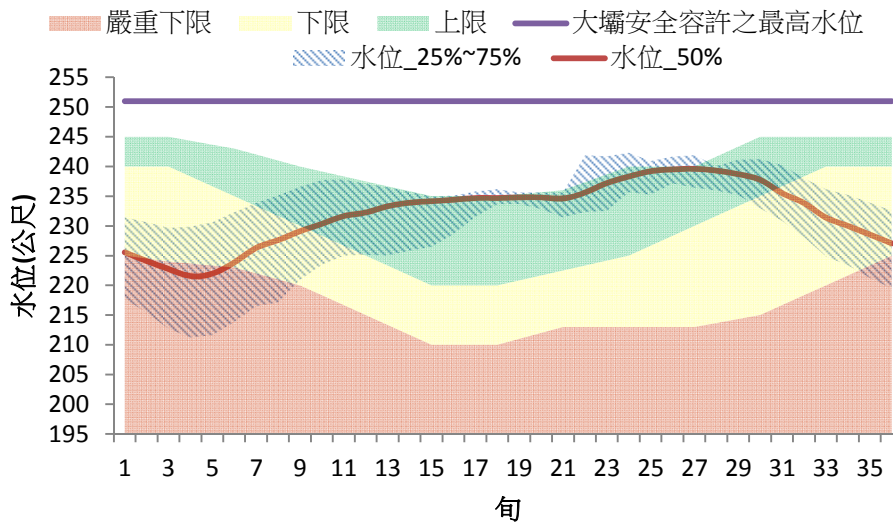


圖 6-7 不同時間尺度水庫操作水位

若整年未發生暴雨事件且起始水位相同，則兩種不同操作之整年水庫水位因放水條件相同，故整年之水位相同，然而，若考慮暴雨事件發生之小時操作時，則水庫水位會因為小時操作的放水情況與日操作之放水情況不同而有差異，圖 6-8 為模擬中特定一年之水庫水位逐日變化圖，在該年中暴雨事件發生於第 258 日，配合小時雨量及流量水庫採用小時操作，其他時間則以日為時間尺度進行操作。由圖 6-8 中可以發現，在暴雨事

件結束的當日，僅考慮日時間尺度之操作水位高於日+小時操作的水位，這是由於僅考慮日時間尺度操作在暴雨事件時最多放水至 245 公尺，但考慮小時操作時可配合小時入流量評估小時出流量，因此放水量較僅考慮日時間尺度水庫操作情況為高。當水庫水位持續在較高的情況下時，可能會過於樂觀估計未來可用之水量，再加上石門水庫當水庫超過上限水位時，可以增放水量以提供發電用水量，而由圖 6-8 可看出，日操作在暴雨事件過後水庫水位較同時考慮日及小時操作情況為高，因此將因為水位的高估，而高估可提發電水量，因此導致高估電廠發電量。

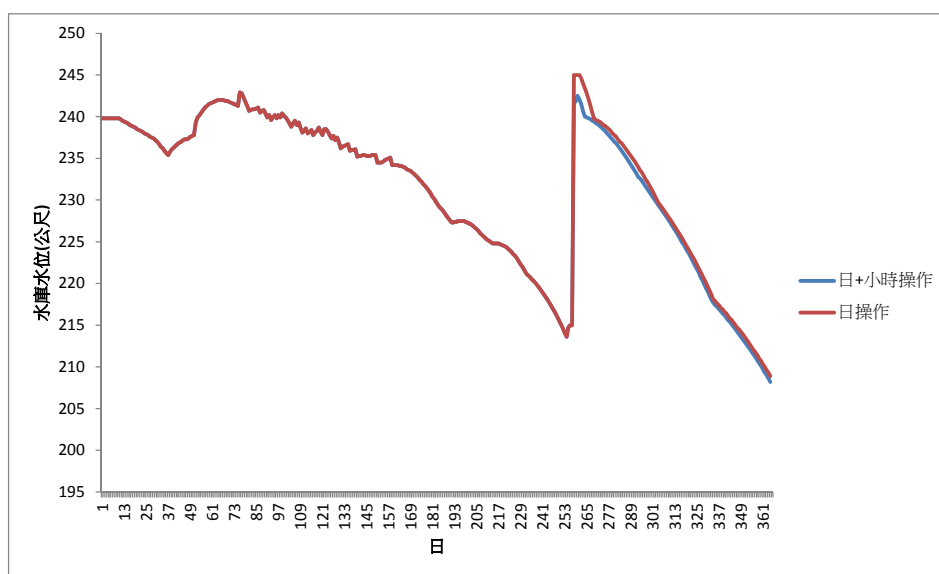


圖 6-8 特定年不同時間尺度水庫操作水位

2. 氣候變遷對水庫操作之影響

在 A1B 情境中(圖 6-9)，25 百分位之水庫水位大致上與基期之 25 百分位之水庫水位相似，但水庫水位之 50 百分位低於下限的情況為 14 旬，較歷史僅有 10 旬情況為差，顯示未來因水庫入流量發生改變，因此水庫可提供的水量較不足夠，然 75 百分位之水庫水位在豐水期則高於基期同時期之水位，顯示在未來氣候變遷的情境下暴雨事件雨量的增加可能使得水庫在豐水期時之防洪操作面臨更加嚴格的挑戰。以 GFCM21 模式之分析結果來看(圖 6-10)，由於在豐水期時暴雨事件雨量增加，且可能連續發生暴雨事件，因此在豐水期時水庫最大水位可能超過水庫大壩安全容許之最高水位，因而造成水庫壩

體之危害。由此可知，雖然水庫在 75 百分位~25 百分位之水位與基期接近，然而，暴雨事件接連發生與暴雨事件雨量增加可能造成其他嚴重的問題。此外，水庫在 75 百分位~25 百分位之水位之範圍較基期為大，亦顯示其供水之不確定性可能增加。

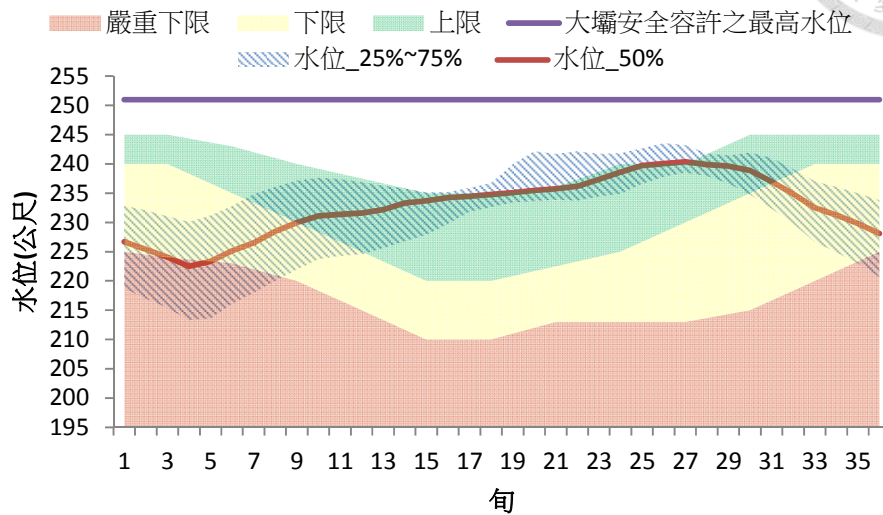


圖 6-9 A1B 情境水庫水位分析

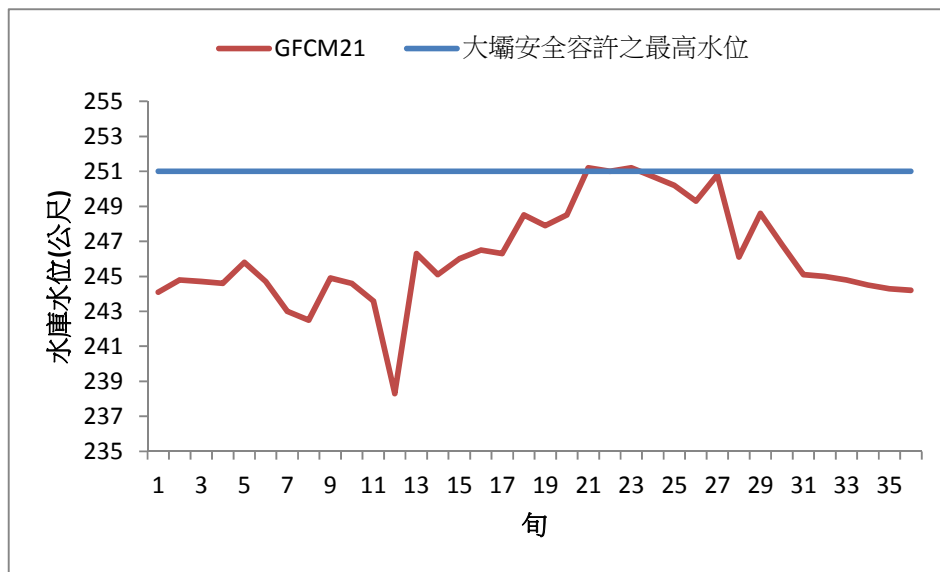


圖 6-10 GFCM21 模式之水庫各旬最大水位

在 A2 情境(圖 6-11)下，25 百分位之水庫水位在枯水期皆低於與基期同期之水庫水位，而 75 百分位之水庫水位不論在枯水期或豐水期皆低於基期之水位，顯示在 A2 情境

下，水庫供水能力受到極大的影響；在 B1 情境中(圖 6-12)，25 百分位之水庫水位從第 6 旬至第 18 旬皆低於基期之水位，但其幅度較 A2 情況緩和，而在 75 百分位之水庫水位上，在第 3 旬至第 17 旬亦低於基期水位，顯示在枯水期時，水庫供水能力將受到氣候變遷的影響，而在豐水期時水庫 75 百分位之水位會略高於基期水位，但改變幅度並不大。

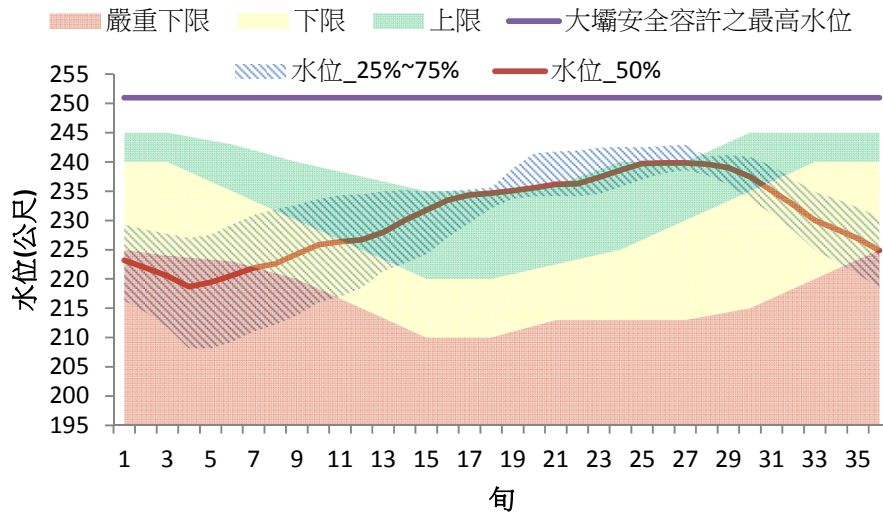


圖 6-11 A2 情境水庫水位分析

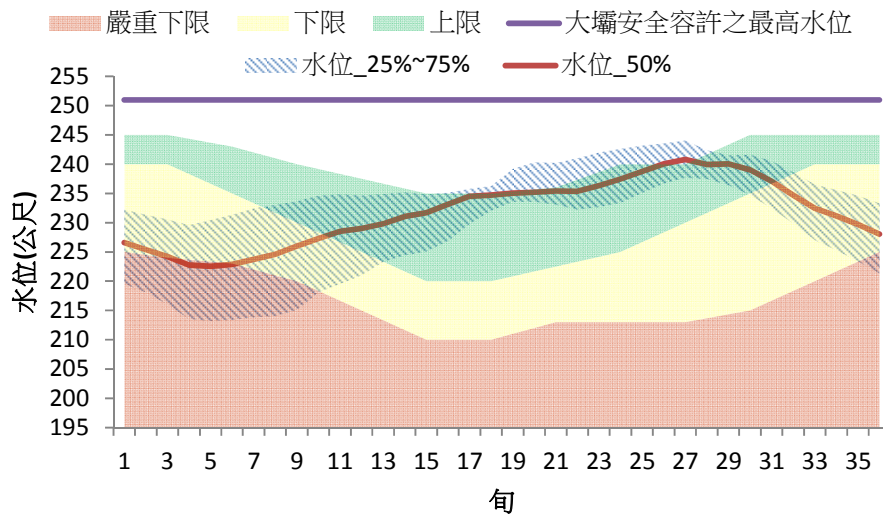


圖 6-12 B1 情境水庫水位分析

6.3 氣候變遷對各供水分區供水情形之影響評估

6.3.1 未來水資源需求情境設定

未來水資源需求推估，係採用水利規劃試驗所於 2012 年完成之「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」之推估方法，同時考慮氣候變遷與社經發展的影響，設定未來需水情境。

「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」(水利署，2009a)已針對民國 120 之每人每日用水量及工業用水量進行推估，本研究在生活用水量部分，除了考慮民國 120 年之每人每日用水量之外，加入國民生產毛額(人均 GDP)代表社會經濟發展，討論因為經濟發展對每人每日用水量之影響，而氣候變遷導致溫度升高對每人每日用水量之影響亦加入分析，綜合各項因子探討民國 120 年之每人每日用水量；在工業用水量則以不同工業區開發情境配合不同氣候變遷情境分析民國 120 年之工業用水量；農業用水量則考慮氣候變遷導致溫度上升與降雨改變，造成農業灌溉需水量改變的情況，配合不同 GCMs 及氣候變遷情境修正農業用水量。

1. 生活用水

未來生活用水部分考慮氣候變遷及社會經濟發展對每人每日用水量(LPCD)之影響，社會經濟發展對每人每日用水量係考慮隨著人均 GDP 成長對用水量之影響，而氣候變遷之影響則考慮因為溫度增加而所增加之用水量，故每人每日用水量可以式(6-1)表示。

$$LPCD_f = LPCD_{120} + GDP修正量 + 溫度修正量 \quad (6-1)$$

式中， $LPCD_f$ 為修正後之每人每日用水量， $LPCD_{120}$ 為「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」(水利署，2009a)所推估之民國 120 年每人每日用水量，GDP 修正量則為考慮 GDP 成長對每人每日用水量之影響，溫度修正量則考慮氣候變遷導致溫度上升對每人每日用水量之影響，由於不同 GCMs 所推估之溫度改變情況不一樣，因此在不同的 GCMs 模式中，溫度修正量並不相同。

(1) 社經發展情境對需水量影響

Alcamo 等(2000)分析瑞士、日本、韓國等 7 個國家，認為在人均 GDP 在 \$10,000-15,000 時，生活用水量呈上升趨勢，而在人均 GDP 在 \$15,000-20,000 時生活用水量呈下降趨勢。由於政府僅發布全臺灣地區每年之人均 GDP 而無各縣市之人均 GDP，因此以臺灣地區之人均 GDP 與縣市之生活用水量為考慮依據，分析大臺北地區及桃園地區 GDP 增加對生活用水量之影響，圖 6-13 及圖 6-14 分別為大臺北及桃園地區之生活用水與人均 GDP 關係圖，由圖中可以發現，大臺北地區及桃園地區之生活用水量呈現下降趨勢，與 Alcamo 等(2000)之研究結果符合。

根據排放情境 A2、A1B 及 B1 情境之經濟成長推估民國 120 年之 GDP 成長為 3.85%、2.13% 及 1.24%，而推估之人均 GDP 分別為 33860 美元、25068 美元及 21414 美元，以人均 GDP 之變化量修正每人每日用水量後，可得圖 6-15 之大臺北地區及桃園地區不同情境之每人每日用水量。

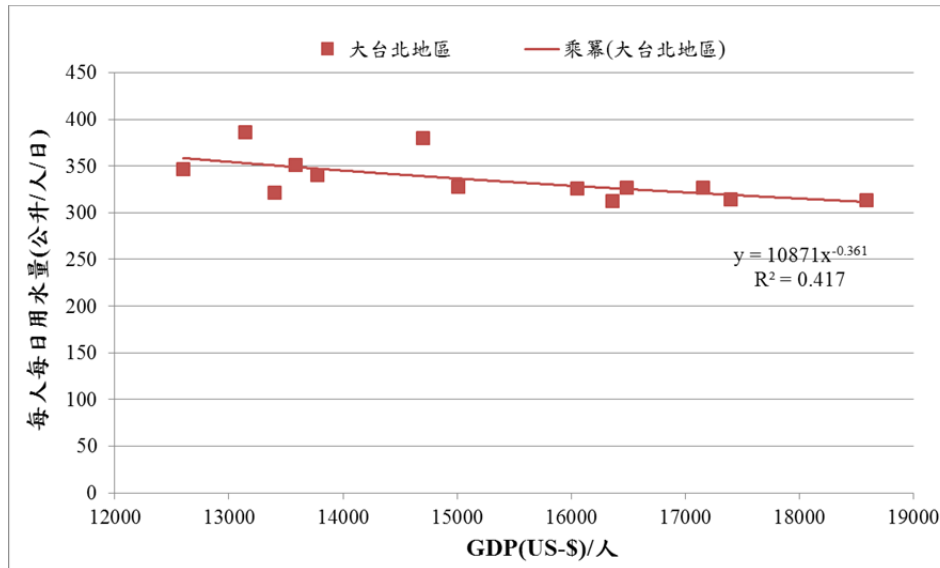


圖 6-13 大臺北地區生活用水與人均 GDP 關係圖(水規所，2012)

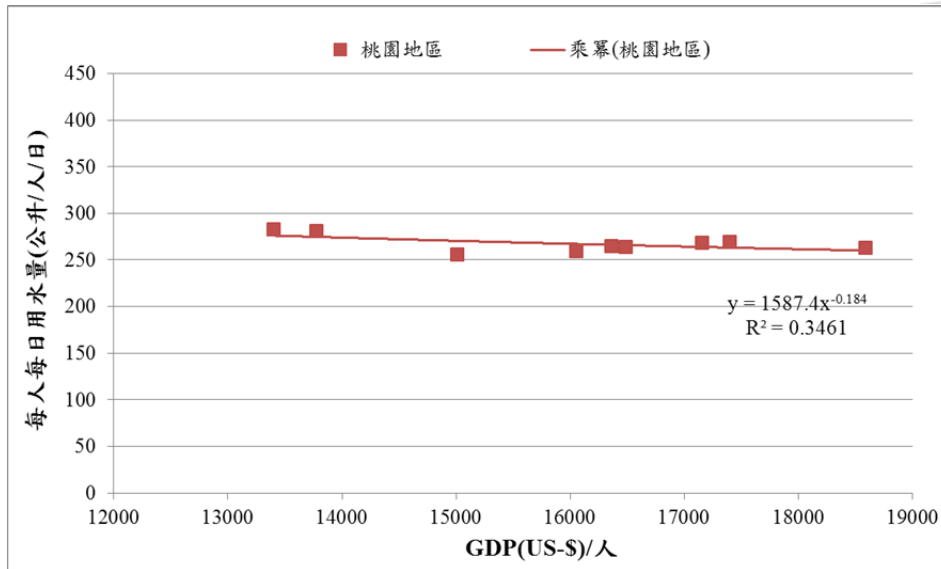


圖 6-14 桃園地區生活用水與人均 GDP 關係圖(水規所，2012)

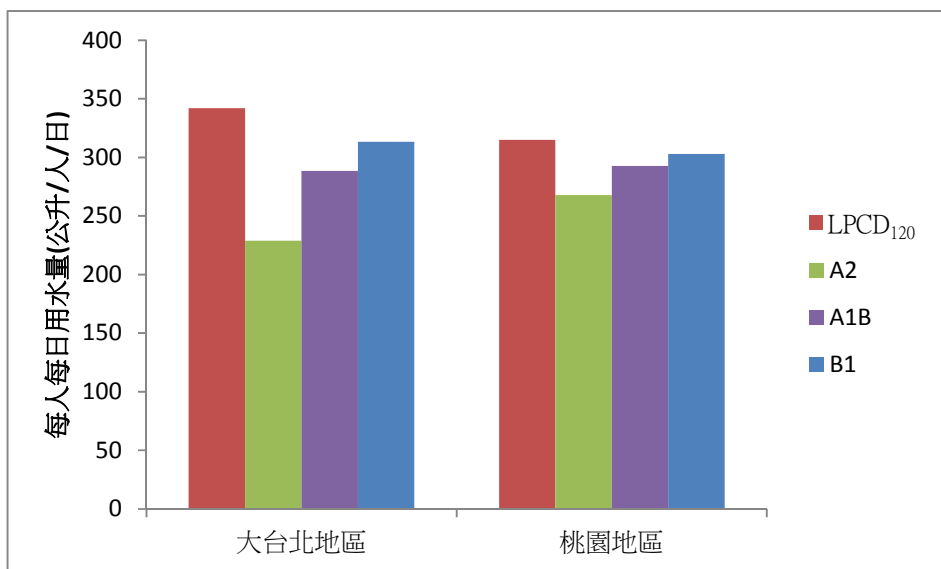


圖 6-15 社經條件修正後之每人每日用水量

(2) 溫度上升對需水量影響

根據 Frederick and Major (1997)指出在溫度升高 2.2°C 時，夏季的生活用水量約增加 2.8%，相當於 1°C 增加增加 1.3%，而 Protopapas 等人(2000)認為在 25°C 以上時，每增加 1°C 將導致 11 公升的需水增加，由前述研究可發現，當溫度高於一特定門檻值時，溫度增加溫度上升可能導致需水量增加，因此首先以供水區域之月均溫差及每月之每人每日

用水量差分析對用水量造成影響之溫度門檻值，亦當月均溫大於門檻值時，溫度增加才會對用水量造成影響，並討論各供水區溫度增加對每人每日用水量之影響。

在進行溫度門檻值分析時，若溫度門檻值偏高資料數目可能過低而無法進行分析，研究中設定不同門檻值進行分析時，以資料數目至少 5 筆以上為基準進行挑選。在大臺北地區，當門檻值超過 24°C 時，資料數目小於 5 筆，因此不予以考慮，而當門檻值為 23°C 時(圖 6-16(a))，月均溫差與每人每日用水量差之相關係數過低，表示在此溫度門檻值之下，月均溫差與每人每日用水量之相關性較低，因此調整溫度門檻時重新分析；當門檻值為 21°C 時，月均溫差與每人每日用水量之相關係數超過 0.6，因此以此門檻值作為後續分析溫度改變對用水量影響之依據。

桃園地區當溫度門檻值高於 24°C 時資料數目不足，因此由門檻值為 23°C(圖 6-17)情況開始進行分析，然而，無論門檻值設定為何，月均溫差與每人每日用水量之相關係數皆小於 0.6，顯示桃園地區月均溫差與每人每日用水量之關係並不顯著，桃園地區不需考慮溫度對每人每日用水量之修正。由於大臺北地區需考慮溫度對每人每日用水量之修正，因此，需判斷不同 GCMs 模式及不同氣候變遷情境所產生之各月月均溫是否超過門檻值，再以溫度改變量修正每人每日用水量。

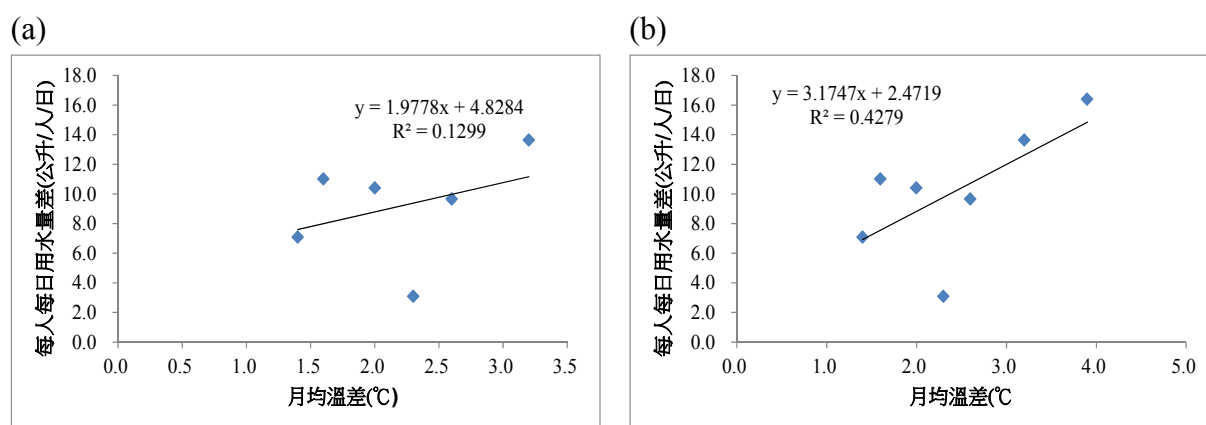


圖 6-16 大臺北地區生活用水與溫度關係圖，(a)門檻值 23°C，(b) 門檻值 21°C

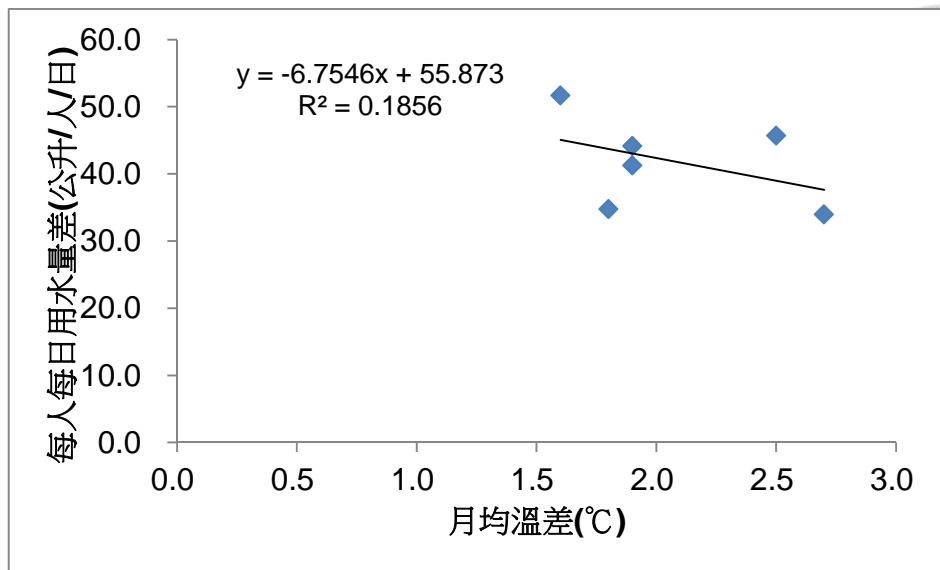


圖 6-17 桃園地區生活用水與溫度關係圖

2. 工業用水

工業用水量需求係依現有產業用地用水成長(無用水計畫書)、開發中新增產業用地用水(有用水計畫書)、已編定(編定中)新增產業用地用水、規劃(研議)中產業用地用水及電力事業用水等推估。大臺北及桃園地區現有產業用地如表 6-3 所示，用水量可分自來水取水以及自行取水(表 6-4)，考量臺灣地區之產業發展情況及為國土保育在政策上並不支持擴大抽取地下水，因此各目標年自行取水量以不成長為原則。

開發中或已開發工業區之目標年用水量以經濟部工業局函示用水資料及重要已開發用水計畫書差異分析審查結果為準，大臺北地區及桃園地區之開發中或已開發正發展中工業區用水需求量如表 6-5 所示；在編定中工業區之用水量大於每日一萬噸以上者有龍潭工業區、桃園科技工業區及桃園煉油廠等，其目標年需水量以工業局函示用水資料為準，詳如表 6-6 所示；而規劃中工業區為桃園濱海地區整體開發建設計畫及秀才科技園區，其目標年需水量列於表 6-6。

台電公司規劃中之非水力發電之電力新建或擴增機組之事業用水為桃園地區之林口電廠及大潭電廠，依據台電公司所提供資料，規劃中之火力計畫用水量估計基準係以

單機容量 800MW 燃煤機組，每部機組每日用水量約 6,000 噸為準，其電廠營運用水需水計畫如表 6-7 所示。

氣候變遷對工業用水的影響主要考量因氣溫增加對冷卻用水需求，但冷卻用水之估算不易，且以臺灣電力公司民國 96 年之營運用水為例，臺灣電力公司之用水量約 0.85 萬立方公尺，相較於該年度 730 百萬立方公尺之工業用水量而言比例過低，因此並不考慮氣候變遷溫度增加對工業用水之影響；但在社會經濟成長對工業用水影響上，由於不同開發情境工業用水成長已隱含工業區開發或工業產能提升的情況，已納入 GDP 成長在其中，因此工業用水量不再考慮經濟成長對工業用水之影響，此外，工業用水量除部分由自來水管線供給外，亦包含自行取水部分，在研究中假設自行取水量並不隨著不同開發情境而有所改變。

研究中以低成長低成長、中成長及高成長情境下之產業用水分別對應 B1、A1B 及 A2 情境下之工業用水量，而低成長係指既有工業區及開發中電力事業之用水成長加上目前開發中工業區完成後所需之用水，中成長係包括低成長加上報編及編定中工業區完成後所需之用水，高成長則包括中成長再加上規劃研議中工業區用水及規劃中電力事業用水後所需之用水。

表 6-3 現有工業區(經濟部水利署，2009)

用水分區	已開發(無用水計畫書)工業區
大臺北地區	南港軟體工業園區、土城工業區、五股工業區、樹林工業區
桃園地區	大園工業區、中壢工業區、平鎮工業區、中壢幼獅工業區、龜山工業區、觀音工業區、林口工業特定區、大潭濱海工業區(原工廠)

表 6-4 現有工業用地之目標年用水需求量(經濟部水利署，2009)

用水分區	目標年用水需求量推估(含自行取水)(噸/日)					自行取水 (噸/日) 各目標年
	100 年	105 年	110 年	115 年	120 年	
大臺北地區	316,223	320,874	325,524	327,849	330,174	219,499
桃園地區	813,995	827,480	840,964	847,707	854,449	533,516

表 6-5 開發中工業區目標年需水量(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009)

類別	分區	產業用地名稱	100年	105年	110年	115年	120年
開發中	大臺北地區	士林科技園區	—	18,816	18,816	18,816	18,816
		臺北港(第二期工程)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
	桃園地區	大潭電廠(火力)	3,750	3,750	3,750	3,750	3,750
		展茂光電公司	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
		華通電腦	15,300	15,300	15,300	15,300	15,300
		中華映管股份有限公司龍潭光電工業園區	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000
		龍潭渴望智慧園區	28,000	28,000	28,000	28,000	28,000
		林口電廠(火力)	1,540	2,269	2,998	2,998	2,998
		新竹科學工業園區龍潭基地	23,000	50,000	50,000	50,000	50,000
		華亞科技園區(擴廠)	41,505	44,505	44,505	44,505	44,505
		大潭濱海特定工業區開發工程	5,850	5,850	5,850	5,850	5,850

表 6-6 編訂及規劃中工業區目標年需水量(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009)

類別	分區	產業用地名稱	100年	105年	110年	115年	120年
已編定/ 編定中	大臺北地區	遠東通訊數位園區	1,237	1,847	2,104	2,104	2,104
		桃園觀塘工業區	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900
	桃園地區	龍潭工業區	23,200	23,200	23,200	23,200	23,200
		桃園科技工業區	13,452	30,000	30,000	30,000	30,000
		華映桃園八德廠	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
	桃園煉油廠含第三重油加氫脫硫工場	22,000	30,000	30,000	30,000	30,000	
規劃(研 議中)	桃園地區	東和鋼鐵公司	3,546	3,546	3,546	3,546	3,546
		楊梅秀才科技園區	7,500	8,300	8,300	8,300	8,300
		濱海地區整體開發建設計畫	230,700	255,300	266,800	266,800	266,800

表 6-7 台電公司電廠營運用水需水計畫(單位：噸/日)(經濟部水利署，2009)

用水分區	電廠或計畫名稱	100年	105年	110年	115年	120年
桃園地區	林口電廠(火力)	1,540	2,269	2,998	2,998	2,998
	大潭電廠(火力)	3,750	3,750	3,750	3,750	3,750

3. 農業用水

氣候變遷將使得溫度增加，因而作物在生長期所需的累積生育度數(Growing Degree Days,GDD)累積的較快，因此將使得作物生長期縮短，因而需要灌溉水量的月份也將受到影響，此外，氣候變遷亦將導致降雨量的改變，溫度及降雨量的改變將對蒸發散量造成影響，整體來說，氣候變遷將改變個時期作物所需之灌溉需水量(圖 6-18)。在評估氣候變遷對灌溉需水量之影響時，以連宛渝(2000)所提出之作物灌溉需水量模式利用氣象合成模式繁衍產生不同氣候變遷情境下之溫度及雨量資料，分析現況及未來之灌溉需水量，再以基期及氣候變遷情境下之灌溉需水量改變比例做修正實際灌溉水量，以推估不同氣候變遷情境下之灌溉需水量。

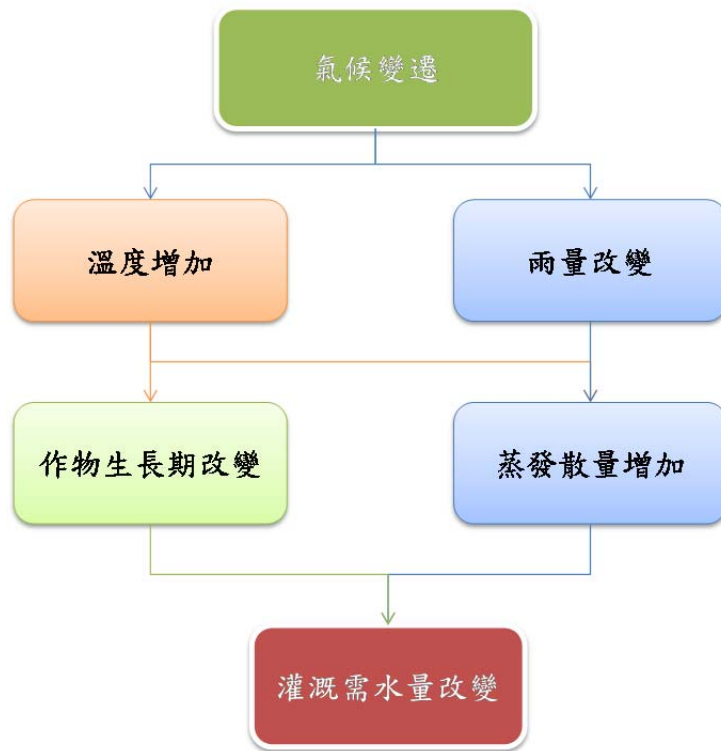


圖 6-18 氣溫與降雨的改變造成灌溉需水量改變示意圖

以 CSM35 模式之 A1B 情境說明氣候變遷對各旬灌溉需水量之影響，圖 6-19 為 CSM35 模式之 A1B 情境下，各旬灌溉需水量改變率，由圖中可以看到，在第 29 旬，也就是二期作的後期，灌溉需水量有減少 100%的情況發生，原因在於溫度上升導致作物

生長期縮短，因此由第 29 旬起就不需要再提供灌溉水量了，在一期作時(第 18 旬)也有類似的情況，但是因為作物生長期縮短的情況較二期作不明顯，因此第 18 旬仍須提供灌溉需水量，但其改變率仍達 80%左右。此外，作物生長期改變將會使得需要提供灌溉水量的時間不同，而由於一期作處於枯水期，降雨量較豐水期為低，再加上 CSMK35 之 A1B 情境為豐水期雨量增加枯水期雨量減少的情境，因此除了生長期移動導致需要提供灌溉需水量的時期不同，造成需要灌溉的情形改變之外，枯水期雨量減少亦使得灌溉需水量增加，也造成在生長前期灌溉需水量有明顯的增加情況。

圖 6-20 為桃園及石門灌區在在氣候變遷影響下，不同 GCMs 及不同情境一期作及二期作灌溉需水量改變率，由於不同模式及不同情境對溫度及雨量改變情況不同，因而對一期作及二期作灌溉需水量的影響而有不同。整體來說，在一期作時，灌溉需水量在不同的 GCMs 及不同的情境下，灌溉需水量大致呈現增加的情形，而在二期作除了 MPEH5 模式之 A1B 情境灌溉需水量有大幅增加的情形外，在其他模式及情境下，灌溉需水量大致呈現減少的情形。

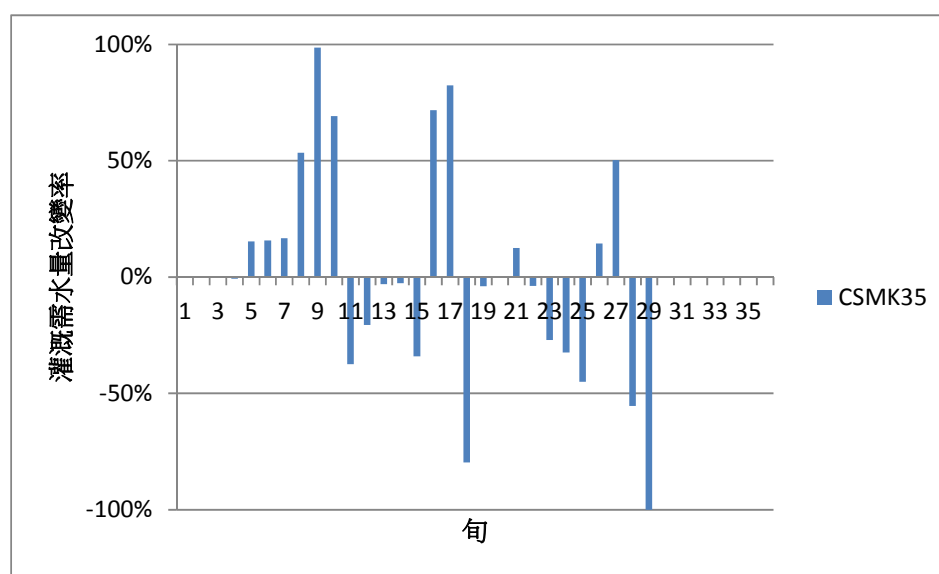


圖 6-19 CSMK35 之 A1B 情境下各旬灌溉需水量改變率

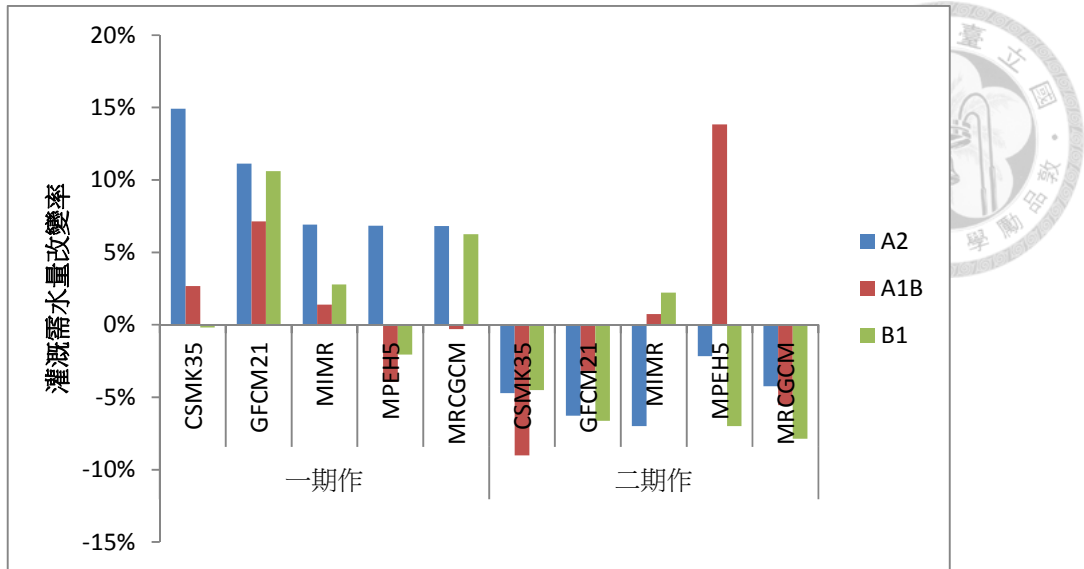


圖 6-20 氣候變遷下桃園、石門灌區灌溉需水量改變率

4.各用水標的未來水資源需求情境彙整說明

未來各用水標的對應不同氣候變遷情境之修正方法整理如表 6-8，各標的用水量依據不同氣候變遷情境之設定方式進行修正，修正後之標的用水量分別帶入水資源供水系統動力模式中，做為模擬未來不同氣候變遷情境供水能力之輸入值。

表 6-8 標的用水量與氣候變遷情境對應關係

	生活用水			工業用水	農業用水
	120 年用水量	GDP 成長	溫度改變		
A2	水利署推估 120 年生活用 水量	3.85%	依不同情境 對溫度的影 響，配合門 檻值設定， 修正生活用 水量	工業區開發 情境高成長	利用各 GCMs 之不 同情境對溫 度及雨量之 影響修正農 業用水量
A1B		2.13%		工業區開發 情境中成長	
B1		1.24%		工業區開發 情境低成長	

6.3.2 供水分區系統動力模式建立與驗證

臺北、板新及桃園供水系統主要水源來自翡翠水庫與石門水庫以及中下游之青潭堰、鳶山堰及三峽堰等攔河堰，依照水源不同，利用 Vensim 軟體建構圖 6-21 之大漢溪水資

源系統動力模式及圖 6-22 之新店溪水資源系統動力模式。大漢溪水資源系統動力模式包含石門水庫、石門大圳、桃園大圳、後池堰、鳶山堰、三峽堰等(圖 6-21)。石門水庫提供石門大圳之水量提供灌溉用水與生活用水，生活用水由龍潭淨水場、平鎮淨水場以及石門淨水場輸送至下游需水端；石門水庫下游後池堰左端為桃園大圳取水口，桃園大圳提供桃園大圳灌區及光復圳灌區之農業用水，而生活用水經由桃園大圳運至大湳淨水場，若桃園大圳取水量不足則由鳶山堰支援供水。石門水庫除供應桃園地區用水外，也另外由淤鳶山堰及三峽堰輸送至板新淨水場供應板新地區用水，板新淨水廠先從三峽河引水，再從鳶山堰取水，若仍無法滿足需水，再向臺北自來水事業處尋求支援。

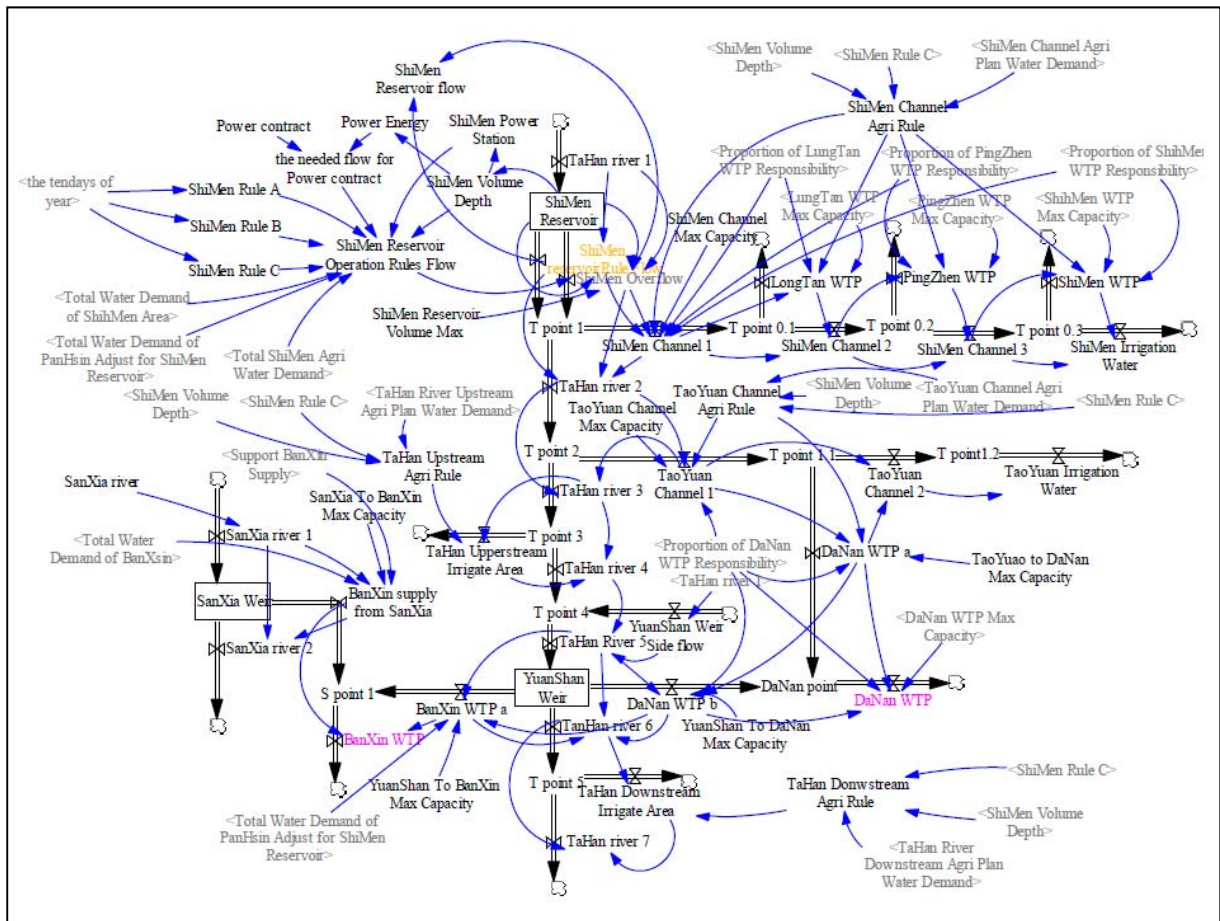


圖 6-21 大漢溪水資源系統動力模式

新店溪水資源系統動力模式包含翡翠水庫、直潭壩、青潭堰、直潭淨水場、長興淨水場、以及公館淨水場(圖 6-22)，翡翠水庫提供水量主要是補足南勢溪之不足水量，因

此若南勢溪水量不足以提供下游所需食，讓翡翠水庫管理局會依操作規線供水至下游，直潭壩主要負責將翡翠水庫之原水輸送至直潭淨水場，下游之青潭堰則是將水輸送至長興淨水場，長興淨水場再利用一分水井將部分水量送至公館淨水場，整個新店溪水資源系統動力模式便遵循此流程將水分送至各地區。

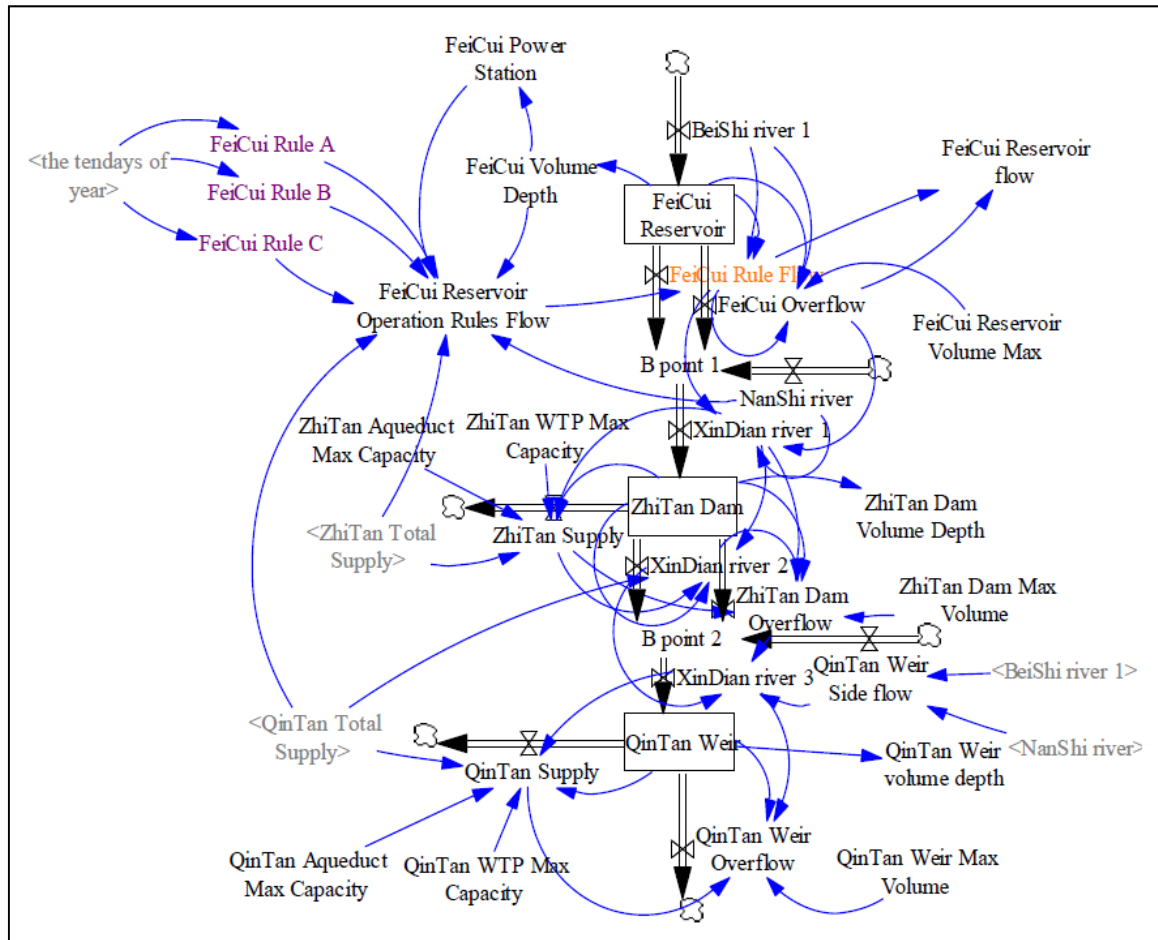


圖 6-22 新店溪水資源系統動力模式

建立新店溪及大漢溪之水資源系統動力模式後，將實際流量資料代入水資源系統動力模式，以最下游之測站流量資料驗證模式之正確性。在河川流量部分，北勢溪及南勢溪分別使用翡翠水庫入流量以福山流量站資料，大漢溪上游則採用石門水庫入流量資料，而下游驗證點在新店溪水資源系統動力系統採用秀朗站，在大漢溪水資源系統動力模式則採用三鶯橋站，驗證資料年限則以所有流量站皆有完整資料之 1991 年~2000 年之流量資料，驗證結果如圖 6-23 及圖 6-24。結果顯示，秀朗站之模擬流量與實際旬流量相關

係數為 0.81，而三鶯橋站之模擬流量與實際旬流量相關係數為 0.87，顯示不論是新店溪水資源系統動力模式或大漢溪水資源系統動力模式之各取水設施之取水規則能反映實際之取水規則，因而使得模擬之下游流量能反映實際之流量。

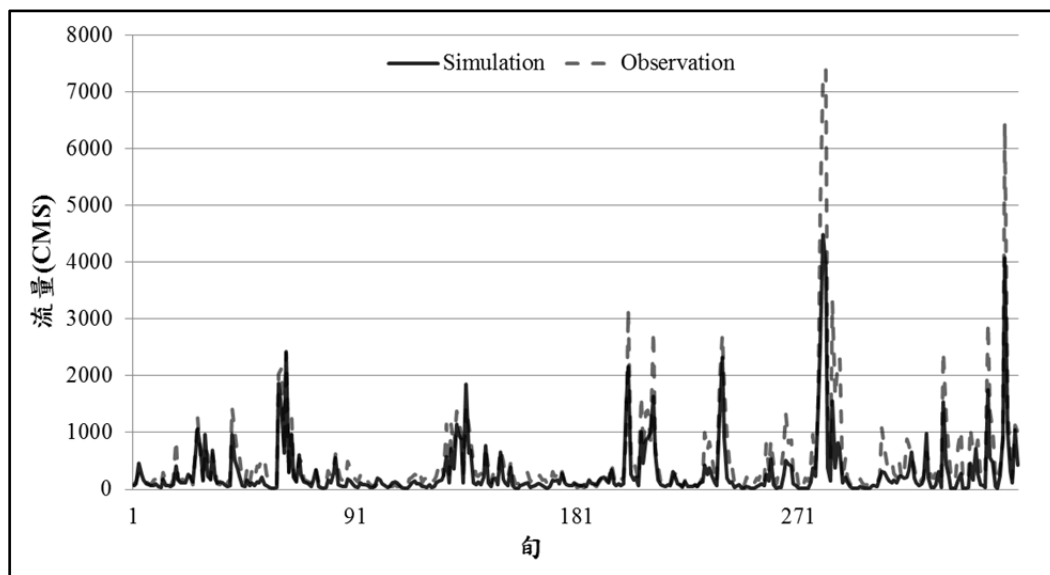


圖 6-23 秀朗站旬流量驗證結果

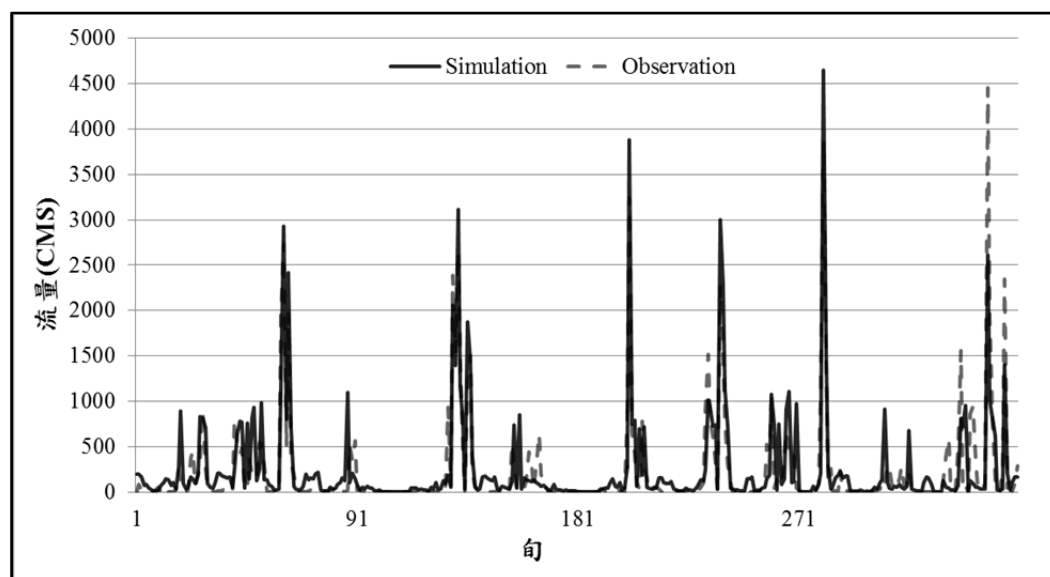


圖 6-24 三鶯橋站流量驗證結果

6.3.3 氣候變遷對水資源設施之衝擊評估



1. 臺北及板新供水區

臺北及板新供水系統評估結果如表 6-9~表 6-12 所示，根據模擬結果顯示，在民國 120 年不論是否考慮氣候變遷的影響，以生活及工業用水為主之臺北供水區其供水承载力皆能滿足需求(表 6-9)，亦可滿足提供臺灣自來水公司第一區管理處及板新地區之支援水量。在回復力部分(表 6-11)，由於臺北供水系統並無超過 DPD 超過 1500 之缺水事件發生，因此 MaxTTR 為 0 旬，MTTF 為 7200 旬，表示在模擬期間供水系統在設定之容忍程度下可正常運作。

表 6-9 氣候變遷對臺北供水系統供水承载力之衝擊評估(單位：萬噸/日)

情境		需水量	SI 反推			DPD 反推		
			供水承载力	供需缺口	供需缺口變化量	供水承载力	供需缺口	供需缺口變化量
目標年無氣候變遷		172	402	-		406	-	
A1B	CSMK35	148	402	-	-	406	-	-
	GFCM21	148	402	-	-	406	-	-
	MIMR	148	402	-	-	406	-	-
	MPEH5	148	402	-	-	406	-	-
	MRCGCM	148	402	-	-	406	-	-
A2	CSMK35	126	402	-	-	406	-	-
	GFCM21	126	402	-	-	406	-	-
	MIMR	126	402	-	-	406	-	-
	MPEH5	126	402	-	-	406	-	-
	MRCGCM	126	402	-	-	406	-	-
B1	CSMK35	160	401	-	-	406	-	-
	GFCM21	160	401	-	-	406	-	-
	MIMR	160	401	-	-	406	-	-
	MPEH5	160	401	-	-	406	-	-
	MRCGCM	160	401	-	-	406	-	-

板新系統在民國 120 年無氣候變遷且 SI 為 0.5 或 DPD 為 1500(%-days)之條件下，雖然供水承载力可滿足需水量(表 6-10)，但由回復力分析可知(表 6-12) 仍有缺水事件

發生，在 120 年未考慮氣候變遷情境下，MaxMTTR 為 7 旬表示缺水超過 DPD 為 1500 的時間為 7 旬，MTTF 為 222 旬表示正常供水為 222 旬，而 MTTR 為 3 表示系統平均失效時期為 3 旬，但由表示系統是否能正常供水之 Availability 指標發現，雖然缺水事件可能導致供水不足，但 Availability 為 0.986，表示板新系統之供水穩定度較高。而在氣候變遷衝擊下，期供水承载力亦皆可滿足需求，但 MaxTTR 在 MPEH5 的 A1B 情況下出現 13 旬的情況，但 MTTF 卻較無氣候變遷情境為高，顯示單一缺水事件所造成的衝擊可能加劇，而在 5 個模式之系統平均失效情形為 3-4 旬，但 MTTF 的變化卻較大，不過在供水穩定度來看，在不同的模式中供水穩定度都超過 0.97；在 A2 情境中，MaxTTR 最小為 GFCM21 模式之 9 旬，在其他模式皆超過 10 旬，系統平均失效時間亦較 A1B 情境為高；B1 情境 MIMR 模式最長仍有 12 旬會無法正常供水，5 個模式有 2-4 旬系統無法正常運作。

表 6-10 氣候變遷對板新地供水系統供水承载力之衝擊評估(單位：萬噸/日)

情境	需水量	SI 反推			DPD 反推			
		供水承载力	供需缺口	供需缺口變化量	供水承载力	供需缺口	供需缺口變化量	
目標年無氣候變遷	90	107	-	-	111	-	-	
A1B	CSMK35	79	107	-	-	103	-	-
	GFCM21	79	101	-	-	101	-	-
	MIMR	79	95	-	-	99	-	-
	MPEH5	79	103	-	-	101	-	-
	MRCGCM	79	105	-	-	102	-	-
A2	CSMK35	79	86	-	-	94	-	-
	GFCM21	79	98	-	-	99	-	-
	MIMR	79	95	-	-	98	-	-
	MPEH5	79	99	-	-	100	-	-
	MRCGCM	79	101	-	-	100	-	-
B1	CSMK35	83	108	-	-	105	-	-
	GFCM21	83	107	-	-	109	-	-
	MIMR	83	99	-	-	103	-	-
	MPEH5	83	114	-	-	112	-	-
	MRCGCM	83	111	-	-	106	-	-

表 6-11 氣候變遷對臺北供水系統回復力之衝擊評估

情境		MaxTTR (旬)	MTTR (旬)	MTTF (旬)	Availability
目標年無氣候變遷		0	-	7200	1
A1B	CSMK35	0	-	7200	1
	GFCM21	0	-	7200	1
	MIMR	0	-	7200	1
	MPEH5	0	-	7200	1
	MRCGCM	0	-	7200	1
A2	CSMK35	0	-	7200	1
	GFCM21	0	-	7200	1
	MIMR	0	-	7200	1
	MPEH5	0	-	7200	1
	MRCGCM	0	-	7200	1
B1	CSMK35	0	-	7200	1
	GFCM21	0	-	7200	1
	MIMR	0	-	7200	1
	MPEH5	0	-	7200	1
	MRCGCM	0	-	7200	1

表 6-12 氣候變遷對板新供水系統回復力之衝擊評估

情境		MaxTTR (旬)	MTTR (旬)	MTTF (旬)	Availability
目標年無氣候變遷		4	3	222	0.986
A1B	CSMK35	7	3	797	0.996
	GFCM21	6	3	512	0.994
	MIMR	13	4	160	0.977
	MPEH5	8	3	357	0.991
	MRCGCM	6	3	1026	0.997
A2	CSMK35	9	5	118	0.963
	GFCM21	5	4	397	0.991
	MIMR	10	4	339	0.988
	MPEH5	11	5	396	0.988
	MRCGCM	12	3	551	0.994
B1	CSMK35	13	3	652	0.995
	GFCM21	12	3	797	0.996
	MIMR	2	4	236	0.982
	MPEH5	5	2	2399	0.999
	MRCGCM	11	4	1797	0.998

2.桃園供水區

桃園地區在民國 120 年無氣候變遷之需水量為 137 萬噸/日，而 SI 為 0.5 之條件下供水承載力為 115.5 萬噸/日，DPD 門檻值為 1500(%-days)反推求供水承載力之結果為 113.4 萬噸/日，供給量皆無法滿足需求(表 6-13)，而在氣候變遷衝擊下，A1B 情境供需缺口約 16 萬噸/日(表 6-13)，A2 情境供需缺口約 44 萬噸/日，而 B1 情境亦有供需不足現象發生，但其不足情形較 A2 及 A1B 情境為低，由供水承載力來看，在未來不論是否考慮氣候變遷的情況下，桃園供水系統並無法提供足夠之供水量，最大缺水量可能高達 44 萬噸/日。

表 6-13 氣候變遷對桃園供水系統供水承載力之衝擊評估(單位：萬噸/日)

情境	需水量	SI 反推			DPD 反推			
		供水承載力	供需缺口	供需缺口變化量	供水承載力	供需缺口	供需缺口變化量	
目標年無氣候變遷	137	115.5	-21.5		113.4	-23.7		
A1B	CSMK35	131	115.8	-15.2	6.2	112.0	112.2	-18.8
	GFCM21	131	115.2	-15.8	5.7	112.0	112.2	-18.8
	MIMR	131	114.4	-16.6	4.9	112.0	112.2	-18.8
	MPEH5	131	115.2	-15.8	5.7	112.0	112.2	-18.8
	MRCGCM	131	115.9	-15.1	6.3	112.0	112.2	-18.8
A2	CSMK35	159	115.0	-44.0	-22.6	113.0	113.2	-45.8
	GFCM21	159	115.5	-43.5	-22.1	113.0	113.2	-45.8
	MIMR	159	115.4	-43.6	-22.1	113.0	113.2	-45.8
	MPEH5	159	115.5	-43.5	-22.1	113.0	113.2	-45.8
	MRCGCM	159	115.7	-43.3	-21.9	113.0	113.2	-45.8
B1	CSMK35	116	115.7	-0.3	21.1	113.0	112.8	-3.2
	GFCM21	116	115.6	-0.4	21.0	113.0	112.8	-3.2
	MIMR	115	115.0	-1.1	20.4	113.0	112.8	-3.2
	MPEH5	116	116.1	-	21.5	113.0	112.8	-3.2
	MRCGCM	116	116.0	-	21.5	113.0	112.8	-3.2

由回復力指標來看(表 6-14)，桃園地區在民國 120 年不考慮氣候變遷情況下，MaxTTR 及 MTTR 為 7194 旬顯示供水系統處於失效狀態，表示桃園地區長期無法滿足

用水需求，回復力不佳；而考慮不同氣候變遷情境結果顯示，A1B 情境供水系統無法正常供水最長為 7194 旬，A2 情境供水系統持續失效期間為 7192 旬，B1 情境供水系統持續失效時間為 7190 旬，顯示桃園地區長期處於供水不足的情況。整體上看來，桃園供水系統之回復能力不佳，供水系統會一直處於失敗之狀態，無法恢復正常供水，而在不同氣候變遷情境下供水承载力模擬結果相似，推測可能為供水設施之限制，使得無論流量如何變化，能提供之水量即為設施之供水承载力。

表 6-14 氣候變遷對桃園供水系統回復力之衝擊評估

情境		MaxTTR (旬)	MTTR (旬)	MTTF (旬)	Availability
目標年無氣候變遷		7194	7194	6	0.001
A1B	CSMK35	7194	7194	6	0.001
	GFCM21	7192	7192	8	0.001
	MIMR	7192	7192	8	0.001
	MPEH5	7192	7192	8	0.001
	MRCGCM	7192	7192	8	0.001
A2	CSMK35	7196	7196	4	0.001
	GFCM21	7196	7196	4	0.001
	MIMR	7196	7196	4	0.001
	MPEH5	7196	7196	4	0.001
	MRCGCM	7196	7196	4	0.001
B1	CSMK35	7190	7190	10	0.001
	GFCM21	7190	7190	10	0.001
	MIMR	7190	7190	10	0.001
	MPEH5	7190	7190	10	0.001
	MRCGCM	7190	7190	10	0.001

6.3.4 氣候變遷之下各供水分區暴露度、敏感度及脆弱度地圖

根據 IPCC 評估結果，A1B 及 A2 情境為溫度上升情況較快，可能造成的影響較大，且 A1B 及 A2 情境下之供需缺口均較 B1 情境為大，因此討論 5 個 GCMs 之 A1B 及 A2 情境模擬之供需缺口最大之 GCMs 模式輸出資料模擬結果，討論各區域之暴露度、敏感度及脆弱度地圖，此外亦以三種用水量為權重計算水資源脆弱度，討論氣候變遷對水資

源之綜合脆弱度，而不同 GCMs 與不同情境下之公共給水暴露度、農業用水暴露度、生活用水脆弱度、工業用水脆弱度、農業用水脆弱度及水資源脆弱度可於附錄二至附錄七查閱。暴露度、敏感度及脆弱度地圖並不以供水區為主進行討論，改以縣市為單位進行分析，其中，大臺北地區包含臺北市以及由臺北供水區、板新供水區及桃園供水區供水之新北市部分區域，桃園地區則為桃園供水區供水之桃園縣，供水系統對應之行政區域如表 6-15 所示。

表 6-15 供水系統對應大臺北地區供水區域

供水系統	轄區—鄉鎮市區
臺北	臺北市松山區、信義區、大安區、中山區、中正區、大同區、萬華區、文山區、南港區、內湖區、士林區、北投區、新北市三重區、中和區、永和區、新店區、汐止區。
板新	新北市板橋區、三重區、新莊區、中和區、樹林區、土城區、三峽區、鶯歌區、泰山區、五股區、蘆洲區、八里區。
桃園	新北市林口區與桃園縣全區。

1. 大臺北地區

表 6-16 與表 6-17 為大臺北地區臺北及板新供水區之臺北市與新北市 A1B 最劣情境下之水資源脆弱度改變情形，雖然臺北市人口密度高使得生活用水敏感度在各區都為 5 級(圖 6-25)，但是其供水量充足供水承载力滿足區域內之需水量，因此公共給水暴露度僅為 1 級(圖 6-26)，因此臺北市之生活用水脆弱度亦僅有 2 級，而在工業用水部分，雖然臺北市部分區域工業用水敏感度亦為 5 級(圖 6-25)，但公共給水暴露度僅為 1 級，因此工業用水脆弱度最高亦僅為 2 級，在農業用水部分，由於臺北市內之水利會管轄灌溉面積多以旱作為主，因此在農業用水部分並未考量其暴露度，而臺北市之整體水資源脆弱度並不高，最高亦僅有 2 級(表 6-16、圖 6-31)。

表 6-17 中八里區位於板新淨水場之管網末端，輸水不易造成該地區之脆弱度較高，蘆洲區之脆弱度較高與其生活用水及工業用水敏感度皆高有關，由水資源脆弱度地圖來

看(圖 6-31)，現況僅有八里及蘆洲之脆弱度達到 4 級，其餘地區皆為 3 級以下，民國 120 年無氣候變遷之影響，除八里及蘆洲，汐止區之脆弱度也提高為 4 級，另有林口區及樹林區脆弱度等級由 2 級提升為 3 級，原因為生活用水脆弱度及工業用水脆弱度所影響，民國 120 年在氣候變遷影響下，蘆洲脆弱度提高至 5 級，汐止維持 4 級，其餘少數地區也提升至 3 級。

比較 A1B 最劣情境與 A2 最劣情境可發現，由於大臺北地區主要以公共給水為主，且在未來用水量增加以民生用水為主，A2 情境預設經濟發展較高，GDP 成長幅度較大的情況下，將導致 A2 情境民生需水量減少幅度較大，因此在公共給水暴露度嚴重程度上，A1B 最劣情境中暴露度達到 5 級的區域較 A2 最劣情境下暴露度達到 5 級的區域為多(圖 6-26)，導致 A1B 情境下之生活用水脆弱度及工業用水脆弱度程度較 A2 情境嚴重(圖 6-28 及圖 6-29)；而在農業用水部分，由於大臺北地區農業面積少，且在不同氣候變遷情境下暴露度等級並沒有改變(圖 6-27)，說明氣候變遷對大臺北地區農業用水之衝擊並不大，不論是 A1B 最劣情境與或 A2 最劣情境之脆弱度(圖 6-30)並沒有改變，以整體之水資源脆弱度來看(圖 6-31)，因 A2 情境生活用水脆弱度及工業用水脆弱度等級較 A1B 情境為低，故 A1B 最劣情境之水資源脆弱度較 A2 最劣情境之水資源脆弱嚴重。

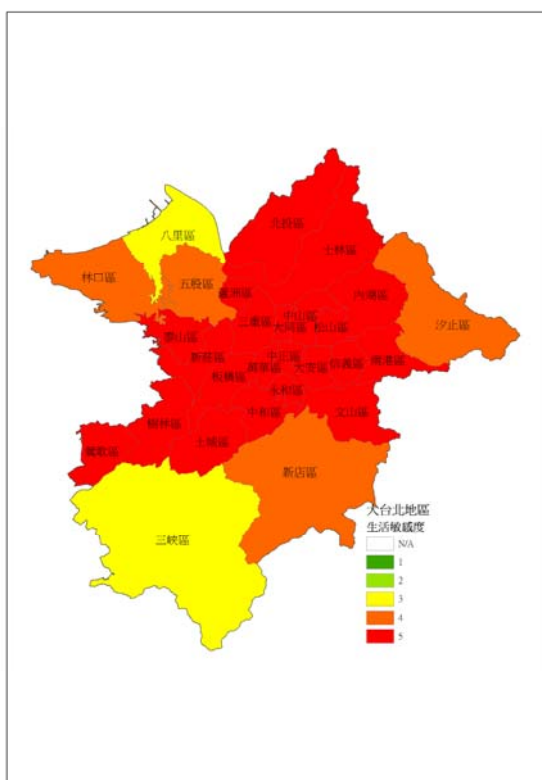
表 6-16 臺北市不同情境下各區之水資源脆弱度改變說明

	現況	民國 120 年 (無氣候變遷)	氣候變遷情境 A1B 最劣	變化說明
松山區	2	2	2	現況脆弱度等級不高，且在民國 120 年不論是否考慮氣候變遷情況下，脆弱度並沒有改變。
信義區	2	2	2	
大安區	2	2	2	
中山區	2	2	2	
中正區	2	2	2	
大同區	2	2	2	
萬華區	2	2	2	
文山區	2	2	2	
南港區	2	2	2	
內湖區	2	2	2	
士林區	2	2	2	
北投區	2	2	2	

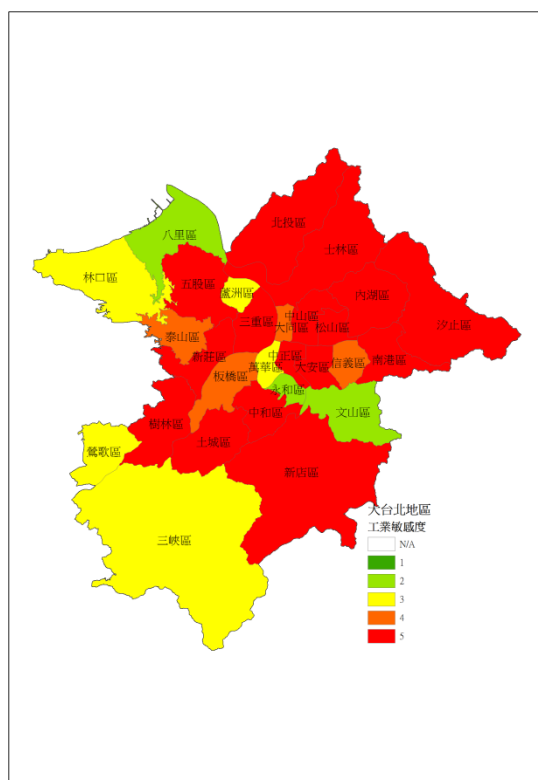
表 6-17 新北市屬於臺北、板新及桃園供水區之不同情境各區水資源脆弱度改變說明

	現況	民國 120 年 (無氣候變遷)	氣候變遷情境 A1B 最劣	變化說明
三重區	2	2	2	無變化。
中和區	2	2	2	
永和區	2	2	2	
三峽區	2	2	2	
新店區	2	2	2	
三芝區	1	1	1	
淡水區	1	1	1	
深坑區	2	2	2	
板橋區	2	2	3	生活用水脆弱度因公共給水暴露度增加而提高，使得水資源脆弱增加。
新莊區	2	2	3	
鶯歌區	2	2	3	
石碇區	1	1	1	
汐止區	3	4	4	
樹林區	2	3	3	
蘆洲區	4	4	5	
泰山區	2	2	3	生活用水脆弱度因公共給水暴露度降低而降低，水資源脆弱降低
林口區	2	3	3	
五股區	3	3	2	
八里區	4	4	3	

(a)生活



(b)工業



(c)農業

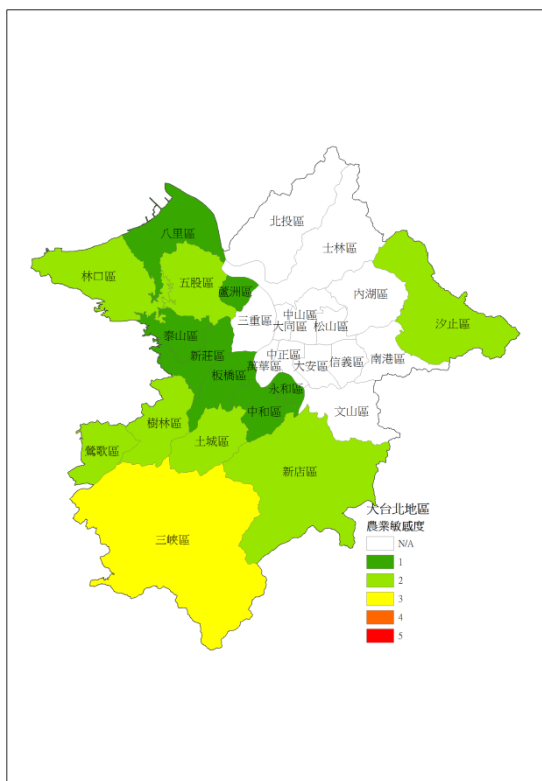
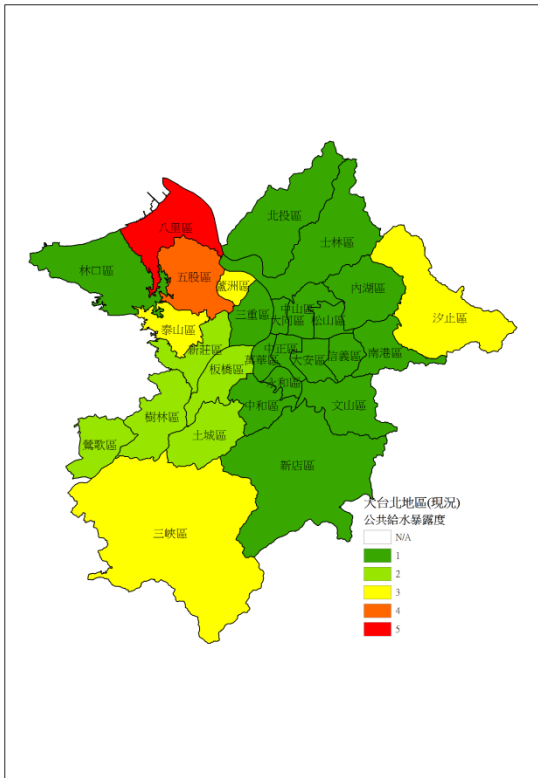
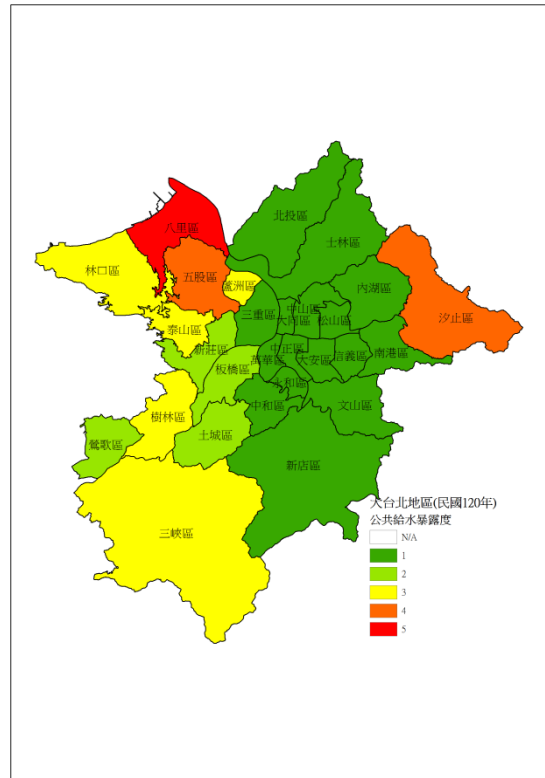


圖 6-25 大臺北地區敏感度地圖

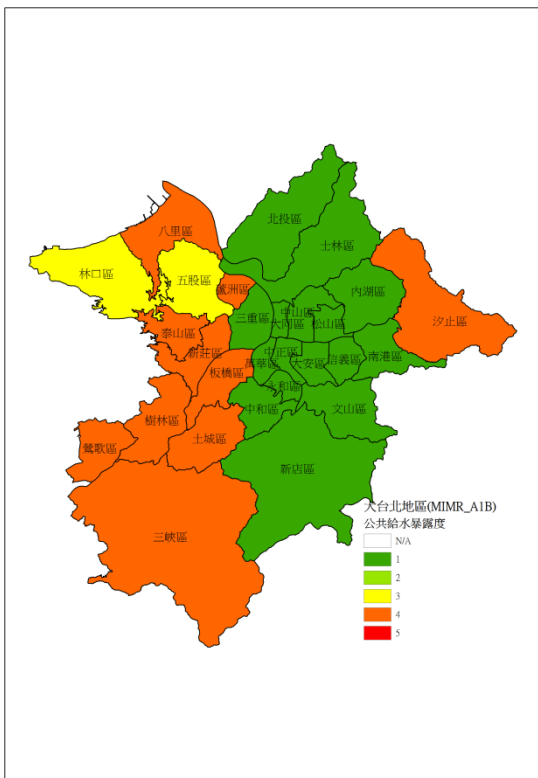
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

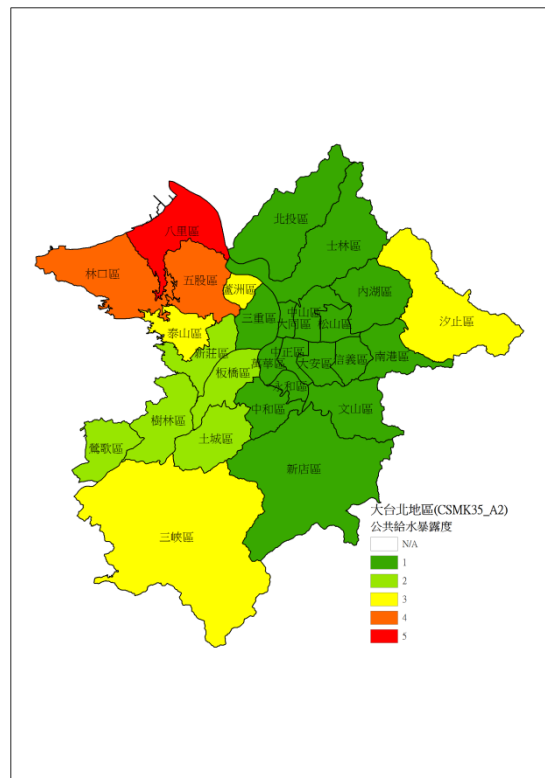
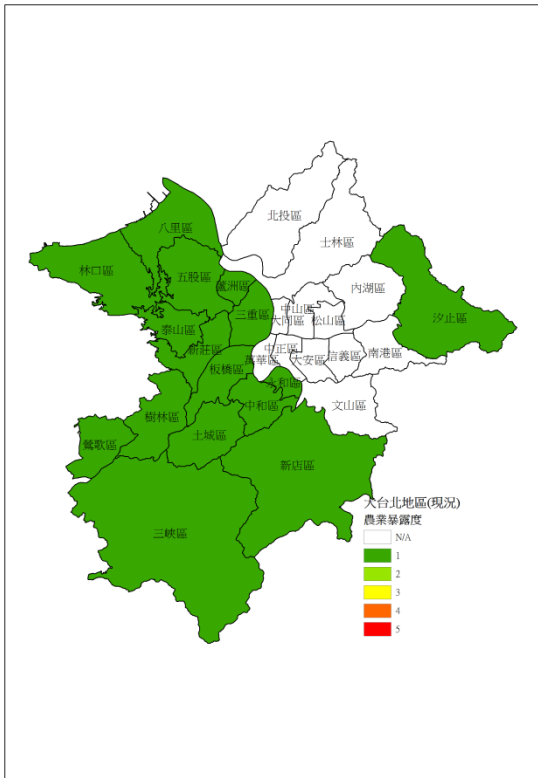
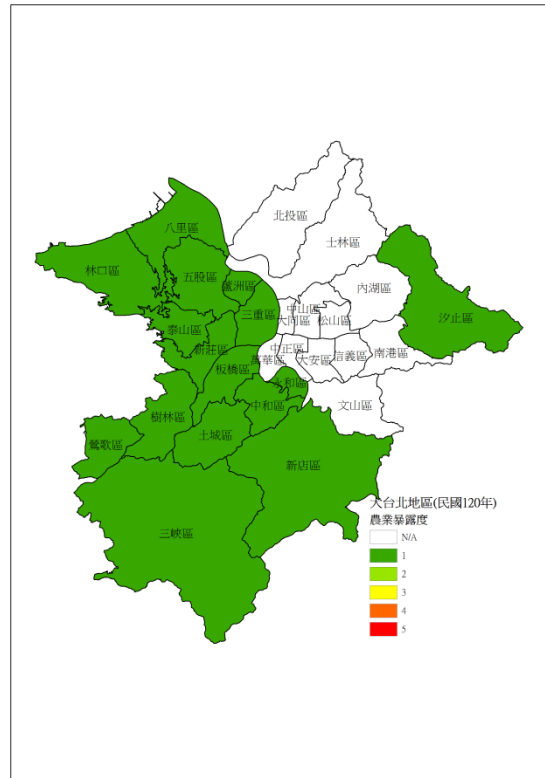


圖 6-26 大臺北地區公共給水暴露度地圖

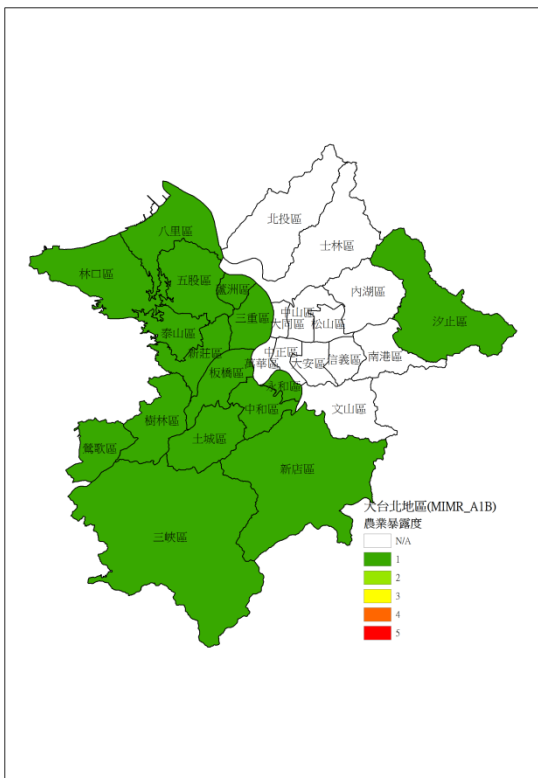
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

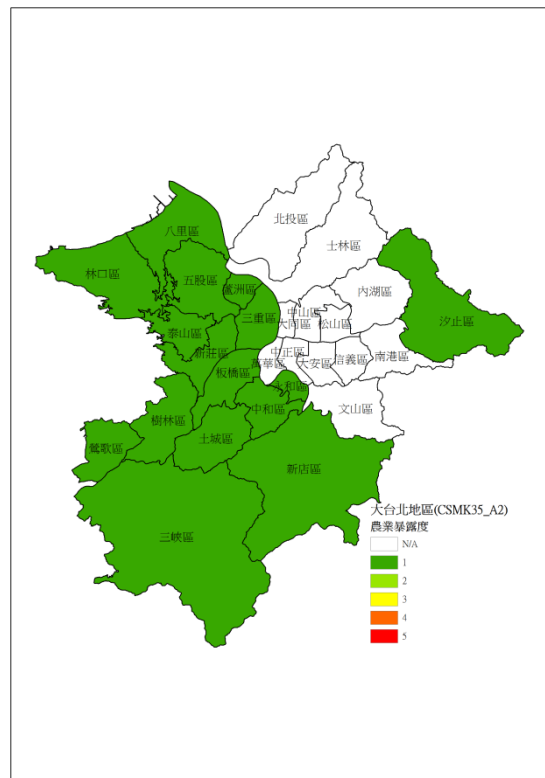
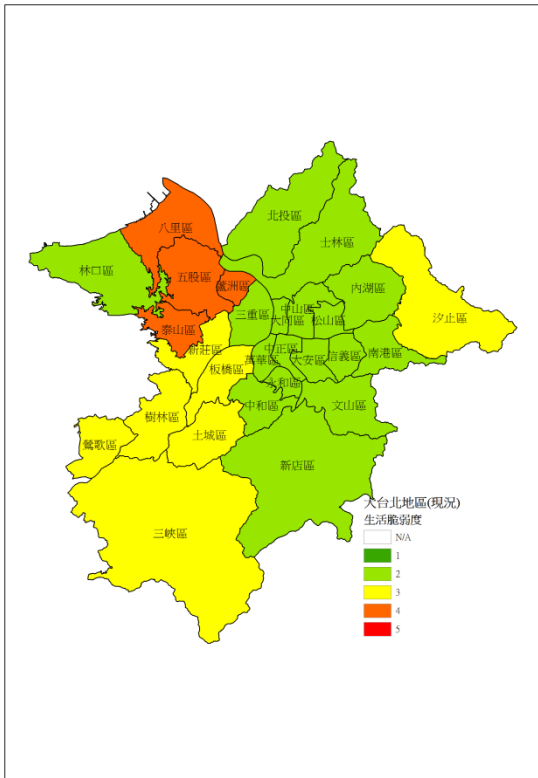
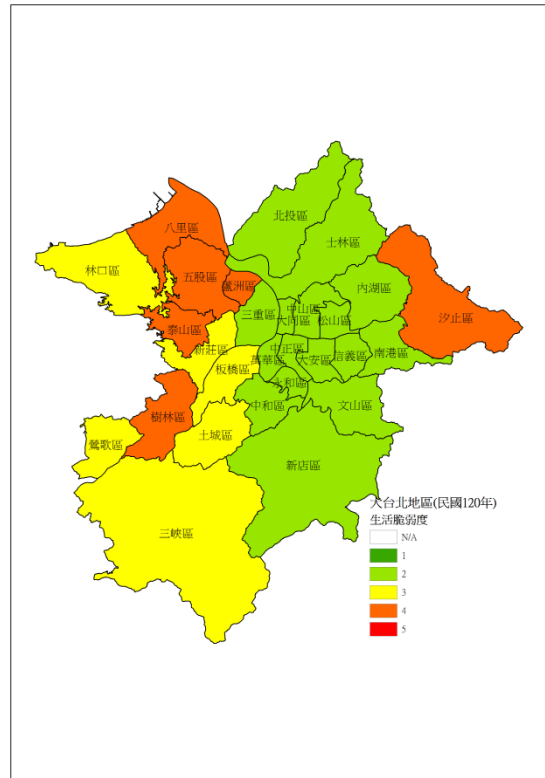


圖 6-27 大臺北地區農業用水暴露度地圖

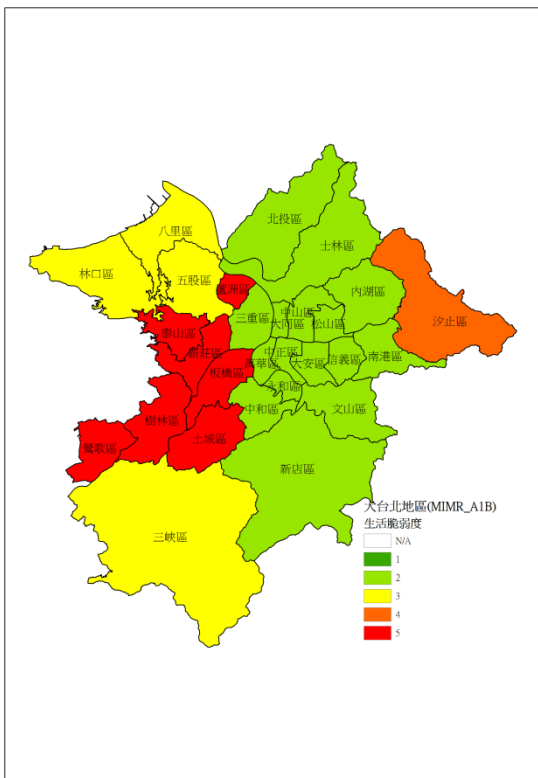
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

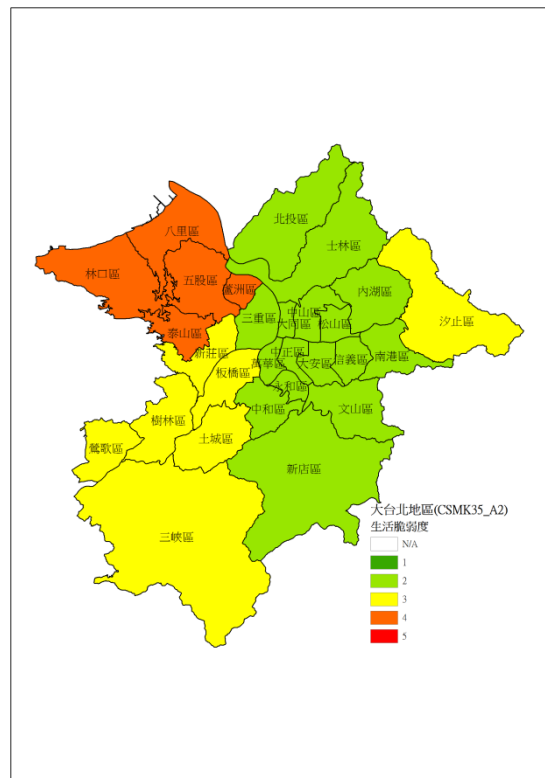
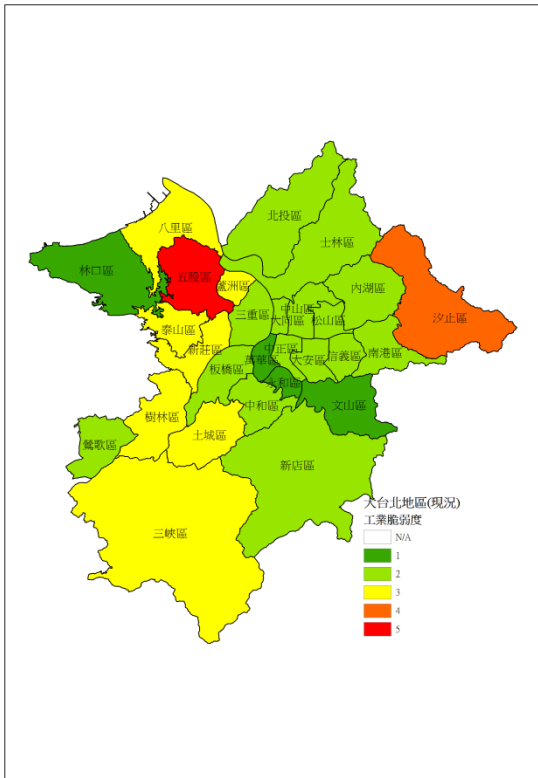
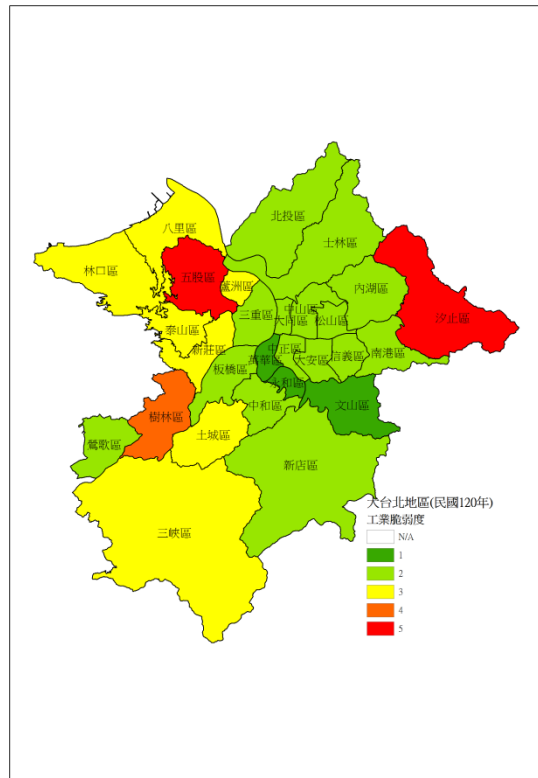


圖 6-28 大臺北地區生活用水脆弱度地圖

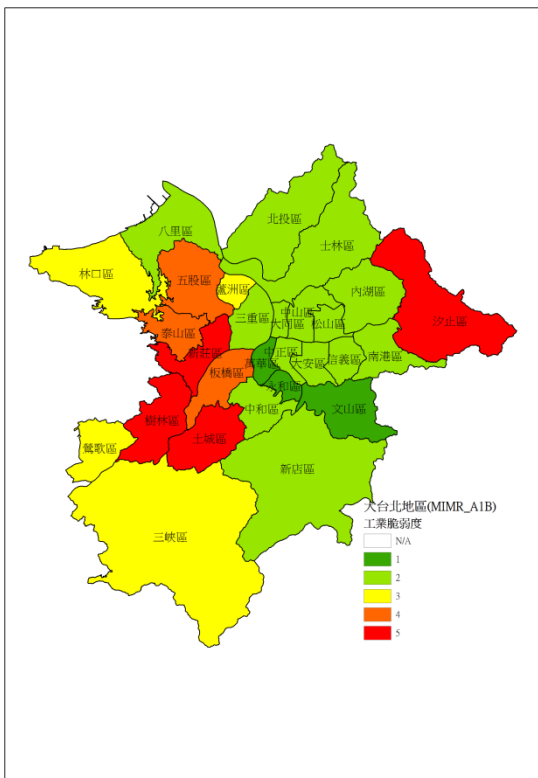
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

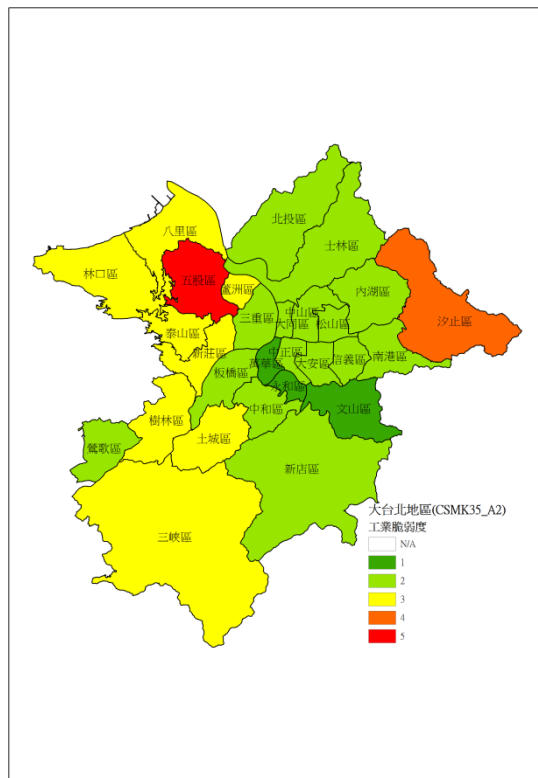
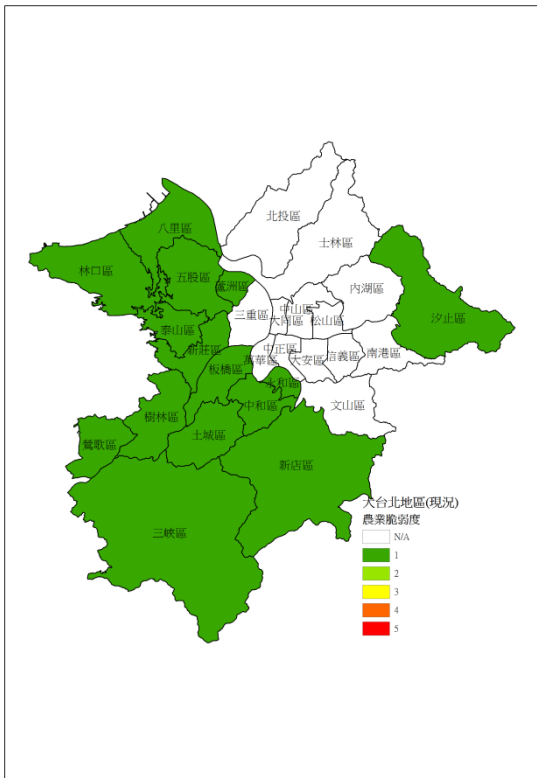
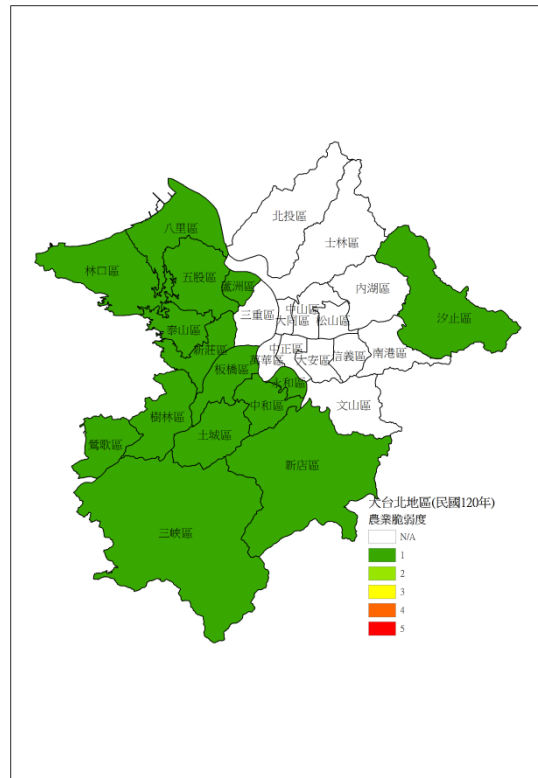


圖 6-29 大臺北地區工業用水脆弱度地圖

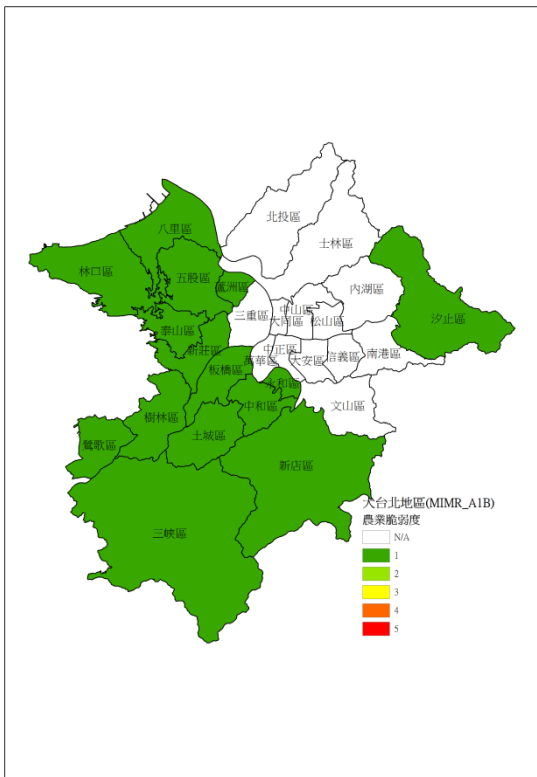
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

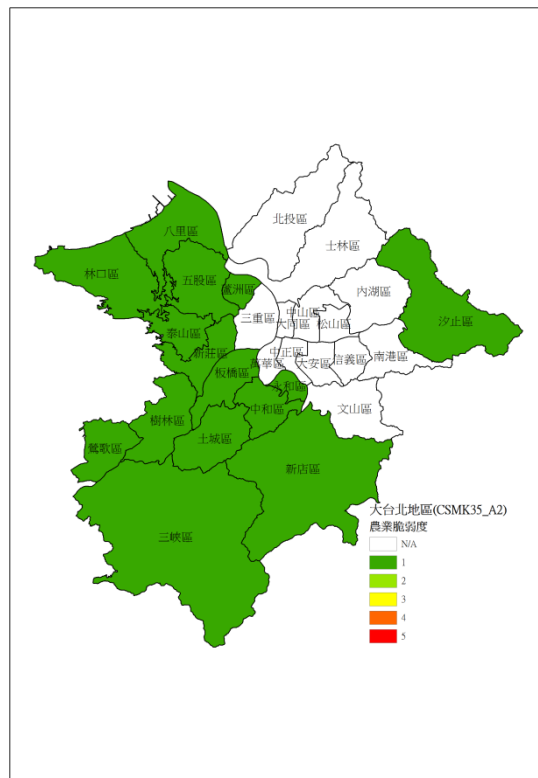
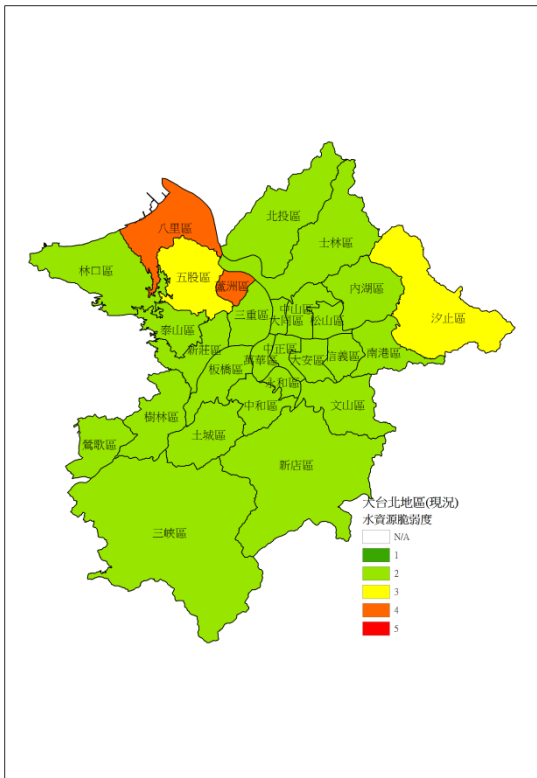
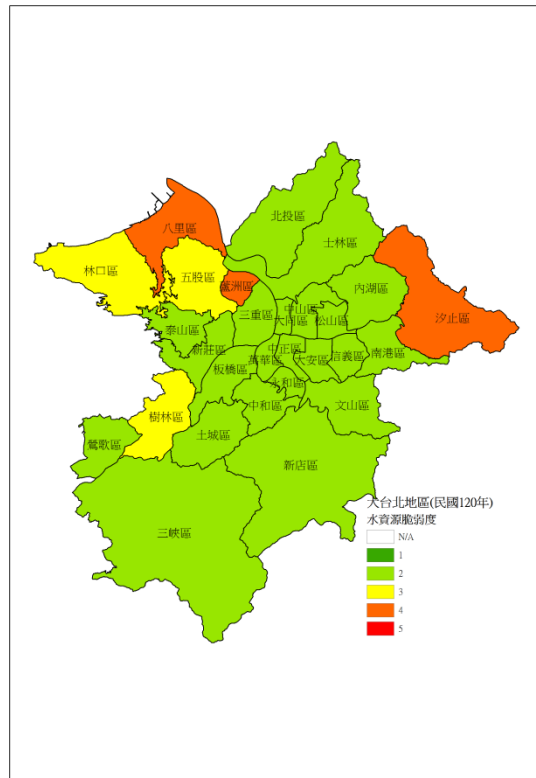


圖 6-30 大臺北地區農業用水脆弱度地圖

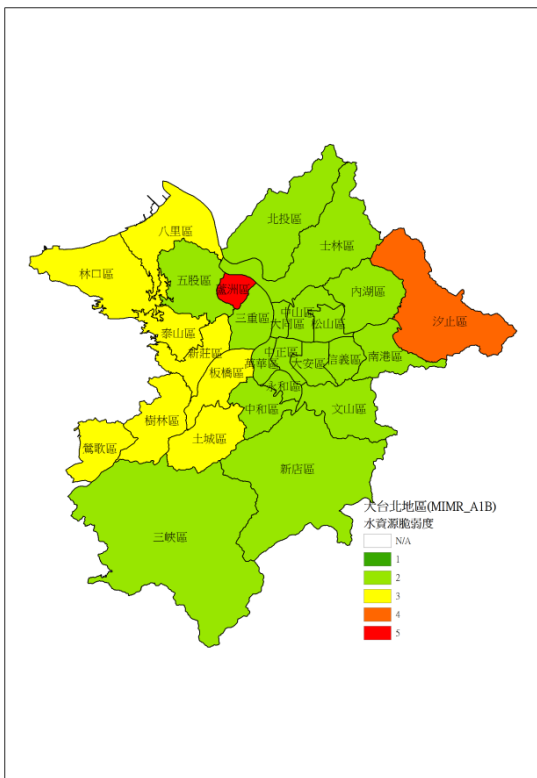
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

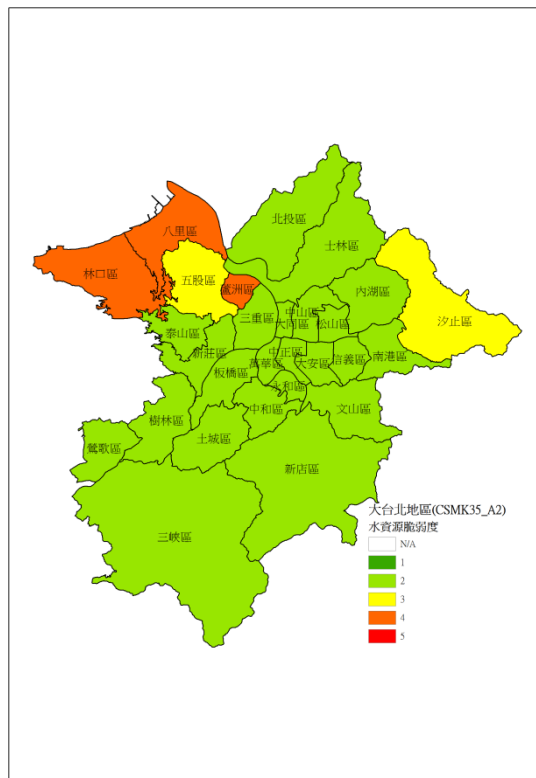


圖 6-31 大臺北地區水資源脆弱地圖

2.桃園地區

表 6-18 為桃園縣內所轄各行政區之水資源脆弱度變化情形，桃園縣為工業高度發展之地區，全縣工業產值居臺灣第一，桃園縣之人口密度在全台 22 直轄市、縣、市中排名第 6 位，再加上桃園縣之農業面積高，農業用水量大，由於農業面積廣大、工業興盛及人口密度高，因此桃園縣之生活用水、工業用水及農業用水等各項敏感度皆高(圖 6-32)，而在脆弱度部分，桃園縣現況生活用水、工業用水及農業用水脆弱度都在 3 級以下(圖 6-35、圖 6-36 及圖 6-37)，隨著工業大幅成長及人口增加等因素，由表 6-13 及表 6-14 之供水承载力及回復力評估可發現，供水量無法滿足需求，因此導致脆弱度增加，龍潭鄉、蘆竹鄉及龜山鄉之公共給水暴露度及脆弱度皆大幅提升(圖 6-33 及圖 6-35)。

在氣候變遷衝擊下，脆弱度等級超過 4 之地區為整個桃園縣的一半，且由表 6-13 及表 6-14 來看，桃園縣之缺水情況相當嚴重，並且可能長期處於缺水的狀態。再由水資源脆弱地圖來看(圖 6-38)，在民國 120 年不考慮氣候變遷之影響下，龍潭鄉、龜山鄉及蘆竹鄉之工業用水脆弱度及生活用水脆弱度都較其他區域為高，因此其水資源脆弱度為縣內較高之區域；而民國 120 年考慮氣候變遷衝擊時，A1B 情境及 A2 情境之最劣情境下龍潭、龜山、蘆竹、中壢、平鎮以及楊梅等地區之生活用水脆弱度高，除了因為該區域為人口聚集處外，在氣候變遷情境下供水將嚴重不足亦為導致該區域之生活用水脆弱度提高。

比較 A1B 最劣情境與及 A2 最劣情境可發現，在 A2 情境經濟發展較高且 GDP 成長幅度較 A1B 情境大的情況下，民生用水量減少幅度亦較 A1B 情境為高，因而使得整體之公共用水暴露度在某些區域較 A1B 最劣情境為低(圖 6-33)，而根據 6.3.3 之分析結果顯示，桃園地區未來處於長期缺水的情況，該結果亦反映在生活用水脆弱度及工業用水脆弱度(圖 6-35 圖 6-36)上，未來不論是 A1B 最劣情境或 A2 最劣情境，生活用水脆弱度除了在復興鄉之外皆大於 4 級，而除了復興鄉及新屋鄉之外工業用水脆弱度皆為 5 級；在農業用水部分，在不同氣候變遷情境下農業用水暴露度等級並沒有改變(，由於

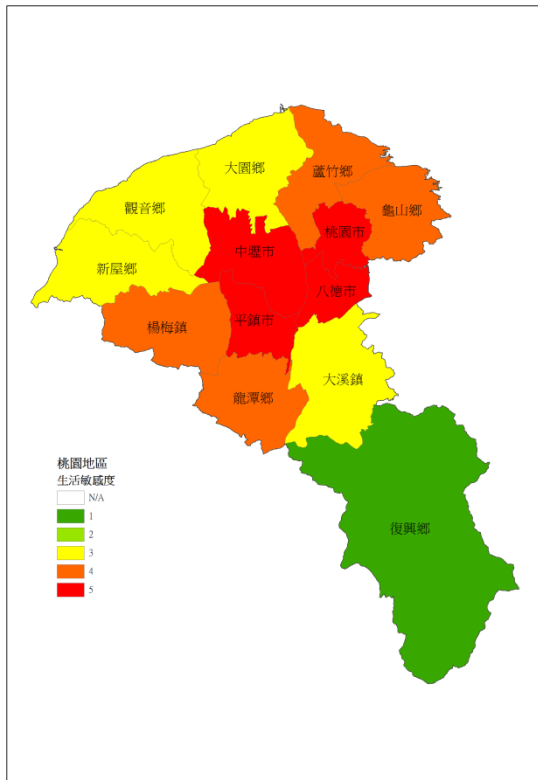


在大漢溪水資源系統動力模式中桃園地區農業供水量供給原則係依據石門水庫操作要點，且並沒有納入若發生嚴重缺水事件時轉移農業用水量供給工業及民生使用，因此農業用水量之暴露度及脆弱度在氣候變遷的情境下並沒有太大的改變，暴露度與脆弱度的等級亦沒有因氣候變遷而增加(圖 6-34 及圖 6-37)，以整體之水資源脆弱度來看(圖 6-38)，桃園地區在未來屬於供水不足之區域，因此不論是在 A2 情境或 A1B 情境其脆弱度等級皆大於 3。接近，為低，因此 A1B 最劣情境之水資源脆弱度較 A2 最劣情境之水資源脆弱嚴重。

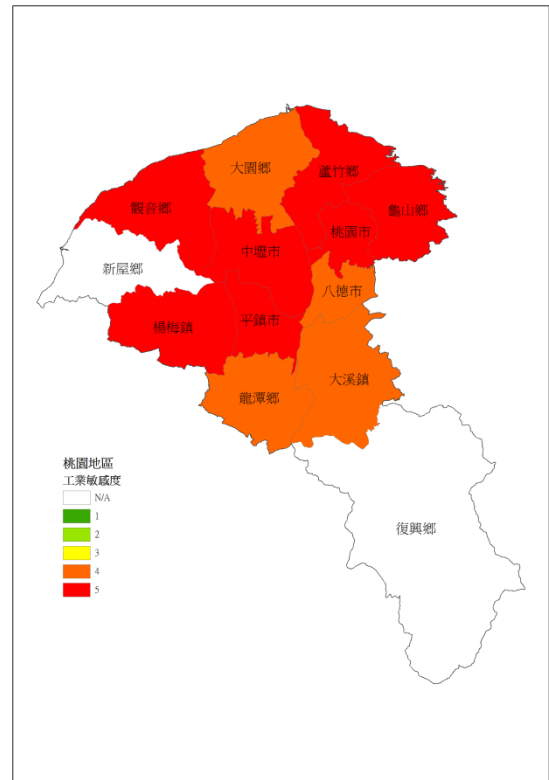
表 6-18 桃園縣不同情境下各鄉鎮市區之脆弱度

	脆弱度等級			變化說明
	現況	民國 120 年 (無氣候變遷)	氣候變遷情境 A1B 最劣	
桃園市	2	3	3	由表 6-13 以及表 6-14 可明顯看出，桃園地區現況、民國 120 年無氣候變遷一直到有氣候變遷之影響，缺水情況逐漸嚴重，使得水資源脆弱度提高。
中壢市	3	3	4	
大溪鎮	2	3	3	
楊梅鎮	2	3	3	
蘆竹鄉	2	4	4	
大園鄉	3	3	3	
龜山鄉	2	4	4	
八德市	2	3	3	
龍潭鄉	2	5	5	
平鎮市	3	3	4	
新屋鄉	2	3	3	
觀音鄉	2	3	3	
復興鄉	1	1	1	無變化。

(a)生活



(b)工業



(c)農業

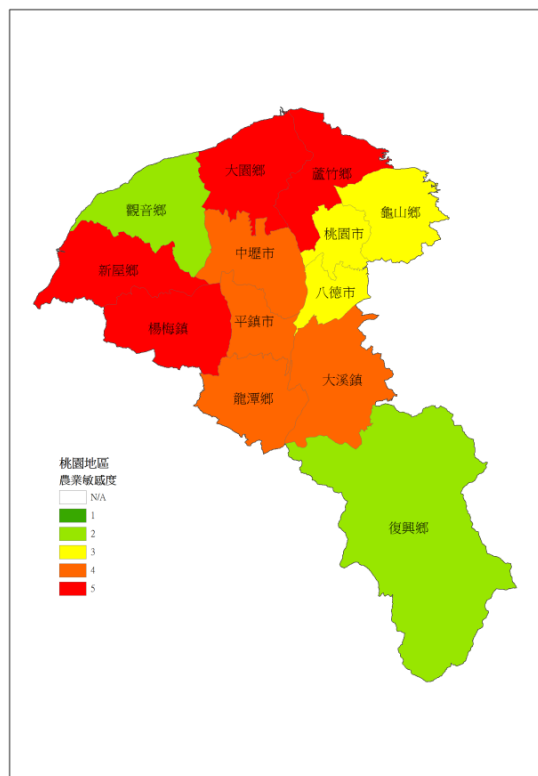
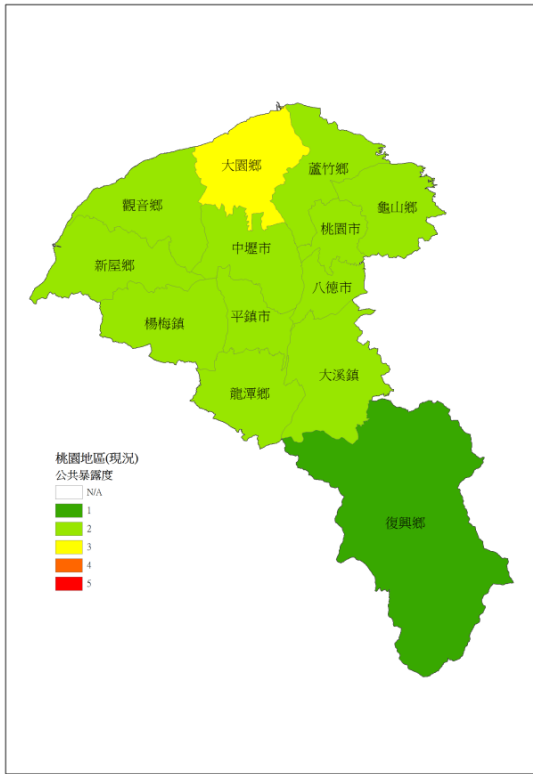
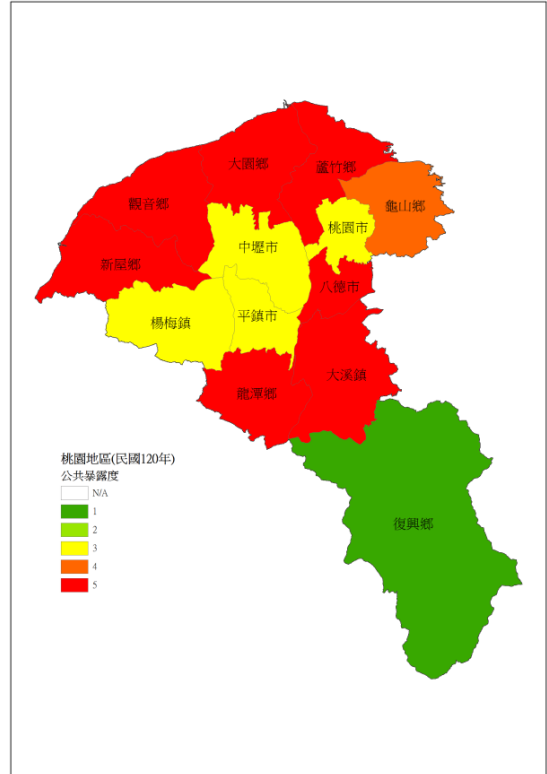


圖 6-32 桃園供水區敏感度地圖

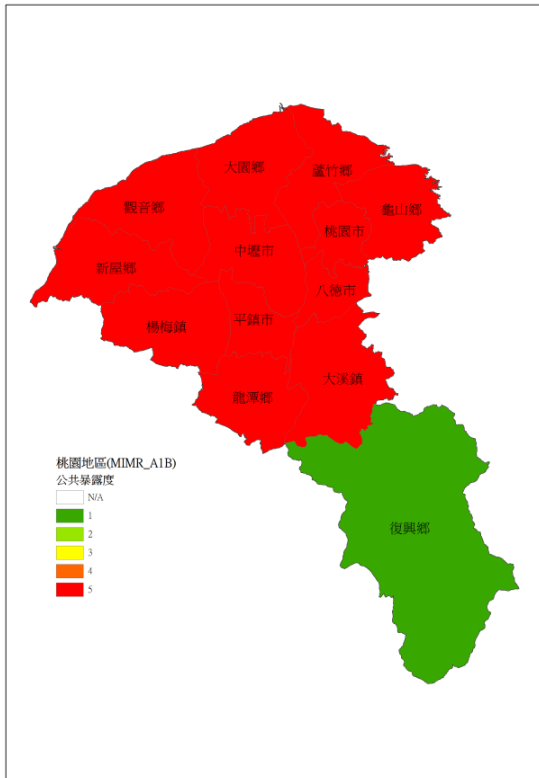
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

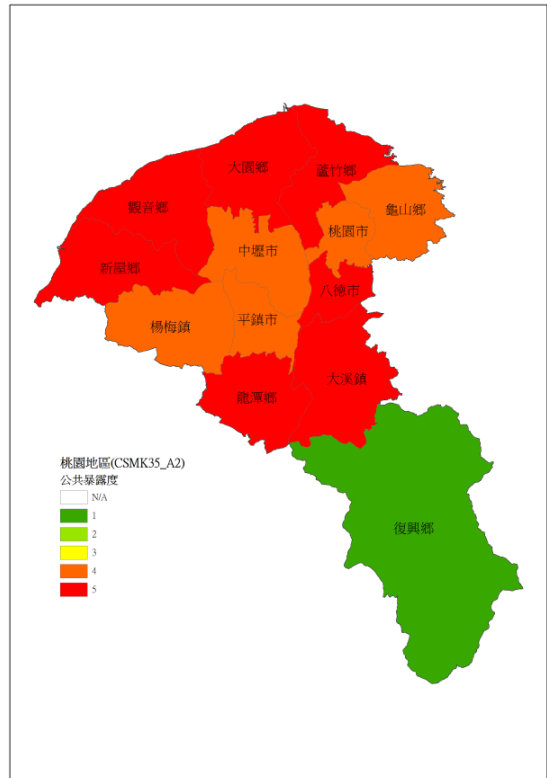
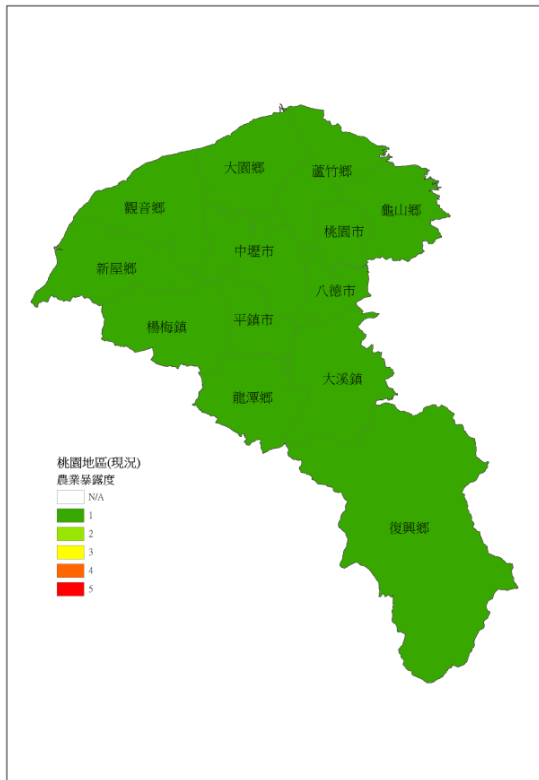
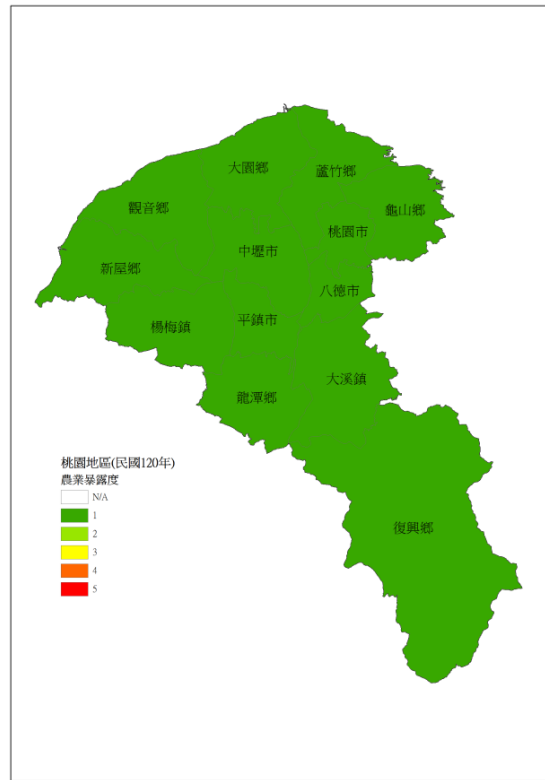


圖 6-33 桃園供水區公共給水暴露度地圖

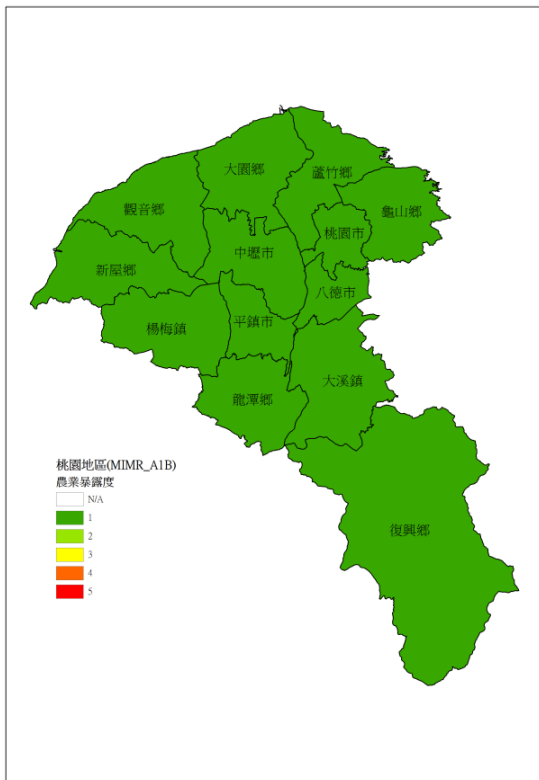
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

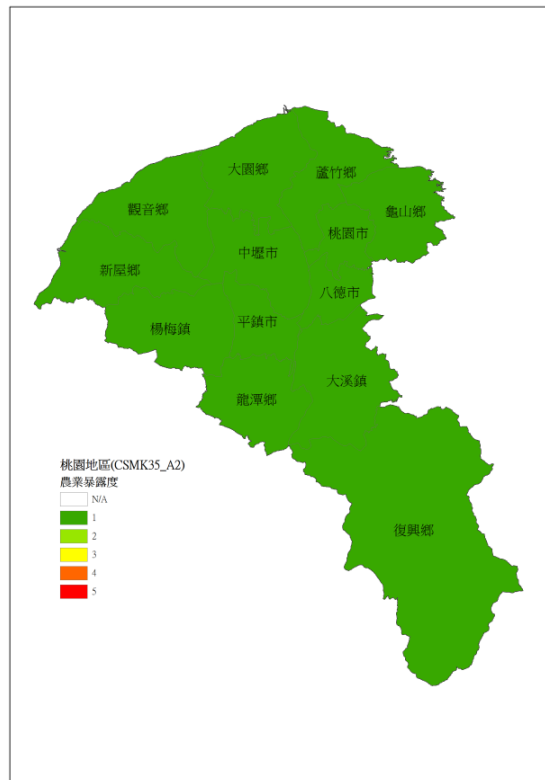
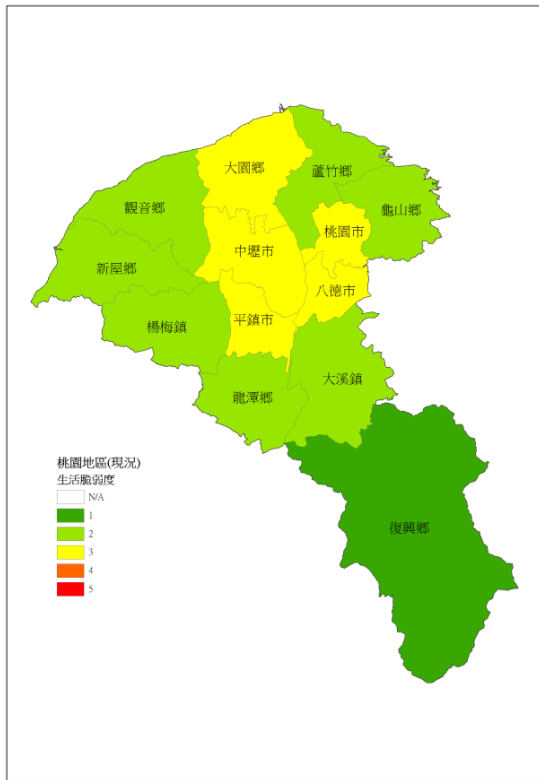
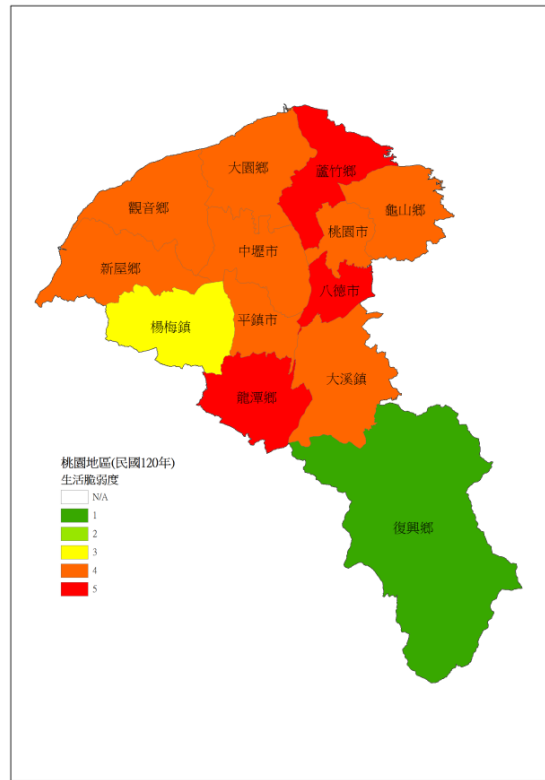


圖 6-34 桃園供水區農業用水暴露度地圖

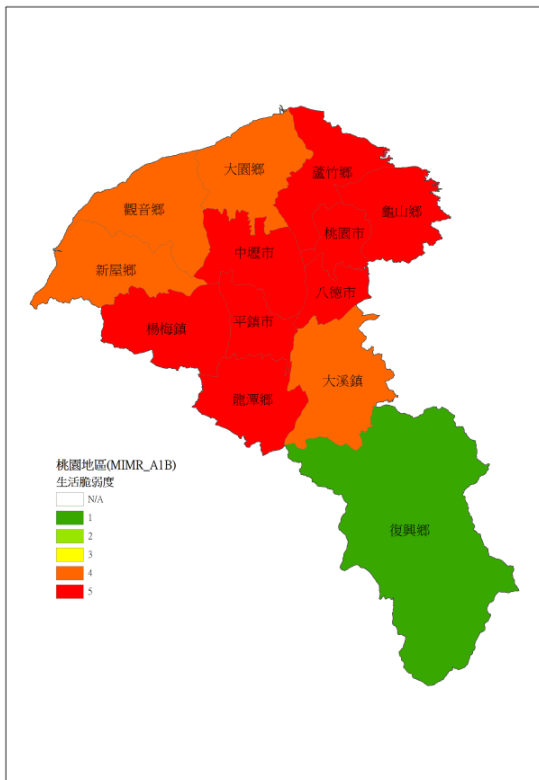
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

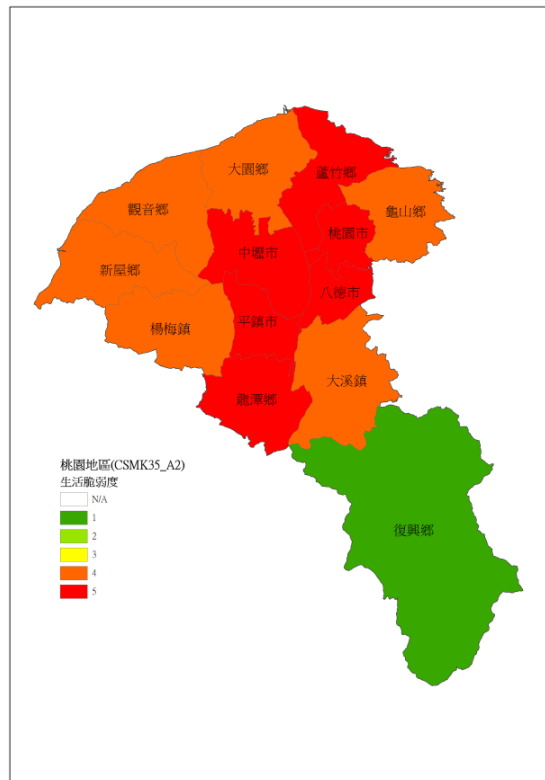
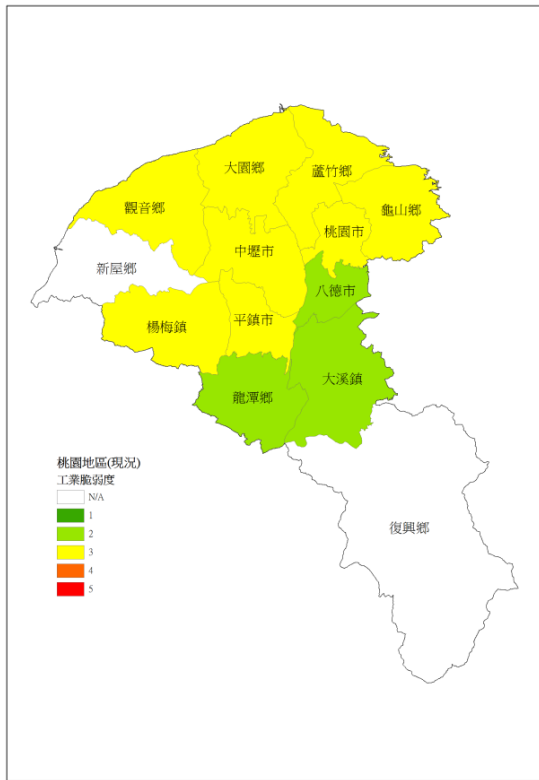
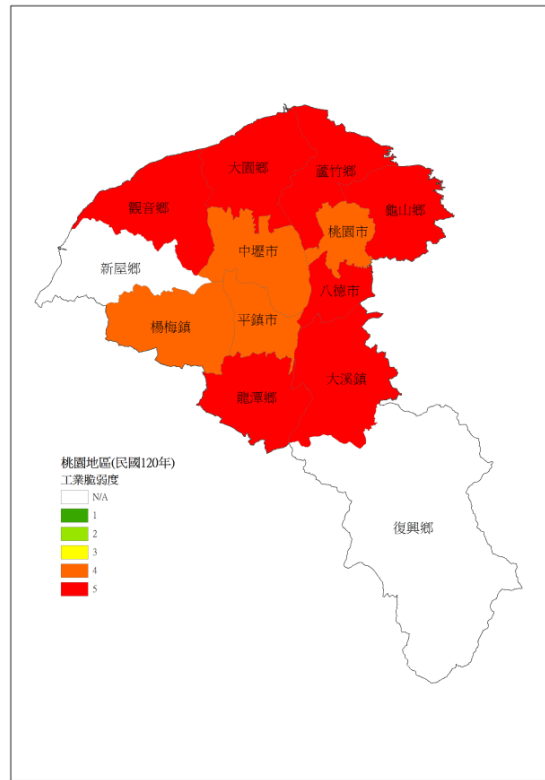


圖 6-35 桃園地區生活用水脆弱度地圖

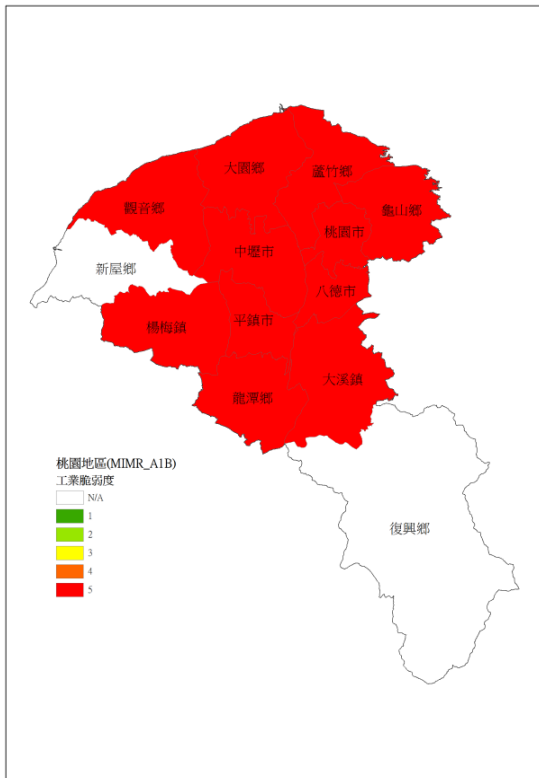
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

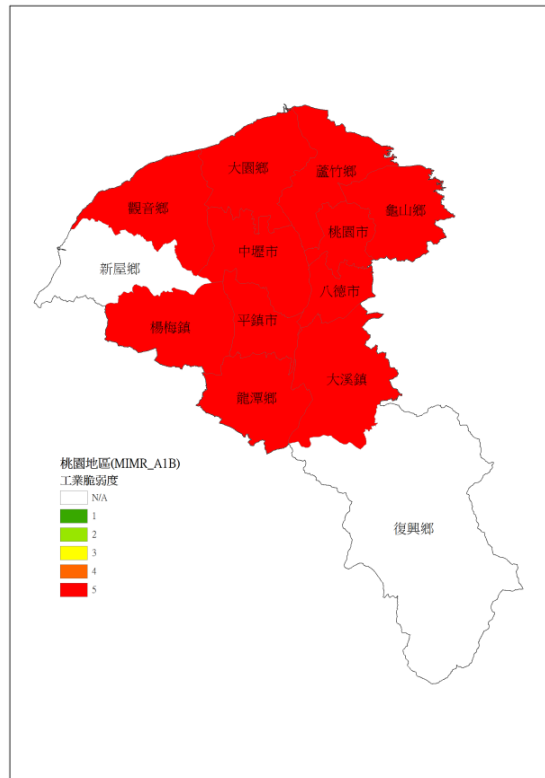
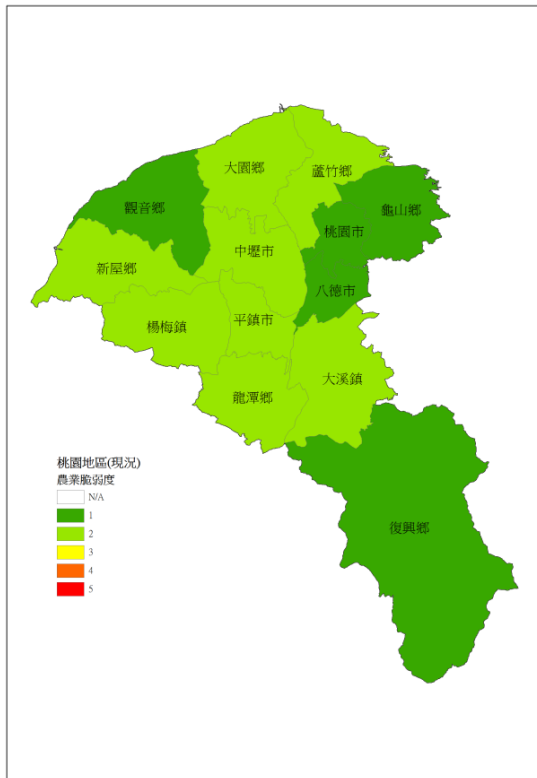
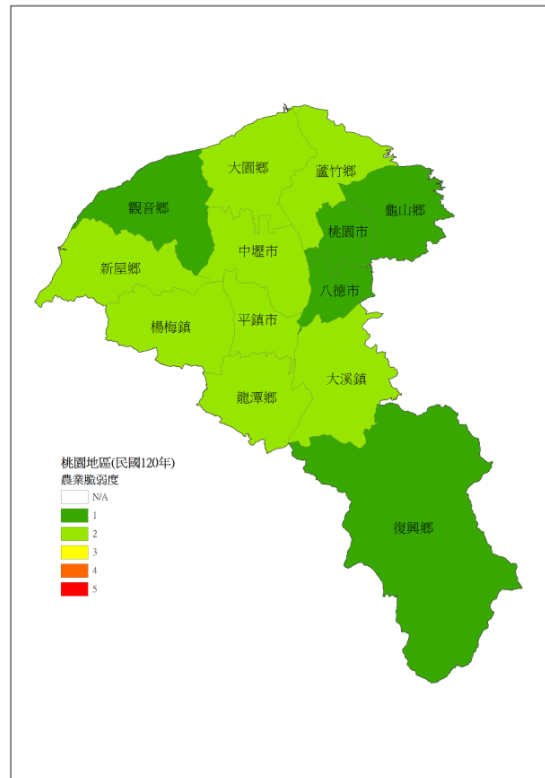


圖 6-36 桃園供水區工業用水脆弱度地圖

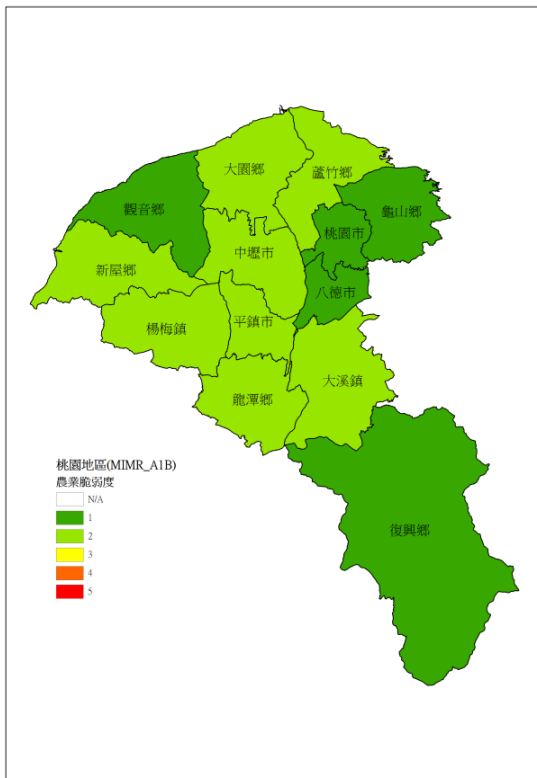
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

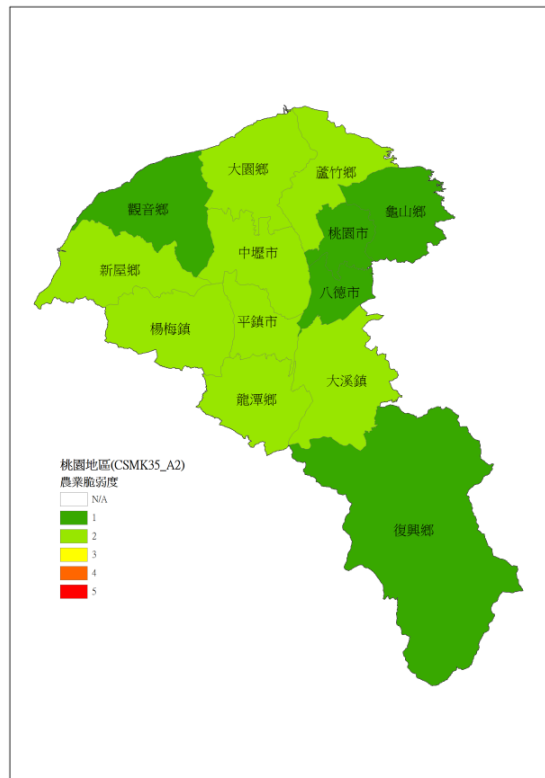
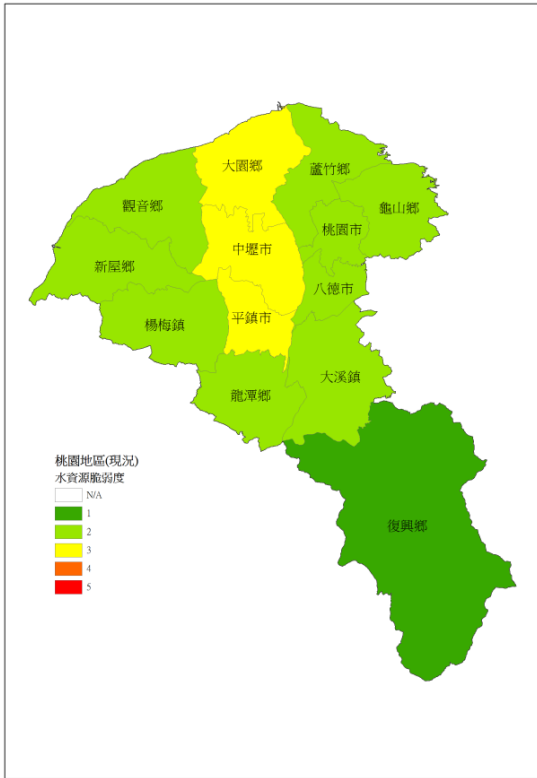
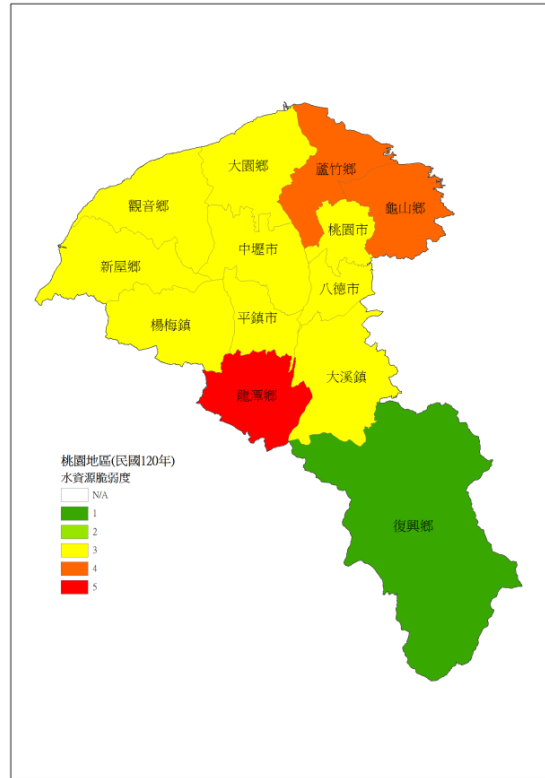


圖 6-37 桃園供水區農業用水脆弱度地圖

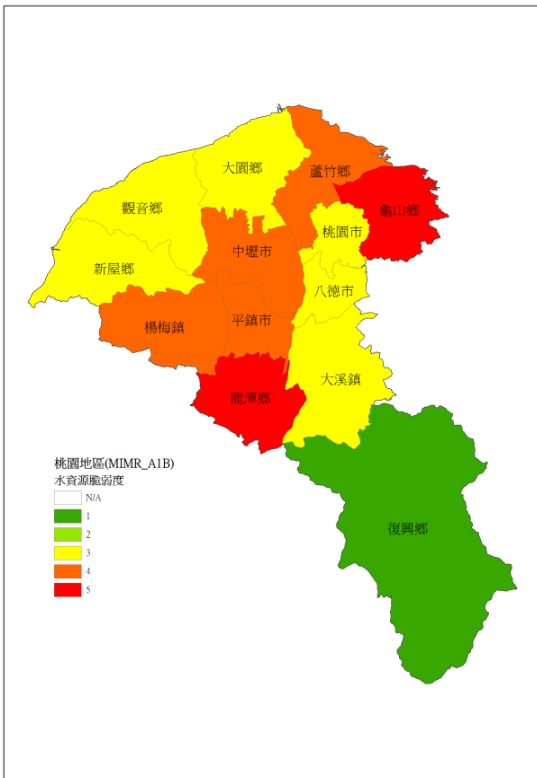
(a)現況



(b)民國 120 年無氣候變遷



(c)A1B 情境最劣



(d)A2 情境最劣

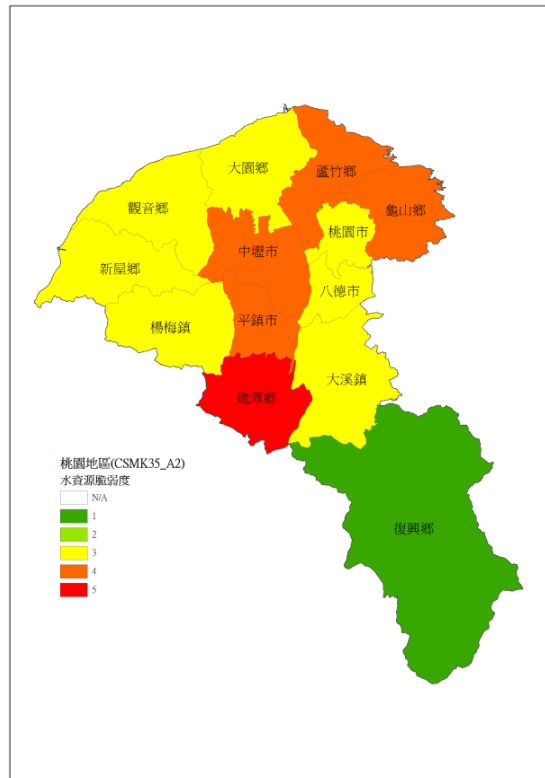


圖 6-38 桃園供水區水資源脆弱地圖

6.4 調適策略分析

進行調適策略分析前，首先針對面臨問題進行討論，再加入現有之既有策略進行承載力分析，評估加入既有策略後是否可達到供需平衡，若仍無法達到供需平衡，則加入強化方案進行分析可能之強化方案之優先順序。

6.4.1 未來面臨問題分析

未來面臨問題主要以水文的衝擊、河川流量的衝擊、供水系統的衝擊及農業灌溉型態的衝擊進行分析討論，其中水文及河川流量衝擊部分主要針對水源不足進行分析，供水系統的衝擊主要說明於需求成長、水源設施不足、整合彈性管理、不當土地利用規劃導致水資源供給壓力等項目進行說明，而農業灌溉型態衝擊除於需求成長部分說明外，亦於農業灌溉用水有效利用與生態用水競合進行說明，而社會大眾認知提升及區域差異等相關問題亦為未來可能面臨問題之一。

1. 水源不足

由於 GCMs 模式較多，因此以各模式之模擬結果平均值做為不同氣候變遷情境下，淡水河流域在豐水期、枯水期及全年流量改變(圖 6-39)情形，根據分析結果顯示，在 A1B 情境下，豐水期及枯水期河川流量都是減少的情形，減少的幅度在枯水期有 4.5%，而在 A2 情境下豐水期的流量有增加的趨勢，但枯水期流量則減少 12%，B1 情境在豐水期及枯水期河川流量改變趨勢與 A2 情境相同，但是由於 B1 情境在枯水期流量減少幅度較小，而在豐水期流量增加較大，因此 B1 情境下全年之流量呈現增加趨勢。但整體來說，未來河川流量大致上在豐水期流量增加而枯水期流量減少，顯示河川流量豐枯水期差異擴大，使得河川水量在枯水期可能不足以提供所需，而豐水期流量卻過剩，加劇了水資源調配的困難性。

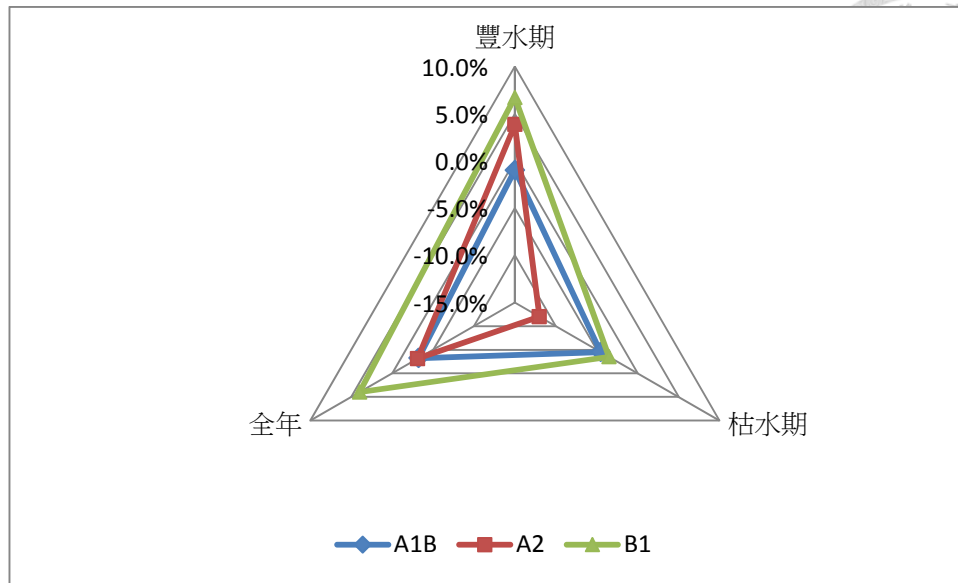


圖 6-39 淡水河流域豐水期、枯水期及全年流量改變情況

2. 需求成長

(1) 人口增加造成生活用水量增加

根據「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」(經濟部水利署，民國 98 年) 報告中認為，人口多寡是直接影響生活用水需求量的主要因素。由圖 6-40 可看出，臺灣地區(包含離島)的人口自民國 65 年~96 年成長約 1.4 倍，而生活用水之需求成長則為 4.7 倍，顯示人口增加與生活用水總量呈現明顯正相關，此外，由圖 6-40 中亦可發現，從民國 90 年開始，雖然人口仍緩慢成長，但是生活用水量在民國 91 年開始有減少的情形，也並沒有隨著人口的增加而增加，反而維持在平穩的情況，除了可能與 91 年北部嚴重乾旱，石門及翡翠水庫皆無法提供須水釀，臺北市甚至首次因旱災全面實施分區供水之因素外，隨著 GDP 成長亦可能是使得生活用水量減少的原因之一。

然而，重大開發案的投資或通過亦可能使得研究區域內人口迅速成長，導致生活用水量急速增加，位於研究區域內之桃園航空城開發案行政院已於民國 101 年 9 月核定，因此可能使得人口大量移入，生活需水量增加，但根據 6.3.3 節之分析顯示，在不考慮航空城

開發之情況下，未來桃園地區可能長期處於供水不足之情況，而隨著航空城的逐步開發，人口逐漸移入，對桃園地區之供水承载力將造成極大衝擊。

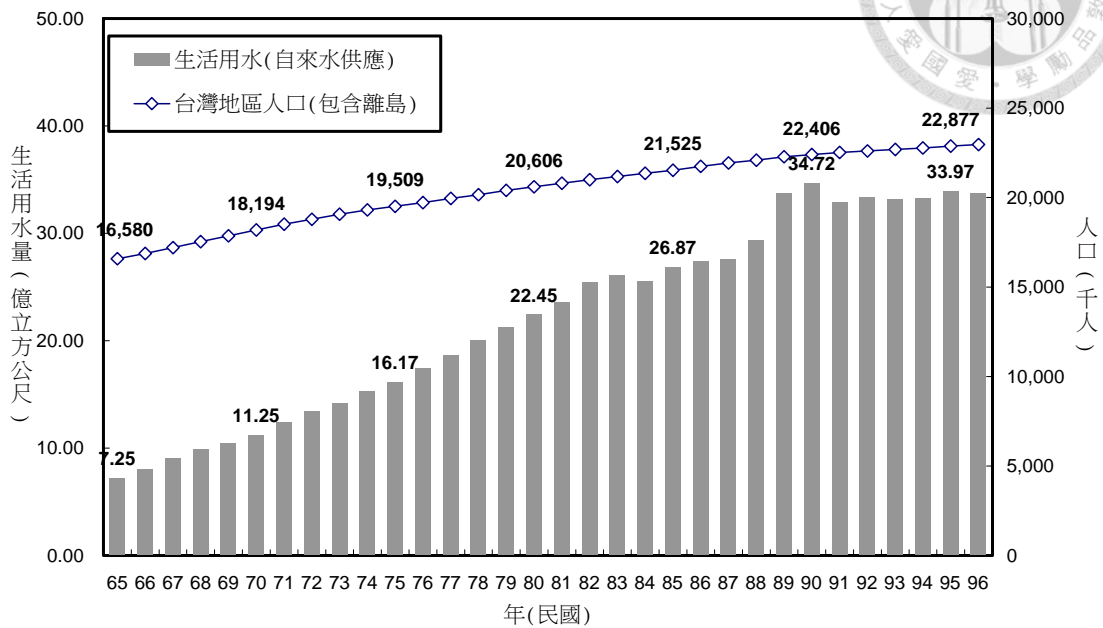


圖 6-40 臺灣地區(含離島)生活用水量與人口趨勢圖(經濟部水利署, 2009b)

(2) 工業用水量增加

工業用水量需求依照不同開發情境，除了現有產業用水量至民國 120 年亦成長 75 萬/日外，未來開發中產業用水、編定中產業用水及規劃(研議)中產業用水及電力事業用水各用水量每日需 20 萬噸、9 萬噸、28 萬噸及 0.6 萬噸，顯示未來工業用水將持續增加。

(3) 農業需水量改變

農業用水量在目標年假設為不成長的情況，然而氣候變遷將導致溫度增加，進一步影響作物的生長狀況(生育度數)，造成生長期的改變，並同時影響蒸發散量，作物蒸發散量的改變表示需水量的改變，加上生長期也受氣候改變影響，未來農業灌溉用水在氣候變遷影響下，將會改變各時期的需水量。

童慶斌(2010)研究亦指出，由於氣候變遷將造成溫度的改變，因此作物生長亦將受到影響，在不同的氣候變遷情境下，水稻一期作之生長天數縮短約 2-6 天而在二期作之生長

天數亦縮短 4-9 天，而由於生長期的縮短，作物需水的時間亦因此而移動，在枯水期之一期作時，不同氣候變遷情境降雨量大部分是減少的，因此作物生長期縮短導致田間需水量的時間改變，也將造成枯水期時之供水問題；在二期作雖然作物生長天數亦因為溫度的增加而縮短，但由於二期作處於豐水期，河川水量本來就比較充足，再加上在氣候變遷的情況下，降雨量是增加的，因此，需水量在時間的分配上雖然有改變，並不對供水造成較大的影響。

3. 水資源設施不足（水庫、淨水場、污水處理再利用）

依據「臺灣北部區域水資源經理基本計畫」（經濟部水利署，2009a）報告說明，翡翠與石門水庫 2 座水庫調蓄供水負荷極重，一旦發生任何緊急事件即可能影響水源穩定供應，供水風險仍高。而根據 6.3.2 節之分析結果顯示，臺北供水區之供水承载力遠大於需求，因此可提供板新或桃園地區一部份水量，然而，跨供水區域提供水量需有連通管線才能提供水量，且必須在臺北供水區有餘裕水量時才能提供水量，當嚴重乾旱事件發生而翡翠水庫無法提供臺北供水區足夠水量時，亦無法提供其他區域支援水量，因此仍須加強水資源設施之供水承载力。

4. 整合性管理彈性（傳統水資源、新興水源、常態供水、備用水源、與緊急供水之整合管理系統）

在面對未來供水可能不足的情況下，加強跨供水區域之為常態供水可能採行之策略之一，然而，當乾旱事件發生時各區域之供水量皆可能不足，因此是否可以提供足夠之支援水量亦須加以討論，以桃園地區為例，若未來板新地區之供水量由新店溪水量供給，原本提供板新地區之水量則轉為提供桃園地區，但若乾旱事件發生新店溪流量無法提供板新地區所需水量，則板新淨水場處理水量是否滿足板新地區，且是否可多提供桃園地區所需水

量都是值得注意的問題。因此加強被援用水與緊急用水系統之整合管理，且強化緊急時之緊急用水彈性調度機制等，加強各種水源之即時及彈性調度為一重要課題。

5. 氣候變遷調適決策能力不足（資訊高度不確定性、決策機制強化）

由於大氣環境之模擬較為複雜，因此目前不同 GCMs 模式對未來氣候變遷所造成之溫度及雨量改變情形並不一致，由圖 3-8 中亦可看出，就算是已經依據 GCMs 模擬東亞區域的降雨型態及季風特性等相關的氣候特性之相關係數，評選各 GCM 模式模擬歷史東亞季風特性之優劣，不同的 GCMs 模式對未來降雨情況之預測仍然不同，而依據不同之 GCMs 所分析之流量、供水承載力及回復力等亦可能有不確定性存在，因此在討論氣候變遷的調適策略時，宜採用具有彈性或較不易發生後火的調適策略為宜，並隨著資訊的改變或更新，修正採取之調適策略，以面對氣候變遷之不確定性所造成之影響。

6. 農業灌溉用水有效利用與生態用水競合

農業用水佔全臺灣地區用水量之大宗，然而，未來各標的用水可能增加的情況下，如何提高農業用水量的效率為重要的課題。然而，根據分析結果顯示作物的生長期會因為溫度增加而有所改變，因此需要灌溉的時期亦可能發生改變，導致用水結構與目前不同，再加上農業用水除了提供灌溉所需之外，亦為維持農村生活及生態重要水源之一，因此如何同時考量農業用水量的改變或是否需提供額外水量對農村生活、生產及生態之影響，亦需近一步分析考慮。此外，是否需要增加灌溉需水量以確保糧食安全，亦為未來氣候變遷情況下需要加以考量之重要課題之一。

7. 土地利用改變會影響水資源供給壓力

根據 6.3.2 之研究結果顯示，桃園地區在不考慮氣候變遷情境下供需缺口約為 22 萬噸/日，而在氣候變遷的影響下，未來供需水量缺口約為 15 萬噸/日-44 萬噸/日之間，且依據回復力分析結果，桃園地區未來將長期處於缺水之情況，然而，隨著航空城開發案逐漸開

發，桃園地區人口以及各項產業進駐，將使得該區之需水量逐漸增加，桃園未來供水情況將面臨更嚴峻挑戰。



8. 社會大眾認知提升（節水措施、水利設施開發）

在面臨需水增加但供水量可能不足的情況下，大型水利設施如水庫之興建為可能之解決方案之一，但興建水庫除面臨壩址選擇不易之外，民眾對於水庫開發造成環境及生態之影響亦普遍無法接受，因此如何透過政策宣加強民眾節約用水觀念，導降低民眾生活用水量外，加強工業區回收水利用之策略及農業回歸水利用之相關措施，透過社會大眾之認知提升將低不必要之用水量亦為一重要課題。

9. 區域差異

研究區域內之縣市產業結構不同，因此各區域用水特性並不相同，當供水量不足時，採取的調適策略亦有所不同，如桃園地區除提供農業用水外，亦包含工業及民生用水，且未來供水將長期不足，但臺北供水區在未來仍有多餘之水量，因此可透過跨供水區域之供水，將臺北供水區之多餘水量提供桃園地區使用。

6.4.2 調適方案規劃

經建會於民國 101 年擬定「國家氣候變遷調適政策綱領」，以「在水資源永續經營與利用之前提下，確保水資源供需平衡」為總目標，為各部會針對氣候變遷所制訂之調適策略與行動計劃綱領，為了達到水資源永續利用及供需平衡，研究中以北區水資源經理計畫(經濟部水利署, 2009a)所列之規畫中策略為既有策略，分析在未來氣候變遷情況下，考慮既有策略後是否可達到供需平衡，若仍未達供需平衡則表 6-19 之水資源調適方案列表，依據所面臨之問題選擇可能之強化方案，並以多準則分析法排序其優先順序，強化策略僅探討其可能之優先順序而不討論其可能提供之供水量。

表 6-19 水資源調適方案列表

調適策略	影響因子	編號	措施
穩定供水能力	水源不足	1	增建水庫或蓄水設施
		2	設置地下水水庫
	設施不足	3	人工湖
		4	雨水儲集系統
		5	埤塘
		6	伏流水
		7	地下水井新增
		8	地下水井復抽
		9	海水淡化廠
		10	淨水場供水能力增加
		11	地表透水率提升
確保合理用水需求負荷	加強管理	12	生活節水方案
		13	工業節水方案
		14	農業節水方案
		15	農業耕作制度調整
		16	水庫淤積清理
	設施不足	17	汰換舊漏自來水管線
		18	降低灌溉渠道輸水損失
19		新增輸水管線	
強化彈性管理能力	加強管理	20	廢汙水回收、循環利用
	設施不足	21	跨流域引水
掌握水資源資訊與不確定性	加強管理	22	加強供需情勢監測
		23	非氣候因子之資料收集與分析
集水區保育與合理土地利用規劃	加強管理	24	土地利用改變
		25	加強水庫上游集水區水土保持
		26	下游生態基流量之分析
		27	工業區之規劃與調整
其他(社會經濟、產業與科技發展)	加強管理	28	建立水資源災害保險制度

1.大臺北地區

大臺北地區以行政轄區來分，包含臺北市與新北市；若以供水系統來劃分，包含臺北自來水事業處、臺灣自來水公司第一區及第十二區管理處，林口區用水則是由第二區管理

處所供給。由於 MIMR 模式在 A1B 情境下供水不足量最多之模式，因此以 MIMR 模式之模擬結果作為討論氣候變遷衝擊之影響，配合民國 120 年無氣候變遷情境及現況進行分析。



(1) 面臨問題

A. 供水能力不足—水源

淡水河流域包含臺北地區、板新地區以及桃園地區，透過河川流量改變情況可發現(圖 6-39)，豐枯水期流量差異變大，因此可能造成未來水資源條配上之困難，使得未來發生缺水之機會大幅提高，因此可利用小型蓄水設施以利於枯水期之使用，降低缺水所致之災損。

B. 設施供水能力

在沒有新的水工設施開發的情況下，供水能力並不會有太大的改變，由表 6-9 及表 6-10 來看，不論在未來不論是否討論氣候變遷的影響，各供水系統之供水能力改變情況不大，此外，在大臺北地區之設施供水能力在未來是否考慮氣候變遷的影響，皆可滿足需求，因此設施供水能力並未對大臺北地區造成限制。

C. 需求負荷過高

臺北供水系統在民國 120 年人口由現況之 385 萬人增加至 403 萬人，板新地區人口由 201 萬人約增加至 212 萬人 (表 6-20~

表 6-21)。依據本計畫分析，大臺北地區生活用水量與 GDP 的相關性明顯因此需要修正，在 A1B 情境中，臺北供水系統修正量約減少 99 百萬噸，板新供水系統約減少 40 百萬噸；臺北供水系統於 A2 情境則是下修 169 百萬噸，此時每人每日用水量已達 250 公升，而板新供水系統之每人每日用水量在減少 40 百萬噸後也達 250 公升。因此，在溫度增加將使得用水量增加部分，除 A1B 情境之臺北供水系統修正量增加 9 百萬噸，其餘 A1B 的板新供水系統、A2 情境下的臺北與板新供水系統皆無法再作氣溫修正。

整體結果評估，臺北由於經濟成長之因素，在未來無論有無氣候變遷影響，生活用水量皆為降低；板新地區若無氣候變遷衝擊，在民國 120 年之生活用水量是成長的，約為 4%，加入氣候變遷影響後，反而因經濟成長而下降。在工業用水部分，板新地區 A1B 情境及民國 120 年無氣候變遷情境下工業用水量皆為考慮工業區中度開發情形，A2 情境雖考慮工業區高度開發，但高度開發的工業區中，並無設立於板新供水系統內，因此，三種情境之工業需水量每年約增加 1 百萬噸。

表 6-20 臺北供水系統需水量分析

		現況	120 年	A1B 最劣
生活需水量	人口數(萬人)	385	402	402
	自來水普及率(%)	100	100	100
	GDP 成長修正之需水量 (百萬噸/年)	-	-	-99
	溫度增加修正之需水量 (百萬噸/年)	-	-	9
	生活需水量(百萬噸/年)	826	620	521
工業需水量(百萬噸/年)		0	0	0
農業需水量(百萬噸/年)		0	0	0

表 6-21 板新供水系統需水量分析

		現況	120 年	A1B 最劣
生活需水量	人口數(萬人)	201	212	212
	自來水普及率(%)	99	100	100
	GDP 成長修正之需水量 (百萬噸/年)	-	-	-40
	溫度增加修正之需水量 (百萬噸/年)	-	-	0
	生活需水量(百萬噸/年)	272	283	243
工業需水量(百萬噸/年)		40	41	41
農業需水量(百萬噸/年)		0	0	0

(2) 既有方案評估

由於臺北供水系統並無缺水狀況發生，因此僅以板新供水系統進行討論。北區水資源經理計畫(經濟部水利署，2007)提到，板新供水系統既有方案有屬於近程規劃之板新供水改善計畫二期工程，該方案主要由新店溪提供應臺北市及新北市板新地區之生活及工業用水需求，將原供應板新地區之部分大漢溪水源南調供應桃園地區之用水需求，由於該方案為利用新店溪與大漢溪水源相互調配支援，因此視為經常性之調配使用，此外，配合北區水資源經理計畫中提出之節約用水方案，以及預計在民國 120 年工業用水量則考慮 10% 的回收水再利用，因此在需求量的部分可降低工業用水量 1 噸左右(表 6-22)。

然而，不論是臺北供水系統或是板新供水系統之供需缺口(表 6-23 及表 6-24)來看，在考量既有方案下，板新地區需水量因工業節約用水而減少，但因板二計畫主要施工內容為擴增自來水輸水管線，因此對於板新地區之供水承载力影響小，而臺北供水區之供水承载力足以提供板新地區之需水量，因此無論有無氣候變遷的影響或既定調適策略的影響，臺北及板新供水系統皆未有供需缺口之發生。

表 6-22 板新供水系統既有方案評估說明

既有方案	新增水源量(萬噸/日)	降低需求量(萬噸/日)
板新供水改善計畫第二期	31	-
工業節約用水	-	1

表 6-23 臺北供水系統既有方案評估後之供需缺口(單位：萬噸/日)

	現況	民國 120 年					
		無氣候變遷		A1B 最劣(MIMR)		A2 最劣(CSMK35)	
		零方案	既有方案	零方案	既有方案	零方案	既有方案
需水量	229	172	172	148	148	126	126
供水承载力	401	402	401	395	395	374	375
供需缺口	-	-	-	-	-	-	-

表 6-24 板新供水系統既有方案評估後之供需缺口(單位：萬噸/日)

	現況	民國 120 年					
		無氣候變遷		A1B 最劣(MIMR)		A2 最劣(CSMK35)	
		零方案	既有方案	零方案	既有方案	零方案	既有方案
需水量	88	90	89	79	78	79	78
供水承載力	92	107	112	95	112	86	112
供需缺口	-	-	-	-	-	-	-

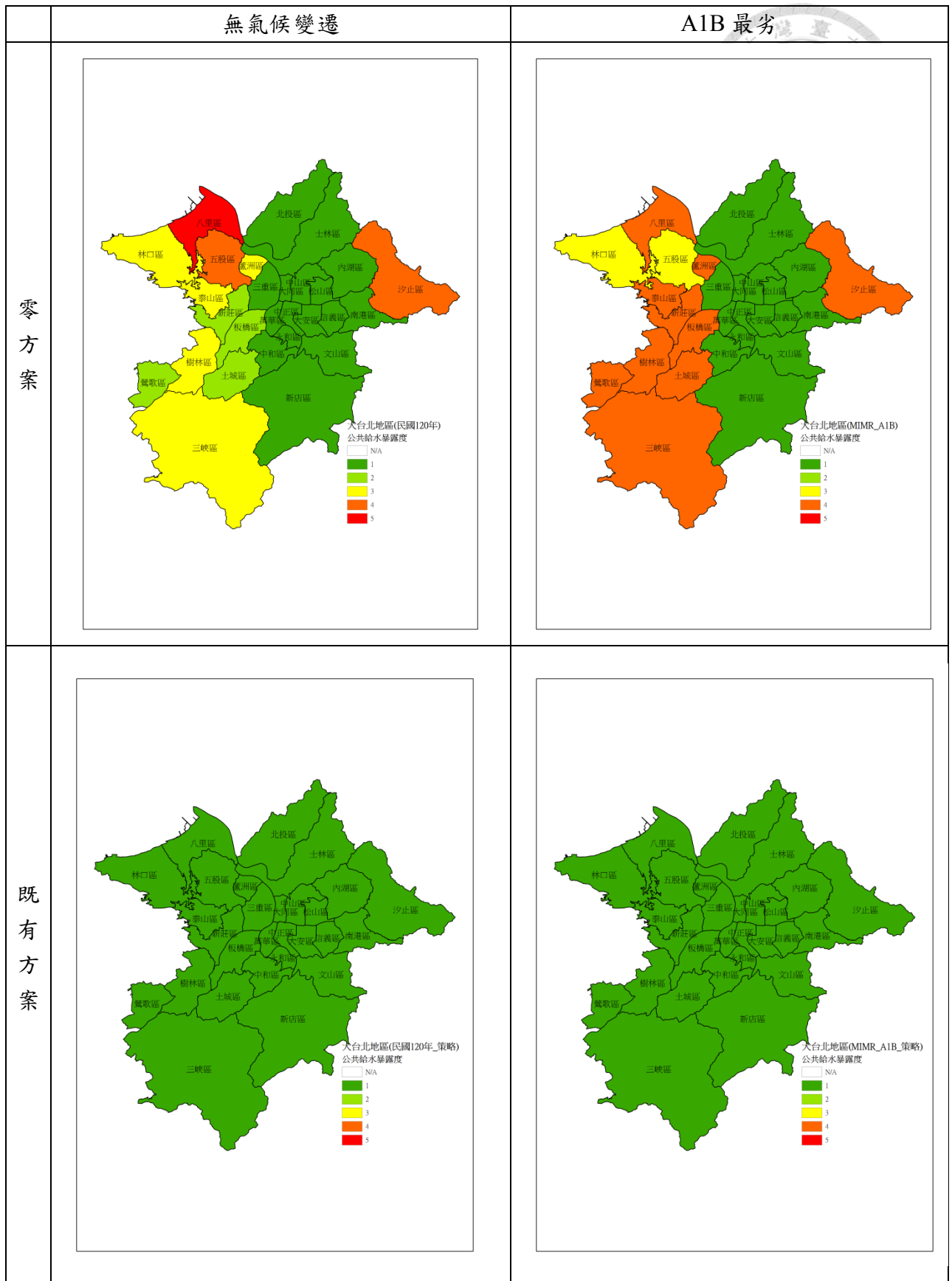


圖 6-41 大臺北地區考慮既有策略對公共給水暴露度之改變

(3) 強化方案評估

經過分析得知整個大臺北地區受到氣候變遷衝擊後之影響，便可應用調適策略評估流程針對高風險之因素進行分析，找出合適之調適方案來因應未來可能會面對的缺水情況。

臺北市之面臨問題與調適策略評估如表 6-25 所示，由於並未發生供水不足之情況，亦沒有既定之調適方案，因此在未來該區域主要以加強供需情勢監測及非氣候因子之資料收集與分析作為其強化調適策略，加強供需情勢監測為提升各供水系統之調度支援能力，由於臺北供水區無論是否考慮氣候變遷之影響，在民國 120 年均不會出現缺水事件，定期監測供需情勢待有需要時再進行調整即可，而非氣候因子之資料收集與分析主要考量敏感度因子之不確定性，由於臺北市內之人口密度及工業產值雖然不會受到氣候變遷的影響，但是敏感度因子的改變仍會對供水脆弱度造成影響，因此須加以監測。

板新供水區之面臨問題與調適策略評估如表 6-26 所示，由於板新地區未能可能發生供水不足的情況，因此以表 6-27 之新北市調適方案評估挑選適合之強化調適策略，效用性(表 6-28)是利用可供應多少水量來作比較基礎，汰換舊漏自來水管線，將原有管線舊漏處更新後，所節省之水量就相當於可供應之水量；雨水儲集系統屬於小系統之蓄水設施，且不是每家每戶皆會設置，評估起來可供應水量較少；而加強供需監測及蒐集非氣候因子資料則為管理手段，較無法增加可用水量。永續性(表 6-29)則是考量對於環境之衝擊大小，故加強管理之調適方案皆具有較好之排名，如加強供需監測及蒐集非氣候因子資料，既對環境影響小又可長期執行；雨水儲集系統，可小範圍設置，對環境影響較小；最後才為汰換舊漏管線，針對有漏水處才作補修。可行性(表 6-30)主要考量經費問題及民眾接受度，因此大型工程類對環境之衝擊及所需花費之成本較難被大眾所接受，與其他方案相較之下，汰換舊漏管線排名最後；加強管理之手段則較容易實行，因此加強供需監測及蒐集非氣候因子資料排名在前兩名。即時性(表 6-31)為考量方案從執行到完成之時間長短，因此雨水儲集系統因施工時間短且可立即提供調適措施使用，故排名最前。針對加強供需監測及蒐集非氣候因子資料因為需要長期收集，故即時性較差。表 6-32 為綜合結果分析，根據分析結果顯示，除收集資料分析外，建議可優先執行之調適方案為雨水儲集系統，雖效用較低，但即時性、可行性高，可做為彈性調度供水之用；之後才為汰換舊漏自來水管線。

表 6-25 臺北市面臨問題與調適策略評估表



步驟 1	1.1:確認範圍	研究區域：臺北市。 自來水供水區：臺北自來水事業處。 各用水對象：生活用水、工業用水、農業用水。
	1.2:動機	氣候變異引發極端降雨造成洪水及乾旱頻率增加。 提供穩定的供水，使各產業在氣候變遷衝擊下穩定發展。
	1.3:預定目標	分析各用水對象的災害脆弱度，及氣候變遷與社會經濟情境。 分析氣候變遷對各標的用水的衝擊程度及產生的災害脆弱度。
	1.4:面臨困難	以衝擊、脆弱度及調適能力，評估系統在氣候變異下脆弱程度。
步驟 2	2.1:過去氣象事件造成影響	主要的影響因子為降雨及溫度，由於連續乾旱事件發生使得降雨不足，導致各標的用水無法滿足，造成民眾不適及工業產值受創
	2.2:解決方式	透過用水調度及備援系統的支援，降低缺水招致的損失
	2.3:回復力門檻值的設定	在工業及生活用水部分，利用 SI 及 DPD 指標分析評估其回復力，而在農業用水部分則利用缺水率評估
步驟 3	3.1:未來氣候如何改變?	1. 溫度增加 2. 不降雨日數增加 3. 暴雨事件降雨強度增加 4. 暴雨事件及乾旱事件等極端天氣發生頻率增加 5. 豐水期雨量增加枯水期雨量減少
	3.2:氣候變遷主要影響因素	溫度及降雨改變除導致流量減少外，豐枯水期流量差異擴大，因此導致可取水量減少，使得供水系統供水承载力改變，無法滿足供水。
	3.3: 非直接由氣候變遷所造成的影響因素	影響因子包括人口成長及經濟發展等，人口成長造成生活需水量改變，而經濟發展經使得生活用水量因 GDP 增加而改變且工業用水量增加(表 6-20)。
	3.4: 氣候變遷所造成之影響	1.以整體系統評估，造成用水之風險因素包括河川流量改變，需水量增加。 2.各用水標的高脆弱度地區詳見圖 6-29 至圖 6-31。
步驟 4	4.1:可能調適措施	由於臺北市並無缺水情形，只需採取加強監測或收集相關資料分析等措施。

表 6-26 新北市面臨問題與調適策略評估表



步驟 1	1.1:確認範圍	研究區域：新北市。 自來水供水區：臺北自來水事業處、臺灣自來水公司第一、二及十二區管理處。 各用水對象：生活用水、工業用水、農業用水。
	1.2:動機	氣候變異引發極端降雨造成洪水及乾旱頻率增加。 提供穩定的供水，使各產業在氣候變遷衝擊下穩定發展。
	1.3:預定目標	分析各用水對象的災害脆弱度，界定氣候變遷與社會經濟情境。 分析氣候變遷對各標的用水的衝擊程度及產生的災害風險。
	1.4:面臨困難	如何綜合衝擊、敏感度以及調適能力，評估系統在氣候變異下的風險程度。
步驟 2	2.1:過去氣象事件造成影響	影響因子為降雨及溫度，連續乾旱事件發生使得降雨不足，導致各標的用水無法滿足，造成民眾不適且農業及工業產值受創
	2.2:解決方式	透過用水調度及備援系統的支援，降低缺水招致的損失
	2.3:回復力門檻值的設定	在工業及生活用水部分，利用 SI 及 DPD 指標分析評估其回復力，而在農業用水部分則利用缺水率評估
步驟 3	3.1:未來氣候如何改變?	1. 溫度增加 2. 不降雨日數增加 3. 暴雨事件降雨強度增加 4. 暴雨事件及乾旱事件等極端天氣發生頻率增加 5. 豐水期雨量增加枯水期雨量減少
	3.2:氣候變遷主要影響因素	溫度及降雨改變除導致流量減少外，豐枯水期流量差異擴大，造成可取水量減少，供水承载力改變無法滿足供水。
	3.3:非直接由氣候變遷所造成的影響因素	主要影響因子包括人口成長及經濟發展等，人口成長造成生活需水量改變，而經濟發展經使得生活用水量因 GDP 增加而改變且工業用水量增加，相關分析結果請見表 6-21。。
	3.4:氣候變遷所造成之影響	1.以整體系統評估，造成用水之風險因素包括河川流量改變，需水量增加。 2.各用水標的高脆弱度地區詳見圖 6-29 至圖 6-31。
步驟 4	4.1:可能調適措施	排放情境 A1B 最劣之模式結果由表 6-22 提供說明。
	4.2:調適措施評估	排放情境 A1B 最劣之模式結果由表 6-24 提供說明。

表 6-27 新北市選定之強化方案及說明

編號	措施	解決問題	措施說明
4	雨水儲集系統	板新地區在 A1B 情境下，模擬結果最劣之供水系統最長失效延時為 5 旬。	設置小系統之貯留系統，可支援短時間缺水情況，經濟部水利署「2008-2012 積極推動節約用水計畫」中將雨水儲集系統納為推動方案之一。
19	汰換舊漏自來水管線	蘆洲、五股、樹林等區皆為公共給水暴露度較高之地區(請見圖 6-26)	配合臺灣自來水公司推動「102-111 年降低漏水率計畫」，降低漏水率便可提升供給之水量，改善公共給水暴露度。
24	加強供需情勢監測	為提升各供水系統之調度支援能力。	由於新北市之需水量是由多個供水系統供應，加強供需情勢監測可提高因應氣候變遷衝擊之能力。
25	非氣候因子之資料收集與分析	評估敏感度因子不確定性。	非氣候因子像是人口密度、工業產值、農田面積等，雖不受氣候變遷衝擊，但仍會對供需情勢造成影響。

表 6-28 新北市調適方案效用性成對比較矩陣

		調適方案標號				得分	排序
		4	19	24	25		
調適方案編號	4	0	0	1	1	2	2
	19	1	0	1	1	3	1
	24	0	0	0	1	1	3
	25	0	0	0	0	0	4

表 6-29 新北市調適方案永續性成對比較矩陣

		調適方案標號				得分	排序
		4	19	24	25		
調適方案編號	4	0	1	0	0	1	3
	19	0	0	0	0	0	4
	24	1	1	0	0	2	2
	25	1	1	1	0	3	1

表 6-30 新北市調適方案可行性成對比較矩陣

		調適方案標號				得分	排序
		4	19	24	25		
調適方案編號	4	0	0	0	0	0	4
	19	1	0	0	0	1	3
	24	1	1	0	0	2	2
	25	1	1	1	0	3	1

表 6-31 新北市調適方案即時性成對比較矩陣

		調適方案標號				得分	排序
		4	19	24	25		
調適方案編號	4	0	1	1	1	3	1
	19	0	0	1	1	2	2
	24	0	0	0	0	0	4
	25	0	0	1	0	1	3

表 6-32 新北市多準則調適策略綜合評量表

方案編號	影響因子	調適方案	效用	永續性	可行性	即時性	總分	優先度
25	加強管理	非氣候因子之資料收集與分析	0	3	3	1	7	1
4	設施不足	雨水儲集系統	2	1	0	3	6	2
19	設施不足	汰換舊漏自來水管線	3	0	1	2	6	2
24	加強管理	加強供需情勢監測	1	2	2	0	5	3

2. 桃園地區

(1) 面臨問題

由於桃園地區與臺北及板新地區同屬於淡水河流域，因此供水承载力不足部分已於大臺北地區一同探討分析，因此桃園地區僅討論設施供水承载力及需求負荷過高所帶來之問題。在桃園地區在民國 120 年不論是否考慮氣候變遷的影響，其供水承载力是無法滿足需求的(表 6-13)，顯示桃園地區之供水承载力不足可能為無法提供足夠之需水量之可能原因之一。

桃園地區在民國 120 年人口由 205 萬人約增加至 219 萬人(表 6-33)，而桃園地區生活用水量與氣溫相關性不高，因此僅考慮 GDP 成長影響之每人每日用水量。在民國 120 年無氣候變遷影響下，由於人口增加，因此生活用水量較現況增加 1.9 千萬噸，而在 A1B 情境下，考慮人口成長及 GDP 成長修正後之生活用水量較民國 120 年未考慮氣候變遷時減少了 2 千萬噸。在工業需水量上，由於工業區開發，因此氣候變遷情境下，工業需水量大幅成長了 130 百萬噸，在農業用水部份，未來農業用水量由於氣候變遷對作物生長將造成影響，因此依據作物生長期改變造成之用水量改變修正農業用水量，根據分析結果顯示，未來農業需水量與目前農業需水量相異不大。

表 6-33 桃園地區需水量分析

		現況	120 年	A1B 最劣
生活 需 水 量	人口數(萬人)	205	219	219
	自來水普及率(%)	94	100	100
	GDP 成長修正之需水量(百萬噸/年)	-	-	-20
	溫度增加修正之需水量(百萬噸/年)	-	-	-
	生活需水量(百萬噸/年)	261	280	260
工業需水量(百萬噸/年)		82	213	213
農業需水量(百萬噸/年)		82	82	83

(2) 既有方案評估

表 6-34 根據北區水資源經理計畫(經濟部水利署，2007)，考慮之既有方案包括中庄調整池、節約用水以及板新地區供水改善計畫二期工程與板新大漢溪水源南調桃園計畫。中庄調整池是一人工湖，為強化桃園與板新供水系統之供水承载力，本計畫將其設定為鳶山堰上游一蓄水設施，以提供下游地區需水量；而節約用水方案主要考慮節約工業用水量的情形，預計在民國 120 年達到 10% 的工業用水量可透過回收水再利用來提供，配合不同氣候變遷情境下工業用水需求情形，可降低工業用水量之需求約 1~6 萬噸左右；板新地區供水改善計畫二期工程與板新大漢溪水源南調桃園計畫工程完工後，可將原本大漢提供板新地區之水量轉而提供桃園地區，並且因大湳淨水場擴建可增加提供每日 15 萬噸水量及龍潭二場之每日 14 萬噸供水量。

表 6-34 桃園地區既有方案評估說明

既有方案	新增水源量 (萬噸/日)	降低需求量 (萬噸/日)
中庄調整池工程計畫	4.5	-
工業節約用水	-	1~6
板新地區供水改善計畫二期工程與 板新大漢溪水源南調桃園計畫工程	31	-
大湳淨水廠擴建	15	-
龍潭二場	14	-

桃園地區之既有方案主要提供生活及工業用水需求，因此針對公共給水暴露度(圖 6-42)以及整體供需缺口(表 6-35)作討論，根據分析結果顯示，若僅考慮桃園系統可提供之供水承载力時，在不考量既有方案時，桃園地區民國 120 年無氣候變遷影響之模擬出現供需缺口，缺口為 21 萬噸/日；在考量既有方案後，缺口從 23 萬噸/日下降至 17 萬噸/日，A1B 情境之 MIMR 模式結果，加入既有方案模擬後，並無供需缺口產生，而在 A2 情境中由於需水量增加幅度大，因此僅考量桃園供水系之供水承载力時，並無法滿足桃園地區需水量，仍有 7 萬噸之供需缺口產生。然而，若將板新地區可支援之水量加入考量，則桃園地區可獲得之供水量在氣候變遷的情境下有每日 188 萬噸，可滿足 A1B 及 A2 最劣情境下所需之需水量，而由圖 6-42 納入既有方案考慮後之公共給水暴露度改變情況來看，由於淨水場之新設及擴充，桃園供水系統之供水承载力可滿足需求量，再加上板新地區可提供之支援水量，桃園地區公共給水暴露度不論是在有無考慮氣候變遷的情境下皆大幅降低。

但值得注意的是，若臺北供水區之供水量不足以滿足臺北地區需求，因而無法提供板新地區所需水量時，則板新地區是否有餘裕之水量可提供桃園地區是值得加以討論的，因此桃園地區仍需考慮強化方案，以分散式之小系統降低未來可能面臨之風險。

表 6-35 桃園地區既有方案評估後之供需缺口(萬噸/日)

	現況	民國 120 年					
		無氣候變遷		A1B 最劣		A2 最劣	
		零方案	既有方案	零方案	既有方案	零方案	既有方案
需水量	97	137	131	131	125	159	150
供水承载力	116	116	146	114	142	115	143
供需缺口	-	-21	-	-17	-	-44	-7
加入板新系統提 供水量後供水承 載力	-	-	193	-	188	-	188

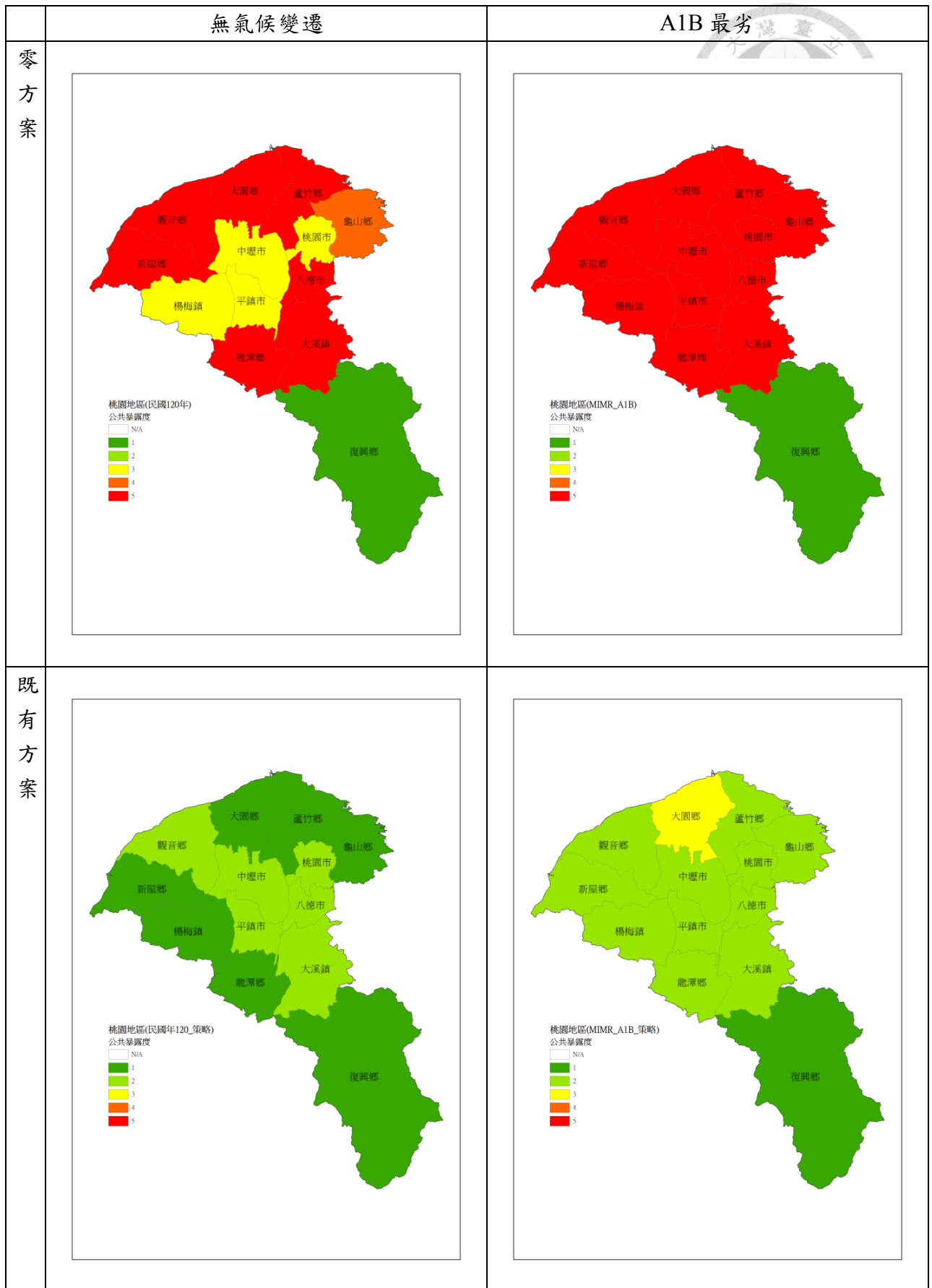


圖 6-42 桃園地區考慮既有策略對公共給水暴露度之改變強化方案評估

根據既有方案評估結果顯示，加入既有方案可有效改善桃園地區供水不足的現象，但若完全滿足桃園地區之需水量，需要板新地區供水改善計畫二期工程與板新大漢溪水源南調桃園計畫工程完工，且可順利提供桃園地區每日 31 萬噸之水量，否則在 A2 情境下，然仍可能發生供水不足的情況，桃園地區之面臨問題與調適策略評估如(表 6-36)，並進一步針對桃園地區提出可採行之強化方案(表 6-37)，在應用多準則分析，評估各項調適策略之優先順序。在效用性(表 6-38)評估上考慮之因子為可供水量多寡，因此排序第一為可供水量最多之水庫興建，增加淨水場供水承載力亦可提高可供給水量，因此排序較前，然而加強管理對增加水資源量之影響較低，因此排序較後；在永續性(表 6-39)考量上主要以對環境之衝擊影響為評估依據，因此對生態環境有較大之效益之水庫清淤排序較前，而大型水工設施之開發及興建對於環境之影響較大，因此排序在後；可行性(表 6-40)部分主要考量民眾接受度，以目前臺灣民眾對於水庫興建造成之環境衝擊與興建成本較高等因素有較高之不接受性，因此水庫興建之排序較低；而加強管理策略在收集各項氣候或非氣候等相關可能影響因子時，可與人口普查或工商普查等資訊一起收集分析，較易執行易較為被接受；最後的即時性(表 6-41)則討論由執行開始至完成之時間長短，由於大型水工設施的開發由規畫階段至施工階段，到最後的實際可供水階段需時較長，因此即時性較低，而資料的蒐集及分析須有較長時期資料，才能進行有效之分析評估因此即時性亦較差，然而埤塘為原有設施，可立即做調度使用，排名較前。最後綜合結果分析，除埤塘為原有設施，且可供一定水量以利調節外，桃園地區之缺水原因來自淨水場供水承載力無法跟上需水量成長，因此擴建淨水場供水承載力為第三要務。大型水利設施工程優先度較後，並非表示不建議採取，而是希望能再經過更仔細評估後執行。而在最後之整體評估上(表 6-42)則以調度埤塘用水為優先度最佳之強化方案，水庫之興建則為優先度最後之強化方案。

由於農業用水在維持農民生計、農村環境及農村生態扮演著相當重要的腳色，因此強化方案中並不以調度農業用水唯一考量之策略，農業用水之調度僅在乾旱事件發生臨時採取之調配措施，而非為常態調度。

表 6-36 桃園地區面臨問題與調適策略評估表

步驟 1	1.1: 確認範圍	研究區域：桃園縣。 自來水供水區：臺灣自來水公司第二區管理處。 各用水對象：生活用水、工業用水、農業用水。
	1.2: 動機	氣候變異引發極端降雨造成洪水及乾旱頻率增加。 提供穩定的供水，使各產業在氣候變遷衝擊下穩定發展。
	1.3: 預定目標	分析各用水對象的災害脆弱度，界定未來新竹地區的氣候變遷與社會經濟情境。 分析氣候變遷與否情況下，對各標的用水的衝擊程度及產生的災害風險。
	1.4: 面臨困難	如何綜合衝擊、敏感度以及調適能力，評估系統在氣候變異下的風險程度。
步驟 2	2.1: 過去氣象事件造成影響	主要的影響因子為降雨及溫度，由於連續乾旱事件發生使得降雨不足，導致各標的用水無法滿足，造成民眾不適且農業及工業產值受創
	2.2: 解決方式	透過用水調度及備援系統的支援，降低缺水招致的損失
	2.3: 回復力門檻值的設定	在工業及生活用水部分，利用 SI 及 DPD 指標分析評估其回復力，而在農業用水部分則利用缺水率評估
步驟 3	3.1: 未來氣候如何改變?	1. 溫度增加 2. 不降雨日數增加 3. 暴雨事件降雨強度增加 4. 暴雨事件及乾旱事件等極端氣候發生頻率增加 5. 豐水期雨量增加枯水期雨量減少
	3.2: 氣候變遷主要影響因素	由於溫度及降雨改變，除導致流量減少外，豐枯水期流量差異擴大，因此導致可取水量減少，使得供水系統供水能力改變，無法滿足供水。
	3.3: 非直接由氣候變遷所造成的影響因素	主要影響因子包括人口成長及經濟發展等，人口成長造成生活需水量改變，而經濟發展經使得生活用水量因 GDP 增加而改變且工業用水量增加，相關分析結果請見表 6-33。
	3.4: 氣候變遷所造成之影響	1. 以整體系統評估，造成用水之風險因素包括河川流量改變，需水量增加。 2. 各用水標的高脆弱度地區詳見圖 6-35~圖 6-37 分析。
步驟 4	4.1: 可能調適措施	排放情境 A1B 最劣之模式結果由表 6-34 提供說明
	4.2: 調適措施評估	排放情境 A1B 最劣之模式結果由表 6-35 提供說明。

表 6-37 桃園地區選定之強化方案及說明

編號	措施	解決問題	措施說明
1	興建水庫	在氣候變遷情境下，桃園地區由於工業成長，需水量大幅增加，造成長期缺水。	於大漢溪上游興建有效庫容 1.5 億噸水庫，配合排砂規劃，與石門水庫串聯運用，增供大漢溪水量外，相互協助供水與清淤排砂操作，將可成為一永續水源經營系統。
5	埤塘	河川流量受到氣候變遷衝擊而減少。	桃園地區的埤塘主要由桃園與石門農田水利會所管轄，最大蓄水量可至達 4602 萬噸，可與其他水源共同調配給水。
10	淨水場供水能力增加	由於工業發展興盛使得需水量增加，但桃園地區之淨水廠能力並未隨之提升。	臺灣自來水公司辦理「石門水庫及其集水區整治計畫—穩定供水設施與幹管改善計畫」，主要工作內容包含改善尖山中繼加壓站、石門淨水場增設 50 萬噸原水蓄水池、龍潭淨水場擴建等，以增加桃園地區供水能力。
18	水庫淤積清理	颱風帶來豪雨，引發巨量泥砂沖入水庫，導致石門水庫原水混濁，超出淨水場之處理能力。	石門水庫及其集水區整治計畫中，包含取水口更新改善工程、集水區山坡地治理、水庫清淤與排砂，確保水庫供水能力與穩定度。
19	汰換舊漏自來水管線	解決桃園整體公共給水暴露度皆偏高問題。	透過臺灣自來水公司推動「102-111 年降低漏水率計畫」，降低漏水率便可提升供給之水量，改善公共給水暴露度。
24	加強供需情勢監測	為提升各供水系統之調度支援能力。	加強供需情勢監測可提高因應氣候變遷衝擊之能力。
25	非氣候因子之資料收集與分析	評估敏感度因子之不確定性。	非氣候因子像是人口密度、工業產值、農田面積等，雖不受氣候變遷衝擊，但仍會對供需情勢造成影響。

表 6-38 桃園地區效用性成對比較矩陣

		調適方案標號							得分	排序
		1	5	10	18	19	24	25		
調適方案編號	1	0	1	1	1	1	1	1	6	1
	5	0	0	0	1	0	1	1	2	4
	10	0	1	0	1	1	1	1	5	2
	18	0	0	0	0	0	1	1	2	5
	19	0	1	0	1	0	1	1	4	3
	24	0	0	0	0	0	0	1	1	6
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	7

表 6-39 桃園地區永續性成對比較矩陣

		調適方案標號							得分	排序
		1	5	10	18	19	24	25		
調適方案編號	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	5	1	0	1	0	1	0	0	3	4
	10	1	0	0	0	0	0	0	1	6
	18	1	1	1	0	1	1	1	6	1
	19	1	0	1	0	0	0	0	2	5
	24	1	1	1	0	1	0	0	4	3
	25	1	1	1	0	1	1	0	5	2

表 6-40 桃園地區可行性成對比較矩陣

		調適方案標號							得分	排序
		1	5	10	18	19	24	25		
調適方案編號	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	5	1	0	1	1	1	1	1	6	1
	10	1	0	0	0	0	0	0	1	6
	18	1	0	1	0	1	0	0	3	4
	19	1	0	1	0	0	0	0	2	5
	24	1	0	1	1	1	0	0	4	3
	25	1	0	1	1	1	1	0	5	2

表 6-41 桃園地區即時性成對比較矩陣

		調適方案標號							得分	排序
		1	5	10	18	19	24	25		
調適方案編號	1	0	0	0	0	0	1	1	2	5
	5	1	0	1	1	1	1	1	6	1
	10	1	0	0	0	1	1	1	4	3
	18	1	0	1	0	1	1	1	5	2
	19	1	0	0	0	0	1	1	3	4
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	25	0	0	0	0	0	1	0	1	6

表 6-42 桃園多準則調適策略綜合評量表

方案編號	影響因子	調適方案	效用	永續性	可行性	即時性	總分	優先度
5	水源不足	埤塘	2	3	6	6	17	1
18	加強管理	水庫淤積清理	2	6	3	5	16	2
10	設施不足	淨水場供水能力增加	5	1	1	4	11	3
19	加強管理	汰換舊漏自來水管線	4	2	2	3	11	3
25	加強管理	非氣候因子之資料收集與分析	0	5	5	1	11	3
24	加強管理	加強供需情勢監測	1	4	4	0	9	4
1	水源不足	興建高台水庫	6	0	0	2	8	5



第七章 結論與建議



7.1 結論

為了評估氣候變遷對供水系統造成的影響，並提出調適措施以降低氣候變遷可能帶來的衝擊，本研究中發展氣候變遷對供水系統衝擊評估之流程與工具，在流程上依據聯合國發展規劃署所提出的「氣候變遷調政策略綱領」分成五大步驟，由問題界定開始，系統性的評估現況與未來的脆弱度與風險，接著提出解決問題之可能之調適策略及其評估方式，最後並持續調適措施之落實與修正。評估工具方面，本研究注重於發展可同時繁衍產生日間尺度及小時時間尺度之氣象合成模式與可同時模擬日時間尺度及小時時間尺度之水文模式，配合研究區域之水資源供水系統模式，可分析氣候變遷對供水系統之衝擊。

在挑選 GCMs 時，應先評估各 GCM 之基期輸出資料與研究區域之歷史之溫度及降雨特性是否符合，而後利用研究中提出之挑選方法挑選出適合之 GCMs。由 IPCC 網站上所提供之各 GCMs 之輸出資料進行分析時，可依據相關係數、豐水期及枯水期之 RMSE 值，利用排名法或缺點扣分法進行挑選，然而，利用「臺灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」提供之 GCMs 輸出資料進行挑選時，由於 TCCIP 計畫所提供之 GCMs 基期資料已經過誤差修正，不同 GCMs 之間的差異並不大，與測站之相關性以及豐水期與枯水期 RMSE 在不同的 GCMs 間之差異並不大，因此，無法挑選出適合之 GCMs。由於經過誤差修正後，不同 GCMs 之溫度及雨量資料會校正至與歷史溫度及降雨特性相同，但網格點之歷史氣象資料與測站之歷史氣象資料間是否亦具有相同之統計特性仍須加以考量，因此應先挑選出 GCMs 後，再針對網格點之資料與測站資料之資料進行誤差修正，以獲得未來氣象資料的改變情境。

傳統的氣象合成模式僅能利用單一分佈的函數描述降雨，研究中建立以雙機率分佈分別描述一般降雨事件及暴雨事件之氣象合成模式，在暴雨事件時透過雨型挑選，可產生小時雨量資料。由於降雨隨著不同的區域而有不同的分佈特性，因此不論使用單一分佈函數描述降雨或雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式時，均應先利用最適度檢定挑選適合研究區域之機率分佈函數，接著在繁衍產生雨量資料。根據研究結果，雙機率分佈描述降雨之

氣象合成模式可較合理重現歷史雨量分布情形，且在暴雨事件與非暴雨事件平均雨量上以及各月份最大雨量值均與歷史特性較為符合，因此後續研究建議可採用以雙機率分佈描述降雨之氣象合成模式，並可採用 13 公分做判斷暴雨事件與否之門檻值，而為了確保繁衍資料能重現歷史統計特性，建議繁衍資料長度至少應為 100 年。

研究中建立可同時模擬不同時間尺度之水文模式 (NTU_WH)，模式以 Green-Ampt 法計算入滲量，再結合水平衡計算，當降雨發生時，降雨量先滿足入滲量，有多餘的水量才會形成地表逕流。利用歷史氣象資料比較 GWLF 模式與本研究發展 NTU_WH 模式可發現，由於水文模式描述水文歷程並不相同，因此在旬平均流量上亦有差異存在，這是由於 GWLF 模式在計算入滲量時並未考慮土壤中可入滲的空間，只要是未能成為地表逕流的雨量不論多少都視為入滲量進入土壤中，導致高估了入滲量，而低估了地表逕流量。此外，雖然 GWLF 模式之單日滲漏較 NTU_WH 模式為高，但因 NTU_WH 模式考慮了滲漏延遲因子，在發生降雨事件後的連續幾天，均可補充淺層飽和層之土壤水分，因此淺層飽和層土壤水分減少速度較慢，故 NTU_WH 模式所模擬之連續七天低流量均較 GWLF 模式所模擬之結果為高；利用 NTU_WH_DH 模式同時模擬不同時間尺度之流量結果顯示，其逐旬平均流量 Nash-Sutcliffe 模式效率係數高且與年總流量亦接近，說明 NTU_WH_DH 模式可適切模擬歷史流量情況，可作為評估水庫操作時之入流量資料。GWLF 模式與 NTU_WH 模式模擬之逐旬流量與歷史逐旬流量之 Nash-Sutcliffe 模式效率係數都超過 0.75，但是考量 GWLF 模式會低估低流量，可能擴大氣候變遷的枯水期造成的影響，因此建議可以 NTU_WH 模式模擬流量進行後續研究。

研究中建立不同時間尺度水庫操作模式，可於暴雨事件發生時以小時之時間尺度進行水庫防洪操作，而於非暴雨事件時，以日為時間尺度進行水庫供水操作。比較僅考慮以日時間尺度之水庫操作模式，不同時間尺度之水庫操作模式因考慮暴雨時之小時防洪操作，因此暴雨事件結束後之水庫水位並不會固定維持在 245 公尺，會因為不同的入流量及雨量使得水庫水位落在不同的區間，亦即僅考慮日操作之水庫模式可能高估暴雨事件後之水庫水位，因而使得水庫增放水量以提供發電用水量，導致高估電廠發電量。

氣候變遷對供水系統承載力的評估結果顯示，氣候變遷對臺北供水系統衝擊影響不大，可維持正常供水，且有多餘水量可提供其他地區使用，板新以在容忍度 SI 為 0.5 之條件下供水承載力雖可滿足需水量，但仍有缺水事件發生，而在桃園地區在容忍度 SI 為 0.5 的條件下，供水承載力是無法滿足需水量的，雖然在 B1 情境下供需缺口最小，最大供需缺口僅有每日 1 萬噸，但由回復力指標來看卻發現不論在何種情境下，桃園地區是長期處在缺水的情況的，因此須採取適當調適措施，以降低桃園地區供水承載力無法滿足需水量情形。

在調適策略挑選及評估上，本研究以 APF 與 UKCIP 架構為基礎建立調適策略挑選及評估架構，提出在不同階段評估階段需比較及分析之工作項目，分析可能之強化方案，再利用多準則分析法決定強化方案執行之優先順序。由於大臺北地區由於供水滿足需求，可持續監測供需情勢，不需加入其他強化方案，桃園地區在加入既有策略後，提供之水量可滿足桃園地區之需水量，但其為考慮板新地區供水改善計畫二期工程與板新大漢溪水源南調桃園計畫工程完工，且可順利提供桃園地區每日 31 萬噸之水量，才可滿足桃園地區之需水量，然而若該方案並未完成，則桃園地區仍將面臨供水不足情況，且則板新地區是否有餘裕之水量可提供桃園地區亦值得加以考慮，因此需考慮強化方案以降低未來面臨之風險，而根據研究結果可採行之強化方案建議依據為埤塘、水庫清淤、淨水場供水能力增加與汰換舊漏自來水管線。

7.2 建議

針對研究過程中及分析過程中遇到問題，本研究提出下列建議以供後續研究參考。

1. 利用氣象合成模式產生暴雨事件小時雨量時，假設暴雨事件為 24 小時之暴雨事件，然暴雨事件並不一定是 24 小時，也不一定是從暴雨當天的第一個小時開始，因此後續研究可先產生降雨延時，再產生降雨起始時間，配合繁衍產生的降雨量，以決定暴雨事件在時間上的分佈，此外，在利用機率分佈描述降雨量時，目前是以 12 個月分中通過最

多月份通過最適度檢定之機率密度函數來描述各月份的降雨情形，未來建議可依據最適度檢定結果，各月份採用不同之機率密度函數描述降雨情形。

2. 不同的水文模式在描述水文歷程時採用的方程式與使用的參數並不相同，將對流量模擬造成影響，因此在分析流量時可先進行敏感度分析，決定各項因子對流量影響程度，以挑選適當之水文模式。
3. 本研究所建立之 NTU_WH 水文模式並未特別考慮窪蓄與截留對河川流量的影響，在暴雨事件發生時，窪蓄截留的量相對於河川流量而言較小，因此在暴雨事件發生時是否考慮窪蓄截留對河川流量的影響不大，然而，在連續低雨量事件發生時，包括窪蓄與截留量佔比例較大，因此可能對河川流量分析造成影響，建議後續研究可分析枯水期或乾旱時期窪蓄與截留量之影響。
4. 研究中在敏感度評估時僅使用單一因子做計算，但各標的用水量之敏感度因子不一定為單一因子，舉例來說，生活用水敏感度除目前考慮之人口密度外，亦可納入年齡與性別等因子，建議未來可採用多個敏感度因子，分析評估不同敏感度因子間之權重或不同因子之組合方式，綜合考量可能之敏感因子。
5. 氣候變遷可能導致作物生長期或適合種植的作物改變，造成水資源需求的改變，在研究中假設農業面積不變，且農業灌溉需水量僅因溫度影響導致生長期改變，造成需水時間改變，因此，建議未來可結合農業政策，同時評估氣候變遷導致農作物制度調整對水資源需求之影響，並分析可供水量變化對糧食生產之影響，以確保在氣候變遷情境下之糧食安全，此外，農業用水節水尚須針對各面向進行考量，因此建議後續研究可針對此方向進行分析討論，此外，由於作物種類變更可能造成之產銷衝擊及產業結構調適等相關議題亦應由後續研究深入探討。
6. 根據分析結果顯示，在未來桃園地區將長期處於缺水的情況，但行政院已於民國 101 年 9 月核定桃園航空城開發案，未來桃園地區將面臨人口大量移入、工商業活動頻繁與生活需水量增加的情形，而隨著航空城的逐步開發，桃園地區供水不足的情況可能更

加嚴重，因此未來重大開發案前，應先針對區域內之供水急需水情形進行評估，以降低可能造成之衝擊。

7. 本研究僅針對可能的強化策略進行討論，並分析不同調適策略之優先順序，然而，不同強化策略可提供的水量或可降低的需水量並不相同，且對供水改善的情形並不一致，因此可以透過計算不同強化策略之 Shapley value(Shapley 1953)，以各強化策略所能提供之水量為評估目標，以各強化策略所能提供水量之平均邊際貢獻，進一步決定各強化策略之優先順序。
8. IPCC 在 2013 或 2014 年將釋出新的 AR5 情境，建議未來研究可先針對 AR5 情境之輸出資料進行分析，若 AR5 所釋出之輸出資料與 AR4 情境之輸出資料差異不大或較不嚴重，則不一定需要重新進行模擬，然而，若未來情境資料與 AR4 情境資料差異較大，則可利用本研究提出之方法重新進行模擬，分析利用 AR5 情境之輸出資料對供水系統之衝擊並評估可能之調適策略。
9. 氣候變遷可能有不確定性產生，因此建議後續研究除針對氣候變遷對未來氣象條件之不確定性進行分析研究之外，強化策略部分亦應考慮氣候變遷的不確定性可能對調適策略造成的影響。



參考文獻

1. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., Oconnell, P. E., & Rasmussen, J. (1986a). An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, She .1. History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *J Hydrol*, 87(1-2), 45-59.
2. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., Oconnell, P. E., & Rasmussen, J. (1986b). An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, She .2. Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *J Hydrol*, 87(1-2), 61-77.
3. Alcamo, J., Heinrichs, T., & Rösch, T. (2000). World Water in 2025—Global Modeling and Scenario Analysis for the 21st Century
4. *Center for Environmental Systems Research*.
5. Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232.
6. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development. *J Am Water Resour As*, 34(1), 73-89.
7. Bridges, T. C., & Haan, C. T. (1972). Reliability of Precipitation Probabilities Estimated from the Gamma Distribution. *Mon Weather Rev*, 100(8), 607-611.
8. Burton, I., Malone, E., & Huq, S. (2004). *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures* (B. Lim & E. Spanger-Siegfried Eds.): United Nations Development Programme, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
9. Castellvi, F., Mormeneo, I., & Perez, P. J. (2004). Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. *J Hydrol*, 289(1-4), 286-302.
10. Chow, Ven Te, Maidment, David R., & Mays, Larry W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.
11. Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P., & Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, 62(1-3), 337-363.
12. Cole, J. A., Slade, S., Jones, P. D., & Gregory, J. M. (1991). Reliable Yield of Reservoirs and Possible Effects of Climatic-Change. *Hydrolog Sci J*, 36(6), 579-598.
13. Development, United States Agency for International. (2007). *Adapting To Climate variability and Change: A Guidance Manual For Development Planning*.
14. Dubrovsky, M., Nemesova, I., & Kalvova, J. (2005). Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. *Clim Res*, 29(2), 139-156.

15. Eum, H. I., & Simonovic, S. P. (2010). Integrated Reservoir Management System for Adaptation to Climate Change: The Nakdong River Basin in Korea. *Water Resour Manag*, 24(13), 3397-3417.
16. Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Farzaneh, M. R., Zehnder, A. J. B., Srinivasan, R., & Yang, H. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *J Hydrol*, 480, 85-101.
17. Feyen, L., & Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *J Geophys Res-Atmos*, 114, Artn D17116.
18. Forrester, Jay Wright. (1961). *Industrial dynamics*. [Cambridge, Mass.]: M.I.T. Press.
19. Forrester, Jay Wright. (1969). *Urban dynamics*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
20. Fowler, H. J., Kilsby, C. G., & Stunell, J. (2007). Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. *Hydrol Earth Syst Sc*, 11(3), 1115-1124.
21. Frederick, K. D., & Major, D. C. (1997). Climate change and water resources. *Climatic Change*, 37(1), 7-23.
22. Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics Part I - The flow of air and water through soils. *J Agr Sci*, 4, 1-24.
23. Haith, D. A., & Shoemaker, L. L. (1987). Generalized Watershed Loading Functions for Stream-Flow Nutrients. *Water Resour Bull*, 23(3), 471-478.
24. Halmova, D., & Melo, M. (2006). Climate change impact on reservoir water supply reliability *IAHS Publication 308* (pp. 407-412). Wallingford: IAHS Press.
25. Haman, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division*, 83(7), 107-120.
26. Hansen, J. W. (2002). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agr Syst*, 74(3), 309-330.
27. He, J., Valeo, C., & Bouchart, F. J. C. (2006). Enhancing urban infrastructure investment planning practices for a changing climate. *Water Sci Technol*, 53(10), 13-20.
28. Huff, F. A. (1967). Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. *Water Resour Res*, 3(4), 1007-&.
29. IPCC. (2007). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
30. Kang, B., & Ramirez, J. A. (2007). Response of streamflow to weather variability under climate change in the Colorado Rockies. *J Hydrol Eng*, 12(1), 63-72.
31. Kilsby, C. G., Jones, P. D., Burton, A., Ford, A. C., Fowler, H. J., Harpham, C., James, P., Smith, A., & Wilby, R. L. (2007). A daily weather generator for use in climate change studies. *Environ Modell Softw*, 22(12), 1705-1719.
32. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

33. Lettenmaier, D. P., Wood, A. W., Palmer, R. N., Wood, E. F., & Stakhiv, E. Z. (1999). Water resources implications of global warming: A US regional perspective. *Climatic Change*, 43(3), 537-579.
34. Li, H. B., Sheffield, J., & Wood, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *J Geophys Res-Atmos*, 115, Artn D10101.
35. Loukas, A., Vasiliades, L., & Dalezios, N. R. (2002). Potential climate change impacts on flood producing mechanisms in southern British Columbia, Canada using the CGCMA1 simulation results. *J Hydrol*, 259(1-4), 163-188.
36. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J Chem Phys*, 21(6), 1087-1092.
37. Mimikou, M. A., Baltas, E., Varanou, E., & Pantazis, K. (2000). Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *J Hydrol*, 234(1-2), 95-109.
38. Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and environment*. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. Paper presented at the Proc. 15th Symposium Society for Experimental Biology, Swansea. Cambridge University Press, London.
39. Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
40. Murdoch, P. S., Baron, J. S., & Miller, T. L. (2000). Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. *J Am Water Resour As*, 36(2), 347-366.
41. Murphy, J. (1999). An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *J Climate*, 12(8), 2256-2284.
42. Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Di Luzio, M. (2005). Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *T Asae*, 48(3), 1101-1113.
43. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J Hydrol*, 10(3), 282-290.
44. Nash, L. L., & Gleick, P. H. (1991). Sensitivity of Streamflow in the Colorado Basin to Climatic Changes. *J Hydrol*, 125(3-4), 221-241.
45. Nash, L. L., & Gleick, P. H. (1993). The Colorado River Basin and climatic change: the sensitivity of streamflow and water supply to variations in temperature and precipitation. *US Environmental Protection Agency*.

46. Nearing, M. A., Liu, B. Y., Risse, L. M., & Zhang, X. (1996). Curve numbers and green-ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resour Bull*, 32(1), 125-136.
47. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J.R. (2009). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas A&M University System: Texas Water Resources Unstitute Technical
48. Park, G. A., Ahn, S. R., Lee, Y. J., Shin, H. J., Park, M. J., & Kim, S. J. (2009). Assessment of Climate Change Impact on the Inflow and Outflow of Two Agricultural Reservoirs in Korea. *TAsabe*, 52(6), 1869-1883.
49. Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River Basin. *Climatic Change*, 62(1-3), 233-256.
50. Pickering, N. B., Stedinger, J. R., & Haith, D. A. (1988). Weather Input for Nonpoint-Source Pollution Models. *J Irrig Drain E-Asce*, 114(4), 674-690.
51. Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1975). Rainfall Temporal Patterns for Design Floods. *J Hydr Eng Div-Asce*, 101(Nhy1), 81-95.
52. Powell, D. N., Khan, A. A., Aziz, N. M., & Raiford, J. P. (2007). Dimensionless rainfall patterns for South Carolina. *J Hydrol Eng*, 12(1), 130-133.
53. Protopapas, A. L., Katchamart, S., & Platonova, A. (2000). Weather Effects on Daily Water Use in New York City. *J Hydrol Eng*, 5(3), 332-338.
54. Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A Serial Approach to Local Stochastic Weather Models. *Ecol Model*, 57(1-2), 27-41.
55. Richardson, C. W. (1981). Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar-Radiation. *Water Resour Res*, 17(1), 182-190.
56. Richardson, C.W, & Wright, D.A. (1984). WGEN: A model for generating daily weather variables. : US Department of Agriculture, Agricultural Research Service,.
57. Rutter, A. J., Robins, P. C., Morton, A. J., & Kershaw, K. A. (1972). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests, .1. Derivation of Model from Observations in a Plantation of Corsican Pine. *Agr Meteorol*, 9(5-6), 367-384.
58. Selker, J. S., & Haith, D. A. (1990). Development and Testing of Single-Parameter Precipitation Distributions. *Water Resour Res*, 26(11), 2733-2740.
59. 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.
60. 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.
61. Senhorst, H. A. J., & Zwolsman, J. J. G. (2005). Climate change and effects on water quality: a first impression. *Water Sci Technol*, 51(5), 53-59.

62. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., & Marquis, M. and others (eds). (2007). *Climate change 2007: the physical science basis contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
63. Takara, Kaoru, Kim, Sunmin, Tachikawa, Yasuto, & Nakakita, Eiichi. (2009). Assessing Climate Change Impact on Water Resources in the Tone River Basin, Japan, Using Super-High-Resolution Atmospheric Model Output. *Journal of Disaster Research*, 4(1), 12-23.
64. Thodsen, H. (2007). The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. *J Hydrol*, 333(2-4), 226-238.
65. Tung, C. P. (1995). *The Impact of Land Use and Climate Changes on Streamflows and Corn Grain Yields and the Effects of Corn Production Response Strategies*. (PHD Thesis), Cornell University, New York.
66. Tung, C. P., & Haith, D. A. (1995). Global-Warming Effects on New-York Streamflows. *J Water Res Pl-Asce*, 121(2), 216-225.
67. UKCIP. (2010). *The UKCIP Adaptation Wizard V 3.0*.: UKCIP, Oxford.
68. Vlcek, O., & Huth, R. (2009). Is daily precipitation Gamma-distributed? Adverse effects of an incorrect use of the Kolmogorov-Smirnov test. *Atmos Res*, 93(4), 759-766.
69. Wegehenkel, M., & Kersebaum, K. C. (2009). An assessment of the impact of climate change on evapotranspiration, groundwater recharge, and low-flow conditions in a mesoscale catchment in Northeast Germany. *J Plant Nutr Soil Sc*, 172(6), 737-744.
70. Whetton, P.H., McInnes, K.L., Jones, R.N., Hennessy, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Bathols, J., & P., Durack. (2005). Climate change projections for Australia for impact assessment and policy application: A review. CSIRO Marine and Atmospheric Research
71. Wilby, R. L., Whitehead, P. G., Wade, A. J., Butterfield, D., Davis, R. J., & Watts, G. (2006). Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *J Hydrol*, 330(1-2), 204-220.
72. Wilks, D. S., & Wilby, R. L. (1999). The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Prog Phys Geog*, 23(3), 329-357.
73. Wu, K. S., & Johnston, C. A. (2007). Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model. *J Hydrol*, 337(1-2), 187-199.
74. Xu, Y. P., Zhang, X. J., Ran, Q. H., & Tian, Y. (2013). Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. *J Hydrol*, 483, 51-60.
75. Yen, B. C., & Chow, V. T. (1980). Design Hyetographs for Small Drainage Structures. *J Hydr Eng Div-Asce*, 106(6), 1055-1076.
76. 行政院經濟建設委員會. (2012). 國家氣候變遷調適政策綱領.
77. 何宜昕. (2010). 建立氣候變遷對石門水庫供水與防洪能力之影響評估方法. 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文.

78. 吳至剛. (2000). 氣候變遷對高屏河流域水資源衝擊之探討. 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文.
79. 卓盈旻, & 盧孟明. (2009). IPCC 第四期評估報告氣候模式對亞洲夏季季風模擬之分析. 大氣科學, 37(2), 13-33.
80. 林俊成、李國忠. (2000). 全球溫暖化對畢祿溪試驗集水區河川流量衝擊評估. 台灣林業科學, 15(1), 51-60.
81. 林能暉. (2007). IPCC 第一工作分組之第四次評估報告：科學基礎 第二章“大氣成分和輻射驅動力的改變”之重點說明. 全球變遷通訊雜誌(55), 1-5.
82. 洪念民. (1997). 氣候變遷對大安溪水資源營運之影響. 國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文.
83. 徐享崑. (2006). 水源調配與水庫管理. 2006 閻振興教授論壇-台灣當前水利問題對策與展望論文集, B1-B10.
84. 徐嘉君, & 林淑華. (2008). 全球氣候變遷模式推估與情境模擬簡介. 林業研究專訊, 15(2), 5-7.
85. 財團法人農業工程研究中心. (2003). 桃園農田水利會於石門水庫之水權與歷年實際取用水量探討. 財團法人桃園農田水利研究發展基金會.
86. 國立台灣大學水工試驗所. (1990). 石門水庫操作模式與自動化監控系統規劃.
87. 國家災害防救科技中心. (2010). 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫(2/3): 行政院國家科學委員會.
88. 許恩菁. (1999). 設計暴雨兩型序率模式之研究. 國立台大學農業工程學研究所碩士論文.
89. 許振崑, 林伯勳, 鄭錦桐, 冀樹勇, 黃文洲, & 尹孝元. (2009). 石門水庫集水區土壤沖蝕量評估及現地試驗監測. 第十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會.
90. 連宛渝. (2000). 氣候變遷對台灣水稻灌溉需水量及潛能量之影響. 國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文.
91. 連宛渝, 童慶斌, 何宜昕, 戴嘉慧, & 莊立昕. (2013). 建立環流模式推估能力評比之方法. 農業工程學報, 59(1), 1-14.
92. 陳正達, 許晃雄, 盧孟明, 隨中興, 周佳, 翁叔平, 陳昭銘, 林傳堯, 鄭兆尊, 朱容練, 吳宜昭, 卓盈旻, 陳重功, 張雅茹, 林士堯, 林修立, 童裕翔, & 楊承道. (2011). 未來氣候變遷推估 2011：臺灣氣候變遷科學報告 2011: 政院國家科學委員會.
93. 陳明業. (2002). 淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究. 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文.
94. 童慶斌. (2001). 系統動態模式建構概論. 環境系統動態理論與應用研習會.
95. 童慶斌. (2010). 氣候變遷對灌溉系統之衝擊與脆弱度評估方法之建立. 行政院農業委員會.
96. 童慶斌. (2012). 氣候變遷與生態環境課程講義: 國立台灣大學生物環境系統工程學系.

97. 童慶斌、吳明進、張斐章、李明旭、柳文成、謝龍生. (2002). 氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建置-氣候、水文、生態部分(一). 行政院環境保護署專題研究計畫報告.
98. 童慶斌、李宗祐. (2001). 氣候變遷對七家灣溪流量之影響評估. 農業工程學報, 47(1), 65-74.
99. 童慶斌、洪念民、陳主惠. (1999). 氣候變遷對水資源影響評估與適應策略研擬. 中國農業工程學報, 45(4), 73-90.
100. 經濟部水利規劃試驗所. (2012). 強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究.
101. 經濟部水利署. (2009a). 臺灣北部區域水資源經理基本計畫.
102. 經濟部水利署. (2009b). 臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討.
103. 經濟部水利署. (2011). 石門水庫運用要點.
104. 經濟部水利署. (2012a). 中華民國 100 年水利統計.
105. 經濟部水利署. (2012b). 國家氣候變遷調適行動方案- 水資源領域.
106. 經濟部水資源局. (2001). 水文設計應用手冊.
107. 葉弘德, & 韓洪元. (1990). 台北市暴雨雨型之研究. 台灣水利, 38(3), 36-49.
108. 詹麗梅. (2001). 區域供水系統系統動力模型建立與策略評估-以大基隆供水區為例. 國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文.
109. 盧孟明, 余嘉裕, 張智北, 鄭明典, 徐月娟, 呂國臣, 林昀靜, 涂建翊, 卓盈旻, & 李思瑩. (2007). 氣候變遷對災害防治衝擊調適與因應策略整合研究--子計畫:氣候變遷對台灣地區降雨及海水位變異之影響(I). 行政院國家科學委員會.
110. 柳中明. (2012). <http://taiwanpedia.culture.tw/web/content?ID=100572>, 台灣大百科全書, 文化部.



附錄一、GWLF 模式及 NTU_WH 模式參數



表 1 土壤分類及描述

Soil Hydrologic Group	Description
A	Low runoff potential and high infiltration rates even when thoroughly wetted. Chiefly deep, well to excessively drained sands or gravels. High rate of water transmission ($>0.75\text{cm/hr}$).
B	Moderate infiltration rates when thoroughly wetted. Chiefly moderately deep to deep, moderately well drained soils with moderately fine to moderately coarse textures. Moderate rate of water transmission ($0.40\text{-}0.75\text{ cm/hr}$).
C	Low infiltration rates when thoroughly wetted. Chiefly soils with a layer that impedes downward movement of water, or soils with moderately fine to fine texture. Low rate of water transmission ($0.15\text{-}0.40\text{ cm/hr}$).
D	High runoff potential. Very low infiltration rates when thoroughly wetted. Chiefly clay soils with a high swelling potential, soils with a permanent high water table, soils with a claypan or clay layer at or near the surface, or shallow soils over nearly impervious material. Very low rate of water transmission ($0\text{-}0.15\text{cm/hr}$)
Distributed Soils (Major altering of soil profile by construction, development):	
A	Sand, loamy sand, sandy loam.
B	Silt loam, loam
C	Sandy clay loam
D	Clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, clay

表 2 農業耕地的 CN2 值(Soil Convation Service,1986)

Land Use/Cover		Hydrologic Condition	Soil Hydrologic Group				
			A	B	C	D	
Fallow Bare Soil		-	77	86	91	94	
Crop residue cover(CR)		Poor*	76	85	90	93	
		Good	74	83	88	90	
Row Crops	Stright row(SR)	Poor	72	81	88	91	
		Good	67	78	85	89	
	SR+CR	Poor	71	80	87	90	
		Good	64	75	82	85	
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88	
		Good	65	75	82	86	
	C+CR	Poor	69	78	83	87	
		Good	64	74	81	85	
	Contoured & terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82	
		Good	62	71	78	81	
	C&T+CR	Poor	65	73	79	81	
		Good	61	70	77	80	
	Small SR Grains		Poor	65	76	84	88
			Good	63	75	83	87
SR+CR		Poor	64	75	83	86	
		Good	60	72	80	84	
C		Poor	63	74	82	85	
		Good	61	73	81	84	
C+CR		Poor	62	73	81	84	
		Good	60	72	80	83	
C&T		Poor	61	72	79	82	
		Good	59	70	78	81	
C&T+CR		Poor	60	71	78	81	
		Good	58	69	77	80	
Close - SR seeded or broadcast legumes or rotation meadow			Poor	66	77	85	89
			Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85	
		Good	55	69	78	83	
	C&T	Poor	63	73	80	83	
		Good	51	67	76	80	

*:Hydrologic condition is based on a combination of factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of close-seeded legumes in rotations, (d) percent of residue cover on the land surface (goof \geq 25%), and (e) degree of surface roughness.

表 3 鄉村地區的 CN2 值(Soil Conervation Service,1986)

Land Use/Cover	Hydrologic Condition	Soil Hydrologic Group			
		A	B	C	D
Pasture, grassland or range-continuous forage for grazing	Poor ^a	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow - continuous grass, protected from grazing, generally mowed for hay		30	58	71	78
Brush - Brush/ weeds/ grass mixture with brush the major element	Poor ^b	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods / grass combination(orchard or tea farm) ^c	Poor	57	73	72	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods	Poor ^d	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads- buildings, lanes, driveways and surrounding lots		59	74	82	86

a:Poor:<50% ground cover or heavily grazed with no mulch; Fair: 50 to 75% ground cover and nor heavily grazed; Good:>75% ground cover and lightly or occasionally grazed.
b:Poor:<50% ground cover; Fair: 50 to 75% ground cover ; Good:>75% ground cover.
c:Estimated as 50% woods, 50% pasture.
d:Poor:<50% forest litter, small trees and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning; Fair: woods are grazed but not burned and some forest litter covers the soil; Good: woods are protected from grazing and litter and brush adequately cover the soil.

表 4 乾旱及半乾旱牧場的 CN2 值(Soil Conervation Service,1986)

Land Use/Cover	Hydrologic Condition	Soil Hydrologic Group			
		A	B	C	D
Herbaceous - grass, weeds & low-growing brush; brush the minor component	Poor ^a	-	80	87	93
	Fair	-	71	81	89
	Good	-	62	74	85
Oak/aspen - oak brush, aspen, mountain manogany, bitter brush, maple and other brush	Poor	-	66	74	79
	Fair	-	48	57	63
	Good	-	30	41	48
Pinyon/ juniper - pinyon, juniper or both; grass understory	Poor	-	75	85	89
	Fair	-	58	73	80
	Good	-	41	61	71
Sagebrush with grass understory	Poor	-	67	80	85
	Fair	-	51	63	70
	Good	-	35	47	55
Desert scrub - saltbush, greasewood, creosotebrush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite and cactus	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

a:Poor:<30% ground cover(litter, grass and brush overstory); Fair:30 to 70% ground cover;
Good:>75% ground cover.

表 5 都市地區的 CN2 值(Soil Conervation Service,1986)

Land Use/Cover	Soil Hydrologic Group			
	A	B	C	D
Open space(lawns, parks, golf courses. Cemeteries, ets.):				
Poor condition(grass cover <50%)	68	79	86	89
Fair condition(grass cover <50-75%)	49	69	79	84
Good condition(grass cover >75%)	39	61	74	80
Impervious areas:				
paved parking lots, roofs, driveways, etc.	98	98	98	98
Streets and roads:				
Paved with curbs & storm sewers	98	98	98	98
Paved with open ditches	83	89	92	93
Gravel	76	85	89	91
Dirt	72	82	87	89
western desert urban areas:				
Natural desert landscaping (pervious areas, only)	63	77	85	88
Artificial desert landscaping(impervious weed barrier, desert shrub with 1-2 in sand or gravel mulch and basin borders)	96	96	96	96

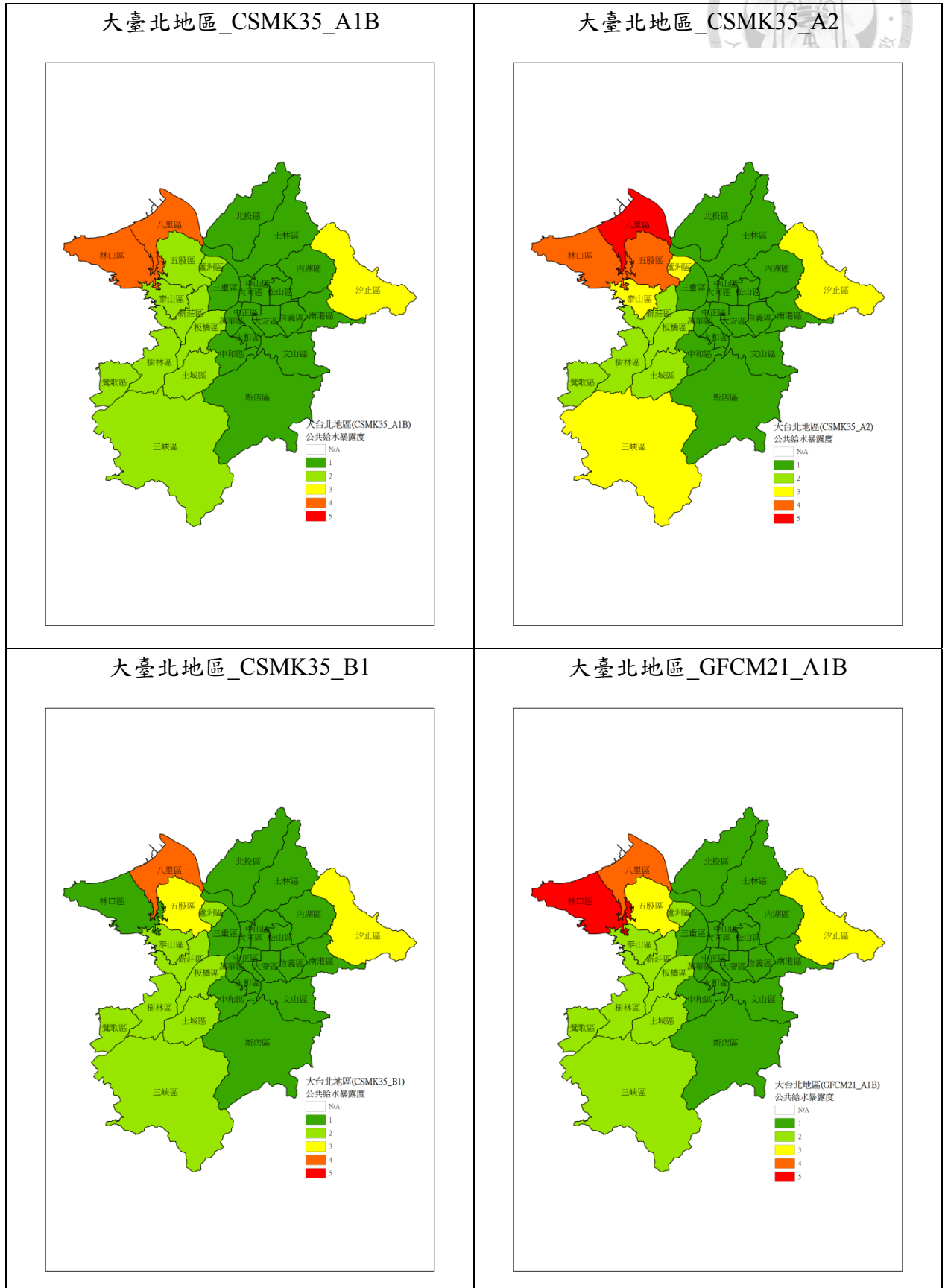
表 6 日照時數

月份 緯度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
48	8.7	10.0	11.7	13.4	14.9	15.7	15.3	14.0	12.3	10.6	9.1	8.3
46	8.9	10.2	11.7	13.3	14.7	15.4	15.0	13.8	12.3	10.7	9.3	8.5
44	9.2	10.3	11.7	13.2	14.5	15.2	14.8	13.7	12.3	10.8	9.5	8.8
42	9.3	10.4	11.7	13.1	14.3	15.0	14.6	13.6	12.3	10.9	9.7	9.0
40	9.5	10.5	11.8	13.0	14.1	14.7	14.4	13.6	12.2	11.0	9.8	9.2
38	9.7	10.6	11.8	13.0	14.0	14.5	14.3	13.4	12.2	11.0	10.0	9.4
36	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.1	9.6
34	10.0	10.8	11.8	12.8	13.7	14.2	14.0	13.2	12.2	11.2	10.2	9.8
32	10.2	10.9	11.8	12.8	13.6	14.0	13.8	13.3	12.2	11.2	10.4	10.0
30	10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1
28	10.5	11.1	11.8	12.7	13.4	13.7	13.5	13.0	12.1	11.3	10.6	10.3
26	10.6	11.1	11.8	12.6	13.2	13.6	13.4	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
24	10.7	11.2	11.9	12.6	13.1	13.4	13.3	12.8	12.1	11.4	10.9	10.6

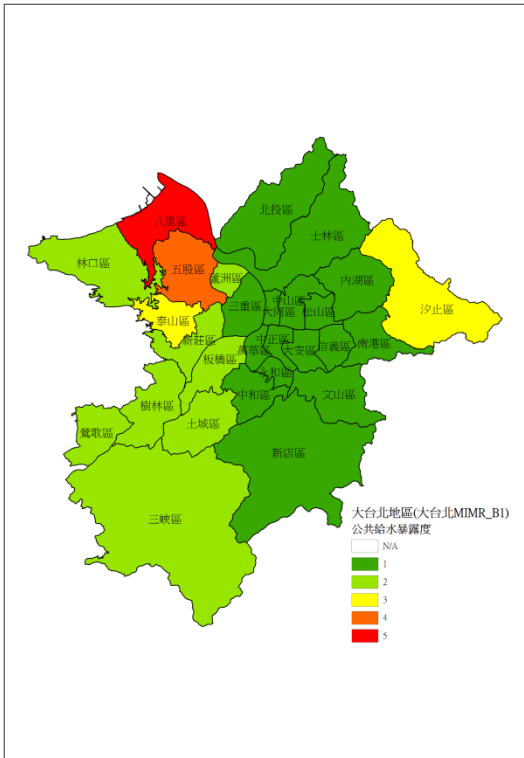
表 7 土壤參數(Chow et al., 1988)

Soil class	prosiy	Effective prostiy	Wetting front soil suction head	Hydraulic conductivity
Sand	0.437 0.374-0.500	0.417 0.354-0.480	4.98 0.97-25.36	11.78
Loamy sand	0.437 0.363-0.506	0.401 0.219-0.473	6.13 1.35-27.94	2.99
Sandy loam	0.453 0.351-0.555	0.412 0.283-0.541	11.01 2.67-45.47	1.09
Loam	0.463 0.375-0.551	0.434 0.334-0.534	8.89 1.33-59.38	0.34
Silt loam	0.501 0.420-0.582	0.486 0.394-0.578	16.8 2.92-95.39	0.65
Sandy clay loam	0.398 0.332-0.464	0.33 0.235-0.425	21.85 4.42-108.0	0.15
Clay loam	0.464 0.409-0.519	0.309 0.279-0.501	20.88 4.79-91.10	0.1
Silty clay loam	0.471 0.418-0.524	0.432 0.347-0.517	27.3 5.67-131.50	0.1
Samdy clay	0.43 0.370-0.490	0.321 0.207-0.435	23.9 4.08-140.2	0.06
Silty clay	0.479 0.425-0.533	0.432 0.334-0.512	29.22 6.13-139.4	0.05
Clay	0.475 0.427-0.523	0.385 0.269-0.501	31.63 6.39-156.5	0.03

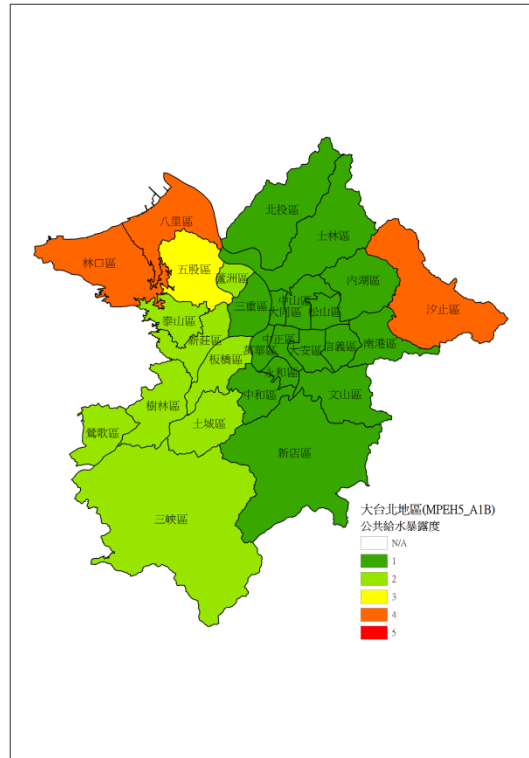
附錄二、不同 GCMs 公共給水暴露度地圖



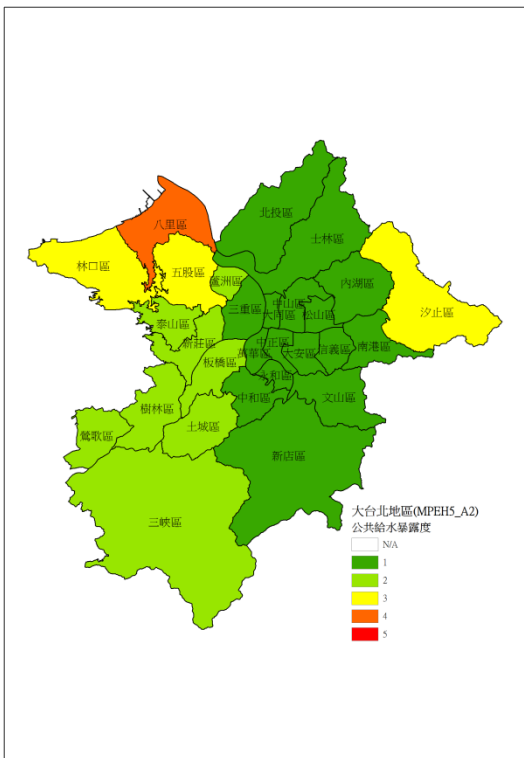
大臺北地區_MIMR_B1



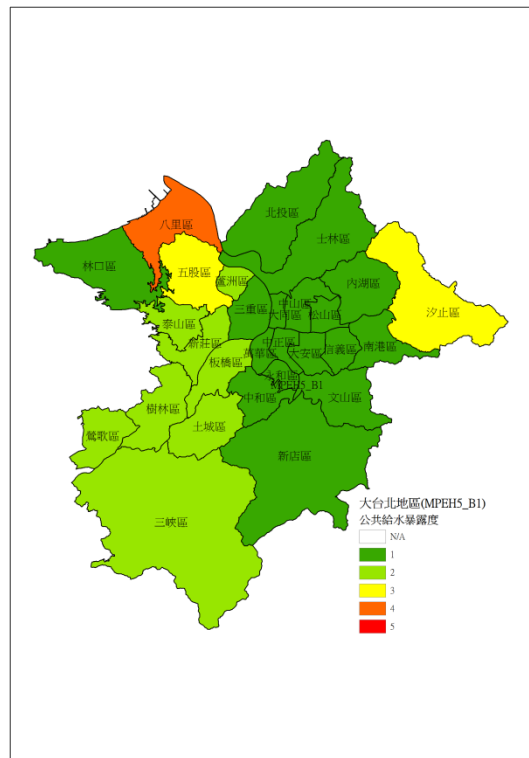
大臺北地區_MPEH5_A1B



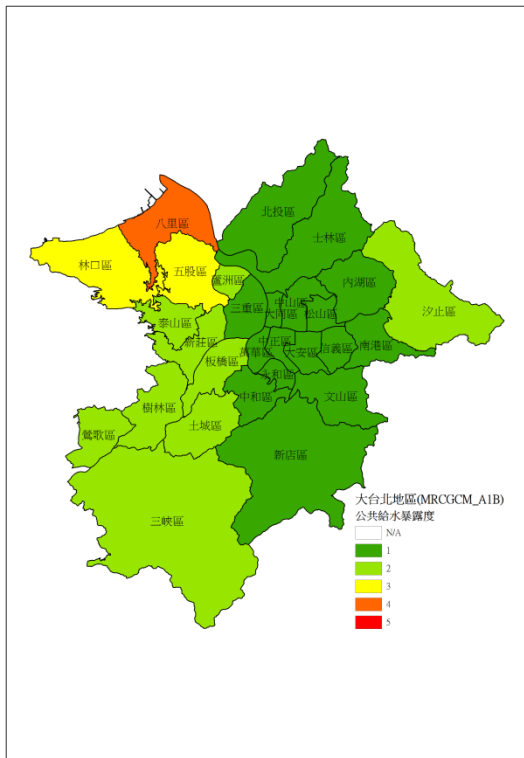
大臺北地區_MPEH5_A2



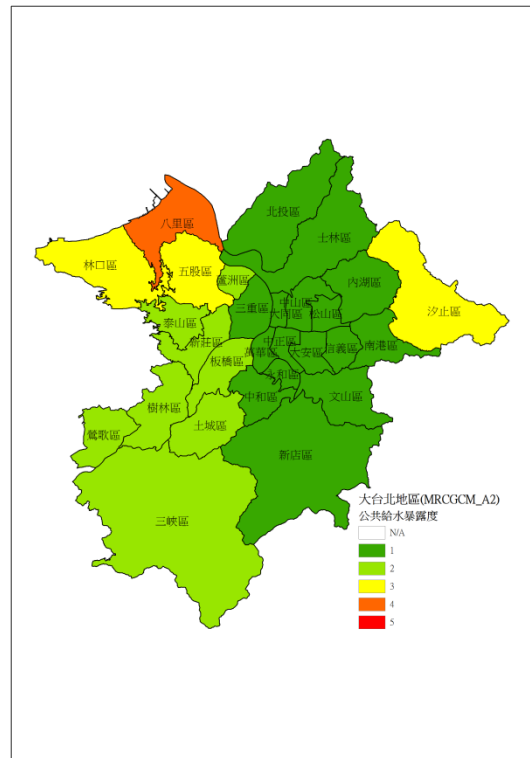
大臺北地區_MPEH5_B1



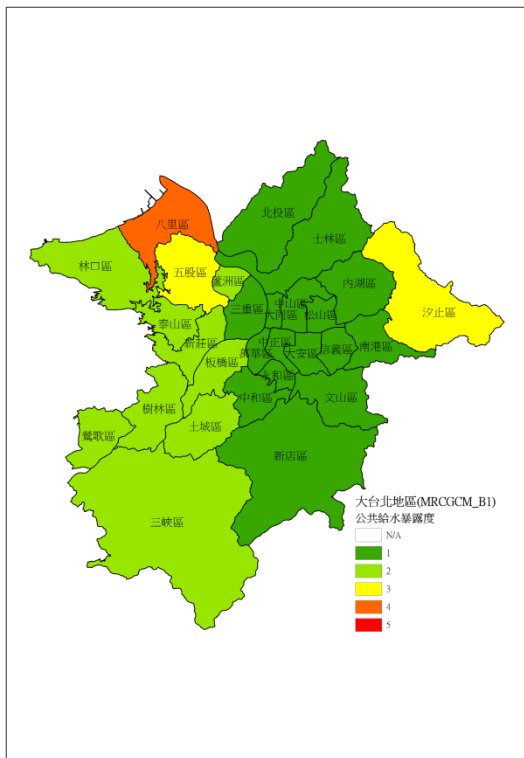
大臺北地區_MRCGCM_A1B



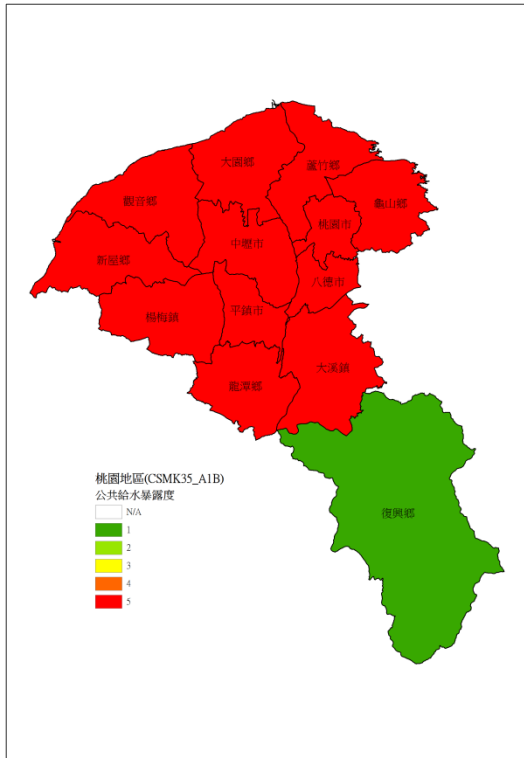
大臺北地區_MRCGCM_A2



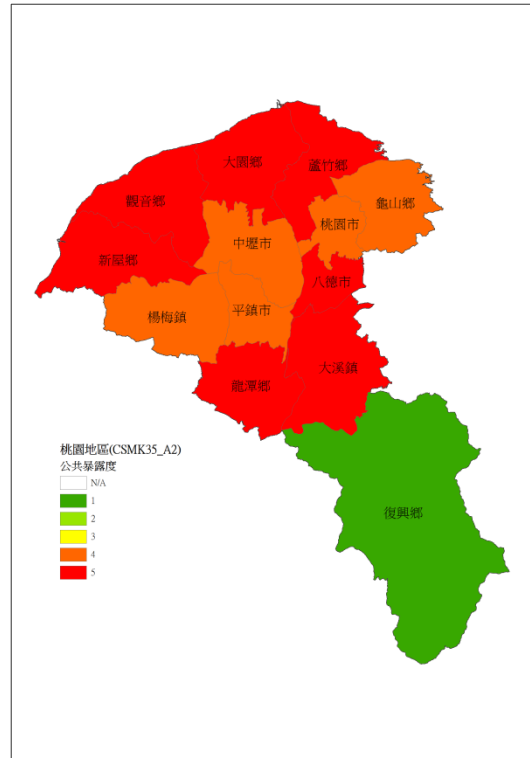
大臺北地區_MRCGCM_B1



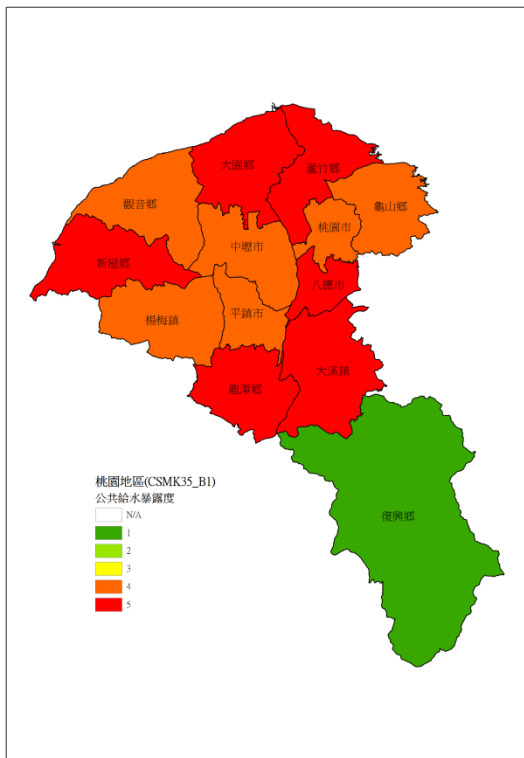
桃園地區_CSMK35_A1B



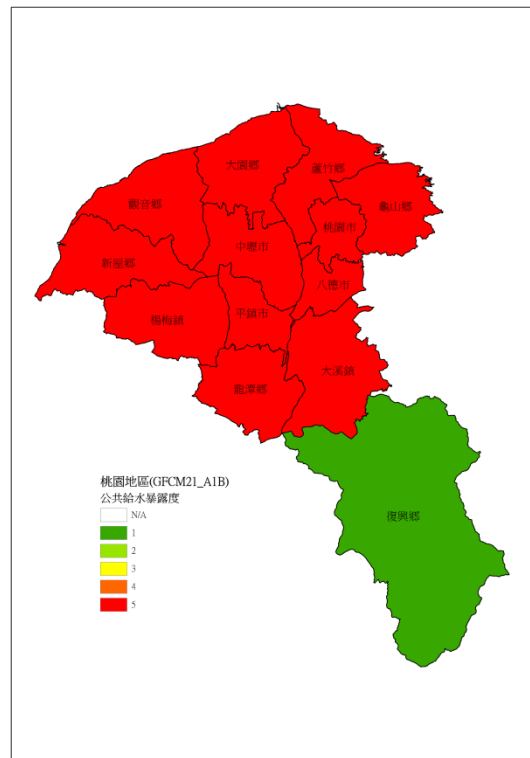
桃園地區_CSMK35_A2



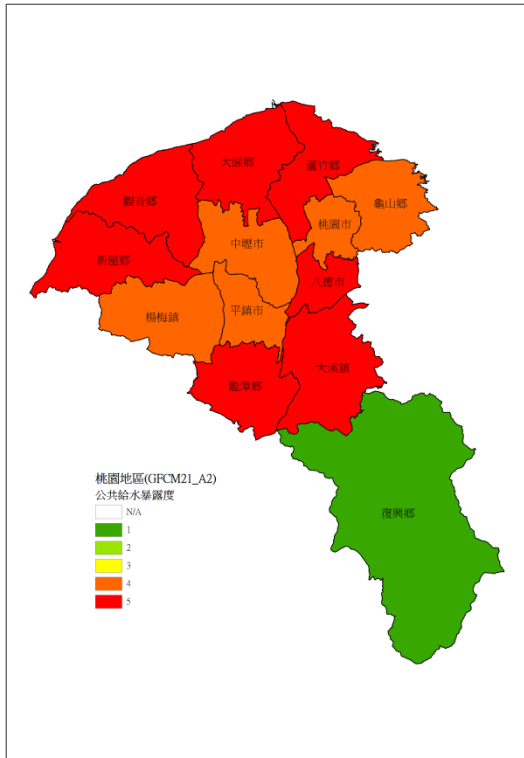
桃園地區_CSMK35_B1



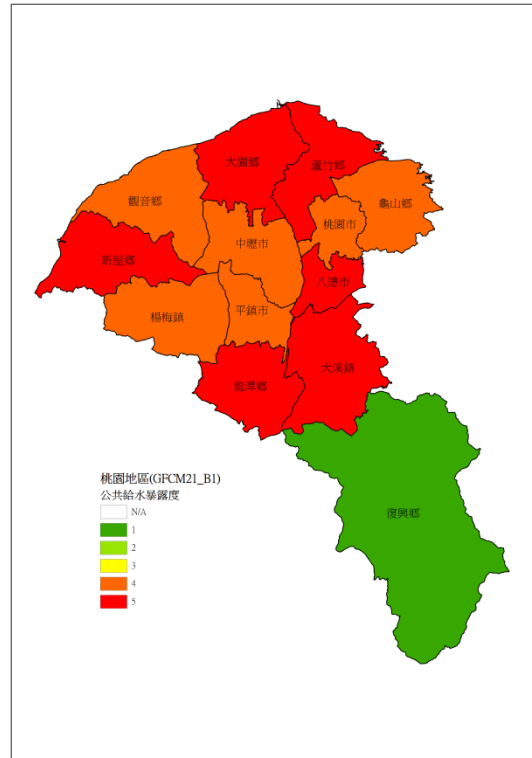
桃園地區_GFCM21_A1B



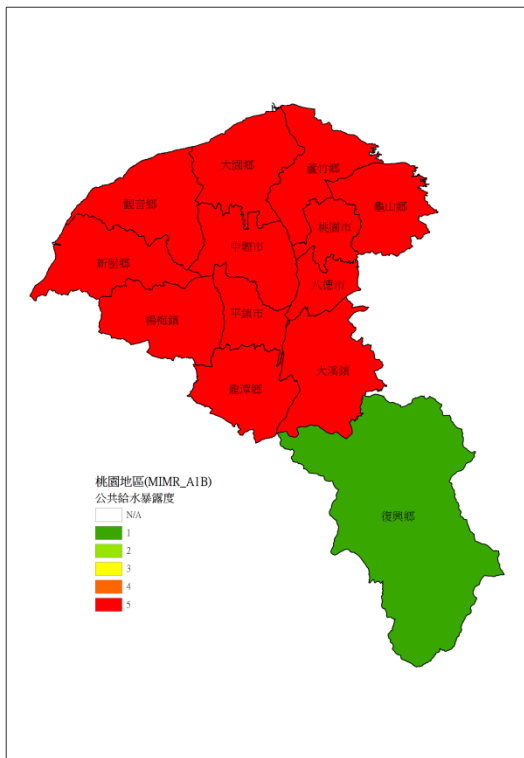
桃園地區_GFCM21_A2



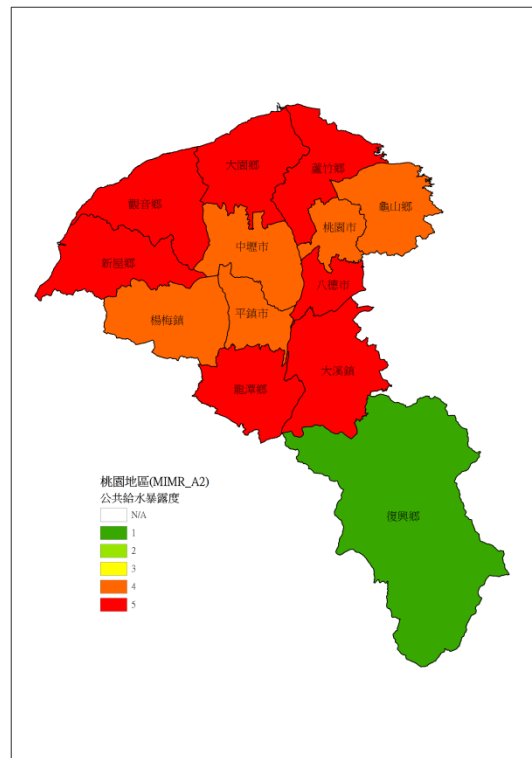
桃園地區_GFCM21_B1



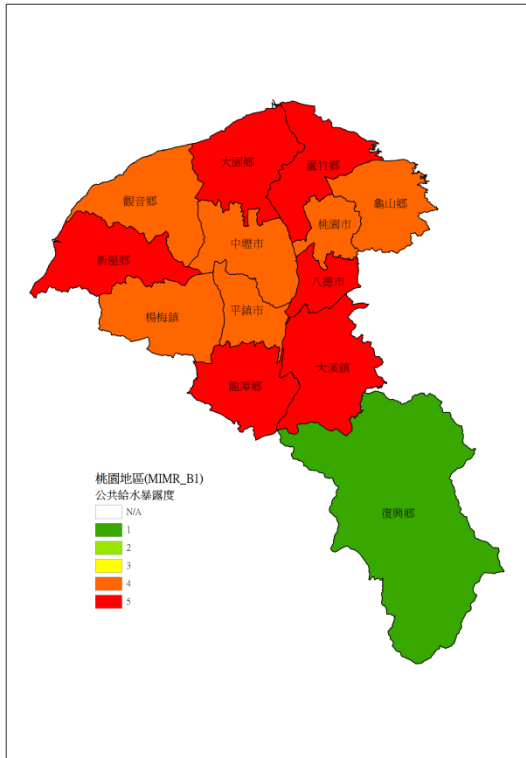
桃園地區_MIMR_A1B



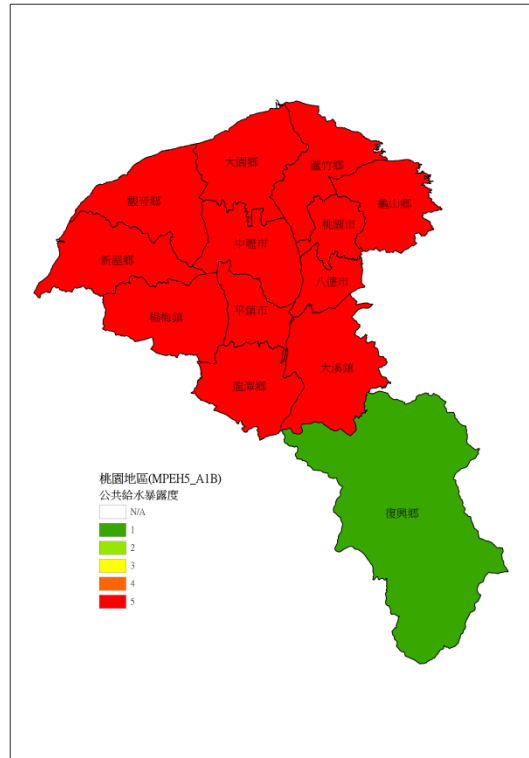
桃園地區_MIMR_A2



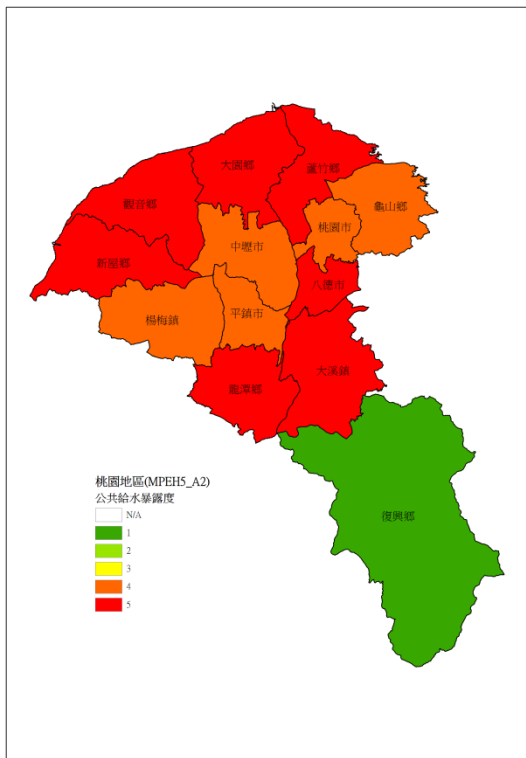
桃園地區_MIMR_B1



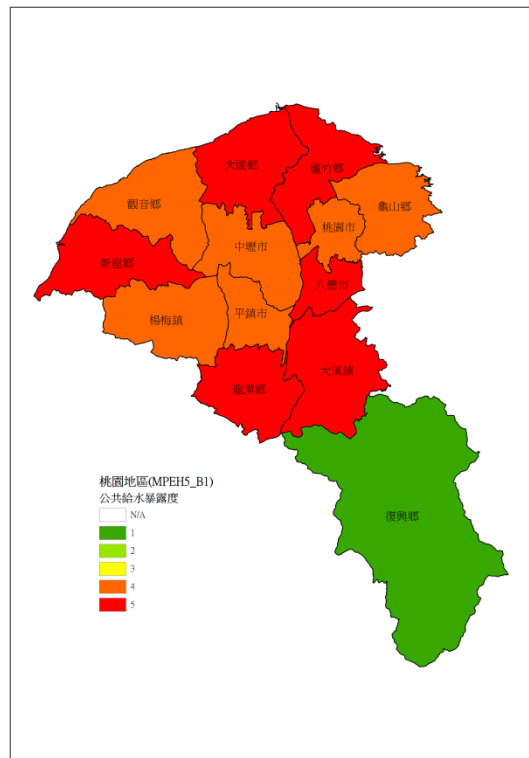
桃園地區_MPEH5_A1B



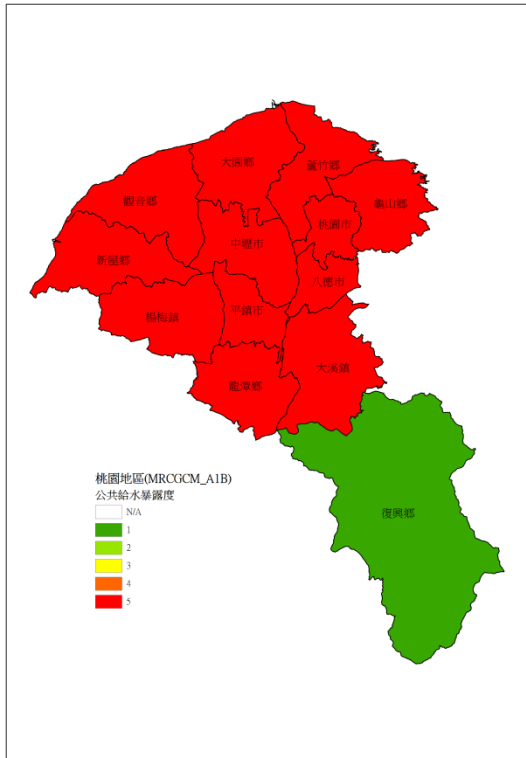
桃園地區_MPEH5_A2



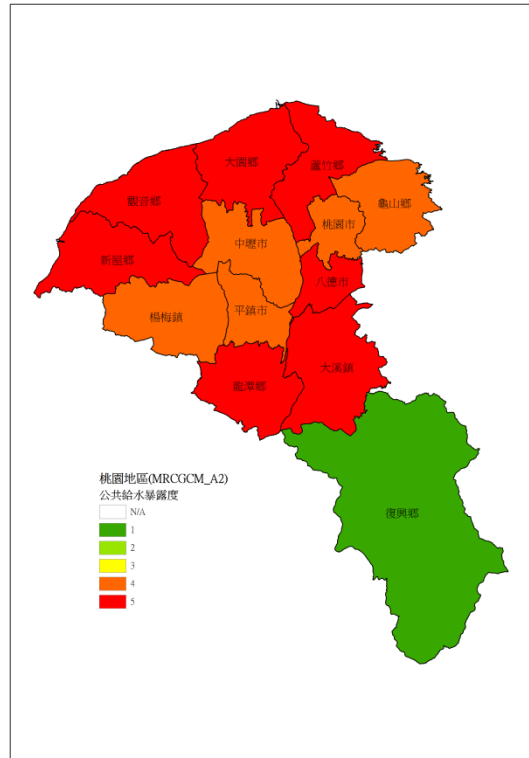
桃園地區_MPEH5_B1



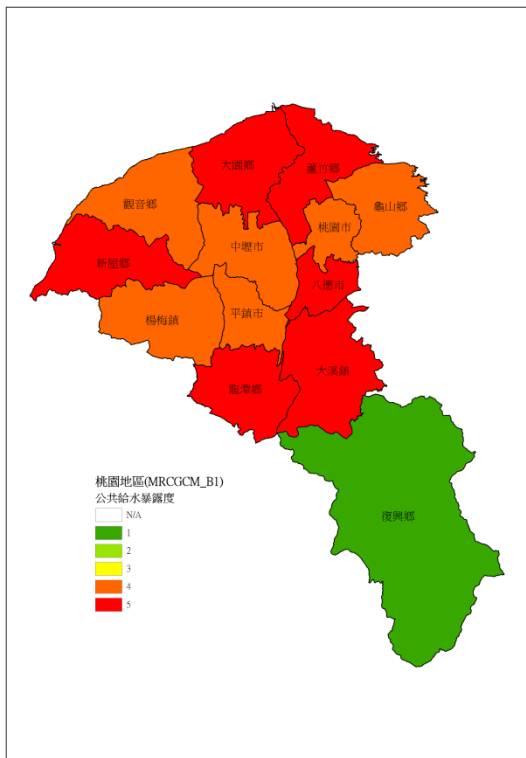
桃園地區_MRCGCM_A1B



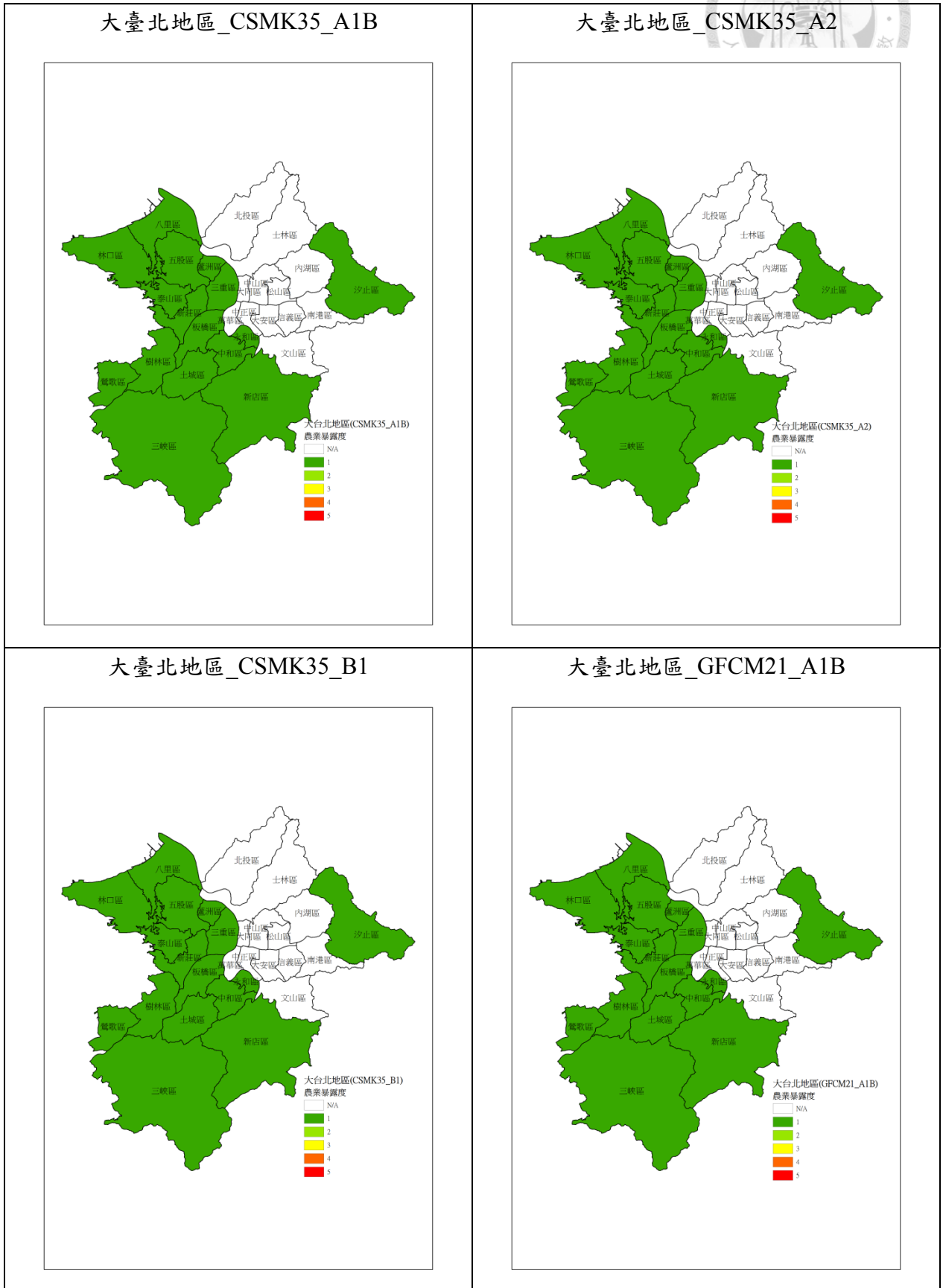
桃園地區_MRCGCM_A2



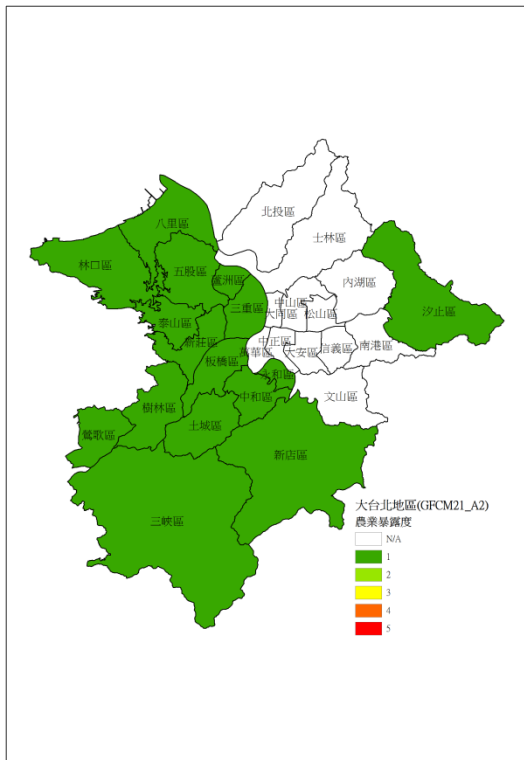
桃園地區_MRCGCM_B1



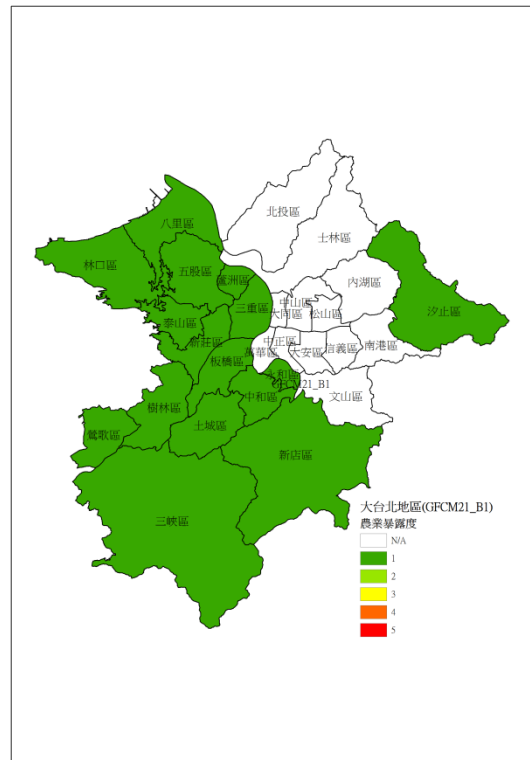
附錄三、不同 GCMs 農業用水暴露度地圖



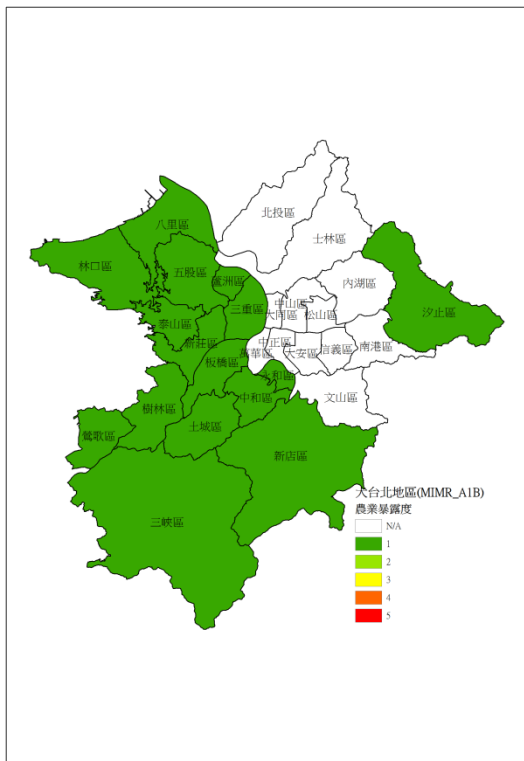
大臺北地區_GFCM21_A2



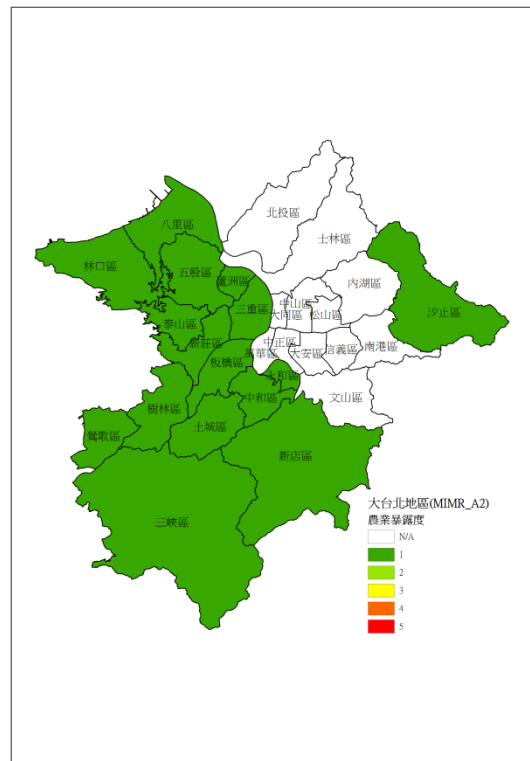
大臺北地區_GFCM21_B1



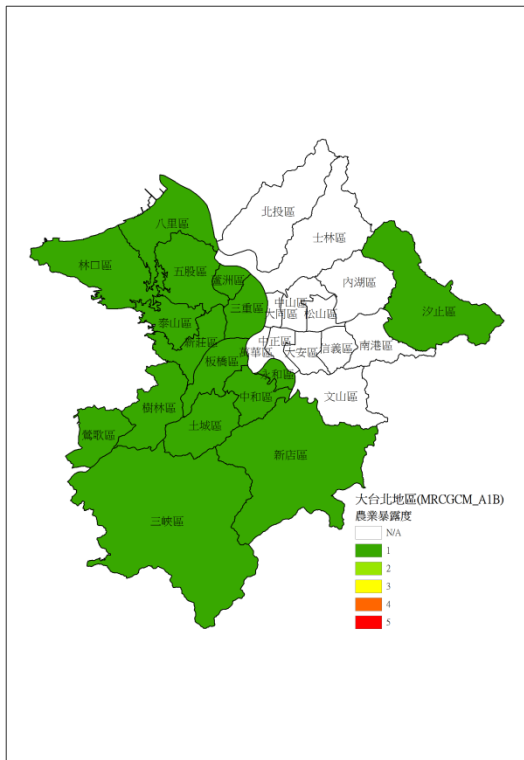
大臺北地區_MIMR_A1B



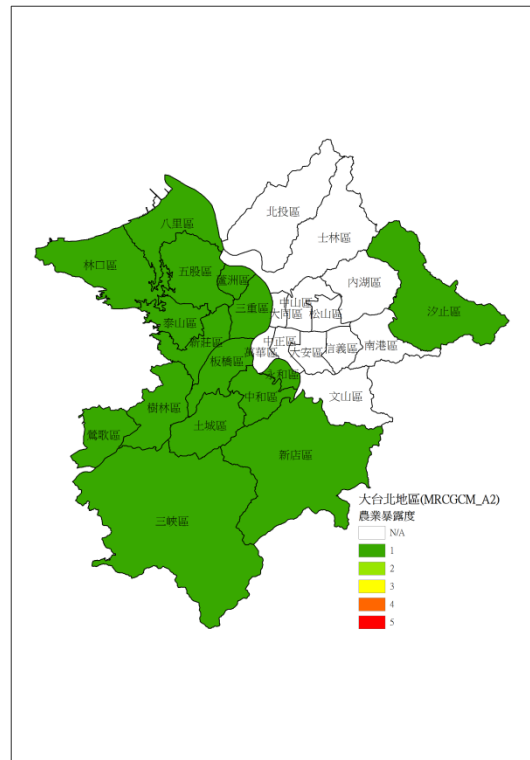
大臺北地區_MIMR_A2



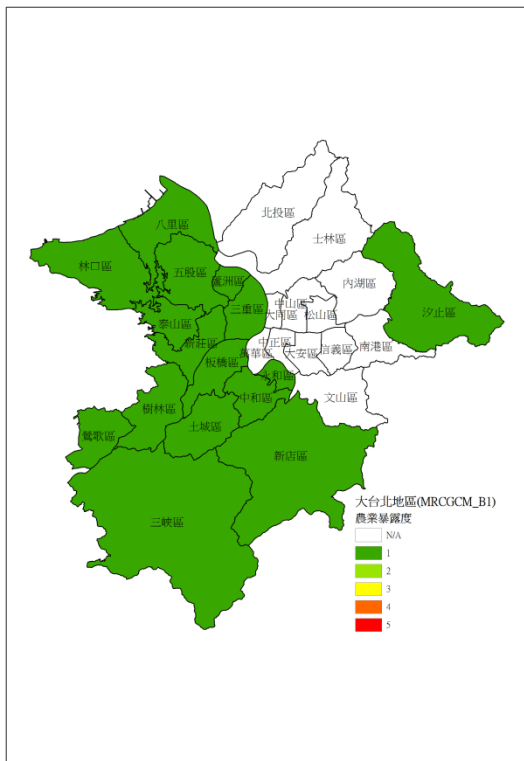
大臺北地區_MRCGCM_A1B



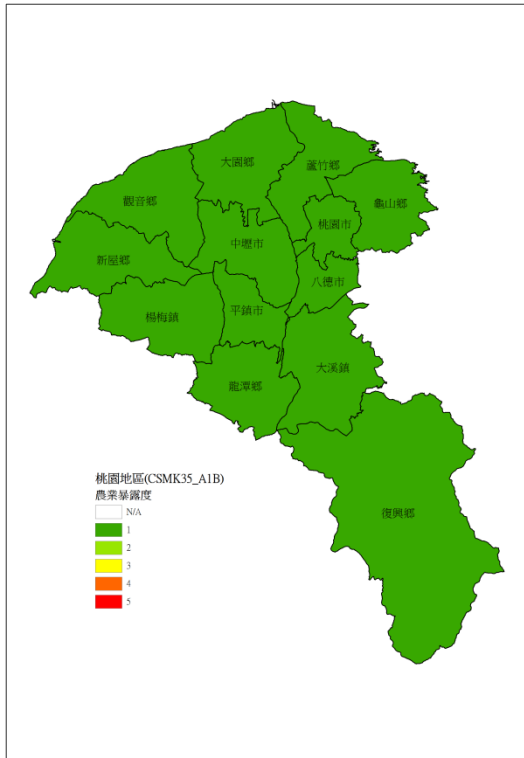
大臺北地區_MRCGCM_A2



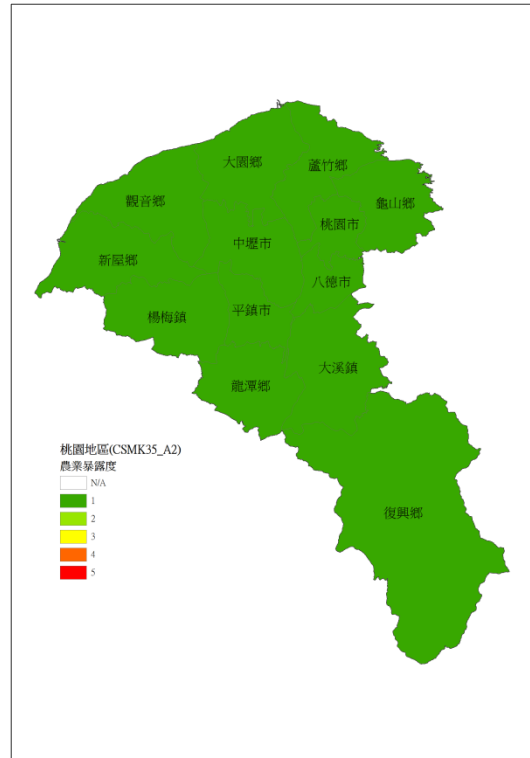
大臺北地區_MRCGCM_B1



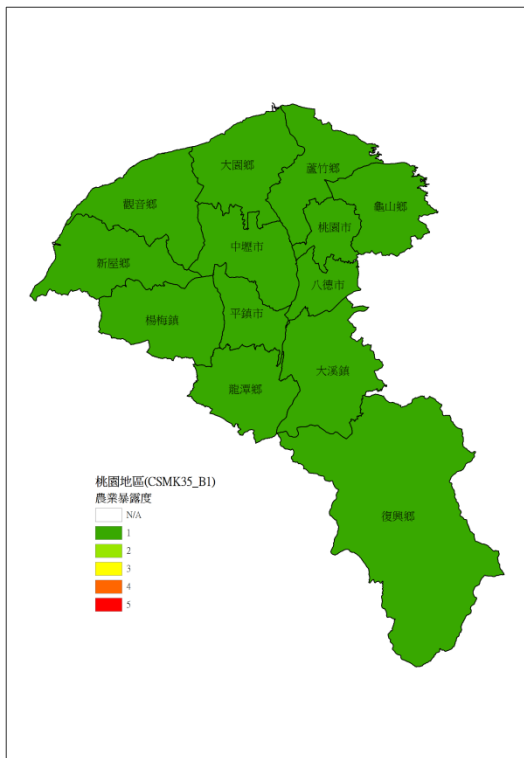
桃園地區_CSMK35_A1B



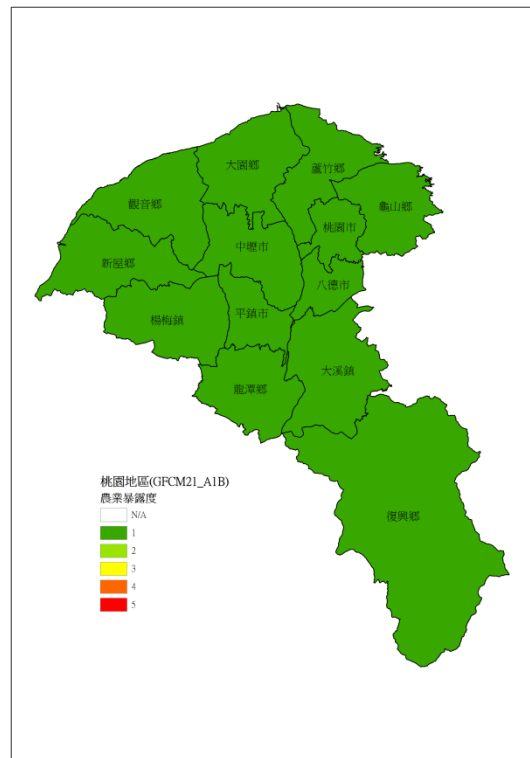
桃園地區_CSMK35_A2



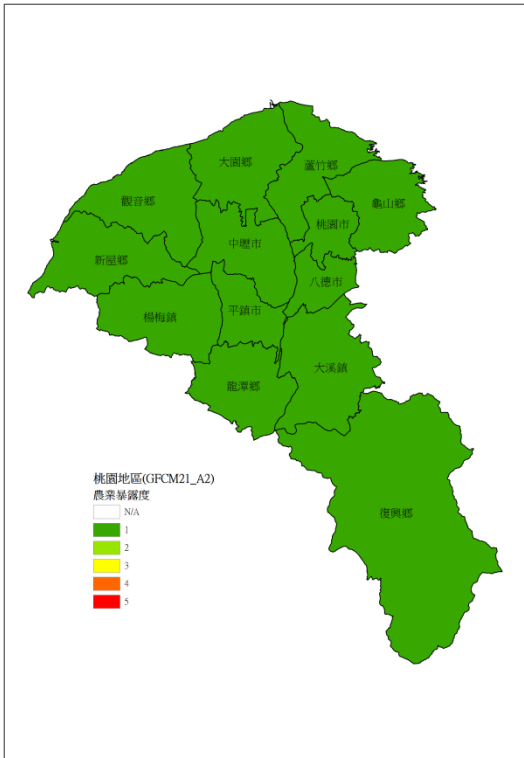
桃園地區_CSMK35_B1



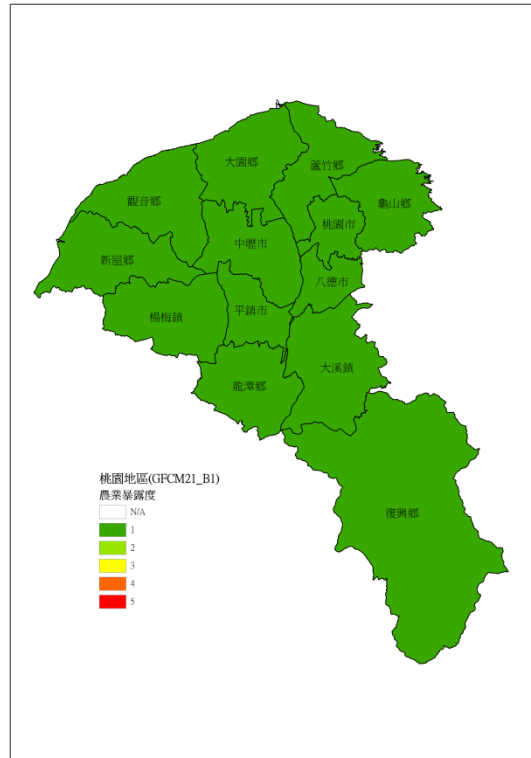
桃園地區_GFCM21_A1B



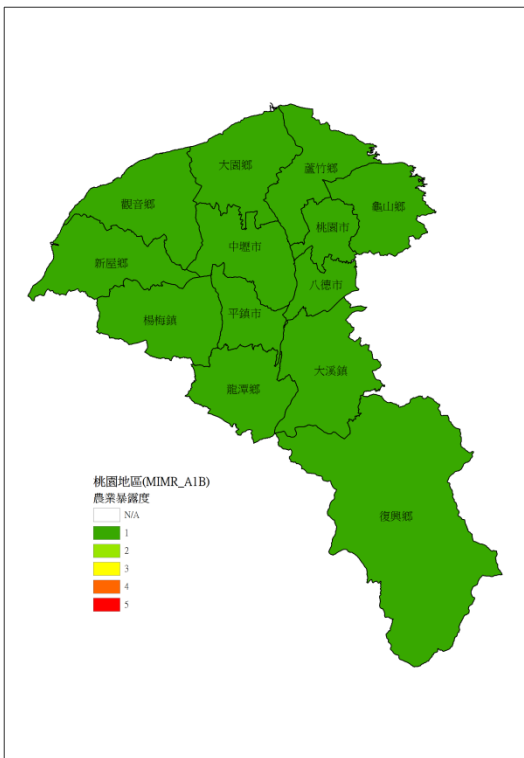
桃園地區_GFCM21_A2



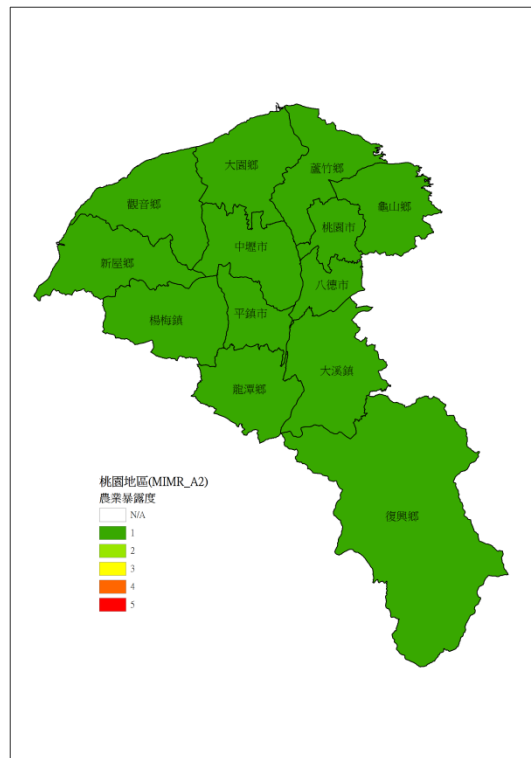
桃園地區_GFCM21_B1



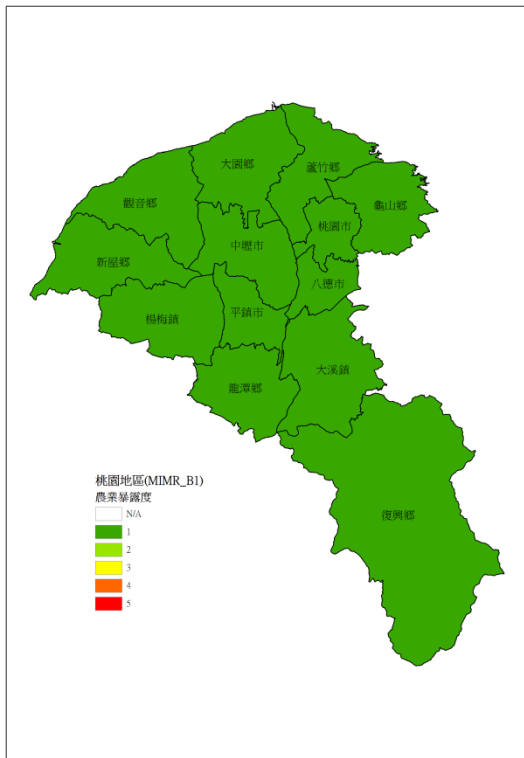
桃園地區_MIMR_A1B



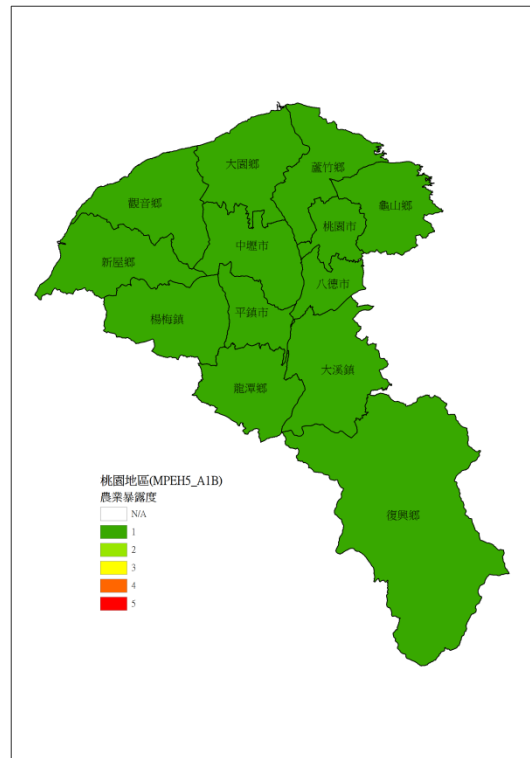
桃園地區_MIMR_A2



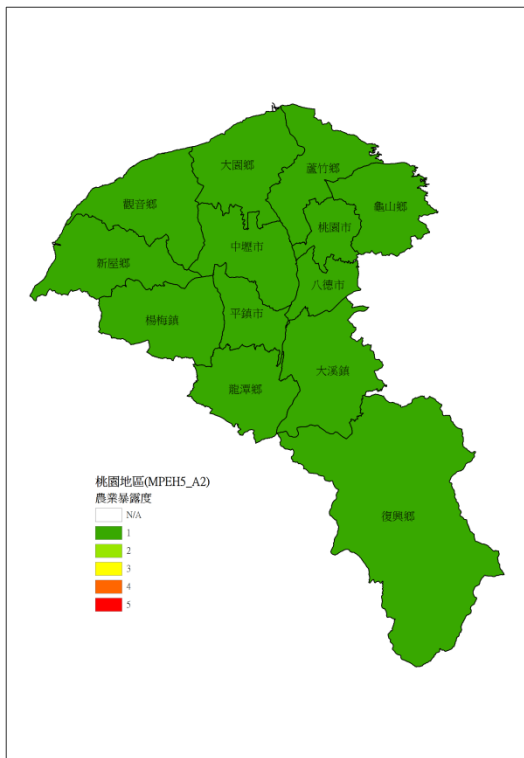
桃園地區_MIMR_B1



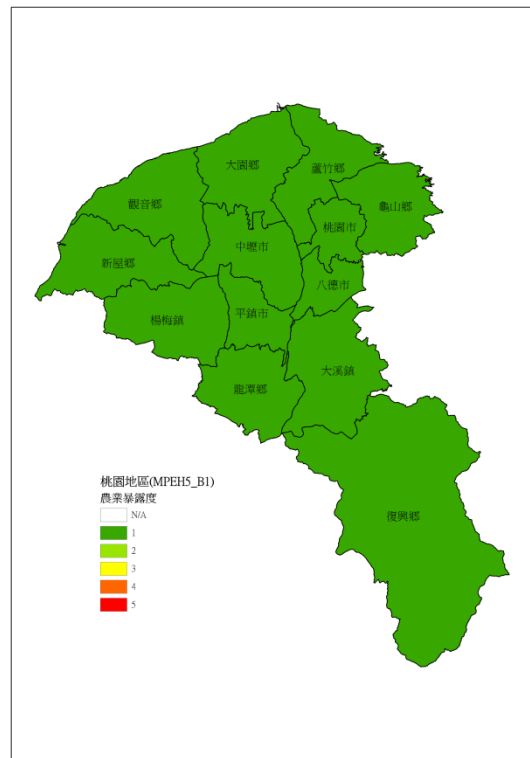
桃園地區_MPEH5_A1B



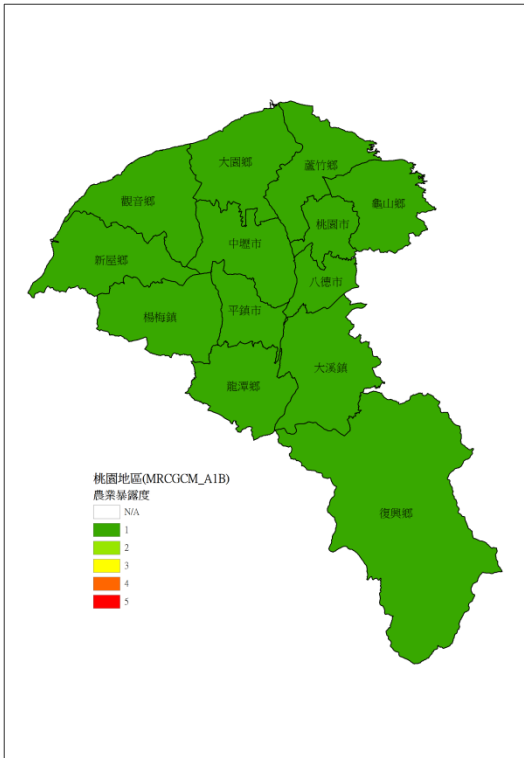
桃園地區_MPEH5_A2



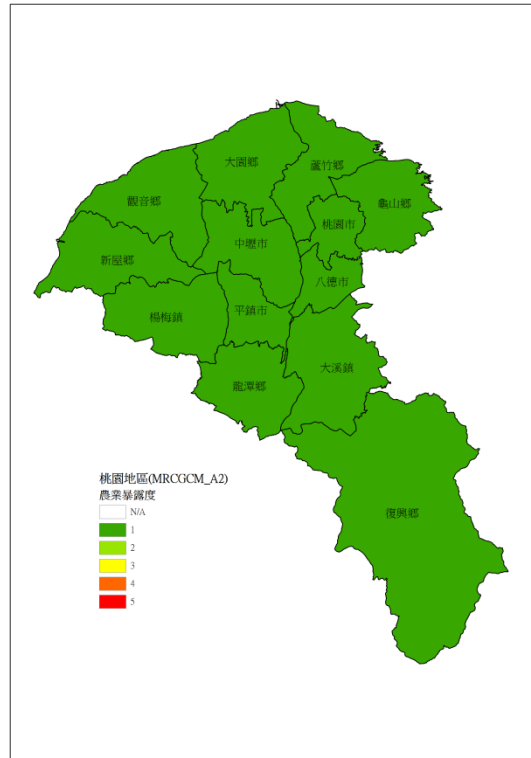
桃園地區_MPEH5_B1



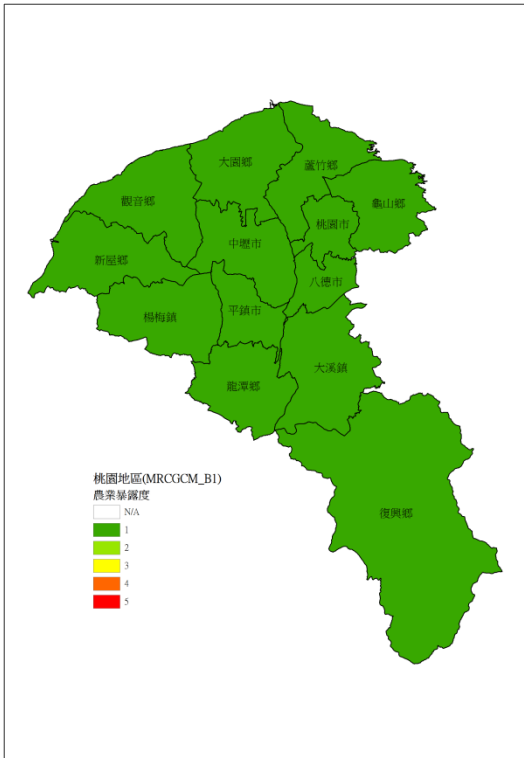
桃園地區_MRCGCM_A1B



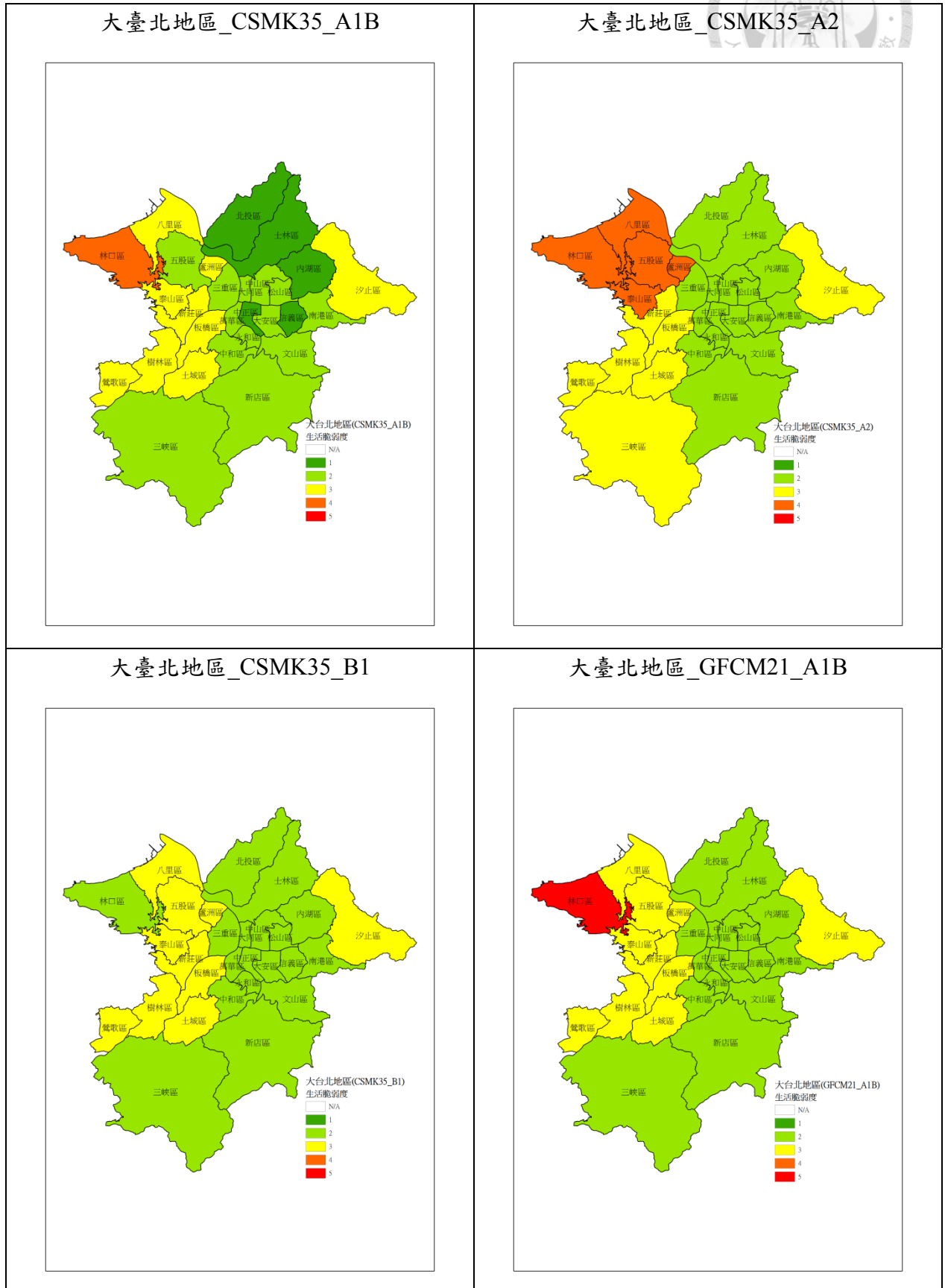
桃園地區_MRCGCM_A2



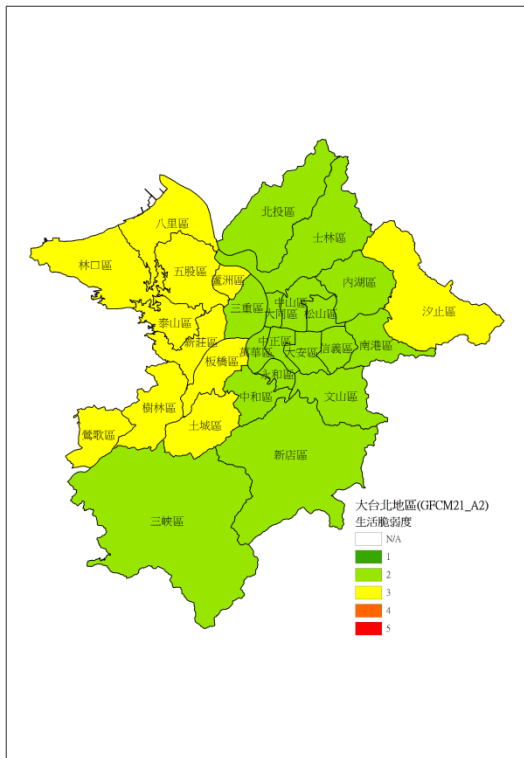
桃園地區_MRCGCM_B1



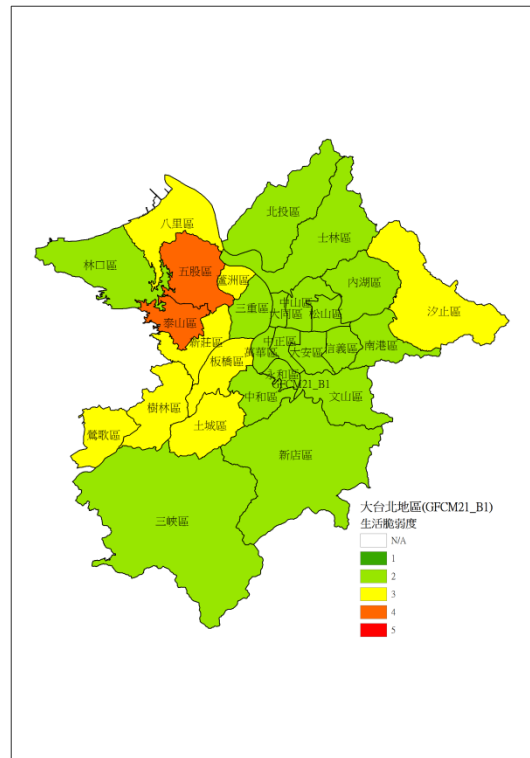
附錄四、不同 GCMs 生活用水脆弱度地圖



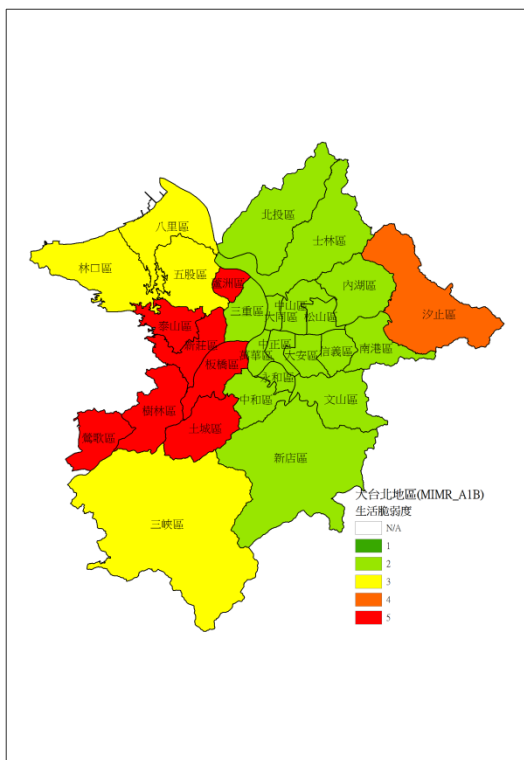
大臺北地區_GFCM21_A2



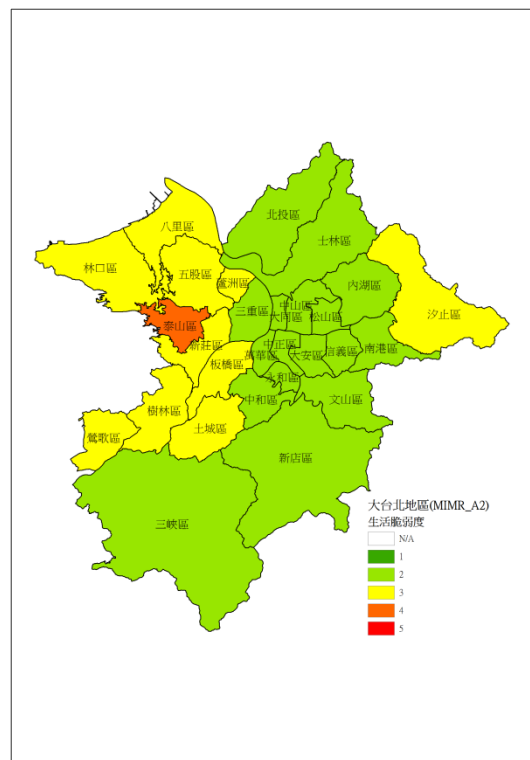
大臺北地區_GFCM21_B1



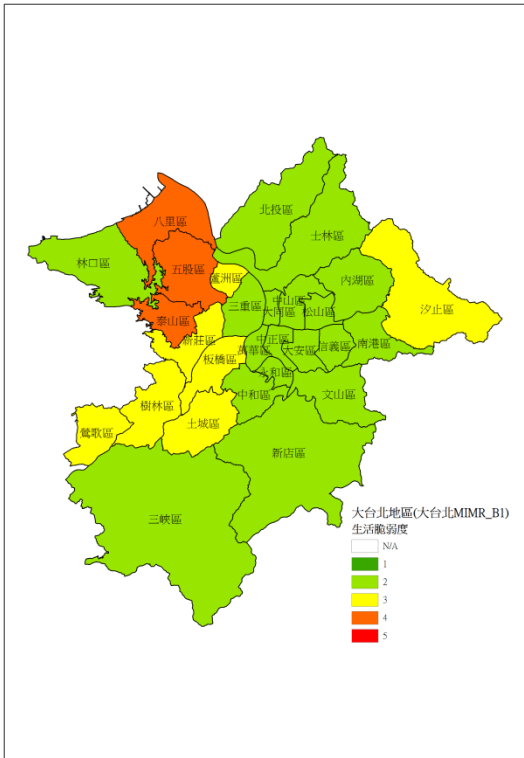
大臺北地區_MIMR_A1B



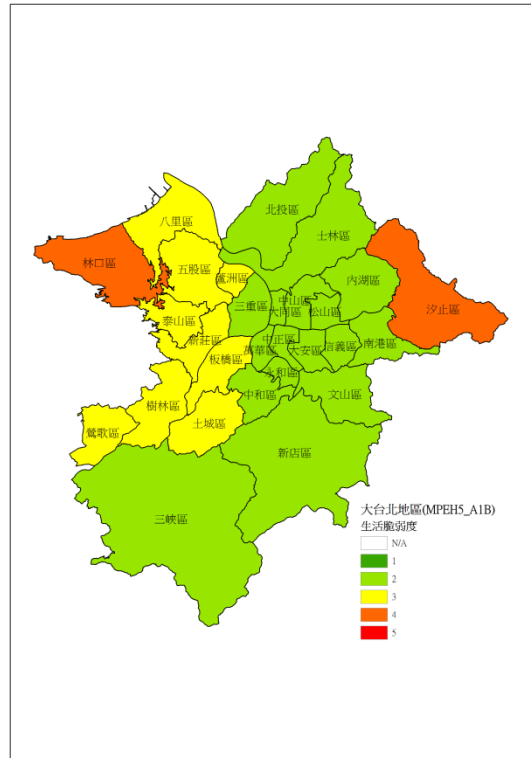
大臺北地區_MIMR_A2



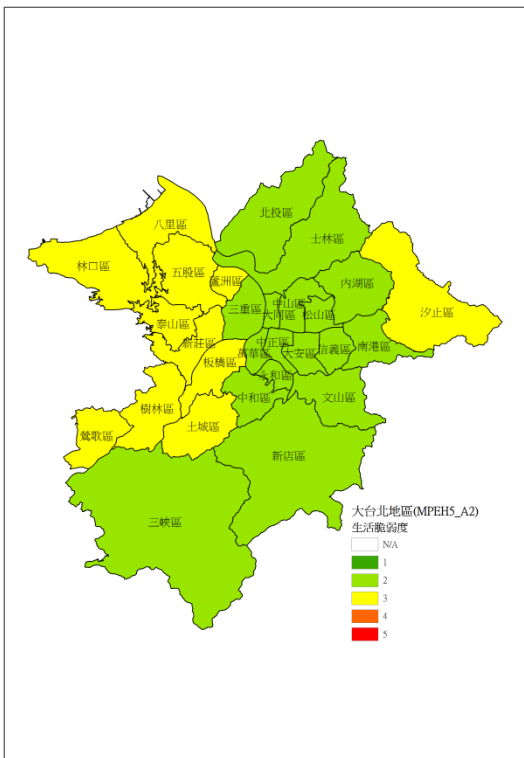
大臺北地區_MIMR_B1



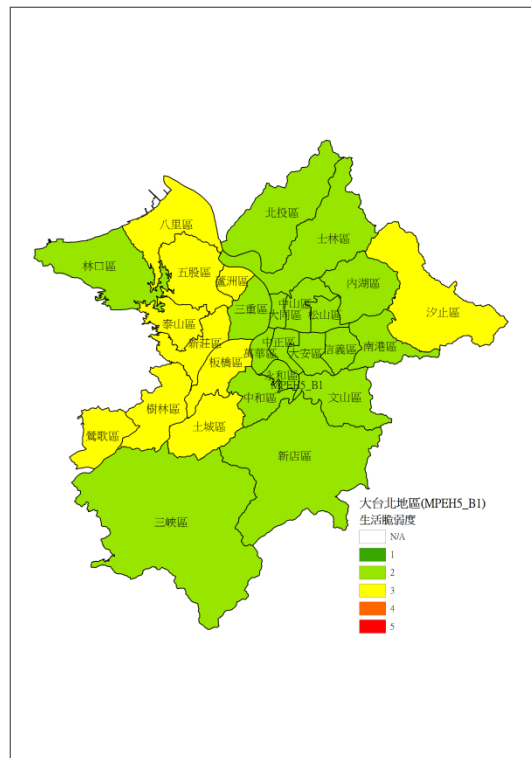
大臺北地區_MPEH5_A1B



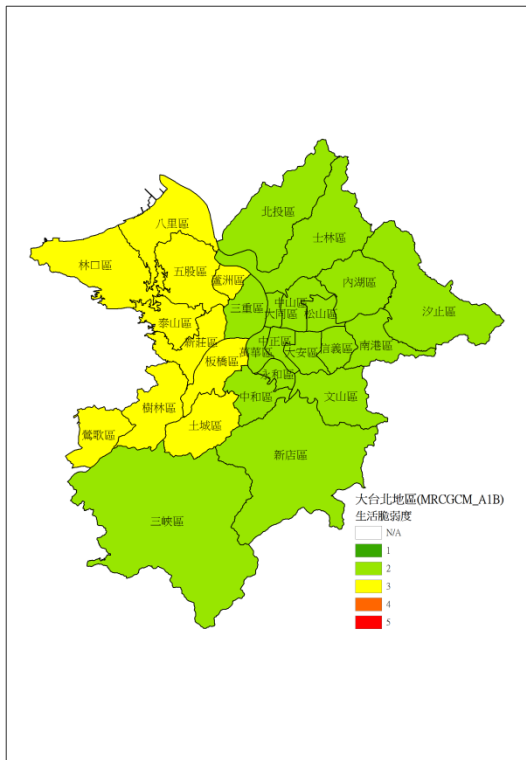
大臺北地區_MPEH5_A2



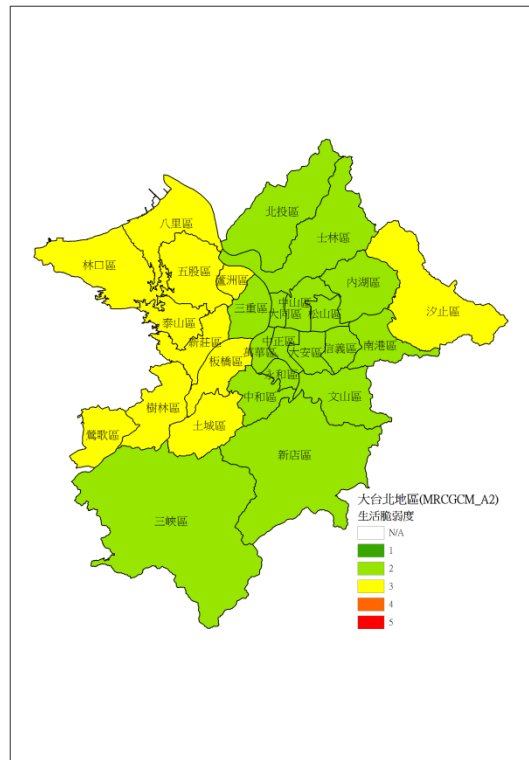
大臺北地區_MPEH5_B1



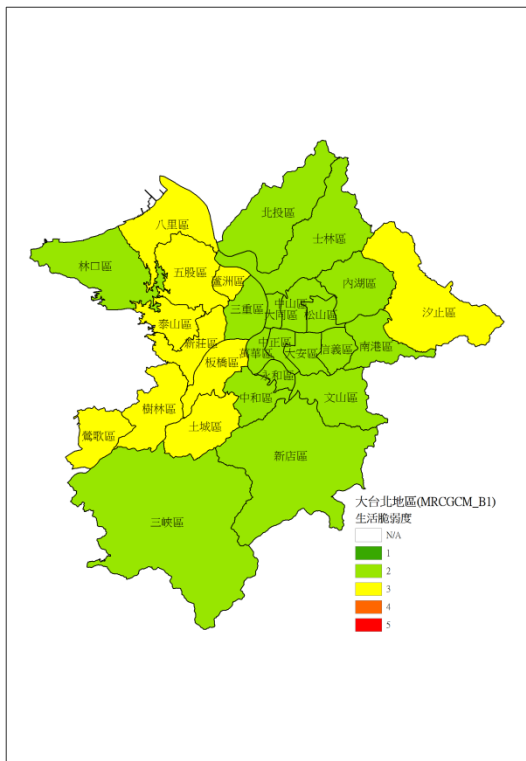
大臺北地區_MRCGCM_A1B



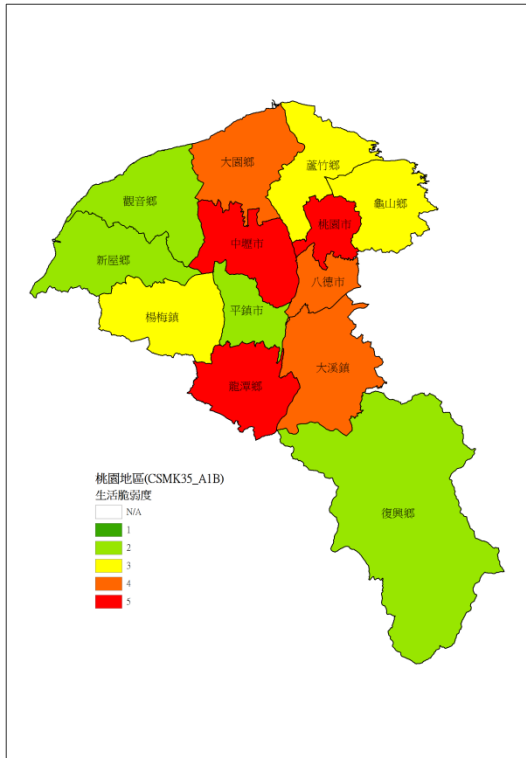
大臺北地區_MRCGCM_A2



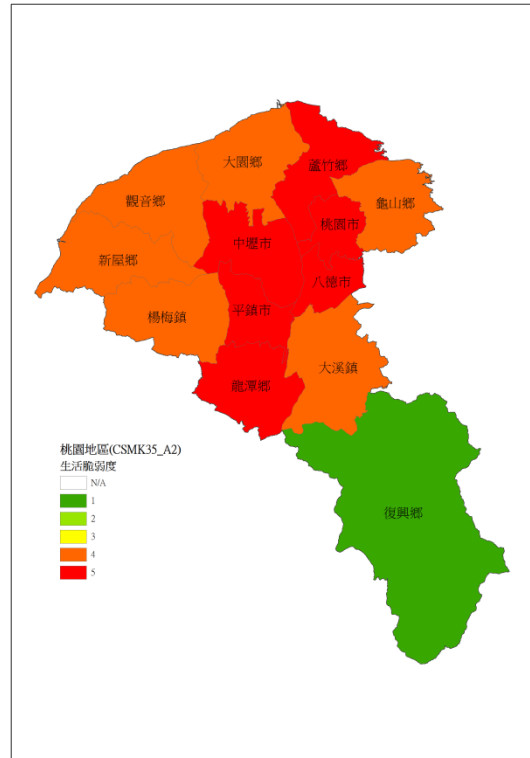
大臺北地區_MRCGCM_B1



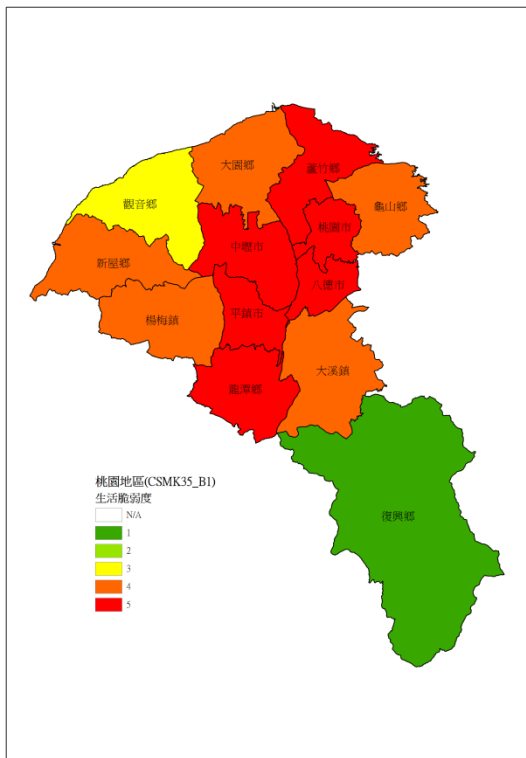
桃園地區_CSMK35_A1B



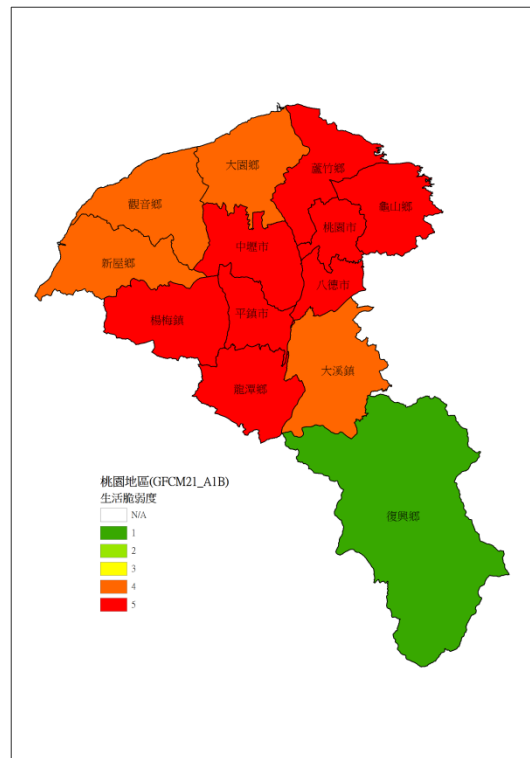
桃園地區_CSMK35_A2



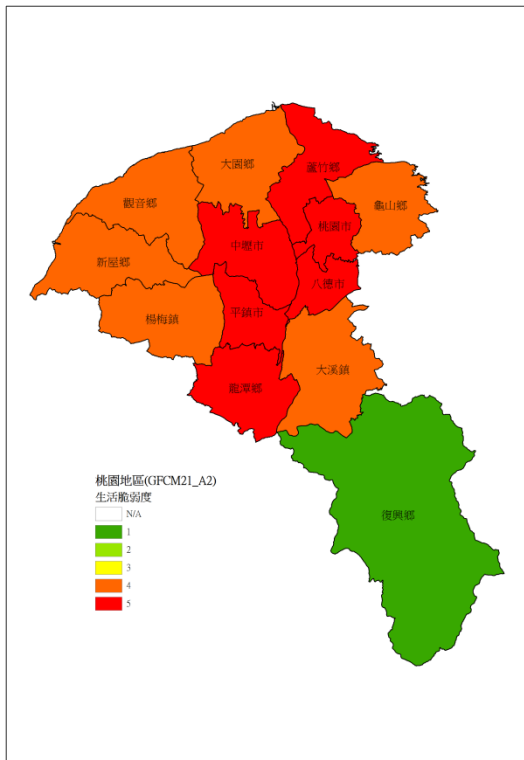
桃園地區_CSMK35_B1



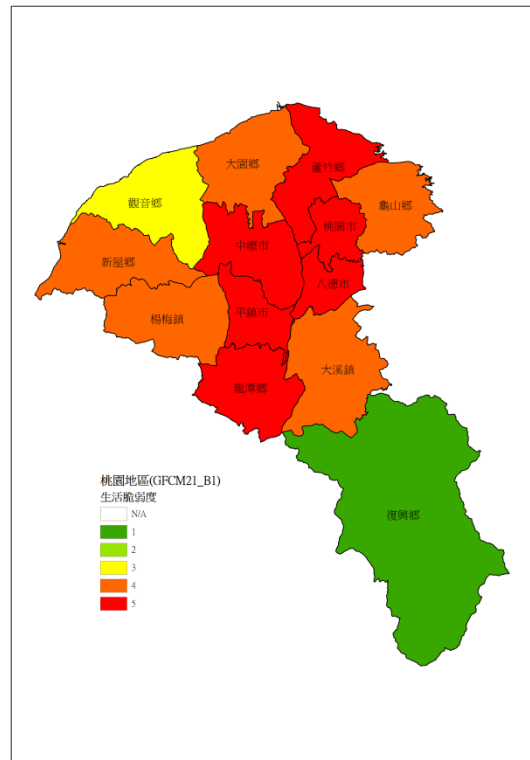
桃園地區_GFCM21_A1B



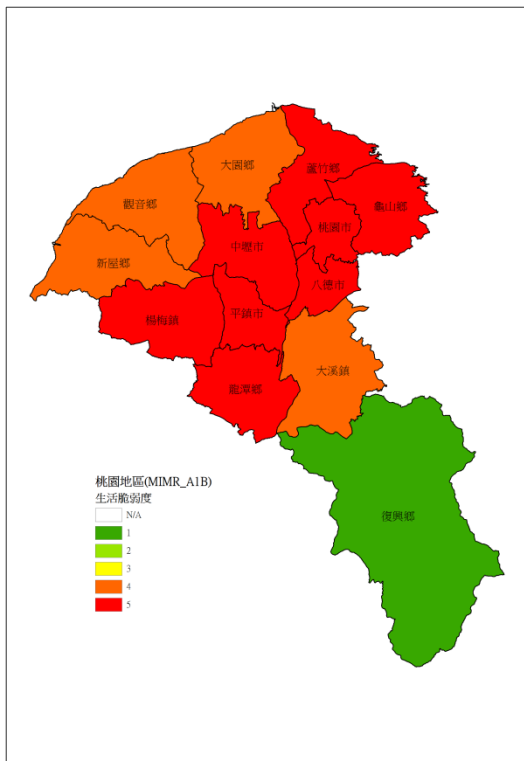
桃園地區_GFCM21_A2



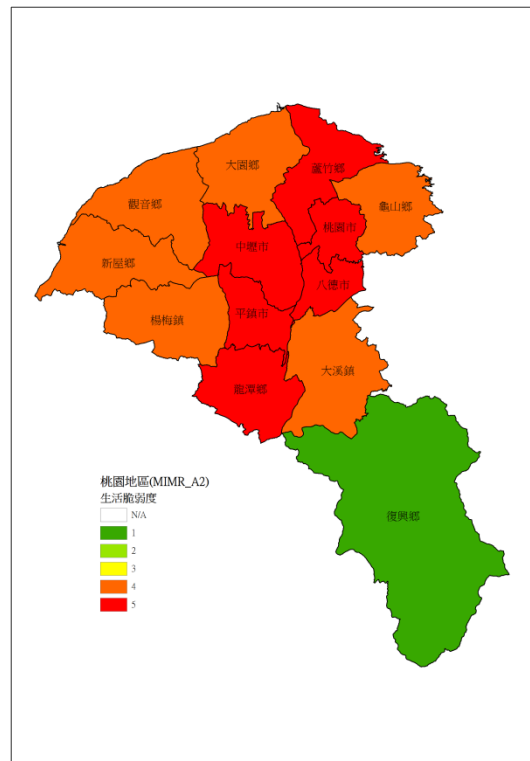
桃園地區_GFCM21_B1



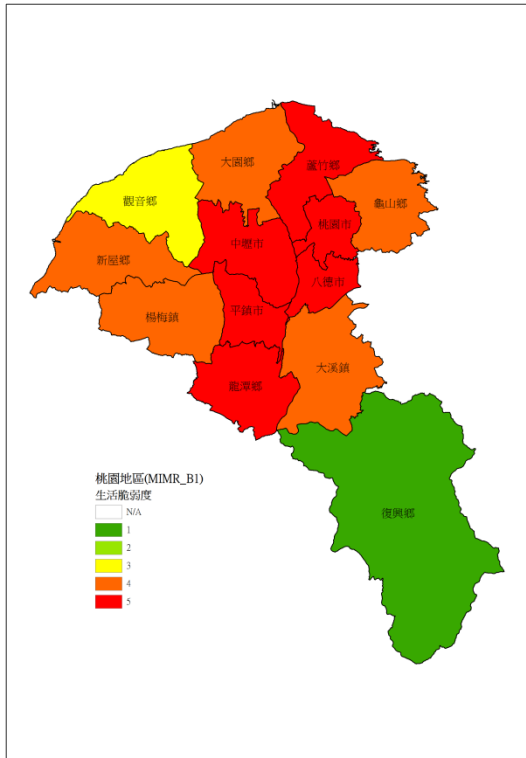
桃園地區_MIMR_A1B



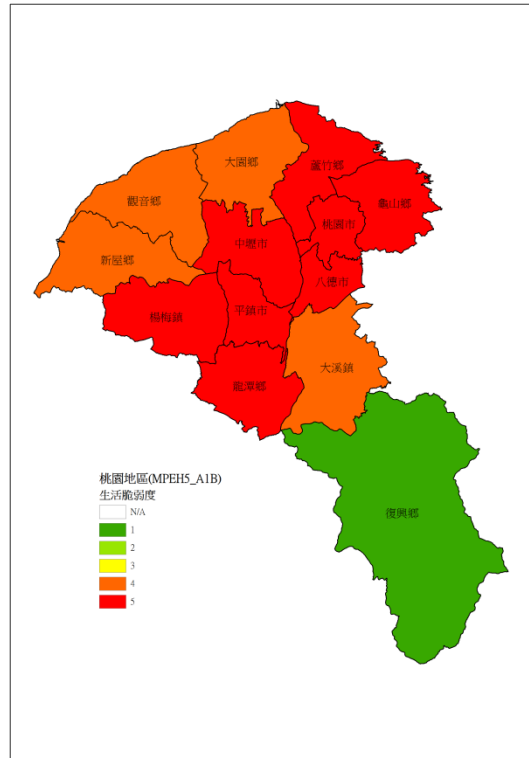
桃園地區_MIMR_A2



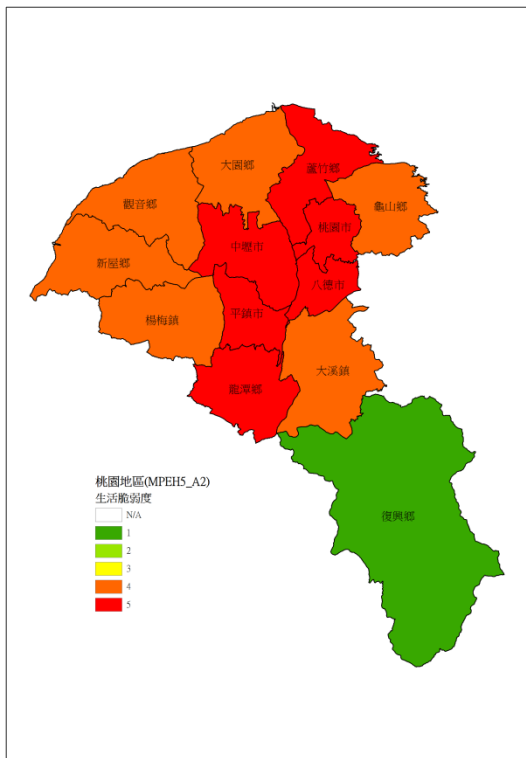
桃園地區_MIMR_B1



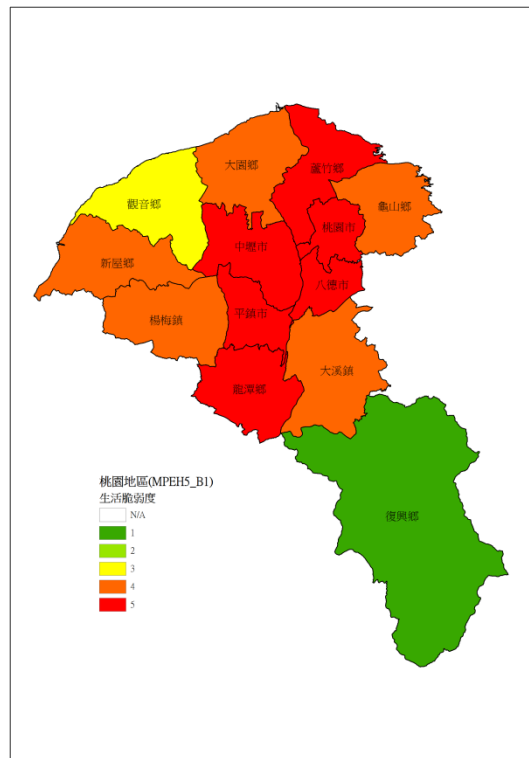
桃園地區_MPEH5_A1B



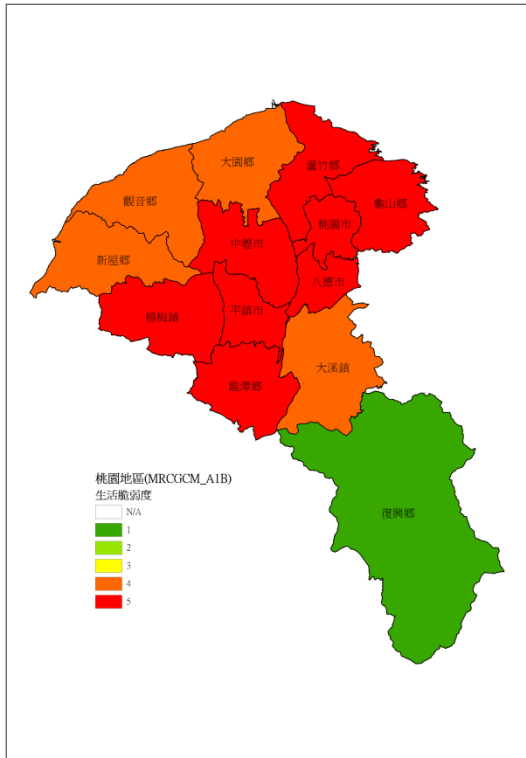
桃園地區_MPEH5_A2



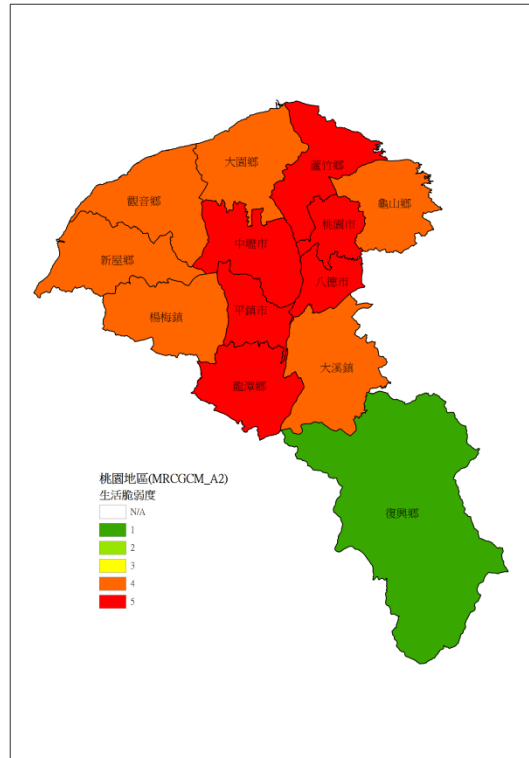
桃園地區_MPEH5_B1



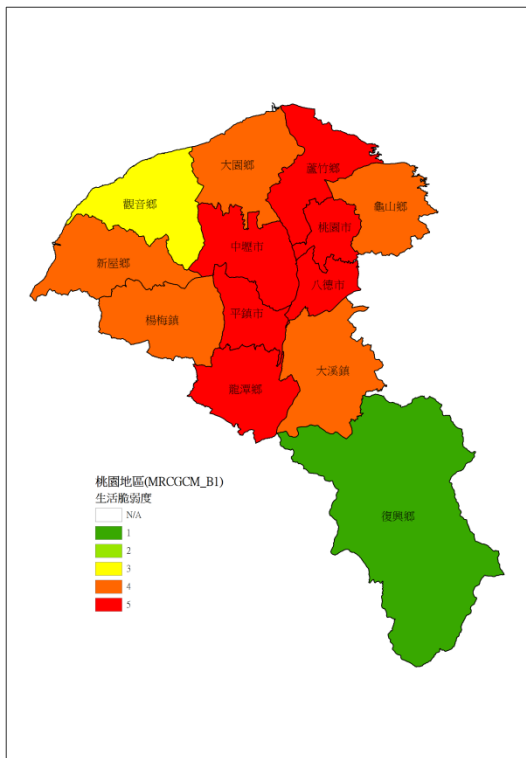
桃園地區_MRCGCM_A1B



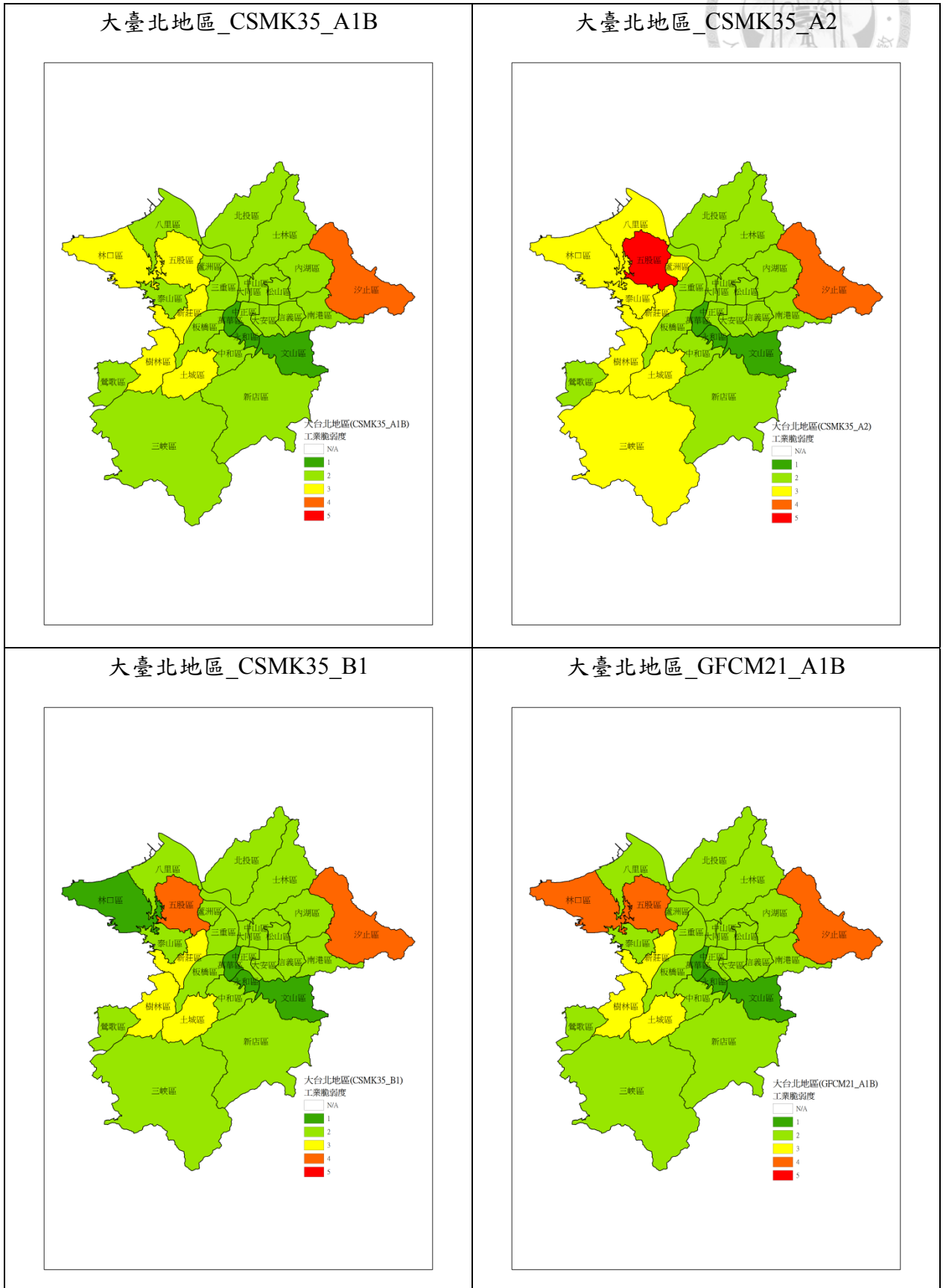
桃園地區_MRCGCM_A2



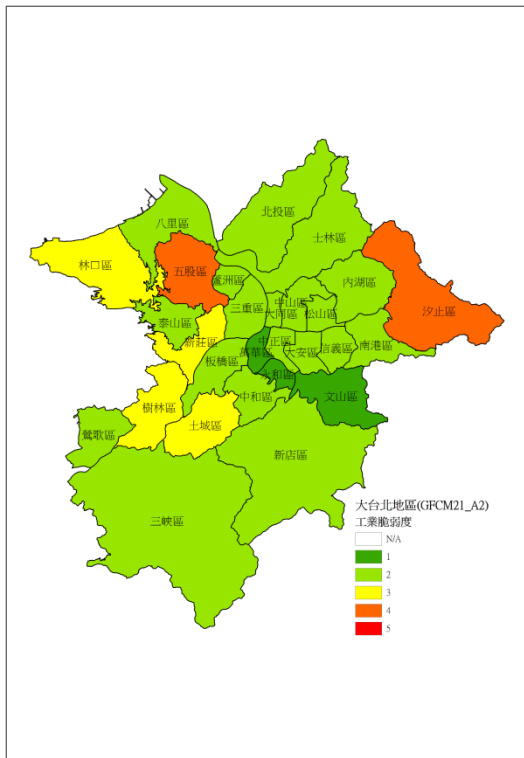
桃園地區_MRCGCM_B1



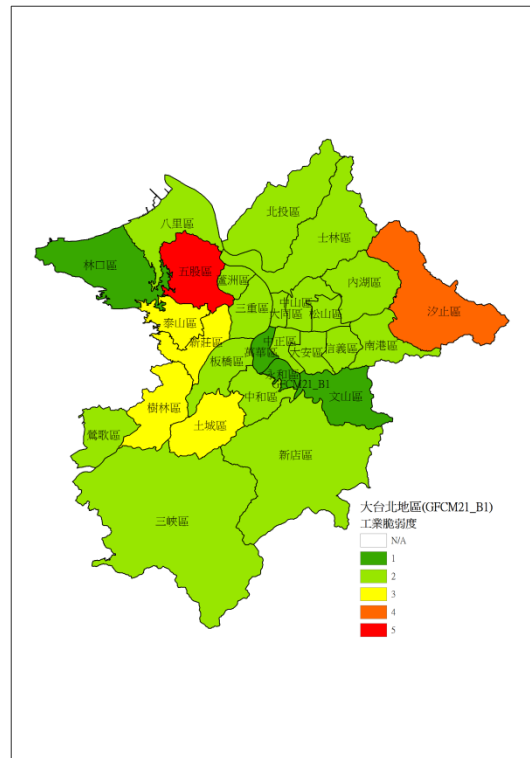
附錄五、不同 GCMs 工業用水脆弱度地圖



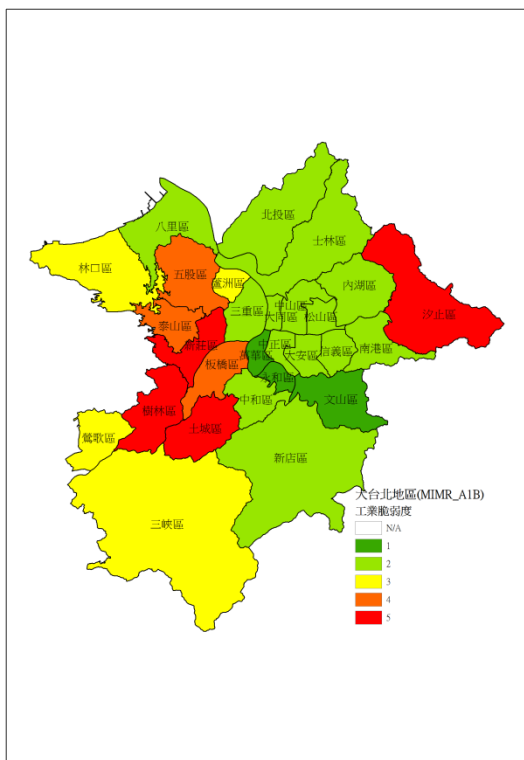
大臺北地區_GFCM21_A2



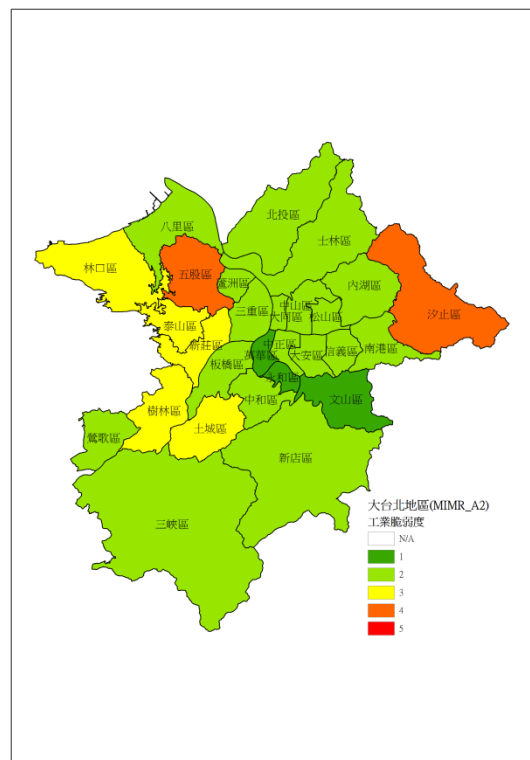
大臺北地區_GFCM21_B1



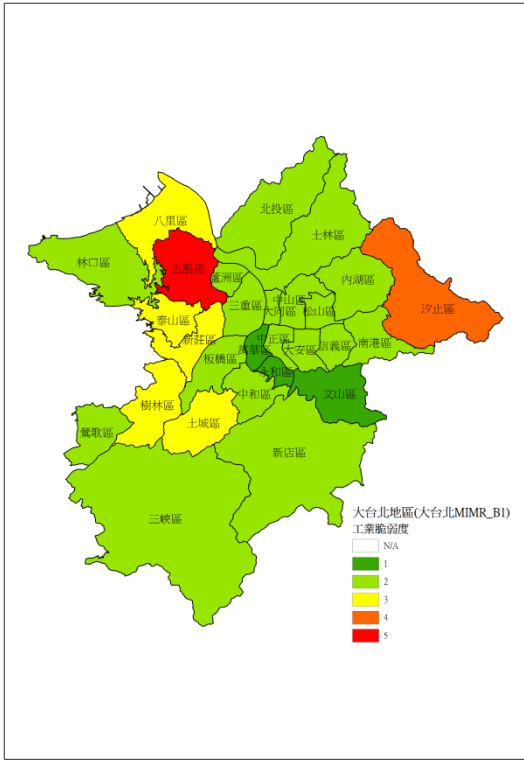
大臺北地區_MIMR_A1B



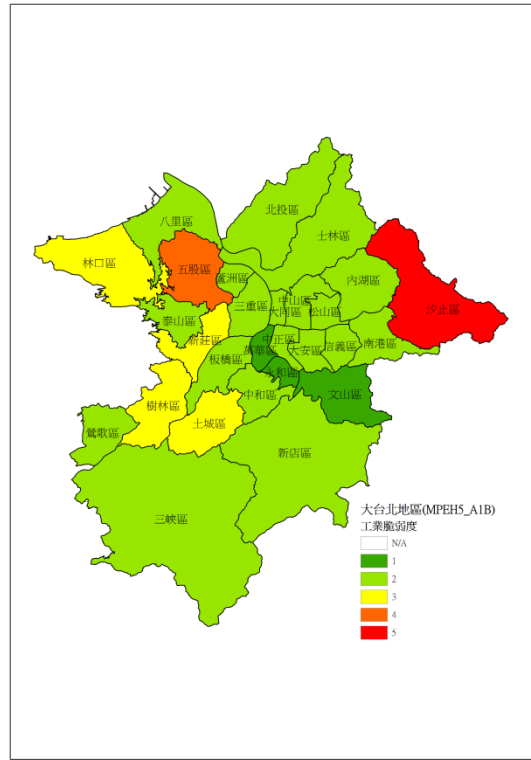
大臺北地區_MIMR_A2



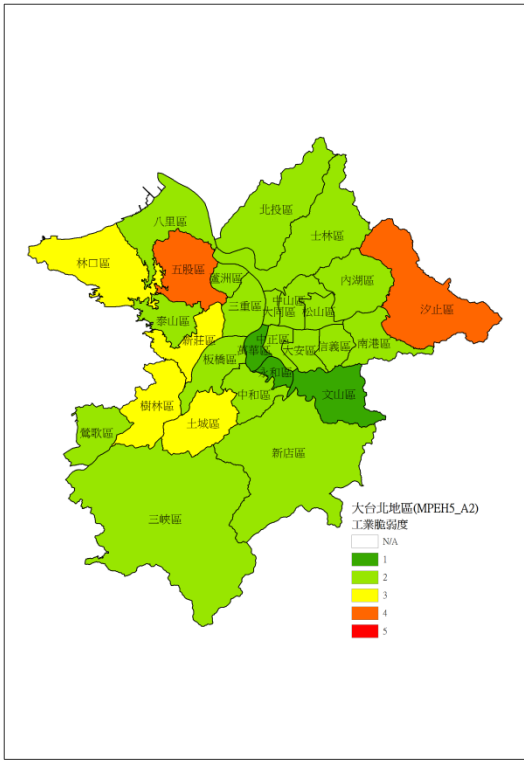
大臺北地區_MIMR_B1



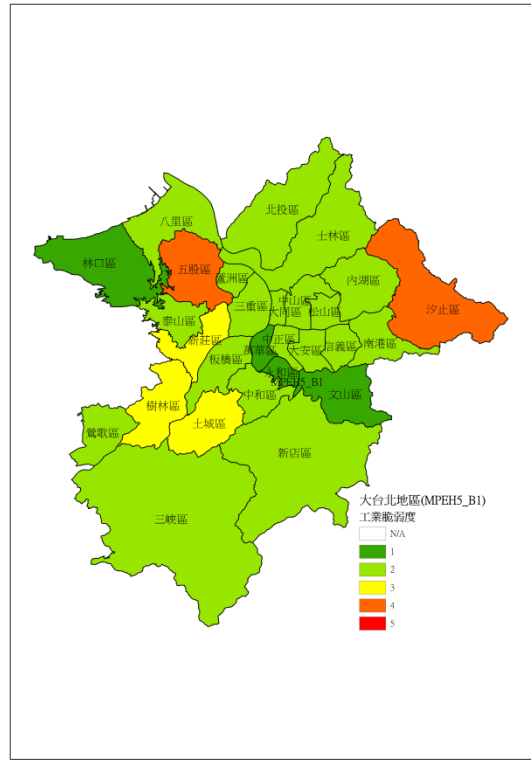
大臺北地區_MPEH5_A1B



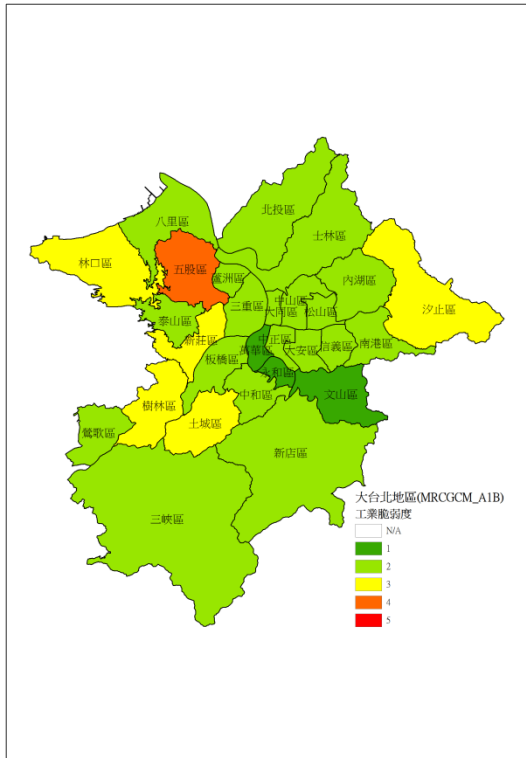
大臺北地區_MPEH5_A2



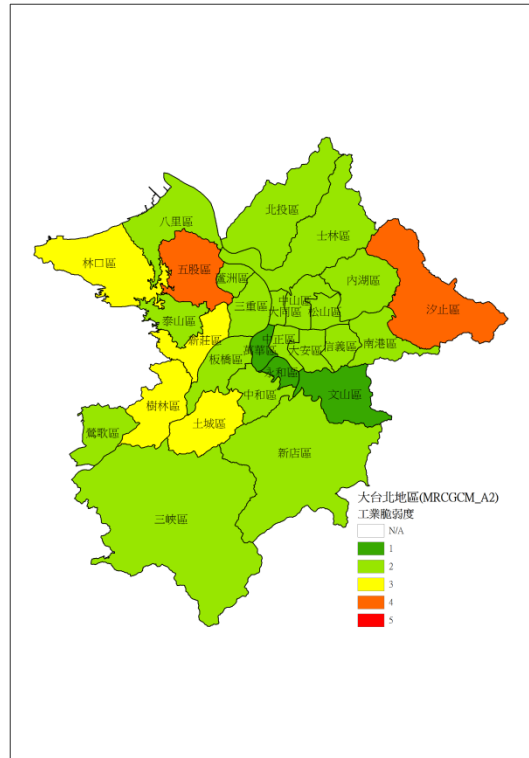
大臺北地區_MPEH5_B1



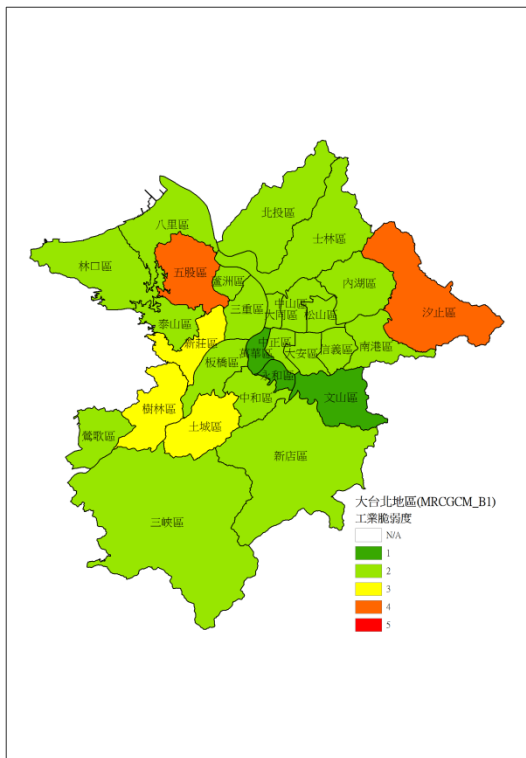
大臺北地區_MRCGCM_A1B



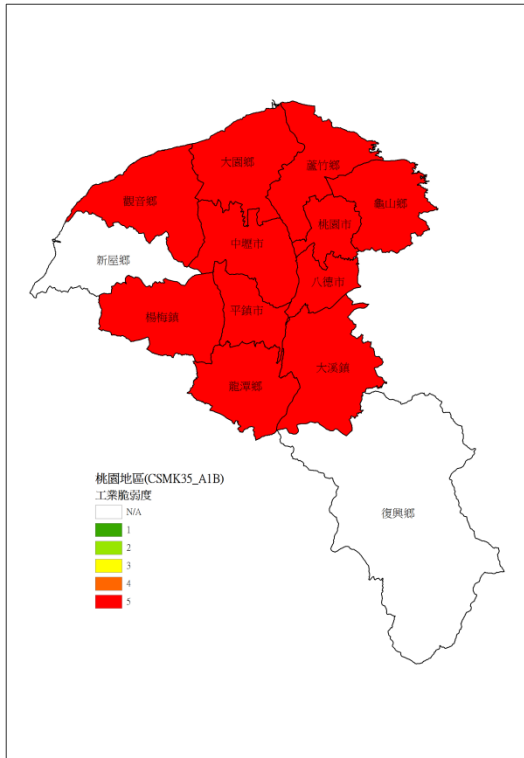
大臺北地區_MRCGCM_A2



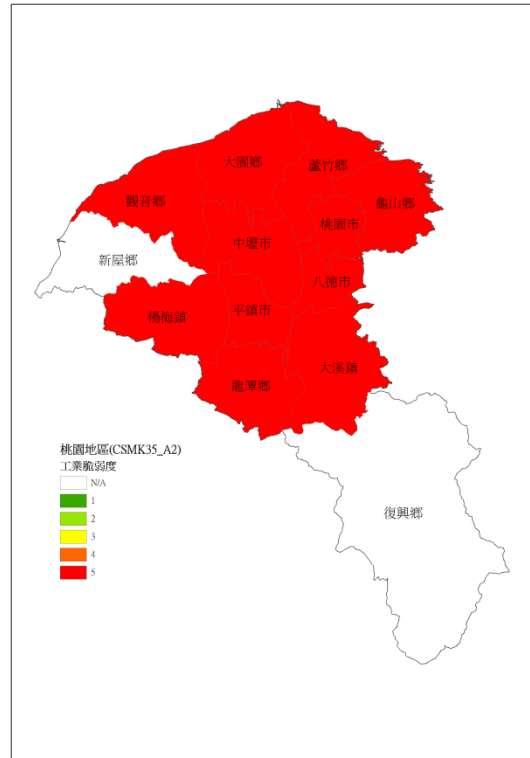
大臺北地區_MRCGCM_B1



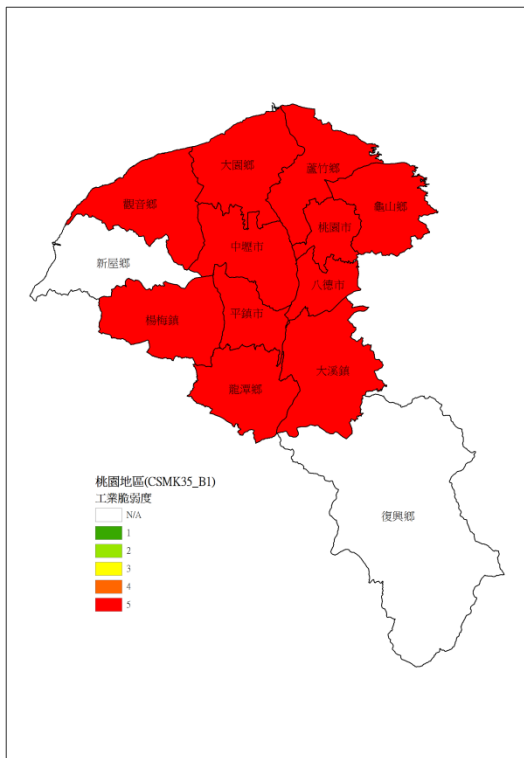
桃園地區_CSMK35_A1B



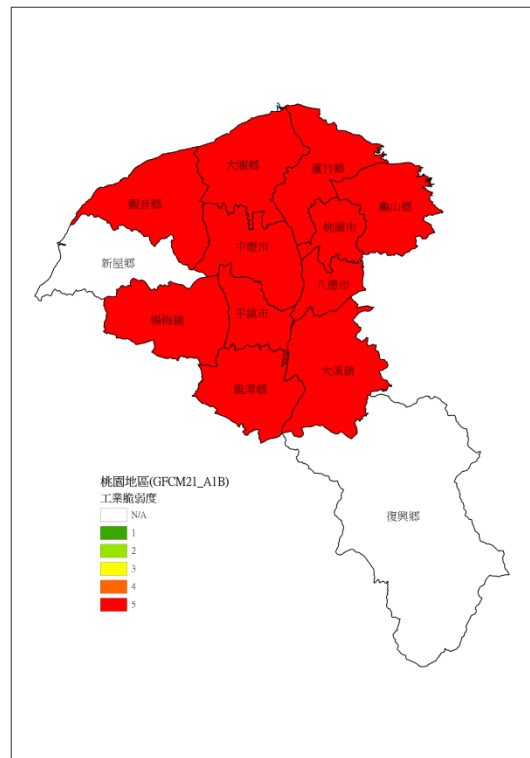
桃園地區_CSMK35_A2



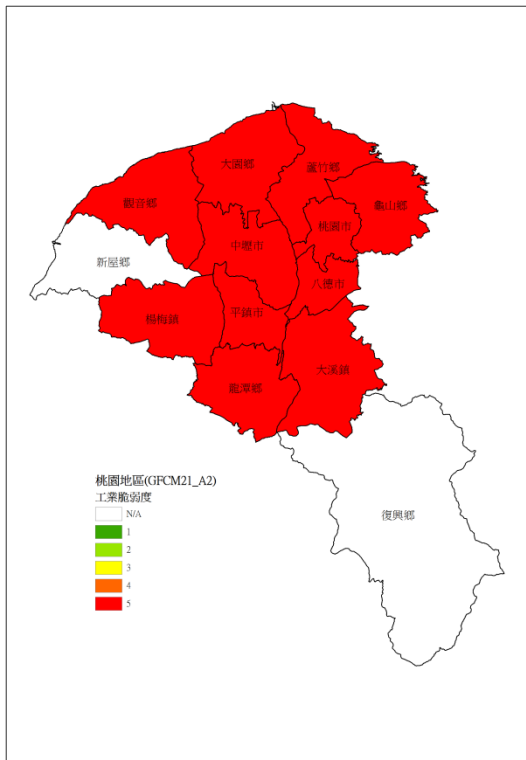
桃園地區_CSMK35_B1



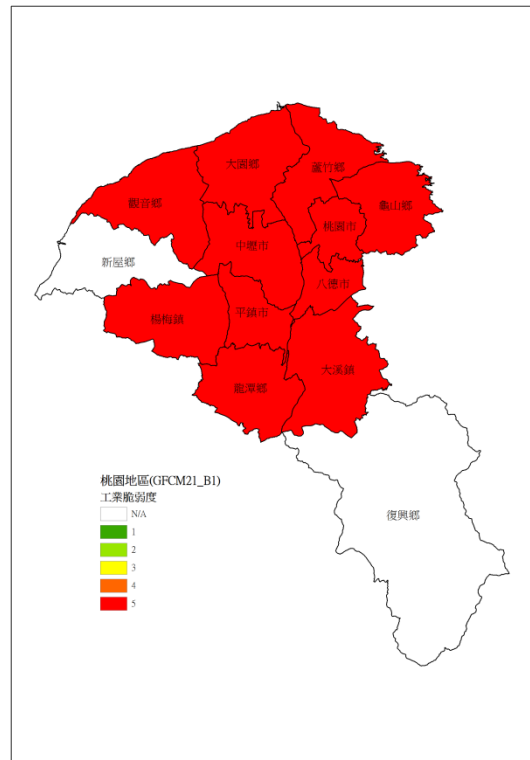
桃園地區_GFCM21_A1B



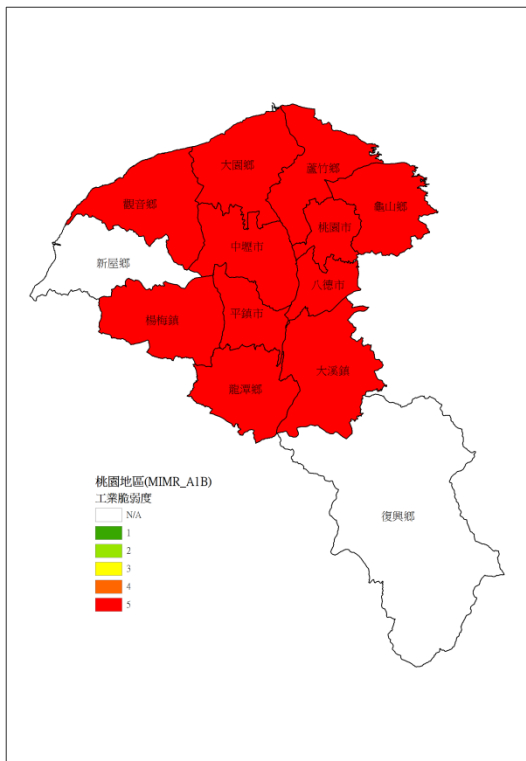
桃園地區_GFCM21_A2



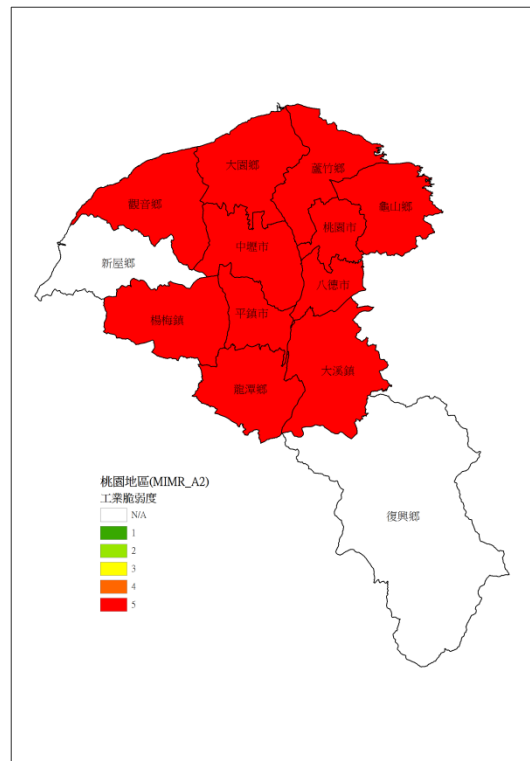
桃園地區_GFCM21_B1



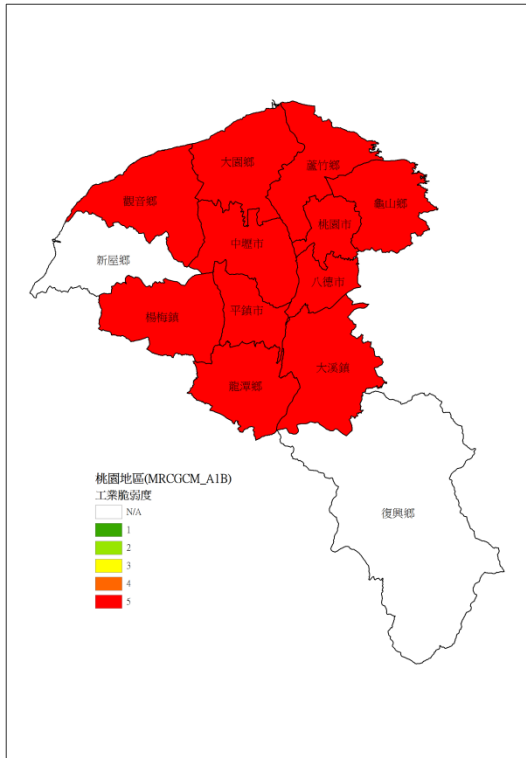
桃園地區_MIMR_A1B



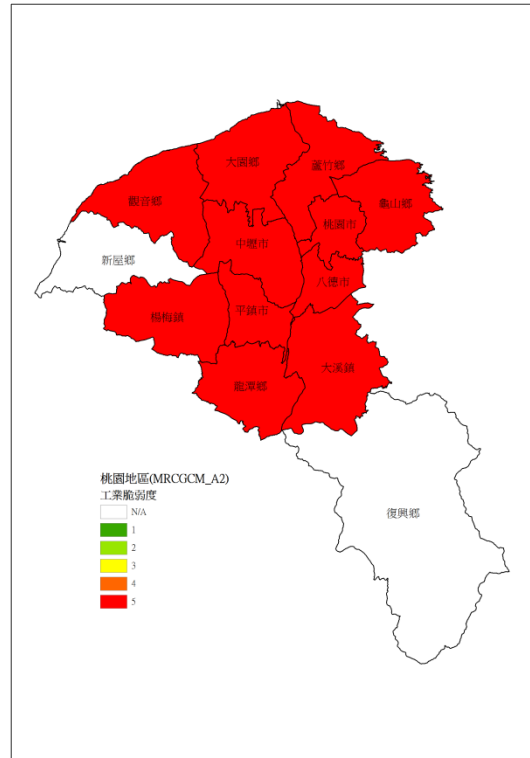
桃園地區_MIMR_A2



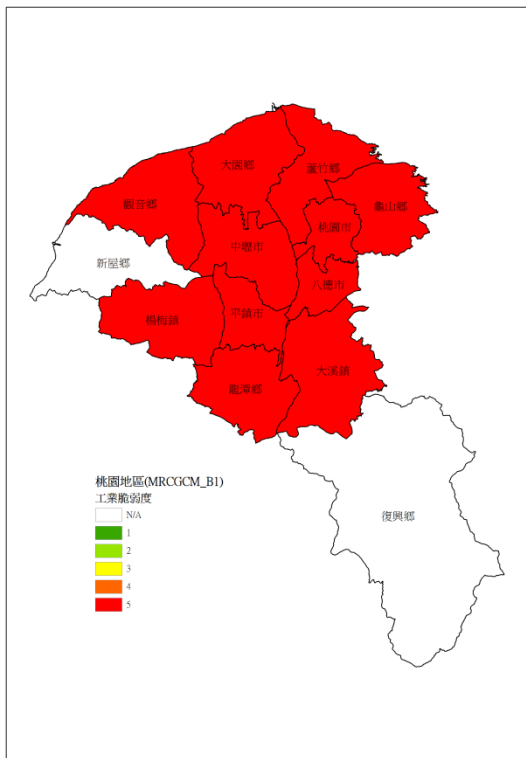
桃園地區_MRCGCM_A1B



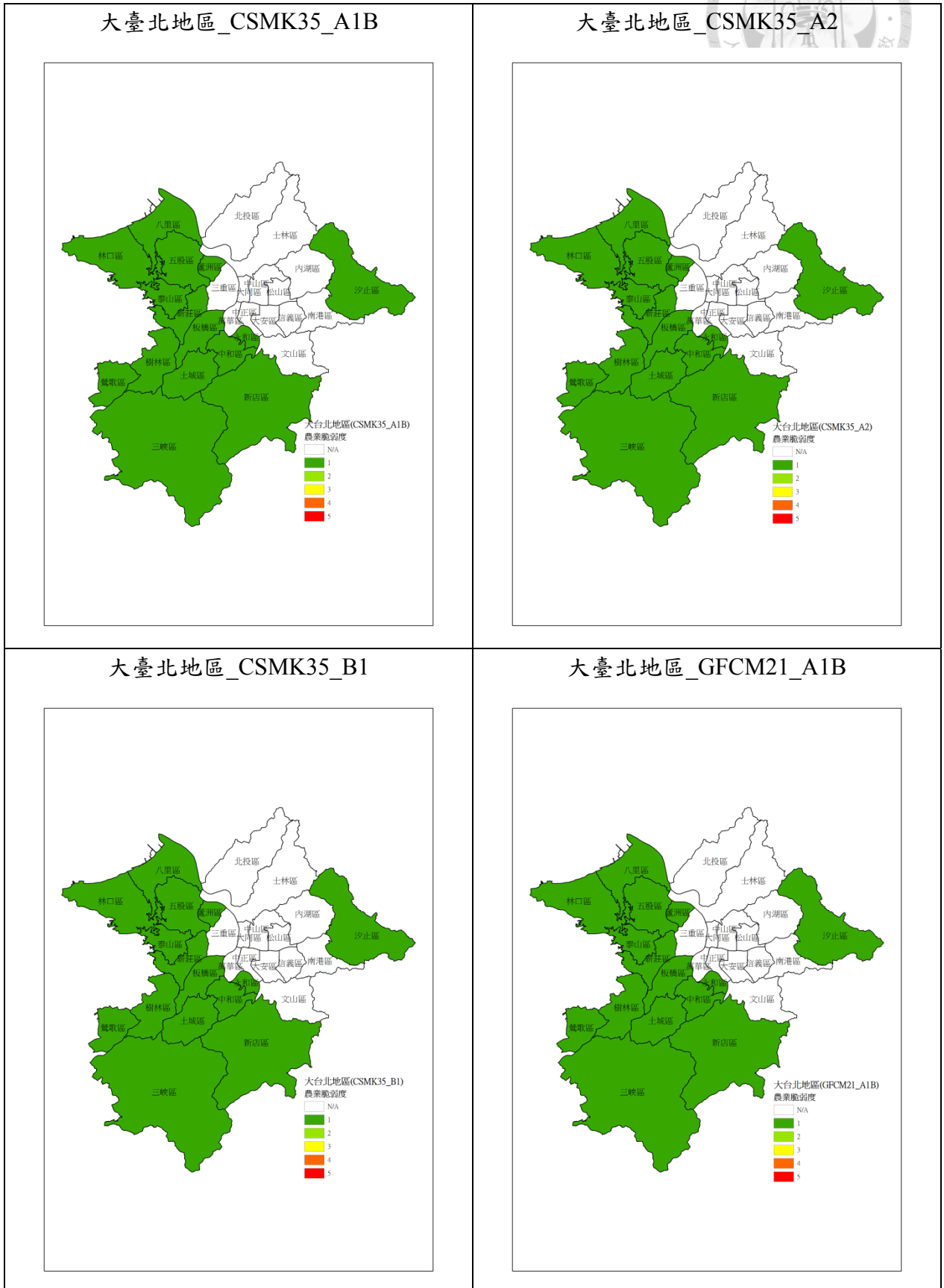
桃園地區_MRCGCM_A2



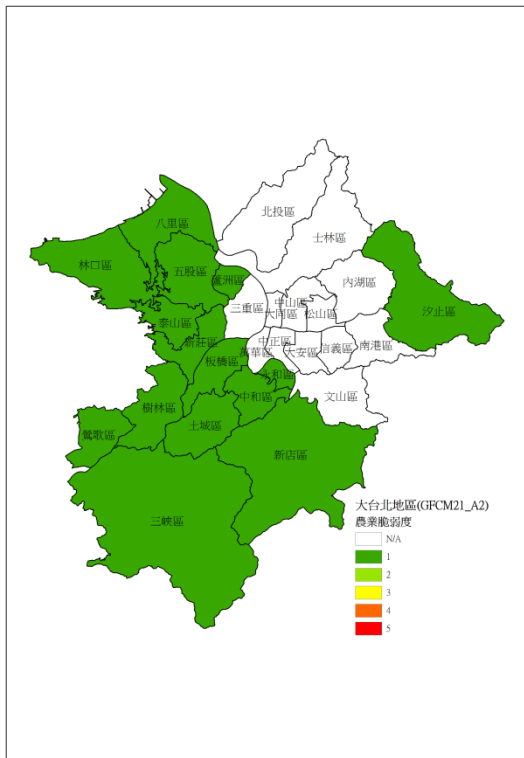
桃園地區_MRCGCM_B1



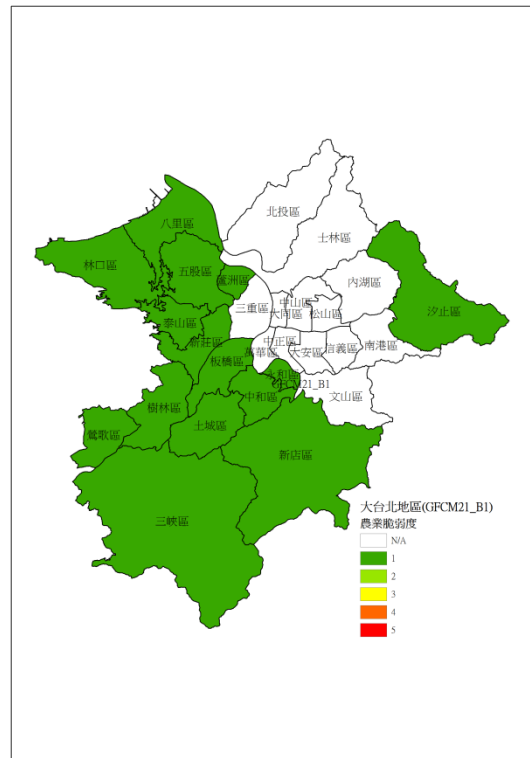
附錄六、不同 GCMs 農業用水脆弱度地圖



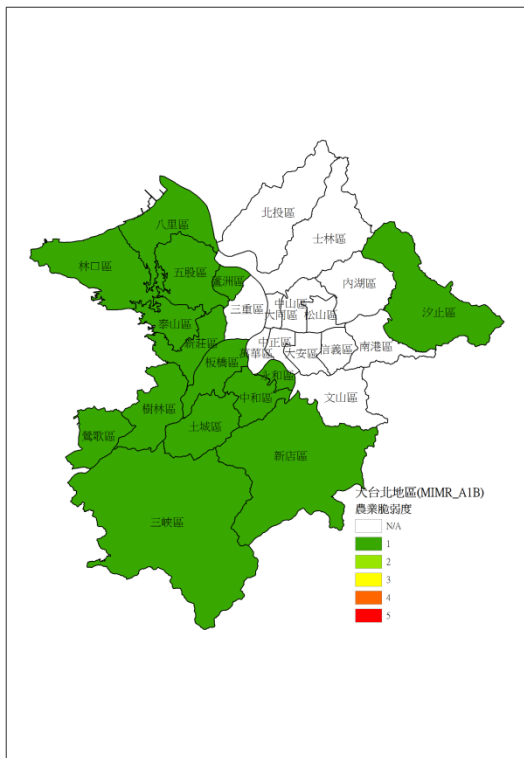
大臺北地區_GFCM21_A2



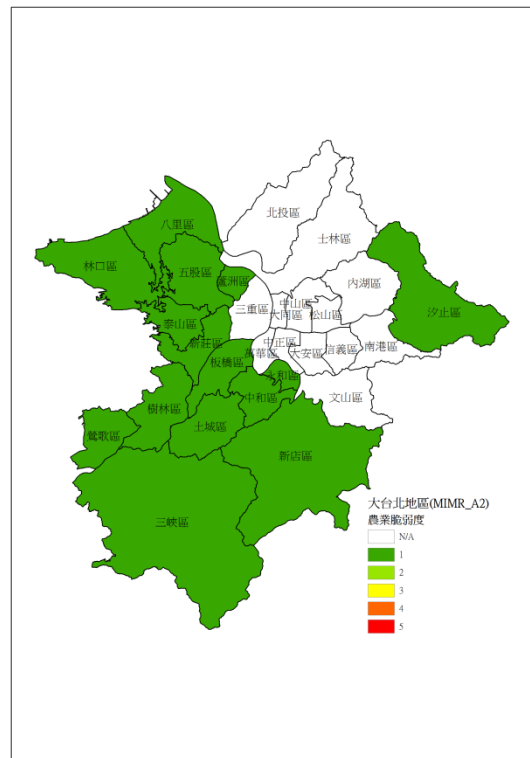
大臺北地區_GFCM21_B1



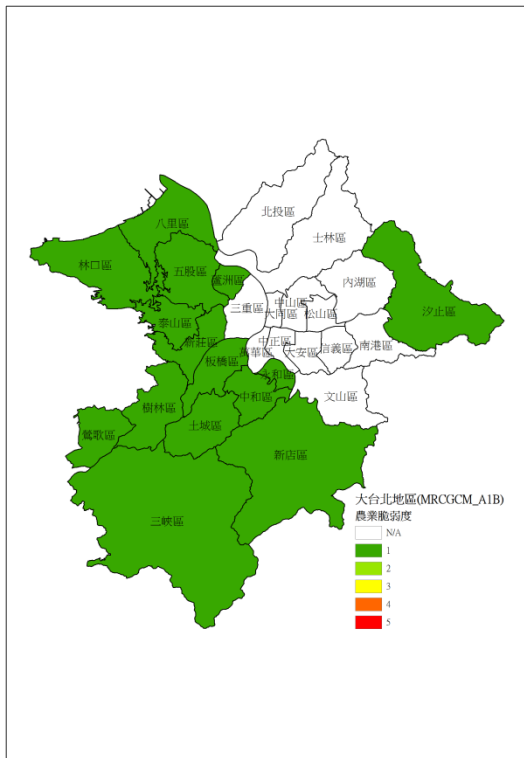
大臺北地區_MIMR_A1B



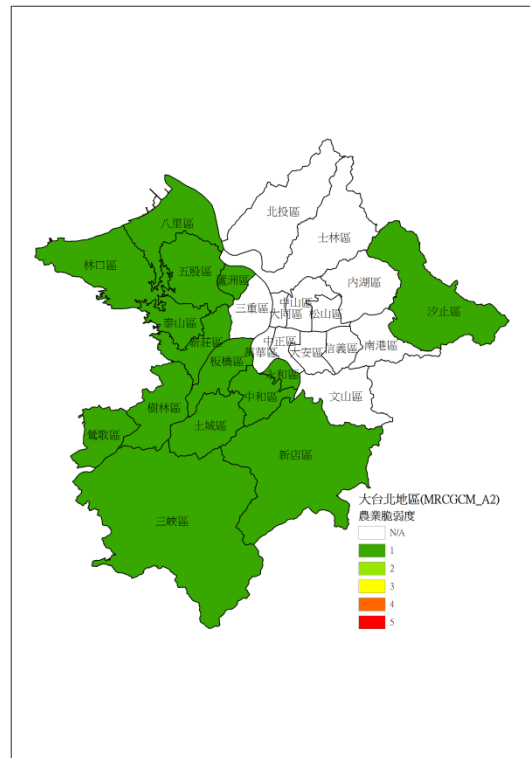
大臺北地區_MIMR_A2



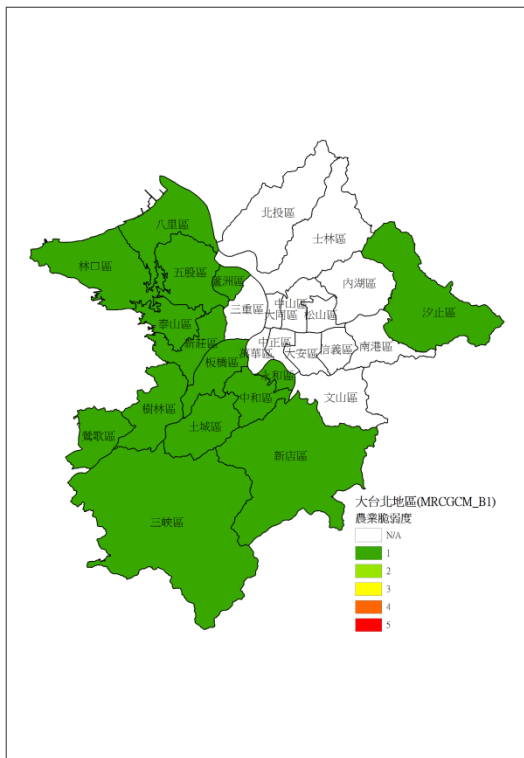
大臺北地區_MRCGCM_A1B



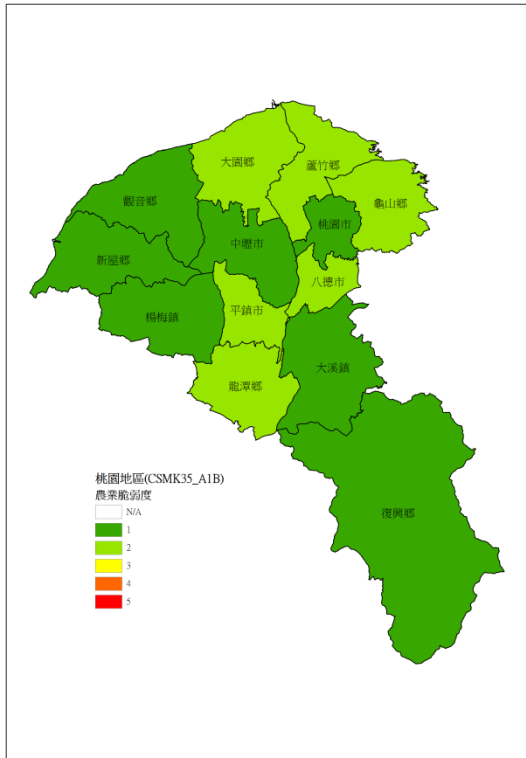
大臺北地區_MRCGCM_A2



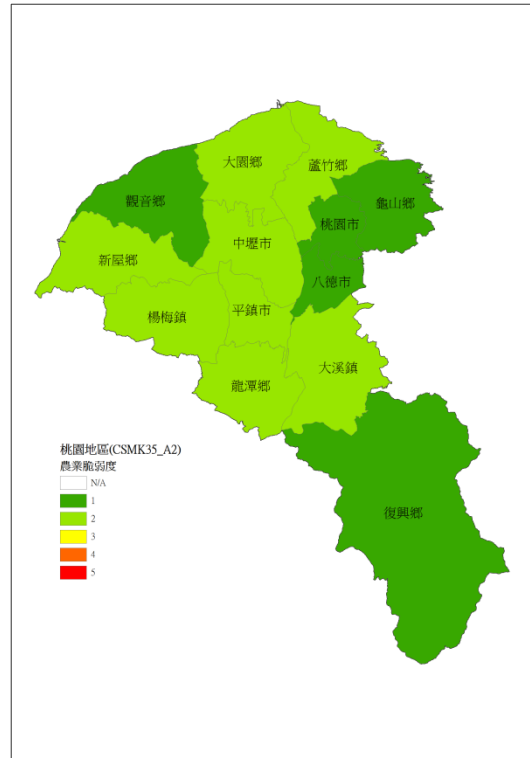
大臺北地區_MRCGCM_B1



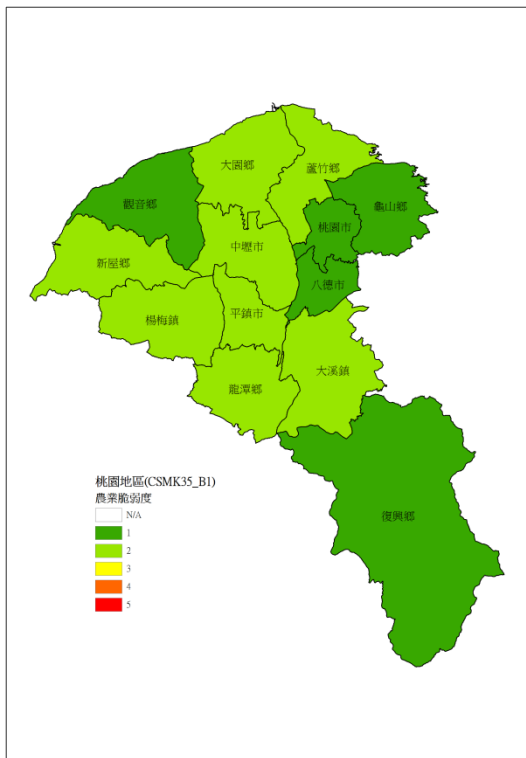
桃園地區_CSMK35_A1B



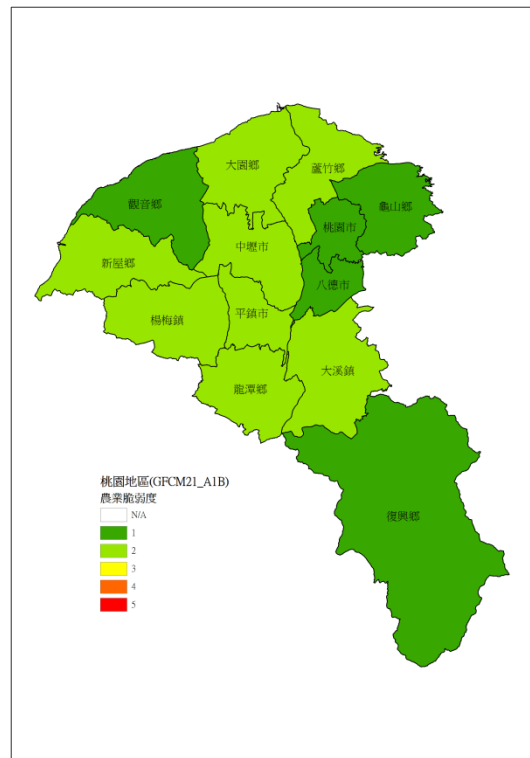
桃園地區_CSMK35_A2



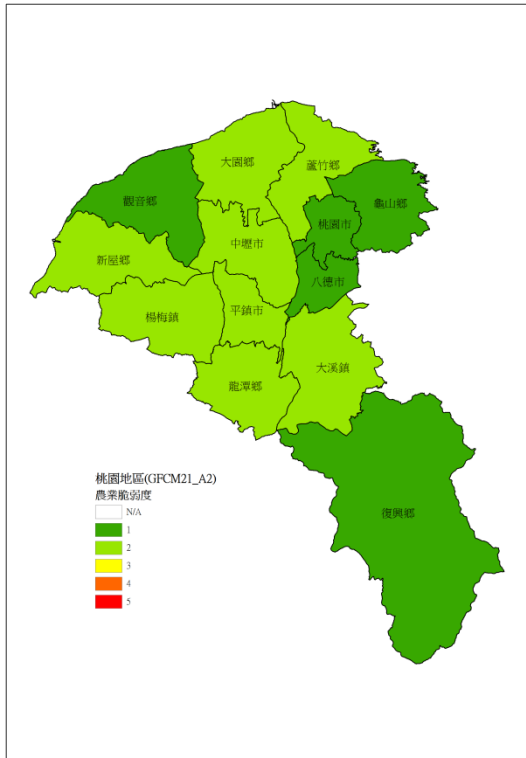
桃園地區_CSMK35_B1



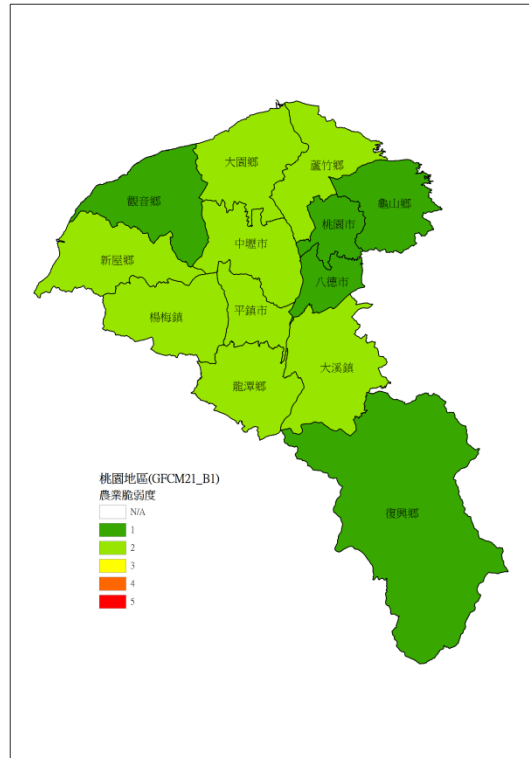
桃園地區_GFCM21_A1B



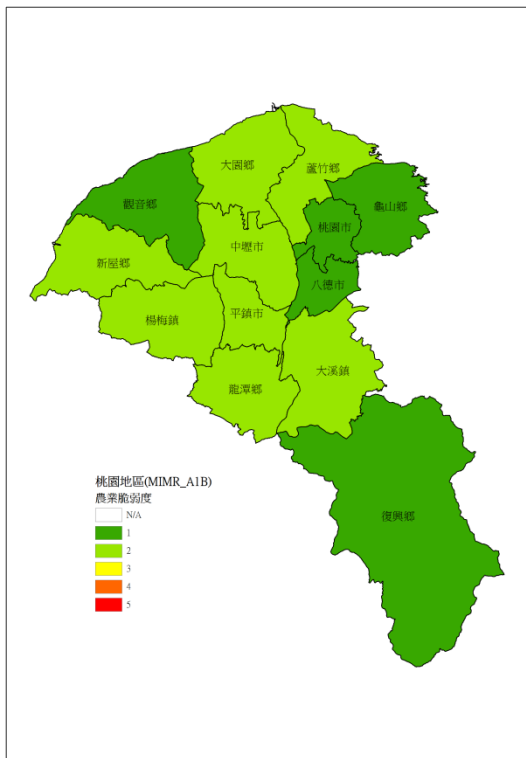
桃園地區_GFCM21_A2



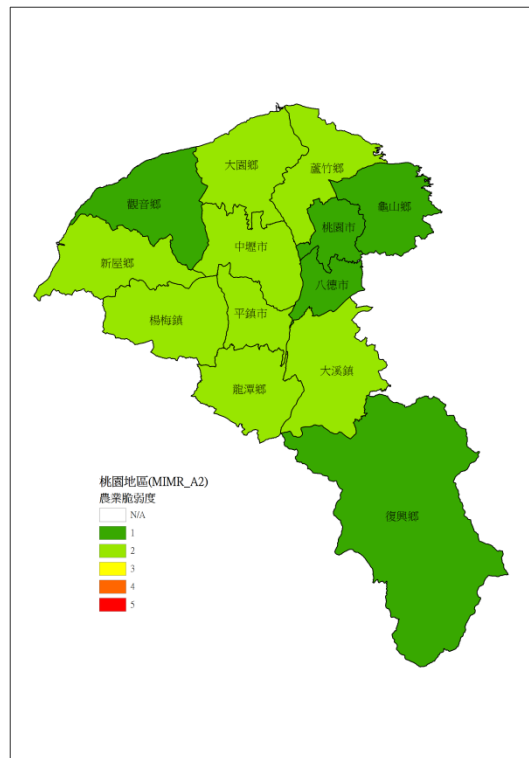
桃園地區_GFCM21_B1



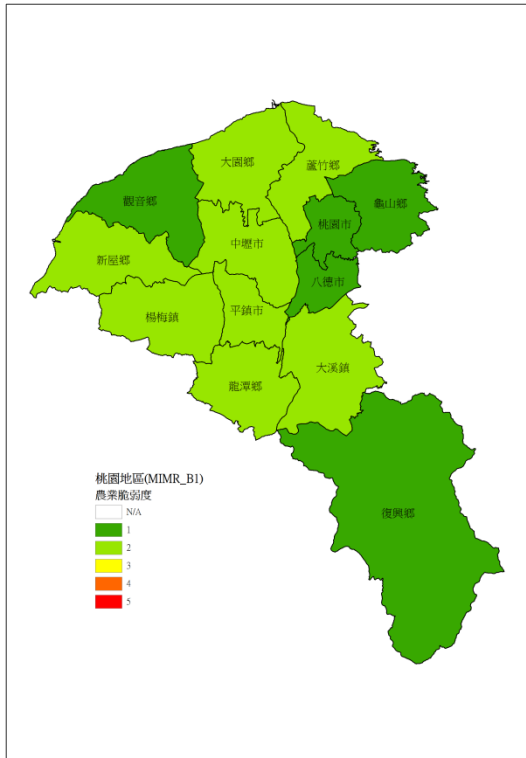
桃園地區_MIMR_A1B



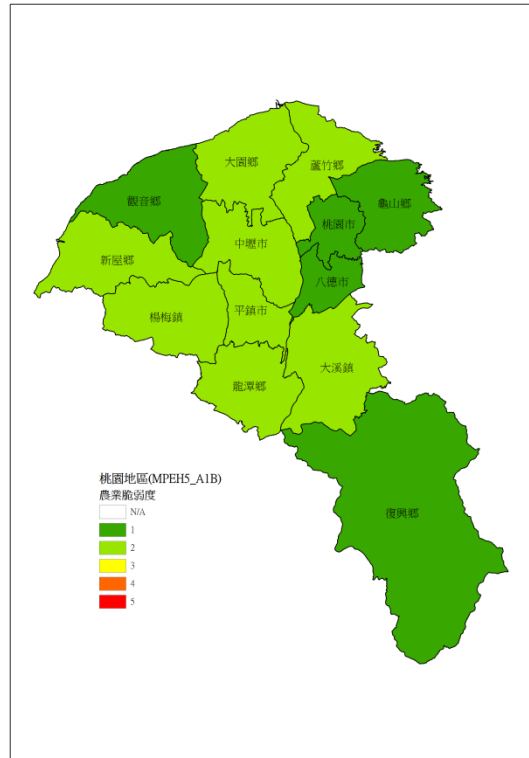
桃園地區_MIMR_A2



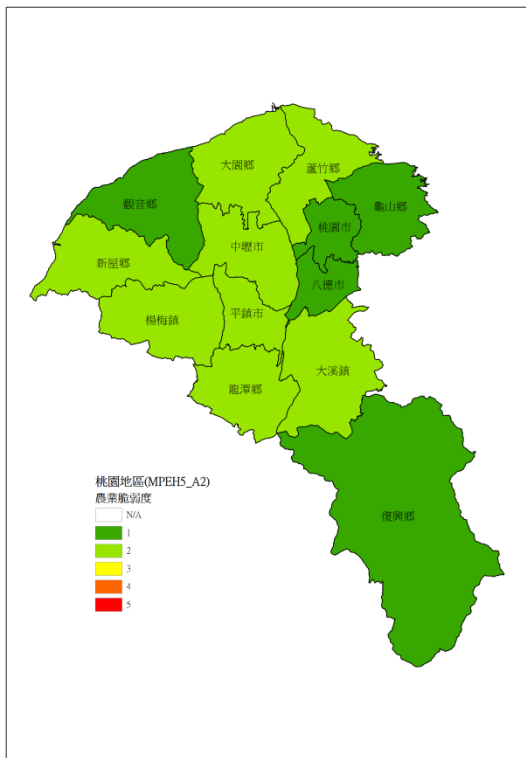
桃園地區_MIMR_B1



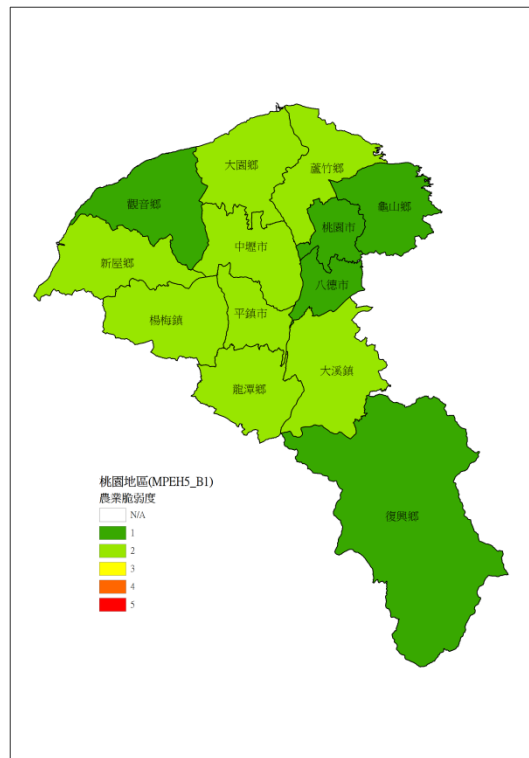
桃園地區_MPEH5_A1B



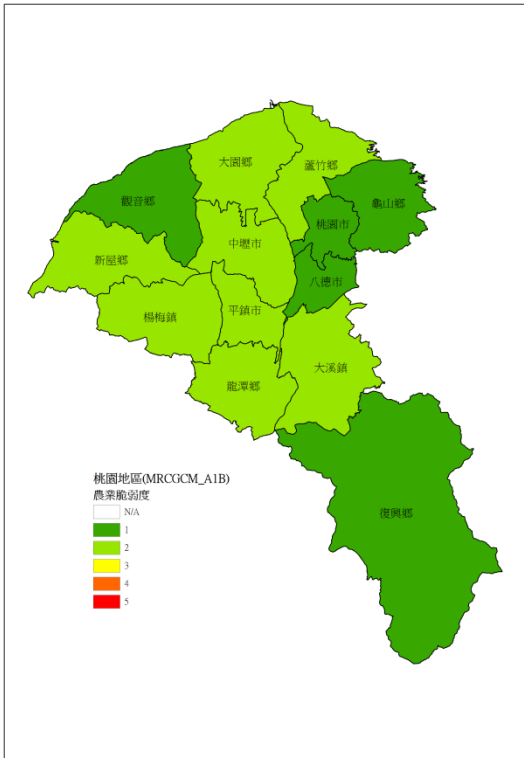
桃園地區_MPEH5_A2



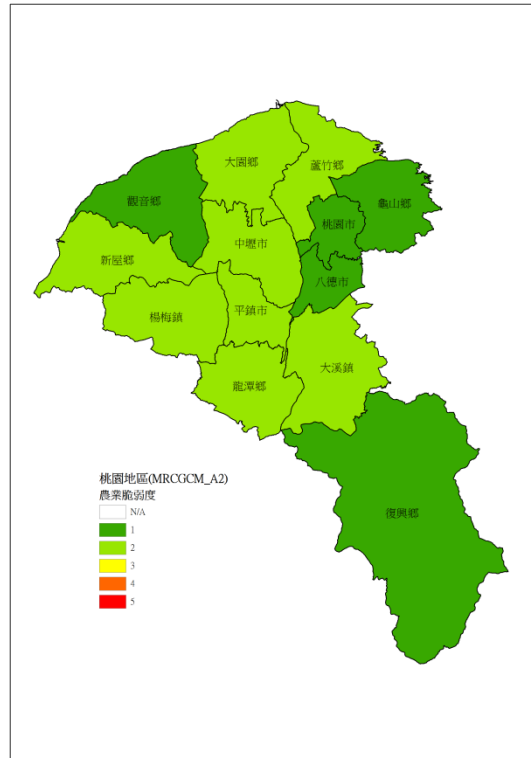
桃園地區_MPEH5_B1



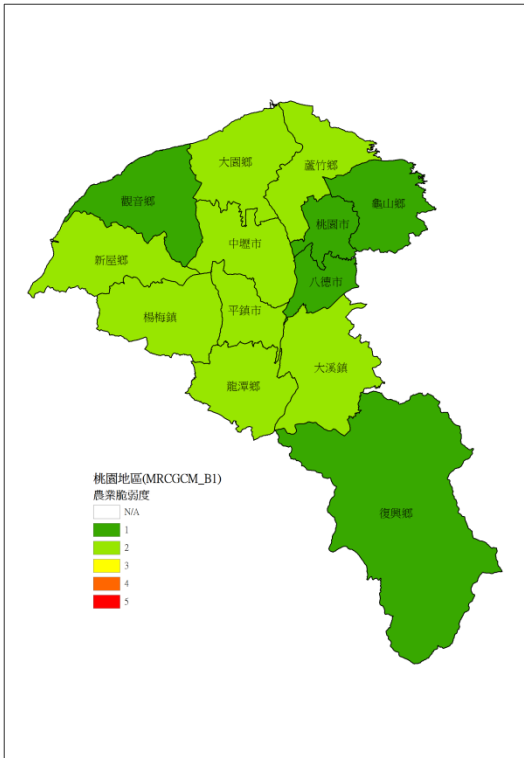
桃園地區_MRCGCM_A1B



桃園地區_MRCGCM_A2

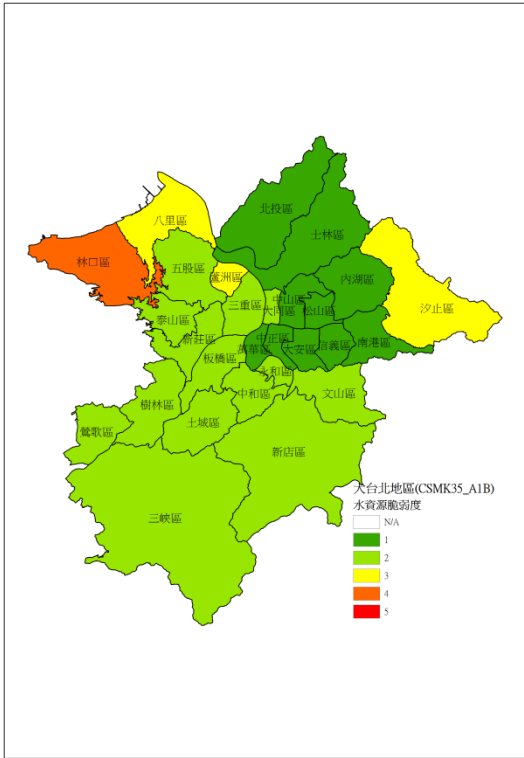


桃園地區_MRCGCM_B1

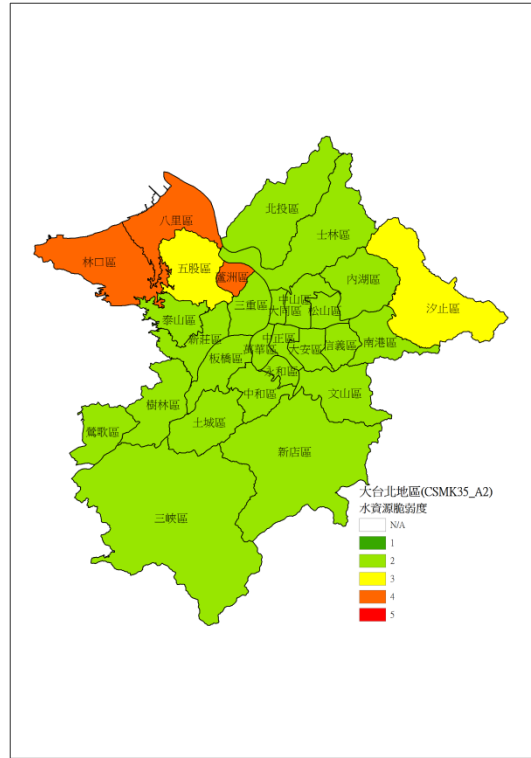


附錄七、不同 GCMs 水資源水脆弱度地圖

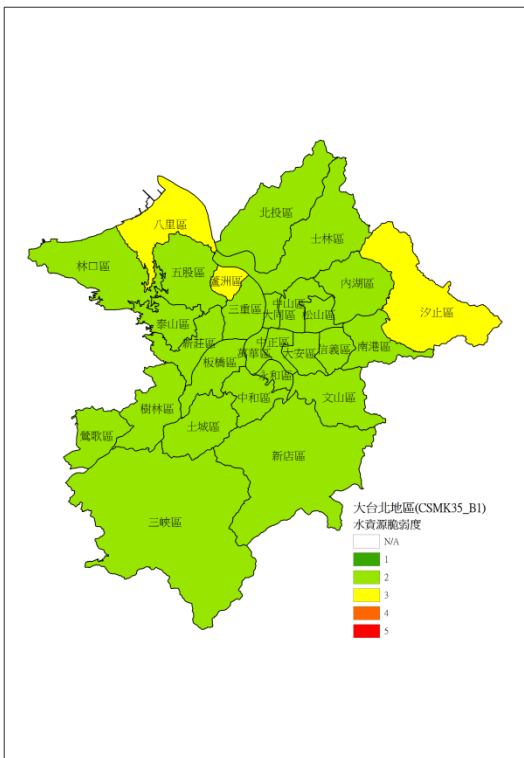
大臺北地區_CSMK35_A1B



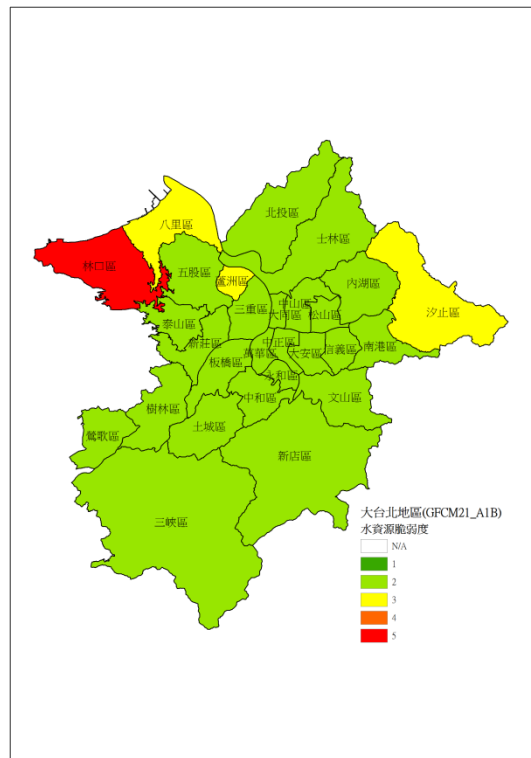
大臺北地區_CSMK35_A2



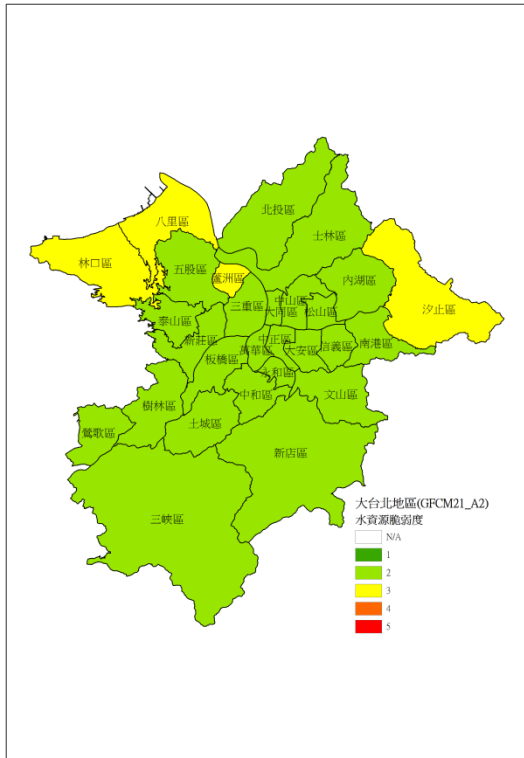
大臺北地區_CSMK35_B1



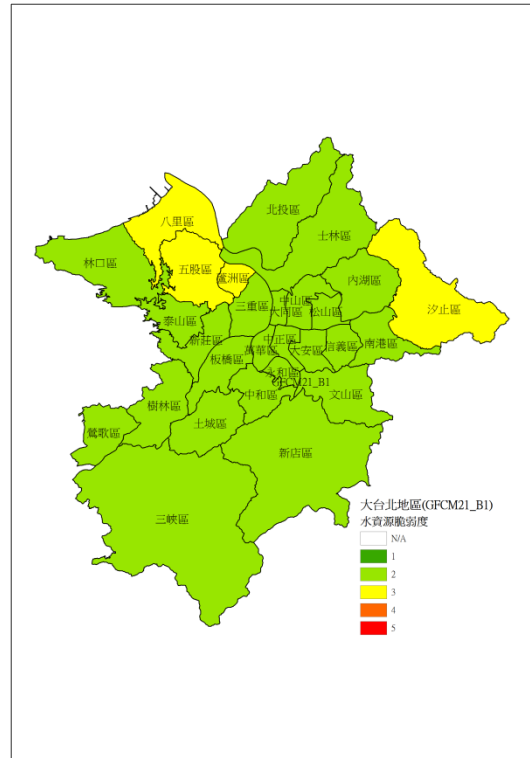
大臺北地區_GFCM21_A1B



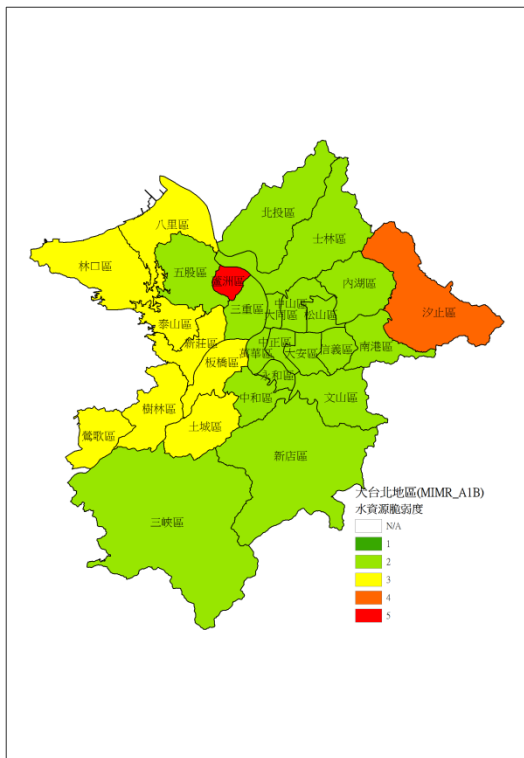
大臺北地區_GFCM21_A2



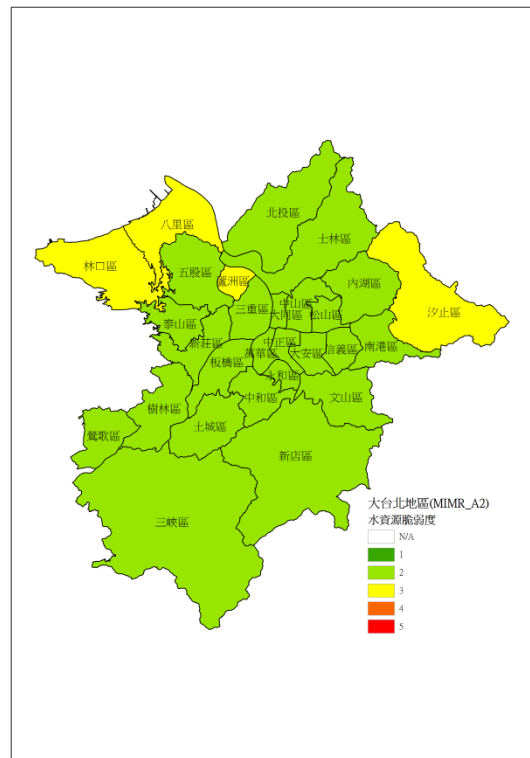
大臺北地區_GFCM21_B1



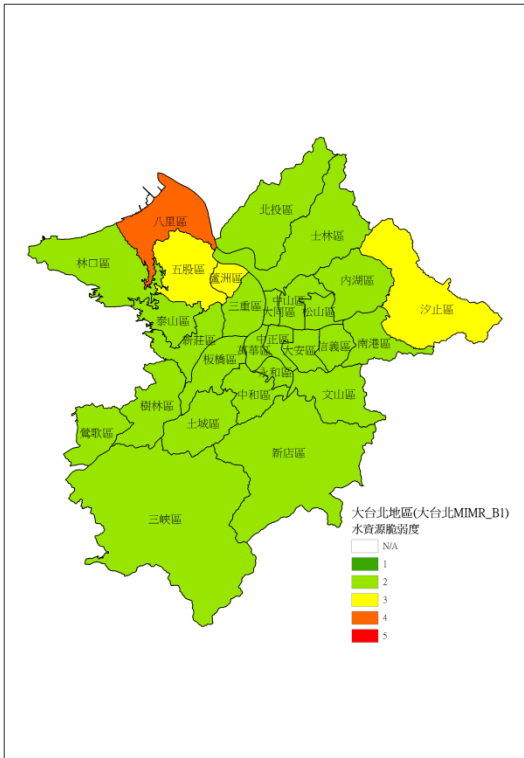
大臺北地區_MIMR_A1B



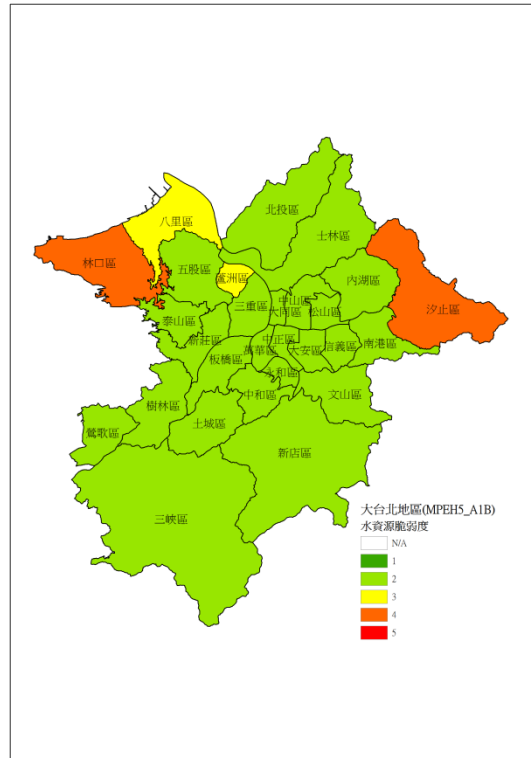
大臺北地區_MIMR_A2



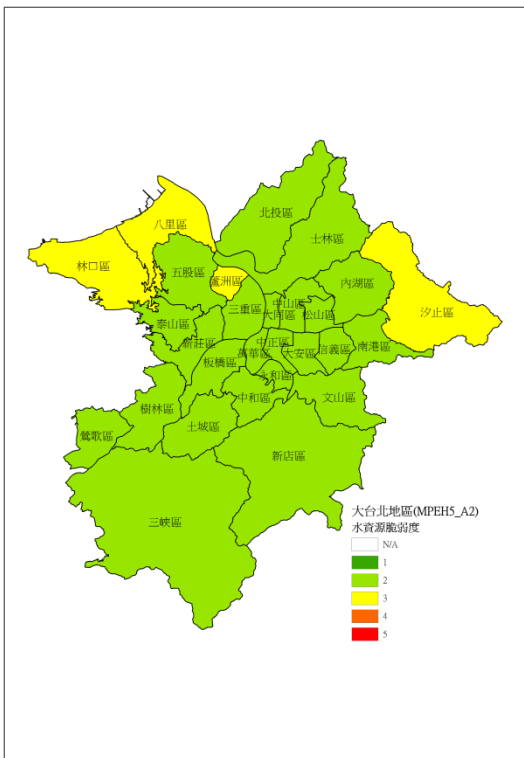
大臺北地區_MIMR_B1



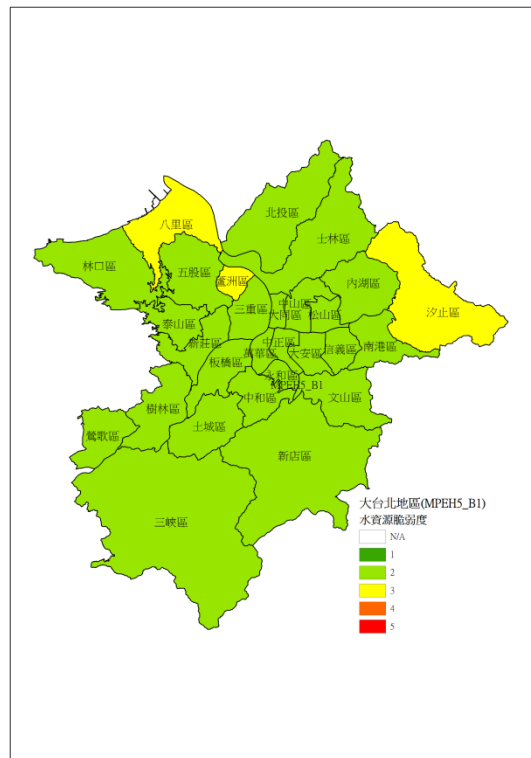
大臺北地區_MPEH5_A1B



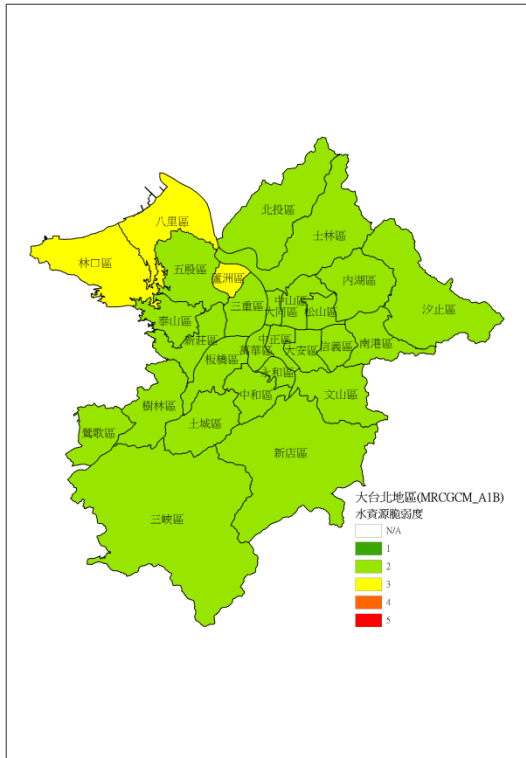
大臺北地區_MPEH5_A2



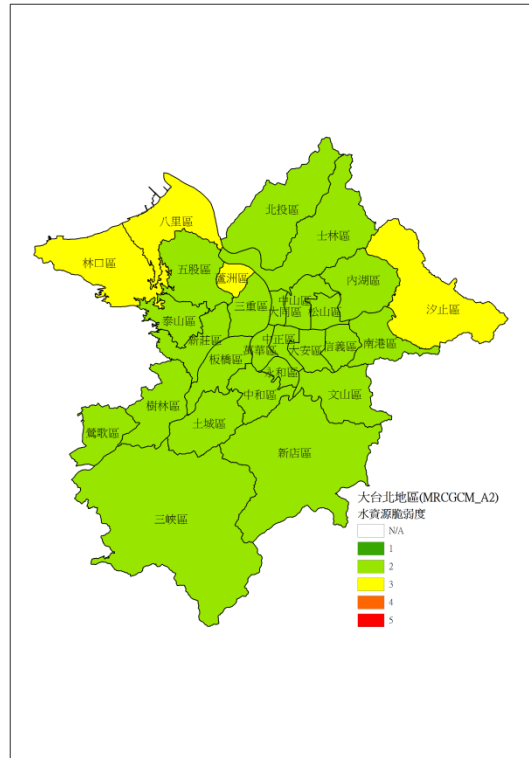
大臺北地區_MPEH5_B1



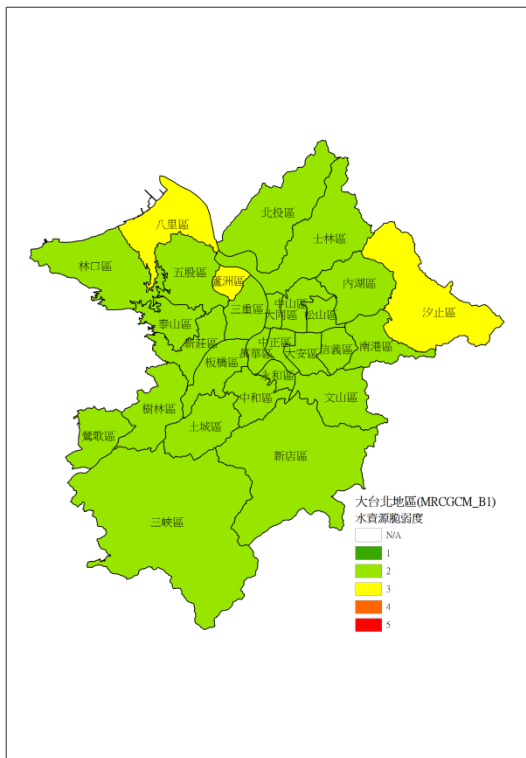
大臺北地區_MRCGCM_A1B



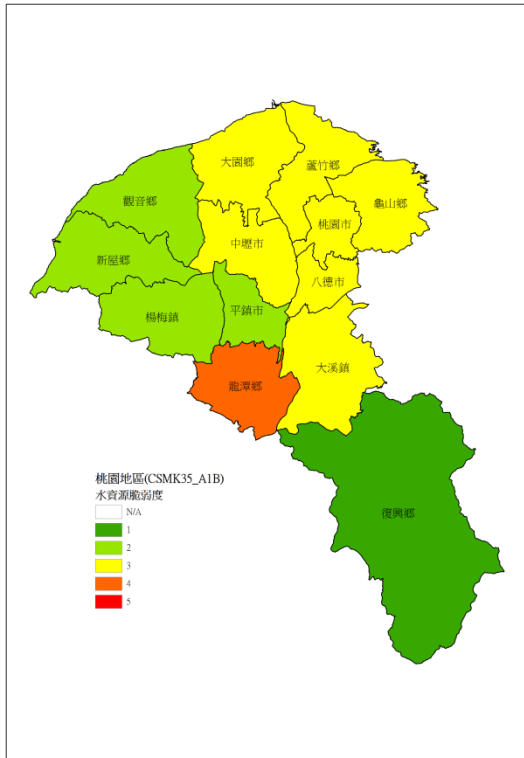
大臺北地區_MRCGCM_A2



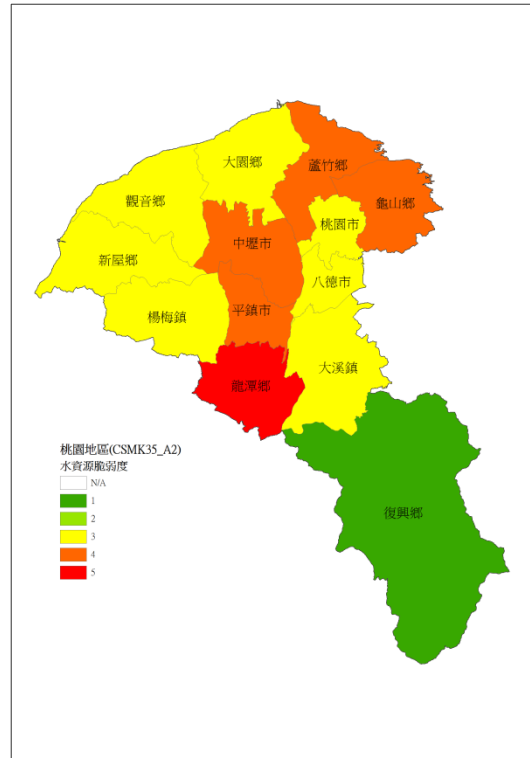
大臺北地區_MRCGCM_B1



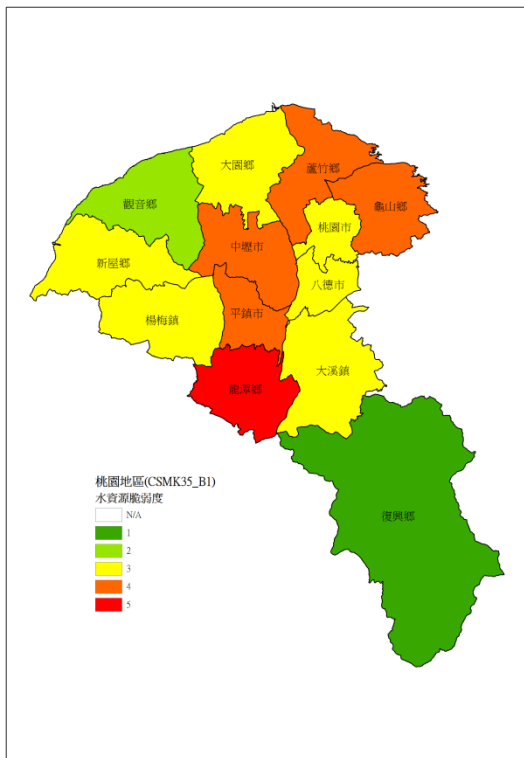
桃園地區_CSMK35_A1B



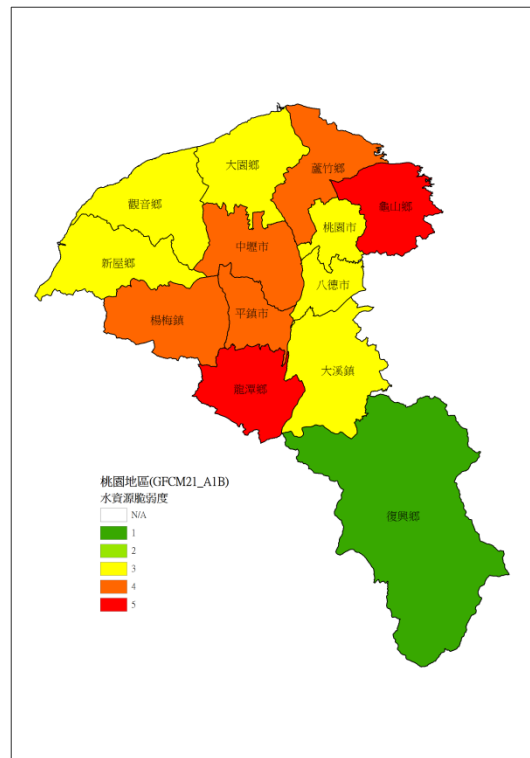
桃園地區_CSMK35_A2



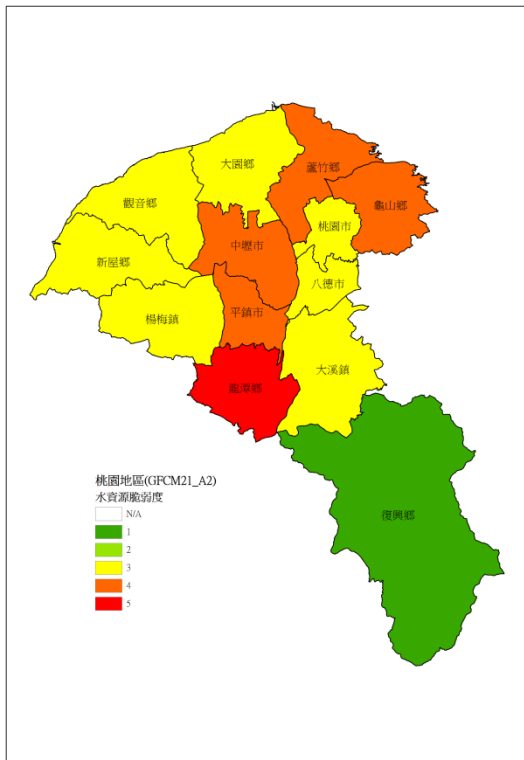
桃園地區_CSMK35_B1



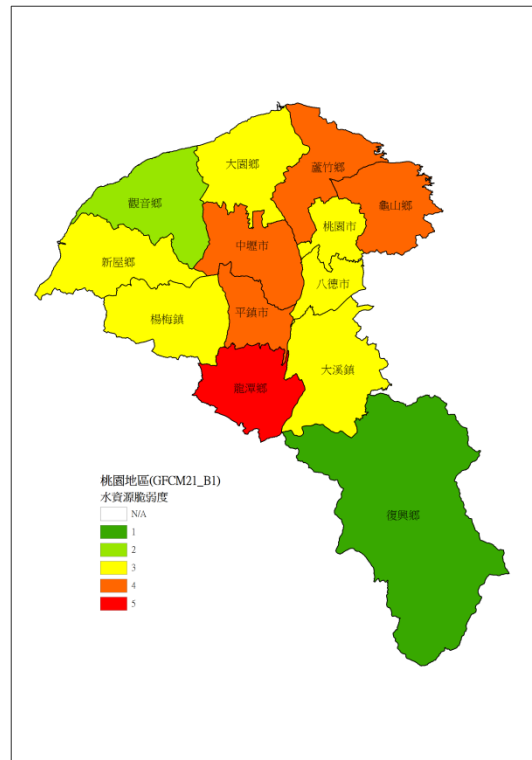
桃園地區_GFCM21_A1B



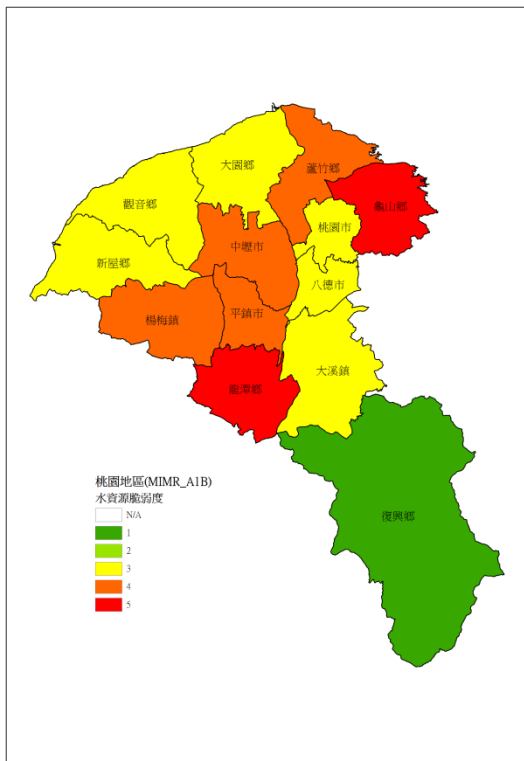
桃園地區_GFCM21_A2



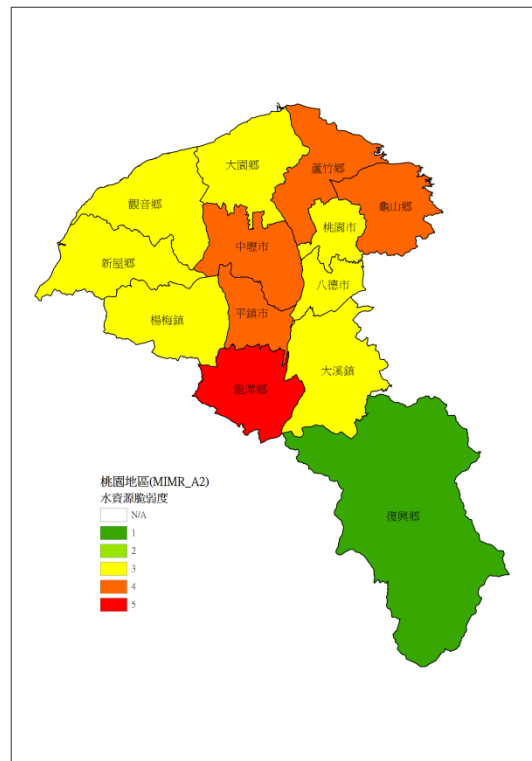
桃園地區_GFCM21_B1



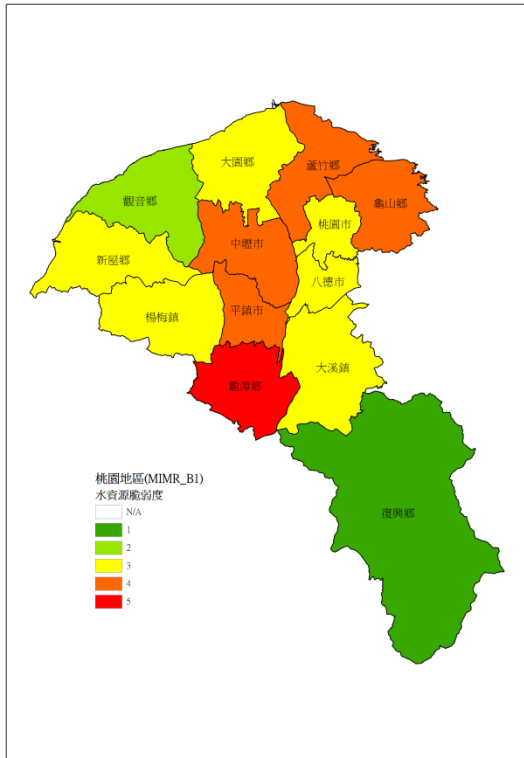
桃園地區_MIMR_A1B



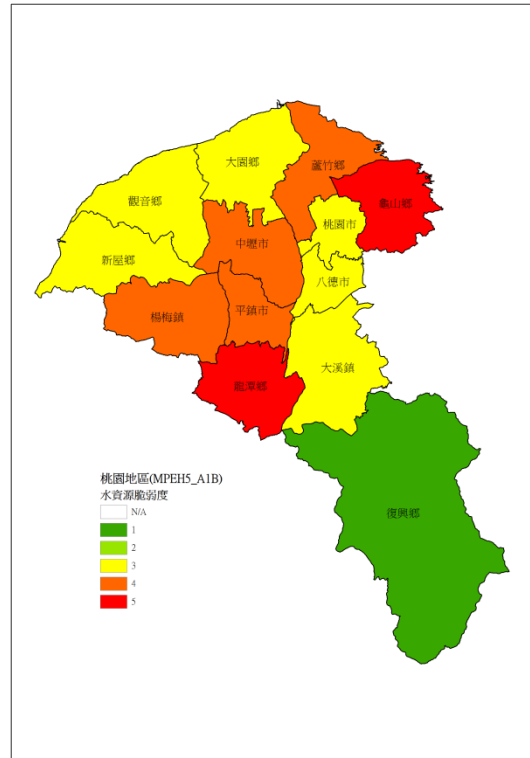
桃園地區_MIMR_A2



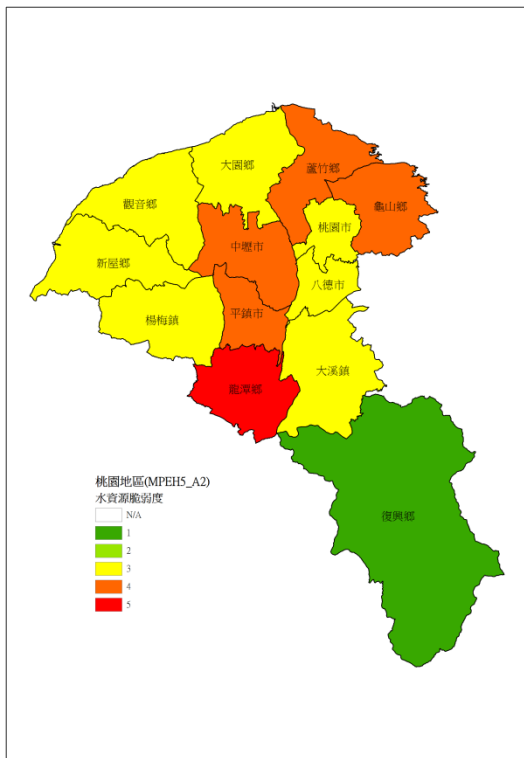
桃園地區_MIMR_B1



桃園地區_MPEH5_A1B



桃園地區_MPEH5_A2



桃園地區_MPEH5_B1

