

# 全球暖化對水資源之影響與調適

## Influence of Global Warming on Water Resources and Adaptations

童慶斌

國立台灣大學生物環境系統工程學系教授

陳思瑋

國立台灣大學生物環境系統工程學系專任助理

### 摘 要

全球暖化可能直接影響水資源，本研究將以系統動力模式作為評估工具，建置水資源系統供需模擬模式，並透過流量的驗證證明模式之正確性，以確保能合理的評估在氣候變遷下水資源系統變化的情形；未來全球暖化情境分析方面是根據大氣環流模式(GCM)模擬之預測值，然後再配合氣象資料合成模式，產生評估模式所需之輸入資料。將這所產生之資料輸入水資源系統動力模式，利用永續指標來探討水資源系統之永續性變化，並分析氣候變遷所帶來的衝擊，期能透過一些策略操作，使得水資源供水系統之使用更具有永續性。

關鍵字：系統動力學、氣候變遷、永續指標、水資源

### 一、前言

今年在德國舉行的世界八大工業國(G8)高峰會議於 2007 年 6 月份結束，議程當中除了以往的經濟、政治、社會等議題外，也特別針對目前全世界最火紅的話題-全球暖化及氣候變遷之問題達成協議，會中要求在 2009 年前制定出 2012 年京都議定書後的溫室氣體排放標準，並要求八大工業國及五個新興經濟體能確



切訂立出穩定地球大氣溫室氣體濃度的長期目標，以減輕氣候變遷所帶來的衝擊。

在台灣，同樣地正面臨全球暖化所帶威脅，2007年5月25日基隆測得5月最高溫 $37.3^{\circ}\text{C}$ ，打破2005年5月剛創下最高溫之 $37.2^{\circ}\text{C}$ ；氣候變遷不再只是一個口號、信仰，它是真真實實地發生在你我的身旁，從目前地球上各種現象加上科學上的種種證據，都一一的顯示出氣候變遷是正在進行中，而且它正無情地威脅人類的性命。聯合國特將島嶼國家列為氣候變遷下全球最脆弱之地區，同為島嶼的台灣，加上經濟發展及人口成長對環境帶來的負荷，更提高在氣候變遷下之脆弱度。所謂「知己知彼，百戰百勝」，首先先要清楚明白知道自己有那種合適的分析工具可以採用，且能洞悉瞭解「氣候變遷」此敵人，結合兩者後，分析評估未來氣候變遷可能所帶來的衝擊及影響，並及早擬定適當之調適策略，對抗氣候變遷所帶來的挑戰，必能大大提升戰勝氣候變遷的勝算，進而達到永續發展之願景。

## 二、氣候變遷衝擊、調適、與脆弱度

### (一) 氣候變遷衝擊

近世紀以來，由於工業革命開啓了世界快速發展的大門，隨著人口快速成來、科技日新月異，人類活動對氣候帶來了很大的衝擊，同時人類也製造了大量的溫室氣體，排入大氣中，目前大氣中二氧化碳的濃度比過去幾十萬年任何時間都高。由於溫室氣體在大氣中具有很長的生命期，溫室氣體對氣候的影響是長久的而且是全球性的，即使人類現在暫停一切有關人為的溫室氣體排放，其存留在大氣中的人為溫室氣體一樣會影響著地球。根據 IPCC 第三次評估報告指出，20 世紀全球地表溫度升高了大約 $0.6^{\circ}\text{C}$ ，20 世紀的最後二十年是最暖的二十年，20 世紀北半球地面溫度的增加比近 1000 年任何其他世紀都大，而受氣候變化最直接影響的即包括水資源。氣候變遷衝擊之研究，不僅分析平均狀態之改變，更應分析氣候可能之極端變異。過去之極端事件是否更頻繁？甚至是否將成爲常態？一旦極端氣候成爲常態，自然或人為系統是否能調適？

### (二) 調適與脆弱度

爲因應氣候變遷所帶來的衝擊，主要的工作項目可分作兩大項：減輕 (Mitigation) 及調適 (Adaptation)。減輕氣候變遷主要工作在減少溫室氣體排

放，減緩人爲對氣候衝擊。而在調適工作方面，就是擬定適當策略來降低氣候變遷所帶來的衝擊，因此必須強化自然與人爲系統面對氣候變遷之調適能力 (Adaptive Capacity)，以應付未來可能衝擊。調適策略的擬定必須考量不同地區與不同面向(Sectors)，必須符合環境與政經發展，因此必須有科學基礎之研究與分析。要建立有效調適策略與強健調適能力就必須要正確瞭解氣候變遷與其可能帶來之衝擊，及有效之工具可評估調適策略。

脆弱度是指系統考量衝擊與調適後仍可能發生之受損程度，簡單來說，脆弱度即表示透過調適策略仍不能消弭之衝擊，舉一個最簡易的例子，未來若有缺水 50 萬噸的危機，經由適當調適策略，例如增加蓄水設施或是透過水資源的調配來提升供水能力，但仍會有 10 萬噸的缺水危機，這 10 萬噸的缺水即爲脆弱度。脆弱度爲衝擊與調適策略之函數，不管自然或人爲系統之脆弱度會因爲氣候變遷衝擊而有影響，同時脆弱度會因爲適當調適策略而減輕不利衝擊而降低脆弱度，當然不當調適策略反而會強化氣候變遷衝擊。故要如何合理且完整的評估氣候變遷下之衝擊、脆弱度、調適項目是必要的，以對抗氣候變遷所帶來的挑戰，使人類能邁向一永續的願景。

### 三、研究案例 — 新店溪、大漢溪流域供水系統

水資源供水系統影響社會經濟之發展，主要水源之河川流量與主要用水需求之農業灌溉均直接受到氣候變遷之影響，如無適當調適策略，全球暖化可能導致供水系統脆弱度增加。本節將以北部新店溪流域供水系統爲例，說明氣候變遷衝擊評估流程。

#### (一) 氣候變遷衝擊評估流程

氣候變遷衝擊在探討未來氣候之影響，但未來尚未發生，並無記錄氣象與水文資料，因此必須借重電腦模擬模式進行分析。未來氣候情境部分主要借重全球環流模式(General Circulation Models, GCMs)，但其爲全球尺度，解析度較一般生態環境之研究區域大很多，因此應用在衝擊影響評估上，其預測值只用於設定氣候變遷預設情境，必須再配合氣象資料合成模式，進行蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo Simulation)，結合集水區流量與供水系統模擬模式進行試驗分析，且模擬模式以氣象資料爲輸入資料。在衝擊影響評估模式與氣候預設情境間，時間尺度會不同，例如預設情境往



往以月為尺度之資料，而衝擊模式有時需要以日為尺度之氣象資料，則此時需要氣象資料合成模式之協助。氣候變遷衝擊影響評估之研究最重要在預設情境之設立，利用各情境所提供之預測值修正溫度與降雨量月平均資料，將修正後未來的溫度及降雨量資料代入氣象資料合成模式中，可模擬得未來氣候之各模式預測之日溫度與日降雨量資料，輸入氣象資料合成模式產生評估模式所需要之氣象資料，最後由評估模式分析得知衝擊影響。將不同氣候變遷預設情境下之合成氣象資料輸入河川流量評估模式，模式中評估比較不同情境下低流量模擬結果之差異，可了解氣候變遷對河川極端流量之衝擊，最後由借由系統動力模式作為本研究之評估模式，以進一步分析得知衝擊影響，整個評估流程如圖 1。

本研究集水區流量模擬模式部分採用在台灣地區可提供良好模擬結果之 GWLF ( Generalized Watershed Loading Functions ) ( Haith and Shoemaker, 1987 ) 中流量模式作為流量預報之分析工具。本研究先以新店溪與大漢河流域為研究範圍，北勢溪之流量驗證圖如圖 2，其餘流域也都有良好的驗證結果，由實際與模擬資料之相關係數可知此模式之模擬結果在可接受範圍。

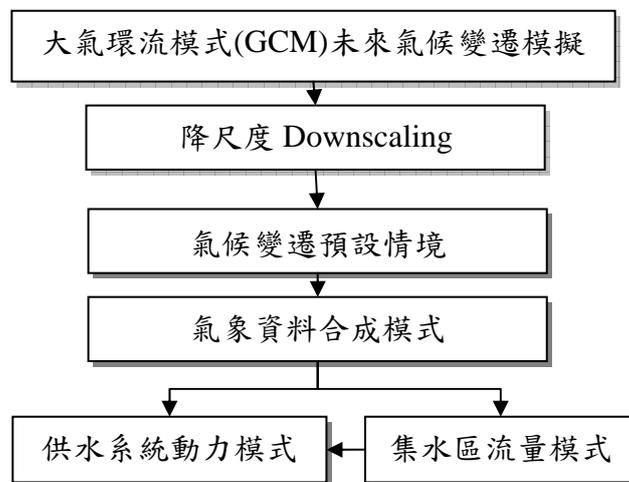


圖 1 氣候變遷衝擊評估流程

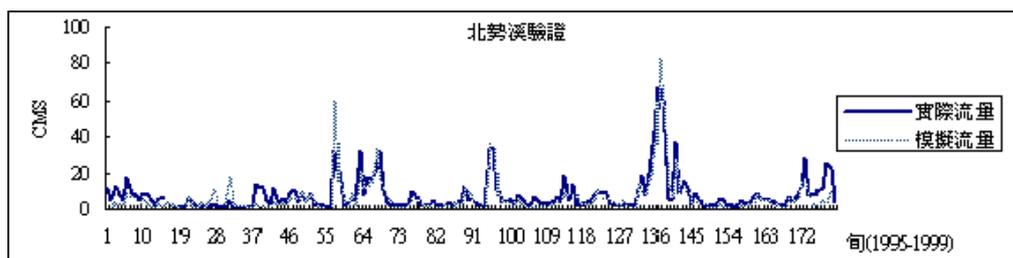


圖 2 北勢溪流量驗證

(二) 水資源系統動力模式

本研究的研究範圍為新店溪及大漢河流域，並將採用系統動力模式去建構出新店溪 - 大漢溪之水資源系統動力模式，由於系統動力學與時間演進具有密切之連動關係，其系統動力學之軟體 Vensim 在操作上亦比一般程式語言簡單，可用運用視窗化的圖形操作界面建立起所需的系統模式架構圖，再把系統相關因子原件化，賦於適當的數學式以呈現真實的狀況，再將這些原件組合起來並可建立起一系統，故非常適合作水資源系統之研究。參考相關報告（經濟部水資源局，1999；臺北自來水事業處，2002、2003）分析水資源系統（Tung et. al., 2006），本研究共分為三個系統-新店溪系統、大漢溪系統、台北自來水供水系統，新店溪大漢溪系統如圖 3。

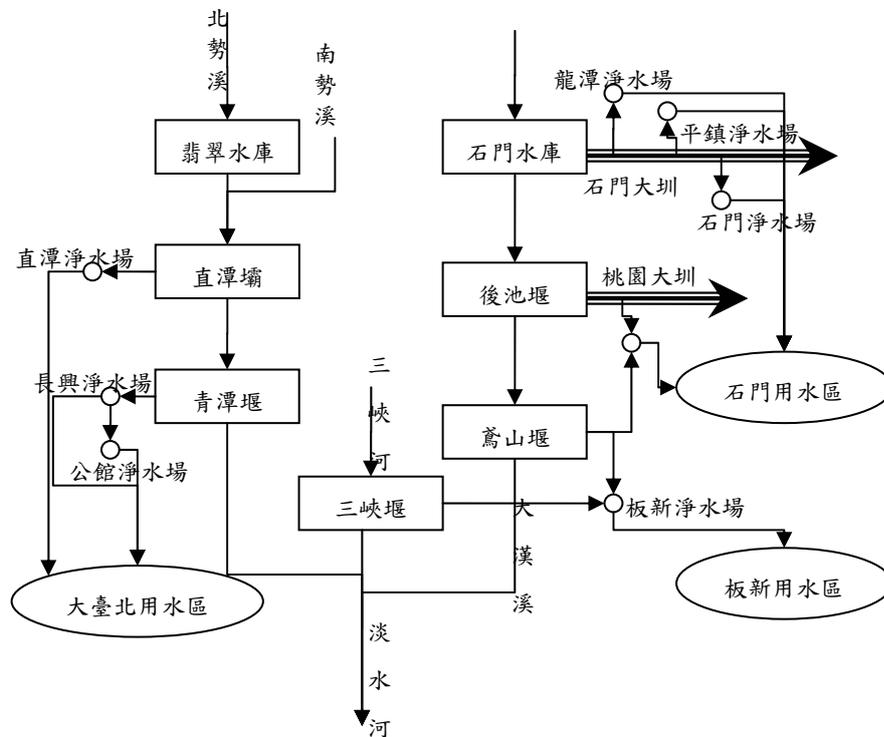


圖 3 新店溪與大漢溪水資源系統示意圖

爲了確定本模式的合理性，從一開始將上游流量資料輸入模式後，模式中各取水設施原件會根據需水量所推算的需水量去決定所取水量，並且操作方式是與現實情況相同，所以爲了要驗證模式是否能合理的反映出水資源系統之操作特性，特採用經用各取水行爲後的下游流量測站進行驗證，例如圖 4 便列出新店溪之下游流量驗證示意圖，以確保本水資源系統動力模式可合理的進行各項評估工作。

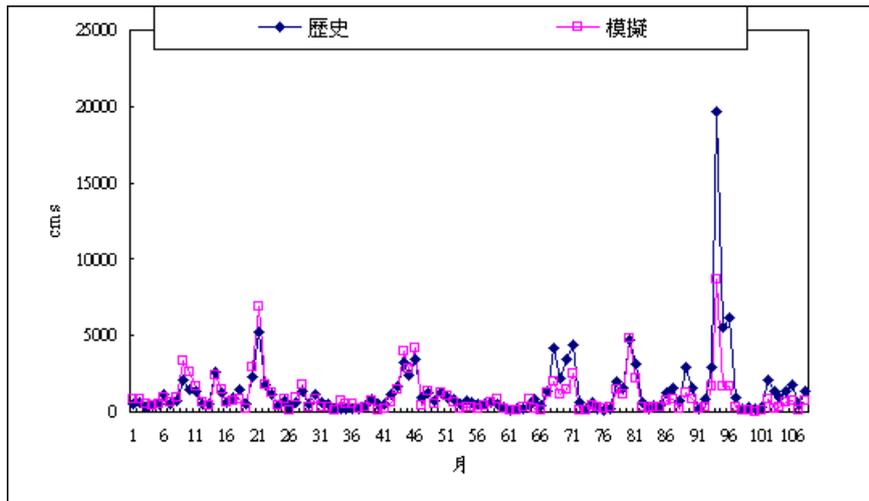


圖 4 新店溪歷史與模擬逐月流量驗證結果圖

### (三) 永續指標

如何定義出永續指標來反映水資源系統的永續性，本研究首先定義出供水環境承载力，當總需水量小於環境承载力時，其指標定為 1，表示此水資源使用是符合永續發展的，而總需水量大於環境承载力時，指標值便會從 1 遞減為 0，離永續性越遠，一旦超過臨界值，指標值永遠為零，。而永續發展指標等於 1 時，代表的是水資源使用情形具有永續性，但不是代表永遠不缺水，在定出供水規劃準則時，是以年缺水指數(SI)等於 1，來求得環境承载力，年缺水指數(SI)等於 1 其中即隱含了平均每年缺水 10%，並非指標值等於 1 時，水資源系統會永遠不缺水。本研究假設若總計畫需水量超出環境承载力的 10%時，整個永續發展指標將永遠等於 0，故永續發展指標的公式如下：

$$SDI = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq C \\ \text{Max} \left[ 0, y = \frac{1}{(1.1-1)} \times \left( 1.1 - \frac{x}{C} \right) \right] & \text{if } x > C \end{cases} \quad (1)$$

### (四) 氣候變遷對供水系統永續性之衝擊評估

而本研究之氣候變遷預設情境採用 IPCC 提供之 SRES 情境輸出資料，而其中 SRES 預設情境包含 A2 及 B2 兩種排放情境及由 IPCC 所提供之六個模式，並就短期（西元 2010~2039 年）作探討，之所以就短期作研究主要原因是若探討中、長期氣候變遷之影響，其時間點距目前很久遠，屆時現有的水資源系統如水庫，或已達使用年限，或因各種主、客觀

因素而必須有所改變，故以現有之水資源系統架構來進行評估不具任何意義。

在未來需水量部分，本研究以 2025 年作為代表，根據相關之預測成長趨勢及評估模式，模擬研究區域之民生、工業，其中民生、工業用水之成長趨勢係依據綱領計畫預測值，計算在 2025 年民生、工業需水量；農業用水部分，由於農業需水量會受到氣候變遷的影響而有所變動，本研究依據政府農業用水政策，以維持現況不成長的方式，故未來之農業用水量將以維持現況用水量為原則，故本研究以現有之農業用水保留量視為各用水區未來之農業用水。各個氣候變遷預設情境之下模擬結果，如表 1 與表 2 所示。

表 1 SRES A2 情境分析結果

GCM Model	臺北區			板新區			石門區		
	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI
CGCM2	3378712	↑	1.00	1322000	↑	1.00	1348274	↑	1.00
HADCM3	3374767	↑	1.00	1331962	↑	1.00	1348274	↑	1.00
CSIRO-Mk2	3267260	↓	1.00	1188751	↓	1.00	1234849	↓	1.00
CCSR	3317562	↓	1.00	1288860	↓	1.00	1324603	↑	1.00
R30	3353068	↑	1.00	1302964	↑	1.00	1322630	↑	1.00
ECHAM4	3215973	↓	1.00	1143677	↓	1.00	1140164	↓	1.00

表 2 SRES B2 情境分析結果

GCM Model	臺北區			板新區			石門區		
	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI	環境承载力 (CMD)	變化情形	SDI
CGCM2	3293890	↓	1.00	1253847	↓	1.00	1305863	↓	1.00
HADCM3	3297836	↓	1.00	1215775	↓	1.00	1286137	↓	1.00
CSIRO-Mk2	3263315	↓	1.00	1178690	↓	1.00	1206247	↓	1.00
CCSR	3350110	↑	1.00	1304937	↑	1.00	1326575	↑	1.00
R30	3229781	↓	1.00	1176718	↓	1.00	1290082	↓	1.00
ECHAM4	3286986	↓	1.00	1256904	↓	1.00	1298959	↓	1.00



過去研究雖指出在水文上，氣候變遷將導致豐枯水期流量更極端化，差異也會變大，但從分析結果發現，採取適當調適策略，如台北供水區跨域支援板新供水區與改善售水率等，仍能有效減輕氣候變遷所帶來之衝擊，因此，有些情境雖供水承载力下降，但永續性仍能維持。表 1 與表 2 中部分情境承载力上升原因主要為情境預測降雨量增加。由表 1 與表 2 可看到不同情境有差異，其隱含在氣候變遷研究上必須強化不確定性分析，與建立根據此不確定性之風險管理機制。

## 五、結論與建議

根據各氣候變遷預設情境下所模擬的結果，雖然部分情境下供水承载力有下降趨勢，但在假設達成預定售水率與跨區支援等之改善措施，永續發展指標都可維持在 1，即短期而言供給仍可滿足需求。另外，本研究探討了在氣候變遷下水資源永續性變化的情形，其結果是在短期氣候變遷下仍符合水資源利用的永續性，但並不代表以目前水資源系統在氣候變遷下是完全不缺水的，由於供水承载力分析依據為年缺水指數為 1，其隱含了平均每年約缺水 10%，故永續發展指標等於 1 並非意味著完全不缺水，這是值得注意的。

氣候變遷影響除了帶來長期趨勢不斷改變，也導致短期變異增加，因此，因應氣候變遷當務之急為建立長期預警，瞭解長期趨勢是否已超過系統當初設計可因應處理之範圍，如已不足以負荷，則必須啟動策略規劃加以修正與強化系統調適能力；此外，必須增加系統因應之彈性，如供水系統應加入地下水源與農業迴歸水等備援用水之考量，並發展結合季節性預報能力之風險管理措施，以因應較大之氣候變異。由於氣候變遷影響顯著，雖然是否發生與發生程度之量化仍有相當之不確定性，但仍須建立適當因應機制，藉助預警機制在適當時機採取適當措施進行風險管理，以降低氣候變遷可能帶來之衝擊。

## 參考文獻

1. 經濟部水資源局，1999，「台灣地區北部區域水資源綜合發展計畫(II)」，經濟部水資源局。
2. 臺北自來水事業處，2002，「臺北地區供水系統合理調配暨危機管理之探討」。

3. 臺北自來水事業處，2003，「供水管網改善計畫-期初報告」。
4. IPCC WG I, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
5. Haith, D. A. and Shoemaker, L. L. 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resources Bulletin* 23(3): 471-478.
6. Tung, C. P., Chen, Y. J., Chen, S. W., Liu, T. M. 2006. Sustainability Appraisal of Taipei Municipal Water Supply System. *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*. 16(5): 319~325.