

# 物質流及系統動力模式分析淡水河流域水資源供需情勢

童慶斌

## 摘要

本研究以流域為系統範圍，並引進物質流概念，探討台灣水資源之利用與管理。另外再以淡水河流域所含涵蓋之大台北地區為研究區域，配合 VENSIM 建置水資源供水系統動力模式，及提出水資源永續利用指標之概念，於未來整體需水量提高之前題下，分析淡水河流域水資源供需情況。未來此模式可進一步應用於探討改善水資源用水效率之政策。

## 一、前言

物質流分析(Material Flow Analysis, MFA)是一直是國際間所認可用來評估環境政策的重要工具之一。自 19 世紀中期，美國便開始提倡物質流的概念，由於文明開發以來，人類便開始不斷的使用各種物質、物資以推動社會經濟的進步，尤其是工業革命之後，人類對於各種物質的使用需求量大幅提高，亦開始意會到物質是否能持續獲得及使用將是一個重要的議題，也使得美國於 1952 年由 Paley 委員會(Paley Commission)提出一份總統物質政策委任書(President's material policy commission)，其中強調了系統性追蹤物質流向的重要性。

近十數年來在歐美與日本等國更是開始進行多元化的物質流分析研究，例如美國紐澤西州立法規定所有的勞工需每年提出一份有毒物質的報表，此份報告由紐澤西州政府環境部門應用於收集化學物質生產量、環境排放量與傳送、及防止污染之相關資訊(Dorfman and Wise 1997)。歐盟採用 Eurostat(2001)提出的架構做為經濟體之物質流會計及物質收支的應用，其中包括經濟上通用的物質流會計(material flows accounts)及物質收支(material balance)，以顯示經濟體內的物質輸入、輸出與累積量的變化；及物質輸入輸出表格，以綜合描述環境與經濟體間，及經濟體內的物質流，並清楚區分物質的種類及產品的種類。日本於平成 15 年(2003 年)年通過「循環型社会形成推進基本計畫」後，每年皆利用物質流分析對國內所有的資源進口、出口與循環等資料進行詳細的調查，並將結果發表於「循環型社會白書」中，一方面了解國內資源的運用與流動情形，並期望能由其中找出可以改進的切入點，以致力於達到 3R (即 Reuse、Reduce、Recycle) 的理想。

由於物質流的概念在於找出一個系統中物質之變化情況，及其投入與產出之詳細情形，因此，本研究嘗試將物質流的概念應用於流域水資源的管理問題中，將流域視為主要系統，探討水資源的應用與管理問題，並藉由系統動力模式分析大台北地區之水資源供需情形，以了解氣候變遷下大台北地區水資源系統的水資源供給能力是否遭受衝擊，並期待能提出新的管理思維與策略，以於水資源供給與需求量持續變化的未來達到水資源的最佳利用，邁向永續發展的最終理想。

## 二、物質流定義及相關文獻

根據美國 National Research Council of the National Academies 所出版「Materials Count」(2004)一書中提出，物質流的分析必須針對一個具明確邊界系統，並追蹤各層面自環境流入或流出系統之物質；日本環境省所出版「循環型社會白書」則定義物質流分析為針對某一特定區域範圍於特定期間之內，對於該範圍內物質所的總投入量、區域內物質的流動、區域外物質的排出量等進行統計，計算其總量或是特定物質的量的方法。

物質流分析亦被稱呼為「物質流會計 (Material Flow Accounts)」或是「物質收支分析 (Material Balance Analysis)」。物質流分析的方式有許多種，於整體面上可能著眼於經濟活動所伴隨的物質流出、入總量之推估，於環境面上則可能著眼於重要性較高的特定物質進行詳細的分析。因此，物質流可算是掌握經濟活動對於環境影響的評估工具，可用以協助評估經濟活動中天然資源與其他資源量的使用，並從中瞭解資源浪費的癥結，對於環境政策上的擬定具備相當重要的意義。

日本政府於平成 15 年(西元 2003 年)所決定的「循環型社會推進基本計畫」中，則將物質流分析的三項基本指標導入數值指標的概念，即：進口（資源生產性 =  $GDP / 資源投入量$ ）、出口（最終廢棄量）以及循環（循環利用率 =  $資源循環量 / 資源投入量$ ）。

而國際會計師協會 (International Federation of Accountants, IFAC) 則認為，一個組織或企業應針對其所有的物質輸入與輸出進行追蹤，並確保沒有任何的能源、水資源或是其他物質的量在計算時遭到被忽略。而上述計算某組織之能源、水、物質與廢棄物的投入-產出的會計方式，則稱為「物質平衡」(material balance) 有時亦被稱作「投入-產出平衡」(input-output balance) 或是「質量平衡」(mass balance)。

Eurostat(2001)提到大部份歐洲國家內之統計機構皆有國家經濟體尺度之資料需進行物質流分析，而奧地利是第一個建立經濟體尺度之物質流會計之國家，而目前至少包括奧地利、丹麥、芬蘭、德國、義大利、荷蘭、瑞典、英國在內的歐盟國家，皆以經濟體為範圍進行物質流分析(如圖 1)。

物質平衡除可應用於前述經濟體尺度外，更可以應用於各種不同的層級上，例如在資訊的收集上，其範圍可針對整個組織，或是僅針對特定場所、原料、污染流、製程或是裝備線、產品線或服務線等……，視資訊的用途而定。而透過各種物質的管理措施，對物質的流動進行完整的追蹤，包括物質的採購、運送、庫存、內部分配、使用、產品運送等過程，甚至於廢棄物的收集、回收、處理以及棄置，所有的數據應該達成平衡。

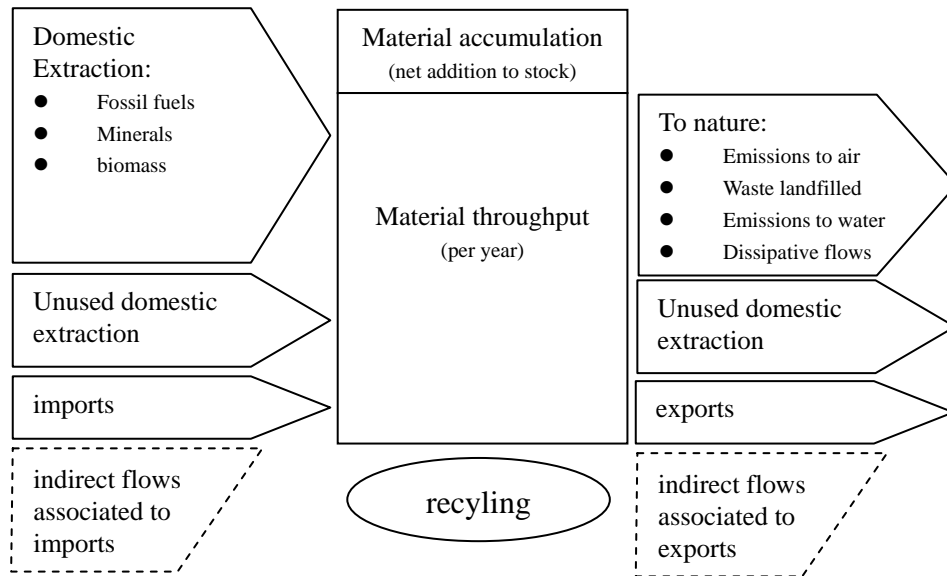


圖 1 經濟體尺度之物質收支圖(Eurostat,2001)

### 三、物質流分析台灣地區水資源概況

以物質流的分析概念來檢視流域水資源的管理問題，將發現兩者間具有許多相似之處(如圖 3)。

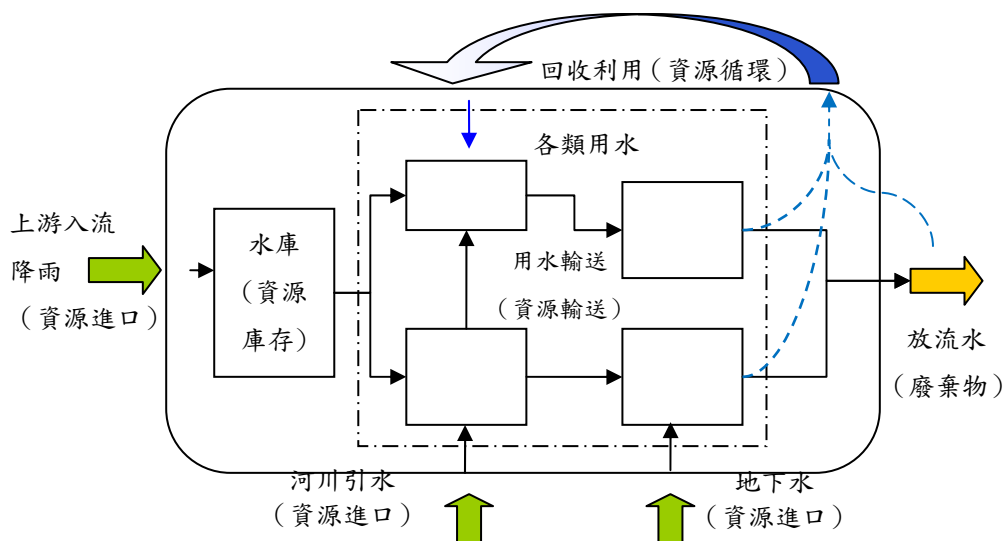
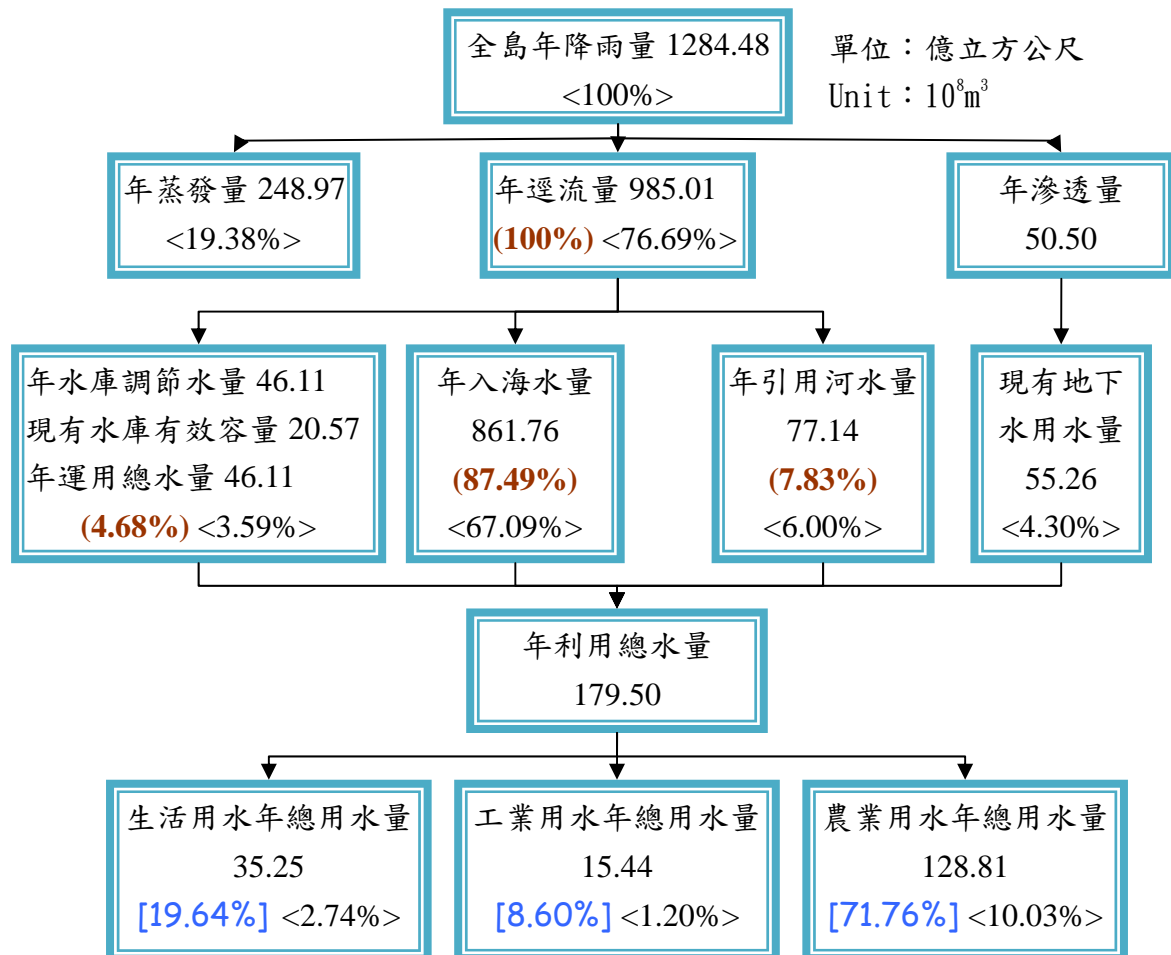


圖 3 水資源系統之物質流分析示意圖 (本研究自行繪製)

就分析範圍上，流域水資源的整體分析系統即可視為進行物質流分析時的系統範圍，而「水資源」本身即為唯一進出物質流系統的物質，而流域水資源系統中，水庫上游的入流量、降雨量以及河川引水量、地下水抽取量等皆可視為物質流分析中資源的進口，水庫則類比於資源的庫存。一般的物質流研究有一定比例都是以工業上的生產系統作為分析對象，而流域水資源管理則是以流域本身作為分析系統，相較下分析規模可說是兩者間最大之差距。由工業尺度來進行水資源的物質流分析，或是由流域尺度進行水資源的物質流分析，雖然出發角度不同，

若就水資源整體物質流的架構來檢視，前者乃由下而上的分析，後者則由上而下進行探討，兩者之分析結果勢必將相互結合，形成一個大至流域整體，小及單一地區、水庫甚至工廠的完整物質流系統。

台灣地區的年平均降雨量大約 2500 公釐，為世界平均降雨量的 2.6 倍，然而擁有豐沛降雨量的台灣，卻因為本身的地形特性以及降雨的時空分配不均等問題，導致實際可用的水資源大幅減少。下圖 4 為經濟部水利署所統計之民國 94 年台灣本島水資源運用情況，由下列數據顯示出，台灣每年的總降雨量約有 77% 會成為河川逕流量，同時也是台灣地區最重要的水資源，然而逕流量中卻有將近 67% 的水資源直接流入海中，並未受到妥善利用。在台灣地區年總用水量中，農業用水約占整體用水之 72%，民生用水則占約 20%，其餘則為工業用水，可見農業用水仍然為台灣地區用水之大宗。此外在地下水方面，民國 94 年之地下水入滲量為 50.50 億噸，然而該年之地下水使用量卻達 55.26 億噸，顯示出台灣地區於超抽地下水的現象依然存在。



< > 以降雨為基數；( ) 以年逕流量為基數；[ ] 以年總利用水量為基數

資料來源：經濟部水利署

圖 4 臺灣本島水資源運用實況

在台灣地區的可用水資源之中，水庫所調節的量約占全年降雨量之 3-4%，由河川直接引水的量占約 6%，剩下的需求的則由地下水所供應。相較於河川引水以及地下水抽取量而言，水庫的調節水量雖然較低，然而河川引水量受到豐、枯水期的影響而有所變動，其不確定性較高；地下水亦處於超抽狀態，若提昇其抽水量勢必將導致其他層面的負面影響，整體而言水庫對於台灣水資源的供應仍然佔有舉足輕重的地位。

另外若單獨檢視北區包含臺北縣市、基隆市、宜蘭縣、桃園縣、新竹縣，總面積為 7346 平方公里之現況水文學量，童慶斌等(2002)將地下水補注量視為水平衡方程式之殘差項，先計算降雨量(P)、逕流量(Q)與蒸發散量(ET)，並假設長期水平衡分析下，地下水儲蓄改變量相對於上述水文學量而言可忽略不計，則地下水補注量可估算為 P-Q-ET。為考量資料一致性與空間分布均勻化，在雨量站部分採用福山、梅花、宋屋、思源、古魯、臺北、竹子湖、宜蘭、基隆與新竹等 10 個測站，逕流量部分以 SCS curve number 方法推估，蒸發散以 Hamon (1963)公式推估潛勢蒸發散再修正作物係數得實際蒸發散量，其推估結果於現況水文學量部分，在現況水文學量部分，北區之年降雨量為 230 億立方公尺、年逕流量為 97 億立方公尺、年蒸發散量為 65 億立方公尺，所得之地下水補注量為 68 億立方公尺。由平均降雨深度來看，北區之年雨量為 3130 毫米，豐枯水期降雨比例為 63：37，逕流之豐枯水期比例為 76：24，蒸發散之豐枯水期比例為 68：32，地下水補注量之豐枯水期比例為 40：60。表 1 為北區逐月水文學量比較。

表 1 臺灣北區逐月水文學量(單位：mm)

月份	降雨量	逕流量	蒸發散量	地下水補注量
1	145	31	35	79
2	232	61	35	136
3	199	44	52	103
4	188	48	71	69
5	264	88	97	78
6	292	122	114	55
7	225	107	120	-2
8	356	195	110	50
9	464	274	86	105
10	368	212	70	85
11	246	100	52	95
12	151	39	41	71
年總量	3130	1322	883	925
豐水期	1969(63%)	999(76%)	598(68%)	371(40%)
枯水期	1162(37%)	323(24%)	285(32%)	554(60%)

以年總量而言，逕流量佔年降雨量之 42%、蒸發散佔 28%、地下水補注量佔 30%；在豐水期時，逕流量佔降雨量之 51%、蒸發散佔 30%、地下水補注量佔 19%；在枯水期時，逕流量佔年降雨量之 28%、蒸發散佔 25%、地下水補注量佔 48%。分析結果顯示在豐水期時因較大降雨事件較多，逕流量所佔比例較高，蒸發散亦因夏季太陽輻射旺盛而較高，可補注量所佔比例相對較小。而在枯水期時因雨量多較小，表土含水量多不足，降雨多先補注入滲，逕流產生相對較小，加上冬季太陽輻射較弱，蒸發散量亦較小。

以上資料收集與分析在於以物質流觀念，分別了解台灣全區與北部地區之水資源概況。對於今日的台灣而言，在面對社會工商業的持續發展，以及總人口逐漸成長的壓力下，對於水資源的需求必定是有增無減，因此瞭解水資源，以進行水資源之開發與管理，進而推求可供水量，甚至因應氣候變遷的衝擊，勢必成為台灣邁向永續發展的一大課題。

### 三、水資源永續利用分析

#### (一) 分析工具

本研究應用物質流概念進行淡水河流域水資源架構之分析管理，然而物質流分析僅為一分析方式，在建構流域水資源之物質流系統架構後，若欲針對研究中的假設進行進一步的分析與模擬工作，仍須仰賴其他輔助的物質流分析工具之協助。在進行物質流分析的過程中，本研究以美國麻省理工學院(1961)發展之系統動力模式建構出淡水河流域資源系統之基本架構，藉由系統動力模式的協助，將流域水資源物質流架構以系統動力模式元件的方式加以描述，包括儲存(stock or level)、流動(flow or rate)以及助動(converter or auxiliary)元件，並透過模式的計算、分析功能，了解所建構物質流系統的特性，進而分析供水系統之供給量及永續發展指標的變化。

#### (二) 研究流程

##### 1.系統動力模式之建構

本研究以大台北地區水資源系統為主要研究區域，探討台北、桃園、板新、基隆等供水區之水資源供給情形。首先透過資料收集與文獻回顧，了解淡水河流域之各項水利設施架構及供水系統管線，以建立淡水河流域水資源系統架構，下圖 6 為淡水河流域中，新店溪與大漢河流域水資源系統示意圖。

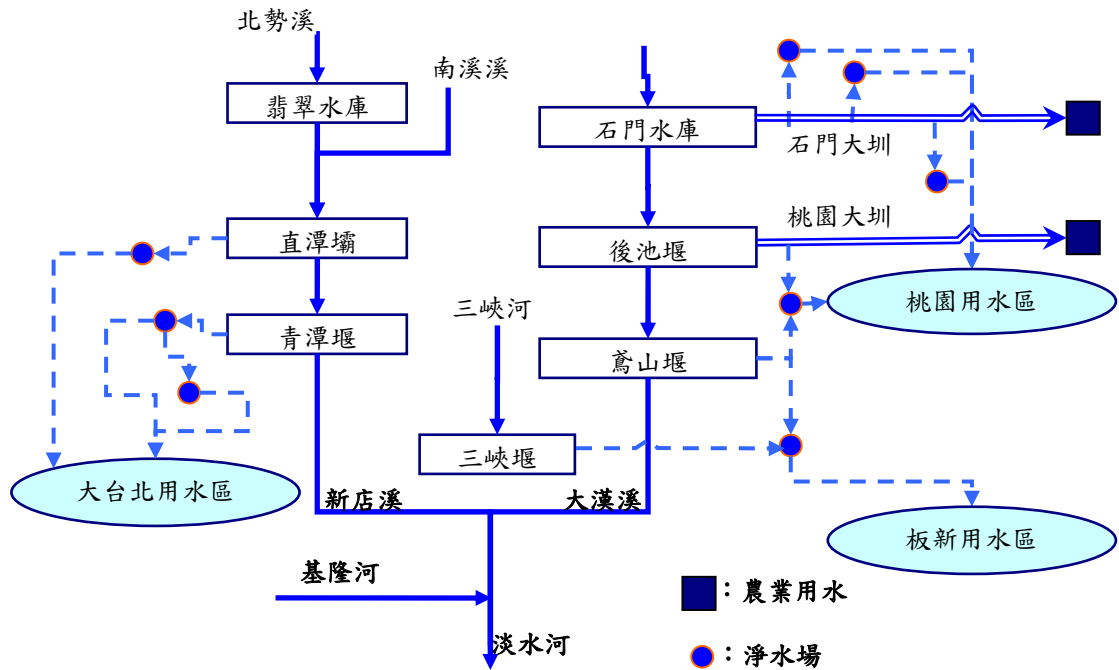


圖 6 新店溪與大漢溪水資源系統示意圖

## 2. 未來需水量情境分析

系統動力模式建構完成後，為了解未來大台北地區之用水量變化情形，需進行未來用水情境之分析與假設。本研究以 2021 年作為代表，藉由資料收集與文獻回顧，分別就生活、農業與工業等三大用水設定其未來之可能需水量，相關資料分如下述：

### (1).生活用水

在生活用水上，本研究以水利署水利規劃試驗所於「北部地區水資源利用整體檢討規劃(2)－水源及供水系統檢討暨調查規劃」中所推估的資料，作為生活用水之依據，並以中成長趨勢資料為主，相關資料如下表 2 所述。

表 2 2021 年生活用水量推估相關參數值

供水系統	供水總人口 (萬人)	普及率(%)	每人每日用水量 (公升)	抄見率(%)
臺北	386.14	99.9	364	66.77
板新	200	99.7	310	81.90
桃園	205.41	98.6	290	76.65
基隆	95.9	98.8	335	58.81

### (2).工業用水

在工業用水方面，其需水量亦根據水規所「北部地區水資源利用整體檢討規

劃(2)－水源及供水系統檢討暨調查規劃」所提供之工業用水量資料，同樣以中成長趨勢為主，相關數據如下表 3 所述。

表 3 2021 年工業需水量推估

供水系統	低成長	中成長	節水中成長	高成長
板新	11.89	11.89	10.7	17.75
桃園	55.32	63.81	58.81	64.89
基隆	2.54	3.12	2.96	5.16

### (3). 農業用水

在農業用水上，本研究採用北區水資源局所提供計畫用水量之平均值作為石門及桃園兩灌區的農業需水量，其餘各灌區則是直接取計畫用水量之平均值。此外在未來情境方面，依據政府農業用水政策，維持以現況不成長的方式，故未來之農業需水量將以維持現況用水量為原則，以現有之農業計畫需水量視為未來之農業用水。

## (三) 分析結果

### 1. 水資源永續利用現況分析

建立水資源系統動力模式後，必須先針對水資源永續利用作現況分析，而在現況分析上，本研究設定 1991~2001 年為資料模擬之時間，並嘗試將 2004 年 7 月完工之板新工程改善計畫一期工程納入系統，以作為未來情境之分析參考依據。下表 4 為水資源永續利用現況分析結果，表中之供給量定義為水資源系統之最大可供水量。

表 4 供水能力現況分析(1991~2001 年)

用水區	無考慮板一計畫		考慮板一計畫	
	需求量	供給量	需求量	供給量
臺北區	220.9	282.0	220.9	348.7
			52.6(支援板新)	
板新區	70.6	52.2	52.6(臺北支援)	69.3
			18.0	
桃園區	66.8	108.9	66.8	108.9
基隆區	22.9	36.3	22.9	36.3

在未考慮板一計畫的情況下，臺北、桃園及基隆用水區之供水並無問題，然而板新地區的供水狀況則較為窘困，也顯示出板新計畫的存在理由。在將板一計畫列入考量後，考慮板一工程計畫後，臺北用水區因多了直潭淨水場的第五座淨水設施，設計處理能力增加，所以臺北區的供給量增加了每日 66.7 萬立方公尺；



而板新地區則由每日 52.2 萬立方公尺上升到 69.3 萬立方公尺，使得板新供水區的供水問題得以獲得紓解。

## 2. 氣候變遷衝擊水資源系統

在水資源未來供需情勢分析上，本研究將 2021 年之未來需水量情境帶入水資源系統動力模式進行推估與分析，其結果如下表 5 所述。根據資料所推估而得的需水量，可發現臺北地區的變化不大，其成長並不顯著，而板新與桃園供水區之需水量則呈上升的狀態（板新地區的實際需水量是仍包含臺北區的支援每日 53 萬立方公尺，共為每日 92.2 萬立方公尺）。由於板新地區獲得臺北自來水系統的支援，故其供水可滿足需求量，而桃園地區及基隆地區之供給量皆小於推測之需求量，可預見該兩地區未來供水情形並不是很充裕。現階段在桃園地區已規劃有中庄調整池計畫、桃竹雙向聯通管工程、及海水淡化廠等多個水資源經理方案規劃執行中，而基隆地區亦有八堵抽水站與新山淨水場改善、基隆河新水源開發計畫、及台北基隆雙向聯通管路工程等方案研議中，其目的皆在於提高桃園與基隆地區的供水能力，以因應未來需水量的成長。

表 5 未來（2021 年）之水資源利用永續性之變化(單位：萬 CMD)

用水區	現況		未來	
	1991-2001 年 平均需水量	供給量	短期預設情境 平均需水量	供給量
臺北區	273.5	348.7	277.6	377.9
板新區	18.0	69.3	39.2	66.7
桃園區	66.8	108.9	145.2	127.8
基隆區	22.9	36.3	48.4	40.4

## 四、結論

本研究嘗試將物質流分析的概念應用於流域水資源永續利用與管理問題中，除分析全台及北台灣之水資源現況外，並以系統動力模式作為分析工具，分析大台北地區於未來水資源使用量改變下之水資源永續利用情況，其結果亦顯示出桃園供水區於本研究所設定之未來水資源使用情境下，可能發生水資源供應不足的問題，未來桃園、基隆地區應考量多元化之水資源調適方案，方可舒緩其缺水問題，甚至因應可能之氣候變遷衝擊。

## 五、參考文獻

1. 日本環境省，2006，「平成 18 年版 循環型社會白皮書」
2. 日本環境省，2007，「平成 19 年版 環境/循環白皮書」
3. 經濟部水利署，2007，「自強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力 1/2」
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2006，「北部地區水資源利用整體檢討規劃

(2)-水源及供水系統檢討暨調查規劃」

5. Dorfman, M.H., and M. Wise, 1997, Tracking Toxic Chemicals: The Value of Material Accounting Data, Newyork: INFORM, Inc., 80pp.
6. Eurostat, 2001, Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 92pp.
7. IFAC, 2005, "International Guidance Document Environmental Management Accounting"