

利用資料包絡分析與層級分析法評估台灣六都水資源利用指標

喻芷妤

陸軍軍官學校管理科學系

摘要

水資源短缺和氣候變遷是當今面臨的兩大挑戰，對人類社會、經濟和生態環境都帶來了深遠影響，極端氣候頻率增加，加劇水資源短缺問題，同時也會對水資源的品質造成威脅。而全球人口持續增長，水資源短缺問題在各地日趨嚴重，在短時間內我們無法停止氣候變遷，我們需要採取綜合性的應對措施，加強水資源管理，台灣的水資源大部分作為農業用途，近年來農業用水雖有減少的趨勢，但隨著國民所得與生活水準的提高及產業發展轉型，導致民生用水、工業用水等公共用水之需求逐年提升，此外，基礎設施老化、漏水、農業灌溉不當以及家庭用水習慣不佳，導致用水浪費，因此，本研究使用水資源利用效率指數評估台灣六個直轄市水資源利用效率，結合DEA的CCR模型與AHP方法，分析台灣民生用水、工業用水及農業用水效率，以及主要影響因素，希望透過本研究提出的數據，找出水資源利用效率不彰的原因，以改善長期水資源浪費問題。

關鍵詞：資料包絡分析(DEA)、層級分析法(AHP)、水資源、利用效率

一、緒論

(一)研究背景

台灣屬於亞熱帶地區，季風氣候明顯，年平均降雨量約2500 mm，是世界平均的2.6倍，降雨空間與時間上分布不平均，年降雨量約80%集中於每年五月至十月，南北差異較大。北部地區雨量集中在梅雨季，而南部則多受颱風影響，水資源集中在有限的地區，河川多屬於荒溪型河川。加上地形複雜，全島面積30%是山地，40%是丘陵、台地，30%是平原，河川多短

小、陡坡流急落差大，水資源並不容易保留，年降雨量有近 60% 直接流入海中，近 20% 蒸發，即使降水充沛，但因保留不易，仍被列為缺水國家，因此，台灣必須正視水資源管理問題，提出更有效水資源管理方式，本研究採用水資源利用評估指標來進行水資源管理。

(二)研究區域概述

台北市在日治時期就已成為統治中心，國民政府遷台後，將台北設為首都，加

速了台北市的都市化進程，目前更是台灣的政治、經濟和文化中心；新北市早期主要以農業、漁業為主，並發展了淡水和瑞芳等貿易港口，隨著台灣工業化的推進，新北地區工業區逐漸形成，成為台北市的工業衛星城市，容納大量工廠及人口，成為台灣人口最多的都市。桃園市早期以農業為主，主要生產稻米和茶葉，1970年代起，設立多個工業區，發展電子、製造和物流業，成為台灣工業的重要據點，是台灣的工業重鎮和國際交通門戶。台北市、新北市與桃園市為淡水河流域範圍，主要支流包含大漢溪、基隆河、新店溪，分別發源於品田山、獅公髻尾山及鶯子嶺北側標高約700公尺處，流域面積2,726.00平方公里，為臺灣第三長之河流，河流全長約158.7公里僅次於濁水溪及高屏溪。淡水河系流域位於台灣北部(北緯 $25^{\circ}14'$ - $25^{\circ}14'07$ ，東經 $121^{\circ}24'$ - $121^{\circ}31$)，屬於亞熱帶氣候區，年平均溫度約 21.7°C 。冬季盛行東北季風，降雨甚多；夏季盛行西南季風，燠熱而多陣雨；颱風期間常降豪雨，易致使水災。流域內主要降雨集中在4-5月之梅雨季、7-9月之颱風雨及12-2月之東北季風雨，具有流域內之降雨以平地向山區遞增，迎風面雨較背風面雨大等特性乾濕季不明顯，全流域之平均年雨量為2966.1mm，約佔北部區域年總雨量之38.6%。淡水河流域主要由雪山山脈、大屯火山區、臺北盆地、林口臺地、桃園臺地組成。

台中市在日治時期，被規劃為模範城市，並建設了市政廳、公園等基礎設施，

確立了現代城市雛形，國民政府遷台，台中市逐漸成為工商業中心，是台灣的交通樞紐和文化中心，台中地區主要河川自北而南為大安溪、大甲溪、烏溪三大水系，臺中市位處北回歸線屬於副熱帶季風氣候，氣溫又受到海洋調節，四季的變化不大，氣溫隨地形呈現特西高東低，年均溫約 23.7°C ，夏季受西南季風影響，經常有旺盛的熱對流，形成對流雨，加上颱風帶來降水，年均降水量約1762.8毫米，台中市東部為雪山山脈南端，中央為占地面積最大的台中盆地，是台中市人口稠密區，戰後初期的產業發展最主要以農業為主，但隨著產業升級，臺中市的農業轉型為科技型、精緻型產業。

臺南市是台灣最早開發的城市，歷史文化底蘊深厚。中西部為鹽水溪、曾文溪淤積平原，全境位於北回歸線之南，屬副熱帶季風氣候與熱帶季風氣候的過渡帶，全年平均氣溫為 24.7°C ，受季風及地形影響，降雨乾濕季分明，雨量多集中於五到九月夏季，年均降雨量約1741.5毫米，東側有丘陵及山地，平原區比例最大、地形最平緩的城市，農耕地面積全臺灣第一，隨南部科學園區與多個工業區建立，成為高科技製造業的重鎮，並推動文化觀光產業，使傳統文化與現代經濟並存發展。

高雄市是台灣的港口都市，擁有豐富的工業和港埠資源。日治時期，日本在高雄建設高雄港，並設立製糖、造船等重工業，使高雄成為南台灣的重要工業城市。屬於高屏溪流域範圍，主要支流包含荖濃溪、旗山溪及隘寮溪，分別發源於中央山

脈玉山山脈東山、玉山西南麓及知本主山與北大武山，流域面積3257平方公里，為台灣面積最廣之河流，河流全長約171公里，為全台第二長河流。高屏溪流域位於台灣西南部（北緯 $22^{\circ}47'-23^{\circ}28'$ ，東經 $120^{\circ}43'-120^{\circ}57'$ ），地理位置在北回歸線以南，屬於熱帶氣候區，由於地形垂直分布自海岸起至海拔3666公尺間，氣候類型變化大，沿海平原及中海拔丘陵區屬於熱帶氣候區，高山地區屬於溫帶型氣候，形成垂直氣候帶，年平均氣溫約 25.1°C ，平均相對濕度約75.6%，氣溫隨高度增加而降低，高山地區年均氣溫約在 -1.1°C ~ 7.9°C 間，年平均降水量約2454毫米，每年5-10月因西南季風盛行及颱風侵襲，降水量占全年82%，乾濕季分明，降水空間分布不均，降水分布自玉山之3042毫米向沿海地區降至1906毫米，高屏溪流域中下游為平原、盆地及台地組成，早期以農業為主，隨工商業發展，成為台灣重工業發展核心地區，升格直轄市後，高雄逐步從重工業都市轉型，推動港區都市更新、文創產業和綠能發展，成為一座多元發展的海港城市。

(三)產業發展進程

台灣早期以農業為主，生產稻米、甘蔗級茶葉等，逐步發展養殖漁業；日治時期，隨著現代化基礎設施建設，奠定日後台灣工業發展基礎。1950年代，隨國民政府來台，政府推動進口替代工業化政策，減少進口依賴、提升國內工業能力，發展食品、紡織等簡單製造業。這一階段，政府透過土地改革促進農業增長，為工業化

提供資本積累，同時成立國營企業推動基礎設施建設。1960年代，台灣開始轉向出口導向，設立出口加工區，吸引外資並鼓勵國內企業進軍國際市場。台灣紡織、成衣、鞋類、電子零件和輕工業快速發展，台灣逐漸成為「世界工廠」。1980年代後期，隨著全球市場的轉變，台灣政府推動「十大建設」，並積極發展高科技產業，台灣逐漸在全球半導體和資訊科技產業中佔據重要地位。2000年代後，台灣的經濟重心從製造業逐漸轉向服務業，尤其是金融、資訊服務、電商和物流等。隨著高科技產業進一步升級，政府鼓勵創新和創業，推動物聯網、人工智慧、綠色能源等新興產業的發展，並支持中小企業和初創企業的成長。

(四)研究方法

本研究利用資料包絡分析(DEA)與層級分析法(AHP)來評估水資源利用效率，AHP是由美國大學教授 Tomas L. Saaty[1]於1971年應美國國防部要針對一些計畫上的問題提出相關解決方案，主要是在不明狀況之下，將一個或多個評估方案做出分析，一定各準則的重要性，來去解決決策上的問題，這就是層級分析法的起源。後續經過很多專家學的應用及證明，進而提出相關修正意見，讓層級分析法理論更為完善及廣泛使用，特別在對於資源分配、項目規劃、結果預測、決策判斷及投資評估等方面，都能得到相當的成果，並於1980年出版AHP的專作，後續在在1982年至1987年間很多針對AHP理論的書籍都相繼出版，而且應用的範圍更加廣泛

。 AHP 可針對 12 種類型決策問題提出相對應的解決方案[2]：產生替代方案、預測結果與風險評估、資源分配、衡量績效、確保系統穩定、規劃、解決衝突、選擇最佳方案、決定優先順序、最佳化及決定需求。AHP 理論簡單，具有實用性，目的是將問題複雜的部分的系統化，利用層級的架構將各分析的構面因素於予考慮及分析，運用量化當方式將將各因素由無形到可經過數據或量化的方式加以判斷評估，能夠讓人員對整體的事物有通盤了解，針對優劣因素找出最佳方案，降低錯誤決策的發生。AHP 基本假設，主要有下列 9 項[27]：(1)一系統可被分析或拆解成很多種類、因素等，進而產出有針對性的網絡層級結構。(2)假設每一因素所在層級都是獨立性。(3)可運用層級內的因素或組成要素作為上一層級的評估標準。(4)執行評估時，可以將尺度的數值替換成比率尺度。(5)可以利用矩陣處理模式，將各因素做成對比較後，算出數據。(6)各關係有遞移性，不管是優或者是劣都可以滿足(A 優於 B, B 優於 C，則 A 優於 C)，另外用強度做區分的也可以滿足(A 強於 B 二倍, B 強於 C 三倍，則 A 強於 C 六倍)。(7)得出的結果不完全都具備遞移性，因此若發現無遞移性的時候，則必須測試其一致性。(8)利用加權法則獲得因素的優勢。(9)探求的各因素在結構中，不論其優劣或優先的順序及程度，都與整個評估結構有相對關係。

另建立正確層級結構的優點包含：(1)將複雜的系統變成簡單的程式，這就是整

合系統。(2)當上一層內各因素優先順序發生改變時，必將影響下一層次內各因素的權重。(3)將因素區分成不同層級的整體，比我們評估整系統更有效果、效率。(4)將系統更細緻的區分層級，讓我們更了解各層級結構所指向的目標。(5)以層級的方式發展整合性的系統是相當迅速及有效的。(6)層級應具備彈性及可靠度；簡單說就是部分(局部)的變動不會影響整體的結構。(7)就目前理論而言，階層式的方式較接受度較高，而且具備易於溝通的特色。

DEA 是由 Farrell[3]於 1957 年提出生產邊界來衡量生產效率，是一種非參數的效率分析方法，可以同時考慮多個輸入和輸出，這使得它能夠在一個模型中綜合考慮多個方面的效率，並評估資源利用方面的表現，不需要預先制定權重且易於理解，客觀性較強，在效率評估和效率改進方面有著廣泛的應用價值，Chrane、Cooper 與 Rhodes[4]三位學者在 1978 年根據生產邊界概念，發展資料包絡分析法作為綜合性績效衡量指標，藉由數學規劃模式來衡量生產邊界，並從投入面與產出面為效率作更完整的解釋。並以經營效率衡量的概念，建立數學規劃模型(即所謂的 CCR 模式)，來衡量廠商的生產效率。Banker, Charnes, & Cooper[5]將技術效率值分為純技術效率 及 規模效率，即所謂的 BCC 模式。Charnes, Cooper, Lewin, Morey, & Rousseau[7] 提出 加法 模式 (Additive Model)，將效率衡量的結果和 Pareto 最適化的經濟觀念加以結合。Banker & Morey[8]以類別變數(Categorical

Variable)分析方法，區分決策者「無法控制」與「可控制」二類變數，探討當投入或產出變數不受管理者控制的情況。Sexton, Silkman, & Hogan[9]提出交叉效率(Cross Efficiency)的概念，極大化決策制定單位(DMU)的自評效率，以找出真正有效率的 DMU。Land, Lovell, & Thore[10]則分析機率限制 DEA 模式，在資料不確定時，用統計機率分配的方式來預估績效。有些 DEA 研究者創出一個新的領域稱為超效率(super-efficiency)模型來對 DEA 的效率 DMU 做排序並發展出許多模型。儘管這些新創的模型有趣且可用，但一般來說，仍有缺乏穩定性或可行性等缺點[11]。然而 DEA 模式在處理多元產出及投入問題上，以線性規劃方法求得各權重值，並計算產出與投入的比值以得到各單位的績效值，充分解決被評估單位之投入、產出數量不一致與權重選取問題。在應用範疇上不僅可找出最有效率和最無效率的評估單位、資源管理的衡量方式，

(五)研究架構

本研究主要分為蒐集資料、比較探討、參考專家文獻，找出來影響各級產業用水權重指標，並建立層級分析標準，再

二、文獻探討

(一)水資源利用效率指標(WEI)

水資源利用指標是用來衡量和評估水資源利用效率、管理水資源可持續性和水資源利用效益的量化指標，歐盟基於永續發展精神，定義三種衡量資源指標效率

也可運用在相對無效率的單位，找出有效率的經營實務、目標設定、效率策略、觀察效率、時間的變化與資源分配[12]。劉春初其結合 DEA 分析法與 AHP 分析法探討公共部門的生產效率，首先將 DEA 之投入、產出項做適度的篩選，並驗證投入、產出項是否符合同向性的假設，以進行客觀面效率分析；此外研究中使用 AHP 進行主觀的權數設定，透過一致性比率(Consistency Ratio; CR)與一致性指數(Consistency Index; CI)檢定以獲得全體之共識，最後再進行主觀面效率分析，以探討公共部門之生產效率。邢台平結合 DEA 分析法與 AHP 分析法進行警察機關刑事偵防績效衡量之研究[28]，首先其將蒐集到的刑事偵防工作之官方資料及問卷調查作為投入產出項，以客觀面的 DEA 評估模式進行分析，再配合 AHP 決定各投入產出項之權重，並代入原 DEA 模式中，成為權數設限之 DEA 模式。

利用資料包絡分析法計算效率值，最後，分析影響農業、工業及民生用水效率不彰的主要原因，並彙整結論及提出建議

的指標類型，分別衡量資源使用效率、資源使用對環境之衝擊、資源使用對降低生態壓力之進展[18]。國家經濟發展與水資源利用之間存在著密切的關係。生產與消費等經濟活動增長通常會伴隨著對水資源的需求增加，包括工業、農業和生活用水等方面，完整的水資源評估指標系統可

以同時評估資源使用率、環境衝擊與社經效益，及三者相關性，水資源利用指數為淡水資源年取水量與長期平均可取得淡水資源量之比，取水量包括農業用水、工業用水和生活用水。水資源利用指數愈大表示用水壓力愈大，亦表示水資源稀少或水資源過度使用。

WEI 是根據 DEA 的結果和各個指標的權重而建構的因素。本研究主要考慮三個因素——生活用水、農業用水和工業用水。WEI 的計算如下：

$$WEI = \gamma_1 D_{WEI} + \gamma_2 A_{WEI} + \gamma_3 I_{WEI} \quad (1)$$

γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分別代表生活、農業及工業用水的權重。

水資源利用指數可用來評估水資源使用壓力，甚至審視是否超限利用，故可視為一種資源使用對環境衝擊指標；水資源生產力為生產面水資源使用效率指標；人均生活用水量為消費面之水資源使用效率指標。前述各項指數 / 指標計算方式界定如下：

水資源利用指數 I = 年取水量 / 長期平均可再生水資源量

水資源利用指數 II = 年取水量 / 長期平均可利用水資源量

全國用水生產力 = 全國 GDP / 總取水量
(元 / 立方公尺)

農業用水生產力 = 農業 GDP / 農業用水取水量(元 / 立方公尺)

工業用水生產力 = 工業 GDP / 工業用水取水量(元 / 立方公尺)

人均生活用水量 = 生活用水取水量 / 人口數(立方公尺 / 人 / 年)

(二) 資料包絡分析(DEA)

是一種非參數的線性規劃方法，用於評估多個輸入和輸出之間的效率和相對績效，DEA 模式的效率研究程序有三[13]：一是界定和選擇分析的 DMU，其次是決定適合與相關用來衡量 DMU 的相對效率之投入與產出，最後是應用與結果的分析。而 DMU 的界定與選擇準則為執行相同工作有著相同目標的決策單位，並在相同的市場情況運作，同時描述所有這群體中的決策單位績效之要素是相同的，除了在強度或規模的差異。至於決策單位的數目根據經驗法則，至少應是投入和產出數目的兩倍。DEA 模式最常用的有 CCR 及 BCC 下列兩種模式，經由 CCR 模式可求得總效率；BCC 模式可求得純粹技術效率及規模效率。

1.CCR 模式

CCR 模式是由 Chranes、Cooper 與 Rhodes[4]三位學者於 1978 年首先根據 Farrell 模式的效率衡量理論基礎。CCR 模式其假設為有 n 個被評估的決策單位，將 s 種投入($x_j ; j = 1, 2, \dots, s$)轉換成 m 種產出($y_i ; i = 1, 2, \dots, m$)，當評估第個 DMU 之效率值時，分別代表結合各項產出 i 與投入 j 的未知權重，同時計算產出與投入的比值。求得各單位的績效值，如下所示：

$$\text{目標函式 } \text{MAX } h_k = \frac{\sum_{i=1}^m U_i Y_{ik}}{\sum_{j=1}^s V_j X_{jk}} \quad (2)$$

$$\text{限制式 } \frac{\sum_{i=1}^m U_i Y_{ik}}{\sum_{j=1}^s V_j X_{jk}} \leq 1 \quad U_i \geq 0, V_j \geq 0 \quad (3)$$

$$i = 1,2,3 \dots ,m ; j=1,2,3 \dots ,s ; k=1,2,3 \dots ,n$$

其中 k 表示受評估的決策單位

h_k ：為受評估決策單位之相對效率值

Y_{ik} ：為第 k 個決策單位之第 i 個產出值

X_{jk} ：為第 k 個決策單位之第 j 個投入值

U_i, V_j ：為決策單位 k 之第 i 個產出
值及第 j 個投入值之權數

2.BBC 模式

BCC 模式是由 Banker.R.D. 等人於 1984 年所提出[6]，將 CCR 模式中有關固定規模報酬的假設作了修正，可用於探討技術效率(technical efficiency)、規模效率(scale efficiency)與規模報酬的問題。BCC 模式以 CCR 模式為基礎，擴充了凸性(Convexity)的性質，並以生產可能集合(Production Possibility Set)建立凸性性質、無效率性質、射線無限制性質與最小外插性質等四項公設與 Shephard 距離函數(Distance Function)，導出可衡量純技術效率與規模效率之關係，並引進可解釋在變動規模報酬下 DMU 處於規模報酬遞增或規模報酬遞減的變數。因此將總效率分成純技術效率(Pure Technical Efficiency)及規模效率(Scale Efficiency)二種，並描述總效率、純技術效率、規模效率三種效率之間的關係，用以衡量 DMU 的效率並解釋相對無效率的原因。此種分析固定規模報酬(CRS;Constant Return to Scale)與變動規模報酬(VRS;VariableReturn to Scale)的效率衡量結果之關係的方法，即 DEA 之 BCC 模式乃是放寬固定規模報酬之模型設定，在模型中多加了的限制；決策者可透過規模效率值是否為 1 來判別受衡量

DMU 是否具規模效率以供調整該 DMU 生產規模之參考。其數學模式如下：

$$\text{目標函式 Max } h_k = \sum_{i=1}^s U_i Y_{ik} - U_k \quad (4)$$

$$\text{限制式 } \sum_{i=1}^m U_i Y_{ik} - \sum_{j=1}^s V_j X_{jk} - U_i \leq 0 \quad (5)$$

$$U_i \geq \varsigma > 0, V_j \geq \varsigma > 0$$

$$i = 1,2,3 \dots ,m ; j=1,2,3 \dots ,s ; k=1,2,3 \dots ,n$$

其中 k 表示受評估的決策單位

h_k ：為受評估決策單位之相對效率值

Y_{ik} ：為第 k 個決策單位之第 i 個產出值

X_{jk} ：為第 k 個決策單位之第 j 個投入值

U_i, V_j ：為決策單位 k 之第 i 個產出值及第 j 個投入值之權數

根據求得之 U_k 可用來探討各決策單位規模報酬的狀態，若

A. $U_k=0$ 表示該決策單位是在最適規模下生產，屬於固定規模報酬(Constant Return to Scale, CRS)

B. $U_k>0$ 而則表示該決策單位在大於最適規模下生產，屬於規模報酬遞減(Decreasing Return to Scale, DRS)

C. $U_k<0$ 表示該決策單位在小於最適規模下生產，屬於規模報酬遞增(Increasing Return to Scale, IRS)

由於 CCR 模式的固定規模報酬假設可以用來評估總效率，BCC 模式之變動規模報酬假設可以評估技術效率，所以使用 DEA 方法應同時合併使用 CCR 模式與 BCC 模式，才能計算出規模效率值(Scale Efficiency)，進一步比較決策單位之間的相對效率。透過 BCC 模型，可了解 DMU 技術無效率有多少來自純技術無效率(要素投入浪費)及多少無效率來自 DMU 未來在最適規模下生產所造成。

以單一投入與單一產出說明總技術效率、純粹技術效率與規模效率之間的關係。設有 A、B、C、D、E 五個DMU，以一種投入生產一種產出，則 A、B、C、E 為位於邊界上之點，就投入面而言D點生產OF之產量必須投入FD之投入量，但 H 點同樣生產OF之產量卻只須要 FH 之投入量，因而定義 D 點之技術效為 $TE = FH/FD$ ；另採產出面而言，D 點投入 OI 之投入量生產 ID 產量，但 J 點同樣投入 OI 之投入量卻生產 IJ 產量，故定義 D 點之產出面技術效率為 $TE = ID/IJ$ 。同時保持 OF 之產量，若 H 點能達到 C 點之平均每單位產出，則只須 FG 之投入量即可，因而定義 H 點(及 D 點)之規模效率為(Scale Efficiency) $SE = FG/FH$ 。若固定 OF 之產出，則同時達到技術效率及規模效率者只需 FG 之投入，因而定義 D 點之總效率為 $AE = FG/FD (= ID/IK) = FH/FD \times FG/FH = TE \times SE$ 。另規模指標(Scale Indicator) $SI = OG/OC$ 用於衡量規模報酬。技術效率可描述在既定產出水準下任一點至邊界點之距離，而規模效率可描述在既定產出水準下邊界點至最適生產規模邊界(射線 OC)之距離，而最適生產規模之必要條件為固定規模報酬 [6][15])。

(三)層級分析法(AHP)

將一個複雜的決策問題層級化，將其分解為若干個層級，每個層級包含若干個因素或準則。然後，通過建立一個層級結構，評估每個因素或準則對於達成最終目標的重要性和貢獻程度，使用層級分析法

，需先歸納因素以建立層級架構，再評估因素。步驟如下：

- 1.定義問題：需先定義問題，應該盡量擴大問題的範圍，通盤考慮可能影響問題的因素。
- 2.分析影響因素：分析每層級各因素的相互影響，以及對整個系統的影響。
- 3.建立層級結構：將決策問題分解為若干個層級，包括目標層級、準則層級和方案層級，確定各層級之間的層級關係。根據 Miller[14]的研究結果指出人類無法同時對 7 種以上的事物進行比較，因此處理複雜問題時，利用層級結構加以分解，建立相互獨立的層級化關係時，每一層級的要素不宜超過 7 個，可進行合理的比較，並可保證其一致性。
- 4.構建判斷矩陣：利用對兩兩因素進行兩兩比較的方法，建立一個判斷矩陣，評估每對因素之間的相對重要性。Saaty [1] 提出評估尺度，如表 * 所示。決策者以成對比較方式，找出因素之間的相對重要性，而因素相對重要性之尺度數值分別是 1、2、3、4、5、6、7、8、9，以及其對應的倒數 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$ 、 $1/7$ 、 $1/8$ 、 $1/9$ 。成對比較矩陣之主對角線是因素自身的比較，所以其衡量值都是 1，而主對角線上方的數值是因素成對比較後所得數值，在對角線下的對應位置則是他們的倒數。

表 1、層級分析法之評估尺度

定義	評估尺度
同等重要	1
中等重要	3
頗重要	5
非常重要	7
極重要	9
絕對重要	2、4、6、8

5. 計算權重：通過對判斷矩陣進行特徵值分解 (Eigenvalue Decomposition)，計算出每個因素或準則的權重。

6. 一致性檢驗：對判斷矩陣的一致性進行檢驗，Saaty[1] 建議用一致性指標 (Consistency Index, C.I.) 與一致性比率 (Consistency Ratio, C.R.) 來檢定。(1) 一致性指標 (C.I.): 指從特徵向量法所求出的 \max

(最大特徵值) 與 n (因素個數) 的差異程度。C.I. 的公式如下：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (7)$$

當 $C.I.=0$ 顯示前後判斷具有完全一致性，不過很難達到完全一致，因此 Saaty [1] 認為 $C.I. 0.1$ 是可容許的誤差。(2) 一致性比率 (C.R.): 成對比較矩陣在不同階層數下，對應各自的 R.I. 值，就是隨機性指標 (Random Index, R.I.)，如表 2 所示。而在同階層數下，C. I. 值與 R.I. 值相除可得一致性比率 (Consistency Ratio, C.R.)，若 $C.R. 0.1$ 顯示矩陣的一致性程度令人滿意。C.R. 的公式如下：

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (8)$$

表 2、隨機指標表

階數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

由於層級間有不同的比重，因此需要檢定整體層級是否有一致性。整體層級之一致性比率 (Consistency Ratio of the Hierarchy, C.R.H.)，是整體層級一致性指標 (Consistency Index of the Hierarchy, C.I.H.) 除上整體層級隨機指標 (Random Index of the Hierarchy, R.I.H.) 求得，若

$C.R.H. \leq 0.1$ ，表示可接受整體層級之一致性。C.R.H. 的公式如下：

$$CIH = \sum (\text{每層級的優先向量}) \times (\text{每層級的C.I.值})$$

$$RIH = \sum (\text{每層級的優先向量}) \times (\text{每層級的R.I.值})$$

$$CRH = \frac{CIH}{RIH} \quad (9)$$

三、研究方法

(一) 研究規劃

本研究選擇了民生、農業和工業用水消耗作為輸入指標，而人口、糧食產量和工業增加值則作為輸出指標。OE 是對每個單位的水資源分配能力、管理和技術能

力進行綜合評估的指標，是評估本研究中民生、農業和工業用水效率的主要指標。因此，本研究基於傳統的 DEA 介紹一個在特定區域中擁有最高用水效率的 DMU，以評估其他 DMU 的真實用水效率。

傳統的資料包絡分析（DEA）僅能在決策單位（DMU）之間進行比較，找出相對有效的單位，並將其用作評估每個單位效率的標準。這種方法適用於比較和排名DMU之間的效率，但無法客觀判斷每個DMU的真實效率。首先以DEA-CCR模型對民生、農業及工業用水效率分析其主要影響因素，並使用AHP分配權重，找出影響台灣地區氣候變遷影響下，用水效率不彰的主因，並提出氣候變遷背景下的水資源管理和緩解水資源短缺的數據及解決方法。

（二）研究步驟

本研究旨在探討高屏地區水資源的利用與管理現況，並預估其未來發展趨勢，以提供永續發展策略的參考。具體研究步驟如下：

1、確定研究動機與目的：主要在於確立進行研究的必要性和具體目標。水資源是所有產業運行的重要資源，但因為氣候變遷、人口成長及經濟發展，水資源的供應面臨著巨大壓力。因此，研究動機為找出影響水資源運用的最大因素，並透過量化的方法分析各產業對水資源的利用效率，目的是希望提出更有效的水資源分配與管理策略，以提升整體利用效率，降低水資源的浪費，達成永續發展的目標。

2、篩選主要影響指標：透過文獻回顧、專家訪談和統計數據來篩選影響水資源利用效率的主要指標，例如氣候因素（降水量、蒸發量）、經濟因素（用水成本、GDP）、人口因素（人口密度、人均用水量）等。這些指標將用來建構層級分析法中的指

標系統，目的是確保納入的指標能涵蓋影響水資源管理的主要因素，進一步提高分析的準確性。

3、根據層級分析法，建立指標系統的層級結構：將影響各級產業用水利用效率的指標建立層級結構，透過成對比較來量化各指標的重要性。

4、蒐集各地用水量數據：蒐集不同地區和不同產業的用水數據。這些數據包括工業、農業、家庭及其他產業的水資源使用量、用水效率、投入成本等。蒐集數據的來源可以包括政府的公開統計資料、研究報告以及相關單位的數據庫。

5、利用資料包絡分析方法計算每個決策單位的效率值：將蒐集的用水數據輸入DEA模型中，通過投入和產出比率計算各單位的技術效率（用水資源投入轉換為產出）。這樣的效率值可作為各單位水資源利用績效的指標，幫助找出低效或高效的用水單位。

6、綜合分析水資源的利用管理現況，根據現有數據和分析結果，預估未來發展趨勢：根據層級分析法和資料包絡分析法的結果，研究者需對各地區和各產業的用水並評估各產業是否需要改進用水策略，以應對未來可能的水資源短缺問題。

7、對分析結果進行檢討，提出具體的結論和可行的改善建議，為後續研究提出建議方向：根據前述分析結果，對水資源管理提出具體的結論和建議，例如針對低效用水的產業提出改善建議，推動更有效率的用水技術。可以建議政府制定適當的水資源分配政策，提升高需求地區和產業的

用水效率，鼓勵節水措施，進行更多用水監測。針對未來研究，也可以提出建議，例如考慮納入更多的環境影響指標或使用

其他效率評估方法，以進一步提升水資源管理的精準性。

四、數值分析

(一)概述

隨氣候變遷影響加劇，水資源浪費成為現今所需關注的問題，各地區須尋求更高效率的用水方法，同時又要維持民生、農業及工業發展；本研究針對台灣六個直轄市，評估各個部門在資源利用上的效率，進一步發現可能存在的效率提升空間，

從效率評估和因素分析兩個角度探討六個直轄市用水效率的問題。本研究首先請專家針對三個投入項，分別為民生用水量(C1)、工業用水量(C2)、農業用水量(C3)進行評估，得出成對比較矩陣，如表3所示。其次請專家針對三個產出項分別為人口總數(L1)、工業產值(L2)及農業產值(L3)進行評估，得出成對比較矩陣，如表4所示。

表 3、水資源使用量之成對比較矩陣

評估指標	專家	C1	C2	C3
C1	P1	1	3	5
	P2	1	2	6
	P3	1	1	4
C2	P1	1/3	1	4
	P2	1/2	1	3
	P3	1	1	2
C3	P1	1/5	1/4	1
	P2	1/6	1/3	1
	P3	1/4	1/2	1

表 4、人口總數、工業產值與農業產值之成對比較矩陣

評估指標	專家	L1	L2	L3
L1	P1	1	2	5
	P2	1	3	6
	P3	1	1	7
L2	P1	1/2	1	3
	P2	1/3	1	4
	P3	1	1	5
L3	P1	1/6	1/3	1
	P2	1/5	1/4	1
	P3	1/7	1/5	1

表 5、表 6 及表 7 分別顯示 109 年、110 年及 111 年的產出值及投入值，人口

總數、工業產值及農業產值作為產出數據，民生用水、工業用水及農業用水。

表 5、109 年產出值與投入值

	產出值			投入值	
	人口總數 (人)	工業產值 (億元)	農業產值 (千元)	民生用水 (立方公尺)	工業用水 (立方公尺)
台北市	2602418	1393	516806	411548353	3335419
新北市	4030954	16163	6842206	585467271	71224218
桃園市	2268807	29221	11254816	289151530	255357358
台中市	2820787	21471	32996227	426247742	237331345
臺南市	1874917	18138	56162610	243729177	212889825
高雄市	2765932	25708	36293734	374079466	294994738

表 6、110 年產出值與投入值

	產出值			投入值	
	人口總數 (人)	工業產值 (億元)	農業產值 (千元)	民生用水 (立方公尺)	工業用水 (立方公尺)
台北市	2524393	1358	557594	397481665	2403166
新北市	4008113	17237	6743219	583223643	50156283
桃園市	2272391	38406	11066708	297627201	203506642
台中市	2813490	25963	35420480	405493684	159479974
臺南市	1862059	23861	60700585	232629921	186882996
高雄市	2744691	32186	45146318	379543273	243206506

表 7、111 年產出值與投入值

	產出值			投入值	
	人口總數 (人)	工業產值 (億元)	農業產值 (千元)	民生用水 (立方公尺)	工業用水 (立方公尺)
台北市	2480681	1334	520627	393078175	3556258
新北市	3998881	18527	6515697	576264142	65503433
桃園市	2281464	40619	11799010	296933762	226735309
台中市	2814459	27565	37159500	412998117	193786792
臺南市	1852997	25134	64300880	251026400	225167370
高雄市	2718137	34887	4360299	360131909	242079123

(二)DEA方法

表 8、109 年產出值與投入值正規化結果

	產出值			投入值		效率值	排名	
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
台北市	0.6456	0.0477	0.0092	0.7029	0.0113	0.0688	0.785	5
新北市	1.0000	0.5531	0.1218	1.0000	0.2414	0.5234	0.830	3
桃園市	0.5628	1.0000	0.2004	0.4939	0.8656	0.7015	0.749	6
台中市	0.6998	0.7348	0.5875	0.7280	0.8045	0.2369	1.000	1
臺南市	0.4651	0.6207	1.0000	0.4163	0.7217	1.0000	0.854	2
高雄市	0.6862	0.8798	0.6462	0.6389	1.0000	0.7548	0.809	4

表9、110年產出值與投入值正規化結果

	產出值			投入值			效率值	排名
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
台北市	0.6298	0.0354	0.0092	0.6815	0.0099	0.0370	0.708	5
新北市	1.0000	0.4488	0.1111	1.0000	0.2062	0.2700	0.808	3
桃園市	0.5669	1.0000	0.1823	0.5103	0.8368	0.3736	0.778	4
台中市	0.7019	0.6760	0.5835	0.6953	0.6557	1.0000	0.638	6
臺南市	0.4646	0.6213	1.0000	0.3989	0.7684	0.4284	1.000	1
高雄市	0.6848	0.8380	0.7438	0.6508	1.0000	0.3586	0.863	2

表10、111年產出值與投入值正規化結果

	產出值			投入值			效率值	排名
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
台北市	0.6203	0.0328	0.0081	0.6821	0.0147	0.0256	0.786	4
新北市	1.0000	0.4561	0.1013	1.0000	0.2706	0.2146	0.901	2
桃園市	0.5705	1.0000	0.1835	0.5153	0.9366	0.2968	0.862	3
台中市	0.7038	0.6786	0.5779	0.7167	0.8005	1.0000	0.669	6
臺南市	0.4634	0.6188	1.0000	0.4356	0.9301	0.4233	1.000	1
高雄市	0.6797	0.8589	0.0678	0.6249	1.0000	0.3203	0.710	5

分別將109年、110年及111年的所有投入值及產出值正規化，減少數據冗餘，增加數據的一致性，如表8、表9及表10所示。

(三)AHP-DEA方法

表 11、投入值之成對比較矩陣與權重

	民生用水量	工業用水量	農業用水量	權重
民生用水量	1	2	5	0.5813
工業用水量	1/2	1	3	0.3092
農業用水量	1/5	1/3	1	0.1096

表 12、產出值之成對比較矩陣與權重

	人口總數	工業產值	農業產值	權重
人口總數	1	2	6	0.5869
工業產值	1/2	1	4	0.3238
農業產值	1/6	1/4	1	0.0893

表 13、109 年加權後的產出值及投入值結果與效率值

	產出值			投入值			效率值	排名
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
	0.5869	0.3238	0.0893	0.5813	0.3092	0.1096		
台北市	0.3789	0.0154	0.0008	0.4086	0.0035	0.0075	0.865	6
新北市	0.5869	0.1791	0.0109	0.5813	0.0746	0.0574	1.000	1
桃園市	0.3303	0.3238	0.0179	0.2871	0.2676	0.0769	0.977	2
台中市	0.4107	0.2379	0.0525	0.4232	0.2488	0.0260	0.922	3
臺南市	0.2730	0.2010	0.0893	0.2420	0.2231	0.1096	0.900	4
高雄市	0.4027	0.2849	0.0577	0.3714	0.3092	0.0827	0.896	5

表 14、110 年加權後的產出值及投入值結果與效率值

	產出值			投入值			效率值	排名
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
	0.5869	0.3238	0.0893	0.5813	0.3092	0.1096		
台北市	0.3696	0.0115	0.0008	0.3962	0.0031	0.0041	0.274	6
新北市	0.5869	0.1453	0.0099	0.5813	0.0638	0.0296	0.319	3
桃園市	0.3327	1.0000	0.0163	0.2966	0.2587	0.0409	0.655	2
台中市	0.4119	0.2189	0.0521	0.4042	0.2027	0.1096	1.000	1
臺南市	0.2727	0.2012	0.0893	0.2319	0.2376	0.0470	0.316	4
高雄市	0.4019	0.2713	0.0664	0.3783	0.3092	0.0393	0.295	5

表 15、111 年加權後的產出值及投入值結果與效率值

	產出值			投入值			效率值	排名
	人口總數	工業產值	農業產值	民生用水	工業用水	農業用水		
	0.5869	0.3238	0.0893	0.5813	0.3092	0.1096		
台北市	0.3641	0.0106	0.0007	0.3965	0.0045	0.0028	0.220	6
新北市	0.5869	0.1477	0.0090	0.5813	0.0837	0.0235	0.256	3
桃園市	0.3348	0.3238	0.0164	0.2995	0.2896	0.0325	0.257	2
台中市	0.4131	0.2197	0.0516	0.4166	0.2475	0.1096	0.210	4
臺南市	0.2720	0.2004	0.0893	0.2532	0.2876	0.0464	1.000	1
高雄市	0.3989	0.2781	0.0061	0.3633	0.3092	0.0351	0.229	5

表 11 及表 12 分別顯示投入項及產出項的成對比較矩陣，將數值帶入公式(7)分別得出 $CI=0.0018$ 及 $CI=0.0051$ ，再將 CI 值帶入公式(8)導出可接受的 $CR=0.0032$ 及 $CR=0.0087$ 。表 13、表 14 及表 15 顯示

，表 8、表 9 及表 10 加入權重之結果，並導入 DEA-CCR 模型之目標函式(2)與限制式(3)計算出效率值，再進行最後的分析及排名。

(四) 比較與討論

表 16 彙整 DEA 法與 AHP-DEA 法各年度用水效率值及排名，並將數值繪製成圖 1 及圖 2，最後分析其變化與差異。

表 16、各年度效率值及排名

	DEA						AHP-DEA					
	109 年		110 年		111 年		109 年		110 年		111 年	
	效率 值	排名										
台北市	0.785	5	0.708	5	0.786	4	0.865	6	0.274	6	0.220	6
新北市	0.830	3	0.808	3	0.901	2	1.000	1	0.319	3	0.256	3
桃園市	0.749	6	0.778	4	0.862	3	0.977	2	0.655	2	0.257	2
台中市	1.000	1	0.638	6	0.669	6	0.922	3	1.000	1	0.210	4
臺南市	0.854	2	1.000	1	1.000	1	0.900	4	0.316	4	1.000	1
高雄市	0.809	4	0.863	2	0.710	5	0.896	5	0.295	5	0.229	5

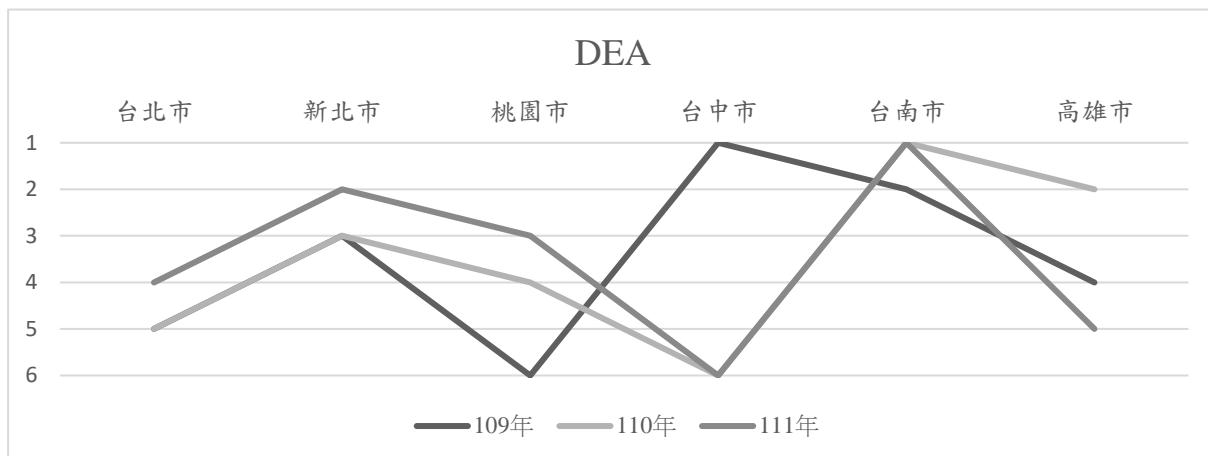


圖 1. DEA 法效率值數據圖

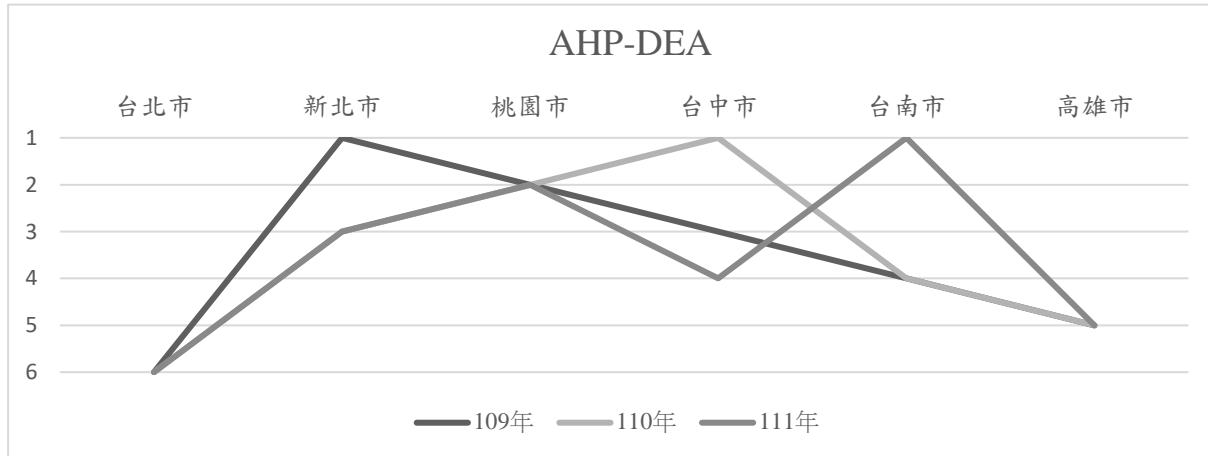


圖 2. AHP-DEA 法效率值數據圖

1. 圖 1 中，利用 DEA 法計算六都的用水效率，在不考慮各產業用水權重與人口總數、工業產值及農業產值之權重情況下，可以觀察到各縣市效率值排名落差

較大，尤其台中市(109 年排名為 1, 110 及 111 年排名為 6)落差最大；圖 2 中，利用本研究方法 AHP-DEA 法加入權重後計算效率值，可以觀察到各縣市效率

- 值排名落差較小。
2. 從圖 1 與圖 2 中可以看出，AHP 法提供了主觀的權重分配方式，因此，我們加入各產業用水權重與人口總數、工業產值及農業產值之權重；而 DEA 法提供了客觀的效率評估。結合兩者，AHP-DEA 法更全面地評估決策單元的表現，減少單一方法的局限性。
 3. 如果僅利用 DEA 法，不考慮權重因素會欠缺客觀，造成效率值排名落差過大，在分析及訂定水資源相關政策時，可能會導致決策不穩定、資源配置錯誤、政策信任降低且長期缺乏目標，而無法訂定出有效管理水資源利用之政策。本研究所使用 AHP-DEA 法可以綜合考量多個投入與產出指標，提供更全面效率評估，並結合客觀性與主觀性，提高評估結果的可信度和可操作性。

五、結論與建議

(一)結論

人們自古逐水草而居，生活離不開水源，水資源缺乏是全球面臨的一個嚴重挑戰，對人類生存、經濟發展和生態環境都帶來了巨大的影響，在都市化及工業化後，氣候變遷急遽，極端氣候導致的洪水及旱災，更顯水資源的重要性，有效的水資源管理也是迫在眉睫的問題。DEA 與 AHP 方法時常被用來評估水資源利用效率，DEA 用來評估不同產業的水效率，結合客觀因素對產業水資源利用效率的影響，AHP 則用來分析水資源管理者對水資源開發利用效率的偏好等主觀因素對水資源利與效率的影響，本研究採用 DEA-CCR 計算每個地區農業用水、生活用水及工業用水的利用效率，結合 AHP 方法，建立水資源綜合效率評估指標，提出更有效水資源利用方法。

(二)建議

面對愈來愈嚴峻的水文條件，提高水資源利用效率、推動水資源保護和治理，以及建立跨國合作機制，共同應對跨境水資源管理挑戰最有效解決水資源缺乏問題方法，設定政策目標，監控和評估政策成效整體用水生產力、工業用水生產力、生活用水效率雖仍有改善空間，但皆有明確的效率提升跡象，此與政府部門推動多年的節約用水、廢水回收再利用等政策有關。農業用水生產力無明顯趨勢，表示其用水效率無明確提升現象，未來加強提升農

業用水效率將是降低臺灣水資源壓力的重要環節。同時，我們也需要加強對氣候變遷的應對，減少溫室氣體排放，促進可持續發展，並加強氣候風險管理和調適措施的實施。加強公眾的意識和行動，提高人們對水資源和氣候變遷問題的認識，鼓勵人們改變生活方式，減少浪費，節約用水，以及支持政府和國際組織的相關政策。

參考文獻：

- [1]Saaty, T. L. "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1980.
- [2]Saaty, T. L., "The Analytic Hierarchy Process: Decision Making with Dependence and Feedback", 1996.
- [3]Farrell, M.J., The Measurement of Productive Efficiency", 1957.
- [4]Charnes, A, Cooper, W. W., Rhodes, E., "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", 1978.
- [5]Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. , "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", 1978.
- [6]Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W., "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", 1984.
- [7]Abraham Charnes, William W. Cooper, Arie Y. Lewin, Richard C. Morey, James J. Rousseau, "A Developmental Study of Data Envelopment Analysis in Measuring the Efficiency of Maintenance Units in the U.S. Air Forces", 1985.

- [8]R. D. Banker & R. C. Morey, "The Use of Categorical Variables in Data Envelopment Analysis", 1986.
- [9]Thomas R. Sexton, Robert H. Silkman, & Andrew J. Hogan, "Data Envelopment Analysis: Critique and Extensions", 1986.
- [10]Kent D. Land, C. A. Knox Lovell, Sten Thore, "Chance-Constrained Data Envelopment Analysis", 1993.
- [11]Shanling Li , Jahanshahloo, & Khodabakhshi, "A super-efficiency model for ranking efficient units in data envelopment analysis", 2007.
- [12]Boussofiane, A., Thanassoulis, E., "A Comparison of the Analytical Hierarchy Process and Data Envelopment Analysis in the Context of Performance Assessment", 1991.
- [13]Golany, B., Roll, Y., "An Application of Data Envelopment Analysis to the Evaluation of the Efficiency of Public Bureaucracies", 1989.
- [14]Miller, S. M., "The Information Input in the Comparative Process of Social Choice", 1956.
- [15]Banker,R. D., "On the Measurement of Technical Efficiency in the Data Envelopment Analysis (DEA) Model", 1989.
- Pakkar , M. S., "Using DEA and AHP for Hierarchical Structures of Data", 2016.
- [16]Zilla, S. S., Mehrez, A., & Yossi,H., "An AHP/DEA Methodology for Ranking Decision Making Units", 2000.
- [17]陳昀翔,企業永續水資源績效指標與模糊評量制度研究, 2023.
- [18]周嫦娥,"臺灣水資源利用效率初探",中國土木水利工程協會期刊, 48(4):pp.23-31, 2021.
- [19]沈昱,以 AHP 層級分析法探討行銷策略影響通路績效之研究-以傢飾布企業為例, 2020.
- [20]劉芷昂,高屏溪流域伏流水開發之水資源評估, 2019.
- [21]童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭,"氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討", 中國土木水利工程協會期刊, 42(4):pp.30-45, 2015.
- [22]劉介宇, 資料包絡分析法(Data Envelopment Analysis)簡介與應用, 2012.
- [23]黃乾怡、蔡明峰、黃匯華,"應用資料包絡分析法(DEA)於六標準差專案之績效評估", 技術學刊, 24(2):pp.117-130, 2009.
- [24]陳世宗,"資料包絡分析法在企業績效分析之運用與實證探討以中國電視事業公司為例", 國立空中大學管理與資訊學系管理與資訊學報, 11, pp.159-194, 2006.
- [25]蔡博信,整合DEA、AHP及資料倉儲於經營績效評估模式之實證研究, 2004.
- [26]朱家勳,台灣有線電視系統台經營績效之研究-綜合運用 DEA 與 AHP 模式, 2003.
- [27]邢台平,結合 DEA 分析法與 AHP 分析法進行警察機關刑事偵防績效衡量之研究, 2002.

[28]鄧振源、曾國雄，”層級分析法(AHP)
的內涵特性與應用(下)”，中國統計學報，
27(7)，pp.13767-13870，1996.

Evaluation of Water Resource Utilization Indicators in Taiwan's Six Special Municipalities Using Data Envelopment Analysis and Analytic Hierarchy Process

Zhi-Yu YU

Department of Management Science, R.O.C Military Academy

Abstract

Water scarcity and climate change are two major challenges facing the world today, with profound impacts on human society, the economy, and the ecological environment. The increasing frequency of extreme weather events has intensified water scarcity issues and also poses threats to water quality. As the global population continues to grow, water shortages are becoming increasingly severe in many regions. Although climate change cannot be halted in the short term, comprehensive response measures must be adopted to strengthen water resource management.

In Taiwan, the majority of water resources are used for agricultural purposes. Although agricultural water use has shown a decreasing trend in recent years, rising national income, improved living standards, and the transformation of industrial development have led to increasing demand for public water use, such as domestic and industrial water. In addition, issues such as aging infrastructure, water leakage, improper agricultural irrigation, and inefficient household water habits contribute to water waste.

Therefore, this study evaluates the water resource utilization efficiency of Taiwan's six special municipalities using the Water Resource Utilization Efficiency Index. It integrates the CCR model of Data Envelopment Analysis (DEA) with the Analytic Hierarchy Process (AHP) to analyze the efficiency of domestic, industrial, and agricultural water use, as well as the key influencing factors. Through the data presented in this research, the aim is to identify the causes of inefficient water use and provide insights to improve long-term water resource wastage.

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), Analytic Hierarchy Process (AHP), Water Resources, Utilization Efficiency