

應用多目標規劃法於低碳運輸計畫 之預算分配

A MULTI-OBJECTIVE PROGRAMMING MODEL OF BUDGET ALLOCATION IN LOW CARBON TRANSPORTATION PROJECTS

陳正杰 Cheng-Chieh (Frank) Chen¹

馮正民 Cheng-Min Feng²

劉庭豪 Ting-Hau Liou³

(103 年 10 月 6 日收稿，104 年 3 月 5 日第 1 次修改，104 年 7 月 8 日第 2 次修改，
104 年 12 月 16 日定稿)

摘 要

運輸部門的溫室氣體排放量為全球產業最大宗排放源之一，發展低碳運輸計畫以減少碳排放量已成為近年來公共運輸系統建設之目標。以往決策者在公共建設規劃時多採用質性評選方式來決定預算分配比例，缺乏較客觀的量化因素。本研究建構一多目標數學規劃模式，以追求低碳運輸策略效益最大與減少區域間預算分配差距，同時導入「計畫可調整性」及「最低可執行預算規模比例」等因素，進行低碳運輸計畫預算分配。

模式建構階段初始藉由典型背包問題 (0-1 Knapsack Problem) 發展整數規劃預算分配模型 (即模式 1)、考慮預算可調整性，將計畫分成連續型計畫及非連續型計畫之混合整數規劃預算分配模型 (即模式 2)、加入公平

-
1. 國立東華大學企業管理學系暨運籌管理研究所助理教授 (聯絡地址：974 花蓮縣壽豐鄉大學路 2 段 1 號 東華大學企業管理學系暨運籌管理研究所；電話：03-8633168；E-mail: frank542@mail.ndhu.edu.tw)。
 2. 國立交通大學運輸與物流管理學系教授 (聯絡地址：100 臺北市中正區忠孝西路 1 段 118 號 4 樓 交通大學運輸與物流管理學系；電話：02-23494956；E-mail: cmfeng@mail.nctu.edu.tw)。
 3. 國立交通大學運輸與物流管理學系碩士。

性目標式、區域預算配給比例等參數與考慮各計畫之最低可執行預算比例，構建一多目標混合整數非線性規劃預算分配模型（即模式 3）。依據不同情境最佳化預算分配，並依據實例分析驗證模式之可行性。

從我國行政院環保署之「低碳城市建構計畫」實例分析結果可以得知，當總預算額度偏低時，模式傾向將預算優先分配予減碳能力較佳之區域；當預算額度較為充足時，本研究發展之公平性目標式會有助於減少區域間預算配給之差異。由於分配結果會隨著權重目標調整而改變，本研究透過多目標權衡分析針對不同權重組合求取最佳解，可作為決策者未來執行模式之參考依據。

關鍵詞：低碳運輸計畫；預算分配；公平性；多目標混合整數非線性規劃

ABSTRACT

Reducing greenhouse gas emissions is one major issue and challenge in transportation sections. To achieve this mission, various administrative divisions under the central government were asked to propose some low-carbon transport projects for annual budget planning and allocation.

Instead of arbitrarily evaluating the performance of those projects, this paper contributes a method for quantifying and jointly optimizing the results of project selections and budget allocations, while also considering the proportion and minimum required amount of each proposed budget. A basic model (Model 1) adapted from the typical 0-1 knapsack problem, an extended mixed integer programming model (Model 2), and a multi-objective mixed integer nonlinear programming model (Model 3) are developed in this study.

Models 1 and 2 are maximizing the total reduction of emissions based on selected projects and approved budget. Model 3 is further pursuing the equality issue by minimizing the variance of allocation results among administrative divisions. Through a series of numerical examples and sensitivity analysis, the models demonstrate their ability to maximize emissions reduction through budget allocating decisions. Different weight combinations between two objective functions are also examined.

Key Words: *Low-carbon transportation; Budget allocation; Equity; Multi-objective mixed integer nonlinear programming problem (MMINLP)*

一、前言

運輸為衍生性需求，文明演進勢必帶動運輸需求量的增加。根據國際能源總署研究報告 (International Energy Agency, IEA) ^[1] 指出，全球溫室氣體在 1970-2005 年間共增加

61%，2005 年全球大約排放 454 億噸的溫室氣體，而其中 59% 就來自於石化燃料的使用（見圖 1），尤以運輸部門產生之二氧化碳排放量占全球產業石化燃料總排放量約 23%（見圖 2）。Lee^[2]指出運輸部門 95% 之活動必須依賴石化燃料，顯示在交通運輸帶給人們便利的同時，運輸系統排放的大量溫室氣體不僅對環境產生衝擊，更導致全球氣候的暖化與異變（Koetse and Rietveld^[3]）。

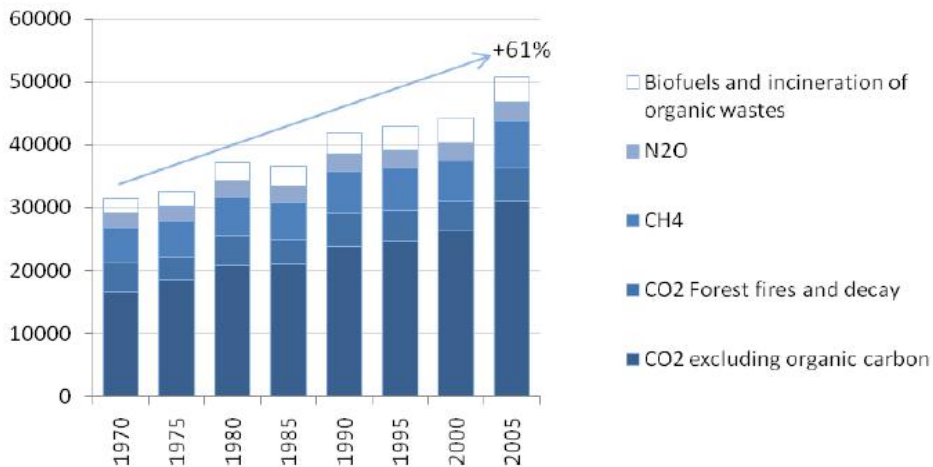


圖 1 1970 至 2005 年全球溫室氣體排放統計 (IEA^[1])

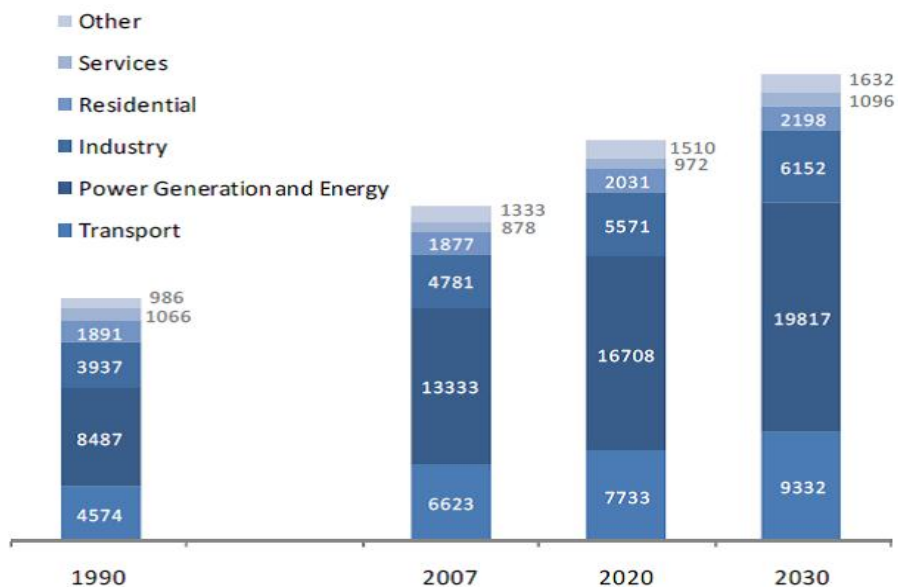


圖 2 全球各部門溫室氣體二氧化碳排放量 (IEA^[1])

面對全球暖化之問題，自 1997 年京都議定書通過後（2005 年生效，效期至 2020 年），各國紛紛提出低碳運輸計畫等實質行動響應。我國環保署於「低碳示範城市建構對象」會議中，要求各縣市針對低碳運輸提出計畫後加以評選，並編列年度預算投入其最終評選之計畫。

傳統公共建設之計畫評選與預算分配，並未明示或不易估計計畫目標、成本和效益（如本研究之低碳運輸計畫），大多由行政機關決策者依經驗、主觀制定，甚少嚴謹考量計畫之成本及實行之成效、缺乏以科學的方法進行系統性的分析、比較與評估。不僅造成計畫評選之過程難以客觀量化，計畫執行效率也不易評估與追蹤。除此之外，大部分文獻均側重於探討計畫之組合評選或預算分配最佳化，較少同時考量計畫評選與預算分配。

有鑑於此，本研究希望能以國內之低碳運輸計畫評選與預算分配為例，依照專家訪談之建議，導入「計畫可調整性」及「最低可執行預算規模比例」之概念，建構一多目標混合整數非線性規劃模式，期能兼顧低碳運輸策略效益最大化與提升區域預算分配公平性等目標。「計畫可調整性」即將傳統背包問題之離散變數改為連續變數，以提升預算投入之彈性及體現計畫分期投入的概念；後者「最低可執行預算規模比例」則因考量現實中計畫皆需最低執行成本，計畫投入不得小於該最低規模成本量，以避免計畫無法正常執行。同時將投入成本所帶來的效益一併列入公平性參考依據。以避免真正有效率的計畫因為齊頭式的成本公平而被略過，使得預算分配更有效率。相關研究架構如圖 3 所示。

後續章節分述如下：第二節透過文獻回顧整理公共建設計畫資源分配之相關模型與架構，並以此為基礎建構本研究之預算分配模式。第三節介紹本研究所提出之模型與相關假設，包括依據典型背包問題發展整數規劃預算分配模型、考慮預算可調整性與最低可執行預算比例，將計畫分成連續型計畫及非連續型計畫之混合整數規劃模型、納入公平性目標式、區域預算配給比例等參數構建為多目標混合整數非線性規劃問題。第四節藉由數值分析結果驗證模式、敏感度與多目標權衡分析之可行性，第五節藉由我國行政院環保署之「低碳城市建構計畫」實例分析探討預算分配結果，期能提供政府分配預算之建議與參考。

二、文獻回顧

2.1 國內外低碳運輸計畫

Lenzen 等人^[4]曾針對經濟合作暨發展組織國家（Organization for Economic Cooperation and Development）之客貨運業各項運具能源消耗量進行分析，發現能源消耗量（括號內為年成長率）都持續成長（見表 1）。

Lee^[2]在其研究指出現今運輸部門全球二氧化碳排放量以私人運具、公路貨運與航空產業為前三名，文中並提出改善能源使用效率、發展替代能源、制訂低碳燃油標準等低碳運輸相關政策。

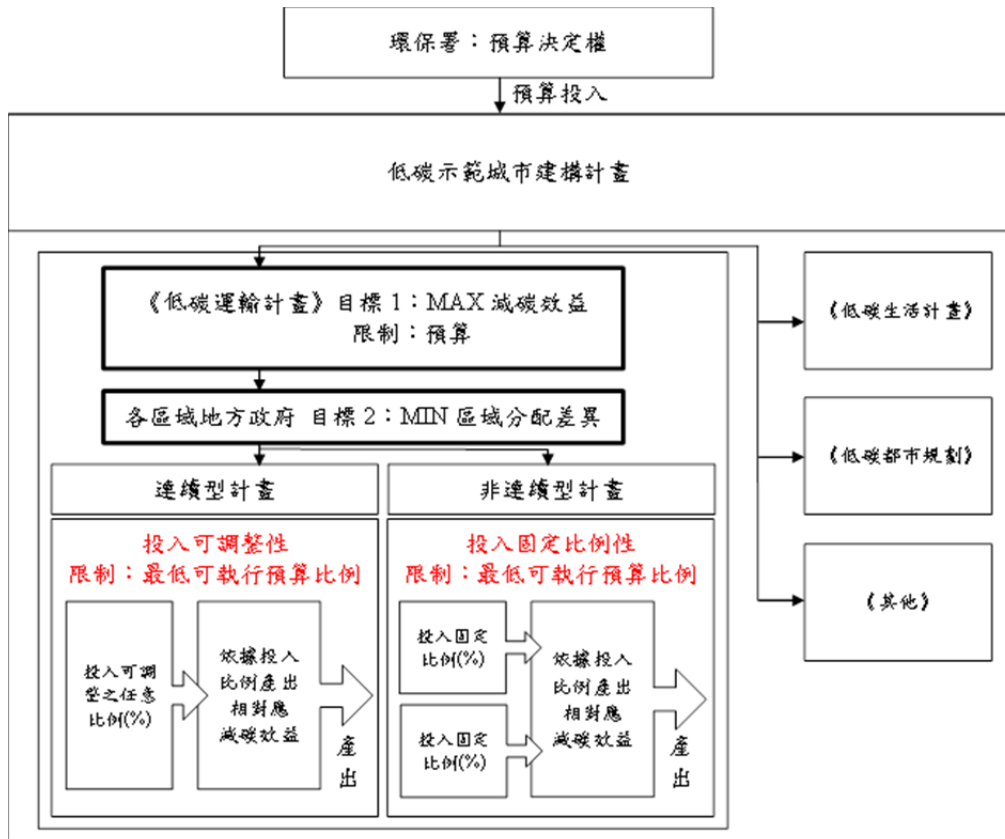


圖 3 研究架構圖

表 1 OECD 成員國各運具模式之能源消耗量(單位：百分比)

運具模式		北美區	歐洲區	太平洋區
客運	Cars	57 (+1.4)	54 (+1.7)	57 (+1.2)
	Buses	1 (+1.5)	3 (+1.3)	1 (+0.8)
	Railways	1 (+0.4)	1 (+1.0)	3 (+0.9)
	Aviation	8 (+2.3)	8 (+4.5)	5 (+3.3)
貨運	Trucks	24 (+2.0)	30 (+2.2)	25 (+1.9)
	Railways	7 (+1.6)	3 (+0.1)	3 (+1.8)
	Shipping	2 (-0.7)	1 (+0.1)	5 (+0.2)

資料來源：World Energy Outlook 2002, OECD Statistics Database。

在私人運具方面，美國運輸部針對溫室氣體減量提出 4 種計畫，包含：採用低碳燃油、增加車輛燃油經濟性、改善運輸系統效率以及減少碳密集旅次活動 (USDOT Report^[51])。

這些計畫具體執行方案包括：發展與採用替代燃料，如氫能源與電能；改善引擎效率、車體設計與輕量化材質減少油耗；鼓勵私人運具旅次移轉至大眾運輸、提升整體公共運輸系統的運作效率；改變旅次活動型態，提倡更具能源效率的運具、增加運具乘載率、與減少非必要旅次。歐盟從提高運具耗能標準方面著手，自 2012 年起限制汽車排放量應小於 100 公克／公里，並推廣省能運具及智慧型汽車。亞洲部分，日本因大眾運輸系統較其他亞洲國家發達，因此著重在節約能源。藉由節約能源法的規範，要求提高運具耗能標準、改善運具系統管理、推廣節能運具以及獎勵省能運具研發（交通部運研所^[6]）。

在替代運輸方面，部分文獻強調發展公共運輸有助於轉移私人運具旅次量，進而減少碳排放量（例：Waterson 等人^[7]；Chester 與 Horvath^[8]；Geels^[9]）。Li 與 Li^[10] 以日本為例說明人口規模較大的城市，公共運輸的減碳效率較高。同樣的，公共運輸系統的推行對於人口稠密的歐洲較容易受到民眾的支持，進而達到減少交通擁擠與減碳目的。反觀美國由於幅員廣闊、使用者習慣與燃油成本低廉，私人運具使用率仍居高不下（Greene 與 Wegener^[11]；Chester 與 Horvath^[8]；Geels^[9]）。Anderson 與 Karathodorou^[12] 針對捷運系統之場站、基礎設施、列車運轉與營運面等提出各項減碳建議（見圖 4）。

Lai 與 Ren^[13] 在其研究中也建議可採取政府、公共運輸及社會大眾三方互動的管理模式，促使大眾積極配合參與低碳計畫的發展。國際運輸論壇（ITF）則認為除發展低碳計畫，同時也必須考量大眾對減排計畫的接受度，以及執行時可能遭遇的障礙與效益評估的問題。因此提出 4 種運輸部門的低碳相關計畫：第一，在運輸需求部分，應盡量減少需求量，並利用重新規劃土地使用、提升乘載率、改變運輸需求型態與規模來減少私人運具之

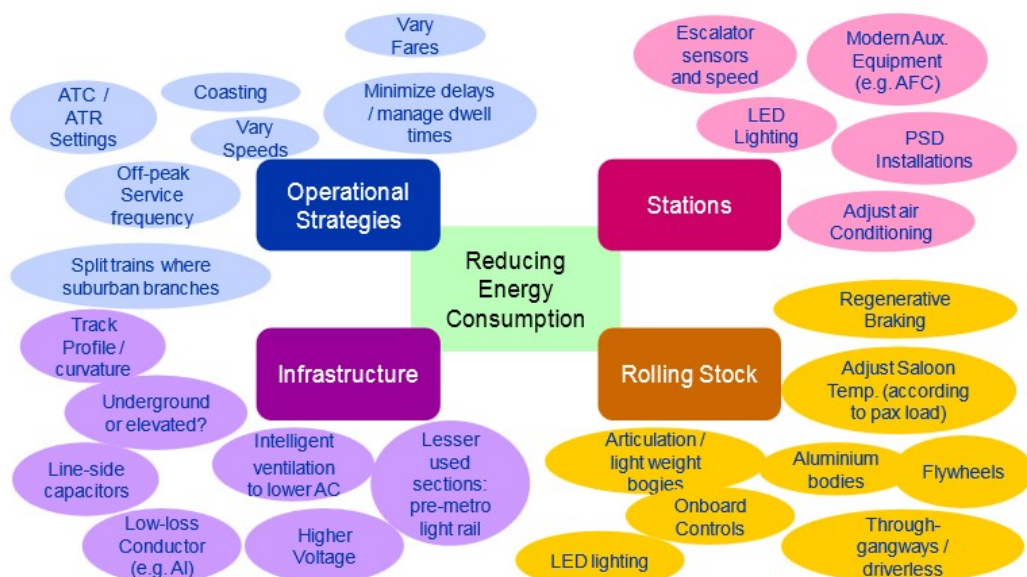


圖 4 捷運低碳計畫架構 (Anderson 與 Karathodorou^[12])

需求；第二，在運具使用方面，提倡使用高效能低污染的運輸工具，如大眾運輸工具或非燃油動力交通工具。第三點則是著重在燃油部分政府應協助發展新型替代燃油科技與車輛節能科技。最後，利用交通控制與管理手段，使車流更順暢以減少怠速所產生的碳排放量。

在公路貨運方面，Li 與 Gao^[14] 藉由成立低碳貨運網路，配合發展半掛式拖車運輸 (semi-trailer swap transportation)，不僅減少貨運物流業二氧化碳排放量，同時增加貨物運輸量與促進運輸網路之營運效率。

綜上所述，低碳運輸政策大部分需要政府機關協助推行才能達到實質效果。根據聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Programme) 估計，目前國際主要城市所產生之二氧化碳，占全球總排放量 80%，故都市政策制定者在推動減碳工作上扮演著相當重要的角色。本研究特別針對國際各大城市與我國減碳計畫之「運輸部門」部分整理，據以研析與比較我國和國際各城市之減碳計畫、目標與未來計畫趨勢，供政府相關部門未來施政參考。

表 2 國外主要城市運輸部門溫室氣體減量目標與節能減碳措施

國家	主要城市	溫室氣體排放量減量目標		運輸部門節能減碳政策措施
		城市級	國家級 (自訂／議定書目標)	
美國	舊金山	2012 年：排放量比 1990 年水準再降 20%	2002~2012 年：每單位經濟活動排放強度降低 18 % (2008~2012 年：排放量比 1990 年水準降 7%)	1.增加公眾運輸使用率 2.推廣共乘制 3.推廣腳踏車與步行代替開車
	西雅圖	2012 年：排放量比 1990 年水準降 7%		1.打造完善的自行車環境 2.採用生質燃油並推廣油電混合公車 3.大量使用電車 4.興建輕軌大眾運輸系統
	洛杉磯	2030 年：排放量比 2007 年水準降 35%，達到 1990 年的水準		1.提倡潔淨替代燃料與電力車 2.巴士運輸方案 3.建置自動交通監控系統 4.推廣通勤者行程削減計畫
	紐約	2030 年：排放量比 2005 年水準降 30%		1.擴建鐵路系統和改善巴士服務 2.試行道路收費計畫
英國	倫敦	1.2010 年：排放量比 1990 年水準降 20% 2.2050 年：排放量比 1990 年水準降 60%	2008~2012：排放量比 1990 年水準降 12.5%	1.「塞車稅」制度，根據 CO ₂ 排放水平，向進入市中心的車輛徵收費用 2.巴士汰舊換新
日本	東京	2020 年：排放量比 2000 年水準降 25%	2008~2012 年：排放量比 1990 年水準降 6%	制定有利於推廣使用省油汽車的規例。

資料來源：顏君聿^[15]。

表 3 國內運輸部門溫室氣體減量目標與節能減碳措施

	運輸部門 節能減碳目標	相關法規修訂	技術計畫	經濟誘因與社會宣導
1998年 第1次全國能源會議	2010年累計節約率為15.5%、2020年達23.7%，累計節約量為688萬公秉油當量	修訂「車輛容許耗用能源標準及檢查管理辦法」，增訂汽機車耗用能源標準	- 提升汽機車耗用能源標準 - 推動採用省能運具 - 開發電動機車燃料電池 - 健全軌道大眾運輸系統 - 實施運輸系統管理計畫 - 發展智慧型運輸系統 - 降低運輸活動所衍生之環境衝擊	(1)推動汽燃費改隨油徵收 (2)加強省油車輛宣導
2005年 第2次全國能源會議	2020年累計節約369萬公秉油當量，降低CO ₂ 排放量1,046萬噸，到2025年累計年節約622萬公秉油當量，降低CO ₂ 排放量1,430萬噸	逐步檢討提高汽機車能源效率標準(2009年6月完成「車輛容許耗用能源標準及檢查管理辦法」修正草案)	- 健全完善的軌道運輸服務 - 提升公路及市區公車服務功能 - 提供民眾便利的交通轉乘服務 - 落實以綠色運輸系統為導向之土地使用規劃 - 合理化汽(機)車成長管理 - 強化私人運具使用管理 - 運用先進科技 - 強化運輸需求管理 - 提升貨物運輸之運作效率 - 辦理能源領域科技計畫	(1)推廣低污染省能源運具或交通設施 (2)推廣與宣導綠色大眾運輸系統 (3)推廣節能活動
2008年 永續能源政策綱領	各部門行動計畫，應訂定部門節能減碳績效額度，以達成全國CO ₂ 排放減量目標(規劃於2016至2020年間回到2008年排放量，於2025年回到2000年排放量)	檢討修正道路照明標準降至合理範圍，並符合照明效率	- 建構便捷大眾運輸網，紓緩汽機車使用與成長 - 建構「智慧型運輸系統」，提供即時交通資訊，強化交通管理功能 - 建立人本導向，綠色運具(腳踏車與人行步道)為主之交通環境 - 推廣電動機車應用 - 推動「整車自主工業技術建立計畫」，輔導業界發展自主車型之可充電式油電車(PHEV) - 加強車輛節能創新技術研發計畫 - 計程車全面瓦斯化	(1)推動油電混合動力汽車獎勵推廣措施 (2)鼓勵使用替代燃料運具 (3)加強低污染、低油耗車輛宣導
2009年 第3次全國能源會議	訂定部門節能減碳目標，並逐年檢討及調整，以最低成本規劃可行方案(全國CO ₂ 排放減量目標同永續能源政策綱領，並視後京都時期協議後續發展進行調整)	- 落實道路管理法規 - 通盤檢討及修訂交通法令	- 發展公共運輸系統 - 建立友善自行車交通環境 - 推動共乘制度及資訊化派車系統 - 提升汽機車新車耗能標準 - 推動生質燃料 - 推動零件、系統及整車之輕量化 - 規劃「後鋰電池」之儲能技術	(1)推動汽燃費隨油徵收 (2)提供適當措施與誘因，創造電動及燃料電池汽、機車市場 (3)獎勵研發與推廣省能低碳運具 (4)獎勵「後鋰電池」之儲能技術 (5)各種車輛應標示油耗率、年度購油費用 (6)推廣省能交通運具

資料來源：行政院環保署；顏君聿^[16]。

2.2 公共建設計畫評選、預算分配與公平性

近年來公共建設計畫因政府財政日趨艱困，如何在資源有限的情况下，最佳化預算分

配，以達成整體效用最大化，儼然成為一門重要的課題。與民間企業較不同，公營機關分配預算時除考慮政策執行績效，還要考量區域平衡與縮短城鄉差距等議題，同時兼顧計畫生產效益與分配的合理公平性 (Kaplan 與 Michael^[17])。

以往決策者在規劃運輸計畫的同時，成本投入及計畫所產生的價值效果之評估內容往往缺乏較客觀的量化因素，多以非量化等主觀評選方式來進行決策 (例：Meredith 與 Mantel^[18]；Huang 等人^[19]；Puthamont 與 Charoenngam^[20])。Puthamont 與 Charoenngam^[20]建議五大類計畫共 50 項計畫評選標準；Huang 等人^[19]研擬由政府補助之研發科技計畫評選機制，從計畫本身科技程度、計畫執行、效益評估、風險衡量等方面進行評選，發展出 29 項細項評估準則；Meredith 與 Mantel^[18]則從生產、行銷、財務、人力資源管理等方面建議共 44 項計畫評選參考準則。上述研究所羅列之評選準則雖然鉅細靡遺，但實務面卻往往造成評選過程不易聚焦且流於主觀等缺點。

事實上過往文獻不乏應用量化模式進行公共建設計畫評選或預算分配的例子，包含最佳化模型 (例：Wise 與 Perushek^[21]；Zayed^[22]；Anderson 等人^[23]；Gabriel 等人^[24]；楊有恆等人^[25])、模糊理論、多準則評量等計畫評選方式 (例：Huang 等人^[26]；Cristóbal^[27]；Ebrahimnejad 等人^[28])，但鮮少同時進行計畫評選與預算分配之相關研究。

Wise 與 Perushek^[21]在其圖書館收藏資源分配模式下，利用多目標規劃模式在有限總預算下維持館藏成長量、各學科出版量比例平均分配，同時考量專款最小和最大的限制。Zayed^[22]則以公部門角度對橋樑維護工程計畫進行來探討如何分配預算金額。Anderson 等人^[23]利用多目標規劃對一廢棄物焚燒廠進行最大化焚燒量、經濟發展與環境衝擊等評估，納入遺傳演算法求得柏拉圖最佳解。Gabriel 等人^[24]以背包問題為基礎建構預算分配模式，探討如何在有限預算 (即背包容量) 內選擇工程的計畫組合並求解最大化的總計畫價值，文中同時證明此為一 NP 問題，本研究之模型一即參考此模型發展而成。楊有恆等人^[25]在其研究中建構線性規劃預算分配模式，使各產業間貢獻度達到最大，同時使不同產業間之滿意度差距減小之雙目標最佳化模型。

Huang 等人^[26]運用模糊多目標方式來求解公共基礎設施項目的預算分配問題。Cristóbal^[27]運用多準則評量法結合層級分析法 (analytic hierarchy process)，搭配妥協排序法 (i.e. the VIKOR method)，考量社會、經濟、環境與科技等互相衝突之決策目標，來評選西班牙政府挹注之再生能源計畫。Ebrahimnejada 等人^[28]同樣結合妥協排序法與模糊網路分析法 (analytic network process) 來進行建設案之評選。

本研究因所評選之低碳運輸計畫均有各地方政府所提供之量化成本與效益資訊，故朝向發展最佳化模型之計畫評選與預算分配方式。未來若面臨部份計畫成本或效益難以量化估計時，或需要考慮計畫科技創新或風險等質化影響因素，建議可運用模糊理論結合質化與量化模型來進行後續研究。

由於公共建設預算分配之決策問題大部分屬於多目標資源分配最佳化問題，本研究擬藉由整數規劃背包問題構建基礎模式。然而背包問題在過往文獻中大部分應用於計畫選擇 (project selection) 組合問題或僅探討預算分配 (budget allocation) 額度之議題；前者只著重

在計畫的選擇與否，投資風險過高，後者僅探討分配的額度，卻可能造成若干計畫預算配額過少無法正常運作等問題。除此之外，低碳運輸計畫具有多年期、長時效等特性。因此近年來國外類似計畫案例多採用先投入部分預算金額，例如電動車前導、示範計畫等分期分部方法以降低投資風險。

過往談及公共建設計畫預算分配公平性議題的文獻較少。Berger 與 Nasr Bechwati^[29]、Reinartz 等人^[30]與 Tsao^[31]從私人產業界的觀點，探討如何分配有限預算來留住舊客戶與吸引新顧客，藉由縮小資源分配之差距，兼顧新舊客戶之間的公平性，達成市占率最大化之目標。

綜上所述，本研究擬導入「計畫可調整性」及「最低可執行預算規模比例」以建構多目標數學規劃模式來達到低碳運輸策略效益最大與提升區域預算分配公平性等兩大目標。「計畫可調整性」即將傳統背包問題之離散變數改為連續變數，以提升預算投入之彈性及體現計畫分期投入的概念；後者「最低可執行預算規模比例」則因考量現實中計畫皆需最低執行成本，計畫投入不得小於該最低規模成本量，以避免計畫無法正常執行。

在衡量分配公平性方面，有別於過往研究多著重於縮小資源（如本研究之預算金額）分配之差距，本研究將投入成本後所預期之效益一併列入公平性參考依據。以避免真正有效率的計畫因為齊頭式的成本公平而被略過，使得預算分配更有效率。

三、研究方法

3.1 問題描述與定義

本研究假設由中央政府行政機關（例如行政院環保署）執行預算分配動作，並希望透過不同的預算分配策略搭配不同的預算限制進行我國低碳運輸計畫評選與預算分配，據以提供中央政府機關規畫預算分配之決策參考。

以下分別定義計畫分配架構、計畫類型、預算分配策略：

（一）計畫分配架構

考量我國現行預算分配方式，本研究假設中央決策機關先依據資金運用方式將不同種類之低碳計畫分門別類（例如：營運型、補貼型、建設型、其他類）。每種計畫類型下涵蓋各地方政府所提出各區域未來減碳發展目標之子計畫，由中央政府進行計畫評選與預算分配。

（二）計畫類型

- （1）連續型計畫：即該計畫之投入不一定是固定量，具有可依比例調整性、可依比例變動性。例如推動宣導等無固定規模資產計畫。

- (2) 非連續型計畫：此種計畫類型預算投入增加幅度須有一固定規模比例，適用於有「不可分割性資產」的計畫。例如購買低碳運具等計畫，一輛運具相當於一「定量」投入，此種類型計畫投入須為「倍數」。

由於各項計畫之總減碳效益已知，為簡化計畫預算調整後之減碳效益估算，本研究假設各子計畫減碳效益及預算兩者為正相關（即投入預算越多，產出減碳效益亦隨之增加），各計畫之成本與減碳效益規模報酬固定，各計畫間也相互獨立；低碳計畫不具有加碳之負效益。

(三) 預算分配策略

- (1) 減碳效益極大化：考量總預算限制，最大化獲得預算分配之子計畫之總減碳效益（未考慮區域相關變數）。
- (2) 區域分配公平性：本研究與以往文獻之探討公平性不同，並非單純以分配到之資源做為衡量依據。因考慮到成本公平未必產出效率也公平，例如區域發展較完整之地區因減碳體質較優良，發展較落後之地區則較為劣勢，使得分配到之預算雖然相同，但也犧牲了些許減碳效益卻無法追求最大化。本研究擬參考各區域平均擬分配之預算，考量投入資源後所產出之減碳效益多寡，納入區域間成本效益比之最小變異數概念，做為投入預算前之預算分配策略。
- (3) 多目標權衡策略：將上述兩種策略依據不同權重加以組合。

模式主要涵蓋兩大類限制式：(1) 總執行預算限制：各區域分配到之預算款項不得超越政府總預算上限；(2) 最低可執行預算比例限制：執行成本需達到一定規模，計畫才得以正常執行。每個子計畫均設有「最低可執行預算比例」，倘若該計畫投入未達到一定標準，則該計畫將不入選也不投入預算。

3.2 模式構建

以下共介紹本研究所構建之三種模式，分別是應用背包問題所構建之整數規劃預算分配模型（即模式 1）、加入考慮預算可調整性與最低可執行預算比例，將計畫分成連續型計畫及非連續型計畫之混合整數規劃預算分配模型（即模式 2）、加入公平性目標式、區域預算配給比例等參數之多目標混合整數非線性規劃預算分配模型（即模式 3）。

3.2.1 變數與參數定義

模式 1 至 3 之相關變數與參數定義分述如下：

- (1) 模式集合符號

K ：計畫類型集合；

I ：計畫執行區域集合；

J_D ：非連續型計畫集合；

J_C ：連續型計畫集合。

(2) 模式參數

B ：可分配預算總額；

n ：區域總數， $i \in I, i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ；

m ：計畫類型總數， $k \in K, k = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ ；

P_D ：非連續型計畫總數， $j \in J_D, j = \{1, 2, 3, \dots, P_D\}$ ；

P_C ：連續型計畫總數， $j' \in J_C, j' = \{1, 2, 3, \dots, P_C\}$ ；

C_{ij}^k ：計畫類型 k 中，區域 i 內非連續型計畫 j 執行所需成本；

$C_{ij'}^k$ ：計畫類型 k 中，區域 i 內連續型計畫 j' 執行所需成本；

E_{ij}^k ：計畫類型 k 中，區域 i 內非連續型計畫 j 預估產生之減碳量；

$E_{ij'}^k$ ：計畫類型 k 中，區域 i 內連續型計畫 j' 預估產生之減碳量；

L_{ij}^k ：計畫類型 k 中，區域 i 內非連續型計畫 j 最低可執行預算比例；

$L_{ij'}^k$ ：計畫類型 k 中，區域 i 內連續型計畫 j' 最低可執行預算比例；

d_{ij}^k ：計畫類型 k 中，區域 i 內非連續型計畫 j 每投入一單位增額之比例。

(3) 模式決策變數

x_{ij}^k ：模式 1 之決策變數。若計畫類型 k 區域 i 之計畫被挑選，則變數值為 1；反之為 0；

z_{ij}^k ：非連續型計畫配給單位乘數（非負整數）。代表計畫類型 k 區域 i 內非連續型計畫 j 最終所分配到之預算比例乘數；

$r_{ij'}^k$ ：連續型計畫預算分配比例。代表計畫類型 k 區域 i 內連續型計畫 j' 最終所分配到之預算比例；

α^k ：計畫類型 k 之預算分配比例；

β_i^k ：計畫類型 k 區域 i 之區域預算分配比例。

3.2.2 模式 1

為追求計畫執行之完整性，模式 1 假設預算分配必須全部投入或全盤放棄，屬於「all or nothing」的規劃方式。依據每項計畫與子計畫所估計需投入之預算成本與減碳效益，由決策者根據總預算限制挑選計畫（忽略區域相關變數），為典型 0-1 背包問題之應用（詳見式 1-3）。背包問題之相關文獻眾多，Merkle 與 Hellman^[32] 在密碼學之應用為近代較為經典之研究。背包問題是一種組合優化的 NP-Complete 問題。問題可以描述為：給定一組物品（即本研究之計畫案），每種物品都有自己的重量和價格，在限定的總重量內（即本研究之總預算），如何選擇才能使物品的總價格（即本研究之總減碳效益）最高。方程式(1)為最大化總減碳效益目標式，式(2)為總預算限制式，式(3)假設所有計畫執行變數均為 binary 變數（若該計畫被挑選，則變數值為 1；反之為 0）。

$$\max Z_1 = \sum_i \sum_{j \in J} \sum_k E_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J} \sum_k C_{ij}^k x_{ij}^k \leq B \quad (2)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3)$$

3.2.3 模式 2

上述由背包問題為基礎發展之模式 1，雖然操作較為容易，但實務上卻可能因剩餘的資金無法再投入任何一項未被選中之計畫，在無法完全將預算用罄的情況下，造成預算分配缺乏彈性。本模式將計畫根據投入預算方式的不同分成連續型計畫與非連續型計畫，藉由將分配方式修正為可變動之比例，使預算分配可任意調整。

$$\max Z_2 = \sum_i \sum_{j \in J_D} \sum_k E_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_i \sum_{\substack{j' \in J_C \\ j \neq j'}} \sum_k E_{ij'}^k r_{ij'}^k \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J_D} \sum_k C_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_i \sum_{\substack{j' \in J_C \\ j \neq j'}} \sum_k C_{ij'}^k r_{ij'}^k \leq B \quad (5)$$

$$z_{ij}^k d_{ij}^k \leq 1 \quad (6)$$

$$0 \leq d_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J_D, \forall k \in K \quad (7)$$

$$z_{ij}^k \in \text{non-negative integer} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_D, \forall k \in K \quad (8)$$

$$r_{ij'}^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j' \in J_C, \forall k \in K \quad (9)$$

方程式(4)表示計畫類型 k 區域 i 中，被選中之非連續型計畫和連續型計畫，總產出之減碳效益和。假設各子計畫產出之減碳效益與獲分配之預算成線性正比關係。式(5)為總預算限制式。

z_{ij}^k 為非連續型計畫配給單位乘數，為一正整數之決策變數；而欲輸入之參數 d_{ij}^k 則為每一單位增額之比例， $z_{ij}^k d_{ij}^k$ 則代表該非連續型計畫投入多少單位的增額比例（該比例介於 0-1 之間，詳見式(6)）。非連續型計畫因預算投入具「固定比例性」，即預算增加幅度須有一固定規模比例，適用在購置低碳公車等具有實質上「不可分割性資產」的計畫。例如每增購一部低碳公車必須將該計畫投入比例增加 0.2，購置兩部則增加 0.4 以此類推。連續型計畫則與模式 1 之決策變數雷同。

本研究在模式 2 中，試圖藉由決策變數性質的改變，提高預算分配時預算投入之效率及合理性。一般而言，現實層面的決策者在有預算限制情況下，會盡可能地將預算用罄，以增加總減碳效益。

3.2.4 模式 3

前開模式均屬於單一目標決策模式，主要考慮最大化減碳效益。然而政府機關在評估低碳運輸計畫預算分配時，為避免區域發展失衡，對於投入資源是否能兼顧區域均衡發展與公平性，儼然成為預算分配之新興課題。

各區域間之差異在於城鄉發展程度與社經背景條件不同，甚至影響各區域提出之減碳計畫規模與計畫執行效益。為避免只考慮減碳效益最大化目標，導致資源集中在某些發展程度較高之區域；另一方面，為避免當政策僅考慮區域公平性時，齊頭式平等地分配預算至某些減碳能力相對較弱勢之區域。有鑑於此，模式 3 加入「區域公平性」目標式，考量區域預算配給比例，運用最小變異數之概念，在追求減碳效益的同時，減少區域之間預算分配之差異性。

$$\max Z_3 = \sum_i \sum_{j \in J_D} \sum_k E_{ij}^k \omega_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_i \sum_{\substack{j \in J_C \\ j \neq j'}} \sum_k E_{ij}^k \omega_{ij}^k r_{ij'}^k \quad (10)$$

$$\min Z_4 = \sum_i \left[\frac{\frac{\sum_j E_{ij}^k \omega_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_{j', j \neq j'} E_{ij'}^k \omega_{ij'}^k r_{ij'}^k}{B\alpha^k} - \left(\frac{\sum_i \sum_j E_{ij}^k \omega_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_i \sum_{j', j \neq j'} E_{ij'}^k \omega_{ij'}^k r_{ij'}^k}{\sum_i \frac{B\alpha^k}{n}} \right) / n}{\sum_i \frac{B\alpha^k}{n}} \right]^2 \quad (11)$$

$$\text{if } \left(\frac{B\alpha^k \beta_i^k}{C_{ij}^k} \right) - L_{ij}^k = 0, \text{ then } \omega_{ij}^k = L_{ij}^k ; \text{ otherwise} \quad (12)$$

$$\omega_{ij}^k = \max(0, \left(\frac{B\alpha^k \beta_i^k}{C_{ij}^k} \right) - L_{ij}^k) \left(\frac{\left(\frac{B\alpha^k \beta_i^k}{C_{ij}^k} \right)}{\left(\frac{B\alpha^k \beta_i^k}{C_{ij}^k} \right) - L_{ij}^k} \right)$$

$$\text{if } \left(\frac{B\alpha^k \beta_{i'}}{C_{ij'}^k} \right) - L_{ij'}^k = 0, \text{ then } \omega_{ij'}^k = L_{ij'}^k ; \text{ otherwise} \quad (13)$$

$$\omega_{ij'}^k = \max(0, \left(\frac{B\alpha^k \beta_{i'}}{C_{ij'}^k} \right) - L_{ij'}^k) \left(\frac{\left(\frac{B\alpha^k \beta_{i'}}{C_{ij'}^k} \right)}{\left(\frac{B\alpha^k \beta_{i'}}{C_{ij'}^k} \right) - L_{ij'}^k} \right)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J_D} \sum_k C_{ij}^k \omega_{ij}^k z_{ij}^k d_{ij}^k + \sum_i \sum_{\substack{j \in J_C \\ j \neq j'}} \sum_k C_{ij'}^k \omega_{ij'}^k r_{ij'}^k \leq B \quad (14)$$

$$z_{ij}^k d_{ij}^k \leq 1 \quad (6)$$

$$0 \leq d_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J_D, \forall k \in K \quad (7)$$

$$z_{ij}^k \in \text{non-negative integer} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_D, \forall k \in K \quad (8)$$

$$r_{ij'}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j' \in J_C, \forall k \in K \quad (9)$$

$$0 \leq \beta_i^k \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (15)$$

方程式(10)仍為最大化總減碳效益，其中 ω_{ij}^k 之分子項 $B\alpha^k\beta_i^k$ 為計畫類型 k 區域 i 下，該低碳子計畫最終分配到之預算，為各階層之分配比例乘上總預算額度。將 $B\alpha^k\beta_i^k$ 除以分母項 C_{ij}^k ，若該值大於或等於預算最低執行比例 L_{ij}^k ，代表可獲得該預算額度；若該值小於預算最低執行比例 L_{ij}^k ，代表計畫被執行比例與預算分配未達到一定可執行規模，為避免預算浪費而放棄該低碳計畫（ $\omega_{ij}^k = 0$ ，非連續型計畫； $\omega_{ij'}^k = 0$ ，連續型計畫；詳見式(12) ~ (13)）。

方程式(11)表示將各區域之每單位投入成本所對應之產出效益與各區域平均單位投入成本所對應之產出效益之差距取變異數，並使其變異最小，目的在於縮短各區域之間分配之差異。式(14)仍為總預算限制式，式(6) ~ (9)與式(15)代表各決策變數之範圍。

由於非線性目標式與限制式使模式成為混合整數非線性規畫問題，此一類型問題不太容易求得全域最佳解，不似一般混合整數規劃問題能透過線性規畫鬆弛 (linear programming relaxation) 或拉式鬆弛 (Lagrangian relaxation) 求取解之界限值；部分目標式與限制式亦無法滿足 Karush - Kuhn - Tucker conditions。同時為避免非劣解、偏好函數所帶來之複雜性，本研究採用加權多目標之方式 (Fatemeh 與 Tarokh^[33]，詳見式(20))，將原模式簡化為單目標規劃模式後運用最佳化軟體 Lingo 內建 Global Solver 作全域搜尋引擎與運算求解，當參考解收斂至一定值且連續數回合無法改善即停止 (until no further improvement then stop)。同時為探討所設定之權重與最佳解之關係，本研究將雙目標式分別標準化後再進行多目標權衡分析，瞭解權重變化對最佳解值之影響。

$$\min \left(\sum_{i=1}^k w_i^p \left| \frac{z_i(x) - z_i^*}{z_i^{\max} - z_i^*} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (20)$$

四、應用例說明

配合文獻回顧方法、專家訪談及現實資料，本節擬透過應用例來驗證模式可行性，同時探討不同參數設定之敏感度分析與多目標權衡分析之應用結果。假設中央政府決定於計畫類型 k 投入 280 百萬元 (範例 1) 與 400 百萬元 (範例 2) 之預算，共有 3 個區域地方政府各自提出 3、4、2 個連續型與非連續型之低碳計畫 (如圖 5)，相關參數設定如表 4，所有成本單位均為百萬元，所有減碳效益單位均為萬噸，應用本研究所構建之 3 種模式之計畫選擇與預算分配之數值分析結果。各項計畫之預算與減碳效益均為已知，由各區域地方政府委請顧問公司估算提供。

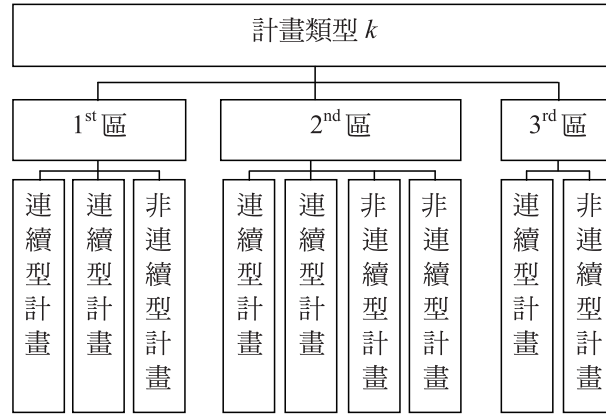


圖 5 範例關係結構圖

表 4 參數設定一覽表

符號	B	n	C_{11}^k	C_{12}^k	C_{21}^k	C_{22}^k	C_{31}^k	C_{32}^k	$C_{11'}^k$
數值	400	3	85	—	98	150	85	—	80
符號	$C_{12'}^k$	$C_{21'}^k$	$C_{22'}^k$	$C_{31'}^k$	$C_{32'}^k$	d_{11}^k	d_{12}^k	d_{21}^k	d_{22}^k
數值	94	83	110	60	—	0.25	—	1/3	1/3
符號	d_{31}^k	d_{32}^k	E_{11}^k	E_{12}^k	E_{21}^k	E_{22}^k	E_{31}^k	E_{32}^k	$E_{11'}^k$
數值	0.2	—	92	—	97	149	89	—	85
符號	$E_{12'}^k$	$E_{21'}^k$	$E_{22'}^k$	$E_{31'}^k$	$E_{32'}^k$	L_{11}^k	L_{12}^k	L_{21}^k	L_{22}^k
數值	95	83	99	72	—	0.2	—	0.4	0.4
符號	L_{31}^k	L_{32}^k	$L_{11'}^k$	$L_{12'}^k$	$L_{21'}^k$	$L_{22'}^k$	$L_{31'}^k$	$L_{32'}^k$	—
數值	0.2	—	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	—	—

其中各低碳計畫最低可執行預算比例之參數設定部分，為區分相對較大規模計劃與相對較小規模計畫，假設若該計畫之成本大於各區域成本平均數，即歸類於大型計畫；反之，小於各區域成本平均數，則歸類於小型計畫。本研究並假設兩目標之間重要程度相同，意即代表著中央決策者對於兩目標同樣重視，因此設定初始兩目標權重比 1：1。假設中央決策單位之總預算為 280 百萬元（範例 1），依據本研究所構建之 3 種模式分配結果如表 5-1 至表 5-3。

表 5-1 總預算 280 百萬元，模式 1 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	0	30.4%	85
		2'	0		
	非連續型	1	100%		
2	連續型	1'	0	39.3%	110
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
		2	0		
3	連續型	1'	0	28.6%	80
	非連續型	1	100%		
投入預算：275 百萬元；減碳量／減碳效益：334 萬噸。					

表 5-2 總預算 280 百萬元，模式 2 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	0	33.6%	94
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
2	連續型	1'	0	55%	154
		2'	3.64%		
	非連續型	1	0		
		2	100%		
3	連續型	1'	0	11.4%	32
	非連續型	1	40%		
投入預算：280 百萬元；減碳量／減碳效益：359.2 萬噸。					

表 5-3 總預算 280 百萬元，模式 3 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	0	33.6%	94
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
2	連續型	1'	44.2%	37.9%	106
		2'	0		
	非連續型	1	0		
		2	47.2%		
3	連續型	1'	0	28.5%	80
	非連續型	1	100%		
投入預算：280 百萬元；減碳量／減碳效益：355.3 萬噸。					

由範例 1 之總預算分配結果顯示，以背包問題分配（見表 5-1），結果可能會發生預算未用罄，無法發揮減碳效益最大化之情況。模式 2（表 5-2）因解除 0-1 整數規劃限制之緣故，於 3 種情境模式下有最高之減碳效益，但可能會使某區域內計畫被分配到少量預算，造成執行無效率或是無法正常執行該計畫。而模式 3（表 5-3）除藉由公平性目標式來兼顧各區域間每單位成本所產生之減碳效益，同時考慮計畫最低可執行預算比例，即每個計畫最低可執行之規模下限，以避免預算投入無法滿足該計畫最低執行成本。範例 2 之總預算提高為 400 百萬元，3 種模式分配結果如如表 6-1 至表 6-3 所示，其餘參數均與範例 1 相同。

表 6-1 總預算 400 百萬元，模式 1 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	0	0%	0
		2'	0		
	非連續型	1	0		
2	連續型	1'	0	65%	260
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
		2	100%		
3	連續型	1'	100%	35%	140
	非連續型	1	100%		
投入預算：280 百萬元；減碳量／減碳效益：355.3 萬噸。					

表 6-2 總預算 400 百萬元，模式 2 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	0	23.5%	94
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
2	連續型	1'	0	56.5%	226
		2'	69.1%		
	非連續型	1	0		
		2	100%		
3	連續型	1'	0	20%	80
	非連續型	1	100%		
投入預算：400 百萬元；減碳量／減碳效益：506.2 萬噸。					

表 6-3 總預算 400 百萬元，模式 3 分配結果

區域	計畫		決策變數值		
			計畫被執行比例(%)	區域預算配給比例(%)	區域獲得總預算(百萬元)
1	連續型	1'	34.5%	30.4%	112
		2'	100%		
	非連續型	1	0		
2	連續型	1'	0	49.6%	198
		2'	60.1%		
	非連續型	1	0		
		2	88.2%		
3	連續型	1'	0	20.0%	80
	非連續型	1	100%		
投入預算：400 百萬元；減碳量／減碳效益：504.7 萬噸。					

由範例 2 之數值分析結果發現，預算額度提高後，所選擇之計畫與範例一不盡相同。雖然模式 1 (應用背包問題) 在本範例恰巧將預算用罄，但區域 1 之子計畫完全未獲分配任何預算，且總減碳效益在 3 種模式裡為最差。模式 3 之計畫選擇與預算分配結果不但能兼顧各區域間預算分配之公平性，其減碳效益與模式 2 在上述兩個範例中並無明顯之差距(約 0.3~1.1%)。

本研究提出 3 種模式以比較不同決策環境、不同目標下的預算分配方。3 種模式彼此

之間並無絕對之優劣，僅提供決策者於面對不同決策環境之決策支援系統。

4.1 敏感度分析

敏感度分析之作用在於探討當個別參數有增減變化時，對於模式優化結果之影響。本研究擬探討下列兩項參數之敏感度分析，據以作為決策者設定相關參數之參考。

4.1.1 預算水準

經由上述範例之數值分析結果可發現，不同預算額度對於各區域計畫選擇之結果會產生影響。本節以總預算 400 百萬元為基礎，每 5%之幅度為一區間，增減至前後 30%，應用模式 3 來進行預算分配，觀察各區域獲得預算分配之變化情形 (如圖 6)。

由於區域 2 計畫之減碳能力較高 (其次是區域 1，最後是區域 3)，當總預算水準不足時，模式會優先分配預算予減碳能力較佳之區域 2。當總預算逐漸增加，跨越過某一預算水準門檻時 (如 380 百萬元至 400 百萬元)，模式會因為公平性目標式之影響，減少優勢區域之預算轉而投入其他區域。最後，當預算到達第 2 個預算水準門檻 (即 460 百萬元至 480 百萬元) 時，減碳能力相對較弱之區域 3 也開始增加預算。因此本研究推論當預算相對充裕時，中央決策者較能針對公平性目標來調整預算分配。

4.1.2 最低可執行預算比例

最低可執行預算比例為模式 3 另一項重要參數設定。範例數值分析部分所採用之預算最低下限分別為「相對小型規模計畫 20%/相對大型規模計畫 40%」之限制條件，大小型規模之劃分則以所有低碳運輸計畫成本之平均數為標準：大於平均數則歸類為相對大型計

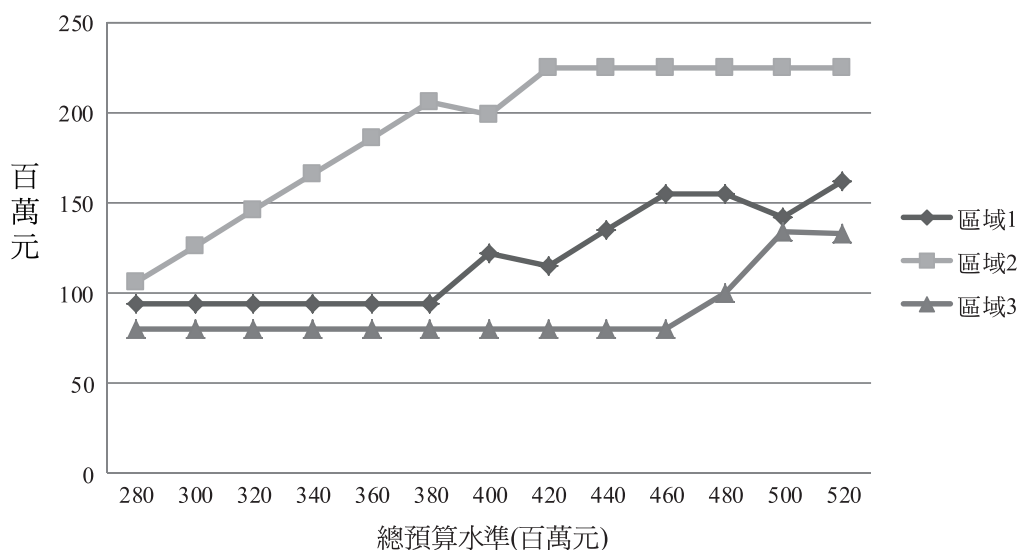


圖 6 不同預算水準對各區域預算分配結果之敏感度分析

畫；反之，則為相對小型規模計畫。本研究將最低可執行預算比例由原本下限之「20%/40%」並以其為基準向上及向下延展區間為-50%至+150%，即「10%/20%」、「30%/60%」、「40%/80%」、「50%/100%」，結果如表 7。

表 7 最低可執行預算比例之敏感度分析

最低可執行預算比例		10/20	20/40	30/60	40/80	50/100
總效益(萬噸)		504.67	504.67	504.67	501.97	500.57
公平性指數 [*]		20200	20200	20200	14325	5212
區域 1 預算分配結果(%)	1-1(小)	34.5%	34.5%	34.5%	40%	50%
	1-2(大)	100%	100%	100%	100%	100%
	1-3(小)	0	0	0	0	0
區域 2 預算分配結果(%)	2-1(小)	0	0	0	80%	93%
	2-2(大)	60.1%	60.1%	60.1%	0	0
	2-3(大)	0	0	0	0	0
	2-4(大)	88.2%	88.2%	88.2%	86%	100%
區域 3 預算分配結果(%)	3-1(小)	0	0	0	0	0
	3-2(小)	100%	100%	100%	100%	50%

註：為方便比較，本研究表中之「公平性」指數為多目標之計畫評選及預算分配規劃模式中第 2 目標式之值，並以倒數表示，為一相對數值。若公平性指標越高，即表示第 2 目標式之值越小，公平性目標分配越均衡。

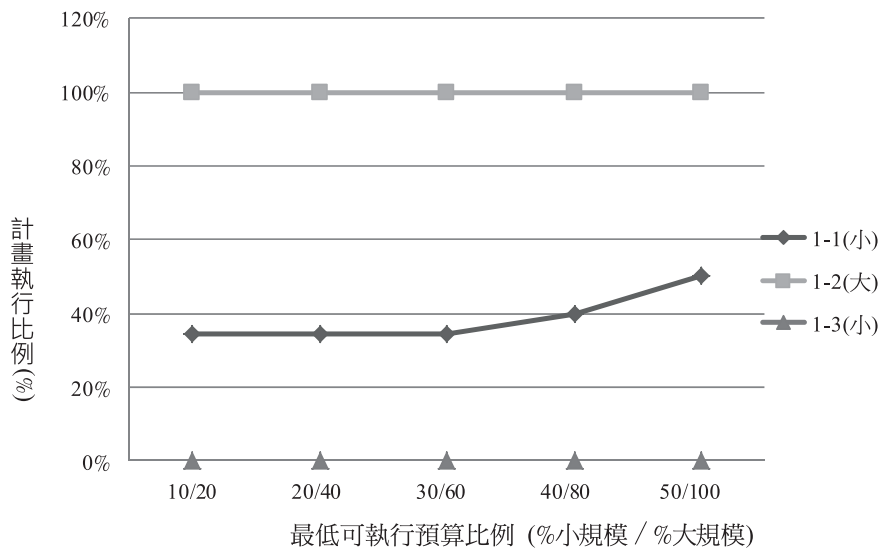


圖 7 最低可執行預算比例對區域 1 內計畫之敏感度分析

表 7 顯示當最低可執行預算比例越高時，代表計畫投入預算限制越嚴苛，總減碳效益呈現逐漸降低之趨勢，分配之公平性同樣會受限於最低可執行預算比例，較難以進行不同區域計畫之預算分配。

以區域 1 為例，由圖 7 可以發現，計畫 1-1 原本在下限 10%/20% 至 30%/60% 時計畫執行比例為 34.5%，但當最低可執行預算比例提升至 40%/80% 時，因下限高於以前面所求出之解臨界值 34.5%，因此模式會自動使計畫 1-1 之預算增加以滿足其下限值。而原本就投入全額預算之計畫 1-2 與完全未分配預算之計畫 1-3 則不受影響。

4.2 權衡分析

範例分析初始假設雙目標之權重為 1:1，即假設雙目標之重要程度視為同等水準。但現實決策環境下因考量因素不同，往往在目標之間會有所權衡。本研究接著探討 9 種總減碳效益極大化目標式與公平性差異極小化目標式之權重比組合（由 5:1 至 1:5）對於模式 3 最佳化結果之影響。為因應兩目標式單位不同，本研究先將模式值予以標準化，再設定兩目標之權重比。

圖 8 顯示在不同權重組合之下總減碳效益變動情形。當公平性目標權重越高（超過 1:3）時，總減碳效益會由 505.5 萬噸減少至 501.5 萬噸，但不同區域得以發展各自的低碳運輸計畫。若一味追求總減碳效益最大化，最終可能導致預算分配過度集中於某些區域。

圖 9 顯示在不同權重組合之下，區域預算分配比例之變動情形。當中央政府越重視減碳效益（即目標式 1 權重越高），則減碳能力相對較高之區域預算配給比例會逐漸升高，造成區域間預算分配嚴重失衡。若中央政府越重視公平性目標（即目標式 2 權重提高），各區域間預算分配差異會逐漸地減少。當雙目標式之權重比趨於某臨界值後，模式總目標值會收斂至一定值。

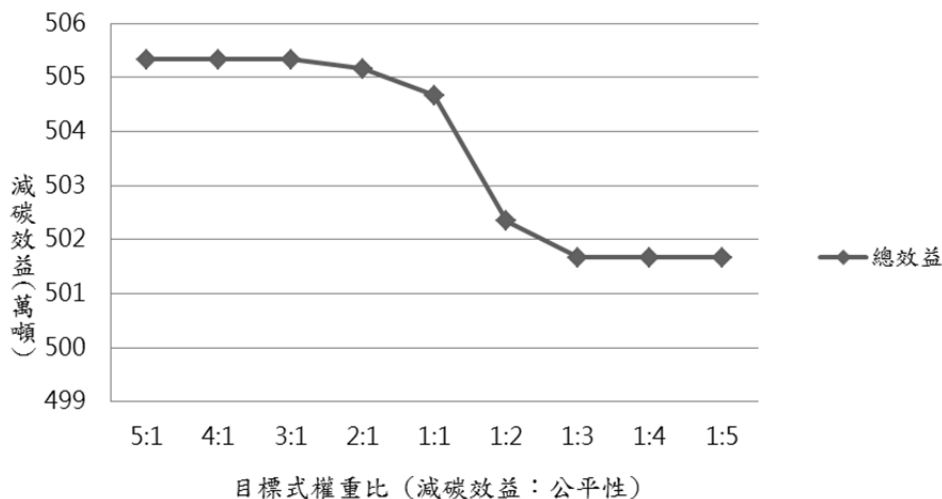


圖 8 不同目標權重比例對總減碳效益之影響

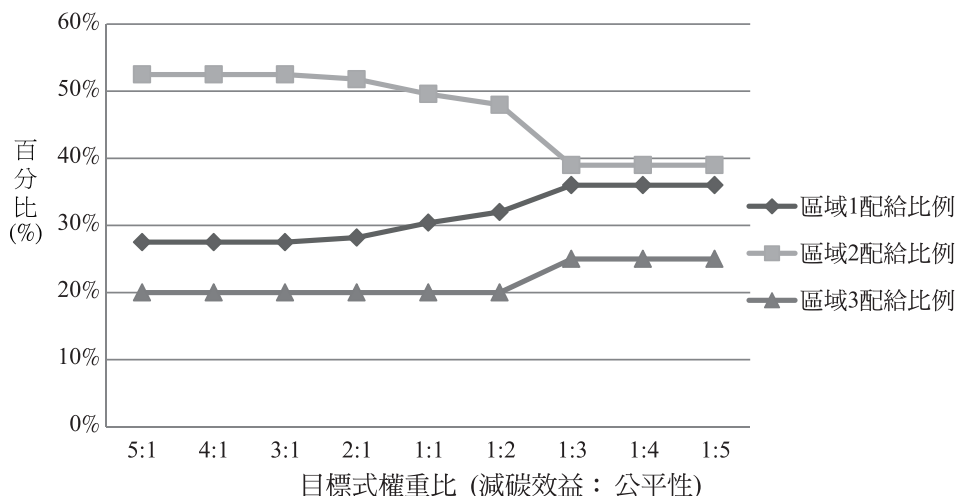


圖 9 不同目標權重比例對區域預算配給比例之影響

五、實證分析

本研究以環保署之「低碳城市建構計畫」進行實例分析，資料數據乃透過各地方政府所提供之計畫報告書而得。部分較為敏感之參數，如環保署之總預算與最低可執行預算比例等原始數據，本研究則使用假設性數據來取代，並藉由第四節之敏感度分析來呈現不同參數設定對於模式最佳化結果之影響。由於該專案計畫目前仍在執行，本研究僅能在不揭露地區名稱下，盡量提供充分資訊（如加註各區域之人口數）。

表 8 列舉各地方政府所提案之部分低碳運輸計畫，其中本研究之實例部分以「電動運具示範計畫」之類型進行相關探討分析。各地區之命名代號以北(N)、中(M)、南(S)三區表示；而各區計畫總數（含連續型與非連續型）分別為 4、3、3。

表 8 國內各縣市運輸部門之低碳計畫部分提案實例

區域別	地方政府	低碳運輸計畫提案
北(N)	A	- 發展智慧型運輸系統 - 更新 LED 號誌 - 健全大眾運輸網路 - 設置海博館轉運站
	B	- 推廣大眾運輸 - 促進運具低碳化，發展替代燃料
	C	- 自行車租借系統 - 鼓勵共乘制 - 鼓勵使用低碳運具(電動機車)

表 8 國內各縣市運輸部門之低碳計畫部分提案實例 (續)

區域別	地方政府	低碳運輸計畫提案
	D	• 建構大眾運輸路網 • 建構自行車道系統 • 推廣低碳綠色運具 • 建置即時路況資訊
	F	• 推廣低汙染車輛 • 推廣自行車及步行 • 鼓勵共乘制 • 推廣低碳駕駛行為
	G	• 健全大眾運輸網 • 規劃自行車道系統 • 規劃行人徒步區 • 推動綠色交通運具 • 推廣低碳駕駛行為
中(M)	H	• 興建公車捷運系統 • 發展大眾捷運系統 • 客運業者車輛汰舊換新 • LNG 清潔車隊計畫 • 規劃自行車道系統 • 更新 LED 交通號誌
	I	• 建置 LED 交通號誌 • 提倡綠色交通運具
	J	• 更新 LED 號誌 • 發展自行車道 • 發展觀光綠能遊艇、纜車系統
	K	• 發展公車捷運系統 • 建置電動自行車路網 • 觀光農業低碳路網建置 • 再生能源發電場示範計畫
南(S)	L	• 發展低碳運輸觀光 • 提倡低汙染載具
	O	• 發展綠色交通 • 改善人行環境
	P	• 規畫停車收費差別費率 • 規劃低碳排放區
	Q	• 汰換 LED 交通號誌 • 推動綠色運具
東(E)	U	• 發展自行車道、鼓勵共乘系統 • 發展智慧型交通控制系統 • 推廣低碳運具
	V	• 建構交通串連網絡 • 自行車步道
	W	• 更新 LED 交通號誌 • 發展綠色運具 • 推廣共乘制度

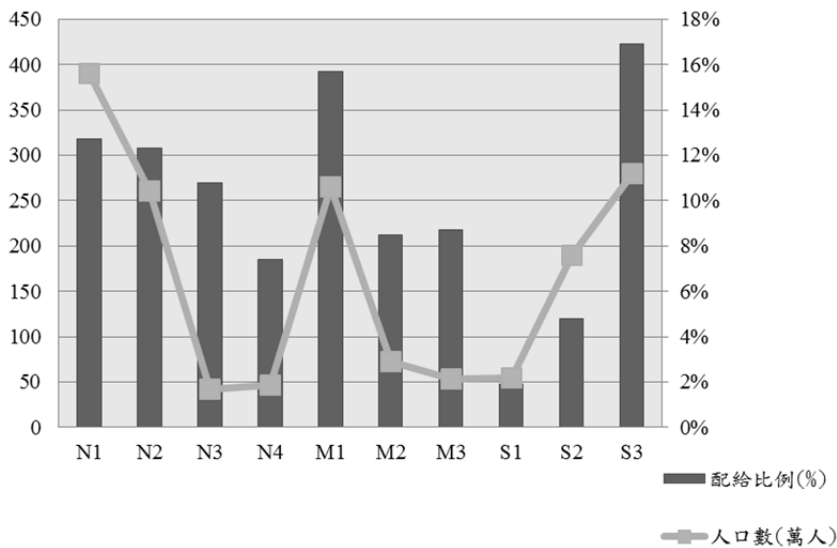


圖 10 「電動運具示範計畫」之實例分配結果

綜觀圖 10 之實例分析結果，北(N)、中(M)、南(S)三區中，人口數相對較多之區域所獲分配之預算較多。推估可能是人口數多之區域在預期減碳效益較高之原因。然而區域 N3 與區域 S2 在人數上差距相當大，但在分配到之預算額度卻剛好呈現與上述觀察之相反趨勢，以人數較低的 N3 區分配到之資源為高。究其原因發現區域 N3 雖然戶籍登記人口數較低，但該區域內設有多所國立大學與數個工業、科技園區，實際居住人口較區域 S2 多，反映在所推出減碳計畫之預期效益也相對較高。其餘區域雖然在預算分配比例較少，但所提出之電動運具計畫之執行比例卻能得到較為完整之預算，因為較弱勢之區域在大眾運具發展仍未完善成熟，因此在電動運具建置方面仍屬於示範型推動計畫，預算總執行成本也相對較低。

本研究所提供之人口數資料僅供參考，模式構建與實例分析仍舊以各地方政府與顧問公司所提供之數據進行分析，未納入區域人口數作為相關變數或參數。值得注意的是各地方政府所提供之數據是否依據戶籍人口數、區域活動人口數或計畫影響之人口數來進行評估，值得中央政府相關單位進行後續追蹤與評核。而本研究之公平性目標式也因而暫不考慮將人口數納入區域公平性之考量參數／變數。

六、結論與建議

本研究以環保署之「低碳城市建構計畫」為例，透過 3 種最佳化模式：應用背包問題之 0-1 整數規劃預算分配模型（即模式 1）、考慮預算可調整性，將計畫分成連續型計畫及非連續型計畫之混合整數規劃預算分配模型（即模式 2）、加入公平性目標式與考慮各計畫

之最低可執行預算比例，所構建之多目標混合整數非線性規劃模型（即模式 3），進行最佳化計畫選擇與預算分配。

由文獻回顧發現過去預算分配多為 0-1 整數規劃議題或是僅探討預算額度如何分配，造成分配彈性不佳。藉由整合兩種分配方法之概念，加入可調整性與最低可執行預算比例之要素，既同時能評選計畫與否與可自由調整投入比例，以增加預算分配之彈性。相較於以往公平性目標多為縮小「分配資源差距」，本研究將投入成本所帶來的效益一併列入公平性參考依據，避免較有效率的計畫因為齊頭式的成本公平而被忽略，提升預算分配效率。

透過實例分析除驗證模式之可行性，同時可做為日後政府相關公共建設計畫應用於現實決策環境之參考。本研究亦發現各行政區域登記戶籍人口數與實際居住和活動人口數有所差距，甚至部分減碳計畫可能會產生跨區移動之現象，建議未來應建立更嚴謹之計畫投入成本與減碳效益之評估準則，以利後續績效評估與檢核。

模式可依決策者之偏好目標、計畫執行狀況反映於未來計畫執行之參數調校與設定，如權重的搭配組合以及計畫最低限度之規模比例的再調整。當計畫需要重新審視或檢討上年度成本投入之效果時，可利用本模式進行預算重分配。

針對上述研究發現與結果，本研究進一步提出未來研究方向與改善建議，條列如下：

1. 本研究受限於時間、人力及實際資料之完整程度，僅能就低碳城市專案計畫所提供之資料及徵詢專家學者意見而假設之數據進行模式之驗證與測試。建議後續相關研究能蒐集更為完整之資訊以利更完整分析之進行。
2. 因近年來地方共同生活圈之觀念已形成，各區域政府所提審之計畫未必只會影響該行政區域內之戶籍人口數。建議後續未來研究可針對計畫實際可能產生影響之活動人口數再行估計較具體之計畫減碳效益。
3. 為避免未來各區域政府為爭取預算而浮報計畫之減碳效益，建議政府決策單位應建立一公平客觀之計畫評估標準、換算衡量公式與評選機制。同時應針對前一年預算執行狀況與實際減碳效益進行相關評估，不僅可減少提審計畫之單位浮報數據，同時有助於落實政府預算分配之公平正義。

參考文獻

1. IEA (International Energy Agency), *World Energy Outlook 2009*, OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) / IEA, Paris, France, 2009.
2. Lee, C., "Transport and Climate Change: A Review", *Journal of Transport Geography*, Vol. 15, 2007, pp. 354-367.
3. Koetse, M. J. and Rietveld, P., "The Impact of Climate Change and Weather on Transport: An Overview of Empirical Findings", *Transportation Research Part D*, Vol. 14, 2009, pp. 205-221.
4. Lenzen, M., Dey, C., and Hamilton, C., *Climate Change, Handbooks in Transport*, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2003.

5. USDOT Report, "Transportation's Role in Reducing U.S. Greenhouse Gas Emissions", Center for Climate Change and Environmental Forecasting, U.S. Department of Transportation, 2010.
6. 交通部運輸研究所，運輸設施節能減碳整體發展計畫規劃與資訊平台建置，民國 99 年。
7. Waterson, B. J., Rajbhandari, B., and Hounsell, N. B., "Simulating the Impacts of Strong Bus Priority Measures", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129, 2003, pp. 642-647.
8. Chester, M. V. and Horvath, A., "Environmental Assessment of Passenger Transportation Should Include Infrastructure and Supply Chains", *Environmental Research Letters*, Vol. 4, No. 2, 2009, pp. 1-8.
9. Geels, F. W., "A Socio-Technical Analysis of Low-Carbon Transitions: Introducing the Multi-Level Perspective into Transport Studies", *Journal of Transport Geography*, Vol. 24, 2012, pp. 471-482.
10. Li, Q. and Li, Q. "Low Carbon Transportation in Japan and Its Developmental Analysis", IET Conference Proceedings, Institution of Engineering and Technology, No. 573, 2010, pp. 142-143.
11. Greene, D. L. and Wegener, M., "Sustainable Transport", *Journal of Transport Geography*, Vol. 5, 1997, pp. 177-190.
12. Anderson, R. J. and Karathodorou, N., "Maximizing the Potential for Metros to Reduce Energy Consumption and Deliver Low Carbon Transportation in Cities", Proceedings of Rail Power Europe Conference, Berlin, Germany, 2012, pp. 1-13.
13. Lai, F. and Ren, J., "On the Necessity and Governance Model of the Construction of China's Low Carbon Transportation System", *Energy Procedia*, Vol. 5, 2011, pp. 1502-1507.
14. Li, H. and Gao, H., "Founding Low Carbon Highway Freight Transportation Networks: An Example Study on Shandong Province", IET Conference Proceedings, Institution of Engineering and Technology, Vol. 2010, No. 573, 2010, pp. 132-137.
15. 顏君聿，「邁向永續城市，建構低碳社會：探討我國城市推動節能減碳策略」，*臺灣經濟研究月刊*，第 31 卷，第 8 期，民國 97 年，頁 40-49。
16. 顏君聿，「探討我國城市推動節能減碳計畫」，*臺灣經濟研究月刊*，第 32 卷，第 6 期，民國 97 年，頁 43-49。
17. Kaplan, E. H. and Michael, H. M., "Allocating HIV-Prevention Resources: Balancing Efficiency and Equity", *American Journal of Public Health*, Vol. 92, No. 12, 2002, pp. 1905-1907.
18. Meredith, J. R. and Mantel, S. J., *Project Management – A Managerial Approach*, Seventh Edition, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2009.
19. Huang, C. C., Chu, P. Y., and Chiang, Y. H., "A Fuzzy AHP Application in Government-Sponsored R&D Project Selection", *Omega*, Vol. 36, Issue 6, 2008, pp. 1038-1052.
20. Puthamont, S. and Charoenngam, C. "Strategic Project Selection in Public Sector: Construction Projects of the Ministry of Defense in Thailand", *International Journal of Project Management*, Vol. 25, 2006, pp. 178-188.
21. Wise, K. and Perushek, D. E., "Goal Programming as a Solution Technique for the Acquisitions Allocation Problem", *Library and Information Science Research*, Vol. 22, No. 2, 2000, pp. 165-183.

22. Zayed, T. M., "Budget Allocation for Steel Bridge Paint Maintenance", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 18, No. 1, 2004, pp. 36-46.
23. Anderson, S. R., Kadirkamanathan, V., Chipperfield, A. J., Sharifi, V., and Swithenbank, J., "Multi-Objective Optimization of Operational Variables in a Waste Incineration Plant", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 29, No. 5, 2005, pp. 1121-1130.
24. Gabriel, S. A., Faria, J. A., and Moglen, G. E., "A Multi-Objective Optimization Approach to Smart Growth Inland Development", *Socio-Econ Planning Science*, Vol. 40, 2006, pp. 212-248.
25. 楊有恆、虞孝成、劉宜欣，「資源配置最適化二階層線性規劃模型之研究－以科技專案計畫預算分配為例」，*科技管理學刊*，第 12 卷，第 2 期，民國 96 年，頁 93-124。
26. Huang, W., Teng, J., and Li, M., "The Budget Allocation Model of Public Infrastructure Projects", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 5, 2010, pp. 697-708.
27. Cristóbal, J. R. S., "Multi-Criteria Decision-Making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: The Vikor Method", *Renewable Energy*, Vol. 36, Issue 2, 2011, pp. 498-502.
28. Ebrahimnejada, S., Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hashemic, H., and Vahdani, B., "A Novel Two-Phase Group Decision Making Approach for Construction Project Selection in A Fuzzy Environment", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, Issue 9, 2012, pp. 4197-4217.
29. Berger, P. D. and Nasr Bechwati, N., "The Allocation of Promotion Budget to Maximize Customer Equity", *Omega*, Vol. 29, No. 1, 2001, pp. 49-61.
30. Reinartz, W., Thomas, J., and Kumar, V., "Balancing Acquisition and Retention Resources to Maximize Customer Profitability", *The Journal of Marketing*, Vol. 69, No. 1, 2005, pp. 63-79.
31. Tsao, H. Y., "Budget Allocation for Customer Acquisition and Retention While Balancing Market Share Growth and Customer Equity", *Market Letters*, Vol. 24, Issue 1, 2013, pp. 1-11.
32. Merkle, R. and Hellman, M. E., "Hiding Information and Signatures in Trapdoor Knapsacks", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 24, Issue 5, 1978, pp. 525-530.
33. Fatemeh, B. and Tarokh, M. J., "A Fuzzy Approach for Multi-Objective Supplier Selection", *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, Vol. 21, No. 1, 2010, pp.1-9.