

國立政治大學資訊管理學系

博士學位論文

綠色閉迴路供應鏈之多目標穩健最佳化決策模式

**A multi-objective robust optimization model for green
closed-loop supply chain network design**

指導教授：林我聰 博士

研究生：方怡文 撰

中華民國 111 年 3 月

摘要

近年環境保護、循環經濟、企業社會責任等議題受到強烈關注，綠色閉迴路供應鏈的相關研究已成為重要課題。企業一方面面對環境議題、法規規範等，另一方面面對競爭激烈經營生態，企業如何有效提升產品或服務的品質，快速回應市場需求，並促成資源循環再利用，將是企業維持競爭力且永續經營的關鍵。

從相關研究文獻中，可發現閉迴路供應鏈模式中，主要多以經濟與環境指標為目標函數，較少考量其他績效評估指標。為補足上述研究缺口，本研究在閉迴路供應鏈網路架構下，考量不確定性，以多目標混合整數規劃方法，建立同時考量經濟因素、環境因素與品質因素之綠色閉迴路供應鏈多目標資源配置決策模式，以尋求利潤最大化、清潔生產最佳化、供應鏈品質最佳化為目標。針對不確定性因素，本研究以情境為基礎的穩健最佳化方法，在綜合考量不同情境下，求得一穩健最佳解。

本研究透過真實產業案例評估數量模式之可行性，面對環境之不確定性與多元的決策目標，可透過此模式進行最佳化資源配置評估，作為企業決策訂定之參考依據。本研究提出綠色閉迴路供應鏈之多目標穩健最佳化決策模式相關研究成果，不僅可作為閉迴路供應鏈相關學術領域研究之參考，在實務上，亦可引導企業建立綠色閉迴路供應鏈資源配置決策模式，以利企業在複雜多變的經營環境，有效訂定較佳決策，協助企業取得較佳獲利能力與競爭優勢。

關鍵詞：閉迴路供應鏈、多目標混合整數規劃、穩健最佳化

Abstract

In order to keep a company's competitive capability, effective integrated management of the supply chain are important recently. Due to the topics such as the environmental issues, the governments' legislation, natural resource limitation and circular economy having got consumers's awareness, the related researches of the closed-loop supply chain which integrate the forward and reverse supply chain are increasingly growing. Companies not only have to meet the environmental regulations, but also have to sustain high quality of the supply chain operation as a means to stay competitive advantage and profit capability.

This study proposes a multi-objective mixed integer programming model for an integrated green closed-loop supply chain network designed to maximize profit, amicable production level (environmentally friendly materials and clean technology usage), and quality level. A scenario-based robust optimization method is used to deal with uncertain parameters such as the demand of new products, the return rates of returned products and the sale prices of remanufactured products.

The proposed model is applied to a real industry case example of a manufacturing company to illustrate the applicability of the proposed model. The result shows a robust optimal resource allocation solution that considers multiple scenarios. This study can be a reference for closed-loop supply chain related academic research and also can be used to guide the development of a green closed-loop supply chain model for better decision making.

關鍵詞：Closed-loop supply chain, Multi-objective mixed integer programming model, Robust optimization

目錄

| | |
|------------------------------|----|
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第一節 研究背景 | 1 |
| 第二節 研究動機 | 3 |
| 第三節 研究目的 | 7 |
| 第四節 研究架構與流程 | 8 |
| 第二章 文獻探討 | 12 |
| 第一節 逆物流相關模式 | 12 |
| 第二節 閉迴路供應鏈模式 | 15 |
| 第三節 綠色/永續供應鏈模式 | 20 |
| 第四節 多目標函數指標 | 27 |
| 第五節 多目標問題之解決方法 | 31 |
| 第六節 不確定性參數問題之解決方法 | 35 |
| 第七節 文獻回顧小結 | 38 |
| 第三章 模式建立 | 42 |
| 第一節 研究範疇 | 42 |
| 第二節 確定性最佳化模式建構與說明 | 44 |
| 第三節 穩健最佳化模式建構與說明 | 54 |
| 第四節 多目標函數轉換單一目標模式建構與說明 | 56 |
| 第四章 案例分析與模式計算 | 59 |
| 第一節 應用案例說明 | 60 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 第二節 多目標函數權重與環境目標函數項目權重計算..... | 66 |
| 第三節 確定性最佳化模式之敏感度分析..... | 70 |
| 第四節 考量不確定性之穩健最佳化模式計算..... | 74 |
| 第五節 清潔科技使用與生產成本對目標函數影響之分析..... | 78 |
| 第六節 不可行性權重與模式穩健性之分析..... | 81 |
| 第五章 研究結論與建議..... | 83 |
| 第一節 研究結論..... | 83 |
| 第二節 實務應用建議..... | 85 |
| 第三節 未來研究方向..... | 87 |
| 參考文獻..... | 90 |



圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 1 研究流程圖..... | 9 |
| 圖 2 逆物流配送架構圖..... | 13 |
| 圖 3 閉迴路供應鏈網路架構圖..... | 16 |
| 圖 4 綠色供應鏈功能性模型圖..... | 21 |
| 圖 5 永續性閉迴路供應鏈一般架構圖..... | 23 |
| 圖 6 4 項研究領域研究數量比較情形..... | 26 |
| 圖 7 5 項研究議題之文獻數量比較情形..... | 26 |
| 圖 8 單一目標函數與多目標函數研究數量比較情形..... | 27 |
| 圖 9 多層閉迴路供應鏈網路架構圖..... | 30 |
| 圖 10 本研究閉迴路供應鏈網路架構圖..... | 43 |
| 圖 11 案例分析執行流程..... | 60 |
| 圖 12 應用案例之供應鏈網路架構圖..... | 61 |
| 圖 13 確定性模式求解之輸入參數與輸出變數..... | 70 |
| 圖 14 LP-METRICS 方法執行步驟..... | 75 |
| 圖 15 生產成本增加 10%，清潔科技使用比例與目標函數之趨勢圖..... | 79 |
| 圖 16 生產成本增加 20%，清潔科技使用比例與目標函數之趨勢圖..... | 80 |
| 圖 17 不可行性權重與模式穩健度之比較..... | 81 |
| 圖 18 不同不可行性權重值之目標函數數值..... | 82 |

表目錄

| | |
|---------------------------------------|----|
| 表 1 綠色供應鏈數量模式多目標函數指標..... | 29 |
| 表 2 文獻彙整表..... | 40 |
| 表 3 R.I 值表..... | 58 |
| 表 4 供應商與物料參數資料..... | 62 |
| 表 5 製造工廠與產品參數資料..... | 62 |
| 表 6 回收再利用生產中心與回收再製品參數資料..... | 63 |
| 表 7 新產品與客戶參數資料..... | 63 |
| 表 8 回收再製品與其他市場客戶參數資料..... | 63 |
| 表 9 新產品由工廠配送至客戶參數資料..... | 64 |
| 表 10 回收再利用生產中心將回收物料配送至製造工廠參數資料..... | 64 |
| 表 11 回收再利用生產中心將回收物料清運至棄置中心參數資料..... | 65 |
| 表 12 回收再利用生產中心配送回收再製品至其他市場客戶參數資料..... | 65 |
| 表 13 棄置中心與回收物料參數資料..... | 66 |
| 表 14 單位產品與物料組成比例參數資料..... | 66 |
| 表 15 回收產品與回收物料拆解比例參數資料..... | 66 |
| 表 16 新產品與回收再製品權重參數資料..... | 66 |
| 表 17 各個目標函數權重值資料..... | 68 |
| 表 18 環境目標函數各項目權重值資料..... | 70 |
| 表 19 新產品需求量敏感度分析資料..... | 71 |
| 表 20 產品回收成本敏感度分析資料..... | 71 |
| 表 21 回收再製品產品需求量敏感度分析資料..... | 72 |
| 表 22 新產品生產成本敏感度分析資料..... | 72 |
| 表 23 新物料採購成本敏感度分析資料..... | 72 |

| | | |
|------|-------------------------------------|----|
| 表 24 | 新產品售價敏感度分析資料..... | 72 |
| 表 25 | 回收再製品售價敏感度分析資料..... | 73 |
| 表 26 | 產品回收率敏感度分析資料..... | 73 |
| 表 27 | 新產品與回收再製品不良率敏感度分析資料..... | 73 |
| 表 28 | 情境設定表..... | 74 |
| 表 29 | 客戶需求高低情境數值資料..... | 74 |
| 表 30 | 回收再製品價格高低情境數值資料..... | 75 |
| 表 31 | 產品回收率高低情境數值資料..... | 75 |
| 表 32 | 新產品之配置情形..... | 76 |
| 表 33 | 新物料之配置情形..... | 76 |
| 表 34 | 回收產品之配置情形..... | 76 |
| 表 35 | 回收再製品之配置情形..... | 77 |
| 表 36 | 工廠存放新產品之配置情形..... | 77 |
| 表 37 | 回收再利用中心存放回收再製品之配置情形..... | 77 |
| 表 38 | 回收物料提供至製造工廠之配置情形..... | 77 |
| 表 39 | 回收物料棄置之配置情形..... | 77 |
| 表 40 | 清潔科技使用比例增加對應生產成本增加 10%之目標函數數值 | 79 |
| 表 41 | 清潔科技使用比例增加對應生產成本增加 20%之目標函數數值 | 80 |

第一章 緒論

第一節 研究背景

有效的供應鏈網路是企業維持競爭優勢的重要關鍵要素，可以協助企業處理不斷增加的環境干擾與愈加激烈的競爭壓力(Pishvae, Jolai, & Razmi, 2009)。供應鏈流程包含正物流供應鏈與逆物流供應鏈兩部分，正物流供應鏈包含供應商、生產中心、配送中心等，相關流程如向供應商取得物料、於生產中心製造最終產品、於配送中心將最終產品有效地送到消費者手中。逆物流供應鏈包含收集中心、處理中心等，相關流程如回收品的收集與處理(Amin & Zhang, 2013b)。過往企業在供應鏈管理上，大多專注在正物流供應鏈，包括原料取得、製造，運送到消費者手上等活動的管理，期望透過前述重要關鍵活動之掌握，維持企業經營有效運作。

隨著科技日新月異，產品生命週期縮短，隨之而來的是廢棄物的快速成長(Salema, Póvoa, & Novais, 2006)，環保議題逐漸發酵，許多國家也制定相關規範，使企業必須考量到原料使用可否、回收再利用議題等，促使逆物流供應鏈成為一個重要研究課題。Meade and Sarkis(2002)研究指出環境因素與企業因素驅使逆物流供應鏈受到研究關注，環境因素包含回收產品對環境造成影響、環境法規、消費者對環境意識重視等；企業因素包含使用回收產品的經濟效益、令消費者滿意的回收政策等。透過逆物流供應鏈流程處理，將使用過後的產品從最終消費者手上回收，並將回收的資源重新分配之後，協助企業獲得額外利潤。惟亦有可能在執行逆物流供應鏈流程，因無法達到經濟規模，無法降低逆物流成本而造成企業一大負擔。

為了維持企業的生產力，並能快速回應滿足消費者需求，有效進行供應鏈整合性管理，其重要性日益顯著(Hatefi & Jolai, 2014)。逆物流供應鏈網路架構與正物

流供應鏈網路架構是會互相影響的，各別單獨的網路架構規劃可能僅達到次最佳化的結果，因此必須整合規劃設計(Pishvae, Jolai, & Razmi, 2009)。由於環境議題、政府法規、天然資源限制等受到重視，近幾年閉迴路供應鏈(Closed-loop supply chain)受到關注程度逐漸成長(Shi, Zhang, & Sha, 2011; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015; Karimi et al., 2019; Atabaki, Mohammadi, & Naderi, 2020; Almaraj & Trafalis, 2021; Pourjavad & Mayorga, 2018; Huang, Murong, & Wang, 2020)。Atabaki, Mohammadi, and Naderi (2020)研究指出近幾年已出現經濟型態的移轉，由”取得-製造-消費(take-make-consume)”的線性經濟，轉變成循環經濟(Circular economy)，旨在尋求資源使用、棄置、排放、能源消耗達到最小化。在循環經濟概念發展下，為了讓產品或物料的使用更加具有效率，對於閉迴路供應鏈發展的需求亦更加顯著。

閉迴路供應鏈包含正物流供應鏈與逆物流供應鏈，正物流供應鏈為原物料從供給、生產、配送到消費者等過程的相關活動，而逆物流供應鏈則主要處理回收品的相關問題，例如如何收集、處理這些回收品使企業經營符合法規規範與企業社會責任(Salema, Póvoa, & Novais, 2009)。Govindan, Soleimani, and Kannan (2015)研究指出大多閉迴路供應鏈研究文獻仍以供應商、工廠、配送中心、回收中心、再製中心、棄置中心等資源有效配置為探討主題，對於因應環境保護意識抬頭，將相關綠色、永續性等議題納入閉迴路供應鏈模式考量之研究文獻仍為不足。Battini, Bogataj, and Choudhary(2017)研究提到歐盟 Horizon 2020 研究計畫中，針對閉迴路供應鏈管理議題強調在產品生命週期延伸的需求、物料的再利用、回收、資源的修復與產業共生等面向。Atabaki, Mohammadi, and Naderi (2020)研究彙整閉迴路供應鏈相關文獻，觀察出在閉迴路供應鏈的量化模式中，考量以環境影響、二氧化碳排放、能源使用為目標函數的文獻數量仍較少。

企業為了永續經營目的，在供應鏈的管理策略上，除了過往以利潤、成本、客戶服務、品質、前置時間等為主要衡量供應鏈績效的指標外，隨著環境保護、氣候

轉變等議題延燒，環境策略指標例如二氧化碳排放量、可回收物料使用率、友善物料使用、清潔科技使用等相關指標，也應作為衡量供應鏈績效之重要參考因素 (Paksoy, Özceylan, & Weber, 2011; Amin & Zhang, 2013; Huang, Murong, & Wang, 2020; Atabaki, Mohammadi, & Naderi, 2020)。企業供應鏈運作除因應環境議題所應執行的相關配套措施，為追求並維持市場競爭優勢，使企業營運不斷成長，在面對競爭劇烈的市場，企業多以強化品質作為維持市場長期競爭力的手段，藉由改善供應鏈品質，減少物料廢棄與供應鏈相關活動的重複執行作業，有助節省長期財務成本，並有利於爭取未來新客戶市場佔有率與維持原客戶市場佔有率 (Franca et al., 2010)。

然而，隨著閉迴路供應鏈運作牽涉更多面向的複雜問題，為了尋求最佳化的供應鏈管理模式，單一目標的設計已無法滿足前述需求，而多目標規劃設計則能配合多元需求與目標，發展出一套同時考量經濟效益、綠色生產、品質水準等多目標之閉迴路供應鏈設計模式。

第二節 研究動機

根據逆物流供應鏈相關文獻回顧，可觀察出過去研究大多在逆物流供應鏈網路架構中，探討存貨模式、路徑規劃、廠址設置、廠商評估、產量評估等。Fleischmann et al.(2001)探討回收處理中心、倉儲中心及製造商等相關逆物流供應鏈網路資源配置研究，主要目標為求出設施選址之最佳化配置；Shih(2001)提出一混合整數規劃模式解決生命週期結束的電腦商品回收處理問題，目的在建構一個最小成本的逆物流網路架構，並選擇適合的廠址位置及規劃出廢棄電腦配送數量；Jayaraman, Patterson, and Rolland (2003)提出一個逆物流配送的網路架構，探討逆物流模式下設施配置的問題；Lee and Dong (2008)發展以 Tabu search 為基礎且具備動態整合能力之逆物流網路模式，求出最適切之配送據點或網路架構安排。

若企業以整合性管理角度，企圖達到最佳化供應鏈管理成效，則整合性閉迴路供應鏈規劃與設計為重要發展議題。綜觀閉迴路供應鏈網路最佳化模式之相關研究文獻，Amin and Zhang(2013a)在建構閉迴路供應鏈網路架構，同時考量供應商、再維修站、再製造委託商之選擇與訂單配置，主要目標求得成本最小化、權重最大化、外購物料與再製物料不良率最小化及準時遞送最大化。Ramezani, Bashiri, and Tavakkoli-Moghaddam(2013)規劃同時考量正物流與逆物流供應鏈網路設計，建構一個多目標隨機模式，求得利潤最大化，客戶回應與供應鏈品質最佳化。隨著環境保護、永續經營、循環經濟、企業社會責任等議題升溫，在閉迴路供應鏈的運作與經營下，對於綠色元素、永續性要件、能源再利用等重視程度更加顯現。Quariguasi Frota Neto et al.(2010)研究指出，整個供應鏈流程涵蓋從原物料的處理到最終產品送達消費者端，為了達到永續性的管理目的，產品設計、產品使用管理、產品生命週期延伸、修復等流程應被加入供應鏈流程中。真正要做到永續性，必須從供應鏈目標著手，除了以經濟指標為主要的供應鏈目標外，亦須將環境、社會等指標納入主要供應鏈目標。Paksoy, Özceylan, and Weber(2011)研究認為隨著環境保護、氣候轉變等議題延燒，環境策略也應納入供應鏈績效考量重要因素。除了成本因素考量，二氧化碳排放量、可回收物料使用率等相關指標應被納入供應鏈績效評估。建立一個綠色供應鏈除了生產中心的配置與數量、每個設備的產能與數量、市場需求的分配、供應商的選擇等決策外，亦包含垃圾處理流程、有效使用能源性資源、節能氣體排放、法規環境因素考量等相關決策議題。

Sheu, Chou, and Hu(2005)考量二手產品回收率以及逆物流的政府津貼，以解決綠色供應鏈整合性物流作業問題，建立一個多目標線性規劃最佳化模式。Bottani et al.(2015)針對可回收運輸物(Returnable transport items, RTIs)建立一個多目標最佳化模式，包含經濟指標與策略性指標。Paksoy, Özceylan, and Weber (2011) 發展一個綠色閉迴路供應鏈模式，除考量最小化運送成本與原物料採購成本，亦將綠色議題

納入考量，如不同運輸工具會產生不同二氧化碳排放量，工廠可選擇採購回收率不同之原物料。Amin and Zhang(2013b)在閉迴路供應鏈網路架構下，建立多目標混合整數規劃模式，除了尋求成本最小化之外，亦將環境因素納入模式中，尋求友善物料與清潔科技使用最大化，並以隨機規劃方法處理需求、回收不確定問題。Atabaki, Mohammadi, and Naderi (2020)在循環經濟(circular economy)議題考量下，建立一個閉迴路供應鏈設計模式，以成本最小化、二氧化碳排放最小化以及能源消耗最小化為目標。Almaraj and Trafalis(2021)在閉迴路供應鏈網路架構下，並考量有缺陷的品質生產，建構一個多目標混合整數線性規劃模式，共有 3 個目標函數，第一個目標函數為供應鏈總成本最小化，第二個目標函數為環境影響最小化，第三個目標函數為社會利益最大化。

由上述逆物流與閉迴路供應鏈相關研究文獻，可觀察出為達到整合性管理訴求，由逆物流研究延伸至閉迴路供應鏈研究的發展趨勢。近期因應環境議題受到關注與重視，逆物流研究或閉迴路供應鏈研究中，加入綠色或永續研究主題儼然成為此領域研究的重要課題。惟 Govindan, Soleimani, and Kannan(2015)研究指出，以整體逆物流及閉迴路供應鏈架構融入永續或綠色主題的研究仍相當缺乏，是值得多投入心力的研究方向。Atabaki, Mohammadi, and Naderi (2020)研究指出，經由彙整檢視閉迴路供應鏈相關文獻，可發現在閉迴路供應鏈的量化模式中，以環境影響、二氧化碳排放、能源使用為目標函數的文獻數量仍較少。Tseng et al. (2019) 針對綠色供應鏈研究議題進行分析，研究結果可發現在觀念、驅動力/阻力、合作、數學模式、評估等 5 種研究議題中，數量模式類型相關研究具有快速成長的趨勢。此類文獻強調採用數量方法協助管理者策略性進行決策過程，以利改善企業經營之經濟績效與環境績效。

在逆物流及閉迴路供應鏈之目標函數設定上，由於產業環境複雜性與多元化，與許多衝突因素互相交雜，單一目標較難完全回應真實世界複雜問題，多目標函數

的規劃與設計才能反應出真實現況提供更多彈性、有用資訊，以利決策者評估與參考(Franca et al., 2010; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015; Atabaki, Mohammadi, & Naderi, 2020)。從文獻探討中，可發現大多綠色逆物流或閉迴路供應鏈研究之多目標函數設定，多以經濟指標與環境指標為主，甚少將其他供應鏈績效衡量指標併同納入考量。為補足上述研究缺口，本研究期望多目標函數的建立能更完整反映企業經營決策考量，擬將產品品質融入供應鏈目標函數中，觀察經濟指標、環境指標與品質指標在綠色閉迴路供應鏈運作的影響關係，同時再納入不確定性因素，使決策過程更貼近產業真實狀況。在不確定性因素的選定上，本研究利用敏感度分析方法，了解相關變數對目標函數的影響程度，根據敏感度分析的結果，挑選出敏感度較高的參數，將其轉換為不確定性參數。本研究主要貢獻為在綠色閉迴路供應鏈網路架構下，建立一個多目標函數模式，除了經濟指標之外，同時考量友善生產之環境指標與品質指標，並運用敏感度分析決定不確定性參數，藉由實際案例驗證，了解目標函數指標之關聯性，以利管理者訂定決策之參考。

本研究在選擇處理不確定性參數所採用的方法，係先經由文獻探討收集擬解決問題之可能方法，再由這些方法中篩選出最適合本計畫情境特性的方法。Govindan, Soleimani, and Kannan (2015)研究指出，現行處理不確定性問題的相關研究，大多數係採用隨機規劃方法，惟為了能夠真實呈現實際環境狀況，處理複雜的不確定性問題，穩健最佳化方法是可取代隨機規劃方法的替代方法。再根據 Jos'e Alem and Morabito (2012)研究指出，穩健最佳化方法具有較隨機規劃方法容易求解且不需要知道不確定性參數之機率分配等優點。經由探討上述方法的使用時機，及考量本研究之不確定性參數機率分配未知情形下，最適合採用穩健最佳化方法處理不確定性參數。透過情境設計，更精確呈現不確定性參數實際情形的描述，再藉由誤差項、懲罰函數之控制，使決策者風險考量納入數量模式中。

由於本研究為多目標決策模式，除了以穩健最佳化方法處理不確定性參數，針對多目標函數處理，參考 Mirzapour Al-e-hashem et al.(2011)、Ma et al. (2016)及 Khalilzadeh and Derikvand (2018)考量目標函數屬性不一致、互相衝突且大小不一，而採用 LP-metrics 方法求解。本研究之目標函數屬性不一致且互相衝突，解決多目標轉換成單一目標問題，採用 LP-metrics 方法為合適作法。在執行過程中，可能需要配合案例資料與情境特性，進行參數資料的調整與設計，此實證程序與評估分析成果，可作為後續相關領域研究者之參考運用。此外，本研究係以製造業為應用案例，進行本研究數量模式之可行性評估。該產業的回收模式不同於一般 3C 產品的回收模式，期望經由本案例之實證應用，探究在閉迴路供應鏈網路架構下，同時考量經濟指標、環境指標與品質指標與不確定性參數，對決策訂定之影響與關聯性，藉以彰顯本研究之研究價值。

第三節 研究目的

因應循環經濟發展趨勢下，企業在考量提升供應鏈運作與品質、促使企業獲利最佳等營運績效，又需兼顧環境保護議題，面對如此多元且複雜的經營目標，企業必須重視閉迴路供應鏈整合管理，透過有效結合正物流供應鏈與逆物流供應鏈的相關運作規劃，協助企業決策者進行有效決策評估與判斷。本研究期望建構一個同時考量經濟因素、環境因素與品質因素之綠色閉迴路供應鏈多目標決策最佳化模式，在考量多元目標與不確定性因素下，使企業獲得資源配置最佳化的決策資訊。

本研究預期目的說明如下：

一、彙整閉迴路供應鏈、綠色供應鏈、永續性供應鏈相關研究文獻，了解現有研究發展現況，尋找此領域研究缺口，發掘出未來值得深入研究之主題與方向，以作為本研究發展最佳化決策模式之參考依據。

二、運用多目標混合整數規劃模式，處理多種不同屬性且可能互相衝突的決策目標，並將敏感度高的參數設定為不確定性參數，呈現產業真實現況，運用穩健最佳化方法處理不確定性問題，另以實際案例評估模式之可行性。藉由此研究過程所得到的研究發現與結果，作為後續相關研究之參考。

三、決策者可參考本研究結果，依據該企業供應鏈運作機制，建立該企業閉迴路供應鏈決策模式，在納入經濟因素、環境因素與品質因素考量下，使閉迴路供應鏈運作達到利潤最大化、清潔生產最佳化、供應鏈品質最佳化之目標，以利提供企業決策者更完整、更有彈性的決策訂定參考資訊。

第四節 研究架構與流程

本研究主要係於閉迴路供應鏈網路架構下，考量不確定性參數，以多目標混合整數規劃方法，建構利潤最大化、清潔生產最佳化、供應鏈品質最佳化之綠色閉迴路供應鏈決策最佳化模式。建模完成後，採用一個真實產業案例資料，進行本研究數量模式可行性之評估，並據以提出本研究相關結論與建議，本研究流程如圖 1 所示。

本研究架構說明如下：

一、研究背景、動機與目的

本研究背景論述因應產業環境變化、經濟發展、法規規範等，造就供應鏈管理重要議題與發展演進，說明值得研究之方向；基於逆物流供應鏈、閉迴路供應鏈等研究文獻回顧，了解研究軌跡與缺口，進而說明本研究動機；再依據相關文獻了解適合的研究方法，提出本研究所規劃的多目標混合整數規劃模式，並經由個案資料驗證模式的可行性，透過本研究的實證過程，說明最終期望達到之研究目的與預期貢獻。

二、文獻探討

在文獻探討部分，針對逆物流供應鏈模式、閉迴路供應鏈模式、綠色供應鏈模式、多目標函數指標、多目標函數問題的解決方案、不確定參數問題的解決方案等研究文獻進行彙整與分析，經由文獻檢視與分析，了解現行相關領域的研究現況與未來值得投入的研究方向，探究出綠色閉迴路供應鏈領域的研究缺口，據以規劃出本計畫主要研究內涵與範疇。



圖 1 研究流程圖

三、模式建立

本計畫在閉迴路供應鏈的網路架構下，將經濟因素、環境因素與品質因素納入考慮，以多目標混合整數規劃方法，建立資源配置最佳化決策模式，以求取利潤最大化、清潔生產最佳化、供應鏈品質最佳化為目標。在模式建立部分，先建立確定性最佳化模式，再轉換為穩健最佳化模式，加入誤差項、懲罰函數之控制，將決策者風險考量納入模式中。

四、案例分析

本研究擬以我國製造業廠商的實際產業案例資料，進行本研究所提出多目標混合整數規劃模式之可行性評估，透過個案訪談與問卷調查，取得相關參數資料，會依資料屬性與運算需求，進行資料設定與調整，再以 Lingo 軟體進行模式的計算與分析。

首先先針對確定性最佳化模式求解後，進行敏感度分析，挑選敏感度較高的參數，將其設定為不確定性參數。針對不確定性參數部分，本研究運用穩健最佳化方法(Robust Optimization Methods)，將不確定性參數透過不同情境組合呈現，求取穩健最佳解。針對多目標函數之處理，先以 AHP 方法經由問卷調查與統計，決定各目標函數的權重值，再以 LP-metrics 方法將多目標模式轉換至單一目標模式，先針對各別單一目標進行求解，再將各別單一目標最佳解帶入單一目標模式，最後求得資源配置最佳解。根據模式運算結果，進行最佳化資源配置決策之評估與分析。

五、結論與建議

依據本研究產業案例之實證結果，提出本研究之研究結論、實務應用建議與未來研究方向。針對研究結論的提出，期望能夠協助企業管理者面對綠色閉迴路供應鏈管理，可以更加有效依據企業經營策略與外在環境的規範，作出最有利的經營管理決策。在實務應用建議提出綠色閉迴路供應鏈之重要管理意涵，期能提供企業永

續經營之參考指引。而未來研究方向的提出，可作為相關領域業者或學者在實務應用或後續學術研究之參考。



第二章 文獻探討

在文獻探討部分，主要針對逆物流相關模式、閉迴路供應鏈模式、綠色/永續供應鏈模式、多目標函數指標、多目標問題之解決方法、不確定性參數問題之解決方法等相關議題文獻進行彙整，期望藉由文獻的回顧，觀察出目前相關領域的研究現況，進一步整理相關的研究缺口，以利於本研究在現行研究基礎上，規劃本研究欲探討的核心內涵與預期研究方向與成果。

第一節 逆物流相關模式

供應鏈管理的觀念源於物流(Logistics)，美國物流管理協會(Council of Logistics Management, USA)於 1998 年對於物流的定義：「物流是供應鏈程序的一部分，其專注於物品、服務及相關資訊，從起始原點到消費之有效流通及儲存的規劃、執行及管理，以達滿足顧客的需求」。中華民國物流協會(Taiwan Association of Logistics Management)對於物流的定義：「物流是一種物體流通活動的行為，在流通的過程中，透過管理程序有效的結合運輸、倉儲、裝卸、包裝、流通加工、資訊等相關物流機能性活動，以創造價值、滿足顧客及社會的需求。」依以上定義來看，物流是供應鏈中透過企業的服務及貨品的流通來滿足消費者的需求，而將物流的焦點擴大，包含到整體上下游成員，則發展成供應鏈的概念。

根據美國物流管理協會(CLM)研究報告指出，逆物流之定義為「透過產源減產(source reduction)、再生(recycling)、替代(substitution)、再利用(reuse)與清理(disposal)等方式進行物流活動，在物流活動中扮演回收產品、維修與再製、物品處理、物品再生、廢棄物處理(waste disposal)及有害物質(hazardous material)管理的角色」。美國逆物流協會(Reverse Logistics Executive Council, RLEC)也對逆物流下了定義：「逆物流是一種物品移動過程中，從最終目的地移動至其他地點，主要是獲得在其他方面沒辦法獲得的價值，或是為了對產品做適當的處置」。

Fleischmann et al. (1997) 對逆物流相關作業管理模式進行回顧與探討，並進一步將逆物流劃分為配銷規劃、存貨管理及生產規劃等三種層面進行探討，其配銷層面認為逆物流的配銷模式為回收品和包裝的收集及運送等過程。回收的管道可藉由原有正物流管道、逆物流管道或整合正、逆物流管道，逆物流的配銷模式如圖 2。

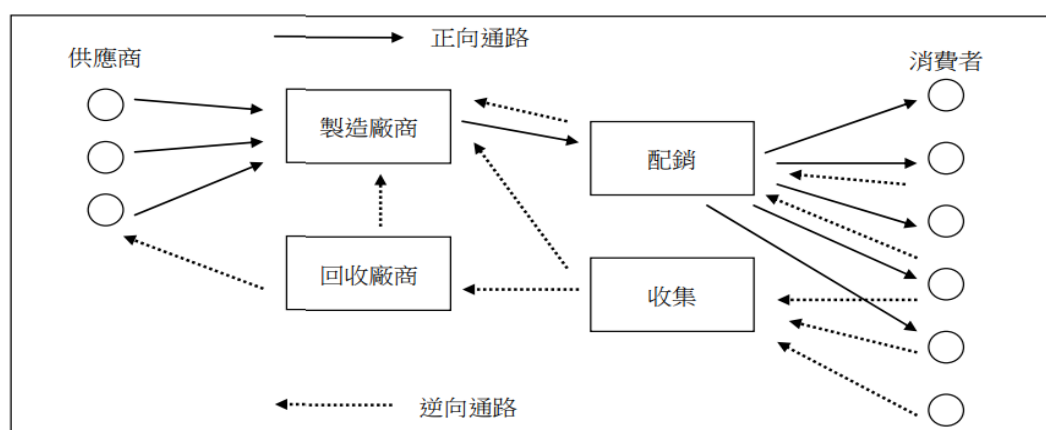


圖 2 逆物流配送架構圖

Louwers et al. (1999) 提出廢棄地毯廠址選擇數量模式，模式中考慮廢棄地毯收集、廢棄地毯初步處理、廢棄地毯配送路徑等因素。在其模式流程概念中，當消費者使用過的廢棄地毯經過收集之後，將運送到附近區域的區域廢棄物處理中心，經過篩檢、挑選，將毫無剩餘價值的地毯送至廢棄物處理廠，經過區域廢棄物中心處理後的地毯，則運送到另一個處理中心(配合地毯再製造過程的特性)，最後成為可再生原料，並運送至顧客端進行再利用。此模式分別計算地毯經過每個節點之成本，最後以總成本最小為目標，以利決策者決定最適合的區域處理中心。

Shih(2001) 提出一混合整數規劃模式，解決生命週期結束的電腦商品回收處理問題，目的在建構一個最小成本的逆物流網絡架構，模式中包含了收集點、中途儲存站、處理設施、再生物料市場以及廢棄物處理廠等設施，選擇適合的廠址位置及規劃出廢棄電腦配送數量。Jayaraman, Patterson, and Rolland (2003) 提出一個逆物

流配送網路架構，探討逆物流模式下設施配置的問題，包含了回收產品之零售點、收集站及製造商，使用啟發式演算法進行求解。

Ko and Evans(2007)在逆物流配銷網路研究中，以第三方物流(3PL)業者提供的逆物流服務觀點，建置了一個動態整合數學模式，使決策者能考慮物流中心之地址選擇。第三方物流業者擁有完善的正物流配銷實體網路，同時可提供成為實施逆物流活動之資源，在第三方物流業者的服務範圍中，主要著重於回收產品的運輸、倉儲以及部分修復處理，也就是回收中心的主要業務。其它如退貨商品的來源、經處理後的再生原料去向，分布較為複雜，難以精確掌握。為配合第三方物流業者的服務特色，作者同時考慮正物流和逆物流模式，並特別探討運輸費用、物流處理中心費用帶來的影響。

Krumwide and Sheu (2002)提出在逆物流網路架構下，第三方物流業者企業營運策略包含三個活動階段：回收品取得(Retrieval)－此階段係指由消費者端收集回收品流程，會受到蒐集的產品類別以及何者角色負責從消費者端進行回收之影響。運輸(Transportation)－逆物流過程中的運輸階段為貨物從一個位置實際移動到另一個位置。逆物流各個流程皆廣泛涵蓋運輸階段，批量經濟因素考量下製造商往往不願自行處理，回收品多半委由第三方物流業者處理。回收品處置(Disposition)－處置流程會因回收品產品類別以及使用狀態而有所不同，大致可分為兩類處理流程：

- (1) 回收品可直接於回收現場處理(On-Site Disposition)作業：修復(Repair)－在處理中心內修復回收產品、商品損壞部分進行替換(Replacement Part Return to Customer)，檢查(Inspection)－將回收產品逐一檢驗，透過人工觀察或利用儀器檢測、廢物利用(Salvage)－找到那些已經損壞或是沒有再利用價值的商品、修訂(Rework)－將有必要修繕的回收產品進行補強作業、重新包裝。

(2) 非現場處理(Off-Site Disposition)作業：運送缺陷回收品到不同的處理設施進行零件替換、或經過處理中心處理後的產出物送到二手市場販賣，無剩餘價值的產品則以廢棄物傾倒處置。

第二節 閉迴路供應鏈模式

Amin and Zhang (2013b)提及閉迴路供應鏈網路包含正物流(forward logistic)供應鏈與逆物流(reverse logistic)供應鏈；正物流供應鏈包含供應商、生產中心、配送中心等，相關流程如向供應商取得物料、於生產中心製造最終產品、於配送中心將最終產品有效地送到消費者手中。逆物流供應鏈包含收集中心、處理中心等，相關流程如回收品的收集與處理。過去大多研究，將正物流供應鏈與逆物流供應鏈網路規劃單獨設計，但實際上逆物流供應鏈網路架構與正物流供應鏈的網路架構是會互相影響的，各別單獨的網路架構規劃有可能僅達到次最佳化的結果，為了避免上述結果，正物流供應鏈與逆物流供應鏈網路必須整合規劃設計(Pishvae, Jolai, & Razmi, 2009)。

著眼於環境法規的嚴格限制與回收產品剩餘價值的發展商機，閉迴路供應鏈受到更多關注(Bottani et al., 2015; Guide, Jayaraman, & Linton, 2003; Quariguasi Frota Neto et al., 2010)。自 2005 年開始，歐盟針對廢電子電機設備建立強制性回收目標、生產者責任、回收義務、建立收集回收系統等相關法規規範，對於閉迴路供應鏈管理需求更加明顯與重視(Quariguasi Frota Neto et al., 2010)。Quariguasi Frota Neto et al.(2010)的研究根據累積能源需求(Cumulative Engery Demand, CED)環境指標，評估電子電機設備在製造、使用、配送、end-of-life 產品等活動對環境影響的程度。Bottani et al.(2015)針對可回收運輸物(Returnable transport items, RTIs)建立一個多目標最佳化模式，包含經濟指標與策略性指標。根據經濟訂購量政策，以模擬方法產生資產再訂購流程與可回收運輸物的處理流程。

Guide and Van Wassenhove(2009)針對閉迴路供應鏈管理所下的定義為在產品生命週期過程中，伴隨著不同型態與數量的回收，產生隨機動態回收價值，在此過程中透過系統的設計、控制與運作，以創造最大價值。傳統逆物流供應鏈研究多著重在技術層面與作業層面的探討，Guide and Van Wassenhove(2009)認為應該從一個整體企業流程觀點切入，讓回收品管理、再製造流程作業議題、回收產品市場發展等三部分，在供應鏈流程上能充分有效地協調與管理，以創造整體供應鏈價值。

Yang, Wang, and Li (2009)將供應鏈成員分為兩類：(1)正物流供應鏈成員，包含原物料供應商、製造商、經銷商與需求市場；(2)逆物流供應鏈成員，包含需求市場、修復中心和製造商。製造商與需求市場為串聯正物流供應鏈與逆物流供應鏈連節點，以形成閉迴路供應鏈架構(如圖 3 所示)。此研究目標是利用變分不等式理論建立網路平衡最佳化，並以案例說明影響運送平衡與淨利之相關參數，如回收率、原物料運送率、回收產品的運送率等。Kannan, Sasikumar, and Devika (2010)針對產品回收發展一個多層級、多時期、多產品的閉迴路供應鏈網路模式，相關決策包含物料採購、生產、配送、回收、棄置等，以基因演算法求解混合整數線性規劃模式。

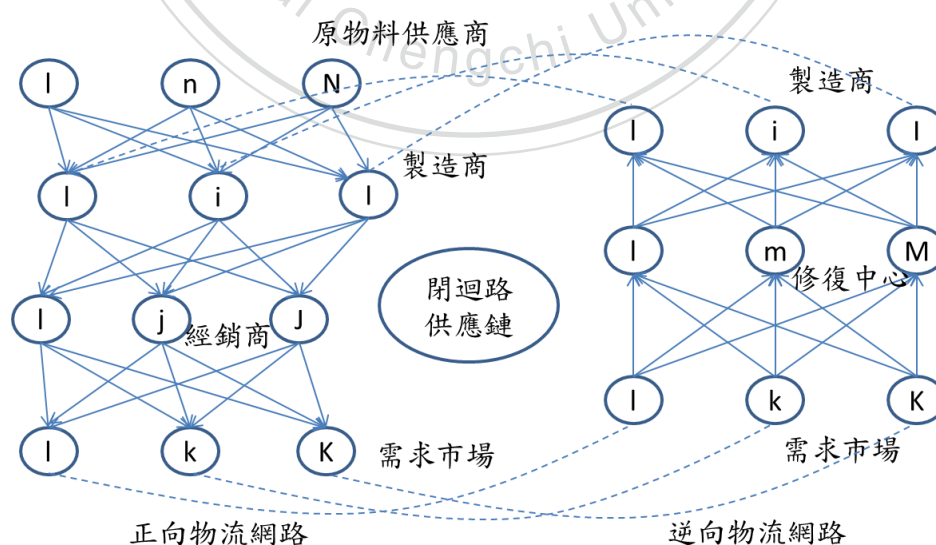


圖 3 閉迴路供應鏈網路架構圖

多數閉迴路供應鏈網路設計模式研究係以混合整數規劃方法建立數學模式 (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015)，主要目標函數有的是求成本最小化，有的是求利潤最大化。較早期此領域相關研究多屬確定性的數量模式建構，後期則有較多不確定性模式的建立與研究。

本節將分別針對確定性閉迴路供應鏈設計模式以及考量不確定性閉迴路供應鏈設計模式兩部分進行探討。

一、確定性閉迴路供應鏈設計模式

Fleischmann et al.(2001)發展閉迴路供應鏈網路模式，同時考量配送與修復的最佳化模式。Uster et al.(2007)所規劃的閉迴路供應鏈網路模式，正物流供應鏈相關參數屬確定性的參數，針對回收中心和修復中心有配置規劃需求，使用 Benders decomposition technique 尋求最佳解。

Lu and Bostel(2007)為了解決再製造網路架構下三類工廠兩階配置問題，建構混合整數規劃模式，並以 lagrangian-based heuristic 方法求解。Pishvae, Farahani, and Dullaert(2010)提出雙目標混合整數線性規劃模式，在同時考量正物流供應鏈與逆物流供應鏈下，尋求網路回應最大化與總成本最小化，以 memetic 演算法求解。

二、考量不確定性閉迴路供應鏈設計模式

Amin and Zhang(2013b)在閉迴路供應鏈設計上，同時考量環境因素、需求量與回收量不確定性，建構混合整數規劃模式，尋求總成本最小化。作者首先運用混合整數規劃方法建構閉迴路供應鏈最佳化決策模式；接著再考量環境因素，包含環保材料、清潔科技，建構出多目標規劃模式，最後再將需求與回收不確定性加入規劃模式中，形成隨機規劃模式，並以情境分析方法求解。

Pishvae, Rabbani, and Torabi (2011)提出以混合整數線性規劃模式，建構閉迴路供應鏈網路，以利支援回收與棄置活動。此篇研究針對回收產品不確定性、修復產品需求不確定性、運送成本不確定性等，運用穩健最佳化方法求解。Cardoso, Barbosa-Póvoa, and Relvas(2013)以混合整數線性規劃方法，在不確定產品需求情境下，建構同時考量正物流與逆物流供應鏈相關活動的最佳化模式。此模式主要目標是尋求淨現值最大化，求解方案中建立正物流與逆物流相關流程，維持庫存水準，並提供廠房、倉儲中心、經銷點等規模與地點最佳資源配置。

El-Sayed, Afia, and El-Kharbotly (2010)建構一個多時期、多階層之閉迴路供應鏈網路模式，此網路結構包含 3 階層正物流供應鏈(供應商、工廠、配送中心)，2 階層逆物流供應鏈(拆解中心、再配送中心)，正物流供應鏈的終端消費者需求是不確定的，逆物流供應鏈的消費者需求是確定的，也可以是不確定的。此問題以隨機混合整數規劃模式求最佳解，主要目標是尋求期望利潤的最大化。Özkar and Baslıgil(2013)建立一個包含修復流程的閉迴路供應鏈網路架構，包含客戶、收集中心、逆物流中心、工廠、修復工廠、配送中心，針對 3 種修復選擇方案—物料修復、元件修復、產品修復，發展多目標最佳化模式，3 個目標函數包含交易滿意度最大化、客戶滿意度最大化、供應鏈整體獲利情形最大化。

Shi, Zhang, and Sha(2011)研究多產品閉迴路供應鏈生產規劃問題，此問題中製造商有 2 個管道提供產品：一為生產新品牌產品，另一為將回收產品再製造為新產品。此研究考量需求與回收不確定性，建構非線性規劃數學模式，並以 Lagrangian relaxation based approach 求解。Lee and Dong(2008)針對動態逆物流供應鏈網路架構，先建構一個 deterministic 混合整數非線性規劃模式，再考量產品與回收品的不確定性，建構二階段隨機規劃模式，目標函數在求投資成本最小化，以及未來產品處理與運送成本最小化，再運用 sample average approximation 與 simulated annealing 結合等方式尋求最佳解。

Amin and Zhang(2013a)考量決策過程的不確定性，建構一個 3 階段閉迴路供應鏈模式，包含評估、網路設計、訂單配置與選擇等。第 1 階段，以品質功能發展方法(quality function development, QFD) 評估供應商、再製造商、合約商、再整修中心等。運用品質功能發展方法決定客戶需求、零件需求、流程需求等相互的關係，另再以模糊集合理論處理決策中的不確定性。第 2 階段，以混合整數非線性規劃模式並考量需求不確定性，建構閉迴路供應鏈網路。第 3 階段，以多目標混合整數線性規劃模式，進行供應商、再製造商、合約商、再整修中心的選擇與訂單的配置。Hatefi and Jolai(2014)在建構整合正物流供應鏈與逆物流供應鏈網路設計時，同時考量不確定參數與設備中斷等兩類風險，針對不確定性部分，以穩健最佳化方法建構模式，針對中斷情境部分，以混合整數規劃搭配 P-Robustness 建構模式，在降低中斷風險情形下，主要目標函數是尋求成本最小化。

Karimi et al. (2019) 在考量不確定環境下，規劃一個多目標、多設施的閉迴路供應鏈模式，主要目標是利潤最大化、客戶滿意度最佳化、及合作夥伴運輸滿意度最佳化。為利於評估此模式之有效性，此研究採用 NSGA-II 及 NPGA 演算法求解，並透過實驗數據與案例進行驗證，最後運用 AHP-TOPSIS 進行評比。Atabaki, Mohammadi, and Naderi (2020)在循環經濟(circular economy)議題考量下，建立一個閉迴路供應鏈設計模式，以成本最小化、二氧化碳排放最小化以及能源消耗最小化為目標。此研究以 possibilistic programming 及 scenario-based stochastic programming 等建立穩健最佳化模式，在 possibilistic programming 中，考量回收產品數量不確定性、回收率不確定性、逆物流運作成本及設備建立成本不確定性；在 scenario-based stochastic programming 中，考量需求不確定性、正物流運作成本不確定性等。藉由案例驗證結果可發現，相較於線性經濟(linear economy)，循環經濟對於二氧化碳、能源消耗等資源利用能產生較好的績效。總成本與二氧化碳及能源具有負向關係，亦即愈低的總成本，代表著越高的二氧化碳排放與能源消耗。

第三節 綠色/永續供應鏈模式

因應環境保護意識抬頭、政府相關法令規範以及民眾對環境重視的期待，在供應鏈運作與管理領域研究上，考量綠色、永續性等環境相關議題之供應鏈最佳決策運作與管理模式，已受到越來越多的關注(Talaei et al., 2016; Yavari & Geraeli, 2019; Sánchez-Flores et al., 2020)。

一、綠色供應鏈與永續供應鏈管理之定義

Hervani et al. (2005)認為綠色供應鏈管理包含綠色採購、綠色製造與物料管理、綠色配送/行銷與逆物流。Srivastava (2007)認為綠色供應鏈係將環境考量整併於供應鏈管理中，包含產品設計、原物料搜尋與選購、製造流程、最終產品運送到消費者的流程、以及產品生命週期結束後之管理。Bansal and Roth (2000) 與 Sarkis et al. (2011)認為綠色供應鏈管理係將環境關切議題整合併入跨組織的供應鏈管理活動，包含逆物流管理。Guiffrida et al. (2011)認為綠色供應鏈管理係指永續供應鏈管理的環境構面。

Seuring and Müller (2008)定義永續供應鏈管理為除了物料、資訊及資本流等管理外，亦包含公司間在供應鏈上的合作，將消費者及利害關係人之需求，以永續發展的三個構面-經濟、環境、社會等進行目標設定。Kim et al. (2014) 定義永續供應鏈為一個供應鏈在思考獲取利益的同時，也需要對它的消費者、供應商、社會及環境負責，透過創新的、具策略性的戰術與管理技術來做到。這樣的一個供應鏈整合了永續的發展以及經濟、環境與社會三個構面的運作。Ansari and Qureshi (2015)認為永續供應鏈管理係運用一些工具與技巧，去達到符合永續發展的目標以及克服可能遭遇的挑戰。Sánchez-Flores et al. (2020) 認為永續供應鏈就是透過供應鏈功能運作下，在社會責任、環境保護以及經濟可行性三者之間取得平衡。

二、綠色供應鏈與永續供應鏈管理之模式設計

過去衡量供應鏈績效多以客戶服務、品質、前置時間、成本等項目為主，隨著環境保護、能源循環再利用等議題延燒，環境策略也成為供應鏈績效衡量之重要指標(Paksoy, Özceylan, & Weber, 2011)。除了成本因素考量，二氧化碳排放量、可回收物料使用率等相關指標亦會被納入供應鏈績效評估。

一個供應鏈設計問題包含生產中心的配置與數量、每個設備的產能與數量、市場需求的分配、供應商的選擇等決策(Meixell & Gargeya, 2005)，而所謂綠色供應鏈包含了廢棄物處理流程、有效使用能源性資源、節能氣體排放、考量法規環境因素等決策處理(Paksoy, Özceylan, & Weber, 2011)。Sarkis (2003)提出綠色供應鏈功能模型，包含綠色供應鏈組成要素與協助決策的運作機制(如圖 4 所示)，並建立一個非線性動態決策模式，探究其可行性。

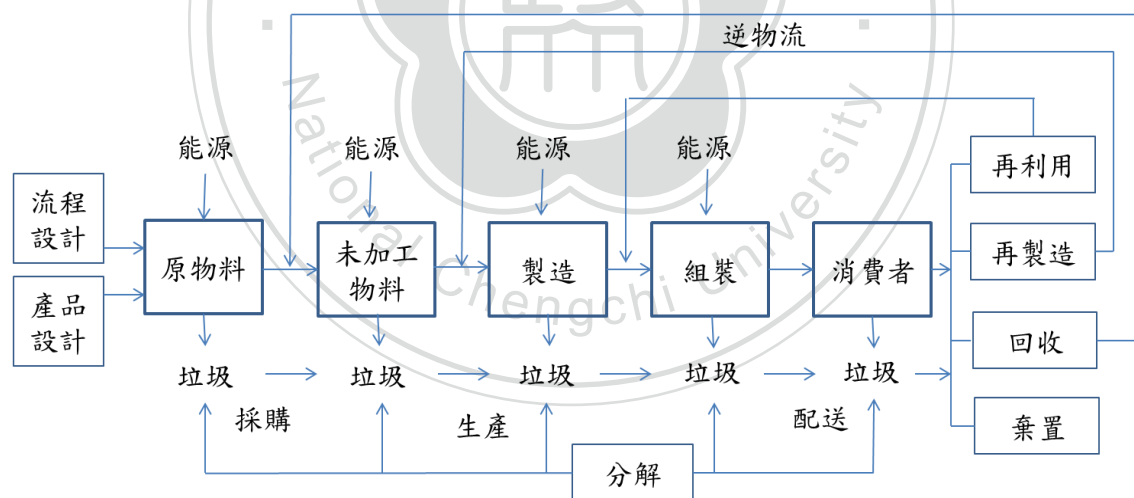


圖 4 綠色供應鏈功能性模型圖

Beamon(1999)觀察自然環境的發展情形，研究調查環境影響因素，建立綠色供應鏈績效衡量方法，並發展出一套綠色供應鏈的流程。Sheu, Chou, and Hu(2005)建立一個多目標線性規劃最佳化模式，考量二手產品回收率以及針對逆向物流的政府津貼，以解決綠色供應鏈整合性物流作業問題，主要兩個目標函數一為正物流(製

造鏈)淨利最大化，另一為逆物流淨利最大化，研究結果指出該模式能創造出更好的淨利績效。

Yeh and Chuang (2011)提出綠色供應商最佳化選擇之數學模式，並以成本、時間、產品品質、綠色評估分數等列入目標函數指標。為了改善綠色供應鏈管理，Zhao et al. (2017)提出多目標最佳化模式，期望將有害物質的隱藏風險最小化、相關碳排放量最小化，以及經濟成本最小化，並運用三個情境，分析綠色因素對供應鏈管理的影響。Lee, Dong, and Bian (2010)考量新產品需求與回收產品供給的不確定性，提出一個永續性的供應鏈網路模式，尋求投資成本與運作成本的最小化。Mahdi Saffar (2015)提出雙目標函數之供應鏈網路設計模式，第一目標函數是尋求總成本最小化，包含設備固定成本、配送成本、生產與維護成本；第二個目標函數是二氧化碳排放最小化。

Linton, Klassen, and Jayaraman(2007)將永續性概念融入供應鏈運作機制，其認為永續供應鏈是將永續性相關議題整合於供應鏈流程核心管理活動，如產品設計、製造副產品、產品使用管理、產品生命週期延伸與修復流程，如圖 5 所示。整體供應鏈流程涵蓋範圍從原物料的處理到最終產品配送到消費者手中，為了達到永續性的管理目的，產品設計、產品使用管理、產品生命週期延伸、修復等流程應被加入供應鏈流程中。

Quariguasi Frota Neto et al. (2010)認為考量逆物流與閉迴路供應鏈流程設計，並不能達到永續供應鏈之效益，真正要做到永續性，必須從供應鏈目標著手，除了以經濟指標為主要供應鏈目標外，亦須將環境、社會等指標納入供應鏈目標設定中。永續供應鏈管理係指供應鏈成員間在物料、資訊、資本與合作之流程管理，以達到經濟、環境與社會三個構面的永續性發展(Ageron et al., 2012)。

應鏈設計模式，尋求總成本與相對應的碳排放最小化，同時考量客戶需求與產品回收率之不確定性。Amin and Zhang (2013b) 以混合整數線性規劃模式方法，提出一個考量環境因素之閉迴路供應鏈模式，兩個目標函數分別是總成本最小化，環境友善物料與清潔科技使用最大化。同時，考量需求與回收的不確定性。

Paksoy, Özceylan, and Weber (2011)發展一個綠色閉迴路供應鏈模式，除考量最小化運送成本與原物料採購成本，亦將綠色議題納入考量，如不同運輸工具會產生不同二氧化碳排放量，工廠可選擇採購回收率不同之原物料。此研究重點在於追求二氧化碳排放量最小化，也鼓勵消費者使用可回收物料。此研究建立一個多目標線性規劃數學模式，其 4 個目標函數分別為正物流運送成本最小化、逆物流運送成本最小化、二氧化碳排放量與處罰成本最小化、總採購成本最小化與總機會利潤最大化。

Pishvae and Razmi (2012)建立一個考量環境議題的供應鏈網路，並考量輸入資料的不確定性，發展一個多目標模糊數量規劃模式。此研究目標函數除了總成本最小化之外，並考量環境影響因素最小化，以生命週期評估為基礎的方法(Life cycle assessment based, LCA-based)，評估不同供應鏈網路設計對環境之影響程度。Safaei, Roozbeh, and Paydar (2017)考量環境議題、法規規範、經濟利益等因素，建立一個硬紙板回收之閉迴路供應鏈網路，以混合整數線性規劃模式尋求回收利潤最大化，並以穩健最佳化方法解決需求不確定性問題。經由實際業界紙類回收案例進行驗證，本研究所提出的數學模式可提供類似硬紙板回收閉迴路供應鏈網路運作一個有效的解決方案。

Pourjavad and Mayorga (2018)建立一個多階層、多時期的永續性閉迴路供應鏈網路架構，以模糊多目標混合整數線性規劃模式，尋求成本最小化、環境影響最小化、社會影響最大化等目標，其中產品回收率、各處理中心處理量、產品需求為模糊參數。本研究先以平均權重法(weighted average method)將模式轉換為多目標混

合整數線性規劃模式，再以 NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II)演算法求解。Huang, Murong, and Wang (2020) 建立一個綠色閉迴路供應鏈網路，以混合整數規劃模式，在需求不確定情況下，尋求網路總成本最小化及設備與運輸過程排放二氧化碳最小化，並使用情境分析方法與 Epsilon 方法進行求解。最後以敏感度分析方法，探討環境需求變化對成本與二氧化碳排放之影響。

Almaraj and Trafalis(2021)在閉迴路供應鏈網路架構下，考量有缺陷的品質生產，建構一個多目標混合整數線性規劃模式，共有 3 個目標函數，第一個目標函數為供應鏈總成本最小化，第二個目標函數為環境影響最小化，第三個目標函數為社會利益最大化。採用擴增加權 Tchebycheff 方法(the augmented weighted Tchebycheff method)將多目標函數轉換成單一目標函數，進而求出一組有效的解決方案；採用穩健最佳化方法求解出一組可因應未來參數波動之穩健解決方案。

Yavari and Geraeli (2019)考量一個多時期、多產品的綠色閉迴路供應鏈網路架構，包含有供應商、製造商、存貨中心、零售商、回收中心等，在此供應鏈網路架構下，建立一個多目標混合整數線性規劃模式，在尋求供應鏈總成本最小化與環境污染最小化的同時，考量客戶需求、回收率以及回收產品品質等三個不確定性參數，並以名為 Yavari and Geraeli (YAG)的啟發式方法(heuristic method)求解大規模問題。透過實際案例驗證，此穩健模式(robust model)相較於明確性模式(deterministic model)具有更好的品質與信賴度。

根據 Govindan, Soleimani, and Kannan(2015)研究結果，閉迴路供應鏈、逆物流、永續供應鏈、綠色供應鏈等 4 類研究領域研究數量分布情形，如圖 6 所示，可看出永續與綠色供應鏈研究數量佔此研究領域研究總數約 10%，因此在永續與綠色供應鏈相關議題上仍存在許多研究空間值得深入探究。

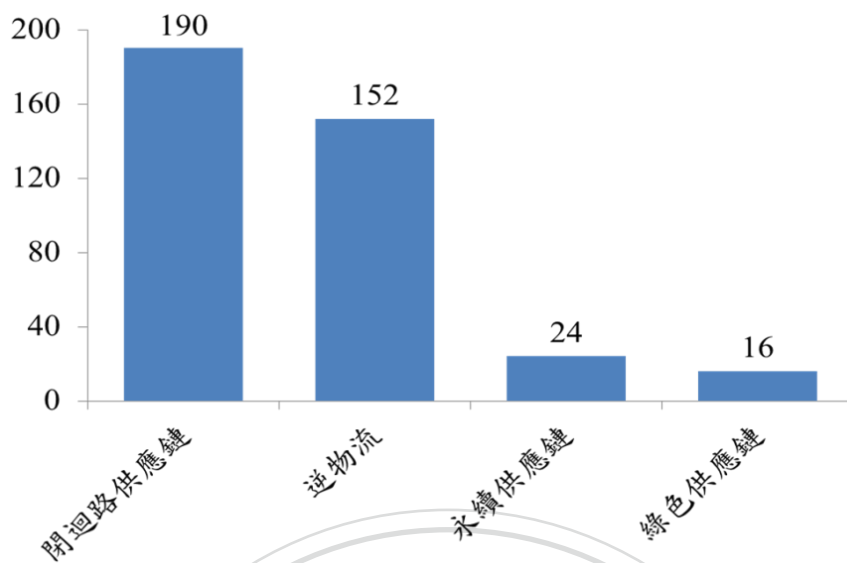


圖 6 4 項研究領域研究數量比較情形

Tseng et al. (2019) 針對 236 篇綠色供應鏈管理文獻，將研究議題分為觀念、驅動力/阻力、合作、數學模式、評估等 5 種類型，研究分析指出數量模式類型相關研究具有快速成長的趨勢，如圖 7 所示。此類文獻強調採用數量方法協助管理者策略性進行決策過程，以利改善企業經營之經濟績效與環境績效。

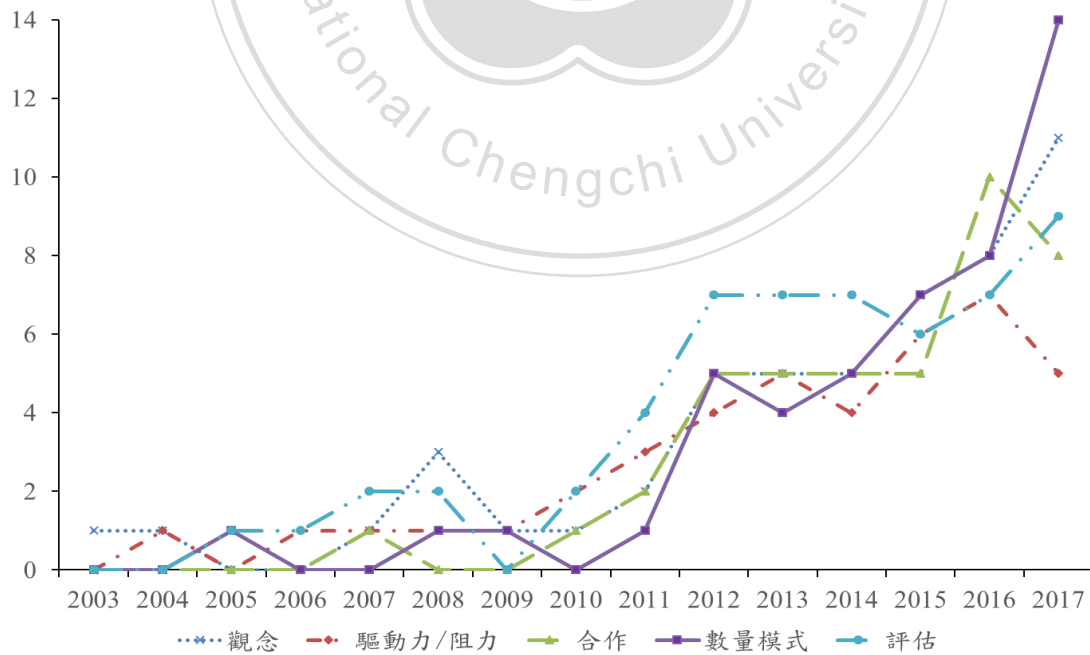


圖 7 5 項研究議題之文獻數量比較情形

綜上文獻研究分析結果，本研究擬建立綠色閉迴路供應鏈網路架構下的數量決策模式，不但符合此領域研究主要趨勢，並可藉以補足此領域研究缺口，為值得投入的研究方向。

第四節 多目標函數指標

面對複雜環境的供應鏈運作流程，僅單一目標函數的設定是無法完整呈現真實的企業營運策略所需達成的績效目標，以多目標函數建立閉迴路供應鏈數量模式，尋求最佳化解決方案為較合適作法。根據 Govindan, Soleimani, and Kannan (2015)彙整單一目標函數與多目標函數之研究文獻數量情形，由圖 8 可看出，逆物流或閉迴路供應鏈領域研究仍以單一目標函數為主，約佔 87.6%，使用多目標函數的研究文獻仍屬少數，約佔 12.4%。Peng et al.(2020)檢視 2004-2018 年共 302 篇閉迴路供應鏈相關文獻，研究發現多目標函數最佳化模式近年已受到相關研究學者持續關注。

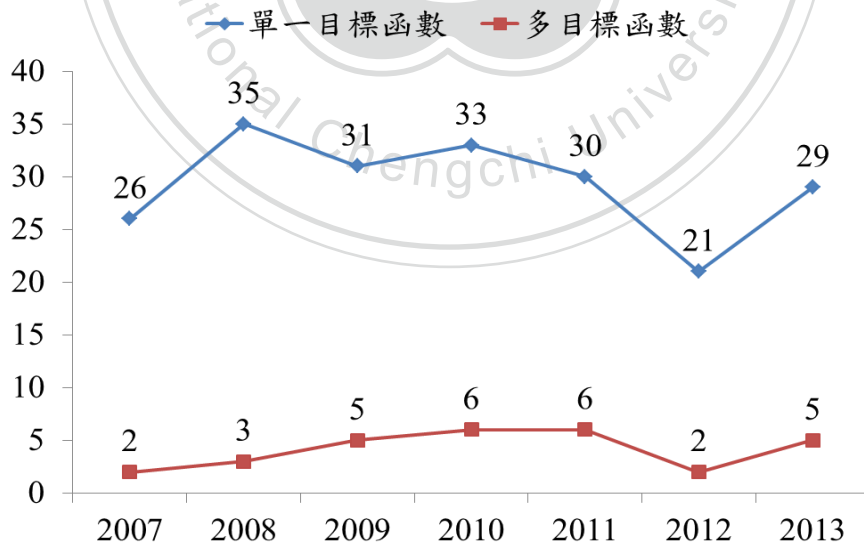


圖 8 單一目標函數與多目標函數研究數量比較情形

本研究彙整綠色供應鏈數量模式目標函數指標相關文獻，如表 1。由表中可看出多數研究文獻的目標函數包含環境績效指標與經濟績效指標，其他供應鏈績效指標如產品品質、運送時間等較少出現在此領域研究中。

在環境指標部分，主要使用的指標包含有二氧化碳排放最小化、汽油消耗最小化、消耗性能源最小化、環境評估最小化、總有害排放最小化、環境成本最小化、碳排放與懲罰成本最小化、綠色評估分數最大化、友善物料、清潔科技使用最大化等。在經濟指標部分，主要使用的指標包含有成本最小化、利潤最大化等。在其他供應鏈績效指標部分，主要使用的指標包含有創造工作機會和經濟發展最大化、風險最小化、社會政治對公司影響最大化、總時間最小化、產品品質最大化、意外受傷率最小化等。

根據 Huang, Huang, and Yang (2017)研究提出綠色供應鏈管理績效指標可分為 3 類，分別是經濟績效指標、環境績效指標、運作績效指標與競爭力，其中運作績效指標與競爭力係以效率、品質與生產力來衡量。許多公司以強化品質作為維持市場長期競爭力的手段，視高品質聲譽為未來爭取新客戶市場佔有率與維持原客戶市場佔有率的重要利器。改善品質可減少廢棄與重工，有助節省長期財務成本 (Franca et al., 2010)。

衡量品質的方法之一就是 6 個標準差，例如 4 個標準差的水準代表一工廠在生產 1 百萬個零件，約有 6210 個損壞零件。為了維持供應鏈營運的獲利性，供應商品質是決策過程關鍵考量要素。然有時品質與獲利會呈現兩難局面，為了提升產品品質可能會增加成本而減少獲利，反之，為追求最大利潤可能會犧牲品質要求。Franca et al.(2010)提出一個評估低品質供應鏈風險之方法，此研究導入多目標隨機數學模式，使用 6 個標準差衡量機制，評估供應鏈之財務風險。一個目標函數為追求利潤最大化，另一個目標函數為追求原物料不良率最小化，亦即提升品質水準。

表 1 綠色供應鏈數量模式多目標函數指標

| 參考文獻 | 環境相關指標 | 經濟指標 | 其他指標 |
|-------------------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------|
| Zhalechian et al. (2016) | 二氧化碳排放、汽油消耗、消耗性能源最小化 | 成本最小化 | 創造工作機會和經濟發展最大化 |
| Zhao et al. (2017) | 碳排放最小化 | 成本最小化 | 風險最小化 |
| Talaei et al. (2016) | 碳排放最小化 | 成本最小化 | |
| Mota et al. (2015) | 環境評估最小化 | 供應鏈成本最小化 | 社會政治對公司影響最大化 |
| Garg et al. (2015) | 碳排放之汽車數量最小化 | 利潤最大化 | |
| Ma et al. (2016) | 環境成本最小化 | 成本最小化(固定成本、運輸成本、生產成本) | |
| Das & Rao Posinasetti (2015) | 總能源消耗最小化、總有害排放最小化 | 利潤最大化 | |
| Altmann & Bogaschewsky (2014) | 環境成本最小化(以碳排放量為計算基礎) | 成本最小化(固定成本、物料供應成本、生產成本、配送成本、棄置成本等) | |
| Paksoy et al. (2011) | 碳排放與懲罰成本最小化 | 運輸成本最小化 採購成本最小化 | |
| Yeh & Chuang (2011) | 綠色評估分數最大化 | 總成本最小化 | 總時間最小化 產品品質最大化 |
| Amin & Zhang (2013b) | 友善物料、清潔科技使用最大化 | 成本最小化 | |
| Mahdi Saffar (2015) | 碳排放最小化 | 成本最小化 | |
| Wang et al. (2011) | 碳排放最小化 | 成本最小化 | |
| Pishvae & Razmi (2012) | 環境影響最小化 | 成本最小化 | |
| Chen & Andresen (2014) | 汙染排放最小化 | 成本最小化 | 意外受傷率最小化 |
| Liu et al.(2018) | 回復數量最大化 | 成本最小化 | 運送時間最小化、生產品質最大化 |
| Pourjavad and Mayorga (2018) | 環境影響最小化 | 成本最小化 | 社會影響最大化(工作機會) |
| Karimi et al. (2019) | | 利潤最大化 | 利害關係人滿意度最大化、客戶需求達成率最大化 |

Ramezani, Bashiri, and Tavakkoli-Moghaddam (2013)認為為了有效進行供應鏈管理，會牽涉到多種目標的衝突，例如成本、利潤、資源平衡、客戶回應、品質等。此外，在考量政府法令規範、環境保護、社會責任、消費者意識等相關議題，也會影響到供應鏈的運作。基於上述議題，在考量不確定環境下，此研究建構一個閉迴路供應鏈網路架構(如圖 9 所示)，發展利潤最大化、消費者滿意回應最大化、品質最佳化之多目標最佳化決策模式。

Castillo-Villara, Smithb, and Simonton(2012)提出一個追求利潤最大化的供應鏈網路設計模式，包含品質成本與傳統的製造與運送成本(SC-COQ Model)。此研究主要的貢獻有三：一為此 SC-COQ 模式能根據供應鏈企業成員間相互關係計算出品質成本，二為此 SC-COQ 模式在考量整體供應鏈品質水準下，能建立物流配送路徑以達到利潤最大化，三為此研究利用模擬退火法以及基因演算法求解。

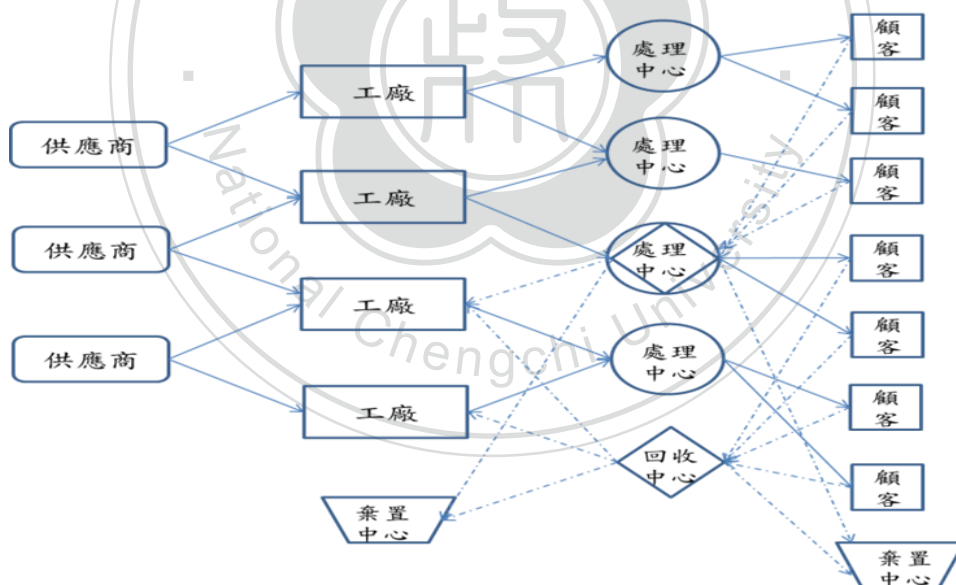


圖 9 多層閉迴路供應鏈網路架構圖

為尋求更完整呈現綠色閉迴路供應鏈之多目標函數，藉以反應真實企業經營決策考量因素，本研究除了考量經濟指標與環境指標，更嘗試加入評估供應鏈績效之重要指標—品質指標，使多目標函數的建立能更貼近企業真實經營環境需要，最終產生之最佳化解決方案，能有效協助經營者決策評估與判斷。

第五節 多目標問題之解決方法

Trisna et al. (2016)針對供應鏈管理的多目標最佳化問題進行文獻研究，文獻中指出將多目標問題轉換成單一目標問題的典型方法包含 Weighted sum method、 ε -constraint method、LP-metrics method、Lexicographic method、Goal programming method、Fuzzy goal programming method 等，以下就各方法進行簡要說明。

一、Weighted sum method

Weighted sum method 係依各個目標函數 $f_i(x)$ 給予一個權重值 r_i ，再將各個目標函數與權重值的乘積進行加總，即可將多目標模式轉換為單一目標模式 $F'(x)$ 。轉換模式說明如下：

$$\text{Max/Min } F'(x) = \sum_{i=1}^n r_i^* f_i(x) \quad (1)$$

subject to

$$H(x) = 0$$

$$G(x) \geq 0$$

$$x_0 \leq r_i \leq 1, i = \{1, \dots, n\}, \sum_{i=1}^n r_i = 1$$

x 為決策變數， n 為目標函數的個數，此方法的每個目標函數乘上權重值後，可形成介於 0-1 之間的數值。此外，各個目標函數權重值加總總和為 1。

二、 ε -constraint method

ε -constraint method 係由 Haimes et al. (1971)所提出，再經由 Chankong and Haimes (1983)討論而成。此方法將多目標轉換成單一目標的作法係保留一個目標函數尋求最佳化，而其餘目標函數轉為限制式。

假設多目標函數數學規劃模式問題如下：

$$\max (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (2)$$

subject to

$$x \in S$$

x 為決策變數， $f_1(x), \dots, f_n(x)$ 為 n 個目標函數， S 為可行解。

轉換模式說明如下：

$$\max f_1(x) \quad (3)$$

subject to

$$f_2(x) \geq e_2,$$

$$f_3(x) \geq e_3,$$

.....

$$f_n(x) \geq e_n,$$

$$x \in S$$

此方法僅有其中一個 $f_i(x)$ 目標函數尋求最佳化，而其他 $n-1$ 個目標函數轉換成限制式，並有各自的 e_i 數值作為限制條件。不同 e_i 數值的設定， $f_i(x)$ 將會產生不同的最佳解。

三、LP-metrics method

LP-metrics method 先就各個目標函數執行最佳化求解程序，各個目標函數最佳解為 F_i ，將多目標問題轉換成單一目標問題，轉換模式說明如下：

$$\text{Min } \sum_i W_i \left(\frac{F_i - F_i^*}{F_i^*} \right) \quad (4)$$

$$0 \leq W_i \leq 1, \sum_i W_i = 1$$

W_i 為各目標函數的權重值，而各目標函數權重值的加總為 1， F_i^* 為轉換後模式各目標函數理想的最佳解。此方法轉換成單一目標函數是在尋求單一目標函數最佳解與多目標函數最佳解的差距最小化。

相關研究文獻如 Altmann and Bogaschewsky (2014)、Ma et al. (2016)、Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011)、Khalilzadeh and Derikvand (2018)、Mazlounian, Fazle Baki, and Ahmadi (2022)等皆採用 LP-metrics method 處理多目標問題。Mirzapour Al-e-hashem et al.(2011)、Ma et al. (2016)及 Khalilzadeh and Derikvand (2018)考量目標函數屬性不一致、互相衝突且大小不一，故採用 LP-metrics 求解。Mazlounian, Fazle Baki, and Ahmadi (2022) 採用 LP-metrics 方法係考量其具備彈性調查目標函數權重值之優點。本研究之目標函數屬性不一致且互相衝突，解決多目標轉換成單一目標問題，採用 LP-metrics 方法為合適作法。

四、Lexicographic method

Lexicographic method 係將每個目標函數依重要性先給予一個序號，並依序尋求各目標函數最小化最佳解 F_j^* 。首先先針對最重要的目標函數，尋求最小化最佳解，於次重要的目標函數求解時，前一步驟完成求解的目標函數會加入限制式，再尋求次重要目標函數的最小化最佳解。轉換模式說明如下：

$$\text{Min } F_i(x) \quad (5)$$

subject to

$$F_j(x) \leq F_j^*$$

$$j = 1, \dots, i - 1, i > 1, i = 1, \dots, k$$

x 為決策變數， i 代表目標函數 F 的優先順序， F_j^* 代表第 j 個目標函數的最小化最佳解，於第 j 次執行求最小化最佳解時獲得。值得注意的是，執行一次單一目標最小化求解程序，可能會產生多個最佳解，若執行一次單一目標最小化求解程序僅獲得一個最佳解，此解即為原始多目標問題的最佳解；若執行完 $k-1$ 次求解程序皆有多個最佳解，則最後一次執行次單一目標最小化解程序所得最佳解 F_k^* ，即可視為原始多目標問題的最佳解。

五、Goal programming method

Goal programming method 主要目的是尋求目標函數目標值之間變異的最小化。轉換模式說明如下：

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m (d_i^+, d_i^-) \quad (6)$$

subject to

$$\text{目標限制式} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad \text{for } i = 1, \dots, m$$

$$\text{系統限制式} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i \quad \text{for } i = m + 1, \dots, m + p$$

$$d_i^+, d_i^-, x_j \geq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

m 為目標限制式，p 為系統限制式，n 為決策變數，Z 為變異數總和， a_{ij} 為變數 j 在第 i 個目標式相關係數， x_j 為第 j 個決策變數， b_i 為 right hand side 值， d_i^+ 和 d_i^- 代表第 i 個目標函數目標值正變異與負變異， $d_i^+ \times d_i^- = 0$ 。

六、Fuzzy goal programming method

Fuzzy goal programming method 係由目標規劃方法發展而來，主要係將含有不確定與不準確特性的模糊變數導入目標規劃模式中。模糊方法的目標是產生一個框架，可將模糊與不精準元素模式化，併入數量模式中。

在閉迴路供應鏈網路設計下，較難以用一般分析方法或商用軟體來解決較大規模多目標決策問題(Pourjavad & Mayorga, 2018)，因此，萬用啟發式演算法(meta-heuristics)常被用來解決此類問題。在許多 meta-heuristics 演算法中，Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) 屬較為多人廣泛使用的一個演算法，主要係因為相較於其它分析方法或 meta-heuristics 演算法，NSGA-II 具有簡易且有效之特點 (Pasandideh, Niaki, & Asadi, 2015)。

Pasandideh, Niaki, and Asadi (2015)研究指出，通常有兩種方法用以解決複雜的多目標最佳化問題，第一種方法是運用多準則決策方法(multi-criteria decision making, MCDM)將多目標最佳化問題轉換成單一目標最佳化問題(Hwang & Masud, 1979)。再由單一目標進化演算法(single-objective evolutionary algorithm, SOEA) 如基因演算法(Genetic Algorithm, GA)、模擬退火演算法(Simulated Annealing, SA)、帝國競爭演算法(Imperialist Competitive Algorithm, ICA)、和聲搜尋演算法(Harmony Search Algorithm, HAS) 以及粒子群優化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO) 進一步求解(Deb et al., 2002)。第二種方法為運用多目標進化演算法(multi-objective evolutionary algorithm, MOEA)如非支配排序的遺傳演算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II; Non-dominated Ranked Genetic Algorithm, NPGA)、多目標粒子群演算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)等求解出所謂的柏拉圖最佳前緣解。

第六節 不確定性參數問題之解決方法

處理不確定性問題主要方法包含：敏感度分析、蒙地卡羅模擬、模糊規劃(fuzzy programming)、隨機規劃(stochastic programming)、隨機動態規劃(stochastic dynamic programming)、穩健最佳化(robust optimization)等。敏感度分析簡單易用，但是並未將不確定性參數考慮進入模式中；蒙地卡羅模擬、隨機規劃等考量了不確定性參數，並假設不確定性參數服從某一機率分配，但實務上經常無法找到條件符合的機率分配函數，用以反映真實的環境情形；穩健最佳化方法不需知道不確定性參數的機率分配，透過誤差項、懲罰函數之控制，可將決策者的風險考量重點反應在模式上，並透過情境的設計使不確定因子的描述更加精確，更貼近現實環境，且較隨機規劃方法容易求解(Safaei, Roozbeh, & Paydar, 2017; Jos'e Alem & Morabito, 2012)。Govindan, Soleimani, and Kannan (2015)研究指出，現行處理不確定性問題

的相關研究，大多數係採用隨機規劃方法，惟為了能夠真實呈現實際環境狀況，處理複雜的不確定性問題，穩健最佳化方法是可取代隨機規劃方法的替代方法。

本研究處理不確定性參數所採用方法之選擇，首先經由文獻探討收集擬解決問題之可能方法，再由這些方法中篩選出最適合本計畫情境特性的方法。經由探討上述方法的使用時機，及考量本計畫的情境設計，將採用穩健最佳化方法，透過情境設計，更精確呈現不確定性參數實際情形的描述，再藉由誤差項、懲罰函數之控制，使決策者風險考量融入模式中。

穩健最佳化是一個可信賴的解決方法適用於處理製造系統的不確定性問題。此方法將不確定參數轉換成不同的應用情境，所找出的最佳解可確保所有情境的個別解都能最接近最佳解。Mulvey et al. (1995) 提出一個包含兩種穩健型態的穩健最佳化模式架構，分別是方法穩健性(solution robustness)與模式穩健性(model robustness)。方法穩健性係指所有情境解都能最接近最佳解，模式穩健性係指所有情境解幾乎皆為可行解。此模式架構的目標函數，在方法穩健性和模式穩健性兩部分皆有懲罰項，並給予相對應的權重值。

以下列線性規劃模式來看，包含有決策變數與控制變數：

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= c^T x + d^T y & (7) \\ \text{s.t. } Ax &= b \\ Bx + Cy &= e \\ x, y &\geq 0 \end{aligned}$$

x 為決策變數， B, C, e 為隨機係數，為了將不確定性參數模式化，Mulvey et al. (1995) 導入情境變數($s \in \Omega$)，各個情境皆有其對應的發生機率 p_s ($\sum_s p_s = 1$)。在不同情境下的不確定係數 B, C, e 可以 B_s, C_s, e_s 表示。在不同情境下的控制變數 y 可以 y_s 表示。在某些不確定參數值的情境下，可能會沒有可行解。 δ_s 代表在

某些不確定參數值的情境下，此模式無可行解，在此情況下， δ_s 將會等於 0。反之，在有可行解的情境下， δ_s 將會是一個正數。在考量高度不確定性的供應鏈網路設計，一個穩健最佳化模式如下所示：

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \quad (8)$$

subject to

$$Ax = b$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0, \delta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega$$

公式 8 第一個部分代表方法穩健性，而第二個部分代表模式穩健性，懲罰未滿足不確定參數的部分。若以 F_s 代表在某個情境下的目標函數 $f(x, y_s)$ ，若此函數具有高變異值，意指當不確定性參數有小幅變動，會造成目標函數值的巨大變動。Mulvey et al. (1995) 以下列公式來表示方法穩健性：

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} P_s F_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s (F_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} F_{s'})^2 \quad (9)$$

λ 代表方法變異數的權重，當 λ 值增加，代表方法對於所有情境資料的變化較不敏感。Yu and Li (2000) 討論二次方程式需要大量計算問題，進而提出替代形式，以絕對值形式代替二次方程式形式，如下所示：

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} P_s F_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s |F_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} F_{s'}| \quad (10)$$

雖然上述目標函數為一非線性函數，惟可將問題轉換成線性規劃模式，意即在線性目標函數與限制式中，導入兩個偏差變數，來求得最佳解。公式 9 可轉換為下列線性規劃模式：

$$\text{Min } \sum_{s \in \Omega} P_s F_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s [(F_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} F_{s'}) + 2\theta_s] \quad (11)$$

subject to

$$F_s - \sum_{s \in \Omega} P_s F_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (12)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (13)$$

公式 12 係指若 $F_s \geq \sum_{s \in \Omega} P_s F_s$ ，那麼 $\theta_s = 0$ ，反之，若 $\sum_{s \in \Omega} P_s F_s \geq F_s$ ，那麼 $\theta_s = \sum_{s \in \Omega} P_s F_s - F_s$ 。

目標函數的第二部分 $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ 為不可行性的懲罰函數，即當某些情境違反控制限制條件會運用懲罰函數來做處理。所謂違反控制限制條件係指針對某一問題在某些情境下出現無可行解的情形。 ω 為一權重值，即為權衡方法穩健性與模式穩健性重要程度的數值。綜上說明，穩健最佳化的目標函數可轉換為下列公式：

$$\text{Min } \sum_{s \in \Omega} P_s F_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s [(F_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} F_{s'}) + 2\theta_s] + \omega \sum_{s \in \Omega} P_s \delta_s \quad (14)$$

另關於不確定性參數部分，依據 Govindan, Soleimani, and Kannan(2015) 研究結果顯示，常用的不確定參數有需求(約 48.9%)、回收品(37.8%)、成本(5.8%)、價格(6.7%)、其他(32.6)等。本研究將依據確定性最佳化模式之敏感度分析結果，作為不確定性參數挑選之參考。

第七節 文獻回顧小結

伴隨著環境保護意識抬頭、法規規範要求、循環經濟發展等議題持續受到關切，閉迴路供應鏈研究也持續受到學術界與實務界的重視，相關研究文獻發表仍具熱度。Battini, Bogataj, and Choudhary(2017) 彙整 the International Journal of Production Economics 有關閉迴路供應鏈主題特刊之 24 篇文獻，共包含 6 項議題，其中 1 項議題為閉迴路供應鏈之環境衡量與多目標最佳化，可看出運用多目標最佳化方法解決問題，為閉迴路供應鏈受到重視的研究方向。

綜觀產業環境複雜性與多元化，與許多衝突因素互相交雜，單一目標較難完全回應真實世界複雜問題，多目標函數的規劃與設計才能反應出真實現況提供更多彈性、有用資訊，以利決策者評估與參考。因應綠色與永續議題發展的重要性，相關研究在設定目標函數上，除了經濟指標外，亦多納入綠色、永續、環境、復原彈性等指標。

依據 Govindan, Soleimani, and Kannan (2015) 檢視從 2007 年 1 月至 2013 年 3 月學術期刊，共 382 篇逆物流與閉迴路供應鏈相關文獻，在逆物流與閉迴路供應鏈之建模方法上，共分為 13 種類，包含概念與描述性模式、線性與混合整數規劃、非線性規劃、凸函數與凹函數規劃、動態規劃、等候理論模式、馬可夫決策模式、圖形理論、賽局理論、模糊理論、模擬退火、多標準決策訂定方法，其他如類神經網路等。其中佔比最高的是線性與混合整數規劃，約佔有 21.2%。

Tseng et al. (2019) 針對 236 篇綠色供應鏈管理文獻，將研究議題分為觀念、驅動力/阻力、合作、數學模式、評估等 5 種類型，研究分析指出數量模式類型相關研究具有快速成長的趨勢，此類文獻強調採用數量方法協助管理者策略性進行決策過程，以利改善企業經營之經濟績效與環境績效。本研究在綠色閉迴路供應鏈網路的建模方法，比照上述類似研究所採用的方法，以混合整數規劃方法，進行數量模式的建立，尋求最佳解決方案，以利協助經營管理者進行策略性的決策評估。

在數量模式尋求最佳解的過程中，若考量不確定性參數，可以更真實呈現產業面臨的複雜環境，經由計算取得之最佳解，可更有效地提供企業經營者訂定決策之相關評估參考資訊。在處理不確定性參數的方法上，除了一般傳統的隨機規劃方法外，採用穩健最佳化方法處理不確定性參數，是值得後續研究學者多加採用的研究方法(Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015; Kazemia et al., 2019)。

本研究檢視前述相關研究文獻，依據閉迴路網路架構、不確定性參數、目標函數指標、解決方法等構面，彙整說明如表 2。依據閉迴路供應鏈相關研究彙整結果，可發現主要多以經濟與環境指標為目標函數，較少考量其他績效評估指標。為補足研究缺口，本研究在綠色閉迴路供應鏈網路架構下，建立以經濟指標、環境指標與品質指標為多目標函數，並以敏感度分析選擇不確定性參數、運用穩健最佳化模式處理不確定性問題之研究模式，可展現本研究之創新性。

本研究採用個案非屬大規模且複雜之案例，採用 LP-metrics method 尋求多目標問題最佳解，尚屬合宜。若未來本研究進一步擴大研究規模，且數量模式更加複雜，則採用萬用啟發式演算法如 NSGA II，MOSA 等，將會是後續研究值得參考的求解方法。

表 2 文獻彙整表

| 研究文獻 | 閉迴路供應 鏈架構 | 不確定 性參數 | 環境指標 目標函數 | 經濟指標 目標函數 | 品質指標 目標函數 | 解決方案/ 建模方法 |
|--------------------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--|
| Zhalechian et al. (2016) | * | multiple | * | * | | Stochastic possibilistic programming |
| Mohammed et al. (2017) | * | multiple | | * | | Robust optimization |
| Zhao et al. (2017) | | | * | * | | Big data analytic approach Scenario analysis |
| Talaei et al. (2016) | * | multiple | * | * | | Robust fuzzy optimization |
| Mota et al. (2015) | * | | * | * | | Multi-Objective approach Scenario analysis |
| Garg et al. (2015) | * | | * | * | | Interactive Multi-Objective Programming approach algorithm |
| Ma et al. (2016) | * | multiple | * | * | | Robust optimization |
| Das & Posinasetti (2015) | * | | * | * | | Bi-objective Pareto optima solutions, Goal programming |

表 2 文獻彙整表(續)

| 研究文獻 | 閉迴路供應鏈架構 | 不確定性參數 | 環境指標目標函數 | 經濟指標目標函數 | 品質指標目標函數 | 解決方案/建模方法 |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| Altmann & Bogaschewsky (2014) | * | multiple | * | * | | Robust optimization |
| Lee et al. (2010) | | multiple | * | * | | The sample average approximation scheme with an importance sampling strategy |
| Paksoy et al. (2011) | * | | * | * | | Scenario analysis |
| Ramezani et al. (2013) | | multiple | | * | * | Pareto-optimal solutions |
| Yeh & Chuang (2011) | | | * | * | * | Multi-Objective Optimization |
| Amin & Zhang (2013b) | * | multiple | * | * | | Multi-Objective approach |
| Mahdi Saffar (2015) | | multiple | * | * | | Jimenez approach |
| Liu et al.(2018) | * | single | * | * | * | Approximation, -constraint method, MOSA, NSGA-II |
| Pourjavad & Mayorga (2018) | * | multiple | * | * | | NSGA-II |
| Karimi et al. (2019) | * | single | | * | | NSGA-II, NPGA |
| Yavari & Geraeli(2019) | * | multiple | * | * | | Heuristic method |
| Huang et al. (2020) | * | single | * | * | | The scenario-based method and the Epsilon method |
| Almaraj & Trafalis(2021) | * | multiple | * | * | | Robust optimization |
| Atabaki et al. (2020) | * | multiple | * | * | | Possibilistic programming, Stochastic programming |
| This study | * | multiple | * | * | * | Multi-Objective approach Robust optimization |

第三章 模式建立

本章節主要說明本研究的研究範疇、數量模式之建模方法、處理不確定性參數與多目標問題之方法等。首先說明本研究綠色閉迴路供應鏈網路架構與運作機制，在此架構下，考量採購、製造、回收、處理、棄置等相關流程之最佳資源配置，先建立混合整數線性規劃模式，並將經濟因素、環境因素與品質因素納入考慮，進而建立多目標決策最佳化數量模式。本研究以 AHP 方法，求得各目標函數的權重值。針對不確定性參數，本研究以穩健最佳化方法求解，最後再以 LP-metrics 法將多目標函數模式轉換成單一目標函數模式，求得穩健最佳解。

第一節 研究範疇

本研究之綠色閉迴路供應鏈網路架構包含供應商、製造工廠、客戶、回收再利用生產中心、其他市場客戶、棄置中心等(如圖 10 所示)。在此供應鏈網路架構下，本研究探討在單一時期下，由製造工廠向供應商採購新物料，另由回收再利用生產中心提供回收物料，依據產品/物料組成比例，由製造工廠生產新產品並銷售配送至客戶端。再由回收再利用生產中心向客戶收購回收產品，處理過後的部分回收物料流回製造工廠生產新產品，部分回收物料製成回收再製品，銷售至其他市場客戶，部分回收物料則清運至棄置中心進行棄置處理。

在上述綠色閉迴路供應鏈網路架構下，企業面對永續經營趨勢潮流，如何兼顧企業營利、環境保護、產品品質等面向，在供應鏈運行下，能獲得相關資源配置最佳化，此為本研究擬解決之研究課題。

為解決上述研究問題，本研究擬建立最佳資源配置決策之數量模式，第一個目標函數為尋求總利潤最大化；為因應節能、資源再生利用等環保意識，此模式加入環境因素考量，以環境參數的使用狀況做評斷，第二個目標函數係尋求清潔生產最

佳化，其計算的單位與成本、利潤不同，無法納入同一目標函數中。此外，為維持客戶滿意度與忠誠度，於模式中加入品質因素考量，以產品不良率作為判斷準則，第三個目標函數係尋求供應鏈品質最佳化，不良率的計算單位亦不同於成本與利潤，無法放置同一個目標函數。在上述多種情況同時考量下，建立了多目標決策最佳化數量模式，運用 AHP 方法，求取多目標函數之權重。

為了能反映真實產業環境的不確定性，本研究會先針對確定性之多目標混合整數線性規劃模式進行敏感度分析，再參酌分析結果，將敏感度較高者轉換為不確定性參數，並以穩健最佳化方法，處理不確定性問題。先將不確定性參數設定幾個不同數值，依其不同數值組合建立各種情境，並依各種情境可能發生情形，設定各個情境發生機率。最後再以 LP-metrics 方法，將多目標函數轉換為單一目標函數，求得穩健最佳解。

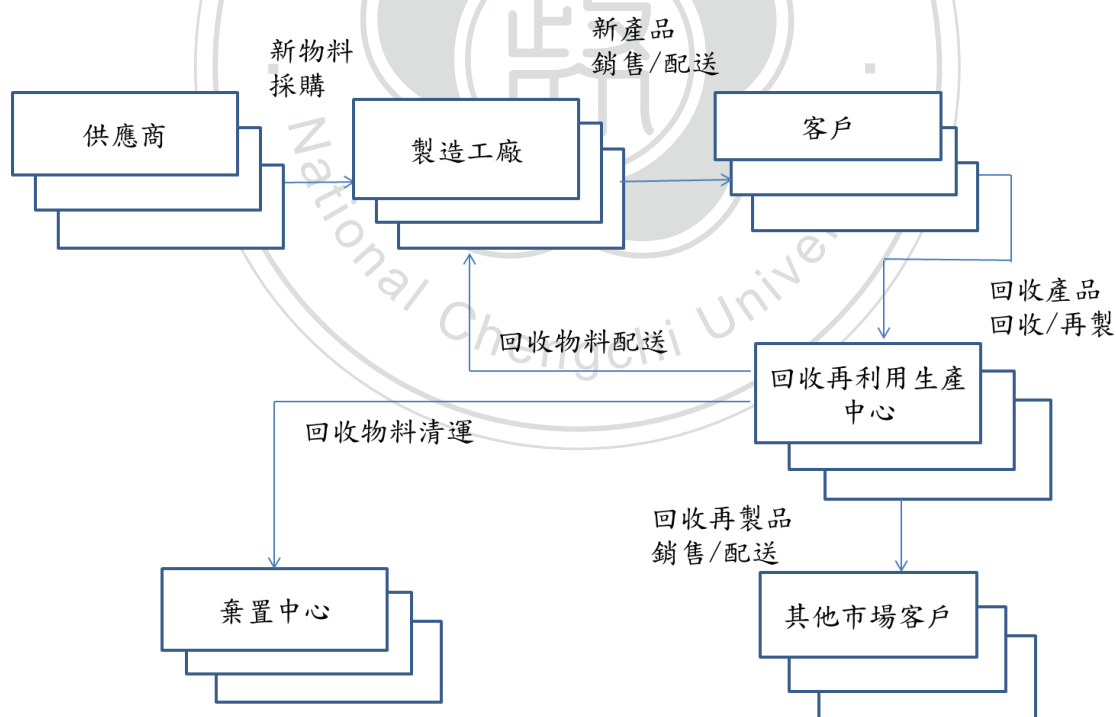


圖 10 本研究閉迴路供應鏈網路架構圖

本研究基本假設說明如下：

- (1) 僅考量單一時期下的數量模式規劃與建構。
- (2) 供應商、製造工廠、回收再利用生產中心、棄置中心等皆有產能限制。
- (3) 回收產品須向客戶進行收購，而非由客戶免費提供。
- (4) 除了回收再製品之市場銷售價格，新產品銷售價格、其他相關單位成本為穩定狀態。
- (5) 各節點配送作業，沒有時間限制。
- (6) 針對穩健最佳化方法之情境組合，各種情境發生之機率皆相同。

第二節 確定性最佳化模式建構與說明

本研究依據閉迴路供應鏈網路流程與運作機制，建立確定性多目標混合整數線性規劃模式，本節主要說明模式符號、模式建構內涵等。

(1) 模式符號說明

集合：

S 供應商集合

C 客戶集合

M 製造工廠集合

L 回收再利用生產中心集合

T 其他市場客戶集合

O 棄置中心集合

P 新產品集合

E 回收再製品集合

N 新物料集合

R 回收物料集合(R1：供製造工廠；R2：供其他市場客戶；R3：送至棄置中心)

F 目標函數集合

I 情境集合

(2) 數量模式建構說明

參數：

SC_{sn} 向供應商 s 採購新物料 n 之單位採購成本

PC_{pm} 由製造工廠 m 製造產品 p 之單位生產成本

RC_{le} 由回收再利用生產中心 l 生產回收再製品 e 之單位生產成本

CC_{cp} 由客戶 c 回收產品 p 之單位回購成本

DC_o 棄置中心 o 之單位棄置成本

FC_m 開設製造工廠 m 之固定成本

FC_l 開設回收再利用生產中心 l 之固定成本

FC_o 開設棄置中心 o 之固定成本

TC_{pmc} 產品 p 由製造工廠 m 配送至客戶 c 的單位配送成本

- TC_{prlm} 回收物料 $r(r \in r1)$ 由回收再利用生產中心 l 配送至製造工廠 m 生產產品 p 的單位配送成本
- TC_{elt} 回收再製品 e 由回收再利用生產中心 l 配送至其他市場客戶 t 的單位配送成本
- TC_{rlo} 回收物料 $r(r \in r3)$ 由回收再利用生產中心 l 清運至棄置中心 o 的單位清運成本
- Π_{pm} 產品 p 放置於製造工廠 m 的期初庫存量
- Π_{le} 回收再利用產品 e 放置於回收再利用生產中心 l 的期初庫存量
- IC_{pm} 產品 p 放置於製造工廠 m 的單位存貨成本
- IC_{le} 回收再利用產品 e 放置於回收再利用生產中心 l 的單位存貨成本
- IM_{pm} 產品 p 放置於製造工廠 m 的存貨數量限制
- IM_{le} 回收再利用產品 e 放置於回收再利用生產中心 l 的存貨數量限制
- CS_{sn} 供應商 s 提供新物料 n 的產能限制
- CP_{pm} 製造工廠 m 生產產品 p 的產能限制
- CM_{lp} 回收再利用生產中心 l 回收產品 p 的產能限制
- CE_{le} 回收再利用生產中心 l 生產回收再製品 e 的產能限制
- CO_{or} 棄置中心 o 處理回收物料 $r(r \in r3)$ 的產能限制
- DP_{cp} 客戶 c 對產品 p 的需求量
- DE_{et} 其他市場客戶 t 對回收再製品 e 的需求量

- RA_p 產品 p 的回收比例
- P_{pc} 提供客戶 c 產品 p 的單位售價
- P_{et} 提供其他市場客戶 t 回收再製品 e 的單位售價
- EM_{pm} 製造工廠 m 生產產品 p 使用友善物料的比例
- EM_{le} 回收再利用生產中心 l 生產回收再製品 e 使用友善物料比例
- CT_{mp} 製造工廠 m 生產產品 p 使用清潔科技比例
- CT_{pmc} 製造工廠 m 配送產品 p 至客戶 c 使用清潔科技比例
- CT_{rlo} 回收再利用生產中心 l 運送回收物料 $r(r \in r3)$ 至棄置中心 o 使用清潔科技比例
- CT_{le} 回收再利用生產中心 l 生產回收再製品 e 使用清潔科技比例
- CT_{elt} 回收再利用生產中心 l 配送回收再製品 e 至其他市場客戶 t 使用清潔科技比例
- CT_{prlm} 回收再利用生產中心 l 配送回收物料 $r(r \in r1)$ 至製造工廠 m 生產產品 p 使用清潔科技比例
- DR_{mp} 製造工廠 m 生產產品 p 的不良率
- DR_{le} 回收再利用生產中心 l 生產回收再製品 e 的不良率
- W_p 產品 p 重要性之權重值
- W_e 回收再製品 e 重要性之權重值
- B_{np} 組成單位產品 p 所需新物料 n 單位數量

RM_{rp} 產品 p 從客戶端回購後分解成回收物料 $r(r \in r1)$ 供製造工廠再製之比例

RE_{rp} 產品 p 從客戶端回購後分解成回收物料 $r(r \in r2)$ 製造回收再製品之比例

RO_{rp} 產品 p 從客戶端回購後分解成回收物料 $r(r \in r3)$ 需棄置處理之比例

W_f 目標函數 f 之權重值

決策變數：

QN_{nspm} 由供應商 s 提供新物料 n 至製造工廠 m 生產產品 p 的數量

QM_{pmc} 由製造工廠 m 生產產品 p 提供客戶 c 的數量

QL_{plc} 由客戶 c 提供產品 p 至回收再利用生產中心 l 的數量

QR_{rlmp} 由回收再利用生產中心 l 配送回收物料 $r(r \in r1)$ 至製造工廠 m 生產產品 p 的數量

QE_{relt} 由回收再利用生產中心 l 將回收物料 $r(r \in r2)$ 製造回收再製品 e 至其他市場客戶 t 的數量

QO_{rlo} 由回收再利用生產中心 l 清運回收物料 $r(r \in r3)$ 至棄置中心 o 的數量

IM_m 二元變數，表示製造工廠 m 開設與否

IL_l 二元變數，表示回收再利用生產中心 l 開設與否

IO_o 二元變數，表示棄置中心 o 開設與否

QI_{pm} 產品 p 放置於製造工廠 m 的期末存貨數量

QI_{el} 回收再利用產品 e 放置於回收再利用生產中心 l 的期末存貨數量

QU_{pc} 產品 p 提供給客戶 c 的缺貨數量

QU_{et} 回收再利用產品 e 提供給其他市場客戶 t 的缺貨數量

情境變數：

SP_i 各情境 i 發生機率

λ 方法穩健性權重值

ω 模式穩健性權重值，即不可行解的權重值

θ_{1i} 第 1 目標函數情境 i 之線性化變數

θ_{2i} 第 2 目標函數情境 i 之線性化變數

θ_{3i} 第 3 目標函數情境 i 之線性化變數

在本研究數量模式架構下，包含有經濟目標、環境目標與品質目標等 3 個目標函數，並尋求採購、製造、回收、處理、棄置等相關流程之最佳資源配置決策。在環境目標函數的模式建構方面，本研究參考 Amin and Zhang(2013b)閉迴路供應鏈網路模式中，所提出之兩個重要環境參數—友善物料使用與清潔科技使用，作為環境目標函數建構之基礎，建立清潔生產最佳化之目標函數模式。在品質目標函數的模式建構方面，本研究參考 Ramezani, Bashiri, and Tavakkoli-Moghaddam(2013)以原物料不良率作為供應鏈品質好壞判斷依據，配合本研究需求，係以新產品不良率和回收再製品不良率，建立供應鏈品質最佳化之目標函數模式。

目標函數：

$$\begin{aligned} \text{Max ob1} = & \text{Revenue} - \text{Purchase Cost} - \text{Processing Cost} - \text{Transportation Cost} - \\ & \text{Disposal Cost} - \text{Inventory Cost} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Revenue} = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C QM_{pmc} \times P_{pc} + \sum_{r \in R2} \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T QE_{relt} \times P_{et} \quad (16)$$

$$\text{Purchase Cost} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P SC_{sn} \times QN_{nspm} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L CC_{cp} \times QL_{plc} \quad (17)$$

$$\text{Processing Cost} = \sum_{m=1}^M FC_m \times IM_m + \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M PC_{mp} \times QM_{pmc} + \sum_{l=1}^L FC_l \times IL_l + \sum_{r \in r2} \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L RC_{le} \times QE_{relt} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Transportation Cost} = & \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C TC_{pmc} \times QM_{pmc} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{r \in r1} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M TC_{prlm} \times QR_{rlmp} + \\ & \sum_{r \in r2} \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T TC_{elt} \times QE_{relt} + \sum_{r \in r3} \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O TC_{rlo} \times \\ & QO_{rlo} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Disposal cost} = \sum_{o=1}^O FC_o \times IO_o + \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O DC_o \times QO_{rlo} \quad (20)$$

$$\text{Inventory cost} = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M IC_{pm} \times QI_{pm} + \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L IC_{el} \times QI_{el} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{Max ob2} = & \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C EM_{pm} \times QM_{pmc} + \sum_{r \in r2} \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T EM_{le} \times \\ & QE_{relt} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C CT_{mp} \times QM_{pmc} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C CT_{pmc} \times QM_{pmc} + \\ & \sum_{r \in r2} \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CT_{le} \times QE_{relt} + \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CT_{elt} \times QE_{relt} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M CT_{prlm} \times QR_{rlmp} + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O CT_{rlo} \times QO_{rlo} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{Min ob3} = & \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C DR_{pm} \times W_p \times QM_{mpc} + \sum_{r \in r2} \sum_{e=1}^E \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T DR_{le} \times \\ & W_e \times QE_{relt} \end{aligned} \quad (23)$$

目標函數公式說明：

公式 15：目標函數 1 為計算整體利潤，係由總營收減去採購成本、製造處理成本、配送成本、棄置成本、存貨成本等。

公式 16：總營收包含新產品販售營收、回收再製品販售營收等。新產品販售營收為新產品販售單價乘上新產品客戶需求數量；回收再製品販售營收為回收再製品販售單價乘上回收再製品其他市場客戶需求數量。

公式 17：採購成本包含新產品所需原物料的採購成本和由客戶端回收產品的收購成本。新產品所需原物料採購成本為各原物料單位成本乘上新產品所需各原物料數量；回收產品所需收購成本為各產品單位收購成本乘上各產品回收數量。

公式 18：製造處理成本包含製造工廠固定成本、新產品生產成本、回收再利用生產中心固定成本、回收再製品生產成本。新產品生產成本為新產品單位生產成本乘上新產品需求數量；回收再製品生產成本為回收再製品單位生產成本乘上回收再製品需求數量。

公式 19：運輸成本包含新產品由製造工廠送至客戶的配送數量乘上其單位配送成本、回收物料由回收再利用生產中心配送至製造工廠的數量乘上其單位配送成本、回收再製品由回收再利用生產中心配送至其他市場客戶的數量乘上其單位配送成本、回收物料由回收再利用生產中心清運至棄置中心數量乘上其單位清運成本。

公式 20：棄置成本包含棄置中心固定成本、回收物料由回收再利用生產中心清運至棄置中心數量乘上其單位棄置成本。

公式 21：存貨成本包含產品放置於製造工廠的存貨成本、回收再製品放置於回收再利用生產中心的存貨成本。

公式 22：目標函數 2 為計算清潔生產情形，包含使用友善物料數量及使用清潔科技數量。使用友善物料數量為新產品生產數量及回收再製品生產數量各自乘上其使用友善物料比例；使用清潔科技數量為新產品生產數量、新產品配送數量、回收物料清運至棄置中心數量、回收再製品生產數量、回收再製品配送數量、回收物料配送回製造工廠數量等乘上其各自使用清潔科技比例。

公式 23：目標函數 3 為計算產品品質情形，包含新產品生產數量乘上各自產品權重與產品不良率，回收再製品生產數量乘上回收再製品權重與回收再製品不良率。

限制式：

$$\sum_{m=1}^M QM_{pmc} + II_{pm} - QI_{pm} = DP_{cp} \quad \forall c, p \quad (24)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L QE_{relt} + II_{el} - QI_{el} = DE_{et} \quad \forall t, e \quad (25)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M QN_{nspm} \leq CS_{sn} \quad \forall n, s \quad (26)$$

$$\sum_{c=1}^C QM_{pmc} \leq IM_m \times CP_{pm} \quad \forall p, m \quad (27)$$

$$\sum_{c=1}^C QL_{plc} \leq IL_l \times CM_{lp} \quad \forall l, p \quad (28)$$

$$\sum_{l=1}^L QO_{rlo} \leq IO_o \times CO_{or} \quad \forall o, r \in r3 \quad (29)$$

$$\sum_{r \in r2} \sum_{t=1}^T QE_{relt} \leq IL_l \times CE_{le} \quad \forall l, e \quad (30)$$

$$\sum_{l=1}^L QL_{plc} \leq (\sum_{m=1}^M QM_{pmc} + II_{pm} - QI_{pm}) \times RA_p \quad \forall p, c \quad (31)$$

$$\sum_{m=1}^M QR_{rlmp} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RM_{rp} \quad \forall p, l, r \in r1 \quad (32)$$

$$\sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T QE_{relt} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RE_{rp} \quad \forall p, l, r \in r2 \quad (33)$$

$$\sum_{o=1}^O QO_{rlo} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RO_{rp} \quad \forall p, l, r \in r3 \quad (34)$$

$$\sum_{s=1}^S QN_{nspm} \geq \sum_{c=1}^C QM_{pmc} \times B_{np} \quad \forall p, n, m \quad (35)$$

$$QI_{pm} \leq IM_{pm} \quad \forall p, m \quad (36)$$

$$QI_{el} \leq IM_{el} \quad \forall e, l \quad (37)$$

$$QN_{nspm}, QM_{pmc}, QL_{plc}, QR_{rlmp}, QE_{relt}, QO_{rlo},$$

$$QU_{pc}, QU_{et}, QI_{pm}, QI_{el}, \theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i} \geq 0 \quad \forall r, s, p, c, m, o, l, n, t, e \quad (38)$$

$$IM_m, IL_l, IO_o \in \{0,1\} \quad \forall m, o, l \quad (39)$$

限制式公式說明：

公式 24：製造工廠生產新產品數量加上期初存貨數量減去期末存貨數量等於客戶新產品需求量。

公式 25：回收再利用生產中心生產回收再製品數量加上期初存貨數量減去期末存貨數量等於其他市場客戶的回收再製品需求量。

公式 26：供應商提供某物料的數量小於等於該供應商提供該物料的最大供給量限制。

公式 27：製造工廠生產某新產品的數量小於等於該製造工廠生產該產品的最大產能限制。

公式 28：回收再利用生產中心回收某產品的數量小於等於該回收再利用生產中心回收該產品的最大容量限制。

公式 29：棄置中心處理某回收物料的棄置數量小於等於該棄置中心棄置該回收物料的最大產能限制。

公式 30：回收再利用生產中心生產回收再製品的數量小於等於該回收再利用生產中心生產該回收再製品的最大產能限制。

公式 31：由客戶收購產品至回收再利用生產中心的數量小於等於該產品生產數量加上期初存貨數量減去期末存貨數量，再乘上該產品回收比例。

公式 32：該回收物料提供給製造工廠的數量等於回收產品由回收再利用生產中心依分解比例分解出供製造工廠使用的回收物料數量。

公式 33：該回收再製品提供給其他市場客戶的數量等於回收產品由回收再利用生產中心依分解比例分解出供再製成回收再製品的回收物料數量。

公式 34：該回收物料清運至棄置中心的數量等於回收產品由回收再利用生產中心依分解比例分解出需棄置的回收物料數量。

公式 35：由供應商提供生產某新產品所需物料至製造工廠的數量大於等於製造工廠生產該新產品所使用該物料的數量。

公式 36：產品 p 放置於製造工廠 m 的期末存貨數量小於等於產品 p 放置於製造工廠 m 的存貨數量限制。

公式 37：回收再製品放置於回收再利用生產中心 l 的期末存貨數量小於等於回收再製品 e 放置於回收再利用生產中心 l 的存貨數量限制。

公式 38：為非負數限制式。

公式 39：設定為二元變數。

第三節 穩健最佳化模式建構與說明

本研究參採 Mulvey et al. (1995) 所提出的穩健最佳化模式架構，以及 Yu and Li (2000) 所提出的模式呈現形式，將本研究的三個目標函數轉換為穩健最佳化模式的呈現方式，如公式 40-42。

$$\text{Max ob1} = \sum_{i=1}^I SP_i F_{1i} - \lambda \sum_{i=1}^I SP_i [(F_{1i} - \sum_{i'=1}^I SP_{i'} F_{1i'}) + 2\theta_{1i}] - \omega \sum_{i=1}^I SP_i (QU_{pc} + QU_{et}) \quad (40)$$

$$\text{Max ob2} = \sum_{i=1}^I SP_i F_{2i} - \lambda \sum_{i=1}^I SP_i [(F_{2i} - \sum_{i'=1}^I SP_{i'} F_{2i'}) + 2\theta_{2i}] - \omega \sum_{i=1}^I SP_i (QU_{pc} + QU_{et}) \quad (41)$$

$$\text{Min ob3} = \sum_{i=1}^I SP_i F_{3i} + \lambda \sum_{i=1}^I SP_i [(F_{3i} - \sum_{i'=1}^I SP_{i'} F_{3i'}) + 2\theta_{3i}] + \omega \sum_{i=1}^I SP_i (QU_{pc} + QU_{et}) \quad (42)$$

以 F_{1i} 代表第 i 個情境下的第一個目標函數，以 F_{2i} 代表第 i 個情境下的第二個目標函數，以 F_{3i} 代表第 i 個情境下的第三個目標函數，公式 43-45 為 linearization 限制式，需配合加入穩健最佳化模式中。

$$F_{1i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{1i} + \theta_{1i} \geq 0 \quad \forall i \quad (43)$$

$$F_{2i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{2i} + \theta_{2i} \geq 0 \quad \forall i \quad (44)$$

$$F_{3i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{3i} + \theta_{3i} \geq 0 \quad \forall i \quad (45)$$

需求相關的限制式如公式 24、25，在穩健最佳化模式中，改由公式 46、47 取代之。

$$\sum_{m=1}^M QM_{pmc} + II_{pm} - QI_{pm} = DP_{cp} - QU_{pc} \quad \forall c, p \quad (46)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L QE_{relt} + II_{el} - QI_{el} = DE_{et} - QU_{et} \quad \forall t, e \quad (47)$$

其他限制式如公式 26-39，維持不變併入穩健最佳化模式中。經由上述的轉換過程，即完成穩健最佳化模式的建構，完整限制式說明如下：

$$F_{1i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{1i} + \theta_{1i} \geq 0 \quad \forall i \quad (48)$$

$$F_{2i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{2i} + \theta_{2i} \geq 0 \quad \forall i \quad (49)$$

$$F_{3i} - \sum_{i=1}^I SP_i F_{3i} + \theta_{3i} \geq 0 \quad \forall i \quad (50)$$

$$\sum_{m=1}^M QM_{pmc} + II_{pm} - QI_{pm} = DP_{cp} - QU_{pc} \quad \forall c, p \quad (51)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L QE_{relt} + II_{el} - QI_{el} = DE_{et} - QU_{et} \quad \forall t, e \quad (52)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M QN_{nspm} \leq CS_{sn} \quad \forall n, s \quad (53)$$

$$\sum_{c=1}^C QM_{pmc} \leq IM_m \times CP_{pm} \quad \forall p, m \quad (54)$$

$$\sum_{c=1}^C QL_{plc} \leq IL_l \times CM_{lp} \quad \forall l, p \quad (55)$$

$$\sum_{l=1}^L QO_{rlo} \leq IO_o \times CO_{or} \quad \forall o, r \in r3 \quad (56)$$

$$\sum_{r \in r2} \sum_{t=1}^T QE_{relt} \leq IL_l \times CE_{le} \quad \forall l, e \quad (57)$$

$$\sum_{l=1}^L QL_{plc} \leq (\sum_{m=1}^M QM_{pmc} + II_{pm} - QI_{pm}) \times RA_p \quad \forall p, c \quad (58)$$

$$\sum_{m=1}^M QR_{rlmp} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RM_{rp} \quad \forall p, l, r \in r1 \quad (59)$$

$$\sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T QE_{relt} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RE_{rp} \quad \forall p, l, r \in r2 \quad (60)$$

$$\sum_{o=1}^O QO_{rlo} = \sum_{c=1}^C QL_{plc} \times RO_{rp} \quad \forall p, l, r \in r3 \quad (61)$$

$$\sum_{s=1}^S QN_{nspm} \geq \sum_{c=1}^C QM_{pmc} \times B_{np} \quad \forall p, n, m \quad (62)$$

$$QI_{pm} \leq IM_{pm} \quad \forall p, m \quad (63)$$

$$QI_{el} \leq IM_{el} \quad \forall e, l \quad (64)$$

$$QN_{nspm}, QM_{pmc}, QL_{plc}, QR_{rlmp}, QE_{relt}, QO_{rlo},$$

$$QU_{pc}, QU_{ct}, QI_{pm}, QI_{el}, \theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i} \geq 0 \quad \forall r, s, p, c, m, o, l, n, t, e \quad (65)$$

$$IM_m, IL_l, IO_o \in \{0, 1\} \quad \forall m, o, l \quad (66)$$

第四節 多目標函數轉換單一目標模式建構與說明

針對本研究所提出之多目標混合整數線性規劃模式，需要將多目標模式轉換為單一目標模式，以利後續求解程序。在轉換為單一目標模式前，需要先進行多目標函數權重設定，本研究運用 AHP 方法求得各別目標函數的權重值，再採用 LP-metrics 方法，將多目標函數轉換單一目標函數。

一、運用 AHP 方法，求得各別目標函數之權重值

本研究運用 AHP 方法，求得各別目標函數之權重值。AHP 方法係透過專家問卷調查方法，針對評估因素之重要性進行兩兩比較，再將回收資料進行統計與檢定，進而得出各項評估因素之權重值，主要執行步驟說明如下：

1. 建立比較矩陣

根據問卷調查的結果，將各項評估因素之評比分數，分為 1-9 等級，經對應後以幾何平均法計算出各項評估因素之分數，並建立比較矩陣，如公式 67 所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{ji} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (67)$$

2. 計算特徵向量與特徵值

依據上述各項評估因素分數，以矩陣列向量幾何平均值標準化方法 (Normalization of the Geometric Mean of the Rows, NGM)，計算各項評估因素之特徵向量(W_i)，如公式 68，亦為各項評估因素之權重值； n 為評估因素個數。特徵值的計算上，先以成對比較矩陣 A 與特徵向量 W_i 相乘得出 W_i' ，再依公式 69，計算出特徵值 λ_{\max} 。

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n [(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}]} \quad (68)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \cdots + \frac{w'_n}{w_n} \right) \quad (69)$$

3. 一致性檢定

一致性檢定主要係以一致性指標 (Consistence Index, C.I.) 與一致性比率 (Consistence Ratio, C.R.) 來評估實際結果的一致性程度高低，其計算公式如 70-71， $CI \leq 0.1$ 、 $CR \leq 0.1$ ，表示其一致性是在可接受範圍內。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (70)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (71)$$

表 3 R.I 值表

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| R.I. | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.48 | 1.56 | 1.57 |

二、採用 LP-metrics 方法，將多目標函數轉換單一目標函數

在多目標函數轉換單一目標函數的求解程序方面，本研究採用 LP-metrics 方法，首先會先針對各別目標函數尋求最佳解，在各別目標函數單獨執行後，可得到三個目標函數的最佳解，ob1 為經濟目標函數利潤最大化之最佳解，ob2 為環境目標函數清潔生產最佳化之最佳解，ob3 為品質目標函數供應鏈品質最佳化之最佳解。再設定三個目標函數的穩健最佳解分別為 ob1*、ob2*、ob3*，三個目標函數的權重值為 W₁、W₂、W₃，LP-metrics 方法將多目標函數轉換為單一目標函數的模式如公式 72 所示。

$$\text{Min } W_1 \times \frac{(ob1-ob1^*)}{ob1^*} + W_2 \times \frac{(ob2-ob2^*)}{ob2^*} + W_3 \times \frac{(ob3-ob3^*)}{ob3^*} \quad (72)$$

將上述各別單獨執行的目標函數最佳解以及由 AHP 方法求得的權重值帶入公式 72，依此目標函數再次執行，即可求得各目標函數的穩健最佳解，亦可求得各項資源配置的近似最佳解。

第四章 案例分析與模式計算

因應環境保護、循環經濟等議題的持續升溫，企業於供應鏈管理有效運用再生資源、節能科技，更是近幾年企業經營關切之重要課題。本研究期望透過綠色閉迴路供應鏈最佳決策模式的建立，同時考量經濟、環境、品質等決策目標，提供企業在尋求資源配置最佳化之參考。

在確認本研究範疇、數學模式建立之前，先針對閉迴路供應鏈、綠色供應鏈、多目標決策、不確定性因素解決方案等領域相關文獻，進行探討與分析，根據研究軌跡找出研究缺口，以及適當的研究範圍與方法。針對本研究問題，以多目標混合整數規劃方法，先建立確定性的線性數量模式，再轉換成穩健最佳化的數量模式，並以 LP-metrics 方法求解多目標問題。

為了評估本研究數量模式的可行性，將以實際案例資料，進行後續的應用研究分析。本研究係以國內一家製造業者為例，透過廠商個案訪談，了解該廠商閉迴路供應鏈整體運作架構與流程，包含從供應商物料供給、製造工廠產品生產、產品配送至客戶、由客戶回收產品至回收再利用中心、回收產品的處理再利用；部分回收物料流回製造工廠生產新產品；部分回收物料製造成回收再製品銷售至其他市場客戶；部分回收物料則清運至棄置中心進行棄置處理。

再藉由問卷調查方式，取得相關參數資料如單位物料採購成本、單位生產成本、單位配送成本、單位清運成本、產能限制、產品單價等。另以 AHP 方法，透過問卷調查與統計，取得各別目標函數的權重值，以利後續運用 LP-metrics 方法，將多目標函數轉換為單一目標函數時，各目標函數權重值的設定。

在完成參數資料收集之後，以 Lingo 軟體進行模式的運算與執行，應用案例分析執行流程如圖 11 所示。於本章第二節中，針對多目標函數權重與環境目標函數權重計算進行說明；於第三節中，針對確定性最佳化模式之敏感度分析進行說明；

於第四節中，針對考量不確定性之穩健最佳化模式執行操作進行說明；於第五節中，針對清潔科技使用與生產成本對目標函數影響分析進行說明；於第六節中，針對不可行性權重與模式穩健性之分析進行說明。

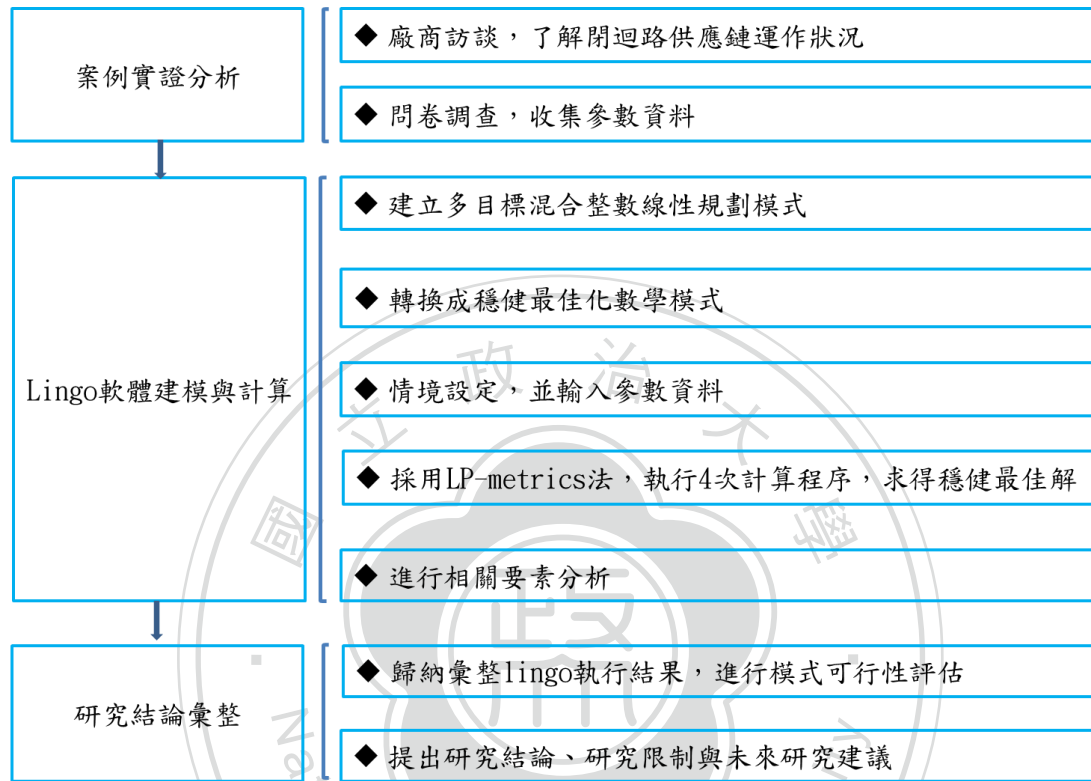


圖 11 案例分析執行流程

第一節 應用案例說明

為了驗證本研究所提出閉迴路綠色供應鏈多目標資源分配決策最佳化模式的可行性，本研究以國內一家製造業廠商為應用案例，依據該廠商閉迴路供應鏈運作架構與流程，建立本研究數量模式驗證之相關參數。此供應鏈網路架構中包含有 4 個供應商、5 種新物料、2 個產品、2 個製造工廠、5 個新產品客戶、2 個回收再利用生產中心、3 種回收物料(供製造工廠生產新產品、製成回收再製品提供其他市場客戶、清運至棄置中心處理)、2 個回收再製品、5 個其他市場客戶、1 個棄置中心等(如圖 12 所示)，並僅考量單一時期下，進行參數設定、數量模式計算執行。經過個

案訪談與問卷資料收集，配合該廠商經營資料之機密性以及模式驗證所需，廠商所提供的資料會經由調修後再作呈現。

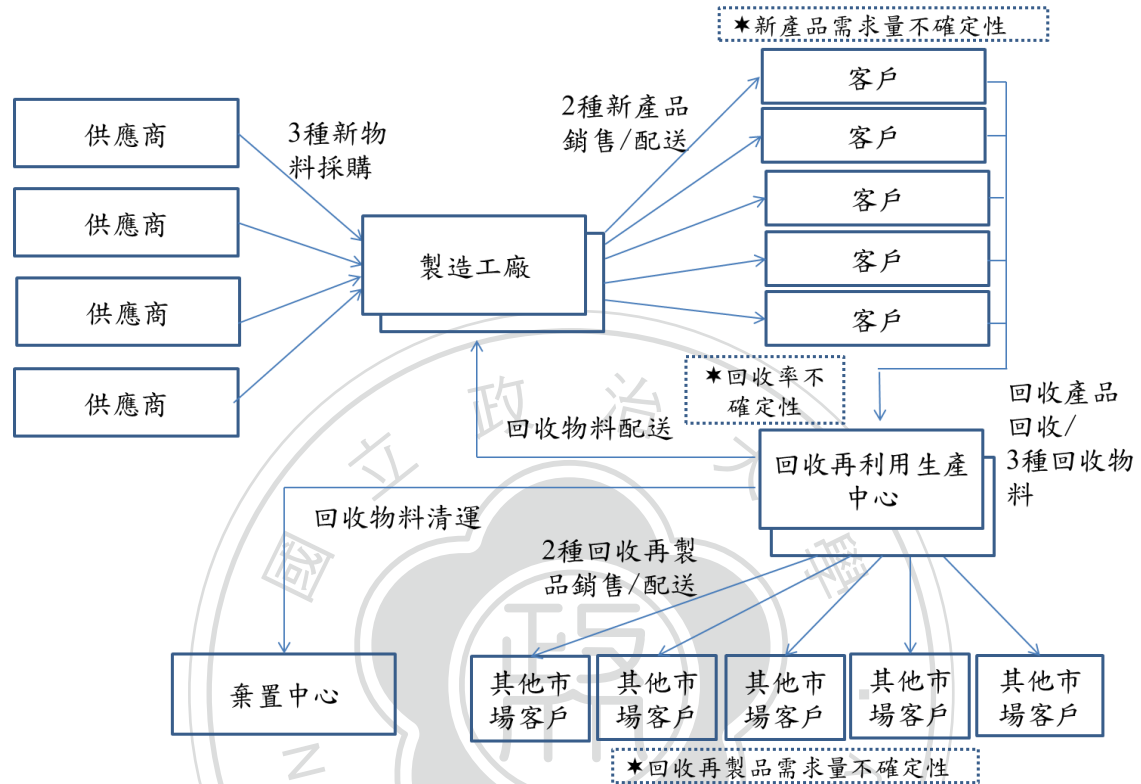


圖 12 應用案例之供應鏈網路架構圖

該廠商閉迴路供應鏈核心活動與流程說明如下：向供應商採購新物料，送至製造工廠生產新產品，新產品之物料來源除了新物料，亦包含回收物料。新產品由製造工廠銷售至客戶端，再從客戶端收購回收產品送至回收再利用生產中心。由回收再利用生產中心將回收產品經過處理後，產生回收物料，部分回收物料流回製造工廠生產新產品；部分回收物料製造成回收再製品，銷售至其他市場客戶；部分回收物料則清運至棄置中心進行棄置處理。

本研究以問卷調查與實際訪談等方式，收集執行數量模式所需之供應商、物料、製造工廠、新產品、回收再利用生產中心、回收再製品、回收物料、棄置中心等相關參數資料，如採購成本、生產成本、回收成本、配送成本、棄置成本、清運成本、

固定成本、存貨成本、產能限制、友善物料使用比例、清潔科技使用比例、需求量、單位售價、不良率等(如表 4-16 所示)。

(1) 供應商與物料參數資料：

表 4 供應商與物料參數資料

| 物料 | 參數 | 供應商 | | | |
|----|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 單位採購成本(SC_{sn}) | 75 | 80 | - | - |
| | 產能限制(CS_{sn}) | 800 | 400 | | |
| 2 | 單位採購成本(SC_{sn}) | 65 | 70 | 75 | - |
| | 產能限制(CS_{sn}) | 400 | 400 | 200 | |
| 3 | 單位採購成本(SC_{sn}) | - | 60 | 80 | 85 |
| | 產能限制(CS_{sn}) | | 400 | 600 | 400 |
| 4 | 單位採購成本(SC_{sn}) | - | 90 | - | 85 |
| | 產能限制(CS_{sn}) | | 60 | | 60 |
| 5 | 單位採購成本(SC_{sn}) | - | - | - | 70 |
| | 產能限制(CS_{sn}) | | | | 50 |

(2) 製造工廠與產品參數資料：

表 5 製造工廠與產品參數資料

| 參數 | 工廠 | | 產品 | |
|---------------------------|-----|------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 固定成本(FC_m) | 20 | | 30 | |
| 單位生產成本(PC_{mp}) | 80 | 40 | 85 | 35 |
| 產能限制(CP_{pm}) | 800 | 1000 | 600 | 800 |
| 友善物料使用比例 (EM_{pm}) | 0.2 | 0.9 | 0.2 | 0.9 |
| 清潔科技使用比例 (CT_{mp}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 不良率(DR_{pm}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 期初庫存量(II_{pm}) | 300 | 300 | 500 | 500 |
| 單位存貨成本(IC_{pm}) | 5 | 10 | 10 | 5 |
| 存貨數量限制(IM_{pm}) | 30 | 30 | 50 | 50 |

(3)回收再利用生產中心與回收再製品參數資料：

表 6 回收再利用生產中心與回收再製品參數資料

| 參數 | 回收中心 | 回收再製品 | | 回收中心 | 回收再製品 | |
|---------------------------|------|-------|-----|------|-------|-----|
| | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 固定成本(FC_{le}) | 20 | | | 10 | | |
| 單位生產成本(RC_{le}) | | 80 | 45 | | 60 | 35 |
| 產能限制(CE_{le}) | | 500 | 300 | | 500 | 300 |
| 友善物料使用比例 (EM_{le}) | | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| 清潔科技使用比例 (CT_{le}) | | 0.1 | 0.1 | | 0.1 | 0.1 |
| 不良率(DR_{le}) | | 0.1 | 0.1 | | 0.1 | 0.1 |
| 期初庫存量(II_{le}) | | 300 | 250 | | 300 | 350 |
| 單位存貨成本(IC_{le}) | | 20 | 20 | | 20 | 20 |
| 存貨數量限制(IM_{le}) | | 10 | 10 | | 30 | 30 |
| | | 新產品 | | | 新產品 | |
| | | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 產能限制(CM_{lp}) | | 600 | 700 | | 600 | 700 |

(4)新產品與客戶參數資料：

表 7 新產品與客戶參數資料

| 新產品 | 參數 | 客戶 | | | | |
|-----|--------------------------|----|----|----|----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 單位售價(P_{pc}) | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| | 單位回收成本 (CC_{cpr}) | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| 2 | 單位售價(P_{pc}) | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| | 單位回收成本 (CC_{cpr}) | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |

(5)回收再製品與其他市場客戶參數資料：

表 8 回收再製品與其他市場客戶參數資料

| 回收再製品 | 參數 | 其他市場客戶 | | | | |
|-------|------------------|--------|-----|-----|----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 需求量(DE_{et}) | 55 | 55 | 110 | 66 | 110 |
| 2 | 需求量(DE_{et}) | 154 | 110 | 55 | 55 | 154 |

(6)新產品由工廠配送至客戶參數資料：

表 9 新產品由工廠配送至客戶參數資料

| 工廠 1 參數 | | 客戶 | | | | |
|---------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 新產品 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{pmc}) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{pmc}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{pmc}) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{pmc}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 工廠 2 參數 | | 客戶 | | | | |
| 新產品 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{pmc}) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{pmc}) | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{pmc}) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{pmc}) | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

(7)回收再利用生產中心將回收物料配送至製造工廠參數資料：

表 10 回收再利用生產中心將回收物料配送至製造工廠參數資料

| 回收中心 1/ 回收物料 | 參數 | 工廠 1 | 工廠 2 |
|-----------------|-------------------------|------|------|
| 1 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 25 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 25 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.1 | 0.1 |
| 3 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 25 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.1 | 0.1 |
| 回收中心 2/ 回收物料 | 參數 | 工廠 1 | 工廠 2 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 30 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.2 | 0.2 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 30 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.1 | 0.1 |
| 3 | 單位配送成本(TC_{prlm}) | 30 | 30 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{prlm}) | 0.1 | 0.1 |

(8)回收再利用生產中心將回收物料清運至棄置中心參數資料：

表 11 回收再利用生產中心將回收物料清運至棄置中心參數資料

| 回收中心 1 | 參數 | 棄置中心 |
|--------|------------------------|------|
| 回收物料 | | 1 |
| 1 | 單位清運成本(TC_{rlo}) | 10 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{rlo}) | 0.1 |
| 回收中心 2 | 參數 | |
| 回收物料 | | 1 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{rlo}) | 12 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{rlo}) | 0.1 |

(9)回收再利用生產中心配送回收再製品至其他市場客戶參數資料：

表 12 回收再利用生產中心配送回收再製品至其他市場客戶參數資料

| 回收中心 1 | 參數 | 其他市場客戶 | | | | |
|--------|------------------------|--------|-----|-----|-----|-----|
| 回收再製品 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{elt}) | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{elt}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{elt}) | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{elt}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 回收中心 2 | 參數 | 其他市場客戶 | | | | |
| 回收再製品 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 單位配送成本(TC_{elt}) | 20 | 20 | 15 | 20 | 20 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{elt}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 單位配送成本(TC_{elt}) | 10 | 20 | 10 | 15 | 15 |
| | 清潔科技使用比例(CT_{elt}) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

(10)棄置中心與回收物料參數資料：

表 13 棄置中心與回收物料參數資料

| 參數 | 棄置中心 | | 回收物料 | |
|--------------------|------|--|------|--|
| | 1 | | 1 | |
| 固定成本(FC_o) | 10 | | | |
| 單位棄置成本(DC_o) | | | 10 | |
| 產能限制(CO_{opr}) | | | 1000 | |

(11)單位產品與物料組成比例參數資料：

表 14 單位產品與物料組成比例參數資料

| 新產品 | 新物料組成比例(B_{np}) | | | | |
|-----|---------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 0.8 | 0.05 | 0.08 | 0.02 | - |
| 2 | - | 0.45 | 0.03 | - | 0.02 |

(12)回收產品與回收物料拆解比例參數資料：

表 15 回收產品與回收物料拆解比例參數資料

| 回收產品 | 回收物料比例(RM_{rp}) | | | 回收物料比例(RE_p) | | 回收物料比例(RO_{rp}) |
|------|---------------------|------|------|------------------|-----|---------------------|
| | R11 | R21 | R22 | R12 | R23 | R13 |
| 1 | 0.1 | - | - | 0.4 | - | 0.5 |
| 2 | - | 0.55 | 0.05 | - | 0.4 | - |

(13)新產品與回收再製品權重參數資料：

表 16 新產品與回收再製品權重參數資料

| 新產品 | 權重(W_p) | 回收再製品 | 權重(W_e) |
|-----|-------------|-------|-------------|
| 1 | 0.3 | 1 | 0.3 |
| 2 | 0.2 | 2 | 0.2 |

第二節 多目標函數權重與環境目標函數項目權重計算

為了取得各個目標函數的權重值與環境目標函數項目的權重值，本研究以 AHP 方法，進行問卷調查與統計，問卷對象為該領域產學研專家，總計回收 29 份問卷，再將回收資料進行統計分析處理，並經一致性檢定後，最終取得各個目標函數與環境目標函數項目的權重值。說明如下：

一、各個目標函數權重值

本研究以 AHP 方法，依循下列三個步驟：建立比較矩陣、計算特徵向量與特徵值、一致性檢定，計算出經濟目標函數、環境目標函數、品質目標函數等各個目標函數權重值，彙整相關數據如表 17。

1. 建立比較矩陣

根據問卷調查結果，將經濟、環境、品質目標之評比分數分為 1-9 等級，經對應後以幾何平均法計算出各項評估目標之分數，建立比較矩陣，如下所示。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{經濟} & \text{環境} & \text{品質} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{經濟} \\ \text{環境} \\ \text{品質} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1.18 & 1.05 \\ 0.85 & 1 & 1.50 \\ 0.95 & 0.67 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. 計算特徵向量與特徵值

依據上述經濟、環境、品質等評估目標分數，以矩陣列向量幾何平均值標準化的 NGM 法，計算各項評估目標之特徵向量(W_i)，亦即為各項評估目標之權重值。特徵值的計算上，先以成對比較矩陣 A 與特徵向量 W_i 相乘得出 W_i' ，再計算出特徵值 λ_{\max} 。

經濟目標權重值($W_{\text{經濟}}$)=

$$(1/(1+0.85+0.95)+1.18/(1.18+1+0.67)+1.05/(1.05+1.50+1))/3=0.36$$

環境目標權重值($W_{\text{環境}}$)=

$$(0.85/(1+0.85+0.95)+1/(1.18+1+0.67)+1.50/(1.05+1.50+1))/3=0.36$$

品質目標權重值($W_{\text{品質}}$)=

$$(0.95/(1+0.85+0.95)+0.67/(1.18+1+0.67)+1/(1.05+1.50+1))/3=0.28$$

$$W_{\text{經濟}}' = 1*0.36+1.18*0.36+1.05*0.28=1.08$$

$$W_{\text{環境}}' = 0.85*0.36+1*0.36+1.50*0.28=1.09$$

$$W_{\text{品質}}' = 0.95 * 0.36 + 0.67 * 0.36 + 1 * 0.28 = 0.86$$

$$\text{特徵值 } \lambda_{\max} = (1.08/0.36 + 1.09/0.36 + 0.86/0.28) / 3 = 3.03$$

3. 一致性檢定

為進行一致性檢定，先計算一致性指標(Consistence Index, C.I.)與一致性比率(Consistence Ratio, C.R.)，用以評估實際結果的一致性程度高低，計算說明如下：

$$C.I. = (3.03 - 3) / 2 = 0.015$$

$$C.R. = 0.015 / 0.58 = 0.026$$

由計算結果可看出， $C.I. = 0.015 \leq 0.1$ 、 $C.R. = 0.026 \leq 0.1$ ，表示其一致性是在可接受範圍內。

表 17 各個目標函數權重值資料

| 因素 | 經濟 | 環境 | 品質 | 權重 | 特徵值 | C.I. | C.R. |
|----|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 經濟 | 1.00 | 1.18 | 1.05 | 0.36 | 3.03 | 0.015 | 0.026 |
| 環境 | 0.85 | 1.00 | 1.50 | 0.36 | | | |
| 品質 | 0.95 | 0.67 | 1.00 | 0.28 | | | |

二、環境目標函數各項目權重值

本研究以 AHP 方法，依循下列三個步驟：建立比較矩陣、計算特徵向量與特徵值、一致性檢定，計算出環境目標函數中，清潔科技使用、友善物料使用等項目之權重值，彙整相關數據如表 18。

1. 建立比較矩陣

根據問卷調查結果，將清潔科技使用、友善物料使用之評比分數分為 1-9 等級，經對應後以幾何平均法計算出各項評估因素之分數，建立比較矩陣，如下所示。

| | |
|--|-------|
| | 清潔 友善 |
| | 科技 物料 |

$$A = \begin{matrix} \text{清潔科技} \\ \text{友善物料} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1.02 \\ 0.98 & 1 \end{bmatrix}$$

2. 計算特徵向量與特徵值

依據上述清潔科技使用、友善物料使用等評估因素分數，以矩陣列向量幾何平均值標準化的 NGM 法，計算各項評估因素之特徵向量(W_i)，亦即為各項評估因素之權重值。特徵值的計算上，先以成對比較矩陣 A 與特徵向量 W_i 相乘得出 W_i' ，再計算出特徵值 λ_{\max} 。

$$\text{清潔科技使用權重值}(W_{\text{清潔科技使用}}) = (1/(1+0.98)+1.02/(1.02+1))/2=0.5$$

$$\text{友善物料使用權重值}(W_{\text{友善物料使用}}) = (0.98/(1+0.98)+1/(1.02+1))/2=0.5$$

$$W_{\text{清潔科技使用}}' = 1*0.5+1.02*0.5=1.01$$

$$W_{\text{友善物料使用}}' = 0.98*0.5+1*0.5=0.99$$

$$\text{特徵值}\lambda_{\max} = (1.01/0.5+0.99/0.5)/2=2$$

3. 一致性檢定

為進行一致性檢定，先計算一致性指標(Consistence Index, C.I.)與一致性比率(Consistence Ratio, C.R.)，用以評估實際結果的一致性程度高低，計算說明如下：

$$C.I. = (2-2)/1=0$$

$$C.R. = 0$$

由計算結果可看出， $C.I.=0 \leq 0.1$ 、 $C.R.=0 \leq 0.1$ ，表示其一致性是在可接受範圍內。

表 18 環境目標函數各項目權重值資料

| 因素 | 清潔科技使用 | 友善物料使用 | 權重 | 特徵值 | C.I. | C.R. |
|--------|--------|--------|------|-----|------|------|
| 清潔科技使用 | 1.00 | 1.02 | 0.50 | 2 | 0 | 0 |
| 友善物料使用 | 0.98 | 1.00 | 0.50 | | | |

第三節 確定性最佳化模式之敏感度分析

本研究透過 Lingo 軟體先建立確定性之多目標混合整數線性規劃模式，彙整廠商提供資料，鍵入各項參數資料後，進行模式之計算，求出確定性模式最佳解，包含原物料訂購數量，工廠製造、配送及存放新產品數量，回收再利用中心生產及存放回收再製品數量、配送回收物料數量，回收物料棄置數量等如圖 13 所示。

輸入參數

1. 單位採購成本
2. 產能限制
3. 固定成本
4. 單位生產成本
5. 友善物料使用比例
6. 清潔科技使用比例
7. 產品不良率
8. 單位棄置成本
9. 新產品需求量
10. 新產品單位售價
11. 單位回購成本
12. 回收再製品需求量
13. 回收再製品單位售價
14. 單位配送成本
15. 單位清運成本
16. 單位產品之物料組成比例
17. 產品權重與回收比例
18. 單位存貨成本

輸出

1. 整體利潤最大化
2. 清潔生產最佳化
3. 供應鏈品質最佳化
4. 各原物料訂購數量
5. 各工廠製造/配送/存貨數量
6. 各回收再利用生產中心再製/存貨/配送/棄置數量

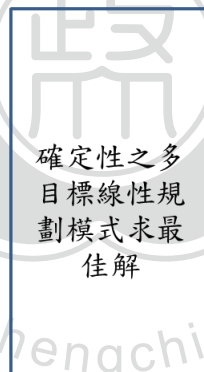


圖 13 確定性模式求解之輸入參數與輸出變數

在計算出最佳解之後，後續再進行相關參數之敏感度分析，針對幾項較為關鍵的參數改變對於決策變數的影響，進一步推算與評估，了解相關變數對目標函數的

影響程度。根據敏感度分析的結果，將敏感度較高的參數轉換為不確定性參數，以利後續設定不確定性參數之多情境組合，並建立不確定性之穩健最佳化模式與尋求穩健最佳解。

本研究針對新產品需求量、新產品生產成本、產品回收成本、回收再製品產品需求量、新物料採購成本、新產品售價、回收再製品售價、產品回收率、新產品與回收再製品不良率等 9 個參數進行敏感度分析。進行敏感度分析前，除了原本的數值之外，分別再設定加減 10% 的數值，共有 3 個情境假設，個別計算出其對應的目標函數值，再進行敏感度分析，計算出敏感度係數。各項參數之敏感度分析結果如表 19-27 所示。藉此系統性的分析程序，挑選出對本研究模式較為關鍵的參數作為不確定性參數。

表 19 新產品需求量敏感度分析資料

| | 新產品 1 需求量 | | | | | 新產品 2 需求量 | | | | | 目標函 數值 | 敏感度 係數 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | | |
| 1 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 288 | 288 | 324 | 90 | 90 | 207115 | 0.75 |
| 2 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 320 | 320 | 360 | 100 | 100 | 224482 | |
| 3 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 352 | 352 | 396 | 110 | 110 | 241835 | |

表 20 產品回收成本敏感度分析資料

| | 產品 1 回收成本 | | | | | 產品 2 回收成本 | | | | | 目標函 數值 | 敏感度 係數 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | | |
| 1 | 81 | 81 | 81 | 81 | 81 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 230508 | 0.25 |
| 2 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 224482 | |
| 3 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 218455 | |

表 21 回收再製品產品需求量敏感度分析資料

| | 回收再製品 1 需求量 | | | | | 回收再製品 2 需求量 | | | | | 目標函 數值 | 敏感 度係 數 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | | |
| 1 | 49.5 | 49.5 | 99 | 59.4 | 99 | 138.6 | 99 | 49.5 | 49.5 | 138.6 | 224076 | 0.02 |
| 2 | 55 | 55 | 110 | 66 | 110 | 154 | 110 | 55 | 55 | 154 | 224482 | |
| 3 | 60.5 | 60.5 | 121 | 72.6 | 121 | 169.4 | 121 | 60.5 | 60.5 | 169.4 | 224887 | |

表 22 新產品生產成本敏感度分析資料

| | 工廠 1 產品 1 生產成本 | 工廠 1 產品 2 生產成本 | 工廠 2 產品 1 生產成本 | 工廠 2 產品 2 生產成本 | 目標函 數值 | 敏感度 係數 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|
| 1 | 72 | 36 | 76.5 | 31.5 | 228658 | 0.17 |
| 2 | 80 | 40 | 85 | 35 | 224482 | |
| 3 | 88 | 44 | 93.5 | 38.5 | 220306 | |

表 23 新物料採購成本敏感度分析資料

| 採購 成本 | 供 應 商 1 物 料 1 | 供 應 商 1 物 料 2 | 供 應 商 2 物 料 1 | 供 應 商 2 物 料 2 | 供 應 商 2 物 料 3 | 供 應 商 2 物 料 4 | 供 應 商 3 物 料 2 | 供 應 商 3 物 料 3 | 供 應 商 3 物 料 3 | 供 應 商 4 物 料 4 | 供 應 商 4 物 料 4 | 供 應 商 4 物 料 5 | 目標函 數值 | 敏 感 度 係 數 |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------|
| | 1 | 67.5 | 58.5 | 72 | 63 | 54 | 81 | 67.5 | 72 | 76.5 | 76.5 | 63 | 228177 | 0.15 |
| 2 | 75 | 65 | 80 | 70 | 60 | 90 | 75 | 80 | 85 | 85 | 70 | 224482 | | |
| 3 | 82.5 | 71.5 | 88 | 77 | 66 | 99 | 82.5 | 88 | 93.5 | 93.5 | 77 | 220786 | | |

表 24 新產品售價敏感度分析資料

| | 新產品 1 售價 | | | | | 新產品 2 售價 | | | | | 目標函 數值 | 敏感 度係 數 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | | |
| 1 | 72 | 76.5 | 81 | 85.5 | 90 | 49.5 | 54 | 58.5 | 63 | 67.5 | 218444 | 0.25 |
| 2 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 224482 | |
| 3 | 88 | 93.5 | 99 | 104.5 | 110 | 60.5 | 66 | 71.5 | 77 | 82.5 | 230519 | |

表 25 回收再製品售價敏感度分析資料

| | 回收再製品 1 售價 | | | | | 回收再製品 2 售價 | | | | | 目標函 數值 | 敏感 度係 數 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | 客 戶 1 | 客 戶 2 | 客 戶 3 | 客 戶 4 | 客 戶 5 | | |
| 1 | 1080 | 1080 | 1170 | 1170 | 1260 | 432 | 450 | 450 | 450 | 468 | 199832 | 1.11 |
| 2 | 1200 | 1200 | 1300 | 1300 | 1400 | 480 | 500 | 500 | 500 | 520 | 224482 | |
| 3 | 1320 | 1320 | 1430 | 1430 | 1540 | 528 | 550 | 550 | 550 | 572 | 249131 | |

表 26 產品回收率敏感度分析資料

| | 產品 1 回收率 | 產品 2 回收率 | 目標函 數值 | 敏感 度係 數 |
|---|----------|----------|-----------|---------------|
| | 1 | 0.81 | 0.81 | 206190 |
| 2 | 0.9 | 0.9 | 224482 | |
| 3 | 0.99 | 0.99 | 242760 | |

表 27 新產品與回收再製品不良率敏感度分析資料

| | 新產品不良率 | 回收再製品不良率 | 目標函 數值 | 敏感 度係 數 |
|---|--------|----------|-----------|---------------|
| | 1 | 0.09 | 0.09 | 224484 |
| 2 | 0.1 | 0.1 | 224482 | |
| 3 | 0.11 | 0.11 | 224480 | |

經由上述分析結果，新產品需求量的敏感度係數為 0.75，產品回收率的敏感度係數為 0.80，回收再製品售價的敏感度係數為 1.11，這三個參數的敏感度係數較高，顯示其改變會對目標函數的改變產生較大的影響，亦即對於本研究數量模式之運算結果具有相對重要之影響性。因此，本研究挑選出新產品需求量、產品回收率、回收再製品售價等三個參數，作為不確定性參數，並分別設定不同情境數值，再據以進行後續多情境組合之設定。

第四節 考量不確定性之穩健最佳化模式計算

針對不確定性參數的處理，以穩健最佳化方法，透過不同情境之參數設定，將確定性多目標混合整數線性規劃模式，轉換成穩健最佳化數量模式，在多個情境下尋求穩健最佳解。本研究根據敏感度分析結果，針對敏感度較高的參數轉換為不確定性參數，再將不確定性參數設定為高低兩種情境，各種情境代表不確定性參數高低水準的不同組合。例如有三個不確定性參數，各不確定性參數有高低兩種情境，假設每一個情境發生機率相同，各情境設定的組合結果如表 28 所示。

表 28 情境設定表

| 情境 | 不確定性參數 1 | 不確定性參數 2 | 不確定性參數 3 | 機率 |
|----|----------|----------|----------|-------|
| 1 | 高 | 高 | 高 | 12.5% |
| 2 | 高 | 高 | 低 | 12.5% |
| 3 | 高 | 低 | 高 | 12.5% |
| 4 | 高 | 低 | 低 | 12.5% |
| 5 | 低 | 高 | 高 | 12.5% |
| 6 | 低 | 高 | 低 | 12.5% |
| 7 | 低 | 低 | 高 | 12.5% |
| 8 | 低 | 低 | 低 | 12.5% |

情境設定完成後，接著須配合情境組合，調整案例參數資料。依敏感度分析結果，將所選定的三個不確定性參數：客戶需求、回收率、回收再製品價格等，各別設定高低 2 種情境數值，如表 29-31 所示。

表 29 客戶需求高低情境數值資料

| 新產品 | 需求情境 | 客戶 | | | | |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 高 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| | 低 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| 2 | 高 | 344 | 344 | 384 | 124 | 124 |
| | 低 | 296 | 296 | 336 | 76 | 76 |

表 30 回收再製品價格高低情境數值資料

| 回收再製品 | 價格 情境 | 其他市場客戶 | | | | |
|-------|----------|--------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 高 | 1400 | 1400 | 1500 | 1500 | 1600 |
| | 低 | 1000 | 1000 | 1100 | 1100 | 1200 |
| 2 | 高 | 680 | 700 | 700 | 700 | 720 |
| | 低 | 280 | 300 | 300 | 300 | 320 |

表 31 產品回收率高低情境數值資料

| 產品 | 情境 | 產品回收率 |
|----|----|-------|
| 1 | 高 | 0.9 |
| | 低 | 0.7 |
| 2 | 高 | 0.9 |
| | 低 | 0.8 |

由於本研究為多目標混合整數線性規劃模式，在處理多目標函數轉換為單一目標函數程序上，係採用 LP-metrics 方法，先以各別單一目標函數進行求解，再將各別單一目標函數的最佳解帶入轉換後的單一目標函數中，最後以轉換後的單一目標函數，求得資源配置最佳解(如圖 14 所示)。

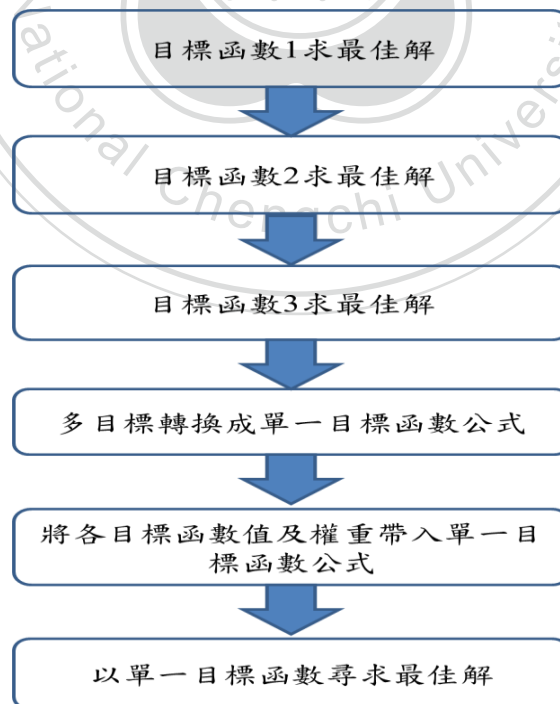


圖 14 LP-metrics 方法執行步驟

本研究透過 Lingo12.0 軟體先建立確定性之多目標混合整數線性規劃模式，依照問卷調查及訪談廠商所收集到的資料，鍵入參數資料，並將 λ 值設為 1， ω 值設為 50， $W_1, W_2,$ and W_3 權重值分別為 0.36、0.36、和 0.28，進行計算求出資源配置之最佳解，包含原物料訂購數量、新產品配送至客戶數量、產品回收數量、回收再製品配送至其他市場客戶數量、配送回收物料數量、棄置回收物料數量、新產品置於工廠存貨數量、回收再製品置於回收再利用中心存貨數量等，如表 32-39 所示。

表 32 新產品之配置情形

| 新產品 | 工廠 | 客戶 | | | | |
|-----|----|-----|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 440 | 306.6 | 248.2 | 3.7 | 1.5 |
| | 2 | 0 | 133.4 | 231.8 | 216.3 | 218.5 |

表 33 新物料之配置情形

| 新產品 | 估應商 | 新物料 | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|---|-------|-------|----|----|----|---|----|----|
| | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | | 工廠 | | 工廠 | | 工廠 | | 工廠 | | 工廠 | |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | 1 | 400 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 0 | 0 | 17.5 | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| | 3 | - | - | 7.5 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| | 4 | - | - | - | - | 0 | 0 | 10 | 0 | - | - |
| 2 | 1 | - | - | 66.7 | 333.3 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | - | - | 335.9 | 26.5 | 30 | 24 | - | - | - | - |
| | 3 | - | - | 27.4 | 0.2 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| | 4 | - | - | - | - | 0 | 0 | - | - | 20 | 16 |

表 34 回收產品之配置情形

| 回收產品 | 回收中心 | 客戶 | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 126 | 1.25 |
| | 2 | 124.8 | 124.8 | 124.8 | 0 | 124.8 |
| 2 | 1 | 100 | 101.1 | 38.6 | 50.2 | 50.2 |
| | 2 | 136.8 | 135.7 | 230.2 | 10.6 | 10.6 |

表 35 回收再製品之配置情形

| 回收再製品 | 回收中心 | 其他市場客戶 | | | | |
|-------|------|--------|------|------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 26.2 | 26.2 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 81.2 | 37.2 | 81.2 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 18.5 | 117.5 |
| | 2 | 117.5 | 73.5 | 18.5 | 0 | 0 |

表 36 工廠存放新產品之配置情形

| 新產品 | 工廠 1 | 工廠 2 |
|-----|------|------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 224 | 0 |

表 37 回收再利用中心存放回收再製品之配置情形

| 回收再製品 | 回收中心 1 | 回收中心 2 |
|-------|--------|--------|
| 1 | 11.2 | 0 |
| 2 | 3.5 | 0 |

表 38 回收物料提供至製造工廠之配置情形

| 新產品 | 回收物料 | 工廠 | | 回收中心 | | | |
|-----|------|----|---|-------|---|---|-------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | | |
| 1 | R11 | | | 13.1 | 0 | 0 | 49.9 |
| 2 | R21 | | | 187.1 | 0 | 0 | 288.1 |
| | R22 | | | 17 | 0 | 0 | 26.2 |

表 39 回收物料棄置之配置情形

| 回收物料 | 棄置中心 1 | 回收中心 1 | 回收中心 2 |
|------|--------|--------|--------|
| R13 | | 65.5 | 249.5 |

藉由穩健最佳化方法，可以將不確定性因素轉換成多種情境以利模擬真實環境的狀況，亦可運用懲罰函數將限制式之不可行解納入考量。經由一連串求解的過程，本研究整理出下列幾點發現：

- 一、經由敏感度分析結果，新產品需求量、回收產品回收率及回收再製品的銷售價格對於本研究數量模式之目標函數具有高度敏感，故可推論出此三個參數對於本研究數量模式之運算結果具有相對重要性。公司管理者在評估

綠色閉迴路供應鏈之執行績效，可多加關注新產品需求量、回收產品回收率及回收再製品的銷售價格此三個參數對整體供應鏈執行成效可能帶來的影響。

二、本研究使用 AHP 方法確認三個目標函數之權重值，分析結果可得知經濟目標函數與環境目標函數的權重值相同，皆略高於品質目標函數之權重值。由此可推論出，在閉迴路供應鏈運作模式下，環境指標受到關注的程度相當於經濟指標，亦即表示公司在考量企業經營獲利的同時，必須一併將環境影響因素納入考量，在經濟與環境因素權衡之下，才能尋求對公司最有利的決策方案。

第五節 清潔科技使用與生產成本對目標函數影響之分析

為了進一步探討清潔科技使用比例與生產成本對目標函數的影響，本研究將清潔科技使用比例分為 25%、50%、75%及 100%，再將各種清潔科技使用比例所對應的生產成本分為 2 種情境，一種情境是隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應的生產成本增加 10%，另一種情境是隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應的生產成本增加 20%。依據前述情境設定，以穩健模式計算出各目標函數值，分述如下：

情境一：隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應的生產成本增加 10%

藉由情境一的設定，新產品生產成本與回收再製品生產成本增加後的數值如表 40 所示。以清潔科技使用比例為 50%為例，新產品生產成本增加 10%，分別為 88、44、94、39，回收再製品生產成本增加 10%，分別為 88、50、66、39，經由 Lingo 軟體計算得出目標函數 1 為 138406，目標函數 2 為 279995，目標函數 3 為 11041。由圖 15 可看出清潔科技使用比例增加，對應生產成本增加 10%，對目標函數之影響。

表 40 清潔科技使用比例增加對應生產成本增加 10%之目標函數數值

| 清潔 科技 使用 比例 | 新產品生產成本 | | | | 回收再製品生產成本 | | | | 目標函 數 1 | 目標函 數 2 | 目標函 數 3 |
|----------------------|---------|----|-----|----|-----------|----|----|----|------------|------------|------------|
| | 80 | 40 | 85 | 35 | 80 | 45 | 60 | 35 | | | |
| 25% | 80 | 40 | 85 | 35 | 80 | 45 | 60 | 35 | 148235 | 232525 | 11041 |
| 50% | 88 | 44 | 94 | 39 | 88 | 50 | 66 | 39 | 138406 | 279995 | 11041 |
| 75% | 96 | 48 | 102 | 42 | 96 | 54 | 72 | 42 | 129657 | 327465 | 11041 |
| 100% | 104 | 52 | 111 | 46 | 104 | 59 | 78 | 46 | 119920 | 374935 | 11041 |

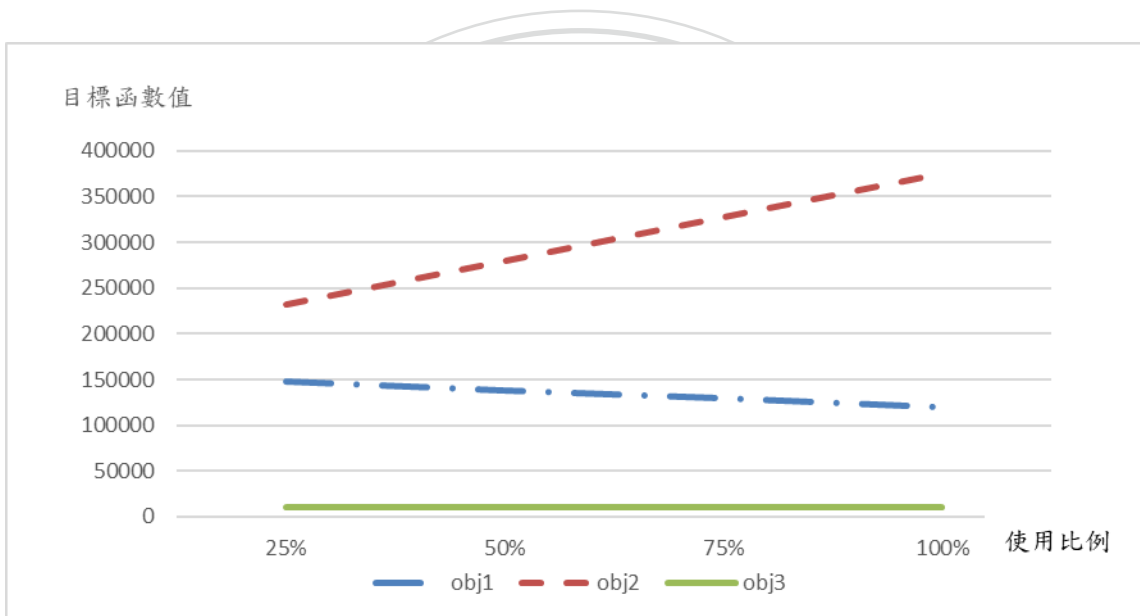


圖 15 生產成本增加 10%，清潔科技使用比例與目標函數之趨勢圖

情境二：隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應的生產成本增加 20%

藉由情境二的設定，新產品生產成本與回收再製品生產成本增加後的數值如表 41 所示。以清潔科技使用比例為 50% 為例，新產品生產成本增加 20%，分別為 96、48、102、42，回收再製品生產成本增加 20%，分別為 96、54、72、42，經由 Lingo 軟體計算得出目標函數 1 為 129657，目標函數 2 為 279995，目標函數 3 為 11041。由圖 16 可看出清潔科技使用比例增加，對應生產成本增加 20%，對目標函數之影響。

表 41 清潔科技使用比例增加對應生產成本增加 20%之目標函數數值

| 清潔科技使用比例 | 新產品生產成本 | | | | 回收再製品生產成本 | | | | 目標函數 1 | 目標函數 2 | 目標函數 3 |
|----------|---------|----|-----|----|-----------|----|----|----|--------|--------|--------|
| 25% | 80 | 40 | 85 | 35 | 80 | 45 | 60 | 35 | 148235 | 232525 | 11041 |
| 50% | 96 | 48 | 102 | 42 | 96 | 54 | 72 | 42 | 129657 | 279995 | 11041 |
| 75% | 112 | 56 | 119 | 49 | 112 | 63 | 84 | 49 | 111252 | 327465 | 11041 |
| 100% | 128 | 64 | 136 | 56 | 128 | 72 | 96 | 56 | 92888 | 374935 | 11041 |

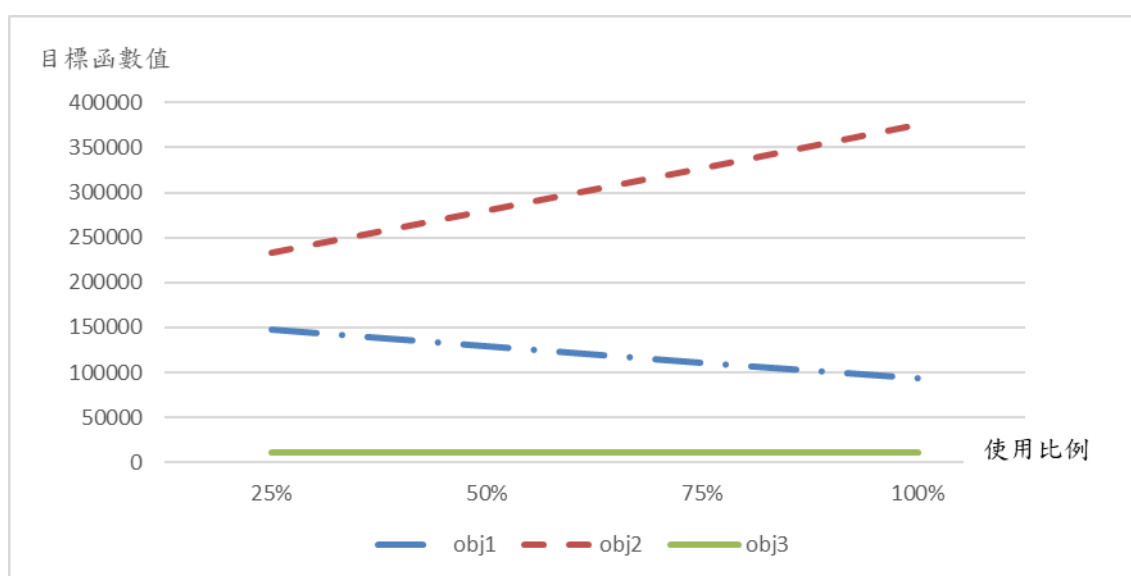


圖 16 生產成本增加 20%，清潔科技使用比例與目標函數之趨勢圖

經由上述分析結果，可看出隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應生產成本增加 10%時，目標函數 1 和目標函數 2 的數值變化並沒有差距太多，而隨著清潔科技使用比例增加 25%，所對應生產成本增加 20%時，目標函數 1 數值的變化遠大於目標函數 2 數值的變化。公司管理者在面對利潤最大化與清潔生產最佳化這兩個衝突的目標時，若清潔科技的使用所產生額外生產成本是在某個可接受的範圍，可在減少利潤的情形下，考量採用多一些的清潔生產；反之，若清潔科技使用所產生額外成本大過於可接受的範圍，則在公司維護經營利潤前提下，將無法為了清潔生產多最一些努力。

第六節 不可行性權重與模式穩健性之分析

不可行性權重值 ω 係用來代表模式的不可行性，亦即可反映出各情境中未被滿足的需求量。圖 17 呈現出不可行性權重值的改變，使新產品未滿足需求量及回收再製品未滿足需求量產生之變化。由此比較分析結果可發現，當隨著不可行性權重值 ω 由 10 增加至 40 時，新產品未滿足需求量及回收再製品未滿足需求量之總和呈現持平的狀態；當不可行性權重值 ω 增加至 50，可得出新產品與回收再製品最低的未滿足需求量，亦即再增加不可行性權重值，也不會產生更低的未滿足需求量。因此，本研究個案最適合的不可行性權重值為 50。

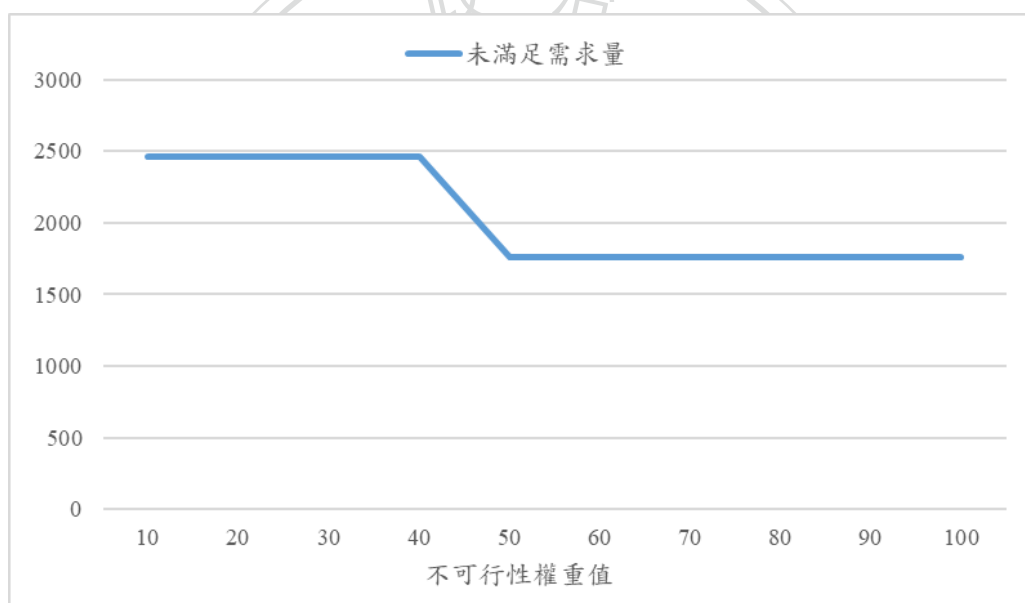


圖 17 不可行性權重與模式穩健度之比較

由圖 18 可呈現出目標函數與不可行性權重值之關聯性。當不可行性權重值增加，目標函數 1 和目標函數 2 的數值皆下降，而目標函數 3 不同於目標函數 1 和目標函數 2，其數值是起伏不定的。

目標函數 1 和目標函數 2 數值下降的百分比分別是 21%和 10%，而目標函數 3 數值增減變動的幅度達 99%。由此觀察結果可得知，目標函數 3 受到不可行性權重

值的影響較為顯著，而目標函數 1 和目標函數 2 受到不可行性權重值的影響相對較低。

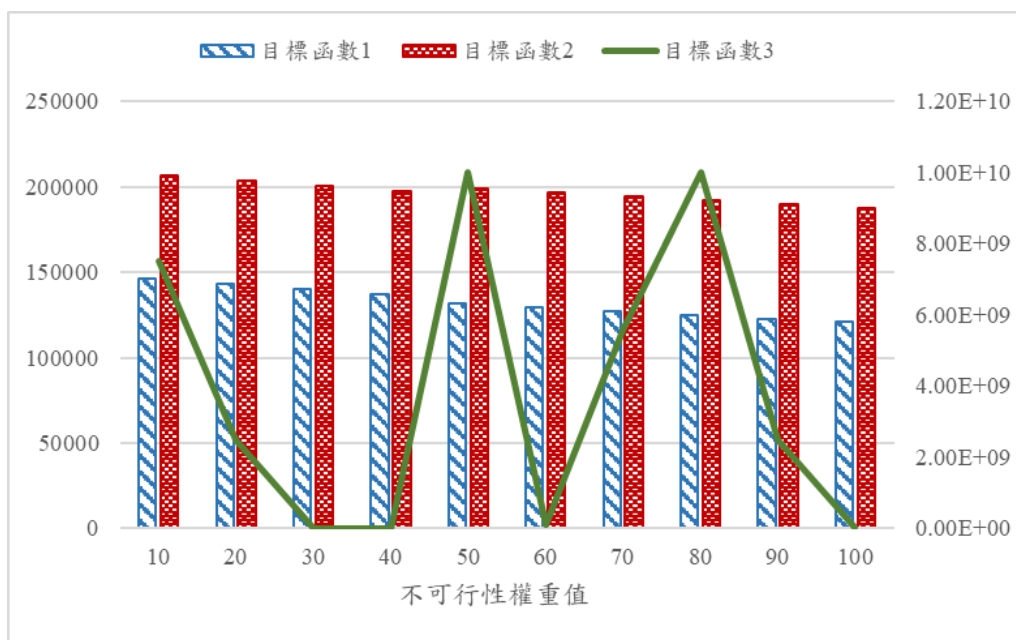


圖 18 不同不可行性權重值之目標函數數值

第五章 研究結論與建議

本研究深入探討閉迴路供應鏈與綠色、永續等環境議題之研究情形，透過文獻探討與產業需求狀況的了解，在建立量化模式上使用正確的變數與參數，且透過求解的實作演練過程，對於運用多目標函數求解方法也更加明白與熟悉。另外，本研究決策模式也將不確定性因素納入模式中考量，並採用穩健最佳化方法求解。在執行過程中，除了對於相關模式、方法的運用更加熟悉，亦對解決此類似問題與決策特性更加清楚。後續可藉此研究成果為基礎，更進一步去探討其他不同模式或方法適合的產業問題與應用領域，以解決實際問題，探究更多應用多目標決策的知識，以利產生更多實際有效的決策資訊供企業訂定決策之參考。

此外，本研究針對閉迴路供應鏈領域進行資源分配決策模式之研究，可了解同時考量正物流與逆物流供應鏈之相互影響關係，以及在建構決策最佳化所需要考量的因素，並在外在環境與經營層面的眾多因素考量下，形成最佳決策使企業經營獲得最大利益。後續研究者可進一步以特定產業個案進行模式評估，抑或可探討不同應用領域，評估本研究模式之適用性，期望本研究可做為後續研究者深入研究閉迴路供應鏈相關議題之參考。

第一節 研究結論

本研究以閉迴路供應鏈網路架構同時考量正物流與逆物流供應鏈，評估整體資源分配的有效性，可避免陷入決策次最佳化的情形。在閉迴路供應鏈領域研究中，主要多以供應鏈活動之間彼此資源分配的決策模式為主，但由於法規規範再加上環境保護、循環經濟等議題的重要，將環境因素納入供應鏈活動，了解其對供應鏈影響程度是有其必要性。在衡量企業經營環境所需面對的重要議題，本研究以閉迴路供應鏈網路架構，在供應鏈資源分配決策模式中納入經濟因素、環境因素、品質因素、不確定性參數之考量，以利建構更完備之綠色閉迴路供應鏈多目標資源分配決

策最佳化模式。本研究從產業實務面臨需求與問題，納入閉迴路供應鏈運作之重要參數與變數，建構一個量化決策模式，使其模式最佳化執行結果，能更真實貼近產業實際狀況，並確實能提供企業決策者進行決策制定之有效資訊。

彙總分析相關綠色閉迴路供應鏈研究文獻後，除了了解此領域之研究現況外，亦可觀察出此領域研究缺口與未來研究方向，包含綠色供應鏈數量模式研究具快速成長趨勢；多目標函數指標多以經濟與環境指標為主，較少考量其他供應鏈績效評估標；不確定性參數選擇與建議求解方法等。本研究在綠色閉迴路供應鏈網路架構下，考量新產品需求量、產品回收率、回收再製品售價等參數的不確定性，以多目標混合整數規劃模式，尋求利潤最大化、清潔生產最佳化、供應鏈品質最佳化，透過穩健最佳化、LP-metrics 等方法求解，最終獲得資源配置最佳解，可回應本研究擬解決之研究課題。本研究之研究範疇、模式建立以及求解方法等，皆能呼應前述研究所建議之未來研究方向及研究缺口，且在綠色閉迴路供應鏈網路架構下，建立以經濟指標、環境指標與品質指標為多目標函數，並同時考量不確定性參數之研究模式，可呈現出本研究之創新性，相信本研究成果能補足部分研究缺口，並可作為後續研究閉迴路供應鏈與環境議題之參考依據。

此外，本研究係以製造業為應用案例，進行數量模式之可行性評估。該產業的回收模式不同於一般 3C 產品的回收模式，期望經由本案例之實證應用，探究在閉迴路供應鏈網路架構下，同時考量經濟指標、環境指標與品質指標與不確定性參數，對決策訂定之影響與關聯性，藉以彰顯本研究之研究價值。

本研究採用 AHP 方法，計算出各目標函數的權重值，以及環境目標函數中，清潔科技使用與友善物料使用等項目之權重值。經由計算結果，經濟指標與環境指標權重值相同，皆為 0.36，略高於品質指標的權重值 0.28，可看出同時衡量這三個績效指標，經濟指標與環境指標同等重要。環境目標函數中，清潔科技使用與友善物料使用的權重值相同，皆為 0.5，顯示出此兩個項目的重要性相同。

在決定不確定性參數部分，本研究採用敏感度分析方法進行分析比較，經由分析結果，挑選敏感度係數較高的 3 個參數作為不確定性參數，分別為新產品需求量、產品回收率、回收再製品售價。再利用穩健最佳化方法，將不確定性參數轉換成高低 2 種情境設定，組合出 8 種不同情境，進行後續最佳化求解。本研究建立綠色閉迴路供應鏈多目標資源分配決策最佳化模式，因同時考量正物流與逆物流之運作，因此本研究數量模式最佳化結果較能呈現整體最佳化的效益，可避免陷入次最佳化的結果。

本研究較為顯著的貢獻有二：第一，不同於過往研究，多僅以經濟指標或環境指標作為研究目標主軸，本研究除了經濟因素之外，將友善生產因素與品質因素併同納入目標函數，並分析在不同情境下，對三種目標函數的影響；第二，不同過往研究，以直觀角度擇定不確定性參數，而本研究利用敏感度分析方法，決定了三個較為重要的不確定性參數，並利用穩健最佳化模式，轉化成不同情境，作為最佳化決策之評估衡量要素。

第二節 實務應用建議

面對競爭激烈且市場需求快速變化，有效提升供應鏈品質，使整體供應鏈運作產生最大效益，是企業經營關切議題。除了提升品質議題，環境保護、循環經濟亦是持續被重視與關注的議題。各國政府也為因應環境保護提出許多產品生產規範，我國產業面對國際市場巨大的競爭威脅，為確保產品外銷無虞，亦須配合相關清潔生產規範，調整供應鏈相關活動運作機制。在循環經濟政策發展下，如何符合環境保護相關規範，促使企業資源有效再利用，且又能提升供應鏈的運作品質，維持供應鏈有效運作與管理，以利企業創造最佳經營績效，是企業主必須面對與解決的課題。

本研究整合閉迴路供應鏈網路架構，同時納入經濟議題、環境議題與品質議題，形成多目標最佳化決策，較能呈現企業面臨多元且衝突的決策變數，再搭配不確定性參數的考量，亦較能反應產業實際的經營生態環境，綜整考量企業供應鏈核心活動，不同情境下之決策參考準則，如此多元且具彈性的決策參考資訊，對企業決策擬定必有所助益，對於企業永續經營亦能產生引導作用。

經由本研究分析結果，可歸納出下列 4 點重要的管理意涵：

- 一、針對綠色閉迴路供應鏈管理議題，公司管理者為了同時兼顧競爭優勢與永續發展，運用多目標量化模式尋求最佳解，有利於管理者取得更完整且精準的資訊，進行經營管理決策的評估與訂定。
- 二、不確定性因素對閉迴路供應鏈執行成效具有關鍵性的影響，本研究運用敏感度分析方法，從眾多因素中萃取出較為關鍵的 3 個不確性因素，並納入數量模式，在尋求最佳解的過程中，已充分考慮不確性因素的影響，使最後求出的最佳解更能真實反映出實際運作狀況。對於管理者而言，有助於管理者能夠更加關注於較為重要的不確定性因素，進而有效評估並降低這些不確定性因素所帶來的可能影響，使管理者能夠做出更為有效的決策分析與判斷。
- 三、由本研究結果可發現，本研究所建構的綠色閉迴路供應鏈最佳化模式，經濟指標與環境指標同等重要，此現象可反映出綠色製造議題在供應鏈管理上受到的關注會越來越顯著。對管理者而言，面對複雜的綠色閉迴路供應鏈管理，符合綠色永續的製造過程，會成為將來維持競爭優勢或爭取訂單不可或缺的必要條件。因此，如何有效從各種可能衝突的決策指標中，取得最佳化資源分配與策略佈局，是管理者會面臨到的挑戰，

藉由本研究多目標決策模式，有助於管理者取得有效的資訊進行做出最佳決策。

四、若進一步探討清潔科技使用比例與生產成本對目標函數的影響，經研究結果可發現，若清潔科技的使用所產生額外生產成本是在某個可接受的範圍，可在減少利潤的情形下，考量採用多一些的清潔生產。對於環境保護意識顯著，許多環保規範應運而生，企業面對這樣的產業環境發展趨勢下，勢必為了遵守環保規範而需要多負擔成本以達到法令規範的要求，因此，企業在追求獲利最大化的同時，尋找使用清潔科技最有效的解決方案，能以最低成本達到符合環保規範的產品，亦是企業刻不容緩的重要課題。

第三節 未來研究方向

根據本研究的研究成果與發現作為基礎，後續可進一步針對產業其他面向的議題，如考量其他環境指標、延伸應用到其他產業、採用多時期資料進行分析、考量使用 meta heuristic NSGA-II 等方法，透過相關研究工具與方法，建立有效的決策參考模式，使企業面臨複雜經營環境能更有效訂定最佳決策，以利企業得以永續經營，維持競爭優勢，並創造經營價值最大化之目標。

一、 考量其他環境指標

因應國際上對於循環經濟、零碳排等議題的發展趨勢，綠色與環境保護議題仍會持續受到高度關注，本研究採用了友善物料與清潔科技指標，還有其他環境指標如 Oršič et al. (2019)研究所提能源消耗、廢棄物回收、環境事件、環境運作的監控、水資源消耗等，可供後續做進一步研究，探討其他環境指標對綠色閉迴路供應鏈整體績效之影響，抑或可比較不同環境指標對不同供應鏈績效指標之影響。

二、 延伸應用到其他產業

本研究提出的多目標混合整數線性規劃模式，後續可進一步應用於其他產業如零售業、資通訊產業、傳統產業等，依據不同產業的屬性與需求，更深入探討綠色閉迴路供應鏈網路架構下，經濟指標、環境指標及品質指標在不同產業所產生不同影響之差異比較，抑或者可將其他供應鏈績效指標也納入考量。可藉由這樣的研究成果，了解不同產業因應環境保護議題，在面對永續經營的目標下，所需考量的重要關鍵要素。不同產業在此領域的相關研究與發現，可做為企業永續發展評估衡量之參考，協助決策者從更多元的角度或觀點，制定有效的企業永續經營決策。

三、 採用多時期資料進行分析

本研究目前僅以單一時期資料，進行模式之運算與分析，雖然有考量期初與期末存貨，可採用滾動式方式，推估多個時期的可能情形，但較難以呈現出周期性變化所可能造成的影響。後續研究可進一步採用多時期的資料集合，進行最佳化的求解。若產業本身會隨著不同時期而有明顯的週期變化，如需求變化、成本變化等，採用多時期資料進行模式的運算，更能貼近產業真實樣貌，反映出週期變化對目標函數的影響，使最後產生的最佳化結果更加助益於決策者制定決策之參考。

四、 考量使用 meta heuristic 等方法

為了求解本研究多目標混合整數規劃問題，考量研究個案規模，故以 LP-metrics 方法進行最佳解求解具有其適切性。後續若進一步擴大個案研究規模，則可以採用 generalized outer approximation、generalized cross decomposition、generalized benders decomposition、genetic algorithm、simulated annealing、NSGA-

II 等演算法，進行規劃求解。另外，也可針對不同演算法的最佳化結果，進行比較與評估分析。



參考文獻

- Ageron, B., Gunasekaran, A., and Spalanzani, A., “Sustainable supply management: An empirical study,” *International Journal of Production Economics*, Vol. 140, No. 1, 2012, pp. 168-182.
- Al Jadaan, O., Rao, C.R., and Rajamani, L., Parametric study to enhance genetic algorithm performance, using ranked based roulette wheel selection method, InSciT, Merida, Spain, 2006, pp.274-278.
- Almaraj, I.I., Trafalis, T.B., “A robust optimization approach in a multi-objective closed-loop supply chain model under imperfect quality production,” *Annals of Operations Research*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04286-8>.
- Altmann, M. and Bogaschewsky, R., “An environmentally conscious robust closed-loop supply chain design,” *Journal of Business Economics*, Vol. 84, No. 5, 2014, pp. 613-637.
- Amin, S. H. and Zhang, G., “A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty,” *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 5, 2013a, pp.1405–1425.
- Amin, S. H. and Zhang, G., “A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol.37, No.6, 2013b, pp.4165-4176.
- Ansari, Z.N. and Qureshi, M.N., “Sustainability in supply chain management: An overview,” *The IUP Journal of Supply Chain Management*, Vol. 12, 2015, pp.24-46.
- Atabaki, M. S., Mohammadi, M., and Naderi, B., “New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy,” *Computers & industrial engineering*, Vol.146, 2020, pp.106520.
- Bansal, P. and Roth, K., “Why companies go green: a model of ecological responsiveness,” *Academy of Management Journal*, Vol. 43, No. 4, 2000, pp.717-736.
- Battini, D., Bogataj, M., and Choudhary, A., “Closed loop supply chain (CLSC): Economics, modelling, management and control,” *International Journal of Production Economics*, Vol. 183, Part B, 2017, pp.319–321.
- Beamon, B.M., “Designing the green supply chain,” *Logistics Information Management*, Vol. 12, No. 4, 1999, pp. 332-342.
- Bottani, E., Montanari, R., Rinaldi, M., and Vignali, G., “Modeling and multi-objective optimization of closed loop supply chains: A case study,” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 87, 2015, pp.328-342.
- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., and Relvas, S., “Design and planning of supply

- chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 226, No. 3, 2013, pp.436-451.
- Castillo-Villara, K. K., Smithb, N. R., and Simonton, J. L., “The impact of the cost of quality on serial supply-chain network design,” *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 19, 2012, pp.5544-5566.
- Chankong, V. and Haimes, Y. Y., “Optimization-based methods for multiobjective decisionmaking-An overview,” *Large Scale Systems In Information And Decision Technologies*, Vol.5, No.1, 1983, pp.1–33.
- Chen, Z. and Andresen, S., “A multiobjective optimization model of production-sourcing for sustainable supply chain with consideration of social, environmental, and economic factors,” *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, 2014, pp.1-11.
- Das, K. and Rao Posinasetti, N., “Addressing environmental concerns in closed loop supply chain design and planning,” *International Journal of Production Economics*, Vol. 163, 2015, pp.34-47.
- Deb, K., Pratap, A., Agerwal, S., and Meyarivan, T., “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, 2002, pp.182–197.
- El-Sayed, M., Afia, N., and El-Kharbotly, A., “A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk,” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, 2010, pp.423–431.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J. A. E. E., and Van Wassenhove, L. N. "Quantitative models for reverse logistics: A review," *European Journal of Operational Research*, Vol.103,No.1,1997, pp. 1-17.
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J., and Van Wassenhove, L., "The impact of product recovery on logistics network design," *Production and Operations Management*, Vol. 10, No. 2, 2001, pp.156-173.
- Franca, R. B., Jones, E. C., Richards, C. N., and Carlson, J. P., “Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality,” *International Journal Production Economics*, Vol. 127, No. 2, 2010, pp.292-299.
- Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., and Jha, P. C., “A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 100, 2015, pp.297-314.
- Govindan, K., Soleimani, H., and Kannan, D., “Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 240, No. 3, 2015, pp.603–626.
- Guide, V. D. R., Jr. and Van Wassenhove, L. N., “The evolution of closed-loop supply

- chain research, *Operations Research*, Vol. 57, No. 1, 2009, pp.10-18.
- Guide, V. D. R., Jayaraman, V., and Linton, J. D., "Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery," *Journal of Operations Management*, Vol. 21, No. 3, 2003, pp.259-279.
- Guiffrida, A.L., Datta, P., El Saadany, A., Jaber, M., and Bonney, M., "Environmental performance measures for supply chains," *Management Research Review*, Vol. 34, No. 11, 2011, pp.1202-1221.
- Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., and Wismer, D. A., "On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Vol.1, 1971, pp.296-297.
- Hatefi and Jolai, "Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions," *Applied Mathematical modelling*, Vol.38, No.9-10, 2014, pp.2630-2647.
- Hervani, A.A., Helms, M.M., and Sarkis, J., "Performance measurement for green supply chain management," *Benchmarking: An International Journal*, Vol.12, No. 4, 2005, pp.330-353.
- Huang, L., Murong, L., and Wang, W., "Green closed-loop supply chain network design considering cost control and CO₂ emission," *Modern Supply Chain Research and Applications*, ahead-of-print, 2020.
- Huang, Y.-C., Huang, C.-H., and Yang, M.-L., "Drivers of green supply chain initiatives and performance: Evidence from the electrical and electronics industries in Taiwan," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 47, No. 9, 2017, pp.796-819.
- Hwang, C.L. and Masud, A.S.M., *Multiple-objective decision making, methods and applications: A state-of-the-art survey*, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- Jayaraman, V., Patterson, R.A., and Rolland, E., "The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures," *European Journal of Operational Research*, Vol. 150, No.1, 2003, pp.128-149.
- Jos'e Alem, D., and Morabito, R., "Production planning in furniture settings via robust optimization," *Computers & Operations Research*, Vol.39, 2012, pp.139-150.
- Kannan, G., Sasikumar, P., and Devika, K., "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 3, 2010, pp.655-670.
- Karimi, B., Niknamfar, A.H., Gavyar, B.H., Barzegar, M., and Mohtashami, A., "Multi-objective multi-facility green manufacturing closed-loop supply chain under uncertain environment," *Assembly Automation*, Vol. 39, No. 1, 2019, pp.58-76.
- Kazemia, N., Modak, N. M., and Govindan, K., "A review of reverse logistics and closed

- loop supply chain management studies published in IJPR: A bibliometric and content analysis," *International Journal of Production Research*, Vol. 57, No. 15-16, 2019, pp.4937-4960.
- Khalilzadeh, M. and Derikvand, H., "A multi-objective supplier selection model for green supply chain network under uncertainty," *Journal of Modelling in Management*, Vol. 13 No. 3, 2018, pp. 605-625.
- Kim, K., Jeong, B., and Jung, H., "Supply chain surplus: Comparing conventional and sustainable supply chains," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 26, 2014, pp.5-23.
- Ko, H.J. and Evans, G.W., "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward reverse logistics network for 3PLs," *Computers & Operations Research*, Vol.34, No.2, 2007, pp.346-366.
- Krumwiede, D.W. and Sheu C., "A model for reverse logistics entry by third-party providers," *Omega*, Vol.30, No. 5, 2002, pp. 325-333.
- Lee, D. H. and Dong, M., "A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery," *Transportation Research Part E*, Vol. 44, No. 3, 2008, pp. 455-474.
- Lee, D.-H., Dong, M., and Bian, W., "The design of sustainable logistics network under uncertainty," *International Journal of Production Economics*, Vol. 128, No. 1, 2010, pp.159-166.
- Linton, J.D., Klassen, R., and Jayaraman, V., "Sustainable supply chains: an introduction," *Journal of Operations Management*, Vol. 25, No. 6, 2007, pp.1075-1082.
- Liu, M., Liu, R., Zhu, Z., Chu, C., and Man, X., "A bi-objective green closed loop supply chain design problem with uncertain demand," *Sustainability*, Vol. 10, No. 4, 2018, pp.967-988.
- Louwers, D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F., and Flapper, S. D. P. "A facility location allocation model for reusing carpet materials," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36, No.4, 1999, pp. 855-869.
- Lu, Z. and Bostel, N., "A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities," *Computers & Operations Research*, Vol.34, No. 2, 2007, pp. 299-323.
- Ma, R., Yao, L., Jin, M., Ren, P., and Lv, Z., "Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty," *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 89, 2016, pp.195-202.
- Mahdi Saffar, M., Shakouri G., H., and Razmi, J., "A new multi objective optimization model for designing a green supply chain network under uncertainty," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 6, No. 1, 2015, pp.15-32.

- Mazlounian, M., Fazle Baki, M., and Ahmadi, M., "A robust multiobjective integrated master surgery schedule and surgical case assignment model at a publicly funded hospital," *Computers & Industrial Engineering*, Vol.163, 2022, p.107826.
- Meade, L. and Sarkis, J., "A conceptual model for selecting and evaluating third-party reverse logistics providers," *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 7, No. 5, 2002, pp. 283- 295.
- Meixell, M. J. and Gargeya, V. B., "Global supply chain design: A literature review and critique," *Transportation Research Part E*, Vol. 41, No. 6, 2005, pp. 531-550.
- Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., and Aryanezhad, M.B., "A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty," *International Journal of Production Economics*, Vol.134, No. 1, 2011, pp.28-42.
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., and Syed, M. N., "Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty," *Transportation Research Part D*, Vol. 51, 2017, pp.146-172.
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., and Barbosa-Povoa, A. P., "Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 105, 2015, pp.14-27.
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., and Zenios, S. A., "Robust optimization of large-scale systems," *Operations research*, Vol. 43, No. 2 ,1995, pp. 264-281.
- Oršič, J., Rosi, B., and Jereb, B., "Measuring sustainable performance among logistic service providers in supply chains," *Tehnički Vjesnik – Technical Gazette*, Vol. 26, No. 5, 2019, pp.1478-1485.
- Özkır, V., and Baslıgil, H., "Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, 2013, pp.114-125.
- Paksoy, T., Özceylan, E., and Weber, G.-W., "A multi objective model for optimization of a green supply chain network," *Global Journal of Technology and Optimization*, Vol. 2, 2011, pp.84-96.
- Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A., and Asadi, K., "Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA," *Information Sciences*, Vol. 292, 2015, pp.57-74.
- Peng H., Shen, N., Liao, H. L., Xue, H. Q., and Wang, Q. W., "Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain - A review for current situation and future prospects," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 254, 2020, pp.1-20.
- Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., and Dullaert, W., "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design," *Computers & Operations*

- Research*, Vol. 37, No. 6, 2010, pp.1100-1112.
- Pishvae, M. S., Jolai, F., and Razmi, J., “A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.28, No. 4, 2009, pp.107-114.
- Pishvae, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S. A., “A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 2, 2011, pp.637-649.
- Pishvae, M. S. and Razmi, J., “Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No.8, 2012, pp. 3433–3446.
- Pourjavad, E. and Mayorga, R.V., “Optimization of a sustainable closed loop supply chain network design under uncertainty using multi-objective evolutionary algorithms,” *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 13, No. 2, 2018, pp.216-228.
- Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J. A. E. E., and Spengler, T., “From closed-loop to sustainable supply chains: The WEEE case,” *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 15, 2010, pp.4463-4481.
- Ramezani, M., Bashiri, M., and Tavakkoli-Moghaddam, R., “A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 1-2, 2013, pp.328-344.
- Ramezani, M., Farhang Moghaddam, B., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., and Gholamnejad, S., “A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113, 2016, pp.662-673.
- Safaei, A. S., Roozbeh, A., and Paydar, M. M., “A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain,” *Journal of Cleaner Production*, Vol.166, 2017, pp. 1154-1168.
- Salema, M. I. G., Póvoa, A. P. B., and Novais, A. Q., “A strategic and tactical model for closed-loop supply chains,” *OR Spectrum*, Vol. 31, No. 3, 2009, pp.573-599.
- Salema, M. I. G., Póvoa, A. P. B., and Novais, A. Q., “A warehouse-based design model for reverse logistics”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, No. 6, 2006, pp.615-629.
- Sánchez-Flores, R.B., Cruz-Sotelo, S.E., Ojeda-Benitez, S., and Ramírez-Barreto, M.E., “Sustainable supply chain management- A literature review on emerging economies,” *Sustainability*, Vol.12, No. 17, 2020, pp.6972.
- Sarkis, J., “A strategic decision framework for green supply chain management,” *Journal*

- of *Cleaner Production*, Vol. 11, No. 4, 2003, pp. 397-409.
- Sarkis, J., Zhu, Q., and Lai, K.-h., "An organizational theoretic review of green supply chain management literature," *International Journal of Production Economics*, Vol.130, No. 1, 2011, pp.1-15.
- Seuring, S. and Müller, M., "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16, 2008, pp.1699-1710.
- Shi, J., Zhang, G., and Sha, J., "Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return," *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 3, 2011, pp.641-650.
- Sheu, J. B., Chou, Y. H., and Hu, C., "An integrated logistic operational model for green supply chain management," *Transportation Research Part E*, Vol. 41, No. 4, 2005, pp. 287-313.
- Shih, L.H., "Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.32, No.1, 2001, pp.55-72.
- Srivastava, S.K., "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review," *International Journal of Management Reviews*, Vol.9, No.1, 2007, pp.53-80.
- Trisna, T., Marimin, M., Arkeman, Y., and Sunarti, T. C., "Multi-objective optimization for supply chain management problem: A literature review," *Decision Science Letters*, Vol.5, 2016, pp.283-316.
- Tseng, M.-L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., and Afrin, S., "A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges," *Resources, Conservation & Recycling*, Vol.141, 2019, pp.145-162.
- Uster, H., Easwaran, G., Akcali, E., and Cetinkaya, S., "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model," *Naval Research Logistics*, Vol. 54, No. 8, 2007, pp.890-907.
- Yang, G., Wang, Z., and Li, X., "The optimization of the closed-loop supply chain network," *Transportation Research Part E*, Vol. 45, No. 1, 2009, pp. 16-28.
- Yavari, M. and Geraeli, M., "Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods," *Journal of Cleaner Production*, Vol.226, 2019, pp.282-305.
- Yeh, W.-C. and Chuang, M.-C., "Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems," *Expert Systems With Applications*, Vol.38, No. 4, 2011, pp.4244-4253.
- Yu, C. and Li, H., "A robust optimization model for stochastic logistic problems," *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, 2000, pp.385-397.

- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., and Mohammadi, M., “Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty,” *Transportation Research Part E*, Vol.89, 2016, pp.182-214.
- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, N., and Huang, T., “An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, 2017, pp.1085-1097.

