

國立陽明交通大學
運輸與物流管理學系

碩士論文

Department of Transportation and Logistics Management
National Yang Ming Chiao Tung University
Master Thesis

碳排放成本對台灣沿海貨櫃航運影響之研究
The Impact of Carbon Emission Costs on Coastal
Container Shipping in Taiwan

研究生：王立慧（Wang, Li-Huei）

指導教授：黃明居（Hwang, Ming-Jiu） 博士

中華民國一一二年六月

June 2023

碳排放成本對台灣沿海貨櫃航運影響之研究

The Impact of Carbon Emission Costs on Coastal Container Shipping in Taiwan

研究生：王立慧

Student：Wang, Li-Huei

指導教授：黃明居

Advisor：Hwang, Ming-Jiu

國立陽明交通大學

運輸與物流管理學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Yang Ming Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Traffic and Transportation

June 2023

Taiwan, Republic of China

中華民國一十二年六月

誌謝

本論文能順利完成，最先要感謝的是明居老師的指導，不論是在研究上還是日常生活中，老師都抱持著開放的態度與我們分享及討論，很慶幸在學生生涯的最後能有這樣一位指導老師。

也很謝謝 1001 的戰友們-陪我一路走來酸甜苦辣都共同經歷的雅珮、和我一起身陷 AIS 漩渦的救星瑄汝、我的喝酒好夥伴及第二個指導老師乙宙，可以和你們同一間實驗室是我的榮幸。還有啾啾啾團的大家-KC lab 的家佑、信豪和我最愛的游佳諭，是我的心靈雞湯與垃圾桶，還有惟心、濬得、丞翊、昱廷、周昱、吏成，因為有你們在，我的研生活大部分的時候都很快樂，即使痛苦的時候也不是一個人。可以認識你們的我真的很幸運！

最要謝謝的是爸爸媽媽王怡婷和王彩虹，雖然總是吵吵鬧鬧的，但我知道在需要的時候，你們一定會做我最堅固的後盾！謝謝你們的愛，讓我可以任性的做自己想做的事！



最後，我想把 Q 比放在這裡，紀念他陪我走過的 11 年多的時光，我會繼續往前走，但心裡永遠有一個位置留給你...

王立慧 謹誌於

陽明交通大學運輸與物流管理學系

仲夏

碳排放成本對台灣沿海貨櫃航運影響之研究

研究生：王立慧

指導教授：黃明居 博士

國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘要

近年來全球環保意識提高、對二氧化碳排放量日漸重視，大環境的變化勢必會對台灣國內貨櫃轉運成本帶來影響。故本研究建立一沿海航運貨櫃運輸碳排放模型，欲探討在不同碳排放抑制制度(碳稅、碳交易)下，運送人該如何針對不同考量因素(時間、成本面)調整運送方式，以及運送人運具選擇後對整體碳排放量之影響。本研究以服務於沿海航運之船舶為主，基於 AIS (Automatic Identification System) 數據以及國內貨櫃流量資料計算不同情境下船舶廢氣排放量，以評估國內貨櫃運送對環境所造成之排放汙染。

根據研究結果，考量碳排放成本後，運送人會傾向花較長之運送時間使用船舶轉運國內貨櫃，當國內貨櫃之總轉運量 26.5%由卡車運輸移動到船舶運送時，總二氧化碳排放量可降低 12.96%，而當使用船舶運送之貨櫃量來到總量之 63.8%時，總二氧化碳排放量可降低 18.01%。不論是碳稅或碳交易皆有助於降低排放量，尤其在運送人越重視運送成本的情況下，使用船舶轉運的機會越大。另外，從運送人之角度來看，欲達到相同減碳效果得前提下，使用碳交易的成本較低。

關鍵字：沿海航運貨櫃運輸碳排放模型、碳稅、碳交易、AIS

The Impact of Carbon Emission Costs on Coastal Container Shipping in Taiwan

Student : Li-Huei Wang

Advisor : Ming-Jiu Hwang

Department of Transportation and Logistics Management
National Yang Ming Chiao Tung University

Abstract

In recent years, global environmental awareness has grown, with a strong focus on reducing carbon emissions, impacting domestic container shipping costs in Taiwan. This study establishes a carbon emissions model for coastal container shipping. It investigates how shippers can adjust transportation methods considering factors (time and cost) under different carbon reduction strategies (carbon taxation, carbon trading). The research focuses on coastal vessels, using AIS data and container flow info to assess emissions in various scenarios, evaluating the environmental impact of domestic container transport.

According to the research findings, shippers tend to choose longer maritime transportation for domestic containers due to carbon emission costs. When 26.5% of the total domestic container transportation volume shifts from trucking to maritime shipping, the overall carbon dioxide emissions can be reduced by 12.96%. Furthermore, when the usage of maritime container transport reaches 63.8% of the total volume, the total carbon dioxide emissions can be reduced by 18.01%. Both carbon tax and trading cut emissions, especially when shippers prioritize costs, favoring maritime transport. Carbon trading appears more cost-effective for achieving similar emission reductions from the shipper's standpoint.

Keywords: carbon emissions model, coastal container shipping, carbon taxation, carbon trading, AIS

目錄

摘要	i
Abstract	ii
目錄	iii
圖目錄	v
表目錄	vi
第一章、緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究方法	4
1.4 研究限制與範圍	4
1.5 研究流程	5
第二章、文獻回顧	7
2.1 AIS 數據與船舶廢氣污染	7
2.2 運具廢氣排放計算	9
2.3 碳稅與碳交易制度	11
2.4 短途海運與沿海航運貨櫃運輸	14
2.5 小結	17
第三章、沿海航運貨櫃運輸碳排評估模型	19
3.1 沿海航運貨櫃運輸問題之探討	19
3.2 研究架構	20
3.3 沿海航運貨櫃運輸碳排模型	21
3.3.1 含碳稅之沿海航運貨櫃運輸模型	24
3.3.2 含碳交易之沿海航運貨櫃運輸模型	28
3.3.3 求解方法與執行步驟	29
第四章、實證研究	31
4.1 資料預處理	31
4.1.1 貨櫃流量整理	31
4.1.2 AIS 資料處理	34
4.1.3 模型之其他數值範例	36
4.2 排放量計算結果與比較	39
4.3 沿海航運貨櫃運輸碳排模型實證分析	48

4.3.1 不考慮碳排放模型之結果	49
4.3.2 考量碳稅模型之結果	50
4.3.3 考量碳交易模型之結果	56
4.3.4 小結	60
第五章、結論與建議	62
5.1 結論	62
5.2 未來模型改善建議	63
參考文獻	64



圖目錄

圖 1 台灣國內貨櫃運輸方式.....	3
圖 2 研究流程圖.....	6
圖 3 碳排放交易歷年價格.....	13
圖 4 碳稅歷年價格.....	13
圖 5 國內貨櫃運輸方式.....	20
圖 6 研究架構圖.....	21
圖 7 國內線船舶進港艘次.....	33
圖 8 2022 年船舶進港艘次與裝卸櫃量.....	34
圖 9 AIS 資料處理流程.....	35
圖 10 AIS 船舶軌跡圖.....	36
圖 11 沿海航運貨櫃船在港口停泊/定錨之排放.....	40
圖 12 船舶操作狀態排放量比較.....	42
圖 13 國內貨櫃轉運南下段排放量比較.....	43
圖 14 國內貨櫃轉運北上段排放量比較.....	44
圖 15 模型結果-不考慮碳排放成本.....	50
圖 16 模型結果-設碳稅為每噸十元.....	53
圖 17 模型結果-設碳稅為每噸一百元.....	53
圖 18 碳排放量與總運輸時間、總成本之關係.....	54
圖 19 碳稅模型排放量比較.....	55
圖 20 碳稅模型成本比較.....	55
圖 21 調整 psc 價格(ppc 皆為 100).....	60
圖 22 調整 ppc 價格(psc 皆為 100 元).....	60
圖 23 轉運貨量與二氧化碳排放量之關係.....	61
圖 24 碳排放成本比較.....	61

表目錄

表 1 排放汙染文獻整理.....	8
表 2 船舶操作狀況分類.....	10
表 3 AE 之負載係數.....	10
表 4 低負載時 ME 之調整係數.....	10
表 5 船舶排放量計算係數說明.....	11
表 6 卡車排放量計算係數說明.....	11
表 7 海運轉運相關問題考量面相文獻整理.....	17
表 8 沿海航運貨櫃運輸模型參數與變數定義.....	22
表 9 沿海航運貨櫃運輸模型參數與變數定義.....	28
表 10 台灣四大商港裝卸貨櫃總量 (單位: TEU).....	31
表 11 台灣四大商港間貨櫃流量 (單位: TEU).....	31
表 12 台灣四大商港間進港艘次分類數量.....	32
表 13 台灣各縣市的進出口貨櫃量 (單位: TEU).....	37
表 14 港口與港口間的旅行距離和時間.....	38
表 15 港口與城市之間的旅行距離和時間.....	39
表 16 船舶平均運輸時間 (單位: 小時).....	39
表 17 各港之貨櫃船進港艘次.....	40
表 18 藍色公路貨櫃船航行排放量.....	41
表 19 使用沿海航運轉運之 CO ₂ 排放量.....	43
表 20 使用貨櫃卡車轉運之 CO ₂ 排放量.....	43
表 21 藍色公路專用船的總進港艘次.....	45
表 22 5000 GT 以下專用船之裝載量.....	45
表 23 5000~7500 GT 專用船之裝載量.....	45
表 24 7500~10000 GT 專用船之裝載量.....	46
表 25 10000~12500 GT 專用船之裝載量.....	46
表 26 12500~15000 GT 專用船之裝載量.....	46
表 27 15000~17500 GT 專用船之裝載量.....	47

表 28 17500~20000 GT 專用船之裝載量	47
表 29 20000 GT 以上專用船之裝載量	47
表 30 僅成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化.....	49
表 31 碳稅=10 元時成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化 .	51
表 32 碳稅=100 元時成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化	52
表 33 碳排放量上限=11916.42 千萬噸	57
表 34 碳排放量上限=13806.10 千萬噸	58
表 35 碳排放量上限= 17662.08 千萬噸	59



第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

雖然國際貿易中約有八成以上仰賴海上運輸，不過經濟合作暨發展組織 (OECD) 指出，海運業僅占全球溫室氣體 (GHG) 總排放量的 2.5%。因此透過將短途海運(包含沿海航運)做為海上高速公路應用，從而緩解公路和鐵路擁擠，並改善溫室氣體排放，成為了一種降低外部成本之可行方法被提出。而在歐盟，約 40% 貨物仰賴海上運輸，其中短途海運之總貨運量佔總海運貨物量的 60% (Johnson and Styhre, 2015)。相關研究指出，將貨物運送模式由公路移轉為海運可減少約一半之外部成本，證實了短途海運在歐洲對環境的友好性，因其確實減少了腹地的擁堵，且在公路和鐵路上不需要大規模的基礎設施投資(Heneseay and Young, 2006；Raza et al., 2020)。

即便相對於其他運輸模式海運擁有較低之外部成本，相關組織依然非常致力於將其推向更永續之方向發展:2015 年起根據 MARPOL 附則 VI 設立波羅的海、北海、北美和美國加勒比海域四個硫排放控制區 (SECA)，對航行於其領域之船舶燃料含硫量作了限制；而歐盟透過立法進一步將所有歐盟港口周圍海域設立為排放控制區；中國亦自 2017 年開始實施國內排放控制區 (DECA) 政策 (Zhou et al., 2022)；而台灣港務公司亦隨 IMO 之腳步，自 107 年度起推動國際商港空氣污染防治方案，期望透過降低船速、使用低硫油等措施推行綠色航運，並且則規定從 2019 年起外籍船舶及航駛國際航線之國籍船舶，進入我國國際商港應採用硫含量 0.5% 以下之低硫燃油(商港法第七十五條)。IMO 2020 限硫令之實施，更彰顯了航運朝向永續發展之重要性與必然性，無論主動或被動，所有航運相關企業都將為此目標一同努力。

另外，由歐盟推動之碳邊境調整機制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, 以下簡稱 CBAM) 從今年 (2023) 起開始逐步實施，對於進口至歐盟國家之特定商品課徵碳關稅，目的是避免高碳排產業為了躲避嚴格的碳排放規範，外移到碳排放規範較為寬鬆的國家而導致的碳洩漏。CBAM 之推行，為達

到 2050 年淨零排放目標的手段之一，更是將碳稅從區域法規、勸導性作為提升到具有強制力之國際共同法規的一大步，同時亦會對航運產業造成極大影響。因此降低運送之碳排放成本，成為了政府、企業以及貨主共同關心的課題，當立法機關積極推薦相關永續法規時；航商也在努力追求優化船舶、使用替代燃油、減速...來達到降低排放量；而運送人及託運人更需慎選運送工具與路線已降低成本，達到效益最佳化。

由此可見，評估船舶運送時所帶來之外部成本至關重要，尤其臺灣海峽之為全球最繁忙航線之一，交通部運輸研究所 (2021) 指出台灣西部海域範圍是排放 PM2.5 最多的航道。部分研究試圖透過 AIS 數據探討船舶廢氣排放對沿海、港口所造成之影響，而其中又以沿海和國際過境船舶的排放量占總船舶排放量的比例最大。(Song, 2014；Goldsworthy and Goldsworthy, 2015；Goldsworthy, 2017) 根據過往研究顯示，歐洲許多地區使用短途海運替代鐵路、卡車運輸，不但能夠緩解道路擁擠狀況，也能降低外部成本對環境影響，並且海運又具有較低的運費，使託運人能夠以更經濟的方式運送貨物。而台灣港務公司自 102 年度起至今持續有在推動藍色公路轉運優惠，期望能透過鼓勵業者多利用船舶轉運來減緩公路擁擠與降低外部成本。台灣國內貨櫃運輸說明如圖 1，以出口櫃為例，假設現有一位於北部的出口櫃(黑色三角形代表出貨地)，最終須在高雄港裝船出口：該出口櫃有可能以陸運方式運送至附近港口，在該港口轉由海運送至最終目的港出口(藍色公路)，而此種情境下通常是依賴服務於沿海航運船舶或專用船(圖 1(a))；該出口櫃亦可能因為合約、船期、公司成本考量等因素以陸運方式運送至附近港口(契約裝貨港)後，再送至最終目的港(實際出口港)出口(圖 1(b))；該出口櫃亦可能直接以陸運方式運送至目的港出口(圖 1(c))。另外，針對使用沿海航運轉運之國內貨櫃，也就是前段所述之圖 1(a)的部分，通常會這樣做的原因有二：(1)配合船期考量，在契約裝貨港收貨後，使用小船轉運至較有較多國際航班的港口出貨；(2)在卡車不足或是使用船舶運送成本較低的情況下，將貨物拖到最近的港口轉運再運送至最終目的港裝船出口。



圖 1 台灣國內貨櫃運輸方式

資料來源：本研究繪製

在二氧化碳排放量廣受重視且成本提升的現在，使用沿海航運運送國內貨櫃之優勢以及政策面之考量應被重新審視，故本研究將會建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型，透過 AIS 數據以及貨櫃在台灣港口間之流向資料，考量將二氧化碳排放量納入運送成本後，國內貨櫃運輸之模式會如何轉變，以及對總成本和二氧化碳排放量之影響。

1.2 研究目的

過去，運送人為追求方便與時間效率，在行經台灣各港間之國內貨櫃中約有 90% 是使用貨櫃卡車來做運送 (Lee et al., 2010)。不過現今由於卡車司機的缺乏，國內貨櫃卡車運輸之成本提高、營運車輛減少，再加上對碳排之重視度日漸提高，還有台北港之興起、貿易型態轉變……這些趨勢使得南北貨櫃轉運之貨量與運輸方式和以往產生極大變化。在此背景下運送人應該如何安排國內貨櫃的運送方式，對其最有效益，而當加上碳排放成本(碳稅、碳交易)的情況下，運送人若選擇最有效益的方式，會對整體碳排放量有何影響呢？故本研究欲探討台灣國內貨櫃運輸所造成之排放汙染，評估使用沿海航運運送國內貨櫃之效益，並模擬當使用不同方式對碳排放量作約束，使外部成本(二氧化碳排放量)

轉為內部成本時，運送人應該要如何安排國內貨櫃運輸對其較有效益，以及國內貨櫃運輸之模式、數量改變對整體二氧化碳排放量之影響。研究結果可供相關業者採取綠色行動或供政府制定環境相關政策之參考。

本研究目的條列如下：

1. 整理臺灣沿海 AIS 資料，並基於 AIS 數據計算國內貨櫃運輸使用沿海航運之排放量。
2. 以碳排放量角度分析國內貨櫃運輸分別使用海運以及陸運之比較。
3. 融入碳稅、碳交易制度，發展沿海航運貨櫃運輸碳排評估模式。
4. 透過情境模擬，評估不同模式下的運送成本，討論運送人之選擇及該選擇對排放量之影響，以供相關業者及政策參考。

1.3 研究方法

首先進行 AIS 資料處理，移除不在研究期間與範圍之 AIS 數據，並根據導航狀態將其分類用以計算船舶排放量。接著比較相同基準下使用卡車與使用船舶運送貨櫃往來台灣主要貨櫃港之二氧化碳排放量。最後建立一個沿海航運貨櫃運輸碳排模型，將二氧化碳排放量納入運送成本做考量，模擬不同情境，以求最小化運輸成本與時間的情況下，討論當在成本中加上碳稅或碳排放對運送人在安排國內貨櫃運輸時之運具選擇有何改變，以及對總體二氧化碳排放量有何影響。

1.4 研究限制與範圍

本研究以行經台灣西部沿海並至少連續停靠基隆港、台北港、台中港、高雄港中之二的貨櫃船舶作為沿海航運進行討論，將研究範圍界定在台灣國內貨櫃之沿海運輸，亦即在台灣四大商港間移動之海上貨櫃運輸。本研究欲比較使用國內貨櫃轉運使用沿海航運或卡車運輸之優勢。預計以航港局所搜集之 AIS 船舶軌跡資料以及港務公司所搜集之 2022 年貨櫃在台灣港口間移動的流量資料，探討不同運輸模式下國內貨櫃運輸之排放量以及成本。雖然本研究無法取得使用貨櫃卡車於港口到港口間之實際轉運櫃量，但本研究透過一沿海航運貨櫃運輸碳排模型的建立，根據現有的資料(使用海運轉運之貨櫃量)調整比例進行模

擬，並假設納入碳排放成本考量，在目標為最低總運送成本及時間的情況下，用以推估在不同情境下運送人應該如何安排運送國內轉運貨櫃，以達最佳效益，而當貨櫃由陸上運輸轉至海上運輸時，可減少多少比例的碳排放量，以供相關業者及政策參考。

1.5 研究流程

本研究之研究流程如圖 2 所示，詳細流程如下：

1. 首先，針對相關領域進行文獻回顧整理，瞭解海上高速公路發展的優劣勢與碳排相關規定以及相關計算方法。
2. 確立本研究之目的與範圍、限制。接著對船舶廢氣排放問題之相關文獻進行整理歸納，並蒐集計算排放量所需之各種參數資料。
3. 整理貨櫃流量資料，以利後續用於計算沿海航運國內貨櫃運送之排放量與運送成本。
4. 進行 AIS 資料整理，移除不在研究範圍之資料、離群值，並擷選出特定船舶，用以計算航行路線、時間與排放量。
5. 通過 AIS 資料與相關計算公式，比較使用沿海航運與貨櫃卡車運送國內貨櫃之排放量。
6. 最後，建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型，求出不同情境下之最低成本與時間，用以評估碳排制度下國內貨櫃運送模式之轉變，以及相關成本的變化和該抑制排放量手段的影響。
7. 提出研究結論與建議。

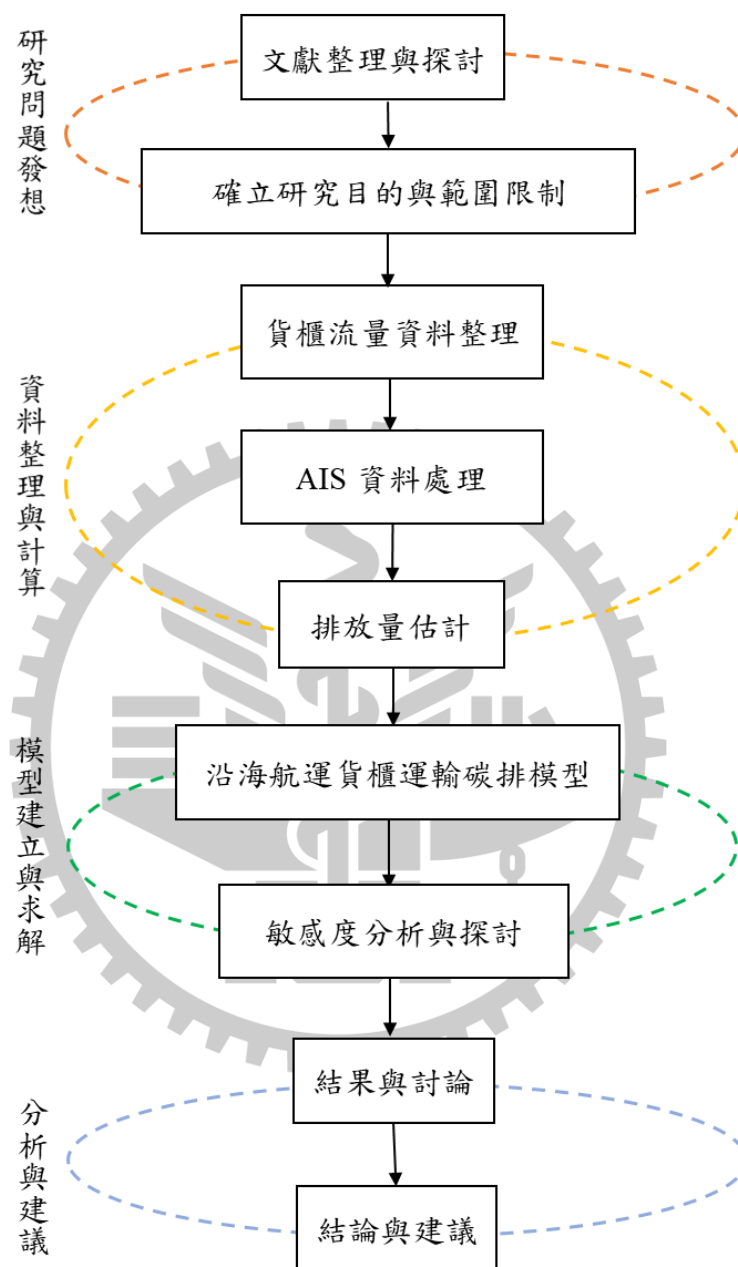


圖 2 研究流程圖

資料來源:本研究繪製

第二章、文獻回顧

2.1 AIS 數據與船舶廢氣污染

AIS (Automatic Identification System) 是一套安裝在船舶上的自動追蹤系統，藉由地面接收站、衛星設備，提供船舶交通管理系統辨識及定位。根據海上人命安全公約 (SOLAS)，對於從事國際航次中滿 300 噸 (GT) 或以上之貨船，和未從事國際航次中滿 500 噸或以上之貨船，以及所有客船，須強制安裝 AIS (Goldsworthy and Goldsworthy, 2015；Goldsworthy, 2017)。

AIS 數據之應用通常會結合視覺化分析，Andrienko and Andrienko (2021)指出 AIS 數據中常見的船舶屬性資料錯誤，並提出基於 AIS 數據識別船舶停泊事件之方法。Willems et al. (2009) 考慮了船速，提出了一種新的方法來計算船舶軌跡並可視化研究結果，用以支持船舶交通控制和相關政策。Goldsworthy (2017) 將船舶分為停泊、定錨、航行、低機動性及其他，並將其用於評估船舶對排放空間分佈之影響。而在船舶所造成之空氣污染中，船用燃料燃燒生成物包括 NO_x、SO_x、PM、VOC、CO、CO₂、CH₄、N₂O 及 PAH，其中 NO_x 和 SO_x 為最重要之污染因素。(Merk, 2014；Goldsworthy and Goldsworthy, 2015)

有關船舶廢氣污染之研究主要可分為兩個面向：(1)從燃料方面著手，改善船舶排放污染程度；(2)研究特定地區船舶排放污染之影響。Hulskotte and Van Der Gon (2010)調查停泊時的燃料消耗和相關的燃料特性，提出一種計算停泊船舶廢氣排放的方法。Martinez-Lopez et al. (2019) 對能夠提供優化的船舶技術和操作特性的數學模型進行了修改和求解，以評短途海運船隊使用不同推進裝置和燃料對複合運輸之外部成本、時間方面之表現。Lee et al. (2010) 對卡車運輸和沿海航運之廢氣排放進行了比較，探討台灣國內貨櫃運輸的外部成本。Kilic and Girit (2015) 評估沿海船用燃料，調查在土耳其沿海航線上航行的船舶年二氧化碳排放量，並分析海上運輸的燃油效率以及貨物在不同運輸方式間轉移對二氧化碳排放的影響。Rodrigues et al. (2015) 使用英國進口貿易背景下的五種情景來評估二氧化碳總排放量和進口貨櫃改道的成本，通過結合使用替代港口和修

訂複合運輸戰略來評估英國供應鏈可能的碳減排戰略。

Ng et al. (2013) 使用 AIS 數據編制了一份香港遠洋船舶廢氣排放清單，發現貨櫃船排放量居所有船型之首。Liu et al. (2014) 基於船舶活動密度，評估 2006 年到 2010 年間高雄港商船排放之 SO_2 變化及其影響。Goldsworthy and Goldsworthy (2015) 使用 AIS 數據輔以插值法，評估澳洲沿海船舶廢氣排放之時空分布。對於船舶排放汙染影響之計算方式有很多種，基於計算方式的不同，用於計算之資料型態也會有所不同，因此很難將不同文獻之研究結果放在一起做比較。而本研究參考 Goldsworthy and Goldsworthy (2015)、Gan et al. (2022) 及 Huang et al. (2020) 計算排放之方式，會透過 AIS 數據計算沿海航運船舶在台灣四大貨櫃港間移動所造成之排放量，詳細計算方式可見 2.2 節。

表 1 排放汙染文獻整理

	方式	汙染源	研究地區
Hulskotte and Denier van der Gon (2010)	燃油消耗	停泊之船舶	荷蘭 (鹿特丹港)
Lee et al. (2010)	貨櫃流量	卡車、貨櫃船	台灣
Ng et al. (2013)	AIS	遠洋船舶	香港
Liu et al. (2014)	船舶活動	商船	台灣(高雄港)
Song (2014)	AIS	港區內船舶	中國(洋山港)
Goldsworthy and Goldsworthy (2015)	AIS	航行於沿海船舶	澳洲
Kilic and Girit (2015)	燃油消耗	航行於沿海船舶	土耳其
Rodrigues et al. (2015)	貨櫃流量	卡車、貨櫃船	英國
Goldsworthy (2017)	AIS	航行於沿海船舶	澳洲
Martinez-Lopez et al. (2019)	引擎性能、 燃油消耗	短途海運船舶	西班牙到法 國間航線
本研究	AIS	航行於沿海之貨櫃船	台灣
	貨櫃流量	卡車	

資料來源：本研究整理

2.2 運具廢氣排放計算

船舶污染物排放主要來源於船舶引擎——主機(Main Engine, 以下簡稱 ME)、輔機(Auxiliary Engine, 以下簡稱 AE)和鍋爐(Boiler)，ME 為船舶提供航行動力；AE 為船舶提供電力；而鍋爐為船舶提供加熱或蒸汽泵驅動。引擎機類型可分為五類：低速柴油機 (Slow-speed Diesel Engine, SSD)、中速柴油機 (Mediumspeed Diesel Engine, MSD)、高速柴油機 (High-speed Diesel Engine, HSD)、燃氣輪機 (Gas Turbine Engine, GT) 和蒸汽輪機 (Steam Turbine Engine, ST)。大型船舶(遠洋貨船、超大貨櫃船、油輪)通常採用低速柴油機(最高轉速小於 350rpm)作為 ME，而中速柴油機(最高轉速為 350~1000 rpm)通常用作大型船舶的 ME 或 AE，而高速柴油機(轉速高於 1000 rpm)則用於小型船舶 ME 或大型船舶 AE。(Weng et al., 2020; IMO, 2020) 因鍋爐之排放資料不易收集，且其排放量較低，故本研究在計算船舶廢氣排放量時不考慮鍋爐之排放。根據 Gan et al.(2022) 之研究，貨櫃船噸位(GT)與 ME 之引擎功率成正比關係，如式子(1)。其中 P^{ME} 為 ME 之引擎功率；其中 P^{AE} 為 AE 之引擎功率。

$$P^{ME} = (37.11GT)^{0.63} \quad (1)$$

$$P^{AE} / P^{ME} = 0.22 \quad (2)$$

船舶廢氣排放計算如下，引擎功率與船舶速度三次方成正比，故引擎的負載係數計算如式子(3)，而關於 AE 之負載係數如表 3，當處於低負載率時，計算 LF^{ME} 便需要乘上調整係數如表 4。各因素資料來源如下：引擎功率(P)可參照 LRS (Lloyd's Register of Ships)及港務局提供之船舶詳細資訊與過往研究文獻，而對於沒有在資料庫中的船舶，根據 Gan et al.(2022) 使用船舶類型和噸位等級來估計引擎功率；負載係數(LF)可根據船速得出；持續時間(T)依照 AIS 數據；排放係數(EF)參考自 Growsworthy (2015) 以及 Huang et al. (2020)。本研究假設所有船舶都使用同樣的燃料，由於 IMO 2020 限硫令的實行，過往使用之燃料與現今使用的具有極大差異，但相關低硫燃料(例如 LNG)的燃油係數不易取得，故本研究回顧多篇應用 AIS 數據計算船舶排放量之文獻(可見 2.1 節)，蒐集各篇文獻中用以計算之燃油後，決定以含硫量小於 0.1%的船用輕柴油 (Marine Gas Oil,

MGO) 作為計算依據。

表 2 船舶操作狀況分類

	正常航行	低速航行	低機動性	停泊/定錨
船速	>12 kn	8~12 kn	1~8 kn	≤ 1 kn

資料來源：Gan et al. (2022)

表 3 AE 之負載係數

	正常航行	低速航行	低機動性	停泊/定錨
LF^{AE}	0.13	0.25	0.5	0.17

資料來源:Gan et al. (2022)

表 4 低負載時 ME 之調整係數

LF^{ME}	PM10	NOx	VOC	SO2	CO2
≤ 2%	7.29	4.63	21.18	1.00	1.00
2%~10%	1.38	1.22	2.18	1.00	1.00

資料來源:Gan et al. (2022)

$$LF^{ME} = P^{ME} / P_{MAX}^{ME} = (V_{1,2} / V_{MAX})^3 \quad (3)$$

$$E_{i,f,l}^{ME} = P^{ME} \times LF_l^{ME} \times LLAM \times T_{f,l} \times EF_{i,f}^{ME} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$E_{i,f,l}^{AE} = P^{AE} \times LF_l^{AE} \times T_{f,l} \times EF_{i,f}^{AE} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$E_{i,f,l}^{total} = E_{i,f,l}^{ME} + E_{i,f,l}^{AE} \quad (6)$$

表 5 船舶排放量計算係數說明

係數	說明
$E_{i,f,l}^{ME}$	當船舶的操作模式為 l 時，使用燃油 f 、ME 所排放出之汙染物 i (t)
$E_{i,f,l}^{AE}$	當船舶的操作模式為 l 時，使用燃油 f 、AE 所排放出之汙染物 i (t)
LF_l^{ME}	船舶操作模式 l 期間，ME 的負載係數 (load factor)
LF_l^{AE}	船舶操作模式 l 期間，AE 的負載係數 (load factor)
$LLAM$	低負載時 ME 之調整係數
$T_{f,l}$	船舶的操作模式為 l ，燃油為 f 之持續時間 (h)
$EF_{i,f}^{ME}$	使用 ME、燃油 f 之汙染物 i 排放係數 (g/(kWh))
$EF_{i,f}^{AE}$	使用 AE、燃油 f 之汙染物 i 排放係數 (g/(kWh))
i	汙染物質(NO _x 、SO ₂ 、PM ₁₀ ...)
f	燃料類型
l	船舶操作模式(正常航行、低速航行、低機動性、停泊/定錨)
$V_{1,2}$	船舶從位置 1 到 2 的行駛速度
V_{MAX}	船舶可行使之最大速度

而有關卡車之貨櫃運輸排放量之計算如式(7)，參考至 Liao et al. (2009)。

$$E_i^{truck} = Q \times L \times EF_i^{truck} \quad (7)$$

表 6 卡車排放量計算係數說明

係數	說明
E_i^{truck}	卡車所排放出之汙染物 i (t)
Q	貨櫃量
L	行駛距離(km)
EF_i^{truck}	卡車排放之汙染物 i 的排放係數

2.3 碳稅與碳交易制度

1997 年第一部限制各國溫室氣體排放的國際法案——《京都議定書》於日本

京都通過，此案之通過，意味著溫室氣體排放成為各國關心的議題，也成為可採取具有強制力手段來約束相關組織之溫室氣體排放的開端。在海運方面，國際海事組織(IMO)的成員國於 2018 年，決議「與 2008 年相比，迄 2050 年的每年溫室氣體排放總量，至少要減少 50%」。歐盟為了實現《京都議定書》確立的二氧化碳減少排放的目標，於 2013 年建立歐盟排放交易體系（European Union Emission Trading Scheme，以下簡稱 EU ETS），推出了排放交易制度（Emission Trading Scheme，以下簡稱 ETS），設立全歐盟溫室氣體許可排放量的分配與交易上限，透過市場機制解決經濟體產生之排放問題，並由 EU ETS 進行查證以及相關規定的建立（LRQA，2023）。另外，根據張潞之與賴廷嘉(2012)之研究，實行減排活動時，使用排放權交易成本低於降低船速 20% 的成本。不過 ETS 的實行，導致許多企業將其生產線轉移至未受到排放交易制度管制的區域，造成了碳洩漏的現象。因此歐盟進而於 2022 年推動實施 CBAM，向進口至歐盟的產品徵收費用，而若進口國家具有與歐盟同等的碳稅制度，則進口商品則可免除原本應繳納的 CBAM 憑證。此舉突破主權疆界將碳稅作為邊境稅收取，另外這項機制的施行除了可以解決碳洩漏的問題，也能推動其他國家的相關產業重視減碳工作。

目前國際上用來抑制碳排放的方式主要有兩種：(1) 碳稅及(2) 碳排放交易系統。碳稅是針對造成二氧化碳排放的商品或服務，依排放量課徵環境稅，其優點為碳稅的價格較明確，不會隨著碳交易的價格變動，且行政管理輕鬆，只需要將碳稅納入原有的稅收體即可，但缺點是減排結果不能預先確定，且若稅率訂得過低，難以達到減少碳排放的效果；碳排放交易之內容為對各業者設立碳排放量上限，允許排放量低的行業將它的額外配額出售給排放量大的業者，其優點是減排的結果能事先確定，執行減碳者可獲得更大的利益，缺點是執行成本較高，需要行政機關建置合法的交易體系、分配碳權，並監測業者碳排放情況。Kenan et al. (2022) 便針對岸邊橋式機分配問題之二氧化碳排放量進行碳稅及碳交易制度之比較。另外，根據世界銀行（World Bank）統計，目前全球有 65 個國家及地區實施碳定價策略，其中 30 個採取碳排交易制度、35 個以碳稅制為主，這些區域造成之溫室氣體排放量約占全球總排放量的 21.5%，而無

論是碳稅或碳交易價格皆呈上升趨勢，如圖 3 及圖 4。(簡鈺璇，2022； World Bank, 2022)

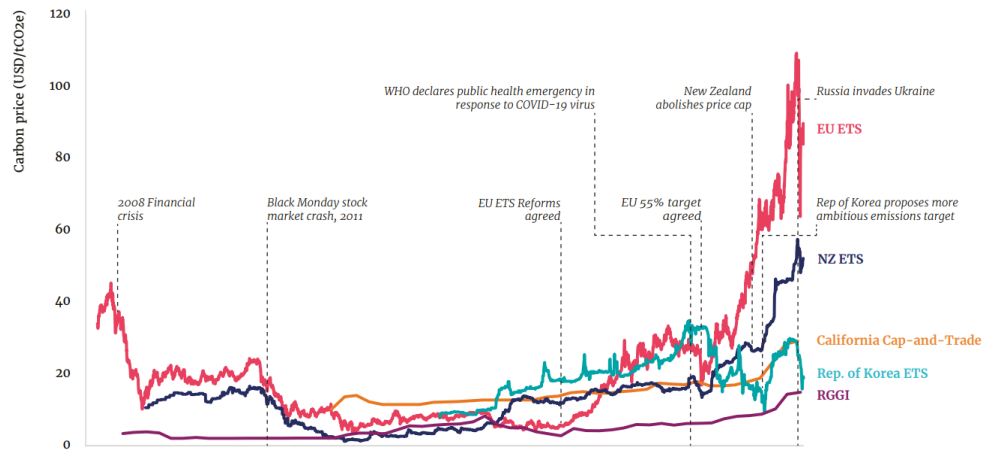


圖 3 碳排放交易歷年價格

資料來源: World Bank (2022)

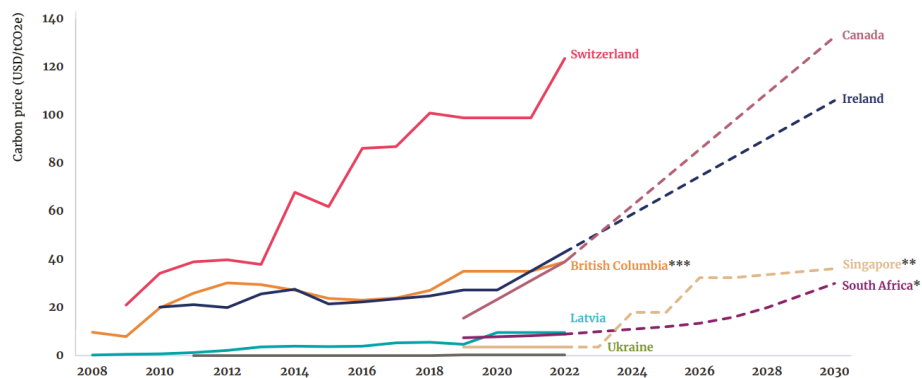


圖 4 碳稅歷年價格

資料來源: World Bank (2022)

而台灣起初是以獎勵方式鼓勵企業實行自願減碳行為，其後行政院於 2011 年之「節能減碳行動計畫」，制定我國 2020 年及 2025 年國家與部門減量部門。隨著國際產業對供應鏈減碳加嚴，政府於 2015 年正式通過《溫室氣體減量及管理法》：「設定為 2050 年的溫室氣體排放量須較 2005 年降低 50% 以上」做為碳管理作為之依據。又於今年(2023 年)三讀通過《氣候變遷因應法》，

將國家溫室氣體長期減量目標訂定為 2050 年淨零排放、強化氣候治理、成立溫室氣體管理基金專款專用，並明定碳費徵收、繳納及核算等相關作業。《氣候變遷因應法》通過後，確定台灣將來會正式徵收碳費，同時相關機構也積極向歐盟爭取，當企業向政府繳納後，可抵減歐盟 CBAM (鍾泓良，2023)。對於減排活動，根據不同的實行方法會有不同之影響結果，故本研究欲比較碳稅及碳交易對台灣國內貨櫃運輸轉運模式及二氧化碳排放量有何影響。

2.4 短途海運與沿海航運貨櫃運輸

短途海運一詞最早源自 1999 年 6 月，由歐洲通訊委員會所提出：「短途海運是指地理位置位於歐洲的港口之間或與歐洲接壤的封閉海域有海岸線的非歐洲國家的港口和港口之間的海上貨物和旅客流動。」不過相關組織、專家至今仍未有達成共識，故關於「短途海運」一詞，並沒有統一、明確的定義，歐盟統計局便提到：「短途海運是相對較短距離之貨物的海上運輸，而不是洲際跨洋深海運輸」，而美國海事局(United States Maritime Administration)則定義：「短途海運為不穿越海洋並利用內陸和沿海水道運輸商業貨物的商業海運。」，因此短途海運包含使用沿海和內陸水道將貨物運輸到港口以及近海接駁運務(Vanden Bos and Wiegman, 2018；Paixão-Casaca and Marlow, 2007)。而本研究使用短途海運之概念，將研究範圍界定在台灣國內貨櫃之沿海運輸，亦即在基隆港、台北港、台中港、高雄港間移動之海上貨櫃運輸。

由於海運具有國際性，運送人再安排運輸方式與路線時，除了需要考量基本運送成本與公司策略外，也須將各國政府態度、法規等納入考量，因此在管理層面，政府對於短途海運發展之立場亦是相當重要的影響因素。Skocibusic and Jolic (2010) 探討克羅地亞共和國短途海運的發展分析，以改善克羅地亞與歐盟的交通連接和競爭力。Brooks and Wilmsmeier (2017) 評估了過去十年智利沿海航運的貨運結構、需求和運送模式以及航運服務的供應，針對智利短途海運發展的前景提出相關建議。Casaca et al. (2017) 則通過繪製供需圖並分析其優劣勢，指出巴西沿海航運面臨之弱點，建議企業和政府需進行一些經濟和政治變革。而台灣計畫於明年(2024 年)開始正式對相關企業徵收碳費，故本研究將模

擬針對排放量課徵相關費用後，會對整體國內貨櫃轉運活動有什麼樣的影響。

又因僅靠海運無法達成戶到戶(Door to Door)運送，故短途海運之應用經常與公路運輸結合做討論，並且基於成本、時間等等因素影響，短途海運與陸地運輸呈現一種既合作又競爭的關係。在運具選擇方面，Feo and Garcia (2011) 使用具有誤差分量的混合 logit 模型，考慮了運送人之偏好及公路運輸和短途海運之間的貨運方式選擇，以分析西歐發展短途海運的可行性。Chandra et al. (2020) 以汽車物流為例，建立一混合整數線性規劃模型，探討在何種情境下能使汽車運量由公路運送轉移至沿海航運較有利。由於使用海運運送所造成之排放量和使用陸運相比較低，因此「環境效益」被本研究視為是從公路轉由海運運送的重要核心概念，在考量公路轉移至海運之運輸問題時，應當納入相關環境因素考量較為適當。

過去學者以環境角度討論海運與陸運以及複合運輸間之關係：Prata and Arsenio (2017) 以主要利益相關者的觀點評估航行速度和二氧化碳排放量如何影響四種運輸方案之選擇：(1)海運-海運（短途海運）；(2)海上公路；(3)海上鐵路；(4)海運-鐵路-空運，結果顯示航行速度介於 17~23 節之間的對短途海運(方案一)影響最為嚴重，以及降低航速雖然可使運輸成本降低，卻會導致物流鏈中之成本增加。Ramalho and Santos (2021) 評估葡萄牙北部和西北歐間，包括短途海運在內的不同貨物複合運輸路線的內部成本和時間及每種模式和貨物單位的外部成本，結果顯示公路轉短途海運的運輸方式對於環境永續發展是有益的。而 Hilmola (2013) 則與前述研究抱持著相反觀點，其以芬蘭赫爾辛基和愛沙尼亞塔林間之運輸路線的情況為例，評估了縮短海運路線，將腹地運輸（公路和鐵路）作為替代的效益。另外根據 Medda and Trujillo (2010) 之研究，短途海運所排放之二氧化碳約為卡車運輸之五分之一，且船舶運輸的邊際外部成本約為 0.14 歐元/公里，而公路運輸的成本約為 0.24 歐元/公里，證實了應用短途海運之優勢。上述研究主要皆是針對物流運送現況去進行運送方式的比較與探討，而根據不同背景狀況使用海運替代路上運輸有時是有利的，有時則不具有效益。

台灣過去亦有相關研究，Liao et al. (2009) 及 Lee et al. (2010)透過當時往來台灣主要商港間使用海運與陸運所運送之貨櫃量資料，探討公路運輸與海運服務所造成之排放量比較。賴冠豪(2011) 建立了一個複合運輸模型，模擬使用貨櫃車與沿海航運運輸之間的運具和路線選擇，並確定使用沿海航運替代部分陸上運輸可降低環境成本以及空氣汙染物與二氧化碳的排放量。交通部運輸研究所(2018)，探討專船營運的情況下，將貨櫃由陸運轉海運運輸之社會效益，以及海運與陸運成本差異，為政府在研擬貨櫃轉運獎勵機制提供參考。Johnson and Styhre (2015) 指出，必須提供應用短途海運之明確的好處，例如為承運人節省成本或時間，並且能夠通過向用戶提供門到門海運服務來適應運輸需求的需要，短途海運才能真正成為具有競爭力的替代公路運輸。而政府亦持續推動推展藍色公路環島貨櫃轉運案，期望可以透過獎勵機制提升運送人使用沿海航運服務來降低陸運交通負荷、提高環境效益。不過近期由於受到歐盟影響，碳排議題廣受討論，尤其 GBAM 之實施，碳價的制定及相關規定的訂立成為政府、業者、貨主共同關心之議題。本研究所應用之模型改良自賴冠豪(2011)的模型，融合 AIS 資料以更精確計算船舶排放量，並納入碳稅與碳排放的觀點進行比較，討論不同情境下運送人該如何安排轉運才最具效益，以及運送人選擇會如何影響整體碳排放量。

表 7 海運轉運相關問題考量面相文獻整理

	政策面	成本面	時間面	二氧化碳排放量
Skocibusic and Jolic (2010)	✓			
Brooks and Wilmsmeier (2017)	✓			
Casaca et al. (2017)	✓			
Feo and Garcia (2011)		✓	✓	
Chandra et al. (2020)		✓	✓	
Prata and Arsenio (2017)			✓	✓
Ramalho and Santos (2021)		✓	✓	✓
Hilmola (2013)		✓	✓	
Medda and Trujillo (2010)				✓
Liao et al. (2009)				✓
Lee et al. (2010)	✓			✓
賴冠豪(2011)		✓		✓
Johnson and Styhre (2015)		✓	✓	
本研究	✓	✓	✓	✓

資料來源：本研究整理

2.5 小結

在沿海海運領域中，環境影響為核心議題，經前段文獻回顧內容可以得知，應用 AIS 數據及計算燃油消耗為評估船舶污染最常見之方法。透過結合時間和空間的分配來檢測船舶帶來之外部成本，能使研究結果更加準確。Liao et al. (2009)、Lee et al. (2010)、賴冠豪 (2011) 皆探討過台灣地區沿海航運問題，台灣港務公司亦自 102 年度起發放藍色公路獎金，鼓勵國內貨櫃貨物由陸運改成

亦海運方式運送。由文獻探討可知，全世界對於環境議題越來越重視，我國《氣候變遷因應法》之推行，勢必會對於運送人成本造成一定影響。本研究欲將未來可能面臨之狀況納入考量，以台灣地區為例，探討當需要考慮碳排放成本時，運送人應該如何安排較具有效益，以及碳排放成本納入考量後，是否能有效凸顯使用海運轉運之優勢所在。

本研究欲使用 AIS 船舶活動資料搭配貨櫃在台灣流向、流量資料來評估台灣國內貨櫃運輸之廢氣汙染狀況，透過使用船舶真實航行於台灣港口間之路線來計算沿海航運之排放量可使結果更貼近實際情況，最後建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型，透過加入碳稅與碳交易制度，評估不同情境下運送人運送國內貨櫃之運具選擇，及該選擇行為對整體二氧化碳排放量影響。



第三章、沿海航運貨櫃運輸碳排評估模型

3.1 沿海航運貨櫃運輸問題之探討

本研究以運送人(航商)的決策角度出發，在運送台灣國內貨櫃時，可能基於契約、船期因素，運送業者收貨港口與實際裝船進出口的港口不同，而在收貨港(轉運港)到目的港(實際進出口港)間之路程，運送人應根據不同情境考量，選擇使用船舶或卡車運送，來最小化營運成本以達到最佳效益。

台灣國內貨櫃運輸範例說明如圖 5，線段粗細表示二氧化碳排放量。以出口櫃為例，大部分的貨物會直接運往目的港口出口，而少部分會因契約、船期、時間、成本...考量，必須先透過卡車從出口縣市拖至其他港口，最後再透過船舶或卡車運往實際出貨港出口。進口櫃運送方式與出口櫃相似，當貨物抵達卸貨港後，可透過海運轉運至離目的地縣市最近的港口再轉由卡車運送至目的地縣市；或透過卡車轉運至目的地卸貨港後，在運送至目的地縣市；也可能透過卡車從實際卸貨港直接運送至目的地縣市。其中卡車運輸所排放的二氧化碳量與貨量以及運送距離成正比，而由於台灣西部海岸線較短，船舶航行於港口間之排放量較為固定，因此以碳排放的角度來看，若貨量越多或距離越長時，使用船舶運送的碳排放量會比較低，而貨量較少或距離較短時，使用船舶會較不利。故本研究將碳排放納入運送考量，以台灣現有貨量作為參數輸入，討論加入碳排放成本後，是否能促使運送人多加使用沿海航運，並達到規模經濟之效益。

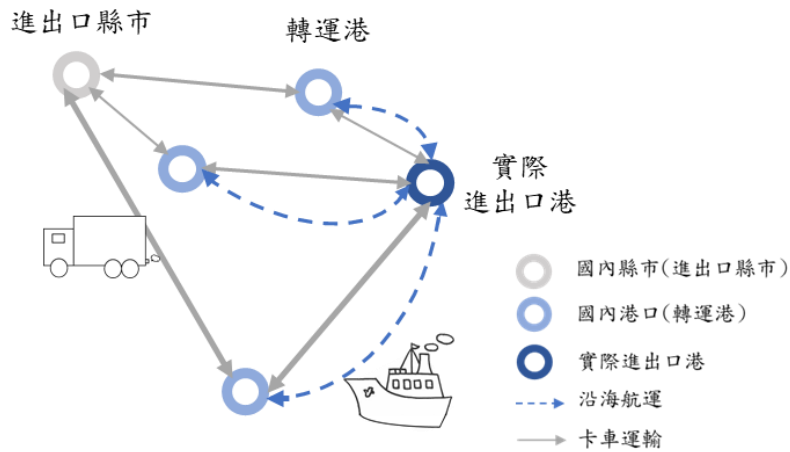


圖 5 國內貨櫃運輸方式

資料來源：本研究繪製

本研究欲整理並比較國內貨櫃使用沿海航運(藍色公路)或公路運輸往來各港口間所造成之排放量，並建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型，以現有的貨櫃量（使沿海航運之貨櫃總量）作為輸入資料，假設在總貨量不變，最小化營運成本、時間雙目標下，若須納入排碳因素（碳稅或碳交易）考量，運送人應如何調整目前的運送方式。沿海航運貨櫃運輸碳排模型可用以評估台灣地區國內貨櫃運輸之現狀與使用沿海航運之效益，而後透過敏感度分析探討不同碳排放量制度限制下，國內貨櫃運輸模式的轉變情況，對運送人運輸成本會有何影響，以及能有效減少多少比例之二氧化碳排放量。

3.2 研究架構

本研究之架構如圖 6 所示。透過港務公司所蒐集之資料，整理出在基隆港、台北港、台中港、高雄港間移動之貨櫃量。整理航港局所搜集之 AIS 船舶軌跡資料，並根據航行狀態與船速將其區分成不同操作模式以利計算沿海航運之船舶排放量。運具之排放量計算方式可見 2.2 節式(1)~(7)，本研究將比較使用海運、陸運進行國內貨櫃運送所造成之排放量差異並探討使用沿海航運之優勢。最後建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型，結合現況，探討當二氧化碳排放量納入成本考量時，運送人該如何安排轉運才能作具有效益，進一步比較不同的制約方法(碳稅、碳交易)，對總運輸成本、運具選擇及排放量之影響。

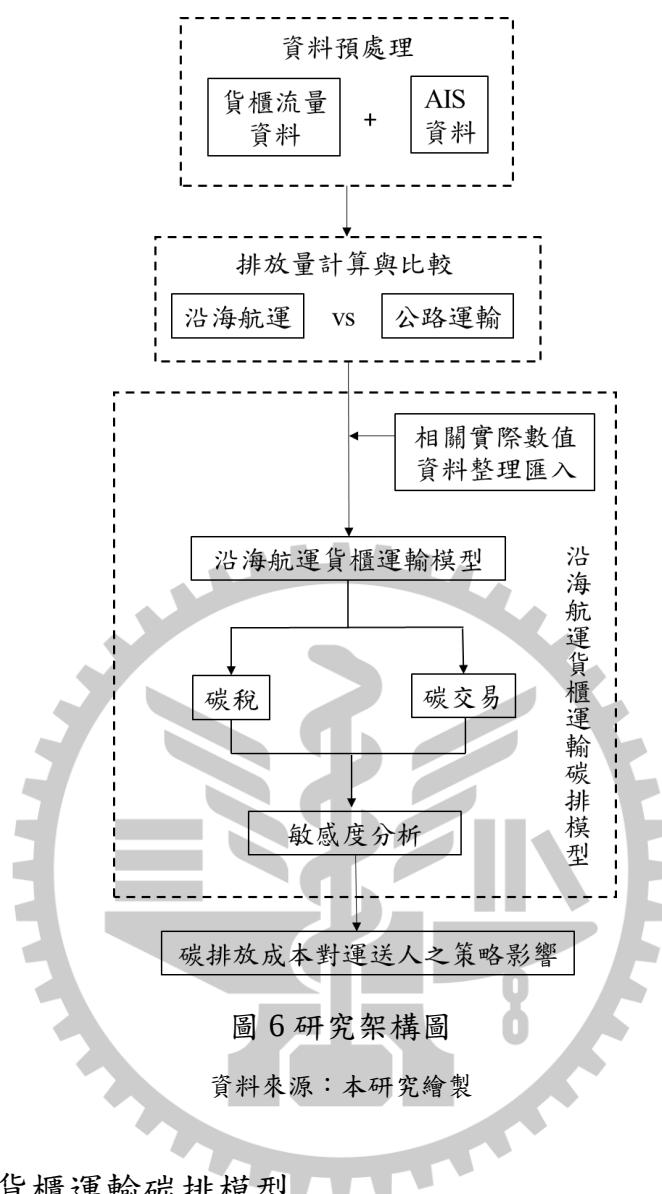


圖 6 研究架構圖

資料來源：本研究繪製

3.3 沿海航運貨櫃運輸碳排模型

本研究建立一個沿海航運貨櫃運輸碳排模型，來模擬國內貨櫃運輸狀況，當進口貨櫃抵達台灣港口後，需要使用貨櫃卡車直接送至內陸縣市或使用貨櫃卡車、沿海航運之方式轉運再送達內陸縣市；出口貨櫃可由內陸縣市經由貨櫃卡車直接運送至國內港口後出口，或經由貨櫃卡車、沿海航運的方式轉運後至出口港出口。因海運具有國際性，而目前世界上最廣為使用來抑制二氧化碳排放量的方法為碳稅與碳交易，所以本研究參考 Kenan et al. (2022)，將碳稅與碳交易納入成本考量，並比較分別討論使用這兩種方式對運送人在運送成本與運送模式的安排有何影響，以及其運送行為之改變會如何影響排放量。沿海航運

貨櫃運輸碳排模型之集合、參數與變數如表 8。

本研究模型之情境假設如下：

1. 運送人皆有自有船隊及車隊
2. 所有船舶使用一樣的燃料
3. 貨櫃卡車皆在運送起點等待，沒有調度問題
4. 有足夠數量的卡車營運於國內港口到港口間之路線
5. 需要轉運的貨量為固定且已知的
6. 使用海運和使用陸運所受到的碳排放規範是一樣的

表 8 沿海航運貨櫃運輸模型參數與變數定義

集合	
J	國內港口
K	國內各縣市
M	運具， $m=1\sim9$ ，1 為貨櫃車；2 為 5000 GT 以下之貨櫃船；3 為 5000~7500 GT 貨櫃船；4 為 7500~10000 GT 貨櫃船；5 為 10000~12500 GT；6 為 12500~15000 GT；7 為 15000~17500 GT；8 為 17500~20000 GT；9 為 20000 GT 以上之貨櫃船
參數	
i_j	國內港口 j 之進口貨櫃量
e_j	國內港口 j 之出口貨櫃量
ed_k	從國內縣市 k 出口的貨櫃量
id_k	到國內縣市 k 進口的貨櫃量
ti_j	國內港口 j 之進口轉運貨櫃量
te_j	國內港口 j 之出口轉運貨櫃量
o_j	國內港口 j 的港口容量
n^m	運輸模組 m 的載貨容量
v^1	貨櫃車之總運具數量

c_{jk}^1	使用貨櫃卡車從國內港口 j 到國內縣市 k 的運輸成本(每單位運具)
c_{jt}^m	使用運輸運具 m 從國內港口 j 到國內縣市 k 的運輸成本(每單位運具)
p_{jk}^1	貨櫃卡車從國內港口 j 到國內縣市 k 的二氧化碳排放量
p_{tj}^m	運具 m 從轉運港 t 到國內港口 j 的二氧化碳排放量
t_{jk}^1	貨櫃卡車從國內港口 j 到國內縣市 k 的運輸時間
t_{tj}^1	貨櫃卡車轉運港 t 到國內港口 j 的運輸時間
a	碳稅價格
thc	貨櫃碼頭裝卸作業費
變數	
DI_{jk}	從國內港口 j 到國內縣市 k 的進口貨櫃量
DE_{kj}	從國內縣市 k 到國內港口 j 的出口貨櫃量
AI_{jk}	從國內港口 j 直接運送到國內縣市 k 的進口貨櫃量
AE_{kj}	從國內縣市 k 直接運送到國內港口 j 的出口貨櫃量
LTI_{tjk}	透過陸運從國內港口 t 轉運至國內港口 j 後運送到國內縣市 k 的進口貨櫃量
LTE_{kjt}	透過陸運從國內縣市 k 經由國內港口 j 轉運送到國內港口 t 出口的貨櫃量
STI_{tjk}	透過海運從國內港口 t 轉運至國內港口 j 再轉由陸運送到國內縣市 k 的進口貨櫃量
STE_{kjt}	從國內縣市 k 發貨，透過海運經由國內港口 j 轉運送到國內港口 t 出口的貨櫃量
VI_{jk}^1	從國內港口 j 運送進口貨櫃量到國內縣市 k 的貨櫃卡車數量(車次)
VE_{kj}^1	從國內縣市 k 運送出口貨櫃量到國內港口 j 的貨櫃卡車數量(車次)
VI_{tj}^m	運輸運具 m 從國內港口 t 轉運進口貨櫃到國內港口 j 的運具數

	量(艘次)
VE_{tj}^m	運輸運具 m 從國內港口 t 轉運出口貨櫃到國內港口 j 的運具數量(艘次)

3.3.1 含碳稅之沿海航運貨櫃運輸模型

3.3.1.1 目標函數與成本函數

透過相關法規、政策訂定使得外部成本內部化，使用碳稅價格 a 來評估增設碳稅對運送人總成本的影響，以及對排放量的約束效果。沿海航運貨櫃運輸碳排模型的目標是最小化運送人之成本與時間，目標式(8)、(9)如下，總成本為運輸成本(TC)加上碳稅價格乘(a)上排放量(EC)，運送時間使用貨櫃卡車運送國內貨櫃之總時間(TT)加上使用船舶轉運國內貨櫃所花費之總時間(ST)。

$$\text{Min} \quad TC + a \times EC \quad (8)$$

$$\text{Min} \quad TT + ST \quad (9)$$

運輸成本 (Transportation Cost, TC) 為使用貨櫃卡車從國內港口直達運輸或轉運運輸至國內各縣市，加上經由使用沿海航運服務在國內港口間轉運後運至國內縣市之成本，如式(10)，其中單位運輸成本 c 為在給定距離下使用一運具 m 運輸之成本，運輸成本 c 之計算參考至交通部運輸研究所(2018)、航港局商港服務費計費標準， thc 為台灣港口每 TEU 的場站處理費用；環境成本 (Environmental Cost, EC) 為根據貨櫃車、沿海航運運輸所排放的二氧化碳來計算，如式(11)，其中 p 為一輛貨櫃車或一艘船舶在給定距離下行駛所排放之二氧化碳量，本研究設定一輛貨櫃卡車最多能裝載 2 TEU，而船舶則根據不同噸位可裝載不同貨櫃量，該裝載量之設定數值根據港務公司之船舶裝卸歷史紀錄整理並取平均。運送時間之計算方式如式(12)、(13)，為在給定距離下運具之行駛時間乘上運具行駛次數，又因使用船舶轉運會多兩次吊櫃動作，平均裝卸一櫃所需時間為 5 分鐘，故需要再加上使用船舶轉運之櫃量乘上兩倍之 $5/60$ 。通過納入外部成本考量在追求總成本、時間最小的情況下，運量、運具選擇之改變。

$$\begin{aligned}
TC = & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (c_{jk}^1 \times VI_{jk}^1 + c_{kj}^1 \times VE_{kj}^1) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} (c_{tj}^1 \times VI_{tj}^1 + c_{jt}^1 \times VE_{jt}^1) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \sum_{m \neq 1} (c_{tj}^m \times VI_{tj}^m + c_{jt}^m \times VE_{jt}^m) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \left(thc \left(\sum_{k \in K} STI_{tjk} + \sum_{k \in K} STE_{ktj} \right) \right)
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
EC = & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (p_{jk}^1 \times VI_{jk}^1 + p_{kj}^1 \times VE_{kj}^1) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} (p_{tj}^1 \times VI_{tj}^1 + p_{jt}^1 \times VE_{jt}^1) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \sum_{m \neq 1} (p_{tj}^m \times VI_{tj}^m + p_{jt}^m \times VE_{jt}^m)
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
TT = & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (t_{jk}^1 \times VI_{jk}^1 + c_{kj}^1 \times VE_{kj}^1) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} (t_{tj}^1 \times VI_{tj}^1 + t_{jt}^1 \times VE_{jt}^1)
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
ST = & \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \sum_{m \neq 1} (t_{tj}^m \times VI_{tj}^m + t_{jt}^m \times VE_{jt}^m) \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \left(2 \times 5/60 \times \left(\sum_{k \in K} STI_{tjk} + \sum_{k \in K} STE_{ktj} \right) \right)
\end{aligned} \tag{13}$$

3.3.1.2 限制式

根據流量守恆定理，進口和出口貨櫃量限制式如下：式(14) 從國內縣市 k 到各個國內港口 j 的出口貨櫃量等於從國內縣市 k 出口之總貨櫃量；式(15) 從各個港口 j 到的縣市 k 進口貨櫃量等於縣市 k 進口之總貨櫃量；式(16) 從各個縣市 k 到港口 j 的出口貨櫃量等於港口 j 之總出口貨櫃量；式(17) 從港口 j 到各個縣

市 k 的進口貨櫃量等於港口 j 之進口貨櫃量；式(18) 從縣市 k 到港口 j 之出口貨櫃量等於從縣市 k 使用貨櫃車直達運輸及使用船舶或貨櫃車轉運至港口 j 之貨櫃量加總；式(19) 從港口 j 到縣市 k 之進口貨櫃量等於從港口 j 使用貨櫃車直達運輸及使用船舶或貨櫃車轉運至縣市 k 之貨櫃量加總。式(20)、(21)為對轉運總貨櫃量做限制。

$$\sum_{j \in J} DE_{kj} = ed_k, \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} DI_{jk} = id_k, \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} DE_{kj} = \sum e_j, \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} DI_{jk} = \sum i_j, \quad \forall j \in J \quad (17)$$

$$DE_{kj} = AE_{kj} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} LTE_{ktj} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} STE_{ktj}, \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (18)$$

$$DI_{jk} = AI_{jk} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} LTI_{jtk} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} STI_{jtk}, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{t \in J \setminus \{j\}} LTE_{ktj} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} STE_{ktj} = te_j, \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (20)$$

$$\sum_{t \in J \setminus \{j\}} LTI_{jtk} + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} STI_{jtk} = ti_j, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (21)$$

式(22)為港口容量限制式，進口、出口及轉運至港口 j 之貨櫃總量不能大於港口 j 的港口容量。

$$\sum_{k \in K} DE_{kj} + \sum_{k \in K} DI_{jk} \leq o_j, \quad \forall j \in J \quad (22)$$

式(23)、(24)、(25)、(26)為使用貨櫃車運輸進出口的總貨櫃量需小於等於使用貨櫃車作直達運輸或是轉運的貨櫃車裝載容量；式(27)、(28)為進出口國際櫃及使用沿海航運運輸之轉運的貨櫃量需小於等於船舶的裝載容量。

$$AE_{kj} \leq n^1 \times VE_{kj}^1, \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (23)$$

$$AI_{jk} \leq n^1 \times VI_{jk}^1, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{t \in J \setminus \{j\}} L TE_{kjt} \leq n^1 \times VE_{jt}^1, \quad \forall t, j \in J; t \neq j \quad (25)$$

$$\sum_{t \in J \setminus \{j\}} L TI_{tjk} \leq n^1 \times VI_{tj}^1, \quad \forall t, j \in J; t \neq j \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} \left(i_j + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \sum_{k \in K} ST I_{jtk} \right) \leq \sum_{m \in M \setminus \{1\}} \left(n^m \times \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} VI_{jt}^m \right) \quad (27)$$

$$\sum_{j \in J} \left(e_j + \sum_{t \in J \setminus \{j\}} \sum_{k \in K} ST E_{ktj} \right) \leq \sum_{m \in M \setminus \{1\}} \left(n^m \times \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} VE_{tj}^m \right) \quad (28)$$

式(29)、(30)為對貨櫃卡車車次之限制，參考自賴冠豪(2011)假設每輛卡車一天營業 10 小時，扣除假日一年營業天數為 320 天，以貨櫃車營業時間來限制車量，由於國內貨櫃轉運量約占整運量之兩成，為了使卡車營運量可滿足國內貨櫃轉運量故設定至少要有兩成的貨櫃卡車服務於港口到港口間之運送；式(31)、(32)為船舶進港艘次限制，本研究根據港務公司所提供之 2022 年進港艘次資料作為限制船舶進港艘次之參考依據。

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (t_{jk}^1 \times VI_{jk}^1 + t_{kj}^1 \times VE_{kj}^1) + \sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} (t_{jt}^1 \times VI_{jt}^1 + t_{tj}^1 \times VE_{tj}^1) \leq v^1 \times 10 \times 320 \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in J \setminus \{j\}} (t_{jt}^1 \times VI_{jt}^1 + t_{tj}^1 \times VE_{tj}^1) \geq 0.2 \times v^1 \times 10 \times 320 \quad (30)$$

$$VI_{jt}^m \leq v_{jt}^m, \quad \forall m \in M \setminus \{1\}, \forall t, j \in J; t \neq j \quad (31)$$

$$VE_{tj}^m \leq v_{tj}^m, \quad \forall m \in M \setminus \{1\}, \forall t, j \in J; t \neq j \quad (32)$$

最後，限制式(33)~(39)為對決策變數的非負及整數的限制。本研究將貨櫃單位轉換為 TEU，故限制式(33)~(36)之貨櫃量只需要為正數即可，限制式(37)~(39)為運具數量之限制，故設定其為正整數。

$$DI_{jk}, DE_{kj} \geq 0, \quad \forall j \in J', \forall k \in K \quad (33)$$

$$AI_{jk}, AE_{kj} \geq 0, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (34)$$

$$LTI_{tjk}, LTE_{kjt} \geq 0, \quad \forall k \in K, \forall t, j \in J; t \neq j \quad (35)$$

$$STI_{jtk}, STE_{ktj} \geq 0, \quad \forall k \in K, \forall t, j \in J; t \neq j \quad (36)$$

$$VI_{jk}^1, VE_{kj}^1 \in N, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (37)$$

$$VI_{tj}^1, VE_{jt}^1 \in N, \quad \forall t, j \in J; t \neq j \quad (38)$$

$$VI_{jt}^m, VE_{tj}^m \in N, \quad \forall t, j \in J; t \neq j \quad (39)$$

3.3.2 含碳交易之沿海航運貨櫃運輸模型

碳交易政策的原則為訂立一個碳排放量上限，對於相關企業、組織所排放之超過或未達到上限的排放單位可用於交易，相關企業、組織，例如：運送人、貨主，可根據其需要，分別購買或出售額外的排放單位，以降低成本及符合政策規定。為了模擬碳交易的實行，引入了除現有參數和變數之外的新參數和變數，如表 9，並假設所有關於碳量買賣之需求皆能被滿足。

表 9 沿海航運貨櫃運輸模型參數與變數定義

參數	
cap	碳排放量上限
ppc	購買每單位碳的價錢
psc	賣出每單位碳的價錢
變數	
C^P	購買之碳量
C^S	賣出之碳量

透過碳交易的實行可抑制碳排放量。本研究訂立一個碳排放量放上限 cap 來評估增設碳排放量上限對運送人總成本的影響，以及對排放量的約束效果。含碳交易之沿海航運貨櫃運輸模型的目標一樣是最小化運送人之成本與時間，

以下列出與含碳稅之沿海航運貨櫃運輸模型不同之處。

含碳交易之沿海航運運輸碳排模型的總成本目標式變為式(40)，總成本為運輸成本及購買每單位碳價乘上超出上限之排放量加上賣出每單位碳價乘上未達上限之排放量；而關於運送時間之目標式一樣為式(9)。

$$\text{Min } TC + ppc \times C^P - psc \times C^S \quad (40)$$

限制式新增了式(41)、(42)，設立一碳排放量上限後，代表環境成本之二氧化碳排放量扣掉購買之碳量再加上賣出之碳量需要等於碳排放量上限，並且購買及賣出之碳量為大於零之正數。含碳交易之沿海航運貨櫃運輸模型受制於式(14)~(39)及(41)、(42)。

$$EC - C^P + C^S = cap \quad (41)$$

$$C^P, C^S \geq 0 \quad (42)$$

3.3.3 求解方法與執行步驟

本研究所探討的問題為在納入二氧化碳排放成本後，運送人應選擇何種運送方式來安排國內貨櫃運送較有效益。由於影響運送人決策的因素很多，且其中目標可能發生相互衝突之情況，故使用多目標規劃 (Multiple Objective Programming, MOP)，試圖找出其中之柏拉圖最佳解(Pareto-optimal solution)，以供決策者做參考。

參見 3.3.1、3.3.2 章的數學模式可知其為一多目標混合整數線性規劃問題，將各目標函數給予一權重數，對加權後的每個目標值予以加總，使多目標決策問題轉為單目標數學規劃問題。權重設定依照決策者的要求，不同的權重會導致不一樣的最佳解，而運送人的決策考量不總是一樣的，例如：在旺季或是針對某些具有時效性之貨物，運送時間會是較重要之考慮因素，淡季時則可能傾向以運送成本較低之方式完成貨物之運送，因此本研究在最小化運輸成本及運

送時間的目標下，以敏感度分析探討不同權重(考量狀況)下，總成本會有何變化，以及不同碳排抑制手段之影響。

應用模型計算前，需先進行資料收集、整理。本研究根據港務公司所提供之 2022 年資料，整理出台灣四大商港各港的總進出口貨櫃量以及藍色公路轉運櫃量，並從中篩選出本研究所指定之船舶；根據航港局提供之 AIS 資料，整理出特定船舶軌跡，用以計算沿海航運在台灣四大商港間往來航行之排放量；最後整理台灣各縣市之總進出口貨量，不同運送路線之距離、時間和不同運具的營運成本，作為沿海航運貨櫃運輸模型之參數。

由於本研究欲了解在考慮碳排放後，使用沿海航運在台灣是否具有其效益所在，故透過整理出貨量流量資料與 AIS 資料，計算使用不同運具運送台灣國內貨櫃之二氧化碳排放量，以比較不同運輸方式排放量差異。最後，將相關數值輸入本研究所建之沿海航運貨櫃運輸碳排模型，模擬不同碳排政策下對運具選擇與排放量之影響。

第四章、實證研究

4.1 資料預處理

4.1.1 貨櫃流量整理

在收集資料的部分，首先根據港務公司所提供之 2022 年資料，以 TEU 為單位，整理出台灣四大商港各港的總進出口貨櫃量以及藍色公路轉運櫃量，如表 10，由於貨櫃尺寸不同，因此使用將其轉化成以 TEU 為單位時，會產生有小數的情況。接著，進一步整理出基隆港、台北港、台中港、高雄港四港間經由沿海航運(藍色公路)往來之貨櫃量，如表 11。

表 10 台灣四大商港裝卸貨櫃總量 (單位：TEU)

		基隆港	台北港	台中港	高雄港
國際櫃	進口櫃	1,570,634.50	904,650.00	1,175,030.00	2,296,326.00
	出口櫃	1,319,360.00	1,096,650.00	1,310,915.00	2,266,850.25
藍色公路	轉運卸櫃	102,174.50	354,180.00	499,436.00	296,844.75
	轉運裝櫃	181,961.50	250,141.00	446,481.50	316,889.30

資料來源：台灣港務公司

表 11 台灣四大商港間貨櫃流量 (單位：TEU)

迄 起	基隆港		台北港		台中港		高雄港	
	卸櫃	裝櫃	卸櫃	裝櫃	卸櫃	裝櫃	卸櫃	裝櫃
基隆港			0	1,303	10,466	28,645	25,383	5,245
台北港	655	1,749			86,709.25	75,896.75	183,040.5	52,105.5
台中港	5,175.25	780	103,000.5	32,394			86,390.25	61,746.25
高雄港	40,416	2,860	73,136.5	49,584.25	152,496.8	100,657.8		

資料來源：台灣港務公司

由於不同噸位的船舶在排放量方面會有明顯差異，所以本研究將船舶依照噸位分為八類，透過取平均值的方式計算排放量與成本。而台灣四大商港間之船舶進港艘次如表 12。

表 12 台灣四大商港間進港艘次分類數量

前一港	船舶噸位	基隆	台北	台中	高雄
基隆	~5000		5	111	72
	5000~7500		3	233	88
	7500~10000		0	1505	500
	10000~12500		0	20	13
	12500~15000		13	74	107
	15000~17500		1	604	504
	17500~20000		141	600	252
	20000~		0	0	449
台北	~5000	0		85	12
	5000~7500	30		0	266
	7500~10000	1		0	7
	10000~12500	0		0	0
	12500~15000	0		80	398
	15000~17500	34		240	172
	17500~20000	4		614	532
	20000~	0		458	181
台中	~5000	99	6		40
	5000~7500	26	25		303
	7500~10000	178	0		1486
	10000~12500	0	0		32
	12500~15000	6	51		127
	15000~17500	315	333		1023
	17500~20000	193	603		1248
	2000~	23	490		1117
高雄	~5000	3	26	96	
	5000~7500	3	37	141	
	7500~10000	65	4	341	
	10000~12500	0	0	0	
	12500~15000	15	192	255	
	15000~17500	12	81	779	
	17500~20000	353	148	875	
	20000~	280	424	617	

資料來源：本研究整理

根據初步的統計整理結果，可發現行經國內航線之船舶噸位大多集中於 15000~20000 GT，另外以專船經營之船舶數量為行經國內航線之總船舶的 6.7%，其中，又以總噸位為 12500~15000 GT 以及 17500~20000 GT 的船舶最多，如圖 7。

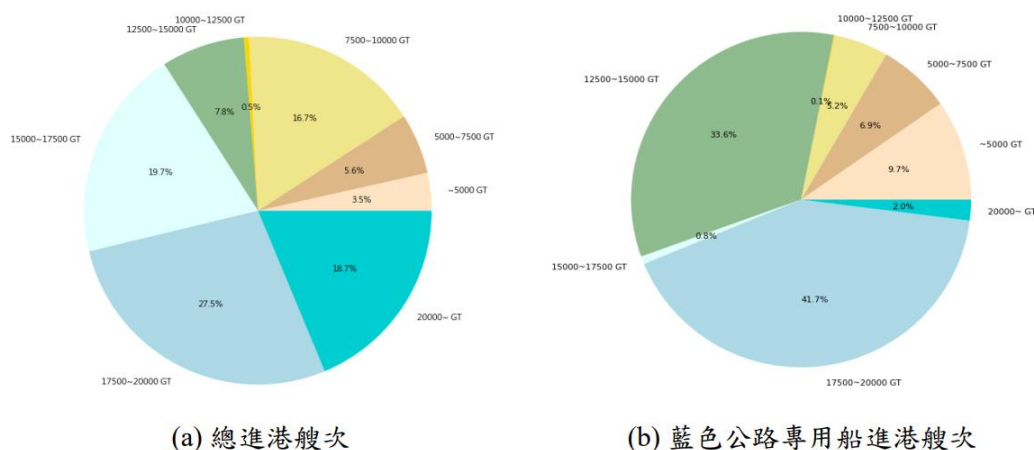


圖 7 國內線船舶進港艘次

資料來源：本研究繪製

另外，根據單因子變異數分析(ANOVA)可發現：在 95%的信心水準下，不同月份之間的裝卸貨櫃量具有顯著差異，不過不同月份之間的船舶進港艘次卻沒有顯著差異，可見圖 8，黑色折線代表進港艘次，綠色折線代表裝卸櫃量。因此，可由此推論裝卸貨櫃量和船舶艘次並沒有明顯的關聯性，所以本研究在設計沿海航運貨櫃運輸碳排模型設計的時候，為追求更符合實際狀況之排放量，選擇以船舶進港艘次而非貨櫃量為單位去計算排放成本。

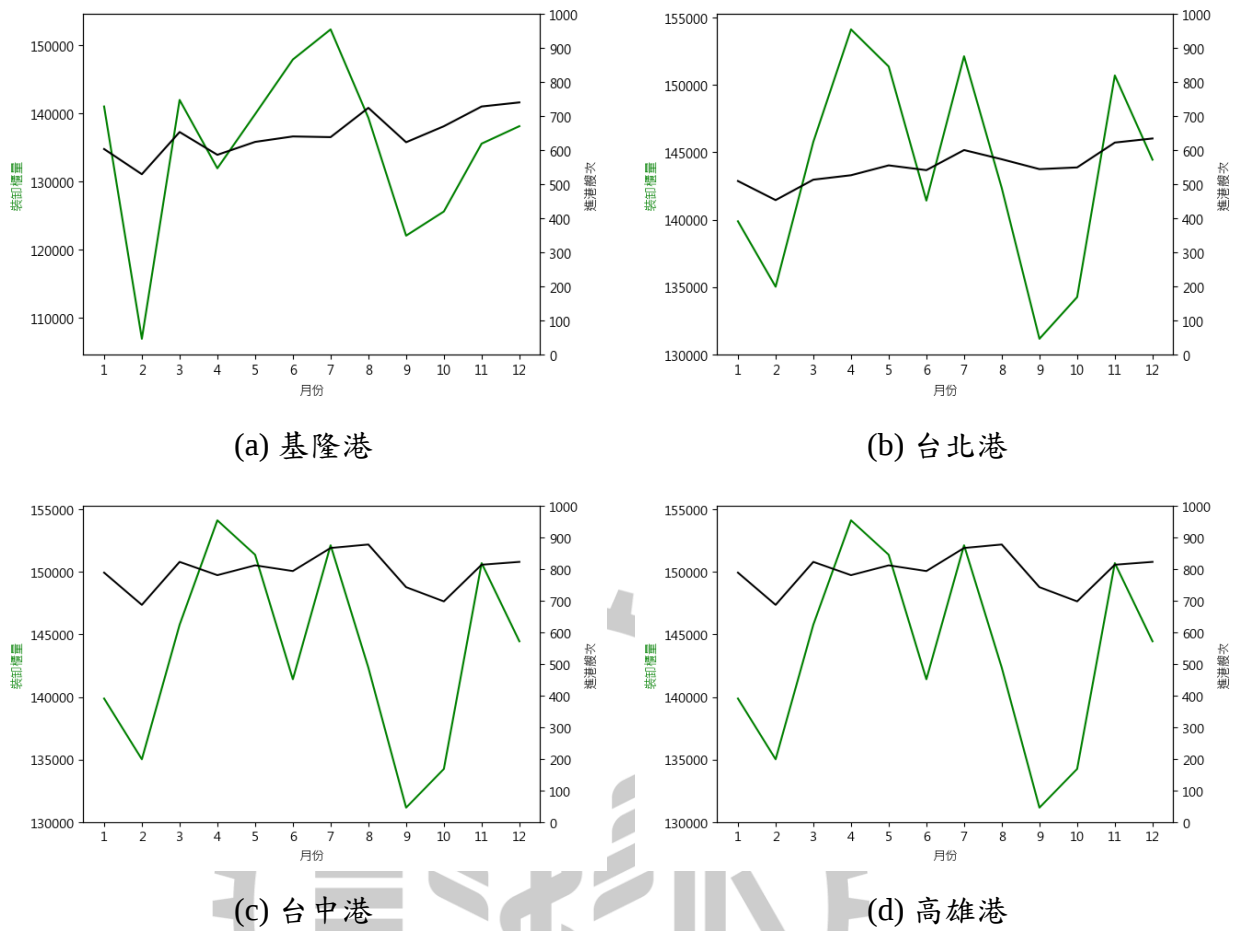


圖 8 2022 年船舶進港艘次與裝卸櫃量

資料來源：本研究繪製

4.1.2 AIS 資料處理

本研究透過 AIS 資料計算船舶之排放量，並將計算結果作為沿海航運貨櫃運輸碳排模型中有關船舶排放之參數依據。

AIS 資料處理流程如圖 9，本研究透過 python 與 QGIS 來處理大量 AIS 資料。AIS 初始資料中包含船名、MMSI、IMO 號碼、時間、位置、速度、航向、目的港和導航狀態等。由於接收 AIS 訊號之雷達不只一個，且 AIS 資料中有些欄位內容是仰賴船員手動輸入，因此可能會有資料重複以及錯誤的問題。所以需要先將 AIS 資料做初步的處理：移除 MMSI 長度不足 9 碼之數據、移除時間不在研究範圍內之資料、刪除重複數據。由於無法直接透過 AIS 資料確認該船舶是否為貨櫃船，故先篩選出船舶類別為 70~79 間之貨物船，在進一步以人工方

式作判別，並挑選出至少停靠台灣四大商港中之兩個港口的船舶，用以評估營運於沿海航運之船舶的排放量。

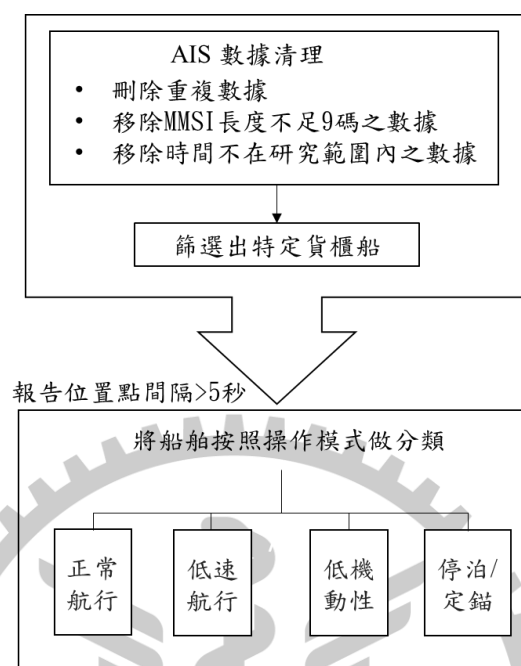


圖 9 AIS 資料處理流程

資料來源：本研究繪製

船舶之排放量可根據每艘船舶之每個報告位置間的距離、時間與速度來計算。由於 AIS 資料中，單一秒內的資料筆數很多，且報告位置與位置之間的間距遠低於計算船舶排放所需，故設立 5 秒為一門檻值，將位置報告點間隔低於 5 秒之位置點移除，以縮小數據集。雖然可由 AIS 資料中的導航狀態得知船舶航行狀態，但有時導航狀態不一定會是船舶實際的操作狀態，而不同的船舶操作狀態會有不同的燃油消耗率，進而影響船舶排放，故此時需透過船舶屬性、速度與實際航行位置，將船舶分為正常航行、低速航行、低機動性及停泊/定錨，如表 2，以便於計算船舶廢氣排放 (Song, 2014; Goldsworthy, 2017; Gan et al., 2022)。另外對於異常資料，如速度極快的離群值的軌跡，則需要去進一步分析造成原因，對於無法解釋之軌跡予以移除。圖 10 為一艘服務於沿海航運之船舶一個月的軌跡圖，經過整理後可計算出台灣國內港口間往來之平均航行、等待時間及相關之排放量。

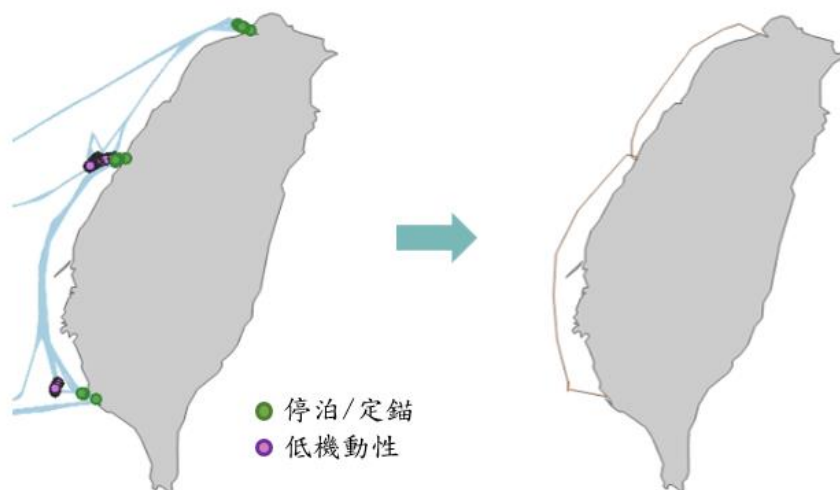


圖 10 AIS 船舶軌跡圖

資料來源：本研究繪製

4.1.3 模型之其他數值範例

本研究所建立之沿海航運貨櫃運輸碳排模型涉及貨櫃由港口到港口以及港口到城市之運量，有關港口到城市之貨櫃流量，參考自交通部統計處統計年鑑(民國 110 年)之資料，將原始資料之貨量公噸數按照各地區佔所有進出口貨櫃量(TEU)的比例轉換計算而得，再根據 2022 進出口貨櫃量之比例做調整，詳細資料可見表 13，而關於貨櫃由港口到港口之運量資料參考 4.1.1 由港務公司所得之資料。

根據港務公司資料，設定基隆港的裝載容量為 320 萬 TEU；台北港的裝載容量為 270 萬 TEU；台中港的裝載容量為 340 萬 TEU；高雄港的裝載容量為 1280 萬 TEU。本研究設定每一輛貨櫃卡車所能裝載的最大容量為 2 TEU，並假設每艘船可裝載到台灣的進出口貨櫃量有限：設定總噸位 5000 噸以下之船舶可裝載之最大容量為 500 TEU；總噸位 5000~7500 的船舶可裝載之最大容量為 650 TEU；總噸位 7500~10000 的船舶可裝載之最大容量為 800 TEU；總噸位 10000~12500 的船舶可裝載之最大容量為 1200 TEU；總噸位 12500~15000 的船舶可裝載之最大容量為 1600 TEU；總噸位 15000~17500 的船舶可裝載之最大容量為 1800 TEU；總噸位 17500~20000 的船舶可裝載之最大容量為 2000 TEU；總噸位 20000 以上

的船舶可裝載之最大容量為 4000 TEU。

表 13 台灣各縣市的進出口貨櫃量 (單位:TEU)

	進口量	出口量
新北市	795904.02	772931.89
台北市	34092.56	37773.56
桃園市	1219780.13	1190546.54
台中市	957943.32	1420153.33
台南市	446079.95	644722.04
高雄市	2078369.94	1643439.46
宜蘭縣	32010.95	21997.63
新竹縣	180373.17	108171.33
苗栗縣	43666.31	69176.94
彰化縣	434498.93	134029.41
南投縣	52490.44	81141.90
雲林縣	161107.95	30712.54
嘉義縣	150481	172382.45
屏東縣	29167.32	39287.22
台東縣	13650.24	11626.76
花蓮縣	0	0
基隆市	563294.42	664098.60
新竹市	6364.60	113551.63
嘉義市	0	33504.78
總量	7199275.25	7189248.01

資料來源：本研究整理

貨櫃卡車之數量參考自交通部統計處統計年鑑(民國 110 年)，設定總貨櫃車數量上限為 13830 輛。而船舶數量設計為可滿足所有貨量裝載，但對不同噸位大小之船舶數量比例有所限制，其參考至 2022 年船舶實際進口艘次，可見表 12。關於陸運貨櫃卡車於港口間運送之成本參考自交通部運輸研究所(2018)，陸運貨櫃卡車於港口至台灣各縣市運送之成本則參考自賴冠豪 (2011)。而沿海航運之運送成本參考自航港局商港服務費收費標準及交通部運輸研究所(2018)，為租金成本、油耗成本、相關商港服務費以及裝卸費用加總。

每單位卡車及船舶之二氧化碳排放量根據本研究之 4.2 節計算結果。台灣國

內貨櫃車運輸是透過國道 1 號與國道 3 號將貨櫃運至各個港口與縣市，港口與港口間之運輸距離與時間如表 14，港口到城市之運輸距離與時間如表 15；而船舶運輸時間則根據 AIS 資料，不考慮南向北向差異，取平均運輸時間，如表 16。另外，由於本研究之目的並非探討碳稅價格以及碳交易之收費標準，故碳稅價格則訂為每噸十元以及每噸一百元，以討論收費金額差異對運量轉變及運具選擇、二氧化碳排放量的影響，並將碳交易之買進與賣出價格設定為一百元，方便與碳稅模型做比較。

表 14 港口與港口間的旅行距離和時間

	距離(km)				時間(h)			
	基隆港	台北港	台中港	高雄港	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		51	181	389		0.8	2.27	4.38
台北港	51		162	369	0.8		2.17	4
台中港	181	162		221	2.27	2.17		2.73
高雄港	389	369	221		4.38	4	2.73	

資料來源:本研究整理

表 15 港口與城市之間的旅行距離和時間

	距離(km)				時間(km)			
	基隆港	台北港	台中港	高雄港	基隆港	台北港	台中港	高雄港
新北市	44.3	18.1	196	396	1.17	0.35	3.33	6.33
台北市	24.7	28.9	171	371	0.50	0.63	2.77	5.72
桃園市	68.8	48.3	126	326	1.18	0.77	2.12	5.07
台中市	186	167.2	22.7	208	2.92	2.17	0.90	3.40
台南市	332	310	162	67.3	4.93	3.30	2.72	1.72
高雄市	374	355	204	18.1	5.42	3.73	3.18	0.85
宜蘭縣	75.3	88	227	427	1.65	1.38	3.83	6.82
新竹縣	107	70.5	110	310	1.93	1.08	2.00	4.98
苗栗縣	163	114	78.6	277	2.87	1.58	2.00	4.73
彰化縣	212	187	40.9	182	3.27	2.15	1.05	3.03
南投縣	277	235	103	270	3.27	2.57	1.05	3.03
雲林縣	246	226	75.6	158	3.90	2.60	1.67	2.85
嘉義縣	294	268	131	139	4.57	2.87	2.32	2.65
屏東縣	408	379.1	238	47	6.05	3.85	3.82	1.65
台東縣	382	379.1	432	241	11.40	5.77	9.87	7.63
花蓮縣	238	181.6	432	241	6.92	3.00	7.43	9.05
基隆市	7.5	49.5	190	238	0.32	0.73	3	5.97
新竹市	103	71.5	90.8	294	1.77	1.03	2.35	4.67
嘉義市	274	254.6	104	128	4.12	2.87	1.90	2.40

資料來源:本研究整理

表 16 船舶平均運輸時間(單位:小時)

	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		4	7	16
台北港	4		6	15
台中港	7	6		9
高雄港	16	15	9	

資料來源:本研究整理

4.2 排放量計算結果與比較

本研究只考慮有在台灣四大商港至少連續停靠 2 個港口的貨櫃船，由於相

同的船舶可能在一年中重複抵達同樣的港口數次，所以本研究以艘次為單位計算。所用以計算排放之貨櫃船為總貨櫃船數量之 37%。關於停泊以及等待時所產生的排放量計算結果如圖 11。另外，由於這裡並非將所有到達港口的船舶都列入考慮，而是只考慮有行經國內航線之貨櫃船，因此會與以完整資料進行計算之結果有所不同。

表 17 各港之貨櫃船進港艘次

停靠港	基隆港	台北港	台中港	高雄港
總貨櫃船	7758	6619	9509	32458
藍色公路貨櫃船	1640	2583	7728	8929

資料來源：本研究整理

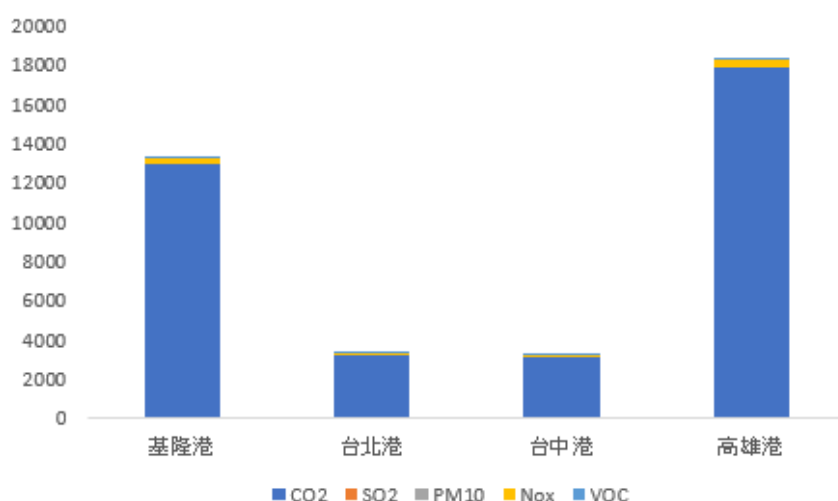


圖 11 沿海航運貨櫃船在港口停泊/定錨之排放

資料來源：本研究繪製

2022 年貨櫃船於國內線航行造成的排放量計算結果如表 18。根據排放量計算結果，可發現國內線貨櫃船在港口等待、停泊(航速<1 節)所造成排放量為占船舶航行所造成排放量的 13.9%，為總排放之 12.2%，如圖 12。

表 18 藍色公路貨櫃船航行排放量

CO2				
	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		799.91	25829.70	43377.60
台北港	227.40		9922.17	28822.88
台中港	7514.70	10318.58		65371.86
高雄港	17692.62	17667.46	38645.73	
SO2				
	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		2.16	79.25	132.31
台北港	0.70		30.42	88.26
台中港	23.06	31.63		200.01
高雄港	54.23	53.91	117.51	
PM10				
	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		0.36	16.54	45.66
台北港	0.12		5.18	14.99
台中港	4.16	5.40		33.94
高雄港	12.18	9.20	20.04	
NOx				
	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		19.47	724.02	1218.18
台北港	6.32		279.72	811.19
台中港	210.64	290.90		1838.53
高雄港	496.81	497.25	1086.82	
VOC				
	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		0.36	13.20	22.32
台北港	0.12		5.10	14.79
台中港	3.84	5.30		33.45
高雄港	9.11	9.06	19.78	

資料來源：本研究整理

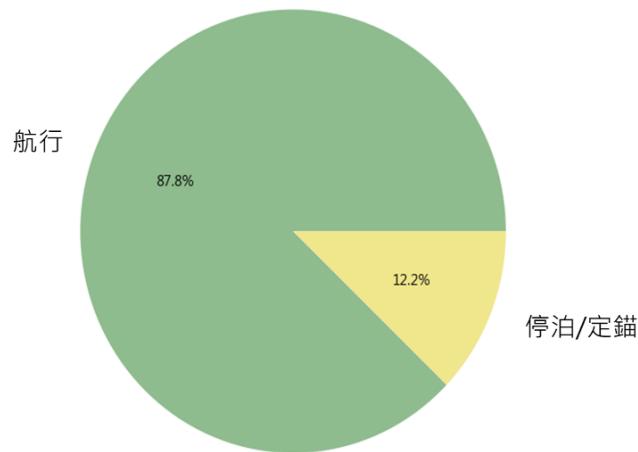


圖 12 船舶操作狀態排放量比較

資料來源：本研究繪製

為討論使用海運或陸運轉運所排放之二氧化碳差異，本研究透過 2022 年實際進出口貨量結合 2.2 之公式計算運送相同貨量的情況下，使用沿海航運與卡車運輸之排放量，表 19 為若全部使用沿海航運所造成之二氧化碳排放量計算結果，表 20 為若全部使用貨櫃卡車運送所造成之二氧化碳排放量計算結果。根據實際貨量計算結果可知：由基隆港轉運至台北港、台中港、高雄港及台北港轉運至基隆港和台中港轉運至高雄港，以陸運方式運送是較有環境效益的(二氧化碳排放量較低)；由高雄港轉運至基隆港、台北港、台中港及台中港轉運至基隆港、台北港和台北港轉運至台中港、高雄港，以海運方式運送是較有環境效益的。圖 13、圖 14 為依照二氧化碳排放量計算結果內容所繪製之比較圖，縱軸為二氧化碳排放量，橫軸根據港口到港口間的距離由短到長排排序之航段，從圖中可明顯看到，在運送南下貨櫃時部分段使用卡車運輸較有利，部分則使用船舶運輸較有利，而北上的貨櫃除台北港到基隆港，其餘使用船舶運送皆比較具有優勢，推測是因為北上的貨量較南下貨量多的緣故。從此結果可推論，使用沿海航運之環境效益中，距離並非影響的唯一因素，只要在貨量足夠多的情況下，以船舶運送就會比較具有環境優勢。

表 19 使用沿海航運轉運之 CO2 排放量

起 \ 迄	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		799.91	25829.70	43377.61
台北港	227.40		9922.17	28822.88
台中港	7514.70	10318.58		65371.86
高雄港	17692.62	17667.46	38645.73	
到港口之總排放	25434.72	28785.95	38645.73	137572.35

資料來源：本研究整理

表 20 使用貨櫃卡車轉運之 CO2 排放量

起 \ 迄	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		417.51	25210.98	42879.53
台北港	165.47		16510.50	37897.03
台中港	9096.33	16077.64		64350.19
高雄港	23547.71	32339.29	42589.74	
到港口之總排放	32809.51	48834.44	84311.22	145126.75

資料來源：本研究整理

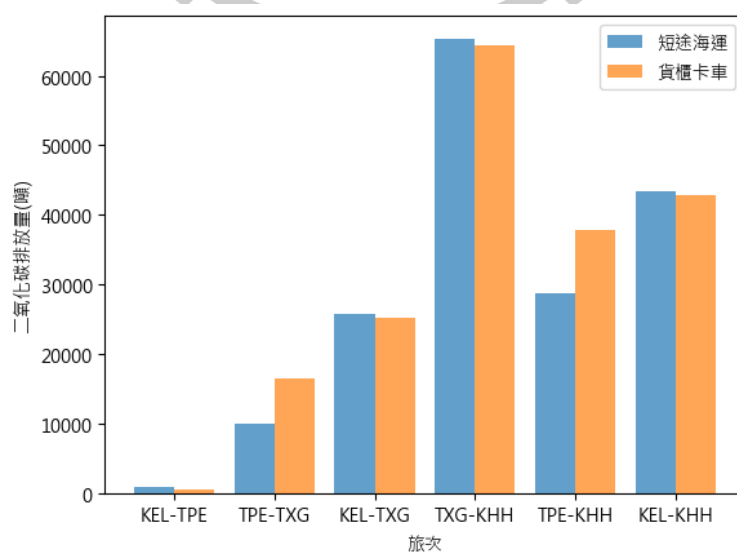


圖 13 國內貨櫃轉運南下段排放量比較

資料來源：本研究繪製

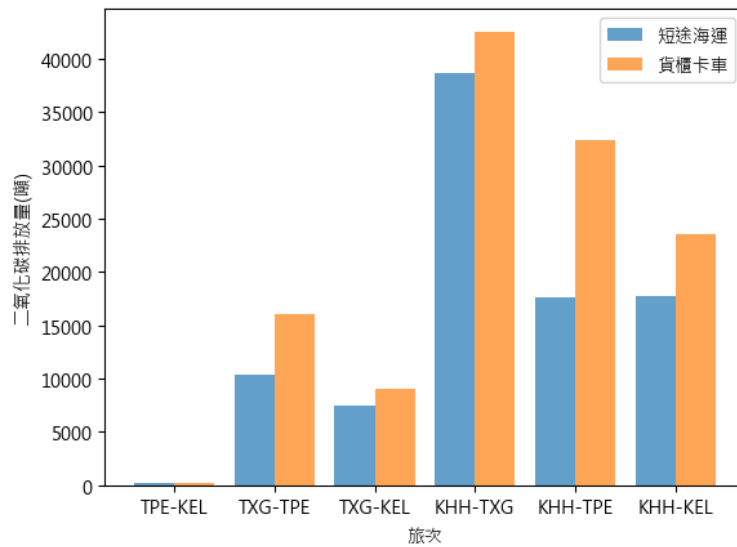


圖 14 國內貨櫃轉運北上段排放量比較

資料來源：本研究繪製

目前實務上亦有專營台灣沿海航運路線之船舶(藍色公路專用船)，根據 2022 年之資料，藍色公路專用船的總進港艘次如表 21。若從單就二氧化碳排放成本的角度來看，以專用船經營國內港口間之貨櫃運送，至少需要裝載一定數量之貨櫃才能符合環境效益，以總噸位小於 5000 以下的船舶為例，結果可見表 22；以總噸位位於 5000~7500 的船舶為例，結果可見表 23；以總噸位位於 7500~10000 的船舶為例，結果可見表 24；以總噸位位於 10000~12500 的船舶為例，結果可見表 25；以總噸位位於 12500~15000 的船舶為例，結果可見表 26；以總噸位位於 15000~17500 的船舶為例，結果可見表 27；以總噸位位於 17500~20000 的船舶為例，結果可見表 28；以總噸位為 20000 以上的船舶為例，結果可見表 29。

表 21 藍色公路專用船的總進港艘次

迄 起	基隆港	台北港	台中港	高雄港
基隆港		1	82	19
台北港	0		105	267
台中港	0	194		412
高雄港	2	172	144	

資料來源：台灣港務公司

表 22 5000 GT 以下專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			1.95	138.07	4.83	96.43	14.85	137.82
台北	1.95	138.07			3.65	81.24	12.90	126.30
台中	4.83	96.43	3.65	81.24			9.25	151.17
高雄	14.85	137.82	12.90	119.72	9.25	151.17		

資料來源：本研究整理

表 23 5000~7500 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			2.24	158.92	5.56	110.99	15.99	148.41
台北	2.24	158.92			4.03	89.85	13.75	134.50
台中	5.56	110.99	4.03	89.85			9.72	158.70
高雄	15.99	148.41	13.75	134.50	9.72	158.70		

資料來源：本研究整理

表 24 7500~10000 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			2.7748	196.42	6.8784	137.20	18.0474	167.49
台北	2.7748	196.42			4.7275	105.36	15.2726	149.42
台中	6.8784	137.20	4.7275	105.36			10.5451	172.26
高雄	18.0474	167.49	15.2726	149.42	10.5451	172.26		

資料來源：本研究整理

表 25 10000~12500 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			2.77	196.42	6.88	137.20	18.05	167.49
台北	2.77	196.42			4.73	105.36	15.27	149.42
台中	6.88	137.20	4.73	105.36			10.55	172.26
高雄	18.05	167.49	15.27	149.42	10.55	172.26		

資料來源：本研究整理

表 26 12500~15000 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			3.69	261.13	9.14	182.39	21.59	200.40
台北	3.69	261.13			5.93	132.10	17.90	175.17
台中	9.14	182.39	5.93	132.10			11.98	195.65
高雄	21.59	200.40	17.90	175.17	11.98	195.65		

資料來源：本研究整理

表 27 15000~17500 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要裝載 櫃量(TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			4.10	290.11	10.16	202.63	23.18	215.13
台北	4.10	290.11			6.47	144.08	19.08	186.70
台中	10.16	202.63	6.47	144.08			12.62	206.12
高雄	23.18	215.13	19.08	186.70	12.62	206.11		

資料來源：本研究整理

表 28 17500~20000 GT 專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			4.48	317.48	11.12	221.75	24.68	229.05
台北	4.48	317.48			6.97	155.39	20.20	197.59
台中	11.12	221.75	6.97	155.39			13.22	216.01
高雄	24.68	229.05	20.20	197.59	13.22	216.01		

資料來源：本研究整理

表 29 20000 GT 以上專用船之裝載量

迄 起	基隆		台北		台中		高雄	
	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)	CO ₂ 排放量	至少需要 裝載櫃量 (TEU)
基隆			4.67	330.66	11.58	230.95	25.40	235.75
台北	4.67	330.66			7.22	160.83	20.73	202.83
台中	11.58	230.95	7.22	160.83			13.51	220.77
高雄	25.40	235.75	20.73	202.83	13.51	220.77		

資料來源：本研究整理

4.3 沿海航運貨櫃運輸碳排模型實證分析

沿海航運貨櫃運輸碳排模型為一個線性規劃問題，本研究使用 Gurobi Optimizer 搭配 python 語言進行求解。

根據 2022 年船舶在台灣國際商港之裝卸量資料發現，各月份的裝卸量雖在統計上有顯著差異，但各月分之船舶進港艘次數卻沒有顯著差異，因此在計算成本與排放量方面，改由以運具而非貨櫃為單位，並且在沿海航運方面，結合了 AIS 計算船舶排放量之方法，將二氧化碳排放量納入模型中，使模擬結果更貼近現況。另外由於不同噸位之船舶在排放量上會有差異，故本研究將船依照不同噸位分為 8 類，以利計算。

本研究討論了台灣國內貨櫃的流動情形，研究對象分為國內港口與各縣市。透過沿海航運貨櫃運輸碳排模型可以看出貨櫃在港口與港口間以及港口與城市之間流動，並且分別計算使用貨櫃卡車與沿海航運之總成本(運輸成本+外部成本)。本研究將運送人最在意之運送成本及時間因素設為目標值，建立雙目標整數規劃模式求出柏拉圖前緣，並探討在不同情況下之排放量差異。另外，本篇研究欲探討在不同措施下，內陸貨櫃車運輸與沿海航運船舶運輸之間的運具選擇行為，以及該選擇行為對碳排放量之影響。因此除了找出柏拉圖最佳前緣外，通過不同措施比較(碳稅、碳交易)，調整決策參數來使得目標值有所改變，並藉此觀察對運量轉變影響以及排放量制約效果。

沿海航運貨櫃運輸碳排模型的目的，為探討在貨櫃卡車數量有限且需要考量二氧化碳排放量的情況下，貨運業者如何選擇運送方式來運送國內貨櫃，在最小化運輸成本及運送時間的目標下，探討成本的變化以及不同碳排抑制手段之影響。研究結果可從兩個面向解讀:首先，運送人作為決策者，可依照需求選擇最有利之方式安排國內貨櫃運送，並且也可在相關碳排放規定上發揮影響力，爭取對其較有利之方式；而第三者(如政府、相關組織)，可根據本研究模型模擬不同狀態下運送人選擇行為所造成之排放量，作為制定相關規定之參考。

4.3.1 不考慮碳排放模型之結果

根據沿海航運貨櫃運輸碳排模型求解得到的結果，在沒有考慮二氧化碳排放量(沒有任何二氧化碳抑制手段)的情況下，不論是基於成本或時間面考量，業者在安排台灣國內貨櫃轉運會優先選擇使用卡車的方式，如表 29，其中 w1 為運送成本目標式之權重，w2 為運送時間目標式之權重。只考慮時間因素(成本權重為 0、時間權重為 1) 時，二氧化碳排放量明顯高出許多，而當開始考量成本因素後，二氧化碳排放量明顯降低，不過並沒有隨著總成本減少而降低。不同考量情境下時間與成本之關係如圖 15。

表 30 僅成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)
0	1	1,436	84.6	17,662.07	4,781,893	0
0.05	0.95	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.1	0.9	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.15	0.85	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.2	0.8	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.25	0.75	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.3	0.7	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.35	0.65	1,282	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.4	0.6	1,281	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.45	0.55	1,281	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.5	0.5	1,281	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.55	0.45	1,281	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.6	0.4	1,281	84.6	14,533.17	4,781,893	0
0.65	0.35	1,067	84.7	14,533.17	4,781,893	0
0.7	0.3	1,067	84.7	14,533.17	4,781,893	0
0.75	0.25	1,026	84.7	14,533.17	4,781,893	0
0.8	0.2	1,018	84.7	14,533.17	4,781,893	0
0.85	0.15	844	84.7	14,533.17	4,781,893	0
0.9	0.1	700	84.8	14,533.17	4,781,893	0
0.95	0.05	698	84.8	14,533.17	4,781,893	0
1	0	681	84.9	14,533.17	4,781,893	0

資料來源:本研究整理

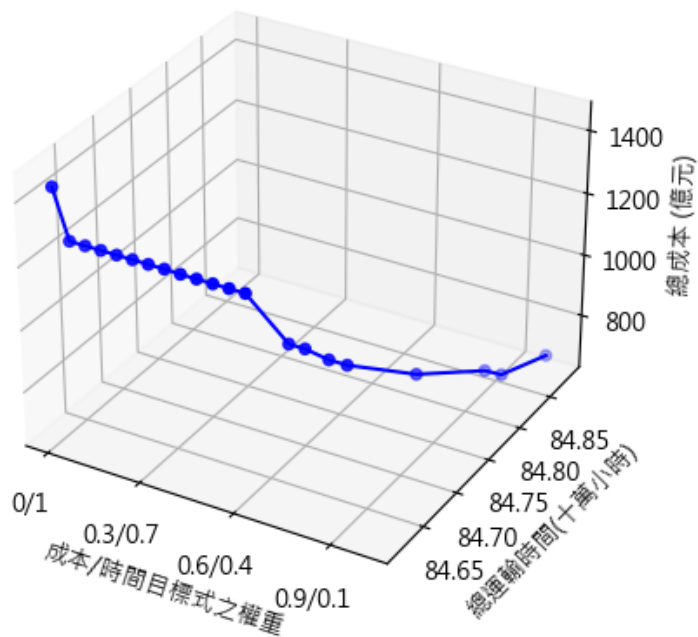


圖 15 模型結果-不考慮碳排放成本

資料來源:本研究繪製

4.3.2 考量碳稅模型之結果

加入碳稅後，根據模型求解得到的結果，當碳稅設為每噸十元，成本權重為 0.95、時間權重為 0.05 時，會有 1267557 TEU 的貨量轉移至海上運送，為本來陸地運輸貨量的 26.5%，此時，二氧化碳排放量相較未課徵碳稅時，下降 12.96%；當只考慮成本因素時(成本權重為 1、時間權重為 0)，會有 3053483 TEU 的貨量轉移至海上運送，為本來陸地運輸貨量的 63.86%，此時，二氧化碳排放量相較未課徵碳稅時，下降 18.01%。當碳稅提高為每噸一百元時，成本權重為 0.65、時間權重為 0.35 時，就會有 1267557 TEU 的貨量轉移至海上運送，與碳稅為每噸十元，成本權重為 0.95、時間權重為 0.05 之結果相同；當成本權重來到 0.85、時間權重為 0.15 時，便會有 3053483 TEU 的貨量轉移至海上運送，與碳稅為每噸十元，成本權重為 1、時間權重為 0 之結果相同。

表 31 碳稅=10 元時成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)	CO2 排放量 下降比例
0	1	19,099	84.6	17,662.08	4,781,893	0	0.00%
0.05	0.95	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.1	0.9	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.15	0.85	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.2	0.8	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.25	0.75	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.3	0.7	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.35	0.65	15,164	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.4	0.6	15,162	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.45	0.55	15,162	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.5	0.5	15,162	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.55	0.45	15,162	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.6	0.4	15,162	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.65	0.35	14,948	84.7	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.7	0.3	14,948	84.7	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.75	0.25	14,907	84.7	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.8	0.2	14,900	84.7	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.85	0.15	14,725	84.7	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.9	0.1	14,581	84.8	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.95	0.05	13,462	86.9	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
1	0	12,777	90.3	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%

資料來源:本研究整理

表 32 碳稅=100 元時成本與時間考量下之成本、碳排、貨櫃量變化

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)	CO2 排放量 下降比例
0	1	178,057	84.6	17,662.08	4,781,893	0	0.00%
0.05	0.95	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.1	0.9	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.15	0.85	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.2	0.8	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.25	0.75	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.3	0.7	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.35	0.65	139,419	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.4	0.6	139,417	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.45	0.55	139,417	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.5	0.5	139,417	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.55	0.45	139,417	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.6	0.4	139,417	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.65	0.35	127,735	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.7	0.3	127,735	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.75	0.25	127,644	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.8	0.2	127,636	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.85	0.15	120,324	90.0	11,916.41	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.9	0.1	120,044	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.95	0.05	120,042	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
1	0	120,032	90.7	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%

資料來源:本研究整理

當碳稅設定為每噸十元的情況下，運送時間相較於未徵碳稅時有明顯提高的情況，為追求最有效益之方式，業者在成本考量權重高於 0.95 後，便會開始將部份國內貨櫃轉由船舶運送，如圖 16，紅色部分為開始使用船舶轉運；而當碳稅提高至每噸一百元時，不同考量情況下運送時間的變化基本上與碳稅設定為十元時一致，但業者在成本考量權重高於 0.65 後，便會開始將部份國內貨櫃轉由船舶運送，如圖 17。另外，從圖 18(紅色部分為有使用船舶轉運)可知在不考慮碳排放成本的情況下點座標分布較為平均，業者傾向依照當下狀況考量該選擇成本較小或是時間較短之方式安排貨物運送，二氧化碳排放量介於 14500~18000 千萬噸之間。碳稅設定為每噸十元的情況下，點座標開始往中間

部分集中，運送時間相較於未徵碳稅時有明顯提高的情況，二氧化碳的排放量也有下降趨勢，約介於 11900~18000 千萬噸之間，但比起排放量最低的選項，業者在多數情況下會傾向選擇中間值，此時排放量約為 13800 千萬噸。而當碳稅提高至每噸一百元時，點座標逐漸往右邊聚集，二氧化碳排放量的範圍同碳稅設定為每噸十元一樣，介於 11900~18000 千萬噸之間，但相比碳稅較低的情況，業者會更願意去選擇排放量較少的運送方式，此時排放量約為 11900 千萬噸。

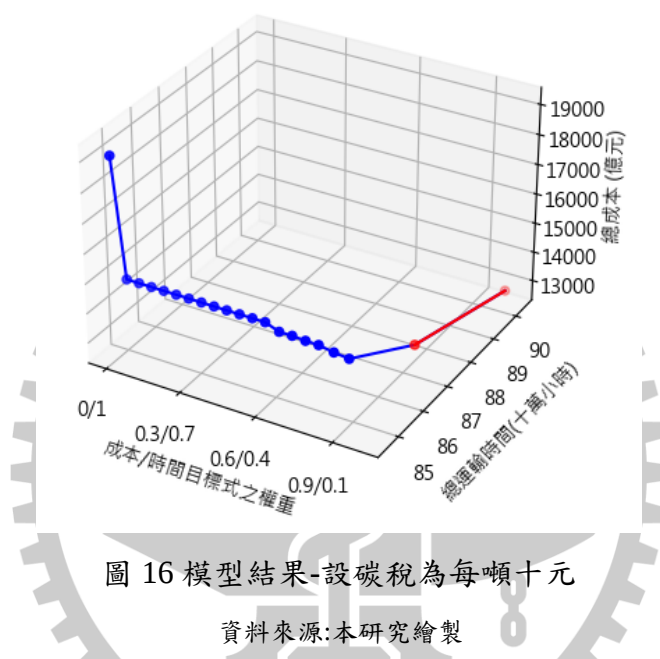


圖 16 模型結果-設碳稅為每噸十元

資料來源:本研究繪製

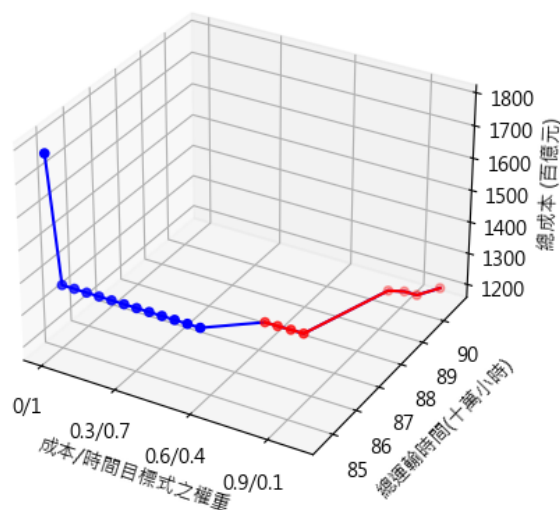


圖 17 模型結果-設碳稅為每噸一百元

資料來源:本研究繪製

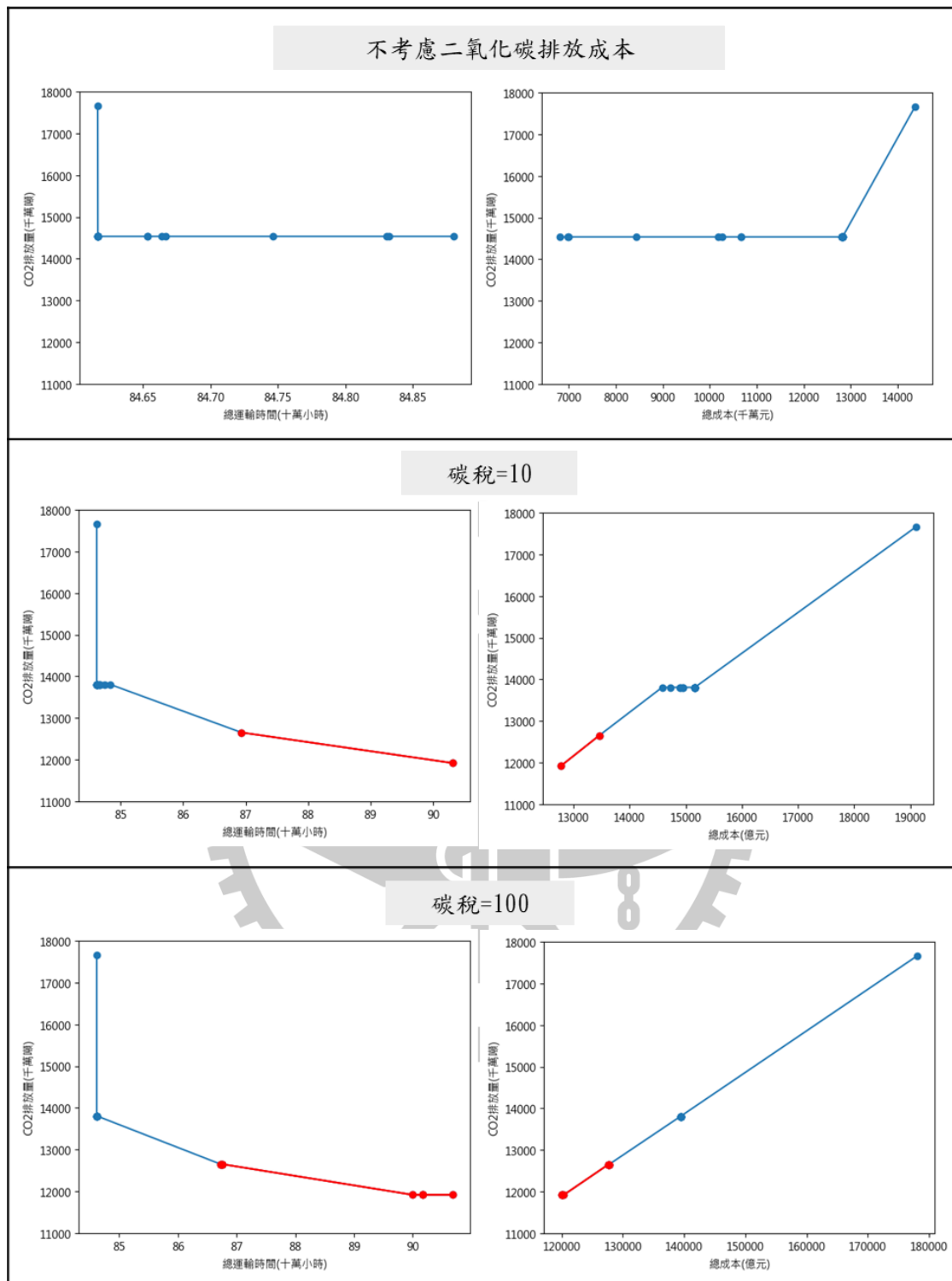


圖 18 碳排放量與總運輸時間、總成本之關係

資料來源:本研究繪製

碳稅設定為每噸十元、每噸一百元在不同考量情況下，對於運送時間的影響結果幾乎相同，但在總成本上會有很大的差異。而在只考慮一種最佳策略，即只選擇最小化總運送時間或最小化總運送成本時，碳稅設定為每噸十元和每噸一百元對轉運量、碳排放量之影響結果會是一樣的，然而在現實生活中影響運送人運具選擇之因素並非單一原因，本研究以同時考量最小化總運送成本及時間情境為例，此時提高碳稅的可以促使更多運送人採取降低碳排放量之行為，提升更多業者使用船舶轉運之意願。

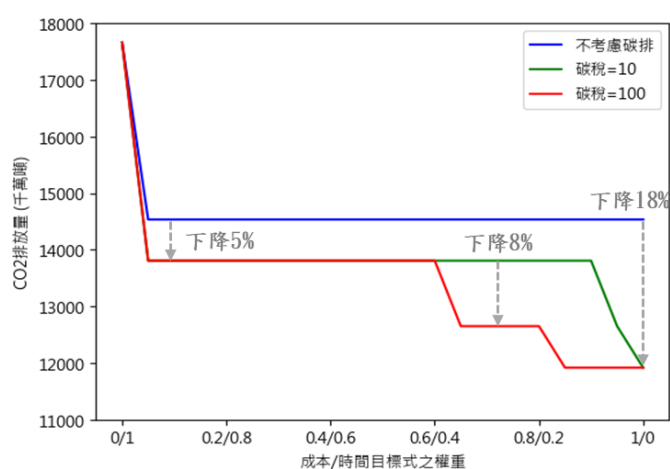


圖 19 碳稅模型排放量比較

資料來源:本研究繪製

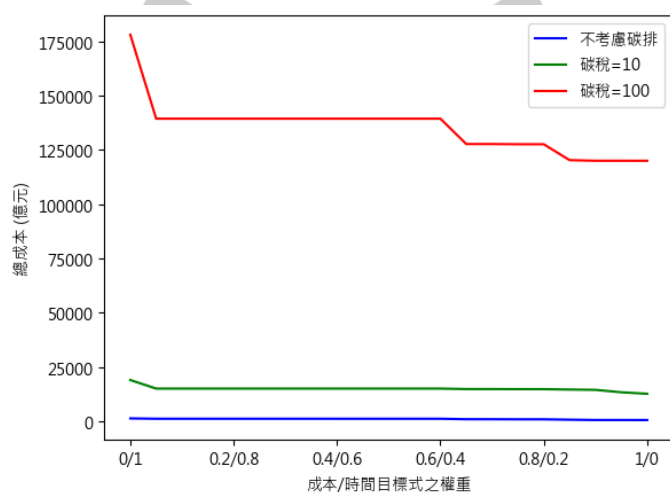


圖 20 碳稅模型成本比較

資料來源:本研究繪製

4.3.3 考量碳交易模型之結果

考量碳交易之沿海航運貨櫃運輸碳排模型目的之一是為了與碳稅模型進行比較，以供運送人參考對其較有利之碳排放抑制方法。這裡選擇碳稅為一百元之模型為基準，挑選其中出最小(11916.42 千萬噸)、中間(13806.10 千萬噸)、最大(17662.08 千萬噸)的二氧化碳排放量，將其作為碳排放量上限分別帶入碳交易模型，並且為了方便比較，將購買每單位碳的價錢(ppc)與賣出每單位碳的價錢(psc)皆設為 100 元，並假設所有運送人賣出或買進之碳排需求皆能被滿足。

不同碳排放量上限模型之結果可見表 33、表 34、表 35。三種結果中，碳排放量、轉運量及時間基本上沒有太大差異，最主要的差異來自總成本，當碳排放量上限由原來的最小(11916.42 千萬噸)提高到中間(13806.10 千萬噸)時，運送人使用船舶轉運後，可以出售省下來的碳排放量，這時總成本金額為負數，代表運送人完全可以靠出售省下來的碳排放量來補則運送成本支出，而當排放量上提高到最大 (17662.08 千萬噸) 時，運送人無論在何種情境下，都完全可依賴出售省下來的碳排放量來補則運送成本支出。

表 33 碳排放量上限=11916.42 千萬噸

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)	CO2 排放量 下降比例
0	1	55,565	84.6	17328.71	4,781,893	0	0.00%
0.05	0.95	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.1	0.9	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.15	0.85	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.2	0.8	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.25	0.75	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.3	0.7	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.35	0.65	20,254	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.4	0.6	20,253	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.45	0.55	20,253	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.5	0.5	20,253	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.55	0.45	20,253	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.6	0.4	20,253	84.6	13806.10	4,781,893	0	5.00%
0.65	0.35	8,571	86.7	12650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.7	0.3	8,571	86.7	12650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.75	0.25	8,480	86.8	12650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.8	0.2	8,471	86.8	12650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.85	0.15	1,160	90.0	11916.41	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.9	0.1	880	90.2	11916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.95	0.05	878	90.2	11916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
1	0	861	90.3	11916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%

資料來源:本研究整理

表 34 碳排放量上限=13806.10 千萬噸

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)	CO2 排放量 下降比例
0	1	366,679	84.6	17,328.71	4,781,893	0	0.00%
0.05	0.95	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.1	0.9	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.15	0.85	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.2	0.8	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.25	0.75	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.3	0.7	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.35	0.65	13,576	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.4	0.6	13,559	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.45	0.55	13,559	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.5	0.5	13,559	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.55	0.45	13,559	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.6	0.4	13,559	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.65	0.35	-103,256	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.7	0.3	-103,256	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.75	0.25	-104,173	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.8	0.2	-104,254	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.85	0.15	-177,370	90.0	11,916.41	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.9	0.1	-180,165	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.95	0.05	-180,190	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
1	0	-180,359	90.3	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%

資料來源:本研究整理

表 35 碳排放量上限= 17662.08 千萬噸

w1	w2	總成本 (億元)	時間 (十萬 小時)	CO2 排放量 (千萬噸)	卡車 轉運量 (TEU)	船舶 轉運量 (TEU)	CO2 排 放量下 降比例
0	1	-1,892	84.6	17,328.71	4,781,893	0	0.00%
0.05	0.95	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.1	0.9	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.15	0.85	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.2	0.8	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.25	0.75	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.3	0.7	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.35	0.65	-37,202	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.4	0.6	-37,204	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.45	0.55	-37,204	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.5	0.5	-37,204	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.55	0.45	-37,204	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.6	0.4	-37,204	84.6	13,806.10	4,781,893	0	5.00%
0.65	0.35	-48,885	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.7	0.3	-48,885	86.7	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.75	0.25	-48,977	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.8	0.2	-48,985	86.8	12,650.07	3,514,336	1,267,557	12.96%
0.85	0.15	-56,297	90.0	11,916.41	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.9	0.1	-56,576	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
0.95	0.05	-56,579	90.2	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%
1	0	-56,596	90.3	11,916.42	1,728,410	3,053,483	18.01%

資料來源:本研究整理

另外，根據現有市場狀況，通常購買每單位碳的價錢(ppc)會大於賣出每單位碳的價錢(psc)，故本研究以碳排放量上限為 13806.10 千萬噸 (中間)之模型為例，試圖調整買進與賣出之價格，並討論價錢變動對整體之影響。研究結果可見圖 21、圖 22，當購買之碳價維持在 100 元，而賣出之碳價下降到 80 元時，若賣出之碳排收入大於運送成本，在相同成本之下，運送人會選擇排放量較低的方式；當賣出之碳價維持在 100 元，而買進之碳價上升到 120 元時，若運送人需負擔之運送成本提高，運送人會傾向選擇較低排放之運送方式，且當成本提高越多，碳排放量的降低會越明顯。

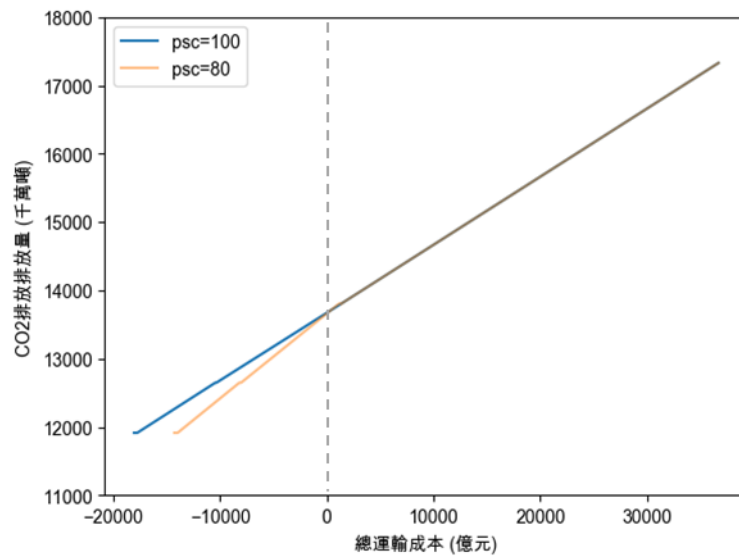


圖 21 調整 psc 價格(ppc 皆為 100)

資料來源:本研究繪製

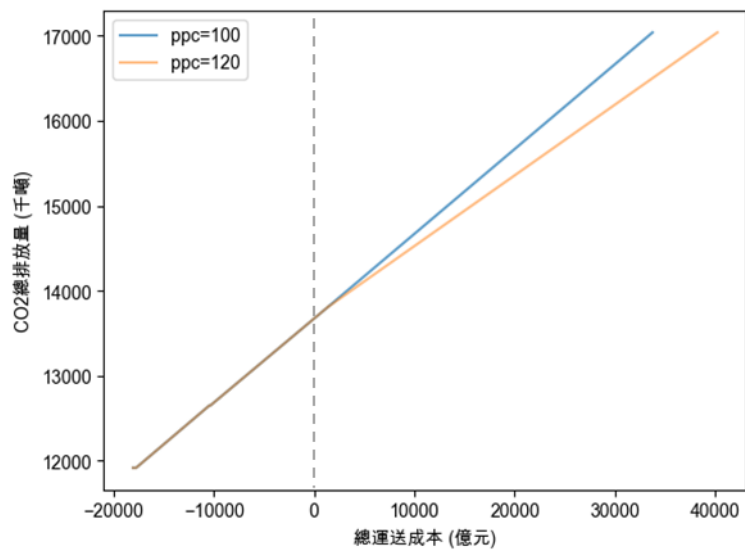


圖 22 調整 ppc 價格(psc 皆為 100 元)

資料來源:本研究繪製

4.3.4 小結

由沿海航運貨櫃運輸碳排模型之計算結果，可證明當轉移越多貨櫃至海上轉運時，可降低越多二氧化碳排放量，使用不同運具運送轉運貨量與二氧化碳排放量之關係可見圖 23。

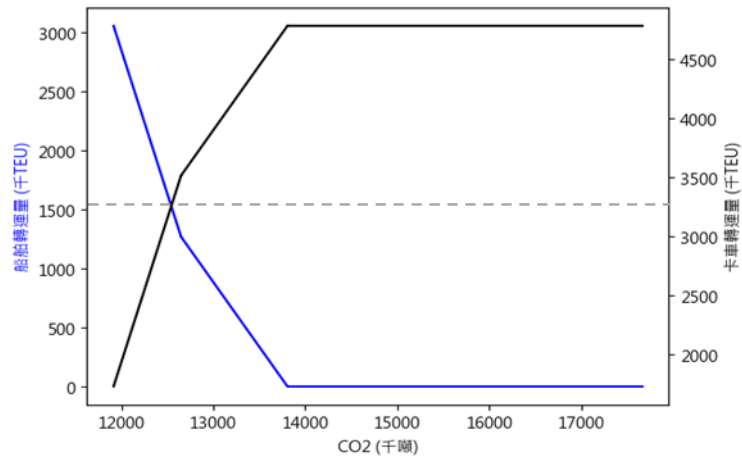


圖 23 轉運貨量與二氧化碳排放量之關係

資料來源:本研究繪製

另外以本研究結果為例，碳稅和碳交易就抑制二氧化碳排放量的結果來說效果是差不多的，但使用碳交易對於運送人來說成本低很多，如圖 24。因此從運送人的角度來看，在考量碳排放量背景之下，使用碳交易相比碳稅會比較有利的；而從政策制定者的角度來看，為了確保該政策對整體相關業者皆是有效的，碳稅的價錢不能制定得太低，而若要採取碳交易的方式來限制排放量，需要先決定最終想達成之碳排放量，並根據該目標估計出最小排放量，將其設為碳排放之上限，過高或過低的碳排放量上限皆是沒有意義的，因為其對最終之碳排放量不會影響，只會影響到相關業者之運送成本。

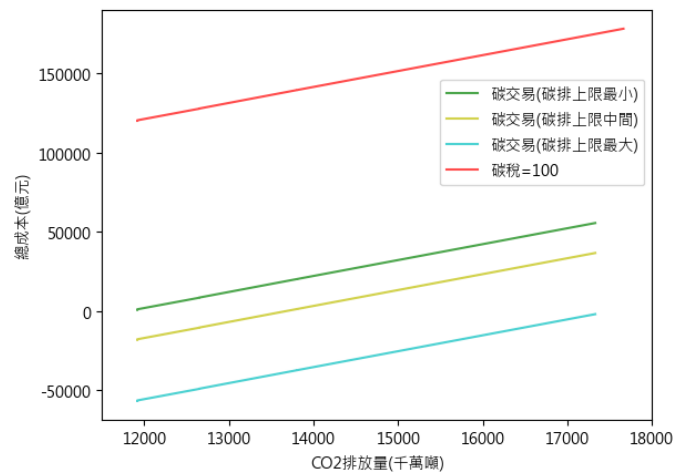


圖 24 碳排放成本比較

資料來源:本研究繪製

第五章、結論與建議

5.1 結論

本研究欲了解使用沿海航運運送國內貨櫃的效益，並探討在不同情境下運送人應如何安排貨櫃轉運較具優勢，以及不同運具選擇對二氧化碳排放量之影響。首先，透過 AIS 數據評估沿海航運船舶在運送國內貨櫃所造成之外部成本，並根據實際貨櫃流量資料進行公路卡車運輸與海上船舶運輸排放量比較。接著建立一沿海航運貨櫃運輸碳排模型進行模擬，探討當納入碳排放成本(碳稅和碳交易)會對整體運輸模式有何影響。本研究主要有四個最重要的面向：(1) 使用沿海航運運輸所造成之汙染程度(廢氣排放)；(2) 沿海航運與公路運輸之排放量比較；(3) 不同情境下的運具選擇、轉運量的改變 (4) 運具選擇、轉運量的改變對整體二氧化碳排放量之影響。

針對第一個面向，根據 2022 年資料紀錄之藍色公路船舶於台灣西部沿海航行排放了 266190.61 噸之二氧化碳，另外港口停泊或等待所造成之排放量佔船舶行經台灣西部沿海排放量的 13.9%，除了致力於降低港口排放量，對於行經沿海船舶之排放政府也應給予適當之注意。對於第二面向，根據 2022 年實際進出口貨量資料，假設全部使用海運運送，會排放 137572.351 噸二氧化碳，假設全部使用公路卡車運送，會排放 145126.7468 噸二氧化碳，證實使用船舶轉運較卡車運輸來的環保。

第三面向：當不考慮碳排放成本時，無論在何種情境下，對業者而言使用卡車運輸都比較利，而當碳稅與碳交易制度開始施行後，業者對於使用船舶轉運的意願會提升，並且隨著碳價的提高，業者會更願意去使用沿海航運。第四面向：當國內貨櫃之總轉運量的 26.5%由卡車運輸移動到船舶運送時，總二氧化碳排放量可降低 12.96%，而當使用船舶運送之貨櫃量來到總量之 63.8%時，總二氧化碳排放量可降低 18.01%。不論是碳稅或碳交易皆有助於降低排放量，尤其在運送人越重視運送成本的情況下，使用船舶轉運的機會越大。又由於沿海航運貨櫃運輸模型之目標為最小化運輸成本及時間，故從運送人之角度來看，

欲達到相同減碳效果得前提下，使用碳交易的成本較低，並且業者也可根據沿海航運貨櫃運輸碳排模型之結果根據其所面臨之情境來安排要使用船舶轉運還是卡車運送；另一方面，政策制定者也可參照本研究結果來訂定相關政策以減少碳排放量。

台灣現階段關於碳排放政策的制定已有初步規劃，並設有碳權交易所，行政機關透過相關機制與規定的陸續設立表現出推動減碳之決心，但其中卻不包含航運產業。過往在評估台灣地區排放量時，海運部分大多僅考慮到在港口之排放，船舶在沿海部分航行的排放量似乎被放在一個模糊地帶，有提到，卻又不夠周全。在台灣沿海範圍內的船舶運送所造成之排放汙染到底算不算政府的管轄範圍？若須納入政府考量範圍，則本研究可提供政府在制定相關碳排放政策的參考。若非為政府考量範圍，則根據全球趨勢，以及國貿相關制度、法規的更新，運送人亦需去重視碳排放以及相關制度的適用，本研究可為其在爭取、挑選適用方案(法規)時提供參考。

5.2 未來模型改善建議

在日漸重視永續觀念之現今，評估運輸所造成之環境成本至關重要，當總運輸成本提高的情況下，使用沿海航運的優勢將會越來越顯現出來。過去「時間」為使用沿海航運服務之一大劣勢，但如今技術進步、通關效率提升，且在貨車司機缺乏之情況下，亦增長了沿海航運之競爭力。另外，近年來企業積極訂購新型改良環保船舶，並陸續投入營運，因此關於船舶之排放量預計會再降低，連帶的也會降低運送人之營運成本。

另外因為低硫油政策之實行，船用燃油與過往有著極大改變，但該政策實行至今不過三年，相關燃油資料、系數收集較不易，故本研究為了方便計算，假設所有船舶都使用硫含量 0.5%以下之海運柴油(MGO)，後續若有更充足之資料，可再進行相關研究以求更貼近實務之結果。

參考文獻

- 交通部運輸研究所(2018)，2018年海運重要議題。運輸工程組研究報告。
- 交通部運輸研究所(2021)，港區船舶能源使用及空氣污染排放偵測技術評估之研究。港灣技術研究組計劃。
- 張潞之、賴廷嘉(2012年8月30日)。國際海運船舶溫室氣體排放評估模式之建構與碳權分析。行政院國家科學委員會專題研究計畫。
- 錢樺、賴堅戎、蕭傑諭、蘇青和、黃茂信、許義宏(2019)。整合 AIS 與海洋陣列雷達系統之航安應用評估。交通部運輸研究所。
- 賴冠豪(2011)。國內貨櫃短程航運運輸之研究與外部成本分析。(碩士論文，國立交通大學，新竹市，台灣)。
- Andrienko, N., & Andrienko, G. (2021). Visual Analytics of Vessel Movement. In A. Artikis & D. Zissis (Eds.), *Guide to Maritime Informatics* (pp. 149–170). New York, NY: Springer.
- Bukljas Skocibusic, M., & Jolic, N. (2010). Functional analysis of republic of Croatia for short sea shipping development. *Promet-Traffic&Transportation*, 22(1), 53-63.
- Brooks, M. R., & Wilmsmeier, G (2017). A chilean maritime highway is it a possible domestic transport option? *Transportation Research Record*, 2611, 32-40.
<https://doi.org/10.3141/2611-04>
- Casaca, A.C. P., Galvao, C. B., Robles, L. T., & Cutrim, S.S. (2017). The Brazilian cabotage market: a content analysis. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 9(5), 601-625.
- Chandra, S., Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2020). Analysing the modal shift from road-based to coastal shipping-based distribution—a case study of outbound automotive logistics in India. *Maritime Policy & Management*, 47(2), 273-286.
<https://doi.org/10.1080/03088839.2019.1707313>
- Feo, M., Espino, R., & García, L. (2011). An stated preference analysis of Spanish freight forwarders modal choice on the south-west Europe motorway of the sea. *Transport Policy*, 18(1), 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.05.009>
- Gan, L., Che, W., Zhou, M., Zhou, C., Zheng, Y., Zhang, L., ... & Song, L. (2022). Ship exhaust emission estimation and analysis using Automatic Identification

- System data: The west area of Shenzhen port, China, as a case study. *Ocean & Coastal Management*, 226, 106245.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106245>
- Goldsworthy, L., & Goldsworthy, B. (2015). Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data—An Australian case study. *Environmental Modelling & Software: with Environment Data News*, 63, 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.009>
- Goldsworthy, B. (2017). Spatial and temporal allocation of ship exhaust emissions in Australian coastal waters using AIS data: Analysis and treatment of data gaps. *Atmospheric Environment*, 163, 77-86.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.028>
- Henesey, L., & Young, M. (2006). Short sea shipping in the United States: Identifying the prospects and opportunities. In TRB's ports and channels committee (AW010) at 85th TRB Annual Meeting.
- Hilmola, O. P. (2013). Data envelopment analysis of helsinki-tallinn transportation chains. *Promet-Traffic & Transportation*, 25(6), 575-586.
<https://doi.org/10.7307/ptt.v25i6.1196>
- Huang, L., Wen, Y., Zhang, Y., Zhou, C., Zhang, F., & Yang, T. (2020). Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80, 102277.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102277>
- Hulskotte, J. H. J., & Van Der Gon, H. D. (2010). Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey. *Atmospheric Environment*, 44(9), 1229-1236.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.018>
- IMO (2020). Fourth IMO GHG Study 2020.
- Johnson, H., & Styhre, L. (2015). Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 71, 167-178.
- Kenan, N., Jebali, A., & Diabat, A. (2022). The integrated quay crane assignment and scheduling problems with carbon emissions considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 165, 107734. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107734>
- Kilic, A., & Girit, O. (2015). Special consumption tax incentive on marine bunkers

- and cargo shifting to short sea shipping in Turkish cabotage routes. *International Journal of Maritime Engineering*, 157(A2), 85-93.
<https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2015.a2.317>
- Lee, P. T. W., Hu, K. C., & Chen, T. (2010). External costs of domestic container transportation: Short-sea shipping versus trucking in Taiwan. *Transport Reviews*, 30(3), 315-335. <https://doi.org/10.1080/01441640903010120>
- Liao, C. H., Tseng, P. H., & Lu, C. S. (2009). Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(7), 493-496.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.05.002>
- Liu, T. K., Sheu, H. Y., & Tsai, J. Y. (2014). Sulfur dioxide emission estimates from merchant vessels in a port area and related control strategies. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1), 413-421. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.02.0061>
- Martinez-Lopez, A., Sobrino, P. C., Gonzalez, M. C., & Trujillo, L. (2019). Choice of propulsion plants for container vessels operating under short sea shipping conditions in the European union: An assessment focused on the environmental impact on the intermodal chains. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part M-Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 653-669. <https://doi.org/10.1177/1475090218797179>
- Medda, F., & Trujillo, L. (2010). Short-sea shipping: an analysis of its determinants. *Maritime Policy & Management*, 37(3), 285-303.
<https://doi.org/10.1080/03088831003700678>
- Merk., O. (2014). Shipping emissions in ports. *Discussion papers (International Transport Forum)*, 2014-20.
- Ng, S. K., Loh, C., Lin, C., Booth, V., Chan, J. W., Yip, A. C., ... & Lau, A. K. (2013). Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta. *Atmospheric environment (1994)*, 76, 102-112
- Paixão-Casaca AC, Marlow PB (2007). The impact of the trans-European transport networks on the development of short sea shipping. *Maritime Economics & Logistics*, 9(4), 302-323. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100184>
- Prata, J., & Arsenio, E. (2017). Assessing intermodal freight transport scenarios bringing the perspective of key stakeholders. *Transportation Research Procedia*,

- 25, 900-915. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.465>
- Ramalho, M. M., & Santos, T. A. (2021). The impact of the internalization of external costs in the competitiveness of short sea shipping. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 959. <https://doi.org/10.3390/jmse9090959>
- Raza, Z., Svanberg, M., & Wiegman, B. (2020). Modal shift from road haulage to short sea shipping: A systematic literature review and research directions. *Transport Reviews*, 40(3), 382-406. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1714789>
- Rodrigues, V. S., Pettit, S., Harris, I., Beresford, A., Piecyk, M., Yang, Z., & Ng, A. (2015). UK supply chain carbon mitigation strategies using alternative ports and multimodal freight transport operations. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 78, 40-56. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.013>
- Song, S. (2014). Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmospheric Environment* (1994), 48, 288-297. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.006>
- Van den Bos G, Wiegman B. (2018). Short sea shipping: a statistical analysis of influencing factors on SSS in European countries. *Journal of Shipping and Trade*, 3(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0032-3>
- Weng, J., Shi, K., Gan, X., Li, G., & Huang, Z. (2020). Ship emission estimation with high spatial-temporal resolution in the Yangtze River estuary using AIS data. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119297>
- World Bank (2022), State and trends of the carbon pricing.
- Willems, N., Van De Wetering, H., & Van Wijk, J. J. (2009). Visualization of vessel movements. *Graphics Forum*, 28(3), 959-966. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01440.x>
- Zhou, L., Li, M., Cheng, C., Zhou, Z., Nian, H., Tang, R., & Chan, C. K. (2022). Real-time chemical characterization of single ambient particles at a port city in Chinese domestic emission control area—Impacts of ship emissions on urban air quality. *Science of the Total Environment*, 819, 153117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153117>

網路來源:

簡鈺璇 (2022)。零碳時代必懂得 15 格關鍵字。經理人。檢自:

https://www.managertoday.com.tw/articles/view/64541?utm_source=copyshare
，2023 年 4 月 18 日。

鍾泓良 (20230303)，歐盟碳邊境稅 我爭取直接抵減經濟日報。檢自

<https://udn.com/news/story/7238/7005632>，2023 年 4 月 13 日。

遠見 (20230110)。氣候變遷因應法三讀通過！2050 淨零排放、碳費徵收重點一

次看。檢自: <https://esg.gvm.com.tw/article/21200>，2023 年 4 月 13 日。

LRQA (2023)。EU ETS 歐盟排放交易體系查證。檢自: [https://www.lrqa.com/zh-](https://www.lrqa.com/zh-tw/eu-ets3/)

[tw/eu-ets3/](https://www.lrqa.com/zh-tw/eu-ets3/)，2023 年 4 月 13 日。

TCCiP (2023)。歐盟達成共識：建立全球第一個碳關稅制度。檢自:

https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_news_one.aspx?kid=20230104214519，2023
年 4 月 18 日。

