運輸計劃季刊
第五十五卷 第三期
民國一一五年九月
頁 243～頁 267

Transportation Planning Journal
Vo1. 55 No. 3
September 2026
PP. 243～267

淨零轉型下機車電動化的減碳效益：臺灣與中國之比較研究

TOWARDS NET-ZERO FUTURE: COMPARATIVE ANALYSIS OF SCOOTER ELECTRIFICATION IN TAIWAN AND CHINA

陳珮慈 Pei-Ci Chen[1]
陳維軒 Wei-Hsuan Chen[2]
謝依芸 I-Yun Lisa Hsieh[*3]

(113 年 3 月 26 日收稿，113 年 6 月 16 日第一次修正，113 年 8 月 26 日第二次修正，113 年 10 月 9 日接受)

摘 要

國際間致力推動「2050 年淨零排放」，運具電動化成為各國永續轉型手段。臺灣為機車密度最高的國家，全球機車大國中又與中國關係最為緊密，可透過對比洞察兩岸政經環境對於運具轉型的影響。過去車隊排碳模型大多針對四輪運具，本研究建構一機車車隊模型，根據社會經濟因子與生命週期評估，預測未來機車保有量、持有機率、能源使用、溫室氣體排放等關鍵輸出，透過情境分析檢視電動化政策減碳效益。研究結果顯示，目前臺灣禁售燃油機車政策時程較明朗，但機車部門仍將造成 1.005 百萬公噸的溫室氣體直接排放，遠高於政策預期，無法達成我國 2050 淨零目標。本研究根據兩岸機車市場特徵提出相關建議，期許裨益我國在亞洲經濟發展趨勢下成為兩輪運具永續轉型典範。

關鍵詞： 淨零排放、車隊模型、機車持有、機車電動化、生命週期評估、永續轉型

1. 國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組碩士生。
2. 國立臺灣大學化學工程學系碩士。
3. 國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組助理教授 *投稿聯絡人 (聯絡地址：106 臺北市大安區辛亥路三段 188 號 601，電話：02-3366-4259，E-mail: iyhsieh@ntu.edu.tw)。

ABSTRACT

In line with global '2050 Net Zero Emission' goals, the transportation sector's pivotal role as a major emitter has increased the emphasis on vehicle electrification. However, existing research mainly focuses on carbon emissions from four-wheeled vehicles, leaving a gap regarding two-wheeled vehicles. This study addresses this gap by developing a comprehensive scooter fleet model that predicts future scooter ownership, energy consumption, and greenhouse gas emissions, considering socioeconomic factors and fuel lifecycle assessment. With Taiwan's distinction as the nation with the world's highest scooter density and considering the close political and economic ties between China and Taiwan, particularly within the field of significant scooter-producing nations, this study focuses on these two countries. Research findings indicate Taiwan's clearer timeline for phasing out fuel-powered scooters. However, despite these policies, the scooter sector is projected to emit 1.005 million metric tons of greenhouse gases directly, surpassing policy expectations and hindering Taiwan's 2050 net-zero emissions goal. Based on the unique characteristics of Taiwan's and China's scooter markets, this study proposes relevant recommendations to facilitate Taiwan's transition towards becoming a sustainable model for two-wheeled transportation, aligning with broader economic trends in Asia.

Key Words: *Net-zero emissions; Vehicle fleet model; Scooter; Transportation electrification; Life-cycle assessment; Sustainability transitions*

一、前　言

於第 21 屆《聯合國氣候變化綱要公約》締約國大會 (COP21)，195 個國家在 2015 年 12 月 12 日達成《巴黎協議》(Paris Agreement)，約束締約國推動減碳政策，目標是本世紀末全球氣溫升幅不超過攝氏 2 度，並力爭控制於 1.5 度內。而 2021 年政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) 的第六次氣候變遷評估報告 (Sixth Assessment Report [AR6]) 指出，若欲將升溫控制在攝氏 1.5 內，必須於 2030 年前將全球溫室氣體排放量減半，並在 2050 年達到「淨零排放 (Net-Zero Emissions)」。然而今 (2023) 年初 IPCC 發布，現今升溫幅度已到達攝氏 1.1 度，中央研究院環境變遷研究中心人為氣候變遷專題中心執行長許晃雄表示，2050 年升溫 1.5 度已經難以避免，但若能達到 2050 年淨零排放，溫度雖不會立即下降，但在本世紀末可能恢復至升溫攝氏 1.5 度內。

根據國際能源總署 (International Energy Agency [IEA]) 統計，交通運輸部門約占全球二氧化碳排放量的 25%，同時也是石油消耗最多的部門，占全球總消耗量的 92%，若以運輸方式分類，公路運輸則占交通運輸排放量的四分之三。在過去 30 年間，全球運輸部門碳

排放不斷增加，2000 至 2018 年間公路旅客運輸碳排成長 43%，公路貨運則成長 38% (鄭祖睿 [1])。為解決燃油運具所帶來的嚴重汙染，並降低對於石化燃料的依賴，近年各國陸續提出將於 2030 年 (英國、德國、荷蘭等)、2040 年 (臺灣、加拿大等) 禁售燃油車的政策 [2]，IPCC 亦於氣候變遷第六次評估報告第三冊《氣候變遷的減緩》(AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change)，指出運具電動化在運輸部門減碳行動中扮演重要角色。

本文之所以選擇中國作為比較對象，乃因全球機車大國中，中國與臺灣的政經地理關係最為緊密。中國和臺灣作為亞洲兩個重要的地區經濟體，其機車市場在規模、結構、消費習慣等方面存在差異，透過對兩地區的機車保有量 (Scooter Stock)、能源使用、排放等數據進行對比分析，可洞察兩岸間不同政策取向和經濟環境對於能源消耗及環境保護的影響。且中國和臺灣之地理、氣候、人口分布特徵不同，使機車市場面臨的挑戰有所區別，若進而深入探討地區性的交通擁堵情形、空氣品質、城市規劃等面向，有益於未來制定更具針對性的永續政策和行動。此外，根據環境保護署統計，臺灣的境外空氣污染約占四成，主要源自於中國。中國華北、華中地區的污染濃度高於臺灣，往年經常透過長程傳輸現象影響臺灣地區，導致我國暴露在其所帶來的自然及人為空氣汙染物 (Lai and Brimblecombe [3])。且燃油機車會排放黑碳 (Black Carbon) 和多種揮發性有機物(Volatile Organic Compounds [VOCs])，並產生大量二次有機氣膠 (Secondary Organic Aerosols [SOA])，對於人體健康與氣候變遷有巨大負面影響，在城市車輛排放汙染源中占主導地位 (Platt et al. [4])。燃油車所造成的空氣汙染相當可觀，臺灣除了本地汙染源亦受到中國間接影響，須藉由國際合作以解決，且兩岸地理緊鄰，因此跨境合作和資訊交流對於減少汙染物傳輸及改善環境狀況至關重要。

臺灣為全球機車密度最高的國家，根據交通部公路局統計，截至 2022 年 8 月止，臺灣機車登記總數約 1434 萬輛，平均每 100 人就有 62 輛機車，為達成「臺灣 2050 淨零排放路徑」(國家發展委員會 [5])，交通部於 2022 年 11 月提出 2030 年市區公車及公務車全面電動化、2040 年電動小客車及機車市售率 100%等目標，加速朝向電動化轉型；中國為全球機車保有量最高的國家之一，且現今仍持續增長，雖然其目前尚未對「禁售燃油機車」提出確切政策時程，但 2019 年中國製定《電動自行車安全技術規範》，簡稱新國標，促進電動兩輪車市場的銷售和穩定成長，習近平亦於 2020 年 9 月第 75 屆聯合國大會正式宣布「2030 年前實現碳達峰、2060 年前實現碳中和」之目標，機車全面電動化為將來不可避免的趨勢。

兩輪車的主流市場為亞洲地區，占全球摩托車數量的 80%、全球兩輪車銷量的 90%以上，尤其東南亞國家更為盛行，然而過去文獻所提出的車隊排碳模型大多針對四輪運具，且傾向於研究北美及歐洲市場 (Eccarius and Lu [6]；Kurniawan et al. [7]；Velasquez and Eisenbeiss [8]；IDTechEx [9])，目前臺灣機車車隊模型已有相關研究提出 (Chien et al. [10]；Tsai et al. [11])，但中國機車市場的動態預測至今仍缺乏模型建構，其對未來淨零運輸系統發展不可或缺，必須受到重視。綜上所述，本研究採用 Tsai et al. [11] 所開發之車隊模型並

調整改良，以機車車隊模型 (Scooter Fleet Model) 與生命週期評估 (Life Cycle Assessment [LCA]) 之油井到車輪 (Well-to-Wheels [WTW]) 預測 2050 年臺灣及中國機車車隊模型之溫室氣體排放及能源使用情形，分別設計基本情境 (Reference Scenario) 與全面電動化情境 (BEV Scenario)，以檢驗機車電動化的排碳與能耗潛力，進而衡量兩岸相關政策所帶來的環境效益。本研究旨在藉由模型之預測結果，協助政府機關與社會群體檢視機車電動化之政策影響，以利達成運輸部門淨零排放的願景。

二、文獻回顧

2.1 生命週期評估－油井到車輪 (Well-to-Wheel；WTW)

生命週期評估用於評估產品、服務或流程在整個生命週期內對環境的影響，其涵蓋從原材料獲取、生產、運輸、使用，到最終處理或廢棄的各個階段，有助於瞭解所考慮系統的資源消耗、能源使用和汙染排放，協助制定永續決策以減少對環境的負面影響 (United Nations Environment Programme [UNEP][12])，最初起源於 1969 年由美國可口可樂公司委託研究 (Hunt and Franklin [13])，於 1990 年被國際環境毒理學與化學學會 (The Society of Environmental Toxicology and Chemistry [SETAC]) 正式定義，在 2000 年前後，國際標準化組織 (International Organization for Standardization [ISO]) 正式將 LCA 列入 ISO14040 國際標準，指出 LCA 是一個彙編和評價產品系統生命週期中的輸入、輸出、潛在環境影響等的方法。

車輛燃料全生命週期研究，可用於評估機動車壽命期間內的能源消耗和環境汙染情況，涉及能源開採、生產、運輸、儲存、分配以及車輛使用等過程，其具有明顯的地域性，受不同地區的資源、能源來源和技術等條件限制。由於歐洲與北美洲等已開發國家較早意識到交通領域能耗與排放的壓力，導致其對車輛生命週期的相關議題給予極大重視，在過去大量研究貢獻下形成一套完整的評價體系和方法論，目前已推出 20 多種生命週期評價軟體，主要包含英國的 Boustead、德國的 Umberto、瑞士的 EcoPro 以及美國的 GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) 等。GREET 由美國阿貢國家實驗室 (Argonne National Laboratory) 所開發，是一款專門針對交通部門車輛技術和燃料的 LCA 軟體，被廣泛應用於汽車替代燃料的案例研究。綜上所述，可看出生命週期評估在國際間已發展成一種適合永續發展戰略所要求的環境管理工具，而國內在臺灣環保署的支持下，由中華經濟研究院負責執行，自 2013 年起引進美國阿貢國家實驗室的 GREET 模型進行臺灣本土研究，其「臺灣地區車輛生命週期評估」計畫的結果提供許多關鍵的排放係數，可算是國內目前唯一能針對本土車輛進行完整生命週期評估的工具。而 Tsai et al.[11]藉由 GREET 臺灣本土化的模型，進一步對整體道路運輸部門的能耗排放進行預測及探討與能源政策之影響評估。

LCA 被廣泛用於比較不同車種的能源需求、空氣汙染物與溫室氣體排放 (Dai et al.

[14]；Hollingsworth et al. [15]；Wang et al. [16])，過去多項研究證實，電動化發展與電網排放強度具高度相關，為了評估低碳發電組合所帶來的潛在影響，須關注整體生命週期而非僅限於車輛運行階段 (Marmiroli et al. [17])。其中，「油井到車輪」(Well-to-Wheel [WTW]) 分析是 LCA 應用於交通運輸研究的狹義範疇，聚焦於燃料生命週期，包含能源消耗與排放，不考慮車體製造與報廢 (Prussi et al. [18])。WTW 分析可分為「油井到油箱」(Well-to-Tank [WTT]) 和「油箱到車輪」(Tank-to-Wheel [TTW]) 兩階段 (Demirdoven and Deutch [19]；Ajanovic [20])，其考量了能源的生產、提煉、運輸，以及最終在車輛引擎內燃燒的過程 (EU Science Hub [21])，如圖 1 所示。

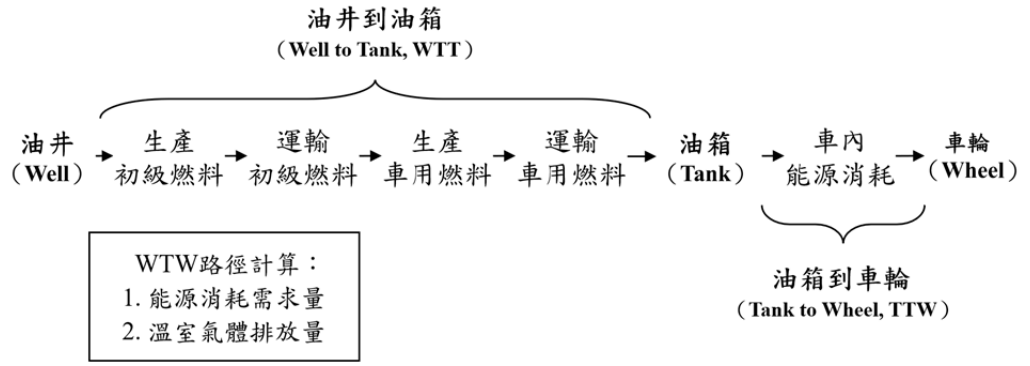


圖 1　燃料生命週期：油井到油箱 (WTT) 與油箱到車輪 (TTW) 兩階段 (改編自 EU Science Hub [21])

2.2 機車保有量

車隊模型 (Vehicle Fleet Model) 建模起源於美國市場，廣泛應用於預測車隊能源和排放，以了解交通政策所帶來的影響，較為著名的研究包括 MIT FLEET 模型 (Bandivadekar [22])，LEVERS 模型 (Yang et al. [23])，Greene et al. [24] 在 2010 年的車輛情景研究等，皆是基於由下而上的方法建構模型，預測不同情境假設下之車輛保有量、銷量、能源需求、排放量等，以詳細評估機動車隊之汰換周轉、行駛需求、節能技術改進和部署，及其對未來總燃料需求和排放量之影響，其中「保有量 (Stock)」指的是某地區內所有已登記在冊且尚未報廢的車輛總數—無論是活躍使用中或暫時停用的機動車輛。此外，美國阿貢國家實驗室也開發許多富含工程與技術細節的相關車輛模型，如 GREET、Autonomie、PSAT，以及 VISION (蔡佳妤 [25])，上述模型被美國能源部、美國運輸部、汽車工業以及學術界的研究人員大量應用於各種分析。然而大多數研究的探討對象不包含兩輪車，導致其車隊模型開發相較於四輪車輛較為匱乏，使運輸部門排碳預測產生偏差。

國內有關機動車輛持有預測的文獻起源甚早，其中「持有率 (Ownership Rate)」是指每一百人或家戶中擁有的車輛數量，常用於評估一個區域內機動車輛的普及程度和市場飽和度，而「持有機率 (Ownership Probability)」則為群體或個人擁有機車的可能性，其基於

可支配收入進行估算，有助於理解不同收入水平的人對機車的需求，進而用於政策制定或市場分析。交通部運輸研究所之《我國機車持有及使用特性之研究》[26]，採用家戶人數、汽車數、18 歲以下人數、工作人口數為變數，以簡單線性迴歸建立機車使用模式。該研究亦建立機車持有需求函數，發現若機車持有成本上升將顯著降低其持有機率，因此建議管理當局透過管制機車持有成本之手段，抑制機車持有率。陳鴻文 [27] 則透過臺北市家戶問卷調查資料，以卜瓦松分布 (Poisson Distribution) 建立家戶汽機車持有數量模式。孫珮珊[28]則在研究中使用了灰預測、BPN、Gompertz 非線性回歸和線性對數模型四種方法，分別構建了個人與家戶、汽車與機車、長期與短期之持有數量預測模型，採用 1974 年至 2002 年的臺灣地區個人汽機車持有數量、個人收入、家庭汽機車持有數量、家庭收入等變數資料，進行樣本內擬合和樣本外預測，最終以績效評估選擇最佳的預測模型，結果顯示針對個人和家庭的汽機車短期和長期預測模型，四種方法各有優勢。蔡佳佳 [29] 以聯立方程建立臺灣整體、臺北市、臺中市、高雄市之機車持有率預測模型，就臺灣整體機車持有模式，該作者挑選經濟、人口、三級產業就業人口比例，以主成分分析所得之綜合指標作為變數，避免上述三者相關性過高而產生共線性問題。該研究發現，臺北市家戶所得僅與汽車持有數量有關，機車持有數則不受所得影響；臺中市汽機車數量均受所得影響，且機車僅為所得較低時之過渡性運具；高雄市之汽車與機車持有數量則完全不受所得因素影響。

回顧過去汽機車持有與銷售模型，主要的解釋變數分為：人口、所得、價格。人口變數如，人口密度、人口數、就業人口數、戶數等；所得變數如，可支配所得、平均每人國民所得、人均 GDP 等；價格變數如，機汽車平均售價、持有成本、交通類別消費者物價指數、躉售物價指數等。Gompertz 函數 (S 曲線) 經常用於描述私家車存量如何隨著經濟（如人均 GDP、人均收入和車輛購買力）的發展而增長，但對東亞地區機車保有量的曲線擬合較為不合理 (Hsu [30])。Nishitateno and Burke [31] 與 Chu et al. [32] 指出，隨著可支配收入增加，機車保有量首先會隨之增長，但在達到臨界值後會開始轉折並遞減，該曲線被稱為「倒 U 型曲線 Inverse U relationship」或「摩托車庫茲涅茨曲線 Motorcycle Kuznets Curve」，而 Tsai et al. [11]研究首次證實臺灣的機車保有量、持有率和持有機率確實隨著經濟發展呈現倒 U 型之關係，且目前市場仍在持續增長，尚未達到轉折點之飽和水平。本研究沿用其所建構的臺灣車隊模型並加以調整，車種僅保留機車 (Scooter)，根據動力來源分為燃油機車 (Internal Combustion Engine Vehicle [ICEV]) 與電動機車 (Battery Electric Vehicle [BEV])，並將模型橫向延伸，加入中國機車市場作為比較對象，以利於參照兩岸相關政策影響，同時亦對中國機車車隊模型發展提出貢獻。

三、研究方法與數據

3.1 機車車隊模型：模型框架與概述

本研究基於 Tsai et al. [11] 為臺灣道路運輸系統建構的原始車隊模型，進行了重要的參

數調校與修正。特別地，我們納入 2021 年和 2022 年的最新臺灣數據樣本，並將研究擴展至中國市場，整合並分析廣泛的散佈資料，這些更新顯著提升模型的數據基礎，增強其時效性和地區適應性，圖 2 展示了本研究的機車車隊模型框架。首先，我們根據社會經濟指標等驅動因素輸入數據，來源包括兩岸的政府機構和相關單位，例如交通部公路局、國家統計局等，同時結合文獻回顧和合理假設進行推估。接著，透過國家政策設置的情境假設，本研究評估了淨零排放路徑下的能源消耗量和溫室氣體排放量。

值得一提的是，我們對模型中「電動汽車和機車的 TTW 階段能源消耗」的假設進行了重要調整。原始模型中，Tsai et al. [11] 假設此階段能源消耗為零，這是一種常見的模型簡化手法。然而，依據 Helmers and Marx [33] 與 Albatayneh et al. [34] 指出，即使在電動車行駛階段，仍會有能源消耗。為了更真實地反映電動車的能源使用和相關碳排放，我們調整了相關計算方式，提升了模型預測的精確性並增強了其在政策制定和環境評估中的實用價值 (詳見章節 4.2)。

本研究聚焦於 ICEV 和 BEV 兩大燃料類型，探討的「機車」在兩岸間雖存在術語差異，但規格相近，臺灣部分按照《道路交通安全規則》(中華民國交通部 [35])定義為「普通重型機車」，中國則根據《機動車運行安全技術條件》(中華人民共和國公安部 [36]) 定義為「普通摩托車」。兩者都可根據驅動方式細分為燃油與電動機車。由於社會經濟因素如收入、基尼指數 (Gini Index)、人口和國內生產毛額 (Gross Domestic Product [GDP]) 等的影響，車輛保有量的趨勢預測存在高度不確定性。因此，本研究採用拔靴法信賴區間 (Bootstrap Confidence Intervals) 來建立模型參數的抽樣分布，以精確預測機車保有量，反映現實中的不確定因素。

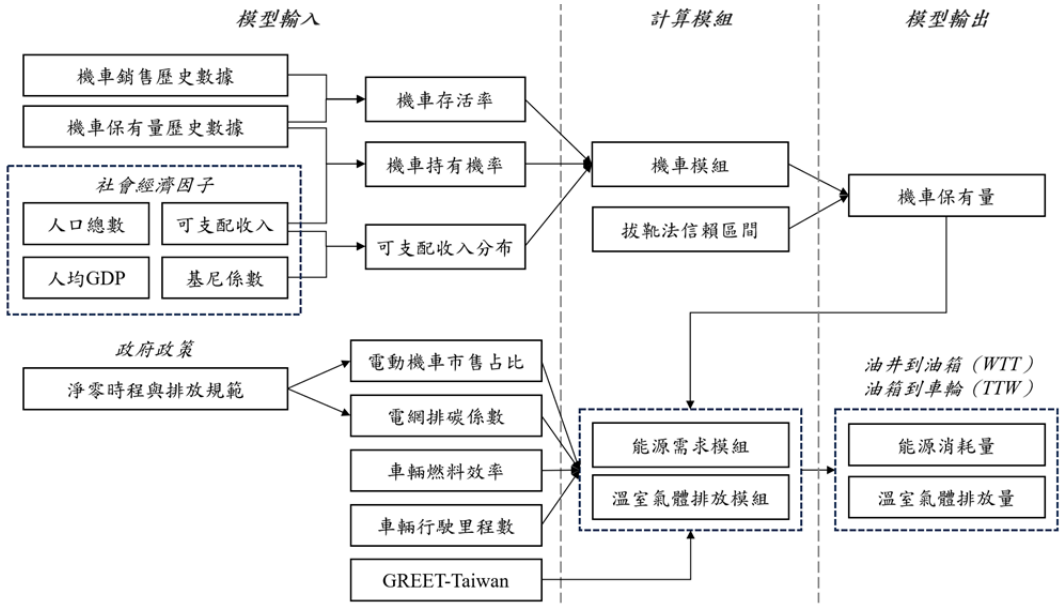


圖 2　機車車隊模型之架構 (改編自 Tsai et al.[11])

3.2 機車模組

3.2.1 機車保有量

臺灣行政院主計總處之家庭收支調查，與中國人民大學中國調查與資料中心所執行之中國綜合社會調查 (Chinese General Social Survey [CGSS]) 之調研內容包含不同家戶的收入水平以及其所擁有的汽機車數量，研究結果顯示，雖然高收入群體更可能擁有機車，但並非所有高收入者都會選擇購買與擁有。隨著可支配收入遞增，擁有汽車的傾向為 S 形曲線，而擁有機車的機率為倒 U 型。機車保有量 ($\widehat{PS}$)，為可支配收入分配 (I) 和具備該收入水準的個人在整體可支配收入範圍內擁有機車的機率 (γ) 之乘積，而未來人口預測分別取自臺灣國家發展委員會及中國育媧人口研究智庫，如式 (1)：

$$\widehat{PS}_i = P_i \int_0^{\infty} I_i(\mathrm{x})\gamma(\mathrm{x})\mathrm{d}(\mathrm{x}) \tag{1}$$

其中，

$\widehat{PS}_i$：第 i 年之機車總保有量

P_i：第 i 年之人口總數

x：人均可支配收入

I_i：第 i 年的可支配收入分布函數

γ：機車持有率 (Ownership Probability) 與人均可支配收入的關係

機車銷售量 (S) 包含新購入與汰舊換新，如式 (2)，新購入 (S^N) 表示收入增加導致車輛保有量增加，而汰舊換新 (S^R) 則與報廢車輛有關。臺灣機車存活率，本研究根據過去文獻採用二參數邏輯函數 (Two-Parameter Logistic Function) [11]，如式 (5)，中國機車存活率則參考《機動車強制報廢規定》，至多 13 年即須強制報廢 (該政策自 2013 年 5 月 1 日起施行)。「存活率」描述的是隨時間推移，尚未報廢的車輛與原始購買車輛總數的比例，該指標反映了車輛的壽命和耐用性。

$$S_i = S_i^N + S_i^R \tag{2}$$

$$S_i^N = \widehat{PS}_i + \widehat{PS}_{i-1} \tag{3}$$

$$S_i^R = \sum_{j=1}^{i} S_{i-j}\,(SR_{i,j-1} - SR_{i,j}) \tag{4}$$

$$SR_{i,j} = 1/(1 + aexp(b \times j)) \tag{5}$$

其中，

$SR_{i,j}$：第 i 年的機車存活率與車齡 j 的函數關係

3.2.2 可支配收入分布

過去研究證實[11]，在對數常態分布 (Log-Normal Distribution)、伽瑪分布 (Gamma

Distribution)、韋伯分布 (Weibull Distribution)、對數邏輯分布 (Log-Logistic Distribution；Fisk) 與貝塔分布 (Beta Distribution) 等常見的收入分布擬合模型中，以對數邏輯分布模型之均方誤差 (MSE) 績效表現最為優異，因此本研究沿用該模型進行臺灣與中國之收入分布擬合，如式 (6)：

$$f(x;a,b)=\frac{(b/a)(x/a)^{b-1}}{((x/a)^{b}+1)^{2}} \tag{6}$$

其中，

x：人均可支配收入

a,b：分布尺度參數

根據歷史數據與預測之人均可支配收入 (M) 和基尼係數 (G)，以式 (7)、(8) 模擬臺灣與中國給定年分之收入分布情形，以十年作為尺度，自 2020 年推估至 2050 年，而上述數據主要取自於臺灣行政院主計總處與中國國家統計局。

$$G=1/b \tag{7}$$

$$M=a\pi/(bsin(\pi/b)) \tag{8}$$

3.2.3 機車持有機率

收入是擁有私家車輛的主要驅動因子 (Hsieh et al. [37]；Chu et al. [32]；Tsai et al. [11])，本研究以 Gamma Distribution 加上常數項以描述機車持有機率 (Ownership Probability) 與收入之間的倒 U 關係，如式 (9)。Gamma 分布描述了連續隨機變量的機率分布，消除負二項分布 (Negative Binomial Distribution) 輸入變數的整數限制，因此更適合本研究的機車持有率建模，並添加一常量變數以優化模型擬合績效，反映機車在臺灣及中國普遍被認為是必要運具。

$$\gamma(x)=\frac{\beta^{a}x^{a-1}exp(-\beta x)}{\tau(a)+C} \tag{9}$$

其中，

x：人均可支配收入

a,b：分布尺度參數

γ：擁有機車之機率

C：常數項

3.3 拔靴法信賴區間

拔靴法 (Bootstrapping) 源自於 1979 年由美國統計學家 Bradley Efron 發表於《Annals of Statistics》，其廣泛應用於統計學、機器學習和數據分析等領域，是一種統計學上的抽樣

方法，用於估計樣本統計量的分布，從已知的樣本數據中進行有放回的抽樣，進而獲得對母體參數的估計以及其不確定性。本研究將臺灣及中國機車模組使用的資料集分別分成 20 組作為原始樣本，各進行 100 次抽樣，同一樣本點可能在單次抽樣中多次出現。本研究對每次的虛擬樣本分別進行回歸，藉由該參數組合計算 95%信賴區間，即採樣不確定性，以更有效地捕捉未來預測之變動幅度。

3.4 能源需求和溫室氣體排放

燃料生命週期 (WTW) 分析可分為「油井到油箱」(WTT) 和「油箱到車輪」(TTW) 兩階段 (Demirdoven and Deutch [19]；Ajanovic [20])，WTT 為能源原料開採至能源生產、傳輸、配送 (至加油站或充電樁)，而 TTW 則為車輛運行時之燃料消耗。道路車輛之直接能源使用 (E_{TTW}) 由車輛保有量 (V)、燃油效率 (FCR)、行車公里數 (VKT) 計算而得，如式 (10)：

$$E_{TTW,i} = \sum_k E_{TTW,i,k} = \sum_k \sum_j V_{i,j} \cdot S_{i,j,k} \cdot FCR_{i,j,k} \cdot VKT_{i,j} \tag{10}$$

其中，

$V_{i,j}$：第 i 年時 j 車種的保有量

$S_{i,j,k}$：第 i 年時以能源 k 為動力的 j 車種之保有量占比

$FCR_{i,j,k}$：第 i 年時以能源 k 為動力的 j 車種之燃油效率

$VKT_{i,j}$：第 i 年時 j 車種每輛車的行駛公里數

臺灣燃油效率的歷史數據取自臺灣空氣污染物排放量清冊 11.0 (Taiwan Emission Data System 11.0 [TEDS 11.0])，未來改善速率則是基於過去研究所提出之預期值 (Wang et al. [38]；Peng et al. [39]；Tsai et al. [11])；中國部分則根據 Weiss et al. [40] 所彙整之數據及《機動車運行安全技術條件》規範數值進行推估。臺灣每年行駛里程 (Vehicle Kilometers Traveled [VKT]) 數據取自行政院環境保護署，中國部分則根據 Cherry [41] 之研究數據。表 1 為兩國燃油效率與年行駛公里數之數據，燃油車與電動車之燃油效率單位分別為 km/L 與 km/kWh。

表 1　臺灣與中國燃油效率與年行駛公里數

國家	車種	燃油效率 (Fuel Efficiency)							年行駛公里數（Annual VKT）
		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
臺灣	燃油	23.17	23.51	23.86	24.22	24.59	24.97	25.34	6385
	電動	27.08	28.38	29.68	30.98	31.68	32.39	33.10	6385
中國	燃油	33.59	34.22	34.87	35.54	36.21	36.90	37.60	4300
	電動	26.25	27.18	28.15	29.15	30.18	31.25	32.36	3000

WTW 能源需求與溫室氣體排放計算如式 (11)、(12)。上游燃料生產－油井到油箱 (WTT) 的能源密集度和溫室氣體排放因子之臺灣數據主要來自 GREET-Taiwan 模型 [11]，其基於美國阿貢國家實驗室所開發之 GREET 模型，透過數據在地化以反映臺灣的特定燃料生產途徑，發電組成比例參照曾暐畯等人 [42] 所預測之「臺灣淨零路徑下至 2050 年發電來源按燃料別占比」，而中國數據則根據過去研究與政策趨勢進行推算 (孔德洋 [43]；陳怡 [44]；Zheng et al. [45])。本研究之電網碳密集度 (Carbon Intensity) 遵循歐盟定義，為發電所產生之碳排放與總發電量的比值，而臺灣和中國電動車「油井到油箱」的電網溫室氣體排放係數 (單位為 gCO2e/ kWh) 將隨著可再生能源技術的持續發展逐漸下降，整體趨勢如圖 3 所示；而車輛運行階段－油箱到車輪 (TTW) 的能源消耗計算為機車保有量、車輛行駛里程數和燃料效率的乘積。

$$E_{WTW,i} = \sum_k E_{WTW,i,k} = \sum_k (E_{TTW,i,k} \cdot EI_{WIT,i,k} + E_{TTW,i,k}) \tag{11}$$

$$GHG_{WTW,i} = \sum_k GHG_{WTW,i,k} = \sum_k (E_{TTW,i,k} \cdot EF_{WTW,i,k}) \tag{12}$$

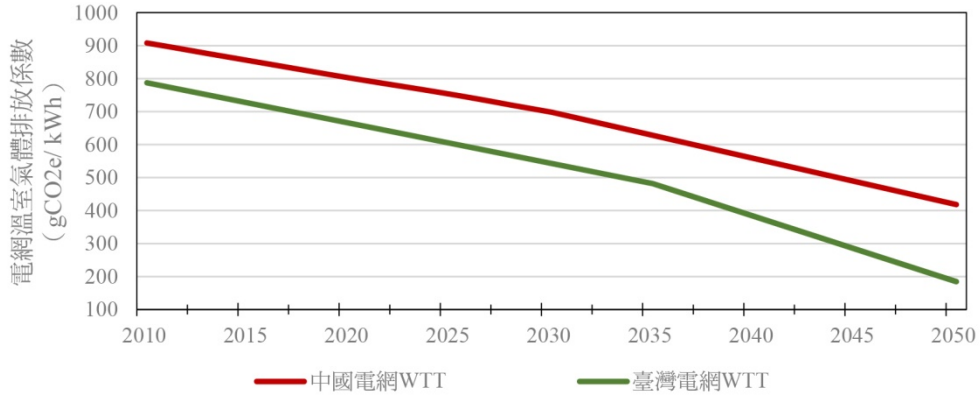


圖 3　臺灣和中國電動車「油井到油箱 WTT」溫室氣體排放量 (單位：gCO2e/ kWh)

3.5 機車電動化情境設計

為了評估機車電動化對溫室氣體排放的影響，本研究參照了 Tsai et al. [11]和 Hsieh et al. [37]的研究假設，設定了兩種情景。「REF 情境」(Reference Scenario) 作為基準情景，假設現有的電動化推廣政策全部取消，市場僅維持現狀，其中幾乎所有道路車輛都是以汽油為動力的 ICEV。在此情景下，排放變化主要由機車保有量和 ICEV 的燃油效率變化驅動。「BEV 情境」(BEV Scenario) 則反映了臺灣和中國對電動機車未來銷售的具體目標。臺灣部分，根據「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，設計了電動機車新車年銷售量在

2030 年達到 35%、2035 年達到 70%，並預計到 2040 年所有新售機車均為電動機車。銷售比例的計算使用內插法進行年份間的估計。中國部分，依據過去的銷售數據和前瞻產業研究院的預測，以及《中國傳統燃油汽車退出進度研究與環境效益評估》(2020) 的預測作為基準，假設 2050 年前將全面禁售燃油機車，並以內插法估計 2035、2040、2045 和 2050 年的市售比例，如圖 4 所示。這兩種情景設計允許本研究全面評估機車電動化政策在不同時間點下對環境的潛在影響，並提供有力的數據支持對策略調整的建議，增強政策制定的依據和前瞻性。

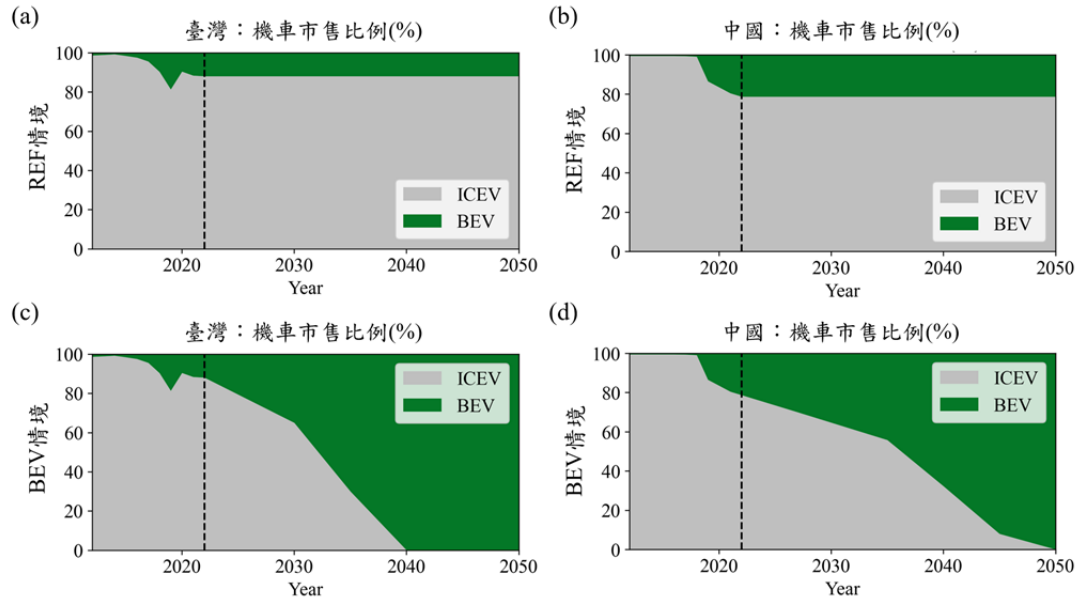


圖 4　在 REF 與 BEV 情境下，臺灣及中國之不同燃料別機車之市售比例：(a)臺灣 REF 情境；(b)中國 REF 情境；(c)臺灣 BEV 情境；(d)中國 BEV 情境

四、研究結果

4.1　機車保有量預測

本研究所建構之模型透過可支配收入分布 (圖 5)，與擁有機車機率曲線 (圖 6)，可進而預測每百人機車保有量及總體機車保有量 (圖 7)。圖 5 為可支配收入之增長趨勢與分布，分別呈現第 2.5、第 50、第 97.5 百分位之預測曲線，可見隨著國家發展，人民可支配所得皆預期會逐年攀升 (根據 2022 年匯率，1 人民幣約等於 4.4274 臺幣)，然而相較於臺灣，中國的貧富差距呈現明顯落差，整體收入分布曲線偏左，財富高度集中於少數人。圖 6 為拔靴法信賴區間結果，綠色虛線分別為區間之上下界，將兩國所有家庭收支調查樣本各分 20 組數據點進行 100 次抽樣，放入模型以回歸擬合，結果顯示臺灣與中國機車持有機率呈

現倒 U 趨勢，符合過去研究所述之「倒 U 型曲線 Inverse U relationship」或「摩托車庫茲涅茨曲線 Motorcycle Kuznets Curve」。而臺灣與中國的判定係數(Coefficient of Determination [R-squared]) 分別為 0.90 與 0.64，乃因臺灣原始數據較為密集且趨勢一致，導致擬合結果高度吻合倒 U 型 Gamma 分布，且 95%信賴區間的範圍較窄，相較之下，中國原始數據點則大多呈現垂直分布，集中在低收入群體，收入最高的群體數據點與剩餘的 19 組之水平距離約為 350 萬至 450 萬人民幣，貧富差距大導致擬合結果之信賴區間較寬，但仍可見其呈現倒 U 趨勢，整體機車持有機率低於臺灣。觀察圖 6 (a) 發現，臺灣機車持有機率之峰值所對應之人均可支配收入為 0.5 百萬台幣，並於 0.55 百萬台幣左右開始下滑，對照圖 5 (a) 分別為 2043 年與 2050 年，故可推得臺灣機車持有機率將會在 2043 年達到 63%之峰值，維持至 2050 年開始趨緩，而中國機車持有機率直至 2050 年仍尚未達到最高峰。

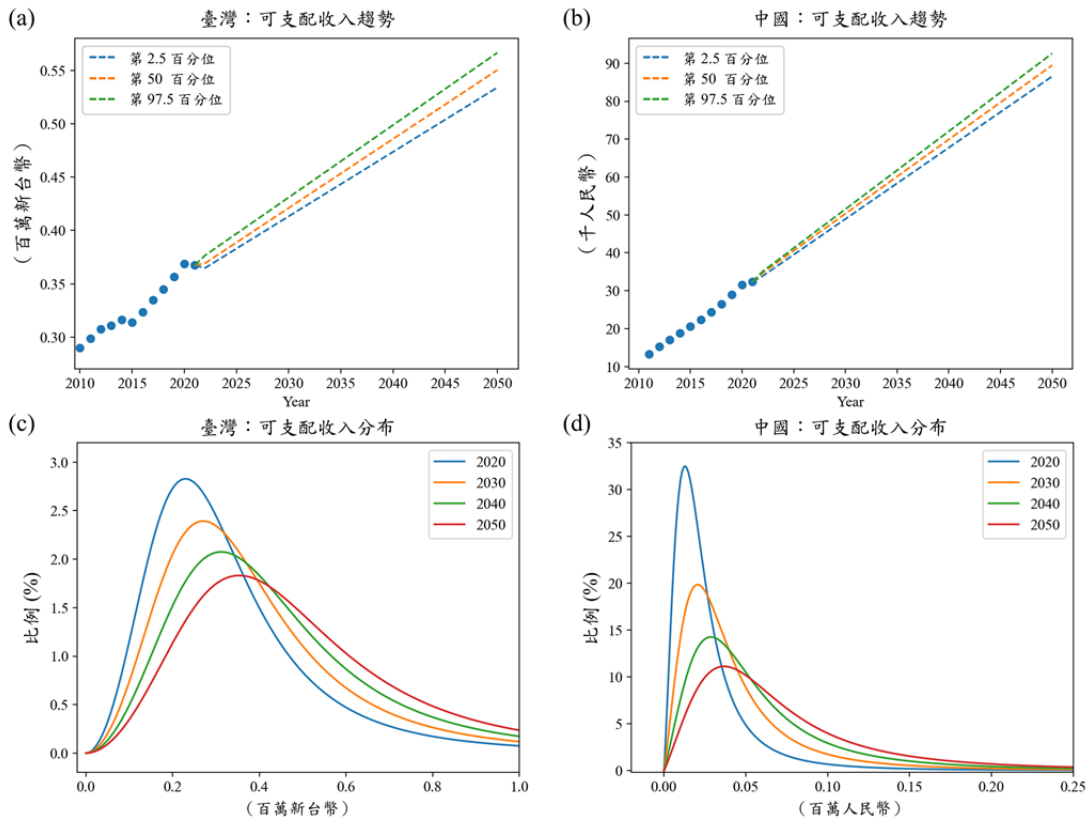


圖 5 可支配收入增長趨勢與採用對數邏輯回歸所擬合之收入分布：(a) 臺灣可支配收入增長趨勢；(b) 中國可支配收入增長趨勢；(c) 臺灣可支配收入分布；(d) 中國可支配收入分布

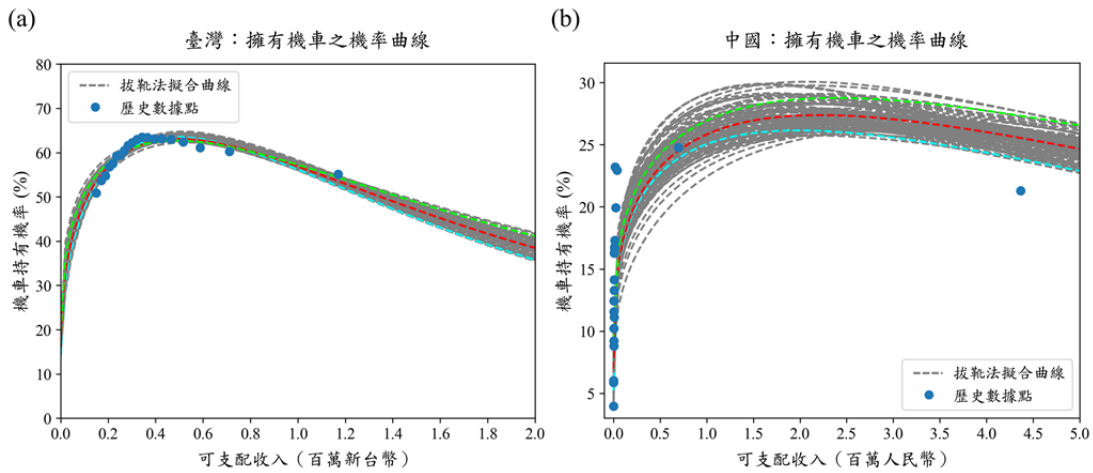


圖 6　拔靴法信賴區間 (Bootstrap Confidence Interval)：(a)臺灣；(b)中國

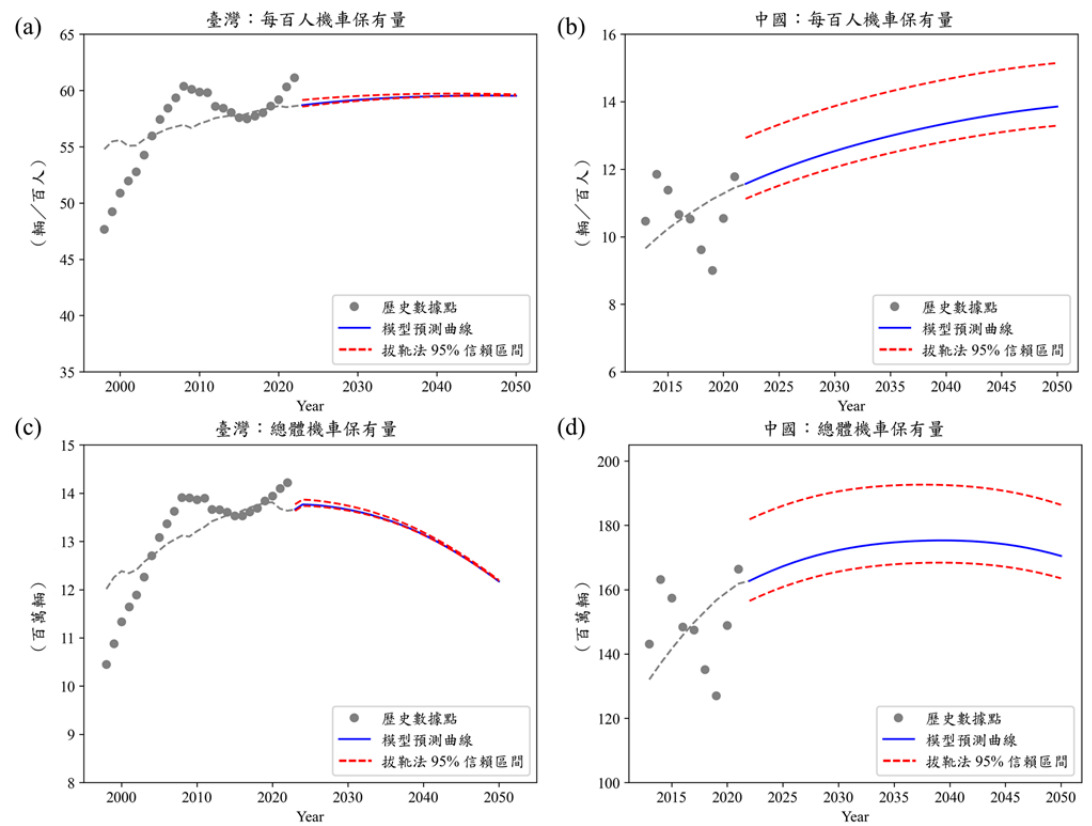


圖 7　每百人機車保有量及總體機車保有量：(a) 臺灣每百人機車保有量；(b) 中國每百人機車保有量；(c) 臺灣總體機車保有量；(d) 中國總體機車保有量

見圖 7，根據臺灣及中國預測結果，至 2050 年臺灣每百人所擁有的機車數量約為中國的 4.4 倍，但因中國龐大的人口規模，導致其全國機車保有量將比臺灣高出 13 倍，而目前中國機車保有量仍在持續攀升。可見雖然中國的低薪階級占大多數，但近年來經濟蓬勃發展，龐大人口導致全國機車市場供需量快速成長，若繼續仰賴化石燃料與傳統內燃機引擎，整體能源使用與溫室氣體排放量將會相當可觀。對於圖 7 (b)、(d) 之歷史數據而言，中國機車保有量並沒有官方的統計資料，因此本研究將國家統計局所提供「總戶數 (百戶)」與「每百戶摩托車擁有量」進行乘積，得到保有量大致呈現「N 字型」之轉折趨勢，符合中國摩托車商會之摩托車內銷量數據，其上升至 2009 年開始下降，一直持續至 2018 年又重新回升 (信達證券 [46])。此 N 字型趨勢可歸咎為 2019 年末疫情爆發後中國人民的交通偏好模式轉變，選擇以私人運具取代大眾運輸，以及近年來都市擁塞問題日益嚴重，民眾多改採用體積小、方便使用與停放的兩輪車作為代步工具，且最近幾年中國「禁摩令」逐漸鬆綁，故基於上述原因導致機車需求量回升。

為了確保模型的穩健性並證明其在實務應用中的價值，本研究針對臺灣和中國的實際機車保有數據與模型預測值進行了對照分析。在臺灣，根據「交通部機動車輛登記數」的資料，2023 年底機車總數為 14,545,338 輛，而到了 2024 年 4 月則達到 14,578,873 輛。這顯示出臺灣的機車總數雖然仍在增長，但增長幅度正在逐漸趨緩，與本研究預期的「倒 U 型趨勢」相符。在中國的情況，我們依據國家統計局的數據估計 2022 年機車保有量為 158,202,044 輛，其與模型的預測值高度一致。這些數據不僅證實了我們模型的預測精確性，也強化了模型在實際政策制定和環境評估中的應用價值。

4.2 不同情境下生命週期溫室氣體排放與能源需求

根據現有相關電動化目標政策與實際銷售數據，本研究設計 REF 與 BEV 兩個情境以對燃油與電動銷售比例進行假設。臺灣政府於 2022 年 3 月底提出 2050 淨零排放完整藍圖，當中明確表示將於 2040 年全面禁售燃油車；反觀中國，截止目前為止，尚未提出確切電動化時程，因此本研究參照《中國傳統燃油汽車退出進度研究與環境效益評估》(2020) 之 PV2 進行未來推估，得到中國將直到 2050 年才將有可能全面禁售燃油機車，意味著目前臺灣禁售時序領先中國。根據不同電動機車銷售市占比情境，結合機車保有量預測，可推估兩國電動機車之普及率，如圖 8 所示。結果顯示，在 BEV 情境下，兩岸 BEV 保有量皆於 2040 年超過 50%。讀者可觀察中國的保有量曲線在 2026 與 2039 年會有兩個轉折點，其原因為中國實施「車齡 13 年即強制報廢」之政策所導致之表徵，該政策自 2013 年 5 月 1 日起施行。

圖 9 顯示在 REF 及 BEV 情境下，兩岸 ICEV 與 BEV 機車市占比例。由於中國電動車技術與產業發展較為成熟，且電動兩輪車當前相較臺灣更為盛行，因此在 REF 情境下燃油與電動機車之市占比例約為 8:2，略領先於臺灣的 9:1。然而，經由臺灣禁售燃油車政策加速轉型後，BEV 情境下臺灣電動機車市占比例將於 2050 年增加至近 85%，即燃油機車占約 15%，超越中國的 80.67%，可見政策對於國家推廣電動運具購買具有一定的影響力。

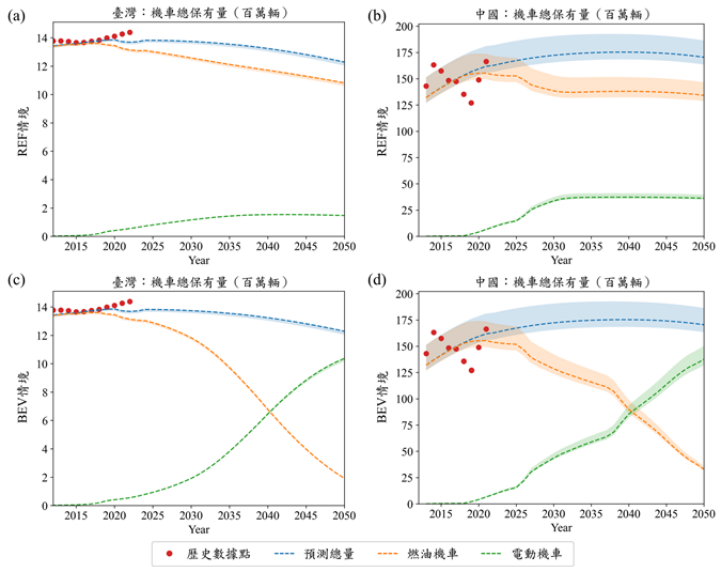


圖 8　REF 與 BEV 情境下，臺灣及中國之機車保有量變化趨勢：(a) 臺灣 REF 情境；(b) 中國 REF 情境；(c) 臺灣 BEV 情境；(d) 中國 BEV 情境

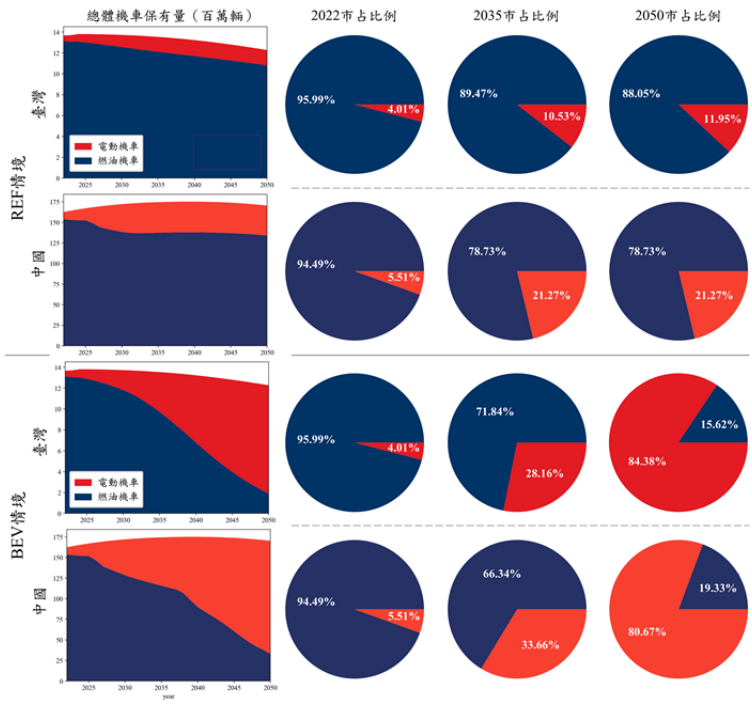


圖 9　REF 與 BEV 情境下，臺灣及中國之機車保有量變化與 ICEV 及 BEV 之市占比例：(a) REF 情境下總體機車保有量；(b) REF 情境下 ICEV 及 BEV 市占比例；(c) BEV 情境下總體機車保有量；(d) BEV 情境下 ICEV 及 BEV 市占比例

由圖 10 可見，不論是 ICEV 或 BEV，抑或是 2022 年或 2050 年，中國機車每行駛一公里能源消耗表現都優於臺灣。根據經濟部能源署之《車輛油耗指南》[47]，機車的燃油效率通常隨著排氣量的增大而降低，因此當市場上有較多大排氣量機車時，會對整體燃油效率造成負面影響。目前臺灣市場上的普通重型機車主要為排氣量介於 125 至 150cc 的車型(節能標章全球資訊網 [48])，相對地，中國機車市場則以小排量機車為主，觀研天下 [49] 的研究報告顯示，2022 年排氣量在 50 至 150ml 的機車在中國的總銷量占比高達 71%，反映中國市場對中小型機車的偏好，這類機車通常具有更良好的燃油效率，因此在燃油效率方面中國機車的整體表現優於臺灣。然而，在溫室氣體排放部分，臺灣電動機車的表現相比於中國則略勝一籌，乃因臺灣電網的碳排放密度低於中國所導致。

本研究對原始模型中「TTW 階段能源消耗」的假設進行了調整，原假設認為電動車在此階段的能源消耗為零 (依據 Tsai et al. [11] 簡化的設定)。然而，基於現實觀察，電動車在行駛階段實際存在著能源消耗，因此我們對此進行了調整並納入計算。如圖 10 顯示，從 2022 年到 2050 年，臺灣與中國的 TTW 階段能源消耗介於 0.0302 至 0.0376 kWh/km 之間。此結果與臺灣綜合研究院 [50] 的研究數據高度一致，其中插電式電動機車的每公里耗電量為 0.0355 kWh，電池交換式電動機車則為 0.0381 kWh。這些發現不僅確認了我們模型調整的正確性，也顯示了其在指導政策制定和環境評估方面的潛在價值。

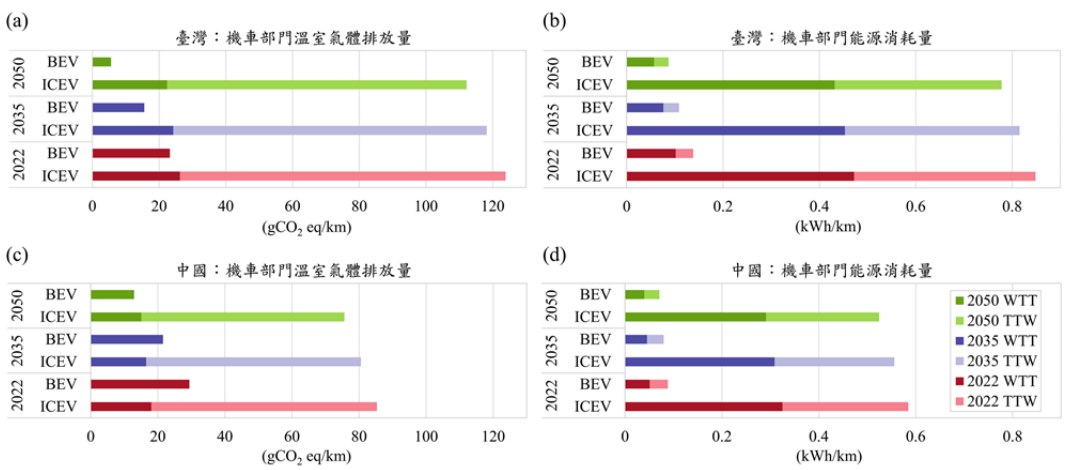


圖 10　REF 與 BEV 情境下，兩岸 WTT 與 TTW 每行駛一公里的溫室氣體排放與能源消耗量：(a)臺灣之溫室氣體排放量；(b)臺灣之能源消耗量；(c)中國之溫室氣體排放量；(d)中國之能源消耗量

比較圖 11、圖 12 可見兩岸的機車能源消耗與溫室氣體排放量主要來源皆為 ICEV，中國的總溫室氣體排放與能源消耗量皆超過臺灣，REF 情境下分別為臺灣的 6.42 倍與 6.2 倍，BEV 情境下則分別為 10.26 倍與 7.31 倍，而比較單一國家之 REF 與 BEV 情境，臺灣溫室氣體排放改善幅度為 77.36%，能源消耗改善幅度為 71.02%，中國則分別為 63.82%與

65.85%，相較之下臺灣的成長幅度較大。

此外亦可發現，儘管 BEV 情境相較於 REF 情境已有顯著改善效果，溫室氣體排放與能源使用量大幅下降，但根據臺灣 2050 年淨零排放路徑規劃，2040 年起機車銷售全面電動化，道路運輸部門至 2050 年預計僅能產生 3.2 百萬公噸碳排放，機車部門額度則分配為 0.41 百萬公噸 (張綜桁 [51])，然而縱使 BEV 情景下電動機車在 2050 年占整體機車達約 85%，卻仍將造成 1.005 百萬公噸的溫室氣體直接排放，比政策所預期高出 1.45 倍，可見僅仰賴運具電動化無法達成淨零目標，須再改善並加強政策力道，例如推動電力部門深度脫碳、降低燃油機車保有量等。

2022 年經濟部能源局指出，臺灣的進口能源占 97.3%，國際間運送過程導致其碳足跡較高，且我國主要仰賴火力發電，根據能源局所發布之能源統計月報所示，2020 至 2022 年火力發電量占比居高不下，分別為 82.2%、83.3%、82.4%，而根據中國國家統計局數據，2022 年中國火力發電量僅占總發電量 66.6%，在全球可再生能源市場中占有主導地位，其綠能技術佈署與政策推廣規劃可供臺灣跟進效仿。若將來臺灣能加速推動能源轉型，提升再生能源發電比例，將對運具電動化的生命週期溫室氣體排放產生顯著影響。

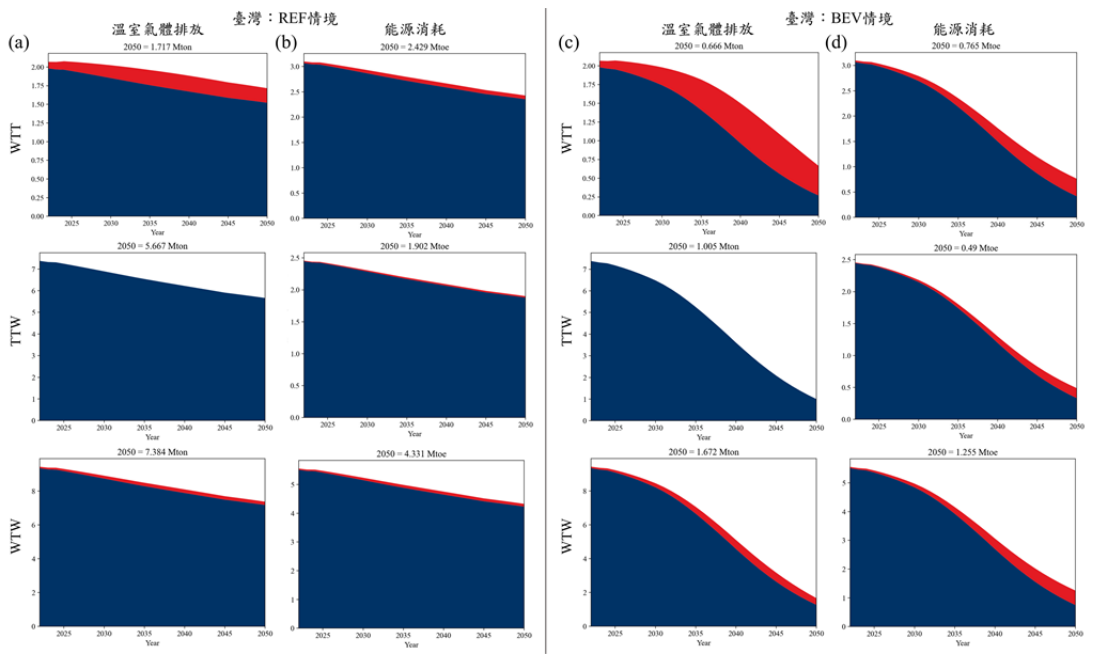


圖 11　REF 與 BEV 情境下，2050 年臺灣之溫室氣體排放與能源消耗趨勢：（a）REF 情境下溫室氣體排放量；（b）REF 情境下能源消耗量；（c）BEV 情境下溫室氣體排放量；（d）BEV 情境下能源消耗量

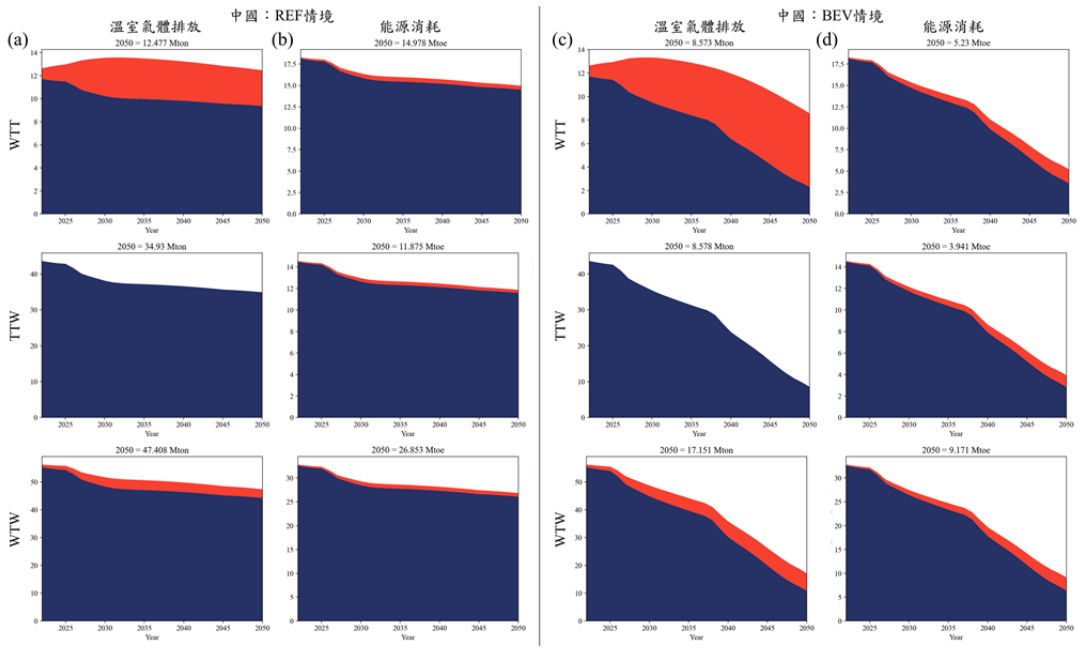


圖 12　REF 與 BEV 情境下，2050 年中國之溫室氣體排放與能源消耗趨勢：(a) REF **情境下溫室氣體排放量；**(b) REF **情境下能源消耗量；**(c) BEV **情境下溫室氣體排放量；**(d) BEV **情境下能源消耗量**

4.3　結果討論

對照兩岸 WTT 與 TTW 每行駛一公里的溫室氣體排放與能源消耗量，不論是 ICEV 或 BEV，抑或是 2022 年或 2050 年，中國機車每行駛一公里的能源消耗表現都優於臺灣，可歸咎於臺灣機車的排氣量相對較大，而中國國內流行輕型機車，因此燃油效率表現較佳，然而由於臺灣電網的碳排放密度低於中國，因此在溫室氣體排放部分，臺灣電動機車的表現略勝一籌。臺灣的能源多為進口，運送過程中所產生之碳足跡相較於國內自產更加龐大，且我國電力結構主要仰賴火力發電，2020 至 2022 年火力發電量占比居高不下，分別為 82.2%、83.3%、82.4%，反觀中國火力發電僅占總發電量 66.6%，近年在發電總量、電力結構、電力輸送以及電力配置等方面都不斷的擴張精進，致力於開發多元能源，可供臺灣效仿借鏡，以利於我國電力部門深度脫碳。觀察兩情境下溫室氣體排放與能源消耗趨勢可見，BEV 情境表現遠勝於 REF 情境，且臺灣在兩情境對比之 2050 年溫室氣體排放及能源消耗改善幅度皆優於中國，分別為 77.36%與 71.02%，證實禁售燃油機車政策確實能達到環境永續之目的。然而，根據臺灣政府訂定之 2050 年淨零排放路徑，道路運輸部門至 2050 年僅能產生 3.2 百萬公噸碳排放，機車部門排放額度則為 0.41 百萬公噸，儘管 BEV 情境下溫室氣體排放與能源消耗顯著下降，卻仍將產生 1.005 百萬公噸的溫室氣體直接排放，比政策所預期高出 1.45 倍，顯現臺灣在現今政策規劃下無法達到「2050 淨零排放」

目標。

因此，本研究根據分析結果提出具體建議。考慮到許多國家已計劃在 2035 年前禁售燃油車，臺灣當局應評估提前這一時程。為加速燃油車的汰換，應實施多元政策誘因，鼓勵車主選擇電動車。臺灣政府需在「交通系統」和「電力系統」兩大層面推動改革。在交通系統管理上，「獎勵」與「管制」應該並行實施。政策應不僅提升購車獎勵金額以刺激電動車銷售，同時應明確設定老舊燃油車的汰換年限，這樣做可以有效促進過時車輛的更新，並控制機車總數，進而減少交通擁堵和環境污染的問題。目前臺灣的政策雖對機車電動轉型有一定助益，但未包括強制報廢現存燃油車的措施，從而限制了策略的全面性。本研究建議政府可參考中國的強制報廢政策，通過國家公權力強制報廢不符合環保標準的老舊機車，從而減少道路系統中的移動汙染源。然而，鑒於臺灣與中國的國情差異，對於機車汰舊換新的具體政策，如年限、對象及處罰方式等，都需要根據當地實際情況進行適應性調整。例如，可以考慮根據地區空氣品質及交通狀況，調整使用年限，或加強對環保排氣的檢查和限制。若將來我國欲實施報廢政策，政府必須事先全面評估該政策可能產生的影響，包括其對溫室氣體減排和能源消耗的具體效益，同時透過教育和宣傳活動提高公眾對新政策的理解和接受度是至關重要的，以避免政策執行過程中產生的民怨和效益不彰的問題。此外，自 2023 年起，環保署實施了《淘汰老舊機車換購電動機車溫室氣體減量獎勵辦法》，該政策定義「老舊機車」為中華民國 96 年 6 月 30 日(含) 前出廠的燃油機車。根據該政策，淘汰老舊機車的車主可以獲得新台幣兩千元的獎勵，而換購電動機車者可再獲額外新台幣一千元的獎勵。然而，從本研究的角度來看，目前的獎勵金額尚有提升空間。若政府主要透過獎勵換車機制來推廣電動機車，應考慮顯著增加補助金額，以增強民眾對政策的感知和參與。此外，還應配合執行因地制宜的報廢政策，結合獎勵與限制的手段，促進市場的健康發展，確保環境政策的整體效益最大化。而電力系統層面，目前臺灣電力結構仍以火力發電為主，若電動車保有量持續增加導致發電需求攀升，將提升 WTT 之溫室氣體排放與能源消耗量，因此當務之急為加速電網改善，確切落實臺灣淨零轉型關鍵戰略之「運具電動化及無碳化」，在運具電動化的同時推動電力行業深度脫碳，避免運具轉型後排碳量不減反增，而充電樁佈署及電力基礎設施擴張亦為現今不可忽視的議題。

五、結論

5.1 研究結論

本研究藉由機車保有量預測與生命週期評估，比較臺灣與中國的機車車隊之溫室氣體排放與能源消耗，以及電動化政策之影響效益。雖然兩岸的政經發展結構存在差異，模型預測結果亦有所異同，但彼此仍有可相互效仿之處。透過模型擬合結果可見，隨著人民可支配收入增加，兩岸的機車持有率與機車保有量皆呈現倒 U 關係，即過去研究所提出之「摩托車庫茲涅茨曲線 Motorcycle Kuznets Curve」。臺灣在相同收入水平下之機車持有機率較

高，倒 U 曲線頂點相對偏左，機車持有機率最高峰將會在約 2043 年達到 63%，維持至 2050 年開始趨緩；而中國機車持有機率至 2050 年約為 25%，仍呈現成長趨勢，最高峰約為 27.5%，但礙於貧富差距過大，低薪階級占大多數卻受到極端值影響，且當前整體經濟仍快速成長，導致無法準確預期何年將達到峰值，後續可透過更新數據以捕捉未來趨勢。本研究推測 2050 年臺灣機車持有機率之所以高達中國的 2.52 倍，乃因臺灣地狹人稠，機車在我國運具市場較為主流，然而中國兩輪車市場之車種更加多元，民眾尚有電動輔助自行車、微型電動二輪車等選擇，其亦為一熱門探討議題。至 2050 年時，雖然臺灣的機車密度為中國的 4.4 倍，但因中國龐大的人口規模，導致其全國機車保有量將會比臺灣高出 13 倍。在符合現今淨零轉型政策規畫路徑的 BEV 情境下，兩國電動機車保有量皆會於 2040 年超過燃油機車，但差別在於臺灣機車總保有量已開始下滑，中國則剛達到臨界閾值，而中國與臺灣的電動機車普及率預期在 2050 年分別提升至 80.67%與 84.38%。此外，值得探討的是，中國現行政策中存在強制報廢機制，導致機車保有量預測曲線每 13 年便出現轉折，可藉由該措施強制老舊燃油機車退出市場。

考慮到亞洲市場對機車的極高依賴度，其中臺灣擁有全球最高的機車密度，而中國則擁有龐大的機車保有量，使其成為亞洲區內一個極具代表性的比較對象。儘管臺灣與中國在機車市場的規模、結構和消費習慣上存在顯著差異，但這些差異恰巧提供了一個機會，可透過比較兩地在機車保有量、能源使用和溫室氣體排放等方面的數據，深入了解各自政策的成效。此外，臺灣與中國不僅地理上相鄰，其政經關係亦密切相連，這在電動機車的快速技術發展及市場擴張中尤為重要。中國的污染排放有潛在的跨境傳播風險，對臺灣的環境保護與公眾健康可能造成間接影響，強調了進一步國際合作的必要性，以共同推動淨零排放的全球目標。本研究通過比較臺灣和中國的機車車隊模型預測結果，評估了不同政策對能源使用和環保目標的影響，旨在為臺灣的淨零轉型政策提供實證基礎，並建議具體措施以指導政府機構和民間組織，制定更加本土化和有針對性的永續發展政策。同時，這一分析也促進了對中國機車市場和技術發展的瞭解，對於未來可能的技術突破提供了前瞻性的見解。因此，本研究不僅是對現有模型的應用，也對機車領域的研究缺口作出了貢獻，有助於推動臺灣成為亞洲地區兩輪運具永續轉型的標竿。

5.2 研究限制與未來研究方向

本研究受限於數據取得途徑，臺灣原始數據相較於中國較為齊全。中國機車市場之數據主要來自國家統計局與相關研究機構，但仍有諸多不確定性，例如家庭收支調查－中國綜合社會調查 CGSS 問卷中，包含家戶機車擁有數之年份僅至 2010 年，因此無法完整捕捉後續變化，僅以數學模型盡可能進行擬合，此外礙於資料取得不易，部分缺乏逐年數據，故以過去研究結果、分析報告書所揭露之有限數據，及相關政策趨勢，使用插值法進行推估。從研究過程中亦發現，關於燃油及電動四輪車之數據集與相關研究皆較為完整，證實「機車」車隊模型之研究較為匱乏，尤其中國相關研究之主要探討對象多為電動四輪車與電動助力車 (臺灣稱為微型電動二輪車)，期許後續研究能補足該議題內容，裨益中國機車

車隊模型開發。此外，本研究所定義的生命週期範圍主要聚焦於燃料的整個生命週期，即油井到車輪 (WTW)，而未包括車體與電池的製造與回收，即從搖籃到墳墓 (Cradle-to-Grave) (Qiao et al. [52])。這可能導致對能耗、排放及相關潛在問題的評估不全面。我們希望本研究的預測結果能夠促進相關領域的進一步研究，並通過整合從搖籃到墳墓的分析，來全面評估電動化政策的綜合效益。

關於未來展望，期盼本研究提出之機車車隊模型能夠加入其他東南亞機車大國作為比較對象，例如印度、印尼、越南、馬來西亞等國家，更加全面性地進行跨國評估與探討，並更新相關數據以利與時俱進。除了國家間的比較，亦可深入研究國內不同地區層級之內部潛在差異，使模型模擬結果更加完善，裨益地區性政策之制定與實施。

參考文獻

1. 鄭祖睿，「淨零轉型政策下，交通運輸部門的減碳解方？」，https://www.scimonth.com.tw/archives/6431，民國 112 年。
2. 盧宗成、林季萱、簡佑勳，「考慮使用者路徑選擇行為之電動車公共充電設施設址最佳化模式與演算法」，**運輸學刊**，第 35 卷，第 1 期，民國 112 年，頁 61-91。
3. Lai, I. C. and Brimblecombe, P., "Long-range transport of air pollutants to Taiwan during the COVID-19 lockdown in Hubei Province", *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 21, No. 2, 2021, Article 200392.
4. Platt, S. M., Haddad, I. E., Pieber, S. M., Huang, R. J., Zardini, A. A., Clairotte, M., Suarez-Bertoa, R., Barmet, P., Pfaffenberger, L., Wolf, R., Slowik, J.G., Fuller, S.J., Kalberer, M., Chirico, R., Dommen, J., Astorga, C., Zimmermann, R., Marchand, N., Hellebust, S., Temime-Roussel, B., Baltensperger, U., and Prévôt, A. S., "Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities", *Nature Communications*, Vol. 5, No. 1,Article 3749.
5. 國家發展委員會，**臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明**，民國 111 年。
6. Eccarius, T., and Lu, C. C., "Powered two-wheelers for sustainable mobility: A review of consumer adoption of electric motorcycles", *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 14, No. 3, 2020, pp. 215-231.
7. Kurniawan, M. P., Chonhenchob, V., Singh, S. P., and Sittipod, S., "Measurement and analysis of vibration levels in two and three wheel delivery vehicles in Southeast Asia", *Packaging Technology and Science*, Vol. 28, No. 9, 2015, pp. 836-850.
8. Velasquez, J. M., and Eisenbeiss, K., "Emergence of Electric-Powered Two-Wheelers on Asian Roads: Curse or Blessing from a Sustainable Transport Perspective?", *Transportation Research Record*, Vol. 2503, No. 1, 2015, pp. 147-152.
9. IDTechEx, "Micro EVs 2023-2043: Electric Two-Wheelers, Three-Wheelers, and Microcars", https://www.idtechex.com/en/research-report/micro-evs-2023-2043-electric-two-wheelers-three-wheelers-and-microcars/915, 2023.
10. Chien, Y. H., Hsieh, I. Y. L., and Chang, T. H., "Beyond personal vehicles: How electrifying

scooters will help achieve climate mitigation goals in Taiwan", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 45, 2023, Article 101056.

11. Tsai, C. Y., Chang, T. H., and Hsieh, I. Y. L., "Evaluating vehicle fleet electrification against net-zero targets in scooter-dominated road transport", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 114, 2023, Article 103542.
12. United Nations Environment Programme, Life Cycle Assessment, 1996.
13. Hunt, R. G., and Franklin, W. E., "LCA—How it came about: —Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 1, 1996, pp. 4-7.
14. Dai, D., Leng, R. B., Zhang, C., and Wang, C. T., "Using hybrid modeling for life cycle assessment of motor bike and electric bike", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 12, No. 2, 2005, pp. 77-80.
15. Hollingsworth, J., Copeland, B., and Johnson, J. X., "Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters", *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 8, 2019, Article 084031.
16. Wang, M., Elgowainy, A., Lee, U., Bafana, A., Banerjee, S., Benavides, P. T., Bobba, P., Burnham, A., Cai, H., Gracida-Alvarez, U. R., Hawkins, T. R., Iyer, R. C., Kelly, J. C., Kim, T., Kingsbury, K., Kwon, H., Li, Y., Liu, X., Lu, Z., Ou, L., Siddique, N., Sun, P., Vyawahare, P., Winjobi, O., Wu, M., Xu, H., Yoo, E., Zaimes, G. G., and Zang, G., "Summary of Expansions and Updates in GREET® 2021", No. ANL/ESD-21/16, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2021.
17. Marmiroli, B., Messagie, M., Dotelli, G., and Van Mierlo, J., "Electricity generation in LCA of electric vehicles: A review", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 8, 2018, Article 1384.
18. Prussi, M., Yugo, M., DE, P. L., Padella, M., Edwards, R., and Lonza, L., "JEC Well-to-Tank report v5", Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
19. Demirdöven, N., and Deutch, J., "Hybrid cars now, fuel cell cars later", *Science*, Vol. 305, Iss. 5686, 2004, pp. 974-976.
20. Ajanovic, A., "Renewable fuels–A comparative assessment from economic, energetic and ecological point-of-view up to 2050 in EU-countries", *Renewable Energy*, Vol. 60, 2013, pp. 733-738.
21. EU Science Hub, "Well-to-Wheels Analyses", https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities/well-wheels-analyses_en, 2016.
22. Bandivadekar, A. P., "Evaluating the impact of advanced vehicle and fuel technologies in US light duty vehicle fleet", MIT Engineering Systems Division, Technology, Management, and Policy Program Ph.D. Thesis, 2008.
23. Yang, C., McCollum, D., McCarthy, R., and Leighty, W., "Meeting an 80% reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: A case study in California", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 14, No. 3, 2009, pp. 147-156.
24. Greene, D. L., Baker Jr, H. H., and Plotkin, S. E., "Reducing greenhouse gas emissions from US transportation", https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/23588, 2010.

25. 蔡佳妤，「台灣車輛電動化的潛在市場與影響」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 111 年。

26. 張新立、吳宗修、吳舜丞、楊政樺、陳鴻文、楊筑雅、郭承瑋、黃月貞、楊家銘、林國顯、湯儒彥、張瓊文，**我國機車持有及使用特性之研究**，交通部運輸研究所，民國 91 年。

27. 陳鴻文，「家戶特性與汽、機車持有數及使用量關係之研究－以台北市為例」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國 91 年。

28. 孫珮珊，「台灣地區各縣市汽、機車持有模式之建立」，國立暨南國際大學土木工程學系碩士論文，民國 93 年。

29. 蔡佳佳，「機車持有預測模式之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所交通工程組碩士論文，民國 94 年。

30. Hsu, T. P., "A comparative study on motorcycle ownership forecasting model of Asian Countries-Taiwan, Malaysia and Vietnam", Proceedings the 6th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Bangkok, 2005.

31. Nishitateno, S., and Burke, P. J., "The motorcycle Kuznets curve", *Journal of Transport Geography*, Vol. 36, 2014, pp. 116-123.

32. Chu, M. Y., Law, T. H., Hamid, H., Law, S. H., and Lee, J. C., "Examining the effects of urbanization and purchasing power on the relationship between motorcycle ownership and economic development: A panel data", *International Journal of Transportation Science and Technology*, Vol. 11, No. 1, 2022, pp. 72-82.

33. Helmers, E., and Marx, P., "Electric cars: technical characteristics and environmental impacts", *Environmental Sciences Europe*, Vol. 24, No.14, 2012, pp. 1-15.

34. Albatayneh, A., Assaf, M. N., Alterman, D., and Jaradat, M., "Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles", *Environmental and Climate Technologies*, Vol. 24, No. 1, 2020, pp. 669-680.

35. 中華民國交通部，**道路交通安全規則**，民國 113 年。

36. 中华人民共和国公安部，**机动车运行安全技术条件**，民国 106 年。

37. Hsieh, I. Y. L., Chossière, G. P., Gençer, E., Chen, H., Barrett, S., and Green, W. H., "An integrated assessment of emissions, air quality, and public health impacts of China's transition to electric vehicles", *Environmental Science & Technology*, Vol. 56, No. 11, 2022, pp. 6836-6846.

38. Wang, H., Ou, X., and Zhang, X., "Mode, technology, energy consumption, and resulting CO2 emissions in China's transport sector up to 2050", *Energy Policy*, Vol. 109, 2017, pp. 719-733.

39. Peng, T., Ou, X., Yuan, Z., Yan, X., and Zhang, X., "Development and application of China provincial road transport energy demand and GHG emissions analysis model", *Applied Energy*, Vol. 222, 2018, pp. 313-328.

40. Weiss, M., Dekker, P., Moro, A., Scholz, H., and Patel, M. K., "On the electrification of road transportation–a review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.41, 2015, pp. 348-366.

41. Cherry, C. R., “Electric two-wheelers in China: analysis of environmental, safety, and mobility impacts”, University of California, Berkeley, 2007.

42. 曾暐峻、陳厚銓、張綜桁、張天昱、謝依芸，「臺灣電力碳密集度現況研究與淨零政策之展望」，**臺灣能源期刊**，第 9 卷，第 4 期，民國 111 年，頁 307-321。

43. 孔德洋、唐闻翀、柳文灿、王敏敏，「**燃料电池汽车能耗，排放与经济性评估**」，同济大学学报（自然科学版），第 46 卷，第 4 期，民國 107 年，頁 498-503。

44. 陈怡、田川、曹颖、刘强、郑晓奇，「**中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析**」，气候变化研究进展，第 16 卷，第 5 期，民國 109 年，頁 632-640。

45. Zheng, Y., He, X., Wang, H., Wang, M., Zhang, S., Ma, D., Wang, B., and Wu, Y., “Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 25, 2020, pp. 355-370.

46. 信达证券，「机械设备行业专题：摩托车专题-大排量和电动化新兴赛道正在崛起」，https://zhuanlan.zhihu.com/p/505456916，民國 111 年。

47. 經濟部能源署，**車輛油耗指南**，民國 113 年。

48. 節能標章全球資訊網，「節能標章全球資訊網-節能比一比」，https://www.energylabel.org.tw/purchasing/compare/Motorcycles.aspx?sqft=1&T2=0&varF=4，民國 113 年。

49. 观研天下，「中国摩托车行业发展趋势分析与投资前景研究报告（2023-2030 年）」，https://www.chinabaogao.com/baogao/202308/655968.html，民國 112 年。

50. 財團法人臺灣綜合研究院，「電動車對電力需求之探討」，https://ea01.moeaea.gov.tw/a0101/01/article/expert-knowledge/8894，民國 113 年。

51. 張綜桁，「邁向公路淨零排放:臺灣機車車隊模型發展與應用」，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 111 年。

52. Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., Jiang, S., and Hao, H., “Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China”, *Applied Energy*, Vol. 204, 2017, pp. 1399-1411.