

我國公路運輸溫室氣體排放變動因素 分解分析¹

DECOMPOSITION ANALYSIS OF GHGS EMISSION FROM ROAD TRANSPORTATION IN TAIWAN

李正豐 Cheng-Feng Lee²
林勻浙 Yun-Hsi Lin³

(96 年 11 月 30 日收稿，97 年 1 月 28 日第一次修改，97 年 11 月 24 日定稿)

摘 要

本文應用分解分析之對數平均數迪氏指數法，探討 1995-2005 年影響臺灣公路運輸溫室氣體排放之關鍵因素，研究結果發現人均能源消費量及人口成長，是造成臺灣公路運輸溫室氣體每年排放量增加的二項關鍵因素。其中又以人均能源消費量為最主要的增量因素，且其所造成的排放增量效應有加速擴大的現象；人口成長雖是次要的排放增量因素，但隨著近年來臺灣人口出生率逐年降低，使得排放增量效應有減小的趨勢；其他組成因素對排放量的影響相對皆不顯著。前述研究結果顯示，降低公路運輸的人均能源消費量是減緩此部門溫室氣體排放的重要策略方向，而大眾運輸系統的普遍與便利化，則是抑制自用小客車及機車數量持續成長，有效降低人均能源消費量的重要關鍵。此外，積極發展新能源技術，逐漸以可再生能源或非碳能源取代傳統的化石能源，更是未來公路運輸進一步減少溫室

-
1. 本研究承蒙行政院國家科學委員會專題研究計畫（計畫編號：NSC 95-2221-E-434-005）經費補助，謹此致謝。
 2. 致遠管理學院環境資源學系助理教授（聯絡地址：721 臺南縣麻豆鎮南勢里 87-1 號致遠管理學院環境資源學系；電話：06-5718888 轉 874；E-mail：kvnlee@dwu.edu.tw）。
 3. 致遠管理學院環境資源學系大學部學生。

氣體排放的必然發展方向。

關鍵詞：公路運輸；溫室氣體排放；分解分析；對數平均數迪氏指數

ABSTRACT

This study applies the LMDI decomposition analysis approach to identify the key factors which affect greenhouse gases (GHGs) emission from Taiwan's road transportation sector during the period of 1995-2005. The results indicate that per capita energy consumption for road transport and the population growth are two primary factors causing its GHGs emission to increase. Population growth is the secondary primary factor causing GHGs emission to increase, however, along with Taiwan's decreasing birth rate in recent years the emission increase presents a reducing trend. It is noticeable that the emission increase inducing by per capita energy consumption presents a growing trend due to continuously increasing private transport in Taiwan. It implies that cutting down per capita energy consumption is an important way to reduce GHGs emission from this sector. The promotion of a public transport system, however, is a pivot strategy to reduce the growth of private transport and per capita energy consumption for road transport as well. Besides, the development and application of non-fossil energy technologies is the essential way to further cut GHGs emission from Taiwan's road transportation sector.

Key Words: Road transportation; GHGs emission; Decomposition analysis; LMDI

一、前言

2005 年 2 月 16 日「京都議定書」正式生效後，新興工業化國家極可能成為下一波被要求進行溫室氣體減量的對象。我國雖非簽約國之一，然由於近數十年來經濟高度發展，2005 年的 CO₂ 排放量已居全球排名的第 22 位，而 1995~2005 年間人均排放量更以每年 8% 成長，與經濟成長呈反向脫鉤的現象（臺灣經濟研究院^[1]），因此在下一波國際溫室氣體減量行動中被以「新興工業國」要求規範減量的可能性極大。由於臺灣並非「氣候變化綱要公約」的締約國之一，且因過去多數國家對溫室氣體減量的承諾仍然存在不確定性，為免過早表態對國家經濟發展造成重大衝擊，故一直未向國際社會提出明確的減量承諾；即使在 2005 年「全國能源會議」中亦僅針對 1998 年設定之參考目標重新進行檢討，並建議以「減緩我國溫室氣體排放成長率至 OECD 國家水準，再進一步使人均排放量達與 OECD 國家相同水準。」作為努力的目標。然而，面對近年來國際溫室氣體管制行動具體化，我國實需加緊腳步研擬積極有效的減量策略並具體落實，以利減量工作的進行及因應未來國際管制的要求。

公路運輸是經濟發展與民生交通不可或缺的重要元素之一，而化石燃料是目前汽、機

車等運輸載具的主要動力來源，燃料在車輛引擎中燃燒除產生動力外亦會伴隨排放出粒狀物 (particulate matters)、氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO) 及二氧化碳 (CO₂) 等廢氣，其中 CO₂ 被認定是造成全球暖化的主要溫室氣體 (GHGs) 種類之一。由於 CO₂ 為燃燒過程的必然產物，故其排放量與能源消費量有高度相關，圖 1 為我國公路運輸歷年能源消費量的變動情形 (經濟部能源局^[2])，其中 1995 年為 10,094,865 KLOE，之後消費量逐年成長，至 2005 年增為 13,327,284 KLOE，約占運輸部門能源總消費量的 82%，並相當於全國總能源消費的 19%，1995-2005 年十年間的能源年消費量成長 32%。至於我國公路運輸的 CO₂ 排放，依據相關研究 (工研院能環所^[3]) 顯示 2005 年我國 CO₂ 總排放量約 257,260 千公噸 (Gg)；而本研究估算歷年公路運輸之 CO₂ 排放情形，發現 2005 年的排放量為 35,562 Gg，約占全國總量的 14%，較 1995 年成長 32%。顯示公路運輸亦是我國溫室氣體的重要排放源之一，需要擬定有效的減量策略來減緩其排放，而若能將影響其排放量的各相關因素之相對貢獻程度加以量化並藉以找出關鍵因素，將有助於此部門相關減量策略的研擬。

國內有關運輸部門溫室氣體排放的研究，黃運貴及曹壽民^[4]以 IPCC 之方法計算我國運輸部門 CO₂ 排放量，並比較各國 1990 至 1998 年的 CO₂ 排放情形。研究結果顯示 1998 年各國運輸部門之 CO₂ 排放量與 1990 年相較，成長幅度大部分均超過 10%；而運輸部門 CO₂ 排放量占總排放量比例，除中國大陸外均介於 15~30%；另公路運輸排放量占運輸部門排放量之比例，絕大部分國家均超過 80% 以上。廖慧嵐等人^[5]探討民國 79 年至 93 年汽油車及柴油車 CO₂ 排放特性及影響其變動的關鍵因素，研究結果顯示汽油車部分以經濟成長為主要的增量因素，每千人擁有車輛數為次要增量因素，而柴油車之分析結果大致相同。Lu 等人^[6]探討經濟成長、人口密集度等五個因素對 1990-2002 年間臺灣、德國、日本及南韓公路運輸 CO₂ 排放變動的影響，其研究顯示經濟成長及人均車輛擁有數是導致 CO₂

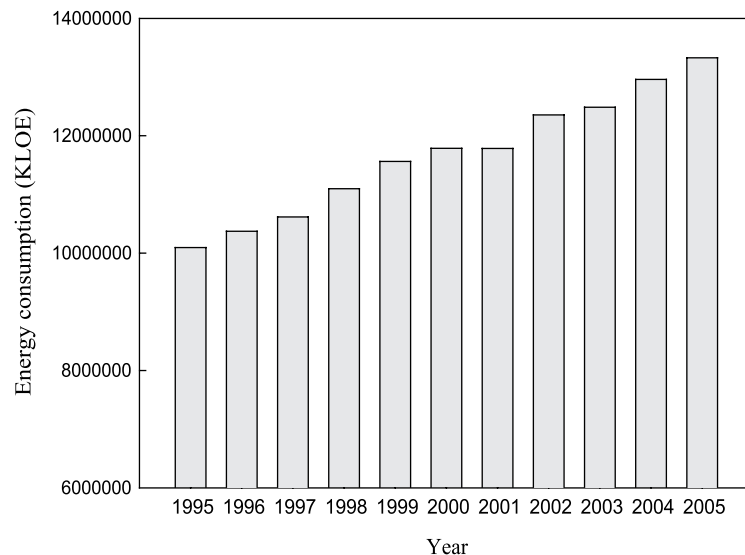


圖 1 我國公路運輸歷年能源消費量變動

排放增加的最重要因素，而人口密集度是主要的減量因子。在國外方面，Stead^[7]以英國為例探討運輸之 CO₂ 等廢氣排放與旅行型態間的關係，其結果顯示旅行距離可合理的反映車輛之能源消費與廢氣排放，並建議以人均旅行距離作為運輸政策與規劃評估的環境指標。Morán 及 González^[8]以投入產出法分析歐洲數國路上運輸之 CO₂ 排放結構，其研究結果顯示部門間的生產關聯及最終消費結構對路上運輸排放量的影響。本研究應用分解分析 (decomposition analysis) 之對數平均數迪氏指數法 (log-mean Divisia index method I, LMDI I) (Ang^[9]) 探討影響 1995~2005 年我國公路運輸溫室氣體 (包括 CO₂、CH₄ 及 N₂O) 排放量變動的關鍵因素，並依據分析結果研提可能的減量策略與方向。

二、研究方法

2.1 公路運輸溫室氣體 (GHGs) 排放估算

我國公路運輸的溫室氣體排放源主要來自汽機車等交通工具之引擎燃燒汽、柴油等燃料所產生的 CO₂，以及相對微量的 CH₄ 與 N₂O 排放。依據經濟部能源局出版之「臺灣能源平衡表」(經濟部能源局^[2])，臺灣公路運輸部門的能源消費種類除了汽油、柴油外，尚包括少量的燃料油、液化石油氣 (LPG) 及電力。本研究估算公路運輸的溫室氣體排放量係以 IPCC 建議的方法為基礎，亦即以「活動強度」乘以對應之「排放係數」而得，其中「活動強度」引用自「臺灣能源平衡表」中公路運輸歷年各類能源消費量資料 (原始單位)，而各類油品 (汽油、柴油及燃料油) 及 LPG 的「排放係數」則參考國內相關研究 (經濟部能源局^[10]) 依據我國燃料熱值修正所得之建議值。另外，由於電力的溫室氣體排放強度與發電燃料結構關係密切，因此每年的排放係數不同，其中 2005 年電力排放係數係直接引用經濟部能源局公告之資料^[11]，每度電力消費之溫室氣體產生量 0.632 kg CO₂-e，而 1995-2004 年各年之排放係數則以 2005 年之值為基準，再依據電力排放係數相關研究 (侯萬善^[12]) 之結果進行修正而得，結果如表 1 所示有逐年上升的趨勢。在本研究中，化石燃料燃燒所產生之 CO₂、CH₄ 及 N₂O 三種溫室氣體排放量經分別估算後，各自乘上對應之全球暖化潛勢值 (GWP) 轉換為 CO₂ 當量，然後與電力排放的部分加總得到公路運輸每年的溫室氣體排放量。

2.2 分解分析相關研究回顧

過去分解分析 (decomposition analysis) 以拉氏指數法 (Laspeyres index) 及算術平均迪氏指數法 (arithmetic mean Divisia index, AMDI) 較常被學界應用於研究上，但二者在分解後均會有殘差項的存在，影響分析結果的可信賴性。1997 年 Ang 及 Choi^[13]修正傳統之算術平均權重迪氏指數法，改以對數平均權重取代，達到完全分解而無殘差項的效果，稱為 log-mean Divisia index method II (LMDI II) (Ang and Liu^[14])；隨後 Ang 及 Liu 再提出另

表 1 歷年我國電力溫室氣體排放係數

Year	Emission factors ^a
1995	0.523
1996	0.531
1997	0.556
1998	0.582
1999	0.583
2000	0.602
2001	0.614
2002	0.606
2003	0.624
2004	0.623
2005	0.632 ^b

註：a.單位為「kg CO₂-e/度」。

b.經濟部能源局^[11]公告資料。

一種完全分解方法 log-mean Divisia index method I (LMDI I)，改善 LMDI II 雖無殘差項問題，但缺乏聚集之一致性 (consistency in aggregation) 的缺點^[14]。2003 年 Ang 等人^[15]比較數種可完全分解的因素分析方法，認為就應用的容易性與彈性的觀點來看，LMDI I 比其他分解方法有較多的優點。

分解分析過去常被應用在能源消費及相關污染物排放變動因素的探討研究，在國內方面如 Lu 等人^[6]以算術平均迪氏指數法 (AMDI) 探討經濟成長、人口密集度等五個因素對 1990-2002 年間臺灣、德國、日本及南韓公路運輸 CO₂ 排放變動的影響。Lin 等人^[16]應用算術平均迪氏指數法 (AMDI) 將 CO₂ 排放量拆解成排放係數、能源密集度、產業結構及經濟成長四個因子的乘積，以探討影響臺灣工業部門 CO₂ 排放變動的關鍵因素，並與美國、日本、德國、荷蘭及南韓之情形比較。林素貞等^[17]利用迪氏指數法，將 CO₂ 排放量拆解成 CO₂ 排放係數、能源密集度、產業結構配比及經濟成長等四種因素之乘積，藉以探討影響我國與美、日、英三國商業部門 CO₂ 排放的關鍵因素。結果顯示各國 CO₂ 排放增量的關鍵因素皆為經濟成長，而能源密集度是我國唯一的減量因素。此外，排放係數為英國與日本的減量因素，而美國主要的減量因素亦為能源密度。廖慧嵐等^[5]利用分解分析之 LMDI I，探討民國 79 年至 93 年汽油車及柴油車 CO₂ 排放特性及影響其變動的關鍵因素，其所選取之組成因素包括 CO₂ 排放係數、車輛耗能度、每千人擁有車輛數、人力密集度及經濟水準。黃運貴與曹壽民^[18]利用迪氏對數平均指數分解法，分析運輸部門客貨運之活動需求強度、各運輸系統之市場占有率及能源密集度等因素對該部門能源消費量變動的影響效果，研究結果發現，活動強度與能源密集度為運輸能源消費量主要之影響因素，而該

二項因素之影響效果則均主要來自公路系統。劉春初等人^[19]以分解分析探討臺灣地區水泥業營收入變動來源之分析，其研究結果顯示造成營收入增加的主要因素，為技術變動效果及價格效果，然而影響營收入減少的主要來源為規模效果。國外方面，Albrecht 等人^[20]以歐洲四個國家碳的排放變動，探討無殘差的 Shapley 分解法與傳統分解法的差異，研究結果顯示，Shapley 分解法在能源使用的碳排放強度及經濟成長二因素部分對總排放的影響較大。Wang 等人^[21]應用 LMDI 分析 1957~2000 年中國整體 CO₂ 排放變動情形，研究結果認為中國已達成可觀的 CO₂ 減量，而能源密集度的改善為主要因素，貢獻度占總減量效果的 95%；此外燃料轉換及可再生能源的使用亦對 CO₂ 減量產生正面效應。

2.3 影響公路運輸溫室氣體排放之因素選取

分解分析 (decomposition analysis) 法的應用需考量選取因素的「可分解性」及「可控性」，以確保因素選取適當及分析結果合理，同時亦具有實務上的參考價值。就本研究而言，由於公路運輸的溫室氣體排放主要來自各種機動車輛使用汽油、柴油、LPG 等化石燃料所產生的 CO₂、CH₄ 及 N₂O，故與燃料的消費型態及結構有密切的關係。舉例而言，柴油的消費配比升高會導致油品的 CO₂ 平均排放強度上升，而產生溫室氣體排放的增量效果；又當油品消費的結構配比上升，將使得來自油品耗用的 CO₂ 排放增加；此外，公路運輸的溫室氣體排放量亦與人口數呈正相關，即人口越多則對公路運輸能源的需求越大，而溫室氣體排放量隨之增加。另運輸結構則是影響能源消費強度的重要因素，當私人運具占總運輸量之比例上升時，平均每人用於公路運輸的能源消費量增加，將導致溫室氣體的排放增量；反之，當大眾運輸系統占總運量之比例提升時，溫室氣體排放將因人均能源消費量降低而產生減量效應。除了前述討論的相關因素外，其他如車輛種類、車輛數、駕駛習慣、道路狀況、車齡、維修保養、天候、交通政策等亦皆會影響公路運輸之溫室氣體排放，其中不同車種的能源耗用強度有所差異，一般而言大型車（大貨車、大客車）的能耗高於小型車（小客車、機車）。本研究計算歷年我國車輛的平均能耗發現呈逐年下降的趨勢，其中 1995 年為 0.765 KLOE/輛，2000 年為 0.692 KLOE/輛，2006 年為 0.655 KLOE/輛；另相關統計資料（交通部統計處^[22]）則顯示歷年我國小客車與機車數量持續成長，至 2006 年已合占全國總車輛數達 95%。可知隨著小客車與機車數量逐年快速增加，我國車輛的平均能耗正逐年降低；然而，整體溫室氣體排放量卻因車輛數持續成長而增加，顯示私人運具的高持有與高使用比例對溫室氣體排放所造成的影響，是非常值得探討的部分，因此本研究選擇「人均能源消費量」及「人口數」作為分解探討的對象因素，以分別探討運輸結構及人口成長對溫室氣體排放的影響。至於其他因素包括駕駛習慣、道路狀況、車齡、車輛保養狀況等，礙於相關資料不易蒐集、量化困難、不確定性高等限制，加以本研究希望著重於整體運輸發展策略、非碳或再生能源替代等政策面的探討，技術層面並非聚焦考量之重點，因此並未被選取作為本文探討的相關影響因子。

基於前述之討論分析，本文將公路運輸的溫室氣體排放量分解為「燃料溫室氣體排放強度」、「能源消費配比」、「人均能源消費量」及「人口數」等因素的乘積，其中「燃

料溫室氣體排放強度」可用以探討因汽、柴油消費結構變動，造成油品平均溫室氣體排放強度改變而對排放量產生之影響；「能源消費配比」用以量化油品與 LPG 消費配比消長所導致的排放影響；「人均能源消費量」係反映公路運輸部門的能源耗用強度，耗用強度升高表示運輸結構偏向私人運具的使用發展，將造成溫室氣體排放量增加；「人口數」則代表因人口成長造成運輸需求增加，而衍生的能源耗用與溫室氣體排放。由於以上各因素皆與公路運輸的溫室氣體排放密切相關，顯示本研究對影響因素之選取適當，可確保分解分析結果的合理性。此外，所選取之各個因素主要與能源替代、運輸規劃等政策層次之策略選項有關，因此在實務上亦皆具有「可操控性」，雖然有些策略（例如：以非碳或再生能源取代化石燃料）可能不易在短期內達到目標，但可藉由政府對相關政策方向的具體落實來加速其進展。

2.4 分解分析原理與方法

分解分析的原理乃將欲探討的主體拆解成數個相關因子的乘積，再經過運算將每個組成因子對主體變動之貢獻量化，藉以探討影響主體變動的關鍵因子。本研究應用分解分析原理將公路運輸的 GHGs 排放量拆解成能源 GHGs 排放強度、能源消費配比、人均能源消費量及人口數四項因子的乘積，並進一步以對數平均數迪氏指數法 (LMDI) 對我國公路運輸的 GHGs 排放量變動進行分解分析，以數學式表示如下：

$$Q_t = \sum_{i=1}^3 Q_{it} \quad (1)$$

$$Q_{it} = \frac{Q_{it}}{E_{it}} \times \frac{E_{it}}{E_t} \times \frac{E_t}{P_t} \times P_t = c_{it} \times r_{it} \times e_t \times P_t \quad (2)$$

其中， i 分別表油品、LPG 及電力， Q_t 為 t 年公路運輸之 GHG 總排放量 (Gg CO₂-e)， Q_{it} 為 t 年之 i 能源 GHG 排放量 (Gg CO₂-e)， E_{it} 為 t 年 i 能源之消費量 (KLOE) (經濟部能源局^[2])， E_t 為 t 年公路運輸之總能源消費量 (KLOE)， P_t 為 t 年全國人口總數 (人) (內政部^[23])。 $c_{it} = \frac{Q_{it}}{E_{it}}$ ，表 t 年 i 能源之 GHG 排放強度 (Gg CO₂-e/KLOE)； $r_{it} = \frac{E_{it}}{E_t}$ ，表 t 年 i 能源之結構配比 (%)； $e_t = \frac{E_t}{P_t}$ ，表 t 年之人均能源消費量 (KLOE/人)。

將式 (2) 對時間 (t) 微分可得

$$\frac{dQ_{it}}{dt} = \frac{dc_{it}}{c_{it}} \times \frac{Q_{it}}{dt} + \frac{dr_{it}}{r_{it}} \times \frac{Q_{it}}{dt} + \frac{de_t}{e_t} \times \frac{Q_{it}}{dt} + \frac{dP_t}{P_t} \times \frac{Q_{it}}{dt} \quad (3)$$

再對式 (3) 積分後可得 t_0 至 t_1 期間 GHG 排放量變動

$$\Delta Q_i = \int_{t_0}^{t_1} d \ln(c_{it}) \times Q_{it} + \int_{t_0}^{t_1} d \ln(r_{it}) \times Q_{it} + \int_{t_0}^{t_1} d \ln(e_t) \times Q_{it} + \int_{t_0}^{t_1} d \ln(P_t) \times Q_{it} \quad (4)$$

應用對數平均數迪式指數法 (LMDI)，式 (4) 可以改寫為

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = & \ln \frac{c_{it_1}}{c_{it_0}} \times \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} + \ln \frac{r_{it_1}}{r_{it_0}} \times \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} + \ln \frac{e_{t_1}}{e_{t_0}} \times \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} \\ & + \ln \frac{P_{t_1}}{P_{t_0}} \times \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^3 \Delta Q_i \quad (6)$$

將式 (6) 展開可得

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = & \ln \frac{c_{1t_1}}{c_{1t_0}} \times \frac{Q_{1t_1} - Q_{1t_0}}{\ln(Q_{1t_1} / Q_{1t_0})} + \ln \frac{c_{2t_1}}{c_{2t_0}} \times \frac{Q_{2t_1} - Q_{2t_0}}{\ln(Q_{2t_1} / Q_{2t_0})} + \ln \frac{c_{3t_1}}{c_{3t_0}} \times \frac{Q_{3t_1} - Q_{3t_0}}{\ln(Q_{3t_1} / Q_{3t_0})} \\ & + \ln \frac{r_{1t_1}}{r_{1t_0}} \times \frac{Q_{1t_1} - Q_{1t_0}}{\ln(Q_{1t_1} / Q_{1t_0})} + \ln \frac{r_{2t_1}}{r_{2t_0}} \times \frac{Q_{2t_1} - Q_{2t_0}}{\ln(Q_{2t_1} / Q_{2t_0})} + \ln \frac{r_{3t_1}}{r_{3t_0}} \times \frac{Q_{3t_1} - Q_{3t_0}}{\ln(Q_{3t_1} / Q_{3t_0})} \\ & + \ln \frac{e_{t_1}}{e_{t_0}} \times \sum_{i=1}^3 \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} + \ln \frac{P_{t_1}}{P_{t_0}} \times \sum_{i=1}^3 \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{\ln(Q_{it_1} / Q_{it_0})} \end{aligned} \quad (7)$$

三、結果分析與討論

3.1 相關參數歷年變動分析

3.1.1 溫室氣體排放量

本研究依照 IPCC 建議之方法分別計算 1995~2005 年我國公路運輸各種能源消費之溫室氣體 (包括 CO₂、CH₄ 及 N₂O 三種主要氣體) 排放量，再根據不同氣體之全球暖化潛勢值 (GWP) 換算成 CO₂ 當量後，加總而得溫室氣體之總排放量，推估之相關細節詳如第 2.1 節所述。

歷年排放量的估算結果如圖 2 所示，可知我國公路運輸之溫室氣體排放除了 2001 年因柴油消費量減少而略有下降外，其餘各年為逐年上升的情形，其中 1995 年的排放量為 27,859 Gg CO₂-e，2000 年增為 32,514 Gg CO₂-e，2005 年進一步成長至 36,770 Gg CO₂-e，1995~2005 年間年排放量之成長率達 32.0%，與能源消費之成長率相當，顯示公路運輸之

溫室氣體排放問題不容忽視。就三種溫室氣體的排放當量分析，2005 年 CO₂ 排放量占 96.8%，而 CH₄ 及 N₂O 僅合占約 3.2%，故仍以 CO₂ 為公路運輸主要之溫室氣體排放類別。

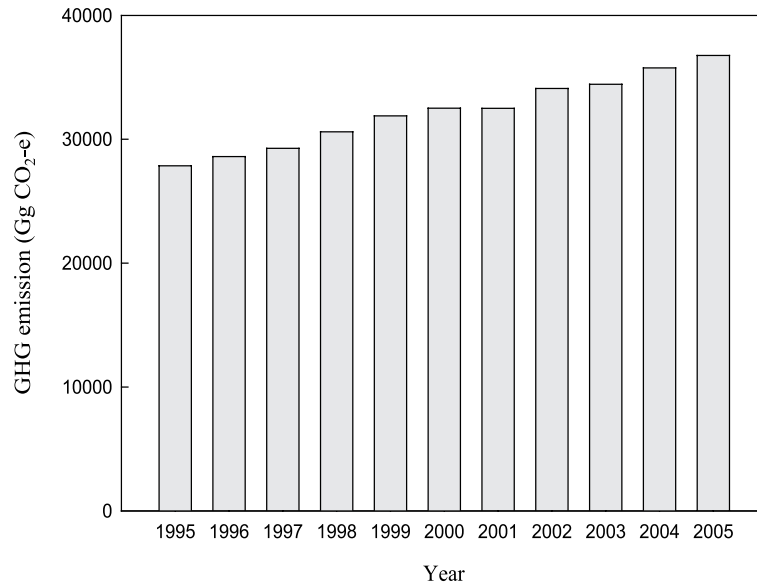


圖 2 我國公路運輸歷年溫室氣體排放情形

3.1.2 各類能源消費量與結構配比

由表 2 可知，我國公路運輸之能源消費類別以汽油及柴油為主，歷年之消費配比合計皆達 99.4%以上，僅有少量的燃料油、LPG 及電力消費，其中電力的消費則主要來自車站設施之用電，消費量雖有逐年上升的趨勢，但所占之消費比例皆低於 0.1%。以 2005 年為例，汽油占總能源消費量的 68.3%，柴油占 31.3%，LPG 僅占 0.3%，燃料油及天然氣則合占不到 0.1%。而各類能源之消費量皆逐年增加，1995~2005 年間汽油消費量成長 32.2%，柴油成長 30.1%；另過去十年來因政府推行計程車改裝成瓦斯車，部分營業用小客車陸續改裝為以 LPG 為燃料，年消費量由 1995 年僅 1KLOE 增加為 2005 年的 42,825 KLOE，2006 年消費量更上升至 62,199 KLOE，最近因國際油價高漲，預期未來消費量將會持續成長。在汽油及柴油的消費結構方面，歷年的變動均不大，但近數年來汽油的消費量及配比均有下降的趨勢，而柴油的消費量及配比則均呈現微幅上升的趨勢。若分為油品、LPG、電力三類能源來看，LPG 及電力之消費配比均有逐年上升的趨勢，油品之消費配比則相對逐年微幅下降，但仍維持在 99.4%以上。

3.1.3 能源 GHG 排放強度

能源 GHG 排放強度係指平均每單位能源消費的溫室氣體排放量，由於 CO₂ 是公路運

輸主要的溫室氣體排放類別，故其值之高低與能源的消費結構密切相關，低碳燃料之消費配比愈高，則 GHG 排放強度愈低；反之，若含碳量高的燃料消費配比偏高，則 GHG 排放強度愈高。圖 3 為我國公路運輸於 1995~2005 年之能源 GHG 平均排放強度，可知由於油品消費量所占百分比始終維持在 99.4% 以上，且各年汽、柴油之消費配比變動不大，致歷年能源 GHG 平均排放強度之變動不顯著，維持在每 2,760 公噸/KLOE 左右。

表 2 公路運輸歷年能源消費量與結構配比

年代	汽油	柴油	燃料油	LPG	電力
1995	68.2%	31.8%	0.0%	0.0%	0.0%
2000	69.2%	30.6%	0.0%	0.1%	0.0%
2005	68.3%	31.3%	0.0%	0.3%	0.0%
2006	66.7%	32.8%	0.0%	0.5%	0.0%

資料來源：本研究整理。

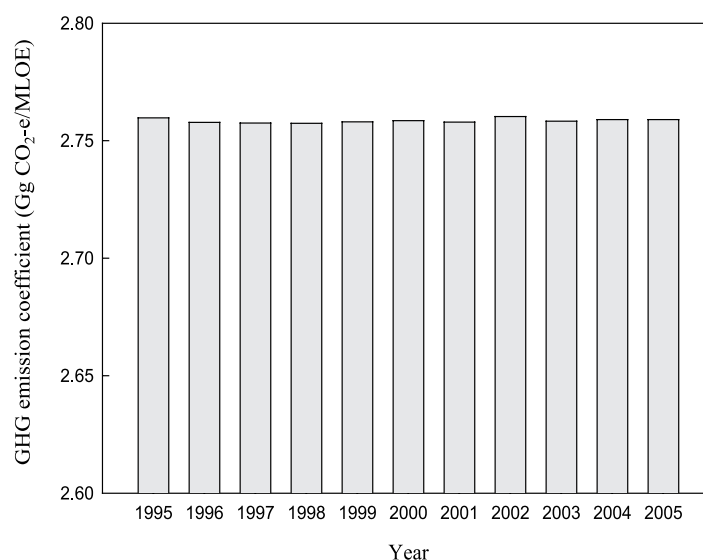


圖 3 我國公路運輸歷年 GHG 排放強度變動情形

3.1.4 人口成長

由於人口越多對交通的需求越大，故公路運輸的能源消費量（如圖 1 所示）與人口數的變動具有正向相關性。我國歷年人口數成長情形如圖 4 所示，1995 年全國總人口數為 21,357,431 人，2000 年增為 22,276,672 人，2005 年進一步增加至 22,770,383 人，可知與公

路運輸的能源消費量同樣呈逐年增加的趨勢。然以成長率來看，臺灣每年的人口成長率隨著「少子化」趨勢的發展，明顯呈現逐年降低的趨勢，1996 年的成長率尚略高於 1.0%，此後每年下降，2005 年之成長率已不及 0.4%。以 1995~2005 年間的總成長率來看，全國總人口數成長 6.6%，遠低於公路運輸同期間的能源消費量成長率 (32.0%)，顯示我國公路運輸的能源消費型態逐漸趨於浪費的現象。

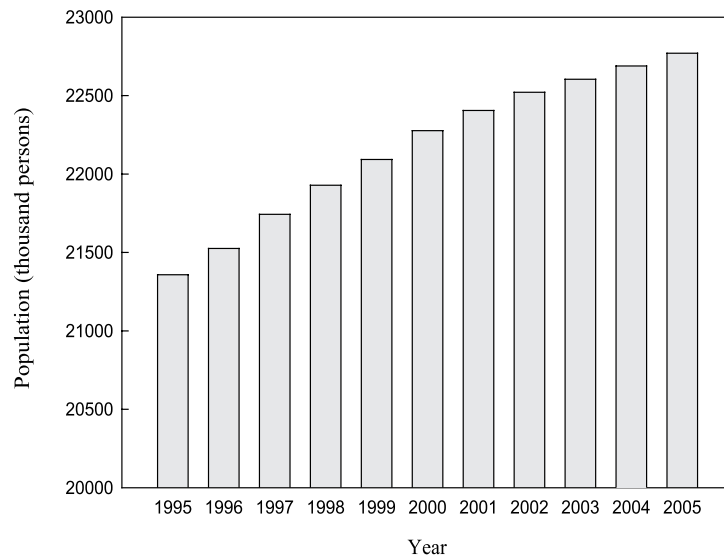


圖 4 我國歷年人口成長情形

3.1.5 人均能源消費量

本研究所謂「人均能源消費量」係指臺灣地區每年平均每單位人口耗用在公路運輸上的能源量，其值之高低可反映國人在公路運輸上的能源消費強度，消費強度越高代表能源的使用型態越浪費。圖 5 顯示，我國公路運輸之人均能源消費量在 1995~2005 年間呈逐年升高的趨勢，其中 1995 年為 473 公升油當量 (LOE)/人，2000 年上升為 529 LOE/人，2005 年再上升至 585 LOE/人，十年間平均每人每年在公路運輸的能源消費量增加 112 LOE，成長率 23.7%。顯示臺灣地區過去十年隨著物質生活水準的持續提升，一般家庭購車能力增強，加上公路交通路網建設趨於完整便利，民眾在交通工具的利用型態上逐漸趨向小客車、機車等私人交通工具，而導致平均每人之能源消費量逐年上升。本研究依據相關統計數據計算發現，歷年平均每人擁有的小客車及機車數量均呈現逐年增加的情形（圖 6），1995~2006 年間每一千人擁有的小客車及機車數分別由 188 輛及 399 輛增加為 249 量及 593 輛，成長率分別達 37.3%及 48.6%，顯示其中機車數量之成長尤其快速。此外相關研究亦指出，我國小客車數占各種車輛總數之比例逐年上升（廖慧嵐等^[5]），而私人運具之運量占總客運量之比率從 1993 年的 73%逐年上升至 2003 年的 88%；換言之，大眾運具之

運量相對減少 15% (蕭再安^[24])。表示我國近年來在大眾運輸的建設與推動上的積極度頗為不足，未來仍有極大的努力空間。

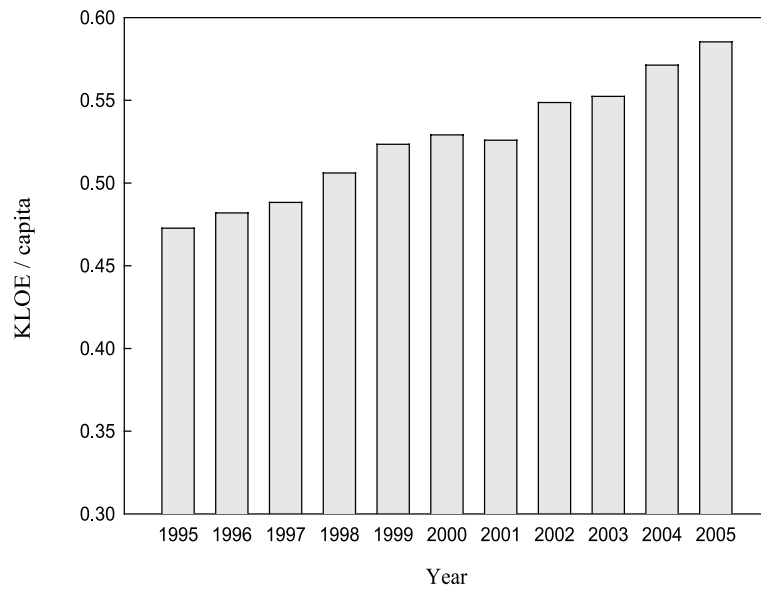


圖 5 我國公路運輸歷年人均能源消費量變動

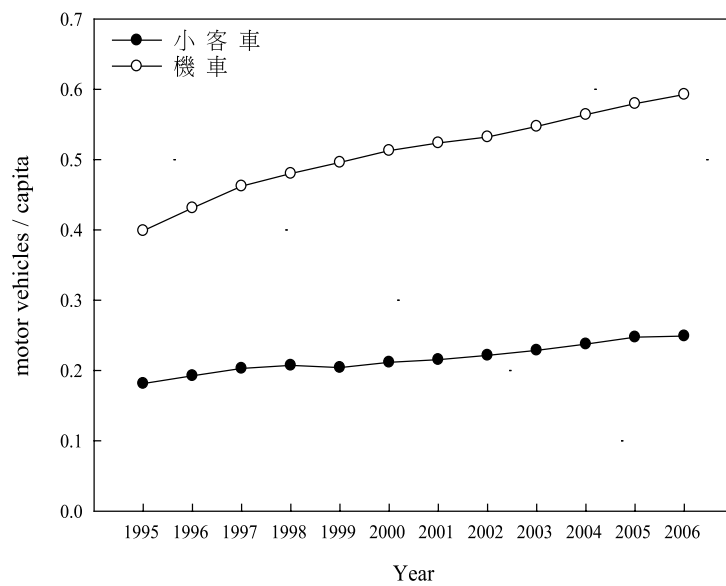


圖 6 我國歷年平均每人擁有車輛數變動情形

3.2 GHG 排放變動分解分析

本文應用分解分析法之對數平均數迪氏指數 (LMDI) 探討 1995~2005 年間影響臺灣公路運輸溫室氣體排放之關鍵因素，研究分別將 1995~2000 年及 2000~2005 年間之溫室氣體年排放變動量藉由前述方法加以分解，計算出油品排放強度、油品消費配比、人均能源消費量、人口成長等八項組成因素對排放量變動的貢獻，以量化評估各因素對我國公路運輸之溫室氣體排放的影響及重要性，分析結果分別彙整如表 3 及表 4 所示。

3.2.1 1995-2000 年

表 3 之分析結果顯示，2000 年臺灣公路運輸的溫室氣體排放量較 1995 年增加 4654.7 Gg CO₂-e，而人均能源消費量的上升是造成排放量增加的主要因素，對排放的增量影響高達 3396.6 Gg CO₂-e，相當於排放淨變動量的 73.0%。本研究定義此百分比為「影響度」，用以評判各組成因子對排放量變動影響的方向（增量或減量）及比較不同因子的相對影響程度。以本研究為例，正的影響度表示該組成因子對溫室氣體的排放造成增量效應，負的影響度則表示該因子對排放具有減量效果，而影響度的絕對值越大表示該因子對排放變動的影響越大。

由表 3 可知，人口成長是另一重要的排放增量因子，對排放變動的影響量有 1268.9 Gg CO₂-e，影響度為 27.3%。其他組成因子對排放量的影響相對不顯著，其中 LPG 的消費配比及電力的排放強度與消費配比雖然皆有排放增量的效果，但因消費量不多，因而對排放變動的影響量亦不大，影響度皆在 1% 以下。油品的消費量雖大，但因歷年油品消費配比一直維持在 99.4% 以上，而汽、柴油的消費結構變動亦不明顯，因此 1995~2000 年間不論排放強度或消費配比均僅有少量的減量效果，影響度亦低均於 1.0%。

表 3 1995~2000 年我國公路運輸溫室氣體排放變動分解分析結果

單位：Gg CO₂-e

項 目	排放影響量	影響度
油品排放強度	-14.3	-0.3%
油品消費配比	-42.2	-0.9%
LPG 排放強度	0.0	0.0%
LPG 消費配比	36.1	0.8%
電力排放強度	1.7	0.0%
電力消費配比	7.8	0.2%
人均能源消費量	3396.6	73.0%
人口成長	1268.9	27.3%
淨變動量	4654.7	100.0%

3.2.2 2000-2005 年

如表 4 所示，2005 年我國公路運輸的溫室氣體排放量較 2000 年增加 4256.0 Gg CO₂-e，而人均能源消費量及人口成長仍然是造成排放量增加的重要因子。其中人均能源消費量上升對公路運輸溫室氣體排放的增量影響有 3491.5 Gg CO₂-e，影響度高達 82.0%；而此段期間人口的成長對排放增量的影響已減少至 758.3 Gg CO₂-e，影響度降為 17.8%，顯示人均能源消費量的持續上升已成為我國公路運輸部門溫室氣體排放增加的最主要原因。

其他因素在此段期間對排放量的影響同樣相對不明顯，其中油品部分因柴油的消費配比上升導致整體 GHGs 排放強度微升，而轉為產生排放的增量效應；另此段期間 LPG 之消費配比由原來的 0.1% 成長為 0.3%，而對 GHGs 的排放有 59.6 Gg CO₂-e 的增量影響；相對油品的消費配比則略降，對此部門的 GHGs 排放的減量影響有 67.2 Gg CO₂-e，影響度均較 1995 ~ 2000 年略高。

表 4 2000 ~ 2005 年我國公路運輸溫室氣體排放變動分解分析結果

單位：Gg CO₂-e

項 目	排放影響量	影響度
油品排放強度	12.1	0.3%
油品消費配比	-67.2	-1.6%
LPG 排放強度	0.0	0.0%
LPG 消費配比	59.6	1.4%
電力排放強度	1.0	0.0%
電力消費配比	0.8	0.0%
人均能源消費量	3491.5	82.0%
人口成長	758.3	17.8%
淨變動量	4256.0	100.0%

3.2.3 綜合分析

綜合前二節之分析結果發現，人均能源消費量的持續上升及人口自然成長是造成臺灣公路運輸溫室氣體排放量增加的二個關鍵因素，尤其人均能源消費量上升所導致的排放增量效應有擴大的現象，增量影響度由 73.0% 上升為 82.0%。顯示隨著臺灣經濟的持續發展，國民的物質生活水準亦不斷提升，但大眾運輸系統的規劃建設與便利性，卻始終無法滿足大部分地區民眾交通運輸的需求，以致自用小客車及機車的使用與持有率逐年成長，平均每位國人用於公路運輸的能源量因而持續上升，致所造成溫室氣體排放的增量效應顯著且有逐漸增強的現象。因此，降低公路運輸人均能源消費量，是減緩此部門溫室氣體排放的重要方向，而大眾運輸系統的普遍與便利化，則是抑制自用小客車及機車數量持續成長，

有效降低人均能源消費量的必要策略之一；此外，省能及綠色運具（如油電混合車、腳踏車）的利用，亦可有效減少化石能源的耗用，進而達到抑低人均能源消費量的效果。

在人口成長的影響部分，由於人口增加會導致對能源的消費需求上升，因而對公路運輸的溫室氣體排放形成增量的效應，為僅次於人均能源消費量的增量影響因子。唯臺灣近年來隨著「少子化」趨勢的發展，人口出生率節節下降，故此因素對公路運輸溫室氣體排放增量的影響有逐漸減弱的趨勢，1995～2000年之增量影響度為27.3%，2000～2005年降為17.8%。儘管如此，其造成排放量增加的影響仍需要加以重視，因此如何在滿足能源消費需求增加的同時減少溫室氣體的排放，成為重要的思考方向；而以非碳或生質燃料取代目前以油品為主的能源消費結構，則為可能的關鍵策略。分解分析之結果亦發現，由於公路運輸歷年之油品消費量始終占能源總消費量的99.4%以上，因而油品消費配比因子對溫室氣體排放量變動的影響極為有限，僅因LPG消費配比的增加而產生極少量的排放減量效應；此外，油品GHG排放強度因子亦因歷年汽、油柴之消費比例變動及GHG排放係數差異均有限，致對溫室氣體排放量變動的影響亦不易顯現。顯示若公路運輸部門欲藉由油品消費配比的下降，或降低能源GHG排放強度來達到有效減少溫室氣體排放的目的，仍需藉由積極推展及使用替代燃料著手。

四、結論與建議

本文應用分解分析之對數平均數迪氏指數法(LMDI)，將1995～2005年間我國公路運輸的GHGs排放進行分解分析，結果證明此方法可有效量化及比較各相關因子對排放量變動的影響程度，並藉以確認及探討此部門進行溫室氣體減量的重要方向及策略。分析結果發現探討的八項相關因子中，人均能源消費量的持續上升，是造成臺灣公路運輸溫室氣體排放量增加的最主要因素，且其增量影響效應有擴大的現象；而人口成長為僅次於人均能源消費量的增量影響因子，但隨著臺灣人口出生率逐年下降，其增量影響度有逐漸減弱的趨勢。而其他六項因子，包括三類不同能源之GHG排放強度及消費結構配比，由於歷年公路運輸之燃料消費類別以油品為主，結構配比變動不大（維持在99.4%以上）；且因歷年汽、柴油之消費比例變動及GHG排放係數差異均有限，致對溫室氣體排放量變動的影響亦不易顯現。

上述分析結果顯示，如何有效降低公路運輸的人均能源消費量，是減緩此部門溫室氣體排放的關鍵課題，而大眾運輸系統的普遍與便利化，則是抑制自用小客車及機車數量持續成長，有效降低人均能源消費量的重要策略；此外，省能及綠色運具（如油電混合車、腳踏車）的使用亦可有效減少化石能源的耗用，進而達到抑低人均能源消費量的效果。2005年「全國能源會議」結論（經濟部能源局^[25]）中，曾針對運輸部門提出「發展綠色運輸系統」及「舒緩汽機車使用與持有」等溫室氣體減量策略建議，然而除了具體實現全國綠色運輸系統的建設外，如何規劃出完善且具吸引力的營運計畫並加以落實，使民眾願意主動

改變過去利用自用小客車與機車作為代步工具的生活型態，實是政府推動上述相關策略能否成功的重要關鍵。

分析結果亦顯示隨著人口的成長，對公路運輸能源的消費需求將相對增加，進而造成溫室氣體的排放增量；而目前以油品為主的能源消費結構，則使得各燃料消費配比及能源 GHG 排放強度等因子，對溫室氣體排放的減量影響不易顯現。因此，公路運輸部門若欲在滿足能源消費需求成長的同時能減少溫室氣體的排放，或藉由降低油品消費配比或能源 GHG 排放強度來達到有效減少溫室氣體排放的目的，均需藉由積極推展及使用替代燃料，以非碳或生質燃料取代目前以油品為主的能源消費結構著手。對於替代燃料的推展使用，短期而言需要積極提升低碳（例如：LPG）及生質燃料（例如：酒精）的使用比例，目前中油雖已開始供應「E3 酒精汽油」，但相較於國外添加生質酒精於汽油的作法早已實施多年，且與一般汽油的價差很大，對民眾具有足夠經濟誘因的情況，顯然我國還有很大的進步空間。就中長期而言，則需要朝以非碳能源替代傳統以汽柴油作為車輛主要動力來源的方向努力；近幾年來全球主要汽車製造商陸續推出各種低污染車輛，而在臺灣雖亦已有油電混合車款上市，可惜由於相較於其他同等級車款的售價過高，欲普遍為一般民眾接受及選擇並不容易。顯示我國公路運輸的能源使用結構欲朝向低（非）碳燃料的方向發展，達到有效降低能源 GHG 排放強度的目標，實需要政府在推動各種策略的同時能提出完整的配套措施，方能對多數民眾產生足夠的誘因去配合。

參考文獻

1. 臺灣經濟研究院，「我國經濟成長與二氧化碳排放脫鉤之芻議」，<http://www.tier.org.tw/03forum/tiermon200607.asp>，民國九十五年。
2. 經濟部能源局，「臺灣能源平衡表」，http://www.moeaboe.gov.tw/ePublication/energy_balance/main/ch/default.htm，民國九十六年。
3. 工研院能環所，「我國能源有關 CO₂ 排放統計與分析」，<http://eigic.estc.tw/download/CO2.doc>，民國九十六年。
4. 黃運貴、曹壽民，「運輸部門二氧化碳排放情形分析」，**都市交通**，第十八卷，第一期，民國九十二年，頁 1-14。
5. 廖慧嵐、盧怡靜、林素貞，「CO₂ 排放趨勢變動與關鍵因素分解—以汽機車與柴油車之比較」，2006 環境規劃與管理研討會論文，中華民國環境工程學會，民國九十五年，頁 1-10。
6. Lu, I. J., Lin, S. J., and Lewis, C., "Decomposition and Decoupling Effects of Carbon Dioxide Emissions from Highway Transportation in Taiwan, Germany, Japan, and South Korea", *Energy Policy*, Vol. 35, 2007, pp. 3226-3235.
7. Stead, D., "Relationships between Transport Emissions and Travel Pattern in Britain", *Transport Policy*, Vol. 6, 1999, pp. 247-258.

8. Morán, M. A. T. and González, P. del R., "Structure Factors Affecting Land-transport CO₂ Emissions: A European Comparison", *Transportation Research Part D*, Vol. 12, 2007, pp. 239-253.
9. Ang, B. W., "The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide", *Energy Policy*, Vol. 33, 2005, pp. 867-871.
10. 經濟部能源局, 「能源產業溫室氣體排放係數」, http://eigic.estc.tw/download/emission_factors.xls, 民國九十六年。
11. 經濟部能源局, 「95 年度電力排放係數」, <http://www.moeaec.gov.tw/news/newsdetail.asp?group=g&no=03&serno=00321>, 民國九十六年。
12. 侯萬善, 「我國電力供應系統排放係數的估算」, <http://proj.moeaidb.gov.tw/tigo/epaper/epaper01.htm#item4-1>, 民國九十五年。
13. Ang, B. W. and Choi, K. H., "Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method", *The Energy Journal*, Vol. 18, No. 3, 1997, pp. 59-73.
14. Ang, B. W. and Liu, F. L., "A New Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation", *Energy*, Vol. 26, 2001, pp. 537-548.
15. Ang, B. W., Liu, F. L., and Chew, E. P., "Perfect Decomposition Techniques in Energy and Environmental Analysis", *Energy Policy*, Vol. 31, 2003, pp. 1561-1566.
16. Lin, S. J., Lu, I. J., and Lewis, C., "Identifying Key Factors and Strategies for Reducing Industrial CO₂ Emissions from a Non-Kyoto Protocol Member's (Taiwan) Perspective", *Energy Policy*, Vol. 34, 2006, pp. 1499-1507.
17. 林素貞、黃群達、林佑蓉, 「臺、美、日、英之商業部門 CO₂ 排放趨勢與關鍵因素探討」, *能源季刊*, 第三十六卷, 第四期, 民國九十五年, 頁 56-77。
18. 黃運貴、曹壽民, 「我國運輸部門能源消費量分解分析」, *運輸學刊*, 第十七卷, 第二期, 民國九十四年, 頁 175-208。
19. 劉春初、陳家榮, 「臺灣地區水泥業營業收入變動來源之研究: 1994-2001」, *華岡經濟論叢*, 第四卷, 第一期, 民國九十三年, 頁 49-69。
20. Albrecht, J., Francois, D., and Schoors, K., "A Shapley Decomposition of Carbon Emissions without Residuals", *Energy Policy*, Vol. 30, 2002, pp. 727-736.
21. Wang, C., Chen, J., and Zou, J., "Decomposition of Energy-Related CO₂ Emission in China: 1957-2000", *Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 73-83.
22. 交通部統計處, 「95 年交通統計要覽」, <http://www.motc.gov.tw/hypage.cgi?HYPAGE=stat07.asp&catid=57&year=95>, 民國九十六年。
23. 內政部, 「戶籍人口統計年報」, <http://www.ris.gov.tw/ch4/static/st10-0.html>, 民國九十六年。

24. 蕭再安，「營造健康、綠色的交通環境—京都議定書生效後運輸部門因應策略」，**能源報導**，民國九十四年，頁 8-10。
25. 經濟部能源局，**能源政策白皮書**，民國九十五年。