

環境規劃與管理類

我國資源生產力探討及物質使用效率分析

王彬墀*、李育明**、陳秋楊***

摘 要

為探討物質使用效率，提升資源生產力，並衡量評估人類文明永續發展的狀態或努力程度，國際上發展諸多兼顧經濟發展、環境保護與社會公平之評量指標系統。因此，本研究透過資源管理績效評價方法，進行經濟體層級為主之資源生產力與效率之實證研究與量化分析。

透過資料包絡分析法(DEA)分析我國過去 20 年物質流的監控結果得知，物質直接投入量指標(DMI)平均約上升 2.83%，物質直接消費量指標(DMC)則平均約上升 2.13%；2 項指標(DMI 與 DMC)的成長率均低於 GDP 成長率(平均約上升 4.95%)。至於我國經濟體之資源生產力評估，代表物質強度的指標 DMI/GDP 由 1.8kg/USD 降為 0.9kg/USD，且我國在學習效果的變化值分數低於 1，表現欠佳，無疑昭示我國刻正遭逢資源利用發展的困頓。

【關鍵字】永續性、生命週期評估、物質流分析、資料包絡分析

*財團法人台灣永續能源研究基金會
黎明技術學院觀光休閒系

**國立臺北大學自然資源與環境管理研究所

***明志科技大學環境資源學院

經理
兼任助理教授
特聘教授
榮譽教授

一、前言

為衡量或評估人類文明永續發展的狀態或努力程度，國際上發展諸多兼顧經濟發展、環境保護與社會公平之評量指標系統，如常見的經濟發展指標「國民生產毛額」(Gross Domestic Products, GDP)、著重所得分配均等與否程度的吉尼係數(GINI coefficient)或考量人文面向之「人類發展指數」(Human Dimension Index, HDI)等，惟其涵蓋層面仍未臻周全，聯合國近年因而積極發展並鼓勵各國廣為運用「包容性財富指數」(Inclusive Wealth Index, IWI)，即是著眼於其關切重點超越上述傳統經濟及發展指標的內容，而以納入全方位的資產(assets)為考量，如經濟產值(Economic Products)、人文資產(Human Wealth)與自然資本(Natural Capitals)，進而量化呈現財富及其成長永續性之真實狀態。此外，考量國家層級諸如政治自由、社會網絡的堅實與否及貪污情況等因素，以及屬於個人層次的身心健康、工作保障與家庭穩定等，聯合國另委託美國哥倫比亞大學地球研究所(The Earth Institute)研究並發表「全球幸福報告」(World Happiness Report)。其他如英國列格坦研究機構(Legatum Institute)提出的「全球繁榮指數」(Prosperity Index)、不丹王國的「國民幸福指數」(Gross National Happiness, GNH)以及經濟合作暨發展組織所發展的「美好生活指數」(Your Better Life Index)等，皆屬探究並試圖衡量人類於物質生活和精神生活之恆定性的評量指標系統。

徐如賓(2013)指出，近年來世界許多國家皆面臨所得分配漸趨惡化的難題，探究其主要原因包括：全球化趨勢的開展、技術偏向的科技進步(skill-biased technology change)，以及勞工談判力的式微等。特別在全球金融危機爆發後，世界經濟與產業結構驟變，各國更加體認所得分配不均對經濟成長的潛在衝擊，紛紛研擬、推動包容性成長(inclusive growth)的相關政策措施，以維繫經濟的持續穩健成長。亞洲開發銀行(ADB)曾於「2020年策略」(Strategy 2020, ADB, 2008)提出「包容性成長」為各國長期發展應考量三大策略之一，強調「機會平等的成長」，使社會上的每個成員都能在平等的基礎上，參與經濟成長的過程，並分享經濟成長成果；聯合國亦成立「包容性成長國際政策中心」(International Policy Centre for Inclusive Growth, IPC-IG)，做為政策討論及溝通的平台，促進各國落實推動包容性

成長。歐盟則於 2010 年制訂「發展綱領 Europe 2020」(EU, 2010)，並將「包容性成長」列為國家未來發展的重要方向，致力推動經濟成長與社會公平及正義之同時兼顧。另參照 Lee and Krayner (2003)的定義，「包容性的」(inclusive)研究，意謂具廣度及深度，且納括大部分之人、事或物。「包容性的」過程，亦即盡其所能地充分利用階級科層中所具有之先天優勢、觀點見解及可能的貢獻(以組織改造為例)；而「包容性的」模型，則係將所有受影響的個人(同以組織改造為例)囊括其內，且使其充分了解相關進展及問題，藉以彰明前述之公平性。

因此，過去數十年來的永續性發展思維，已然改變為人類發展(Human Development, HD)與永續發展兩相異且互補的概念。在注重自然資源與環境、人類福祉的基本觀點及生活品質方面，亦由經濟成長受限於環境極限，提升至減少貧窮、獲致更好的生活水準及提升人類發展的層次等。如以永續性為本，可導入人文面向、強化社會永續性，衡量以往未能深入或探討之議題或領域，應可達成追求全方位福祉之目標。惟限於本文篇幅，本研究在整體探討的概念上，僅就環境面向之資源生產力、使用及其效率為主。

「資料包絡分析」(data envelopment analysis, DEA)係一無參數的效率分析方法，藉由比較決策單元(Decision Making Unit, DMU)之投入產出數據資料，進而衡量各 DMU 之相對效率。本文係以台灣地區物質流分析資料庫為依據，並蒐集具代表性之經濟體物質流分析資料，俾進行經濟體層級之資源生產力與物質使用效率實證分析，另運用 DEA 的 BCC 模式(Banker, Charnes and Cooper, 1984)與 Malmquist 生產力指數方法(Malmquist Productivity Index, MPI)，比較我國與其他具代表性經濟體的資源使用效率。

二、文獻回顧

2.1 物質流分析

Graedel and Allenby (1995)提及經濟體自環境中取用及自國外進口原物料，俾利進行後續的製程、製造、生產及消費。Linstead et al. (2001)則認為，物質流分析種類可分為物質流(material flow)、單一物質流(substance flow)及能源流(energy flow)，其目的即是針對一設定時段的某一已定義之區域或系統，追蹤及量化包含能源在內的物質流量。雖部分如建築物與公共建物的興建係計入人造資本的存量，然產品終究會成為廢棄物或部分回收再利用，且最後仍須以掩埋或焚化的方式進行最終處置。由此可見，所有的資源投入，最終仍會變成一項產出，故可以計算資源的流量，並於物質平衡模型中使用這些資訊。

歐盟統計局(Eurostat, 2001)提出物質平衡模型如圖 1 所示，其中 TMR(總物質需求)=國內開採量(化石燃料、礦物及生物資源量)+未利用之國內開採量+進口量+與進口相關之間接流量。DMI(物質直接投入量)=國內開採量(化石燃料、礦物、生物資源量)+進口量。DMC(物質直接消費量)=DMI-出口量。

質量平衡方程式用於物質流分析之表示如下：

$$MF_i = A_i + B_i - C_i \pm D_i$$

其中 MF_i = i 地區的物質流分析

A_i = i 區域資源流量的投入(物質進口+產品進口+水消耗量)

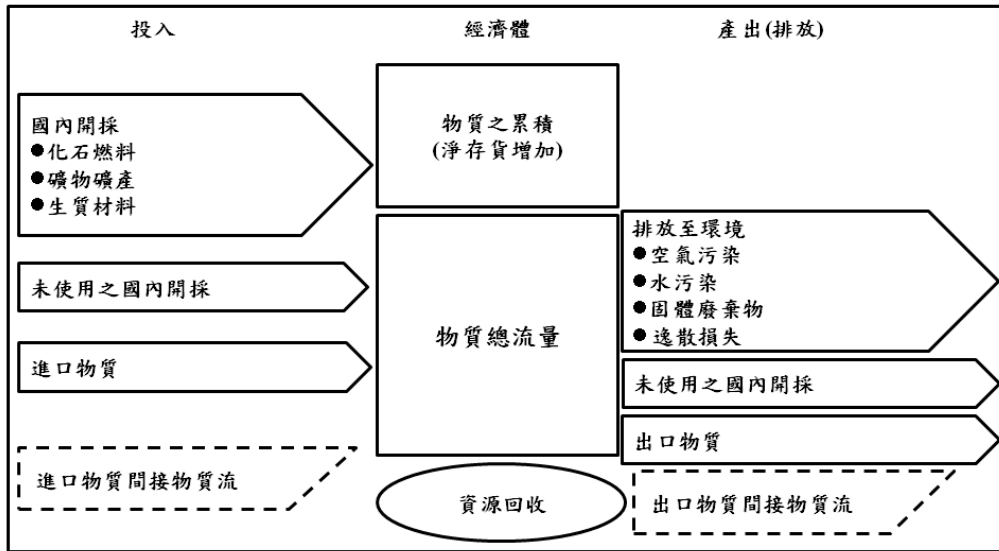
B_i = i 區域的物質產量

C_i = i 區域資源流量的產出(物質出口+產品出口+廢棄物+廢水+水輸出量)

D_i = i 區域(資源)存量的變化

由上可知， A 、 B 、 C 及 D 蒐集所有上述相關數據不僅困難且相當耗時，歐盟統計局因而另行設計了一套國家經濟面的物質流會計，亦即，透過國家經濟計算能量流，並將水及空氣排除於算式外，目前已有許多研究針對國家尺度進行資源使用

的計算。英國環境、食品與農村事務部(DEFRA, 2003)則用於農業、林業、漁業、採礦、化石燃料及其他材料等資源使用上納入物質流分析，且此類計算亦將「隱藏」的物質流列入，如礦業廢棄物自採礦過程中移除而未直接投入經濟生產。



資料來源：Eurostat, 2001

圖 1 物質平衡模型示意圖

近年屢見物質流分析運用於國家尺度以下的經濟體之相關研究，如 Barrett (2002)發表關於英國約克郡的物質流分析及生態足跡研究，其中化石燃料運輸及隱藏的流量(如留在礦坑的礦業廢棄物)雖被低估(分別比英國平均值減少 30%及 35%)，惟仍有助於都市型經濟之物質流計算，如約克郡在 2000 年的 TMR 為 3,387,000 公噸，每人平均則為 18.8 公噸。Moffatt (2006)亦利用物質流分析探索不同情境的發展及廢棄物減量，例如英國東南部於 2000 年間產生 368 萬公噸的廢棄物(包含 53%營建廢棄物、19%工商業、16%農業、11%家戶及 1%的其他廢棄物)，除約以每年 1%至 3%的比例成長，且將可能在 25 年內增至現今的 2 倍。Schmidt-Bleek (1992; 1993a; 1993b)認為，與物質流分析有關的政策先驅是「四倍數 Factor 4」資源使用減量的理念，亦即資源使用減半、產出加倍(人民福祉加倍)，而「倍數 X」論點的科學基礎仍受質疑(X 可為任意正實數)；倘若提高任何不可再生

176 我國資源生產力探討及物質使用效率分析

資源的消耗量，則資源量將會遞減。Sckmidt-Bleek 亦指出，進步的經濟發展中，無須任何證明，物質投入量至少要減半(若計算人口成長，可能要減量更多)。

綜言之，物質流分析乃追蹤物質從自然界開採進入人類經濟體系，並藉由經濟活動在各種人類社會階段中移動，最後回歸自然環境的情形。Dietz and Neumayer (2007)認為物質流分析之優點在於一方面可以反映及追蹤那些無貨幣價值但對自然環境影響較大的物質移動，另一方面也可以反映其他國家以其國內自然資源支持本國經濟發展的實際情形，在衡量經濟發展與資源使用效率時亦較能符合實際情形，而該立論亦可應用於諸多受關注的環境污染或議題上。有鑑於此，行政院環境保護署於 2014 年底始公布我國 2012 年度溫室氣體排放清冊報告，本研究亦維護更新我國物質流資料庫至 2012 年止，並依此繪製我國最新物質平衡圖。

2.2 資源生產力

論及資源生產力則須瞭解資源耗用指標，Giljum et al. (2011)提到現有的量測系統及指標、資源耗用指標之要件與建議之資源耗用指標組合，茲分述如後。

2.2.1 現有的量測系統及指標

1. 量測資源耗用之方法

- (1) 物質流會計及分析(Material flow accounting and analysis, MFA)與 MIPS 每單位服務的總物質投入，亦即資源生產力的倒數/單位服務量之原物料進流法(Material Input per Service Unit)。
- (2) 能源流會計(能源流分析，EFA)；若與物質流併用分析，則係物質與能源流分析(MEFA)。
- (3) 空氣帳(Air accounts)。
- (4) 水帳(Water accounts)。
- (5) 土地覆蓋及使用帳(Land cover and land use accounts)。

2. 以資源投入之核心類別為基礎的指標

- (1) 以物質流為基礎之指標(以質量或以質量與GDP相關之指標):如DMC、MIPS。
衝擊指標則由「生命週期評估」導入。
- (2) 能源流分析部分:如DEI(似直接物質投入DMI)、CED 累積能源需求。
- (3) 水足跡。
- (4) 土地覆蓋及使用變遷;如於農地擴增為建地之成本。
- (5) 生態足跡。
- (6) 碳足跡。

2.2.2 資源耗用指標之要件

1. 須廣泛且互補地涵蓋所有資源耗用類別。
2. 須與政策相關聯。
3. 易於宣導。
4. 應用生命週期觀點。
5. 避免重複計算。
6. 於不同尺度量測資源耗用。
7. 與國家帳系統相互協調及一致。

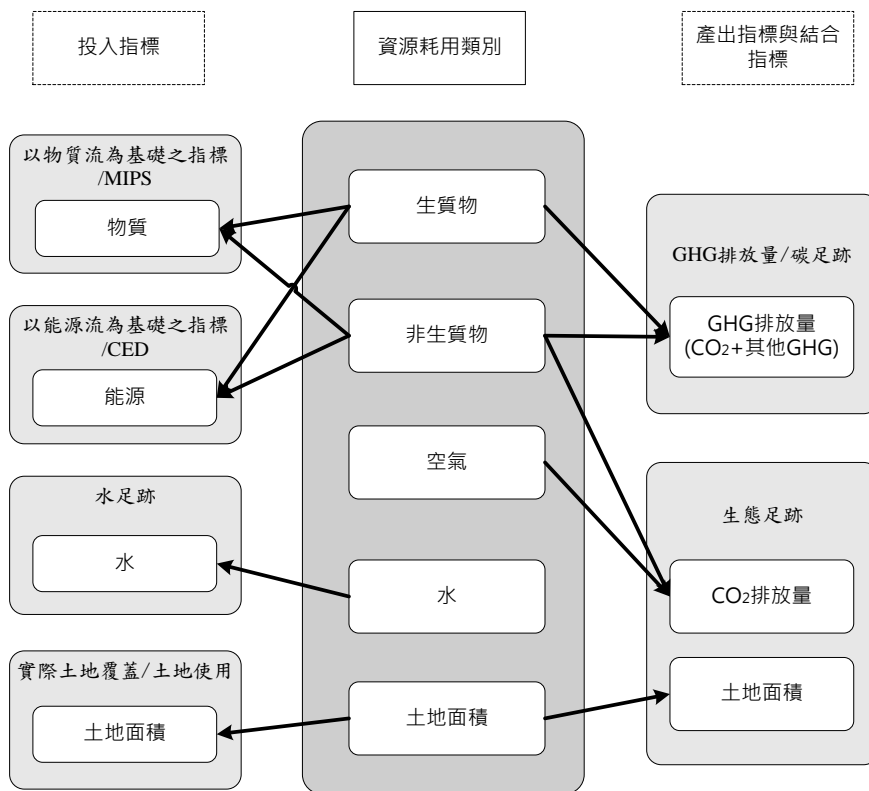
2.2.3 資源耗用指標組合

Giljum et al. (2011)建議區分適用於企業之產品層級,以及適用於如國家等經濟體層級的資源耗用指標組合如表 1;另匯整以資源投入之核心類別為基礎的指標概念圖如圖 2。

表 1 資源耗用指標組合彙整表

資源耗用類別	產品層級	國家層級
物質	產品之物質投入	物質投入/國家之物質消費(包括隱含於進出口)
生質物 非生質物	生質物 非生質物	生質物 非生質物
水	產品水足跡	國家水足跡(包括隱含於進出口)
土地面積	產品之實際耗用土地面積	國家之實際耗用土地面積(包括隱含於進出口)
GHG 排放量	產品碳足跡	國家 GHG 排放量(包括隱含於進出口)

資料來源：Giljum et al. (2011)



資料來源：Giljum et al. (2011)

圖 2 資源耗用與投入產出組合指標示意圖

2.3 資料包絡分析方法

資料包絡分析法(DEA)最早由 Charnes et al. (1978)提出，意謂構建生產函數之過程中，所有的投入資料(data)均被包絡(envelope)於生產函數之下，其中「資料」係指多項產出(如財務、績效)指標或各項投入與產出的數值；而「包絡」則是各指標的整合，而非僅是加權平均。該法係一無參數的效率分析方法，藉由比較同一資料群組內所有決策單元(Decision Making Unit, DMU)之投入產出數據資料，進而衡量每一決策單元之相對效率，亦即在資料包絡分析法的有效率意謂可為其他決策單元之比較標準，屬相對效率(relative efficiency)，而非絕對效率(absolute efficiency)。此法常使用兩類型之規模假設，即固定規模報酬(Constant Returns to Scale, CRS)與變動規模報酬(Various Returns to Scale, VRS)，後者包含規模報酬遞增及規模報酬遞減。CRS 係假設產出量會隨著投入量變化的相同比例而改變(亦即所有的投入量加倍，則產出量亦隨之倍增)；VRS 則假設由於製程或生產之科技與技術的不同，而呈現規模報酬之遞增、固定及遞減。

DEA 之特性可歸納如下：

- 無須假設特定的函數形式。
- 確定性邊界(deterministic frontier)。
- 容易處理多產出與多投入下的效率計算。
- 具有計算單位上的不變性，亦即不會因單位不同而產生不同結果。
- 假定 DMUs 具有同質的產出及投入項。
- 投入及產出數據不得有負值，否則須經平移(translation)處理。
- 投入項不得為 0，產出項則可以為 0。
- 為維持 DEA 模型的鑑別力，DMU 數目宜在投入及產出項目的 2 倍以上。
- 加入新的 DMU，原有的 DMUs 效率值不會因此上升；至於加入更多的投入及產出項，個別 DMU 的效率值至少不會下降。

- 效率值易受到環境因素及統計噪音的扭曲。

因為 DEA 無參數之特性及其富彈性之操作方式(可視情況設定為投入或產出導向)，故係一實用之效率分析方法，可依 MFA 的目標及需求，進而測試或確認去物質化及排放(或污染)減量效果。因此，本節以亞太 10 國、歐盟 28 會員體及我國等經濟體之物質流資料庫相關資料之彙整基礎，利用 DEA 方法針對各經濟體資源使用之效率進行評估工作。其中，較為人熟知的 CCR 模型(Charnes, Cooper and Rhodes)係利用線性規劃方式，獲致 DMU 之最佳生產效率前緣或邊界(best production frontier)，其在規模報酬固定(CRS)的假設前提下，選擇投入導向，對分析所有在最適規模操作之 DMU 效率相當合適。而由 CCR 模型所得的技術效率值稱之為整體技術效率或總技術效率(Overall Technical Efficiency, OTE；亦即 CRS TE)，其數學規劃式可表示如下：

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, \lambda} \theta \\ \text{s. t. } & -q_i + Q\lambda \geq 0, \\ & 0\chi_i - \chi\lambda \geq 0, \\ & \lambda > 0 \end{aligned}$$

其中 θ 為技術效率值、 λ 係權重向量、 x_i 為第 i 個 DMU 之 $K \times 1$ 投入向量、 q_i 則為第 i 個 DMU 之 $M \times 1$ 產出向量、 X 是 $K \times N$ 的投入矩陣，而 Q 則為 $M \times N$ 的產出矩陣。另一方面，若將變動規模報酬(VRS)的效果納入考量，則 Banker, Charnes 與 Cooper (1984) 提出 BBC 模型為一更普遍之型式且廣泛被使用；該模型為 CRS-DEA 模型的延伸，在原模型方程群組中加入凸性限制式(convexity constraint) $I1'\lambda = 1$ 、即權重和為 1，如下所示；其中 $I1$ 係一均為 1 之 $N \times 1$ 向量。

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, \lambda} \theta \\ \text{s. t. } & -q_i + Q\lambda \geq 0, \\ & 0\chi_i - \chi\lambda \geq 0, \\ & \lambda \geq 0 \\ & I1'\lambda = 1 \end{aligned}$$

BCC 模型所得到的效率前緣具有凸性，個別 DMU 相對較接近 BCC 模型所求得的效率前緣，因而使得 BCC 模型所求得的效率值至少不會低於 CCR 模型。BCC 模型求解所得到的效率值稱為純粹技術效率(pure technical efficiency, PTE；亦即 VRS TE)，PTE 係相對於 VRS 效率前緣所得出，介於 0 與 1 之間。理論上，規模效率(scale efficiency, SE)由 CCR 模型與 BCC 模型所得到的效率值相除而得 ($SE=OTE/PTE$)，換言之 $OTE=PTE \times SE$ 。

此外，效率評估之研究方法另採以 DEA 為基礎，且可進行跨期別分析的 Malmquist 生產力指數方法(Malmquist Productivity Index, MPI)，以補強前述之缺憾。MPI 可呈現每一 DMU 於一指定時期內之總要素生產力效率之變化，其亦可評估介於兩不同時期之效率變化，茲就 MPI 之數值意涵說明如下：

(一) $MPI > 1$ ：意謂該 DMU 於 t 時期至(t+1)時期間，將投入項轉化為產出項之效率，其結果呈現上升態勢。

(二) $MPI \leq 1$ ：等於 1 時表示狀況持平，小於 1 則意指在 t 時期至(t+1)時期的相對效率呈現衰退下滑現象。

相對於共同的技術水準，藉由計算每一數據資料點間之距離比，MPI 可衡量介於兩時間點之總要素生產力(total factor productivity, TFP)變化。一般而言，MPI 寓含生產力變化的 2 項主要來源；一為效率變化(catch-up，即追趕效果)，另一項則為技術變革(technological change；或稱 frontier-shift 前緣或邊界移動、innovation 創新效果。意指前緣或邊界技術之變動)。「效率變化」(即總技術效率 OTE，由純粹技術效率 PTE 與規模效率 SE 之乘積所組成)與每一 DMU 可藉由學習好的案例、經驗或經濟規模等而增進自我效率的努力程度有關，亦可稱為學習效應(learning effect)。而「技術變革」係指於兩時間點間，該 DMU 具效率之前緣或邊界的變動，亦即科技之進步；換言之，技術變革可說是新產品或新科技的發展，可使製程方法等更為精進改善，進而促使生產前緣或邊界之向上提升。效率變化及技術變革效果，其計算式如下：

$$\text{效率變化 Catch-up} = \frac{\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^{t+1}}{\delta_i^t(x_0, y_0)^t} \quad \text{及}$$

$$\text{技術變革 Frontier-shift} = \left[\frac{\delta_i^t(x_0, y_0)^t}{\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^t} \times \frac{\delta_i^t(x_0, y_0)^{t+1}}{\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^{t+1}} \right]^{1/2}$$

其中 $(x_0, y_0)^t$ 及 $(x_0, y_0)^{t+1}$ 代表 DMU 分別於 t 期及 t+1 期的數據資料點； $\delta_i^t(x_0, y_0)^t$ 及 $\delta_i^t(x_0, y_0)^{t+1}$ 分別代表 $(x_0, y_0)^t$ 及 $(x_0, y_0)^{t+1}$ 相對於 t 時期邊界的效率； $\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^t$ 與 $\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^{t+1}$ 則分別代表 $(x_0, y_0)^t$ 及 $(x_0, y_0)^{t+1}$ 相對於(t+1)時期邊界的效率。

MPI 依定義係為「效率變化」與「技術變革」的乘積，其式如下所示；此外，如就兩效率比的幾何意義進一步闡釋 MPI 所代表的意涵，一是就 t 時期技術水準衡量效率變化，另一則是就(t+1)時期技術水準衡量效率變化。換言之，其不僅表示 DMU 的總要素生產力(TFP)，同時亦反應 DMU 之效率高低，以及技術邊界的提升或衰退。

$$\text{MPI} = (\text{Catch-up}) \times (\text{Frontier-shift}) = \left[\frac{\delta_i^t(x_0, y_0)^{t+1}}{\delta_i^t(x_0, y_0)^t} \times \frac{\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^{t+1}}{\delta_i^{t+1}(x_0, y_0)^t} \right]^{1/2}$$

三、研究方法及資料說明

在物質流分析中普遍應用的指標可區分為投入、產出及消費指標群。相關文獻 (Eurostat, 2001; Bringezu et al., 2003; Weisz et al., 2006) 指出，投入面向之指標，如直接物質投入(DMI)，係衡量經濟體內物質直接投入使用之量，DMI 包含自該經濟體區域內(或該國內)之自然環境開採及進口，且使用於生產及消費之物質，亦即 DMI 等於國內開採使用量以及進口量。而產出面向之指標，如國內製程產出(Domestic Processed Output, DPO)乃計算於一經濟體區域內(或一國內)，由其自然環境開採及進口之耗用物質轉變為廢棄物及其他排放的總重量；惟須說明的是，前述物質也可能源自於既有存貨(stocks)，且均未包括存貨的開採使用量及出口量。

就消費面向指標而言，國內物質消費(DMC)係量測一經濟體內(或一國內)之物質直接使用總量，惟不包括間接流；淨存貨增加(Net Additions to Stock, NAS)則指該經濟體之物質成長量，換言之，亦即用於建築物或其他基礎建設之新建築物質，以及使用於新耐久材之物質總重量。惟「除役物質」(decommissioned materials)如頹壞之建築物或耐久材等存貨廢棄之舊物質，其未回收再利用之量則併入 DPO 計算。由此觀之，NAS 可標示出此等含括投入及產出之物質流平衡是否達成、或距離平衡尚有多少差額，亦可將之視為永續代謝成熟與否的必要條件(Weisz et al., 2006)。物質貿易平衡 (Physical Trade Balances, PTBs) 則衡量經濟體之物質貿易究為剩餘或赤字，即進口量減去出口量；PTBs 意指資源進口量是否多於資源出口量，亦可闡釋該經濟體的 DMC 係奠基於何者，究是倚靠自有資源、抑或仰賴進口資源。

此外，本研究參採世界資源研究所(World Resources Institute, WRI)的物質流分析架構(Adriaanse et al., 1997; Matthews et al., 2000)，以及物質流分析方法(Fischer-Kowalski et al., 2011)，相關關鍵指標的定義或計算程序歸納如後(按：因仍存在定義上及計算上之困難，故此未論及間接流)。

$$DMI = DE + Imports ;$$

$$DMC = DMI - Exports ;$$

$$PTBs = Imports - Exports ;$$

$$DPO = \text{空氣污染排放} + \text{廢水} + \text{固體廢棄物} + \text{溢散量}。$$

其中 DMI：物質直接投入量(domestic material input)

DMC：物質直接消費量(domestic material consumption)

DE：國內開採與使用量(domestic extraction used)

Imports：進口量，源自貿易的直接物質投入(邊境重量為準)

Exports：物質之出口量(邊境重量為準)

PTBs：物質貿易平衡，進口量減去出口量

DPO：國內製程產出量，包括空氣及水的排放、廢棄物、溢散的使用物質與其他沈降物

至於資源生產力則可結合意欲產出與總體物質流分析指標而構建，若該意欲產出係一經濟績效指標，亦可同時提供該經濟體有關生態效益(eco-efficiency)或環境效率的資訊。例如 GDP/DMI 意指直接物質生產力、而 GDP/DMC 亦為一廣為使用的生產力指標。綜言之，衡量及監控隨時間變化之生產力指標，可供了解或測試有關物質或資源之使用是否與經濟成長脫鉤，以及各自價值之附加，並可引領潮向永續發展之方向邁進。

本文以我國物質流監控資料為基礎，先進行物質流概況分析及資源生產力延伸探討，並參考歐盟統計局、澳洲聯邦科學與工業研究組織(CSIRO)與聯合國環境規劃署亞太物質流線上資料庫而與歐盟、亞太等國家或經濟體進行資源效率分析比較。另應用 IPAT 方程式，衡量我國物質投入強度之變化，並將分析結果與其他亞太 10 國、歐盟 28 個會員體進行比較；並延伸效率變化之評估模式，應用 DEA 中的 MPI 方法進一步比較包含我國在內的 39 個經濟體之效率變化。

四、評估與分析

4.1 我國物質流分析及資源生產力延伸探討

針對物質流分析領域，我國持續進行相關研究(Lee and Lee, 2003; Lee and Lin, 2006; Su et al., 2009)，如 1990 年代起已建立一以我國各官方機關為數據來源的資料庫，本研究即參酌此一資料庫並更新至 2012 年之數據。我國的 MFA 相關研究業已運用世界資源研究所(Adriaanse et al., 1997; Matthews et al., 2000)及歐盟統計局(Eurostat, 2001)所建議的投入/產出方法，建置一修訂的 MFA 架構，此一相對具包容性的架構含括前述的國內開採及使用、進口、排放、出口及間接流等要項。本研究進一步擴展及強化前述相關研究，並維護更新來自行政院主計總處、財政部、關務署以及政府相關機關等單位之 MFA 資料庫數據。圖 3 係 2012 年我國 MFA 監控結果，資料顯示國內開採及使用(DE)為 185.2 百萬公噸(無國內開採之化石燃料)，

進口物質總量達 201.69 百萬公噸，其中有 66%為進口化石燃料；而排放至環境中的空氣污染物，其主要成分為溫室氣體，佔 DPO 總量的 98%。

藉由延伸前述監控成果，本研究嘗試分析過去 20 年間我國物質流 DMI 指標趨勢及其組成，並與 GDP 進行比較，如圖 4 所示；另亦針對產出導向指標之 DPO 進行類似分析如圖 5。

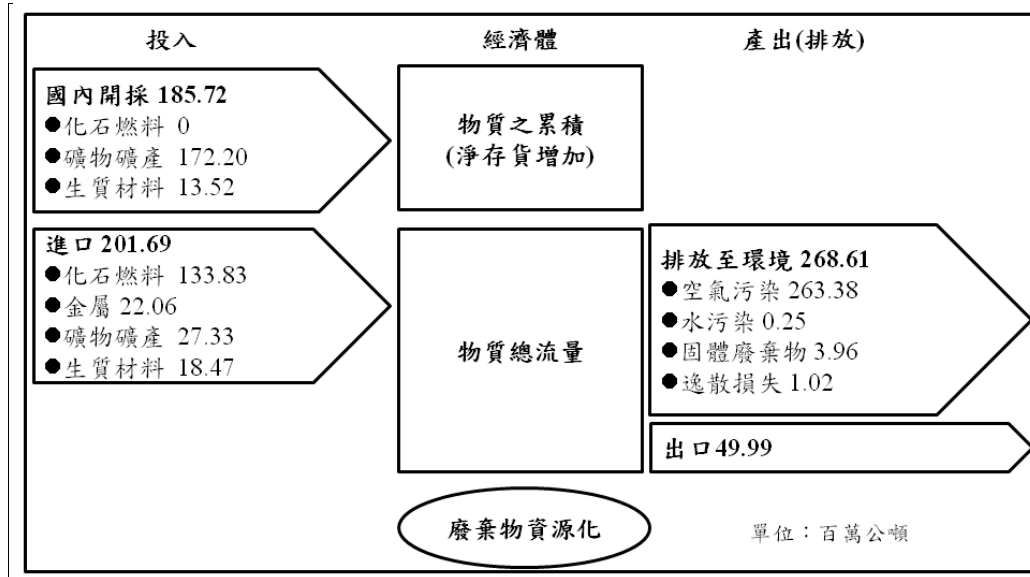


圖 3 2012 年我國物質流平衡示意圖

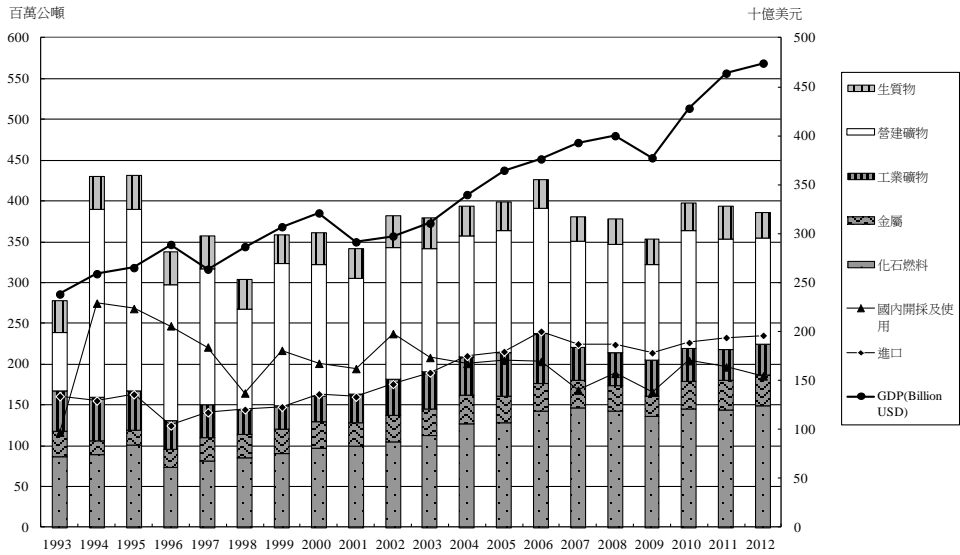


圖 4 我國歷年 GDP、直接物質投入(DMI)趨勢與其組成

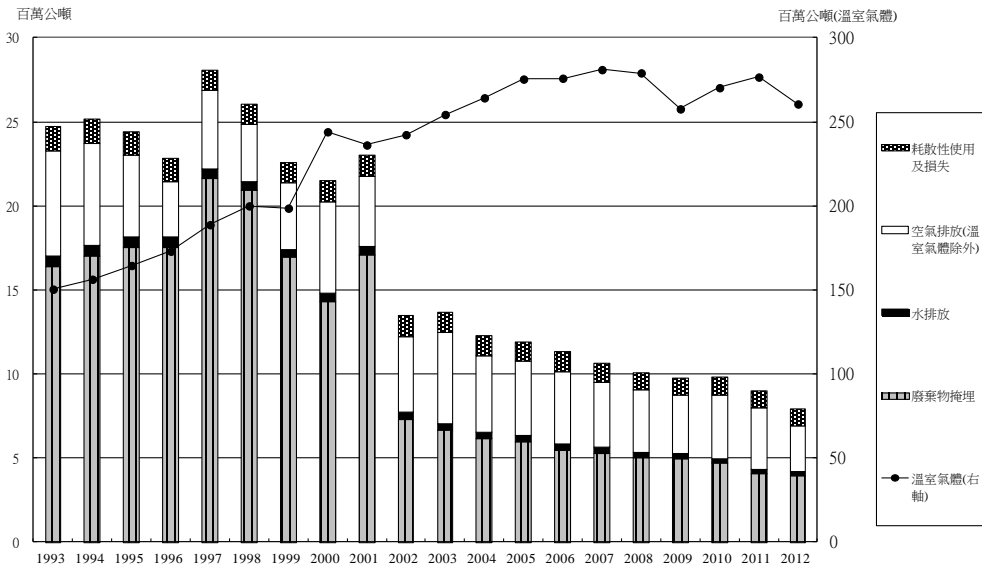


圖 5 我國歷年國內製程產出(DPO)趨勢及其組成

分析圖 4 及圖 5 之資料可知：(1)指標 DMI 平均每年升高 2.83%，DMC 每年則平均上升 2.13%，兩者均低於 GDP 的平均成長率(GDP 平均成長率為 4.95%，以 2000 年美元價格為基準)。(2)產出方面，傳統污染物排放自 2001 年起即明顯降低，其中溫室氣體排放為 DPO 之大宗。(3)儘管溫室氣體排放趨勢於 2009 年以前與 GDP 之成長趨勢約略近似，但在 2010 年後卻產生戲劇性的變化，亦即溫室氣體排放量之平均成長率已低於 GDP 平均成長率，反映溫室氣體排放量似已與經濟成長相對脫鉤之趨勢。

4.2 我國物質流分析及資源生產力延伸探討

本研究參考及回顧過去研究所建議之投入導向、產出導向及消費導向等指標 (Eurostat, 2001; Lee, 2008; UNEP, 2011 and 2013)，發現資源生產力(或前述之生態效益)的評價，常藉由計算每單位資源耗用(物質單位指標，如 DMI)所獲得之福利(以錢幣單位計算之經濟產值，如 GDP)，並以投入導向觀點表示；而排放密度類指標則監控制程產出(如 DPO)與經濟產值(如 GDP)之間的關係。考量上述不同觀點，本研究採用效率的相關指標，例如 DMI/GDP(資源生產力之倒數)、DPO/GDP 以及 DMC/GDP，此 3 類指標依序代表該經濟體之物質強度、排放強度與另一型式的物質強度(或物質效率)。

彙整我國過去 20 年間上開 3 種指標之人均物質需求-人均 DMI、人均 DPO、人均 DMC 及人均 GDP 等(折線圖)，以及 3 類型式之強度指標(柱狀圖)，如圖 6。其中 1994 年至 1995 年間的人均 DMC 與人均 DMI 之數值差異較大，此係因前述期間的營建材料投入量及消費量甚多，而其效果較不易反映於產值或 GDP 上。誠如該圖所示，DMI/GDP 由 1.8kg/USD 降至 0.9kg/USD(以 2000 年美元價格為基準，下同)，而其他 2 個相關強度指標亦呈現相似之趨勢(DPO/GDP：由 0.9 降至 0.6、DMC/GDP 由 1.7 降至 0.9)。人均 GDP 由 1993 年的 11,000 美元提升為 2012 年的 20,500 美元；人均 DMI、人均 DMC 及人均 DPO 則分別落於 18、15 與 10 公噸，且相關強度指標在過去 10 年間明顯呈現下降趨勢，人均物質需求則趨於穩定。

為與其他經濟體比較由 MFA 衍生之資源生產力相關指標，本研究另蒐集整理其他不同之物質流統計資料來源，如歐盟統計局(資料統計區間為 1990 年至 2011

年)、澳洲聯邦科學與工業研究組織(CSIRO)與聯合國環境規劃署亞太物質流線上資料庫(UNEP Asia-Pacific Material Flow online database; 資料統計區間為 1970 年至 2008 年), 茲就我國與歐盟 28 個經濟體、亞太 10 國之人均 DMC 及 DMI 之比較結果分述如後。

- 人均 DMC：澳洲及愛爾蘭於 2000 年分別達到最高的 49.1 公噸與 44.3 公噸；愛爾蘭於 2008、2011 年時分別降至 33.7 公噸及 21.6 公噸，惟澳洲於 2008 年仍維持在 49.2 公噸的高檔。在東亞方面，日本及南韓在 2000 年至 2008 年間，分別自 12.9 公噸與 18.2 公噸，降至 10.5 公噸及 18.1 公噸，但我國卻自 2000 年的 15.2 公噸上升至 2008 年的 15.8 公噸，以及 2011 年的 16.7 公噸。
- 人均 DMI(因資料欠缺，故未含亞太地區)：盧森堡、愛爾蘭及芬蘭之人均 DMI 於 2000 年時為最高，分別達到 49.3、47.5 及 41.0 公噸，與人均 DMC 趨勢相似。愛爾蘭至 2011 年其人均 DMI 已降至 25.0 公噸，盧森堡亦下降至 40.5 公噸。然而我國之人均 DMI 在 2000 年至 2011 年間，卻由 15.9 公噸上升至 18.5 公噸。

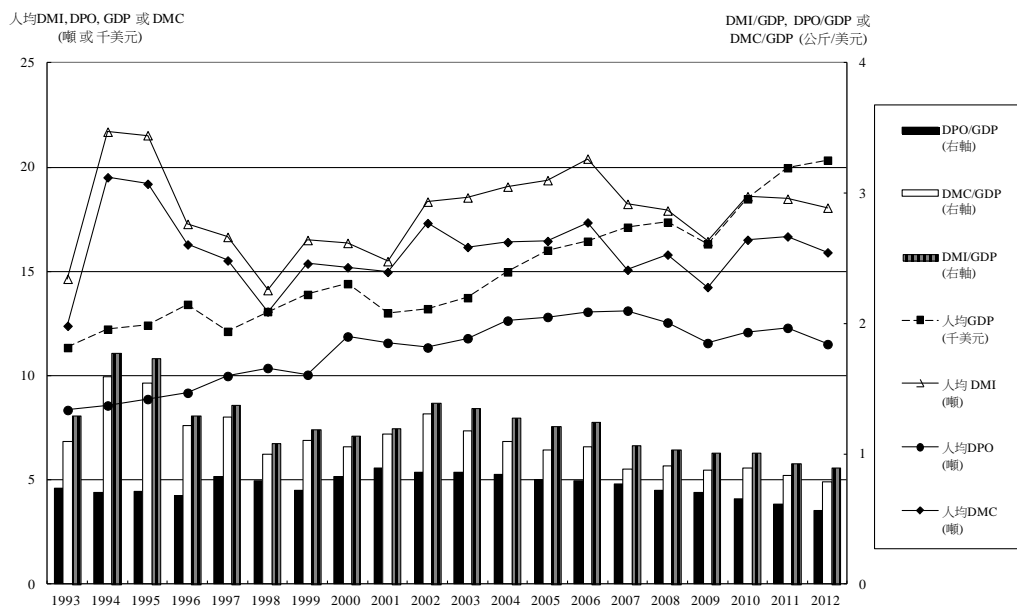


圖 6 以我國 MFA 相關衍生指標闡釋資源生產力示意圖

4.3 特定經濟體永續性之 IPAT 分解與物質使用效率評估

由衡量人類福祉的角度觀之，如將 GDP 之多寡視為產出，資料包絡分析模型中的同軸(radial)效率度量方式假設相當合理且適合用於資源使用效率或生產力之研析，究其原因在於除該法係無參數之分析架構外，也可視個案情形以投入或產出導向進行分析，俾符合實際狀況或需求。此外，在 1970 年代即有相關研究提出以解構 IPAT 方程式($I=P \times A \times T$ ；I：衝擊 impact、P：人口 population、A：富裕程度 affluence、T：科技 technology)了解各因子對於環境衝擊之影響程度的概念(Ehrlich and Holdren, 1971; 1972)，後續所衍生的諸多迴響與發展(Dietz and Rosa, 1994; Graedel and Allenby, 1995; Waggoner and Ausubel, 2002)，也為進一步了解對環境各類衝擊與評估前述相關影響因子的貢獻程度等，提供了良好的連結。

4.3.1 IPAT 分解

本節詳述應用 IPAT 方程式，針對由 MFA 衍生之特定指標進行評估及其結果。聯合國環境規劃署出版的「亞太地區資源生產力近期趨勢」報告(UNEP, 2013)不僅提供各經濟體資源利用的樣態，該報告亦詳細闡述永續且有效率使用資源的可能性，無疑可為形塑一經濟體構建永續性與效率所需的健全政策基礎之參考。該報告選擇 DMC 指標代表 IPAT 方程式中的衝擊(I)，而物質強度指標 DMC/GDP 則定義為科技或技術之回應。爰此，假設 $I=DMC$ 、 $P=$ 人口數、 $A(\text{人均 GDP})=GDP/P$ ，以及 $T(\text{物質強度, MI})=DMC/GDP$ ，則 IPAT 方程式中各參數變化可以下式呈現。

$$\Delta I = \Delta P \times \Delta A \times \Delta T \quad \text{或} \quad \Delta DMC = \Delta P \times \Delta \left(\frac{GDP}{P} \right) \times \Delta \left(\frac{DMC}{GDP} \right)$$

上式意謂欲穩定相關衝擊的任何作為，須同時處理或滿足富足程度(A)與物質強度(T)2 項重要因子。另據聯合國環境規劃署報告，人口成長的驅動力在區域層級上，對資源開採壓力加重環境負荷之影響已不若成長日益快速的富足程度，亦即 A 已成為 IPAT 中最重要之驅動因子。此外，報告亦主張過去 10 年間，由於人口不斷成長，日益提高之物質強度為開採壓力上升之主要原因。惟針對我國的相關分析並未含括於該報告或其他同類型的技術文件中，本研究遂嘗試依其方法將我國資料納

190 我國資源生產力探討及物質使用效率分析

入計算並進行比較。以同為 2000 年美元匯率之 GDP 為比較基礎，我國與亞太 10 國、歐盟 28 會員體之 IPAT 方程式解構比較分析彙整如表 2，此外 UNEP 的「亞太地區資源生產力近期趨勢」報告及其資料庫最新資料係更新至 2008 年止，雖我國(截至 2012 年)及歐盟(蒐集至 2011 年)資料庫數據較新，惟為求各經濟體之資料時間序列完整性，遂將前述共計 39 經濟體之資料分析區間訂為 2000 年至 2008 年。根據解構比較分析結果顯示，自 2000 年至 2008 年間，所有經濟體在科技或技術回應上(DMC/GDP 或 MI)均有改善。德國(DE)、愛爾蘭(IE)、義大利(IT)、馬爾他(MT)、英國(UK)及日本(JP)在 DMC 減少上甚為明顯；然而羅馬尼亞(RO)及越南(VN)的 DMC 成長率則雙雙超過 100%，研判該 2 國可能正處於新興發展階段，故相較於以往歷史統計資料而相對消費較多比例之物質。我國之物質消費量(DMC)於資料區間內稍有上升，但在物質強度的降低上則位居所有分析經濟體之末。

表 2 2000-2008 年我國與其他經濟體之物質消費主要驅動因子變化

Country or Economy	Δ DMC(%)	Δ DMC (in MMT)	Δ P (%)	Δ A (%)	Δ MI (%)
BE: Belgium	0	0.599	4	110	-54
BG: Bulgaria	50	51.030	-8	338	-63
CZ: Czech Republic	6	10.548	1	283	-73
DK: Denmark	9	12.183	3	110	-49
DE: Germany	-9	-134.032	0	92	-53
EE: Estonia	80	14.987	-3	332	-57
IE: Ireland	-10	-17.306	18	130	-67
EL: Greece	15	23.116	3	163	-57
ES: Spain	18	122.865	14	141	-57
FR: France	1	9.763	6	102	-53
HR: Croatia	83	31.755	-4	239	-44
IT: Italy	-15	-137.064	5	100	-59
CY: Cyprus	77	11.780	12	144	-35
LV: Latvia	20	6.867	-8	370	-72
LT: Lithuania	89	24.410	-9	353	-54
LU: Luxembourg	2	0.183	12	142	-62
HU: Hungary	11	13.803	-2	240	-67
MT: Malta	-11	-0.157	7	102	-59
NL: Netherlands	0	0.777	3	119	-56
AT: Austria	8	15.643	4	108	-50

Country or Economy	Δ DMC(%)	Δ DMC (in MMT)	Δ P (%)	Δ A (%)	Δ MI (%)
PL: Poland	19	104.311	0	213	-62
PT: Portugal	16	30.782	3	109	-46
RO: Romania	219	378.193	-8	496	-42
SI: Slovenia	23	7.936	1	172	-55
SK: Slovakia	53	28.675	0	367	-67
FI: Finland	19	33.908	2	118	-47
SE: Sweden	18	31.789	4	91	-41
UK: United Kingdom	-6	-46.294	5	72	-48
AU: Australia	12	111.393	12	128	-56
CN: China	99	11,264.044	5	260	-47
IN: India	46	1,673.370	13	128	-43
ID: Indonesia	27	263.706	12	176	-59
JP: Japan	-19	-304.913	1	2	-21
MY: Malaysia	39	130.238	17	111	-44
PK: Pakistan	40	225.921	16	98	-39
KR: Korea	4	31.248	4	68	-41
TH: Thailand	38	153.835	6	109	-38
VN: Viet Nam	124	402.009	10	169	-24
TW: Taiwan	8	25.547	3	19	-12

資料來源：1. Statistics database of Eurostat, European Commission; 2. CSIRO and UNEP Asia-Pacific Material Flows online database; 3. 本研究維護之我國物質流資料庫; 4. MMT：百萬公噸, P: population, A: per capita GDP, MI: DMC/GDP

綜上所述，本實證研究構建一與物質流相關之永續性評估，而由 MFA 衍生之關鍵因子或指標，可做為降低物質使用之導引，而追求高效率之物質利用同樣是永續性的重要議題之一。根據前述結果，本研究呈現經更新後的我國 MFA 資料庫相關監控與統計結果(更新至 2012 年)，並就現況加以描述；除選取關鍵指標進行闡釋，並就我國之資源生產力及效率，以經濟體之物質流分析觀點進行量化分析。本研究同時亦應用 IPAT 方程式，衡量我國物質強度之變化，進而將分析結果與其他亞太 10 國、歐盟 28 個會員體進行比較。

我國之國內物質投入量 DMI 指標值約達 421 百萬公噸(MMT)，另在國內開採並使用 DE 指標中營建礦材占約 92%，進口物質有 66% 為化石燃料；包括污染物排放、廢棄物及溫室氣體等的國內製程產出 DPO 指標約有 263MMT，近乎 99% 的占比為溫室氣體排放量。根據過去 20 年來針對我國物質流的監控結果顯示，指標 DMI

192 我國資源生產力探討及物質使用效率分析

平均約上升 2.83%，指標 DMC 則平均約上升 2.13%；指標 DMI 及 DMC 的成長率均低於 GDP 的成長率(平均約上升 4.95%)。此外，觀察相關趨勢可知，我國溫室氣體排放量自 2010 年起與經濟成長呈現相對脫鉤的現象。

在我國經濟體之資源生產力評估方面，代表物質強度的指標 DMI/GDP 由 1.8kg/USD 下降到 0.9kg/USD，而其他 2 個與強度相關的指標亦為類似的趨勢(排放強度指標 DPO/GDP 自 0.9kg/USD 降為 0.6kg/USD、而 DMC/GDP 則自 1.7 kg/USD 降為 0.9 kg/USD)。人均 GDP 從 1993 年的 11,000USD 上升至 2012 年的 20,500USD；另人均 DMI、人均 DMC 及人均 DPO 分別為 18、15 及 10 公噸。前述結果顯見與強度相關之指標在過去 10 年間呈現降低之趨勢，而人均物質需求亦趨於穩定；此可做為台灣地區環境衝擊與經濟成長脫鉤現象佐證。

此外，本研究亦參採 UNEP 出版之研究報告以補充我國及歐盟 28 會員體之相關統計資料(2000 至 2008 年)，並與原報告之亞太 10 國進行比較。IPAT 解構分析結果顯示，所有經濟體在技術回應面向(DMC/GDP 或 MI)均有改善精進，其中德國、愛爾蘭、義大利、馬爾他、英國及日本等國，在降低 DMC 的衝擊上成效明顯。對照台灣地區雖係主要績效分析標的，但在物質消費(DMC)的變化呈現稍微上升的趨勢；物質強度雖見改善，惟仍係所有納入分析之經濟體中表現最差者。

4.3.2 資源效率探討

本研究利用 DEA 進行效率分析的投入/產出數據資料，以國內生產毛額(GDP)為唯一產出項，另以人口數及物質投入(DMI)為投入項所估算導出之效率，便可相對公平客觀地反映富足程度(人均 GDP)及資源生產力(GDP/DMI)，圖 7 係以 BCC 模型，選擇投入導向之 DEA 分析結果。以 2008 年而言，丹麥(DK)、德國(DE)、盧森堡(LU)、馬爾他(MT)、荷蘭(NL)、英國(UK)及日本(JP)等國，表現最佳，同時在富足程度及資源生產力 2 項達到效率前緣。至於我國(TW)的資源生產力於 39 個經濟體中名列第 23。惟在一特定時間的 BCC 模型分析缺點包括無法區別具時間跨度(跨年期)的效率變化，以及科技進步的因素未被完整考量。

本研究延伸效率變化之評估模式，應用 DEA 中的 MPI 方法進一步比較包含我國在內的 39 個經濟體之效率變化，俾彌補 BCC 模式無法進行跨期比較及考量創新因素之缺憾。

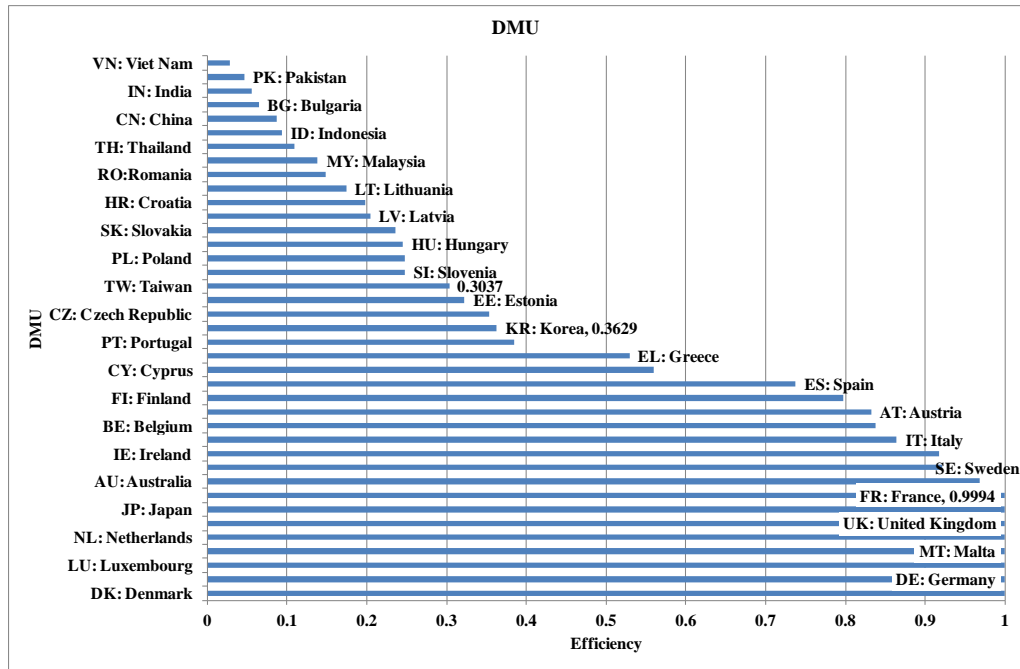


圖 7 以 BCC 模型分析各經濟體於 2008 年之相對資源使用效率結果

在規模報酬假設為 VRS 的前提下，本研究選擇投入導向進行實證研究，另導入人口數與 DMC 為投入項、GDP 為唯一產出，蒐集並分析亞太 10 國、歐盟 28 會員體及我國等 39 個經濟體於 2000 至 2008 年間之相關資料數據結果如表 3。由分析結果可知，以固定時間點觀之表現最好的經濟體為英國與日本，惟如同時考量學習及創新效果則未必保持領先；反之，部分處於新興發展階段的經濟體，如捷克 (CZ)、匈牙利(HU)、波蘭(PL)及斯洛伐克(SK)等，表現相對較佳。我國則因效率變化值小於 1，反映於學習效果面向表現欠佳；其他如賽普勒斯(CY)、斯洛維尼亞(SI)及越南(VN)等國亦是類似情形，此類經濟體應先關注如何面對效率變化表現不彰，以及如何增進資源生產力等問題。

表 3 以 MPI 分析 39 個經濟體 2000 至 2008 年之實證結果彙整表

DMU	Catc h-up	Frontier -shift	Malm quist	DMU/St atistics	Catc h-up	Frontier -shift	Malm quist
BE: Belgium	1.395	1.569	2.189	PT: Portugal	1.295	1.744	2.258
BG: Bulgaria	1.137	1.724	1.961	RO: Romania	1.970	1.813	3.571
CZ: Czech Rep.	2.472	1.940	4.794	SI: Slovenia	0.921	1.850	1.704
DK: Denmark	1.272	1.745	2.218	SK: Slovakia	1.689	1.840	3.108
DE: Germany	1.622	1.216	1.973	FI: Finland	1.303	1.818	2.368
EE: Estonia	1.156	1.075	1.243	SE: Sweden	1.249	1.590	1.986
IE: Ireland	1.383	1.880	2.599	UK: United Kingdom	1.424	1.330	1.894
EL: Greece	1.721	1.630	2.806	AU: Australia	1.682	1.475	2.480
ES: Spain	1.905	1.380	2.629	CN: China	2.370	1.235	2.927
FR: France	1.701	1.247	2.121	IN: India	1.217	1.489	1.813
HR: Croatia	1.018	2.017	2.053	ID: Indonesia	1.576	1.570	2.476
IT: Italy	1.662	1.275	2.120	JP: Japan	1.000	1.014	1.014
CY: Cyprus	0.974	1.124	1.095	MY: Malaysia	1.321	1.714	2.264
LV: Latvia	1.242	1.303	1.619	PK: Pakistan	1.025	1.664	1.705
LT: Lithuania	1.116	1.693	1.889	KR: Korea	1.201	1.459	1.752
LU: Luxembo urg	1.000	1.692	1.692	TH: Thailand	1.025	1.600	1.641

DMU	Catch-up	Frontier-shift	Malmquist	DMU/Statistics	Catch-up	Frontier-shift	Malmquist
MT: Malta	1.000	1.507	1.507	TW: Taiwan	0.783	1.527	1.195
NL: Netherlands	1.477	1.538	2.272	Average	1.392	1.567	2.180
AT: Austria	1.317	1.663	2.191	Max	2.472	2.017	4.794
PL: Poland	2.108	1.573	3.317	Min	0.783	1.014	1.014

註：Year 2000–2008; DEA Model = Malmquist-Radial(input oriented), Returns to Scale = Variable(Sum of Lambda = 1)

五、結語

本文應用 DEA 相關方法(BCC 模型、MPI)，比較我國與其他經濟體的資源使用效率。不論是 BCC 模型或 MPI，數據資料蒐集期間均為 2000 年至 2008 年；丹麥、德國、盧森堡、馬爾他、荷蘭、英國及日本 7 個經濟體雖於 2008 年表現最佳，惟一旦同時將 MPI 蘊含之學習及創新效果列入考量並計算 2000 年至 2008 年跨期的結果，原先具效率的國家均未能保持其領先地位；反倒是發展中的經濟體如捷克(CZ)、匈牙利(HU)、波蘭(PL)及斯洛伐克(SK)等具有較佳的 Malmquist 指數值，反映其於經濟體顯然在學習(追趕)及創新(前緣或邊界移動)上表現優良。我國則在學習效果的表現欠佳，分數低於 1，顯示我國刻正遭逢資源利用發展的困頓。

本研究藉應用如 DEA 之計量經濟方法，分析資源使用及其效率比較，除了各經濟體自我的努力外，每一經濟體可將其他經濟體視為標竿(特別是社經環境及規模相仿的經濟體)，透過相關經驗、政策及指令之諮詢與學習，進而提升本身效率，達到永續發展。總體而言，本文目的係為提醒政府之政策制訂者，以及持不同觀點的資源消費者或廠商等，在追求實現永續性過程中，資源效率扮演極其重要的角色。未來可預期的是，全世界各經濟體如欲增進人民福祉之競爭力將取決於新的政策、技術或最新設計基礎設施等，能否使用較少物質之效率高與規模多寡；換言之，本研究旨在藉由物質流分析的資源生產力相關探討，針對永續性進行延伸評

估，此係著眼於 MFA 衍生的關鍵因子可適度反映永續發展的三面向，而分析該等指標則可視為對永續性的延伸評價。

其次，本研究主張藉由學習其他經濟體良好的典型與規模經濟，據以改善經濟體本身的效率(即效率變化)。惟實證顯示，被許多具強大競爭力之新興經濟體環繞的我國，其資源使用效率日漸降低，單憑技術的發展，可能無法強有力的減緩因生產製程及消費所帶來的環境衝擊，可見我國之問題不在「技術變革」，在技術創新上仍具潛力，我國資源使用效率日漸降低係因「效率變化」因子，其與藉由學習優良範例、經驗或經濟規模等而增進自我效率的努力程度之效率變化因子有關。爰此，建議應參考與我國發展歷程相仿並借鏡可做為標竿之經濟體或國家經驗，據以調整各資源使用政策，並跳脫現有框架，配合相關法令之配套與修訂，同時考量經濟規模，方能有效解決問題癥結。綜言之，為使我國成為世界上永續發展的經濟體，我國應通盤擘劃完整政策，不僅著重於資源之永續利用，更須擬訂並落實具有經濟、社會及環境三者整合觀點的法令規章。

六、參考文獻

- 徐如賓(2013)，「包容性成長的意義與政策啟示」，《綜合規劃研究 101 年》，行政院經濟建設委員會綜合計劃處，臺北市，第 225-250 頁。
- Adriaanse, A.; Bringezu, S.; Hammond, A.; Moriguchi, Y.; Rodenburg, E.; Rogich, D.; Schütz, H. (1997), *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, World Resources Institute: Washington, DC, USA.
- Banker, R. D.; Charnes, A.; Cooper, W. W. (1984), "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis." *Management Science* Vol. 30, 1078-1092.
- Barrett, J.; Vallack, H.; Jones, A. and Haq, G. (2002), *A material flow analysis and ecological footprint of York: Technical report*. Sweden: Stockholm Environment Institute.

- Bringezu, S.; Schütz, H.; Moll, S. (2003), "Rationale for and Interpretation of Economy-Wide Materials Flow Analysis and Derived Indicators." *Journal of Industrial Ecology* Vol.7, 43-64.
- Charnes, A.; Cooper, W. W. and Rhodes, E. (1978), "Measuring the efficiency of decision making units." *European Journal of Operational Research* Vol. 2, 429-444.
- Communication from the Commission (COM). Europe 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Available online: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF>.
- CSIRO and UNEP Asia-Pacific Material Flows online database. Available online: <http://www.cse.csiro.au/forms/form-mf-start.aspx>.
- Dietz, S. and Neumayer, E. (2007), "Weak and strong sustainability in the SEEA: Concepts and measurement". *Ecological Economics*, 61(4): 617-62.
- Dietz, T. and Rosa, E. A. (1994), "Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Human Ecology* Vol. 1, 277-300.
- Eurostat (2001), *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators. A Methodological Guide*, Luxembourg: Eurostat.
- Giljum, S.; Burger, E.; Hinterberger, F.; Lutter, S. and Bruckner, M. (2011), "A comprehensive set of resource use indicators from the micro to the macro level." *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 55, 300-308.
- Graedel, T. E. and Allenby, B. R. (1995), *Industrial Ecology*, NJ: Prentice Hall.
- Lee, W. W. and Kraymer, K. J. (2003), *Organizing Change: An Inclusive, Systemic Approach to Maintain Productivity and Achieve Results*, CA: Pfeiffer.
- Lee, Y. M. (2008), "Evaluating resource productivity indicators for material flow analysis of Taiwan economy." *Journal of Environmental Engineering and Management* Vol. 18, 33-39.

- Linstead, C. and Ekins, P. (2001), "Mass balance UK. mapping UK resource and material flows". Forum for the Future, London.
- Matthews, E.; Amann, C.; Fischer-Kowalski, M.; Bringezu, S.; Hüttler, W.; Kleijn, R.; Moriguchi, Y.; Rodenburg, E.; Rogich, D. and Schandl, H. (2000), *Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies*; World Resources Institute: Washington, DC, USA.
- Moffatt, I. (2006), "Environmental space, material flow analysis and ecological footprint". Chapter 20 In: Atkinson, G., Dietz S. and Neumeyer, P. (Eds.), *Handbook of Sustainable Development*. 319-344, Cheltenham UK: Edward Elgar.
- Schmidt-Bleek, F. (1992), "Materials flow and eco-restructuring." *Fresenius Environmental Bulletin* Vol. 2, 529-34.
- Schmidt-Bleek, F. (1993a), "MIPS – a universal ecological measure". *Fresenius Environmental Bulletin* Vol. 2, 306-11.
- Schmidt-Bleek, F. (1993b), "Towards universal ecology disturbance measures". *Journal of Regulatory Toxicology and Pharmacology* Vol. 18, 456-62.
- Statistics database of Eurostat, European Commission. Available online: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/themes>.
- UNEP Regional Office for Asia and the Pacific (2011), *Resource Efficiency: Economics and Outlook for Asia and the Pacific*; UNEP Regional Office for Asia and the Pacific: Bangkok, Thailand.
- UNEP Regional Office for Asia and the Pacific (2013), *Recent trends in Material Flows and Resource Productivity in Asia and the Pacific 2013*; UNEP Regional Office for Asia and the Pacific: Bangkok, Thailand.
- Waggoner, P. E. and Ausubel, J. H. (2002), "A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity", *PNAS(Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 99(12), 7860-7865.

Weisz, H.; Fridolin, K.; Christof, A.; Nina, E.; Karlheinz, E.; Klaus, H. and Marina, F. K. (2006), "The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption." *Ecological Economics* Vol. 58, 676-698.