

# 能源效率之衡量及其與環境政策工具的關聯

楊晴雯\*

## 摘要

提升能源效率是減少溫室氣體排放議題中至為關鍵的策略之一，大多數國家都以能源生產力衡量總體層級的能源效率，在運用時未曾細究此一指標的經濟內涵與適用性，直至 2008 年 12 月的第十四屆締約國會議 (Fourteenth Session of the Conference of the Parties, COP14) 中，聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 首度呼籲各國重視能源效率的衡量問題。本文指出，傳統的能源生產力指標因受多種與使用技術及配置效率無關之他種因素的影響，並不適合用做為衡量能源效率的指標，而只適合衡量為達特定實質國內生產毛額 (gross domestic product, GDP) 水準的能源成本有效性。本文也同時檢討技術效率及相關指標的問題，並提出一個新的能源效率指標，除可避免其他指標可能出現的不一致性問題之外，亦可反映缺乏效率的來源、以及廠商在不同環境政策工具下的能源效率差異，並用以評估外生變數變動對能源效率的影響。

關鍵詞：能源效率、能源生產力、總量管制與排放交易、技術效率、配置效率

JEL 分類代號：H21, H23, I18

---

\* 聯絡作者：楊晴雯，國立中央大學產業經濟研究所博士候選人，23581 新北市中和區成功路 135 號 24 樓之 1，電話：0938030357，E-mail: [93444008@cc.ncu.edu.tw](mailto:93444008@cc.ncu.edu.tw)。

投稿日期：民國 98 年 2 月 10 日；修訂日期：民國 98 年 4 月 24 日；

接受日期：民國 100 年 11 月 14 日。

經濟研究 (Taipei Economic Inquiry), 48:2 (2012), 287-317。

臺北大學經濟學系出版

## 1. 前言

2002 年在南非約翰尼斯堡舉行之永續發展世界高峰會 (World Summit on Sustainable Development) 中，能源是五大主題之一，會中明確揭櫫提升能源效率對於促進永續發展的重要性；聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 與京都議定書 (Kyoto Protocol) 也確立經由改善能源效率以減少溫室氣體排放的必要性；許多政府和產業組織（包括半導體、面板、家電、汽車、石化、煉鋼、水泥等）更為提高能源效率標準而致力於產業轉型。

提高能源效率是我國六項能源政策方針之一。政府一向鼓勵使用高效率的能源及降低能源需求的技術，來抑制 CO<sub>2</sub> 的排放，中華民國永續發展策略綱領及行政院永續發展推動計畫均主張推動全面節約能源及提升能源效率。2008 年的永續能源政策綱領表明：永續能源政策的基本原則將建構「高效率」、「高價值」、「低排放」及「低依賴」的「二高二低」能源消費型態與能源供應系統，其中高效率即指提高能源使用與生產效率。我國溫室氣體減量法草案亦明訂：溫室氣體排放源及排放實體排放之溫室氣體排放量應符合溫室氣體效能標準，目的事業主管機關應檢討及調整國家能源、產業及運具結構政策，依政策調整結果訂定高耗能產業比例、高碳類燃料比例及高耗能運具比例與預定達成期程，經評估無法達成指標時，得限制或禁止高耗能產業之設置及操作、限制高碳類燃料之輸入及使用、限制高耗能運具之輸入、製造及販賣。由此可知，提升能源效率是節能減碳議題中的最佳雙贏策略。

因此，許多國家都就能源生產力或能源密集度訂定具體目標。例如丹麥的能源行動計畫 (Energy 21) 訂定 1994 年至 2005 年以及 1994 年至 2012 年能源密集度必須降低 25% 以及 34%；盧森堡在 1998 年的永續發展國家計畫 (National Plan for Sustainable Development)

要求能源密集度在 1993 年至 2010 年要降低 20%；2002 年奧地利永續發展策略 (Austrian Strategy for Sustainable Development) 預定能源密集度每年降低 1.6%。

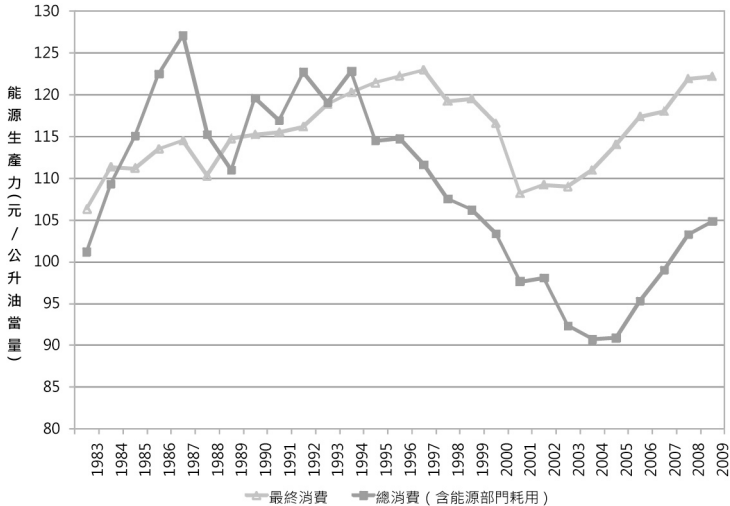
就我國而言，1998 年全國能源會議的結論指出，2010 年以前整體經濟的能源效率平均每年需改善 1.2%，2010 年至 2020 年平均每年改善 1%；若以能源生產力計算，在此兩期間分別應提升 8% 至 24%。永續能源政策綱領更明訂能源效率與能源密集度的目標：未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度在 2015 年較 2005 年下降 20% 以上；並藉由技術突破及配套措施，在 2025 年下降 50% 以上。

由以上說明可見提升能源效率的重要性，但能源效率應如何衡量呢？UNFCCC 在 2008 年的第十四屆締約國會議 (Fourteenth Session of the Conference of the Parties, COP14) 中首度呼籲各國關注此一課題，使能源效率的衡量問題重新引起各界重視。一般而言，大多數國家都以能源密集度 (energy intensity) 或能源生產力 (energy productivity, EP) 做為衡量總體層級的能源效率指標，<sup>1</sup> 前者係指每一單位國內生產毛額 (gross domestic product, GDP) 所使用的能源投入量，後者則為每一單位能源使用量所產生的 GDP，兩者互為倒數關係。

在圖 1 中，吾人根據不同內涵之能源使用量描繪兩條台灣能源生產力曲線，二者變動趨勢雖然略有不同，但隨時間經過的起伏都很大，並不足以精準地反映能源效率的一般趨勢。一般而言，能源效率應該具有長期穩定改善的特性，主要原因有三：(i) 能源使用的技術一直在進步，不會有技術退步的現象；(ii) 能源使用者的經濟理性應有一致性，不至於變化無常；(iii) 產業結構縱有變遷而影響能源使用效率，但也不太可能在短期內發生巨大變動。

---

<sup>1</sup> 台灣亦復如此。此二指標之所以常被使用是因為概念簡單易懂，資料的取得與計算都相當容易，大都來自官方統計。



資料來源：本研究整理。原始資料中，歷年實質 GDP 由行政院主計總處國民所得統計年報取得，能源消費量由經濟部能源局能源平衡表取得。

圖 1 台灣的能源生產力變動趨勢

事實上，能源密集度或能源生產力都不是衡量能源效率的適當指標，原因如下：(1) GDP 係全國各產業部門生產之附加價值的總和，舉凡國內資本存量、人力資本、產業結構變動、能源價格波動、技術進步、企業的競爭力等因素，都會影響 GDP，故 GDP 的多寡不宜全部歸功於能源單一要素的貢獻。因此，GDP 與能源使用量之間的關係必須經過審慎的計量檢定，方能正確呈現二者之間的穩定關係。(2) 能源生產力通常只適合衡量整體經濟社會或個別產業部門為達一個特定水準之 GDP 的能源成本有效性 (cost effectiveness)，<sup>2</sup> 而不足以反映個別生產要素（例如能源、勞動、資本等）的使用效率。(3) 能源生產力指標或可反映產業部門間之能源平均報酬的差

<sup>2</sup> 假設能源使用量為  $E$ ，則能源生產力  $EP = GDP/E$ ，因此，為達一個特定水準的 GDP，所使用的能源越多（隱含能源支出多）， $EP$  便越小；反之， $EP$  便越大。因此， $EP$  的大小適足以反映為達一定 GDP 所付出之能源成本 ( $wE$ ) 的大小。此即成本有效性的概念。

異，卻無法反映廠商在資源配置上的效率，更無法用以衡量生產設備的能源效率。(4) 掌握能源效率的驅動力是至關重要的議題，為了分析能源效率變動的驅動力，文獻上常利用因素分解法 (decomposition approach) 將能源密集度或能源生產力拆解成產出效果、結構效果、密集度效果等 (Ang, 1994; Liu et al., 1992)，藉以刻劃能源使用與經濟活動的關係。惟拆解的方式因個案而異，往往過於天真，而且很難得到實證結果的支持。<sup>3</sup> (5) 各國計算 GDP 的差異也使得能源效率的跨國比較缺乏一致性的基礎。

鑒於傳統能源效率指標的缺失，本文第二節首先說明文獻上關於能源效率的衡量方式，並論述其潛在缺失，特別指出估算能源生產力時，不宜直接採用 GDP 和能源使用量的比值，而須採用適當的計量模式予以推估。第三節根據要素需求理論，提出一個以單位能源使用量之實質利潤損失為基礎的新能源效率指標，不僅可以衡量個別廠商過量或不足使用能源的效率，而且可以將能源匱效率的來源分解為四項，因而擴增提升能源效率的可行策略。第四節說明廠商的能源效率將因其面對之環境政策工具的不同（本文考慮總量管制與排放交易）而異的原理，並比較新能源效率指標與傳統能源生產力指標在不同環境政策制度下的差異。第五節則為結論與建議。

## 2. 文獻回顧

能源效率的衡量可從國家層級（或整體社會面）、產業部門層級、個別廠商層級、製程或個別設備層級而分別訂定適當的指標。一般而言，如果我們可以用較少的能源投入來生產等量的產出或服務，即可視為能源效率提升的現象。因此，Patterson (1996) 將能源

---

<sup>3</sup> 例如有些研究在決定拆解方式後 (例如  $Z = A \times B \times C$ )，再進行迴歸分析 (例如推估  $\ln Z = \alpha \ln A + \beta \ln B + \gamma \ln C$ )，實證結果通常顯示各係數推定值均不等於 1，故有違拆解法的內涵。

效率廣泛地定義為：

$$\text{能源效率} = \frac{\text{製程的有用產出量}}{\text{製程的能源投入量}} \quad (1)$$

鑒於有用產出量與能源投入量衡量方式與單位之差異，Patterson (1996) 乃將 (1) 式指標依單位區分為四類：熱力學指標 (thermodynamic indicator)、物理—熱力學指標 (physical-thermodynamic indicator)、經濟—熱力學指標 (economic-thermodynamic indicator)、以及經濟學指標 (economic indicator)。

Tanaka (2008) 同樣定義了四類能源效率指標並指出各類指標之適用性，該四類指標包括能源產出一能源投入指標（即 Patterson (1996) 之熱力學指標）、能源密集度（物理—熱力學或經濟—熱力學指標）、能源消費量（熱力學指標）、與能源技術擴散率等。事實上 Tanaka (2008) 的前三項指標並未超脫 Patterson (1996) 的範疇，無論是 Patterson (1996) 或 Tanaka (2008) 所提出的效率衡量方式，仍屬能源生產力指標。由於資料取得容易且觀察較為直覺，使能源生產力成為目前政府部門最常用來提報能源效率的指標。

事實上，文獻上提出的效率指標不只一端，尚包括因素分解後的能源生產力、綜合性的能源效率指標、以及個別要素效率指標等。表 1 彙整各項指標的內容，並說明各指標的問題及其適用性。

## 2.1 傳統生產力指標的問題

如前所述，GDP 易受多種因素的影響，其多寡不宜全部歸功於能源單一要素的貢獻。因此，採用前述的任何指標時，如果單純地以實際觀察到的 GDP 及能源使用量的資料來計算能源生產力，極可能出現類似圖 1 的巨幅震盪情況。如欲正確地反映能源生產力，必須兼顧 GDP 與能源使用量之間的因果關係，例如，林盈均 (2005)、

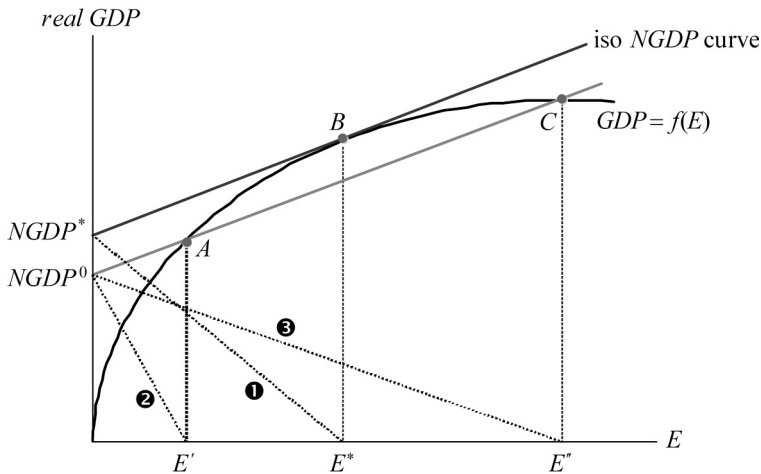
單珮玲 (2010)、Lee and Chang (2008) 與 Mishra et al. (2009)，並應用適當的計量方法加以推估，方能正確地衡量出能源生產力。

表 1 能源效率指標類別與文獻應用概況

指標類別	計算方式	問題與適用性	應用文獻
能源生產力／量 能源密集度	有用產出量／能源投入量	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 資料取得與計算簡便</li> <li>● 生產力提升不等效率提升</li> <li>● 常以 GDP 及能源使用量計算，無法去除影響 GDP 之其他因素</li> <li>● 無法反映個別要素使用效率</li> <li>● 無法反映資源配置效率與技術效率的差異</li> </ul>	Tanaka (2008)、Sivak and Tsimhoni (2009)
因素分解後的能源生產力	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 拉氏指數 (Laspeyres index)</li> <li>● 迪式指數 (Divisia index)</li> <li>● 麥氏指數 (Malmquist index decomposition)</li> </ul> 拆解產出效果、結構效果、密集度效果 離析生產力變化與效率變化	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 解析能源生產力變化之趨動力，以純化能源使用與經濟之關係</li> <li>● 易受限於拆解方法，難以得到實證支持</li> </ul>	Liu et al. (1992)、Ang (1994)、Ang and Liu (2007)、Mairet and Decellas (2009)、Wei et al. (2007) 與 Bor (2008)
綜合性能源效率指標	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術效率</li> <li>● 配置效率</li> <li>● 經濟效率</li> </ul> (常用的推估方法包括：隨機邊界分析法、距離函數法、資料包絡法等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可用以比較廠商間效率差異，亦可推估效率隨時間之變動趨勢</li> <li>● 可運用於廠商層級、產業層級、地區層級、國家層級之比較</li> <li>● 假設生產技術為固定規模報酬</li> <li>● 須準確推估廠商生產 (或成本) 邊界</li> <li>● 無法衡量個別要素的使用效率</li> </ul>	Aiken and Pasurka Jr. (2003)、Mukherjee (2008)、Wei et al. (2007)、Honma and Hu (2008)、Zhou and Ang (2008) 與 Hu and Wang (2006)
個別要素效率指標	條件要素需求量／實際要素投入量	可能出現能源效率與成本效率不一致的現象	Feijoo et al. (2002)

資料來源：本研究整理。

即便如此，能源生產力終究只適合衡量整體經濟社會或個別產業部門為達一個特定水準之 GDP 的能源成本有效性，並不適合用以衡量能源本身的使用效率。茲以圖 2 說明應用能源生產力指標的問題如下。



資料來源：本研究整理。

說明：iso NGDP 曲線為實質淨 GDP 曲線，斜率為  $w$ 。

圖 2 實質 GDP 生產曲線及能源生產力指標

圖 2 之  $ABC$  曲線代表實質 GDP 的生產曲線（為能源使用量的函數， $GDP = f(E)$ ），在既定的能源價格  $w$  之下，實質淨 GDP (net gross domestic product, NGDP) 最大化之最適能源使用量為  $E^*$ ，此時之能源生產力為直線 ① 之斜率絕對值所代表。考慮  $A$  與  $C$  兩個產出水準，其能源使用量分別為  $E'$  與  $E''$ ，而對應之實質淨 GDP 均為  $NGDP^0$ ，故能源生產力分別為直線 ② 和直線 ③ 之斜率絕對值所代表。由此可知， $A$  點的能源生產力不但高於  $C$  點，也同時高於  $B$  點；前者為真，後者卻是難以接受，這是因為能源生產力指標並未真正反映要素使用的效率。

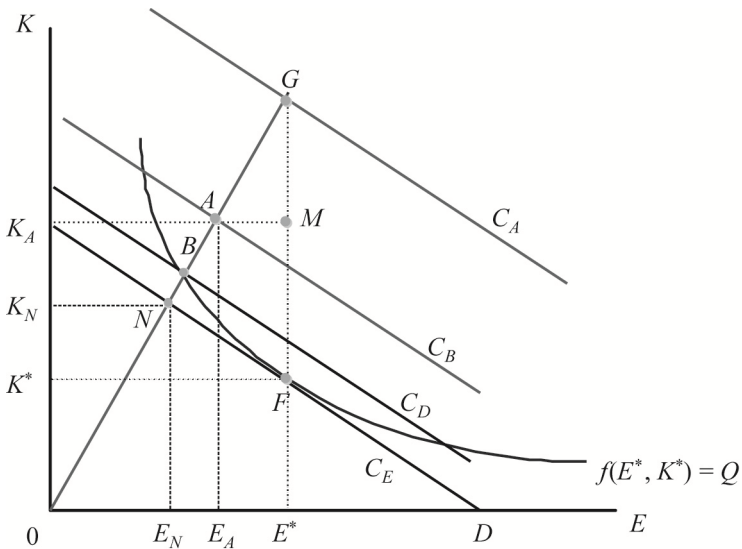
## 2.2 綜合性效率指標的問題

技術效率 (technical efficiency, TE) 與配置效率 (allocative efficiency, AE) 是兩個常被用來衡量個別廠商組合要素的綜合性效率指



標。<sup>4</sup> 此二指標的概念可藉 Farrell (1957) 的生產邊界 (production frontier) 說明之。<sup>5</sup>

圖 3 中  $Q$  曲線代表一群使用能源 ( $E$ ) 與其他要素之複合投入 ( $K$ ) 兩種要素來生產同類產品之所有廠商的生產邊界，線上的每一個要素組合點 (如  $B$  點與  $F$  點) 均可生產出相同的產量水準，是屬於具有完全技術效率 (亦即最高可能的技術效率水平) 的要素組合。但廠商為達該產量水準而實際使用的要素組合點大都落在邊界



資料來源：Farrell (1957) 及本研究整理。

圖 3 Farrell 的技術、配置與經濟效率

<sup>4</sup> 最先由 Farrell (1957) 提出，並被廣泛採用，藉以評估許多產業或廠商的組合要素的效率；如果資料係屬個別部門 (而非個別廠商)，亦可適用。在實證分析時，主要以邊界分析法 (frontier analysis)、距離函數法 (distant function analysis)，以及資料包絡分析法 (data envelopment analysis) 為主。

<sup>5</sup> 當然也可藉由成本邊界 (cost frontier) 的概念來估算技術效率與配置效率。讀者可參考 Schmidt and Lovell (1979)、Kopp and Diewert (1982)、傅祖壇 (1994) 以及黃宗煌與王貴玲 (2002) 等。

的右上方（例如  $A$  點與  $G$  點），此時要素的使用量超出必要的最低使用量，故可視為缺乏技術效率。

假設廠商為達生產邊界所代表之產量水準的實際使用投入組合為  $G$  點，則  $G$  點的技術效率值可以  $OB$  與  $OG$  之比值衡量之，<sup>6</sup> 亦即  $TE_G = OB/OG (< 1)$ ；當實際觀察到的生產投入組合愈趨近  $B$  點（或  $TE$  值愈趨近於 1）時，代表其技術效率愈高。 $G$  點的配置效率則以  $ON$  與  $OB$  之比值衡量之，亦即  $AE_G = ON/OB (< 1)$ 。技術效率與配置效率亦可以廠商為達特定產量之效率成本與實際成本之比值衡量之，亦即： $TE_G = C_D/C_A$ ， $AE_G = C_E/C_D$ 。據此，具有完全技術效率的要素組合（如  $B$  點）不必然具有完全配置效率，僅有  $F$  點同時滿足完全技術效率與完全配置效率，亦即達到完全經濟效率的情況。<sup>7</sup>

在實證上用以評估技術效率的方法以隨機邊界法和資料包絡法最為盛行，<sup>8</sup> 不僅可以比較不同廠商之間的效率差異，亦可推估個別廠商組合要素之效率隨時間經過而變動的趨勢。但在實務上仍須面對許多問題：(i) 技術效率與配置效率都是用以衡量個別廠商使用要素的整體效率，無法衡量個別要素的使用效率；(ii) 必須準確地推估出廠商的生產邊界或成本邊界；(iii) 生產邊界或成本邊界的實證模型非常多元化，且須選擇適當的推估方法。(iv) 效率的評估結果屬於相對的觀念，亦即僅就樣本資料，選定當時效率最差（或最佳）者為比較標竿。(v) 如果廠商使用能源有過度節約而致實際用量低於最適水準時，資料包絡法與隨機邊界法都無法反映此時存在的匱效率。

<sup>6</sup> 此時假設生產技術具有固定規模報酬。

<sup>7</sup> 經濟效率乃可用  $C_D/C_A$  衡量之。

<sup>8</sup> 在推估生產邊界時，所設定的實證模型很多，例如確定性生產邊界 (Afriat, 1972; Richmond, 1974)、隨機性生產邊界 (Aigner et al., 1977; Feijoo et al., 2002)、成本邊界函數法 (黃志典與黃智遠, 2004; 傅祖壇, 1994; 鄭秀玲與周群新, 1998; 鄭秀玲等, 1997; Aiken and Pasurka Jr., 2003; Cornwell et al., 1990; Honma and Hu, 2008; Hu and Wang, 2006; Mukherjee, 2008; Schmidt and Sickles, 1984; Wei et al., 2007; Zhou and Ang, 2008)。

### 2.3 個別要素效率指標的問題

陸怡蕙 (2008) 根據一個簡易的動態模型，提到效率改善代表生產單位能在相同的資本存量水準之下，經由生產效率的提升而達到更高的邊際利潤率。這代表整條資本的邊際產量 (marginal product of capital,  $MP_K$ ) 曲線會上移，換言之，能源效率似可以  $MP_K$  的高低衡量之。但反過來說， $MP_K$  越高的生產單位，其能源效率卻未必越高，因其可能肇因於他種有助於提升  $MP_K$  之因素的貢獻（這和利用能源生產力來衡量能源效率的問題如出一轍）。Feijoo et al. (2002) 首先提出以條件要素需求量與實際要素投入量的比值做為衡量個別要素效率的指標。他首先設定一個生產函數，並求導出成本最小化之能源的條件需求 (conditional demand function of input)，即圖 3 之  $E^*$ ，如果實際觀察到的要素組合（產量亦為  $Q$ ）為  $G$  點，則能源之使用效率指標表示如下：

$$EE = \frac{FE^*}{GE^*} \quad (2)$$

比較  $A$  點與  $F$  點的能源效率後，亦可發現 Feijoo et al. (2002) 所定義的能源效率與成本效率不一致，因為  $F$  點之成本低於  $A$  點，但後者之  $EE$  卻大於前者。再者，考慮資本用量相同之  $A$  點與  $M$  點，前者之  $EE$  亦高於後者，但  $M$  點之能源使用量卻是成本最小化的應有用量。最後比較同在生產邊界的  $B$  點與  $F$  點，二者之  $EE$  完全相同（亦即  $EE = 1$ ），但  $B$  點之成本卻高於  $F$  點。根據上述分析可見，唯有當廠商的實際能源用量大於  $F$  點時，Feijoo et al. (2002) 的效率指標才會與成本效率有一致的結果；反之，則出現不一致的現象。為改善此一問題，下一節將提出一個新的能源效率指標。

### 3. 衡量能源效率的新指標

#### 3.1 新指標的定義

要素利用是否具有效率，可從靜態或動態的角度區分之。就靜態效率而言，只要廠商對第  $i$  種要素的使用量滿足邊際產量收益 (marginal product revenue, MPR) 等於邊際要素成本 (marginal factor cost, MFC) 的條件，即可認定對該要素的使用具有效率。<sup>9</sup> 當廠商在產品市場與要素市場皆為價格接受者時，上述條件即可簡化為利潤最大化之一階必要條件如下：<sup>10</sup>

$$VMP_i(\mathbf{x}; P) = w_i, \forall i, \quad (3)$$

其中  $VMP_i(\mathbf{x})$  代表第  $i$  種要素之邊際產值， $\mathbf{x}$  代表生產要素投入向量； $P$  與  $w_i$  分別代表產品價格與第  $i$  種要素的價格。

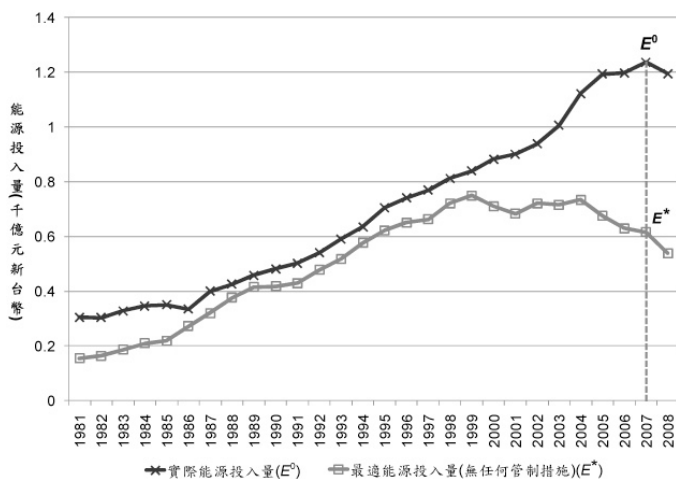
假設生產函數為 Cobb-Douglas 函數，吾人可利用實際資料來估算最適能耗量（決定於 (3) 式）與實際能耗量之差異，<sup>11</sup> 其結果如圖 4 所示。由此可見，台灣歷年的實際能耗量均高於最適能耗量，其間的差距在 2000 年以後大幅擴大（見圖 4 (a)）；至於能源以外之其他要素的實際投入量，也超過最適水準（見圖 4 (b)）。因此，如果依據 Feijoo et al. (2002) 所提出的效率指標（即 (2) 式）來衡量台灣的能源效率，其結果是：能源效率與其他要素的效率變動未盡相同，但近 10 年來，則明顯趨於惡化。

<sup>9</sup> 動態效率則取決於個別要素之邊際產值折現值總和等於要素價格之折現值總和。

<sup>10</sup> 此一條件隱含生產時的要素使用已達完全的技術效率，同時亦達到配置效率的準則。

<sup>11</sup> 利用行政院主計處雙面平減表之實質金額計算之歷年國內生產總值、能源產值與其他產業產值，計算國家產出、能源投入量與其他要素投入量，並使用該表中之生產總值與能源價格平減指數計算相對價格波動。此外自經濟部能源局取得歷年溫室氣體排放量，便可計算歷年單位能源投入之排放係數。

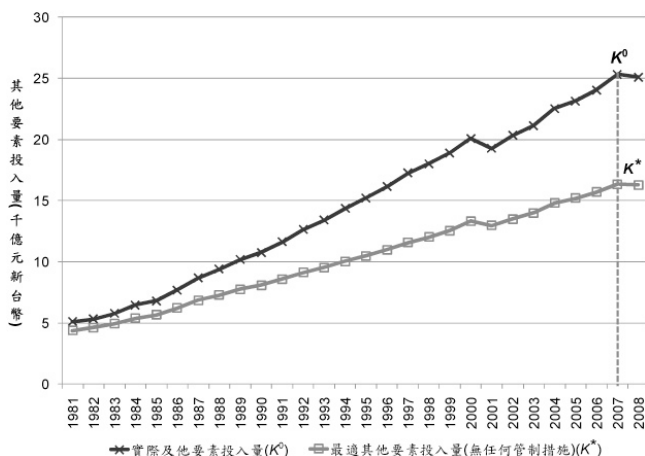
此外，吾人由圖 4 亦可窺知，能源匱效率的來源，一方面可歸因於能源投入的技術匱效率及配置匱效率，另一方面則可歸因於生產過程中所搭配使用之其他要素的技術匱效率及配置匱效率。



資料來源：本研究整理。

註： $E^0 = 1.2368$ ， $E^*$ 無管制 = 0.6152。

(a) 能源投入量



資料來源：本研究整理。

註： $K^0 = 25.3136$ ， $K^*$ 無管制 = 16.3441。

(b) 其他要素投入量

圖 4 最適要素投入量與實際投入量

追求利潤最大化之完全競爭廠商對於一種要素之最適雇用量，應滿足該要素之  $VMP_i(x)$  與其價格相等的條件；倘其要素雇用量不等於此一最適要素雇用量，即表示該要素之使用量不具經濟效率。因此，吾人可用「因能源使用缺乏效率所造成的實質潛在損失」來反映能源效率。<sup>12</sup>

為簡化說明起見，假設要素市場為完全競爭市場，能源價格固定為  $w_E$ 。在圖 5 中， $VMP_i(E; K^*, P)$  代表一群廠商生產某一同類產品的能源邊際產值鋒線（其中  $E$  與  $K^*$  分別代表能源用量及複合要素的最適投入量），利潤最大化之最適能源投入量為  $E^*$ ，具經濟效率之實質邊際產值為  $BE^*$ 。茲考慮三家廠商 ( $j = D, F, G$ ) 的實際能源使用量向量為  $(E_D, E_F, E_G)$ ，邊際產值向量為  $(DE_D, FE_F, GE_G)$ 。故相對於具經濟效率之能源用量而言，各家廠商之實質利潤損失 ( $RPL$ ) 可表示如下：

$$\begin{aligned} RPL_j &= \pi_j^* - \pi_j^0 \\ &= (\pi_j^* - \pi_j^e) + (\pi_j^e - \pi_j^0), \end{aligned} \quad (4)$$

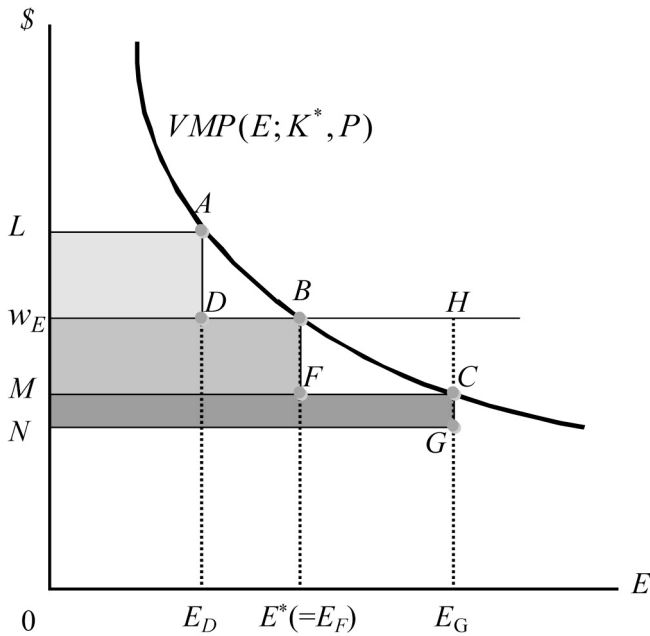
其中  $\pi^* = f(E^*; \bar{K}) - (w_E/P)E^* - (r/P)\bar{K}$  代表具經濟效率之實質利潤； $\pi_j^e = f(E_j; \bar{K}_j) - (w_E/P)E_j - (r/P)\bar{K}_j$  代表第  $j$  家廠商在具有技術效率下使用現有能源數量 ( $E_j$ ) 應有的實質利潤； $\pi_j^0$  則代表實際觀察到的實質利潤。

(4) 式的  $\pi_j^* - \pi_j^e$  代表廠商的實際能源用量缺乏配置效率 ( $E_j \neq E^*$ ) 所產生的損失，以下稱配置匱效率實質損失 (allocation inefficiency loss,  $AEL$ )； $\pi_j^e - \pi_j^0$  則代表廠商的實際能源用量缺乏技術效率 ( $VMP_j^0 \neq VMP_j^e$ ) 所產生的損失，以下稱技術匱效率實質損失 (technical inefficiency loss,  $TEL$ )。因此， $D$  廠商的  $AEL_D = \Delta BDA$ ， $TEL_D = \Delta ADw_E L$ ； $G$  廠商的  $AEL_G = \Delta BHC$ ， $TEL_G = \Delta CGNM$ ； $F$  廠商的  $AEL_F = 0$ ， $TEL_F = \Delta BFMw_E$ 。<sup>13</sup>

<sup>12</sup> 林盈均 (2005) 曾提出類似構想，惟其論證內容未能建構具體的能源效率指標。

<sup>13</sup> 此處的技術效率損失係以平均產值與實際能源用量的乘積逼近之。

在圖 5 中，如果  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $G$  各點代表各家廠商所使用的能源價量組合，則可看出各家之能源效率水準不同，且其置效率的來源也不同，其中  $B$  點兼具技術效率及配置效率； $A$  點與  $C$  點具有技術效率，卻不具配置效率； $F$  點具有配置效率，卻不具技術效率； $D$  點與  $G$  點則不具有技術效率及配置效率。



資料來源：本研究整理。

圖 5 廠商的技術效率損失與配置效率損失

根據以上說明，吾人可為各家廠商定義一個能源效率指標 (energy efficiency indicator,  $EEI_j$ ) 指標如下：

$$EEI_j = \frac{RPL_j}{E_j^0} \quad (5)$$

(5) 式實即表示每單位能源用量的實質利潤損失，因此， $EEI_j$  越大（小），表示能源效率越低（高）。此一能源效率指標具有如下特性：(i) 以每單位能源用量的實質利潤損失來計量，含意簡單清楚， $EEI$  的值越大，代表廠商越缺乏效率。(ii) 兼顧了廠商使用能源的技術效率與配置效率。(iii)  $EEI$  的衡量結果不會出現與成本效率不一致的現象。(iv) 不增加實證上的困難度，只要能推估出有效的生產邊界、或利潤邊界、或能源需求邊界，即可計算  $EEI$ 。(v) 可用於廠際間的能源效率比較，亦可透過加總得到更高層級的能源效率。(vi) 可以反映出廠商在不同環境制度下使用同一要素組合所顯現的差別效率。

### 3.2 能源效率的組成份拆解

從前面的分析可知，影響能源效率的來源，除了本身的技術效率和配置效率水準之外，其他複合投入的技術效率與配置效率也是關鍵。因此，在觀察到的實際能源投入量之下，其實質利潤損失可拆解如 (6) 式所示：

$$\begin{aligned} RPL_j &= \pi_j^* - \pi_j^0 \\ &= (\pi_j^* - \pi_{jE}^e) + (\pi_{jE}^e - \pi_{jK}^e) + (\pi_{jK}^e - \pi_{jE}^0) + (\pi_{jE}^0 - \pi_{jK}^0), \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\pi_j^* - \pi_{jE}^e$  代表來自能源投入配置效率之實質利潤 ( $AEL_E$ )； $\pi_{jE}^e - \pi_{jK}^e$  代表來自其他投入配置效率之實質利潤損失 ( $AEL_K$ )； $\pi_{jK}^e - \pi_{jE}^0$  代表來自能源投入技術效率之實質利潤損失 ( $TEL_E$ )； $\pi_{jE}^0 - \pi_{jK}^0$  代表來自其他投入技術效率之實質利潤損失 ( $TEL_K$ )。

(6) 式表示來自能源投入之配置效率實質損失應為最適投入組合所獲取之利潤  $\pi_j^*$ ，扣除能源與其他投入皆滿足技術效率，其他投入滿足配置效率但能源不滿足配置效率下之利潤  $\pi_{jE}^e$ ；來自其他投入之配置效率損失則為  $\pi_{jE}^e$  扣除能源與其他投入皆滿足技術效率，但能源與其他投入皆不滿足配置效率下之利潤  $\pi_{jK}^e$ ；來自能源投入



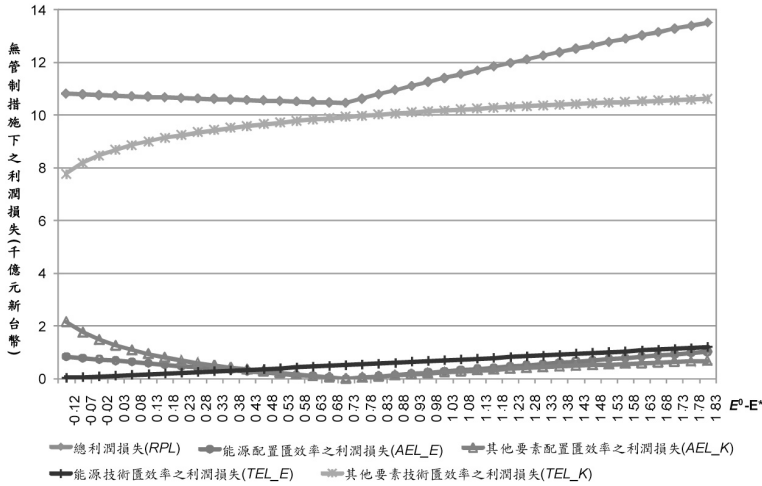
之技術效率損失則為  $\pi_{jK}^e$  扣除能源與其他投入皆不滿足配置效率，但其他投入滿足技術效率而能源不滿足技術效率下之利潤  $\pi_{jE}^0$ ；來自其他投入之技術效率損失則為  $\pi_{jE}^0$  扣除能源與其他投入皆不滿足配置效率與技術效率（即實際投入組合）下之利潤  $\pi_{jE}^0$ 。

當實際能源投入量 ( $E^0$ ) 與最適能源投入量的差距（亦即  $\Delta \equiv |E^0 - E^*|$ ）越大時，(6) 式所分解之四項實質利潤損失的變化情況或有不同。茲以 Cobb-Douglas 生產函數為例，吾人可根據最適解與實際觀察資料，估算出四項實質利潤損失的變化情況，其結果如圖 6 所示。由此可見，整體實質利潤損失隨  $E^0 - E^*$  之增加而增加；換言之，廠商在生產時，不論是過量使用或不足使用能源，均將承受效率損失，這是資料包絡法與隨機邊界法所無法衡量的。就整體實質利潤損失的各項組成而言，因能源缺乏技術效率所產生之利潤損失 ( $TEL_E$ ) 將隨  $E^0 - E^*$  的增加而增加，來自能源配置效率所產生之利潤損失 ( $AEL_E$ ) 則先遞減後遞增，這與圖 5 完全一致（例如  $D$ 、 $F$ 、 $G$ ）；因其他投入缺乏技術效率所產生之利潤損失 ( $TEL_K$ ) 亦隨  $E^0 - E^*$  的增加而增加，因此，最適化能源使用量，除可提高能源本身的技術效率與配置效率外，亦可減少其他要素因缺乏技術效率所衍生的損失；來自其他投入之配置效率的利潤損失 ( $AEL_K$ )，亦呈現先遞減後遞增的現象，此一情況與  $AEL_E$  相同。

此外，圖 6 亦顯示  $TEL_K$  遠高於其他三項組成份，<sup>14</sup> 此一結果表示，在鼓勵提高能源效率的同時，若能有效改善其他複合投入之技術效率，可望達到事半功倍之效。

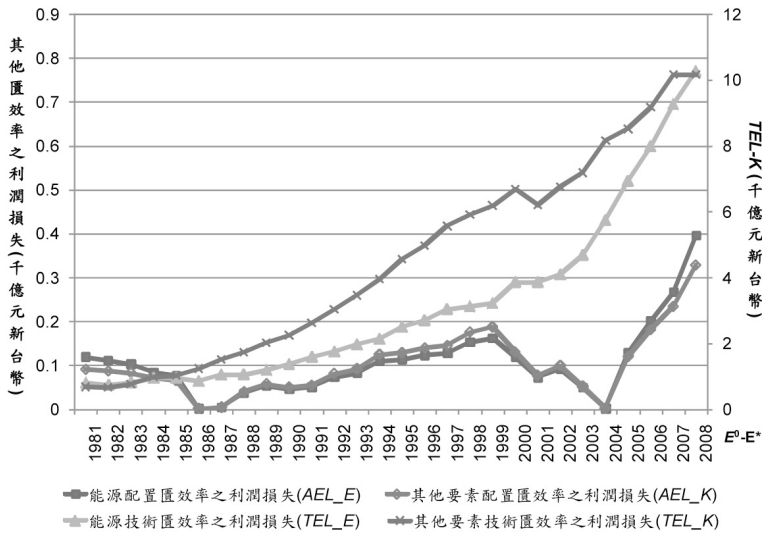
在 Cobb-Douglas 的設定下，根據實際觀察的資料所推估之實質利潤損失則如圖 7 所示。

<sup>14</sup> 之所以如此，是因為其他複合投入在生產過程中對產值的貢獻額度遠超過能源單項投入。因此，如能掌握複合投入的內容，並認定出較為重要的替代或互補要素，便可按各項要素逐一臚列出其技術效率所造成的損失 ( $TEL_K$ )。



資料來源：本研究整理。

圖 6 能源投入之實質利潤損失的各組成份變化



資料來源：本研究整理。

註：在無管制情況下， $E^* = 0.62$ ， $K^* = 16.34$ ， $E^0 = 1.24$ ， $K^0 = 25.31$ ， $RPL = 11.36$ ， $AEL\_E = 0.27$ ， $AEL\_K = 0.23$ ， $TEL\_E = 0.69$ ， $TEL\_K = 10.17$ 。

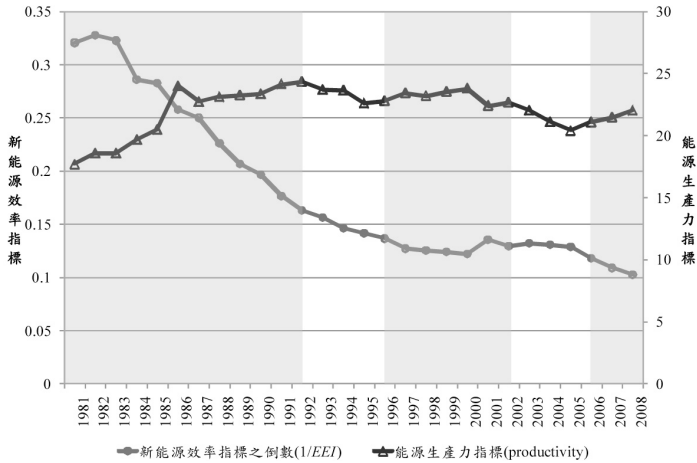
圖 7 歷年實質利潤損失與來源

整體而言，能源使用的實質利潤損失逐年擴大，其中最主要的貢獻來源是非能源之複合投入缺乏技術效率所致；因此，提高製程及設備的能源效率並加速提供能源服務之老舊設備的汰舊換新，實乃不容忽視的課題；此外，促進能源價格合理化，更是提升配置效率與技術效率的有效工具。能源缺乏技術效率則是次要的來源，此一匱效率也有逐年擴增的態勢；肇因於能源的配置匱效率及非能源複合投入的配置匱效率的實質利潤損失，則起起伏伏，變動趨勢大致相仿，三次能源危機之後，逐漸惡化，直至 2000 年始見改善，但自 2005 年起卻見急速惡化。

### 3.3 能源效率的推估結果

圖 8 彙整新能源效率指標 (*EEl*) 及傳統能源生產力指標之計算結果，由此可以發現，能源生產力與新能源效率指標的變動趨勢並不一致。傳統能源生產力指標顯示，1992 年以前之能源生產力逐年提升，之後則呈現緩步下降，但自 2006 年起則再度回升。*EEl* 指標則反是，能源投入效率在 2000 年以前均逐年惡化（但在第一次能源危機時則見曇花一現的改善），直至 2001 年才緩和下來，但自 2006 年之後又告惡化（見圖 8）；此一趨勢與根據 Feijoo et al. (2002) 所反映的變動趨勢頗為一致。2006 年之後的國際能源價格雖然高漲，但國內的凍漲措施，使得國內市場價格無法反映成本而顯偏低，能源效率是否因此惡化，仍有待實證分析予以驗證。

以上分析結果顯示，如果以能源生產力做為能源效率的指標，在某些情況下或能適當地反映能源效率的變動情勢，但在某些情況下卻可能帶來不正確的訊息。其間最主要的原因，仍在於能源的成本份額只是 *GDP* 的一小部分，而能源生產力指標卻將 *GDP* 的成長全部歸因於能源。



資料來源：本研究整理。

圖 8 能源生產力指標與新能源效率指標

## 4. 能源效率與政策工具的關聯

根據上述的效率指標，吾人可以發現，當廠商面對不同的環境政策工具時，即便其所使用的要素組合相同，其間隱含的效率程度卻不一樣，因廠商在不同制度環境下最有效率的要素使用量未必相同；換言之，如果廠商不能因應環境政策而在要素組合上做出適當的調適，即可代表廠商在不同制度下展現出不同的要素使用效率。

為說明起見，本節分別考慮總量管制與排放交易兩種環境政策工具，並比較廠商在此二制度下使用同一要素組合所顯現的差別效率。

### 4.1 總量管制下的能耗量

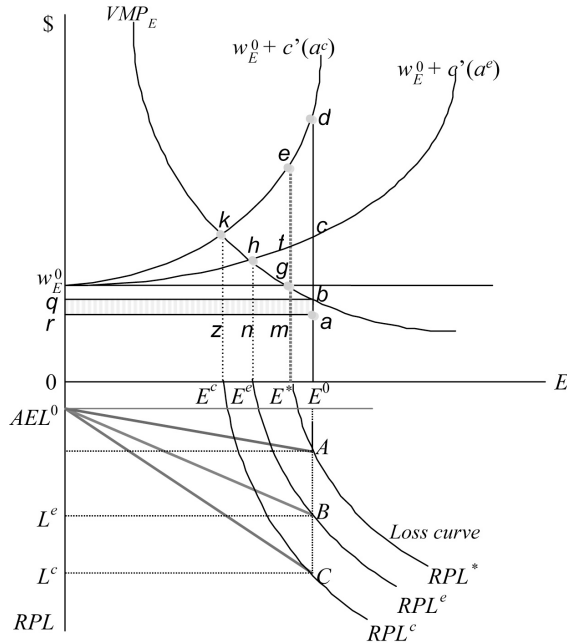
在無任何排放管制政策之前，假設廠商利潤最大化之最適能源用量為  $E^*$ ，實際使用量為  $E^0$ ，因此技術效率實質損失為  $TEL = \square bar q = TEL^0$ ，而實質利潤損失曲線乃如  $RPL^*$  所示（當實際能源用量越偏

離  $E^*$  時， $RPL$  將越高；見圖 9）。

廠商從事減排之減量成本函數為  $c(a)$ ，其中  $a$  代表廠商的  $\text{CO}_2$  減排量，而第  $i$  種要素的  $\text{CO}_2$  排放係數為  $e_i$ （ $e$  代表排放係數向量），排放的總量管制水準為  $\bar{e}$ 。因此廠商在總量管制下之利潤極大化問題為：

$$\begin{aligned} \max \quad & \pi = pf(x) - wx - c(a), \\ \text{s. t.} \quad & \bar{e} \geq ex - a. \end{aligned}$$

最適能源使用量 ( $E^c$ ) 將滿足 (7) 式的一階必要條件（即圖 9 之  $k$  點所示）。此時配置效率實質損失為  $AEI^c = \Delta bzk$ ，而實質利潤損失曲線 (loss curve) 乃如  $RPL^c$  所示（當實際能源用量越偏離  $E^c$  時， $RPL$  將越高）。



資料來源：本研究整理。

圖 9 廠商在總量管制與排放交易下之能源效率的比較

$$VMP_E(E^c) = w_E + c'(a^c) \cdot e_E, \quad (7)$$

其中， $a^c = e_E E^c - \bar{e}$ 。

## 4.2 排放交易下的能耗量

假設 CO<sub>2</sub> 排放許可證的價格為  $\gamma$ ，排放許可交易量為  $m$ （ $m > 0$  表示買入），排放交易下之利潤極大化問題可表示為：

$$\begin{aligned} \max_{x, a, m} \quad & \pi = pf(x) - wx - c(a) - \gamma m, \\ \text{s. t.} \quad & \bar{e} = ex - a - m. \end{aligned}$$

上述問題之一階必要條件如下：

$$VMP_E(E^e) = w_E + c'(a^e) \cdot e_E, \quad (8)$$

$$c'(a^e) = \gamma, \quad (9)$$

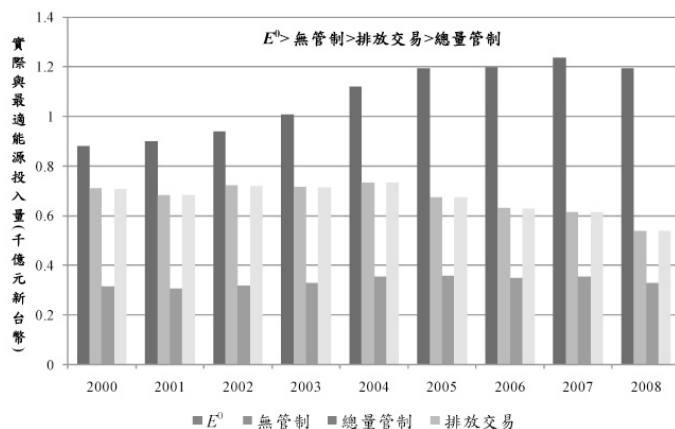
其中 (8) 式即圖 9 之  $h$  點所示，此時之最適能源使用量應為  $E^e$  ( $> E^c$ )，故實質利潤損失曲線乃如  $RPL^e$  所示。<sup>15</sup>

在前述三種情況（無管制、總量管制、及排放交易）下之實質利潤損失曲線分別如圖 9 之第四象限之  $RPL^*$ 、 $RPL^c$  及  $RPL^e$  曲線所示，其中每單位能源用量的實質利潤損失分別如  $A$ 、 $B$ 、 $C$  直線之斜率絕對值所代表。因此可見，同一廠商在同一能源用量之下，當其所面對的環境政策工具不同時，該能源用量所隱含的能源效率並不相同。換言之，政府所設計的環境政策工具，對於廠商的能源效率是有所作用的，因此善選政策工具也是提升能源效率的策略之一。

在 Cobb-Douglas 生產函數的設定下，吾人利用行政院主計處雙面平減表，求解三種情境下的最適能源投入量與其他要素投入量：包括無排放管制、總量管制（排放管制目標為 214 百萬公噸）、及總量管制

<sup>15</sup> (8) 式與 (7) 式之決策準則雖然相同，由而決定出來的要素使用量卻不相同，因為在此二情況下之減排量並不相同，而且  $a^c > a^e$ ，因此  $E^c > E^e$ 。

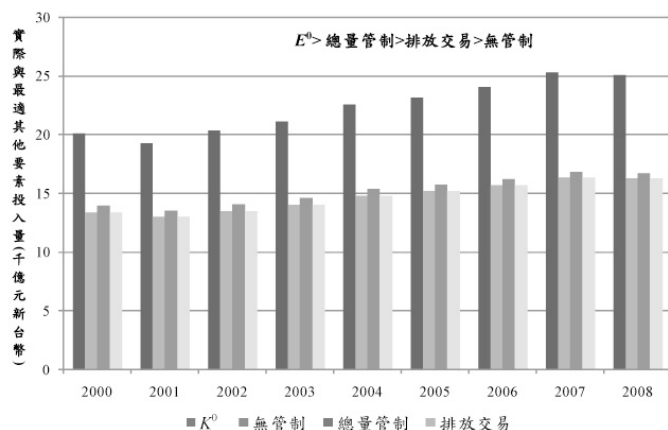
與排放交易併行 (cap and trade)。結果顯示：能源最適投入量由高而低依序為無管制、排放交易、總量管制（如圖 10 (a)），此一結果與圖 9 的理論預期一致。至於其他複合要素投入量，由高而低依序則為總量管制、排放交易、無管制（如圖 10 (b) 所示），顯然與能源最適投入相反，這是因為能源投入與其他複合要素投入間存在替代關係。



資料來源：本研究整理。

註： $E^0 = 1.2368$ ， $E^*$ 無管制 = 0.6152，總量管制 = 0.3558，排放交易 = 0.6144。

(a) 能源投入量



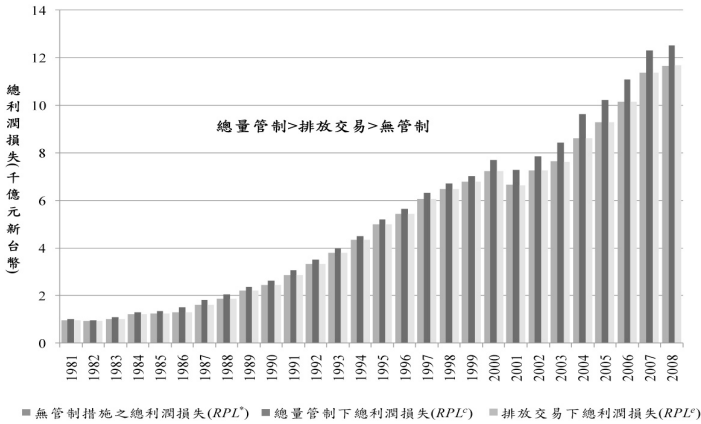
資料來源：本研究整理。

註： $K^0 = 25.3136$ ， $K^*$ 無管制 = 16.3441，總量管制 = 16.8220，排放交易 = 16.3453。

(b) 其他要素投入量

圖 10 政策工具下最適要素投入量與實際投入量

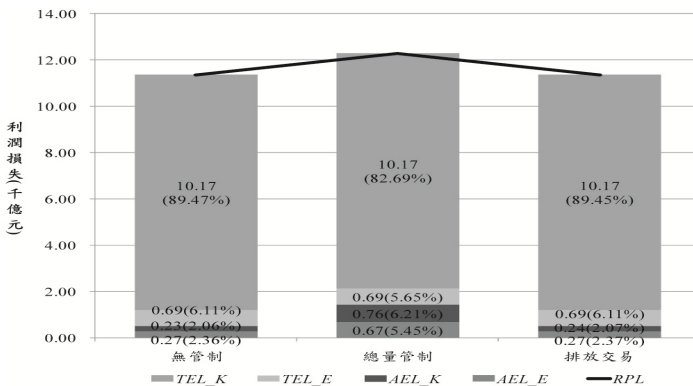
就總利潤損失而言，由高至低依序為總量管制、排放交易與無管制（如圖 11）。就利潤損失的來源而言，其他複合要素缺乏技術效率所產生之利潤損失 ( $TEL_K$ ) 的佔比最大，在無管制及排放交易的情境下，則分別高達 89.47% 及 89.45%。其他利潤損失佔總損失之比重，則因政策工具不同而存在結構性變化；如在無管制措施與排放交易措施下，第二大利潤損失的來源為能源缺乏技術效率所產生之利潤損失 ( $TEL_E$ )，但在總量管制下，則為其他複合要素缺乏配置效率所產生之利潤損失 ( $AEL_K$ ；如圖 12)。



資料來源：本研究整理。

註：2007 年之  $RPL^* = 11.3630$ ， $RPL^c = 12.2937$ ， $RPL^e = 11.3655$ 。

圖 11 政策工具下利潤損失總和

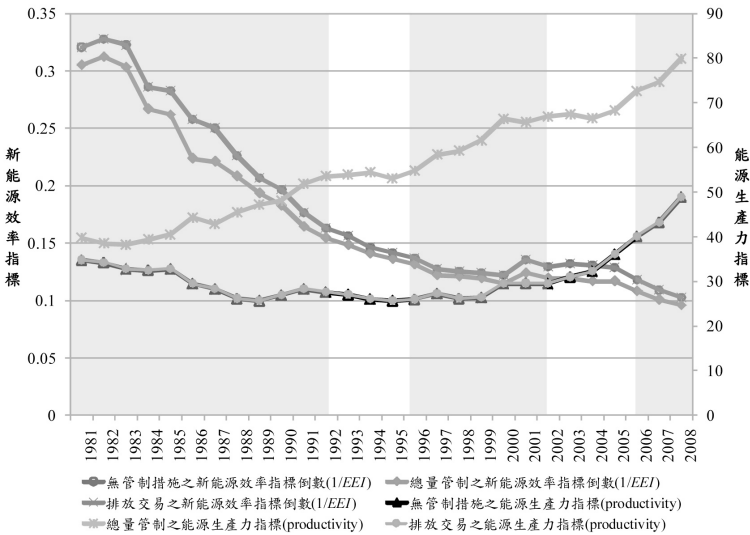


資料來源：本研究整理。

圖 12 政策工具下利潤損失來源



最後，吾人分別就無管制、總量管制、及排放交易三種政策情境，推估新能源效率指標 (EEI) 及能源生產力，其結果彙整於圖 13。由此可知：(i) 排放交易下之能源效率與無管制時幾近相同，主要原因在於吾人所設定的碳交易價格低於邊際防制成本，致使廠商鮮少自行減量，而幾乎完全從市場中購入所必要的排放許可；如果碳權價格足夠高，則排放交易的能源效率可望低於無管制的情境。(ii) 排放交易下的能源效率高於總量管制，而且隨時間經過有逐漸惡化的趨勢，此與理論上的預期相符，且與 Feijoo et al. (2002) 的效率指標一致。(iii) 就能源生產力指標而言，在排放交易與總量管制下的能源效率均逐年提升，而且總量管制下的能源生產力高於排放交易下的能源生產力（如圖 13）。此一結果，在理論上似乎難以成立，因此，使用能源生產力來反映能源效率的不適當性可見一斑。



資料來源：本研究整理。

圖 13 政策工具下新能源效率指標

## 5. 結論與建議

能源使用效率的提升無疑是當前要務，但應如何衡量能源使用效率，並制定一個客觀的衡量指標呢？現行常見的能源生產力（或能源密集度）指標因採用 GDP 來計算產出，故其變動不足以代表能源效率改善與否，而此指標在應用上多以因素分解法進行分析，雖然可藉此得知指標變動的效果來源，卻無法針對特定能源投入的使用效率進行使用效率的衡量，也無法透過解析方法抽離出影響 GDP 的其他變動因素。

本文除建立實證模型分別推估我國能源生產力及各產業部門之能源技術效率的變動趨勢外，也延伸 Feijoo et al. (2002) 的方法，提出一個較具優勢的能源效率指標，即以每單位能源用量的實質利潤損失為基準。此一指標具有多項特性：(i) 以每單位能源用量的實質利潤損失來計量，含意簡單清楚，*EEI* 的值越大，代表廠商越缺乏效率。(ii) 兼顧了廠商使用能源的技術效率與配置效率。(iii) *EEI* 的衡量結果不會出現與成本效率不一致的現象。(iv) 不增加實證上的困難度，只要能推估出有效的生產邊界、或利潤邊界、或能源需求邊界，即可計算 *EEI*。(v) 可用於廠際間的能源效率比較，亦可透過加總得到更高層級的能源效率。換言之，單位能源投入損失不僅可以衡量特定廠商在特定能源投入的使用效率，亦可衡量總體層級的特定能源使用效率。(vi) 可以反映出廠商在不同環境制度下使用同一要素組合所顯現的差別效率。

此外，在本文所定義的能源效率指標下，吾人發現，同一廠商在同一能源使用量之下，當其所面對的環境政策工具不同時，該能源使用量所隱含的能源效率並不相同。換言之，政府所設計的環境政策工具，對於廠商的能源效率是有所作用的，因此，善選政策工具也是提升能源效率的策略之一。

## 參考文獻

- 行政院主計總處 Directorate-General of Budget, Accounting and Statistics, Executive Yuan, R.O.C. (1993-2009), 國民所得統計年報 *National Income Statistics Yearbook*, <http://www.dgbas.gov.tw/ct.asp?xItem=15448&CtNode=4643>。(in Chinese)
- 林盈均 Lin, Yin-Chun (2005), 「能源使用效率之衡量與溫室氣體減量工具的影響」“Measurement of Energy Efficiency and the Effect of Policy Instruments for Greenhouse Gas Reduction”, 碩士論文 MA. Thesis, 國立清華大學經濟系 Department of Economics, National Tsing Hua University。(in Chinese with English abstract)
- 陸怡蕙 Luh, Yir-Hueih (2008), 「效率改善與能源需求：動態生產模型之定性分析」“Efficiency Improvements and Energy Demand: A Qualitative Analysis Based on the Dynamic Production Model”, *農業經濟叢刊 Taiwanese Agricultural Economic Review*, 13: 2, 81-98。(in Chinese with English abstract)
- 單珮玲 Shan, Pei-Ling (2010), 「產業部門能源需求與碳排放之驅動力與效率的實證研究」“Empirical Analysis on Driving Forces and Technical Efficiency of Energy Demand, Economic Growth and Carbon Emission”, 博士論文, Ph. D. Thesis, 國立政治大學財政學系 Department of Public Finance, National Chengchi University。(in Chinese with English abstract)
- 黃志典、黃智遠 Huang, Chih-Dian and Chih-Yuan Huang (2004), 「台灣地區銀行產業成本效率之實證研究－隨機邊界法之應用」“Analysis of Cost Efficiency of Banks in Taiwan — Stochastic Frontier Approach”, *企銀季刊 Journal of Taiwan Business Bank*, 27: 3, 1-28。(in Chinese with English abstract)
- 黃宗煌、王貴玲 Huang, Chuang-Huang and Kuei-Ling Wang (2002), 「自來水事業之技術效率與有效供水成本的評估」“Efficiency Assessment of Technology and Supply Cost of Tap

- Water Enterprise”，清華大學永續發展研究室 The Center for Sustainable Development of National Tsing Hua University，兩岸永續發展研討會 The Conference of Cross-Straits Sustainable Development。(in Chinese)
- 傅祖壇 Fu, Tsu-Tan (1994)，「要素固定性、對偶成本邊界函數及生產效率之衡量－台灣毛豬農場之實證」“The Effects of Input Fixity on the Measurement of Productive Efficiency of Taiwan Hog Farms”，經濟論文叢刊 *Taiwan Economic Review*，22：4，451-475。(in Chinese with English abstract)
- 經濟部能源局 Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs (1993-2009)，能源平衡表 Energy Balance Sheet of Taiwan，[http://www.moeaboe.gov.tw/opengovinfo/Plan/all/energy\\_balance/main/ch/default.htm](http://www.moeaboe.gov.tw/opengovinfo/Plan/all/energy_balance/main/ch/default.htm)。(in Chinese)
- 鄭秀玲、周群新 Jang, Show-Ling and Chiun-Shing Jou (1998)，「調整風險後之銀行效率分析：台灣銀行業的實證研究」“Risk-Adjusted Efficiency in the Taiwan Banking Industry”，經濟論文叢刊 *Taiwan Economic Review*，26：3，337-366。(in Chinese with English abstract)
- 鄭秀玲、劉錦添、陳欽奇 Jang, Show-Ling, Jin-Tan Liu and Qin-Qi Chen (1997)，「台灣中小企業銀行的效率分析：1986-1994年」“Efficiency in the Taiwan SME Banks: 1986-1994”，經濟論文 *Academia Economic Papers*，25：1，69-95。(in Chinese with English abstract)
- Afriat, S. N. (1972)，“Efficiency Estimation of Production Function,” *International Economic Review*, 13:3, 568-598.
- Aigner, D. J., C. A. K. Lovell and P. J. Schmidt (1977)，“Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models,” *Journal of Econometrics*, 6:1, 21-37.
- Aiken, D. V. and C. A. Pasurka Jr. (2003)，“Adjusting the Measurement of US Manufacturing Productivity for Air Pollution Emissions Control,” *Resource and Energy Economics*, 25:4, 329-351.

- Ang, B. W. (1994), "Decomposition of Industrial Energy Consumption: The Energy Intensity Approach," *Energy Economics*, 16:3, 163-174.
- Ang, B. W. and N. Liu (2007), "Energy Decomposition Analysis: IEA Model versus Other Methods," *Energy Policy*, 35:3, 1426-1432.
- Bor, Y. J. (2008), "Consistent Multi-Level Energy Efficiency Indicators and Their Policy Implications," *Energy Economics*, 30:5, 2401-2419.
- Cornwell, C., P. Schmidt and R. C. Sickles (1990), "Production Frontiers with Cross-Sectional and Time-Series Variation in Efficiency Levels," *Journal of Econometrics*, 46:1-2, 185-200.
- Farrell, M. J. (1957), "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, 120:3, 253-290.
- Feijoo, M. L., J. F. Franco and J. M. Hernández (2002), "Global Warming and the Energy Efficiency of Spanish Industry," *Energy Economics*, 24:4, 405-423.
- Honma, S. and J. L. Hu (2008), "Total-Factor Energy Efficiency of Regions in Japan," *Energy Policy*, 36:2, 821-833.
- Hu, J. L. and S. C. Wang (2006), "Total-Factor Energy Efficiency of Regions in China," *Energy Policy*, 34:17, 3206-3217.
- Kopp, R. J. and W. E. Diewert (1982), "The Decomposition of Frontier Cost Function Deviations into Measures of Technical and Allocative Efficiency," *Journal of Econometrics*, 19:2-3, 319-331.
- Lee, C. C. and C. P. Chang (2008), "Energy Consumption and Economic Growth in Asian Economies: A More Comprehensive Analysis Using Panel Data," *Resource and Energy Economics*, 30:1, 50-65.
- Liu, X. Q., B. W. Ang and H. L. Ong (1992), "The Application of the Divisia Index to the Decomposition of Changes in Industrial Energy Consumption," *The Energy Journal*, 13:4, 161-178.

- Mairet, N. and F. Decellas (2009), "Determinants of Energy Demand in the French Service Sector: A Decomposition Analysis," *Energy Policy*, 37:7, 2734-2744.
- Mishra, V., S. Sharma and R. Smyth (2009), "Are Fluctuations in Energy Consumption Per Capita Transitory? Evidence from a Panel of Pacific Island Countries," *Energy Policy*, 37:6, 2318-2326.
- Mukherjee, K. (2008), "Energy Use Efficiency in U.S. Manufacturing: A Nonparametric Analysis," *Energy Economics*, 30:1, 76-96.
- Patterson, M. G. (1996), "What is Energy Efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues," *Energy Policy*, 24:5, 377-390.
- Richmond, J. (1974), "Estimating the Efficiency of Production," *International Economic Review*, 15:2, 515-521.
- Schmidt, P. and C. A. K. Lovell (1979), "Estimating Technical and Allocative Inefficiency Relative to Stochastic Production and Cost Frontiers," *Journal of Econometrics*, 9:3, 343-366.
- Schmidt, P. and R. C. Sickles (1984), "Production Frontiers and Panel Data," *Journal of Business & Economic Statistics*, 2:4, 367-374.
- Sivak, M. and O. Tsimhoni (2009), "Fuel Efficiency of Vehicles on US Roads: 1923-2006," *Energy Policy*, 37:8, 3168-3170.
- Tanaka, K. (2008), "Assessment of Energy Efficiency Performance Measures in Industry and Their Application for Policy," *Energy Policy*, 36:8, 2887-2902.
- Wei, Y. M., H. Liao and Y. Fan (2007), "An Empirical Analysis of Energy Efficiency in China's Iron and Steel Sector," *Energy*, 32:12, 2262-2270.
- Zhou, P. and B. W. Ang (2008), "Linear Programming Models for Measuring Economy-Wide Energy Efficiency Performance," *Energy Policy*, 36:8, 2911-2916.

# Measurement of Energy Efficiency and Its Linkage to Environmental Policy Instruments

Yang, Chin-Wen

## Abstract

Improving energy efficiency is one of the critical strategies to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Energy productivity, as an indicator of energy efficiency, is pervasively used worldwide. However, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in Fourteenth session of the Conference of the Parties (COP14) has noted that the economic meanings and suitability of this indicator need to be explored. This paper points out that the traditional energy productivity could measure only the cost effectiveness of energy in order to achieve a given level of real gross domestic product (GDP), but not the energy efficiency *per se*. After critically reviewing a number of existing indicators, I propose a new one and show its difference from energy productivity and other indicators which may cause inconsistency between technical efficiency and cost efficiency. Furthermore, the origins of the inefficiency can be decomposed and in response to alternative environmental regimes.

Keywords: Energy Efficiency, Energy Productivity, Cap and Trade,  
Technical Efficiency, Allocate Efficiency

JEL Classification: H21, H23, I18

---

Yang, Chin-Wen, Graduate Institute of Industrial Economics, National Central University,  
24 F-1, No. 135, Chenggong Rd., Zhonghe Dist., New Taipei City 23581, Taiwan, R.O.C.,  
Tel: 886-938030357, E-mail: [93444008@cc.ncu.edu.tw](mailto:93444008@cc.ncu.edu.tw).

Received 10 February 2009; revised 24 April 2009; accepted 14 November 2011.

