

碳排放量的影響因素—兼論主要國家的能源效率

經濟研究處/國內經濟科

蔡釗旻

2024 年 8 月

摘 要

隨氣候變遷的威脅日益明顯，全球各國意識到淨零排放（net zero emissions）的重要性，多數國家業已公開承諾將藉由發展乾淨能源或提高能源效率等方式，以達成 2050 淨零排放的目標。

近年環境議題方受到高度關注，討論此議題的國內文獻不多，且鮮少以臺灣作為研究對象；再者，國內文獻主要著重於研究經濟成長對環境的影響，較少討論通膨與環境間之關係；另外，在能源效率上，鮮少國內文獻對臺灣的能源效率進行估計，大多著重於探討影響能源效率的因素。

有鑑於此，本文擷取 44 個國家（含 34 個經濟合作暨發展組織（Organisation for Economic Cooperation and Development，以下簡稱 OECD）成員國，以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西）的經濟成長、通膨率，以及與二氧化碳排放量的相關變數（如單位 GDP 能源消耗量、乾淨能源比重、人均實質 GDP、貿易開放程度、總人口數、都市人口數）之年資料，嘗試驗證影響排放二氧化碳的因素，並探討經濟成長、通膨與二氧化碳排放量間之關係，同時評估樣本國家的能源效率，藉以觀察樣本期間（1990 年~2022 年）亞洲、美洲、歐洲與臺灣能源效率的變動情況。上述實證結果能提供相關單位參考。實證結果與建議分項說明如下：

壹、實證結果

一、一般化最小平方法的結果指出，欲減少排放二氧化碳，改善能源效率與提高乾淨能源比重係關鍵因素，惟經濟成長通常伴隨著環境汙染，顯示在追求經濟成長下，宜將環境問題納入考慮。

國際間經貿往來頻繁有助於取得淨零排放的相關技術，改善能源

效率，惟對貿易依存度高且能源資源匱乏的國家而言，存在能源安全危機，因容易受供應鏈問題與地緣政治風險的衝擊。

二、追蹤資料門檻迴歸模型的結果指出，若以人均實質 GDP 成長率作為門檻變數，不論其高於或低於門檻，人均實質 GDP 成長率與二氧化碳排放量間均為顯著的正向關係，顯示環境顧志耐曲線（enviroment Kuznets curve, EKC）所述的倒 U 型關係不存在。

而若以通膨率作為門檻變數，對歐洲國家而言，通膨對二氧化碳排放量的影響存在門檻效果；惟對亞洲與美洲國家而言，二者關係不顯著，可能係因疫情過後全球經濟正逐步重回正軌，為追求經濟成長，各國可能增加使用化石燃料，並暫緩實施因應氣候變遷的措施，加以通膨壓力仍未緩解，貨幣政策的緊縮效果持續發酵抑制需求，復以全球經濟零碎化（fragmentation）影響經貿活動所致。

三、隨機邊界分析的結果指出，較高的能源價格與貿易開放程度均能夠有效地提升能源效率，因較高的能源價格能使企業轉向使用低碳技術，而激勵民眾傾向消費低碳商品；而貿易開放程度愈高，有助於加速引進先進技術；另外，減少工業部門的能源消耗情況亦能夠改善能源效率。

四、根據能源效率的估計結果發現，在經貿往來頻繁與國際合作下，亞洲國家的能源效率已有明顯改善；受美中貿易戰持續與衝突擴大、疫後經濟復甦加速能源消耗等影響，美洲國家的能源效率改善幅度小；歐洲國家因能源資源匱乏，加以俄烏戰爭等地緣政治風險居高，引發能源危機，導致能源效率明顯下滑。

五、由於臺灣能源資源高度依賴進口，能源效率容易受國際經濟金融情勢的影響。於 2008 年以前，受惠於國際貿易往來頻繁，有助

於我國取得先進技術，能源效率大幅提升；嗣因受國際局勢動盪，加以各國間競爭激烈，臺灣對外貿易成長趨緩，復以工業部門能源消耗較多，衝擊能源效率。近年，我國能源效率改善可能係因全球商品需求回溫以及國內加速推動乾淨能源發展與氣候變遷因應的相關政策。

貳、政策意涵

- 一、為達成淨零排放的目標，宜訂定合理的能源價格，發展低耗能的產業，鼓勵企業採用高能源效率的設備，並制定能源消耗減緩措施，如二氧化碳排放率標準、節能減碳獎勵措施等（Black et al., 2021）。
- 二、各國政府宜及早提出淨零路徑的改革方針，如提高乾淨能源比重的進程，減少使用化石燃料，此即能源轉型。
- 三、經濟成長往往會增加二氧化碳的排放，造成環境汙染，惟提高能源效率，制定更嚴格的环境保護政策，可以取得經濟成長與環境間之平衡（Cevik and Jalles, 2023）。
- 四、本行雖非我國氣候行動之主要推動者，惟面對氣候變遷帶來的風險，宜投注自身研究量能，並密切關注氣候相關議題之發展，同時，滾動檢討及精進相關業務執行與提升研究氣候風險的能力，積極因應氣候變遷對臺灣經濟金融帶來的挑戰。

關鍵詞：能源消耗、能源效率、乾淨能源、二氧化碳排放量、環境汙染、一般化最小平方法、追蹤資料門檻迴歸模型、隨機邊界分析

JEL 分類代號：C23、D22、Q43、Q54、Q55

目 次

壹、前言.....	1
貳、文獻回顧.....	4
一、影響二氧化碳排放量的文獻.....	4
二、討論經濟成長、通膨及二氧化碳排放量間之關係的文獻.....	6
三、有關能源效率的文獻.....	8
參、研究方法與變數說明	10
一、一般化最小平方法（generalized least squares, GLS）	10
二、追蹤資料門檻迴歸模型（panel threshold regression model） ..	11
三、隨機邊界分析（stochastic frontier analysis, SFA）	12
肆、資料說明與實證結果	14
一、資料來源與變數說明	14
二、實證結果	20
（一）一般化最小平方法（標準誤經修正的追蹤資料迴歸模型）	20
（二）追蹤資料門檻迴歸模型	22
（三）隨機邊界分析	27
1、係數之估計結果	27
2、能源效率之估計結果	29
伍、結論與政策意涵	42
一、結論	42
二、政策意涵	45

圖目次

圖 1、2024 年 4 月全球陸地與海洋的溫度與 1991 年~2020 年平均溫度之差異	2
圖 2、1990 年以來，全球二氧化碳的排放情形	2
圖 3、1990 年~2022 年人均二氧化碳排放量與人均實質 GDP 成長率	18
圖 4、1990 年~2022 年人均二氧排放量與通膨率	18
圖 5、1990 年~2022 年人均能源消耗量與單位 GDP 能源消耗量	19
圖 6、1990 年~2022 年乾淨能源比重	19
圖 7、1990 年~2022 年亞洲、美洲、歐洲的能源效率估計結果	31
圖 8、1990 年~2022 年日本、新加坡、南韓、中國大陸的能源效率估計結果	34
圖 9、1990 年~2022 年美國、加拿大的能源效率估計結果	36
圖 10、1990 年~2022 年冰島、波蘭、愛沙尼亞的能源效率估計結果	39
圖 11、1990 年~2022 年臺灣能源效率的估計結果與能源價格指數、工業附加價值率、服務業附加價值率、貿易開放程度的情形	41
附錄圖 1、1990 年~2022 年樣本國家的能源效率情形（被解釋變數：人均能源消耗量）	58
附錄圖 2、1990 年~2022 年樣本國家的能源效率情形（被解釋變數：單位 GDP 能源消耗量）	62

表 目 次

表 1、模型變數與資料來源	15
表 2、敘述統計	15
表 3、一般化最小平方法之結果	21
表 4、追蹤資料門檻迴歸模型之結果（門檻變數：人均實質 GDP 成長率）	25
表 5、追蹤資料門檻迴歸模型之結果（門檻變數：通膨率）	26
表 6、隨機邊界分析之結果	28
附錄表 1、追蹤資料之單根檢定（原始資料）	55
附錄表 2、追蹤資料之單根檢定（年增率）	55
附錄表 3、追蹤資料迴歸模型之結果（固定效果）	56
附錄表 4、追蹤資料迴歸模型之結果（隨機效果）	56
附錄表 5、一般化最小平方法之結果	57

壹、前言

氣候變遷加劇全球極端氣候的發生。近年來，全球各地天災不斷，如歐洲各國遭遇熱浪襲擊、希臘野火肆虐、西班牙連日乾旱；美國東部、德國南部、日本九州、南韓慶尚北道、澳洲雪梨等地區均爆發嚴重洪災。此外，全球暖化，海平面上升，部分國家（如加勒比海、巴拿馬）開始撤離島嶼居民。

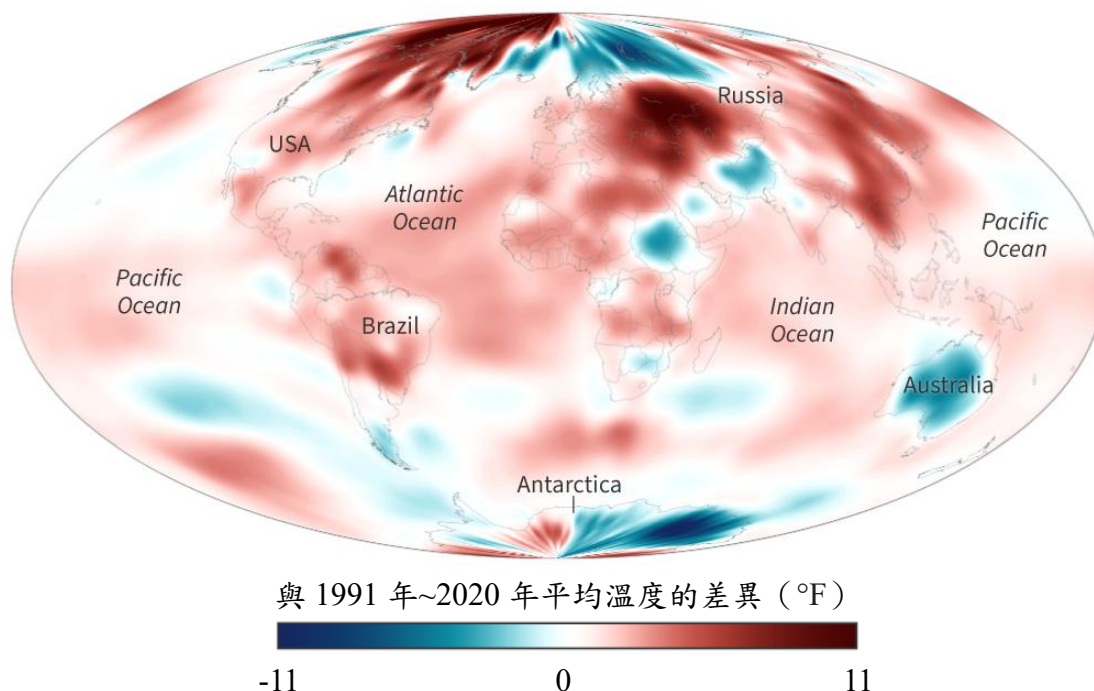
極端氣候的發生與全球暖化有關。根據美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）統計，2024 年 4 月北半球的陸地與海洋溫度為有記錄以來最高，且較 1991 年~2020 年的平均溫度高 1.75°C (3.15°F)。南半球則為有記錄以來次熱的 4 月，高於平均溫度 0.88°C (1.58°F)。（見圖 1）

然而，全球暖化又與二氧化碳排放量有關。觀察圖 2 發現，全球二氧化碳排放量持續增加，自 1990 年的 221.50 億噸增加至 2022 年的 385.02 億噸，且 2022 年的年增率為 7.79%，係 1990 年以來最高。

值得一提的是，2020 年全球二氧化碳排放量轉呈負成長 5.36%，主因 COVID-19 疫情全球大流行，各國相繼實施邊境管制等措施，衝擊經濟活動，使得能源消耗大幅降低，致二氧化碳排放量明顯減少；惟疫後因經濟活動復甦，能源需求回升，加以多數國家乾淨能源的重要政策與措施尚未完善，致全球二氧化碳排放量再度增加，據此可推論，經濟成長對二氧化碳的排放有一定的影響。

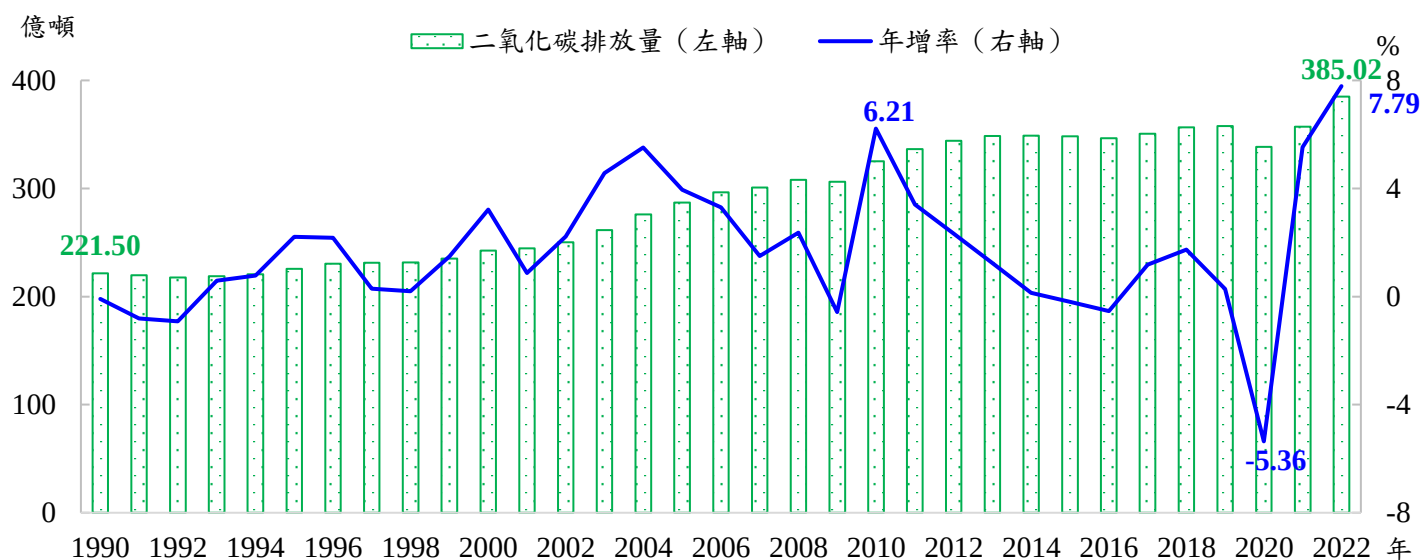
《巴黎協議（Paris Agreement）》的主要目標係以工業革命前的全球平均溫度為基準，將上升幅度控制在 2°C 以內，並力求控制在 1.5°C 以內。根據 UNEP (2023) 指出，若欲達成該目標，截至 2030 年，全球溫室氣體排放量需要分別約減少 28%、42%。由此可知，全球在減緩氣候變遷的措施仍有相當大的努力空間。

圖 1、2024 年 4 月全球陸地與海洋的溫度與 1991 年~2020 年平均溫度之差異



資料來源：擷取自 NOAA (2024), "Global Climate Report for April 2024," National Centers for Environmental Information, Global Precipitation Climatology Project, May 15.

圖 2、1990 年以來，全球二氧化碳的排放情形



資料來源：美國能源資訊管理局 (Energy Information Administration, EIA)。

總言之，雖然淨零排放已成為全球共識，多數國家訂定淨零排放目標，並要求企業邁向綠色轉型，惟脫碳 (decarburization) 速度緩慢，全球仍屬於碳密集型經濟，加以俄烏戰爭未解與地緣政治緊張局勢加

劇，在主要經濟體的通膨壓力仍高下，因應氣候變遷的相關政策可能暫緩實施、化石燃料基礎設施與碳鎖定（carbon lock-in）的政策可能增加，¹ 以致影響未來的脫碳情形。

由此可知，全球的暖化情形將會持續較長時間，未來極端氣候的發生頻率可能愈來愈高，各國政府如何邁向永續發展，將是解決氣候變遷危機的關鍵，如 Cevik (2022a, 2022b) 發現，提高能源效率有助於減少歐洲、加勒比海區域之二氧化碳排放量。有鑑於此，本文參考 Cevik (2022a, 2022b)，評估 44 個主要國家（包含 34 個經濟合作暨發展組織（Organisation for Economic Cooperation and Development，以下簡稱 OECD）成員國、² 臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西）影響二氧化碳排放量的因素。

與 Cevik (2022a, 2022b) 不同的是，本文考慮到總體經濟與環境間相互作用存在複雜性，加以近年全球各國均遭受到沉重的通膨壓力，貨幣政策在此一關係中應扮演何種角色，係各國央行關注的事，因此，瞭解總體經濟變數如何影響二氧化碳排放量亦相當重要，因此，本文亦探討經濟成長、通膨與二氧化碳排放量間之關係，此舉有助於提供央行對總體經濟與環境間之政策整合的思維。

此外，Kraiche et al. (2022) 表示各國需要評估自身的能源效率，因其對永續發展相當重要，加以 IEA (2019)、Cevik (2022a, 2022b) 均指出，提高能源效率有助於減少二氧化碳排放量，進而達成《巴黎協議》的目標，因此，本文參考 Filippini and Hunt (2012)、Cevik and Gao

¹ 以電力系統為例，若整個社會持續採用傳統化石燃料發電的型態，即使乾淨能源成本持續下降，亦難以取代二氧化碳排放量較高的化石燃料，加以個人與社會往往傾向維持現有的體制，抗拒改變現狀，此即碳鎖定。

² 歐洲：奧地利、德國、法國、英國、盧森堡、瑞典、瑞士、比利時、希臘、荷蘭、冰島、挪威、丹麥、愛爾蘭、葡萄牙、義大利、西班牙、匈牙利、愛沙尼亞、芬蘭、波蘭、斯洛伐克、斯洛維尼亞、捷克。

亞洲：澳洲、紐西蘭、日本、南韓、土耳其、以色列。雖澳洲與紐西蘭應屬大洋洲，惟其屬亞太地區的國家，加以考慮到樣本國家含土耳其與以色列，故仍將稱之為亞洲。

美洲：美國、加拿大、墨西哥、智利。

(2023)，評估樣本國家的能源效率，此舉亦能探討能源效率變動情形的潛在驅動因素。此等實證結果能提供相關單位參考，並對淨零排放提供建議，為永續發展奠定基礎。

近年環境議題方受到高度關注，討論此議題的國內文獻不多，且鮮少以臺灣作為研究對象；再者，多數國內文獻著重於研究經濟成長對環境的影響，較少討論通膨與環境間之關係；另外，在能源效率上，鮮少國內文獻對臺灣的能源效率進行估計，大多著重於探討影響能源效率的因素。

綜上所述，本文的主要貢獻在於（1）以 44 個樣本國家（含臺灣）作為研究對象，來分析二氧化碳排放量的影響因素；（2）採用門檻迴歸模型分析經濟成長率與通膨率對二氧化碳排放量的影響效果；（3）估計 44 個樣本國家（含臺灣）的能源效率，並分析主要區域與主要國家的能源效率情形，此舉亦涵蓋能源效率影響因素的探討。

其餘章節內容依序為：第貳章回顧相關文獻，第參章為研究方法與變數說明，第肆章為敘述統計與實證結果，第伍章為結論與建議。

貳、文獻回顧

本節的文獻回顧分為（1）二氧化碳排放量的影響因素；（2）經濟成長率、通膨率對二氧化碳排放量的影響；（3）能源效率估計，茲說明如下：

一、影響二氧化碳排放量的文獻

黃柏農與李佳珍（2018）使用對數平均迪式指數分解法（logarithmic mean divisia index，以下簡稱 LMDI）將人均二氧化碳排放量分解成經濟活動、人口成長、單位 GDP 能源消耗量、能源結構、碳排係數等 5 項效果，藉以觀察臺灣 1971 年~2014 年二氧化碳

排放量的變動情形。

結果發現，2000 年以前，臺灣的二氧化碳排放量減少，主因 1977 年開始引進核能發電，能源效率提升與碳排係數降低；2000 年以後，臺灣經濟成長趨緩，加以少子化，雖有助於減少排放二氧化碳，惟因該期間增加使用化石燃料，碳排係數明顯增加，導致該期間臺灣的人均二氧化碳排放量未能明顯減少。

Black et al. (2021)認為減少使用化石燃料最有效的方法係提高價格，並提出對先進、高所得新興國家與低所得新興國家課徵碳稅，每公噸二氧化碳排放量分別課徵 75 美元、50 美元、25 美元，以實現《巴黎協議》的目標。該文亦指出，提高價格具政治挑戰性，各國需要在碳定價與其它工具間取得平衡。³

Cevik (2022a)擷取 1980 年~2019 年 39 個歐洲國家的資料來探討氣候變遷與能源安全議題。結果發現，增加核能、可再生能源、其它非碳氫化合物能源的比重，以及提高能源效率，均有助於減少排放二氧化碳，進而改善整個歐洲的能源安全。該文主張擺脫碳氫化合物、提高能源效率的政策與相關改革為緩解氣候變遷、減少能源依賴與減少能源價格波動風險的關鍵因素。

Cevik (2022b)以加勒比海區域的小島國家為研究對象，探討該區域的氣候變遷與能源安全議題。結果指出，提高能源效率與減少使用化石燃料有助於大幅減少排放二氧化碳，而增加綠色投資與財務彈性長期上將產生正向助益。自風險報酬的角度而言，短期內降低氣候變遷相關風險與提高環境品質帶來的益處超過減緩氣候變遷所增加的潛在成本。

³ 政府可以採用非定價策略，如二氧化碳排放率標準、費用減免、乾淨技術補貼等，因其避免能源價格大幅上漲，雖政治挑戰性較小，惟效率較低。

Black et al. (2023)估計全球各國化石燃料補貼的情況。⁴ 結果發現，各國的化石燃料定價普遍過低。過低的定價意味著政府放棄收入來源，並損害分配與減貧目標。該文主張能源價格改革能夠減少能源消耗，並對環境、財政、經濟帶來效益，惟其需要增加對家計部門的援助。⁵

Cevik and Jalles (2023)研究 1970 年~2020 年 25 個已開發國家的能源部門（電力、天然氣）結構改革對環境成果與綠色成長的影響。結果發現，迄今為止的結構改革尚未能夠明顯減少人均溫室氣體排放量，惟其能有效地減少單位 GDP 溫室氣體排放量；此外，對環境監管較嚴格的國家而言，能源的結構改革可以帶來更好的環境成果與綠色成長。

二、討論經濟成長、通膨及二氧化碳排放量間之關係的文獻

環境顧志耐曲線（environment Kuznets curve, EKC）指出，經濟成長與環境汙染間存在倒 U 型的關係。經濟發展初期，環境會受到經濟成長的負面影響，惟隨政策轉向汙染較少的經濟發展，在經濟成長達到特定門檻後，環境汙染會開始下降。

部分文獻證實經濟成長與環境汙染間之倒 U 型關係（Galeotti et al., 2006; 吳珮瑛等, 2008b; Sarkodie et al., 2020; Alola and Ozturk, 2021; Baloch et al., 2021）；惟亦有文獻指出，該倒 U 型關係不存在（吳珮瑛等, 2015a; Destek et al., 2018; Destek and Sinha, 2020; Dogan et al., 2020; Kar, 2022）。

然而，亦有部分文獻發現，經濟成長與環境汙染（如二氧化碳排

⁴ 補貼有 2 種形式：（1）顯性補貼：低於化石燃料供給成本的索價；（2）隱性補貼：低於環境成本與消費稅收入的索價。

⁵ 該文建議援助措施宜針對低收入戶，以避免增加財政負擔。亦宜與能源消耗無關，以避免損害節能激勵措施，因此，援助可能採取經過經濟狀況調查的移轉支付或一次性能源帳單回扣的形式。

放量)間之關係由最初的倒U型轉變成N型,意味著在更高的經濟成長水準下會出現新的轉折點,反而造成更嚴重的環境汙染(Álvarez–Herranz et al., 2017; Allard et al., 2018; Destek et al. 2020),可見經濟成長與環境汙染之關係迄今未有定論。

近年來,通膨與二氧化碳排放量間之關係亦受到重視,多數文獻係以環境顧慮耐曲線作為研究通膨如何影響二氧化碳排放量的基礎;惟二者間之關係在文獻上亦存在不同的結果。

直覺上,較高的通膨可能削弱民間消費,進而抑制生產活動,以致二氧化碳排放量減少(Ronaghi et al., 2020),惟若通膨上升來源係能源價格上漲,則亦可能促使企業增加投資,以改善能源效率或改變能源結構,進而減少排放二氧化碳。

Musarat et al. (2021)以馬來西亞的建築業為研究對象,探討通膨對二氧化碳排放量的影響,結果發現,較低的通膨率與二氧化碳排放量增加有關,惟該文亦發現,在較高的通膨率下,緩解通膨壓力的措施可能抑制經濟成長,反而減少二氧化碳排放量。

Grolleau and Weber (2024)擷取 1970 年~2020 年 189 個國家的資料,並採用固定效果追蹤資料迴歸模型來研究通膨對二氧化碳排放量的影響。結果發現,核心通膨與人均二氧化碳排放量間存在顯著的負向關係。

AlShafeey and Saleh (2024)採用 Levenberg–Marquardt 逆向傳遞演算法的神經網路模型研究美國、歐盟、中國的通膨與溫室氣體排放量間之關係。結果指出,溫室氣體排放量與通膨率間為非線性關係,即存在門檻效果。

三、有關能源效率的文獻

Filippini and Hunt (2012)使用隨機邊界分析 (stochastic frontier analysis, 以下簡稱 SFA) 估計 1978 年~2006 年 29 個 OECD 國家的能源效率, 而不直接觀察單位 GDP 能源消耗量 (即能源消耗密集度), 主因該文發現, 單位 GDP 能源消耗量並非能源效率的良好指標。

以義大利為例, 在樣本期間內, 該國的單位 GDP 能源消耗量下降, 意味著能源效率有所提高, 惟實際上, 估計的能源效率反而呈下降情形。有鑑於此, 該文主張在探討環境問題時, 宜估計能源效率, 以作為補充資訊, 而非直接採用單位 GDP 能源消耗量, 避免潛在的誤導性政策建議。

Chen et al. (2016)擷取臺灣 1982 年~2011 年間的產業資料, 探討能源價格對能源消耗量與能源效率的效果, 並將短期與長期的能源消耗量區分成能源利用與能源浪費。結果指出, 臺灣製造業短期與長期的能源效率值平均分別為 0.60、0.80。此外, 就短期而言, 在面對價格變動下, 能源利用缺乏彈性, 惟就長期而言, 則存在價格彈性。能源效率的短期價格彈性為 0.08, 長期則為 0.14, 顯示能源效率與能源價格間為正向關係。

Tajudeen et al. (2018)先以單位 GDP 能源消耗量的資料估計能源效率, 接著, 驗證 30 個 OECD 國家能源效率對二氧化碳排放量的影響。結果發現, 1971 年~2015 年單位 GDP 能源消耗量下降係因能源效率提高所致。以國家別而言, 僅以色列、紐西蘭、葡萄牙、西班牙之能源效率呈下降的情形。整體而言, 提高能源效率有助於減少排放二氧化碳。此外, 該文亦發現, 增加使用乾淨能源有助於減少排放二氧化碳, 惟不如提高能源效率重要。

梁啟源等 (2021) 採用 LMDI 方法將 2014 年~2019 年臺灣工業

部門能源消耗量的變動，分解成能源密集度、產業結構、經濟活動、產能利用率變動的效果，藉以分析近年臺灣工業部門能源消耗的因素。

結果發現，2014 年~2019 年工業部門能源消耗量減少，雖該期間，經濟活動增加能源消耗，惟受能源密集度下降與工業部門產業結構變動影響，致能源消耗總量減少。該文指出，透過提升能源效率與節能措施，能夠減緩經濟發展衍生出的能源消耗量。另外，減少化石燃料補貼、促使能源價格合理化以反映成本、考慮課徵碳稅、能源稅或碳費、採行節能交易機制等，均有助於提升工業部門能源效率。

Kraiche et al. (2022)指出提高能源效率對永續發展相當重要，需要對能源效率進行評估，以提供政策制定者設定能源效率目標的資訊。該文使用 SFA 估計 1990 年~2015 年 44 個歐洲國家的能源效率，並比較 1990 年~1998 年、1999 年~2007 年、2008 年~2015 年各國的平均能源效率。

結果發現，(1) 能源效率最高的國家存在外溢效果；(2) 相較於 1990 年~1998 年，於 1999 年~2007 年，歐洲國家平均能源效率提高 67.44%，惟於 2008 年~2015 年，僅提高 59.09%；(3) 能源效率的成長情況可能隨時間經過趨於平穩或下降；(4) 當國家面臨經濟衰退時，能源效率會下降，此意味著 COVID-19 疫情全球大流行所引發的經濟衰退，將衝擊未來的能源效率。

Li et al. (2022)擷取 2000 年~2016 年中國大陸 30 個行政區的資料，採用 SFA 估計能源效率。結果發現，平均能源效率自 2000 年的 0.79 降至 2016 年的 0.77，顯示中國大陸的能源消耗有待改善，整個樣本期間平均能源效率為 0.78。然而，該文指出，單位 GDP 能源消耗量僅能反映能源效率的某一層面，宜評估能源效率作為補充資訊，

同時，提及 EIA (1995)主張單位 GDP 能源消耗量未必能反映出真實的能源效率。

Cevik and Gao (2023)採用 SFA 評估 1980 年~2021 年 38 個歐洲國家的能源效率。結果發現，平均而言，歐洲國家的能源效率約生產邊界的 90%，惟各國間存在顯著的差異。再者，能源價格（如徵收碳稅、取消化石燃料補貼）係影響能源效率的關鍵因素，因民眾會對能源價格的變動有所回應。此外，更嚴格的环境保護政策與鼓勵民眾節約能源均能夠明顯提高能源效率。

Wu et al. (2019)發現，提升能源效率能夠降低能源需求與減少二氧化碳排放量，並促進經濟成長，顯示改善能源效率的重要性。為探索能源效率的驅動因素，Su (2023)採用追蹤資料迴歸模型，估計 2000 年~2020 年間 46 個國家（含臺灣）的能源效率，結果發現，能源效率的關鍵因素係經濟成長、再生能源與電氣化技術。此外，產業結構轉型、貿易開放程度提高與人口成長率增加均有助於改善能源效率，惟此等因素在不同國家間之影響效果存在差異。

參、研究方法與變數說明

一、一般化最小平方法（generalized least squares, GLS）

本文蒐集 44 個國家的資料，同時存在橫斷面與時間序列的資訊，因此，選擇採用一般化最小平方法來估計。參考 Cevik (2022a)、Cevik (2022b)、Cevik and Jalles (2023)，模型設定如下：

$$y_{i,t} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^7 \alpha_i x_{i,t} + \gamma_i + \varepsilon_{i,t} \dots \dots \dots (1)$$

其中，被解釋變數($y_{i,t}$)為人均二氧化碳排放量；解釋變數($x_{i,t}$)

包含單位 GDP 能源消耗量（即能源消耗密集度）、乾淨能源比重、⁶ 人均實質 GDP、貿易開放程度、總人口數、都市人口數、通膨率，共 7 個解釋變數。再者，模型亦納入國家固定效果（ γ_i ）。 α_0 為常數項， $\varepsilon_{i,t}$ 為誤差項。

然而，有幾個問題必須注意：（1）橫斷面相關（cross-section dependence）：Baltagi (2013) 主張若資料的時間序列超過 20 年以上會存在橫斷面相關的問題，惟對短期與大量的個體資料不是大問題；（2）異質性（heterogeneity）：樣本國家間的特徵存在差異；（3）自我相關（autocorrelation）：誤差項可能存在自我相關性。

有鑑於此，本文採用一般化最小平方法，並設定誤差項具異質性與相關性進行估計，此即標準誤經修正的追蹤資料迴歸模型。此外，為確保實證結果具強韌性，本文另外使用 2 種模型做比較：（1）固定效果追蹤資料迴歸模型；（2）隨機效果追蹤資料迴歸模型。二者均採用強韌性的標準誤。⁷

二、追蹤資料門檻迴歸模型（panel threshold regression model）⁸

由於部分文獻發現，經濟成長率與二氧化碳排放量間為倒 U 型關係，惟部分文獻則持否定看法，亦有部分文獻發現二者為 N 型關係；而通膨率與二氧化碳排放量的關係上，部分文獻支持負向關係，惟部分文獻主張存在門檻效果，為非線性關係。

有鑑於此，在驗證經濟成長率、通膨率與二氧化碳排放量間之關係上，採用 Hasen (1999) 提出的固定效果追蹤資料門檻迴歸模型進行估計。模型設定如下：

⁶ 乾淨能源包含水力、地熱、太陽能、潮汐、生物質能、風力。

⁷ 為減輕誤差項存在相關性或異質性衍生之問題，因而採用強韌性的標準誤。

⁸ 使用追蹤資料門檻迴歸模型時，資料不能缺漏，因此，本文以上期資料填補缺漏值。

$$y_{i,t} = \alpha_i + \sum_{i=1}^7 \beta'_1 x_{i,t} I(q_{i,t} \leq \tau) + \sum_{i=1}^7 \beta'_2 x_{i,t} I(q_{i,t} > \tau) + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

其中，被解釋變數($y_{i,t}$)為人均二氧化碳排放量；解釋變數($x_{i,t}$)有單位 GDP 能源消耗量、乾淨能源比重、人均實質 GDP、貿易開放程度、總人口數、都市人口數、通膨率； $I(\cdot)$ 為指標函數，門檻變數($q_{i,t}$)為人均實質 GDP 成長率或通膨率， τ 為門檻值。模型亦納入國家固定效果(α_i)。 $\varepsilon_{i,t}$ 為誤差項。⁹

為估計 τ ，透過拔靴法(bootstrap)搜尋門檻變數($q_{i,t}$)的子集合，並將範圍限制在某個區間內($\underline{\tau}, \bar{\tau}$)，此即門檻變數($q_{i,t}$)的分量。門檻估計值($\hat{\tau}$)係以極小化殘差平方和(residual sum of squares)而得，表示如下：

$$\hat{\tau} = \arg \min S_1(\tau) \dots \dots \dots (3)$$

三、隨機邊界分析(stochastic frontier analysis, SFA)¹⁰

能源效率係指，消耗相同的能源要素投入，有更多的能源產出，抑或係在相同的能源產出下，消耗更少的能源要素投入。由於多數文獻認為單位 GDP 能源消耗量未必能反映出真實的能源效率，建議估計能源效率(EIA, 1995; Filippini and Hunt, 2012; Li et al., 2022)。在估計能源效率方面，多數文獻採用 SFA。所謂邊界的核心概念係經濟主體能夠達到最大或最小水準。

對生產函數而言，該邊界給定企業在任何投入水準下，可取得的最大產出水準；就能源需求函數而言，該邊界的意義係在給定經濟主體生產的能源服務(產出)下，估計所需的最低能源要素水準

⁹ 在討論經濟成長率與二氧化碳排放量間之關係時，為使全文模型一致，以人均實質 GDP 成長率作為門檻變數。

¹⁰ 為避免缺漏值太多而無法估計能源效率，本文以上期資料填補缺漏值。

（投入），以認定一國的能源生產情況是否達到有效邊界。

若一國未達到生產邊界，則其與生產邊界的差距意味著該國的能源要素投入較多，即能源效率較低；反之，則代表能源效率較高。參考 Filippini and Hunt (2012)、Cevik and Gao (2023)，模型設定如下：

$$EE_{i,t} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_{i,t} + \varepsilon_{i,t} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_{i,t} + v_{i,t} - \mu_{i,t} \dots (4)$$

其中，被解釋變數（ $EE_{i,t}$ ）為 i 國在 t 期下的能源效率，以人均能源消耗量作為代理變數，惟必須注意的是，人均能源消耗量愈高表示能源效率愈低。

解釋變數（ $x_{i,t}$ ）包含人均實質 GDP、能源相對價格、工業與服務業的附加價值率（即附加價值占 GDP 之比重）、貿易開放程度、總人口數、都市人口數。在 SFA 架構中的誤差項 $\varepsilon_{i,t}$ 由 2 個項目組成： $v_{i,t}$ 、 $u_{i,t}$ ，表示成 $\varepsilon_{i,t} = v_{i,t} - u_{i,t}$ 。

其中， $v_{i,t}$ 為隨機誤差項（即殘差），而 $u_{i,t}$ 則為無效率項。假設隨機誤差項（ $v_{i,t}$ ）服從常態分配，而無效率項（ $u_{i,t}$ ）係一非負的隨機變數，服從指數分配，其代表著 i 國在 t 期下的能源效率水準，反映著最高的能源效率（生產邊界）與實際能源效率間之差距。

必須注意的是，資料必須先經過對數轉換，再以 Battese and Coelli (1995) 的架構來估計技術效率，公式如下：

$$EF_{i,t} = \frac{EE_{i,t}^F}{EE_{i,t}} = \exp(-u_{i,t}) \dots \dots \dots (5)$$

其中， $EE_{i,t}$ 係 t 期下， i 國以人均能源消耗量估計的能源效率， $EE_{i,t}^F$ 係 t 期下， i 國能源效率的生產邊界，即被解釋變數之配適值（ $\widehat{EE}_{i,t}$ ）。為減輕相關性或異質性問題，於此，亦採用強韌性的標準誤。

肆、資料說明與實證結果

一、資料來源與變數說明

各國的資料包含人均實質 GDP、通膨率，以及與二氧化碳排放量有關的變數（如人均能源消耗量等），¹¹ 主要擷取自美國能源資訊管理局(EIA)、世界銀行(World Bank)的世界發展指標資料庫(world development indicators database)；¹² 臺灣的資料則來自 EIA、能源署、主計總處、內政部、財政部；乾淨能源比重的資料來源係 Ritchie et al. (2023)線上提供的資料。

樣本期間為 1990 年~2022 年，主因多數國家 1990 年以前的資料缺漏較多，且臺灣能源署的資料最早僅能追溯至 1990 年。樣本國家共 44 個，包含 34 個 OECD 成員國，¹³ 以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西。資料為不平衡的追蹤資料(unbalanced panel data)，頻率為年，並彙總於表 1。

首先，為確保資料定態，採用 Fisher-ADF 與 Fisher-PP 單根檢定。檢定結果指出，除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數則均以年增率表示，使之定態。（見附錄表 1、附錄表 2）。

根據表 2，平均而言，人均二氧化碳排放量約 8.34 公噸；單位 GDP 能源消耗量約 4.39 千英熱，即生產 1 單位 GDP 平均需要消耗約 4,390 英熱的能源；而人均能源消耗量則約 1.48 億英熱。然而，部分資料的標準差較大，意味著各國間的部分特徵存在明顯的差異，呼應著前述提及樣本國家存在異質性問題。

¹¹ 根據 EIA 定義，能源消耗量包含石油、天然氣、煤炭、核電、水力發電、非水力發電的再生電力的消耗量。

¹² 事實上，世界銀行亦提供人均二氧化碳排放量、單位 GDP 能源消耗量、人均能源消耗量的資料，惟後二者最新僅至 2015 年，加以未提供臺灣的資料，因此，改用美國能源管理局的資料。雖然能源署有公布人均能源消耗量、單位 GDP 能源消耗量的資料，惟考量能源單位一致性，因此，未使用能源署的資料。

¹³ 見註解 2。

表 1、模型變數與資料來源

定義	計算方法	資料來源
人均二氧化碳排放量	二氧化碳排放量/人口數	EIA、能源署、內政部、作者計算
單位 GDP 能源消耗量	能源消耗量/GDP ¹	EIA
乾淨能源比重	乾淨能源消耗占總能源消耗之比重*100 ²	Ritchie et al. (2023) ³
人均實質 GDP	實質國內生產毛額/總人口數	World Bank、主計總處、內政部、作者計算
貿易開放程度	(進口總額+出口總額)/GDP*100， 並取對數	World Bank、主計總處、財政部、作者計算
總人口數	總人口數	EIA、內政部
都市人口數	都市人口數 ⁴	World Bank、內政部
通膨率	消費者物價指數年增率	World Bank、主計總處
人均能源消耗量	能源消耗量/人口數	EIA
能源相對價格	能源價格指數/GDP 平減指數，並取對數	World Bank、主計總處、作者計算
工業附加價值率	工業附加價值/GDP*100 ⁵	World Bank、主計總處、作者計算
服務業附加價值率	服務業附加價值/GDP*100	World Bank、主計總處、作者計算

註 1：GDP 採用 2015 年購買力平價做調整，以美元為單位。

2：乾淨能源包含核能、水力、地熱、風力、太陽能、潮汐、生質能等。

3：Ritchie, H., P. Rosado and M. Roser (2023), "Energy," published online at ourworldindata.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/energy>.

4：臺灣的都市人口數係六都加上新竹縣市計算。

5：臺灣的附加價值率係以國內生產毛額占生產總額之比率，即企業每生產 1 單位商品時，所創造的 GDP。

表 2、敘述統計

定義	平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
人均二氧化碳排放量（單位：公噸）	8.34	5.96	0.19	43.19	1,430
單位 GDP 能源消耗量（單位：千英熱）	4.39	1.87	0.77	16.54	1,441
乾淨能源比重（單位：%）	20.23	18.71	0	85.71	1,452
人均實質 GDP（單位：百萬美元）	28,788.63	22,116.13	528.90	112,417.88	1,429
貿易開放程度（單位：值）	91.98	65.97	15.16	437.33	1,431
總人口數（單位：千人）	100,335.78	259,102.26	255.00	1,425,893.00	1,440
都市人口數（單位：千人）	51,437.94	109,446.50	231.26	897,578.43	1,452
通膨率（單位：%）	5.07	10.04	-4.48	105.22	1,439
人均能源消耗量（單位：百萬英熱）	148.07	101.61	2.75	663.28	1,441
能源相對價格（單位：值）	4.33	1.01	-0.51	18.24	1,350
工業附加價值率（單位：%）	27.69	7.07	10.40	49.12	1,359
服務業附加價值率（單位：%）	59.53	8.84	32.38	80.38	1,356

註：能源消耗量的單位係英熱（British thermal unit, Btu），為英制的熱能單位。

資料來源：EIA、World Bank、Ritchie et al. (2023)、能源署、主計總處、財政部、內政部、作者整理。

為節省篇幅，資料區分為全球、亞洲、美洲、歐洲，並特別描繪出臺灣資料，以利比較。觀察圖 3 發現，就全球而言，於 2008 年以前，人均二氧化碳排放量逐年增加，嗣後，則明顯下降，主因多數歐洲國家均致力於減少排放二氧化碳，在乾淨能源與碳密集度較低的燃料（如天然氣等）上大幅成長，加以淨零排放政策效果發酵，如歐盟硝酸鹽指令（nitrates directive）、歐盟建築能源績效指令（energy performance of buildings directive），並引入能源護照制度、歐盟垃圾掩埋指令（landfill directive）等（EEA (2014)）。

此外，美洲國家則於 2010 年後大抵呈下降情形，主因樣本國家能源朝向低碳轉型，並訂定相關法規與政策，如 2008 年加拿大實施碳稅、美國 2008 年頒布《新能源政策法》與 2009 年《乾淨能源與安全法》、墨西哥則於 2014 年實施碳稅、智利於 2014 年頒布氣候汙染稅法，並於 2018 年開始徵收溫室氣體排放稅等。

然而，由於亞洲國家（含臺灣）為全球主要的製造業供應鏈，隨製造業生產增溫，二氧化碳排放量不斷攀升。雖於 2020 年因 COVID-19 疫情全球大流行，經濟活動停滯而減少排放二氧化碳；惟嗣後，經濟活動復甦，以致二氧化碳排放量回升。

再者，除亞洲國家（含臺灣）之外，對全球、歐美國家而言，經濟成長與二氧化碳排放量間大抵呈正向關係，顯示多數國家的經濟成長係以環境汙染作為代價。¹⁴

在通膨率方面，觀察圖 4 發現，除歐洲國家之外，對全球、亞洲國家（含臺灣）、美洲國家而言，通膨率與二氧化碳排放量間大致為負向關係，顯示較高的通膨水準可能抑制企業的生產活動，民間

¹⁴ 人均二氧化碳排放量與人均實質 GDP 成長率的相關係數結果，全球、亞洲（含臺灣）、美洲、歐洲分別為 0.18、-0.10、0.04、0.17。

消費下降，以致減少排放二氧化碳。¹⁵

另外，觀察圖 5 發現，雖人均能源消耗量與單位 GDP 能源消耗量均為能源效率的衡量指標（指數上升，表示能源效率下降），惟二者的走勢並不相同。樣本期間內的單位 GDP 能源消耗量大抵呈下降情形，顯示樣本國家的能源效率隨時間經過而增加，惟就人均能源消耗量而言，歐美國家則均呈先升後降的情況，意味著起初的能源效率不佳，隨時間經過，可能因技術進步而有所改善。

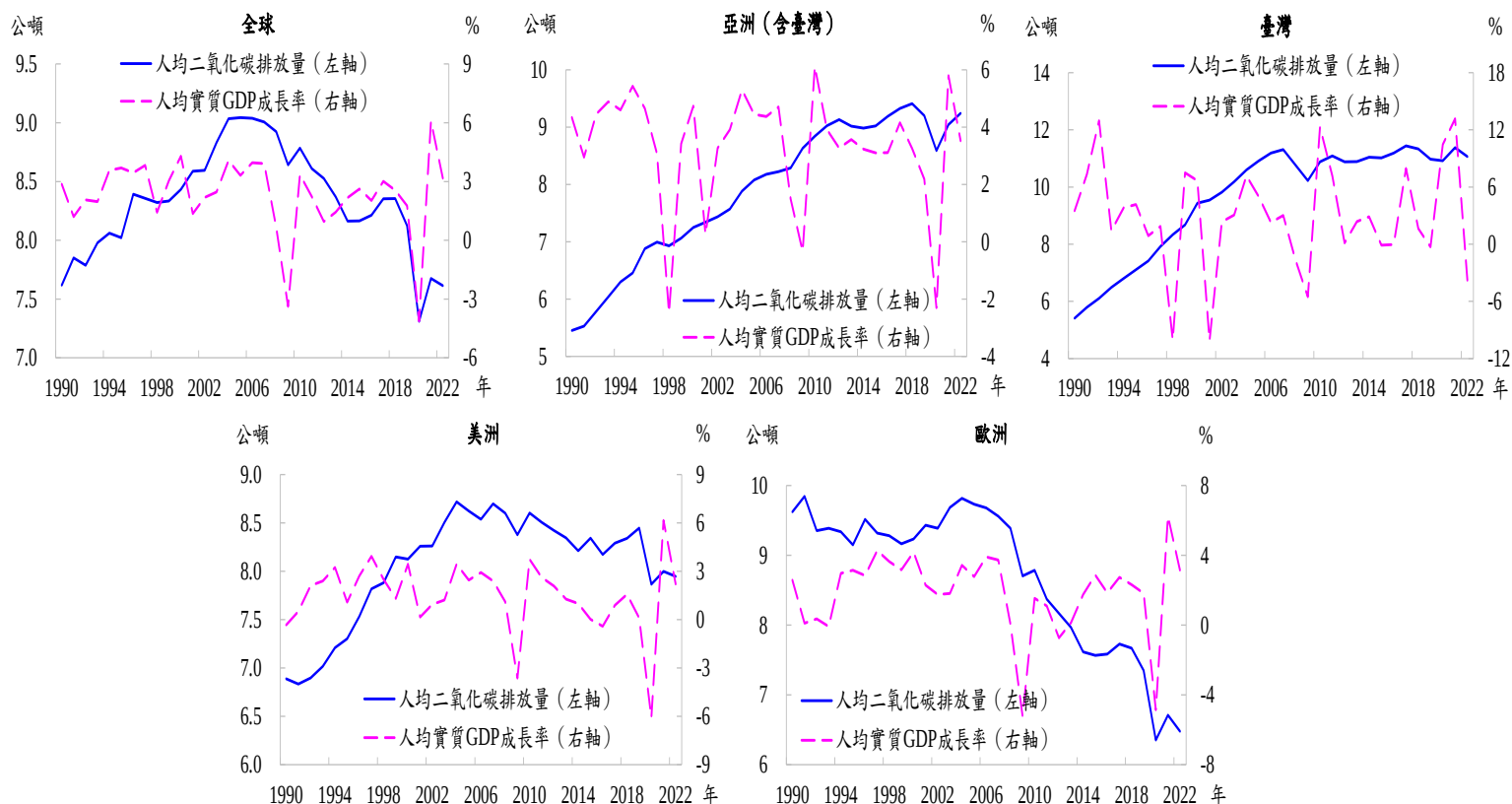
然而，對亞洲國家（含臺灣）而言，除全球金融危機與 COVID-19 疫情期間，經濟活動受到衝擊之外，其餘樣本期間，人均能源消耗量大抵呈增加情形，顯示平均而言，多數亞洲國家的能源效率有待改善。

在乾淨能源比重方面，隨時間經過，各國意識到遏止地球暖化刻不容緩，積極地發展乾淨能源，多數國家的乾淨能源比重持續攀升，增加幅度以歐洲國家最為明顯。雖然近年來，亞洲國家的乾淨能源比重持續上升，惟仍遠低於歐美國家。（見圖 6）

綜上所述，雖然中國大陸、日本、南韓等亞洲國家相繼宣布將於 2050 年、2060 年達成「淨零排放」目標，惟欲達成該目標則必須加強改善能源效率、大幅提升乾淨能源的比重，並積極地發展減碳技術且落實減碳行為。

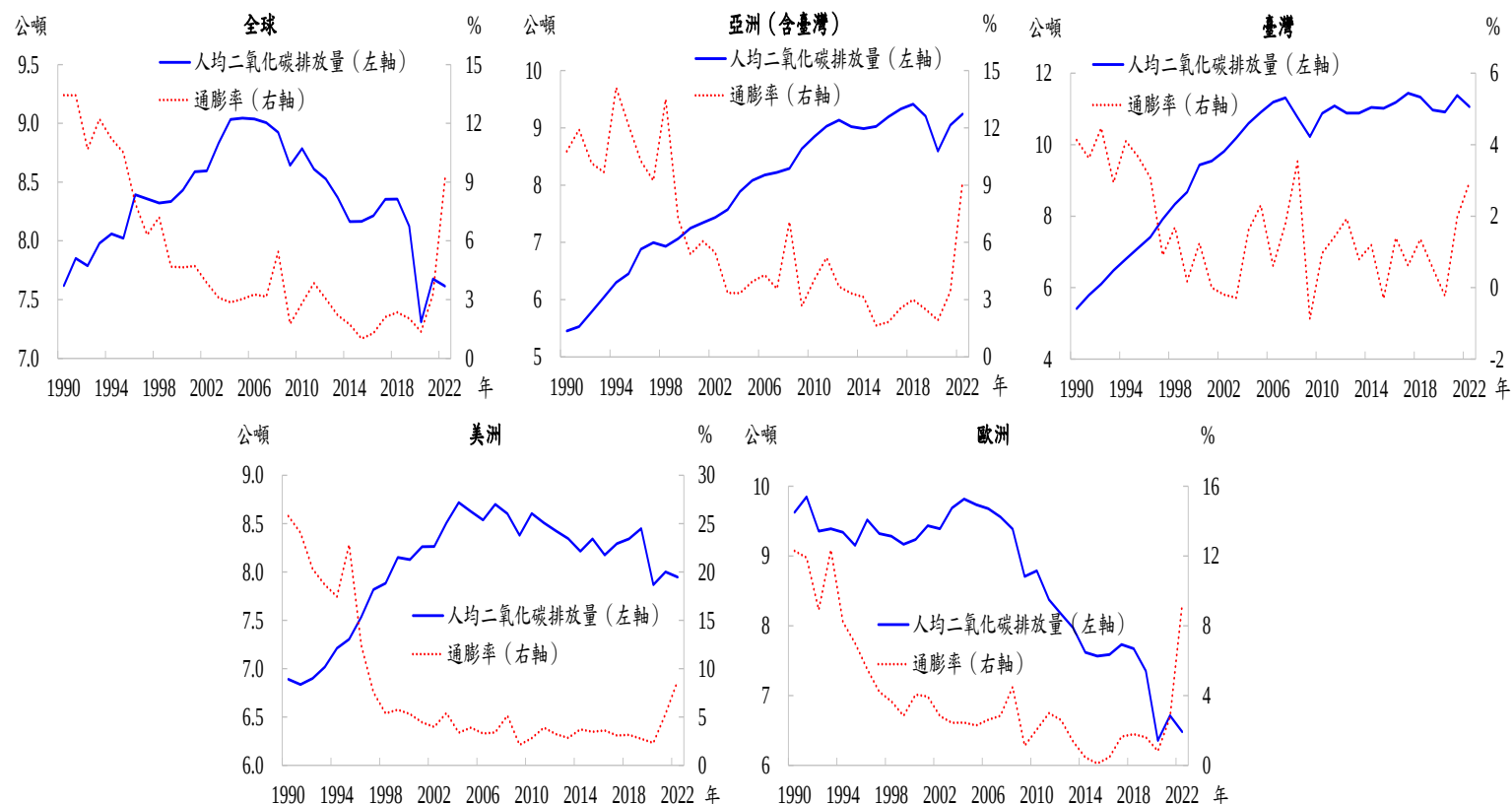
¹⁵ 人均二氧化碳排放量與通膨率的相關係數結果，全球、亞洲（含臺灣）、美洲、歐洲分別為 -0.44、-0.81、-0.92、0.38。

圖 3、1990 年~2022 年人均二氧化碳排放量與人均實質 GDP 成長率



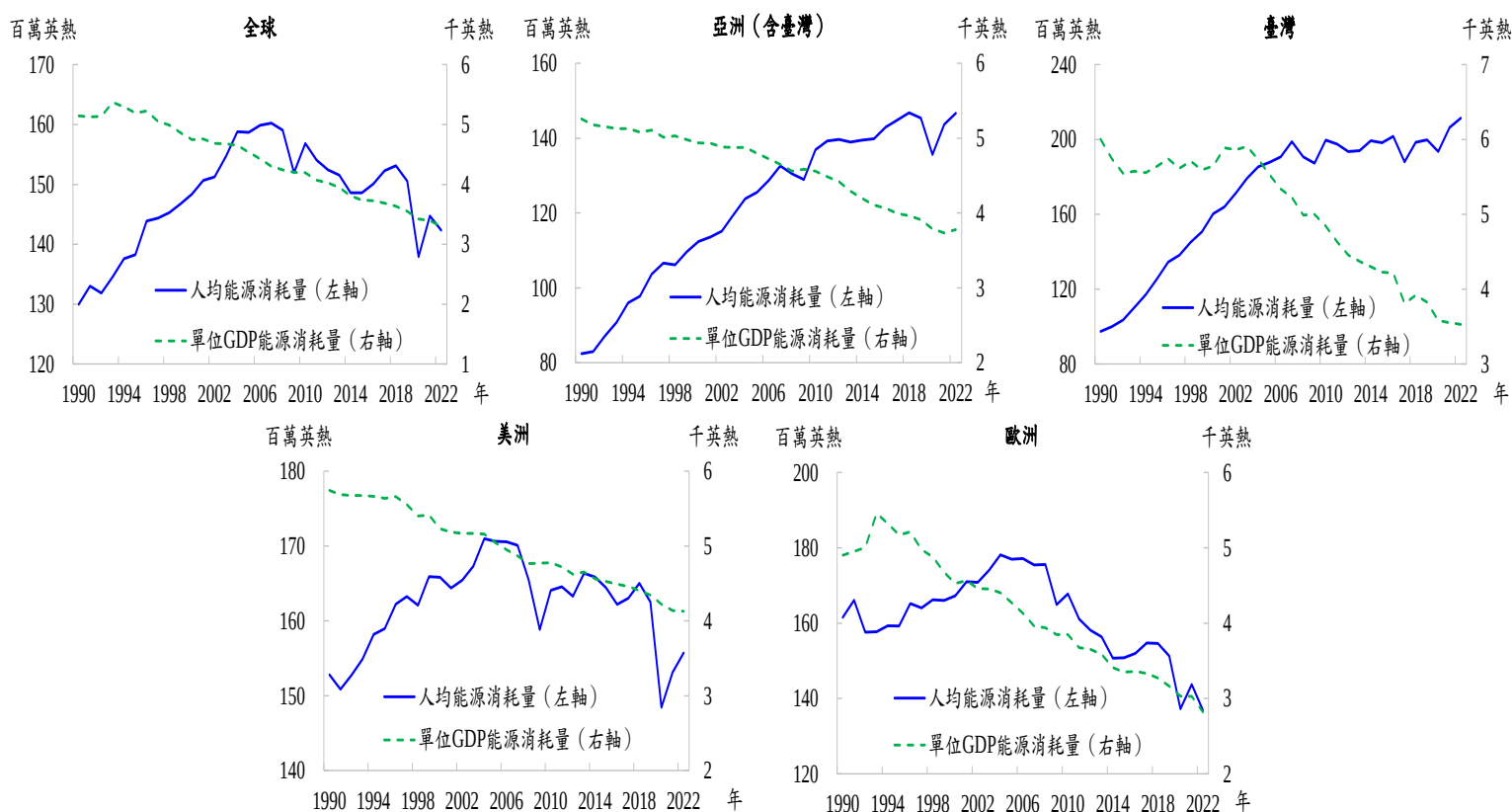
註：全球樣本包含 34 個 OECD 成員國，以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西。
資料來源：EIA、World Bank、能源署、主計總處、內政部、作者計算。

圖 4、1990 年~2022 年人均二氧排放量與通膨率



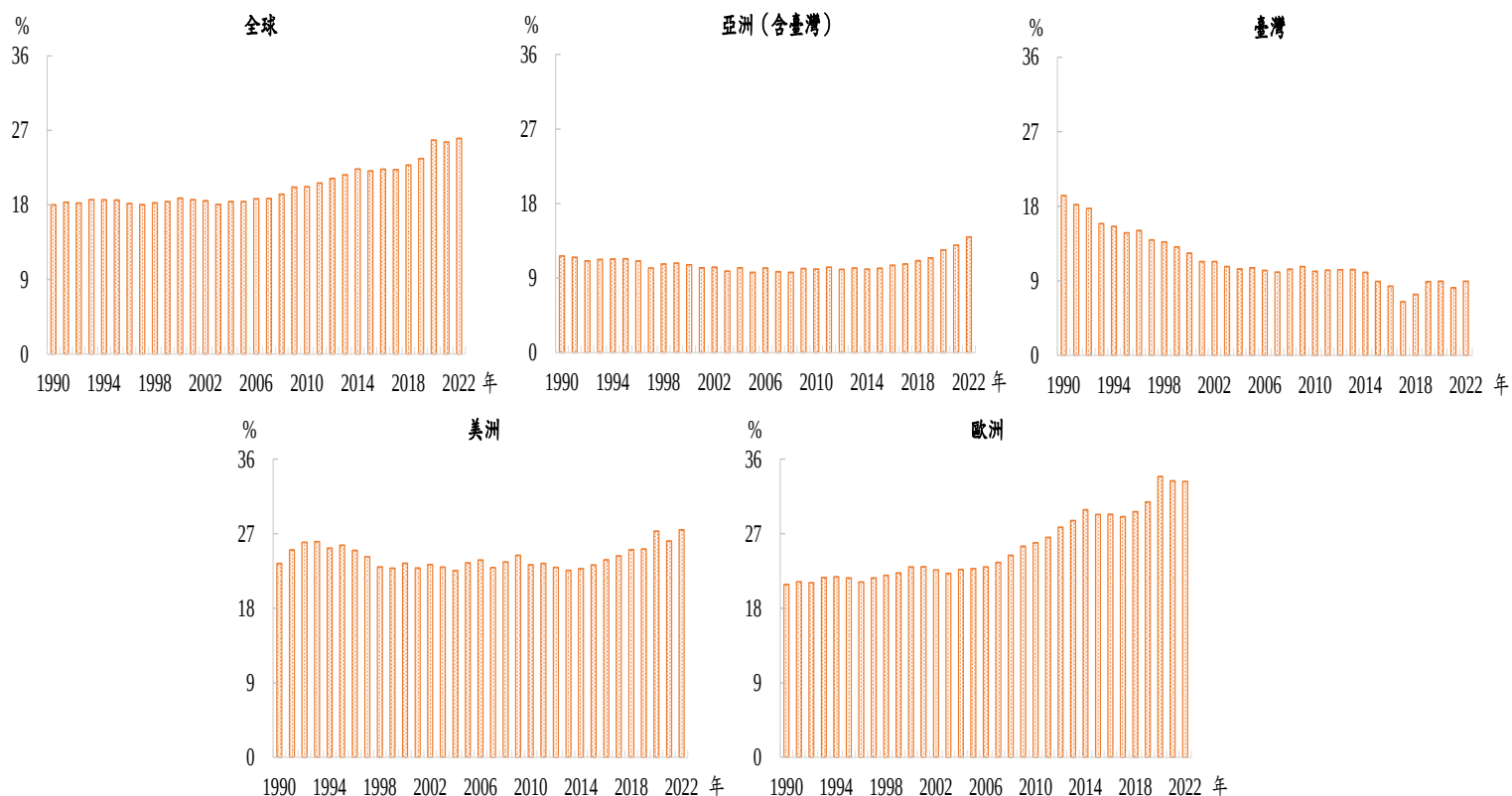
註：全球樣本包含 34 個 OECD 成員國，以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西。
資料來源：EIA、World Bank、能源署、主計總處、內政部、作者計算。

圖 5、1990 年~2022 年人均能源消耗量與單位 GDP 能源消耗量



註：全球樣本包含 34 個 OECD 成員國，以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西。
資料來源：EIA。

圖 6、1990 年~2022 年乾淨能源比重



註 1：全球樣本包含 34 個 OECD 成員國，以及臺灣、新加坡、中國大陸、馬來西亞、泰國、越南、菲律賓、印度、印尼、巴西。

2：臺灣乾淨能源比重持續減少主因核能比重逐年減少。

資料來源：Ritchie et al. (2023)。

二、實證結果

（一）一般化最小平方法（標準誤經修正的追蹤資料迴歸模型）

首先，就表 3 的結果而言，以「單位 GDP 能源消耗量」作為能源效率指標時，無論係就全球而言，抑或係就亞洲與歐美國家而言，單位 GDP 能源消耗量均顯著地正向影響人均二氧化碳排放量，即單位 GDP 能源消耗量愈高，則會增加排放二氧化碳。單位 GDP 能源消耗量愈低代表能源效率愈高，由此可知，提高能源效率有助於減少排放二氧化碳。

在乾淨能源比重方面，乾淨能源比重與人均二氧化碳排放量間為顯著的負向關係，可知乾淨能源比重增加會減少對化石燃料的依賴，進而減少排放二氧化碳；換言之，改變能源結構（自化石燃料轉向乾淨能源）有助於達成淨零排放的目標。

在人均實質 GDP 方面，人均實質 GDP 與人均二氧化碳排放量間皆為顯著的正向關係，意味著經濟成長往往導致更高的二氧化碳排放量，並造成環境汙染問題。

在貿易開放程度方面，對全球、美洲國家而言，其與人均二氧化碳排放量為顯著的負向關係，即貿易開放程度愈高，全球化程度愈高，有助於促進技術進步與創新，以達成減少排放二氧化碳的目標。然而，對亞洲與歐洲國家而言，貿易開放程度的負向效果未達統計顯著性，前者可能係因碳洩漏（carbon leakage）的緣故；¹⁶ 後者可能係因 2012 年歐債危機、2014 年以來，俄烏衝突持續等影響該區域的能源安全問題所致。¹⁷

¹⁶ 為因應氣候變遷，一國實施較嚴格的規定（如課徵碳稅、碳費等），致生產成本變高，進而導致企業將生產線外移至相對較不嚴格的國家，或自規定較寬鬆的國家進口且成本較低的商品，就會造成碳洩漏。簡言之，在成本考量下，企業不試圖轉變營運方式朝向綠化減少排放二氧化碳，而把二氧化碳排放量自 A 國轉移至 B 國的作法，便為碳洩漏。

¹⁷ 2014 年烏克蘭爆發廣場革命後，俄羅斯入侵且併吞克里米亞半島，並在頓巴斯地區爆發親俄抗議活動；2015 年~2021 年衝突持續，惟強度較低；2022 年俄烏戰爭爆發。

表 3、一般化最小平方法之結果

被解釋變數： 人均二氧化碳排放量	全球	亞洲	美洲	歐洲
單位 GDP 能源消耗量	0.70*** (0.26)	0.71** (0.36)	0.69** (0.31)	0.90** (0.42)
乾淨能源比重	-0.08*** (0.01)	-0.04** (0.01)	-0.22*** (0.03)	-0.10*** (0.01)
人均實質 GDP	0.68*** (0.06)	0.59*** (0.06)	0.70*** (0.09)	0.77*** (0.10)
貿易開放程度	-1.45* (0.85)	-1.12 (1.05)	-4.88*** (1.75)	-0.54 (1.85)
總人口數	-1.16** (0.55)	0.29 (0.65)	-5.35** (1.91)	-2.66** (1.05)
都市人口數	1.17*** (0.34)	0.38 (0.40)	2.30 (1.51)	2.45*** (0.79)
通膨率	3.51×e-04 (1.32×e-03)	0.02 (0.02)	3.99×e-04 (1.25×e-03)	-0.01 (0.09)
常數項	2.98 (4.44)	1.66 (5.91)	13.61** (6.77)	-4.57 (8.45)
R-squared	0.40	0.38	0.57	0.35
樣本數	1,371	470	160	741

註 1：在一般化最小平方法中，設定誤差項具異質性與橫斷面相關，並納入國家別的固定效果。

2：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

3：Wald 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

4：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

在人口因素方面，直覺上，總人口增加應會推升二氧化碳排放量，惟實證結果指出，對全球、歐美國家而言，較高的人口成長率反而會減少排放二氧化碳，主因總人口的成長速度大於二氧化碳排放量的增加速度，加以民眾的環保意識有所提升，傾向節能減碳。

惟都市人口成長快速可能對能源消耗造成更大的壓力，以致二氧化碳排放量增加。然而，對亞洲國家而言，人口因素對人均二氧化碳排放量沒有顯著的效果，似乎隱含著人口增加速度與二氧化碳排放量的增加速度大略相同。

上述結果大抵與黃柏農與李佳珍(2018)、Tajudeen et al. (2018)、Cevik (2022a)、Cevik (2022b)、Cevik and Jalles (2023)一致。

在通膨率方面，估計係數均不顯著，可能係因通膨率與二氧化碳排放量間為非線性關係，如同 AlShafeey and Saleh (2024)所述。

(另外 2 種模型的結果，係數亦不顯著。見附錄表 3、附錄表 4)

本文額外採用固定效果與隨機效果的追蹤資料迴歸模型進行分析。所有估計係數的結果大抵與一般化最小平方法的結果一致；另外，將能源指標改採用「人均能源消耗量」代替，該結果亦與表 3 大抵一致，顯示實證結果具強韌性。(見附錄表 3~附錄表 5)

雖單位 GDP 能源消耗量與人均能源消耗量均可作為能源指標，惟 Kraiche et al. (2022)建議估計能源效率，因其係永續發展的重要一環，而部分文獻則認為單位 GDP 能源消耗量並非良好的能源效率指標，因而主張估計能源效率(EIA, 1995; Filippini and Hunt, 2012; Li et al., 2022)。有鑑於此，於第肆章第二節之第(三)小節，估計樣本國家的能源效率。

此外，為驗證解釋變數間是否獨立，即共線性問題是否存在，本文進一步計算個解釋變數的變異數膨脹係數 (variance inflation factor, VIF)，結果均小於 3，由此可知，不存在共線性問題。¹⁸

(二) 追蹤資料門檻迴歸模型

表 4 與表 5 分別係以人均實質 GDP 成長率與通膨率作為門檻變數的估計結果。大致而言，估計係數的結果與上述的一般化最小平方法的結果相似。於此，著重說明人均實質 GDP 成長率與通膨率對二氧化碳排放量的估計結果。

若以人均實質 GDP 成長率作為門檻變數，對全球、亞洲與歐美國家而言，不論係門檻以上或以下，人均實質 GDP 成長率的估計係數均顯著為正值，顯示對樣本國家而言，經濟成長會增加二氧化碳排放量，造成環境汙染，不利永續發展，可見二者不為倒 U 型關係，

¹⁸ 以 VIF 值是否大於 10 作為判斷標準，當 VIF 值大於 10，則解釋變數間存在共線性問題。

不存在門檻效果，該結果與 Destek et al. (2018)、Destek and Sinha (2020)、Dogan et al. (2020)、Kar (2022)一致。(見表 4)

值得一提的是，在人均實質 GDP 成長率低於門檻時，通膨率與人均二氧化碳排放量間為正向關係，惟未達統計顯著性，此結果意味著部分國家仍持續排放二氧化碳，惟受經濟成長動能疲弱影響，總排放量未有明顯增加。

然而，在人均實質 GDP 成長率高於門檻時，除亞洲國家之外，通膨率與人均二氧化碳排放量轉呈顯著的負向關係，此一結果係因經濟成長活絡將推升通膨率，為緩解（需求面）通膨壓力，央行會採行升息政策，此舉將抑制經濟成長，同時亦減少排放二氧化碳，抑或係因經濟成長帶來財富效果，激勵企業增加投資，以改善技術或提高能源效率，進而減少排放二氧化碳。該結果與 Musarat et al. (2021)、AlShafeey and Saleh (2024)一致。

若以通膨率作為門檻變數，對亞洲與美洲國家而言，通膨率對二氧化碳排放量不具顯著地影響效果，可能係因全球生產結構的相互依賴性，各國經濟容易受國際價格波動與供應鏈問題的衝擊。舉例而言，2018 年美中貿易戰且該衝突擴大並延續迄今、2020 年 COVID-19 疫情全球大流行等，引發供應鏈問題，並帶來沉重的（供給面）通膨壓力。

雖然當前多數國家採行緊縮貨幣政策可能抑制能源需求，有助於減少能源消耗，然而，當前通膨壓力仍未緩解，民眾購買力下降，可能轉而購買便宜的高碳排或不環保的商品，反而助長二氧化碳排放量，加以地緣政治風險居高與全球經濟零碎化影響經貿活動，復以疫後經濟仍處於復甦階段，亞洲與美洲國家可能暫緩實施因應氣候變遷的措施，並增加使用化石燃料與轉向碳鎖定的政策，減少投

資綠能與低碳技術，此等情況均不利去碳化，並延遲脫碳時程，以致二者的關係不明確。

雖然歐洲國家亦受到上述的全球性因素（如當前通膨壓力仍高、地緣政治影響經貿活動等）之衝擊，惟通膨率對人均二氧化碳排放量的影響卻存在門檻效果，即二者為非線性關係，可能係因多數歐洲國家在疫後經濟復甦階段，仍持續為淨零排放的目標努力，如歐盟於 2019 年 12 月 11 日公布「歐洲綠色新政」、2021 年第 3 季，歐盟與英國致力推動飲食減碳、產業鏈創新等，盡可能避免使用化石燃料，與亞洲、美洲國家可能轉向碳鎖定政策不同。

以歐洲國家的結果而言，當通膨率低於門檻值 2.68% 時，歐洲國家的二氧化碳排放量會增加，惟當通膨率高於門檻值 2.68% 時，因較高的通膨可能削弱民間消費與抑制企業的生產活動，或係較高的能源成本促使企業有誘因增加投資乾淨能源，以改變能源結構（能源轉型），以致二氧化碳排放量減少。（見表 5）

表 4、追蹤資料門檻迴歸模型之結果（門檻變數：人均實質 GDP 成長率）

被解釋變數：人均二氧化碳排放量	全球		亞洲	
門檻值	6.12		4.55	
	門檻以下	門檻以上	門檻以下	門檻以上
單位 GDP 能源消耗量	0.63*** (0.18)	0.05 (0.24)	1.50*** (0.35)	-0.06 (0.27)
乾淨能源比重	-0.07*** (0.01)	-0.06*** (0.02)	-0.02** (0.01)	-0.09*** (0.03)
人均實質 GDP 成長率	0.78*** (0.05)	0.31* (0.19)	0.57*** (0.09)	0.54*** (0.20)
貿易開放程度	-1.46* (0.75)	-0.04 (0.84)	-1.57* (0.98)	0.70 (1.03)
總人口數	-1.03** (0.51)	-0.75 (0.95)	1.48** (0.67)	-0.54 (0.77)
都市人口數	1.19*** (0.37)	1.07* (0.56)	-0.06 (0.46)	0.14 (0.47)
通膨率	3.38×e-03 (0.02)	-0.23*** (0.04)	0.01 (0.03)	0.03 (0.03)
常數項	1.96 (3.68)		-1.29 (4.51)	
R-squared	0.30		0.25	
樣本數	1,151	257	309	171
被解釋變數：人均二氧化碳排放量	美洲		歐洲	
門檻值	4.68		3.31	
	門檻以下	門檻以上	門檻以下	門檻以上
單位 GDP 能源消耗量	0.27 (0.39)	-0.23 (1.65)	0.62** (0.29)	0.60* (0.32)
乾淨能源比重	-0.21*** (0.03)	-0.14* (0.08)	-0.11*** (0.01)	-0.08*** (0.02)
人均實質 GDP 成長率	0.55*** (0.11)	0.74* (0.48)	0.88*** (0.09)	0.33* (0.18)
貿易開放程度	-2.91 (2.20)	-4.05 (2.61)	-1.65 (1.34)	-0.81 (1.35)
總人口數	-6.92*** (2.37)	-6.63 (5.78)	-2.59*** (0.97)	-3.81*** (1.23)
都市人口數	5.08** (2.09)	14.30*** (5.32)	2.43*** (0.87)	2.71*** (0.89)
通膨率	0.05 (0.07)	-0.74*** (0.23)	0.01 (0.05)	-0.30*** (0.04)
常數項	10.35 (9.89)		2.55 (6.82)	
R-squared	0.54		0.29	
樣本數	101	59	544	224

註 1：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

2：F 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

3：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

表 5、追蹤資料門檻迴歸模型之結果（門檻變數：通膨率）

被解釋變數：人均二氧化碳排放量	全球		亞洲	
門檻值	3.34		1.97	
	門檻以下	門檻以上	門檻以下	門檻以上
單位 GDP 能源消耗量	0.53*** (0.20)	0.18 (0.18)	0.74** (0.34)	0.10 (0.27)
乾淨能源比重	-0.11*** (0.01)	-0.03*** (0.01)	-0.10*** (0.02)	-0.02 (0.01)
人均實質 GDP 成長率	0.72*** (0.06)	0.62*** (0.07)	0.47*** (0.11)	0.66*** (0.08)
貿易開放程度	-2.39*** (0.75)	-2.21*** (0.75)	-1.98* (1.08)	-0.98 (1.02)
總人口數	-0.77 (0.57)	-0.28 (0.60)	0.91 (0.80)	0.24 (0.68)
都市人口數	0.56 (0.41)	1.28*** (0.40)	0.52 (0.52)	0.12 (0.43)
通膨率	0.30* (0.17)	-0.05*** (0.02)	0.18 (0.45)	0.02 (0.02)
常數項	6.79* (3.65)		3.70 (4.70)	
R-squared	0.29		0.24	
樣本數	882	526	172	308
被解釋變數：人均二氧化碳排放量	美洲		歐洲	
門檻值	3.40		2.68	
	門檻以下	門檻以上	門檻以下	門檻以上
單位 GDP 能源消耗量	0.37 (0.46)	0.63 (0.56)	0.92*** (0.35)	0.54* (0.28)
乾淨能源比重	-0.26*** (0.08)	-0.21*** (0.04)	-0.13*** (0.02)	-0.08*** (0.01)
人均實質 GDP 成長率	0.60*** (0.19)	0.63*** (0.13)	0.65*** (0.09)	0.75*** (0.10)
貿易開放程度	-1.01 (2.56)	-2.02 (2.41)	-2.31* (1.30)	-1.92 (1.33)
總人口數	-6.65** (2.80)	-7.16* (3.99)	-0.11 (1.16)	-3.61*** (0.95)
都市人口數	5.05** (2.35)	6.66* (3.38)	0.35 (0.98)	3.36*** (0.78)
通膨率	-0.43 (0.47)	0.01 (0.07)	0.83*** (0.29)	-0.18*** (0.03)
常數項	3.40 (11.05)		4.43 (6.70)	
R-squared	0.46		0.29	
樣本數	44	116	473	295

註 1：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

2：F 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

3：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

(三) 隨機邊界分析

1、係數之估計結果

如前所述，因多數文獻認為能源效率指標未必能反映出真實的能源效率，建議估計能源效率，且此舉亦有助於提供相關的政策建議。有鑑於此，本文在估計能源效率上，分別採用人均能源消耗量、單位 GDP 能源消耗量作為被解釋變數，並比較二者結果，以確保能源效率的估計結果具強韌性。(見表 6)

此外，為利比較，本文係以所有樣本國家的資料來估計隨機邊界，雖能夠將樣本區分成亞洲、美洲、歐洲，分別估計各洲的隨機邊界，惟僅能進行各區域內的比較，無法針對亞洲、歐洲與美洲國家做比較，因隨機邊界不同，即比較基準不同。

二者的結果大抵一致，顯示實證結果具強韌性。特別的是，就人均能源消耗量的結果而言，人均實質 GDP 與人均能源消耗量間為顯著的正向關係，可見經濟發展會增加能源消耗，該結果與 Filippini and Hunt (2012)一致。

惟以單位 GDP 能源消耗量的結果而言，人均實質 GDP 與單位 GDP 能源消耗量間為顯著的負向關係，意味著提高經濟成長動能有助於降低單位 GDP 能源消耗量，顯示經濟成長增加的速度大於能源消耗增加的速度，該結果與 Cevik and Gao (2023)一致。¹⁹

雖二者均被視為能源效率的指標，惟實際蘊含的意義可能存在差異。經濟成長增加會造成人均能源消耗量增加，隱含能源效率較低，惟當經濟成長速度大於能源消耗速度，則單位 GDP 能源消耗量會下降，顯示能源效率較高，因此，導致上述人均實質 GDP 之估計係數正負號不同的結果。

¹⁹ Cevik and Gao (2023)發現，人均實質 GDP 對單位 GDP 能源消耗量具顯著的負向效果，而對人均能源消耗量則具顯著的正向效果。

表 6、隨機邊界分析之結果

被解釋變數 解釋變數	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量
人均實質 GDP	0.31*** (0.12)	-0.59*** (0.08)
能源相對價格	-0.03*** (0.01)	-0.03*** (0.01)
工業附加價值率	0.43*** (0.14)	0.36*** (0.11)
服務業附加價值率	0.06 (0.31)	-0.09 (0.24)
貿易開放程度	-0.13*** (0.04)	-0.12*** (0.04)
總人口數	-0.81*** (0.27)	-0.69*** (0.18)
都市人口數	0.90*** (0.22)	0.73*** (0.16)
常數項	-7.26*** (0.53)	-7.78*** (0.48)
σ_u	0.15*** (0.02)	0.16*** (0.02)
σ_v	0.03*** (0.01)	0.02*** (0.01)
樣本數	1,452	1,452

註 1：模型納入國家別的固定效果，並採用強韌性的標準誤。

2：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

3：Wald 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

重要的是，能源相對價格對人均能源消耗量、單位 GDP 能源消耗量均為顯著的負向效果，即能源相對價格愈高，能源消耗愈少，有助於提升能源效率，可見企業與民眾對於徵收碳費或碳稅會有所回應，進而改善能源效率，如同 Filippini and Hunt (2012)、Chen et al. (2016)、Black et al. (2023)、Cevik and Gao (2023)所述。

就產業面而言，工業的附加價值率與人均能源消耗量、單位 GDP 能源消耗量間均為顯著的正向關係，係因工業生產大多屬於能源密集活動，其附加價值愈高，能源消耗量愈多，該結果與 Filippini and Hunt (2012)、Cevik and Gao (2023)一致；惟服務業未達統計顯著性，可見能源消耗量仍大多集中在工業。

再者，就貿易開放程度而言，貿易開放程度愈高，有助於進口

原物料，取得生產要素，各國間之生產技術亦得以流通，促進生產力提升，進而減少能源消耗量，有助於改善能源效率，該結果與 Cevik and Gao (2023)、Su (2023)一致。

最後，在人口因素方面，總人口成長率愈高會顯著地降低人均能源消耗量，有助於提升能源效率；惟都市人口快速成長則會增加能源消耗，反而不利改善能源效率，該結果與 Cevik and Gao (2023)一致。

2、能源效率之估計結果

(1) 亞洲、美洲、歐洲

觀察圖 7 發現，人均能源消耗量與單位 GDP 能源消耗量的結果大抵類似，各個樣本國家的能源效率走勢詳見附錄圖 1 與附錄圖 2。於此，就亞洲、美洲、歐洲且以人均能源消耗量的能源效率估計結果進行說明：

整個樣本期間的能源效率以美洲國家平均為 0.90 最高，而歐洲國家平均為 0.88 居次，亞洲國家平均則為 0.85。平均而言，雖亞洲國家的能源效率低於歐美國家，惟已有明顯的改善。於 2010 年後，亞洲國家的能源效率雖仍低於美洲國家，惟已高於歐洲國家，該結果可能與在貿易開放與國際合作下，取得先進技術有關。

雖然亞洲國家以往可能遭受碳洩漏的影響，以致 2006 年以前的能源效率偏低，惟全球各國淨零排放意識逐漸抬頭，節能減碳不再僅限特定區域或國家，各國開始制定法規，控管二氧化碳排放量，發生碳洩漏的情形可能減少，致 2006 年以後，能源效率明顯改善。²⁰

²⁰ 為解決碳洩漏問題，2023 年 5 月 17 日歐盟碳邊境調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)正式生效，預計於 2026 年實施。該機制係避免歐盟在減少二氧化碳排放時，造成企業將二氧化碳排放量轉移至非歐洲區域的國家。

對美洲國家而言，於 1990 年~2005 年，能源效率平均為 0.90，於 2006 年~2022 年平均則為 0.91，雖略有提升，惟改善幅度不大，可能係與美中貿易戰持續、疫後經濟復甦反而加速能源消耗、地緣政治的高度不確定性與全球經濟零碎化影響經貿活動有關，抑或與能源安全問題衝擊能源轉型有關。

對歐洲國家而言，其能源效率約於 2010 年開始下降，該結果與 Cevik and Gao (2023)一致。細究近年歐洲的能源效率問題，主因能源供給短缺，引發歐洲區域的能源危機，能源安全問題浮現。自 2001 年以來，多數歐洲國家致力於推動能源轉型，減少使用石油、煤炭，增加使用天然氣、風力、核能等能源。

就天然氣而言，歐洲國家的能源資源匱乏，天然氣主要自俄羅斯進口，對外貿易的依存度較高，以及 2014 年以來，俄烏衝突不斷，地緣政治風險推升能源供給的不穩定性。²¹ 此外，2021 年歐洲天然氣價格飆漲，加以該年 8 月亞馬爾-歐洲天然氣管道發生火災，加劇天然氣供給問題。

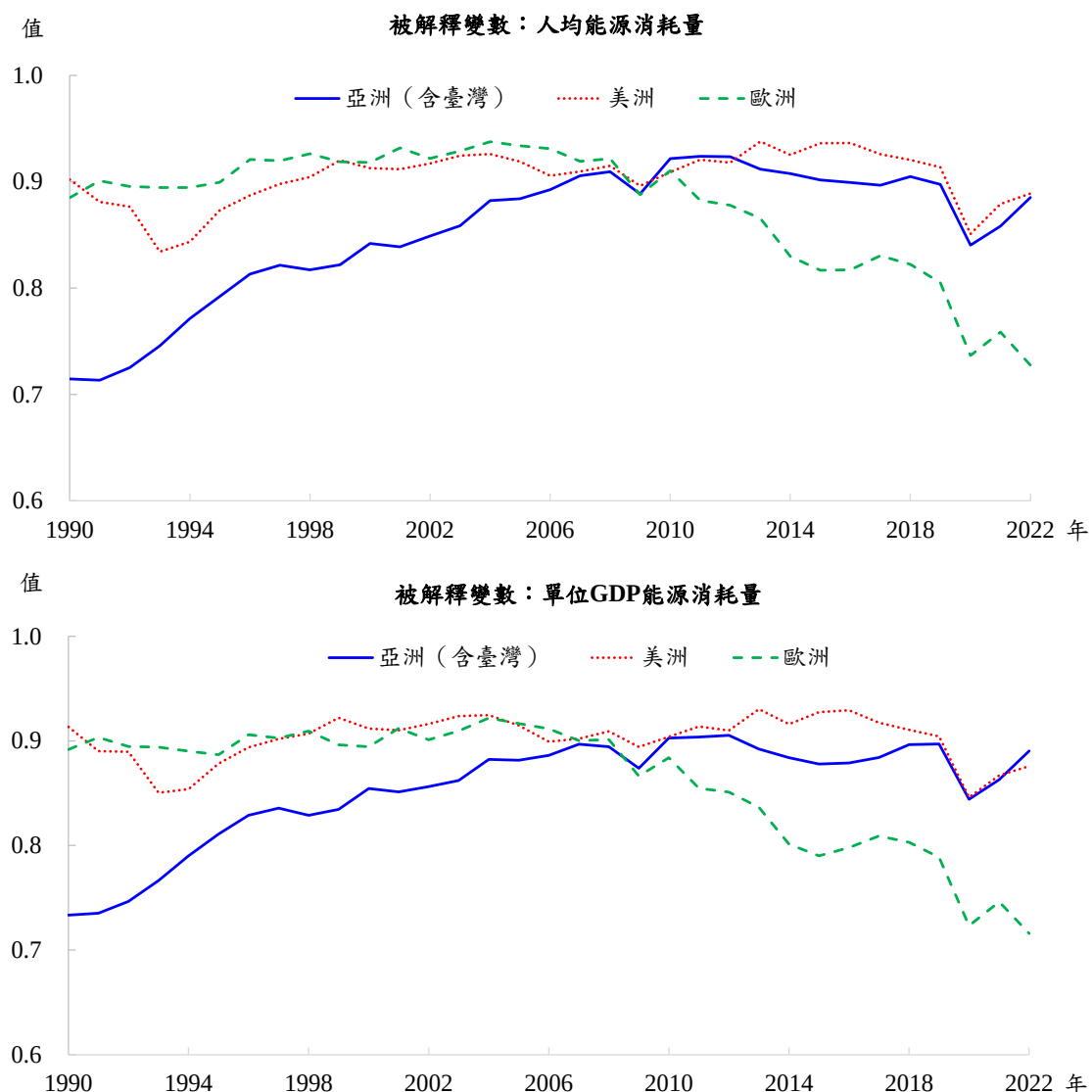
在風力方面，雖多數歐洲國家的風力發電比重亦高，惟其容易受氣候影響，致不確定性較大；在核能方面，受 1986 年烏克蘭車諾比核災、2011 年日本福島核災的影響，多數歐洲國家對核電抱持著謹慎的態度，部分歐洲國家（如德國、英國、瑞士等）陸續關閉核電站或計畫將核電廠除役，惟近期俄烏戰爭引發缺電問題，部分國家延役核電廠。

整體而言，多數歐洲國家的能源結構具高度脆弱性，當供給面發生問題，容易受負面衝擊，以致能源效率自 2010 年開始下滑。

美國於 2022 年 6 月提出清潔競爭法案（Clean Competition Act, CCA），已完成二讀。因參院進入新會期，該法案目前擱置中。若通過，美國將開始徵收碳稅，課徵對象包含美國當地生產製造及從其它國家進口的商品。

²¹ 見註解 17。

圖 7、1990 年~2022 年亞洲、美洲、歐洲的能源效率估計結果



資料來源：作者估計。

順帶一提，圖 5（第 19 頁）描繪的單位 GDP 能源消耗量均逐年下降，意味著亞洲、美洲、歐洲的能源效率持續改善，惟圖 7 顯示，除亞洲國家外，美洲與歐洲國家之能源效率的估計結果與圖 5 的單位 GDP 能源消耗量之情況存在明顯的差異，呼應著文獻主張不宜直接對能源效率的指標做解讀（Filippini and Hunt, 2012; Li et al., 2022）。

(2) 亞洲-日本、新加坡、南韓、中國大陸

本節針對 4 個亞洲主要國家且以人均能源消耗量的能源效率估計結果概略說明：

① 日本

觀察圖 8 發現，整個樣本期間，日本的能源效率呈下降的情形。1990 年到 2000 年，整體能源效率改善速度明顯放緩，主因自 1980 年以來，國際油價處於較低水準且穩定，以致製造業在改善能源效率上進展甚微。(Aoki et al., 2023)

雖如此，於 2014 年以前，日本能源效率均高於 0.90，接近生產邊界，惟自 2014 年起，能源效率則低於 0.90，可能係因 2011 年福島核災事件，而重新啟用傳統化石燃料發電廠，增加進口化石燃料，推升日本對外能源的依賴程度，致其容易受到國際事件（如俄烏戰爭）與國際能源價格影響，加以低廉的能源價格助長能源消耗，進而衝擊能源效率。

② 新加坡

在樣本期間內，新加坡的能源效率情況與圖 7（第 31 頁）描繪的亞洲情形類似。觀察圖 8 發現，1996 年、2003 年新加坡的能源效率分別升至 0.65、0.80，可能係因於 1995 年，新加坡政府進行電力產業自由化，並自 2003 年，放寬對電力市場的管制，建立國家電力市場，允許批發業者的供電進行買賣報價，電力零售市場逐步開放（2021 年電力能源消耗比重約 24.52%），以致能源效率改善。(Loi and Jindal, 2019)

2009 年與 2020 年，新加坡的能源效率亦有明顯下降，主因分別受到全球金融危機、COVID-19 疫情全球大流行的影響所致。

整個樣本期間，新加坡的能源效率改善幅度相當顯著，可能係受惠於技術進步、電力產業自由化與政府的多項政策等。²²

③ 南韓

在樣本期間內，南韓的能源效率情況亦與圖 7（第 31 頁）描繪的亞洲情形類似。自 1990 年以來，南韓政府積極地促使能源使用合理化，系統性地提高能源效率，持續更新需求面管理策略，以提高工業、建築、交通方面的能源效率。煤炭、石油的能源消耗比重分別自 1990 年之 18.05%、67.27% 減少至 2021 年之 3.90%、53.55%。（Aridi et al., 2023）

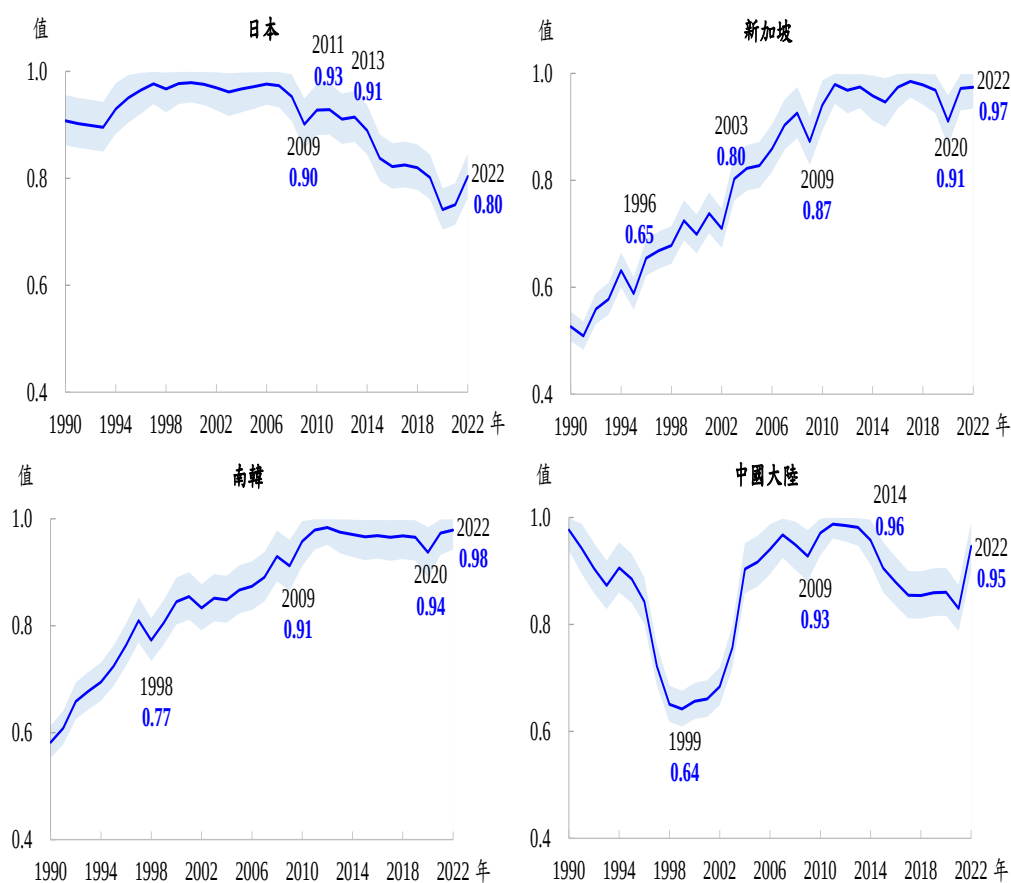
觀察圖 8 發現，於 1998 年、2009 年、2020 年，分別遭受到亞洲金融危機、全球金融危機、COVID-19 疫情全球大流行的影響，以致南韓的能源效率有所下降。整個樣本期間，南韓的能源效率改善幅度相當顯著，可能係受惠於技術進步與政府的多項政策等。²³

²² 2007 年 11 月公布「促進能源成長—國家能源政策報告（Energy for Growth—National Energy Policy Report）」，奠定中長期的能源政策架構。2012 年 4 月訂定《節約能源法》（Energy Conservation Act, ECA），管理能源消耗量。2013 年起，規定電力年消耗量超過 15 百萬度，或燃料/蒸汽年用量超過 54 兆焦耳的工業部門與運輸部門，應聘用合格能源管理員，並繳交能源使用與溫室氣體排放量報告、能源效率改善計畫，且必須每年重新檢視。2017 年 3 月修訂《節約能源法》，規定新建或擴建設施應進行能源效率機會評估（Energy Efficiency Opportunities Assessment, EEOA）。（何玉麗, 2019）

2018 年研擬碳訂價法案（Carbon Pricing Act, CPA），於 2019 年 1 月 1 日課徵碳稅，並以碳稅持續強化各項措施。

²³ 1979 年訂定《能源合理利用法（Energy Use Rationalization Act）》，1992 年修改該法，並推動具法律強制性之「能源效率標示與標準計畫」，訂定產品的最低能源效率標準（MEPS），淘汰能源效率低的產品。1999 年推出的「節能減碳自願協議」鼓勵企業訂定節能減碳目標。2008 年宣布第 1 個 20 年能源總體規劃，涵蓋所有能源部門的總體規劃，提供能源政策的中長期願景，同時強調提高各部門能源效率的重要性，並設定將單位 GDP 能源消耗量降低 47% 的目標。2010 年頒布《低碳暨綠色成長架構法案（the Framework Act on Low Carbon, Green Growth）》，透過創造新的綠色產業，逐步將能源與資源密集型的產業結構轉變為低碳綠色產業結構。2019 年產業通商資源部（MOTIE）設立新的能源創新政策局，致力於提高能源效率，顯示能源效率在南韓能源政策的重要性。（Aridi et al., 2023）

圖 8、1990 年~2022 年日本、新加坡、南韓、中國大陸的能源效率
估計結果



資料來源：作者估計。

④ 中國大陸

觀察圖 8 發現，1998 年因亞洲金融危機爆發，加劇能源效率下滑，惟 1999 年至 2007 年間，中國大陸對外經濟貿易規模迅速擴大，有助於取得先進技術，產能快速增加，致能源效率明顯提高；於 2008 年受全球金融危機衝擊，致能源效率下滑；嗣後，能源效率復甦，惟於 2014 年出現明顯下降，可能係因中國大陸經濟成長放緩，能源需求疲弱，傳統化石燃料與再生能源間轉呈競爭關係，²⁴（Shen and Xie , 2017）加以 2020 年 COVID-19 疫情全

²⁴ 部分地方政府認為傳統的化石燃料能夠提供較多的就業與稅收，因而對傳統化石燃料的能源部門投入較多資金，且嚴格地限制再生能源的投資計畫。

球大流行，經濟活動停擺亦加劇能源效率下降；嗣後，能源效率隨經濟活動復甦而回升。

(4) 美洲-美國、加拿大

本節針對美國與加拿大且以人均能源消耗量的能源效率估計結果概略說明：

① 美國

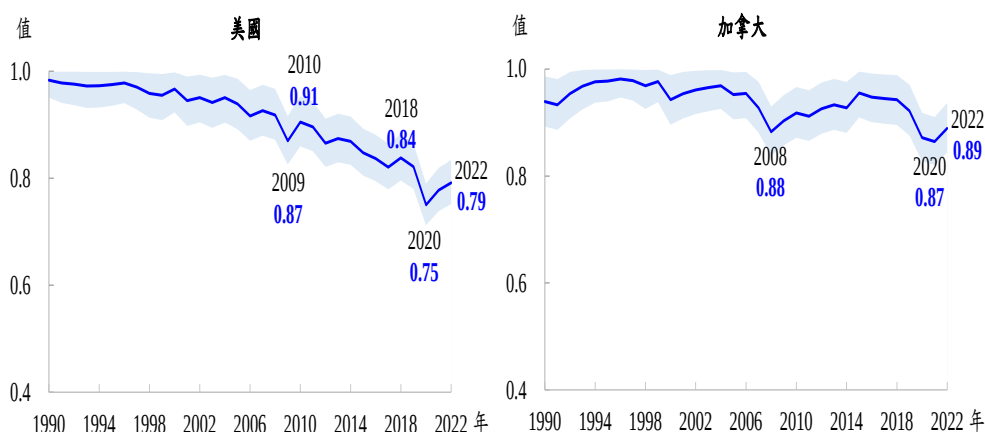
除 2009 年受全球金融危機影響，致美國的能源效率低於 0.90 外，於 2012 年以前，能源效率均高於 0.90，接近生產邊界；惟自 2012 年起，能源效率便低於 0.90，可能係因服務業附加價值率持續攀升，增加能源消耗，加以 2018 年美中貿易戰且衝突擴大並延續迄今，復以 2020 年 COVID-19 疫情全球大流行衝擊美國經濟活動，投資大幅減少，加以多家化石燃料發電廠暫時關閉，且再生能源供給不足，造成嚴重的能源缺口，均對能源效率產生負向衝擊。(見圖 9)

此外，Matthews and Blunt (2022)指出美國能源的潛在危機，此可能係導致能源效率走低的原因。該文指出，1992 年美國雖通過《能源政策法案》，放寬對發電廠的管制，解除天然氣價格上限，鼓勵產業競爭，惟缺乏系統性的監管，加以大量的能源企業進入市場，引發市場混亂，對各州監管機構帶來嚴峻的挑戰。²⁵

因水力壓裂 (fracking) 技術取得重大進展，於 2009 年以後，美國大量開採頁岩內的天然氣與石油，致頁岩油產業蓬勃發展，惟因廠商大規模擴張，致多數頁岩油井缺乏生產效率，開採成本走高，招致虧損，以致近年投資減少。

²⁵ Matthews, C. M. and K. Blunt (2022), "America's New Energy Crisis," The Wall Street Journal, Business, August 1.

圖 9、1990 年~2022 年美國、加拿大的能源效率估計結果



資料來源：作者估計。

由於美國政府補助，乾淨能源價格較低，吸引大量資金投入，惟因全球供應鏈問題、美國能源供給緊張、乾淨能源興建計畫延宕等因素，致乾淨能源的供給仍不足以因應能源需求。

② 加拿大

在樣本期間內，加拿大的能源效率一直處於較高水準，平均約 0.94，除 2008 年全球金融危機、2020 年~2022 年 COVID-19 疫情全球大流行期間之外，其餘時間點的能源效率均逾 0.90，接近生產邊界。（見圖 9）

加拿大針對公用事業公司與各級政府均實施相關政策，以提高整個經濟的能源效率，包含綠色住宅補助與貸款計畫、輕型車輛的排放標準、加強對建築的相關規範、工業能源效率與碳捕捉、二氧化碳利用與儲存計畫、家計部門能源效率專案等。

於 1992 年訂定《能源效率法》，允許當局監管耗能產品，促進能源與替代燃料的有效利用，實施節能與減少排放二氧化碳計畫，並蒐集能源使用資料，用於改善當前能源技術、制定公共政策，以解決總體環境變動與能源需求的快速成長所帶來的挑戰。

加拿大政府認為能源效率在實現 2030 年排放目標與 2050 年淨零排放目標上具關鍵性作用。(IEA (2022))

(5) 歐洲-冰島、波蘭、愛沙尼亞

多數歐洲國家的情況均與圖 7 (第 31 頁) 描繪的歐洲情形類似，本節僅針對能源效率與圖 7 不同者 (即冰島、波蘭、愛沙尼亞) 概略說明。

① 冰島

冰島的能源發展有其獨到之處，由於全球爆發多次石油危機，國際油價劇烈波動，促使冰島政府開始尋求供給穩定的能源，因而開發出地熱、水力等乾淨能源，促使其能源效率明顯改善。(見圖 10) 該國的乾淨能源比重係 44 個樣本國家中唯一逾 80% 者，而運輸部門與漁業係冰島仍使用傳統化石燃料的部門。²⁶ (MII (2014))

值得一提的是，於 2009 年冰島的能源效率達高峰，惟受到全球金融危機衝擊該國的經濟活動，致 2010 年能源效率明顯下滑；嗣後，能源效率緩步復甦。於 2018 年能源效率再度達到高峰後明顯下降，可能係因冰島係全球加密貨幣產業的重點國家，且加密貨幣的挖礦過程需要消耗相當龐大的電力，加以 COVID-19 疫情全球大流行，致能源效率降至 2020 年之 0.77 的低點。²⁷

② 波蘭

在樣本期間內，除受全球金融危機衝擊，致 2009 年能源效率

²⁶ 為符合歐盟再生能源的目標，冰島政府推動「生態城市運輸系統 (Ecological City Transport System, ECTOS)」計畫，旨在以氫能作為大眾運輸交通工具的動力來源，致力於 2020 年前達到運輸部門使用再生能源的比例達 10% 之目標，並提供免稅措施，激勵運輸部門採用氫能而放棄化石燃料。

²⁷ 由於加密貨幣的挖礦過程需要消耗大量的能源，在近年的能源成本飆升下，加密貨幣業者尋找更具效益、電價相對便宜的挖礦聖地，以致冰島成為比特幣礦工的避難所。

降至 0.86 最低點外，其餘時間的能源效率均處於相當高的水準，接近效率邊界，可能係因該國為歐洲最主要的產煤國，能源消耗主要使用煤炭，使用天然氣的比重低，以致該國的能源供給較為穩定，不易受到國際油價、能源供給、地緣政治風險的衝擊。（見圖 10）

為達成歐盟目標，2020 年 9 月，波蘭政府與工會達成協議，同意於 2049 年前逐步淘汰煤礦開採活動，並於 2021 年 2 月通過「2040 年波蘭能源政策」法案，致力於 2030 年燃煤發電比重低於 56%，乾淨能源比重至少達能源消耗總量的 23%；2033 年啟用首座核電廠，規劃每 2~3 年啟用新機組，共計 2 個核電廠，6 部機組；2040 年離岸風電達 11 吉瓦（Gigawatt, GW）等，可見波蘭的能源轉型主要朝核能與風力發電的方向邁進。（MCE (2021)）²⁸

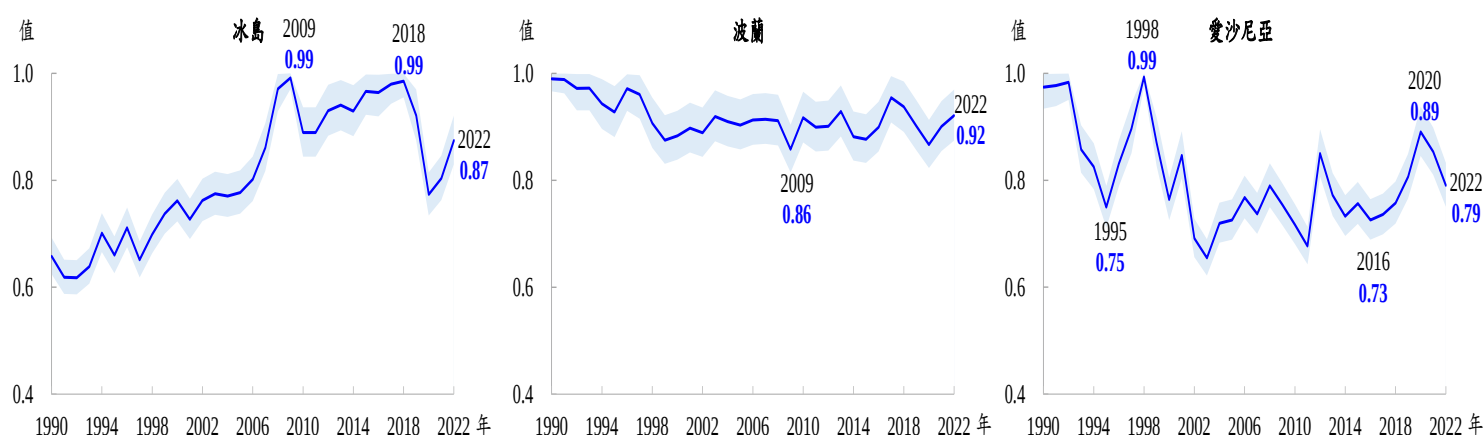
③ 愛沙尼亞

在樣本期間內，愛沙尼亞的能源效率的變動情況較大，且平均而言，能源效率不高，約 0.80，可能係因愛沙尼亞對改善能源效率的投資較少，加以能源效率投資的融資條件相對缺乏吸引力、投資者對小規模的投資機會不感興趣等。於 1995 年能源效率大幅改善，於 1998 年達高峰，可能係因歐盟及其成員國的資金援助對改善愛沙尼亞的能源效率具有顯著的貢獻。²⁹（見圖 10）（IEC (2002)）

²⁸ 天然氣係低碳轉型的過渡燃料，惟為避免對天然氣供給的單一管道存在高度的依賴，便需要多種取得管道。有鑑於此，波蘭將建造波羅的海管道（挪威-丹麥-波蘭），擴大希維諾烏伊希切（Świnoujście，波蘭的港口城市）的液化天然氣接收站，並在格但斯克灣（Gulf of Gdańsk）建造浮動式天然接收站（Floating Storage Regasification Unit, FSRU）。

²⁹ （1）歐盟在 1992 年~2002 年為愛沙尼亞的能源部門投資 730 萬歐元；（2）自 1995 年起，瑞典援助愛沙尼亞 930 萬瑞典克朗，用於 15 個技術支援專案與可行性研究；（3）自 1994 年以來，丹麥為愛沙尼亞的能源效率投資提供與能源效率相關的技術援助與支持，價值達 4,250 萬瑞典克朗（約 570 萬歐元）；（4）芬蘭的援助活動集中在技術援助計畫的融資上，包含工業節能計畫（1992 年~1996 年）、住宅區節能改造及節能訓練（1994 年~1995 年）等。（IEC (2002)）

圖 10、1990 年~2022 年冰島、波蘭、愛沙尼亞的能源效率估計結果



資料來源：作者估計。

愛沙尼亞的能源系統以化石燃料為主，惟其占能源供給總量的比重自 2010 年的 90% 降到 2022 年的 71%，主因使用油頁岩發電已被生物能源、風能與太陽能所取代。為改善能源效率與能源轉型，於 2016 年~2020 年，愛沙尼亞約 67% 的創業投資選擇綠色新創事業，至 2020 年綠色新創企業的投資占 GDP 的比重達 0.33%，係 OECD 國家中最高者，此可能係 2016 年以來，愛沙尼亞的能源效率逐年改善的原因。(IEA (2023)) 於 2020 年，受 COVID-19 疫情全球大流行影響，致能源效率下降。

(6) 臺灣

臺灣缺乏能源的備援系統，且能源進口依存度高，能源供給容易受國際事件與國際能源價格影響，進而衝擊能源效率。根據圖 11 顯示，於 1990 年~2008 年，臺灣能源效率估計值明顯走高，可能係因 (1) 貿易開放程度擴大，加速導入國外成熟技術與強化系統整合；(2) 能源價格走升，有助於減少能源消耗；(3) 2000 年以後，亞洲區域經濟興起與中國大陸崛起，在各國競爭激烈下，臺灣製造業多採價格競爭，利潤漸趨微利，工業附加價值率明顯下滑，致能源消耗減少。(見圖 11) 該結果與劉澤懷 (2020) 指出臺灣的

發電效率隨時間經過明顯改善一致。

嗣後，受國際事件與國際能源價格衝擊，如 2008 年全球金融危機、2012 年歐債危機、2015 年美國頁岩油產量大增、2018 年美中貿易戰與美國對伊朗實施制裁、2020 年 COVID-19 疫情全球大流行等，均造成國際油價大跌、全球商品需求降溫，致貿易成長趨緩，反而助長能源消耗並衝擊能源效率，加以工業部門的能源消耗較多，復以 ECCT(2015)指出，³⁰ 臺灣能源價格長期低於國際水準的影響，加以民眾對節能減碳的認知不足，導致能源效率差。

直至近幾年方有所改善，可能係因國內能源價格上漲、全球商品貿易回溫帶動臺灣出口成長所致，加以《電業法》修正草案於 2017 年 1 月 11 日三讀通過、《乾淨能源發展條例》修正草案於 2019 年 4 月 12 日三讀通過，有助於加速推動國內乾淨能源發展與氣候變遷因應的相關政策。

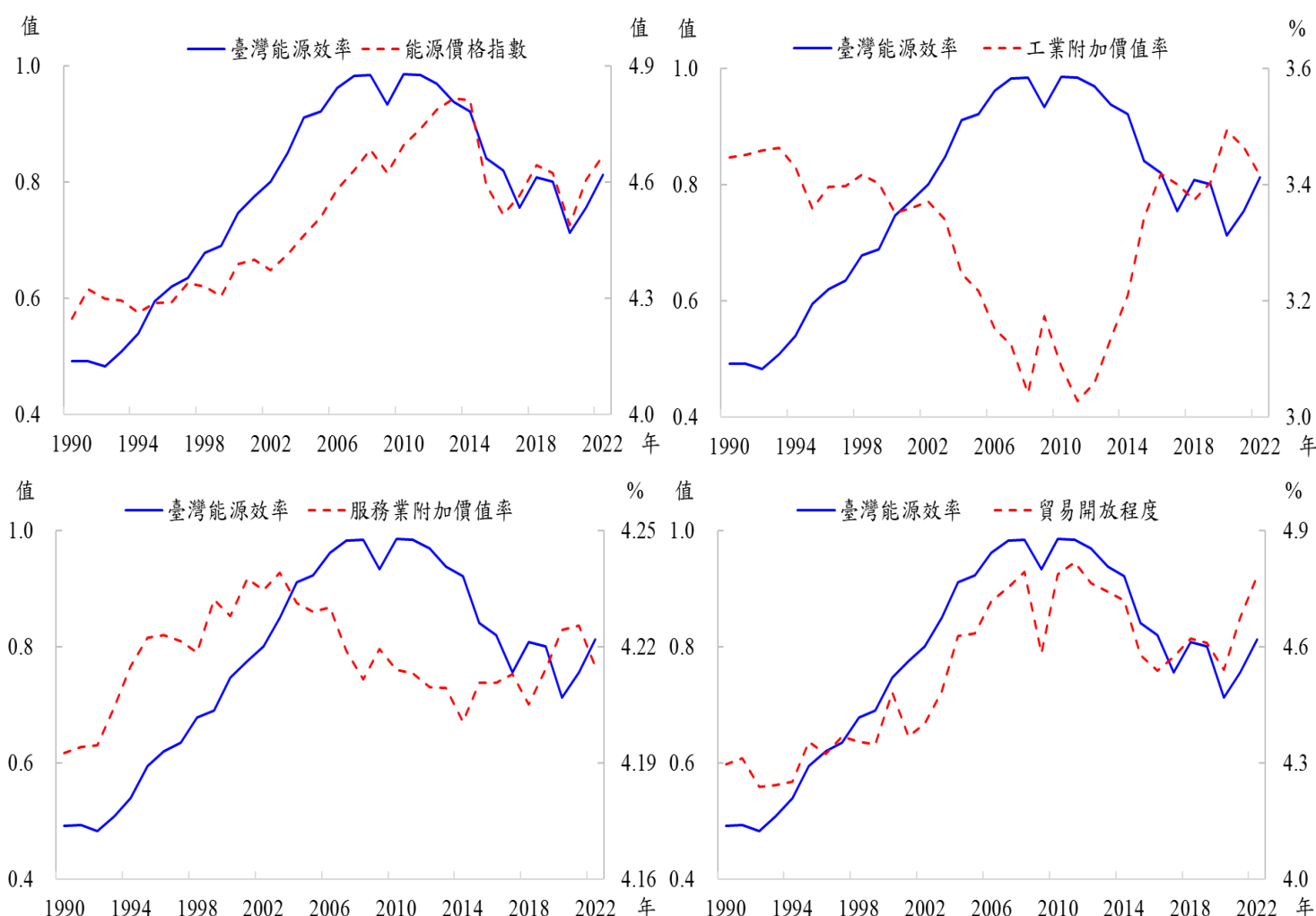
綜上所述，為達成淨零排放目標，在當前經濟活動復甦，全球終端商品需求回溫下，各國宜致力於提高能源效率，加速布署高效率的能源技術，如儲能設備、低碳電力系統、創新能源（如氫能、生質能等）的發電技術，並發展碳捕捉利用與封存（carbon capture, utilization and storage, CCUS）的設備，以及轉向使用乾淨能源。（IEA (2021)）

值得一提的是，Tajudeen et al. (2018)發現，乾淨能源有助於減少排放二氧化碳，惟不如提高能源效率來的重要。該文建議，制定結合改善能源效率與增加乾淨能源的措施，以實現環境保護。³¹

³⁰ ECCT (2015), “The Path to Industrial Energy Efficiency in Taiwan–Partnering with the EU,” European Chamber of Commerce Taiwan, press release, 5 March.
<https://www.ecct.com.tw/eccts-lci-issues-report-on-industrial-energy-efficiency/>。

³¹ 為提高能源效率，IEA (2024)在第 9 屆全球能源效率年會上提供各國相關政策工具的實用方法並強調政策整合，同時，建議各國建構涵蓋多個部門的能源效率政策架構。在短期上，確定政策實施的優先順序可能具有正面效益。部分政策的實施速度快或可產生更大的影響，惟此舉

圖 11、1990 年~2022 年臺灣能源效率的估計結果與能源價格指數、工業附加價值率、服務業附加價值率、貿易開放程度的情形



資料來源：主計總處、財政部、作者估計。

影響能源效率的關鍵因素之一係能源價格。Black et al. (2023) 指出，目前各國的能源價格通常無法充分反映出對環境損害的水準或成本，加以多數文獻認為減少使用化石燃料最有效的方法係提高價格，如對能源制定合理的價格、課徵碳稅、對使用化石燃料收取相關費用，有助於促進企業與民眾轉而選擇使用低碳能源，惟對各國而言，此舉具政治挑戰性。(Borenstein, 2012; Black et al.,

取決於各國自身的情況，如現有的政策組合、經濟結構與規模、可用的財政空間等。
IEA (2024), "Energy Efficiency Policy Toolkit 2024: From Versailles to Nairobi," 9th Annual Global Conference on Energy Efficiency, 21–22 May.

2021; Gugler et al., 2021; Jaumotte et al., 2021; Parry et al., 2021)

有鑑於此，Black et al. (2021)建議各國需要在碳定價與其它工具間取得平衡，或可靈活運用「非定價策略」，如訂定二氧化碳排放率標準、費用減免、對乾淨技術進行補貼等。

此外，Cevik (2022)若一國最初的乾淨能源比重極低，則改變化石燃料的價格並不會促使乾淨能源大幅成長，因此，採用「非課稅的政策」來激勵企業投資替代或乾淨能源更顯現必要性。

伍、結論與政策意涵

節能減碳已成為全球共識，由於經濟與環境間之關係較複雜且不明確，本文嘗試驗證影響排放二氧化碳的因素，並瞭解總體經濟變數與二氧化碳排放量間之關係，有助於給予央行有關經濟與環境間的政策思考方向。另外，能源效率係因應氣候變遷的有效工具，本文估計各國能源效率的現況，有助於提供政府改善能源效率的方向。

氣候變遷的風險可能持續相當長的時間，各國政府必須採行果斷的因應措施，並強化經濟、金融與社會的抵禦能力。面對氣候變遷，政府宜積極關注氣候動向，並透過國際合作，引入先進技術。各國央行宜將氣候相關風險納入總體審慎的範疇，並進行壓力測試，以評估此等風險可能帶來的衝擊，有助於即時採行因應措施，降低氣候風險對經濟金融體系之衝擊。

一、結論

(一) 能源效率、乾淨能源比重、經濟成長、貿易開放程度均為影響二氧化碳排放量的重要因素

一般化最小平方法的結果指出，對所有的樣本國家而言，改善能源效率與提高乾淨能源比重均能減少排放二氧化碳，有

助於達成淨零排放的目標，惟經濟成長通常伴隨著環境汙染。

一般而言，各國間經貿往來愈頻繁有助於技術進步與創新，進而減少排放二氧化碳。對美洲國家而言，二者為顯著的負向關係；惟對亞洲與歐洲國家而言，負向關係不顯著，前者可能係因其環境保護政策較不嚴格，遭受碳洩漏問題的影響；後者則可能係因俄烏戰爭與地緣政治風險造成能源供給不確定性高所致。

(二) 經濟成長與二氧化碳排放量間之關係不為倒 U 型關係，門檻效果不存在；通膨對二氧化碳排放量之影響則具有門檻效果，惟僅存在於歐洲國家

追蹤資料門檻迴歸模型的結果指出，若以人均實質 GDP 成長率作為門檻變數，不論其是否高於或低於門檻，人均實質 GDP 成長率與二氧化碳排放量間為顯著的正向關係，可見二者不為倒 U 型的非線性關係。

值得一提的是，當經濟景氣熱絡推升通膨率時，為緩解（需求面）通膨壓力，緊縮的貨幣政策將抑制經濟成長，亦減少排放二氧化碳，抑或係經濟成長帶來的財富效果，促使企業增加投資，以改善技術或提高能源效率，進而減少排放二氧化碳。

而若以通膨率作為門檻變數，對歐洲國家而言，存在門檻效果，當通膨率低於 2.68% 時，二氧化碳排放量會增加，惟高於 2.68% 時，因較高的通膨可能抑制企業的生產活動，削弱民間消費而減少排放二氧化碳。

對亞洲與美洲國家而言，二者關係不顯著，可能係因供應鏈問題帶來沉重的（供給面）通膨壓力，以及緊縮貨幣政策的效

果持續發酵抑制需求，加以地緣政治風險居高與全球經濟零碎化影響經貿活動，復以疫後經濟仍處於復甦階段，各國可能暫緩實施因應氣候變遷的措施，並增加使用化石燃料與轉向碳鎖定的政策。

（三）能源相對價格、工業附加價值率、貿易開放程度、人口因素均為影響能源效率的重要因素

隨機邊界分析的結果指出，提高能源相對價格有助於減少能源消耗，進而提升能源效率，主因較高的能源價格可能促使企業與民眾轉向低碳技術與商品。此外，減少工業部門的能源消耗情況亦能夠改善能源效率；再者，貿易開放程度愈高，有利進口原物料、取得生產要素與生產技術，進而減少能源消耗量，改善能源效率。另外，總人口成長率愈高會顯著地降低人均能源消耗量，有助於提升能源效率；惟都市人口快速成長則會增加能源消耗，反而不利改善能源效率。

（四）在能源效率方面，亞洲國家低於歐美國家，惟已有明顯的改善；美洲國家最高，惟僅微幅改善；歐洲國家居次，惟近年則明顯下滑

能源效率的估計結果指出，亞洲國家的能源效率雖仍低於美洲國家，惟近年已高於歐洲國家，該結果可能與在貿易開放與國際合作下，取得先進技術有關；美洲國家可能受美中貿易戰持續、疫後經濟復甦加速能源消耗、全球經濟零碎化等影響，以致能源效率改善幅度小；2010 年以前，歐洲國家的能源效率最高，惟嗣因能源供給短缺，引發能源危機，導致能源效率明顯下滑。

(五) 臺灣的能源效率於 2008 年以前大幅提升，嗣後則明顯下降，直至近年才略有改善

於 1990 年~2008 年，臺灣能源效率明顯走高，與全球主要國家貿易往來頻繁，引入國外成熟技術，致發電效率明顯改善，加以能源價格提高，能源消耗減少有關。

嗣後，受國際事件與國際能源價格大跌影響，全球商品需求降溫，加以各國間競爭激烈，臺灣對外貿易成長趨緩，衝擊能源效率。近年，國際能源價格走升、全球商品貿易動能回溫，以及國內加速推動乾淨能源發展與氣候變遷因應的相關政策，致我國能源效率改善。

二、政策意涵

(一) 合理的能源價格、高效率的能源設備，有助於提升能源效率

宜制定合理的能源價格以反映成本，促使企業與民眾有效地使用能源或選擇低碳能源；再者，宜積極發展低耗能的產業，鼓勵企業採用高能源效率的設備（如儲能設備、低碳電力系統、創新能源（如氫能、生質能等）的發電技術等），並訂定能源需求面的管理措施，如二氧化碳排放率標準、費用減免、節能減碳獎勵措施等（Black et al., 2021）。

(二) 提高乾淨能源的比重，加速能源轉型

淨零排放刻不容緩，各國政府宜及早提出淨零路徑的改革方針，如提高乾淨能源比重的進程，達成減碳目標。Gardes-Landolfini et al. (2023)指出，在轉型初期，企業雖因碳稅、法規監管、增加投資高效率設備與低碳技術等，致營業成本增加而影響獲利，惟此舉能有效地降低未來氣候變遷帶來巨大

災害的成本；惟若延遲改革，致減碳目標不如預期，則於 2050 年將會付出更高的代價。

（三）疫情後經濟活動復甦，各國宜思考如何取得經濟成長與環境間之平衡

如前所述，多數國家的經濟成長係以環境汙染為代價，加以圖 1 顯示疫情過後，經濟活動復甦，能源需求回升，2022 年二氧化碳排放量年增率係 1990 年以來最高，環境問題再度浮現。為取得經濟成長與環境間之平衡，Cevik and Jalles (2023) 建議能源結構宜轉向低碳或乾淨能源，並提高能源效率，制定更嚴格的环境保護政策。

（四）持續與相關領域專家互動交流，並滾動檢討及精進相關業務執行與提升氣候風險研究能力

本行雖非我國氣候行動之主要推動者，惟面對氣候變遷挑戰，宜積極關注氣候議題演變與發展，並持續滾動檢討及精進相關業務執行與提升研究氣候風險的能力，以因應氣候變遷對臺灣經濟與金融帶來的挑戰，確保金融穩定，經濟永續成長。

參考文獻

- 何玉麗 (2019),「新加坡能源先期管理制度」,經濟部能源署,專業知識,頁 1-17。
- 吳珮瑛、張弘毅、劉哲良、李瓊映 (2015a),「雙向分量回歸模式之建構-二氧化碳排放與經濟發展關係再檢視」,《農業與經濟》,第 54 期,頁 1-45。
- 吳珮瑛、黃雅琪、吳麗敏、劉哲良 (2008b),「所得分配在不同經濟發展水準國家對 CO₂ 排放減量之影響」,《經社法制論叢》,第 42 期,頁 1-40。
- 梁啟源、鄭睿合、塗千慧、林華偉 (2021),「我國工業部門能源消費量之因素分解:以產能利用率建構」,《臺灣能源期刊》,第 8 卷第 3 期,頁 277-295。
- 黃柏農、李佳珍 (2018),「使用 LMDI 分解法來探討影響台灣二氧化碳排放之因素」,《應用經濟論叢》,第 103 期,頁 45-76。
- 劉釋懷 (2020),「我國發電設備發電效率探討」,經濟部能源署,專業知識,頁 1-10。
- Allard, A., J. Takman, G. S. Uddin and A. Ahmed (2018), “The N-Shaped Environmental Kuznets Curve: An Empirical Evaluation Using a Panel Quantile Regression Approach,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1-14.
- Alola, A. A. and I. Ozturk (2021), “Mirroring Risk to Investment within the EKC Hypothesis in the United States,” *Journal of Environmental Management*, Vol. 293, No. 112890.
- AlShafeey, M. and M. A. S. Saleh (2024), “Assessing Inflation and

Greenhouse Gas Emissions Interplay via Neural Network Analysis: a Comparative Study of Energy Use in the USA, EU, and China,” *Environmental Sciences Europe*, Vol. 36, No. 1, pp. 1–18.

Álvarez–Herranz, A., D. Balsalobre–Lorente, M. Shahbaz and J. M. Cantos (2017), “Energy Innovation and Renewable Energy Consumption in the Correction of Air Pollution Levels,” *Energy Policy*, Vol. 105, pp. 386–397.

Aoki, K., J. Nakajima, M. Takahashi, T. Yagi (2023), “Energy Efficiency in Japan: Developments in the Business and Household Sectors, and Implications for Carbon Neutrality,” Bank of Japan Working Paper Series, No. 23–E–10, pp. 1–32.

Aridi, A., K. Kim, J. S. Lee, N. Y. Shin and D. Kang (2023), “Lessons from Korea’s Energy Efficiency Policies in the Industrial Sector,” World Bank Group report, No. 184544, pp. 1–100.

Baloch, M. A., I. Ozturk, F. V. Bekun and D. Khan (2021), “Modeling the Dynamic Linkage between Financial Development, Energy Innovation, and Environmental Quality: Does Globalization Matter?” *Business Strategy and the Environment*, Vol. 30, No. 1, pp. 176–184.

Baltagi, B. H., (2013), *Econometric Analysis of Panel Data*, 5th ed., Chichester, UK: Wiley.

Battese, G. E. and T. J. Coelli (1995), “A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data,” *Empirical Economics*, Vol. 20, No.2, pp. 325–332.

- Black, S., A. A. Liu, I. Parry and N. Vernon (2023), “IMF Fossil Fuel Subsidies Data: 2023 Update,” IMF working papers, No. 23/169, pp. 1–32.
- Black, S., I. Parry, J. Roaf and K. Zhunussova (2021), “Not Yet on Track to Net Zero: The Urgent Need for Greater Ambition and Policy Action to Achieve Paris Temperature Goals,” IMF Staff Climate Notes, No. 21/5, pp. 1–33.
- Borenstein, S. (2012), “The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation,” *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 26, No. 1, pp. 67–92.
- Cevik, S. (2022a), “Climate Change and Energy Security: The Dilemma or Opportunity of the Century?” IMF working papers, No. 22/174, pp. 1–20.
- Cevik, S. (2022b), “Waiting for Godot? The Case for Climate Change Adaptation and Mitigation in Small Island States,” IMF working papers, No. 22/179, pp. 1–26.
- Cevik, S. and J. T. Jalles (2023), “Restructuring Reforms for Green Growth,” IMF working papers, No. 23/120, pp. 1–30.
- Cevik, S. and K. Gao (2023), “Reaching (Beyond) the Frontier: Energy Efficiency in Europe,” IMF Working Papers, No. 23/198, pp. 1–19.
- Chen, K.–H., H.–Y. Yang, J.–M. Lee and C.–F. Chi (2016), “The Impact of Energy Prices on Energy Consumption and Energy Efficiency: Evidence from Taiwan,” *Energy Efficiency*, Vol. 9, No. 6, pp. 1329–1349.

- Destek, M. A. and A. Sinha (2020), “Renewable, Non–Renewable Energy Consumption, Economic Growth, Trade Openness and Ecological Footprint: Evidence from Organization for Economic Co–operation and Development Countries,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 242, No. 118537.
- Destek, M. A., M. Shahbaz, I. Okumus, S. Hammoudeh and A. Sinha (2020), “The Relationship between Economic Growth and Carbon Emissions in G–7 Countries: Evidence from Time–Varying Parameters with a Long History,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, No.23, pp. 29100–29117.
- Destek, M.A., R. Ulucak and E. Dogan (2018), “Analyzing the Environmental Kuznets Curve for the EU Countries: The Role of Ecological Footprint,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, No. 29, pp. 29387–29396.
- Dogan, E., R. Ulucak, E. Kocak and C. Isik (2020), “The Use of Ecological Footprint in Estimating the Environmental Kuznets Curve Hypothesis for BRICST by Considering Cross–Section Dependence and Heterogeneity,” *Science of The Total Environment*, Vol. 723, No. 138063.
- EEA (2014), “Why Did Greenhouse Gas Emissions Decrease in the EU between 1990 and 2012?” European Environment Agency publications, Jun 3.
- EIA (1995), “Measuring Energy Efficiency in the United States’ Economy: A Beginning,” Energy Information Administration, Office of Energy Markets and End Use, U.S. Department of Energy, Washington, DC,

pp. 1–112.

Filippini, M. and L. C. Hunt (2012), “Energy Demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: A Stochastic Demand Frontier Approach,” *Energy Journal*, Vol. 32, No.2, pp. 59–80.

Galeotti, M., A. Lanza and F. Pauli (2006), “Reassessing the Environmental Kuznets Curve for CO₂ Emissions: A Robustness Exercise,” *Ecological Economics*, Vol. 57, No.1, pp. 152–163.

Gardes–Landolfini, C., P. Grippa, W. Oman and S. Yu (2023), “Energy Transition and Geoeconomic Fragmentation: Implications for Climate Scenario Design,” IMF Staff Climate Note, pp. 1–44.

Grolleau, G. and C. Weber (2024), “The Effect of Inflation on CO₂ Emissions: An Analysis over the Period 1970–2020,” *Ecological Economics*, Vol. 217, No. 108029.

Gugler, K., A. Haxhimusa and M. Liebensteiner (2021), “Effectiveness of Climate Policies: Carbon Pricing vs. Subsidizing Renewables,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 106, No. 102405.

Hansen, B. E. (1999), “Threshold Effects in Non–Dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference,” *Journal of Econometrics*, Vol. 93, No. 2, pp.345–368.

IEA (2019), “Multiple Benefits of Energy Efficiency,” IEA reports, Paris.
URL: <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency>.

IEA (2021), “Net Zero by 2050: a Roadmap for the Global Energy Sector,” IEA reports, pp. 1–224.

IEA (2022), “Canada 2022,” IEA reports, Energy Policy Review, pp. 1–261.

IEA (2023), “Estonia 2023,” IEA reports, Energy Policy Review, pp. 1–84.

IEC (2002) “In–depth Review of Energy Efficiency Policies and Programmes of Estonia,” International Energy Charter, Energy Efficiency Country Reviews, pp. 1–74.

Jaumotte, F., W. Liu and W. J. McKibbin (2021), “Mitigating Climate Change: Growth–Friendly Policies to Achieve Net Zero Emissions by 2050,” IMF working papers, No. 21/195, pp. 1–35.

Kar, A. K. (2022), “Environmental Kuznets Curve for CO₂ Emissions in Baltic Countries: An Empirical Investigation,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 47189–47208.

Kraiche, M., L. Kutlu and X. Mao (2022), “Energy Efficiency of European Countries,” *Applied Economics*, Vol. 54, No.23, pp. 2694–2706.

Li, H., A. Appolloni, Y. Dou, V. Basile and M. Kopsakangas–Savolainen (2022), “A Parametric Method to Estimate Environmental Energy Efficiency with Non–Radial Adjustment: An Application to China,” *Annals of Operations Research*.

URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-022-05053-z>.

Loi, T. S. A. and G. Jindal (2019), “Electricity Market Deregulation in Singapore–Initial Assessment of Wholesale Prices,” *Energy Polciy*, Vol. 127, pp. 1–10.

MCE (2021), “Energy Policy of Poland until 2040 (EPP 2040),” Ministry of Climate and Environment (Poland), pp. 1–102.

URL: <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until->

2040-epp2040.

MII (2014), “The Icelandic National Renewable Energy Action Plan for the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources in Accordance with Directive 2009/28/EC and the Commission Decision of 30 June 2009 on a Template for the National Renewable Energy Action Plans,” Ministry of Industries and Innovation (Iceland), pp. 1–62.

URL: https://energy.ec.europa.eu/document/download/7b6e89ad-9e3b-474f-80d0-3ea5bd03b404_en.

Musarat, M. A., W .S. Alaloul, M. S. Liew, A. Maqsoom and A. H. Qureshi (2021), “The Effect of Inflation Rate on CO₂ Emission: A Framework for Malaysian Construction Industry,” *Sustainability*, Vol. 13, No. 3, pp. 1–16.

Parry, I., S. Black and N. Vernon (2021), “Still Not Getting Energy Prices Right: A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies,” IMF working papers, No. 21/236, pp. 1–42.

Ronaghi, M., M. Reed and S. Saghaian (2020), “The Impact of Economic Factors and Governance on Greenhouse Gas Emission,” *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol. 22, No. 2, pp. 153–172.

Sarkodie, S. A., S. Adams, P. A. Owusu, T. Leirvik and I. Ozturk (2020), “Mitigating Degradation and Emissions in China: The Role of Environmental Sustainability, Human Capital and Renewable Energy,” *Science of the Total Environment*, Vol. 719, No. 137530.

Shen, W. and L. Xie (2017), “The Political Economy for Low-carbon

Energy Transition in China: Towards a New Policy Paradigm?” *New Political Economy*, Vol.23, No.2, pp. 1–15.

Su, Y.–W. (2023), “The Drivers and Barriers of Energy Efficiency,” *Energy Policy*, Vol. 178, No. 113598.

Tajudeen, I., G. Wossink and P. Banerjee (2018), “How Significant is Energy Efficiency to Mitigate CO₂ Emissions? Evidence from OECD Countries,” *Energy Economics*, Vol. 72, pp. 200–221.

UNEP (2023), “Broken Record: Temperatures Hit New Highs, Yet World Fails to Cut Emissions (again),” UNEP emissions gap report, pp. 1–108.

Wu, Y.–H., C.–H. Liu, M.–L. Hung, T.–Y. Liu and T. Masui (2019), “Sectoral Energy Efficiency Improvements in Taiwan: Evaluations Using a Hybrid of Top–Down and Bottom–Up Models,” *Energy Policy*, Vol. 132, pp. 1241–1255.

附錄表 1、追蹤資料之單根檢定（原始資料）

變數	逆卡方分配統計量	修正後逆卡方分配統計量
人均二氧化碳排放量	76.99	-0.83
單位 GDP 能源消耗量	185.77***	7.37***
乾淨能源比重	71.71	-1.23
人均實質 GDP	69.30	-1.41
貿易開放程度	135.02**	3.54***
總人口數	88.05	0.004
都市人口數	40.53	-3.58
通膨率	366.12***	20.96***
人均能源消耗量	70.11	-1.35

註：*、**、*** 分別表示該檢定統計量在 10 %、5 %、1 % 之顯著水準下拒絕虛無假設，即無單根現象。

附錄表 2、追蹤資料之單根檢定（年增率）

變數	逆卡方分配統計量	修正後逆卡方分配統計量
人均二氧化碳排放量	1276.11***	89.56***
乾淨能源比重	1296.05***	91.06***
人均實質 GDP	786.32***	52.64***
總人口數	132.71***	3.37***
都市人口數	264.01****	13.27***
人均能源消耗量	1383.06***	97.62***

註：*、**、*** 分別表示該檢定統計量在 10 %、5 %、1 % 之顯著水準下拒絕虛無假設，即無單根現象。

附錄表 3、追蹤資料迴歸模型之結果（固定效果）

被解釋變數：人均二氧化碳排放量	全球	亞洲	美洲	歐洲
單位 GDP 能源消耗量	0.62** (0.27)	0.21 (0.27)	0.62** (0.22)	1.10** (0.49)
乾淨能源比重	-0.08*** (0.02)	-0.04*** (0.01)	-0.23** (0.06)	-0.10*** (0.03)
人均實質 GDP	0.72*** (0.07)	0.60*** (0.06)	0.71*** (0.13)	0.79*** (0.11)
貿易開放程度	-1.30* (0.74)	-0.76 (1.05)	-4.06* (1.68)	-0.05 (2.13)
總人口數	-0.94 (0.73)	0.46 (0.62)	-4.72* (2.25)	-3.05* (1.53)
都市人口數	0.93* (0.50)	0.31 (0.42)	2.41 (2.56)	2.76* (1.48)
通膨率	3.54×e-04 (2.99×e-04)	0.01 (0.02)	1.46×e-04 (7.88×e-04)	-0.02 (0.11)
常數項	1.66 (3.79)	1.65 (4.83)	14.04 (7.23)	-6.49 (11.73)
R-squared	0.28	0.24	0.33	0.26
樣本數	1,371	470	160	741

註 1：採用強韌性的標準誤。

2：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

3：Wald 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

4：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

附錄表 4、追蹤資料迴歸模型之結果（隨機效果）

被解釋變數：人均二氧化碳排放量	全球	亞洲	美洲	歐洲
單位 GDP 能源消耗量	0.13 (0.18)	-0.21 (0.20)	-0.06 (0.06)	0.16 (0.16)
乾淨能源比重	-0.08*** (0.02)	-0.05** (0.02)	-0.23*** (0.06)	-0.09*** (0.03)
人均實質 GDP	0.73*** (0.07)	0.62*** (0.10)	0.74*** (0.10)	0.82*** (0.10)
貿易開放程度	-0.68** (0.35)	0.78* (0.41)	-0.49 (0.50)	-1.25** (0.57)
總人口數	-0.63 (0.55)	-0.48 (0.46)	-2.35 (1.51)	-2.07** (0.82)
都市人口數	1.13** (0.42)	0.89*** (0.29)	2.52 (1.67)	1.97** (0.81)
通膨率	3.31×e-04 (3.82×e-04)	0.01 (0.01)	-5.30×e-04 (6.88×e-04)	0.03 (0.10)
常數項	0.58 (1.58)	-3.09*** (1.18)	1.13 (2.16)	2.60 (2.69)
R-squared	0.32	0.31	0.50	0.30
樣本數	1,371	470	160	741

註 1：採用強韌性的標準誤。

2：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

3：Wald 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

4：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

附錄表 5、一般化最小平方法之結果

被解釋變數： 人均二氧化碳排放量	全球	亞洲	美洲	歐洲
<u>「人均能源消耗量」</u>	1.00*** (0.03)	0.94*** (0.03)	0.65*** (0.10)	1.04*** (0.04)
乾淨能源比重	-0.04*** (0.01)	-0.03* (0.01)	-0.10*** (0.02)	-0.04*** (0.01)
人均實質 GDP	0.62* (0.03)	0.01 (0.04)	0.25*** (0.09)	0.12* (0.06)
貿易開放程度	0.24 (0.33)	0.42 (0.52)	-1.90 (1.55)	0.82 (0.69)
總人口數	-0.19 (0.35)	0.37 (0.51)	-3.26** (1.63)	-1.29* (0.66)
都市人口數	0.33 (0.21)	-0.04 (0.22)	1.67 (1.33)	1.37** (0.54)
通膨率	9.11×e-04 (1.38×e-03)	-1.62×e-03 (0.01)	6.21×e-04 (1.36×e-03)	0.08 (0.05)
常數項	-1.68 (1.58)	-2.13 (2.45)	8.21 (5.87)	-4.42 (2.81)
R-squared	0.79	0.80	0.63	0.77
樣本數	1,371	470	160	741

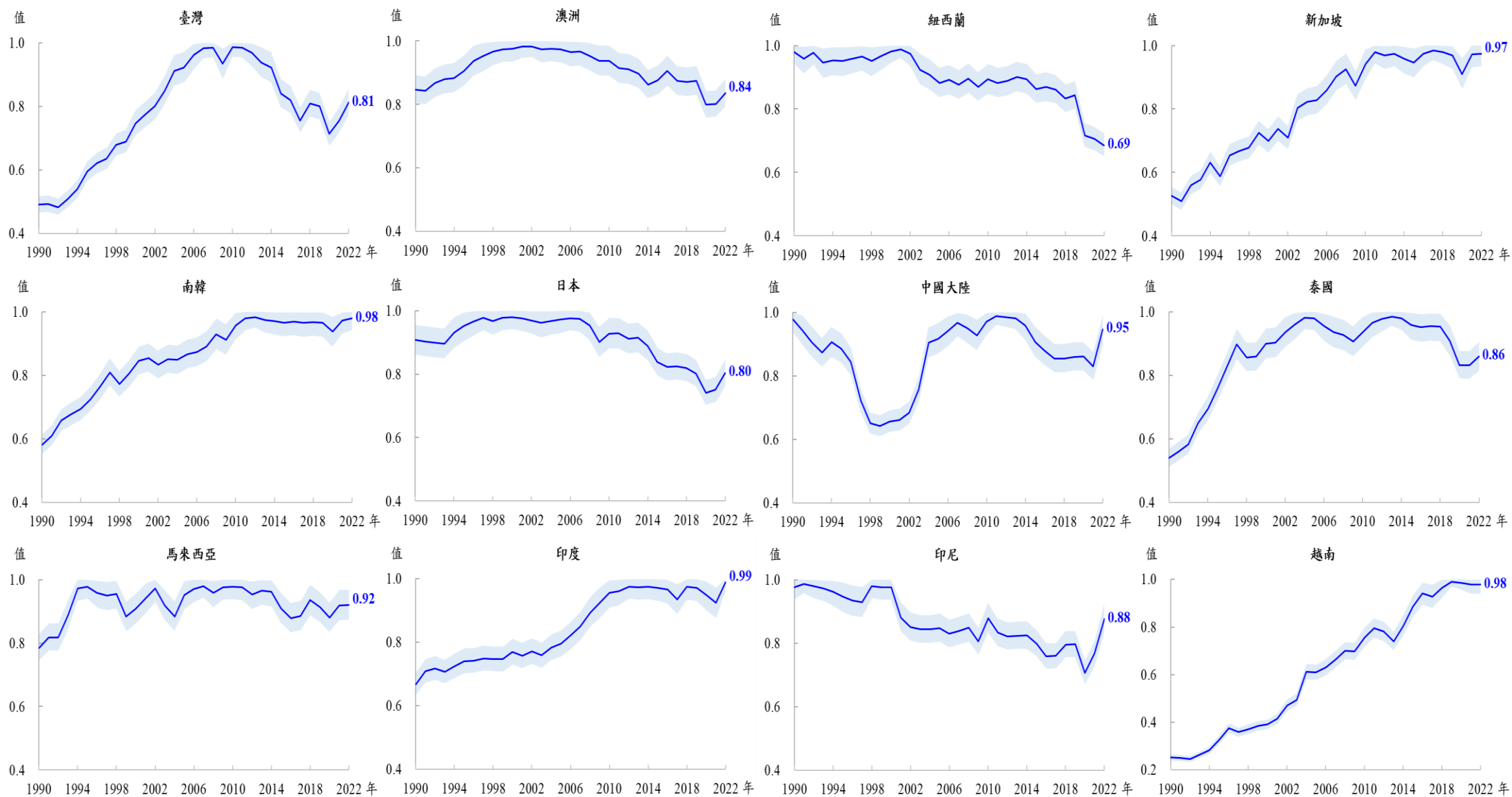
註 1：在一般化最小平方法中，設定誤差項具異質性與橫斷面相關，並納入國家別的固定效果。

2：括弧內為標準誤。*：10%顯著水準、**：5%顯著水準、***：1%顯著水準。

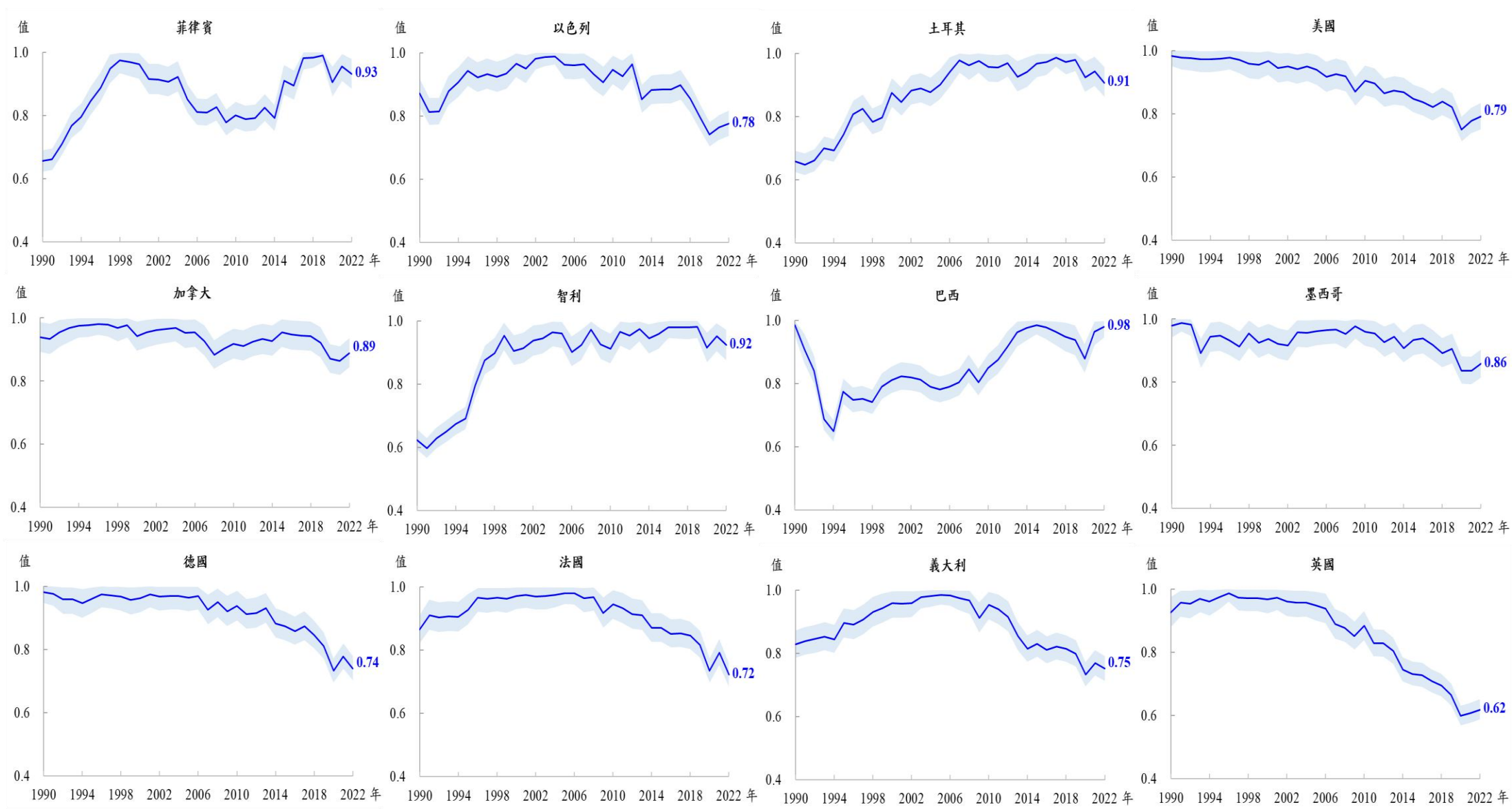
3：Wald 統計量的結果均達 1%顯著水準，表示模型設定合適。

4：除單位 GDP 能源消耗量、貿易開放程度、通膨率為定態之外，其餘變數均以年增率表示使之定態。

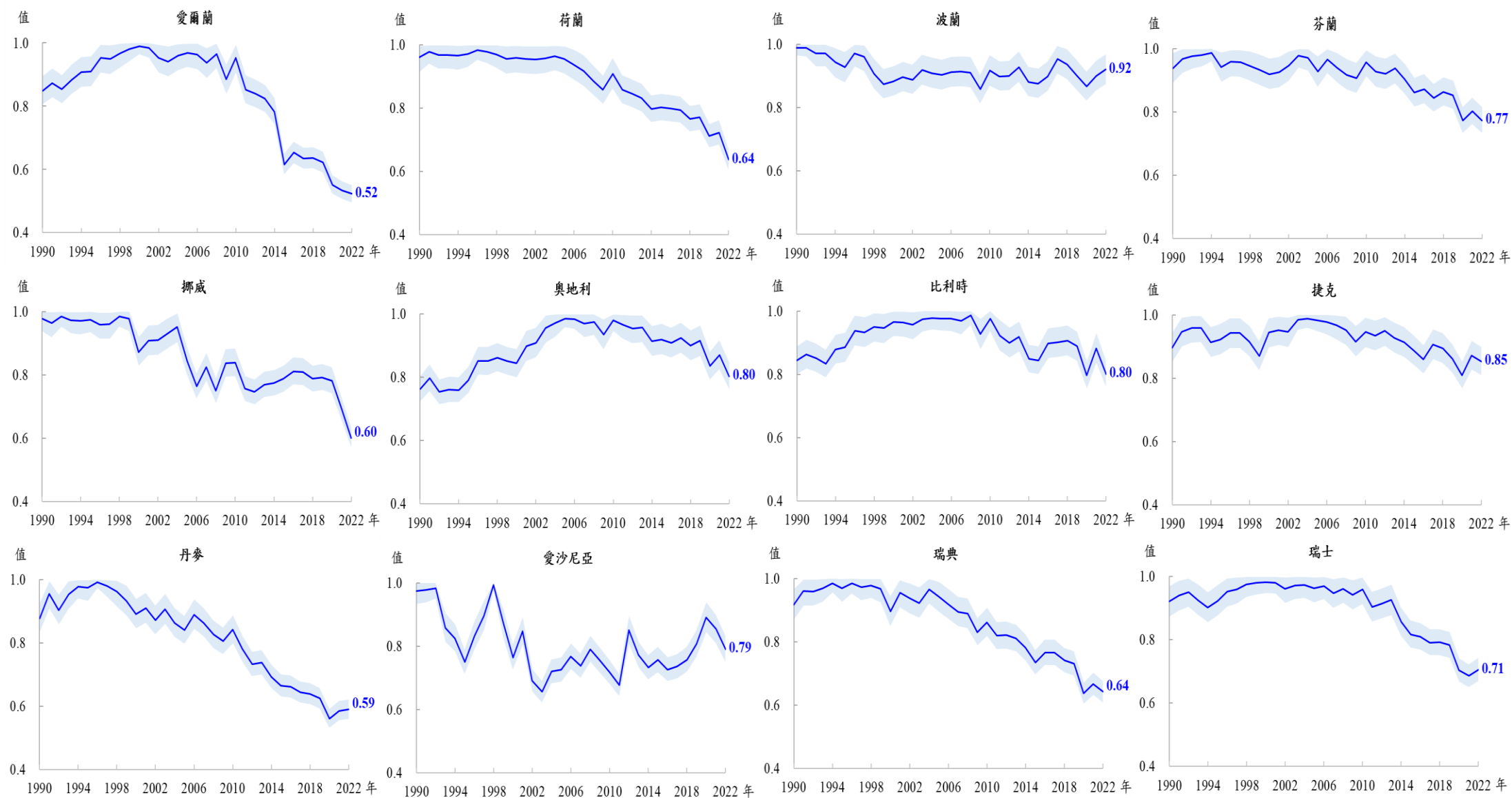
附錄圖 1、1990 年~2022 年樣本國家的能源效率情形（被解釋變數：人均能源消耗量）



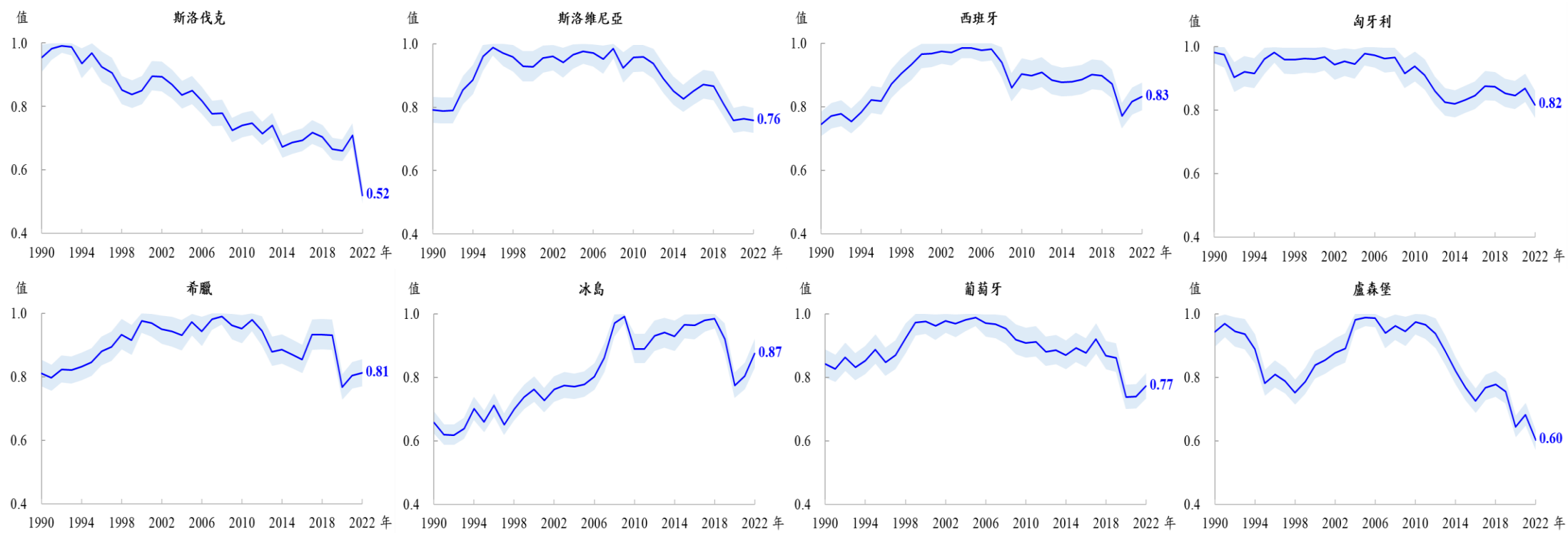
資料來源：作者估計。



資料來源：作者估計。

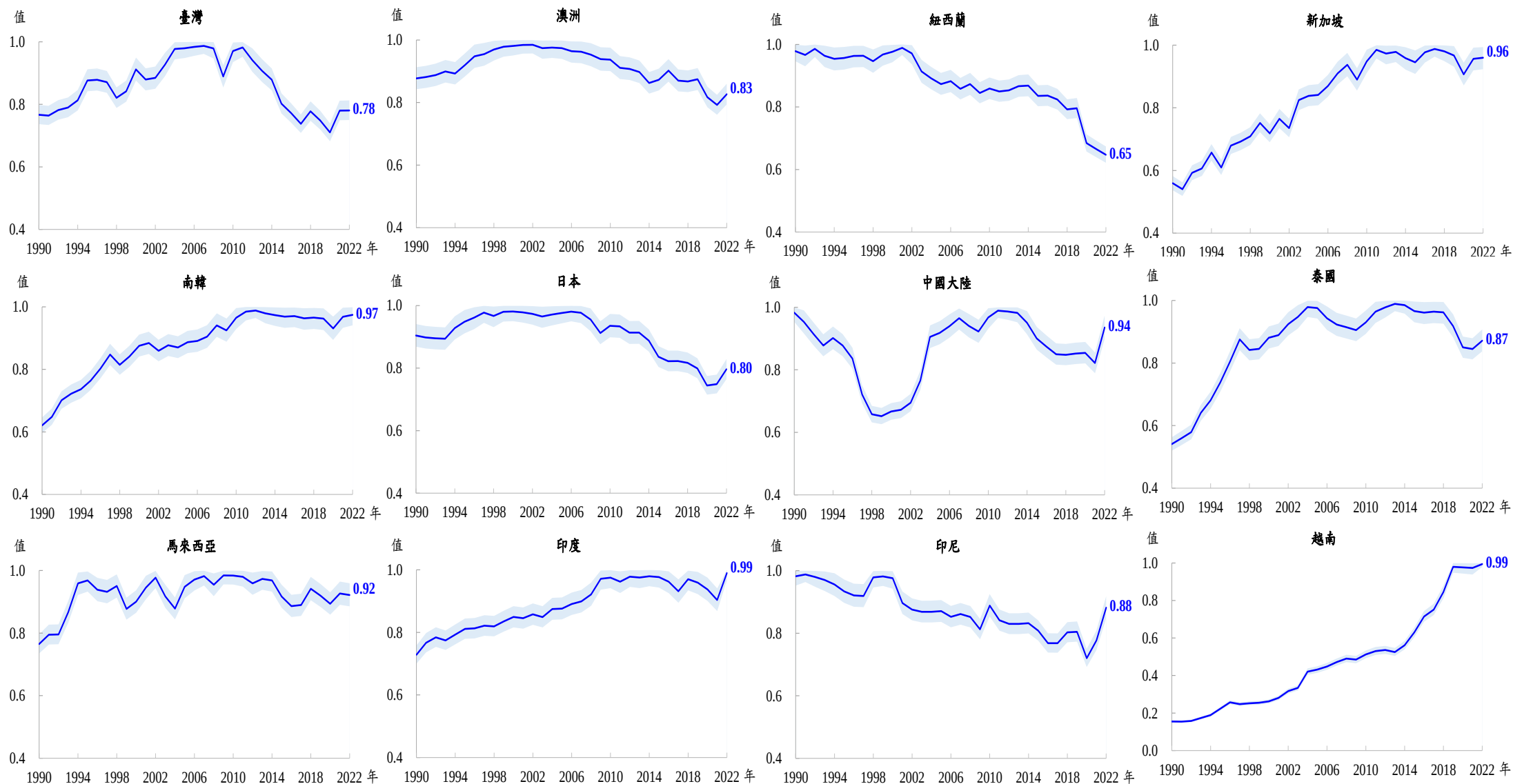


資料來源：作者估計。

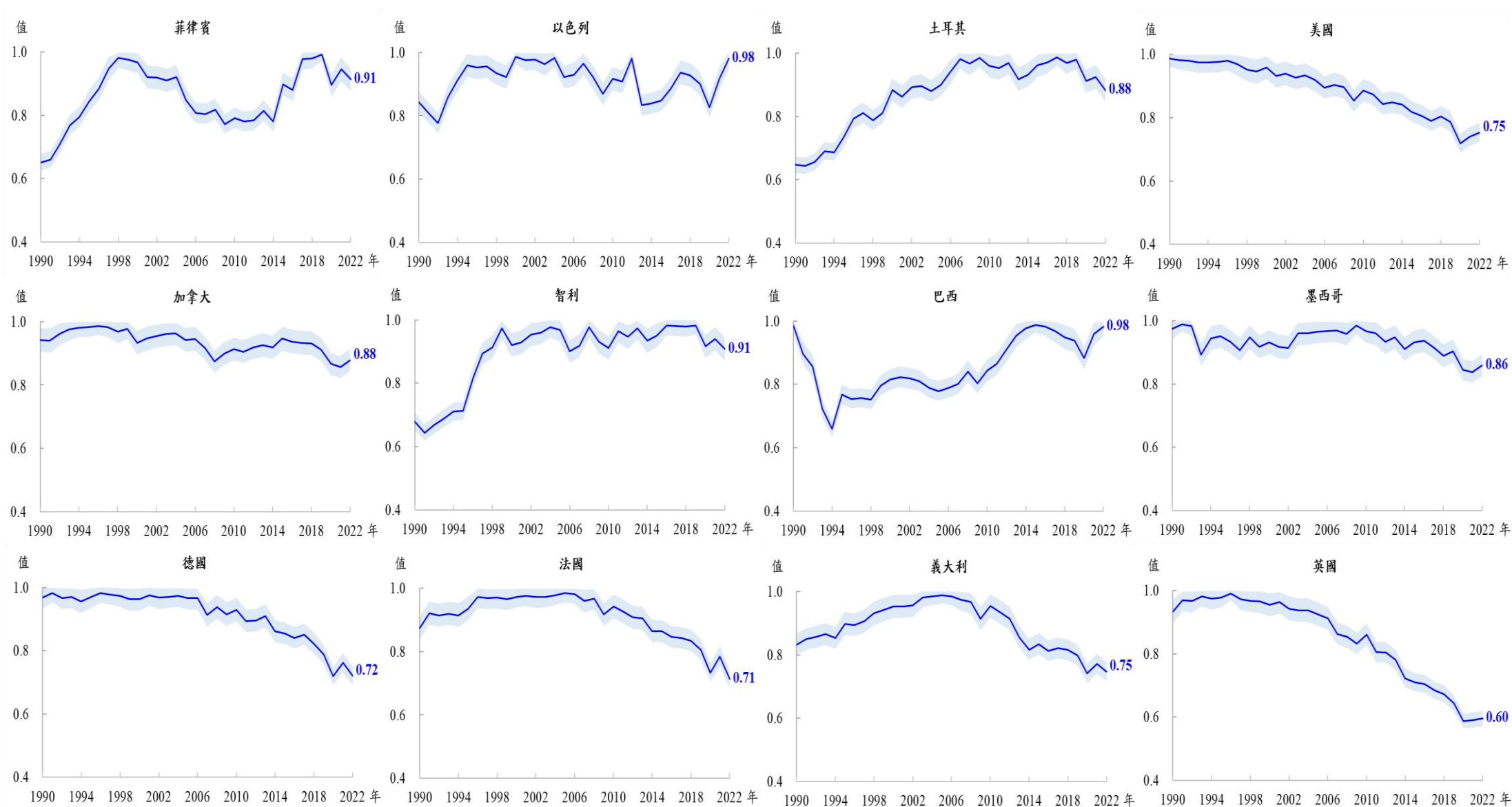


資料來源：作者估計。

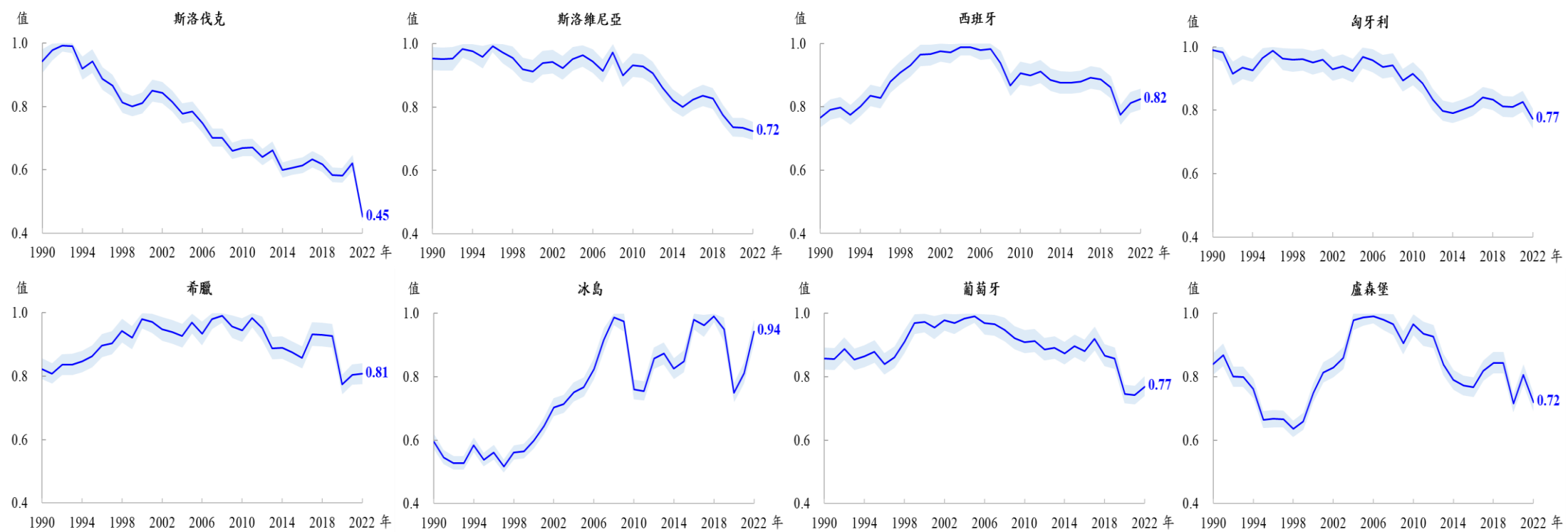
附錄圖 2、1990 年~2022 年樣本國家的能源效率情形（被解釋變數：單位 GDP 能源消耗量）



資料來源：作者估計。



資料來源：作者估計。



資料來源：作者估計。