

結合多評準決策與模糊邏輯於環境永續性評估

劉豐瑞

大葉大學環境工程系
彰化縣大村鄉山腳路 112 號

摘要

由於環境永續性是一個具有整合性的複雜概念，而其評估架構應是一個容納多面向，並同時含有定性、定量方法的綜合體。因此，單純利用傳統的多評準決策（multiple-criteria decision-making, MCDM）或甚至是較新的方法如模糊邏輯（fuzzy logic）來進行評估，都難免捉襟見肘。在這篇論文中，我們提出將多評準決策與模糊邏輯整合，形成一個新的環境永續性的評估架構，其中包含 36 個結構與 5 個非結構的決策點，而多評準決策法是用來模擬結構的決策點，而模糊邏輯則是用來處理非結構的決策點。這個評估架構的輸入是利用環境永續性指數（environmental sustainability index, ESI）所定義的 74 個變數，而輸出是一個介於 0（完全不永續）至 100（完全永續）之間的數值。基於這個整合式的評估架構，我們將 146 個國家的環境永續性進行計算、排序與分類，而這個評估結果將有助於每個國家認清其邁向環境永續的障礙。

關鍵詞：多評準決策，模糊邏輯，環境永續性

Evaluating Environmental Sustainability: An Integration of Multiple-Criteria Decision-Making and Fuzzy Logic

KEVIN F.R. LIU

*Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University
112 Shan-Jiau Rd., Da-Tsuen, Changhua, Taiwan*

ABSTRACT

Environmental sustainability is a complicated concept and its evaluation-framework is a mixture of multiple dimensions, including both quantitative and qualitative methods. Therefore, using only traditional multiple-criteria decision-making (MCDM) or even current fuzzy logic seems insufficient for evaluating environmental sustainability. In this report, a new evaluation-framework based on an integration of MCDM and fuzzy logic for assessing environmental sustainability, consisting of 36 structured and five unstructured decision-points, is proposed, wherein MCDM is used to handle structured decision-points and fuzzy logic serves the unstructured ones. The inputs to this evaluation-framework are 74 variables defined by the Environmental Sustainability Index (ESI); whereas, the output is a score ranging from 0 (i.e., unsustainable) to 100 (i.e., completely sustainable). On the basis of this integrated framework, the environmental sustainabilities of 146 countries are

calculated, ranked and clustered. The evaluation results can be very helpful to various countries in identifying their respective obstacles with regard to environmental sustainability.

Key Words: multiple-criteria decision-making, fuzzy logic, environmental sustainability

一、前言

過去幾個世紀，人口快速的增長、自然資源的消耗與人類社會的工業化造成環境與生態的威脅。西元 1987 年，布蘭登報告 [17] 首先開啓了永續性的觀念，並試圖喚醒人類對環境的改善。西元 1992 年，世界高峰會提出的 21 世紀議程 (Agenda 21) [15] 更明確的提出保護環境的行動方案。近年來，環境永續性已成為環境政策與規劃的重點。

為了對國家對於保護環境的努力進行追蹤，已有許多以全球為尺度，可進行跨國比較的指標系統被發展出來。Prescott-Allen 提出的“國家福祉” [10] 中建議將兩群的指標—環境福祉指標群與人類福祉指標群，利用權重法整合成一個指標。這些指標涵蓋較為廣泛，包括空氣、水、生物多樣性與景觀。永續發展指標諮詢小組 [6] 提出了一組橫跨經濟、環境與社會發展的指標，但是因為缺乏清楚的資料收集、評估與分析的機制，因此不為廣泛接受。生態足跡指數 [16] 把國家的總資源消耗轉變成相當於生物生產的土地面積 (公畝)，然後在除以人口而獲得最後的數值 (公頃/人)。另外，基於著名的環境政策模型“壓力—現況—回應” (pressure-state-response)，環境永續性指數 (environmental sustainability index, ESI) [18] 將 76 變數整合成 21 的環境永續性指標，以監測自然資源的消耗、過去與現在的污染程度、環境管理的成效與社會能力。最後將這 21 的指標的分數取平均值，即是每個國家的環境永續性的分數。

上述的四個評估環境永續性的指數系統，都是基於多評準決策 (multiple-criteria decision-making, MCDM) 而發展。換言之，將各個指標得分以權重法來獲得最後的綜合分數。另一方面，有一群研究人員認為環境永續性的評估比較接近於邏輯推理的過程，因此，他們將環境健全、經濟效率與社會安樂的指標，以模糊邏輯 (fuzzy logic) 的推理來進行評估 [1, 9]。

本研究將嘗試整合多評準決策與模糊邏輯，來進行環境永續性的評估，其理由如下：

- 由於環境永續牽涉的範疇很廣，很多的準則，包括環境、生態、社會經濟等方面的指標，將被納入評估架構中。有些準則可再分解成次準則，而最終形成一個階層式結

構，因此，多評準決策法對這個階層式結構的決策而言是相當適當的 [4]。

- 然而，部分準則具有固有的模糊性與複雜概念，不易被定義或量測，傳統的數學方法並不適合。並且，由於模糊邏輯善於模擬專家與系統化處理模糊情況的能力，因此適合用來處理這樣的情形 [9]。

由於考慮到這兩種情況同時發生於評估環境永續性的架構內，因此我們將提出整合多評準決策與模糊邏輯，並為 146 個國家進行評估。基於環境永續性指數 (ESI) 所定義的變數，一個新的評估環境永續性的架構在下一節中提出。在第 3 節中，詳細的評估方法將被介紹，包括多評準決策與模糊邏輯。146 個國家的評估結果將在第 4 節中討論，最後這個方法的優點將在第 5 節中綜理。

二、環境永續性評估

(一) 環境永續性指數 (ESI)

環境永續性指數 (ESI) [18] 是由耶魯環境法律與政策中心 (Yale Center for Environmental Law and Policy)、哥倫比亞大學國際地球科學資訊網 (Columbia University's Center for International Earth Science Information Network) 與世界經濟論壇的全球領袖明日環境工作小組 (World Economic Forum's Global Leaders for Tomorrow Environment Task Force) 共同合作，自西元 1999 年開始發展的綜合性指數，追蹤可以影響一個國家環境永續性的社會經濟、環境與制度的指標。在最新的 2005 年的報告中，146 個國家被納入排序。

ESI 將 76 個變數整合成 21 個環境永續性指標，而這 21 個指標可歸納為 5 類：環境系統、減低環境壓力、降低人類脆弱、社會與制度的回應能力與全球責任 (見附錄)。ESI 與世界經濟合作發展組織提出的“壓力—現況—回應” (PSR) 模式，特別是其更新的衍生物 DPSIR (增加了驅動力 “driving force” 與衝擊 “impact”) 有很大的相似。在 ESI 評估前，相關的資料被收集與前處理，包括變數的標準化、變數的轉換、遺漏資料的推估與極端資料的處理等，而最後的評分是將各指標的分數平均而得。

(二) 新的評估架構

在決策理論中，有 3 種型態的決策 [14]：結構的、半結構的與非結構的決策。結構的決策是指能被清楚定義、容易瞭解的決策，其通常有例行的標準程序、資料處理的方法或管理科學的模式。例如，水質是否符合標準的決策就是一種結構的決策，因為它具有標準的操作程序。收集廢棄物的最佳路徑也是另一個結構決策的例子，因為它可以管理科學的模式來處理。非結構決策問題通常沒有固定決策程序，而且通常仰賴人類直覺、判斷、知識與解決問題的能力，大部分的環境政策相關的決策皆屬此類。而半結構決策具有部分的結構決策元素與部分的非結構決策元素，是一種標準決策程序與人類判斷的整合。環境影響評估就是典型的半結構決策，因為它意味著數學模式的分析與預測，同時又考慮到專家的主觀判斷與大眾的意見。

至於評估環境永續性，大部分的學者將它視為一種結構決策，因而利用管理科學的技術來進行評估工作，其中以多評準決策 (MCDM) 最為廣泛利用。例如，Ferrarini 等人 [4] 就利用 MCDM 評量義大利 45 個市的環境永續性，而在前言中提及的 4 個指標系統亦是根據 MCDM 來發展的。另一方面，有些研究人員將環境永續性評估視為非結構決策，因而利用邏輯推理的模式進行評估 [1, 2, 9, 11]。

在進行相關文獻的檢視後，我們整理出環境永續性評估的特點：

- 不易定義的本質。所謂的永續性本身是一種模糊的概念，其不易定義與量測 [9]，因此，對環境永續性有不同的觀念就會產生不同的定義與評估架構。如同 O'Laughlin 等人 [8] 所言：“有關健康、永續性與生態系統管理等詞是無法有精確的定義—不同的人會產生不同定義。”
- 多面向的特性。由於多個概念、價值觀與知識同時被納入環境永續性評估中，因此使得它成為多面向的特性。通常，相異的指標橫跨經濟、環境與社會發展都會被納入評估架構中。如同 Andriantsaholiniaina 等人 [1] 所論述：“雖然永續發展難以數學方式來定義，仍有多數學者認為它具有兩個面向：生態的與人類的面向。...直至 1992 年的地球高峰會後，更多的學者開始認為同意人類的面向可再分為社會的、經濟的、社區的與文化的永續性。”
- 定量的評估。可量測的資料與傳統定量的決策工具依然在環境永續性評估中佔有非常重要的角色。身為一個深信以定量方法進行環境決策的例子，2005 年的 ESI 報告中

說道：“在許多領域內，決策分析已經漸漸成為由資料來驅動，但是環境相關領域在這點上卻是落後的。苦於資訊的缺乏，環境決策常常基於一般性觀察、猜測、專家意見、或者假於辭令甚至情緒來制訂。”

- 定性的評估。雖然可量測的指標與定量的決策工具可以幫助環境永續性評估的決策，但是主觀與定性的專業判斷易佔有非常重要的角色。例如，MCDM 似乎就對世界經濟合作發展組織的“壓力—現況—回應”(PSR) 模式要如何整合至環境永續性的評估架構中顯得相當笨拙。因為，這個模式的概念比較像是一種主觀、定性與邏輯上的關係。至於定性的方法對於環境永續性評估的重要性被 Duceya 與 Larson [3] 強調：“論及永續性或者相關概念時的最大困難在於其內涵的定性而非定量的特質。... 支援永續性決策的方法務必要能容納定性與衝突的資訊，如能妥適利用這種定性資訊那就更好了。”

在這篇論文中，環境永續性評估被視為半結構決策，因為環境永續性是一個涵蓋很廣的概念，並且它的評估架構包含多個面向，包括定性與定量的方法。下一段落我們將基於 ES 的變數，發展一個新的含有 5 個分項的評估架構。

首先，環境永續性被分為 5 個分項：空氣品質永續性 (air quality sustainability, AQS)、水質永續性 (water quality sustainability, WQS)、水量永續性 (water quantity sustainability, WQNS)、土地使用與自然資源永續性 (land use & natural resource sustainability, LNS) 與生物多樣性永續性 (biodiversity sustainability, BIOS)。對每一個分項，其評估都是基於“壓力—現況—回應”(PSR) 模式來進行。“壓力”元素再細分為“直接壓力 (direct pressure)”、“間接壓力 (indirect pressure)”與“衝擊”，而“回應”元素再細分為“直接回應 (direct response)”、“間接回應 (indirect response)”與“全球責任 (global stewardship)”。最後，表 1 表示將 74 個變數分類的結果 (i.e., 其中 DISCAS (44) 與 DISEXP (45) 因為與整個架構不合而被剔除。

再者，我們接著發展一個新的評估架構，如圖 1 所示。這 74 個變數位於這個架構的最底層，並且一旦資料被收集齊全，評估工作就可以被啟動。當較低層的決策元素前進至較上層時，這個決策過程有兩種可能性：結構或非結構的決策。例如，當評估圖 1 中的 air quality sustainability 時，“direct pressure”是由其當較低層的決策元素 COALKM (18)、

表 1. 評估環境永續性的 74 個變數

Component	State	Pressure	Response
Air	· NO2 (1)	Direct Pressure	Direct Capability
Quality	· SO2 (2)	· COALKM (18)	· EG (R1)
Sustainability	· TSP (3)	· NOXKM (19)	Indirect Capability
(AQS)	· INDOOR (4)	· SO2KM (20)	· EE (R2)
		· VOCKM (21)	· PSR (R3)
		· CARSKM (22)	· ST (R4)
		Indirect Pressure	Global Stewardship
		· GR2050 (25)	· PIC (R5)
		· TFR (26)	· GGE (R6)
		· WEFSUB (36)	· TEP (R7)
		Impact	
		· DISRES (40)	
		· U5MORT (41)	
Water	· WQ_DO (12)	Direct Pressure	Direct Capability
Quality	· WQ_EC (13)	· BODWAT (30)	· EG (R1)
Sustainability	· WQ_PH (14)	· FERTHA (31)	Indirect Capability
(WQS)	· WQ_SS (15)	· PESTHA (32)	· PSR (R3)
		Indirect Pressure	· ST (R4)
		· GR2050 (25)	Global Stewardship
		· TFR (26)	· PIC (R5)
		Impact	· TEP (R7)
		· DISINT (39)	
		· U5MORT (41)	
Water	· WATAVL (16)	Direct Pressure	Direct Capability
Quantity	· GRDAVL (17)	· WATSTR (33)	· EG (R1)
Sustainability		Indirect Pressure	Indirect Capability
(WQNS)		· GR2050 (25)	· ST (R4)
		· TFR (26)	
		Impact	
		· WATSUP (43)	
Land Use &	· ANTH40 (11)	Direct Pressure	Direct Capability
Natural Resource	· IRRSAL (37)	· EFPC (27)	· EG (R1)
Sustainability		· HAZWST (29)	· RECYCLE (28)
(LNS)		· AGSUB (38)	Indirect Capability
		Indirect Pressure	· ST (R4)
		· GR2050 (25)	Global Stewardship
		· TFR (26)	· PIC (R5)
		Impact	· GGE (R6)
		· UND_NO (42)	· TEP (R7)
Biodiversity	· ECORISK (5)	Direct Pressure	Direct Capability
Sustainability	· PRTBRD (6)	· ANTH10 (10)	· EG (R1)
(BIOS)	· PRTMAM (7)	· FOREST (23)	· FORCERT (35)
	· PRTAMPH (8)	· ACEXC (24)	Indirect Capability
	· NBI (9)	· OVRFSH (34)	· PSR (R3)
		Indirect Pressure	· ST (R4)
		· Air quality (S1)	Global Stewardship
		· Water quality (S2)	· PIC (R5)
		· GR2050 (25)	· GGE (R6)
		· TFR (26)	· TEP (R7)

Note: EG (R1) denotes "Environmental Governance," including GASPR (46), GRAFT (47), GOVEFF (48), PRAREA (49), WEFGOV (50), LAW (51), AGENDA21 (52), CIVLIB (53), CSDMIS (54), IUCN (55), KNWLDG (56) and POLITY (57); EE (R2) denotes "Eco-Efficiency," including ENEFF (58) and RENPC (59); PSR (R3) denotes "Private Sector Responsiveness," including DJSJI (60), ECOVAL (61), ISO14 (62), WEFPRI (63) and RESCARE (64); ST (R4) denotes "Science and Technology," including INNOV (65), DAI (66), PECCR (67) ENROL (68) and RESEARCH (69); PIC (R5) denotes "Participation in International Collaboration," including EIONUM (70), FUNDING (71) and PARTOCIP (72); GGE (R6) denotes "Greenhouse Gas Emissions," including CO2GDP (73) and CO2PC (74); TEP (R7) denotes "Transboundary Environmental Pressures," including SO2EXP (75) and POLEXP (76); Air quality (S1) includes NO2 (1), SO2 (2), TSP (3) and INDOOR (4); Water quality (S2) includes WQ_DO (12), WQ_EC (13), WQ_SS (15) and GGE (R6).

NOXKM (19)、SO2KM (20)、VOCKM (21) 與 CARSKM (22) 所決定，而這個上、下層的關係屬於單純的“分解 (decomposition)”，是被清楚定義與容易瞭解的，可被視

為一種結構的決策。因此，定量的決策工具如 MCDM 似乎就相當適合於這種決策的型態。然而，當基於較低層的決策元素 state、pressure 與 response 來評估 air quality sustainability

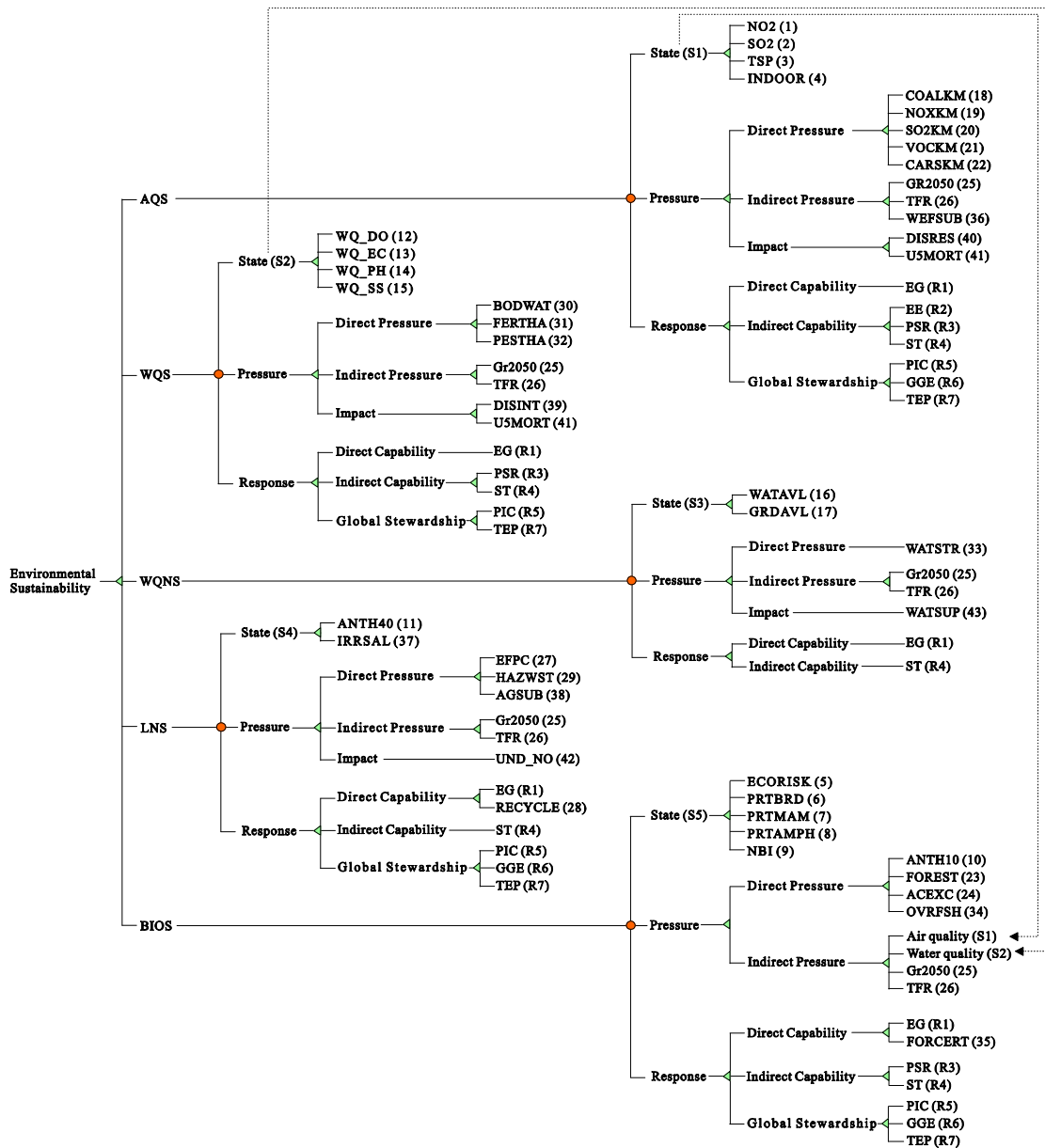


圖 1. 環境永續性評估架構

時，這個評估機制似乎比前述的情形更為複雜，定性的邏輯推理似乎是這個評估機制的核心，應該被視為一種非結構的決策。在圖 1 中，結構的決策點以三角形表示 (i.e., Δ)，而非結構的決策點以圓圈表示 (i.e., \bigcirc)。因此，這整個環境永續性的評估架構形成一個同時具 5 個非結構決策點與 36 個結構決策點的半結構的決策。

這篇論文中，36 個結構決策點將以多評準決策法來處理，而 5 個非結構決策點將以模糊邏輯來模擬。最後，一個結合多評準決策與模糊邏輯的架構，成為我們的評估方法，其方法的細節將在下節中介紹。

三、評估方法

假設一個半結構的決策問題具有一個階層式的結構，而其有許多結構或非結構的決策點組成，如圖 2 所示。多評準決策法用來處理結構決策點，而模糊邏輯則是用來處理非結構決策點。

(一) 多評準決策法

多評準決策 (MCDM) 有下述 3 個步驟：分解 (decomposition)、權重 (weighting) 與綜合分析 (synthesis)。

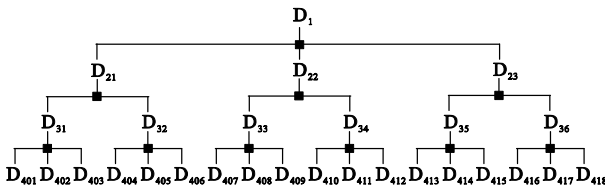


圖 2. 半結構化決策的階層結構

1. 分解

在圖 2 中，每一個決策基於其特性被分解成數個決策元素 D_{ij} (i.e., 準則)，這個分解會一直持續，最後形成一個具有多層的階層式結構 (i.e., 決策方案有時會被置於階層的最下層)。這個分解幫助我們釐清環境永續性的意義，最後形成一個具有 5 層的評估架構，如圖 1 所示。

在圖 2 中的每一個分支點 (i.e., ■) 可視為一個決策 i ，基於其上層 D_{ij} 與下層 $D_{(i+1)j}$ ($k=1\sim n$) 的特性，可被分類為結構或非結構的決策點。在圖 1 中，有 36 個結構決策點。

2. 權重

權重的決定一直是 MCDM 的重要議題，有很多方法可以來決定權重 [5, 13]，例如直接給定法 (direct assignment)、德爾菲法 (Delphi survey)、成對比較法 (pairwise comparison)、特徵向量法 (eigenvector method)、熵值法 (entropy model) 與線性規劃法 (linear programming)。這篇論文中，成對比較法的觀念 [12] 被用來決定每一個決策點的權重。

一個比較矩陣 A 乃是利用成對比較的技巧法來建立： A 的項 a_{jk} 是由詢問專家，比較列元素 A_j (i.e., $D_{(i+1)j}$) 與行元素 A_k (i.e., $D_{(i+1)k}$) 對於他們的上層的決策元素 D_{ij} 的相對重要性，而其回答以 9 點的尺度來表示：

- 1 = Equal importance
- 3 = Weak importance
- 5 = Essential or strong importance
- 7 = Demonstrated importance
- 9 = Absolute importance

2、4、6、8 則屬於上述提到的相鄰尺度的中間程度，而且比較矩陣 A 的項 a_{jk} 需遵守下列的原則： a_{jk} 是一個正值 (i.e., 1, 2, ..., 9)； a_{jk} 與 a_{ji} 需互為倒數； a_{ij} 必為 1。事實上， a_{jk} 的意義是 w_j/w_k ，其中 w_j 與 w_k 分別代表 $D_{(i+1)j}$ 與 $D_{(i+1)k}$ 的權重。

如果 a_{jk} 的給定都是一致的，則比較矩陣 A 有下列的結果：

$$AW = \lambda W \tag{1}$$

其中 W 代表一個權重向量 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$ ，而 λ 代表 A 的一個特徵值，理論上 λ 應等於 n (i.e., n 是這個決策點的下層決策元素的數目)。由 (1) 式來解出權重向量 W 是一個典型的特徵向量問題，因此很多的解特徵向量的技術都可以使用。

如果比較矩陣 A 是完全一致的，則需滿足遞移性：如果 a_{jk} 是 2 且 a_{kl} 是 3，則 a_{jl} 必須是 6。不幸的，當有很多的準則時， A 的一致性不易滿足，而這種不一致性將使得 λ 的最大值 λ_{max} 大於 n 。 A 的不一致的程度被定義為一致性比例 (consistency ratio, CR)，而 $CR=CI/RI$ ，其中 CI 代表一致性指數 (consistency index)，定義為 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ ； RI 則代表隨機指數 (random index)，其值根據 A 的大小而異。如果 CR 較高，代表權重的給定不一致，一般而言， CR 小於 0.10 被認為是可接受的。

在這個研究中，包括作者在內的 3 個專家組成的小組以成對比較法為圖 1 中的 36 個結構決策點來進行權重的給定工作：其同意對環境永續性 ES 而言， AQS 、 WQS 、 $WQNS$ 、 LNS 與 $BIOS$ 具有相同的重要性 (i.e., 換言之，沒有 1 個比其他 4 個更為重要)。同理，在圖 1 中的最低層的決策元素，相對於各自的上層決策元素而言，皆具有相同的權重。至於 “pressure”，它的較低層的決策元素 “direct pressure”、“indirect pressure” 與 “impact” 具有下列的比較矩陣：

Pressure	Direct pressure	Indirect pressure	Impact
Direct pressure	1	3	3
Indirect pressure	1/3	1	1
Impact	1/3	1	1

這個比較矩陣是完全一致的，因此相對重要性的比例為：

$$\text{direct pressure} : \text{indirect pressure} : \text{impact} = 3 : 1 : 1$$

同理，對於 “response” 而言，“direct capability”、“indirect capability” 與 “global stewardship” 的比值亦是 3:1:1。

3. 綜合分析

在圖 1 中，對每一個決策點 I 而言，它的上層決策元素 D_{ij} 的得分 ϕ_{Dij} 是用權重法來計算的，如下：

$$\phi_{D_{ij}} = \sum_{k=1}^n w_{D_{(i+j)k}} \phi_{D_{(i+1)k}} \quad (2)$$

其中 n 是這個決策點的下層決策元素的數目， $w_{D_{(i+j)k}}$ 與 $\phi_{D_{(i+1)k}}$ 分別代表 $D_{(i+1)k}$ 的權重與得分。

(二) 模糊邏輯

模糊邏輯 [20] 可以被視為一種模擬人類以模糊資訊進行推理的機制，可以模擬人類對複雜系統與決策的定性思考過程，因此，模糊邏輯適合於環境永續性評估中的非結構決策點。

1. 以模糊邏輯為知識表現法

在模糊邏輯中，這種以定性與感知為基礎的推理知識，是藉由“IF-THEN”形式的模糊法則來表達。一個具有多個前件部 (antecedent) 的模糊法則表示如下：

IF p_1 AND p_2 AND ... AND p_n THEN q

其中 p_i 代表模糊命題，具有“ X_i is F_i ”的形式，而 X_i 是一個語意變數 (linguistic variable) [21]， F_i 是一個模糊值。這種口語化的模糊法則是由專家知識擷取而來，具有易被瞭解與操作的特性。

在這篇論文中，5 個基於“state”、“pressure”與“response”來評估永續性的非結構決策點，具有下列的法則形式：

IF state is good AND pressure is weak AND response is powerful
THEN sustainability is very good

其中“sustainability”、“state”、“pressure”與“response”被視為語意變數，而“good”、“weak”、“powerful”與“very good”分別是它們的模糊值。

語意變數是一種變數，其值可為精確值、模糊值甚至是字詞。例如，“sustainability”是一個複雜與模糊的概念，因此，它可被視為一個語意變數，而它的可能值有下列 7 個口語的字詞：“excellent”、“very good”、“good”、“medium”、“poor”、“very poor”與“terrible”。同理，語意變數“state”有 3 個模糊值：“good”、“medium”與“poor”；語意變數“pressure”有 3 個模糊值：“strong”、“medium”與“weak”；語意變數“response”有另外 3 個模糊值：“powerful”、

“medium”與“weak”。定義完這些語意變數與其模糊值後，專家小組針對評估架構中的非結構決策點討論出 27 個模糊法則，如表 2。

為了模擬模糊值與字詞，Zadeh [19] 發展了一個數學的工具—模糊集合論。一個模糊集合 F 的基本概念為這個集合中的元素，對於這個集合的隸屬度是一種程度 (degree)，可用隸屬度函數來定義： $\mu_F(x)$ ，其中 x 是在論域 U 中的一個元素，而 $\mu_F(x)$ 代表 x 屬於 F 的程度。語意變數“sustainability”的 7 個模糊值“excellent”、“very good”、“good”、“medium”、“poor”、“very poor”與“terrible”的隸屬度函數，定義在圖 3(a)；同樣的，語意變數“state”、“pressure”與“response”的 3 個模糊值分別定義在圖 3(b)、(c) 與 (d)。

2. 推理機制

假設有一個模糊法則 (i.e., 假設為第 i 條法則) 與 3 個模糊事實，要推論出一個新的模糊結論，如下：

IF X_1 is F_{i1} AND X_2 is F_{i2} AND X_3 is F_{i3} THEN Y is G_i
 X_1 is F_{i1} AND X_2 is F_{i2} AND X_3 is F_{i3} _____ (3)
 Y is G_i'

其中 X_j 與 Y 為語意變數； F_{ij} 與 F_j' 為論域 U_j 中的模糊集合； G_{ij} 與 G_j' 為論域 V 中的模糊集合。利用 compositional rule of inference [21]， G_i' 可以下式來計算：

$$G_i' = (F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3}) \circ ((F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3}) \rightarrow G_i) \quad (4)$$

其中“ \wedge ”代表一個 t-norm 運算子，“ \circ ”是一個 composition 運算子，“ \rightarrow ”代表一個 implication 運算子。

要計算 G_i' ，運算子的選擇是很重要的議題。如果“sup-min”被選擇成為 composition 運算子 [20]，則 G_i' 的隸屬度函數可用下式計算：

$$\mu_{G_i'}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3}}(u_1, u_2, u_3), \mu_{F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3} \rightarrow G_i}(u_1, u_2, u_3, v)] \quad (5)$$

再者，如果“min”選為 t-norm 運算子 (i.e., $a \wedge b = \min(a, b)$) 與 implication 運算子 (i.e., $a \rightarrow b = \min(a, b)$)，則 (5) 式成為知名的“Mamdani's fuzzy reasoning” [7] 並表示成如下的式子：

表 2. 評估環境永續性的模糊法則

Rule	IF State is	AND Pressure is	AND Response is	THEN Sustainability is
1	poor	weak	powerful	good
2	poor	weak	medium	poor
3	poor	weak	weak	very poor
4	poor	medium	powerful	medium
5	poor	medium	medium	poor
6	poor	medium	weak	very poor
7	poor	strong	powerful	poor
8	poor	strong	medium	very poor
9	poor	strong	weak	terrible
10	medium	weak	powerful	very good
11	medium	weak	medium	good
12	medium	weak	weak	poor
13	medium	medium	powerful	good
14	medium	medium	medium	medium
15	medium	medium	weak	poor
16	medium	strong	powerful	good
17	medium	strong	medium	poor
18	medium	strong	weak	very poor
19	good	weak	powerful	excellent
20	good	weak	medium	very good
21	good	weak	weak	good
22	good	medium	powerful	very good
23	good	medium	medium	good
24	good	medium	weak	medium
25	good	strong	powerful	very good
26	good	strong	medium	good
27	good	strong	weak	poor

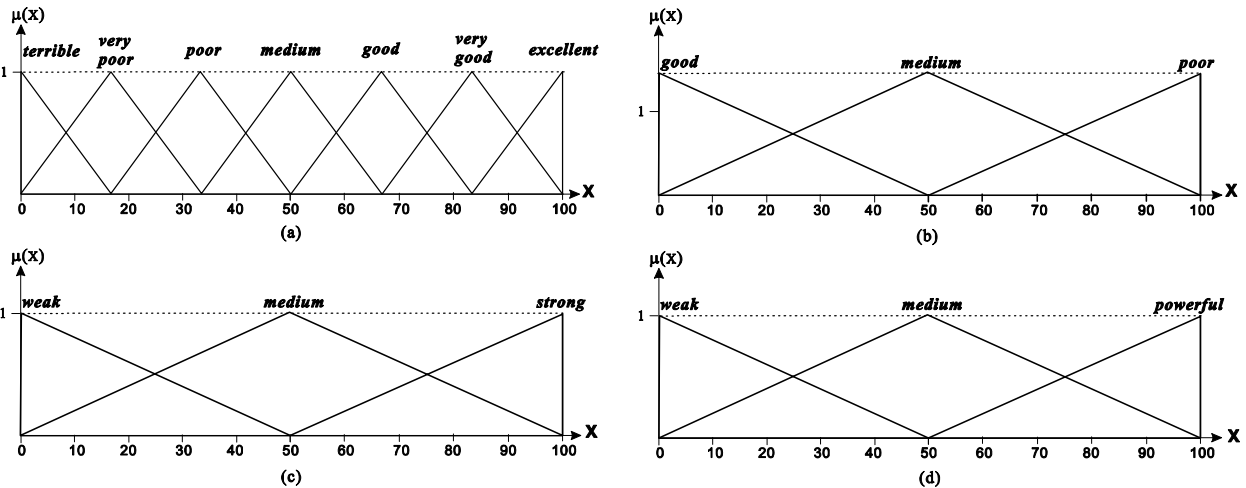


圖 3. 語意變數 (a) 永續性、(b) 狀態、(c) 壓力與 (d) 回應的模糊值與其隸屬度函數

$$\mu_{G_i}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F_1}(u_1), \mu_{F_2}(u_2), \mu_{F_3}(u_3), \mu_{F_{i1}}(u_1), \mu_{F_{i2}}(u_2), \mu_{F_{i3}}(u_3), \mu_G(v)] \quad (6)$$

$$\max_{u_3} \mu_{F_3 \wedge F_{i3}}(u_3), \mu_G(v) \quad (7)$$

(6) 式可以再繼續表示成：

$$\mu_{G_i}(v) = \min[\max_{u_1} \mu_{F_1 \wedge F_{i1}}(u_1), \max_{u_2} \mu_{F_2 \wedge F_{i2}}(u_2),$$

圖 4(a) 展示了 (7) 式的推理過程： $F_j' \wedge F_{ij}$ 表示 F_j' 與 F_{ij} 的交集； $\max_{uj} \mu_{F_j' \wedge F_{ij}}(u_j)$ 是交集的最高隸屬度並被解釋為 F_j' 與 F_{ij} 之間的適合度 (compatibility) C_{ij} ；而

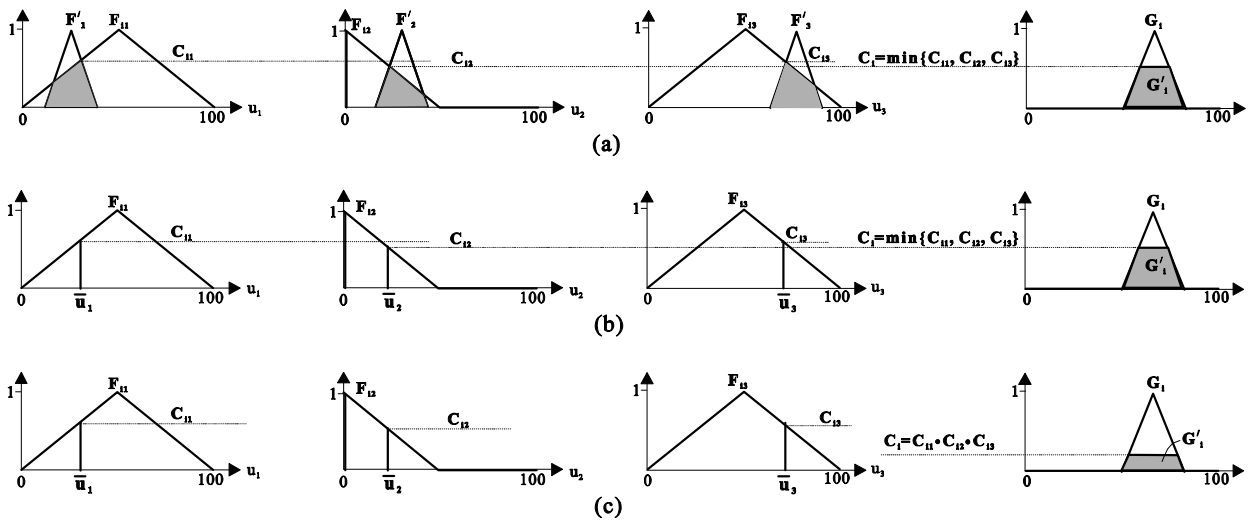


圖 4. 以 (a) t-norm 運算子 “min” 與模糊輸入、(b) t-norm 運算子 “min” 與精確輸入、(c) t-norm 運算子 “product” 與精確輸入進行模糊推理

$\min[\max_{u_1} \mu_{F_1 \wedge F_{11}}(u_1), \max_{u_2} \mu_{F_2 \wedge F_{12}}(u_2), \max_{u_3} \mu_{F_3 \wedge F_{13}}(u_3)]$ 則可看成是法則與事實之間的整體適合度 C_i ，並且 C_i 是用來截切 G_i 以成為 G'_i 。

如果， F'_j 是一個精確值 (i.e., 假設為 \bar{u}_j)，(7) 式變成如下的形式：

$$\mu_{G'_i}(v) = \min[\mu_{F_{11}}(\bar{u}_1), \mu_{F_{12}}(\bar{u}_2), \mu_{F_{13}}(\bar{u}_3), \mu_G(v)] \quad (8)$$

(8)式可以圖 4(b) 來解釋： $\min[\mu_{F_{11}}(\bar{u}_1), \mu_{F_{12}}(\bar{u}_2), \mu_{F_{13}}(\bar{u}_3)]$ 看成是法則與事實之間的整體適合度 C_i ，並且 C_i 是用來截切 G_i 以成為 G'_i 。

如果 “product” 取代 “min” 成為 t-norm 運算子 (i.e., $a \wedge b = a \cdot b$)，式 (6) 應改成：

$$\mu_{G'_i}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F_1}(u_1) \cdot \mu_{F_2}(u_2) \cdot \mu_{F_3}(u_3), \mu_{F_{11}}(u_1) \cdot \mu_{F_{12}}(u_2) \cdot \mu_{F_{13}}(u_3) \cdot \mu_G(v)] \quad (9)$$

同理，如果 F'_j 是一個精確值 \bar{u}_j ，(9) 式變成如下的形式：

$$\mu_{G'_i}(v) = \min[\mu_{F_{11}}(\bar{u}_1) \cdot \mu_{F_{12}}(\bar{u}_2) \cdot \mu_{F_{13}}(\bar{u}_3), \mu_G(v)] \quad (8)$$

(8) 式可由圖 4(c) 來展示： $\min[\mu_{F_{11}}(\bar{u}_1) \cdot \mu_{F_{12}}(\bar{u}_2) \cdot \mu_{F_{13}}(\bar{u}_3)]$ 看成是法則與事實之間的整體適合度 C_i ，並且

C_i 是用來截切 G_i 以成為 G'_i 。

這篇論文中，“product”、“sup-min” 與 “min” 分別被選擇成為 t-norm、composition 與 implication 的運算子。我們不採用較常被使用的 “min” 為 t-norm 運算子，而改採用 “product” 的原因在於每一個輸入的事實都會參與計算 G'_i ，而 “min” 只允許其中之一的輸入事實會去影響 G'_i 的計算。

假設有一個含有 4 個模糊法則的法則庫，如下所示：

- Rule 1 : IF state is medium (F_{11}) AND pressure is weak (F_{12}) AND response is medium (F_{13}) THEN sustainability is good (G_1)
- Rule 2 : IF state is medium (F_{21}) AND pressure is medium (F_{22}) AND response is medium (F_{23}) THEN sustainability is medium (G_2)
- Rule 3 : IF state is good (F_{31}) AND pressure is weak (F_{32}) AND response is powerful (F_{33}) THEN sustainability is very good (G_3)
- Rule 4 : IF state is good (F_{41}) AND pressure is medium (F_{42}) AND response is medium (F_{43}) THEN sustainability is good (G_4)

假設此時有 3 個精確的事實：

- Fact 1 : State is 30.7
- Fact 2 : Pressure is 23.5
- Fact 3 : Response is 71.2

我們將推理過程分成 4 個步驟來解釋 (參見圖 5，E、G、M、

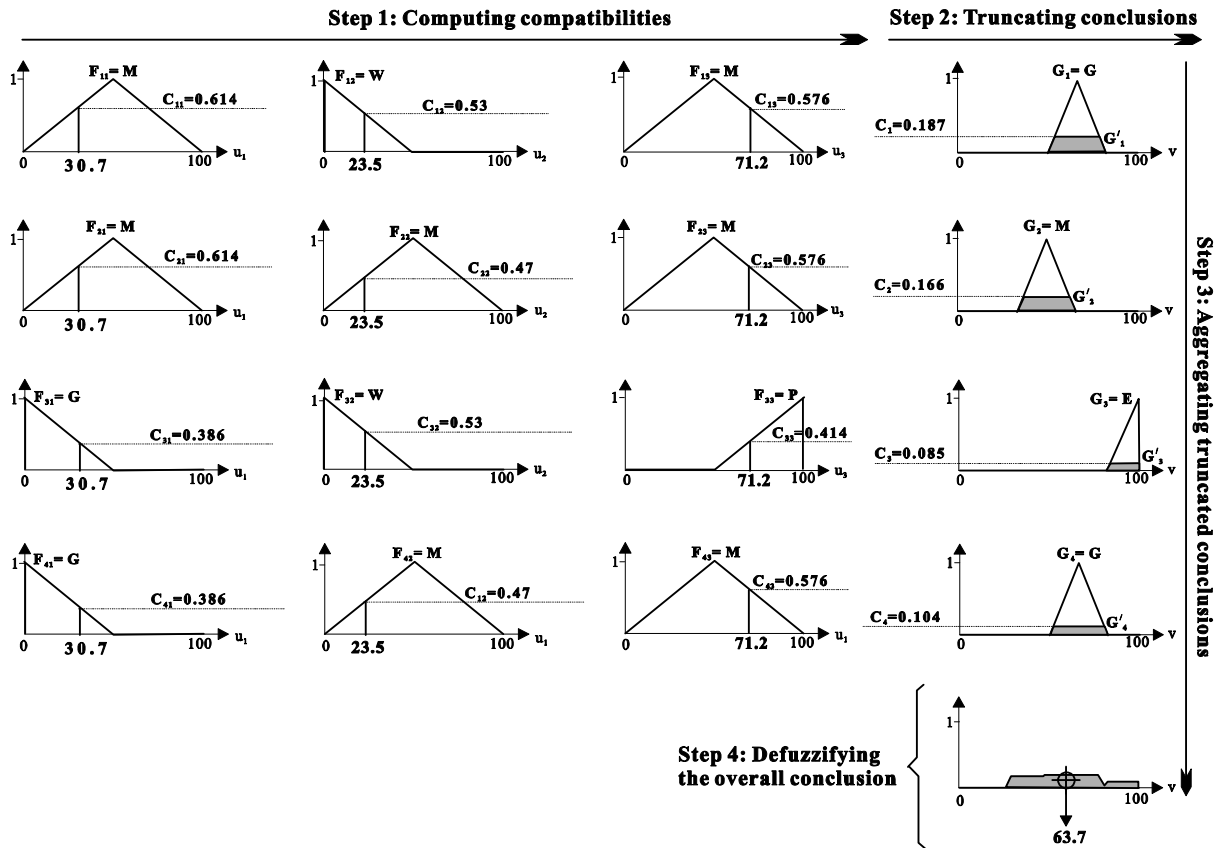


圖 5. 模糊推理的圖形表示法

P 與 W 分別代表模糊集合 “excellent”、“good”、“medium”、“powerful” 與 “weak”):

步驟一：計算適合度：適合度是指有相同語意變數的前件部與事實之間的相似程度，或是指某一個法則與事實之間的適用程度。以 Rule 1 為例，Fact 1 與 “state is F_{11} ” 之間的適合度為 $\mu_{F_{11}}(30.7)=0.614$ ；Fact 2 與 “pressure is F_{12} ” 之間的適合度為 $\mu_{F_{12}}(23.5)=0.53$ ；Fact 3 與 “response is F_{13} ” 之間的適合度為 $\mu_{F_{13}}(71.2)=0.576$ 。Rule 1 與這 3 個事實的整體適合度為 $\mu_{F_{11}}(30.7) \cdot \mu_{F_{12}}(23.5) \cdot \mu_{F_{13}}(71.2)$ ，換言之，0.187。同理，Rules 2、3 與 4 與 3 個事實的整體適合度分別為 0.166、0.085 與 0.104。

步驟二：截切結論：一旦每個法則的整體適合度求出後，代表每個法則的前件部被滿足的程度也已知。如圖 5 所示，以法則適合度去截切原來三角形的結論，而推導出梯形的新的結論。

步驟三：整合截切的結論：這 4 個具有相同語意變數的新結論應該要被整合成一個整體的結論。如同圖 5 所

示，最後的結論是將原 4 個結論採用聯集而得。

步驟四：最後結論的去模糊化：在許多的應用裡，尤其是控制方面，推理出的結論必須是精確值而非模糊值，因此，需要去模糊化的技術 (defuzzification)。所謂去模糊化，是指將模糊集合轉換成精確值的方法。我們將採用重心法 (center of gravity method) 來進行去模糊化，亦即將模糊集合之隸屬度函數的面積取重心。由圖 5 展示了這個去模糊化的結果為 63.7。

四、結果與討論

基於第 2 節提出的環境永續性評估架構與第 3 節介紹的評估方法，238 個國家與他們的 74 個變數被納入考慮評估，如同 2005 年 ESI 報告的作法一樣，資料數少於 45 個的國家將被剔除排序，因此，最後將有 146 個國家將參與評估排序。

執行評估之前，我們就要針對 ESI 提供的原始資料進行前處理，處理原則大致上與 ESI 理念相同，但計算方式不相

劉豐瑞：結合多評準決策與模糊邏輯於環境永續性評估

同，說明如下：(1) 資料遺漏者，採用 Markov Chain Monte Carlo simulation 的推估法來增補資料，共有 30 個變數可以進行增補。無法增補的 44 個變數，以有資料的國家之平均值補之；(2) 資料屬於極端的前後 2.5% 者，以前後 2.5% 之資料代替之；(3) 將每組資料正規化至 0 到 100 之間 ($100 \cdot (x - \text{worst}) / (\text{best} - \text{worst})$)。這種資料處理之方式，其理念是相對性的評分，爲了獲得 146 個國家的環境永續性排名，其計算得之環境永續性得分意義不大。

將每個國家進行評估之後，其輸出是一個介於 0 到 100 之間的數值，而數值愈高代表永續性愈佳。表 3 所列的是這 146 個國家的排名，與 2005 年 ESI 的報告相比較，有 69 個國家的排名上升了 1 至 57 名，而有 74 個國家的排名下降了 1 至 80 名，有 3 個國家的排名沒有變化。詳細的得分情形亦是列在表 3 中的中間 6 行，而每一行的平均值則是列在每一行的最底端。Norway、Finland、Iceland、Canada、Sweden 與 Uruguay 屬於前面的領先群，那是因爲除了 Canada 之外，他們在 5 個分項都有不錯的成績。而落在最後的國家如 Turkmenistan、Haiti、Iraq、North Korea、Uzbekistan 與 Sudan 都是因爲在每個分項的成績都不理想。排名的變動主要原因分析如下：

- (1) ESI 將整個環境系統看成一個整體，將 76 組資料依據現況、驅動力、回應與衝擊的理念再整合成 5 大類(環境系統、減低環境壓力、減低人類脆弱性、社會與制度能力、全球責任)，共 21 個指標(空氣品質、生物多樣性、土地、水質、水量、減低空氣污染壓力、減低生態系統壓力、減低人口壓力、減低廢棄物與消耗壓力、減低水壓力、自然資源管理、環境健康、基本人類營養、自然災害暴露、政府環境管理、生態效率、民營企業責任、科學與技術、參與國際合作、溫室效應氣體排放、減低跨區環境壓力)，最後直接將這 21 個指標的得分平均，獲得最後的環境永續性評估值。
- (2) 本研究是將環境系統先細分成 5 大類(空氣永續性、水永續性、水量永續性、土地與自然資源永續性、生物多樣永續性)，每一大類有其各自的現況、壓力與回應的評估邏輯，於是 76 組資料就依據這個概念去分類在適合的位置。此外，由於缺乏個別對空氣永續性、水永續性、水量永續性、土地與自然資源永續性、生物多樣永續性的回應資料，因此 76 組資料中相關於回應部分的資料組，在對空氣永續性、水永續性、水量永續性、土地與自然資源永續性、生物多樣永續性的

表 3. 146 個國家環境永續性的評估結果

Rank	Country	ES Score	Component Score					ESI Rank	Rank Change
			AQS	WQA	WQNS	LNS	BIOS		
1	Norway	75.48	79.12(A)	79.87(A)	75.87(A)	75.73(A)	66.81(A)	2	-1
2	Finland	74.73	82.70(A)	85.24(A)	55.58(A)	77.89(A)	72.23(A)	1	+1
3	Iceland	74.00	76.05(A)	72.29(A)	86.08(A)	73.75(A)	61.85(A)	5	-2
4	Canada	72.25	73.11(A)	78.95(A)	71.22(A)	69.40(B)	68.57(A)	6	-2
5	Sweden	70.68	81.21(A)	76.03(A)	54.82(A)	75.60(A)	65.75(A)	4	+1
6	Uruguay	70.29	75.54(A)	69.98(A)	71.29(A)	76.60(A)	58.04(A)	3	+3
7	Guyana	68.30	66.99(A)	68.00(A)	59.99(A)	76.19(A)	70.32(A)	8	-1
8	Austria	67.77	77.40(A)	74.58(A)	52.02(A)	73.57(A)	61.27(A)	10	-2
9	Gabon	67.66	62.14(B)	63.53(A)	71.68(A)	72.54(A)	68.41(A)	12	-3
10	Switzerland	67.49	77.50(A)	73.96(A)	50.33(A)	69.48(B)	66.19(A)	7	+3
11	Australia	66.52	65.89(A)	73.22(A)	49.61(A)	74.07(A)	69.81(A)	13	-2
12	Bolivia	66.33	63.61(A)	67.50(A)	58.88(A)	75.15(A)	66.53(A)	19	-7
13	Germany	65.78	73.17(A)	72.51(A)	52.54(A)	72.11(A)	58.57(A)	31	-18
14	Denmark	65.05	76.89(A)	73.39(A)	54.12(A)	65.99(B)	54.84(A)	26	-12
15	Estonia	65.02	77.56(A)	73.76(A)	43.99(A)	73.53(A)	56.24(A)	27	-12
16	New Zealand	64.62	77.39(A)	70.78(A)	59.43(A)	72.77(A)	42.72(B)	14	+2
17	Slovenia	64.58	75.15(A)	68.44(A)	50.46(A)	77.81(A)	51.05(B)	29	-12
18	Brazil	64.41	61.41(B)	67.84(A)	56.55(A)	76.83(A)	59.43(A)	11	+7
19	Panama	64.20	69.13(A)	68.88(A)	48.67(A)	75.12(A)	59.20(A)	28	-9
20	Latvia	64.20	76.66(A)	72.27(A)	38.95(A)	77.95(A)	55.16(A)	15	+5
21	Botswana	63.73	65.59(A)	69.54(A)	39.57(A)	76.44(A)	67.62(A)	34	-13
22	Croatia	63.60	72.61(A)	69.28(A)	43.79(A)	77.76(A)	54.55(A)	20	+2
23	Russia	63.54	64.06(A)	72.26(A)	44.28(A)	77.05(A)	60.08(A)	33	-10
24	Argentina	63.25	72.11(A)	69.05(A)	40.65(A)	75.55(A)	58.89(A)	9	+15
25	Lithuania	63.18	77.36(A)	66.31(A)	39.07(A)	78.86(A)	54.31(A)	23	+2
26	Ireland	63.13	71.31(A)	69.51(A)	48.11(A)	68.50(B)	58.21(A)	21	+5
27	Colombia	63.03	61.19(B)	58.11(B)	58.58(A)	75.35(A)	61.91(A)	22	+5

表 3. 146 個國家環境永續性的評估結果 (續)

Rank	Country	ES Score	Component Score					ESI Rank	Rank Change
			AQS	WQA	WQNS	LNS	BIOS		
28	United States	62.97	66.42(A)	71.72(A)	50.55(A)	67.72(B)	58.41(A)	45	-17
29	Slovakia	62.74	73.28(A)	71.89(A)	39.72(A)	73.09(A)	55.71(A)	49	-20
30	Ecuador	62.56	63.65(A)	64.54(A)	51.30(A)	77.41(A)	55.87(A)	51	-21
31	United Kingdom	62.39	69.20(A)	70.96(A)	51.01(A)	61.67(B)	60.12(A)	66	-35
32	Nicaragua	62.30	61.46(B)	68.78(A)	52.41(A)	73.71(A)	56.14(A)	65	-33
33	Costa Rica	62.28	62.86(A)	59.34(B)	53.17(A)	76.36(A)	59.65(A)	18	+15
34	Netherlands	62.27	68.87(A)	46.45(A)	50.36(A)	66.29(B)	57.38(A)	41	-7
35	France	62.21	73.31(A)	70.43(A)	46.80(A)	64.88(B)	55.61(A)	35	0
36	Namibia	62.19	61.39(B)	66.06(A)	41.41(A)	75.38(A)	66.70(A)	32	+4
37	Venezuela	62.00	63.06(A)	57.83(B)	53.64(A)	72.72(A)	62.73(A)	82	-45
38	Peru	61.80	56.18(B)	62.71(A)	54.04(A)	75.58(A)	60.48(A)	16	+22
39	Japan	61.62	64.43(A)	73.49(A)	49.13(A)	65.64(B)	55.44(A)	30	+9
40	Mongolia	61.09	65.20(A)	67.63(A)	41.00(A)	71.02(A)	60.59(A)	72	-32
41	Bulgaria	61.05	74.55(A)	66.91(A)	37.53(B)	76.36(A)	49.88(B)	70	-29
42	Chile	60.98	64.34(A)	63.92(A)	45.97(A)	77.22(A)	53.43(B)	42	0
43	Paraguay	60.98	60.37(B)	61.30(A)	51.96(A)	72.74(A)	58.51(A)	17	+26
44	Congo	60.66	54.60(B)	56.78(B)	61.84(A)	67.58(B)	62.48(A)	39	+5
45	Portugal	60.47	71.42(A)	70.56(A)	39.39(A)	68.00(B)	52.96(B)	37	+8
46	Hungary	60.45	72.44(A)	67.33(A)	42.79(A)	66.12(B)	53.57(B)	54	-8
47	Poland	60.30	71.40(A)	66.06(A)	41.45(A)	75.77(A)	46.81(B)	104	-57
48	Central Afr. Rep.	59.96	56.81(B)	60.35(B)	50.86(A)	67.78(B)	64.02(A)	25	+23
49	Malaysia	59.91	68.58(A)	60.55(B)	40.21(A)	76.26(A)	53.93(B)	38	+11
50	Albania	59.15	70.76(A)	62.74(A)	32.70(B)	77.82(A)	51.74(B)	24	+26
51	Greece	59.00	69.67(A)	68.37(A)	37.48(B)	66.94(B)	52.56(B)	68	-17
52	Czech Rep.	58.85	72.24(A)	59.92(B)	40.58(A)	68.81(B)	52.71(B)	91	-39
53	South Africa	58.83	63.50(A)	63.96(A)	31.76(B)	73.86(A)	61.06(A)	95	-42
54	Macedonia	58.83	68.01(A)	66.17(A)	37.68(B)	73.99(A)	48.30(B)	90	-36
55	P. N. Guinea	58.78	56.66(B)	59.09(B)	49.54(A)	71.56(A)	57.04(A)	36	+19
56	Armenia	58.70	73.07(A)	64.27(A)	29.39(B)	73.99(A)	52.75(B)	44	+12
57	Oman	58.64	69.55(A)	63.37(A)	27.87(B)	72.19(A)	60.21(A)	83	-26
58	Jordan	58.54	69.43(A)	56.81(B)	29.08(B)	78.09(A)	59.28(A)	84	-26
59	Spain	58.47	69.57(A)	65.70(A)	38.21(A)	64.61(B)	54.25(A)	76	-17
60	Tunisia	58.24	69.56(A)	60.00(B)	27.87(B)	77.20(A)	56.57(A)	55	+5
61	Italy	58.04	65.46(A)	68.56(A)	40.21(A)	61.97(B)	53.98(A)	69	-8
62	Thailand	57.68	63.14(A)	65.12(A)	33.95(B)	75.00(A)	51.19(B)	73	-11
63	Moldova	57.65	76.56(A)	57.83(B)	29.45(B)	74.33(A)	50.08(B)	58	+5
64	Zambia	57.59	58.09(B)	60.09(B)	38.64(A)	71.46(A)	59.67(A)	60	+4
65	Mexico	57.32	65.98(A)	59.10(B)	32.22(B)	74.50(A)	54.79(A)	93	-28
66	Romania	57.20	72.67(A)	57.97(B)	32.62(B)	76.16(A)	46.60(B)	94	-28
67	Turkey	57.03	69.65(A)	58.93(B)	31.93(B)	76.27(A)	48.38(B)	92	-25
68	Serbia & Montenegro	56.74	68.70(A)	56.06(B)	38.77(A)	71.18(B)	49.00(B)	89	-21
69	United Arab Em.	56.64	72.50(A)	59.48(B)	28.79(B)	70.12(A)	52.28(B)	110	-41
70	Bhutan	56.54	61.98(B)	61.47(A)	37.72(B)	70.64(A)	50.87(B)	43	+27
71	Belarus	56.48	69.09(A)	57.90(B)	31.35(B)	74.51(A)	49.55(B)	46	+25
72	Bosnia and Herze	56.48	64.08(A)	60.40(B)	35.96(B)	75.80(A)	46.13(B)	61	+11
73	Honduras	56.41	58.15(B)	57.84(B)	41.90(A)	73.67(A)	50.50(B)	87	-14
74	Sri Lanka	56.34	63.60(A)	62.80(A)	31.59(B)	76.76(A)	46.95(B)	79	-5
75	Ukraine	56.34	74.35(A)	57.31(B)	30.52(B)	72.95(A)	46.56(B)	109	-34
77	South Korea	56.26	59.37(B)	66.56(A)	47.38(A)	65.33(B)	42.67(B)	122	-45
76	Jamaica	56.26	65.78(A)	64.72(A)	34.76(B)	68.83(B)	47.22(B)	108	-32
78	Georgia	56.09	62.27(B)	61.43(A)	28.69(B)	77.94(A)	50.13(B)	56	+22
79	Belgium	56.08	65.53(A)	64.08(A)	37.62(B)	61.65(B)	51.50(B)	112	-33
80	Israel	56.05	68.29(A)	57.34(B)	30.71(B)	64.24(B)	59.67(A)	62	+18
81	Cameroon	55.76	55.70(B)	60.30(B)	37.91(A)	69.70(B)	55.18(A)	50	+31
82	Dominican Rep.	55.66	64.90(A)	59.51(B)	33.45(B)	74.32(A)	46.10(B)	119	-37
83	Ghana	55.32	60.16(B)	58.06(B)	32.46(B)	74.64(A)	51.27(B)	47	+36
84	El Salvador	55.19	59.85(B)	60.45(B)	31.81(B)	72.08(A)	51.78(B)	117	-33
85	Senegal	55.07	60.60(B)	61.05(A)	29.61(B)	72.29(A)	51.80(B)	59	+26
86	Trinidad & Tobago	55.00	65.29(A)	58.87(B)	32.04(B)	56.52(B)	62.30(A)	139	-53
87	Guinea-Bissau	54.72	55.33(B)	54.72(B)	42.74(A)	67.39(B)	53.40(B)	77	+10
88	Tanzania	54.65	57.51(B)	57.00(B)	31.21(B)	71.38(A)	56.15(A)	63	+25
89	Guatemala	54.49	49.10(B)	59.85(B)	36.39(B)	73.08(A)	54.04(A)	116	-27
90	Kazakhstan	54.48	63.12(A)	55.31(B)	26.90(B)	71.57(A)	55.48(A)	78	+12
91	Mozambique	54.31	57.34(B)	56.64(B)	29.16(B)	68.07(B)	60.35(A)	106	-15

表 3. 146 個國家環境永續性的評估結果（續）

Rank	Country	ES Score	Component Score					ESI Rank	Rank Change
			AQS	WQA	WQNS	LNS	BIOS		
92	Saudi Arabia	54.25	67.81(A)	54.91(B)	25.63(B)	70.37(B)	52.50(B)	136	-44
93	Cambodia	54.21	57.03(B)	61.55(A)	34.41(B)	70.62(A)	47.47(B)	67	+26
94	Kenya	54.13	58.10(B)	57.54(B)	26.78(B)	70.20(B)	58.04(A)	100	-6
95	Algeria	53.99	62.23(B)	52.68(B)	25.57(B)	74.24(A)	55.21(A)	96	-1
96	Philippines	53.98	56.72(B)	61.49(A)	34.59(B)	75.44(A)	41.67(B)	126	-30
97	Taiwan	53.91	59.47(B)	42.39(B)	45.24(A)	63.88(B)	58.54(A)	145	-48
98	Malawi	53.89	56.39(B)	55.17(B)	28.41(B)	70.17(B)	59.29(A)	74	+24
99	Laos	53.76	54.77(B)	56.81(B)	41.47(A)	70.85(A)	44.88(B)	52	+47
100	Nepal	53.65	58.20(B)	59.07(B)	24.96(B)	75.32(A)	50.68(B)	85	+15
101	Benin	53.55	53.91(B)	57.79(B)	29.97(B)	74.51(A)	51.55(B)	86	+15
102	Morocco	53.54	65.60(A)	47.97(B)	27.87(B)	76.66(A)	49.59(B)	105	-3
103	India	53.40	56.13(B)	59.62(B)	30.01(B)	73.60(A)	47.66(B)	101	+2
104	Madagascar	53.22	56.15(B)	58.41(B)	34.44(B)	70.11(B)	46.99(B)	64	+40
105	Uganda	53.18	55.67(B)	57.69(B)	25.57(B)	69.92(B)	55.06(A)	57	+48
106	Syria	53.04	61.20(B)	55.08(B)	23.75(B)	73.51(A)	51.65(B)	118	-12
107	Mauritania	52.97	55.87(B)	57.94(B)	27.28(B)	69.16(B)	54.58(A)	124	-17
108	Zimbabwe	52.96	56.21(B)	56.88(B)	26.41(B)	69.45(B)	55.85(A)	128	-20
109	Azerbaijan	52.61	61.00(B)	56.11(B)	25.35(B)	69.08(B)	51.54(B)	98	+11
110	Kyrgyzstan	52.57	56.45(B)	56.63(B)	27.65(B)	71.13(A)	50.97(B)	80	+30
111	Libya	52.45	57.15(B)	52.32(B)	23.85(B)	70.44(B)	58.50(A)	125	-14
112	Bangladesh	52.42	57.50(B)	57.84(B)	27.95(B)	73.27(A)	45.52(B)	113	-1
113	Côte d'Ivoire	52.39	55.70(B)	57.14(B)	29.66(B)	72.03(A)	47.40(B)	88	+25
114	Mali	52.37	54.92(B)	57.86(B)	27.39(B)	67.74(B)	53.96(A)	40	+74
115	Gambia	52.29	56.97(B)	56.77(B)	27.28(B)	68.68(B)	51.77(B)	71	+44
116	Indonesia	52.01	54.71(B)	48.78(B)	32.91(B)	73.79(A)	49.87(B)	75	+41
117	Lebanon	51.95	60.61(B)	53.56(B)	29.71(B)	65.29(B)	50.57(B)	129	-12
118	Cuba	51.93	67.60(A)	63.84(A)	27.70(B)	59.14(B)	41.39(B)	53	+65
119	Sierra Leone	51.49	52.27(B)	52.23(B)	40.84(a)	64.93(B)	47.18(B)	121	-2
120	Burkina Faso	51.48	54.36(B)	53.82(B)	30.11(B)	68.61(B)	50.50(B)	97	+23
121	Pakistan	51.27	57.06(B)	51.47(B)	25.89(B)	73.21(A)	48.74(B)	131	-10
122	Viet Nam	51.10	55.71(B)	54.81(B)	27.08(B)	74.26(A)	43.62(B)	127	-5
123	Rwanda	50.94	54.59(B)	55.02(B)	25.64(B)	67.16(B)	52.31(B)	107	+16
124	Angola	50.89	47.03(B)	74.06(B)	41.14(A)	61.61(B)	57.59(A)	123	+1
125	Togo	50.76	55.82(B)	54.36(B)	26.63(B)	69.55(B)	47.43(B)	111	+14
126	Ethiopia	50.45	55.21(B)	52.97(B)	25.84(B)	66.80(B)	51.42(B)	135	-9
127	Guinea	50.29	53.69(B)	53.65(B)	30.25(B)	65.67(B)	48.19(B)	81	+46
128	Myanmar	50.24	51.28(B)	53.26(B)	29.18(B)	71.34(A)	46.10(B)	48	+80
129	Kuwait	50.10	66.35(A)	60.91(A)	25.12(B)	47.59(B)	50.55(B)	138	-9
130	Egypt	50.06	55.50(B)	51.38(B)	27.47(B)	57.62(B)	58.32(A)	115	+15
131	Liberia	49.97	50.77(B)	48.15(B)	44.18(A)	61.41(B)	45.36(A)	120	+11
132	Niger	49.73	52.47(B)	51.73(B)	25.00(B)	66.45(B)	53.02(B)	103	+29
133	Nigeria	49.66	53.19(B)	52.37(B)	25.01(B)	73.24(A)	44.48(B)	99	+34
134	Iran	49.46	50.73(B)	53.88(B)	25.96(B)	66.26(B)	50.49(B)	132	+2
135	Tajikistan	48.87	55.66(B)	52.65(B)	23.14(B)	62.59(B)	50.32(B)	134	+1
136	Chad	46.68	51.80(B)	50.31(B)	25.31(B)	64.28(B)	51.70(B)	102	+34
137	China	48.55	41.87(B)	53.63(B)	27.59(B)	70.61(A)	49.04(B)	133	+4
138	Yemen	48.26	51.81(B)	51.29(B)	23.99(B)	64.75(B)	49.43(B)	137	+1
139	Burundi	48.06	52.20(B)	49.01(B)	23.47(B)	62.45(B)	53.16(B)	130	+9
140	Dem. Rep. Congo	48.02	51.22(B)	48.72(B)	25.54(B)	60.00(B)	54.60(A)	114	+26
141	Sudan	47.13	49.38(B)	50.23(B)	21.55(B)	64.43(B)	50.04(B)	140	+1
142	Uzbekistan	46.74	53.02(B)	51.38(B)	24.55(B)	51.54(B)	53.21(B)	142	0
143	North Korea	45.74	46.30(B)	50.32(B)	24.81(B)	66.74(B)	40.53(B)	146	-3
144	Iraq	45.16	55.18(B)	45.43(B)	20.14(B)	62.42(B)	42.65(B)	143	+1
145	Haiti	44.72	52.99(B)	49.92(B)	22.97(B)	65.16(B)	32.56(B)	141	+4
146	Turkmenistan	42.75	49.46(B)	46.57(B)	20.76(B)	48.22(B)	48.73(B)	144	+2
average		(57.17)	(62.83)	(60.82)	(37.78)	(70.49)	(53.94)		

評估中，會被重複使用，換言之，政府或民間較重視環境永續性的國家，排名會前進。在資料不足的限制下，本研究認為對於國家尺度的環境評估而言，這是

可以接受且合理的，因為若是一個政府或民間重視環境污染的問題，通而不會只限定在單一項目。最後，本研究認為本文提出的整合式評估架構來進行環境永

續性評估較為合理。

在表 3 中，每個國家的每個分項的成績後面若被標示著“A”，代表這個成績在這個分項的平均值之上；反之，若是這個成績在這個分項的平均值之下，將被標示著“B”。基於這樣的分類，146 個國家被概略分為 6 個群集，如表 4 所示。舉例來說，所有分項都獲得“A”的國家，代表他們在每個分項的都優於平均值，因此被歸類為群集 1，這些國家可被其他國家視為典範。而群集 2 則是那些有 4 個“A”與 1 個“B”的國家的集合，依此類推。沒有位於群集 1 的國家應重視其較差的分項，而參考分數較高的國家的政策工具、科技與方法來進行改善。在排名前 40 的國家，雖然整體環境永續性的分數較高，但是有 19 個國家如 Canada、Gabon 與 Switzerland 等未能進入群集 1，這是因為這 19 個國家都有 1 至 2 個分項的表現低於平均水準的原因。

雖然沒有明確的統計上的關聯，去證明一個國家的環境永續性的表現與其人口密度（population density）或是平均每人國內生產毛額（per capita GDP）有強烈的相關性，表 5

顯示了高人口密度或是高平均每人國內生產毛額的國家似乎與環境永續性的表現有關聯。在表 5 的左半邊代表了人口密度超過每平方公里 200 人的國家，有個較低的環境永續性分數，那是因為他們有著嚴重的環境污染問題與較強的環境壓力所致。儘管如此，有些已開發國家如 Germany、United Kingdom、Netherlands 與 Japan，雖然有著高度的人口密度，卻依然能夠有效的管理其環境上的挑戰。另一方面，在表 5 的右半邊代表了較為富有的國家，他們的平均每人國內生產毛額超過 2500 元美金，有著較高的環境永續性分數。換言之，較富有的國家較願意對環境污染控制來投資資金。

五、結論

在本論文中，我們提出一個同時考慮空氣品質、水質、水量、土地使用與自然資源與生物多樣性的環境永續性評估架構。這個評估架構被視為一種半結構決策，含有 36 個結構決策點與 5 個非結構決策點。這 36 個結構決策點以多評準決策法來處理，而 5 個非結構決策點以模糊邏輯來處理

表 4. 146 個國家環境永續性的群集分析

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6
5A	4A1B	3A2B	2A3B	1A4B	5B
Norway Finland Iceland Sweden Uruguay Guyana Austria Australia Bolivia Germany Estonia Panama Latvia Botswana Croatia Russia Argentina Lithuania Slovakia Ecuador Mongolia (66.52)	Canada Gabon Switzerland Denmark New Zealand Slovenia Brazil Ireland United States United Kingdom Nicaragua Costa Rica Namibia Venezuela Peru Japan Chile Paraguay Poland South Africa Oman Spain Italy (62.7)	Colombia Bulgaria Portugal Hungary Malaysia Albania Macedonia P. N. Guinea Armenia Jordan Tunisia Thailand Zambia Mexico Serbia & Monteneg. Sri Lanka Kazakhstan (58.66)	Congo Central Afr. Rep. Greece Czech Rep. Moldova Romania Turkey Bhutan Belarus Bosnia and Herze. Honduras Ukraine Jamaica South Korea Georgia Belgium Israel Cameroon Dominican Rep. Senegal Trinidad & Tobago Tanzania Guatemala Cambodia Algeria Philippines Taiwan Laos Morocco Cuba Angola Kuwait (55.63)	United Arab Em. Ghana El Salvador Guinea-Bissau Mozambique Saudi Arabia Kenya Malawi Nepal Benin India Uganda Syria Mauritania Zimbabwe Kyrgyzstan Libya Bangladesh Côte d'Ivoire Mali Indonesia Sierra Leone Pakistan Viet Nam Myanmar Egypt Liberia Nigeria China Dem. Rep. Congo (52.52)	Madagascar Azerbaijan Cambia Lebanon Burkina Faso Rwanda Togo Ethiopia Guinea Niger Iran Tajikistan Chad Yemen Burundi Sudan Uzbekistan North Korea Iraq Haiti Turkmenistan (49.01)

表 5. 人口密度、平均每人國內生產毛額與環境永續性的關係

Country	Population Density [†]	ES Score	Rank	Country	Per Capita GDP [‡]	ES Score	Rank
Bangladesh	1,002	52.42	112	Norway	\$61,852	75.48	1
Taiwan	636	53.91	97	Switzerland	\$52,879	67.49	10
South Korea	491	56.26	77	Iceland	\$52,063	74.00	3
Netherlands	395	62.27	34	Ireland	\$50,303	63.13	26
Lebanon	367	51.95	117	Denmark	\$49,182	65.05	14
Belgium	339	56.08	79	Sweden	\$42,392	70.68	5
Japan	337	61.62	39	United States	\$41,917	62.97	28
India	328	53.40	103	Austria	\$39,292	97.77	8
Rwanda	320	50.94	123	Finland	\$39,098	74.73	2
El Salvador	318	55.19	84	Netherlands	\$38,320	62.27	34
Sri Lanka	305	56.34	74	United Kingdom	\$38,098	62.39	31
Israel	302	56.05	80	Belgium	\$37,730	56.08	79
Philippines	292	53.98	96	Japan	\$37,566	61.62	39
Haiti	292	44.72	145	France	\$35,727	62.21	35
Viet Nam	253	51.10	122	Germany	\$35,075	65.78	13
Jamaica	248	56.26	76	Canada	\$34,028	72.25	4
United Kingdom	243	62.39	31	Australia	\$33,629	66.52	11
Germany	230	65.78	13	Italy	\$31,874	58.04	61
Burundi	228	48.06	139	Spain	\$27,074	58.47	59
Trinidad & Tobago	212	55.00	86	New Zealand	\$26,291	64.62	16
Pakistan	202	51.27	121				
average		(55.00)	(88.0)	average		(65.58)	(24.0)
[†] Unit: persons per square kilometer Source: Central Intelligence Agency (CIA), USA (The World Factbook 2005)				[‡] Unit: US dollars Source: International Monetary Fund (World Economic Outlook Database, April 2005)			

之。最後，結合多評準決策與模糊邏輯的方法是我們提出的解決方案。

基於這個整合式的架構，我們評估與分析了 146 個國家的環境永續性的表現：Norway、Finland、Iceland、Canada、Sweden 與 Uruguay 屬於領先群；反之，Turkmenistan、Haiti、Iraq、North Korea、Uzbekistan 與 Sudan 則敬陪末座。這個評估結果亦可提供每個國家持續改善的參考。

誌謝

作者感謝中華民國國家科學委員會的部分贊助（NSC 94-2211-E-212-005）。

參考文獻

- Andriantiatsaholiniaina, L. A., V. S. Kouikoglou and A. P. Phillis (2004) Evaluating strategies for sustainable development, fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis. *Ecological Economics*, 48, 149-172.
- Cornelissen, A. M. G., J. van den Berg, W. J. Koops, M. Grossman and H. M. J. Udo (2001) Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development, a novel approach using fuzzy set theory. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 86, 173-185.
- Duceya, M. J. and B. C. Larson (1999) A fuzzy set approach to the problem of sustainability. *Forest Ecology and Management*, 115, 29-40.
- Ferrarini, A., A. Bodini and M. Becchi (2001) Environmental quality and sustainability in the province of Reggio Emilia (Italy): Using multi-criteria analysis to assess and compare municipal performance. *Journal of Environmental Management*, 63, 117-131.
- Hwang, C. L. and K. Yoon (1981) Multiple attribute decision making. In: *Lectures Notes in Economics and Mathematical Systems*, 186. M. Beckman, H.P. Kunzi and W. KRELLE Eds. Springer-Verlag, Berlin.
- International Institute for Sustainable Development (IISD) (2003) Dashboard of Sustainability. Consultative Group on Sustainable Development Indicators, <http://www.iisd.org/cgsdi/dashboard.asp>.
- Mamdani, E. H. (1977) Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 26(12), 1182-1191.
- O'Laughlin, J., R. L. Livingston, R. Thier, J. Thornton, D. E. Towell and L. Morelan (1994) Defining and measuring forest health. *Sustainable Forestry*, 2(1/2), 65-85.
- Phillis, Y. A. and L. A. Andriantiatsaholiniaina (2001)

- Sustainability: An ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, 37, 435-456.
10. Prescott-Allen, R. (1997) Barometer of sustainability, measuring and communicating well-being and sustainable development. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), Cambridge. Downloaded at www.iucn.org.
 11. Reynolds, K. M., K. N. Johnson and S. N. Gordon (2003) The science/policy interface in logic-based evaluation of forest ecosystem sustainability. *Forest Policy and Economics*, 5, 433-446.
 12. Saaty, T. L. (1990) *The Analytic Hierarchy Process*, Pegramon Press, New York, NY.
 13. Tsamboulas, D. and G. Mikroudis (2000) EFECT: Evaluation framework of environmental impacts and costs of transport initiatives. *Transportation Research Part D*, 5, 283-303.
 14. Turban, A. (2003) *Decision Support Systems and Intelligent Systems*, Prentice Hall, New Jersey, NJ.
 15. United Nation (UN) (1992) Agenda 21. Economic and Social Development Division for Sustainable Development. <http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm>
 16. William, R. E. and W. Mathis (1994) Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy. In: *The Ecological Economics Approach to Sustainability*, A. Jansson, M. Hammer, C. Folke and R. Costanza Eds, Island Press, Washington D.C.
 17. World Commission on Environment and Development (WCED) (1987) *Our Common Future*, Oxford University Press, UK.
 18. World Economic Forum (WEF) (2005) Environmental Sustainability Index, <http://www.yale.edu/esi>.
 19. Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
 20. Zadeh, L. A. (1973) Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 28-44.
 21. Zadeh, L. A. (1975) The concepts of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 199-249.
- 收件：94.08.10 修正：94.10.05 接受：94.11.09

附錄：2005 年環境永續性指數（ESI）的指標與變數 [18]

1 Environmental Systems

1.1 Air Quality

- NO2 (1): Urban population weighted NO2 concentration
- SO2 (2): Urban population weighted SO2 concentration
- TSP (3): Urban population weighted TSP concentration
- INDOOR (4): Indoor air pollution from solid fuel use

1.2 Biodiversity

- ECORISK (5): Percentage of country's territory in threatened ecoregions
- PRTBRD (6): Threatened bird species as percentage of known breeding bird species in each country
- PRTMAM (7): Threatened mammal species as percentage of known mammal species in each country
- PRTAMPH (8): Threatened amphibian species as percentage of known amphibian species in each country
- NBI (9): National Biodiversity Index

1.3 Land

- ANTH10 (10): Percentage of total land area (including inland waters) having very low anthropogenic impact
- ANTH40 (11): Percentage of total land area (including inland waters) having very high anthropogenic impact

1.4 Water Quality

- WQ_DO (12): Dissolved oxygen concentration
- WQ_EC (13): Electrical conductivity
- WQ_PH (14): Phosphorus concentration
- WQ_SS (15): Suspended solids

1.5 Water Quantity

- WATAVL (16): Freshwater availability per capita
- GRDAVL (17): Internal groundwater availability per capita

2 Reducing Environmental Stresses

2.1 Reducing Air Pollution

- COALKM (18): Coal consumption per populated land area
- NOXKM (19): Anthropogenic NOx emissions per populated land area
- SO2KM (20): Anthropogenic SO2 emissions per populated land area
- VOCKM (21): Anthropogenic VOC emissions per populated land area
- CARSKM (22): Vehicles in use per populated land area

2.2 Reducing Ecosystem Stress

- FOREST (23): Annual average forest cover change rate from 1990 to 2000
- ACEXC (24): Acidification exceedance from anthropogenic sulfur deposition

2.3 Reducing Population Pressure

- GR2050 (25): Percentage change in projected population 2004-2050
- TFR (26): Total Fertility Rate

2.4 Reducing Waste and Consumption Pressures

- EFPC (27): Ecological Footprint per capita
- RECYCLE (28): Waste recycling rates
- HAZWST (29): Generation of hazardous waste

2.5 Reducing Water Stress

- BODWAT (30): Industrial organic water pollutant (BOD) emissions per available freshwater
- FERTHA (31): Fertilizer consumption per hectare of arable land
- PESTHA (32): Pesticide consumption per hectare of arable land
- WATSTR (33): Percentage of country under severe water stress

2.6 Natural Resource Management

- OVRFSH (34): Productivity overfishing

- FORCERT (35): Percentage of total forest area that is certified for sustainable management
- WEFSUB (36): World Economic Forum Survey on subsidies
- IRRSAL (37): Salinized area due to irrigation as percentage of total arable land
- AGSUB (38): Agricultural subsidies
- 3 Reducing Human Vulnerability }
 - 3.1 Environmental Health
 - DISINT (39): Death rate from intestinal infectious diseases
 - DISRES (40): Child death rate from respiratory diseases
 - U5MORT (41): Children under five mortality rate per 1,000 live births
 - 3.2 Basic Human Sustenance
 - UND_NO (42): Percentage of undernourished in total population
 - WATSUP (43): Percentage of population with access to improved drinking water source
 - 3.3 Environment-Related Natural Disaster Vulnerability
 - DISCAS (44): Average number of deaths per million inhabitants from floods, tropical cyclones, and droughts
 - DISEXP (45): Environmental Hazard Exposure Index
- 4 Social and Institutional Capacity
 - 4.1 Environmental Governance (EG)
 - GASPR (46): Ratio of gasoline price to world average
 - GRAFT (47): Corruption measure
 - GOVEFF (48): Government effectiveness
 - PRAREA (49): Percentage of total land area under protected status
 - WEFGOV (50): World Economic Forum Survey on environmental governance
 - LAW (51): Rule of law
 - AGENDA21 (52): Local Agenda 21 initiatives per million people
 - CIVLIB (53): Civil and Political Liberties
 - CSDMIS (54): Percentage of variables missing from the CGSDI “Rio to Joburg Dashboard”
 - IUCN (55): IUCN member organizations per million population
 - KNWLDG (56): Knowledge creation in environmental science, technology, and policy
 - POLITY (57): Democracy measure
 - 4.2 Eco-Efficiency (EE)
 - ENEFF (58): Energy efficiency
 - RENPC (59): Hydropower and renewable energy production as a percentage of total energy consumption
 - 4.3 Private Sector Responsiveness (PSR)
 - DJSGI (60): Dow Jones Sustainability Group Index (DJSGI)
 - ECOVAL (61): Average Innovest EcoValue rating of firms headquartered in a country
 - ISO14 (62): Number of ISO 14001 certified companies per billion dollars GDP (PPP)
 - WEFPRI (63): World Economic Forum Survey on private sector environmental innovation
 - RESCARE (64): Participation in the Responsible Care Program of the Chemical Manufacturer's Association
 - 4.4 Science and Technology (ST)
 - INNOV (65): Innovation Index
 - DAI (66): Digital Access Index
 - PECR (67): Female primary education completion rate
 - ENROL (68): Gross tertiary enrollment rate
 - RESEARCH (69): Number of researchers per million inhabitants
- 5 Global Stewardship
 - 5.1 Participation in International Collaborative Efforts (PIC)
 - EIONUM (70): Number of memberships in environmental intergovernmental organizations
 - FUNDING (71): Contribution to international and bilateral funding of environmental projects and development aid

●PARTICIP (72): Participation in international environmental agreements

5.2 Greenhouse Gas Emissions (GGE)

●CO2GDP (73): Carbon emissions per million US dollars GDP

●CO2PC (74): Carbon emissions per capita

5.3 Reducing Transboundary Environmental Pressures (TEP)

●SO2EXP (75): SO2 Exports

●POLEXP (76): Import of polluting goods and raw materials as percentage of total imports of goods and services