

基於生物物理方法的澳門可持續性分析

李金平

摘要：澳門是資源缺乏的人口高度密集的城市，其生命支援系統幾乎完全依賴進口。近年，澳門經歷了快速的經濟繁榮和社會發展，澳門如何能克服其自身的缺點而生存？本文應用H.T.Odum創立的基於生物物理原理的能值(Emergy)分析理論和方法，從城市生態系統的理论出發，對澳門的能值流進行了系統分析研究，通過一系列能值指標，評價澳門城市生態系統自然環境和社會經濟可持續發展的狀況，為澳門制定發展策略和產業調整提供科學指導依據。2003年澳門城市生態系統應用能值為 220×10^{20} sej (Solar emjoules, 太陽能焦耳, 縮寫為sej), 輸入的購買能值有 216×10^{20} sej, 出口能值為 140×10^{20} sej。旅遊博彩業為澳門帶來52.1億美元的收益, 能值收益為 86.5×10^{20} sej, 而遊客只消費能值 32.6×10^{20} sej, 旅遊博彩業巨大的能值淨收益為 53.9×10^{20} sej, 旅遊博彩業的貢獻衝擊比率為2.65。研究還發現, 以相同的貨幣進行商品交換, 中國大陸與澳門的能值交換比率是1.8倍。澳門旅遊博彩業的能值剩餘和澳門與中國大陸的能值交換優勢, 是維持澳門生態經濟系統的關鍵因素。最後對澳門的可持續發展狀況進行了討論。

關鍵詞：能值 能值指標 生物物理方法 城市生態系統 可持續性 澳門

前言

城市必須仰賴城市以外的生態系統，從周圍輸入越來越多的資源，同時大量積累物質和廢棄物¹。Odum(1996)論述了城市是一個非自養的生態系統，脫離為其提供能量、食物、原料和排放廢棄物的偏遠地域的穩定的聯繫，城市的自組織體系將不能維繫²。基於生物物理原理，Odum創立了能值分析方法。能值(Emergy)是指某種流動或貯存的能量中所包含的另一種能量的數量，稱為該能量的能值。能值分析認為所有系統中關聯的能量決定系統的能值價值，能值是宇宙間量度自然和社會真正財富的共同基礎³。能值分析為量化生態系統的生產和服務價值提供了能量基礎。自從80年代起，能值分析被廣泛用於分析生態、產業和經濟系統^{1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}。過去十多年，人類發展和資源環境之間綜合的尺度和複雜性已經增加。離開了城市經濟存

李金平，澳門大學科技學院博士生，中國生態學會理事，澳門科技協進會常務理事。

在的資源基礎-生態系統，難以充分地認識城市經濟系統。生態系統能夠提供人類生態服務例如能源、食物、水，保持大氣的空氣品質，維持農業和營養循環，它們服務人類經濟體系的功能是不可替代的⁵。

20世紀90年代以來，城市可持續性的研究引起各界的普遍關注，嘗試解釋其真實含義成為研究的熱點。1996年H.T.Odum之著作“環境核算”詳細介紹了能值分析的方法²。能值分析途徑是一種重要的基於生物物理原理的生態經濟評價方法，在生態學中具有較廣泛的適用性，尤其用於市場方法難以估價的許多自然資源的評價，不失為一種有效途徑⁹。基於能值分析的指數或比率能夠量度生態環境和經濟的貢獻，並在兩者之間進行公平比較¹¹。

澳門由澳門半島、路環島、氹仔島和路氹填海區構成，總面積27.3 km²，人口441,600人。澳門資源缺乏，人口眾多。澳門農業10年前已消失，漁業伴隨南中國海生物資源的衰退而逐年滑落。澳門第三產業高度發達，近十年來旅遊博彩業(以下簡稱旅遊業)超越製造業逐漸發展成為支柱產業¹²。2003年入境旅客11,887,876人，旅客人均非博彩消費1,518澳門元(1美元=8.033澳門元)。澳門作為以旅遊為龍頭產業的消費性城市，旅遊業毛收入高達58.2億美元¹²，佔澳門2003年全年生產總值的73.7%。旅遊業的巨大收益和連鎖帶動效應，帶動了澳門經濟的快速增長，2003年經濟增長率高達14%。隨著中國內地與澳門“關於更緊密的經貿關係安排(CEPA)”正式簽署，中國大陸居民到港澳“自由行”為澳門特區帶來大量的能值財富收益。本文嘗試運用能值核算方法，探索澳門如何克服資源短缺的劣勢，維繫城市環境經濟的可持續發展。

一、方法

能值(Emergy)是指某種流動或貯存的能量中所包含的另一種能量的數量，稱為該能量的能值。各種的能量均直接或間接源於太陽能，常以太陽能來衡量各種能量的能值；任何資源、產品或勞務形成所需的直接或間接太陽能之量，就是其所具有的太陽能值(Solar emergy)，單位為太陽能焦耳(Sej)²。

(一) 物質和貨幣的能值計算方法

能值轉換率(Transformity)表示單位能量(J)或物質(g)所具有的能值，即單位能量或物質由多少太陽能值轉化而來，它是度量能量品質和等級的尺度。

$$M = E \quad (1)$$

M 表示能值，表示能值轉換率，E代表能量或物質的品質。

經濟系統的能值投入計算是以貨幣量(C)乘該國或地區的能值貨幣比率，見下式：

$$M = C (M/\$) \quad (2)$$

如形成1J木材的能量需要34900 Sej，那麼木材的能值轉換率就是34900 Sej/J。能值分析理論是以自然價值為基礎，將系統中各種生態流和經濟流轉換為能值，對自然環境生產與人類經濟活動進行統一評價，定量分析其結構、功能與生態經濟效益¹³。城市生態系統能值分析的基本步驟是：

- (1)資料的收集、整理、分類。資料主要來自澳門統計年鑒及相關的網頁⁹；
- (2)繪製能量系統圖；
- (3)編制能值評價表，列出研究對象的主要能量來源；
- (4)對系統和子系統能值進行歸併和分類；
- (5)建立反映城市生態、社會和經濟的能值指標綜合體系。

(二) 旅遊業的能值分析

外來遊客消費食物、水、電、交通設施和日常用品。旅遊業消耗的物質和能量之能值可被認為是能值出口¹⁴。對於一個國家或地區，旅遊業帶來的貨幣收入及其所包含的能值被認為是外來能值投入¹⁵，筆者認為既然能值流和貨幣流是反向流動的²，遊客在消費物質和服務的同時，支付貨幣，所以旅遊業與遊客之間的能值交換應是雙向流動的，雙向流動的能值量並不一定相等。遊客的貨幣不斷流入旅遊地，而旅遊地同時不斷地提供物質能值和服務能值予遊客(可視為能值出口，其過程發生於旅遊地)。特別是像澳門這樣以旅遊業為龍頭產業的地區，2003年的遊客人數是本地居民的26倍，遊客消費的能值即旅遊業服務遊客的能值應該單列來計算。澳門旅遊業服務遊客能值(即遊客消費能值)佔澳門總能值的比率由下式導出：

$$R_t = Tdr / (Tdr + 365P) \quad (3)$$

R_t 表示遊客消耗的能值比率， T 代表澳門遊客人數， d 代表遊客平均逗留澳門時間。 r 為遊客的消費係數(澳門居民的消耗係數設為1)，它表示遊客消費是本地居民消費的倍數。遊客消費能值 E_t 由下式求出：

$$M_t = UR_t \quad (4)$$

U 為系統利用總能值。根據黃書禮教授的建議，反映澳門旅遊業的貢獻衝擊指標引用澳門旅遊業的能值交換率(EER)，定義為旅遊業收益能值與支付能值(遊客消費能值)之比：

$$\text{旅遊業的EER} = C_t(M/\$) / M_t \quad (5)$$

C_t 表示旅遊業的貨幣收入， $M/\$$ 表示全球能值貨幣比率。

二、資料及計算

澳門自然環境與經濟的能量綜合系統圖，見圖1。澳門本身沒有農業，水、食品、燃料、原材料和商品幾乎完全依賴進口。同時有一些加工產品出口，整體系統靠外界輸入的能流來推動。分析澳門的進出口情況，可基本掌握澳門城市系統的能流物流狀況。根據國際分類系統，澳門進出口商品分為97類。表1為澳門可更新資源能值分析表，表2為進出口能值的匯總。表3是澳門能值匯總表。表4為澳門、美國、意大利¹⁶、瑞典¹⁷有關能值指標及其計算公式。經過一系列的計算、分析處理等工作，得到澳門城市生態系統主要能值指標。澳門有關的資料來自澳門統計局、澳門港務局和澳門氣象局。

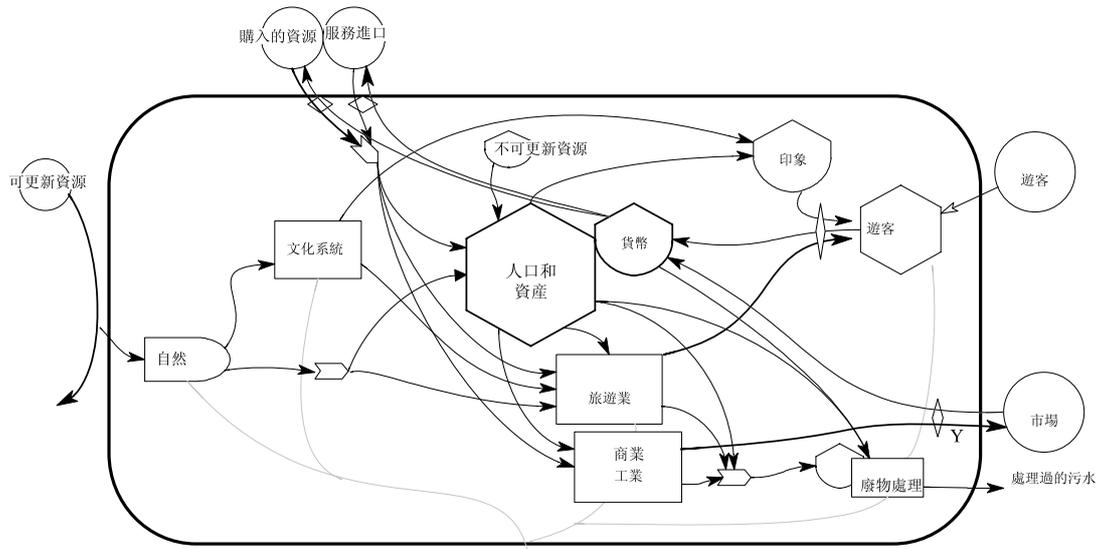


圖1 澳門環境經濟能量系統圖(實線為能值流，虛線為貨幣流)

表1 2003年澳門可更新和不可更新資源能值統計表

| 可更新資源 | 原始資料 (J, g) | 能值轉換率 (Sej/unit) | 能值轉換率 的依據 | 能值 (sej/a) | 能值貨幣 價值 (em\$/a) |
|----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| 1.太陽能 ^a | 1.20×10^{17} | 1 | Odum, 1996 | 1.20×10^{17} | 2.31×10^4 |
| 2.風能 ^b | 4.55×10^{14} | 623 | Odum, 1996 | 6.80×10^{16} | 2.45×10^5 |
| 3.雨水化學能 ^c | 2.01×10^{14} | 18199 | Odum, 1996 | 3.10×10^{18} | 1.12×10^6 |
| 4.雨水勢能 ^d | 3.04×10^{14} | 8888 | Odum, 1996 | 2.70×10^{17} | 9.72×10^5 |
| 5.波浪能 ^e | 9.12×10^{14} | 25889 | Odum, 1996 | 2.36×10^{19} | 8.48×10^6 |
| 6.地球循環能 ^f | 3.96×10^{13} | 29000 | Odum, 1996 | 1.35×10^{18} | 4.84×10^5 |
| 總計： (3+5+6) | 1.15×10^{15} | | | 2.80×10^{19} | 1.01×10^7 |
| 不可更新資源 | | | | | |
| 1.採石 (g) | 3.60×10^{11} | 1.00×10^9 | Odum, 1996 | 3.60×10^{20} | 1.29×10^8 |
| 2.表土損失 | 1.90×10^{09} | 6.25×10^4 | Odum, 1996 | 1.19×10^{14} | 4.27×10 |
| 總計： (1+2) | 3.62×10^{11} | 1.00×10^9 | | 3.60×10^{20} | 1.29×10^8 |

^a太陽能(J)=(面積)×(輻射量)×(1-反射率)=($2.73 \times 10^7 \text{m}^2$)×($1.31 \times 10^6 \text{kcal/m}^2/\text{y}$)×(1-20%)×(4186J/kcal) = $1.20 \times 10^{17} \text{J}$

^b風能 (J) = (面積) × (密度) × (擴散係數) × (風速³)
 = ($2.73 \times 10^7 \text{m}^2$) × (1.3kg/m^3) × (1.00×10^{-3}) × (4.44mps) × ($3.15 \times 10^7 \text{s/yr}$) = $2.25 \times 10^{14} \text{J/yr}$

$$\begin{aligned}
 \text{°雨水化學能 (J)} &= (\text{面積}) \times (\text{年降雨量}) \times (\text{吉布斯自由能}) \\
 &= (2.73 \times 10^7 \text{m}^2) \times (1.49 \text{m}) \times (1000 \text{kg/m}^3) \times (4.94 \times 10^3 \text{J/kg}) = 2.01 \times 10^{14} \text{ J/yr}^d \\
 \text{雨水勢能(J)} &= (\text{面積}) \times (\text{年降雨量}) \times (\text{平均高度}) \times (\text{重力加速度}) \times (\text{雨水密度}) \\
 &= (2.73 \times 10^7 \text{m}^2) \times (1.49 \text{m}) \times (1000 \text{kg/m}^3) \times (763 \text{m}) \times (9.8 \text{m/s}^2) = 3.04 \times 10^{14} \text{ J/yr} \\
 \text{°波浪能(J)} &= (\text{海岸長度}) \times (1/8)(\text{密度}) \times (\text{地心吸力}) \times (\text{浪高}^2) \times (\text{速率}) \\
 &= (4.16 \times 10^4 \text{m}) \times (1/8) \times (1.025 \times 10^3 \text{kg/m}^3) \times (9.8 \text{ m/sec}^2) \times (0.5 \text{m})^2 \times (2.21 \text{m/s}) \times \\
 &\quad (3.14 \times 10^7 \text{s/yr}) = 9.12 \times 10^{14} \text{ J/yr} \\
 \text{†地球循環能 (J)} &= (\text{面積}) \times (\text{熱通量}) = (2.73 \times 10^7 \text{m}^2) \times (1.45 \times 10^6 \text{ J/m}^2) \\
 &= 3.96 \times 10^{13} \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

表2 澳門進出口能值分析表

| 項目 | 原始重量 (kg) | 能量 (joule) | 能值轉換率 (sej/unit) | 能值轉換率的 依據 | 能值 (sej/a) | 能值貨幣 (em\$/a) |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 進口 | | | | | | |
| 1. 食物 ^a | 1.21×10 ⁷ | 3.13×10 ¹⁵ | | | 3.39×10 ²¹ | 6.85×10 ⁸ |
| 2. 自來水 | 5.67×10 ¹⁰ | 2.80×10 ¹⁴ | 660000 | 藍盛芳, 2002 | 1.85×10 ²⁰ | 3.74×10 ⁷ |
| 3. 電力 | 193GWH | 6.44×10 ¹⁴ | 159000 | Odum, 1996 | 1.03×10 ²⁰ | 2.08×10 ⁷ |
| 4. 燃料 | 6.13×10 ⁸ | 2.55×10 ¹⁶ | 54000 | Odum, 2000 | 1.37×10 ²¹ | 8.25×10 ⁸ |
| 5. 礦物 ^a | 8.73×10 ⁸ | 8.73×10 ¹¹ (g) | | 略 | 1.19×10 ²¹ | 2.40×10 ⁸ |
| 6. 原料和半成品 ^a | 5.32×10 ⁸ | 3.76×10 ¹⁵ | | 略 | 1.18×10 ²² | 2.39×10 ⁹ |
| 7. 商品 ^a | 3.08×10 ⁸ | 2.20×10 ¹¹ | | 略 | 1.81×10 ²¹ | 1.09×10 ⁹ |
| 總計(1-7) | 5.928×10 ¹⁰ | 3.33×10 ¹⁶ | | | 1.98×10 ²² | 5.29×10 ⁹ |
| 出口 | | | | | | |
| 1. 食物 ^a | 6.78×10 ⁶ | 1.03×10 ¹⁴ | | 略 | 1.13×10 ²⁰ | 4.07×10 ⁷ |
| 2. 燃料 | 8.99×10 ⁴ | 2.23×10 ¹² | 5.40×10 ⁴ | Odum, 2000 | 1.20×10 ¹⁷ | 4.33×10 ⁴ |
| 3. 水泥 ^a | 9.05×10 ⁷ | 9.05×10 ¹⁰ | 2.07×10 ⁹ | 略 | 1.86×10 ²⁰ | 6.44×10 ⁷ |
| 4. 原料半成品 | 2.57×10 ⁸ | 2.43×10 ¹⁵ | | 略 | 1.04×10 ²² | 3.73×10 ⁹ |
| 5. 商品 ^a | 6.50×10 ⁷ | 5.42×10 ¹⁰ | | 略 | 8.00×10 ²⁰ | 2.88×10 ⁸ |
| 總計(1-5) | 4.19×10 ⁸ | 2.54×10 ¹⁵ | | | 1.15×10 ²² | 4.13×10 ⁹ |
| 廢棄物 | | | | | | |
| 1. 垃圾 (Ws) | 2.49×10 ⁸ | 1.51×10 ¹⁵ | 1.80×10 ⁶ | 黃書禮, 2003 | 2.72×10 ²¹ | 9.77×10 ⁸ |
| 2. 污水 (Wl) | 4.88×10 ¹⁰ | 2.39×10 ¹⁴ | 6.66×10 ⁵ | 黃書禮, 2003 | 1.59×10 ²⁰ | 5.73×10 ⁰⁷ |
| 總計: (1+2) | 4.90×10 ¹⁰ | 1.75×10 ¹⁵ | 1.75×10 ¹⁵ | | 2.88×10 ²¹ | 1.03×10 ⁹ |
| 服務進口和旅遊業出口值；美元 | | | | | | |
| | | | 能值貨幣比 | | 能值energy | 能值貨幣 |
| 1. 勞務進口： | | 1.05×10 ⁹ | 4.94×10 ¹² | 趙新鋒, 2004 | 1.74×10 ²¹ | 3.52×10 ⁸ |
| 2. 旅遊業收入能值： | | 5.21×10 ⁹ | 1.66×10 ¹² | Brown, 2002 | 8.65×10 ²¹ | 3.11×10 ⁹ |
| 3. 旅遊出口 ^a (旅客消費) | | | | | 3.26×10 ²¹ | 1.17×10 ⁹ |

a 能值進出口中食物、礦物、原料和半成品及商品是以進出口之細項累加而得，能值計算過程與進口食物的能值計算過程一樣，由於篇幅所限，不在逐項列出。b 根據公式 (3)、(4)：

$$Rt = \frac{11887876 \times 1.2 \times 1.9}{11887876 \times 1.2 \times 1.9 + 365 \times 448495} = 0.148$$

所以遊客消費的能值(旅遊業出口能值)Mt = RtU= 0.148 × 2.2 × 10²²=3.26×10²¹(Sej)

上式中遊客消耗係數取r=1.9，計算過程如下：遊客人均每日消費用水是常住居民的1.89倍，電2.14倍，食物1.5倍，交通2倍，購物消費4.31倍，乘以上各項在2003年總應用能值中的百分比：

$$\text{水}1.89 \times 0.84\% + \text{電}2.14 \times 5.1\% + \text{食物}1.5 \times 15.4\% + \text{交通}2 \times 6\% + \text{消費品}4.31 \times 2.5\% = 1.9$$

表3 澳門能值分析匯總表

| 代號 Variable | 項目Item | 能量或物質 Energy (J)or Mass(g) | 能值轉換率 Solar Emergy (sej/a) | 能值貨幣價值 emdollars (em\$) |
|----------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| R | 可更新資源 | 1.15×10 ¹⁵ | 2.70×10 ¹⁹ | 9.71×10 ⁶ |
| N | 不可更新資源 | 3.62×10 ¹¹ | 3.60×10 ²⁰ | 1.29×10 ⁸ |
| Fuel | 進口燃料和礦物 | 2.67×10 ²¹ | 2.66×10 ²¹ | 1.07×10 ⁹ |
| G | 進口商品和原材料 | 1.16×10 ²² | 1.72×10 ²² | 3.48×10 ⁹ |
| P2I | 進口勞務 | 1.05×10 ⁹ | 1.74×10 ²¹ | 3.52×10 ⁸ |
| F | 輸入能值：Fuel+G+P2I | 1.43×10 ²² | 2.16×10 ²² | 5.29×10 ⁹ |
| U | 能值應用總量：R+N+F | 1.43×10 ²² | 2.20×10 ²² | 5.43×10 ⁹ |
| Y | 出口能值 | 2.54×10 ¹⁵ | 1.47×10 ²² | 5.04×10 ⁹ |
| T | 旅遊業出口 | 5.21×10 ⁹ \$ | 3.26×10 ²¹ | 1.17×10 ⁹ |
| W | 污水和垃圾能值 | 1.75×10 ¹⁵ | 2.88×10 ²¹ | 1.03×10 ⁹ |
| ELE | 電之能值：1880GWH | 6.77×10 ¹⁵ | 1.08×10 ²¹ | 3.89×10 ⁸ |
| GDP | 國民生產總值(US\$) | 7.90×10 ⁹ | | |
| P2 | 世界能值貨幣比 | | 1.66×10 ¹² | |
| P3 | 中國能值貨幣比 | | 4.94×10 ¹² | |

表4 澳門生態經濟系統能值評價指標

| No. | 能值指標 | 表過式 | 美國 | 意大利 | 瑞典 | 澳門 |
|-----|----------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 可更新能值 | R | 1.72×10 ²⁴ | 1.21×10 ²³ | 4.52×10 ²² | 2.70×10 ¹⁹ |
| 2 | 不可更新能值 | N ^a | 6.80×10 ²⁴ | 3.48×10 ²³ | 3.08×10 ²² | 3.60×10 ²⁰ |
| 3 | 進口能值 | F | 3.26×10 ²⁴ | 1.60×10 ²⁴ | 3.06×10 ²³ | 2.16×10 ²² |
| 4 | 能值應用總量 | R+N+F | 1.18×10 ²⁵ | 2.07×10 ²⁴ | 3.82×10 ²³ | 2.20×10 ²² |
| 5 | 出口能值 | P1×10 P+T+N ₂ | 2.39×10 ²⁴ | 9.30×10 ²³ | 2.62×10 ²³ | 1.40×10 ²² |
| 6 | 本地資源能值比率 | (N ₀ +N ₁ +R)/U | 0.723 | 0.225 | 0.173 | 0.176 |
| 7 | 能值產出率 | Y/F | 0.733 | 0.581 | 0.859 | 0.683 |
| 8 | 能值交換率 | F/Y | 1.27 | 1.72 | 1.16 | 1.47 |
| 9 | 可更新資源比率 | R/U | 0.146 | 0.0585 | 0.122 | 0.00123 |

| | | | | | | |
|----|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 10 | 購買能值比率 | F/U | 0.277 | 0.770 | 0.827 | 0.982 |
| 11 | 能值投資率 | F/R+N | 0.38 | 3.42 | 4.02 | 55.8 |
| 12 | 能值密度 | U/Area (m ²) | 1.25×10 ¹² | 6.86×10 ¹² | 8.99×10 ¹¹ | 8.05×10 ¹⁴ |
| 13 | 人均能值 | U/population | 4.18×10 ¹⁶ | 3.60×10 ¹⁶ | 4.13×10 ¹⁶ | 4.90×10 ¹⁶ |
| 14 | 能值負載率 | (U-R)/R | 5.85 | 16.1 | 7.17 | 813 |
| 15 | 能值貨幣比率 | P1=U/GNP | 1.19×10 ¹² | 1.75×10 ¹² | 1.24×10 ¹² | 2.78×10 ¹² |
| 16 | 電力能值比率 (%) | (el)/U*100 | 3.80 | 9.00 | 14.0 | 4.93 |
| 17 | 人均電力能值 | elect / P | 1.35×10 ¹⁵ | | 5.81×10 ¹⁵ | 2.41×10 ¹⁵ |
| 18 | 人均燃料能值 | fuel/population | 7.92×10 ¹⁴ | | 7.45×10 ¹⁵ | 3.06×10 ¹⁵ |
| 19 | 能值可持續指標 | EYR/ELR | 0.125 | 0.0361 | 0.120 | 0.00084 |
| 20 | 新能值可持續發展指標 | EYR * EER / ELR | 0.159 | 0.0621 | 0.0140 | 0.00123 |

^a：不可更新的能值N可分為3部分，N₀是初級的自然資源，N₁是集約的自然資源，N₂是直接出口的自然資源(Odem, 1996)。

三、結果及討論

澳門2003年進口物質和原料2.58×10⁹ kg、食水56.7×10⁹ kg，出口商品0.42×10⁹ kg。進口物質按重量計算98.4%來自於大陸，佔澳門進口貨值的42.9%。而出口產品按重量只有27.9%返銷大陸，只佔澳門出口貨值的13.7%。中國大陸對澳門物質的淨輸入高達58.3×10⁹ kg¹²，這股龐大的負熵流是維持澳門城市發展的主要動力。中國大陸與澳門間的貿易以原料和初級產品為主，高技術產品較少。貨幣不是真實的財富，真實財富是食物、礦產、肥沃土地、房屋、資訊、藝術等等^{2, 18}。運用能值理論的實證分析表明澳門作為高密度的消費城市，其能值消費水準已進入發達國家行列。

(一) 可持續發展的能值指標

能值產出率越高，表明系統的生產能力強，可持續狀態好；而環境負載率高表明系統生態狀態壓力大。1997年Odum之弟子美國生態學家Brown M.T和意大利生態學家Ulgiati S.提出了能值可持續指標ESI(Emergy sustainable indices)，定義為系統能值產出率與環境負載率之比，即EYR/ELR。他們還確定了ESI的量化標準，即ESI<1為高度發展的消費導向的經濟，ESI>10指明是不發達的經濟，而1<ESI<10為發展中經濟，可持續狀態較好¹¹。作者並不認同其觀點，原因有二：

1. EYR是出口能值與購買能值的比率，多數地區EYR相對較小和穩定於1附近。其值大表明其輸出的真正能值財富多於其購入的能值財富，從在能值的角度看對系統是不利的。反而EYR小於1則對系統有利。經濟發達的美國、意大利、瑞典的都是出口能值小於進口能值^{16, 17}。

2. ELR在不同的度量尺度其值變化很大。在國家尺度，由於有大量可更新資源供其使用，ELR通常較小。在城市尺度，資源缺乏，ELR通常很大，這常導致EYR與ELR之商值(ESI)很小。將不同尺度的ESI值進行比較有失妥當。Ulgiati和Brown所確定的ESI的量化標準，對於城市亦不適合。如澳門2003年ESI為0.00084，北京2000年ESI為0.0016¹⁹，

遠低於美國的0.125，意大利的0.0361，瑞典的0.120。

按Ulgiati和Brow觀點，澳門ESI值小是否表明澳門極端的高消費性及不可持續性？事實上，近年澳門社會經濟欣欣向榮，可持續性並未降低。2002年，陸宏芳在ESI的基礎上提出了能值可持續新指數EISD (Emergy index for sustainable Development)¹⁹，定義為ESI×EER即能值可持續指標與能值交換率的乘積，將系統的能值效率引入計算，2003年澳門EISD為0.00123，較ESI為高。通過以上的實證計算，我們認為以ESI或EISD來比較國家和城市間的可持續發展狀態，是不適合的。

在衡量地區可持續發展的狀況時，2001年Brown和Ulgiati已降低了ESI對衡量地區可持續發展狀況的指示作用，並認為能值的平衡將更為重要。如果離開本地的能值比得到的能值更多，地區經濟是不可持續的；商品交換中的能值平衡將導致長遠的更可持續的發展¹⁵。早在1991年，黃書禮已經提出了類似的觀點；“在1960年台灣進口的能值超出了出口的能值，處於優勢地位”⁵。2003年，澳門城市生態系統輸入的能值為 216×10^{20} sej，而只輸出能值 147×10^{20} sej；能值剩餘(F+R-Y)為 65.2×10^{20} sej，剩餘能值是當年應用能值的29.7%，高於同時期美國的19.0%，瑞典的20.6%，低於意大利的38.0%，表明澳門的真正財富-能值的持續增加和積累，這是近年澳門城市快速發展的真正原因。

（二）澳門生態經濟系統能值分析

1、人均能值利用量和能值密度

人均能值利用量亦能表示居民的生活水準和經濟發展程度。2003年澳門人均能值利用量為 4.90×10^{16} sej，為廣州市 1.34×10^{16} sej的3.7倍，約為2000年美國人均能值利用量 4.18×10^{16} sej的1.2倍，2002年意大利人均能值利用量 3.60×10^{16} sej的1.4倍，2002年瑞典人均能值利用量 4.13×10^{16} sej的1.2倍；澳門旅遊人口相當多，其在澳的消費能值都攤分給了澳門居民，令人均能值利用量偏高。能值密度與土地面積有反比例關係，其大小亦可作為城市生態壓力的一種量度。澳門能值密度高達 8.05×10^{14} sej/m²，是美國的能值密度 1.25×10^{12} sej/m²的644倍，是意大利的117倍，是瑞典的895倍。澳門的能值密度高主要是由於澳門地域狹小人口眾多之故。澳門的應用能值中，進口商品、原材料和燃料佔90.3%。作為能流物流資訊流高度密集的城市生態系統，其能值密度自然比整個國家能值利用强度高⁹。

2、能值貨幣比率和能值投資率

澳門的能值貨幣比率顯示能值利用量與國民生產總值之間的關係，可以看出開發程度和工業化程度。比值高，代表單位經濟活動換取之能值高，生產過程中使用自然資源比值較大。澳門的能值貨幣比率為 2.78×10^{12} sej/\$，高於中國能值貨幣比率 4.94×10^{12} sej/\$，而低於2000年美國的能值貨幣比率為 1.19×10^{12} sej/\$。能值投資率是衡量經濟發展程度和環境負載程度的指標，其值越大表明外界投入的能值越大，經濟發展的程度越高。能值投資率為購買能值與本地可更新能值的比率，全球平均能值投資率為2^{5,9}，美國為0.31，意大利為3.42，瑞典為4.02。澳門由於地域狹小，本地可更

新能值十分有限，能值投資率高達55.8，反映了澳門購買能值非常高，而本土資源嚴重缺乏的特點，大量的投資和頻繁的經濟活動，令自然環境承受較大的壓力。澳門出口加工業貨幣投入大，大量購買能值削弱了產品競爭力。廣州市的能值投資率是35⁹，遷往華南地區的澳門廠家可得到較多的環境資源，經濟效益更高。這是近十年澳門製造業外遷的主要原因。

3、能值受益率(能值交換率)

在能值分析中能值受益率越大表明某城市或地區流入的能值越多，資訊和服務聚集度越高，能量貨幣流通越快，而輸出的能值相對越小，城市真正的能值財富不斷增加，在對外貿易中處於獲利地位。澳門的總體能值受益率為1.47，高於美國的1.3，高於廣州的0.62⁹，略低於意大利的1.7。澳門進口的貨物按重量計算98.4%來自中國大陸，具有高能值低價格的特點，澳門在這種交換中，得到的能值收益很大，因為中國的能值貨幣比率是澳門的1.8倍，以同等貨幣同中國的貿易交往中，至少可以得到0.8倍的淨能值利益。

4、人均燃料能值和電量能值使用率

人均燃料能值一方面表示消費水準，另一方面體現環境壓力。人均燃料能值美國為 7.92×10^{14} sej，瑞典為 7.45×10^{15} sej，澳門為 3.06×10^{15} sej，是美國的3.9倍，原因是澳門發電靠進口大量石油產品，不可能像美國能利用水力發電、風力發電和核電，而火力發電的能值轉換率較高。電量能值使用率顯示電力使用情況，亦是經濟發展的指數之一。澳門由於目前耗電量小的第三產業高度發達，耗電量大的加工製造業在GDP中僅佔7.25%，電力應用能值佔總能值比率僅為4.93%，高於美國2000年的3.8%，低於意大利的9%和瑞典的14.0%。像澳門這樣人口高度密集的城市，大力發展第三產業可減低發電產生的環境污染問題，緩解城市環境壓力，從能值分析的角度看是澳門可持續發展的一個方向。

5、能值自給率、廢棄物的能值

城市生態系統能值自給率越低，系統的自給能力越弱，對外部資源的依賴程度越高。澳門缺乏自然資源，資源幾乎完全依賴外界提供，能值自給率僅為1.8%。遠低於美國的72.3%，意大利的22.5%和瑞典的17.1%。

2002年廢棄垃圾 2.49×10^8 kg，焚燒處理垃圾年產能值為 27.2×10^{20} sej。垃圾全面處理，減少了對周邊環境的影響，但垃圾能值資源未得到充分利用。澳門年排放的廢氣達 1.94×10^9 kg，以汽車尾氣和發電廠排放的廢氣為主。廢氣內包含的能值，缺少相應的能值轉換率未納入計算。澳門廢水排放量為 4.88×10^7 m³，廢水經二級處理後排放²³，廢水能值為 1.6×10^{20} sej。廢棄物作為系統在生態經濟過程中產生的副產品，但不能為系統所利用。廢棄物的能值比率為廢棄物能值與環境可更新資源能值的比率，澳門廢棄物能值是可更新資源能值的103倍。由於廢棄物經過處理，對自然環境的影響和壓力已大大降低。

6、旅遊業能值

按公式(5)對澳門旅遊業能值的貢獻和消耗比率(即能值受益率(交換率))進行了計算。 $EER = (8.65 \times 10^{21}) / (3.26 \times 10^{21}) = 2.65$

這個數值相當於澳門旅遊業的能值產出投入比，即遊客每支付2.65sej的能值財富，卻只消費1 sej能值。旅遊業為澳門的龍頭產業，帶來大量的經濟收入，同時亦加重旅遊地的環境壓力。澳門為外來遊客提供服務，可以理解為服務輸出。旅遊業的收入增加了城市的GDP，2003年澳門旅遊業收益達52.1億美元，按世界能值標準折算的能值為 86.5×10^{20} sej，相當於澳門利用總能值的39.3%。

四、結論

能值理論豐富了生態學與經濟學的定量研究方法，被認為是聯結生態學和經濟學的橋樑。它對自然資源的科學評價與合理利用、經濟發展方針的制定，可持續發展戰略的實施皆具指導意義。研究城市或地區的可持續發展，生態經濟學是較為適當的方法。2002年李金平運用生態足跡理論分析了澳門的旅遊博彩業。得益於博彩行業的經濟高效性，加上廣闊的腹地眾多的賭客，澳門生態足跡產出值為4,202 \$/hm²，高於美國3,337 \$/hm²、香港3,982 \$/hm²、新加坡3,359 \$/hm²的水準，是世界平均水準1,106 \$/hm²的3.8倍²⁰。從能值和生態足跡這兩種分析方法得出的結論都說明澳門生態經濟系統的可持續建基於旅遊博彩業的巨大收益，然後通過市場購入需要的能值或生態足跡，維繫其生物物理平衡和人口承載力。

對澳門的能值指標進行的分析發現，能值可持續發展指標體系(ESI)對於衡量一個國家和地區是適當的，對於衡量一個人口高度密集的城市，由於ESI太小，其所代表的含義難以界定，而用能值剩餘測度則更加合適。澳門未來生態經濟的發展，目前有兩種主流觀點；一種認為澳門應該走產業多元化之路，以避免國際上博彩開放帶來的衝擊。第二種觀點的人認為，澳門應當發揮獨特的區位優勢，借助多元化的旅遊業和眾多歷史文化遺產，吸引更多遊客來澳門觀光消費，帶動澳門經濟的發展。澳門地域狹小，資源貧乏，從能值分析的角度企業投資開工廠由於能值投資率很高，無利可圖，在區域競爭中將處於劣勢；而旅遊業帶動的第三產業具有很高的能值受益率(EEr=2.65)，匯集能值的能力強。立足於能值是真正財富的觀點，澳門未來的可持續發展應揚長避短，大力發展旅遊服務業。為吸引更多遊客，澳門應打造更多旅遊景點，同時控制污染物的排放，合理處置或利用廢棄物。同時證明，中央政府開放中國城市居民港澳自由行是對兩個特區可持續發展的有力支持。

參考資料

- (1) Huang, Shu-Li, Hsu, Wan-Lin. (2003). Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape & Urban Planning*, 63(2), 61~75.
- (2) Odum, H.T. (1996). *Environmental Accounting—Emergy and Environmental Decision Making*. New York: Wiley. pp.36~249.
- (3) Odum, H.T. (2000) Folio #2, *Emergy of Global Processes. Handbook of Emergy Evaluation*. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville. pp.5~24.
- (4) Lan Shengfang, Odum H. T. (1994). Emery evaluation of the environment and economy of Hong Kong. *Journal of environmental sciences*. 6(4), pp.432~439.

- (5) Huang, Shu-Li., Odum H.T. (1991). Ecology and economy: EMWEGY synthesis and public policy in Taiwan. *Journal of Environmental Management* 32: pp.313~333.
- (6) Ulgiati, S., Odum, H.T. and Bastianoni S. (1994). Emery use, environmental loading and sustainability: An emery analysis of Italian. *Ecological Modelling*. 73: pp.215~268.
- (7) Brown, M.T., Ulgiati, S. (1997). Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering* 9: pp.51~69.
- (8) Brown, M.T., Ulgiati, S. (2002). Emery evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 10, 321~334.
- (9) 藍盛芳等, 《生態經濟系統能值分析》, 北京: 化學工業出版社, 2002年7月, 1~386。
- (10) Brown, M.T., Buranakarn V. (2003). Emery indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 38, 1~22.
- (11) Ulgiati S., Brown, M. T. (1998). Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 108, 34~35.
- (12) 澳門特別行政區統計暨普查局, 《澳門統計年鑑2003》, 澳門政府印務局, 2004.1~257。澳門統計局網頁: <http://www.dsec.gov.mo>.
- (13) Hau, J. L., Bakshi, B. R. (2004). Promise and problems of emery analysis. *Ecological Modelling*. 178, pp.215~225
- (14) Abel, T. (2000). Ecosystems, sociocultural systems, and ecological-economics for understanding development: the case of tourism on the Macao, N.A. Dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida. Available online at <http://etd.fcla.edu/etd/uf/2000/ane0595/Abel.pdf>.
- (15) Brown, M. T. (2001), Ulgiati, S. (2004). Emery measures of carrying capacity to evaluate economic investments. *Population and Environment*. 22(5), 471~501.
- (16) Cialani C., Russi D., and Ulgiati S. Investigating a 20-year national economic dynamics by means of emery- based indicators. In Brown, M.T., Campbell, D., Comar, V., Huang, S.L., Rydberg, T., Tilley, D.R., and Ulgiati, S. (Eds), *Emery Synthesis. Theory and Applications of the Emery Methodology*. The Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL. Book of Proceedings of the 3rd Biennial International Emery Research Conference, 29~31 January, 401-416.
- (17) Hagström P., Nilsson P. O. (2004). Emery evaluation of Swedish Economy Since the 1950's. In Brown, M.T., Campbell, D., Comar, V., Huang, S.L., Rydberg, T., Tilley, D.R., and Ulgiati, S., (Eds). *Emery Synthesis. Theory and Applications of the Emery Methodology*. The Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL. Book of Proceedings of the 3rd Biennial International Emery Research Conference, 29~31 January, 417-434.
- (18) Ulgiati, S., H. T., Odum and E. C., Odum. (2004). the prosperous way down. *Ecological Modelling*, 178 (1-2), 249.
- (19) Lu, Hong-fang, Lan, Shengfang, Li, Lei, Peng, Shaolin. (2003). New emery indices for sustainable development. *Journal of Environmental Science*, 15(4), 562~569.
- (20) 李金平、王志石, 澳門2001年生能足跡分析, 《自然資源學報》, 2003, 18(2):197~203。
- (21) 駱世明、陳聿華、嚴斧, 《農業生態學》, 湖南: 中國湖南科技出版社, 1987年, 450~455頁。
- (22) Lan Shengfang, Odum H.T., Liu Xinmao. (1998), Energy Flow and Emery Analysis of the Agroecosystems of China. *Ecological Science*, 17(1), 32~39.
- (23) Odum, H.T., Odum E.C. (1983). *Energy basis for man and nature* (pp.35~159). New York: McGraw-Hill.
- (24) Odum, H.T. (1987). *Ecology and economy: emery analysis and public policy in texas*. Lyndon B. Johnson of Public Affairs, The University of Texas at Austin. policy research project report (pp.54~89).
- (25) Yan, Maocao, Odum, H.T. (2001). *New visual angle to view eco-economic system* (pp. 84~88). Beijing: China Zhigong Publishing House.

A Sustainability Analysis of Macao Using Biophysical Approach

Lei Kampeng

Abstract:

Macao is a densely populated city, lacking natural resources and thus dependent upon imports for almost all its essential goods and raw materials. How can Macao survive given this scenario? This paper attempts to use emergy analysis, originally established by H T Odum, to investigate the urban development sustainability of Macao's environment and economy in 2003. The research reveals that in 2003 the total used emergy was 220×10^{20} sej (Solar emjoules), imported emergy was 216×10^{20} sej, while the exported emergy was about 147×10^{20} sej. The gambling and tourism industries are the main profit earning industries of Macao, earning \$ 5.21 billion in 2003, with an emdollars emergy of 86.5×10^{20} sej. At the same time tourists only consumed 32.6×10^{20} sej, so the emergy surplus of tourism was 53.9×10^{20} sej, the contribution impact ratio of tourism being 2.65 times. Macao also benefitted from exchange with Mainland China: since they have different Emergy/\$ ratios when using the same currency in trading for commodities, the emergy exchange ratio was 1.8 times. These two kinds of emergy surpluses are the most important sources for the sustainable development of Macao's urban ecosystem. In conclusion, the sustainability of Macao is discussed.

Key Words:

Emergy, Emergy indices, Biophysical method, City ecosystem, Sustainability, Macao