

# 城市环境经济能值综合和可持续性分析

李金平<sup>1</sup>, 陈飞鹏<sup>2</sup>, 王志石<sup>1</sup>

(1. 澳门大学科技学院, 澳门; 2. 华南农业大学生命学院, 广州 510642)

**摘要:**澳门资源缺乏, 人口高度密集, 其生命支持系统几乎完全依赖进口。近年, 澳门经历了经济的繁荣和社会的发展, 澳门如何能克服其自身的缺点而生存? 试图应用 H.T.Odum 创立的能值(Emergy)分析理论和方法, 从城市生态系统的理论出发, 对澳门的能值流进行系统分析研究, 通过一系列能值指标, 评价澳门城市生态系统自然环境和社会经济可持续发展的状况, 为澳门制定发展策略和产业调整提供科学指导依据。2003 年澳门城市生态系统应用能值为  $220 \times 10^{20}$  sej (Solar emjoules, 太阳能焦耳, 缩写为 sej), 输入的购买能值有  $216 \times 10^{20}$  sej, 出口能值为  $140 \times 10^{20}$  sej。旅游博彩业为澳门带来 52.1 亿美元的收益, 折算能值收益为  $86.5 \times 10^{20}$  sej, 而游客只消费能值  $32.6 \times 10^{20}$  sej 的商品和服务, 旅游博彩业巨大的能值净收益为  $53.9 \times 10^{20}$  sej, 旅游博彩业的贡献冲击比率为 2.65。研究还发现, 以相同的货币进行商品交换, 中国大陆与澳门的能值交换比率是 1.8 倍。澳门旅游博彩业的能值剩余和澳门与中国大陆的能值交换优势, 是维持澳门生态经济系统的关键因素。最后对澳门的可持续发展状况进行了讨论。

**关键词:**能值; 能值指标; 城市生态系统; 澳门

文章编号: 1000-0933(2006)02-0439-10 中图分类号: Q147, X171.1 文献标识码: A

## The emergy synthesis and sustainability analysis of city's environment and economy

LEI Kam-Peng<sup>1</sup>, CHEN Fei-Peng<sup>2</sup>, WANG Zhi-Shi<sup>1</sup> (1. Faculty of Science and Technology, Macau University, Macau; 2. Faculty of life Science, The South China Agricultural University, Guangzhou 510642). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 439 ~ 448.

**Abstract:** Macao is a population-dense consumes society which is lacking in nature resources and almost all of her life support goods and raw materials depend on import. In the recent years, Macao has experienced an economic boom, as well as social development. How can Macao survive herself against these shortcomings? This paper attempts to incorporate emergy flow analysis to investigate the urban development sustainability of Macao's environment and economy in 2003. The research has revealed that the total used emergy was  $220 \times 10^{20}$  sej (Solar emjoules), and the imported emergy of Macao was  $216 \times 10^{20}$  sej, while the exported emergy was about  $147 \times 10^{20}$  sej in 2003. The gambling and tourism industries (refer to tourism) are the main profit earning industry of Macao, and they have captured \$ 5.21 billion in 2003, with the emdollars emergy  $86.5 \times 10^{20}$  sej, while at the same time tourists only consumed  $32.6 \times 10^{20}$  sej, the emergy surplus of tourism was  $53.9 \times 10^{20}$  sej, the contribution impact ratio of tourism was 2.65 times. Macao also benefit from the exchange with Mainland China since they have different Emergy/ \$ ratio when using the same currency to compare, the emergy exchange ratio was 1.8 times. These two kinds of emergy surpluses are the most important sources for sustainable development of the Macao urban ecosystem. Finally the sustainability of Macao has been discussed.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30170147); 澳门大学资助项目

**收稿日期:**2004-12-04; **修订日期:**2005-11-24

**作者简介:**李金平(1964~), 男, 湖北天门人, 博士生, 主要从事环境管理和生态经济学研究. E-mail: drali1964@yahoo.com

**致谢:**感谢中国科学院华南植物园陆宏芳博士、中国科学院生态环境研究中心胡鹏博士、华南农业大学蓝盛芳教授、国立台北大学黄书礼教授、意大利 Siena 大学 Ulgiati S. 教授和美国 Florida 大学 Brown M. T. 教授提供资料并给予研究和论文写作上的指导; Baker S. 先生协助修改润色英文摘要

**Foundation item:** The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30170147); The research was partly financed by Macao University.

**Received date:** 2004-12-04; **Accepted date:** 2005-11-24

**Biography:** LI Jin-Ping, Ph.D. candidate, mainly engaged in environmental management and ecological economics. E-mail: drali1964@yahoo.com

**Key words:** emergy; emergy indices; city ecosystem; macao

城市必须仰赖城市以外的生态系统,从周围输入越来越多的资源,同时大量积累物质和废弃物<sup>[1]</sup>。Odum 论述了城市是一个非自养的生态系统,脱离为其提供能量、食物、原料和排放废弃物的偏远地域的稳定的联系,城市的自组织体系将不能维系<sup>[2]</sup>。能值(Emergy)是指某种流动或贮存的能量中所包含的另一种能量的数量,称为该能量的能值。能值分析认为所有系统中关联的能量决定系统的能值价值,能值是宇宙间量度自然和社会真正财富的共同基础<sup>[3]</sup>。能值分析为量化生态系统的生产和服务价值提供了能量基础。自从 20 世纪 80 年代起,能值分析被广泛用于分析生态、产业和经济系统<sup>[1,4-10]</sup>。过去十多年,人类发展和资源环境之间综合的尺度和复杂性已经增加。离开了城市经济存在的资源基础-生态系统,难以充分地认识城市经济系统。生态系统能够提供人类生态服务例如能源、食物、水,保持大气的空气质量,农业和营养循环,它们服务人类经济体系的功能是不可替代的<sup>[5]</sup>。

20 世纪 90 年代以来,城市可持续性的研究引起各界的普遍关注,尝试解释其真实含义成为研究的热点。1996 年 Odum 之著作“环境核算”详细介绍了能值分析的方法<sup>[2]</sup>。能值分析途径是一种重要的基于生物物理原理的生态经济评价方法,在生态学中具有较广泛的适用性,尤其用于市场方法难以估价的许多自然资源的评价,不失为一种有效途径<sup>[9]</sup>。基于能值分析的指数或比率能够量度生态环境和经济的贡献,并在两者之间进行公平比较<sup>[11]</sup>。

澳门特别行政区北接广东省珠海市,三面环水,东西为珠江伶仃洋和磨刀门前山水道,南临南海。澳门位于北纬 22°06'39"与 22°13'06",西径 113°31'33"与 113°35'43"之间,由澳门半岛、路环岛、凼仔岛和路凼填海区构成,总面积 27.3 km<sup>2</sup>,人口 441,600 人。澳门资源缺乏,人口众多。澳门农业 10a 前已消失,渔业伴随南中国海生物资源的衰退而逐年滑落。澳门第三产业高度发达,近十年来旅游博彩业(以下简称旅游业)超越制造业逐渐发展成为支柱产业<sup>[12]</sup>。2003 年入境旅客 11,887,876 人,旅客人均非博彩消费 1,518 澳门元(1 美元 = 8.033 澳门元)。澳门作为以旅游为龙头产业的消费性城市,旅游业毛收入高达 58.2 亿美元<sup>[12]</sup>,占澳门 2003 年全年生产总值的 73.7%。旅游业的巨大收益和连锁效应,带动了澳门经济的快速增长,2003 年经济增长率高达 14%。随着中国内地与澳门“关于更紧密的经贸关系安排(CEPA)”正式签署,中国大陆居民到港澳“自由行”为澳门特区带来大量的能值财富收益。本文尝试运用能值核算方法,通过分析真正财富-能值,探索澳门如何克服资源短缺的劣势,维系城市环境经济的可持续发展。

## 1 方法

能值(emergy)是指某种流动或贮存的能量中所包含的另一种能量的数量。各种能量均直接或间接源于太阳能,故常以太阳能来衡量各种能量的能值;任何资源、产品或劳务形成所需的直接或间接太阳能之量,就是其所具有的太阳能值(Solar emergy),单位为太阳能焦耳(sej)<sup>[2]</sup>。

### 1.1 物质和货币的能值计算方法:

能值转换率(transformity)表示单位能量(J)或物质(g)所具有的能值,即单位能量或物质由多少太阳能值转化而来,它是度量能量质量和等级的尺度。

$$M = \tau \times B \quad (1)$$

式中,  $M$  表示能值,  $\tau$  表示能值转换率,  $B$  代表能量或物质的质量。

经济系统的能值投入计算是以货币量乘该国或地区的能值货币比率,见下式:

$$M = F \times (M/\$) \quad (2)$$

如形成 1J 木材的能量需要 34900 sej,那么木材的能值转换率就是 34900 sej/J。能值分析理论是以自然价值为基础,将系统中各种生态流和经济流转换为能值,对自然环境生产与人类经济活动进行统一评价,定量分析其结构、功能与生态经济效益<sup>[13]</sup>。城市生态系统的能值分析基本步骤是:

(1) 数据资料的收集、整理、分类。本研究的原始数据主要来自澳门统计年鉴和澳门统计局网页<sup>[9]</sup>。

- (2)绘制能量系统图。
- (3)编制能值评价表,列出研究对象的主要能量来源。
- (4)对系统和子系统能值进行归并和分类。
- (5)建立反映城市生态、社会和经济的能值指标综合体系。

1.2 旅游业的能值分析

外来游客消费食物、水、电、交通设施和日常用品。旅游业消耗的物质和能量之能值可被认为是能值出口<sup>[14]</sup>。对于一个国家或地区,旅游业带来的货币收入及其所包含的能值被认为是外来能值投入<sup>[15]</sup>,既然能值流和货币流是反向流动的<sup>[2]</sup>,游客在消费物质和服务的同时,支付货币,所以旅游业与游客之间的能值交换应是双向流动的,双向流动的能值量并不一定相等。游客的货币不断流入旅游地,而旅游地同时不断地提供物质能值和服务能值予游客(可视为能值出口,其过程发生于旅游地)。特别是像澳门这样以旅游业为龙头产业的地区,2003 年的游客人数是本地居民的 26 倍,游客消费的能值即旅游业服务游客的能值应该单列来计算。澳门旅游业服务游客能值(即游客消费能值)占澳门总能值的比率由下式导出:

$$R_t = \frac{T \times d \times r}{T \times d \times r + 365 + P}$$

(3)

式中,  $R_t$  为游客消耗的能值比率,  $T$  为澳门游客人数,  $d$  为游客平均逗留澳门时间。  $r$  为游客的消费系数(澳门居民的消耗系数设为 1),它表示游客消费是本地居民消费的倍数。游客消费能值  $E_t$  由下式求出:

$$E_t = U \times R_t$$

(4)

式中,  $U$  为系统利用总能值。根据黄书礼教授的建议,反映澳门旅游业的能值贡献冲击指标相当于澳门旅游业的能值交换率,定义为旅游业收益能值与支付能值(游客消费能值)之比:

$$E_r = \frac{M_t \times E/\$}{E_t}$$

(5)

式中,  $M_t$  表示旅游业的货币收入,  $E/\$$  表示全球能值货币比率。

2 数据及计算

澳门自然环境与经济的能量综合系统图,见图 1。澳门本身没有农业,水、食品、燃料、原材料和商品几乎

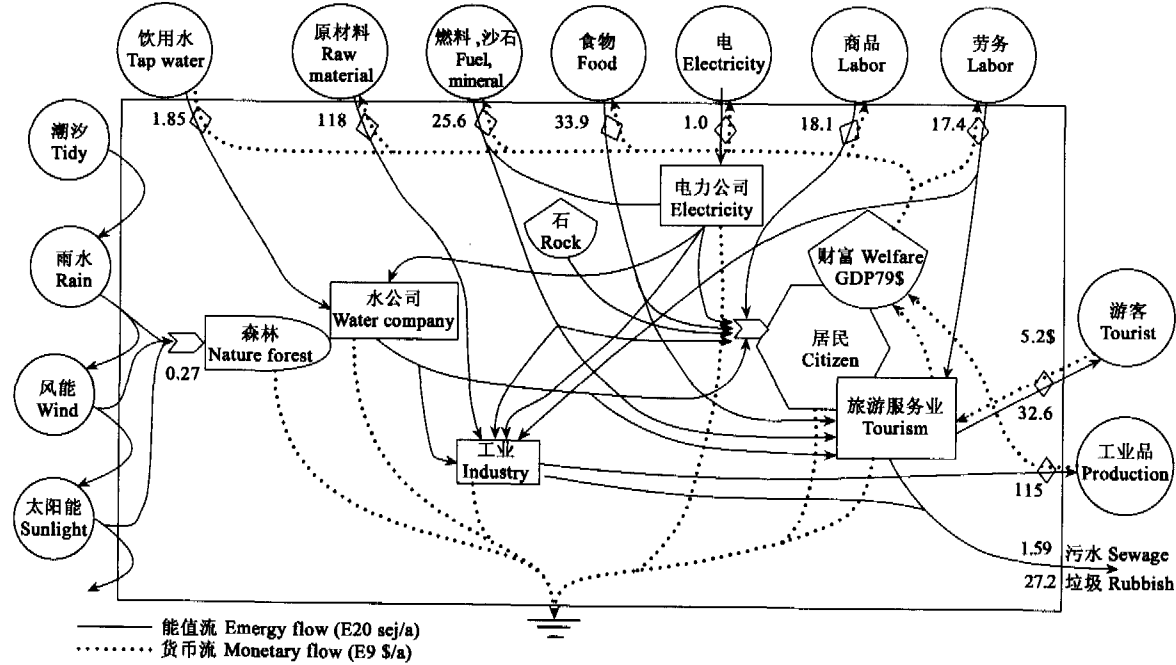


图 1 澳门环境经济能量系统图

Fig.1 The energy system diagram of Macao's environment and economy

完全依赖进口。同时有一些加工产品出口, 整体系统靠外界输入的能流物流来推动。分析澳门的进出口情况, 可基本掌握澳门城市系统的能流物流状况。根据国际分类系统, 澳门进出口商品分为 97 类。表 1 为澳门可更新资源能值分析表, 表 2 为进出口能值的汇总。表 3 是澳门能值汇总表。表 4 为澳门、美国、意大利<sup>[16]</sup>、瑞典<sup>[17]</sup>有关能值指标及其计算公式。经过一系列的计算、分析处理等工作, 得到澳门城市生态系统主要能值指标。澳门有关的数据自澳门统计局、澳门港务局和澳门气象局的数据。

表 1 2003 年澳门可更新和不可更新资源能值统计表  
Table 1 Emergy annual renewable and nonrenewable resources of Macao in 2003

| 可更新资源<br>Renewable                      | 原始数据<br>Raw units<br>(J, g) | 能值转换率<br>Transformity<br>(Sej/unit) | 能值转换率的依据<br>Reference of<br>Transformity | 能值<br>Emergy(sej/a)   | 能值货币价值<br>Emdollars<br>(em \$ /a) |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1. 太阳能 Sunlight <sup>a</sup>            | $1.20 \times 10^{17}$       | 1                                   | Odum, 1996                               | $1.20 \times 10^{17}$ | $2.31 \times 10^4$                |
| 2. 风能 Wind, kinetic <sup>b</sup>        | $4.55 \times 10^{14}$       | 623                                 | Odum, 1996                               | $6.80 \times 10^{16}$ | $2.45 \times 10^5$                |
| 3. 雨水化学能 Rain, chemical <sup>c</sup>    | $2.01 \times 10^{14}$       | 18199                               | dum, 1996                                | $3.10 \times 10^{18}$ | $1.12 \times 10^6$                |
| 4. 雨水势能 Rain, geopotential <sup>d</sup> | $3.04 \times 10^{14}$       | 8888                                | Odum, 1996                               | $2.70 \times 10^{17}$ | $9.72 \times 10^5$                |
| 5. 波浪能 Waves <sup>e</sup>               | $9.12 \times 10^{14}$       | 25889                               | Odum, 1996                               | $2.36 \times 10^{19}$ | $8.48 \times 10^6$                |
| 6. 地球循环能 Earth Cycle <sup>f</sup>       | $3.96 \times 10^{13}$       | 29000                               | Odum, 1996                               | $1.35 \times 10^{18}$ | $4.84 \times 10^5$                |
| 总计 Total (3 + 5 + 6)                    | $1.15 \times 10^{15}$       |                                     |                                          | $2.80 \times 10^{19}$ | $1.01 \times 10^7$                |
| 不可更新资源 Nonrenewable                     |                             |                                     |                                          |                       |                                   |
| 1. 采石 Marbles(g)                        | $3.60 \times 10^{11}$       | $1.00 \times 10^9$                  | Odum, 1996                               | $3.60 \times 10^{20}$ | $1.29 \times 10^8$                |
| 2. 表土损失 Topsoil loss                    | $1.90 \times 10^{09}$       | $6.25 \times 10^4$                  | Odum, 1996                               | $1.19 \times 10^{14}$ | $4.27 \times 10$                  |
| 总计 Total (1 + 2)                        | $3.62 \times 10^{11}$       | $1.00 \times 10^9$                  |                                          | $3.60 \times 10^{20}$ | $1.29 \times 10^8$                |

a 太阳能(J) = (面积) × (辐射量) × (1 - 反射率) =  $(2.73 \times 10^7 \text{ m}^2) \times (1.31 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2/\text{y}) \times (1 - 20\%) \times (4186 \text{ J/kcal}) = 1.20 \times 10^{17} \text{ J}$ ; b 风能(J) = (面积) × (密度) × (扩散系数) × (风速)<sup>3</sup>; =  $(2.73 \times 10^7 \text{ m}^2) \times (1.3 \text{ kg/m}^3) \times (1.00 \times 10^{-3}) \times (4.44 \text{ mps}) \times (3.15 \times 10^7 \text{ s/a}) = 2.25 \times 10^{14} \text{ J/a}$ ; c 雨水化学能(J) = (面积) × (年降雨量) × (吉布斯自由能) =  $(2.73 \times 10^7 \text{ m}^2) \times (1.49 \text{ m}) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (4.94 \times 10^3 \text{ J/kg}) = 2.01 \times 10^{14} \text{ J/a}$ ; d 雨水势能(J) = (面积) × (年降雨量) × (平均高度 × (重力加速度) × (雨水密度) =  $(2.73 \times 10^7 \text{ m}^2) \times (1.49 \text{ m}) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (763 \text{ m}) \times (9.8 \text{ m/s}^2) = 3.04 \times 10^{14} \text{ J/a}$ ; e 波浪能(J) = (海岸长度) × (1/8)(密度) × (地心吸力) × (浪高<sup>2</sup>) × (速率) =  $(4.16 \times 10^4 \text{ m}) \times (1/8) \times (1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \times (9.8 \text{ m/sec}^2) \times (0.5 \text{ m})^2 \times (2.21 \text{ m/s}) \times (3.14 \times 10^7 \text{ s/a}) = 9.12 \times 10^{14} \text{ J/a}$ ; f 地球循环能(J) = (面积) × (热通量) =  $(2.73 \times 10^7 \text{ m}^2) \times (1.45 \times 10^6 \text{ J/m}^2) = 3.96 \times 10^{13} \text{ J/a}$

3 结果及讨论

澳门 2003 年进口物质和原料  $2.58 \times 10^9 \text{ kg}$ 、食水  $56.7 \times 10^9 \text{ kg}$ , 出口商品  $0.42 \times 10^9 \text{ kg}$ 。进口物质按重量计算 98.4% 来自于大陆, 占澳门进口货值的 42.9%。而出口产品按重量只有 27.9% 返销大陆, 只占澳门出口货值的 13.7%。中国大陆对澳门物质的净输入高达  $58.3 \times 10^9 \text{ kg}$ <sup>[12]</sup>, 这股庞大的负熵流是维持澳门城市发展的主要动力。中国大陆与澳门间的贸易以原料和初级产品为主, 高技术产品较少。货币不是真实的财富, 真实财富是食物、矿产、肥沃土地、房屋、信息、艺术等等<sup>[2, 18]</sup>。运用能值理论的实证分析表明澳门作为高密度的消费城市, 其能值消费水平已进入发达国家行列。

3.1 可持续发展的能值指标

能值产出率越高, 表明系统的生产能力强, 可持续状态好; 而环境负载率高表明系统生态状态压力大。1997 年 Odum 之弟子美国生态学家 Brown M. T 和意大利生态学家 Ulgiati S. 提出了能值可持续指标 ESI (Emergy sustainable indices), 定义为系统能值产出率与环境负载率之比, 即  $EYR/ELR$ 。他们还确定了 ESI 的量化标准, 即  $ESI < 1$  为高度发展的消费导向的经济,  $ESI > 10$  指明是不发达的经济, 而  $1 < ESI < 10$  为发展中经济, 可持续状态较好<sup>[11]</sup>。作者并不认同其观点, 原因有二:

- (1) EYR 是出口能值与购买能值的比率, 多数地区 EYR 相对较小和稳定于 1 附近。其值大表明其输出的真正能值财富多于其购入的能值财富, 从在能值的角度看对系统是不利的。反而 EYR 小于 1 则对系统有利。经济发达的美国、意大利、瑞典的都是出口能值小于进口能值<sup>[16, 17]</sup>。
- (2) ELR 在不同的度量尺度其值变化很大。在国家尺度, 由于有大量可更新资源供其使用, ELR 通常较小。在城市尺度, 资源缺乏, ELR 通常很大, 这常导致 EYR 与 ELR 之商值 (ESI) 很小。将不同尺度的 ESI 值进

行比较有失妥当。Ulgiati 和 Brown 所确定的 *ESI* 的量化标准,对于城市亦不适合。如澳门 2003 年 *ESI* 为 0.0008,北京 2000 年 *ESI* 为 0.0016<sup>[19]</sup>,远低于美国的 0.125,意大利的 0.036,瑞典的 0.120。

表 2 澳门进出口能值分析表  
Table 2 Energy evaluation of import, and export of Macao in 2003

| 项目<br>Item                                    | 原始重量<br>Raw units<br>(kg) | 能量 Energy<br>(joule)        | 能值转换率<br>Transformity<br>(sej/unit) | 能值转换率的依据<br>Reference of<br>Transformity | 能值 Energy<br>(sej/a)    | 能值货币<br>Emdollars<br>(em \$ /a) |
|-----------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 进口 Import                                     |                           |                             |                                     |                                          |                         |                                 |
| 1. 食物*Foods                                   | 1.21 × 10 <sup>7</sup>    | 3.13 × 10 <sup>15</sup>     |                                     | 见附录 A Appendix A                         | 3.39 × 10 <sup>21</sup> | 6.85 × 10 <sup>8</sup>          |
| 2. 自来水 Tap water                              | 5.67 × 10 <sup>10</sup>   | 2.80 × 10 <sup>14</sup>     | 660000                              | 蓝盛芳 Lan S.-F.,2002                       | 1.85 × 10 <sup>20</sup> | 3.74 × 10 <sup>7</sup>          |
| 3. 电力 Electricity                             | 193GWH                    | 6.44 × 10 <sup>14</sup>     | 159000                              | Odum,1996                                | 1.03 × 10 <sup>20</sup> | 2.08 × 10 <sup>7</sup>          |
| 4. 燃料 Fuels                                   | 6.13 × 10 <sup>8</sup>    | 2.55 × 10 <sup>16</sup>     | 54000                               | Odum,2000                                | 1.37 × 10 <sup>21</sup> | 8.25 × 10 <sup>8</sup>          |
| 5. 矿物*Minerals                                | 8.73 × 10 <sup>8</sup>    | 8.73 × 10 <sup>11</sup> (g) |                                     | 略                                        | 1.19 × 10 <sup>21</sup> | 2.40 × 10 <sup>8</sup>          |
| 6. 原料和半成品*raw, processed materials            | 5.32 × 10 <sup>8</sup>    | 3.76 × 10 <sup>15</sup>     |                                     | 略                                        | 1.18 × 10 <sup>22</sup> | 2.39 × 10 <sup>9</sup>          |
| 7. 商品*Goods                                   | 3.08 × 10 <sup>8</sup>    | 2.20 × 10 <sup>11</sup>     |                                     | 略                                        | 1.81 × 10 <sup>21</sup> | 1.09 × 10 <sup>9</sup>          |
| 总计 Total (1~7)                                | 5.928 × 10 <sup>10</sup>  | 3.33 × 10 <sup>16</sup>     |                                     |                                          | 1.98 × 10 <sup>22</sup> | 5.29 × 10 <sup>9</sup>          |
| 出口 Export                                     |                           |                             |                                     |                                          |                         |                                 |
| 1. 食物*Foods                                   | 6.78 × 10 <sup>6</sup>    | 1.03 × 10 <sup>14</sup>     |                                     | 略                                        | 1.13 × 10 <sup>20</sup> | 4.07 × 10 <sup>7</sup>          |
| 2. 燃料 Fuels                                   | 8.99 × 10 <sup>4</sup>    | 2.23 × 10 <sup>12</sup>     | 5.40 × 10 <sup>4</sup>              | Odum,2000                                | 1.20 × 10 <sup>17</sup> | 4.33 × 10 <sup>4</sup>          |
| 3. 水泥*Cement                                  | 9.05 × 10 <sup>7</sup>    | 9.05 × 10 <sup>10</sup>     | 2.07 × 10 <sup>9</sup>              | 略                                        | 1.86 × 10 <sup>20</sup> | 6.44 × 10 <sup>7</sup>          |
| 4. 原料和半成品*raw, materials                      | 2.57 × 10 <sup>8</sup>    | 2.43 × 10 <sup>15</sup>     |                                     | 略                                        | 1.04 × 10 <sup>22</sup> | 3.73 × 10 <sup>9</sup>          |
| 5. 商品*Goods                                   | 6.50 × 10 <sup>7</sup>    | 5.42 × 10 <sup>10</sup>     |                                     | 略                                        | 8.00 × 10 <sup>20</sup> | 2.88 × 10 <sup>8</sup>          |
| 总计 Total(1~5)                                 | 4.19 × 10 <sup>08</sup>   | 2.54 × 10 <sup>15</sup>     |                                     |                                          | 1.15 × 10 <sup>22</sup> | 4.13 × 10 <sup>09</sup>         |
| 废弃物 Wastes                                    |                           |                             |                                     |                                          |                         |                                 |
| 1. 垃圾 Rubbish(Ws)                             | 2.49 × 10 <sup>8</sup>    | 1.51 × 10 <sup>15</sup>     | 1.80 × 10 <sup>6</sup>              | 黄书礼 Huang S.-L.,203                      | 2.72 × 10 <sup>21</sup> | 9.77 × 10 <sup>8</sup>          |
| 2. 污水 sewage (W1)                             | 4.88 × 10 <sup>10</sup>   | 2.39 × 10 <sup>14</sup>     | 6.66 × 10 <sup>5</sup>              | 黄书礼 Huang S.-L.,2003                     | 1.59 × 10 <sup>20</sup> | 5.73 × 10 <sup>07</sup>         |
| 总计 Total: (1+2)                               | 4.90 × 10 <sup>10</sup>   | 1.75 × 10 <sup>15</sup>     | 1.75 × 10 <sup>15</sup>             |                                          | 2.88 × 10 <sup>21</sup> | 1.03 × 10 <sup>9</sup>          |
| 服务进口和旅游业出口值 Serves import and Tourism export  |                           |                             |                                     |                                          |                         |                                 |
|                                               |                           | 美元<br>\$                    | 能值货币比<br>Emery/ \$                  |                                          | 能值 emery                | 能值货币<br>emdollars               |
| 1. 劳务进口 Labor, service import:                |                           | 1.05 × 10 <sup>9</sup>      | 4.94 × 10 <sup>12</sup>             | 赵新锋 Zhao X.-F.,2004                      | 1.74 × 10 <sup>21</sup> | 3.52 × 10 <sup>8</sup>          |
| 2. 旅游业收入能值 Tourism emery from \$ income       |                           | 5.21 × 10 <sup>9</sup>      | 1.66 × 10 <sup>12</sup>             | Brown. 2002                              | 8.65 × 10 <sup>21</sup> | 3.11 × 10 <sup>9</sup>          |
| 3. 旅游出口 Tourism export (游客消费 tourist consume) |                           |                             |                                     |                                          | 3.26 × 10 <sup>21</sup> | 1.17 × 10 <sup>9</sup>          |

a 能值进出口中食物、矿物、原料和半成品及商品是以进出口之细项累加而得,能值计算过程与进口食物的能值计算(见附录 A)过程一样,由于篇幅所限,不在逐项列出;

b 根据公式(3)、(4):  $Rt = \frac{11887876 \times 1.2 \times 1.9}{11887876 \times 1.9 \times 1.5 \times 365 \times 448495} = 0.148$  所以游客消费的能值(旅游业出口能值)  $Et = Rt \times U = 0.148 \times 2.2 \times 10^{22} = 3.26 \times 10^{21}(\text{Sej})$ ;上式中游客消耗系数取  $r=1.9$ ,计算过程如下:游客人均每日消费用水是常住居民的 1.89 倍,电 2.14 倍,食物 1.5 倍,交通 2 倍,购物消费 4.31 倍,乘以上各项在 2003 年总应用能值中的百分比:水  $1.89 \times 0.84\% +$  电  $2.14 \times 5.1\% +$  食物  $1.5 \times 15.4\% +$  交通  $2 \times 6\% +$  消费品  $4.31 \times 32.5\% = 1.9$

按 Ulgiati 和 Brown 观点,澳门 *ESI* 值小是否表明澳门极端的高消费性及不可持续性?事实上,近年澳门社会经济欣欣向荣,可持续性并未降低。2002 年,陆宏芳在 *ESI* 的基础上提出了能值可持续新指数 *EISD* (Energy index for sustainable Development)<sup>[19]</sup>,定义为 *ESI* × *EER* 即能值可持续指标与能值交换率的乘积,将系统的能值效率引入计算,2003 年澳门 *EISD* 为 0.00123,较 *ESI* 为高。通过以上的实证计算,以 *ESI* 或 *EISD* 来比较国家和城市间的可持续发展状态,是不适合的。

在衡量地区可持续发展的状况时,2001 年 Brown 和 Ulgiati 已降低了 *ESI* 对衡量地区可持续发展状况的指示作用,并认为能值的平衡将更为重要。如果离开本地的能值比得到的能值更多,地区经济是不可持续的;商品交换中的能值平衡将导致长远的更可持续的发展<sup>[15]</sup>。早在 1991 年,黄书礼已经提出了类似的观点;“在 1960 年台湾进口的能值超出了出口的能值,处于优势地位”<sup>[15]</sup>。2003 年,澳门城市生态系统输入的能值为  $216 \times 10^{20}$  sej,而只输出能值  $147 \times 10^{20}$  sej;能值剩余 ( $F + R - Y$ ) 为  $65.2 \times 10^{20}$  sej,剩余能值是当年应用能值

的 29.7%, 高于同时期美国的 19.0%, 瑞典的 20.6%, 低于意大利的 38.0%, 表明澳门的真正财富——能值的持续增加和积累, 这是近年澳门城市快速发展的真正原因。

表 3 澳门能值分析汇总表

Table 3 Summary of emery flows of Macao

| 代号<br>Variable | 项目<br>Item                               | 能量或物质<br>Energy (J) or<br>Mass (g) | 能值转换率<br>Solar Emery<br>(sej/a) | 能值货币价值<br>emdollars<br>(em \$) |
|----------------|------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| R              | 可更新资源 Renewable resources                | $1.15 \times 10^{15}$              | $2.70 \times 10^{19}$           | $9.71 \times 10^6$             |
| N              | 不可更新资源 Nonrenewable resources            | $3.62 \times 10^{11}$              | $3.60 \times 10^{20}$           | $1.29 \times 10^8$             |
| Fuel           | 进口燃料和矿物 Imported Fuels and Minerals      | $2.67 \times 10^{21}$              | $2.66 \times 10^{21}$           | $1.07 \times 10^9$             |
| G              | 进口商品和原材料 Imported Goods, raw material    | $1.16 \times 10^{22}$              | $1.72 \times 10^{22}$           | $3.48 \times 10^9$             |
| P2I            | 进口劳务 Emery of Services from out place    | $1.05 \times 10^9$                 | $1.74 \times 10^{21}$           | $3.52 \times 10^8$             |
| F              | 输入能值 Imported emery: Fuel + G + P2I      | $1.43 \times 10^{22}$              | $2.16 \times 10^{22}$           | $5.29 \times 10^9$             |
| U              | 能值应用总量 Emery used: R + N + F             | $1.43 \times 10^{22}$              | $2.20 \times 10^{22}$           | $5.43 \times 10^9$             |
| Y              | 出口能值 exported emery (Goods and services) | $2.54 \times 10^{15}$              | $1.47 \times 10^{22}$           | $5.04 \times 10^9$             |
| T              | 旅游业出口 Tourism export                     | $5.21 \times 10^9 \$$              | $3.26 \times 10^{21}$           | $1.17 \times 10^9$             |
| W              | 污水和垃圾能值 Wastes emery                     | $1.75 \times 10^{15}$              | $2.88 \times 10^{21}$           | $1.03 \times 10^9$             |
| ELE            | 电之能值 electricity: 1880GWH                | $6.77 \times 10^{15}$              | $1.08 \times 10^{21}$           | $3.89 \times 10^8$             |
| GDP            | 国民生产总值 Gross National Product (US \$)    | $7.90 \times 10^9$                 |                                 |                                |
| P2             | 世界能值货币比 World emery/ \$ ratio            |                                    | $1.66 \times 10^{12}$           |                                |
| P3             | 中国能值货币比 China Emery/ \$ ratio            |                                    | $4.94 \times 10^{12}$           |                                |

①出口商口能值:按本地能值货币比率折算;进口商品能值多数按全球能值货币比率折算 The emery conversion of export goods accords to Macao's emery/ \$ ratio, whereas imported goods accords to world Emery/ \$ ratio;②中国能值货币比率以  $4.96 \times 10^{12}$  sej/ \$ (赵新锋提供), 世界能值货币比率以  $1.66 \times 10^{12}$  sej/ \$ (Brown M. T 提供) 计算 The Emery/ \$ ratio fo China was  $4.96 \times 10^{12}$  sej/ \$ cited from zhao Xinfeng, world Emery/ \$ ratio was  $1.66 \times 10^{12}$  sej/ \$ cited from Brown B. T., personal communication

表 4 澳门生态经济系统能值评价指标

Table 4 the comparing of the emery indices of country

| 序号<br>No. | 能值指标 Indices                                                    | 表达式 Expression             | 美国 USA                | 意大利 Italy             | 瑞典 Sweden             | 中国澳门<br>Macao, China  |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1         | 可更新能值 Renewable emery                                           | R                          | $1.72 \times 10^{24}$ | $1.21 \times 10^{23}$ | $4.52 \times 10^{22}$ | $2.70 \times 10^{19}$ |
| 2         | 不可更新能值 Nonrenewable                                             | N *                        | $6.80 \times 10^{24}$ | $3.48 \times 10^{23}$ | $3.08 \times 10^{22}$ | $3.60 \times 10^{20}$ |
| 3         | 进口能值 Imported emery                                             | F                          | $3.26 \times 10^{24}$ | $1.60 \times 10^{24}$ | $3.06 \times 10^{23}$ | $2.16 \times 10^{22}$ |
| 4         | 能值应用总量 Emery used                                               | R + N + F                  | $1.18 \times 10^{25}$ | $2.07 \times 10^{24}$ | $3.82 \times 10^{23}$ | $2.20 \times 10^{22}$ |
| 5         | 出口能值 Exported emery                                             | $P1 \times 10 P + T + N_2$ | $2.39 \times 10^{24}$ | $9.30 \times 10^{23}$ | $2.62 \times 10^{23}$ | $1.40 \times 10^{22}$ |
| 6         | 本地资源能值比率 Indigenous sources/ U                                  | $(N_0 + N_1 + R)/U$        | 0.723                 | 0.225                 | 0.173                 | 0.176                 |
| 7         | 能值产出率 Emery yield ratio                                         | Y/F                        | 0.733                 | 0.581                 | 0.859                 | 0.683                 |
| 8         | 能值交换率 Emery exchange ratio                                      | F/Y                        | 1.27                  | 1.72                  | 1.16                  | 1.47                  |
| 9         | 可更新资源比率 Renewable to emery used                                 | R/U                        | 0.146                 | 0.0585                | 0.122                 | 0.00123               |
| 10        | 购买能值比率 Fraction of use purchased                                | F/U                        | 0.277                 | 0.770                 | 0.827                 | 0.982                 |
| 11        | 能值投资率 Emery investment Ratio                                    | $F/(R + N)$                | 0.38                  | 3.42                  | 4.02                  | 55.8                  |
| 12        | 能值密度 Emery Density                                              | U/Area ( $m^2$ )           | $1.25 \times 10^{12}$ | $6.86 \times 10^{12}$ | $8.99 \times 10^{11}$ | $8.05 \times 10^{14}$ |
| 13        | 人均能值 Emery used per person                                      | U/population               | $4.18 \times 10^{16}$ | $3.60 \times 10^{16}$ | $4.13 \times 10^{16}$ | $4.90 \times 10^{16}$ |
| 14        | 能值负载率 ELR                                                       | $(U - R)/R$                | 5.85                  | 16.1                  | 7.17                  | 813                   |
| 15        | 能值货币比率 Emery/ \$ ratio                                          | $P1 = U/GNP$               | $1.19 \times 10^{12}$ | $1.75 \times 10^{12}$ | $1.24 \times 10^{12}$ | $2.78 \times 10^{12}$ |
| 16        | 电力能值比率 Percentages of electricity to use(%) (el)/U $\times 100$ |                            | 3.80                  | 9.00                  | 14.0                  | 4.93                  |
| 17        | 人均电力能值 Average electricity emery                                | elect/P                    | $1.35 \times 10^{15}$ |                       | $5.81 \times 10^{15}$ | $2.41 \times 10^{15}$ |
| 18        | 人均燃料能值 Fuel use per person                                      | fuel/population            | $7.92 \times 10^{14}$ |                       | $7.45 \times 10^{15}$ | $3.06 \times 10^{15}$ |
| 19        | 能值可持续指标 ESI                                                     | EYR/ELR                    | 0.125                 | 0.036                 | 0.120                 | 0.0008                |
| 20        | 新能值可持续发展指标 EISD                                                 | EYR $\times$ EER/ELR       | 0.159                 | 0.062                 | 0.014                 | 0.0012                |

\* 不可更新的能值 N 可分为 3 部分:  $N_0$  是初级的自然资源;  $N_1$  是集约的自然资源;  $N_2$  是直接出口的自然资源<sup>[2]</sup> The nonrenewable resources N can divided into 3 parts,  $N_0$  is the dispersal rural;  $N_1$  is the concentrated use;  $N_2$  is the direct export<sup>[2]</sup>

### 3.2 澳门生态经济系统能值分析

**3.2.1 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平和经济发展程度。2003 年澳门人均能值利用量为  $4.90 \times 10^{16}$  sej, 为广州市  $1.34 \times 10^{16}$  sej 的 3.7 倍, 约为 2000 年美国人均能值利用量  $4.18 \times 10^{16}$  sej 的 1.2 倍, 2002 年意大利人均能值利用量  $3.60 \times 10^{16}$  sej 的 1.4 倍, 2002 年瑞典人均能值利用量  $4.13 \times 10^{16}$  sej 的 1.2 倍; 澳门旅游人口相当多, 其在澳的消费能值都摊分给了澳门居民, 令人均能值利用量偏高。能值密度与土地面积有反比例关系, 其大小亦可作为城市生态压力的一种量度。澳门能值密度高达  $8.05 \times 10^{14}$  sej/m<sup>2</sup>, 是美国的能值密度  $1.25 \times 10^{12}$  sej/m<sup>2</sup> 的 644 倍, 是意大利的 117 倍, 是瑞典的 895 倍。澳门的能值密度高主要是由于澳门地域狭小人口众多之故。澳门的应用能值中, 进口商品、原材料和燃料占 90.3%。作为能物流信息流高度密集的城市生态系统, 其能值密度自然比整个国家能值利用强度高<sup>[9]</sup>。

**3.2.2 能值货币比率和能值投资率** 澳门的能值货币比率显示能值利用量与国民生产总值之间的关系, 可以看出开发程度和工业化程度。比值高, 代表单位经济活动换取之能值高, 生产过程中使用自然资源比值较大。澳门的能值货币比率为  $2.78 \times 10^{12}$  sej / \$, 高于中国能值货币比率  $4.94 \times 10^{12}$  sej / \$, 而低于 2000 年美国的能值货币比率为  $1.19 \times 10^{12}$  sej / \$。能值投资率是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标, 其值越大表明外界投入的能值越大, 经济发展的程度越高。能值投资率为购买能值与本地可更新能值的比率, 全球平均能值投资率为  $2^{[5,9]}$ , 美国为 0.38, 意大利为 3.43, 瑞典为 4.02。澳门由于地域狭小, 本地可更新能值十分有限, 能值投资率高达 55.8, 反映了澳门购买能值非常高, 而本土资源严重缺乏的特点, 大量的投资和频繁的经济活动, 令自然环境承受较大的压力。澳门出口加工业货币投入大, 大量购买能值削弱了产品竞争力。广州市的能值投资率是 35<sup>[9]</sup>, 迁往华南地区的澳门厂家可得到较多的环境资源, 经济效益更高。这是近 10a 澳门制造业外迁的主要原因。

**3.2.3 能值受益率(能值交换率)** 在能值分析中能值受益率越大表明某城市或地区流入的能值越多, 信息和服务聚集度越高, 能量货币流通越快, 而输出的能值相对越小, 城市真正的能值财富不断增加, 在对外贸易中处于获利地位。澳门的总体能值受益率为 1.47, 高于美国的 1.3, 高于广州的 0.62<sup>[9]</sup>, 略低于意大利的 1.7。澳门进口的货物按重量计算 98.4% 来自中国大陆, 具有高能值低价格的特点, 澳门在这种交换中, 得到的能值收益很大, 因为中国的能值货币比率是澳门的 1.8 倍, 以同等货币同中国的贸易交往中, 至少可以得到 0.8 倍的净能值利益。

**3.2.4 人均燃料能值和电力能值使用率** 人均燃料能值一方面表示消费水平, 另一方面体现环境压力。人均燃料能值美国为  $7.92 \times 10^{14}$  sej, 瑞典为  $7.45 \times 10^{15}$  sej, 澳门为  $3.06 \times 10^{15}$  sej, 是美国的 3.9 倍, 原因是澳门发电靠进口大量石油产品, 不可能像美国能利用水力发电、风力发电和核电, 而火力发电的能值转换率较高。电力能值使用率显示电力使用情况, 亦是经济发展的指数之一。澳门由于目前耗电量小的第三产业高度发达, 耗电量大的加工制造业在 GDP 中仅占 7.25%, 电力应用能值占总能值比率仅为 4.93%, 高于美国 2000 年的 3.8%, 低于意大利的 9% 和瑞典的 14.0%。像澳门这样人口高度密集的城市, 大力发展第三产业可减低发电产生的环境污染问题, 缓解城市环境压力, 从能值分析的角度看是澳门可持续发展的一个方向。

**3.2.5 能值自给率、废弃物的能值** 城市生态系统能值自给率越低, 系统的自给能力越弱, 对外部资源的依赖程度越高。澳门缺乏自然资源, 资源几乎完全依赖外界提供, 能值自给率仅为 1.8%。远低于美国的 72.3%, 意大利的 22.5% 和瑞典的 17.1%。

2002 年废弃垃圾  $24.9 \times 10^8$  kg, 澳门地少人多, 焚烧处理垃圾年产能值为  $27.2 \times 10^{20}$  sej。焚烧后的残余垃圾只有焚烧前的 20%, 用于填海造地。垃圾全面处理, 减少了对周边环境的影响, 但垃圾能值资源未得到充分利用。澳门年排放的废气达  $1.94 \times 10^9$  kg, 以汽车尾气和发电厂排放的废气为主。废气内包含的能值, 缺少相应的能值转换率未纳入计算。澳门废水排放量为  $4.88 \times 10^7$  m<sup>3</sup>, 废水经二级处理后排放, 废水处理率约为 90%<sup>[23]</sup>, 废水能值为  $1.6 \times 10^{20}$  sej。废弃物作为系统在生态经济过程中产生的副产品, 虽包含很高的能值, 但不能为系统所利用。废弃物的能值比率为废弃物能值与环境可更新资源能值的比率, 澳门废弃物能值是更可

新资源能值的 103 倍(有学者认为其值显示污染物的累积状况,反映环境压力)。由于废弃物经过处理,对自然环境的影响和压力已大大降低。

**3.2.6 旅游业能值** 按公式(5)对澳门旅游业能值的贡献和消耗比率(即能值受益率(交换率))进行了计算:

$$Er = (8.65 \times 10^{21}) / (3.26 \times 10^{21}) = 2.65$$

这个数值相当于澳门旅游业的能值产出投入比,即游客每支付 2.65sej 的能值财富,却只消费 1 sej 能值。旅游业为澳门的龙头产业,带来大量的经济收入,同时亦加重旅游地的环境压力。澳门为外来游客提供服务,可以理解为服务输出。旅游业的收入增加了城市的 GDP,2003 年澳门旅游业收益达 52.1 亿美元,按世界能值标准折算的能值为  $86.5 \times 10^{20}$  sej,相当于系统利用总能值的 39.3%。

#### 4 结论

能值理论丰富了生态学与经济学的定量研究方法,被认为是联结生态学和经济学桥梁。它对自然资源的科学评价与合理利用、经济发展方针的制定,可持续发展战略的实施皆具指导意义。研究城市或地区的可持续发展,生态经济学是较为适当的方法。2002 年李金平运用生态足迹理论分析了澳门的旅游博彩业。得益于博彩行业的经济高效性,加上广阔的腹地众多的赌客,澳门生态足迹产出值为 4,202 \$/hm<sup>2</sup>,高于美国 3,337 \$/hm<sup>2</sup>、香港 3,982 \$/hm<sup>2</sup>、新加坡 3,359 \$/hm<sup>2</sup> 的水平,是世界平均水平 1,106 \$/hm<sup>2</sup> 的 3.8 倍<sup>[20]</sup>。从能值和生态足迹这两种分析方法得出的结论都说明澳门生态经济系统的可持续建基于旅游博彩业的巨大收益,然后通过市场购入需要的能值或生态足迹,维系其生物物理平衡和人口承载力。

对澳门的能值指标进行的分析发现,能值可持续发展指标体系(ESI)对于衡量一个国家和地区是适当的,对于衡量一个人口高度密集的城市,由于 ESI 太小,其所代表的含义难以界定,而用能值剩余测度则更加合适。澳门未来生态经济的发展,目前有两种主流观点;一种认为澳门应该走产业多元化之路,以避免国际上博彩开放带来的冲击。第二种观点的人认为,澳门应当发挥独特的区位优势,借助多元化的旅游业和众多历史文化遗产,吸引更多游客来澳门观光消费,带动澳门经济的发展。澳门地域狭小,资源贫乏,从能值分析的角度企业投资办厂由于能值投资率很高,无利可图,在区域竞争中将处于劣势;而旅游业带动的第三产业具有很高的能值受益率( $Er = 2.65$ ),汇集能值的能力强。立足于能值是真正财富的观点,澳门未来的可持续发展应扬长避短,大力发展旅游服务业。为吸引更多游客,澳门应控制污染物的排放,合理处置或利用废弃物,打造更多旅游景点。同时证明,中央政府开放中国城市居民港澳自由行是对两个特区可持续发展的有力支持。关于澳门废弃物能值的投入产出效益分析,将在以后的研究中深入。

#### References:

- [1] Huang S L, Hsu W L. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape & Urban Planning*, 2003, 63(2): 61 ~ 75.
- [2] Odum H T. *Environmental Accounting-Emergy and Environmental Decision Making*. New York: Wiley, 1996, 36 ~ 249.
- [3] Odum H T. Folio # 2, Emergy of Global Processes. *Handbook of Emergy Evaluation*. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, 2000. 5 ~ 24.
- [4] Lan S F, Odum H T. Emergy evaluation of the environment and economy of Hong Kong. *Journal of Environmental Sciences*, 1994, 6(4), 432 ~ 439.
- [5] Huang S L, Odum H T. Ecology and economy: EMWEGY synthesis and public policy in Taiwan. *J Environ Manage.*, 1991, 32: 313 ~ 333.
- [6] Ulgiati S, Odum H T and Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability: An emergy analysis of Italian. *Ecological Modeling*, 1994, 73: 215 ~ 268.
- [7] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecol. Eng.*, 1997, 9: 51 ~ 69.
- [8] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *J. Clean. Prod.*, 2002, 10: 321 ~ 334.
- [9] Lan S F, Qing P, Lu H F. *The emergy analysis of ecological economy system*. China. Beijing: Chemical Industry Publishes, 2002. 1 ~ 423.
- [10] Brown M T, Buranakarn V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, 38: 1 ~ 22.
- [11] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecol. Model.*, 1998, 108: 34 ~ 35.
- [12] The Statistics and Census Service (DSEC). *Yearbook of Statistic 2003*. Macao: Macao Special Administration Region, 2004. 1 ~ 257. The Statistics and

Census Service webnet: [www.dsec.gov.mo](http://www.dsec.gov.mo)

- [13] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 2004, 178: 215 ~ 225.
- [14] Abel T. Ecosystems, sociocultural systems, and ecological-economics for understanding development: the case of tourism on the Macao, N. A. Dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida, 2000. Available online at <http://etd.fcla.edu/etd/uf/2000/ane0595/Abel.pdf>.
- [15] Brown M T, Ulgiati S. Emery measures of carrying capacity to evaluate economic investments. *Population and Environment*, 2001, 22(5): 471 ~ 501.
- [16] Cialani C, Russi D, and Ulgiati S. Investigating a 20-year national economic dynamics by means of emergy-based indicators. In: Brown M T, Campbell D, Comar V, Huang S L, Rydberg T, Tilley D R and Ulgiati S. (Editors). *Emergy 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, 2004.
- [17] Hagström P, Nilsson P O. 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., Editors. *Emergy 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 2004.
- [18] Ulgiati S, Odum H T and Odum E C, the prosperous way down. *Ecological Modeling*, 2004, 178(1-2): 249.
- [19] Lu H F, Lan S F, Li L, *et al.* New emery indices for sustainable development. *Journal of Environmental Science*, 2003, 15(4): 562 ~ 569.
- [20] Lei K P, Wang Z S. The analysis of ecological footprint of Macao in 2001 (In Chinese, with English abstract). *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 197 ~ 203.
- [21] Luo S M, Chen Y H, Yan F. *Agriculture ecology. China. Hu'nan: Hu'nan Science and Technology Publish House*, 1987. 450 ~ 455.
- [22] Lan S F, Odum H T, Liu X M. Energy Flow and Emery Analysis of the Agroecosystems of China. *Ecological Science*, 1998, 17(1): 32 ~ 39.
- [23] Odum H T, Odum E C. *Energy basis for man and nature*, 2nd. New York: McGraw-Hill, 1983. 35 ~ 159.
- [24] Odum H T. *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, 1987. 54 ~ 89.
- [25] Yan M C, Odum H T. *New visual angle to view eco-economic system*. Beijing: China Zhigong Publishing House, 2001. 84 ~ 88.

#### 参考文献:

- [9] 蓝盛芳, 等. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002. 1 ~ 386.
- [12] 澳门特别行政区统计暨普查局. 澳门统计年鉴 2003. 澳门: 澳门政府官印局, 2004. 1 ~ 257. 澳门统计局网页: <http://www.dsec.gov.mo>
- [20] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 197 ~ 203.
- [21] 骆世明, 陈聿华, 严斧. *农业生态学*. 湖南: 中国湖南科技出版社, 1987. 450 ~ 455.

附录 A 澳门 2003 年进口食物能值计算过程

Appendix A The emergy calculation process of import foods of Macao in 2003<sup>a</sup>

| 食物类别<br>Item                  | 原料 Raw<br>Mass<br>(kg) | 热值 <sup>[21]</sup><br>Heat value<br>(kal/kg) | 能量<br>Energy(J)          | 能值转换率<br>Transformity<br>(sej/J) | 能值 Emery<br>(sej/a)     | 能值转换率来源 Reference<br>of transformity      |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| 肉和肉碎 Meat, offal              | 18606616               | 11600                                        | $4.51746 \times 10^{14}$ | 3170000                          | $1.432 \times 10^{21}$  | 严茂超 <sup>[25]</sup> Yan M.-C., 2001       |
| 活动物 Live animals              | 18321939               | 5800                                         | $3.11384 \times 10^{14}$ | 1710000                          | $5.3247 \times 10^{20}$ | Odum, 1989                                |
| 鱼和水生动物 Fish, quatic animals   | 23324968               | 1000                                         | $9.76383 \times 10^{13}$ | 1710000                          | $1.6696 \times 10^{20}$ | 蓝盛芳 <sup>[22]</sup> Lan S.-F., Odum, 1998 |
| 动物油脂 Animal fats and oils     | 8113937                | 5500                                         | $1.86807 \times 10^{14}$ | 1710000                          | $3.1944 \times 10^{20}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 肉碎和脂渣 Meat offal, greaves     | 608660                 | 2000                                         | $5.0957 \times 10^{12}$  | 1710000                          | $8.7136 \times 10^{18}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 肉类调制品 Preparations of meal    | 8008763                | 5000                                         | $1.67623 \times 10^{14}$ | 1710000                          | $2.8664 \times 10^{20}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 奶蛋蜜 Dairy; eggs; honey        | 14017553               | 1700                                         | $9.97517 \times 10^{13}$ | 2000000                          | $1.995 \times 10^{20}$  | 严茂超 Yan M.-C., Odum.2001                  |
| 活树和切花 Live trees; cut flowers | 3515324                | 4500                                         | $6.62182 \times 10^{13}$ | 44000                            | $2.9136 \times 10^{18}$ | Odum HT. <sup>[23]</sup> 1983             |
| 食用蔬菜 Edible vegetables        | 33827922               | $10^{20}$                                    | $1.44436 \times 10^{14}$ | 27000                            | $3.8998 \times 10^{18}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum. 1998                 |
| 豆类 Leguminous vegetables      | 69742                  | 800                                          | $2.33552 \times 10^{11}$ | 690000                           | $1.6115 \times 10^{17}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 麦麸 Wheat gluten               | 1418                   | 2000                                         | 11871496000              | 690000                           | $8.1913 \times 10^{15}$ | Odum, 1987                                |
| 干菜 Dried vegetables           | 561714                 | 3400                                         | $7.99454 \times 10^{12}$ | 690000                           | $5.5162 \times 10^{18}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 薯类 Potatoes                   | 920555                 | $10^{20}$                                    | $3.93051 \times 10^{12}$ | 2700                             | $1.0612 \times 10^{16}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 可食用根 Edible roots             | 1327442                | $10^{20}$                                    | $5.66781 \times 10^{12}$ | 27000                            | $1.5303 \times 10^{17}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 块茎根 Starchy roots. Tubers     | 1806447                | 800                                          | $6.04943 \times 10^{12}$ | 27000                            | $1.6333 \times 10^{17}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 水果核果 Edible fruit and nuts    | 20202213               | 500                                          | $4.22832 \times 10^{13}$ | 53000                            | $2.241 \times 10^{18}$  | Ulgianti, Odum, 1992                      |
| 咖啡, 茶 Coffee, tea             | 1239937                | 3900                                         | $2.02425 \times 10^{13}$ | 200000                           | $4.0485 \times 10^{18}$ | Ulgianti, Odum, 1992                      |
| 谷类 Cereals                    | 335625                 | 3700                                         | $5.19823 \times 10^{12}$ | 147524                           | $7.6686 \times 10^{17}$ | 严茂超 Yan M.-C., Odum.2001                  |
| 玉米 Corn                       | 1825                   | 3950                                         | 30175827500              | 83000                            | $2.5046 \times 10^{15}$ | Odum. 1996                                |
| 米 Rice                        | 26109094               | 3700                                         | $4.04383 \times 10^{14}$ | 35900                            | $1.4517 \times 10^{19}$ | 严茂超 Yan M.-C., Odum.2001                  |
| 磨粉 Milling products           | 9242934                | 4500                                         | $1.74109 \times 10^{14}$ | 68000                            | $1.1839 \times 10^{19}$ | Odum, 1987                                |
| 种子 Seeds, spores              | 2068                   | 5000                                         | 43283240000              | 68000                            | $2.9433 \times 10^{15}$ | Odum, 1987                                |
| 其它淀粉 Other meslin flour       | 793337                 | 4500                                         | $1.49441 \times 10^{13}$ | 148000                           | $2.2117 \times 10^{18}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 植物粉 Starches; inulin          | 112465                 | 4500                                         | $2.1185 \times 10^{12}$  | 84900                            | $1.7986 \times 10^{17}$ | 严茂超 Yan M.-C., Odum.2001                  |
| 草药 Medicinal plants           | 4047795                | 5000                                         | $8.47203 \times 10^{13}$ | 86000                            | $7.286 \times 10^{18}$  | 严茂超 Yan M.-C., Odum.2001                  |
| 油料种或果 Oil seeds or fruits     | 224                    | 5000                                         | 4688320000               | 1300000                          | $6.0948 \times 10^{15}$ | Odum HT <sup>[2]</sup> , 1996             |
| 豆类 Beans                      | 757361                 | 800                                          | $4.66034 \times 10^{12}$ | 690000                           | $1.4262 \times 10^{18}$ | Odum <sup>[24]</sup> , 1987               |
| 树汁 Vegetable saps             | 4666                   | 5000                                         | 97659380000              | 160000                           | $1.5626 \times 10^{16}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 蔬菜料 Vegetable materials       | 1846453                | 3500                                         | $2.70524 \times 10^{13}$ | 44000                            | $1.1903 \times 10^{18}$ | Odum HT. 1983                             |
| 糖 Sugars                      | 7250944                | 4500                                         | $1.36586 \times 10^{14}$ | 85000                            | $1.161 \times 10^{19}$  | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum. 1994.                |
| 可可 Cocoa                      | 629936                 | 5500                                         | $1.4503 \times 10^{13}$  | 860000                           | $1.2473 \times 10^{19}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum. 1994.                |
| 薯 Potatoes                    | 2764                   | 800                                          | 9256083200               | 148000                           | $1.3699 \times 10^{15}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 调料 Kinds of preparations      | 6250664                | 5000                                         | $1.30826 \times 10^{14}$ | 1710000                          | $2.2371 \times 10^{20}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 酱油 Soya sauce                 | 1824106                | 1000                                         | $7.63571 \times 10^{12}$ | 1710000                          | $1.3057 \times 10^{19}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 植物调料 Plants Preparations      | 5955939                | 2100                                         | $5.23563 \times 10^{13}$ | 1710000                          | $8.9529 \times 10^{19}$ | 蓝盛芳 Lan S.-F., Odum, 1998                 |
| 饮料 Beverages                  | 72513267               | 1300                                         | $3.94603 \times 10^{14}$ | 60000                            | $2.3676 \times 10^{19}$ | Odum <sup>[24]</sup> , 1987               |
| 饲料 Animal fodder              | 2730343                | 1700                                         | $1.94297 \times 10^{13}$ | 80000                            | $1.5544 \times 10^{18}$ | Odum, 1987                                |
| 烟草替代品 Tobacco substitutes     | 2632736                | 3900                                         | $4.29805 \times 10^{13}$ | 84900                            | $3.649 \times 10^{18}$  | 严茂超 <sup>[25]</sup> Yan M.-C., Odum.2001  |
| 总计 Total                      | 297519696              |                                              | $3.13341 \times 10^{15}$ |                                  | $3.3854 \times 10^{21}$ |                                           |

a 每项之能值 = 质量 × 热值<sup>[21]</sup> × 4186 × 能值转换率