

# 基于生物物理视角的城市生态竞争力

张力小, 杨志峰\*, 陈 彬, 刘耕源, 梁 竞

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:**研究城市生命支持系统、系统解析城市运行的生物物理代谢过程是深入揭示现代城市“病”产生机理与作用规律的新视角。借助生态能量学方法之一——能值方法对城市生态经济系统进行了系统分析,并构建了综合性城市生态竞争力指数 UECCI,将之应用于北京、上海和广州 3 个案例城市 1990 年到 2005 年的评价中。同时,引入并整合台北(1991 和 1998 年)和澳门(1990、1993、1995、1997、2000、2003 和 2004 年)的能值分析结果进行参照对比。结果显示:研究期内 3 个案例城市生态经济系统的演化趋势呈现很好的一致性,但广州的 UECCI 一直高于北京和上海,广州城市生态经济系统在可持续发展的长远尺度上似乎更具有生态竞争力;与台北与澳门的进一步比较发现,尽管中国大陆城市经济发展程度不及台北与澳门,其 UECCI 总体上却高于台北和澳门。

**关键词:**城市生态系统;生态竞争力;能值;可持续能力

文章编号:1000-0933(2008)09-4344-08 中图分类号:Q149 文献标识码:A

## An analysis on urban ecological competition capability with biophysical accounting method

ZHANG Li-Xiao, YANG Zhi-Feng\*, CHEN Bin, LIU Geng-Yuan, LIANG Jing

*School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4344 ~ 4352.

**Abstract:** Policy decisions associated with urban development are usually made with a flawed accounting system that ignores the basic life-support system for all metabolism activities. Studying urban life-support system and analyzing its biophysical base systematically of urban ecosystem is a new perspective to understand the mechanism on modern urban illness. Emery method, one of ecological energetic method, was adopted to analyze the urban ecological economic systems. The relevant indices and ratios based on emery flows can be used to evaluate the behavior of ecological economic systems, for the present case, however, a new indicator of Urban Ecological Competition Capacity Index (UECCI) was put forward based on available emery indicators to assess the overall performance of urban ecosystem. Beijing, Shanghai and Guangzhou were chosen as case cities and the period from 1990 to 2005 was considered. Meanwhile, previous evaluation results of Taipei in 1991 and 1998, and Macao in 1990, 1993, 1995, 1997, 2000, 2003 and 2004 were also incorporated for cross references. The results show that the evolution trends for three cities appear to be very similar, however, the UECCI of Guangzhou is higher than those of Beijing and Shanghai, and thus it seem to have greater ecological competition capability from the perspective of longer term sustainability. Further comparison with Taipei and Macao, it is found that the development level

基金项目: 国家科技部重大基础研究计划资助项目(2005CB724204); 国家自然科学基金资助项目(40701173)

收稿日期: 2007-11-20; 修订日期: 2008-06-10

作者简介: 张力小(1977~), 男, 山东沂水人, 博士, 主要从事城市生态与系统生态学研究. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by National Basic Research Program of Ministry of Science and Technology (No. 2005CB724204) and National Natural Science Foundation of China (No. 40701173)

**Received date:** 2007-11-20; **Accepted date:** 2008-06-10

**Biography:** ZHANG Li-Xiao, Ph. D., mainly engaged in urban ecology and systems ecology. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

of mega cities in mainland are inferior to those of Taipei and Macao to some extent, but the UECCI of case cities are higher than those of Taipei and Macao.

**Key Words:** urban ecosystem; ecological competition capability; emergy; sustainability

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<sup>[1,2]</sup>。然而目前对于城市生态系统的评价主要以新古典经济学家所发展的环境经济为主流,评价过程也以人类对环境价值的主观判断为基础,缺乏对生态系统的生物物理基础之考量(biophysical consideration),或仅将其视为经济系统的“外部性”<sup>[3]</sup>。漠视来自生物物理方面的制约,或者说忽视环境系统对城市的生命支持功能而一味追求经济增长的城市发展模式必然会带来灾难性的后果<sup>[4]</sup>。

因此,本文转换研究视角,通过构建城市生态竞争力指标,系统解析城市运行的生物物理基础与过程,来探讨城市生态经济系统演化的可持续性问题。通过对案例城市——北京、上海和广州的城市生态经济系统各种生产与消费活动中生态流跟踪以及系统反馈等过程的研究,探讨其生态效益、环境负荷、动力机制及其调控办法等,从而从本质上把握城市系统运行的内在规律,为从根本上解决现代城市“病”问题提供有效的理论基础和方法体系。

## 1 城市生态竞争力

由于城市是一个异养型的生态系统,脱离与为其提供能量、食物、原料和消纳废弃物的区域环境稳定的联系,城市的自组织体系将不能维系。城市的运转依赖于持续不断的能量、资源和信息的供应。在一个城市中,“新陈代谢”开始于物质的利用、能量的消耗和城市的发展,一部分物质和能量被作为城市基础设施储存起来,物质和废弃物则通过人工循环系统进行迁移,伴随着这一系列过程,污染物被排放到大气、陆地和水域系统中,进一步影响着其生命支持系统。城市及其生命支持系统之间这些循环能否稳定、高效以及流畅地运行直接决定了城市的发展潜力和生态环境质量的好坏,也间接影响着人类生活的质量。

因此,可以从物质输入、转化、储存以及废弃物的排放等过程对城市系统进行分析<sup>[5,6]</sup>,将城市生态系统作用过程分解为 3 个部分:生命支持系统、城市生产消费过程和城市代谢产物(图 1),城市的生物物理代谢贯穿于这 3 个过程中,它是系统运行的基础,也是城市生态系统自组织运行的内在动力。从这样的一个视角看,城市生态竞争力就是城市有效组织(包括获取)物质循环、能量流动和信息传递等过程,优化系统生物物理代谢水平和代谢效率,保持并提高城市活力的能力。

从上述分析可见,在城市生物物理代谢链条中,有 4 个关键环节影响着城市生态竞争力,即资源来源,资源消费结构,系统总体的生态经济效率以及代谢产物对环境的影响。持续安全的资源供应和资源结构、稳定高效的经济生产水平以及较低的污染物排放水平,是提高城市生态竞争力的方向,这也与城市可持续发展的目标是一致的,即减少城市的自然资源利用与废弃物排放水平,同时却不断提高城市的生态活力,使其更加适应当地局部、区域乃至全球的生态系统<sup>[7]</sup>。

## 2 研究方法及案例城市

### 2.1 能值分析方法

能值是一种重要的基于生物物理原理的生态经济评价方法,也是从生态系统食物链和热力学原理中引申出来重要的生态能量分析方法,以能量定律、系统学、系统生态学为理论基础,将生态系统和经济系统的各种形式的能量归为太阳能来评价自然过程和人类经济活动,对自然系统和经济系统的资源、服务或商品的价值进行定量分析,提供了一个衡量和比较各种不同种类、不可比较能量(能量流、物质流、经济流、信息流)的共同尺度和标准<sup>[8,9]</sup>,单位为太阳能焦耳(solar emjoules,缩写为 sej)。

经过 30 多年的发展,能值理论已形成了相对比较完整的理论体系,提供了一系列用于生态系统可持续性分析与评价的指标体系<sup>[10,11]</sup>,被广泛应用于对湿地生态系统<sup>[12]</sup>、农业生态系统<sup>[13,14]</sup>、工业生产系统<sup>[15]</sup>以

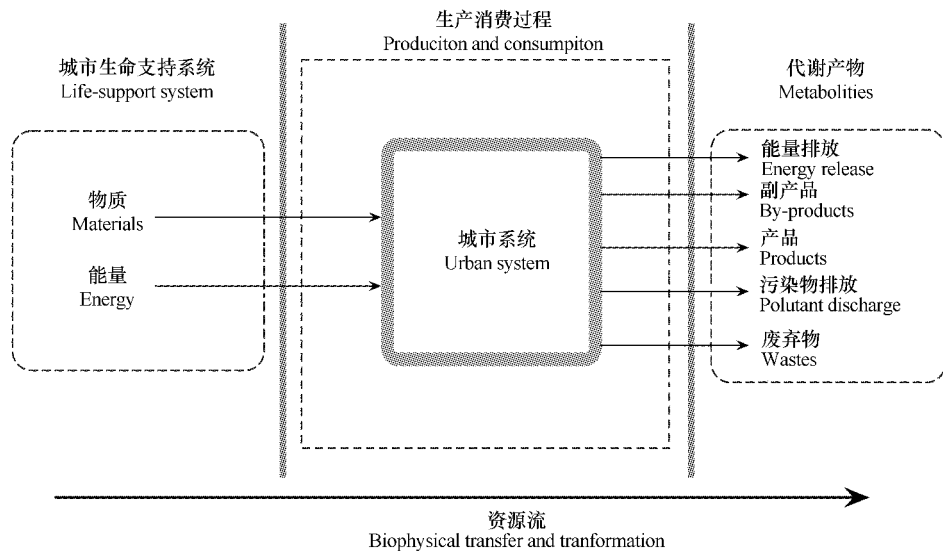


图1 城市生态系统生物物理代谢过程示意图

Fig. 1 Biophysical metabolism model for urban ecosystem

及区域生态系统<sup>[16]</sup>的发展现状与可持续性的评价与分析,为生态管理与生态设计提供决策上的指导。近些年,已有学者将能值分析方法应用于城市生态系统的评价研究中<sup>[17~20]</sup>。关于能值方法的理论基础、分析步骤以及主要指标解释,详细可参阅 Odum、蓝盛芳等人的相关著作介绍<sup>[8,9]</sup>,本研究沿用黄书礼界定的城市生态经济系统边界,并将研究结果与台北和澳门相同年份的结果进行了比较<sup>[3,19,20]</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,并在两者之间进行平行比较,但很难从系统层面进行对比,因为城市生态经济系统在不同方面往往表现出交叉性的差异,相应的指标也就很难出现趋向的一致性。例如,资源禀赋较好的城市,系统运行的生态经济效率可能较低;环境行为友好的城市,却不一定有持续稳定的资源供应等等。因此,可通过整合相应的指标,进一步构建综合性城市生态竞争力指标 UECCI(urban ecological competitive capacity index)。

根据人们对城市生态竞争力的界定,资源获取途径,资源消费结构,系统总体生态经济效率以及环境负荷等4个方面是反映城市生态竞争力的关键指标。这里需要对前两个方面进行说明:城市生态经济系统对外界资源的依赖程度反映了其在竞争能力上的弱点,因为系统维持和发展所需要的资源并不自己控制之下<sup>[21]</sup>;同时,从持续发展的视角来看,一个经济系统要能具有竞争性,必须有免费之可再生资源与需要付费的高品质能量与之搭配<sup>[17]</sup>。因此,选取能值指标体系中能够反映这些方面的4个指标,即能值自给率(emergy self-sufficiency ratio),可再生资源能值所占总能值的比例(percent of renewable resources to emergy used),能值货币比(emergy money ratio)以及废弃物能值与总能值比(waste emergy ratio),构建城市生态竞争力指标 UECCI,归一化处理后可进行不同城市系统的比较,计算公式如下:

$$UECCI = \frac{Esr \times \% Renew}{Emr \times Wer} \quad (1)$$

式中, $Esr$ 为能值自给率, $\% Renew$ 为可再生资源能值所占总能值的比例, $Emr$ 为能值货币比, $Wer$ 为废弃物能值与总能值比。

$$\overline{UECCI}_{ij} = \frac{UECCI_{ij}}{\text{Max}(UECCI_{ij})} \quad (2)$$

式中, $UECCI_{ij}$ 为原始值, $\overline{UECCI}_{ij}$ 为归一化指数, $i$ 为特定年份, $j$ 为不同城市,且 $0 < \overline{UECCI}_{ij} \leq 1$ 。

## 2.2 案例城市概述

北京、上海和广州位于我国南北不同的气候带,分别依托海河流域、长江流域和珠江流域,为京津唐、长江

三角洲和珠江三角洲三大城市群的中心城市,是我国最有经济活力的城市。3 个案例城市很大程度上反映了我国近几十年城市化过程的发展模式与轨迹。但由于所处的自然地理区位、资源禀赋、产业结构和发展历史等方面的不同,使这 3 大城市的生态经济系统有较大差异。

表 1 为北京、上海和广州主要指标比较。由表中可见,北京市的土地面积最大,为 16410.54 km<sup>2</sup>,人口最多,2005 年达 1538.0 万人,但是其人口密度最低,而上海市的人口密度最高,达 2133 人/km<sup>2</sup>,是北京的 2 倍多;经济总量上海最大,但人均 GDP 却是广州最大(68674 元/人)。由于依托不同的流域,广州的人均水资源总量最丰富,达 993.26 m<sup>3</sup>/人,北京最少,只有 212.61 m<sup>3</sup>/人。万元 GDP 能耗、水耗也有很大的差异,北京由于水资源极度缺乏,其万元 GDP 水资源消耗不到上海和广州的 1/2。

表 1 北京上海广州基本情况统计表(2005 年)

Table 1 Statistical table for Beijing, Shanghai and Guangzhou in 2005

| 项目 Item                                                                                | 北京 Beijing | 上海 Shanghai | 广州 Guangzhou |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|--------------|
| 面积(km <sup>2</sup> ) Area(km <sup>2</sup> )                                            | 16410.54   | 6340.50     | 7434.4       |
| 主要依托流域 Associated river basin                                                          | 海河流域       | 长江流域        | 珠江流域         |
| 总人口(万人) Total population (10 thousand)                                                 | 1538.0     | 1352.39     | 750.53       |
| 人口密度(人/km <sup>2</sup> ) Population density (person/km <sup>2</sup> )                  | 937        | 2133        | 1010         |
| GDP(亿元) GDP(100 million yuan)                                                          | 6886.3     | 9154.18     | 5154.20      |
| 人均 GDP(元/人) Per capita GDP( yuan / person)                                             | 45444      | 67297       | 68674        |
| 人均水资源(m <sup>3</sup> /人) Per capita water resources (m <sup>3</sup> /person)           | 212.61     | 203.71      | 993.26       |
| 万元 GDP 水耗(m <sup>3</sup> /万元) Water consumption per thousand yuan GDP(m <sup>3</sup> ) | 50.63      | 125.17      | 131.4        |
| 万元 GDP 能耗(吨标准煤/万元) Energy consumption per thousand yuan GDP (tce)                      | 0.80       | 0.88        | 0.78         |

本研究对北京、上海和广州 3 个城市从 1990 年至 2005 年共 48a 的数据进行了能值核算,并计算了 3 个城市各个年份的 UECCI;同时,利用文献<sup>[3]</sup>的核算结果计算了台北市 1991 和 1998 年的 UECCI 值,利用文献<sup>[19,20]</sup>计算了澳门 1990、1993、1995、1997、2000、2003 和 2004 年的 UECCI 值,作为参照进行了对比分析。

### 3 结果分析

#### 3.1 能值使用强度

选择能值使用总量和能值密度来反映城市的能值使用强度。2005 年北京、上海和广州的能值使用总量分别是  $3.76 \times 10^{23}$ 、 $3.54 \times 10^{23}$ 、 $2.52 \times 10^{23}$  sej,图 2 是研究期内案例城市能值使用总量的变化趋势图。从图中可以看出,从 20 世纪 90 年代初期开始,这 3 个城市的能值使用总量的变化趋势基本相同,呈快速的指数趋势增长,增长速率分别为 7.52%、6.85%、8.93%。1992 年到 1993 年对于广州和上海是一个快速增长期,广州的总能值使用量在这一年的增长率为 43.73%,北京的第一个快速增长期起于 1994 年。从 1999 年后,3 个城市都进入了一个快速增长期。能值使用总量的指数式增长反映了我国城市化过程仍然处在规模扩张的阶段,即使北京、上海和广州这样的超大城市也没有进入后城市化阶段。

能值密度代表单位土地面积上能值的使用量,可客观评价系统经济发展程度和水平,能值密度越大,表明系统经济开发程度越高,发展等级越高。图 3 反映了北京、上海和广州的能值密度变化趋势。和能值总使用量不同,3 个城市的能值使用密度拉开了一定的梯度。上海市的能值密度最大,广州次之,北京最小,反映出

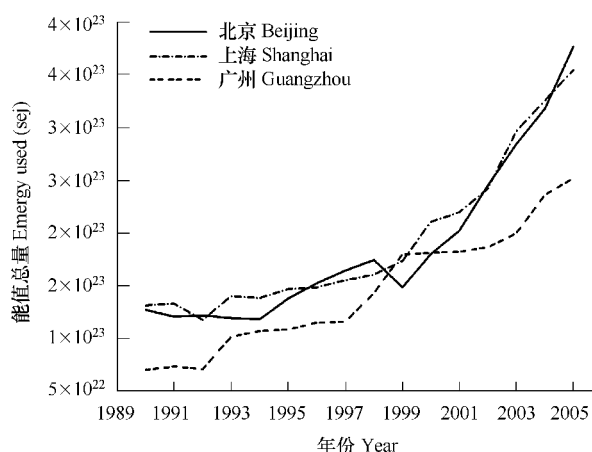


图 2 北京、上海、广州能值使用总量变化趋势图

Fig. 2 Total emergy use in Beijing, Shanghai and Guangzhou from 1990 to 2005

从总体上看还是上海经济发展程度相对较高。将核算结果进一步和中国台北和澳门相同年份的值进行相比,北京、上海和广州的能值密度总体上比台北和澳门小 1~3 个数量级,说明中国大陆城市的总体发展情况在世界范围内处于中等水平,有待继续提高自己的等级地位和影响力。

能值利用强度的变化很大程度上体现了我国城市的发展态势。1978 年后,伴随着国民经济高速增长和城市发展方针的转变,我国城市化步入了稳步发展的轨道。特别是进入 20 世纪 90 年代后,在经济体制改革的引动下,3 个城市生态经济系统进入了更加快速增长的长期,这种变化最先在广州和上海响应,北京的反应要慢一些,但从总体上北京和上海的增长速度更快。

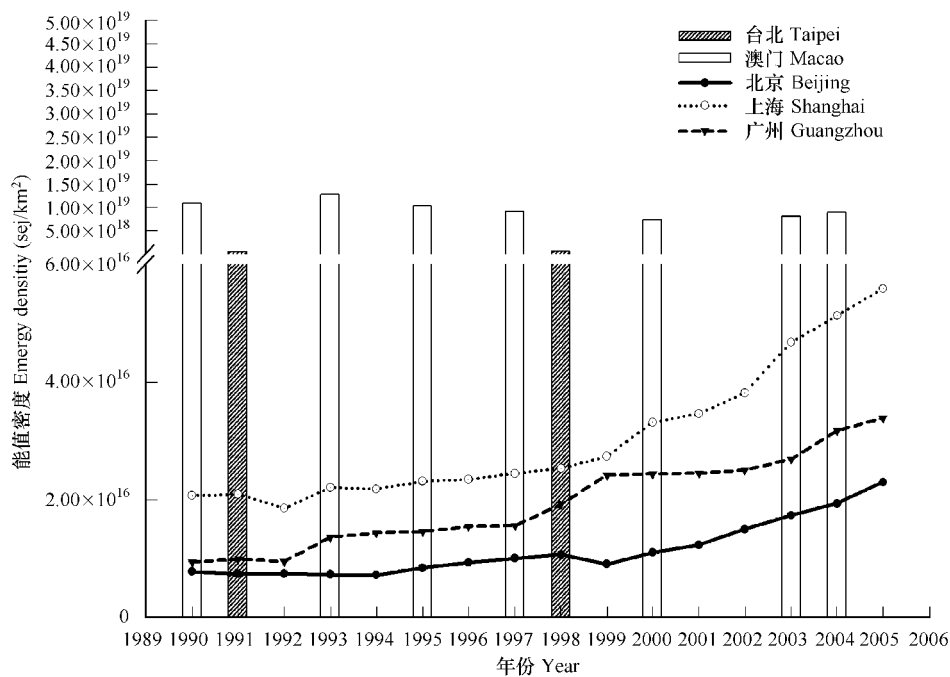


图3 北京、上海、广州能值密度变化趋势图

Fig. 3 The variances of emery density of Beijing, Shanghai and Guangzhou from 1990 to 2005

### 3.2 能值使用结构

城市生态经济系统能值使用结构一定程度上体现其生命支持系统的稳定性和安全性,也在很大程度上决定其发展的方向和水平。从资源供给的方向来看,城市所“消耗”的资源有辖区内开发的本地资源,也有从外地输入的资源 and 产品。可再生资源主要有太阳能、风能和雨水的能量等,直接关系到工农业生产和居民生活,具有重要作用,比如风对于污染扩散的积极作用。不可再生资源则主要有化石燃料和电力的输入等,其直接影响到城市的工业发展,尤其是在自然资源相对缺乏的地区而言,充足的化石燃料输入是维持城市生态系统运行的必要条件。

虽然城市系统的运行主要依赖外界资源的输入,可更新资源的使用量非常少,但这个指标很大程度上决定着区域自然资源禀赋条件对城市的资源支撑,如水资源、粮食、蔬菜等方面的供应能力等。从图 4 可以看到,研究期内 3 个城市的可更新资源占总能值比重总体上非常低且逐年下降,分别从 1990 年的 0.015、0.009、0.021 下降到 2005 年的 0.003、0.003、0.009,这也说明我国发达城市已经完全演变成高度依赖不可更新资源和外界输入的生态经济系统。对指标的进一步比较发现,广州市可更新资源占总能值的比重一直比上海和北京高,北京总体上比上海高,但近几年变化逐渐趋同,2005 年同为 0.003。北京、上海和广州城市生态经济系统所产生的生产和消费过程日渐增强,但主要来自外界物质资源和商品而非可更新自然资源每年所产生的增量,外界输入的能值总量和比例都在持续上升。与台北市进一步比较发现,这项指标和台北市情况相差不大,台北市在 1991 年和 1998 年分别为 0.02 和 0.014。由于澳门本身没有农业,水、食品、燃料、原材料和商品几

乎完全依赖进口,所以澳门的可再生资源能值所占总能值的比例一直较低且相对稳定,研究期内维持在 0.0011~0.0015。

### 3.3 环境负荷

废弃物能值与总能值比这个指标,可以体现出系统在运行中所承受的环境污染压力。由图 5 可以看出,研究期内北京、广州和上海的废弃物与总能值比总体上呈现下降趋势,说明随着城市产业结构调整 and “去工业化”过程的进行,我国城市生态经济系统的相对环境污染负荷呈现下降趋势,但仍然处在一个高位水平。从 3 个城市横向比较来看,上海的废弃物能值与总能值比最大,广州总体上较小,而北京基本上介于两者之间。澳门以旅游和博彩业为主的产业结构或许是导致其该项指标较低的根本原因。

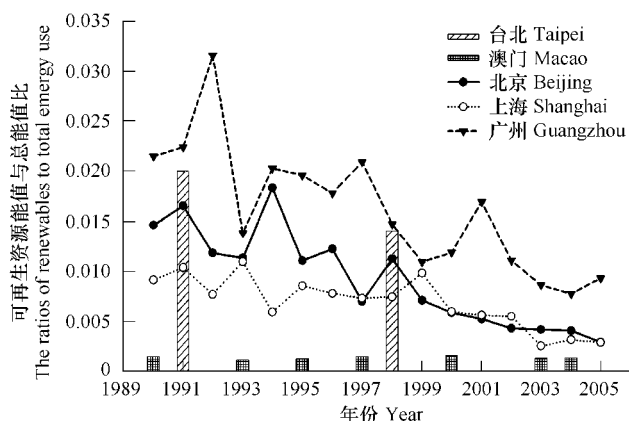


图 4 北京、上海和广州可再生资源能值所占总能值的比例

Fig. 4 The ratios of renewable resources to total energy use in Beijing, Shanghai and Guangzhou from 1990 to 2005

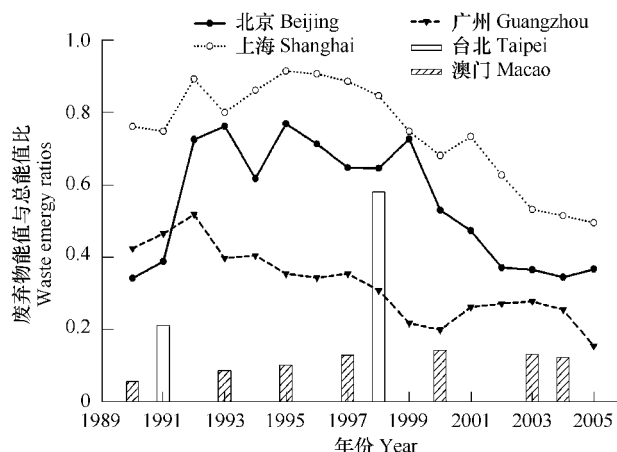


图 5 北京、上海和广州废弃物能值与总能值比

Fig. 5 The ratios of waste energy to total energy use of Beijing, Shanghai and Guangzhou during the studied course

### 3.4 生态经济效率

能值货币比显示地是城市生态经济系统能值使用总量与地区生产总值之间的比例关系,是在城市生态经济系统生态属性与经济属性之间建立起一种的映射关系,其含义是:每流通 1 \$ 货币所需要的商品或者劳务的能值量,在一定程度上可反映城市系统的生态经济效率。如图 6 所示,研究期内 3 个城市的能值货币比总体呈下降趋势,反映出我国发达城市经济发展平稳进行,产业化和商业化程度逐年提高。相比较而言,上海的能值货币比较低,北京和广州的比较呈现波动性变化。尽管上海的资源禀赋相对较差,但其生态经济效率却保持了相对较高的水平,这是因为城市在发展演化过程中,生态经济系统的自组织能力一定程度上能够调整稀缺资源对其约束作用从而提高了资源的总体利用效率<sup>①</sup>,或者说城市化水平较高的城市,城市系统会发展那些使有用能值功率最大化的部件、过程与结构,此即最大功率原理<sup>[25]</sup>。

### 3.5 UECCI 比较

图 7 是北京、上海和广州 1990 年到 2005 年生态竞争力指数 UECCI 的变化趋势图。从图中可以看出,3 个城市总体的生态竞争力指数呈现不同的变化趋势。相比较而言,上海的 UECCI 变化相对稳定,维持在 0.02~0.07 之间的水平,广州波动较大,而北京总体上呈现下降趋势。研究期内各个年份的生态竞争力指数广州均高于北京和上海,上海最小。可见,广州城市生态系统在可持续发展的长远尺度上更具有生态竞争力。这与目前基于城市经济竞争力的评价结果有较大差异<sup>[26]</sup>。进一步与台北与澳门的进行对比发现,广州与北京的 UECCI 普遍高于台北和澳门,在 5 个城市中澳门的值是最低的。

① 张力小. 中国城市群典型城市生态经济系统的对比研究. 北京师范大学博士后研究报告,北京,2007

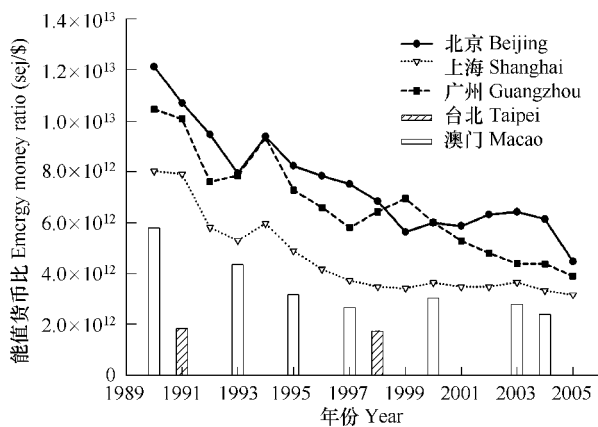


图6 北京、上海和广州能值货币比变化趋势图

Fig. 6 The energy money ratios of Beijing Shanghai and Guangzhou during the studied course

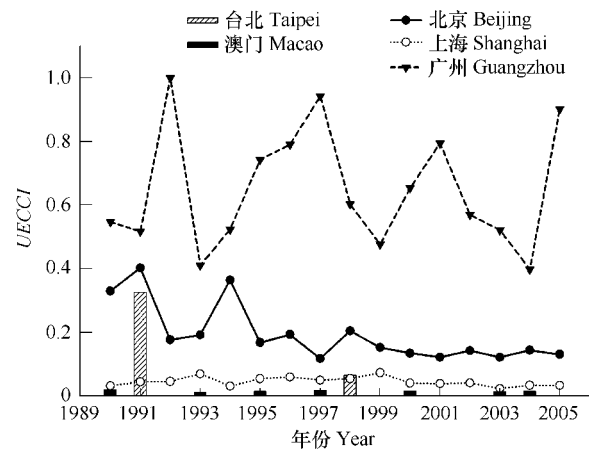


图7 北京、上海和广州 UECI 比较

Fig. 7 The comparison of UECI of Beijing, Shanghai and Guangzhou from 1990 to 2005

如何解析城市生态竞争力的差异是一个较为复杂的问题。广州生态竞争力较强的原因可能由于相对丰富的资源支撑和坚持外向型经济的发展策略。显然,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2%左右,这也是澳门生态竞争力低的主要原因。此外,城市发展历史、城市定位以及外部政策环境都对城市生态竞争力的变化有间接的影响。

然而,如何提高城市的生态竞争力、加强城市可持续能力建设是当前案例城市以及全国各级城市共同面临的紧迫问题。从系统的、生物物理的视角来看,思路应该从后先前看,城市的定位与需求影响着城市的生产与消费,城市的消费与生产影响着城市的资源需求。因此,倡导生态文明的绿色消费模式,加强经济增长方式的转变和产业结构的升级、优化资源供给应是提高城市生态竞争力努力的方向。从政策层面上讲,就是推进节约型城市的建设,因地制宜的明确城市定位与进行发展模式选择,而不是盲目提高城市的行政等级以及追求城市化的速率。

#### 4 结语

对城市生态系统进行综合评估须要考虑生态产品和生态服务对其贡献,忽视其生命支撑系统的评价及其相应的决策,必然会使损害城市可持续发展的能力。本文借助生态能量学方法之一——能值方法对城市生态经济系统进行了系统分析,并构建了综合性城市生态竞争力指数 UECI,将之应用于北京、上海和广州3个案例城市1990年到2005年的评价中,还与台北市和澳门对应年份的评价结果进行了参照对比。结果显示,研究期内3个案例城市生态经济系统的演化趋势呈现很好的一致性,但生态竞争力指数广州均高于北京和上海,上海最小,结果与现有的城市经济竞争力评价结果有很大差异。虽然上海经济发展的程度相对较高,但广州城市生态系统在可持续发展的长远尺度上似乎更具有生态竞争力。由此也可以发现,发达城市生产与消费的持续增长以及由此而来的能流、物流以及资金流的大量涌入造成了日益富裕和繁荣也许是假象,短时间内具有的经济竞争力或许就是潜在生态危机的陷阱。因此,必须从全新的视角来审视城市发展的经济行为和发展模式。

基于生物物理视角,系统评价城市的运行过程,是研究城市生态问题的一个新方向。生态竞争力评价指标,有待于进一步深化,从而能进一步反映城市系统内部错综复杂的作用关系。

#### References:

- [1] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable — And why they are a key to sustainability.

- Environmental Impact Assessment Review. 1996, 16(4-6): 223—248.
- [2] Li F, Liu X S, Hu D, *et al.* Evaluation method and its application for urban sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4793—4802.
- [3] Huang S L. *Energy Basis for Urban Ecological Economic System*. Taiwan: James Publishing House, 2004.
- [4] Georgescu-roegen N. *The entropy law and the economic process*. Cambridge: Harvard University Press, 1971.
- [5] Baccini P, Brunner P. *Metabolism of the anthroposphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [6] Odum E. *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Sunderland: Sinauer Associates, 1989.
- [7] Newman P W. Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*. 1999, 44(4): 219—226.
- [8] Odum H T. *Environmental accounting: energy and environmental decision making*. New York: Wiley, 1996.
- [9] Lan S F, Qin P, Lu H F. *Emergy-Based Analysis of Ecological Economic System*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [10] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 1997, 9(1-2): 51—69.
- [11] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1-2): 201—213.
- [12] Nelson M, Odum H T, Brown M T, *et al.* "Living off the land": resource efficiency of wetland wastewater treatment. *Advances in Space Research*, 2001, 27(9): 1547—1556.
- [13] Lefroy E, Rydberg T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. *Ecological Modelling*, 2003, 161(3): 193—209.
- [14] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*. 2007, 35(7): 3843—3855.
- [15] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(4): 321—334.
- [16] Higgins J B. Emergy analysis of the Oak Openings region. *Ecological Engineering*, 2003, 21(1): 75—109.
- [17] Huang S L, Chen C W. Theory of urban energetics and mechanisms of urban development. *Ecological Modelling*, 2005, 189(1-2): 49—71.
- [18] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emergy synthesis versus material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166—196.
- [19] Lei K, Wang Z, Ton S S. Holistic emergy analysis of Macao. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1): 30—43.
- [20] Lei K, Wang Z. Emergy synthesis of tourism-based urban ecosystem. *Journal of Environmental Management*. in press, doi:10.1016/j.jenvman.2007.04.009
- [21] Pulselli R M, Pulselli F M, Rustici M. Emergy accounting of the Province of Siena: Towards a thermodynamic geography for regional studies. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(2): 342—353.
- [22] BSY. *Beijing Statistical Yearbook 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [23] SSY. *Shanghai Statistical Yearbook 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [24] GSY. *Guangzhou Statistical Yearbook 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [25] Odum H T, Odum E C. *A Prosperous Way Down: Principles and Policies*. Boulder: University Press of Colorado, 2001.
- [26] Ni P F. *Annual report on urban competitiveness. No. 4*. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2006.

#### 参考文献:

- [2] 李锋, 刘旭升, 胡聃, 等. 城市可持续发展评价方法及其应用. *生态学报*, 2007, 27(11): 4793~4802.
- [3] 黄书礼. *都市生态经济与能量*. 台北: 詹氏书局, 2004.
- [9] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. *生态经济系统能值分析*. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [22] 北京统计局. *北京统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [23] 上海统计局. *上海统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [24] 广州统计局. *广州统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [26] 倪鹏飞主编. *中国城市竞争力报告 No. 4——楼市: 城市中国晴雨表*. 北京: 社会学文献出版社, 2006.