

基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用 ——以深圳市为例

赵志强^{1,2}, 李双成^{1,*}, 高 阳¹

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055)

摘要:对生态经济复合系统综合评价是实现区域可持续发展首先要面对的科学问题。针对传统生态足迹模型的系统封闭性和空间互斥性等不合理假设,利用从系统论出发并具有基于流量算法优点的能值分析理论,对传统生态足迹模型加以改进,同时将人类劳务纳入系统评价。改进后的模型仍然从供给与需求角度分析区域消费足迹与承载力,强调区域资源进出口,分析开放系统条件下区域发展状况,并将人类的作用纳入可持续发展评价范畴。以深圳市 2006 年发展状况为例对改进模型进行实证分析。计算结果显示:研究区域具有 48.08ghm² 的人均潜在生态承载力;在生物生产账户上存在 3.60ghm² 的人均生态赤字,需进口来弥补,而在工业产品账户上 3.14ghm² 的人均盈余,可供出口;具有约 4.87ghm² 的人均净承载力出口,为其他区域的发展做出了贡献;人力资源是深圳市可持续发展的重要保障,至少提供相当 5.20ghm² 的人均生态承载力;发展高新技术产业、低能耗的清洁工业,产出高能值转换率的产品,实现区域本地产品在能量系统等级的提升,是提升本地承载力的现实途径。结果表明,改进后模型突破了传统生态足迹模型偏生态的弱可持续性评价局限,成为综合反映区域生态经济发展状况的可持续性评价模型。

关键词:生态足迹模型;能值分析;开放系统;可持续性;深圳

文章编号:1000-0933(2008)05-2220-12 中图分类号:Q149 文献标识码:A

Emergy-based modification for ecological footprint accounting and application to open eco-economic system: a case study of Shenzhen City

ZHAO Zhi-Qiang^{1,2}, LI Shuang-Cheng^{1,*}, GAO Yang¹

1 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2220 ~ 2231.

Abstract: Comprehensively assessing the open eco-economic system is an important issue for the regional sustainable development. To get rid of the shortcomings of general ecological footprint model such as the irrational assumption of system closeness and spatial exclusivity, we proposed a modified ecological footprint model by using emergy theory and method, in which flux calculation and human labor services were incorporated. Although the regional consumption and carrying capacity of the ecological footprint was still analyzed according to the supply and demand in the modified ecological footprint model, it emphasizes import and export of regional resources, the openness of regional socioeconomic system, and incorporation of human labor services. To validate the proposed model, we computed the ecological footprint and carrying capacity with statistical data of Shenzhen City in 2006. The results show that per capita potential ecological carrying capacity in Shenzhen City was about 48.08ghm², and there existed a 3.60ghm² per capita ecological deficit in biological production account that

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(40635028);国家自然科学基金资助项目(40771001)

收稿日期:2007-12-21; **修订日期:**2008-03-24

作者简介:赵志强(1983~),男,山西昔阳人,硕士生,主要从事生态经济和模型模拟研究. E-mail: zqzhao0324@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scli@urban.pku.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40635028; 40771001)

Received date: 2007-12-21; **Accepted date:** 2008-03-24

Biography: ZHAO Zhi-Qiang, Master candidate, mainly engaged in ecological economics. E-mail: zqzhao0324@gmail.com

needs to be offset by imports, but a 3.14ghm^2 per capita ecological surplus in industrial product account that can be used for exports. The per capita net ecological carrying capacity in 2006 was about 4.87ghm^2 , which contributes to the development of other regions. Human resource of Shenzhen City can offer 5.20ghm^2 per capita ecological carrying capacity in 2006, which is important to ensure the sustainability of socioeconomic system. Developing advanced high-technology, low-energy consumption and cleaner industry, producing goods of higher energy transformation rate, and promoting the energy hierarchies of native products are important approaches to regional sustainable development. The modified model solved some deficiencies in general ecological footprint model, by paying more attention to all the elements of eco-economic system but only the ecological components. So, it can be employed to comprehensively assess sustainability of regional eco-economic system.

Key Words: ecological footprint model; energy analysis; open system; sustainability; Shenzhen City

随着社会经济快速发展和人口迅猛增长,资源、环境及经济之间的矛盾日益严重,引发资源枯竭、环境恶化和生态破坏等重大问题。人类活动对地球生态系统的影响越来越大,正确评价人类活动对区域自然环境的压力以及区域生态系统的承载力等系统状态,分析人与自然、环境与经济的关系,是实现社会经济可持续发展面临的重要基本问题。随着评价方法及手段的创新,对于环境可持续性的度量从定性分析逐步发展为定量分析。20 世纪 80 年代提出的能值分析理论^[1~6]和 90 年代提出的生态足迹模型^[7~13]为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径。

本文基于能值分析理论对传统生态足迹模型进行改进,在生态足迹模型框架下,从供给与需求角度分析区域消费足迹与承载力,强调区域资源进出口,分析开放系统条件下区域发展状况,并将人类的作用纳入可持续发展评价框架。最后,应用改进的生态足迹模型分析评价深圳市 2006 年的生态经济系统发展状况,探索城市区域可持续发展途径。

1 传统生态足迹模型及其理论缺陷

1.1 生态足迹模型原理与方法

生态足迹概念首先由加拿大生态经济学家 Rees W E 在 1992 年提出^[7],并在其博士生 Wackernagel M 的协助下将其完善和发展,形成完整的生态足迹模型^[8~13]。

生态足迹基于如下假设来计算:(1)人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其产生的废物的数量;(2)这些资源和废物能够转换成产生等量资源并能消解这些废物的生物生产性土地面积;(3)采用生物生产力来衡量土地时,不同地域间的土地可以用相同的单位来表示;(4)各类土地在空间上互相排斥,即一块土地只能被当作一种土地类型。生态足迹法从需求角度计算生态足迹的大小,从供给角度计算生态承载力的大小,比较二者的大小能够判断一个国家或区域的生产消费活动是否处于当地的生态系统承载力范围之内,从而评价区域的可持续发展状况。当一个国家或区域的生态足迹大于生态承载力时,出现“生态赤字”,其大小等于生态承载力减去生态足迹的差(负数)。生态赤字表明该区域的人口负荷超过了其生态容量,要维持现有人口的消费需求,需要从地区之外进口所欠缺的资源或通过消耗本地区的自然资本来弥补供给量的不足,区域处于相对不可持续的发展状态。当生态足迹小于生态承载力时,为“生态盈余”,表明该区域的生态容量足迹支持现有的人类负荷,区域处于相对可持续性的发展状态^[8,13]。

生态足迹模型的计算分为生态足迹计算和生态承载力计算两个部分。在计算生态足迹时,生物生产性面积主要考虑 6 种类型:化石燃料用地、耕地、林地、牧草地、建筑用地和水域。

$$\text{计算公式为:} \quad EF = Nef = N \sum_{i=1}^n (r_i c_i / p_i) \quad (1)$$

$$NC = Nec = N \sum_{j=1}^6 (a_j r_j / y_j) \quad (2)$$

式中, EF 为总的生态足迹; EC 为区域总生态承载力; N 为人口数; i 为消费商品和投入的类型; ef 为人均生态足迹; r_i 为均衡因子; c_i 为类商品的人均消费量; p_i 为类消费商品的世界平均生产能力; j 为生物生产性土地的类型; ec 为人均生态承载力; a_j 为人均生物生产性土地面积; r_j 为均衡因子; y_j 为产量因子^[8,13]。

生态足迹和生态承载力的计算单位相同, 为人均全球公顷 (global hectare/person, 或者 $\text{ghm}^2/\text{person}$) 或全球公顷 (global hectare, ghm^2)。

1.2 生态足迹模型的理论缺陷

1.2.1 生态足迹模型是基于静态封闭系统假设的评价

传统生态足迹模型评价区域生态可持续发展状况时, 只计算本区域内部的生物生产性土地承载力, 是基于自给自足的小农经济哲学基础。而开放性以及不同系统之间的能量、物质和信息流通与交换是社会经济-生态系统的普遍现象和客观存在。进行全球尺度的生态足迹和生态承载力评价时, 由于地球系统是外界有能量交换和微量物质交换的半开放系统, 评价结果受模型缺陷影响较小。而在进行区域尺度生态可持续评价时, 仅仅根据本区域的生态足迹与生态承载力相比较而得的生态盈余或赤字来断定区域可持续性时就会产生较大误差。尽管生物生产性土地不能流动, 但其上产出的生物生产性产品可以自由流通, 通过产品的流通实现承载力的流通, 也即生态盈余或赤字, 可以通过进出口来实现区域平衡^[14]。

1.2.2 生态足迹模型忽视区域功能差异

生态足迹模型对区域可持续发展的评价指标单一, 忽视普遍存在的区域功能差异和区域比较优势、区域分工、产品流通交易等社会经济现象。因此, 往往得出“经济越发达越不可持续”的悖论^[15~17], 事实上贫穷才是最大的不可持续发展。

集聚效应是社会经济发展的普遍原理, 城市化过程中高度集中的人口流、物质流、信息流、废物流等发生在占用面积较小的城市区域, 在建成区区域几乎全无“生态”承载力, 而只有生态占用, 仅仅在此基础上得出不可持续性的结论是偏颇和失公允的。因此传统生态足迹模型是偏向生态的弱可持续性评估方法。在建成区内, 化石能源与矿物经过加工形成初级工业品, 初级工业产品继续加工产出最终消费品, 在此过程中附加值的增加应该纳入综合可持续性评价中。

1.2.3 空间互斥性假设的缺陷

空间互斥性假设使传统生态足迹模型简单而易于理解和计算, 但忽略了区域所实际具有的复杂的生物承载力, 造成生物承载力被明显低估^[18]。比如仅仅计算林地的木材产出功能, 忽视了其同时具有的涵养水源、调节气候、维持土壤水分循环等功能, 而实际林地吸收 CO_2 的能力更不容忽视。现实世界的生态系统是复杂而多样的, 生态足迹法简单的将各种土地划分为 6 个大类, 复杂系统的功能被单一化, 在计算其生态承载力时仍然只算一种效益。这种计算方式产生奇特现象, 越不发达的地区越是可持续发展, 形成“经济越发达越不可持续”的悖论^[17,18]。事实上, 发达地区系统功能挖掘充分, 也接近理论上的效率最大化即系统潜在的生态效益得以充分实现^[18], 而计算生态承载力只计算一种效益显然是低估的。

1.2.4 对人类的作用考虑不充分

生态足迹模型中, 将人类作为消费者, 也即生态足迹的产生者, 对人的能动作用考虑不足。传统生态足迹模型中, 尽管通过产量因子考虑了人类对生态经济系统的贡献, 但大农业系统的知识、技术以及劳务等其他人类贡献被忽略。而现代社会, 尤其是城市区域以工业和服务业为主, 也吸收了绝对大比例的从业人员, 因此, 在综合评价区域可持续性时传统生态足迹模型具有缺陷。

按照热力学第二定律, 一个孤立系统的熵总是趋于极大, 演化方向是从有序到无序, 然而无论生物演化还是社会演化, 方向与此相反^[19]。生态系统是一种自组织系统, 除了遵循热力学第二定律之外, 还受最大功率原理控制。Odum 认为: 具有活力的系统, 其设计组织方式必须能从外界获取可利用能量加以有效地转化利用, 并能反馈能量以获取更多的能量, 以应存活之需^[4,18]。开放的生态经济系统, 由于存在外界的负熵流入, 才有可能在远离平衡态的条件下形成功能有序的耗散结构。人类强大的信息接受能力和学习能力构成了负

信息熵的有力接受者。人类有益的反馈工作,可以使生态经济系统更有效地运转,也可以自组织的产生承载力。

2 基于能值分析的开放系统生态足迹模型

2.1 能值分析原理与方法

结合了系统生态、能量生态和生态经济原理的能值理论和分析方法是美国著名生态学家、系统能量分析先驱 H. T. Odum 为首于 20 世纪 80 年代创立的^[1~6]。

Odum 将能值定义为^[6,21]:一种流动或贮存的能量中所包含的另一种类别能量的数量。任何形式的能量均源于太阳能,故把任何资源、产品或劳务形成所需直接和间接应用的太阳能之量,定义为其所具有的太阳能值,单位为太阳能焦耳(sej)。能值分析方法的另一个重要概念是能值转换率,被定义为形成单位产品或服务所需要的太阳能值量,是衡量能质和能级的尺度,单位为 sej/J 或 sej/g。

能值转换率用公式可以表达为:

$$A \text{ 种能量(或物质)的能值转换率} = \frac{\text{应用的太阳能焦耳}}{1J(\text{或 } 1g) A \text{ 种能量(或物质)}} \quad (3)$$

能值分析,通过太阳能值转换率将不同类别、难以直接比较的能量形式转化成统一的太阳能值来进行比较,把自然生态系统有形的资源供给、无形的生态系统服务和社会经济系统物质生产与人类消费有机的联系起来,从而首次将自然资本的价值纳入环境经济系统范畴。能值和能值转换率揭示了能量的质量、等级真实价值,通过能值产出率、净能值产出率、能值交换率等一系列的能值指标来评价人类社会与自然系统的可持续发展的水平^[20~22]。

2.2 基于能值分析的开放系统生态足迹模型

能值方法从系统论出发,基于流量计算、细分能值转换率以及将人类劳务纳入系统评价等优势特质,可以弥补传统生态足迹模型的缺陷。近几年来一些学者也在开始尝试两种方法的结合研究^[18,23~25]。本文在前人研究基础上,进一步做出对传统生态足迹模型的改进,充分考虑人类的贡献并将进出口纳入评价框架,结合生态足迹模型从供给和需求角度分析的特点,扩展供给面,重新定义生态承载力,以求更全面合理评价区域发展状况。生态足迹改进模型的计算步骤和方法

(1) 建立能值与生态足迹互换基础

全球可更新资源的投入是可持续发展的基础,也是生态承载力来源,因此全球一年所有自然能值投入量与全球一年生态承载力对应。

引入单位全球公顷能值密度 P ,单位 sej/ghm²,其计算公式为:

$$P = \frac{GEI}{GEC} \quad (4)$$

式中, GEI 为全球一年的所有自然能值输入, GEC 为全球一年所有生态承载力。

(2) 计算生态足迹

首先划分消费项目,然后引入能值转换率,计算区域各消费项目的太阳能值,最后计算各消费项目的人均太阳能值。然后将各消费项目的人均能值换算成对应的生物生产性土地面积,也即消费的生态承载面积。计算生态足迹时,计算 3 类主要消费项目:生物资源消费、能源资源消费和初级工业产品消费。其计算公式为:

$$E_f = \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n (x_i \times T_i) / P \quad (5)$$

式中, E_f 表示人均生态足迹; i 表示资源类型; a_i 表示第 i 种资源的人均生态足迹; x_i 表示第 i 种资源的人均消费量; T_i 第 i 种资源的能值转换率; P 表示单位全球公顷能值密度。

(3) 计算生态承载力

① 本地最大潜在生态承载力

一个系统的全部可更新自然能值输入对应的全部潜在生态承载力,定义为本地最大潜在生态承载力

(*MLEC*),表示在理想状态下,系统潜力完全挖掘利用时的最大生态承载力。其计算公式为:

$$MLEC = \sum_{i=1}^n (r_i \times T_i) / P \quad (6)$$

式中, n 表示本地可更新自然能值投入类型; r_i 表示第*i*种自然能值原始值; T_i 第*i*种资源的能值转换率; P 表示单位全球公顷能值密度。一切自然资源所包含的能量均来源于太阳能,为了避免重复计算,取可更新资源人均能值中的最大值所折算出的相对应的生物生产性土地面积,作为研究区域的人均生态承载力值^[3,6,21]。

② 本地产品产出生态承载力

本地实际生产产品对应的生态承载力,定义为本地产品产出生态承载力(*OEC*)。计算三类主要生产项目:生物资源产出、能源资源产出和初级工业产品产出。

其计算公式与生态足迹计算公式类似,为:

$$OEC = \sum_{i=1}^n c_i = \sum_{i=1}^n (y_i \times T_i) / P \quad (7)$$

式中,*OEC*表示人均产品产出承载力; i 表示资源类型; c_i 表示第*i*种产品的人均生态承载力; y_i 表示第*i*种资源的人均生产量; T_i 第*i*种产品的能值转换率; P 表示单位全球公顷能值密度。

(4) 计算本地劳务以及进出口对应生态承载力流通

重视人类的作用,对人类在生态经济系统的贡献用区域人口劳务收入衡量。劳务收入乘以全球能值/货币比率转换为能值,再换算为对应的生态承载力。全球能值/货币比率等于全球能值总用量除以当年全球经济生产总值,全球年能值总用量包括可更新资源能值用量和不可更新资源能值用量。

生态承载力的流通通过区域产品的进出口实现,鉴于产品进出口统计的不完全,用当年区域进出口货币总额乘以全球能值/货币比率,再转换为生态承载力作为替代。

计算公式为:

$$MEC = M_p / P_{e/m} \quad (8)$$

式中,*MEC*为人均劳务收入或进出口值代表的人均货币承载力, M_p 为人均劳务收入或人均进出口货币额, $P_{e/m}$ 为能值/货币比率。

(5) 综合评价系统可持续发展度

分别计算生态赤字或盈余,综合分析区域劳务生态承载力以及承载力流通在区域发展中的作用,从而衡量研究区域的可持续发展状况。

3 案例研究——以深圳市为例

3.1 研究区域概况

深圳市地处中华人民共和国广东省中南沿海,陆域位置东经 113°46′~114°37′,北纬 22°27′~22°52′,全市总面积 1952.84km²,东临大鹏湾,西连珠江口,南与香港接壤,北与东莞市、惠州市为邻。深圳地势东南高,西北低,多为低丘陵地,间以平缓的台地,西部沿海一带是滨海平原。深圳属亚热带海洋性气候,常年平均气温 22.4℃,多年平均年降雨量 1933.3mm,日照 2120.5h。深圳海岸线全长 230km,海洋资源丰富,有优良的海湾港口,通海条件优越。深圳市现辖 6 个县级建制区,即特区内的罗湖、福田、南山、盐田区和特区以外的宝安、龙岗区。

作为中国第一个经济特区,深圳市自 1979 年 3 月被国务院批准设市,1980 年 8 月成立特区以来,在经济建设方面取得了辉煌的成就。但随着城市的快速发展,人口、经济活动在短时间内大量聚集,为了适应城市功能改变与提升,城市建设用地急剧扩张,从而大面积占用生态用地,城市生态系统的结构和功能均发生了较大的变化。量度深圳市城市经济生态综合发展状况,明确城市发展质量及存在问题,是确立深圳今后发展方向的重要议题。

3.2 基于改进模型的深圳市生态足迹/生态承载计算结果与分析

首先计算单位全球公顷能值密度,全球每年自然的能值输入^[6]为 15.83×10^{24} sej,而 2003 年全球的生态

承载力^①为 $1.13 \times 10^{10} \text{ghm}^2$, 所以 $P = GEI/GEC = (15.83 \times 10^{24} \text{sej}) / (1.13 \times 10^{10} \text{ghm}^2) = 14.01 \times 10^{14} \text{sej/ghm}^2$ 。

3.2.1 生态足迹与承载

依据全面反映深圳市社会经济状况的《深圳统计年鉴(2007)》^[26]和《广东统计年鉴(2007)》^[27], 从3个消费账户计算深圳市2006年的生态足迹:生物资源消费账户、能源资源消费账户和初级工业产品消费账户, 具体结果见表1。生物资源消费部分包括农产品、动物产品、酒类、水果等类别, 合计人均生态足迹 4.6797ghm^2 , 其中动物产品(包括水产品)足迹占86.4%, 显示了深圳市饮食消费结构处于较高级水产品;能源资源消费部分包括电力、煤炭、汽油、煤油、柴油和液化石油气等类别, 合计人均能源生态足迹 4.0938ghm^2 , 其中电力占据主要地位;初级工业产品消费包括自来水、成品油、钢材、铝材、化肥、水泥和化学纤维等类别, 合计人均初级工业品消费足迹 2.2992ghm^2 ; 合计人均生态足迹 11.0727ghm^2 。

表1 2006年深圳生态足迹账户计算

Table 1 Calculation for ecological footprint in Shenzhen (2006)

项目 Item	原始数据 Raw data (J或g)	能值转换率* Transformity (sej/J)	太阳能值 Total energy (sej)	人均能值 Emergy per capita (sej/人)	人均生态足迹 Footprint per capita (ghm ² /人)
生物资源消费 Biological resources					
粮食 Food	9.52×10^{15}	1.39×10^5	1.325×10^{21}	1.565×10^{14}	0.1117
食油 Edible Oil	2.74×10^{15}	2.18×10^6	5.967×10^{21}	7.050×10^{14}	0.5032
鲜菜 Vegetables	2.49×10^{15}	4.53×10^4	1.125×10^{20}	1.329×10^{13}	0.0095
猪肉 Pig	7.60×10^{15}	2.85×10^6	2.166×10^{22}	2.559×10^{15}	1.8263
牛羊肉 Beefes And Mutton	2.45×10^{14}	6.71×10^6	1.643×10^{21}	1.941×10^{14}	0.1386
家禽 Poultry	7.80×10^{14}	2.85×10^6	2.222×10^{21}	2.625×10^{14}	0.1874
鲜蛋 Eggs	5.57×10^{14}	2.87×10^7	1.596×10^{22}	1.886×10^{15}	1.3461
鲜奶 Milk	1.51×10^{15}	2.90×10^6	4.382×10^{21}	5.177×10^{14}	0.3695
水产品 Fishery	6.21×10^{14}	3.35×10^6	2.082×10^{21}	2.460×10^{14}	0.1756
茶叶 Tea	3.40×10^{13}	3.19×10^5	1.084×10^{19}	1.281×10^{12}	0.0009
白酒 Alcohol	6.09×10^{13}	1.01×10^5	6.132×10^{18}	7.244×10^{11}	0.0005
啤酒 Beer	2.38×10^{13}	1.01×10^5	2.396×10^{18}	2.831×10^{11}	0.0002
鲜果 Fruits	1.36×10^{15}	8.89×10^4	1.208×10^{20}	1.427×10^{13}	0.0102
小计 Subtotal				6.556×10^{15}	4.6797
能源资源消费 Energy resources					
电力 Electric	1.75×10^{17}	2.68×10^5	4.706×10^{22}	5.560×10^{15}	3.9684
煤炭 Coal	2.09×10^{15}	1.78×10^4	3.713×10^{19}	4.386×10^{12}	0.0031
汽油 Gasoline	6.67×10^{15}	9.06×10^4	6.039×10^{20}	7.135×10^{13}	0.0509
煤油 Coal Oil	1.13×10^{14}	9.06×10^4	1.027×10^{19}	1.213×10^{12}	0.0009
柴油 Diesel Oil	3.86×10^{14}	9.06×10^4	3.498×10^{19}	4.132×10^{12}	0.0029
液化石油气 Gas	9.95×10^{15}	8.05×10^4	8.013×10^{20}	9.467×10^{13}	0.0676
小计 Subtotal				5.735×10^{15}	4.0938
初级工业产品消费 Primary manufacture					
自来水 Tap Water	7.17×10^{15}	1.11×10^6	7.940×10^{21}	9.381×10^{14}	0.6696
成品油 Gasoline	5.58×10^{16}	9.06×10^4	5.049×10^{21}	5.965×10^{14}	0.4258
钢材 Steels	2.23×10^{12}	2.35×10^9	5.236×10^{21}	6.186×10^{14}	0.4415
铝材 Aluminum	2.73×10^{10}	2.68×10^{10}	7.317×10^{20}	8.644×10^{13}	0.0617
化肥 Fertilizer	1.02×10^{12}	6.37×10^9	6.499×10^{21}	7.678×10^{14}	0.5481
水泥 Cement	3.25×10^{10}	5.53×10^{10}	1.798×10^{21}	2.125×10^{14}	0.1517
化学纤维 Chemical Fiber	1.69×10^{10}	6.37×10^8	1.079×10^{19}	1.274×10^{12}	0.0009
小计 Subtotal				3.221×10^{15}	2.2992
生态足迹总量 Total Ecological Footprint		1.551×10^{16}	11.0727		

* 能值转换率参见文献^[6,21,22,28], 做了相应的基准转换 The transformities are taken or modified from references^[6,21,22,28]

① Global Footprint Network. Living Planet Report 2006. Oakland, CA. www.footprintnetwork.org.

依据 2006 年深圳气候数据,计算深圳基于初始可更新资源输入的最大潜在生态承载力。深圳市的自然能值投入为太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能、河水化学能、地球循环能以及海浪能等类型。各种类型能值计算公式和能值转换率依据参考文献^[6,21,22,28],做了相应的基准转换,计算详细结果见表 2。

表 2 2006 年深圳市本地最大潜在生态承载力

Table 2 Calculation for maximum potential ecological capacity in Shenzhen (2006)

项目 Item	原始数据 Raw data (J 或 g)	能值转换率 ^a Transformity (sej/J)	太阳能值 Total emery (sej)	人均能值 Emergy per capita (sej/人)	人均生态承载 Carrying capacity per capita (ghm ² /人)
太阳光能 Sunlight	1.02×10^{19}	1.00×10^0	1.02×10^{19}	1.21×10^{12}	0.0009
风能 Wind	1.02×10^{20}	2.51×10^3	2.57×10^{23}	3.03×10^{16}	21.6361
雨水化学能 Rain Chemical	1.87×10^{19}	3.05×10^4	5.70×10^{23}	6.74×10^{16}	48.0771
雨水势能 Rain Geo-Potential	9.57×10^{15}	1.76×10^4	1.68×10^{20}	1.99×10^{13}	0.0142
河水化学能 River Chemical	6.94×10^{15}	8.13×10^4	5.64×10^{20}	6.67×10^{13}	0.0476
地球循环能 Earth Cycle	1.95×10^{15}	5.76×10^4	1.13×10^{20}	1.33×10^{13}	0.0095
海浪能 Ocean Wave	9.79×10^8	5.12×10^4	5.02×10^{13}	5.93×10^6	0.0000
潮汐能 Tide	1.83×10^{17}	5.12×10^4	9.37×10^{21}	1.11×10^{15}	0.7899
自来水用量 Tap Water	7.17×10^{15}	1.11×10^6	7.94×10^{21}	9.38×10^{14}	0.6696
小计 ^b Total				6.74×10^{16}	48.0771

^a 能值转换率参见文献^[6,21,22,28],做了相应的基准转换 The transformities are taken or modified from references^[6,21,22,28]; ^b 为了避免重复计算,只取数值最大的雨水化学能作为计算本地最大潜在生态承载力的依据^[3,6,21] To avoid double counting, only rain chemical energy was counted as a basis for calculation of the local maximum potential ecological capacity^[3,6,21]

分两个账户计算深圳市 2006 年本地产品产出生态承载力供给:生物资源产出账户、初级工业产品产出账户(将发电量纳入本账户),具体结果见表 3。2006 年深圳本地产品产出生态承载力供给为 6.1627ghm²。生物资源产出合计人均生态承载力 0.7221ghm²,占总产出人均承载力的 11.72%,其中动物产品(包括水产品)

表 3 2006 年深圳市本地产品产出生态承载力供给

Table 3 Local output ecological carrying capacity in Shenzhen (2006)

	项目 Item	原始数据 Raw data (J 或 g)	能值转换率 * Trasformity (sej/J)	太阳能值 Total emergy (sej)	人均能值 Emergy per capita (sej/人)	人均生态承载 Carrying capacity per capita (ghm ² /人)
生物产品产出账户 Biological resources	粮食 Food	9.14 × 10 ¹¹	1.39 × 10 ⁵	1.272 × 10 ¹⁷	1.503 × 10 ¹⁰	0.0000
	花生 Peanuts	1.93 × 10 ¹¹	1.44 × 10 ⁵	2.785 × 10 ¹⁶	3.291 × 10 ⁹	0.0000
	蔬菜 Vegetables	2.80 × 10 ¹⁴	4.53 × 10 ⁴	1.268 × 10 ¹⁹	1.498 × 10 ¹²	0.0011
	水果 Fruits	4.55 × 10 ¹³	8.89 × 10 ⁴	4.046 × 10 ¹⁸	4.780 × 10 ¹¹	0.0003
	牛奶 Milk	2.90 × 10 ¹⁴	2.90 × 10 ⁶	8.416 × 10 ²⁰	9.943 × 10 ¹³	0.0710
	猪肉 Pig	7.99 × 10 ¹⁴	2.85 × 10 ⁶	2.278 × 10 ²¹	2.691 × 10 ¹⁴	0.1921
	禽肉 Poultry	5.21 × 10 ¹³	2.85 × 10 ⁶	1.486 × 10 ²⁰	1.756 × 10 ¹³	0.0125
	禽蛋产量 Egg	1.57 × 10 ¹⁴	2.87 × 10 ⁷	4.490 × 10 ²¹	5.305 × 10 ¹⁴	0.3786
	水产品 Fishery	2.35 × 10 ¹⁴	3.35 × 10 ⁶	7.881 × 10 ²⁰	9.311 × 10 ¹³	0.0665
本地生物资源承载力小计 Subtotal				1.012 × 10 ¹⁵	0.7221	
初级工业产品账户 Primary manufacture	自来水 Tap Water	6.98 × 10 ¹⁵	1.11 × 10 ⁶	7.721 × 10 ²¹	9.122 × 10 ¹⁴	0.6511
	植物油 Edible Oil	2.56 × 10 ¹³	2.18 × 10 ⁶	5.580 × 10 ¹⁹	6.592 × 10 ¹²	0.0047
	发电量 Electric	1.97 × 10 ¹⁷	2.68 × 10 ⁵	5.285 × 10 ²²	6.244 × 10 ¹⁵	4.4571
	化纤 Chemical Fiber	4.91 × 10 ⁹	6.37 × 10 ⁸	3.131 × 10 ¹⁸	3.699 × 10 ¹¹	0.0003
	塑料制品 Plastic	1.28 × 10 ¹²	6.37 × 10 ⁸	8.135 × 10 ²⁰	9.611 × 10 ¹³	0.0686
	成品钢材 Steels	4.13 × 10 ¹¹	2.35 × 10 ⁹	9.705 × 10 ²⁰	1.147 × 10 ¹⁴	0.0818
	平板玻璃 Glass	3.17 × 10 ¹¹	1.41 × 10 ⁹	4.465 × 10 ²⁰	5.275 × 10 ¹³	0.0377
	铝材 Aluminum	6.16 × 10 ¹⁰	2.68 × 10 ¹⁰	1.652 × 10 ²¹	1.952 × 10 ¹⁴	0.1393
本地工业初级产品产出承载力小计 Subtotal				7.622 × 10 ¹⁵	5.4406	
本地生产总承载力供给 Total OEC				8.634 × 10 ¹⁵	6.1627	

* 能值转换率参见文献^[6,21,22,28],做了相应的基准转换 The transformities are taken or modified from references^[6,21,22,28]

承载力占 99.8%,而粮食等农作物占 0.2%,体现了深圳农牧渔等第一产业的结构和深圳区域功能的调整。初级工业产品账户人均总承载力供给为 5.4406ghm^2 ,占总产出人均承载力的 88.28%,其中发电量和自来水生产是本账户的主要贡献者,占了 94%。

表 4 是 2006 年深圳市生态足迹和生态承载计算总结,可以看到,2006 年深圳市本地最大潜在生态承载力是产品产出生态承载力的 7.80 倍,是生物资源产出账户承载力的 66.58 倍,是人均总生态足迹的 4.34 倍。从这个角度看,深圳市远未到达本地理想生态承载极限。然而,区域实际承载力受区域发展程度限制,可更新资源的利用率对区域生态可持续发展具有直接影响力。如深圳市有丰富的降水资源,而于此直接相关的自来水用量对应人均生态承载力仅为 0.6511ghm^2 ,据统计深圳市每年用水量的 80% 从区域外调入。因此,从长远看提高可更新资源利用率是减少实际承载力与最大理想承载力差距的途径,也是实现区域可持续发展的重要途径。

表 4 2006 年深圳市生态足迹和生态承载计算总结 ($\text{ghm}^2/\text{person}$)

Table 4 The summary of ecological footprint and carrying capacity in Shenzhen (2006)

项目 Item	生物资源账户 Biological resources	能源资源账户 Energy resources	初级工业产品账户 Primary manufacture	合计 Total
本地最大潜在生态承载力 $MLEC$				48.0771
本地生产生态承载力 OEC	0.7221		5.4406	6.1627
生态足迹 E_f	4.6797	4.0938	2.2992	11.0727
生态盈余 $OEC-E_f$	-3.5976	-4.0938	3.1414	-4.9100

依据改进后模型的计算结果,产品生产人均承载力与人均生态足迹值相减得到人均生态赤字值为 2.928ghm^2 ,从结构组成看,赤字值的主要组成部分来自生物资源账户和能源资源账户,初级工业产品账户则是盈余状态。这个结果与深圳市城市功能以及产业结构特征一致。

3.2.2 人类劳务与进出口承载力

人类不仅仅是生态足迹的产生者,也是承载力的产生者。人类本身就具有自组织特性,社会的不断进步得益于人类对社会的贡献大于其消费。人的技能、知识、经验等使人具有经济生产能力,体现为无形价值形式,是人类生产系统得以维持的必要条件。人类可以通过教育、保健和职业培训等自我投资方式使其价值得到提高,从而增加人的生产能力的投入回报。因此评价区域可持续状况时,不能将作为区域要素的人类排除在外。作为特殊的可更新资源,人类劳务带来的生态承载供给与人类消费产生的生态足迹处于同一数量级(表 5)。在计算过程中劳务仅仅计算了全年职工工资收入,职工工资收入之外的其他收入、非正式职工的劳务收入等均未纳入计算过程,而且中国相对低廉的工资水平,都使计算数字远远低估了人类对生态经济的实际贡献。根据 Odum 的观点^[21],信息具有高的能值转换率,而信息在人类之间复制和学习的时候,成本相对较低,因此人类的作用作为区域系统可持续性评价必不可少的因素。

表 5 2006 年深圳市人均劳务收入与进出口对应生态承载

Table 5 Carrying capacity of labor service and currency in Shenzhen (2006)

项目 Item	原始数据 Raw data (\$)	全球能值/货币比率 ^[29] Global emery/US \$ ratio (sej/\$)	中国能值/货币比率 ^[29] Chinese emery/US \$ ratio (sej/\$)	人均生态承载 1 * Carrying capacity per capita 1 ($\text{ghm}^2/\text{person}$)	人均生态承载 2 * Carrying capacity per capita 2 ($\text{ghm}^2/\text{person}$)
劳务 Labor Income	3.71×10^{10}	1.66×10^{12}	2.89×10^{12}	5.1996	9.0524
进口 Imports	1.01×10^{11}	1.66×10^{12}	2.89×10^{12}	14.1790	24.6852
出口 Exports	1.36×10^{11}	1.66×10^{12}	2.89×10^{12}	19.0512	33.1675

* 人均生态承载 1 是基于全球能值/货币比率,人均生态承载 2 是基于中国能值/货币比率 Carrying capacity per capita 1 based on the global emery/US \$ ratio and Carrying capacity per capita 2 based on the Chinese emery/US \$ ratio

表 5 计算了基于 2004 年全球能值/货币比率和基于中国 2004 年的能值/货币比率的各项承载力。由于

中国相对较低资源、资本和劳务价格,中国的能值/货币比率远远高于全球能值/货币比率,因此基于中国能值/货币比率计算的各项承载力值较大。而深圳作为中国第一个特区,其商品、资本和劳务交流同时对应国内外两个市场,因此其实际值应该在两者之间。结果显示了进出口值对应的承载力值均高于人均足迹值和产品产出承载力值,表明深圳市生态经济系统具有开放性和流动性。而人均净出口生态承载力为正值,说明深圳市本身在满足自身需求的同时给周围区域提供承载力出口。

根据表 4 和表 5 以及深圳市 2006 年主要商品进出口统计数据,即使在具有巨大赤字的生物资源账户,也并非只有进口,动物性生产产品大量出口,如 2006 年深圳市出口肉用活猪 5.2 万头、活家禽 724.3 万只、活鲜鱼 1.99 万 t 等,而植物性生产产品才大量进口,如 2006 年进口谷物 55.38 万 t、食糖 1.49 万 t 等。此外,主要进口产品还有汽车、复印机、彩电、成品油钢材、肥料自动数据处理部件等,而主要出口棉布、服装、彩电、电话机、自行车、收音机及组合音响等。开放系统依据区域比较优势进行区域分工,多种功能系统之间携带了生态承载力的物质和能量流通由此可见。

3.2.3 改进后生态足迹模型与传统模型比较

运用传统生态足迹模型计算深圳市的生态承载力,以此来与改进生态足迹模型计算结果进行对比。根据深圳市 2006 年的土地利用现状变更调查统计结果,深圳市 2006 年拥有耕地 4258.97 hm²,牧草地 8842.88 hm²,林地 84897.75 hm²,水域 6516.01 hm²,建筑用地 92472.79 hm²。如表 7 所示,在扣除 12% 的生物多样性保护面积之后,深圳市的人均生态承载力为 0.0558 ghm²。将此计算结果与深圳市 2000 年人均生态承载力比较发现,人均生态承载力增加了 17.05%,结合深圳市常住人口从 2000 年的 701.24 万人上升至 846.43 万人,深圳市总均衡生态承载力面积增加了 41.29%。而从生态承载力组成结构看,耕地、林地、水域等具有高生物生产力的生态用地都在急剧减少,而建设用地的比例大量增加,从 2000 年的 0.02496 ghm² 上升至 2006 年的 0.05078 ghm²,比例则由 45.17% 上升至 80.08%。在传统生态足迹模型中,建设用地的均衡因子与产量因子都与具有高生物生产力的耕地相同,分别为 2.8 和 1.66,这正是计算结果显示深圳市总均衡态承载力面积增加的主要原因。而这也是传统模型饱受诟病的一点,尽管林地、草地与可耕地之间的相互转换是可行的,但要将建筑用地转换为其它用地却相当困难^[17]。

表 6 2006 年深圳市基于传统生态足迹模型的生态承载力

Table 6 Ecological carrying capacity based on general ecological footprint model in Shenzhen (2006)

项目 Item	实有面积 Regional area (hm ²)	均衡因子 Equivalence factor	产量因子 Yield factor	均衡总面积 Equivalent total (ghm ²)	人均均衡面积 Equivalent per capita (ghm ² /person)	2000 年人均 均衡面积 Equivalent per capita (2000) (ghm ² /person) ^[30]
耕地 arable land	4258.97	2.8	1.66	19795.71	0.002339	0.002766
林地 forest	84897.75	1.1	0.91	84982.65	0.010040	0.026406
牧草地 pasture	8842.88	0.5	0.19	840.07	0.000099	0.000041
水域 water	6516.01	0.2	1.00	1303.20	0.000154	0.001079
建设用地 built-up area	92472.79	2.8	1.66	429813.54	0.050780	0.024960
合计 Total				536735.18	0.063412	0.055252
生物多样性保护 for biodiversity				64408.22	0.007609	0.006630
人均生态承载力 carrying capacity per capita				0.055802	0.047673	

改进后模型计算的人均生态承载力值是传统方法计算值的 97.2 倍,生物资源账户和初级工业产品账户分别为 57.3 倍和 107.1 倍,这是因为改进后的算法基于具体产品产出值,全面计算了地类的综合性产出,克服传统算法仅仅基于六大类用地假设的弊端。而且改进后模型计算的生态承载力大于了实有土地面积,这与深圳优越的自然条件以及高的潜在自然生产力是一致的,体现了区域自然资源条件和生产力水平与全球平均水平差距,而传统算法基于均衡因子和产量因子的计算结果则远远低估了实际承载力。

表 7 改进后模型与传统模型计算结果比较 (ghm²/person)Table 7 Comparison of modified model results with the general model calculation (ghm² per capita)

项目 Item	生物资源账户 Biological resources	能源资源账户 Energy resources	初级工业产品账户 Primary manufacture	合 计 Total
改进后人均生态足迹 modified E_f	4.6797	4.0938	2.2992	11.0727
本地人均生产生态承载力 OEC	0.7221		5.4406	6.1627
传统模型人均生态承载力 general EC	0.0126		0.0508	0.0634
人均实有土地面积 * Regional area	0.0123		0.0109	2.3071

* 实有土地面积的生物资源账户为耕地、林地、牧草地和水域合计,初级工业产品账户土地面积为建设用地平均值,合计内容里增加了未利用地,是人均行政地域面积 Regional area of biological resources accounts for arable land, forest, pasture and water together, and the primary manufacture accounts for the built-up area, in the total content for per capita administrative geographical area whit the unused land added

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)改进生态足迹模型是基于生态经济系统的能量流分析,并结合传统生态足迹模型从供给和需求角度分析的特点,来计算生态足迹和生态承载力。运用能值分析原理,将研究区域的各种能量流转化成同一标准,并引入单位全球公顷能值密度的概念,将这些能量流换算成对应生态足迹和生态承载力,从而能够定量研究区域环境的可持续发展状况。重新定义不同层次的承载力,最大潜在生态承载力是理想状态下区域能量利用目标。产品产出承载力基于详细分类产出计算,与传统分土地类型计算相比更接近现实世界,并能反映综合功能,不受空间互斥性假设约束。与传统生态足迹模型所采用的全球平均生产力、均衡因子、产量因子等参数相比,改进生态足迹模型所采用的能值转换率、能值密度等参数更加稳定^[23,24];能值转换率反映能量和物质在生态经济系统中的等级,可以反映区域消费层次和区域承载结构。

(2)改进模型充分考虑人类的贡献并将进出口纳入评价框架,将静态封闭系统评价改进为开放系统评价。人类具有自组织特性,也是特殊的可更新资源,属于区域可持续发展的重要条件,将其贡献纳入区域可持续性评价是必不可少的。将进出口纳入评价框架,重视地理多样性和区域功能分工,从而可以更全面合理评价区域发展状况。改进后的模型改变了传统生态足迹模型偏生态可持续评价的思路,扩展为综合反映区域生态经济系统发展状况的可持续性评价模型。

(3)中国改革开放以来,改变了过去自给自足的小农经济系统和小而全的企业、城市封闭系统。运用在评价小尺度开放系统中具有天然理论缺陷的传统生态足迹模型,衡量中国第一个对外开放城市深圳时,谬误明显。运用改进后的模型评价深圳发展状况,可知深圳市具有净承载力出口,为区域外部提供了与本市生态足迹值相当数量级的承载力供给,为其他区域的发展做出了贡献;基于区域分工基础上,大比例的不同类别和等级的承载力通过进出口实现了本区域和其他区域之间的功能互补。深圳在生物生产账户上存在较大生态足迹赤字,需进口来弥补,而在工业产品账户上具有较大盈余,可供出口;人力资源是深圳市可持续发展的重要保障;提高可更新资源利用效率是使产品产出承载力接近本地最大潜在生态承载力的重要途径;发展高新技术产业、低能耗的清洁工业,产出高能值转换率的产品,实现区域本地产品在能量系统等级提升,是提升本地承载力的现实途径。

4.2 讨论

数据的获取往往是科学研究的主要限制因素之一。理论上,无论计算生态足迹还是生态承载力应该包括区域所消费或生产的所有产品,由于数据资料的局限,对于各种资源产品的分类比较粗,还有一些资源项目没有统计进来,只能简化处理,导致计算得到的人均生态足迹和生态承载力都偏小。尤其深圳市处于工业生产高级阶段,应当具有更高数量及能值转换率的工业产品,如电脑芯片、手机、集成电路板等,由于缺少能值转换率数据而未能纳入本地产品产出承载力供给中,而这部分产品是深圳主要的工业产出,也是主要出口产品,因此计算中严重低估了深圳市对区域外部的承载力贡献。

除此之外,改进生态足迹模型本身存在着一些问题,需要进一步完善。比如用职工工资衡量人类在生态

经济系统中的贡献的不准确性,以及用进出口货币额来代替产品承载力的不确定性等。

生态经济系统是复杂系统,实际研究中,在强调复杂性与多变性的同时将其分解为简单而不变的问题,循序渐进、逐次逼近求解才是解决问题的科学态度与方法。总体而言,改进生态足迹模型部分克服了传统生态足迹模型存在的缺陷,计算结果能够更接近真实地反映研究区域综合发展状况。

References:

- [1] Odum H T. Systems Ecology: An Introduction. John Wiley, NY, 1983.
- [2] Odum H T, Odum E C, Blisset M. Ecology and Economy Emergy Analysis and Public Policy in Texas. L. B. Johnson School of Public Affairs and Texas Dept of Agriculture, University of Texas, Austin, 1987.
- [3] Odum H T, Wang F C, Alexander J F, *et al.* Emergy Analysis of Environmental Value. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, FL. 1987.
- [4] Odum H T. Self-organization, Transformity, and Information. *Science*, 1988, 242:1132—1139.
- [5] Odum H T. Ecological and General Systems — An Introduction to Systems Ecology. University Press of Colorado, U.S., 1994.
- [6] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley, New York, US., 1996.
- [7] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4 (2): 121—130.
- [8] Rees W E, Wackernagel M. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996. 224—248.
- [9] Rees W E, Wackernagel M. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth. New Society Publishers, 1996.
- [10] Wackernagel M, Onisto L, Callejas L, *et al.* Ecological footprints of nations: How much nature do they use? How much nature do they have? Commissioned by the Earth Council for the Rio +5 Forum. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997. 4—12.
- [11] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economic*, 1997, 20: 3—24.
- [12] Rees W E, Wackernagel M. Monetary analysis: Turning a blind eye on sustainability. *Ecological Economic*, 1998, 29: 47—52.
- [13] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economic*, 1999, 29: 375—390.
- [14] Manfred Lenzen, Shauna A Murray. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001 (37): 229—255.
- [15] Xu Z M, Chen D J, Zhang Z Q, *et al.* Calculation and analysis on ecological footprints of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (3): 441—445.
- [16] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D, *et al.* Ecological footprint calculation and development analysis of China in 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (2): 280—285.
- [17] Peng J, Wu J S, Jiang Y Y, *et al.* Shortcomings of applying ecological footprints to the ecological assessment of regional sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (8): 2716—2722.
- [18] Sun D L, Liu S, Yao C, *et al.* Improving the Computation of Bio-capacity by Emergy Theory: A Case Study of *Spartina alterniflora* Ecosystem in Northern Jiangsu. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2007, 43 (5): 501—508.
- [19] Chen P. Bifurcation of civilization, Economic chaos and Evolution of the economic dynamics. Beijing: Peking University Press, 2004. 123—133.
- [20] Qin P, Yan J S, An S Q. Sciences of ecological engineering. Nanjing: Press of Nanjing University, 1998. 238—249.
- [21] Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy analysis of ecological-economic system. Chemistry Industry Press, 2002. 91—95.
- [22] Li S C, Fu X F, Zheng D. Emergy analysis for evaluating sustainability of Chinese economy. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (4): 298—304.
- [23] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy: A case study of the Chinese society. *Ecological Modelling*, 2006 (198): 101—114.
- [24] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecol. Model.*, 2005, 185, 65—75.
- [25] Zhang F Y, Pu L J, Zhang J. A modified model of Ecological Footprint calculation Based on the theory of Emergy Analysis: Taking Jiangsu province as an example. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (4): 653—660.
- [26] Bureau of Statistics of Shenzhen. Shenzhen Statistical Yearbook 2007. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [27] Bureau of Statistics of Guangdong. Guangdong Statistical Yearbook 2007. Beijing: China Statistics Press, 2007.

- [28] Odum H T, Brown M T, Williams S B. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Folio No. 1-Introduction and Global Budget. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida; 2000. 16. <<http://www.emergysystems.org/folios.php>>.
- [29] Kampeng Lei, Zhishi Wang, Shanshin Ton. Holistic emergy analysis of Macao. Ecological Engineering, 2008, 32, 30—43.
- [30] Jiang Y Y, Wang Y L, Li W F, *et al.* Measuring Urban Ecological Sustainability: A Case Study in Shenzhen City. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(4): 612—621.

参考文献:

- [15] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析. 土壤学报, 2002, 39(3): 441~445.
- [17] 彭建, 吴健生, 蒋依依, 等. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. 生态学报, 2006, 26(8): 2716~2722.
- [18] 孙东林, 刘圣, 姚成, 等. 用能值分析理论修改生物承载力的计算方法——以苏北互花米草生态系统为例. 南京大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 501~508.
- [19] 陈平. 文明分叉、经济混沌和演化经济动力学. 北京: 北京大学出版社, 2004. 123~133.
- [20] 钦佩, 颜京松, 安树青. 生态工程学. 南京大学出版社, 1998. 238~249.
- [21] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 化学工业出版社, 2002, 91~95.
- [22] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. 自然资源学报, 2001, 16(4): 298~304.
- [25] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及其应用——以江苏省为例. 自然资源学报. 2006, 21(4): 653~660.
- [26] 深圳市统计局编. 深圳统计年鉴 2007. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [27] 广东省统计局编. 广东统计年鉴 2007. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [30] 蒋依依, 王仰麟, 李卫锋, 等. 城市生态可持续发展度量方法探讨——以深圳市为例. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 612~621.