

文章编号 : 1004 - 7271(2006)01 - 0084 - 06

生态足迹理论的微观分析 - 成分法的算法及应用

胡 淼¹, 周应祺²

(1. 上海水产大学经济贸易学院, 上海 200090 ;
2. 上海水产大学, 上海 200090)

摘 要 随着可持续发展研究不断深入, 生态足迹理论逐渐成为国内外可持续发展量化研究的热点。成分法作为生态足迹分析模型中应用于微观单位的一种算法, 能够较为简便形象地估算微观单位对各种资源的消耗程度, 为制订可持续发展战略提供理论依据。该文对该算法的基本思想、分类方法、计算方法和优势缺陷等进行了介绍。同时, 利用成分法进行生态足迹分析尚需根据国情进一步完善和加强, 在我国应用生态足迹的成分法分析模型的主要困难是数据的收集和均衡因子的取得, 但根据我国可持续发展的战略性需求, 成分法分析模型必将得到广泛应用。

关键词 成分法; 生态足迹; 可持续发展

中图分类号 F 015 文献标识码: A

The arithmetic and application of component-based methodology : micro-analysis of ecological footprint theory

HU Miao¹, ZHOU Ying-qi²

(1. Economics & Trade college of Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China ;
2. Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract :With the deepening study of sustainable development, the theory of ecological footprint(EF) has become a focus in the quantitative research of it. As a methodology for micro-analysis of EF, the component-based EF (CEF) can be used to estimate the consumption degree of resources in micro-units conveniently and visually, so as provide the theoretical foundation for the formulation of sustainable development strategy. In this thesis, the basic concept, way of classification, methodology, advantages and shortcomings of the CEF will be stated. Meanwhile, the difficulty in acquiring data and equivalences in China should be considered too. It is indicated that ecological footprint theory and component-based methodology will be widely used in future.

Key words :component-based methodology ; ecological footprint ; sustainable development

可持续发展的理念已被广泛地接受, 成为国家和地区, 以及各种产业发展的指导性思想。在可持续发展理念的实践中, 产生了自然资本主义、生态经济、循环经济等理论, 对可持续发展的评价也从定性研究向定量分析发展。其中, 生态足迹(Ecological footprint, EF)理论以及其微观分析法 - 成分法是近年来出现的可持续发展量化指标中较有代表性的一种。

收稿日期 2005-03-29

项目基金 农业部渔业科技中长期发展战略研究项目(科 04179)

作者简介 胡 淼(1981 -) , 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 专业方向为渔业可持续发展。E-mail : mhu@stmail.shfu.edu.cn

1 成分法的理论背景

生态足迹分析将地球上具有生态生产能力的地域分为 6 种：吸收化石能源的森林及水上都可以将它折算成一定的土地面积，并通过相应均衡因子（equivalence factor）核算成域、耕地、牧草地、森林（薪材用）、水域、建筑用地。对于任何大小的区域，从理论一种“全球性生态生产面积（Global ecological hectare（gha））”抽象概念，也就是生态足迹^[1]。在实践中为了缩小误差，对于不同类型的区域采取不同的算法。例如，对于国家或国家以上层级的生态足迹计算通常采用综合法。世界野生动物保护基金会 WWF 每年发布的 Living Planet Report（LPR）^[1]就是采用此法测算各国和地区的可持续发展程度。然而，以英国 BFF 环境顾问公司和瑞典斯德哥尔摩环境研究所 SEK（Stockholm Environment Institute）为代表的一些机构运用另一种方法，对面积相对较小的区域（省、市、地方、企业、家庭或个人）进行生态足迹模型分析，称为成分法（component-based EF）^[2]。英国 BFF 环境顾问公司将这种算法注册为“Eco-Index Methodology”TM [3, 4]。本文将对成分法作简要介绍。

2 成分法解决的主要问题和研究成果

2.1 成分法解决的主要问题

人类只有一个地球，它所提供的能量是有限的，怎样能使人类的活动在维持自身福利不断提高的同时不影响地球持续提供相应能量，就是可持续发展理论所要解决的问题。生态足迹分析主要通过分析研究对象的消费内容，对其生态占用程度进行量化分析，计算出能满足这个单位消费、并吸收它排放的废弃物所需要多少地球平均生态生产性土地（gha），即生态足迹的大小。在这些基础工作完成之后，就可以进行不同个体之间生态足迹的比较、汇总、主成分分析等其它相关工作，从宏观上对研究对象的可持续发展程度进行估算。显然，如果某宏观区域的生态足迹大大超过保持可持续发展能容纳的面积，这个区域的消费方式就是不可持续的。

2.2 成分法的研究进展和主要研究成果

北美和欧洲一些国家由于较早引入生态足迹理论进行可持续发展程度分析，建立了资源 - 能量转换标准体制和包含一百多种资源消费数据的大型数据库^[3]，就成分法而言，各类生活用品的生态足迹量的年度分析，学校、社区、城市的生态足迹计算已成规模，具有时间序列的资源消费数据可上溯至 10 年以上。最早的成分法生态足迹分析是 Best Foot Forward Ltd 进行的伦敦市生态足迹分析报告，它对伦敦市区各种能源消耗均作出了估算，将来的类似分析都以它为分类标准。

在此之后，以 Best Foot Forward Ltd 和 redefining Progress 为代表的研究机构以对地域性生态足迹和制造品的分析为主。其中主要著作包括《Hereford 生态足迹分析》和《Santa Monica 生态足迹分析》等均沿用伦敦生态足迹分析中的消费分类法对该地区的生态足迹和生态承载能力进行比较和分析。运用 Eco-Index MethodologyTM 进行的生态足迹运算，所得结果均是需要 100 倍以上的地球平均土地面积（gha）才能提供该区域的资源消耗。由于只考虑 CO₂ 一种污染参数，受到了一些学者的质疑，但是，这种算法依然是当前生态足迹的研究中最常用的一种方法，用这种算法计算的生态足迹，是显然被低估的。

在 Best Foot Forward Ltd 著名的 An Ecological Footprint Analysis of Different Packaging Systems^[5]（对不同包装系统的生态足迹分析）中，出现了运用 LCA（Life Cycle Assessment，生命周期估算法）计算不同生产线生产铝制或玻璃饮料罐的生态足迹比较分析，得出了 33 cl 铝制易拉罐平均需要比玻璃制饮料罐多消费一倍以上的资源来达到同样的罐装容积，也为不同的生态足迹运算方法的兼容性作出了初步探索。该文中运用的 CLA 法就是此后的“Regional StepwiseTM Methodology”的雏形。

另外，全球性公益组织 WWF 进行的地域性生态足迹分析^[6, 7]和制造品生态足迹分析，囊括了全球所有的国家和地区，并对各个国家的土地利用程度、水生物种、海洋物种、各种能源、生物资源、水的生态

足迹做了详细的比较和对照^[8,9],是一种较为宏观的研究视角。其中比较有代表性的 living Planet Report 中,全面的数据为面积较小的地区和单位进行生态足迹计算奠定了坚实的基础。

成分法秉承生态足迹理论的基本思路,运用由下而上的数据收集方式和分类核算的基本算法,对范围较小的研究对象的生态足迹进行测算^[10],供决策者制定某行业或某地区的整体可持续发展战略时参考。

3 基本算法和消费分类法

3.1 基本算法

运用成分法计算生态足迹的单位可分为(1)消费型,即大到某个城市,小到一个学校、家庭、个人或某种产品都可以是计算对象,它的特点是被这种单位消费的资源种类多,而且仅仅对该单位的资源消费进行计算。(2)生产型,即对某个工厂或产品的生产流程所消费的资源量,以及对排放的污染进行处理所要消耗的资源量进行生态足迹的计算。分析计算的结果代表生产某类或某种产品而占用的生态足迹^[9]。

无论针对哪一种类型的单位进行生态足迹的计算,都需要将这些消费项目先进行消费分类,再按照一定的归类方法转化成6种生态生产性土地面积,再汇总后进行比较。归类表格见 ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) 的网页(www.iclei.org/ICLEI/ecofoot.htm)^[11]。此处只根据分类结果对算法进行介绍。

由于消费型单位和生产型单位的生态足迹的算法基本相同,以下即以消费型单位生态足迹计算为例,简述分析法的运算过程。具体步骤如下:

3.1.1 各消费项目的生态足迹分量计算

先按照归类表的叙述,找出经过分类后的、各个消费项目所对应的土地类型和相关数据,进行计算,公式如下^[12-14]:

$$A_i = C_i / Y_i \tag{1}$$

式中 i 为消费项目的类型, Y_i 为某种生态生产性土地生产第 i 种消费项目的年(世界)平均产量($\text{kg}/\text{m}^2 \times 10^4$), C_i 为第 i 种消费项目在该地的消费量, A_i 为第 i 种消费项目折算的生态生产性土地面积,也即生态足迹分量($\text{m}^2 \times 10^4$)^[11]。

3.1.2 生态足迹的计算

由于6种生态生产性土地的生态生产力不同,在进行生态足迹分析时,需要将计算得到的各类生态生产性土地面积与相应的均衡因子(equivalence factor)相乘,得到全球平均生态生产性土地的面积,单位为 gha 。现采用的均衡因子如下^[11]:

表 1 生态足迹均衡因子列表

Tab.1 Equivalence factors of ecological footprint

土地类型	世界平均生产力	主要耕地	边缘性耕地	森林/化石能源地	草地	海洋	内陆水域	建筑用地
均衡因子($\text{gha}/\text{m}^2 \times 10^4$)	1.00	2.19	1.80	2.38	0.48	0.36	0.36	2.19

公式如下^[13]:

$$EF = \sum r_j * A_i = \sum r_j * (C_i / Y_i) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 6) \tag{2}$$

式中 r_j 为均衡因子, EF 为某区域生态足迹总量。计算中,不同消费项目先转化为同种生态生产性土地后,与均衡因子相乘,得到折算后的全球平均生态生产性土地的面积,再将6种生态生产性土地面积经均衡折算后的数值累加,就可算出某单位的生态足迹总量。

由于生态足迹理论发展较快,很多基础消费品的平均生态足迹已经被计算出来作为常量供使用,这就使以上算法可以省略相应步骤,大大方便了生态足迹的计算。实际运算中应用较多的如工业用水的生态足迹为 $0.08\text{gha}/10^6\text{L}$,碳元素的生态足迹为 $0.56\text{gha}/\text{t}$ 等^[4,15]。具体数据见 William Rees 和 Wackernagel 的相关著作。

3.2 消费分类法

对于不同的研究对象有不同的消费分类方法,同时,由于不同地区的实际情况不同,即使是同类对象,也可能采取稍有差别的分类方法^[16]。

根据 SEI 和 BFF 在计算生态足迹时对成分法的归纳,将消费型单位的消费做以下分类^[11]:

表 2 消费分类表

Tab.2 Classification of consumption

能源	运输	旅行	垃圾及废弃物	其它
家用电力	公路运输	乘小轿车	可回收重复使用	食物
工业用电	铁路运输	乘大客车	不可回收的商业废弃物	水
服务业用电	海运	乘火车	可回收的商业废弃物	木材
农业用电	空运	乘飞机	复合废弃物	废水
家用燃气		乘轮渡	无害废弃物	建材
工业用气			家庭垃圾	建筑用地
家用煤				
家用石油				

但是,在实践中由于许多不确定因素的存在,导致一些数据无法得到,因此,一般只能就获得的数进行计算,而且采用比较保守的数据。以下的个案就是 Emily Wright 和 Drossman 在数据存在部分缺失时计算消费型单位 Colorado 学院的生态足迹分析表^[3]:

表 3 Colorado 学院的生态足迹分析表

Tab.3 Analysis scheme of colorado college

消费量和废弃物			生态足迹			
成分	2001 年消费总量	成本	成分	总生态足迹 ($\text{m}^2 \times 10^4$)	平均生态足迹 ($n = 2500$)	百分率
能源			能源			
电力	16 486 521 kW·h	\$ 916 881.80	电力	4 463	1.785 2	80
.....						
水	381 970 m^3	\$ 334 134.36	水	---	---	---
			携带能	20.5	0.008 2	0.4
			取水区域	36	0.014 4	0.6
食品	337 500 kg	不确定	食品	574.1	0.229 64	10
固体废弃物	15 300 m^3	不确定	固体废弃物	不确定	不确定	
校园面积	36.45 hm^2	不确定	校园面积	36	0.014 4	0.6
			总计	5 602.6	2.241	100

通过计算,该学院消耗的生态足迹是现有校园面积的 156 倍,或需要 156 倍的校园面积方能提供相应的消费需求。尽管从绝对数字上不能认为该学校的消费模式是不可持续的,但通过同类单位生态足迹大小的类比,可以进行可持续发展模式的相对比较分析。

在生产型单位的生态足迹分析中,由于产品的生产和消费是截然不同的两个过程,对不同过程计算生态足迹,分类方法也有差异,例如 SEI 在对洗衣机生态足迹的计算中,采取以下分类方法^[11]:

表 4 洗衣机的生态足迹表

Tab.4 Ecological footprint of washing machine

洗衣机	总重 (kg)	重量比例 (%)	携带能 (MJ/kg)	材料的携带能 (MJ)	CH ₄ 排放量 (kg)	CO ₂ 排放量 (kg)	N ₂ O 的排放量	总全球暖化潜热 (CO ₂ 当量)
材料								
钢	42.5	50	29.96	1288	0.334	142.67	0.0036	150.8
.....								
总计	85.0	100		3257	1	362	0	384.7
包装								
纸箱	1.30		17.86		0.006	1.93	0.0009	2.34
.....								
生产								
生产过程				368	0.046	23.20		24.2
.....								
生态足迹 (整个生命周期)								0.2295
年生态足迹 (折旧时间 10 年)								0.0230

上表对洗衣机的生产所消耗的原材料和能源进行了分类核算,得到的是生产一台洗衣机的生态足迹。

在 BFF2004 年的调查报告中,出现了“Regional Stepwise™ Methodology”(区域性步进算法,作者译)的算法^[17,18],即无论面对何种研究对象,均将其生命周期内消费的资源全部列表计算,再均摊到每个人。这种思想从每个人头的角度分析各种用品的资源耗费程度,即人均资源消耗程度,在分析以个人为单位的可持续发展生活模式中,尤为常见,分析结果也比较理想。

4 展望

生态足迹理论的核心思想是以测定研究对象占有和消耗的生产性资源量来反映人类对地球生态平衡的影响,认为地球所能提供的土地面积如果不能满足人类消费的需要时,人类的所谓发展就是不可持续的^[19,20]。这种理论具有宏观性和形象化的特点,在算法上也较其它可持续发展指标体系的算法简单,具有操作性较强、可复制性强的优点。用成分法测算的生态足迹量,是较具体地计量了研究对象的生态占用量,使得不同的事物之间也可以进行生态足迹大小的比较,有利于对可持续性的进一步认识。

同时,因为生态足迹是一种新概念,许多研究刚起步。就成分法而言,在算法理论上,存在着影响因子考虑不全,分类过粗的问题。例如,沙漠的生态生产力的内涵认识有待深化,在目前的计算中,也没有涉及;在实践上,存在数据不易收集,能源消耗不易分类和转换因子不易确定的问题。尽管如此,生态足迹算法的结果与同期出现的其它可持续发展量化工具,如生命周期分析、环境空间计算、可持续程度指数(SPI)等的计算结果,都是兼容的^[14]。

由于生态足迹理论引入我国较晚,目前省级以上单位的测算和研究比较多见,文献中尚未见到基于成分法的生态足迹分析,而这种算法在我国广泛应用的确存在许多实际困难^[21-23]。(1)资源-能量转换标准很难确定。我国的生产和生活用能源质量参差不齐,很难将样本中的资源视为全国的平均值,另外,由于我国尚未全面采取垃圾分类制,对于其中的携带能很难估算,也使生态足迹运算结果误差较大。(2)数据收集困难。我国的生产单位或小型消费单位没有相关的能源消费统计部门,抑或由于某种原因该部门不能准确测算资源消费量,都使成分法在实践应用中可能会出现较大误差^[19]。面对这些实际困难,需要相关部门加大资源消耗和排污管理力度,建立相应国家标准,才能得到生态足迹量的准确结果。

当前,我国正处于大量耗费自然资源和人口膨胀的资本原始积累时期,基于劳动密集型和资源密集型的产业规模不断扩大,生态环境破坏和资源消耗是面临的严重挑战。可以预见,各种基础生产或消费

单位的生态足迹分析对于宏观的可持续发展规划设计将具有重要的实用价值。因此,可以预料,逐步发展和完善生态足迹理论,并与经济可持续发展指标体系相结合,对各产业、甚至更小口径的消费单位进行可持续发展程度分析,必将成为生态足迹研究的发展趋势,将对我国经济社会可持续发展、管理和决策具有重要意义。

参考文献：

- [1] World Wildlife Fund. Living Planet Report [R]. <http://www.panda.org/livingplanet/2004>
- [2] Mathis M. The Future center : Herefordshire 's Ecological Footprint [R]. Oxford : Best Foot Forward , Ltd. 2001 , 11 : 8 - 11 .
- [3] Emily P W. The ecological footprint of the Colorado College : An examination of sustainability [J]. Environmental Science , 2002 , 6 : 7 - 23 .
- [4] Barrett J. An Ecological Footprint of Liverpool [R]. Oxford : Best Foot Forward , 2002 . 2 - 15 .
- [5] Kevin L , Craig S , Nicky C. An ecological footprint analysis of different packaging system [R]. Oxford : Best Foot Forward , Ltd. 1998 , 4 : 1 - 5 .
- [6] 徐中民, 张志强. 可持续发展指标体系的分类和评价 [J]. 西北师范大学学报, 2000, 36(4) : 82 - 87 .
- [7] Mathis W , Silverstern I. Big Things First : Focusing on the scale imperative with the ecological footprint [J]. Ecological Economics , 2000 , 33(3) : 319 - 394 .
- [8] Chambers , Nicky C , Craig S , *et al.* . Sharing Nature 's Interest : Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability [M]. New York : Earthscan Publications Ltd. , 2000 . 13 - 50 .
- [9] Mathis W , Chad M , Dan M , *et al.* . 2004 national footprint and accounts : The underlying calculation method [J]. Land Use Policy , 2004 , 21 : 231 - 246 .
- [10] Mathis W , Larry O , Alejandro C , *et al.* . Ecological footprints of nations [A]. Commissioned by the Earth Council for the Rio + 5 Forum [C]. Toronto : International Council for Local Environmental Initiatives , 1997 .
- [11] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹 - 可持续发展的重量及面积观念 [M]. 北京 : 经济科学出版社, 2003. 230 - 257 .
- [12] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区、市)的生态足迹 [J]. 地理学报, 2001, 36(5) : 599 - 609 .
- [13] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析 [J]. 土壤学报, 2002, 35(3) : 442 - 445 .
- [14] 王书华, 毛汉英, 王中静. 生态足迹研究的国内外近期进展 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(6) : 776 - 782 .
- [15] Tommy W , John B , Nia C. Sustainability rating for homes - the ecological footprint component [R]. Stockholm : SEI , 2002 . 6 - 15 .
- [16] Xiong D G , Xian X F. Consumptive ecological footprint and productive ecological footprint : a modification on ecological footprint theory to evaluate regional sustainable development [J]. Chongqing Univ-Eng , 2004 , 3(1) : 51 - 54 .
- [17] George V , Craig S. An ecological footprint analysis of Essex [M]. Oxford : Best Foot Forward Ltd , 2004 . 11 - 14 .
- [18] Flint K. Institutional Ecological Footprint Analysis : A Case Study for The University of Newcastle , Australia [J]. International Journal of Sustainability in Higher Education , 2001 , 2 : 18 - 62 .
- [19] 易光斌, 董瑞斌. 生态足迹理论及其应用 [J]. 江西科学, 2003, 21(3) : 260 - 264 .
- [20] 黎瑞波, 蒋菊生. 生态足迹分析模型及研究现状 [J]. 华南热带农业大学学报, 2004, 10(2) : 12 - 15 .
- [21] 蔺海明, 颜鹏. 甘肃海西绿洲农业区生态足迹动态研究 [J]. 农业现代化研究, 2004, 25(2) : 111 - 115 .
- [22] 白艳莹, 王效科, 欧阳志云, 等. 苏锡常地区生态足迹分析 [J]. 资源科学, 2003, 25(6) : 31 - 36 .
- [23] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型简介 [J]. 生态经济, 2000 (10) : 8 - 10 .