

基于能值分析理论的生态足迹模型及应用

——以江苏省为例

张芳怡¹, 濮励杰^{1,2}, 张 健¹

(1. 南京大学 城市与资源学系, 南京 210093; 2. 国土资源部 土地利用重点实验室, 北京 100029)

摘要:在对传统生态足迹模型进行简要分析的基础上, 提出基于能值分析理论的生态足迹计算模型。该改进生态足迹模型通过将生态经济系统中的各种能量流换算成对应的生物生产性土地面积, 并比较计算得到的生态足迹和生态承载力, 从而衡量研究区域的环境可持续发展状况。论文以江苏省为例, 应用改进生态足迹模型分析其 2003 年生态经济系统的环境状况, 得到人均生态承载力为 $0.299\ 7\text{hm}^2/\text{人}$, 人均生态足迹为 $4.722\ 8\text{hm}^2/\text{人}$, 生态足迹超过生态承载力, 与传统生态足迹模型的计算结果相一致。但与传统生态足迹模型相比, 改进生态足迹模型的计算结果能更真实地反映生态经济系统的环境状况。

关键词:生态足迹模型; 能值分析; 生态足迹; 生态承载力; 江苏省

中图分类号: F062.2 X146

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2006)04-0653-08

1 引言

随着经济快速发展与人口迅猛增长, 人类活动对地球生态系统的影响越来越大, 所面临的自然资源、环境及经济之间的矛盾日益严重, 如资源枯竭、环境恶化等。为实现可持续发展, 把人类对自然环境的压力限制在地球生态系统的承载力范围内, 首先必须评价当前地球生态系统的状况。随着评价方法及手段的不断创新, 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 90 年代, 由 Rees 和 Wackernagel 提出的生态足迹模型, 考虑了自然资源的再生与替代能力、生命支持系统的循环与净化能力以及生物多样性保护等方面, 而且计算结果直观明了, 具有区域可比性, 因此, 很快成为环境可持续发展度量的一个重要方法^[1-3]。

各种生态系统和人类社会经济系统均可视为能量系统, 系统各组分及其作用无不涉及能量的流动、转化与贮存, 能量可用于表达和了解生命与环境、人与自然的关系。但不同类别的能量存在质与价值的根本差异, 不可作简单的加减和比较。20 世纪 80 年代, 国际生态学界提出能值这一新概念理论和分析方法, 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。本文将能值分析理论与生态足迹理论结合起来, 对传统生态足迹模型进行改进。在生态足迹理论框架下, 应用能值分析方法, 将各种能量流换算成对应的生物生产性土地面

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2006-01-06。

基金项目: 国家自然科学基金(40371106); 江苏省自然科学基金(BK2005080); 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金(2003); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养计划“基金(2002)联合资助。

第一作者简介: 张芳怡(1983-), 女, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用规划与管理。E-mail:

xin19831203@163.com

积,比较研究区域的生态足迹和生态承载力,衡量区域环境的可持续发展状况。

2 生态足迹模型介绍

2.1 生态足迹的概念及理论基础

生态足迹是指能够持续地向一定人口提供他们所消耗的所有资源和吸纳他们所产生的所有废物的土地和水体的总面积,它从具体的生物物理量角度研究自然资本消费的空间^[4,5]。人类要维持生存必须消费自然界提供的各种产品和服务,而每项最终消费的量都可以换算成提供生产该消费所需的原始物质与能量的生物生产性土地面积。生态足迹和生态承载力都是用生物生产性土地面积来衡量的,因此,它们可以直接比较。当一个地区的生态承载力小于生态足迹时,即出现“生态赤字”;当其大于生态足迹时,则产生“生态盈余”。生态赤字表明该地区的环境负荷超过了其生态承载力,要满足现有水平的消费需求,该地区或是从地区之外进口所欠缺的资源以平衡生态足迹,或是通过消耗自身的自然资本来弥补供给流量的不足。

2.2 传统生态足迹模型的计算方法^[6-8]

生态足迹的计算基于以下两个前提^[9]:①人类能够估计自身消费的大多数资源、能源及其所产生的废弃物数量;②这些资源和废弃物流能折算成生产和吸纳这些资源和废弃物流的生物生产性面积。

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。由于各种生物生产性土地类型的生态生产力不同,Wackernagel 使用世界平均生产力将资源消费量及废物吸纳量转化为所需要的生物生产性面积。引入均衡因子,使不同类型的生物生产性土地转化为等价的生态生产力,从而合计出总的生态足迹。在计算生态承载力时,引入产量因子,将各国或各地区同类生态生产力土地面积转化为可比面积。计算公式为:

$$a_i = c_i / p_i; E_f = \sum (\gamma \times a_i); E_c = \sum (\gamma \times A_i \times \lambda)$$

式中 i 表示消费项目类型; a_i 表示第 i 种消费项目折算的生物生产性面积; c_i 表示第 i 种消费项目的人均消费量; p_i 表示第 i 种消费项目的全球平均生产力; E_f 表示人均生态足迹; γ 表示均衡因子; E_c 表示人均生态承载力; A_i 表示人均生物生产性土地面积; λ 表示产量因子。

3 基于能值分析理论的生态足迹模型

3.1 改进生态足迹模型的基本原理

改进生态足迹模型是一种基于能值分析理论的新的计算生态足迹和生态承载力的模型。能值分析理论是由美国生态学家、能量分析先驱 H. T. Odum 在 1988 年创立的。能值分析就是以能值为基准,把生态系统或生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析,以评价其在系统中的作用和功能^[10]。由于任何形式的能量均源于太阳能,因此,在实际应用中以“太阳能值”来衡量各种能量的能值,即任何资源、产品或劳务形成过程中直接或间接消耗的太阳能之量,就是其所具有的太阳能值,单位为太阳能焦耳 (Solar Emery Joules, 缩写为 sej)^[11]。

改进生态足迹模型就是将能值分析方法与生态足迹理论框架相结合,首先把各种不同类型、不同等级的能量流通过能值转换率,换算成可以直接进行加减的太阳能值,然后引入

能值密度 ,将各消费项目的太阳能值换算成相对应的生物生产性土地面积 ,从而计算出研究区域的生态足迹和生态承载力 ,由此确定其可持续发展状况。

3.2 改进生态足迹模型的步骤及方法

(1) 计算各主要消费项目的人均太阳能值。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。将能值转换率乘以给定项目的能量 ,该给定的能量就换算为能值 ,其计算公式可表示为 :能值=某有效能×能值转换率。

(2) 计算生态承载力。为了更好地理解生态承载力 ,将自然资源分为可更新资源和不可更新资源两类。由于不可更新资源的消耗速度要快于其再生速度 ,随着人类的不断利用 ,会日益枯竭 ,只有利用可更新资源 ,生态承载力才具有可持续性。因此 ,在计算生态承载力时 ,只考虑可更新资源的能值 ,其计算公式是 :

$$E_c=e/p_1 \tag{1}$$

式中 E_c 表示人均生态承载力 ; e 表示可更新资源的人均太阳能值 ; p_1 表示全球平均能值密度。

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) 计算生态足迹。首先计算区域能值密度。在计算区域总能值时 ,主要考虑 5 种可更新资源的能值 :太阳辐射能、风能、雨水化学潜能、雨水势能及地球旋转能 ,为避免重复计算 ,以其中最大能值作为区域总能值。区域能值密度的计算公式是 :

$$p_2=\text{区域总能值}/\text{区域土地面积} \tag{2}$$

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。计算生态足迹时 ,其包含的消费项目主要分为两类 :生物资源消费和能源资源消费。生物资源消费分为农产品、林产品、畜产品和水产品等大类 ,大类下有一些细分类。能源资源消费主要包括煤、焦炭、燃料油、原油、汽油、柴油和电力等。其计算公式是 :

$$E_f=\sum_{i=1}^n a_i=\sum_{i=1}^n (c_i/p_2) \tag{3}$$

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 ; c_i 表示第 i 种资源的人均能值 ; p_2 表示区域能值密度。

(4) 计算生态赤字或盈余。将计算的各消费项目的人均生态足迹汇总 ,与人均生态承载力进行比较 ,计算得到生态赤字或盈余 ,从而衡量研究区域的可持续发展状况。

4 实例分析

4.1 改进生态足迹模型的说明

江苏省的土地总面积为 $10.26\times10^4\text{km}^2$,2003 年总人口为 $7\,405.82\times10^4$ 人。本文所用的有关社会、经济、人口、资源和环境的原始数据均来自《2004 年江苏省统计年鉴》。根据 Odum 等^[12,13]的研究成果可知 ,全球年均总能值为 $1.583\times10^{25}\text{sej}$,全球平均能值密度 p_1 为 $3.104\times10^{14}\text{sej/hm}^2$ 根据式(1)计算出各种可更新资源的人均生态承载力(表 1) ,从而得出江苏省 2003 年的人均生态承载力为其中的最大值 $0.340\,5\text{hm}^2/\text{人}$ 。由表 1 的计算结果可知 ,江苏省的年均总能值为 $7.828\times10^{21}\text{sej}$,因此 ,根据式 (2) 可以计算得到江苏省的能值密度 p_2 为

7.629×10¹⁴sej/hm² 最后根据式(3)计算出江苏省 2003 年各种消费项目的人均生态足迹(表 2)。

表 1 江苏省 2003 年生态承载力计算结果

Table 1 Calculations for ecological carrying capacity in Jiangsu Province (2003)					
项目	原始数据/J	能值转换率/(sej/J)	太阳能值/sej	人均能值/sej	人均生态承载力/(hm ² /人)
生态承载力			7.828E+21	1.057E+14	0.340 5
太阳辐射能	5.150E+20	1	5.150E+20	6.954E+12	0.022 4
风能	1.830E+18	1 500	2.745E+21	3.707E+13	0.119 4
雨水势能	1.000E+16	8 888	8.888E+19	1.200E+12	0.003 9
雨水化学能	5.068E+17	15 444	7.828E+21	1.057E+14	0.340 5
地球旋转能	1.026E+17	29 000	2.975E+21	4.018E+13	0.129 4

表 2 江苏省 2003 年生态足迹计算结果

Table 2 Calculations for ecological footprint in Jiangsu Province (2003)						
项目	原始数据/J	能值转换率/(sej/J)	太阳能值/sej	人均能值/sej	人均生态足迹/(hm ² /人)	生物生产性土地类型
生态足迹					4.722 8	
生物资源			1.575E+23	2.127E+15	2.788 0	
小麦	1.136E+17	6.80E+04	7.728E+21	1.043E+14	0.136 8	耕地
稻谷	2.136E+17	3.59E+04	7.669E+21	1.036E+14	0.135 7	耕地
玉米	3.215E+16	5.81E+04	1.868E+21	2.522E+13	0.033 1	耕地
薯类	2.971E+15	2.70E+03	8.022E+18	1.083E+11	0.000 1	耕地
大豆	1.186E+16	6.90E+05	8.183E+21	1.105E+14	0.144 8	耕地
蚕豌豆	1.059E+15	6.90E+05	7.307E+20	9.867E+12	0.012 9	耕地
棉花	4.859E+15	1.90E+06	9.233E+21	1.247E+14	0.163 4	耕地
花生	1.186E+16	6.90E+05	8.184E+21	1.105E+14	0.144 9	耕地
油菜籽	3.833E+16	6.90E+05	2.645E+22	3.571E+14	0.468 1	耕地
麻类	8.603E+13	8.40E+04	7.227E+18	9.758E+10	0.000 1	耕地
甘蔗	8.414E+14	8.49E+04	7.143E+19	9.646E+11	0.001 3	耕地
甜菜	1.867E+13	8.49E+04	1.585E+18	2.140E+10	0.000 0	耕地
茶叶	2.083E+14	2.00E+05	4.165E+19	5.624E+11	0.000 7	耕地
蔬菜	3.611E+16	8.49E+04	3.066E+21	4.140E+13	0.054 3	耕地
水果	6.036E+15	5.30E+05	3.199E+21	4.320E+13	0.056 6	林地
林产品	3.149E+09	1.20E+12	3.779E+21	5.102E+13	0.066 9	林地
猪肉	5.728E+12	3.17E+06	1.816E+19	2.452E+11	0.000 3	牧草地
牛肉	6.529E+10	3.17E+06	2.070E+17	2.795E+09	0.000 0	牧草地
羊肉	2.806E+11	3.17E+06	8.896E+17	1.201E+10	0.000 0	牧草地
禽肉	6.718E+11	3.17E+06	2.130E+18	2.876E+10	0.000 0	牧草地
奶类	1.449E+15	1.70E+06	2.463E+21	3.325E+13	0.043 6	牧草地
禽蛋	1.581E+16	2.00E+06	3.162E+22	4.269E+14	0.559 6	牧草地
水产品	2.160E+16	2.00E+06	4.321E+22	5.834E+14	0.764 7	水域
能源资源			1.093E+23	1.476E+15	1.934 8	
煤炭	3.671E+17	3.98E+04	1.461E+22	1.973E+14	0.258 6	化石燃料用地
原油	1.614E+17	5.30E+04	8.556E+21	1.155E+14	0.151 4	化石燃料用地
电力	5.418E+17	1.59E+05	8.615E+22	1.163E+15	1.524 8	建筑用地

4.2 计算结果分析

从表 3 可以得到 ,江苏省 2003 年各种消费项目总的人均生态足迹为 4.722 8hm²/人。按世界环境与发展委员会(WCED)的报告建议 ,应留出 12%的生物生产性土地面积来保护生物多样性 ,江苏省人均生态承载力在扣除了 12%的生物多样性保护地后 ,实际可供利用的面积为 0.299 7hm²/人。因此 ,可以得出结论 :江苏省 2003 年的生态足迹超过生态承载力 ,人均生态赤字为 4.423 2hm²/人。计算结果表明 ,江苏省对自然生态环境的影响远远超出了其生态承载力的范围。其中 ,各类型生物生产性土地面积对总的生态足迹的贡献大小依次排列为 >建筑用地>耕地>水域>牧草地>化石燃料用地>林地(图 1)。

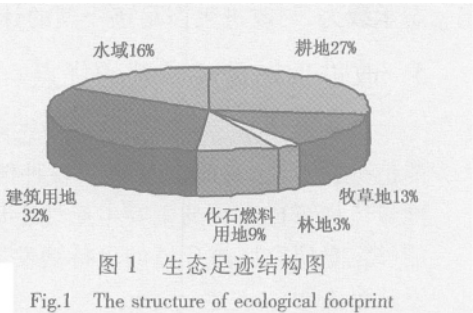


表 3 江苏省 2003 年生态足迹计算总结

Table 3 Ecological footprints summary in Jiangsu Province (2003)

人均生态足迹		人均生态承载力	
土地类型	总计/(hm ² /人)	土地类型	总计/(hm ² /人)
耕地	1.296 3	可更新资源	0.340 5
牧草地	0.603 5		
林地	0.123 5		
化石燃料用地	0.410 0	12%的生物多样性保护地	0.040 9
建筑用地	1.524 8		
水域	0.764 7		
总计	4.722 8	总计	0.299 7

4.3 传统生态足迹模型的说明

运用传统生态足迹模型计算江苏省 2003 年的生态足迹和生态承载力^[14] ,以此来验证改进生态足迹模型的有效性及其可行性。在计算生态足迹和生态承载力时 ,均衡因子和产量因子都是参考 Wackernagel 等^[15,16]计算的世界各国生态足迹估算的结果。其中 ,产量因子是根据全国产品的平均产量与江苏省的平均产量之间的比值 ,并结合文献[15]中计算中国生态足迹时的取值确定的。由表 4 可知 ,应用传统生态足迹模型计算得到江苏省 2003 年人均生态足迹

表 4 江苏省 2003 年应用传统生态足迹模型的计算结果总结

Table 4 Conventional ecological footprints summary in Jiangsu Province (2003)

人均生态足迹				人均生态承载力			
土地类型	人均面积/ (hm ² /人)	均衡因子	均衡面积/ (hm ² /人)	土地类型	人均面积/ (hm ² /人)	产量因子	均衡面积/ (hm ² /人)
耕地	0.171 3	2.8	0.479 6	耕地	0.065 6	2.30	0.422 5
牧草地	0.077 3	0.5	0.038 6	牧草地	0.000 3	0.39	0.000 1
林地	0.015 7	1.1	0.017 3	林地	0.008 3	0.91	0.008 3
化石燃料用地	0.771 9	1.1	0.849 1	建筑用地	0.023 2	1.66	0.107 7
建筑用地	0.007 3	2.8	0.020 5	水域	0.043 6	1.00	0.008 7
水域	1.596 7	0.2	0.319 3				
总计			1.724 5	总计			0.547 3

为 $1.724\ 5\text{hm}^2/\text{人}$, 人均生态承载力为 $0.547\ 3\ \text{hm}^2/\text{人}$, 这里直接以未利用地作为生物多样性保护地, 因此, 人均生态赤字为 $1.177\ 3\text{hm}^2/\text{人}$ 。计算结果表明, 江苏省的生态足迹超过其生态承载力, 与改进生态足迹模型的计算结果是一致的。

5 改进生态足迹模型的优点

改进生态足迹模型是基于生态经济系统的能量流来计算生态足迹和生态承载力。运用能值分析方法, 将研究区域的各种能量流转化成同一标准, 并引入能值密度的概念, 将这些能量流换算成对应的生物生产性土地面积, 并比较计算得到的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。与传统生态足迹模型相比, 其优点主要体现在以下几个方面:

(1) 传统生态足迹模型是用全球平均生产力来考察不同国家和地区的生态状况, 即全球生态平均生产力为 1, 这种利用相对指标计算的生态足迹, 忽略了各地区之间真正的生态比较优势, 不能反映各地区真实的生物生产性面积需求的大小。而改进生态足迹模型克服了这一个缺点, 将所有的自然资源转化为太阳能值进行比较, 更真实地描述了生态足迹的情况。

(2) 传统的生态承载力计算仅仅涉及出于人类需要的生物生产性面积的土地类型, 而主观地排除了诸如沙漠、冰川等土地类型, 使得计算的生态承载力偏小。即使环境条件极端恶劣的土地, 对人类也可能具有一定直接或间接的作用, 只是许多对人类间接有益的生物多样性或其他生态系统属性特征还没被发现。改进的生态足迹模型考虑了所有的土地面积, 因此, 其计算的生态承载力更真实地反映了生态系统的承载能力。

(3) 传统生态足迹模型和改进生态足迹模型都是通过生物生产性土地面积来定量描述生态足迹和生态承载力的。但在具体的换算过程中, 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, 更能反映区域特征。对于自然生态系统来说, 其自组织化程度已经达到很高效的程度, 因此, 对于来自自然界的产品和服务, 其太阳能值转换率的数值相对来说是稳定的^[17]。

6 结论

本文在计算江苏省生态足迹时, 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, 导致计算得到的人均生态足迹偏小。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。比如说, 由于生态经济系统的复杂多样性, 使得能值转换率的计算比较困难, 尤其是工业产品和服务太阳能值转换率的计算, 会因为所选择的原材料、生产方式、途径和效率的不同而变化, 因此, 难以给出确定的数值。

但总的来看, 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, 计算结果能够更真实地反映研究区域生态经济系统的环境状况。

参考文献(References):

- [1] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [2] 李利锋, 成升魁. 生态占用——衡量可持续发展的新指标[J]. 资源科学, 2000, 15(4): 375~382. [LI Li-feng, CHENG Sheng-kui. Ecological footprint: a new indicator for sustainability. *Resources Science*, 2000, 15(4): 375~382.]
- [3] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630~636. [YANG Kai-zhong, YANG Yong, CHEN Jie. *Theory and Method of Ecological Footprint Analysis*. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2000, 15(6): 630~636.]

- CHEN Jie.Ecological footprint analysis:concept,method and case.*Advance in Earth Sciences*,2000,15(6):630-636.]
- [4] Wackernagel M,Rees W E.Perceptual and structural barriers to investing in natural capital:Economics from an ecological footprint perspective[J].*Ecological Economics*,1997,20:3-24.
- [5] William E Rees.Revisiting carrying-capacity:Area-based indicators of sustainability[EB/OL]. <http://www.dieoff.com/page/110.htm>,1997.
- [6] 徐中民,张志强,程国栋.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J].地理学报,2000,55(5):607-616.[XU Zhong-min,ZHANG Zhi-qiang,CHENG Guo-dong.The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province in 1998.*Acta Geographica Sinica*,2000,55(5):607-616.]
- [7] Wackernagel M,Silverstein J.Big things first:focusing on the scale imperative with the ecological footprint[J].*Ecological Economics*,2000,32(3):391-394.
- [8] Vuuren D P,Smeets E MW.Ecological footprints of Benin,Bhutan,Costa Rica and the Netherlands[J].*Ecological Economics*,2000,34(1):115-130.
- [9] Wackernagel M,Onisto L,Bello P,*et al*.National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J].*Ecological Economics*,1999,29:375-390.
- [10] 蓝盛芳,钦佩.生态系统的能值分析[J].应用生态学报,2001,12(1):129-131.[LAN Sheng-fang,QIN Pei.Emergy analysis of ecosystems.*Chinese Journal of Applied Ecological*,2001,12(1):129-131.]
- [11] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002.[LAN Sheng-fang,QIN Pei,LU Hong-fang. *Emergy Analysis of Ecological-economic Systems*.Beijing:Chemistry Industry Press,2002.]
- [12] Odum H T.Environmental Accounting:Emergy and Environmental Decision Making [M].New York:John Wiley,1996.
- [13] M T Brown,R A Herendeen.Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view[J].*Ecological Economics*,1996, 19:219-235.
- [14] 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,2002,39(3):441-445.[XU Zhong-min,CHEN Dong-jing,ZHANG Zhi-qiang,*et al*.Calculation and analysis on ecological footprints of China.*Acta Pedologica Sinica*,2002,39(3): 441-445.]
- [15] Wackernagel M.An evaluation of the ecological footprint[J]. *Ecological Economics*,1999,31:315-320.
- [16] Wackernagel M,Onisto L,Bello P,*et al*.Ecological footprint of nations commissioned by the earth council for the Rio⁴⁵ Forum [A].In:International Council for Local Environmental Initiatives Toronto.Rio⁴⁵ Forum [C].Rio de Janeiro:The Earth Council for the Rio⁴⁵ Forum,1997.3-17.
- [17] 付晓,吴刚,刘阳.生态学研究中的熵分析与能值分析理论[J].生态学报,2004,24(11):2621-2626.[FU Xiao,WU Gang,LIU Yang.Analytical theories of exergy and emergy for ecological research.*Acta Ecologica Sinica*,2004,24(11): 2621-2626.]

A Modified Model of Ecological Footprint Calculation Based on the Theory of Emergy Analysis—Taking Jiangsu Province as an Example

ZHANG Fang-yi¹, PU Li-jie^{1,2}, ZHANG Jian¹

(1.Department of Urban and Resource, Nanjing University,Nanjing 210093,China;

2.Key Lab. of Land Use,Ministry of Land and Resources,Beijing 100029,China)

Abstract: Associated with rapid development of economy and increase of population,we face a series of contradictions among the natural resources,environment and economy,such as resources depression,environmental deterioration and so on.To be sustainable,humanity must live within the limits of nature 's carrying capacity.In the 1990s,Rees and Wackernagel put forward the ecological footprints model,which offers an easy and rapid method to measure the environmental

situations of eco-economic system.

The aim of the paper is to show a modified model of ecological footprint calculation by combining emergy analysis with conventional ecological footprint model of calculations in the framework of the theory of ecological footprint, to apply the method of emergy analysis and introduce the concept of emergy density into the calculation models, in order to translate all kinds of energy flows in the eco-economic systems into the corresponding biological productive units. In this paper we present a new method of ecological footprint calculation, based on the emergy analysis. The translation of human demand of natural resources and the supply of nature services into understandable and quantifiable concepts is the main objective of this new method. Firstly, the amounts of human consumption corresponding to six categories of ecological productive areas and the amounts of natural supply are calculated. And then, these amounts are translated into common unit emergy through the emergy analysis. Thirdly, in this new method we are proposing, we will derive the ecological footprint and carrying capacity by dividing the emergy amounts by the emergy density. Finally, we compare the ecological footprint with the carrying capacity to measure the environmental status of sustainability in the given region.

With Jiangsu Province in the year 2003 as an example, we apply the modified model to it to analyze the ecological environmental situations. According to the calculation equations, we get the annual total emergy amount of Jiangsu was 7.828×10^{21} sej and its emergy density was 7.629×10^{21} sej/ha. And then we get the carrying capacity of Jiangsu was 0.299 7ha/cap, the ecological footprint of biological resources and energy resources was 4.722 8ha/cap and the ecological deficit was 4.423 2ha/cap. So we conclude that the ecological footprint of Jiangsu has exceeded its carrying capacity, which conforms with the calculation results of conventional model of ecological footprints. This indicates that the new method of ecological footprint calculation is effective and feasible.

By analyzing the strong points of the modified model, we find that the calculation results of the modified model give a more realistic picture of the environmental situations of the eco-economic systems, compared to the conventional one.

Key words: ecological footprint model ; emergy analysis ; ecological footprint ; carrying capacity ; Jiangsu province