

基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用

金丹*, 卞正富

(中国矿业大学环境与测绘学院, 国土资源研究所, 江苏 徐州 221008)

摘要:为衡量和评价区域发展的可持续状况, 针对传统生态足迹模型以土地生产力为基础的不足, 结合能值理论和方法, 运用能值转换率和能值密度对模型进行改进, 建立基于能值的生态足迹模型。改进的模型重点在采用区域能值密度, 更加全面真实地反映区域生态承载力的大小以及区域发展模式下生态足迹的需求。能值-生态承载力的计算主要考虑区域可更新自然资源和生物生产性土地的可更新部分; 能值-生态足迹计算人民生活需求资源消费量和区域经济发展的资源出口量。模型应用的结果为: 资源型城市徐州市 2006 年人均能值-生态承载力 1.03 hm^2 , 人均能值-生态足迹 37.76 hm^2 , 分别是其他改进模型计算结果的 4.4 倍和 4.3 倍。如果不进行能值转换率的全球能值基准转换, 能值-生态承载力将是 2.6 倍。生物生产性土地的可更新部分在徐州生态承载力中占有很大比重; 当地承载了其他地区发展所需要的大量能值-生态足迹(出口资源)。可持续性评价指数为 0.97, 表明在为其他地区发展做出巨大生态贡献的同时, 徐州的可持续发展状况十分堪忧。适度控制资源开采规模, 延长产业链, 增加出口产品附加值; 开发利用可再生能源是资源型城市兼顾社会经济发展和生态环境持续的发展策略。

关键词:生态承载力; 生态足迹; 能值; 徐州

Emergy-based ecological footprint model and its application to a natural resource-dependent economy in Xuzhou City

JIN Dan*, BIAN Zhengfu

Institute of Land Resources, College of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

Abstract: The traditional ecological footprint models, developed to access the sustainability of regional developments. Their calculations used “biologically productive areas with world average productivity” as a common measurement unit for ecological footprints and carrying capacity. However, the basis of land productivity was subject to many limitations. In this study we present a new ecological footprint model which is based on the emergy theory. A sustainability evaluation index is also put forward to indicating the extent of the environmental resources use. The new model focused on the ecological carrying capacity and the demand of ecological footprints for sustaining regional development using the emergy transformity and emergy density concepts in the emergy theory. The emergy analysis measures both the work of nature and that of humans in generating products and services. By multiplying the amount of energy with its solar emergy transformity, we can easily quantify different kinds of products, services and environmental work with a single universal unit in solar emergy emjoules. The objective of this paper is to improve the ecological footprint model by introducing the emergy analysis into the calculation process and test the model in Xuzhou City. The emergy-based ecological carrying capacity (EECC) was estimated based on regional renewable resources and the renewable portion of the biologically productive land. The emergy-based ecological footprints (EEF) were calculated according to the natural resource consumption within the region and the regional resource outputs. Our calculations began with the annual solar emergy of earth geobiosphere in calculating regional emergy density. Then, regional renewable resources, renewable portion of biologically productive land, and most of the consumed resources were converted to corresponding emergy amount through emergy analysis. According to respective formula, total amount of emergy-related divided by regional emergy density can obtain emergy-based ecological carrying

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0865); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B07028)

收稿日期: 2009-08-14; **修订日期:** 2010-01-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jindan2001@yahoo.cn

capacity and ecological footprints. In this way, the capacity areas and footprints areas both have the same connotation, namely, the regional emergy density. We applied the improved emergy-based model to Xuzhou City and found that the emergy-based ecological carrying capacity was 1.03 hm² per capita and the emergy-based ecological footprint was 37.76 hm² per capita in Xuzhou City in 2006, which was 4.4 and 4.3 times higher than those of previous models respectively. The emergy-based ecological carrying capacity would be 2.6 times higher, if the transformities were not modified based on the new global emergy baseline reference standard. Our results indicated that the renewable part of the biologically productive land accounted for a large proportion of the regional ecological capacity and a large portion of the footprints in Xuzhou was contributed to exporting resources to other regions outside of the city. The sustainability emergy index (SEI) was 0.97 which indicated the sustainable development of Xuzhou was of concern. The developing strategies for the natural resource-dependent economy city should focus on optimizing economic structure, increasing resource use efficiency, and balancing economic development and eco-environment protection. Such as controlling the exploitation scale, extending the industrial chain, increasing the added value of export products and developing and utilizing renewable energy should be taken into account.

Key Words: ecological carrying capacity; ecological footprint; emergy; Xuzhou City

可持续发展是一种全新的发展观,但要将这种发展理念变成可操作的发展模式,就必须定量测度系统发展的可持续性状态。1992年,加拿大生态经济学家 Rees W E 提出用生态足迹(ecological footprint, EF)来衡量可持续发展^[1],并与其学生 Wackernagel M 于1996年完善了生态足迹分析计算方法^[2]。该理论自提出以来,很快以其全新的思想角度及良好的可操作性得到了全球性的广泛关注和应用。同时,在实证研究的过程中,国内外学者也注意到生态足迹模型还存在一些不足,从而也推动了对模型的改进和完善。目前,生态足迹的计算方法在传统的综合法基础上,发展提出了成分法^[3-5]、投入产出法^[6-10],已经取得了一系列成果。

20世纪80年代提出的能值理论为生态经济系统过程及格局的定量研究开拓了一条新的途径^[11]。近几年,不少学者将能值理论与生态足迹理论结合起来,改进和完善了生态足迹模型。赵晟等^[12]通过结合能值分析和传统生态足迹计算形式建立了修正的生态足迹计算方法,并以甘肃省为例进行了传统方法与改进方法的分析比较。陈斌和陈国谦^[13]运用传统生态足迹法和基于生态热力学的修正方法(emergetic ecological footprint, EEF)计算比较了中国1981—2001年生态足迹和生物承载力;并以生态热力学理论为基础,提出基于体现能概念的生态足迹模型(embodied exergy ecological footprint, EEEF)^[14]。Nguyen 和 Yamamoto^[15]也从热力学角度对生态足迹模型进行了改进,并对7个国家的生物和非生物资源进行了生态足迹计算。Cuadral 和 Björklund^[16]则采用生态足迹、经济成本与收益评价和能值分析3种方法,对尼加拉瓜热带作物生产的经济效益及可持续性进行了评估。刘钦普等^[17]在将能值分析理论与生态足迹理论结合时,考虑了土壤储能和人类利用土地的效率对区域生态承载力的影响,建立“生态可持续指数(ecological sustainability index, ESI)”反映区域可持续发展状况。刘森等^[18]提出区域能值足迹法弥补 EEF 不能反映区域实际情况和技术进步的不足。赵志强等^[19]针对传统模型的系统封闭性和空间互斥性等不合理假设,建立了基于能值分析的开放系统生态足迹模型。以上研究都充分利用了能值分析基于流量算法的优点,在提高模型参数稳定性、真实反映资源价值方面取得了较大进展。但改进模型中仍存在需要完善的地方,比如区域发展模式的体现、能值密度的尺度选择、资源消耗量的统计范围以及可持续评价指标的建立等。本文在传统生态足迹理论框架下,建立区域尺度下的基于能值的生态足迹模型,试图进一步完善区域生态足迹综合研究模型,并将其运用到资源型城市徐州市可持续发展评价中,探讨区域可持续发展状况及模型的可行性。

1 理论基础

1.1 生态足迹模型

任何已知人口(某个个人、一个城市或一个国家)的生态足迹是生产这些人口所消耗的所有资源和吸纳

这些人口所产生的所有废弃物所需要的陆地和水域总面积^[2]。通过比较生态足迹和生态承载力之间是否平衡来判断人类活动是否处于生态系统的承载力范围内。计算模型包括生态足迹计算、生态承载力计算及二者的比较 3 个部分。

(1) 在生态足迹计算中,人类对各种资源和能源的消费项目主要被折算为化石燃料土地、可耕地、林地、牧草地、建筑用地和水域等 6 种生物生产性土地,引入均衡因子将不同类型的生物生产性土地转化为具有相同生态生产力的土地以加总。计算公式为:

$$EF = N \cdot ef = N \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot aa_i) = N \sum_{i=1}^n [\gamma_i (c_i / p_i)] \quad (1)$$

式中, EF 为总的生态足迹; N 为人口数; ef 为人均生态足迹; i 为消费项目的类型; γ_i 表示对应生物生产土地类型的均衡因子; aa_i 为人均第 i 种消费项目折算的生物生产面积; c_i 为 i 种消费项目的人均消费量; p_i 为 i 种消费项目的世界平均生产能力。

(2) 在生态承载力或生物承载力的计算中,不同国家或地区的各类生物生产土地产量与世界平均产量的差异用“产量因子”表示,即某个国家或地区某类土地平均生产力与世界同类土地的平均生产力的比率。计算公式为:

$$EC = N \cdot ec = N \sum_{j=1}^6 (a_j \cdot \gamma_j \cdot y_j) \quad (2)$$

式中, EC 为总生态承载力; N 为人口数; ec 为人均生态承载力; a_j 为人均 j 类生物生产土地面积, γ_j 为均衡因子, y_j 为 j 类生物生产用地的产量因子。根据世界环境与发展委员会(WCED)的报告《我们共同的未来》建议,12%的生物生产土地需被保留以保护生物多样性^[20]。

(3) 如果一个地区的生态足迹大于区域的生态承载力,称为“生态赤字”;反之,则称为“生态盈余”。区域的生态赤字或生态盈余,反映人口对自然资源的利用状况,进而反映区域可持续发展状态。

1.2 能值理论和方法

20 世纪 80 年代,美国著名生态学家 Odum H T 创立了“能值”这样一个科学概念^[21],定义为某种类别流动或贮存的能量所包含的另一种类别能量的数量,称为该能量的能值。地球上大多数物质和能量都可追本溯源始于太阳能,因此通常以“太阳能值”为标准衡量其他任何类别能量和物质的能值,即一定数量的某种类型的能量中所包含的太阳能的数量,或者为形成一定数量的某种类型的能量或物质所需要消耗的太阳能的数量。单位为太阳能焦耳(sej)。单位某能量或物质所含能值量称为该能量或物质的能值转换率,以太阳能值转换率表示,即单位某能量或物质所含太阳能值之量。单位为太阳能焦耳/焦耳(或克),即 sej/J 或 sej/g。

能值分析主要包括 3 个步骤:

(1) 绘制能量系统图 在掌握生态环境和社会经济各方面资料的基础上,确定研究系统的范围边界和内容、主要能量来源以及系统内主要组分,并用能量符号语言概括各组分的作用过程和关系。包括主要的能物流、货币流及其他生态流。

(2) 编制能值分析表 通过能值转换率将系统中来源和性质不同的各类别能量、物质输入和输出项目转换为共同的能值单位,并计算其能值-货币价值。能值分析表一般包括资源类别、项目、原始数据、能值转换率、太阳能值和能值-货币价值 6 个题头。太阳能值 = 原始数据 × 对应的能值转换率;能值-货币价值 = 能值/能值货币比。

(3) 建立能值指标体系 根据能值分析表,建立反映系统中不同类别能值流的数量动态以及它们相互之间数量关系的能值指标体系,分析自然环境生产的价值及其与人类经济活动的关系。主要指标包括能值输入、能值输出、可更新能值比率、净能值产出率、环境负载率、能值货币比率、可持续发展指数等。

2 基于能值的生态足迹模型

能值分析将所有系统考虑为能量流的网络结构,通过确定系统内所有能量流的能值定量测度形成任何自然或人工产品需要的资源量。通过能值转化率,将系统内所有类型的资源转化为同一能值标准,为科学认识

和合理利用自然资源提供了有效的评估工具。而生态足迹从生态角度建立生态资源消费账户,通过测度生态承载力,为人类需求与自然有效供给的比较提供了一种简洁明了的自然资产评估方式。因此,一些研究者认为能值分析能为生态足迹转换为生物生产土地提供另一种新途径^[22],以弥补传统生态足迹计算以土地生产力为基础的不足。为了全面反映区域生态承载力的大小以及更好地体现区域发展模式下生态足迹的需求,本文在总结前人研究的基础上,构建区域尺度下的基于能值的生态足迹模型,重点计算反映区域状况的生态承载力,充分体现区域发展过程中生物产品和能源产品对自然资源的消耗,并建立可持续性评价指数。

2.1 计算步骤

首先对研究区域生态经济系统进行能量流分析,收集消费项目的年度数据,主要包括生物资源和能源资源两大类;然后运用能值分析方法将系统内资源和能量的消费量转换为可以直接加减的太阳能值;采用区域能值密度,根据系统内自然环境的服务和供给计算生态承载力,同时将各项消费项目能值加总以计算研究区域的生态足迹;最后,计算可持续性评价指数。考虑到模型已经将各消费项目转换为同质的能值,因此不再需要体现土地生产力差异的产量因子和均衡因子。

2.2 能值-生态承载力(emergy-based ecological carrying capacity, ECC)计算

为了更好地理解承载力,可将区域内自然资源划分为可更新资源和不可更新资源两部分^[12]。尽管地球上所有资源都能经过漫长复杂的地球化学过程完成更新,但不可更新资源的更新速率与其利用速率相比极为缓慢,也就造成了不可更新资源的耗竭。只有持续利用可更新资源,生态承载力才具有可持续性。因此,承载力的计算主要考虑区域可更新自然资源和生物生产性土地可再生资源部分,其中区域可更新资源包括太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能、河水势能、河水化学能及地球旋转能;生物生产性土地是指区域的耕地、园地、林业用地和牧草地。将这两部分的能值和除以区域能值密度,可得到体现区域能值特点并具有区域能值密度的承载力面积,即:

$$EEC = \frac{e_1 + 0.03e_2}{D} \quad (3)$$

式中, EEC 表示区域年能值-生态承载力; e_1 为区域可更新自然资源能值; e_2 为表土能值,刘钦普认为,就土壤肥力而言,应属于可更新资源,0.03 表示将每年表土能值的 3% 看作是可再生的^[17, 23]; D 表示区域能值密度,为区域太阳辐射能、吸收的潮汐能及进入地球生物圈热量的能值总和与区域面积之比。

2.3 能值-生态足迹(emergy-based ecological footprint, EEF)计算

能值-生态足迹为区域年消费项目能值与区域能值密度之比。消费项目主要分为生物资源和能源资源两大类:生物资源包括农产品、畜牧产品、林产品、水资源等;能源资源包括化石燃料及电力。具体细类见表 3。和传统模型有所不同的是,为体现区域发展对资源的需求,考虑广义的资源“消费量”,即不仅计算区域人口基本生活需求的资源消费量,还将计算经济发展中转化为经济效益的资源用量。具体的做法是,在能值-生态足迹计算公式中,不扣除消费项目的年出口量。各项资源消费量乘以对应的能值转换率得到该资源消费量能值,加总求和后除以区域能值密度,得到与能值-生态承载力一样具有区域能值密度的足迹面积:

$$EEF = \frac{\sum_{i=1}^n [(Pd_i + Im_i) \cdot Tr_i]}{D} \quad (4)$$

式中, EEF 表示区域年能值-生态足迹; Pd_i 为研究区第 i 项消费项目的年产量; Im_i 为第 i 项消费项目的年进口量; Tr_i 为第 i 项消费项目对应的太阳能值转换率; D 表示区域能值密度。

2.4 可持续性评价指数(sustainability evaluation index, SEI)

传统生态足迹模型中的生态盈余或生态赤字指标能够直观明了地反映区域发展对生态环境的利用和依赖状况,却不能很好地体现对环境资源的利用程度,也不便于地区间的比较。生态足迹模型通过测定现今人类为了维持自身生存与发展而利用自然资源的量来评估人类对生态系统的影响,相对于承载力,人类的生态足迹在可持续评价中起到至关重要的作用。因此,本文用能值-生态足迹作为可持续性评价的指示剂,基于能

值的生态足迹模型的可持续性评价指数表示为:

$$SEI = \frac{EEF}{EEF + EEC} \quad (5)$$

SEI 的值在 0 到 1 之间,值越小,可持续性状况越好。当 SEI 趋于 0 时,说明生态足迹与生态承载力相比可以忽略不计,区域发展有很大的生态空间;当 SEI 等于 0.5 时,生态足迹与生态承载力相等,说明区域发展的可持续性处于一种边缘状态;当 SEI 趋于 1 时,说明生态足迹远大于生态承载力,即区域发展给生态环境带来了巨大的压力,区域可持续性状况相当堪忧。根据 SEI 远离 0.5 的程度,可以判断区域可持续或不可持续的程度。通常社会经济的发展必然会增加区域生态足迹,因此,在 0 到 0.5 之间划分可持续性指数的安全区间既能体现经济得以发展,又能反映区域经济活动是否处于生态承载力范围内。

3 模型应用

本文选择地处江苏省西北部的资源型城市徐州市,对改进模型进行应用,探讨区域可持续发展状况。徐州市位于东经 $116^{\circ}22'$ — $118^{\circ}40'$ 、北纬 $33^{\circ}43'$ — $34^{\circ}58'$ 之间,土地总面积 11258 km^2 ,2006 年末总人口 934.73 万。域内大部皆为平原,属暖温带季风气候区,光照充足,气候资源较为优越,是国家和江苏省重要的农业生产基地。境内矿产资源丰富,其中煤炭已探明储量达 39 亿 t 以上,预测储量 69 亿 t,年产量 2500 多万 t,是全国重要的煤炭产地、华东地区的电力基地,2008 年底发电总装机容量达 736 万 kw。

3.1 区域能值密度

自然环境资源来自地球生物圈的作用。太阳辐射能、地球深处的地热能、潮汐能是推动地球生物圈物质循环的 3 种主要能源,对全球能量转化过程起着至关重要的作用,这 3 类能源的太阳能值是评估风、水、地球系统平均能值的基准值^[11]。本文采用 Odum 等人^[24]2000 年确定的全球能值基准,即 $15.83 \times 10^{24} \text{ sej/a}$ 。并以此为依据计算区域总能值,结果见表 1。计算潮汐能时,根据大陆架吸收潮汐能系数范围 0.1—0.5^[21],考虑到徐州所辖地区离海岸线最近仅几十公里,呈半海洋性气候特征,且地域东西狭长,受海洋影响程度有差异,因此潮汐能吸收系数取 0.1。区域能值密度为地区太阳辐射能、地热能、潮汐能 3 项之和与区域总面积之比。因此,得到的区域能值密度为:

$$D = \text{区域总能值} (4.59 \times 10^{20} \text{ sej}) / \text{区域总面积} (11258 \text{ km}^2) = 4.08 \times 10^{14} (\text{sej/hm}^2)$$

表 1 徐州地球生物圈年能值储量

Table 1 Annual budget of solar emergy for the earth geobiosphere in Xuzhou City

能量类型 Source	能量 Energy flux/(J/a)	能值转换率 Transformity/(sej/J)	参考文献 References	太阳能值 Emergy flux/(sej/a)
太阳辐射能 Solar insolation	2.79×10^{20}	1.00	[24]	2.79×10^{20}
地热能 Deep earth heat	1.48×10^{16}	1.20×10^4	[24]	1.78×10^{20}
潮汐能 Tidal energy	0.33×10^{14}	7.39×10^4	[24]	2.42×10^{18}
合计 Total				4.59×10^{20}

3.2 能值-生态承载力与能值-生态足迹

区域可更新资源能值计算结果见表 2。能值转换率根据参考文献^[24]做了基准变换。太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能、河水势能、河水化学能分别均是源自同一过程的复合产物,为避免重复计算,归并时取其中最大值^[21],即 e_1 为 $3.02 \times 10^{21} \text{ sej}$ 。

$e_2 = \text{表层土壤厚度} (30 \text{ cm}) \times \text{生物生产性土地面积} (7127.7 \text{ km}^2)^{[26]} \times 10^{10} (\text{cm}^2/\text{km}^2) \times \text{土壤容重} (1.38 \text{ g/cm}^3)^{[27]} \times \text{土壤表层有机质平均含量} (0.98\%)^{[28]} \times \text{典型表土吉布斯自由能} (5.4 \text{ kcal/g})^{[21]} \times 4186 (\text{J/kcal}) \times \text{表土能值转换率} (7.40 \times 10^4 \text{ sej/J})^{[29-30]} = 4.84 \times 10^{22} \text{ sej}$ 。

表 2 2006 年徐州可更新资源能值计算

Table 2 Calculation for annual renewable resources energy in Xuzhou City (2006)

项目 Item	基础数据 Basic data/J	能值转换率 Transformity/(sej/J)	参考文献 References	太阳能值 Emergy/sej
太阳辐射能 Sunlight	5.63×10^{19}	1.00	[24]	5.63×10^{19}
地表风能 Wind	1.43×10^{16}	2.45×10^3	[24]	3.50×10^{19}
雨水势能 Rain, geopotential	3.11×10^{15}	1.76×10^4	[21, 24]	5.48×10^{19}
雨水化学能 Rain, chemical energy	4.89×10^{16}	3.05×10^4	[24]	1.49×10^{21}
河水势能 Rivers, geopotential	4.62×10^{14}	4.66×10^4	[24]	2.15×10^{19}
河水化学能 Rivers, chemical energy	7.24×10^{15}	8.10×10^4	[24]	5.86×10^{20}
地球旋转能 Earth cycle	1.63×10^{16}	5.76×10^4	[25]	9.39×10^{20}
小计 Total				3.02×10^{21}

按照公式(3), 计算得到 2006 年能值-生态承载力为 $1.10 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 扣除 12% 保护生物多样性以后, 人均能值-生态承载力为 1.03 hm^2 。

根据《徐州统计年鉴》查阅 2006 年区域自然和社会经济状况统计数据^[26], 能量折算系数相关参数参考文献^[11-21, 31-33], 能值转换率进行了基准转换。按照公式(4) 计算得到 2006 年徐州能值-生态足迹账户结果见表 3, 全年能值-生态足迹为 $3.53 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 人均均为 37.76 hm^2 。

表 3 2006 年徐州能值-生态足迹计算账户(2006 年)

Table 3 Emergy-based ecological footprints in Xuzhou City (2006)

		项目 Item	基础数据 Basic data/J	能值转换率 Transformity /(sej/J)	参考文献 References	太阳能值 Emergy/sej	能值-生态足迹 Emergy-ecological footprint/hm ²
生物资源 Biological resources	粮食	稻谷	2.14×10^{16}	6.02×10^4	[24, 33]	1.29×10^{21}	3.16×10^6
		小麦	2.48×10^{16}	1.14×10^5	[24, 33]	2.82×10^{21}	6.92×10^6
		大麦	2.59×10^{14}	1.34×10^5	[24, 34]	3.48×10^{19}	8.52×10^4
		玉米	7.91×10^{15}	4.53×10^4	[24, 11]	3.58×10^{20}	8.78×10^5
		豆类	1.43×10^{15}	1.16×10^6	[24, 33]	1.65×10^{21}	4.04×10^6
		薯类	1.09×10^{15}	4.53×10^3	[24, 33]	4.93×10^{18}	1.21×10^4
		小计					1.51×10^7
	其他作物	油料	3.73×10^{15}	1.16×10^6	[24, 33]	4.32×10^{21}	1.06×10^7
		棉花	8.46×10^{14}	1.44×10^6	[24, 11]	1.22×10^{21}	2.99×10^6
		水果	3.10×10^{15}	8.89×10^5	[24, 11]	2.76×10^{21}	6.76×10^6
		蔬菜	2.10×10^{16}	4.53×10^4	[24, 11]	9.50×10^{20}	2.33×10^6
		瓜类	8.21×10^{14}	6.71×10^4	[24, 34]	5.51×10^{19}	1.35×10^5
		小计					2.28×10^7
	农副产品	猪肉	6.36×10^{15}	2.85×10^6	[11, 24]	1.81×10^{22}	4.45×10^7
		羊肉	5.95×10^{14}	3.35×10^6	[11, 24]	1.99×10^{21}	4.89×10^6
		牛肉	1.17×10^{14}	6.71×10^6	[11, 24]	7.82×10^{20}	1.92×10^6
		禽肉	7.37×10^{14}	2.85×10^6	[11, 24]	2.10×10^{21}	5.15×10^6
		兔肉	8.43×10^{13}	2.85×10^6	[11, 24]	2.40×10^{20}	5.89×10^5
		奶类	5.54×10^{14}	2.85×10^6	[24, 33]	1.58×10^{21}	3.87×10^6
		禽蛋	3.04×10^{15}	3.35×10^6	[24, 33]	1.02×10^{22}	2.50×10^7
		毛类	2.47×10^{12}	6.44×10^6	[21, 24]	1.59×10^{19}	3.90×10^4
		水产品	9.49×10^{14}	3.36×10^6	[24, 35]	3.19×10^{21}	7.82×10^6
		小计					9.37×10^7
木材和水资源	活立木蓄积量	3.30×10^{15}	5.85×10^4	[24, 32]	1.93×10^{20}	4.74×10^5	
	水资源 *	7.18×10^{15}	—	[11, 24, 36]	1.12×10^{21}	2.75×10^6	

续表

	项目 Item	基础数据 Basic data/J	能值转换率 Transformity /(sej/J)	参考文献 References	太阳能值 Emergy/sej	能值-生态足迹 Emergy-ecological footprint/hm ²
能源资源 Energy	小计					3.22×10^6
	原煤	8.06×10^{17}	6.69×10^4	[21, 24]	5.39×10^{22}	1.32×10^8
	汽油	6.81×10^{14}	1.11×10^5	[21, 24]	7.53×10^{19}	1.85×10^5
	柴油	2.44×10^{15}	1.11×10^5	[21, 24]	2.70×10^{20}	6.61×10^5
	液化石油气	1.59×10^{15}	1.11×10^5	[21, 24]	1.76×10^{20}	4.32×10^5
	电力	1.31×10^{17}	2.67×10^5	[11, 21, 24]	3.48×10^{22}	8.54×10^7
	小计					2.18×10^8
合计 Total						3.53×10^8

* 包括灌溉用水和自来水两项,故能值转换率空缺

3.3 结果与分析

以上对基于能值的生态足迹模型的应用结果见表 4。

表 4 基于能值的生态足迹模型应用结果

Table 4 Application results of ecological footprint model based on emergy in Xuzhou City (2006)

区域 Area	年份 Year	人均能值-生态承载力 Emergy-based ecological capacity/(hm ² /capita)	人均能值-生态足迹 Emergy-based ecological footprint/(hm ² /capita)	人均生态赤字 Ecological deficit /(hm ² /capita)	可持续性评价指数 Sustainability evaluation index
徐州 Xuzhou City	2006	1.03	37.76	36.73	0.97

2006 年徐州人均生态赤字为 36.73 hm^2 , 远大于冯芳等^[37]运用赵晟等改进的生态足迹计算方法得到的结果 8.6218 hm^2 。计算区域生态承载力时, 本文考虑的区域可更新自然资源还包括生物生产土地的表土能值可更新资源部分, 而且根据新的全球能值基准转换后, 能值转换率是原来的 1.68 倍, 因而得到的能值-生态承载力是该作者计算结果的 4.4 倍。如果不转换全球能值基准, 结果将是 2.6 倍。能值-生态足迹的计算不仅包括了传统意义上人口消耗的资源量, 而且包括了区域发展所需要的或所消耗的资源量, 因此人均能值-生态足迹比同类研究高出很多, 能值-生态承载力与之相比显得微不足道。这样的结果更加真实地反映了一年区域发展所消耗的自然资源与区域自然环境的资源供给(可更新资源)之间的差距。比如, 煤炭的形成速率相当缓慢, 而当地的年开采量则相当巨大, 从表 3 可以得出仅煤炭资源一项就占到年能值-生态足迹的 37%, 接近当年区域承载力的 14 倍。

按照公式(5)计算得到可持续性评价指数为 0.97, 接近于 1。根据指数值域的划分, 该指数表明 2006 年徐州能值-生态足迹远大于能值-生态承载力。这与该地区生物生产性土地的高强度生产以及煤炭资源的大量开采是一致的, 尤其是能源资源的消耗占到年能值-生态足迹的 62%, 为生态承载力的 22 倍之多。

3.4 讨论

基于能值的生态足迹模型将传统生态足迹模型中人类需求与自然供给的资源流转换为能量流, 通过能值转换率将其表示为同一标准的能值单位, 弥补了传统计算方法以土地生产力为基础的不足。能值转换率相比生物生产性土地的全球平均生产力更具有稳定性^[12-13]。为增强承载力和生态足迹进行比较的科学性, 在能值密度的选择上, 计算能值-生态承载力和能值-生态足迹时都采用区域能值密度, 以保证二者最终人均能值面积是具有相同能值密度即相同内涵的面积。区域能值密度不仅能体现地球生物圈循环的 3 种主要能源在区域的贡献, 同时还能反映与全球平均能值密度的差异。全球各地的自然资源状况千差万别, 区域的可持续性评价由区域能值密度体现也会更为合理。本文改进的模型中生态承载力既包括区域可再生自然资源的贡献, 还包括传统模型中生物生产性土地的生态承载功能, 从而可以较全面地反映区域可再生自然资源的重要性。在计算生态足迹时没有将消费项目对应的出口量减去, 区域发展过程中资源的消耗量反映得更为客观。

因为与自然资源密切相关的生物资源和能源资源出口,尤其是能源资源,会使区域生态足迹偏小。案例应用结果表明了这一点。

基于能值的生态足迹模型重点在衡量和评价区域的可持续状况,采用的是区域能值密度,因此承载力和生态足迹不适合在区域间进行比较。能值-生态足迹的计算包括资源出口量,在更大范围内进行加总会形成重复,因此需要选择对应尺度的能值密度进行计算。可持续性评价指数是相对指数,可用来衡量和评价区域间的差异。可持续发展的要义为社会经济发展和生态环境持续,丰富的自然资源是大自然成百上千亿年的积累才形成的财富,决策者要在发展和保护之间寻求平衡,首先要解决如何合理利用自然资源为经济发展服务。

4 结论与建议

(1) 本文以资源型城市徐州市为案例对改进模型进行应用,2006 年徐州人均生态承载力 1.03 hm^2 ,人均生态足迹 37.76 hm^2 ,人均生态赤字为 36.73 hm^2 。计算结果表明,徐州市相当高的人均能值-生态足迹实际上包含了出口资源的能值-生态足迹,也就是说当地承载了其他区域发展所需要的大量生态足迹,为这些地方方的发展作出了巨大的生态贡献。农产品的生产需要利用当地的光温水资源,煤炭资源的开采不仅要利用当地的自然禀赋,生产引起的废弃物堆放和生态环境破坏还会给当地带来生态负担。因此,发展对资源的需求也给区域的生态环境带来了巨大的压力,资源型城市的可持续性状况十分堪忧。

(2) 模型应用表明,生物生产性土地表土可再生部分能值占区域可更新资源能值总量的 32%,对区域承载力的贡献十分显著,不可忽略。基于能值的生态足迹模型更客观地体现了区域的生态承载力,更真实地反映了区域发展模式下对资源的需求和消耗,从而能更好地反映区域人类社会经济活动与自然资源之间的关系,可为国家或地区可持续发展决策提供参考。

(3) 从计算结果可以看出,为促进资源型城市可持续发展,当地在发展对策上应大力保护耕地的数量和质量,保证区域承载力不下降;适度控制不可再生资源开采规模,保护资源并减小区域生态足迹;结合区域优势,适度延长资源生产产业链,增加出口产品附加值,将会极大地提升地区经济发展的增值空间;开发利用可再生能源改变能源结构会大大减小能源资源的生态足迹,既清洁,又能保证生态承载力具有可持续性。

References:

- [1] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 9-12.
- [3] Kevin L, Craig S, Nicky C. *An Ecological Footprint Analysis of Different Packaging System*. Oxford: Best Foot Forward, Ltd, 1998: 1-5.
- [4] Simmons C, Lewis K, Barrett J. Two feet-two approaches: a component-based model of ecological footprinting. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 375-380.
- [5] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity accounts. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231-246.
- [6] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby H R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 149-160.
- [7] Ferng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprint associated with production activity. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 159-172.
- [8] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 229-255.
- [9] Qin Y C, Niu S H. Application and improvement of ecological footprint method in regional sustainable development evaluation. *Resources Science*, 2003, 25(1): 1-8.
- [10] Hubacek K, Giljum S. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecological Economics*, 2003, 44(1): 137-151.
- [11] Lan S F, Qin P, Lu H F. *Emergy Analysis of Ecological-Economic System*. Beijing: Chemistry Industrial Press, 2002: 12, 62-128.
- [12] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [13] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy — A case study of the Chinese society. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 101-114.
- [14] Chen B, Chen G Q. Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied exergy — A case study of the Chinese society 1981—2001. *Ecological Economics*, 2007, 61(2/3): 355-376.

- [15] Nguyen H X, Yamamoto R. Modification of ecological footprint evaluation method to include non-renewable resource consumption using thermodynamic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(4): 870-884.
- [16] Cuadra M, Björklund J. Assessment of economic and ecological carrying capacity of agricultural crops in Nicaragua. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 133-149.
- [17] Liu Q P, Lin Z S, Feng N H, Liu Y M. A modified model of ecological footprint accounting and its application to cropland in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 154-162.
- [18] Liu M, Hu Y M, Chang Y, Zhang W G, Zhang W. Modification of ecological footprint assessment based on emergy. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 447-457.
- [19] Zhao Z Q, Li S C, Gao Y. Emery-based modification for ecological footprint accounting and application to open eco-economic system: a case study of Shenzhen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2220-2231.
- [20] Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng G D. The concept of ecological footprints and computer models. *Ecological Economy*, 2000, (10): 8-10.
- [21] Odum H T. *Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley, 1996: 51, 73-206, 298.
- [22] Wackernagel M, Yount J D. Footprints for sustainability: the next steps. *Environment, Development and Sustainability*. 2000, 2(1): 21-42.
- [23] Foth H D. *Fundamentals of Soil Science*. Tang Y X, Tan S W, Zhang B Q, Xu X C, Lao J C, Hu T K, Chen X X Translated. Beijing: Agriculture Press, 1984: 124-136.
- [24] Odum H T, Brown M T, Williams S B. *Handbook of Emery Evaluation. Folio #1: Introduction and Global Budget*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000: 7-8.
- [25] Odum H T. *Handbook of Emery Evaluation. Folio #2: Emery of Global Processes*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000: 17.
- [26] Xuzhou Bureau of Statistics. *Xuzhou Statistical Yearbook 2007*. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [27] Bian Z F. Change of agricultural land quality due to mining subsidence. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(2): 213-218.
- [28] Xuzhou Land Resources Network. The status of cultivated land and protection countermeasures in Xuzhou. [2009-04-25]. <http://www.xzgtzy.gov.cn/dt2111111385.asp?docid=2111114012>.
- [29] Brown M T, Bardi E. *Handbook of Emery Evaluation. Folio #3: Emery of Ecosystems*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2001: 61-62.
- [30] Brown M T, Arding J. *Transformities Working Paper*. Gainesville: Center for Wetlands, University of Florida, 1991.
- [31] Luo S M. *Agriculture Ecology*. Beijing: China Agriculture Press, 1987: 450-456.
- [32] Yan M C. *New Theory of Ecological Economics — Theory, Method and Application*. Beijing: Chinese Zhigong Publishing House, 2001: 223-266.
- [33] Yan M C, Li H T, Cheng H, Shen W Q. Emery analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(6): 66-69.
- [34] Shang Q F. *Emery Analysis of Oasis Agricultural Eco-Economic System in Arid Region — A Case Study of Liangzhou District, Wuwei*. Lanzhou: Lanzhou University, 2006: 27-28.
- [35] Brown M T, McClanahan T R. Emery analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1/3): 105-130.
- [36] Odum H T. *Energy, Environment and Public Policy — A Guide to the Analysis of Systems*. Lan S F Translated. Beijing: Oriente Press, 1992: 232-233.
- [37] Feng F, Huang Q H, Jin S. Ecological footprint calculation of Xuzhou based on emery theory. *Territory & Natural Resources Study*, 2009, (1): 8-10.

参考文献:

- [9] 秦耀辰, 牛树海. 生态占用法在区域可持续发展评价中的运用与改进. *资源科学*, 2003, 25(1): 1-8.
- [11] 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: 12, 62-128.
- [18] 刘森, 胡远满, 常禹, 张文广, 张薇. 基于能值理论的生态足迹方法改进. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 447-457.
- [19] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用. *生态学报*, 2008, 28(5): 2220-2231.
- [20] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型. *生态经济*, 2000, (10): 8-10.
- [23] 福斯. *土壤科学原理*. 唐耀先, 谭世文, 张伯泉, 须湘成, 劳家桢, 胡童坤, 陈小萱译. 北京: 农业出版社, 1984: 124-136.
- [26] 徐州市统计局. *徐州统计年鉴 2007*. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [27] 卞正富. 矿区开采沉陷农用地质量空间变化研究. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2): 213-218.
- [28] 徐州国土资源局. 徐州市耕地现状与保护对策. [2009-04-25]. <http://www.xzgtzy.gov.cn/dt2111111385.asp?docid=2111114012>.
- [31] 骆世明. *农业生态学*. 北京: 中国农业出版社, 1987: 450-456.
- [32] 严茂超. *生态经济学新论——理论、方法与应用*. 北京: 中国致公出版社, 2001: 223-266.
- [33] 严茂超, 李海涛, 程鸿, 沈文清. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估. *北京林业大学学报*, 2001, 23(6): 66-69.
- [34] 尚清芳. 干旱区绿洲农业生态经济系统能值分析——以武威市凉州区为例. 兰州: 兰州大学, 2006: 27-28.
- [36] 欧登. *能量、环境与经济——系统分析导引*. 蓝盛芳译. 北京: 东方出版社, 1992: 232-233.
- [37] 冯芳, 黄巧华, 金爽. 基于能值分析的徐州市生态足迹计算. *国土与自然资源研究*, 2009, (1): 8-10.