

基于能值改进的生态足迹模型 在两型社会城市的应用*

——以武汉市为例

郭玲霞¹, 高贵现², 黄朝禧¹

(1. 华中农业大学 土地管理学院, 湖北 武汉 430070; 2. 华中农业大学 经济管理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 简述了生态足迹研究进展, 根据传统生态足迹模型计算出武汉市 2008 年生态足迹及生态承载力, 并在此基础上采用能值改进的生态足迹模型, 对武汉市 2008 年生态足迹及生态承载力进行了计算, 并对基于 2 种模型计算的结果进行比较。2 种计算结果均表明 2008 年武汉市生态足迹超过其生态承载力, 说明武汉市可持续发展状态堪忧。提出武汉市应继续转变发展思路, 大力调整和优化产业结构, 要以循环经济为契机, 实现从传统“三高一低”向现代“三低一高”的突破。

关键词 生态足迹; 生态承载力; 能值分析; 两型城市; 可持续发展

中图分类号: F 323. 211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-3456(2012)04-0075-07

生态足迹模型自提出以来便被广泛应用于定量估算区域的可持续性状况。但由于传统生态足迹模型计算时需用到全球平均产量、均衡因子等不稳定参数, 从而影响了计算结果的准确性。而基于能值改进的生态足迹模型, 计算时使用太阳能作为中间转换参数, 参数较固定, 从而使计算结果更准确。两型社会指的是“资源节约型、环境友好型社会”。资源节约型社会是指整个社会经济建立在节约资源的基础上, 核心是节约资源, 提高资源利用效率, 尽可能地减少资源消耗和环境代价、满足人们日益增长的物质文化需求的发展模式。环境友好型社会是一种人与自然和谐共生的社会形态^[1]。武汉城市圈于 2007 年 12 月被国务院批准为资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革实验区。它包括以武汉市为中心, 由武汉及周边 100 km 范围内的黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、潜江、天门 9 市构成的区域经济联合体^[2]。武汉城市圈区位优势优越, 产业基础好, 发展潜力大, 是湖北省“两圈一带”发展战略的重要组成部分。本文以武汉市为例, 从能量角度探讨人类物质需求与生态系统资源供应的关系, 采用能值转换率、能值密度等更加稳定的参数计算资源节约和环境友好型城市的生态足迹, 以克服传统

生态足迹方法的缺陷, 为判断武汉市以及类似城市的可持续发展能力提供依据和参考。

一、研究回顾

区域的可持续发展必须以生态环境的可持续发展作为前提和保障。由于生态足迹不仅体现了人类活动对生态环境的压力, 而且也体现了人类所依赖的生态环境的承载力, 所以广泛应用于区域可持续发展的定量评价领域^[3]。

生态足迹概念于 1992 年由 Rees 提出, 之后 Wackernagel 等协助完善了其内涵和方法, 并应用生态足迹指数理论对世界上 52 个国家和地区 1997 年的生态足迹进行了实证研究^[4-5]。生态足迹模型在国外广泛应用于区域可持续发展度量和生态经济中的多个领域, 对生态足迹的探讨不再停留于理论阶段, 而同时为辅助政府政策和公司制定决策提供强有力的分析评价基础。生态足迹的概念于 1999 年引入我国, 很多学者对生态足迹的理论、方法和计算模型进行了介绍和相关研究^[6-7]。

近年来, 生态足迹模型在国内外得到了进一步研究和讨论, 主要涉及生态足迹模型的应用和改进。其中, 生态足迹模型的应用不仅体现在从全球到国

收稿日期: 2011-10-13

* 武汉市社会科学基金资助项目“基于湿地生态建设模式的武汉市生态文明建设研究”(whsk10016)。

作者简介: 郭玲霞(1984-), 女, 博士研究生; 研究方向: 土地评价及生态安全。E-mail: purplelily66@yahoo. cn

家到区域等的时空尺度上^[8-10],而且更体现在不同领域的应用上,如:中国木材进口^[11]、以色列谷物供给^[12]、棉花生产和消费^[13-14]、交通系统的评估^[15]、相关产品生命周期的评估^[16]等诸多领域的应用。此外,还有对生态足迹变化的原因分析^[17],利用生态足迹指标进行基于消费方法的环境库兹涅兹曲线研究等^[18]。

对生态足迹模型的改进研究主要有:利用能量净初级生产量计算生态足迹^[19]、基于生态足迹和能值分析集成法对秘鲁的可持续性研究^[20]、利用自我组织图的国家生态足迹的聚类分析^[21]、利用生产土地利用矩阵计算国际贸易中嵌入式生态足迹^[22]、使用热力学方法的改进生态足迹评估方法评估不可更新资源的消费量等^[23]。

纵观国内外生态足迹研究的进展,由于传统生态足迹模型存在一些缺陷,目前对生态足迹的应用已经拓展为对改进模型的应用,而基于能值改进的研究尚较少^[20,24-27]。

二、研究区概况与数据来源

1. 研究区概况

2008年末,武汉城市圈总面积(5.81万km²)占湖北省总面积(18.59万km²)的31.25%,是湖北省人口、城市最为密集的地区;总人口(2994.30万)占全省人口(5711.00万)的52.43%;GDP(6972.10亿元)占全省GDP(11330.38亿元)的61.50%^[28]。武汉城市圈是湖北省产业和生产要素最密集、最具活力的地区,但工业结构偏重(45.50%),高强度开发消耗了大量资源。此外,圈内湖泊湿地萎缩严重,省控湖泊出现富营养化趋势;大气环境质量难以稳定达到二级标准;水土流失、地质灾害等生态环境问题频发;局部地区污染严重。武汉城市圈环境形势严峻,已经成为制约未来发展的重要因素^[29]。

武汉市是湖北省省会,位于113°41'-115°05' E, 29°58'-31°22' N,境内以平原为主,中部散列东西向残丘。有冬温夏热、四季分明,降水丰沛的气候特点。境内河湖众多,有长江和汉江、东荆河、滢水河等10条长江支流,且有“百湖之城”之美誉。2008年武汉总面积(8494km²)、总人口(833.24万人)与GDP(3960.08亿元)分别占武汉城市圈的1.46%、28.06%与56.80%。武汉市不仅是湖北省省会,又是武汉城市圈的核心城市,华中地区最大都

市和中心城市,中国重要的工业基地和综合交通枢纽。据有关资料,2008年,在全国273个城市中,武汉GDP居第15位,绿色GDP居第26位。武汉第二产业中重化工业比重达73%,比全国平均水平高6个百分点。武汉全境面积达8494km²,为武汉城市圈内的特大城市。2009年,武汉市常住人口910万,其中城镇人口537万,人口密度达1071.3人/km²,人地矛盾突出,资源环境破坏较大,水域污染严重,加之气候变化异常,研究武汉市可持续发展能力对于武汉市健康发展具有重要意义,而采用能值改进的生态足迹模型方法进行可持续性分析具有一定的创新价值,同时可为圈内其他城市的可持续发展分析提供一定参考^[29]。

2. 数据来源

本研究中,社会、经济、人口、资源与环境的原始数据均来自于《武汉市统计年鉴(2009年)》;传统生态足迹模型中所用的产量因子及均衡因子参考William等人提出的能值;在计算生物资源账户生态足迹时,采用FAO1993年公布的有关生物资源的世界平均产量;计算能源资源账户所使用的全球平均能源足迹采用Wackernagel等确定的值^[6];产量因子取中国的平均值^[30];均衡因子的选取采用Wackernagel等的研究成果^[5];耕地、林地、草地、化石燃料用地、水域及建筑用地的均衡因子分别为2.80、1.10、0.50、1.10、0.20、2.80,改进模型中的能值转换等数据具体可参考张延安、张芳怡、王闰平等^[25-26,31]的研究。

三、研究方法

1. 传统生态足迹模型法

生态足迹模型的计算可分为生态足迹计算和生态承载力计算两部分。

(1)生态足迹的计算。

$$E_F = N \times r_j \times \sum_{i=1}^n aa_i = N \times r_j \times \sum_{i=1}^n (c_i / p_i) \quad (1)$$

式(1)中: E_F 为总的生态足迹; N 为人口数; aa_i 为人均第*i*种消费商品折算的生物生产面积; c_i 为*i*种商品的人均年消费量; p_i 为*i*种消费商品的年(全球)平均土地生产力; i 为消费商品和投入的类型; r_j 为对应于各土地利用类型的均衡因子; j 为生物生产性土地类型。

(2)生态承载力的计算。

$$E_C = N \times e_c = N \times \sum_{j=1}^n a_j \times r_j \times y_j \quad (2)$$

式(2)中: E_C 为总的生态承载力; N 为人口数; e_c 为人均生态承载力; a_j 为人均生物生产性面积; r_j 为均衡因子; y_j 为产量因子; j 为生物生产性土地类型。产量因子是一个国家或地区某类生物生产土地的平均生产力与同类土地的世界平均生产力的比率。

2. 基于能值改进的生态足迹模型法

(1)生态足迹的计算。

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

式(3)中: E_f 为人均生态足迹; i 为消费项目类型; a_i 为第*i*种资源的人均生态足迹; c_i 为第*i*种资源的人均能值; p_2 为区域能值密度(区域总能值/区域土地面积)。

(2)生态承载力的计算。自然资源可分为可更新资源和不可更新资源,由于不可更新资源的消耗速度要快于其再生速度,只有利用可更新资源生态承载力才具有可持续性,因此,计算生态承载力时只考虑可更新资源的能值,计算公式为:

$$E_c = e / p_1 \quad (4)$$

式(4)中: E_c 为人均生态承载力, e 为可更新资源, p_1 为全球平均能值密度。在计算生态承载力时,主要考虑以下可更新资源的能值,太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能、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。

四、结果与分析

1. 基于传统生态足迹模型的分析

(1)基于传统生态足迹模型的武汉市生态足迹分析。生态足迹计算主要由3个部分组成:即生物资源足迹、能源资源足迹以及贸易调整部分。由于缺乏武汉市贸易资料,且考虑到进出口部分在一定程度上可以相互抵消,故只考虑生物资源足迹和能源资源足迹。

生物资源生态足迹的计算。生物资源主要考虑农产品、动物产品、水产品、水果、林产品等5类,生物资源产品由农用地,具体为耕地、草地、林地、水域等4类用地产出。计算得武汉市2008年生物资源账户,见表1。

表1 武汉市2008年生物资源账户

生物资源类型	全球平均产量/(kg/hm ²)	消费量(产量)/万t	总的生态足迹/hm ²	人均生态足迹/hm ²	土地类型
农产品					
小麦	744	61 180	2.23×10 ⁴	2.68×10 ³	耕地
蚕豌豆	1 856	14 838	7.99×10 ³	9.60×10 ⁴	耕地
薯类	12 607	46 341	3.68×10 ³	4.41×10 ⁴	耕地
稻谷	2 744	1 018 465	3.71×10 ⁵	4.45×10 ²	耕地
玉米	2 744	114 489	4.17×10 ⁴	5.01×10 ³	耕地
大豆	1 856	26 244	1.41×10 ⁴	1.70×10 ³	耕地
其他杂粮	2 744	15 826	5.77×10 ³	6.92×10 ⁴	耕地
棉花	1 000	35 269	3.53×10 ⁴	4.23×10 ³	耕地
油料	1 856	184 545	9.94×10 ⁴	1.19×10 ²	耕地
麻类	1 500	4 134	2.76×10 ³	3.31×10 ⁴	耕地
糖料	18 000	71 734	3.99×10 ³	4.78×10 ⁴	耕地
烟叶	1 548	228	1.47×10 ²	1.77×10 ⁶	耕地
蔬菜	18 000	5 849 145	3.25×10 ⁵	3.90×10 ²	耕地
瓜类	18 000	493 130	2.74×10 ⁴	3.29×10 ³	耕地
动物产品					
牛奶	502	117 611	2.34×10 ⁵	2.81×10 ⁻²	草地
蜂蜜	50	1 305	2.61×10 ⁴	3.13×10 ⁻³	草地
禽蛋	400	138 534	3.46×10 ⁵	4.16×10 ⁻²	草地
猪肉	74	193 560	2.62×10 ⁶	3.14×10 ⁻¹	草地
牛肉	33	12 126	3.67×10 ⁵	4.41×10 ⁻²	草地
羊肉	33	946	2.87×10 ⁴	3.44×10 ⁻³	草地
家禽	400	78 168	1.95×10 ⁵	2.35×10 ⁻²	草地
水产品	29	407 867	1.41×10 ⁷	1.69	水域
水果	3 500	76 707	2.19×10 ⁴	2.12	林地
林产品					
板栗	3 000	2 554	8.51×10 ²	1.02×10 ⁻⁴	林地
香菇	3 000	87	2.90×10 ¹	3.48×10 ⁻⁶	林地
白木耳	3 000	11	3.67	4.40×10 ⁻⁷	林地
黑木耳	3 000	26	8.67	1.04×10 ⁻⁶	林地
油桐籽	1 600	63	3.94×10 ¹	4.73×10 ⁻⁶	林地
茶叶	566	1 733	3.06×10 ³	3.68×10 ⁻⁴	林地
油茶籽	1 600	321	2.01×10 ²	2.41×10 ⁻⁵	林地
木材	1.99	17 377	8.73×10 ⁶	1.05	林地
合计				3.17	

能源资源生态足迹的计算。能源资源主要考虑煤炭、焦炭、原油、燃料油、汽油、柴油、煤油等几种,是由化石燃料用地和建筑用地产出,计算得出武汉市 2008 年能源资源账户,见表 2。

(2)基于传统生态足迹模型的武汉市生态承载力分析。武汉市生态承载力的计算主要包括耕地、林

地、草地、水域和建筑用地五大类的计算,依据惯例环境容量计算中 CO_2 的吸收一般不做计算。根据联合国的规定,还应该减去生物多样性保护的 12% 的均衡面积才是武汉市 2008 年的生态承载力。然后,将生态足迹需求与生态承载力二者分类汇总就可得到武汉市 2008 年的生态赤字情况,见表 3。

表 2 武汉市 2008 年能源资源账户

能源资源类型	全球平均能源足迹/(GJ/hm ²)	折算系数/(GJ/t)	消费量(产量)/万 t	人均生态足迹/hm ²	土地类型
煤炭	55	20.9	1.79×10^3	8.19×10^{-5}	化石燃料土地
焦炭	55	28.5	5.06×10^2	3.15×10^{-5}	化石燃料土地
原油	93	41.9	5.69×10^2	3.08×10^{-5}	化石燃料土地
燃料油	71	50.2	2.73×10^1	2.32×10^{-6}	化石燃料土地
汽油	93	43.1	8.26	4.60×10^{-7}	化石燃料土地
柴油	93	42.7	1.45×10^1	7.98×10^{-7}	化石燃料土地
煤油	93	43.1	4.00×10^{-1}	2.23×10^{-8}	化石燃料土地
炼厂干气	71	46.1	2.85×10^1	2.22×10^{-5}	化石燃料土地
液化石油气	71	50.2	6.60×10^{-1}	5.60×10^{-8}	化石燃料土地
焦炉煤气	93	18.0	1.40×10^2	3.26×10^{-5}	化石燃料土地
电力	1 000	11.8	2.21×10^2	3.15×10^{-7}	建筑用地
热力	1 000	29.3	1.00×10^2	3.52×10^{-7}	建筑用地

表 3 武汉市 2008 年生态足迹计算结果

生态足迹的需求				生态足迹的供给				
土地类型	人均面积/hm ²	均衡因子	均衡面积/hm ²	土地类型	人均面积/hm ²	产出因子	均衡因子	均衡面积/hm ²
耕地	1.15×10^{-1}	2.8	3.23×10^{-1}	耕地	4.06×10^{-2}	1.66	2.8	1.89×10^{-1}
草地	4.58×10^{-1}	1.1	5.03×10^{-1}	草地	3.42×10^{-5}	0.19	0.5	3.25×10^{-6}
林地	3.17	0.5	1.58	林地	1.22×10^{-2}	0.91	1.1	1.22×10^{-2}
水域	1.69	0.2	3.38×10^{-1}	水域	2.42×10^{-2}	1	0.2	4.84×10^{-3}
化石燃料	1.53×10^{-4}	1.1	1.69×10^{-4}	CO ₂ 吸收	0	0	1.1	0
建筑用地	6.70×10^{-7}	2.8	1.87×10^{-6}	建筑用地	1.78×10^{-2}	1.66	2.8	8.27×10^{-2}
总需求足迹			2.75	总供给面积			2.88 × 10 ⁻¹	
			生物多样性面积 12%				3.46 × 10 ⁻²	
			人均生态承载力				2.54 × 10 ⁻¹	
			人均生态赤字				2.50	

根据表 3 的计算结果,2008 年武汉市人均生态足迹是 2.75 hm²,远远大于人均生态承载力 0.25 hm²,人均生态赤字达 2.50 hm²,说明武汉市呈不可持续发展。而从表中还可看出,各用地类型的生态盈余顺序为:林地>草地>水域>耕地>化石燃料用地>建筑用地,并且从生态足迹的供给看以耕地为最多,草地为最少,说明生态足迹供给对耕地的依赖性较强。而从需求看,以林地为主,然后是草地和水域,其次才是耕地,这反映了武汉市人们的消费

结构,并且也一定程度上说明武汉市丰富的水资源对人们食物结构消费倾向的影响。

2. 基于能值改进的生态足迹模型的分析

(1)基于能值改进的生态足迹模型的武汉市生态足迹分析。根据式(3),计算出武汉市 2008 年生态足迹,见表 4。

(2)基于能值改进的生态足迹模型的武汉市生态承载力分析。根据式(4),计算出武汉市 2008 年生态承载力,见表 5。

表 4 武汉市 2008 年生态足迹计算

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)	生物生产土地类型
生态足迹					2.55	
生物资源						
农产品						
小麦	9.61×10 ¹⁴	3.55×10 ⁵	3.41×10 ²⁰	4.09×10 ¹³	1.50×10 ⁻⁶	耕地
蚕豌豆	2.49×10 ¹⁴	4.00×10 ⁵	9.97×10 ¹⁹	1.20×10 ¹³	4.38×10 ⁻⁷	耕地
薯类	1.19×10 ¹⁴	1.80×10 ⁵	2.14×10 ¹⁹	2.57×10 ¹²	9.42×10 ⁻⁸	耕地
稻谷	4.27×10 ¹⁴	3.59×10 ⁴	1.53×10 ¹⁹	1.84×10 ¹²	6.74×10 ⁻⁸	耕地
玉米	1.89×10 ¹⁵	3.55×10 ⁵	6.71×10 ²⁰	8.05×10 ¹³	2.95×10 ⁻⁶	耕地
大豆	4.41×10 ¹⁴	4.00×10 ⁵	1.76×10 ²⁰	2.12×10 ¹³	7.75×10 ⁻⁷	耕地
其他杂粮	2.56×10 ¹⁴	2.20×10 ⁵	5.64×10 ¹⁹	6.77×10 ¹²	2.48×10 ⁻⁷	耕地
棉花	6.63×10 ¹⁴	1.36×10 ⁶	9.02×10 ²⁰	1.08×10 ¹⁴	3.96×10 ⁻⁶	耕地
油料	1.09×10 ¹⁴	9.20×10 ⁵	1.00×10 ²⁰	1.20×10 ¹³	4.40×10 ⁻⁷	耕地
麻类	6.74×10 ¹³	8.40×10 ⁴	5.66×10 ¹⁸	6.79×10 ¹¹	2.49×10 ⁻⁸	耕地
糖料	1.79×10 ¹⁴	8.49×10 ⁴	1.52×10 ¹⁹	1.83×10 ¹²	6.69×10 ⁻⁸	耕地
烟叶	5.47×10 ¹¹	2.00×10 ⁵	1.09×10 ¹⁷	1.31×10 ¹⁰	4.81×10 ⁻¹⁰	耕地
蔬菜	1.40×10 ¹⁶	8.60×10 ⁵	1.21×10 ²²	1.45×10 ¹⁵	5.31×10 ⁻⁵	耕地
瓜类	7.10×10 ¹⁴	1.10×10 ⁵	7.81×10 ¹⁹	9.38×10 ¹²	3.43×10 ⁻⁷	耕地
动物产品						
牛奶	7.14×10 ¹⁷	1.29×10 ⁶	9.21×10 ²³	1.11×10 ¹⁷	4.05×10 ⁻³	草地
蜂蜜	3.26×10 ¹²	8.49×10 ⁴	2.77×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁰	1.22×10 ⁻⁹	草地
禽蛋	7.02×10 ¹⁷	4.40×10 ⁶	3.09×10 ²⁴	3.71×10 ¹⁷	1.36×10 ⁻²	草地
猪肉	1.78×10 ¹⁸	3.36×10 ⁶	5.99×10 ²⁴	7.19×10 ¹⁷	2.63×10 ⁻²	草地
牛肉	1.12×10 ¹⁷	3.36×10 ⁶	3.75×10 ²³	4.50×10 ¹⁶	1.65×10 ⁻³	草地
羊肉	8.71×10 ¹⁵	3.36×10 ⁶	2.93×10 ²²	3.51×10 ¹⁵	1.29×10 ⁻⁴	草地
家禽	3.96×10 ¹⁴	3.36×10 ⁶	1.33×10 ²¹	1.60×10 ¹⁴	5.85×10 ⁻⁶	草地
水产品	1.64×10 ²⁰	3.35×10 ⁶	5.50×10 ²⁶	6.60×10 ¹⁹	2.42	水域
水果	4.94×10 ¹⁷	1.10×10 ⁵	5.43×10 ²²	6.52×10 ¹⁵	2.39×10 ⁻⁴	林地
林产品						
板栗	9.07×10 ¹²	1.20×10 ¹²	1.09×10 ²⁵	1.31×10 ¹⁸	4.78×10 ⁻²	林地
香菇	3.09×10 ¹¹	1.20×10 ¹²	3.71×10 ²³	4.45×10 ¹⁶	1.63×10 ⁻³	林地
白木耳	3.91×10 ¹⁰	1.20×10 ¹²	4.69×10 ²²	5.62×10 ¹⁵	2.06×10 ⁻⁴	林地
黑木耳	9.23×10 ¹⁰	1.20×10 ¹²	1.11×10 ²³	1.33×10 ¹⁶	4.87×10 ⁻⁴	林地
油桐籽	2.24×10 ¹¹	1.20×10 ¹²	2.68×10 ²³	3.22×10 ¹⁶	1.18×10 ⁻³	林地
茶叶	6.15×10 ¹²	1.20×10 ¹²	7.38×10 ²⁴	8.86×10 ¹⁷	3.25×10 ⁻²	林地
油茶籽	1.14×10 ¹²	1.20×10 ¹²	1.37×10 ²⁴	1.64×10 ¹⁷	6.01×10 ⁻³	林地
木材						林地
木材	2.73×10 ¹⁴	3.52×10 ⁴	9.60×10 ¹⁸	1.15×10 ¹²	4.22×10 ⁻⁸	林地
能源资源						
煤炭	3.76×10 ¹⁰	3.98×10 ⁴	1.50×10 ¹⁵	1.79×10 ⁸	6.57×10 ⁻¹²	化石燃料土地
焦炭	1.44×10 ¹⁰	3.98×10 ⁴	5.74×10 ¹⁴	6.89×10 ⁷	2.52×10 ⁻¹²	化石燃料土地
原油	2.38×10 ¹⁰	5.30×10 ⁴	1.26×10 ¹⁵	1.52×10 ⁸	5.55×10 ⁻¹²	化石燃料土地
燃料油	1.37×10 ⁹	5.30×10 ⁴	7.26×10 ¹³	8.71×10 ⁶	3.19×10 ⁻¹³	化石燃料土地
汽油	3.56×10 ⁸	5.30×10 ⁴	1.89×10 ¹³	2.27×10 ⁶	8.30×10 ⁻¹⁴	化石燃料土地
柴油	6.18×10 ⁸	5.30×10 ⁴	3.28×10 ¹³	3.93×10 ⁶	1.44×10 ⁻¹³	化石燃料土地
煤油	1.73×10 ⁷	5.30×10 ⁴	9.14×10 ¹¹	1.10×10 ⁵	4.02×10 ⁻¹⁵	化石燃料土地
炼厂干气	1.31×10 ⁹	5.30×10 ⁴	6.95×10 ¹³	8.34×10 ⁶	3.06×10 ⁻¹³	化石燃料土地
液化石油气	3.31×10 ⁷	5.30×10 ⁴	1.76×10 ¹²	2.11×10 ⁵	7.72×10 ⁻¹⁵	化石燃料土地
焦炉煤气	2.53×10 ⁹	5.30×10 ⁴	1.34×10 ¹⁴	1.61×10 ⁷	5.89×10 ⁻¹³	化石燃料土地
电力	2.62×10 ⁹	1.59×10 ⁵	4.17×10 ¹⁴	5.00×10 ⁷	1.83×10 ⁻¹²	建筑用地
外购热力	2.94×10 ⁹	1.59×10 ⁵	4.67×10 ¹⁴	5.60×10 ⁷	2.05×10 ⁻¹²	建筑用地

表 5 武汉市 2008 年生态承载力计算结果

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			2.33×10 ²⁵	2.80×10 ¹⁸	1.03×10 ⁻¹
太阳辐射能	4.83×10 ¹⁹	1	4.83×10 ¹⁹	5.80×10 ¹²	2.12×10 ⁻⁷
风能	1.53×10 ¹⁷	1 500	2.29×10 ²⁰	2.75×10 ¹³	1.01×10 ⁻⁶
雨水势能	2.63×10 ²¹	8 888	2.33×10 ²⁵	2.80×10 ¹⁸	1.03×10 ⁻¹
雨水化学能	4.22×10 ¹⁶	15 444	6.52×10 ²⁰	7.83×10 ¹³	2.87×10 ⁻⁶
地球旋转能	1.24×10 ¹⁶	29 000	3.60×10 ²⁰	4.31×10 ¹³	1.58×10 ⁻⁶

(3)结果分析。武汉市 2008 年人均生态足迹是 2.55 hm^2 (表 4), 而同年扣除 12% 的生物多样性面积后, 人均生态承载力为 0.09 hm^2 (表 4 和表 5), 因此可得: 2008 年武汉市生态足迹远超过生态承载力, 生态赤字达 2.46 hm^2 。武汉市对资源环境的利用方式为不可持续性的, 这与用传统生态足迹模型计算结果一致。各土地类型对生态足迹的贡献依次为: 水域 > 林地 > 草地 > 耕地 > 化石燃料用地 > 建筑用地。

五、结论与讨论

1. 结论

本文分别运用传统生态足迹模拟和基于能值改进的生态足迹模拟对武汉市资源环境的可持续发展水平进行了定量估算, 2 种方法得出的结论一致, 即武汉市人均生态足迹远远超过生态承载力, 处于不可持续发展状态。因此, 武汉市还应继续转变发展思路, 大力调整和优化产业结构, 要以循环经济为契机, 实现从传统“三高一低”向现代“三低一高”的突破。发展循环经济不仅需要各级政府、企业的自觉和自律, 更需要社会公众和各方面的积极参与。

2. 讨论

改进生态足迹模型由于是基于生态经济系统的能量流来计算生态足迹和承载力, 所以与传统生态足迹模型相比, 有它独特的优势, 尤其是在运用传统生态足迹模型计算时涉及到全球平均生产力、均衡因子、产量因子等几个参数的选取, 这些参数本身并不确切而且很不稳定, 而改进的模型所采用的能值转换率、能值密度等参数相对较稳定, 更能反映区域特征。所以, 基于能值改进的生态足迹模型计算结果的可信度更强, 更能准确反映区域可持续利用情况, 为决策者提供更真实可靠的信息。

参 考 文 献

- [1] 潘家华, 牛凤瑞, 魏后凯. 中国城市发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2009: 469.
- [2] 湖北省测绘局. 武汉城市圈地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009: 36.
- [3] 蒋依依, 王仰麟, 卜心国, 等. 国内外生态足迹模型应用的回顾与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 14-23.
- [4] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [5] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. Ecological footprint of nations[C]//Earth Council for the Rio+5 Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, Toronto, 1997.
- [6] 徐中民, 张志强, 程国栋. 生态经济学理论方法与应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 64-68.
- [7] 张勃, 郭玲霞. 张掖市生态足迹的社会经济驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 43-47.
- [8] JIA J S, ZHAO J Z, DENG H B, et al. Ecological footprint simulation and prediction by ARIMA model—A case study in Henan Province of China[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 538-544.
- [9] LI X M, XIAO R B, YUAN S H, et al. Urban total ecological footprint forecasting by using radial basis function neural network: a case study of Wuhan city, China[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 241-248.
- [10] FERNG J J. Applying input-output analysis to scenario analysis of ecological footprints[J]. Ecological Economics, 2009, 69(2): 345-354.
- [11] NIE Y, JI C Y, YANG H Q. The forest ecological footprint distribution of Chinese logimports[J]. Forest Policy and Economics, 2010, 12(3): 231-235.
- [12] KISSINGER M, DAN G. Place oriented ecological footprint analysis—The case of Israel's grain supply[J]. Ecological Economics, 2010, 69(8): 1639-1645.
- [13] CHAPAGAINA K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [14] HORNBERG A. Footprints in the cotton fields: the industrial revolution as time-space appropriation and environmental load displacement[J]. Ecological Economics, 2006, 59(1): 74-81.
- [15] ADJO A A, JOTIN K C, KHAYESI M. Using the sustainability footprint model to assess development impacts of transportation systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009, 43(4): 339-348.
- [16] MARK A J, STEFANIE H, ROLF F, et al. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products[J]. Ecological Economics, 2008, 64(4): 798-807.
- [17] ANDREW K J, THOMAS J B. The political-economic causes of change in the ecological footprints of nations, 1991—2001: a quantitative investigation[J]. Social Science Research, 2007, 36(2): 834-853.
- [18] MARCO B, GIANGIACOMO B, SILVANA D. A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator[J]. Ecological Economics, 2008, 65(3): 650-661.
- [19] RAUL S, FENI A, ENRIQUE O. Emery net primary production (ENPP) as basis for calculation of ecological footprint[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 475-483.
- [20] RAUL S, LUCAS P, FENI A, et al. Convergence of ecological footprint and emery analysis as a sustainability indicator of

- countries; peru as case study[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [21] MOHAMED M M. Clustering the ecological footprint of nations using Kohonen's self-organizing maps[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(4): 2747-2755.
- [22] DANIEL D M, MATHIS C W, JUSTIN A K, et al. Trading spaces: calculating embodied ecological footprints in international trade using a product land use matrix (PLUM)[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1938-1951.
- [23] HONG X N, RYOICHI Y. Modification of ecological footprint evaluation method to include non-renewable resource consumption using thermodynamic approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(4): 870-884.
- [24] CHEN B, CHEN G Q. Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied exergy——a case study of the Chinese society 1981—2001 [J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(2-3): 355-376.
- [25] 张延安, 郑昭佩, 张文岚. 基于能值改进的生态足迹模型在济南市的应用分析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(2): 134-138, 157.
- [26] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(4): 653-660.
- [27] 陈春锋, 王宏燕, 肖笃宁, 等. 基于传统生态足迹方法和能值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较[J]. *应用生态学报*, 2008(11): 2544-2549.
- [28] 张晓. 从中部主要城市群的比较分析中探究武汉城市圈发展战略——湖北省第二次经济普查分析[EB/OL]. (2010-07-08) [2011-10-15]. <http://jjpc2.stats-hb.gov.cn/pccg/ShowArticle.asp?ArticleID=3015>.
- [29] 刘志辉. 武汉经济社会发展报告(2009)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2009, 30.
- [30] 符国基. 海南生态省生态可持续发展定量研究——生态足迹方法的应用[J]. *农业现代化研究*, 2006, 27(1): 34-38.
- [31] 王闰平. 基于能值的山西省农业生态系统动态分析[D]. 长沙: 湖南农业大学经济管理学院, 2009.

Application of Ecological Footprint Model in “Two-oriented Society” City Based on Emergy Modification

——A Case Study in Wuhan City

GUO Ling-xia¹, GAO Gui-xian², HUANG Chao-xi¹

(1. *College of Land Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, 430070;*

2. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, 430070)

Abstract This paper calculates ecological footprint and ecological bearing capacity of Wuhan city in 2008 by using traditional model of ecological footprint and energy modified model. Then this paper compares the results based on the above calculations from two models. The result shows that two calculations both indicate that ecological footprint of Wuhan in 2008 exceeded its ecological bearing capacity, which indicates that condition of sustainable development in Wuhan is not so good. Therefore, this paper points out that developing thinking should be changed, industrial structure should be vigorously modified and optimized in Wuhan. Wuhan should also take advantage of circular economy and make a breakthrough from traditional “three highs and one low” to modern “three lows and one high”.

Key words ecological footprint; ecological bearing capacity; emergy analysis; “Two-Oriented Society” city; sustainable development

(责任编辑:陈万红)