

基于能值定理的生态足迹模型修正研究

——以长沙市为例

曾晓霞¹,刘云国^{1*},黄磊²,胡新将¹,曾光明¹,谭小飞¹,汤慧¹,樊扬帆¹ (1.湖南大学环境科学与工程学院,环境生物与控制教育部重点实验室,湖南长沙 410082; 2.中国科学院自然科学史研究所,中国科学院大学,北京 100190)

摘要: 能值生态足迹模型是定量分析区域可持续发展的重要方法,然而其计算未考虑到经济发展和科技进步对生态承载力的影响,得出的结论往往具有一定的误差.因此,本文引入社会经济虚拟承载力账户对该模型进行修正,并以长沙市为例进行验证.结果表明:通过相关性对比分析,修正模型可突破传统模型具有生态偏向的弱可持续性评价局限,其计算结果更加科学合理.基于修正模型,2000~2011年长沙市的生态承载力变化不大,年均值为 $2.31\text{hm}^2/\text{人}$,而生态足迹呈现快速增长趋势,年均值为 $2.44\text{hm}^2/\text{人}$.这导致该地区出现逐年加剧的生态超载现象,年人均生态赤字为 $0.13\text{hm}^2/\text{人}$.通过多元统计分析方法得出,农牧业生产和重工业能耗的压力大是造成其生态赤字的主要原因.

关键词: 能值; 修正; 可持续发展; 长沙

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)01-0312-09

The modified model of the emergetic ecological footprint: a case study of Changsha City. ZENG Xiao-xia¹, LIU Yun-guo^{1*}, HUANG Lei², HU Xin-jiang¹, ZENG Guang-ming¹, TAN Xiao-fei¹, TANG Hui¹, FAN Yang-fan¹ (1.Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China). *China Environmental Science*, 2015,35(1): 312~320

Abstract: The emergetic ecological footprint model has been considered to be a valuable and significant method for quantitatively analyzing regional sustainable development. Nevertheless, the deviated results are affected by the ecological carrying capacity, which is not accounted with the factors of economy, science and technology progress. This research introduced the virtual accounts of socio-economic development to modify the model, and took Changsha City as an example for validity check. The results indicated that the modified model, which paid more attention to the elements of eco-economic system but only the ecological component, were more reliable, accurate and reasonable than the original model. Based on the modified emergetic ecological footprint model, the annual ecological carrying capacities of Changsha City were without significant change from 2000 to 2011, with the average value of $2.31\text{hm}^2/\text{per capita}$. While the ecological footprint, which average value was $2.44\text{hm}^2/\text{per capita}$, exhibited a trend of rapid growth and caused a gradually increase of the ecological deficit with the average value of $0.13\text{hm}^2/\text{per capita}$. The giant pressures from the agricultural activity and the heavy industry with high-level energy consumption were considered to be the principal factors, which prompted the growth of the local ecological deficit.

Key words: energy; modify; sustainable development; Changsha City

生态安全作为保障国家和社会稳定的重要基础,与其相关的研究已成为近年来学术界的研究热点.生态足迹模型的基本思想是通过计算人类所消耗的资源量与区域所能提供的资源

收稿日期: 2014-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271332);湖南省科技计划项目(2012SK2021)

* 责任作者, 教授, liuyunguo@hnu.edu.cn

量之间的差值来评价区域发展的生态安全程度^[1-2]。它将人类消耗的自然资源和排放的废弃物转化为相应的生物生产性土地面积与现存的土地面积比较来衡量人类社会的可持续发展状况^[3-4]。其中,能值生态足迹模型是生态足迹研究的一种重要改进方法^[5-6],其将能值分析理论^[7-8]和传统生态足迹模型^[9]相结合,将各种能量流换算成生物生产性土地面积,弥补了传统生态足迹模型在土地类型功能性划分单一,温室气体考虑不全面,因子选取口径不统一等方面的缺点。因有较完善的科学理论基础、简明的指标体系、直观明了的结果,能有效的量化人类社会与自然环境之间的相互关系,能值生态足迹模型迅速成为了定量分析区域可持续发展状况的热门方法^[10-11]。从 20 世纪末开始,陆续有国内外学者将该模型运用于城市尺度^[12-14],区域尺度^[5,15-16]以及国家尺度^[17-18]的生态可持续发展研究当中。

随着在实践中的运用,能值生态足迹模型得到了不同程度的改进。如,生态承载力账户及生态足迹账户的指标体系得到了细化分类,生态承载力的运算提高了对生物多样性保护需求的比重,引入净初级生产力的概念为能值转换率的计算方法提供了新方向等^[17-19]。然而,能值生态足迹模型存在的生态偏向性问题仍未能得到有效的解决^[20]。由于生态足迹模型侧重于衡量生态的可持续程度,强调人类发展对环境系统的影响及其可持续性,其承载力计算基于自然资源的多寡而往往忽略了经济、社会、技术等方面带来的影响。随着人类社会的文明进步及科技发展,资源的利用效率和利用方式得到了集约化的转变,为人类所利用的可更新资源范围不断扩展,单位资源或生态质量能带来更多的经济产出。因此,生态承载力的计算如果忽略经济发展和科技进步的因素,往往会导致生态盈亏的结论与现实状况不符。

近年来,加入经济和科技影响作用的能值生态足迹模型修正研究引起了一些国内学者的重视。王健民等^[21]提出生态足迹模型研究需要反映出社会经济科学技术的反馈力和动态性;赵志强

等^[22]将人力资源纳入了生态足迹模型的可持续评价范畴;顾康康等^[23]在生态足迹模型研究中提出了社会经济系统发展指数的概念。然而,目前结合经济科技因素的能值生态承载力修正研究仍处于起步阶段,如何将该因素的作用纳入到生态承载力指标体系,是其急需探讨和解决的关键问题。基于此现状,本文从自然资源和经济科技水平的角度出发,引入自然资源生态承载力和社会经济虚拟承载力两类账户,扩充和完善能值生态承载力的发展内涵,为能值生态足迹模型评价体系的修正研究及区域生态经济系统的可持续性综合评价提供一种新思路。同时,本文以湘江城市群中的典型城市——长沙市为例对该改进方法进行验证,探讨修正模型耦合的效果,并结合生态评价分析指标和相关统计分析方法来评估长沙市的生态安全状况,为同类地区的可持续发展研究提供科学参考。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

长沙处于从丘陵向平原的过渡地带,位于湖南省东部偏北,是湘江城市群(包括岳阳、株洲、湘潭、长沙、衡阳、永州等市)的核心城市。全市土地面积 1.18 万 km^2 ,其中城区面积 556 km^2 。城区三面环水,河网密布,河流大都属湘江水系。湘江流经长沙市的常年径流量年均达 692.50 亿 m^3 。气候属于亚热带季风气候,降水充沛,雨热同期,四季分明,年平均气温 17.2 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤以红壤、水稻土为主。长沙市综合经济实力在湘江城市群乃至我国中部城市中均名列前茅,主导产业以工业机械、生物医药、新材料及汽车零部件为主,重工业对规模工业增长的贡献率较高,达到 70%以上。

1.2 数据来源

本文基础数据的获取采用查阅与分析相关统计资料的方法,并通过实地调查,补充和核对部分数据资料。其中相关统计资料包括 2000~2011 年的《长沙统计年鉴》、《湖南统计年鉴》、《湖南年鉴》、《湖南经济社会发展 60 年(1949-2009)》及相关的社会经济统计年鉴及报表等。

1.3 能值生态足迹修正模型的计算方法

1.3.1 加入社会经济虚拟承载力账户的生态承载力修正计算 自然资源的生态承载力账户是自然界的可更新资源能值的叠加计算.其包含的可更新能源有太阳辐射能,风能,雨水化学能,雨水势能,地球旋转能以及 3%表层土壤有机能等 6 种.为避免重复计算,根据能值理论,同一性质的能量投入只取其中的最大值^[4,24].如风能、雨水化学能和雨水势能都是太阳光的转化形式,选其中数值最大的一项代入总能值中.因此,研究地区获得的能值即由太阳辐射能、地球旋转能以及表层土壤有机能 3 种类型组成.计算公式为:

$$EC_n = \frac{E}{P_1 \cdot N} \quad (1)$$

$$E = \sum_{i=1}^n e_i \quad (2)$$

式中: EC_n 为人均自然资源生态承载力账户, hm^2 /人; E 为可更新资源的能值, Sej ; P_1 为全球平均能值密度,数值为 $3.1 \times 10^{14} Sej/hm^{2[11,17,19]}$; N 为人口数量; e_i 为第 i 种同类可更新资源的最大值, Sej .

不同阶段的社会经济模式对自然界物资和能量的开发和挖掘水平不同.因此,为综合考虑社会经济系统对生态承载力的影响,在计算中引入社会经济虚拟承载力账户对生态承载力进行修正.计算公式为:

$$EC_e = \frac{t_e \cdot \gamma \cdot (V_t + V_a + V_s)}{N \cdot P_1} \quad (3)$$

$$t_e = \frac{E}{V_g} \quad (4)$$

式中: EC_e 为人均社会经济虚拟承载力账户(hm^2 /人); t_e 为能值-资本转换率^[25]; V_t 为高新技术产值因子,代表技术水平发展的变化情况; V_a 为固定资产投资能力因子,代表经济发展能力的变化情况; V_s 为劳动力资源因子,代表社会人力资源规模的变化情况; V_g 为区域的国内生产总值; γ 为以某年份作为基期的生产价格指数,本文以 2011 年为基期.

因此,修正后的人均生态承载力即由人均自然资源生态承载力账户与人均社会经济虚拟承

载力账户共同构成.计算公式为:

$$EC = EC_n + EC_e \quad (5)$$

式中: EC 为人均生态承载力, hm^2 /人.

1.3.2 生态足迹计算 由于本地生产的产品无论是否被本地消费,均消耗了本地的生态资源,因此本文生态足迹账户的计算从区域的生产角度出发,用地区的生产量来代替消费量.账户分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地及化石能源用地等 6 种生物生产性土地类型.首先,计算区域能值密度:

$$P_2 = \frac{U}{S} \quad (6)$$

式中: P_2 为区域能值密度, Sej/hm^2 ; U 为区域的自然资源能值总量, Sej ; S 为区域面积, hm^2 .

然后引入太阳能值转换率^[25],即单位能量或物质中所含的太阳能值之量.通过资源项目的能量转换率计算其所包含的能量,将太阳能值转换率乘以给定项目的能量,即可将各项目给定的能量换算为太阳能值.区域各项目的太阳能值除以区域总人口,则为各项目的人均太阳能值.

$$C_i = \frac{m_i \cdot T_i}{N} \quad (7)$$

式中: C_i 为第 i 种资源的人均太阳能值, Sej /人; m_i 为第 i 种可更新资源所包含的能量值, J ^[25]; T_i 为第 i 种可更新资源的太阳能值转换率, Sej/J 或 Sej/g ^[24-25].

最后将各项目的人均太阳能值换算成对应的生物生产性土地面积.计算公式为:

$$EF = \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n (C_i / P_2) \quad (8)$$

式中: EF 为人均生态足迹, hm^2 /人; a_i 为第 i 种资源的人均生态足迹, hm^2 /人.

1.3.3 生态盈亏 将各项目的人均生态足迹汇总,与人均生态承载力进行比较,来衡量研究地区的可持续发展情况.若人均生态足迹大于人均生态承载力,则该地区存在生态赤字;反之,则该地区存在生态盈余.计算公式为:

$$EB = EC - EF \quad (9)$$

式中: EB 为人均生态赤字或生态盈余, hm^2 /人.

1.4 生态足迹评价指标

1.4.1 生态差额指数 生态差额指数是表达区域环境生态可持续状况的常用指标,被广泛的运用于区域生态安全状况的评价及比较当中^[3,26]。该指数介于 0 到 1 之间,当其为 0.5 时,说明生态承载力等于生态足迹,即区域能够提供的可更新资源量与人类从中实际获取的资源量相等,两者处于平衡状态,是可持续发展与不可持续发展的临界点;当其大于 0.5 时,则区域处于生态可持续发展状态,且该值越接近于 1 则区域生态可持续性程度越高;当其小于 0.5 时,则区域处于生态不可可持续发展状态,且该值越接近于 0 则区域生态不可持续性程度越高。计算公式为:

$$EGI = \frac{EC}{EC + EF} \quad (10)$$

式中:EGI 为生态差额指数。

1.4.2 生态多样性指数 生态多样性指数用于衡量生态经济系统中生态足迹的分配情况。由两部分组成,一是丰裕度,即不同生物生产性土地类型利用的数量,二是公平度,即测量生态足迹的分配状况。对给定系统组分的生态经济来说,生态足迹的分配越接近平等,生态多样性越高^[27]。计算公式为:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (11)$$

式中:H 是生态多样性指数; P_i 为第 i 类生物生产性土地的生态足迹在总生态足迹中的比例。

1.4.3 万元 GDP 生态足迹指数 万元 GDP 生态足迹是指产生每一万元 GDP 所占用的生态足迹。该指标一方面可反映资源利用效率,一方面也可表征各地在资源利用效率上的差异^[28]。万元 GDP 生态足迹越高说明资源利用率越小,反之,则资源的利用率越大。计算公式为:

$$GE = \frac{N \cdot EF}{V_g} \quad (12)$$

式中:GE 为万元 GDP 生态足迹指数。

1.4.4 发展能力指数 将生态足迹中各类型的生物生产性土地面积作为测算生态经济系统多样性的指标,并采用 Ulanowicz 发展能力公式^[27],分析区域生态经济系统的可持续发展能力,即

$$C = EF \cdot \left(-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i\right) \quad (13)$$

式中:C 为发展能力指数。

1.5 生态足迹的驱动力分析

生态足迹的变化,除了与自然资源的优劣,多寡有关之外,与当地的自然资源管理,人口数量,社会经济,技术水平等社会经济因素亦密切相关^[29]。本文选取人口规模,GDP,固定投资/GDP,三次产业占 GDP 的比例,重工业率,家庭恩格尔系数,财政收入/GDP,城乡居民实际收入比,城镇率,进出口总额等 12 项社会经济指标^[29-30],量化区域社会经济对本地生态足迹的驱动作用。

首先,采用主成分分析法将选取的多个自变量组合成少数且相互独立的能充分反映总体信息的指标,以避免指标间由于多元共线性而无法得出正确结论。然后,运用多元回归模型的向后剔除法,将相关系数较大的主成分因子与生态足迹时间序列进行多元线性回归建模分析,淘汰 $\text{sig} > 0.1$ 的指标,找出影响本地区生态足迹变化的关键社会经济因素。主成分分析与多元线性回归分析由 SPSS 18 中的相应功能完成。

2 结果与讨论

2.1 基于能值生态足迹修正模型的长沙市生态安全状况分析

根据能值生态足迹修正模型,长沙市各类生态承载力的主要计算结果见表 1(以 2011 年为例)。从图 1 可见,2000~2011 年间长沙市的生态承载力变化幅度较小,人均生态承载力在 2.01~2.70 hm^2 /人之间,年均值为 2.31 hm^2 /人。其中,自然资源生态承载力账户(原生态承载力)在年均值 0.89 hm^2 /人附近上下波动。社会经济虚拟承载力账户对长沙市年人均生态承载力的贡献高于自然资源账户,并呈现上升趋势,其贡献率从 2000 年的 70.05%提高到了 2011 年的 75.90%。这从一方面说明,自然界的能值是一定的,生态承载力的提升主要依靠科技力量对自然资源潜能的挖掘和开发。然而,虽然社会经济虚拟承载力账户的加入修正了原有生态承载力的局限性,修正后

的生态承载力较原生态承载力有了一定的提高,但长沙市的生态承载力在湘江城市群中仍处于中低水平(图 2),这与其人口较多,土壤肥力较差,林地面积相对不足,区域面积较小等因素有关。

长沙市的生态足迹呈现波浪式快速上升趋势,最小值和最大值分别为 2002 年的 1.89hm²/人

和 2011 年的 3.13hm²/人,年人均生态足迹为 2.44hm²/人.其中,草地的年人均生态足迹所占比重最大,为总生态足迹的 64.53%;其次是耕地和石化能源用地,分别占比 13.71%和 13.51%;林地的比重最小,为 0.86%.长沙市各类生态足迹的主要计算结果见表 2(以 2011 年为例)。

表 1 基于能值生态足迹修正模型的长沙市生态承载力计算结果(2011 年)

Tabel 1 The calculation result of the ecological carrying capacity in Changsha City based on the modified emergetic ecological footprint model (the year of 2011)

账户	项目	原始数据 (J 或亿元)	太阳能值转换率 (Sej/J 或 Sej/亿元)	太阳能值 (Sej)	人均能值 (Sej/人)	人均生态承载力 (hm ² /人)
自然资源生态承载力账户(EC _n)	太阳辐射能(n ₁)	1.02×10 ²⁰	1	1.02×10 ²⁰	1.44×10 ¹³	0.05
	风能(n ₂)	9.17×10 ¹⁶	1.50×10 ³	1.38×10 ²⁰	1.94×10 ¹³	0.06
	雨水势能(n ₃)	3.89×10 ¹⁶	8.89×10 ³	3.46×10 ²⁰	4.884×10 ¹³	0.16
	雨水化学能(n ₄)	6.45×10 ¹⁶	1.54×10 ⁴	9.97×10 ²⁰	1.41×10 ¹⁴	0.45
	地球转动能(n ₅)	1.87×10 ¹⁶	2.90×10 ⁴	5.43×10 ²⁰	7.66×10 ¹³	0.25
	3%表土能(n ₆)	9.65×10 ¹⁵	6.25×10 ⁴	6.03×10 ²⁰	8.51×10 ¹³	0.27
社会经济虚拟承载力账户(EC _s)	高新技术产业值(n ₇)	3.88×10 ³				
	固定资产投资(n ₈)	3.63×10 ³	3.81×10 ¹⁷	4.07×10 ²¹	5.74×10 ¹⁴	1.85
	劳动力资源(n ₉)	3.16×10 ³				
合计(EC)			6.21×10 ²¹	8.76×10 ¹⁴	2.70	

注:自然资源生态承载力账户中各可更新资源项目的太阳能值转换率参考文献[24-25],社会经济虚拟承载力账户的能值转换率为该年份的能值-资本转换率^[25];为避免重复计算,根据能值理论,同一性质的能量投入只取其中的最大值^[4,24];根据生态足迹定理,所得的自然资源生态承载力应扣除12%的生物多样性保护需求,从而得到实际可利用的人均自然资源生态承载力,因此根据上表可知 EC_n=0.88×(n₁+n₃+n₆), EC_s=n₇+n₈+n₉, EC=EC_n+EC_s;—为此项无数据

表 2 长沙市的生态足迹计算结果(2011 年)

Tabel 2 The calculation result of the ecological footprint in Changsha City (the year of 2011)

项目	原始数据 (J)	太阳能值转换率 (Sej/J)	太阳能值 (Sej)	生态足迹 (hm ²)	人均生态足迹 (hm ² /人)	土地类型	
生物资源	粮食	3.26×10 ¹⁶	8.30×10 ⁴	2.70×10 ²¹	1.68×10 ⁶	耕地	
	豆类	3.22×10 ¹⁴	6.90×10 ⁵	2.22×10 ²⁰	1.39×10 ⁵	耕地	
	薯类	3.04×10 ¹⁴	2.70×10 ³	8.21×10 ¹⁷	5.11×10 ²	耕地	
	油料	3.06×10 ¹⁵	6.90×10 ⁵	2.11×10 ²¹	1.3×10 ⁶	耕地	
	棉花	1.95×10 ¹³	8.60×10 ⁵	1.68×10 ¹⁹	1.05×10 ⁴	耕地	
	蔬菜	1.00×10 ¹⁶	2.70×10 ⁴	2.70×10 ²⁰	1.68×10 ⁵	耕地	
	肉类	1.06×10 ¹⁶	1.70×10 ⁶	1.80×10 ²²	1.12×10 ⁷	草地	
	牛奶	1.89×10 ¹³	1.70×10 ⁶	3.20×10 ¹⁹	2.00×10 ⁴	草地	
	茶叶	4.55×10 ¹⁴	2.00×10 ⁵	9.09×10 ¹⁹	5.67×10 ⁴	林地	
	水果	2.93×10 ¹⁴	5.30×10 ⁴	1.55×10 ¹⁹	9.66×10 ³	林地	
	林产品	3.29×10 ¹⁵	4.40×10 ⁴	1.45×10 ²⁰	9.01×10 ⁴	林地	
	水产品	5.89×10 ¹⁴	2.00×10 ⁶	1.18×10 ²¹	7.34×10 ⁵	水域	
	能源资源	原煤	1.63×10 ¹⁷	3.98×10 ⁴	6.47×10 ²¹	4.03×10 ⁶	石化能源用地
		发电量	2.76×10 ¹⁶	1.59×10 ⁵	4.39×10 ²¹	2.73×10 ⁶	建筑用地
总计					3.13		

注:长沙市的能值消耗按以上6种生物生产性土地类型划分;各项目的太阳能值转换率参考文献[10-11,17-19,25]

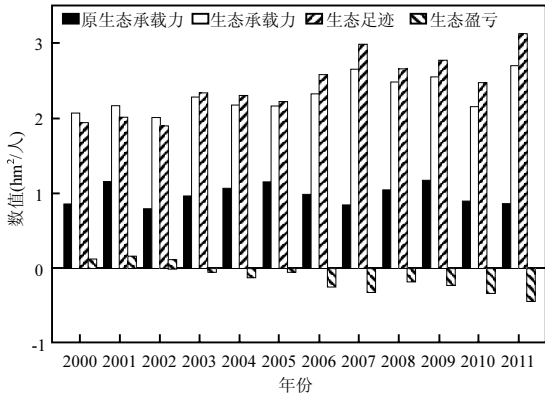


图1 基于能值生态足迹修正模型的长沙市生态安全状况
Fig.1 The ecological security of Changsha City based on the modified emergetic ecological footprint model

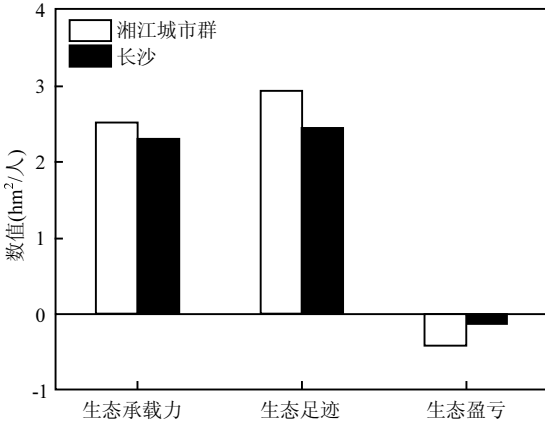


图2 长沙市和湘江城市群的年人均生态承载力、年人均生态足迹及年人均生态赤字对比
Fig.2 The contrast of the average ecological carrying capacity, the average ecological footprint and the average ecological deficit between Changsha City and the city cluster of the Xiangjiang River basin

同理,根据上述能值生态足迹修正模型及计算方法,得出湘江城市群的生态安全状况.从城市群区域范围来看(图2),长沙的生态足迹低于湘江城市群的平均水平,且对该地区的总体生态足迹的贡献率逐年缩小,年人均生态足迹仅占到了该地区年均值的 82.96%.虽然在研究初期,长沙市的生态经济系统出现了短暂的生态盈余时期,然而随着生态足迹的持续增长,生态承载力已不足以与生态足迹抗衡.在 2003 年长沙市首次出现

生态赤字,随后该生态超载状况逐步加重.生态赤字由 2003 年的 $0.05\text{hm}^2/\text{人}$ 变为 2011 年的 $0.42\text{hm}^2/\text{人}$,年均值为 $0.13\text{hm}^2/\text{人}$,是湘江城市群年人均生态赤字的 30.71%.

2.2 修正前后的能值生态足迹模型计算结果的对比分析

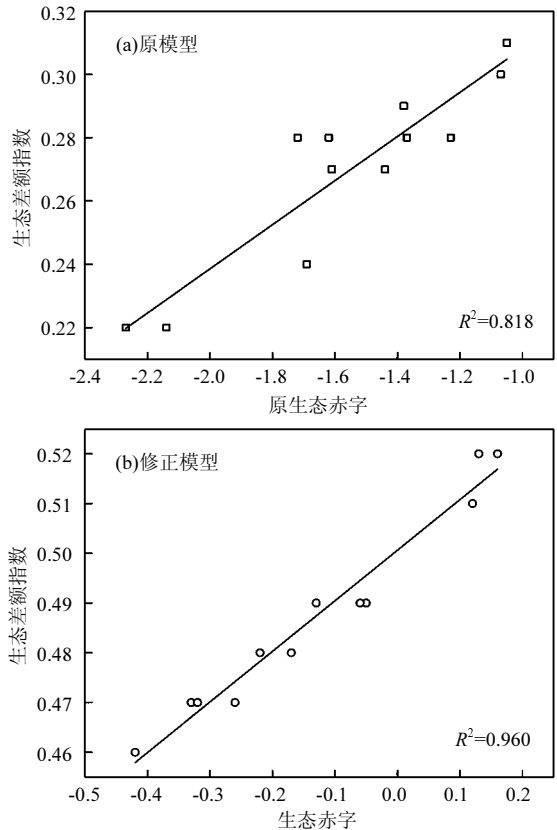


图3 长沙市的生态赤字与生态差额指数的相关性分析
Fig.3 The correlation analysis of the ecological deficit and the ecological gap index in Changsha City

2.2.1 生态承载力的对比 生态承载力是指生态系统通过自我维持、自我调节,所能支撑的最大社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量,与反映一个地区可持续发展能力和水平的发展能力指数具有一定的关联性^[23].因此,可以通过生态承载力与发展能力指数的相关性分析来验证修正生态承载力计算结果的有效性和可行性.Pearson 相关分析的结果表明,修正前后的年人均生态承载力与发展能力指数的相关

系数分别为 0.271 和 0.860**(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$),修正模型的生态承载力更能反映出区域的可持续发展能力及水平。

2.2.2 生态赤字的对比 生态差额指数反映区域生态环境中生态占用的可持续利用程度,与反映人类负荷与生态容量关系的生态盈亏具有一定联系.由图 3 可见,原模型与修正模型的人均生态赤字与生态差额指数的相关系数分别为 0.818**和 0.960**(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$).修正模型可有效地克服因低估实际的生态承载力而导致生态赤字表现出普遍偏大的系统误差现象,更能反映出区域的生态负荷状况。

综上所述可以得出,与传统的生态承载力计算方法相比,修正生态承载力计算方法在考虑自然资源承载力的基础上,肯定了社会经济发展对生态承载力的影响作用,能较敏感地反映出城市生态产出和资源利用率的变化,计算账户更完整,计算结果更合理,更符合实际生态容量情况;而传统方法只考虑了可更新资源及研究地区土地面积的多寡,不仅忽略了土地生产率提高的事实,也忽略了可更新资源概念的延伸性和扩展性,因而低估了实际的承载力。

2.3 长沙市的可持续发展状况分析

鉴于能值生态足迹修正模型的有效性和科学性,在运用该修正模型计算方法的基础上,结合生态足迹评价指标和相关统计分析方法来评估长沙市的生态可持续发展状况。

2.3.1 社会经济与生态足迹的关联 由图 4 可见,在 2000~2011 年期间,长沙市的万元 GDP 生态足迹逐年下降,且该数值明显低于湘江城市群.两者的年均值分别为 1.00 和 2.25,在 12 年间分别下降了 77%和 73%.这表明长沙市的技术水平和生物生产性土地的产出率相对较高,资源利用效率高于其所在城市群的整体水平.科技进步和科学管理对提高生产力和资源利用效率起到了很大作用,而资源利用效率的提高是经济增长方式发生良性转变的反映^[31].这亦是长沙市的生态赤字低于城市群平均水平的重要原因。

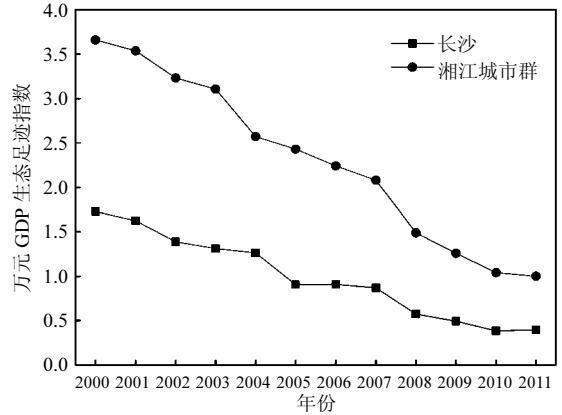


图4 长沙市与湘江城市群的万元 GDP 生态足迹指数对比
Fig.4 The contrast of the ecological footprint per capita GDP between Changsha City and the city cluster of the Xiangjiang River basin

然而,目前长沙市的生态系统仍处在超负荷状态,且生态足迹具有逐年加剧的趋势.通过多元统计分析方法得出,重工业率(相关系数=3.84, sig.=0.02)和人口规模(相关系数=11.49, sig.=0.00)与长沙市的生态足迹具有显著正相关,表明该两者对于长沙市的生态足迹变化具有强烈的正向驱动性.长沙市工业发展快速,重工业行业表现尤为突出,其占第二产业的比重由2000年的47%上升到了2011年的76%.目前,长沙市的经济增长很大程度上依靠对资源和能源的消耗,经济增长模式仍处于资源消耗型阶段.另外,长沙市年均人口增长率达到10.36%,人口密度为596人/km².对于人口密集地区而言,食物的供给需求以及能耗需求势必会对生态足迹的上升起到决定性的作用。

2.3.2 可持续发展的潜在风险分析 如图 5 所示,在 2000~2011 年间,湘江城市群的生态多样性指数处于平稳上升状态,年均生态多样性指数为 0.57.这说明,湘江城市群的生态经济系统历年来对各种生物生产性土地类型开发所造成的影响变化不大,并越来越注意对各类型土地的均衡开发利用.湘江城市群 2011 年的发展能力指数较研究初期上升了 35.46%,年均发展能力指数为 1.81.然而,长沙市的生态多样性指数和发展能力指数均低于湘江城市群的整体水平,年均值分别

为 0.47 和 1.15,分别比湘江城市群的低了 18.83% 和 36.54%。这表明了较湘江城市群而言,长沙市对各类型资源开发利用度的失衡性明显,使其生态系统不能充分发挥多样化结构价值和调节功能,可持续发展能力表现相对较弱,生态安全面临着潜在风险。

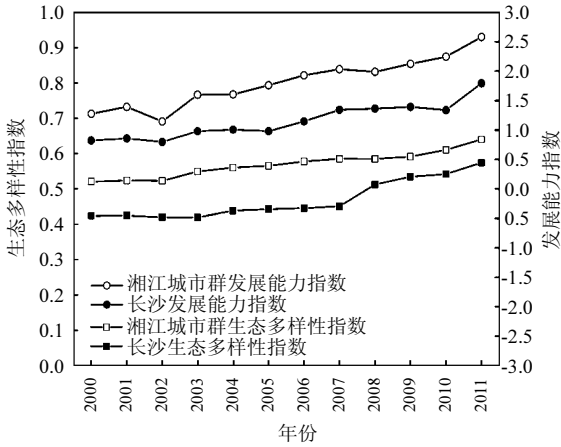


图 5 长沙市与湘江城市群的生态多样性指数与发展能力指数对比

Fig.5 The contrast of the ecological diversity index and the development capacity index between Changsha City and the city cluster of the Xiangjiang River basin

2.4 讨论

本研究将社会科技和经济发展水平的影响作用纳入能值生态足迹模型的生态承载力评价范畴,并将其划分为自然资源生态承载力和社会经济虚拟承载力两类账户进行分类计算。相关性验证分析表明,该修正方法是科学有效的,其得出的计算结果与生态经济系统的耦合效果较原模型更接近于区域实际的发展状况,适用于统一评价尺度的区域生态经济系统可持续发展动态评价和对策研究。然而,能值生态足迹模型涉及的数据分析量较大且计算过程复杂,为进一步提高该修正方法的应用价值,完善和探讨评价指标体系和账户分类方法、能值分析理论与生态足迹指标之间的桥梁性折算系数、生态经济系统的耦合驱动力分析等是今后研究的重点内容。

基于该修正模型分析方法的可持续能力评

价结果表明,长沙市目前处于生态超载状态,且呈现出不断加剧的趋势。通过多元统计分析得出,人口规模的逐步扩大、重工业的迅速发展,既而导致较大的生产压力和能耗压力,是促使长沙市生态负荷持续加剧的主要原因。因此,在资源总量和生态服务供给有限的条件下,增加生态系统对外部反馈投入的转换能力,提高资源利用效率,是在生态安全背景下社会经济可持续发展的核心部分。基于长沙市生态经济系统的现状,在今后的建设发展过程中一是要提升农牧产业的集约式发展水平,鼓励发展高新技术产业,提高单位面积生物生产力及本地生态承载力;二是要优化配置和集约利用各类资源,调整产业结构和能源结构,积极开发利用清洁能源,并适度引进紧缺资源和能源等,降低本地生态足迹的压力,实现城市生态系统与经济活动的协调发展。

3 结论

3.1 加入社会经济虚拟承载力账户的能值生态足迹修正模型可弥补原模型由于存在生态偏向性而导致的弱可持续性评价局限,为生态足迹方法的修正和优化研究提供一定的科学参考。

3.2 修正模型的研究结果表明,在 2000~2011 年间,长沙市的年人均生态承载力为 2.31hm²/人,年人均生态足迹为 2.44hm²/人。从 2003 年起长沙市开始处于生态超载状态,农牧业生产压力和重工业能耗压力大是促使其生态赤字不断加剧的主要原因。

3.3 从湘江城市群区域范围来看,长沙市的资源利用效率水平较高,是其生态赤字低于城市群平均水平的重要因素。然而,长沙市需重视资源的均衡开发利用,使其保持良好的发展能力,降低可持续发展的潜在风险。

参考文献:

[1] Mostafa M M. A Bayesian approach to analyzing the ecological footprint of 140 nations [J]. Ecological Indicators, 2010,10(4): 808-817.

[2] Galli A, Kitzes J, Niccolucci V, et al. Assessing the global environmental consequences of economic growth through the ecological footprint: a focus on China and India [J]. Ecological

- Indicators, 2012,17:99-107.
- [3] 段七零.基于能值分析的江苏省耕地生态足迹区域差异 [J]. 地理科学进展, 2008,27(4):96-102.
- [4] 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——以江苏省为例 [J]. 自然资源学报, 2006,21(4):653-660.
- [5] Dang X, Liu G, Xue S, et al. An ecological footprint and emergy based assessment of an ecological restoration program in the Loess Hilly Region of China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61:258-267.
- [6] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: The case study of Brazil [J]. *Ecological Indicators*, 2012,16:113-127.
- [7] Odum H T. Self-organization, transformity and information [J]. *Science*, 1988,242(4882):1132-1139.
- [8] 李丽锋,惠淑荣,宋红丽,等.盘锦双台河口湿地生态系统服务功能能值价值评价 [J]. 中国环境科学, 2013,33(8):1454-1458.
- [9] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al. Calculating National and Global Ecological Footprint Time Series: Resolving Conceptual Challenges [J]. *Land Use Policy*, 2004,21(3):271-278.
- [10] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy—a case study of the Chinese society [J]. *Ecological Modeling*, 2006,198(1/2):101-114.
- [11] Zhao S, Li Z Z, Li W L. Modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. *Ecological modeling*, 2005, 185(1):65-75.
- [12] Li S, Yuan W, Shi T, et al. Dynamic analysis of ecological footprints of Nanchong City in the process of urbanization [J]. *Procedia Engineering*, 2011,15:5415-5419.
- [13] Zurong D, Jing L I. Ecological Footprint and Reflections on Green Development of Hangzhou [J]. *Energy Procedia*, 2011,5: 118-124.
- [14] 韦 静,曾维华.生态承载力约束下的区域可持续发展的动态模拟——以博鳌特别规划区为例 [J]. 中国环境科学, 2009,29(3): 330-336.
- [15] Liu Q P, Lin Z S, Feng N H, et al. A modified model of ecological footprint accounting and its application to cropland in Jiangsu, China [J]. *Pedosphere*, 2008,18(2):154-162.
- [16] Wei X H, Li Z Z. Ecological value at risk: The temporal analysis of the emergy ecological footprint and biological capacity in Gansu, China 1980-2020 [J]. *Ecological Economics*, 2009, doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.03.006.
- [17] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: The case study of Brazil [J]. *Ecological Indicators*, 2012,16:113-127.
- [18] Siche R, Agostinho F, Ortega E. Emergy net primary production (ENPP) as basis for calculation of ecological footprint [J]. *Ecological Indicators*, 2010,10(2):475-483.
- [19] Siche R, Pereira L, Agostinho F, et al. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010,15(10):3182-3192.
- [20] 章锦河,张 捷.生态足迹模型修正及其研究进展 [J]. 资源科学, 2006,28(6):196-203.
- [21] 王健民,王 伟,张 毅,等.复合生态系统动态足迹分析 [J]. 生态学报, 2004,24(12):2920-2926.
- [22] 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——以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2008,28(5): 2220-2231.
- [23] 顾康康,刘景双.基于生态足迹修正模型的矿业城市生态承载力研究 [J]. 煤炭学报, 2008,33(11):1314-1318.
- [24] 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.
- [25] 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, 2002:62-76.
- [26] LIU Q P, LIN Z S, FENG N H, et al. A modified model of ecological footprint accounting and its application to cropland in Jiangsu, China [J]. *Pedosphere*, 2008,18(2):154-162.
- [27] 张坤民,温宗国,杜 斌,等.生态城市评估与指标体系 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- [28] Shao L, Wu Z, Chen G Q. Exergy based ecological footprint accounting for China [J]. *Ecological Modelling*, 2013,252:83-96.
- [29] 陈成忠,林振山.中国人均生态足迹和生物承载力构成的变动规律 [J]. 地理研究, 2009,28(1):129-142.
- [30] 方建德,杨 扬,叶 堤,等.重庆市生态足迹时间序列动态特征及其驱动因子分析 [J]. 生态环境学报, 2009,18(4):1337-1341.
- [31] 白 钰,曾 辉,马 强,等.基于宏观贸易调整法的城市尺度生态足迹模型——以珠江三角洲城市群为例 [J]. 自然资源学报, 2009,24(2):241-250.

作者简介: 曾晓霞(1986-),女,广西北海人,湖南大学环境科学与工程学院博士研究生,研究方向为区域可持续发展与生态环境修复.发表论文 5 篇.