

生态足迹与生态承载力非线性动力学分析

陈成忠^{1,2}, 林振山^{1,*}, 陈玲玲¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046; 2. 临沂师范学院地理与旅游学院, 山东 临沂 276005)

摘要:考虑到进出口贸易对区域(国家)生态足迹和生态承载力产生的重要影响,基于生态足迹模型理论建立了生态足迹、生态承载力和对外贸易三者之间的非线性动力学模型。研究表明:(1)区域平衡态的生态足迹和生态承载力成线性关系,在某种程度上与 Mathis Wackernagel 的论证相吻合;(2)区域最大生态承载力增大将导致平衡态的生态足迹和生态承载力增大,通过保护环境、控制建设用地、加强土地整理等增加各类生态生产性土地面积(耕地、牧草地、林地、水域等),通过科技、资金投入、管理等提高地方单产,不仅能提高生态承载力,还直接关系到生态足迹的大小;(3)一个区域或国家要实现人口、经济、资源的可持续发展,必须确保区域单位贸易的生态足迹大于其最大生态承载力与最大生态足迹的比值。尽量多进口自然资源性的初级生物产品,少进口高附加值的技术性产品和“奢侈性”消费品(如小汽车);出口自然资源性的初级生物产品,实际上是在出口生态承载力,应多出口人力资源、科技、管理、教育等隐形的社会资源。4)进一步揭示了贸易结构合理、自主创新对区域可持续发展的重要性。

关键词:生态足迹;生态承载力;非线性动力模型

文章编号:1000-0933(2006)11-3812-05 **中图分类号:**P46 **文献标识码:**A

A nonlinear dynamic analysis of ecological footprint and biocapacity

CHEN Cheng-Zhong^{1,2}, LIN Zhen-Shan^{1,*}, CHEN Ling-Ling¹ (1. Geographical Science College, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Department of Geography and Tourism, Linyi Teachers College, Linyi 276005, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3812 ~ 3816.

Abstract:Based on the ecological footprint model and considering the major influence of import and export trade on regional ecological footprint and biocapacity, this paper constructs a nonlinear dynamic model for ecological footprint, biocapacity and foreign trade. Research results show that: (1) in a regional equilibrium state, there is a linear relationship between ecological footprint and biocapacity, which proves Mathis Wackernagel's point in a way; (2) the increase of a regional maximum biocapacity will induce the increase of equilibrium ecological footprint and biocapacity, which indicates that to increase every kind of productive and ecological land area by protecting environment, controlling building land, strengthening land management, etc., and to raise per unit regional output through science and technology, cash investment, management, etc. can not only improve biocapacity, but also directly influence the scale of ecological footprint; (3) maintained the ecological footprint of per unit trade is bigger than the ratio of maximum biocapacity to maximum ecological footprint should be for the sustainable development in a region or country. That means to import more natural-resourced primary bio-products and less technical products with high additional value and luxuries (eg., car). As a matter of fact, exporting nature-resourced primary bio-products is to export biocapacity, thus we should enlarge the export of those invisible social resources, such as human resources, science and technology, management, education, etc.; 4) rational trade structure and independent innovation are vital to regional sustainable development.

Key words: ecological footprint; biocapacity; nonlinear dynamic model

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40371044);国家“211”二期工程重大资助项目

收稿日期:2006-05-12; **修订日期:**2006-10-24

作者简介:陈成忠(1970~)男,山东平邑人,博士生,副教授,主要从事生态资源研究. E-mail: chenchengzhongbu@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linzhenshan@njnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371044) and National “211” Key Project

Received date: 2006-05-12; **Accepted date:** 2006-10-24

Biography: CHEN Cheng-Zhong, Ph.D. candidate, Associate professor, mainly engaged in ecology and resources. E-mail: chenchengzhongbu@163.com

生态足迹 (ecological footprint) 概念自 William Rees^[1] 1992 年提出、在 Mathis Wackernagel 协助下逐步完善^[2~7]以来,作为一种衡量自然资源可持续利用的生物物理定量评价工具,以其新颖的视角很快得到有关国际机构、政府部门和研究机构认可^[8~10],引起众多学者的兴趣,进行了大量实证研究^[11~18]。结果表明,发达国家和地区大多拥有较高的生态足迹及生态赤字,研究报告都提倡减少足迹,而提高生活水平将直接导致增加自己的全球足迹份额。其实,从发展的角度,各国要取得社会发展并具有可持续性,应该在全球可持续性尺度范围内增加自己的全球足迹份额,而不是简单的减少足迹^[19]。贸易是进行资源交流的最直接方式,是满足生态赤字的最便捷方法^[20]。本文尝试利用非线性科学理论^[21~23]建立区域生态足迹、生态承载力与对外贸易三者之间的动力模型,并通过模型分析探讨其动力学关系。

1 模型建立

Mathis Wackernagel 和 William Rees 在 1996 年合著《我们的生态足迹:减轻人类对地球的冲击》^[2]中正式将生态足迹定义为“用生物或生态生产性土地面积 (biological or ecological productive area) 度量一个区域确定人口或经济规模的资源消费和废物吸收水平的账户工具”,用该区域能够提供的生态生产性土地面积表征生态承载力 (biocapacity) 即生态足迹供给,通过二者比较来衡量和分析区域经济系统发展的可持续状况。基于此,我们建立模型如下:

1.1 用 x 代表某区域(国家)总生态足迹, y 代表总生态承载力, r 和 R 分别表示生态足迹年均增加率和生态承载力年均增加率。假设不考虑生态足迹与生态承载力之间的相互关系,并假设生态足迹和生态承载力变化都只与各自的基础量成线性关系,则有以下动力学方程组:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx \\ \frac{dy}{dt} = Ry \end{cases} \quad (1)$$

事实上,生态足迹的增大必然受制于资源、环境的限制而不可能无限制增长,这里的限制就是区域生态承载力。另外,区域对外贸易中的进出口量也会直接或间接形成资源流、废物流和信息流,影响生态足迹和生态承载力。

1.2 若考虑生态足迹、生态承载力和对外贸易三者之间相互关系,则式(1)可修改为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx(ay - x) = f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = Ry \left[1 - b \frac{y}{y_m} - (1 - b) \frac{x}{x_m} \right] = g(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

a 表示单位贸易的生态足迹, ay 表示该区域所允许的生态足迹最大值,即最大生态承载力, $(ay - x)$ 表示生态盈余(或赤字);生态足迹 x 越大,越接近生态承载力所允许的生态足迹极限规模,生态盈余就越小甚至出现生态赤字;公式中的“1”表示该区域资源环境(包括自然资源和社会资源)对生态足迹和生态承载力的限制; y_m 表示该区域最大生态承载力, x_m 表示该区域所能允许的最大生态足迹; b 和 $(1 - b)$ 分别表示出口量和进口量占贸易总量的比重。与 $(ay - x)$ 的生态学意义相似, $\left[1 - b \frac{y}{y_m} - (1 - b) \frac{x}{x_m} \right]$ 表示该区域资源环境所允许的剩余生态承载力,即剩余生态足迹能够达到的最大值。

2 平衡态和稳定性分析

对模式(2)求解平衡态,并对有关平衡态生态学特性、演化行为和稳定性进行分析,为相关部门制定对外贸易策略提供依据:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx(ay - x) = 0 \\ \frac{dy}{dt} = Ry \left[1 - b \frac{y}{y_m} - (1 - b) \frac{x}{x_m} \right] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可求解得到系统共存在 3 个平衡态:

$$A(0,0), B\left(0, \frac{y_m}{b}\right), C\left[\frac{ax_my_m}{bx_m + a(1-b)y_m}, \frac{x_my_m}{bx_m + a(1-b)y_m}\right]$$

有关的 Jacobi 矩阵元为:

$$\begin{aligned} a_{11} &= ar y - 2rx \\ a_{12} &= arx \\ a_{21} &= -(1-b)Ry/x_m \\ a_{22} &= R - 2bRy/y_m \end{aligned} \quad (4)$$

平衡态的生态学意义是系统演化(发展)最终的态。所以,知道了平衡态及其性质就知道了系统的演化方向和特点。以下讨论它们的稳定性。

2.1 对于平衡态 $A(0,0)$

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0 \\ a_{12} &= 0 \\ a_{21} &= 0 \\ a_{22} &= R \end{aligned}$$

其特征根方程为:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \omega & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \omega \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{vmatrix} 0 - \omega & 0 \\ 0 & R - \omega \end{vmatrix} = 0$$

解为: $\omega_1 = 0; \omega_2 = R$

所以, $A(0,0)$ 为不稳定的鞍点,表明生态足迹和生态承载力将以马鞍状发展,离开 $(0,0)$ 态。

2.2 对于平衡态 $B(0, y_m/b)$

$$\begin{aligned} a_{11} &= ar y_m/b \\ a_{12} &= 0 \\ a_{21} &= -(1-b)Ry/bx_m \\ a_{22} &= -R \end{aligned}$$

其特征根方程为

$$\begin{vmatrix} ar \frac{y_m}{b} & 0 \\ -\frac{(1-b)Ry_m}{bx_m} & -R - \omega \end{vmatrix} = 0$$

解为: $\omega_1 = ar \frac{y_m}{b} > 0; \omega_2 = -R$ (5)

如果生态承载力年均增长率 $R > 0$, 平衡态 $B(0, y_m/b)$ 为不稳定的鞍点,说明生态足迹和生态承载力将以马鞍形状远离 $(0, y_m/b)$ 态;如果 $R < 0$, 平衡态 $B(0, y_m/b)$ 为不稳定的结点,说明生态足迹和生态承载力将以非周期曲线或直线形状远离 $(0, y_m/b)$ 态。平衡态 $B(0, y_m/b)$ 的生态学意义是生态承载力的负增长将使生态足迹朝零的方向发展。

2.3 对于平衡态 $C\left[\frac{ax_my_m}{bx_m + a(1-b)y_m}, \frac{x_my_m}{bx_m + a(1-b)y_m}\right]$

由稳定性理论^[21]可知,平衡态 $C\left[\frac{ax_my_m}{bx_m+a(1-b)y_m}, \frac{x_my_m}{bx_m+a(1-b)y_m}\right]$ 为稳定的结点,对分析区域生态足迹、生态承载力与对外贸易三者之间的动力学关系有实际意义。为此,有必要进一步分析讨论。

3 讨论

现用 x_e, y_e 分别表示平衡态 C , 即:

$$\begin{aligned} x_e &= \frac{ax_my_m}{bx_m+a(1-b)y_m} = ay_e \\ y_e &= \frac{x_my_m}{bx_m+a(1-b)y_m} \end{aligned} \quad (6)$$

根据(6)式,有以下结论:

(1) 生态足迹与生态承载力呈线性关系 ($x_e = ay_e$), a 表示单位贸易的生态足迹。这在某种程度上与 Mathis Wackernagel^[24] 的论证“只要生态足迹和生态承载力用同一单位(世界公顷或奥地利公顷)表示,两者就会成正比例变化,即在供给与需求之间存在一定的比例。”相吻合。所以,在一个开放的区域经济中,合理的贸易安排可以提高本区域生态承载力,弥补生态赤字,使区域环境承受更大的生态足迹^[25]。

(2) 对于 $x_e = \frac{ax_m}{(bx_m/y_m) + a(1-b)}, y_e = \frac{x_m}{(bx_m/y_m) + a(1-b)}$, y_m 增大将导致 x_e 和 y_e 增大,通过保护环境、控制建设用地、加强土地整理等增加各类生态生产性土地面积(耕地、牧草地、林地、水域等),通过科技、资金投入、管理等提高地方单产,不仅能提高生态承载力,还直接关系到生态足迹的大小。

(3) 对于 $x_e = \frac{ax_my_m}{ay_m + b(x_m - ay_m)}, y_e = \frac{x_my_m}{ay_m + b(x_m - ay_m)}$, 当 $x_m - ay_m > 0$, 对应于 a 取小值,即贸易效益低、贸易结构不合理(如过多出口自然资源性的初级生物产品、进口高附加值的技术性产品和“奢侈性”消费品。反之,则认为合理)。 b 的增加(分母变大),将导致 x_e 和 y_e 的下降,即在贸易结构不合理的情况下盲目出口,不利于生态足迹和生态承载力的提高(图 1)。

$x_m - ay_m < 0$, 对应于 a 取大值,即贸易效益高、贸易结构合理。 b 的增加(分母变小),将导致 x_e 和 y_e 增加。所以,合理的贸易结构,不仅提高本地居民的生活水平和生活质量,还可以间接提高当地生态承载力(见图 2)。

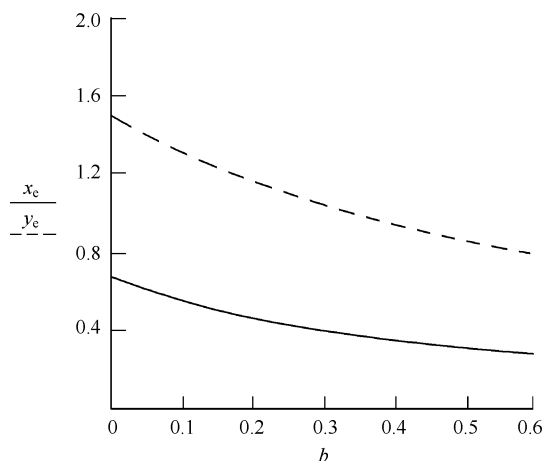


图 1 贸易效益低、贸易结构不合理的情况下, b 的增加,即出口比率的增加将导致生态足迹 x_e 和生态承载力 y_e 的下降

Fig.1 Under small trade benefit or irrational trade structure, the increase in export ratio (b) will depress ecological footprints and biocapacity

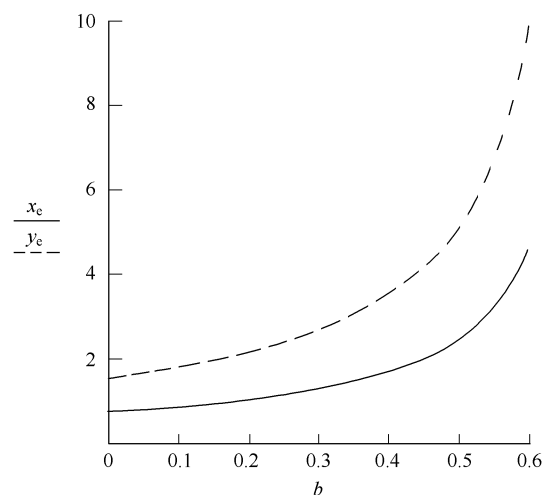


图 2 贸易效益高、贸易结构合理的情况下, b 的增加,即出口比率的增加将导致生态足迹 x_e 和生态承载力 y_e 的提高

Fig.2 Under big trade benefit or rational trade structure, the increase in export ratio (b) will boost ecological footprints and biocapacity

根据以上分析,可以确定 $a_0 = y_m/x_m$ 是一临界参数。一个区域或国家要实现人口、经济、资源的可持续发展,必须确保 $a > a_0$ 。尽量多进口自然资源性的初级生物产品,少进口高附加值的技术性产品和“奢侈性”消费品(如小汽车),因为前者既能提高当地居民的生活水平(生态足迹)也能间接提高当地生态承载力,后者只能极大提高生态足迹而对生态承载力影响很小;出口则相反,出口自然资源性的初级生物产品,实际上是在出口生态承载力,应多出口人力资源、科技、管理、教育等隐形的社会资源。进一步揭示了贸易结构合理、自主创新对区域可持续发展的重要性。

4 结束语

(1) 生态足迹、生态承载力和对外贸易之间是非常复杂的非线性关系,既存在负反馈的稳定机制,也存在非线性的不稳定因素。

(2) 通过保护环境、控制建设用地、加强土地整理等增加各类生态生产性土地面积(耕地、牧草地、林地、水域等),通过科技、资金投入、管理等提高地方单产,不仅能提高生态承载力,还直接关系到生态足迹的大小。

(3) 国际贸易的产品和服务中不仅嵌入了土地等有形物质资源,还嵌入了积累自然资源和人类智慧的隐形社会资源,如生产技术、消费模式、教育模式、通常的价值理念和生活类型^[19]。盲目、不合理的贸易结构,将减小生态足迹和生态承载力,不利于区域的可持续发展;合理的贸易结构,既能提高当地居民的生活水平和质量,又能提高生态承载力。

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.
- [3] Rees W E, Wackernagel M. Urban ecological footprints: Why Cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996.
- [4] Wackernagel M, Onisto L, Bello P. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29: 375 ~ 390.
- [5] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20: 3 ~ 24.
- [6] Rees W E, Wackernagel M. Monetary analysis: turning a blind eye on sustainability. *Ecological Economics*, 1998, 29: 47 ~ 52.
- [7] Wackernagel M, Onisto L, Callejas L. Ecological footprints of nations: how much nature do they use? how much nature do they have? Commissioned by the Earth Council for the Rio + 5 Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, 1997.
- [8] World Wildlife Fund. living planet report 2000 (2002, 2004) [EB/OL]. [http://www.panda.org/downloads/general/LPR.2000.\(2002,2004\).pdf](http://www.panda.org/downloads/general/LPR.2000.(2002,2004).pdf).
- [9] Global Footprint Network 2005 Annual Report. <http://www.footprintnetwork.org>.
- [10] Global Footprint Network, World Wildlife Fund, and Kadorie Farms and Botanic Gardens. Asia-Pacific 2005: the ecological footprint and natural wealth. <http://www.footprintnetwork.org>.
- [11] Wackernagel M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint: application in Sweden and Subregiona. *AMBIO*, 1999, 28(7): 604 ~ 612.
- [12] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H. Ecological footprint time series of Austria, Philippines, and South Korea for 1961 ~ 1999: Comparing the conventional approach to an "actual land area" approach. *Land use Policy*, 2004, 21: 261 ~ 269.
- [13] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926 ~ 1995. *Ecological Economics*, 2001, 38: 25 ~ 45.
- [14] Klaus Hubacek, Stefan Giljum. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecological Economics*, 2003, 44: 137 ~ 151.
- [15] Katelyn B, Bicknell. New Methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27: 149 ~ 160.
- [16] Monfreda C. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and ecological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21: 231 ~ 246.
- [17] Lenzen M, Murray S A. A Modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37: 229 ~ 255.
- [18] Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S. Consumption patterns and their effects on land required for food. *Ecological Economics*, 2002, 42: 185 ~ 199.
- [19] Xu Z M, Cheng G D, Qiu G Y. ImPACTS identity of sustainability assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 198 ~ 208.
- [20] Yuan X H, Li H, Chen B. Dynamic analysis of sustainable development in China based on the ecological footprint. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(3): 38 ~ 42.
- [21] Lin Z S. Nonlinear science and its application to earth science. Beijing: Meteorology Press, 2003.
- [22] Lin Z S. Rabenau-Lin regional model resources regional growth bound by the regional resources and investment environment. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(2): 137 ~ 142.
- [23] Lin Z S. A regional growth model of ternary variables binding by resource. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 767 ~ 773.
- [24] Wackernagel M. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21: 271 ~ 279.
- [25] Liu Y H, Peng X Z. Time series of ecological footprint in China between 1962 ~ 2001: calculation and assessment of development sustainability. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2257 ~ 2262.

参考文献:

- [19] 徐中民, 程国栋, 邱国玉. 可持续性评价的 ImPACTS 等式. *地理学报*, 2005, 60(2): 198 ~ 208.
- [20] 元相虎, 李华, 陈彬. 基于生态足迹模型中国可持续发展动态分析. *中国人口 资源与环境*, 2005, 15(3): 38 ~ 42.
- [21] 林振山. 非线性科学及其在地理学中的应用. 北京: 气象出版社, 2003.
- [22] 林振山. 有限约束的 Rabenau-Lin 区域增长模式. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 137 ~ 142.
- [23] 林振山. 资源约束下的三元函数区域增长模式. *地理研究*, 2005, 24(5): 767 ~ 773.
- [25] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估. *生态学报*, 2004, 24(10): 2257 ~ 2262.