

文章编号:1007-7588(2010)01-0163-08

# 基于生态足迹模型的中国未来发展情景分析

刘某承<sup>1,2</sup>, 王 斌<sup>3</sup>, 李文华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 中国林科院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

**摘要:**生态足迹是近年来国际上一种重要的判别可持续发展程度的生物物理量方法。本文对1949年-2008年中国人均生态足迹和生物承载力进行了测算,在此基础上使用经验模态分解方法建立一个非线性的动态预测模型,并进行长时间的模拟验证,后又分“惯性发展”和“稳步调整”两个情景对中国未来20年发展的生态潜力进行预测,结果表明:①建国60年以来中国的人均生态足迹在小幅波动中不断上升,同时人均生态承载力不断降低,从1985年起中国整体上处于生态赤字期;②若按照惯性发展,则2030年人均生态赤字将达到3.9024hm<sup>2</sup>/cap,可持续发展形势非常严峻;③若按照“稳步调整”情景,则2030年人均生态赤字为1.5217hm<sup>2</sup>/cap,这种程度的生态超载有可能通过一些技术手段如国际贸易等来缓解。最后,基于计算和情景分析提出可持续发展建议。

**关键词:**生态足迹;生物承载力;动态模型;情景分析;中国

## 1 引言

随着人口膨胀和经济增长,工业化和城市化进程在推动人类文明和社会经济增长的同时,也恶化了人与自然生态系统的关系。不断加剧的人地矛盾要求科学、客观地评估区域经济增长的可持续性,并发展出一系列重要指标,以便科学地决策和行动<sup>[1]</sup>。生态足迹作为一种非货币化的生态系统评估工具,是近年来国际上一种重要的判别可持续发展程度的生物物理量方法。生态足迹援引承载力的概念,是对传统土地承载力、资源承载力等概念的对置表达<sup>[2]</sup>,它从生态学的观点出发,研究人类对资源的消费利用状况及这种消费对生态系统造成的影响,通过考察自然资源供给和生物承载力,进而刻画人类社会与自然之间的依存与支持关系,目前被广泛用于系统的压力与状态评估、人口享有和占用自然资本及其服务功能的公平性评估、自然配置的时空适当性评估,以及生态补偿决策和消费的生态合理性评估。

中国自改革开放以来经济的高速增长举世瞩目,同时也付出了沉重的资源、生态与环境代价:不

仅耗用了大量的自然资源,污染了环境,而且生态系统遭到了破坏。自1999年生态足迹方法引入国内以来<sup>[3-7]</sup>,我国学者通过对中国生态足迹的计算,分析中国经济发展对自然资源的利用程度和对生态环境所造成的影响,考察中国自然资本的供给能力,进而对中国发展模式 and 可持续现状、各区域可持续状态做出评估。同时,在原有基本模型(点时间尺度足迹模型)的基础上,不断发展、完善足迹核算方法,推动了动态生态足迹模型<sup>[8-10]</sup>(包括时间序列生态足迹模型、基于综合评价法的足迹模型)、投入产出足迹模型<sup>[11,12]</sup>、成分法足迹模型<sup>[13,14]</sup>(资源流足迹模型/生命周期法足迹模型)等的形成,不同程度地增强了生态足迹作为生态系统评估工具的指标性能。

然而,目前生态足迹模型在我国的应用主要是从人类消费对土地资源的占用角度静态地回顾性评估不同尺度的生态系统的压力与状态,得出的结论都是瞬时性的<sup>[15]</sup>,而它力图反映的社会经济系统对自然生态系统的影响却处在不断变化之中,少数时间序列足迹模型虽具有部分动态性能,但本质上

收稿日期:2009-07-20; 修订日期:2009-09-30

基金项目:国家环境保护部专项:“国家重大环境问题决策支持”(编号:2008ZX002)。

作者简介:刘某承,男,陕西汉中中人,博士生,主要研究方向为生态经济。E-mail: liumoucheng@163.com

通讯作者:李文华, E-mail: liwh@igsrr.ac.cn

仍属于回顾性评估,无法反映未来的变化趋势,警示教育功能有余而决策咨询作用不足。本文对1949年~2008年中国人均生态足迹( $ef$ )和生物承载力( $bc$ )进行了测算,在此基础上利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法建立一个非线性的动态预测模型,进行长时间的模拟验证,并分“惯性发展”和“稳步调整”两个情景对中国未来20年发展的生态潜力进行情景分析,以期更有效地分析社会经济的发展对资源占用特别是土地资源占用的合理性,应对区域生态超载现象。

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹模型

目前,生态足迹的计算方法有3种:

(1)综合法。由Rees和Wackemagel博士等于20世纪90年代提出<sup>[16,17]</sup>,适用于全球、区域和国家层次的生态足迹研究,也是目前应用最多的方法。综合法根据区域统计资料获取地区生产总量、出口总量、进口总量和年终库存总量,自上而下进行数据归纳得到地区消费总量的数据,计算出总的生态足迹后再除以地区总人口,得到人均生态足迹。

(2)组分法。是Simmons等<sup>[18]</sup>人提出的,通过发放调查问卷,采用入户调查方式直接获得当地居民主要消费品类型的人均消费量数据,从而得到该区域的人均各类消费品数量。组分法适用于城镇、村庄、公司、学校、个人或单个项目的小尺度的生态足迹计算。

(3)投入产出法。由Bicknell等<sup>[19]</sup>学者于1998年提出并由台北大学Ferng<sup>[20]</sup>教授于2001年改进,这种方法主要是以投入-产出模型为基础,通过确立资源乘子,建立资源与经济系统的联系,测算生态足迹。

本文的计算以中国的生态足迹为对象,由于时间序列的跨度较大,出于数据的可获得性和准确性,采用综合法模型。

$$ef = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{gP_i}) = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{IP_i} \cdot YF_i) \quad (1)$$

$$bc = \sum_{j=1}^6 r_j \cdot (\sum_i \frac{my_i}{gP_i}) = \sum_{j=1}^6 r_j \cdot (\sum_i \frac{my_i}{IP_i} \cdot YF_i) \quad (2)$$

$$ed(er) = bc - ef \quad (3)$$

式中 $ef$ 为人均生态足迹; $bc$ 为人均生态承载力; $ed(er)$ 表示人均生态赤字(Ecological deficit)或人均生态盈余(Ecological reserve); $j$ 为生产性空间的类型,

包括农地、畜牧地、林地、渔业空间、建筑用地和能源用地; $r_j$ 为第 $j$ 类土地利用的均衡因子,根据中国陆地植被NPP计算,农地和建筑用地的均衡因子为1.71,林地和能源用地为1.41,畜牧地为0.44,渔业空间为0.35<sup>[21]</sup>; $i$ 为消费项目的类型,参照统计年鉴的统计科目,消费数据包括粮食、蔬菜、纤维作物、油料作物、糖料作物、肉类、奶、毛绒产品、木材、纸类、水果、干果、能源、水产品、建筑用地等共42项; $c_i$ 为 $i$ 种消费项目的人均消费量,通过生产量和净进口量的差值,再除以当年人口数量来计算; $gP_i$ 和 $IP_i$ 分别指第 $i$ 种消费项目单位面积的全球年平均产量和国家平均产量; $YF_i$ 指产量因子(为 $gP_i$ 和 $IP_i$ 的比值); $my_i$ 为第 $i$ 类消费项目的区域年总产量。

所有化石燃料消费排放的 $CO_2$ 中有1/3被海洋吸收,其余部分可以通过不同方法转化为土地面积。具体地,将化石燃料的消费量转化为标煤量,再通过热量与 $CO_2$ 吸收率的比值计算出各类能源消费所占用的足迹。中国能地比,通过计算中国森林的平均碳吸收能力,再除以碳排放因子得到。根据第六次全国森林资源清查数据计算我国的森林单位面积平均生产力为2.33t/hm<sup>2</sup>/年,则碳吸收量约为1.16tC/hm<sup>2</sup>/年。因此,原煤的能地比为45GJ/hm<sup>2</sup>/年,原油为58GJ/hm<sup>2</sup>/年,天然气为76GJ/hm<sup>2</sup>/年。

将人均生态足迹和人均生物承载力进行比较时,考虑到土地利用的多功能性,没有将生物多样性保护区域(12%)从人均生物承载力中单独除去。

### 2.2 动力建模方法

**2.2.1 提取波动周期** 利用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)方法<sup>[22-24]</sup>将时间序列作经验模态分解(EMD),可以获得一系列具有不同特征尺度的本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF)<sup>[25]</sup>。实践表明,EMD方法是目前提取数据序列趋势的最好方法,已应用于信号处理、图像处理、湍流、气象、生态经济学等众多的非线性科学领域<sup>[26-29]</sup>。

提取波动周期的过程是:找出时间序列 $x(t)$ 上所有的极大值和极小值点,分别用3次样条函数拟合原始序列的上下包络线,将原序列 $x(t)$ 减去平均包络线 $m_1$ 可得到去掉低频的新序列 $h_1$ ,即: $h_1 = x(t) - m_1$ ;

多次重复上述过程,使 $m_1$ 无限趋近于零,就得到第一个IMF分量 $c_1$ 。用 $x(t)$ 减去 $c_1$ ,得到序列 $r_1$ :

2010年1月

$$r_1 = x(t) - c_1$$

对  $r_1$  继续进行这种分解步骤,直到所得到的剩余部分为单一信号。最终得到了所有的IMF分量及余量  $r_n: r_n = r_{n-1} - c_n$ 。

因此,原始的时间序列  $x(t)$  可表示为所有的

$$\text{IMF分量及趋势项之和: } x(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n$$

对每一个IMF分量  $c_k(t)$  进行Hilbert变换:

$$b_k(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_k(t')}{t-t'} dt', p \text{ 为Cauchy主值, } c_k(t) \text{ 和 } b_k(t)$$

可以构成一个序列:  $Z_{k(t)} = A_k(t) \exp[rt]$ 。

其中,  $A_k(t) = \sqrt{c_k^2(t) + b_k^2(t)}$  为瞬时振幅。

**2.2.2 预测模型建立** 在上述分析基础上,可以建立如下动力学模型:

$$x_i = A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) + IMF_{0i}$$

$$\frac{dR}{dt} = rR_0, \text{ 积分得: } R(t) = R_0 e^{rt}$$

$$x(t) = R(t) + \sum_{i=1}^n \left[ A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) + IMF_{0i} \right]$$

即:

$$x(t) = R_0 e^{rt} + \sum_{i=1}^n \left[ A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) + IMF_{0i} \right] \quad (4)$$

公式(4)是本文建立的非线性人均生态足迹或生物承载力动态预测模型。式中  $x$  为人均生态足迹或生物承载力 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ );  $R_0$  为时间序列  $x(t)$  的初始值 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ );  $r$  为人均生态足迹或生物承载力的年均变化率;  $t$  为时间(年);  $A_i$  为平均振幅 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ );  $T_i$  为周期(年);  $IMF_{0i}$  为各IMF分量的初值 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ )。

### 3 计算结果与情景分析

#### 3.1 1949年-2008年人均生态足迹和生物承载力计算

按照公式(1)、公式(2),基于《新中国五十年统计资料汇编》、《中国统计年鉴》(1981-2008),2008年中国国民经济和社会发展统计公报<sup>1)</sup>,FAO数据库<sup>2)</sup>,中国科学院地理科学与资源研究所的科学数据库<sup>3)</sup>等,本文计算了中国1949年-2008年共60年的生态足迹。由于本文计算时间跨度较大,部分数据缺乏,如1949年-1977年、1981年-1984年缺

乏烟叶、干果、奶、羊毛和禽蛋等数据,均用插值法进行处理。人均生态足迹和生物承载力计算结果见图1。

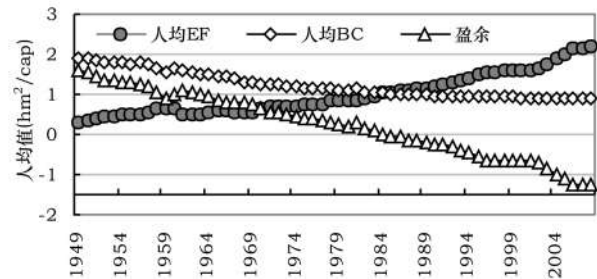


图1 1949年-2008年中国人均EF与BC变化

Fig.1 Per capita EF and BC in China between 1949-2008

通过计算发现,60年来中国人均生态足迹总体呈现在波动中不断增加的趋势,而人均生物承载力则在波动中不断减少。大体上看,建国60年来中国对资源的消耗分为两个阶段:1961年-1978年的慢资源消费增长阶段,该时期内人口迅速增长,但由于各种历史原因,经济增长缓慢,除了建国初期和1963年-1965年经济整顿时期年人均GDP增长达6.9%以外,其余年份人均GDP速度仅为1.5%,与此相对应的资源消费水平的平均增长速度为1.9%;1978年-2008年的快资源消费增长阶段,随着改革开放战略的全面实施,国家建设重点转移到经济领域,从而带动经济的高速增长,人民生活水平也随之上升,同时资源的消费增长速度同样达到较高水平,除了1998年-2001年由于金融危机的影响增长速度缓慢之外,其余年份的资源消费水平的平均增速高达3.16%左右,其中尤以能源消费增长最快,畜牧和水产品从1990年以来开始加速增长。整体看来,建国初始到20世纪80年代中期的37年为生态盈余期;1985年起,由于改革开放以来中国经济的高速增长对自然生态系统的占用,整体上处于生态赤字期,2008年人均生态赤字达到了1.2614  $\text{hm}^2/\text{cap}$ 。

#### 3.2 中国人均生态足迹和生物承载力的情景分析

**3.2.1 模型建立** 通过对图1的中国人均生态足迹和生物承载力进行EMD分解,提取的2个IMF分量及趋势量见表1。

1)国家统计局, [http://www.stats.gov.cn/tjgb/ndtjgb/qgndtjgb/t20090226\\_402540710.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/ndtjgb/qgndtjgb/t20090226_402540710.htm).

2)FAO, <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>.

3)中国科学院地理科学与资源研究所, <http://www.naturalresources.csdb.cn/index.asp>.

表1 中国人均EF和BC各IMF分量及趋势量  
Table 1 Variance contribution by IMF<sub>1-2</sub> and its order

IMF <sub>i</sub>	人均生态足迹			人均生物承载力		
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	RES	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	RES
周期(T <sub>i</sub> ,年)	4.400	13.100	∞	4.500	6.400	∞
方差贡献率(K <sub>i</sub> ,%)	0.390	1.116	98.494	0.803	0.161	99.036
平均振幅(A <sub>i</sub> ,hm <sup>2</sup> /cap)	0.080	0.010	-	0.005	0.015	-
初始值(IMF <sub>0</sub> ,hm <sup>2</sup> /cap)	0.001	0.003	0.266	0.013	0.003	1.550

将表1中的A<sub>i</sub>、T<sub>i</sub>、IMF<sub>01</sub>、IMF<sub>02</sub>带入公式(4),得到:

$$EF(t) = R_0 e^{rt} + 0.08 \sin \frac{2\pi t}{4.4} + 0.01 + 0.01 \sin \frac{2\pi t}{13.1} + 0.03 \quad (5)$$

$$BC(t) = R_0 e^{rt} + 0.05 \sin \frac{2\pi t}{4.5} + 0.0126 + 0.015 \sin \frac{2\pi t}{6.4} + 0.0025 \quad (6)$$

3.2.2 模拟结果 将1949年-2008年中国人均生态足迹和生物承载力的增长率,1949年的人均生态足迹和生物承载力带入公式(5)、公式(6),得到1949年-2008年中国人均生态足迹和生物承载力的模拟模型:

$$EF(t) = 0.3110e^{0.0316t} + 0.08 \sin \frac{2\pi t}{4.4} + 0.01 + 0.01 \sin \frac{2\pi t}{13.1} + 0.03 \quad (7)$$

$$BC(t) = 1.9193e^{-0.0141t} + 0.05 \sin \frac{2\pi t}{4.5} + 0.0126 + 0.015 \sin \frac{2\pi t}{6.4} + 0.0025 \quad (8)$$

根据公式(7)、公式(8),分别模拟中国1949年-2008年人均生态足迹和生物承载力,模拟值和实际值相对平均误差为1.12%和4.23%,如图2所示。

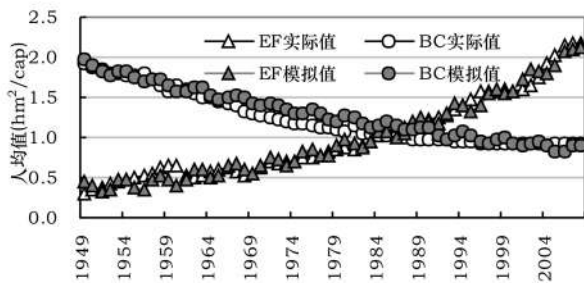


图2 1949年-2008年中国人均EF和BC拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of per capita EF and BC in China between 1949-2008

示。由此可见,模型公式(7)、公式(8)用于预测中国未来人均生态足迹和生物承载力的变化是有效的。

3.2.3 情景分析

(1)“惯性发展”情景。改革开放以来,我国经济快速增长,人民生活水平日益提高,同时经济社会的发展对自然生态系统的消费逐渐增加。通过对建国60年来,特别是改革开放30年来的人均生态足迹和生物承载力分析发现,近年来我国对能源消费增长速度最快,畜牧产品和水产品次之,由于人均粮食消费量的降低以及单位产量的提高导致农产品消费增长不明显,甚至有降低的趋势。由1978年~2008年人均生态足迹和生物承载力的变化可计算出,人均生态足迹年均增长率为3.16%,人均生物承载力年均减少率为1.41%。若今后20年内保持这种变化速度,即假设2008年-2030年中国人均生态足迹和生物承载力的年度变化率  $\bar{r}_{EF} = 3.16\%$ ,  $\bar{r}_{BC} = -1.41\%$  不变,以2008年人均生态足迹和生物承载力作为初始值,构建“惯性发展”情景的预测模型:

$$EF(t) = 2.1769e^{0.0316t} + 0.08 \sin \frac{2\pi t}{4.4} + 0.0075 + 0.01 \sin \frac{2\pi t}{13.1} + 0.0213 \quad (9)$$

$$BC(t) = 0.9155e^{-0.0141t} + 0.05 \sin \frac{2\pi t}{4.5} + 0.0061 + 0.015 \sin \frac{2\pi t}{6.4} + 0.0012 \quad (10)$$

根据公式(9)、公式(10),预测未来20年中国人均生态足迹和生物承载力的变化值,如表2、图3所示。

由表2、图3可以看出若保持过去30年的变化

表2 “惯性发展”情景2008年-2030年中国人均EF和BC预测值

Fig.2 Prediction values of per capita EF and BC in China between 2008-2030 when  $r_{EF}=0.0316, r_{BC}=0.0141$  (hm<sup>2</sup>/cap)

年份	人均EF	人均BC	赤字	年份	人均EF	人均BC	赤字
2008	2.3594	0.9717	1.3877	2020	3.2896	0.7481	2.5416
2010	2.3595	0.8523	1.5072	2025	3.9255	0.7115	3.2140
2015	2.7532	0.7987	1.9545	2030	4.6033	0.7008	3.9024

2010年1月

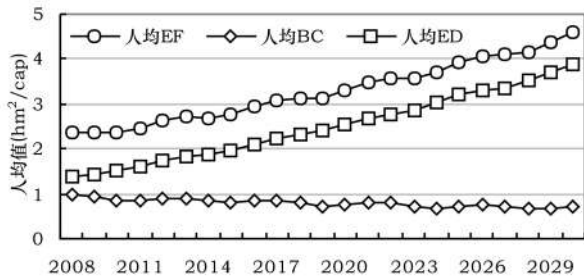


图3 “惯性发展”情景2008年-2030年  
中国人均EF、BC和ED趋势

Fig.3 Prediction chart of per capita EF and BC in China between 2008-2030 when  $r_{EF}=0.0316, r_{BC}=0.0141$

趋势,2008年-2030年中国人均生态足迹会持续增长,人均生物承载力则会不断缩减,2030年分别达到4.6033hm<sup>2</sup>/cap和0.7008hm<sup>2</sup>/cap,使得人均生态赤字急剧增大,2030年为3.9024hm<sup>2</sup>/cap。

需要注意的是,由于一种生态系统的过度占用,如渔业的过度养殖,不能通过增加另一系统如耕地的面积来弥补不同生态系统所能提供的服务。况且,不同类型的生态系统不是独立存在的,如渔业崩溃,则肉类等替代产品消费量将会增多,需要更多的农地和畜牧地来蓄养各种家禽或动物,导致EF更大(因为农地和畜牧地的均衡因子高于渔场),而情景预测模型的构建设没有考虑这个变量,因此已经低估了生态系统超载的严重程度。如果按照惯性发展,未来20年间中国实际的生态超载将比预测结果更严重,不仅会使资源的可获得性降低,还将抑制生态系统供给产品和服务的能力,从而限制社会经济的发展和人民生活水平的提高。若不采取有效措施,降低人类对自然生态系统的占用,并保育自然生态系统以提高生态承载能力,按照现有模式发展下去,中国未来20年发展的可持续潜力不容乐观。因此,探索生态足迹的稳步调整情景非常必要。

(2)“稳步调整”情景。中国已经意识到经济发展必须改变传统的高资源消耗、高环境污染的粗放型增长模式,也已采取有力措施控制人口增长、倡

导节约型社会、提倡循环经济、督促节能减排。但中国属于发展中国家,目前社会、经济等均处于稳步发展时期,人民生活水平逐步提高,未来20年内降低人均生态足迹很难实现。若未来20年内通过技术进步、完善管理等手段,使得自然生态系统的生产力提高10%,并通过改变消费模式、促进资源的回收再利用等措施,使得对自然生态系统占用的增长水平下降10%,同时通过节能减排等措施削减10%的CO<sub>2</sub>和污染排放,即2008年-2030年中国人均生态足迹和生物承载力的年均变化率达到 $\bar{r}_{EF} = 0.32\%$ ,  $\bar{r}_{BC} = -0.14\%$ ,假设20年内人均生态足迹和生物承载力的变化率不变,以2008年人均生态足迹和人均生物承载力作为初始值,构建预测模型:

$$EF(t) = 2.1769e^{0.0031624t} + 0.08\sin\frac{2\pi}{4.4} + 0.0075 + 0.01\sin\frac{2\pi}{13.1} + 0.0213 \quad (11)$$

$$BC(t) = 0.9155e^{-0.00141t} + 0.05\sin\frac{2\pi}{4.5} + 0.0061 + 0.015\sin\frac{2\pi}{6.4} + 0.0012 \quad (12)$$

根据公式(11)、公式(12),预测2008年-2030年中国人均生态足迹和生物承载力的变化值,如表3、图4所示。

由表3、图4可看出:若2008年-2030年中国人均生态足迹保持年均增长率0.32%、人均生物承载力保持年均减少率0.14%不变,则2030年人均EF达到2.4391hm<sup>2</sup>/cap、人均生物承载力达到0.9174hm<sup>2</sup>/cap、人均ED为1.5217hm<sup>2</sup>/cap。与“惯性发展”情景

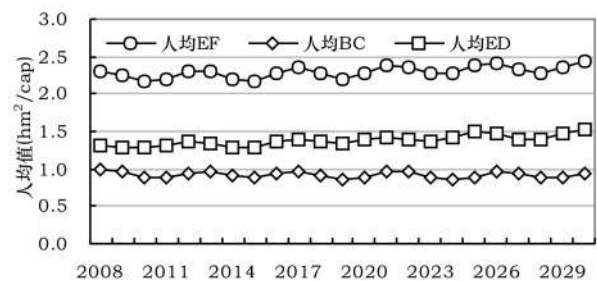


图4 “稳步调整”情景2008年-2030年  
中国人均EF、BC和ED趋势

Fig.4 Prediction chart of per capita EF and BC in China from 2008 to 2030 when  $r_{EF}=0.00316, r_{BC}=0.00141$

表3 “稳步调整”情景2008年-2030年中国人均EF和BC预测值

Table 3 Prediction values of per capita EF and BC in China from 2008 to 2030 when  $r_{EF}=0.00316, r_{BC}=0.00141$  (hm<sup>2</sup>/cap)

年份	人均EF	人均BC	赤字	年份	人均EF	人均BC	赤字
2008	2.2964	0.9832	1.3132	2020	2.2740	0.8770	1.3971
2010	2.1636	0.8786	1.2850	2025	2.3836	0.8660	1.4976
2015	2.1823	0.8783	1.3040	2030	2.4391	0.9174	1.5217

预测相比,2010年、2020年、2030年的人均生态赤字分别缩小了  $0.2222\text{hm}^2/\text{cap}$ 、 $1.1445\text{hm}^2/\text{cap}$  和  $2.3807\text{hm}^2/\text{cap}$ 。因此,“稳步调整”情景的预测结果对中国总的生态可持续发展来说,既是一种鼓舞又是一种挑战。

#### 4 小结与讨论

生态足迹模型把生物生产性空间作为地球生态系统可更新能力的代名词,用之度量进出社会经济系统的物能流,以此刻画社会与自然之间的依存与支持关系。通过1949年-2008年中国人均生态足迹和生物承载力的计算,以及建立非线性学预测模型进行多情景的长时间序列的数值预测,得出以下结论:

(1)建国60年以来,中国人均生态足迹在波动中不断上升,尤其是改革开放以来,随着经济的快速增长,对自然生态系统的占用也有较快的增长。同时,中国人均生物承载力不断降低,使得从1985年起,中国整体上处于生态赤字期。

(2)若按照惯性发展,即2008年-2030年中国人均生态足迹与生物承载力保持过去60年的年均变化率不变,则2030年人均生态足迹、生物承载力、生态赤字将分别达到  $8.4396\text{hm}^2$ 、 $0.4826\text{hm}^2$ 、 $7.9570\text{hm}^2$ 。这时,生态赤字是生物承载力的16倍还要多,可持续发展形势非常严峻。

(3)若未来20年通过内技术进步、完善管理等手段,使得自然生态系统的生产力提高10%,并通过改变消费模式、促进资源的回收利用等措施,使得对自然生态系统占用的增长水平下降10%,同时通过节能减排等措施削减10%的 $\text{CO}_2$ 和污染排放,则2030年人均生态足迹将达到  $1.5217\text{hm}^2$ 、人均生物承载力  $0.9174\text{hm}^2$ 、人均生态赤字为  $1.5217\text{hm}^2$ ,这种程度的生态超载有可能通过一些技术手段如国际贸易等来缓解。

对于中国来说,一方面仍是一个相对落后的发展中国家,有大量贫困人口基本的生存和生活条件还无法得到保证,而经济的高速增长是提高社会福利水平的唯一途径;但另一方面,经济的高速增长,伴随着人口规模的继续扩大,将形成对自然生态系统的进一步占用,产生巨大的生态压力,加剧业已存在的生态超载现象。因此,为实现“稳步调整”情景,本文提出以下致力于可持续发展的策略:

(1)重视技术的发展,提高土地生产力。在土

地有限的情况下,中国解脱生态赤字局面的根本途径之一在于稳定土地资源总量的情况下,提高土地的生物生产力。具体措施包括:维持与提高林、草生态系统的健康与服务功能,为农业生态系统和水资源提供天然的保护屏障;合理的生态农业系统结构与科学的田间管理措施是必不可少的;加大优良种子的利用,提高灌溉面积与灌溉效率;优化肥料投入的结构与数量,减少直至彻底消除不必要的化肥投入;同时增加机械化程度,使机械化土地管理、种植、收割的面积不断扩大等。

(2)促进生产对资源消耗的循环化和减量化,以解决中国面临的严重的资源“隐形流失”和“过度消耗”问题的。“隐形流失”表现在产品开采、收获、储藏、调运、加工、销售和消费中的总损失,“过度消耗”反映在生产环节物能转化和利用效率不高。具体措施包括:把生产系统组织成“自然资源→产品与用品→再生资源”的反馈式流;大力推进循环性的生态工业链和环境卫生业,尽可能将“废弃物”资源化和无害化;在资源开采、运输、加工、贮存、利用等环节提高效率与利用率,同时减少不必要的包装。

(3)倡导节约化的消费模式。在资源总量瓶颈、经济增长方式粗放、城市化发展、人口消费增长等多重发展约束或压力下,节约化是中国推进可持续发展不可或缺的策略之一。对于中国,最急切地节约需求表现为:土地,特别是耕地资源的集约利用;提高水资源,特别是农业水的使用效率,以及工业用水与家庭生活用水的回用率;优化能源结构,采用高效能生产工艺,提高能源系统综合效率;推行与环境优化的建筑结构,节约建设能耗与原材料消耗;培养均衡的膳食习惯,选择既有利于健康,又利于生态的生活模式和饮食结构。尽可能选择与环境友好或低影响的出行方式。

(4)重视国际贸易,努力构建资源贸易体系。对我国现在贸易飞速发展的良好状况,不应仅仅把着眼点放到贸易量的增长上,而更应该从新的角度理性分析贸易的资源占用情况,因为这关系到我国贸易可持续发展的自然资源基础。我国的贸易结构需要改变传统的粗放型生产方式,优化出口产品的结构,逐步向集约型、技术密集型的产品出口方式转变。同时,应增大初级产品的进口力度,以突破制约我国经济增长的资源瓶颈。除此之外,应高

2010年1月

度重视自主创新,努力发展具有自主知识产权的核心技术,生产技术含量高,附加值高,环境污染小、资源占用少的产品,使产品更具市场竞争力。

最后,应该提出的是,现有的生态足迹理论及模型在方法标准性、核算完整性、结果可靠性等方面仍有待提高与完善,同时虽然本文为生态足迹的动态模拟与预测研究提供了一个新的角度,从而对区域发展对自然生态系统的压力状态的预测、预警和相关政策制定提供科学支撑,但不可否认的是本文的情景预测是在各种假设条件下得出的数值,存在很多不足:如人均生态足迹的年均增长率和人均生物承载力的年均减少率保持不变,而现实中生态足迹的变化受各种因素影响,变化异常复杂,好在基本能够保证模型预测的趋势,预测模型还有待进一步完善和发展。

#### 参考文献 (References):

- [1] 李文华,刘某承.关于中国生态省建设指标体系的几点意见与建议[J].资源科学,2007,29(5):1-6.
- [2] 谢高地,鲁春霞.生态足迹方法作为生态系统评估工具的潜力[J].资源科学,2006,28(4):19-22.
- [3] 徐中民,张志强.可持续发展定量研究的几种新方法评介[J].中国人口·资源与环境,2000,10(2):60-64.
- [4] 徐中民,程国栋,张志强.生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法[J].生态学报,2001,21(9):1484-1493.
- [5] 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.
- [6] 李利锋,成升魁.生态占用——衡量可持续发展的新指标[J].自然资源学报,2000,15(4):375-382.
- [7] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000,16(10):8-10.
- [8] 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[J].生态学报,2004,24(10):2257-2262.
- [9] 刘宇辉.中国1961-2001年人地协调度演变分析—基于生态足迹模型的研究[J].经济地理,2005,25(2):219-222.
- [10] 陈六君,毛谭,刘为,等.生态足迹的实证分析—中国经济增长中的生态制约[J].中国人口·资源与环境,2004,14(5):53-57.
- [11] 曹淑艳,谢高地.基于投入产出分析的中国生态足迹模型[J].生态学报,2007,27(4):1499-1507.
- [12] 尚海洋,徐中民.甘肃省2002年生态足迹的投入-产出分析[J].冰川冻土,2007,29(5):837-844.
- [13] 任苇,刘年丰.生命周期影响评价(LCIA)方法综述[J].华中科技大学学报(城市科学版),2002,(19):83-86.
- [14] 闵庆文,余卫东,成升魁,等.商丘市居民生活消费生态足迹的时间序列分析[J].资源科学,2004,26(5):125-131.
- [15] 陈冬冬,高旺盛,陈源泉.生态足迹分析方法研究进展[J].应用生态学报,2006,17(10):1983-1988.
- [16] Wackernagel M., Rees, W. E. Our Ecological Footprint, Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriela Island, Philadelphia: New society Publishers, 1996.
- [17] 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.
- [18] Simmons, C., Chambers, N. Footprinting UK households: how big is your ecological garden?[J] *Local Environ*, 1998,3(3):355-362.
- [19] Bicknell K., Ball R., Cullen R., et al. New methodology for the ecological footprint with an application to New Zealand economy [J]. *Ecological Economics*, 1998,27(2):149-160.
- [20] Ferng J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity[J]. *Ecological Economics*, 2001,37(2):159-172.
- [21] 刘某承,李文华.基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J].自然资源学报,2009,24(9):1550-1559.
- [22] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society London*, 1998, 454: 903-995.
- [23] Huang N, Shen Z. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999,31: 417-457.
- [24] Huang D J, Zhao J P, Su J L. Practical implementation of the Hilbert-Huang Transform algorithm[J]. *Acta. Oceanologica sinica*, 2003, 25(1): 1-11.
- [25] 林振山,袁林旺,吴得安.地学建模[M].北京:气象出版社,2003.
- [26] 张明阳,王克林,刘会玉,等.基于EMD的洪涝灾害成灾面积波动的多时间尺度分析[J].中国农业气象,2005,26(4): 220-224.
- [27] 刘会玉,林振山,张明阳.基于EMD的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析[J].自然资源学报,2005,20(5):745-751.
- [28] 张衍广,林振山,李茂玲,等.基于EMD的山东省GDP增长与耕地变化的关系[J].地理研究,2007,26(6):1147-1155.
- [29] 孙娴,林振山.经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征[J].地理学报,2007,62(11):1132-1141.

# Analysis and Dynamic Prediction of China's Development Based on the Ecological Footprint Method

LIU Moucheng<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>, LI Wenhua<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Researches Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, China)

**Abstract:** Ecological footprint, as a kind of physical indicator to measure the extent of human's use of nature resources, has become one of the most effective methods to quantitatively assess sustainable development, also drawing much attention since developed by Wackernagel and Rees in 1996. In the present work, the authors calculated per capita ecological footprint and biocapacity in China during the period 1949 to 2008. Then, fluctuant cycles of the per capita ecological footprint and biocapacity were decomposed and derived based on the Empirical Mode Decomposition (EMD) method and nonlinear dynamic prediction models were also presented. We proposed two prediction scenarios, named the business-as-usual scenario and the steady adjustment scenario, to project ecological potential of China's economic development for the next 20 years. Results showed that over past 60 years, the per capita ecological footprint increased unsteadily. Meanwhile, the per capita biocapacity reduced consistently. Since 1985 China has showed an aggregated ecological deficit. It was found that the business-as-usual scenario tended to illuminate the consequence that per capita ecological footprint, per capita biocapacity and per capita ecological deficit would become 4.6033hm<sup>2</sup>, 0.7008hm<sup>2</sup> and 3.9024hm<sup>2</sup>, respectively, in China in 2030 if mean annual change rates of per capita ecological footprint and biocapacity remained constant, which would lead China to a grim and complex situation. It was also found that if productivity of natural ecosystems increased by 10%, the consumption of natural ecosystems and emission of CO<sub>2</sub> and contamination reduced by 10%, per capita ecological footprint, per capita biocapacity and per capita ecological deficit would become 2.4391hm<sup>2</sup>, 0.9174hm<sup>2</sup> and 1.5217hm<sup>2</sup>, respectively, in China in 2030, better benefiting potential of sustainable development in China than did the business-as-usual scenario. It should be pointed out that China's current situation is in a dilemma. On the one hand, China is still a developing country with a portion of population still living under the poverty line. Therefore, striving for developing domestic economy should have to be the only way to raise the level of living standard of people. On the other hand, the rapid growth of economy will increase population as well as result in more pressure on the ecological system, significantly aggravating the ecological overloading. As such, in order to really achieve the 'steady adjustment' scenario proposed in this work, some suggestions benefiting sustainable development were also given as follows: increasing land productivity for meeting growing demands, reducing over-consumption of resources with the objective of effectively mitigating ecological backpack, promoting resource-saving consumption and paying much attention to international trades.

**Key words:** Ecological footprint; Biocapacity; Dynamic model; Scenario analysis; China