

中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析及情景预测

陈成忠^{1,2}, 林振山^{1,*}

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

摘要:利用经验模态分解(EMD)方法分解并提取 1961~2001 年中国人均生态足迹与生物承载力变化的波动周期,建立具有周期性波动的非线性动力学预测模型,提出未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力变化的 3 种预测情景。结果表明:(1)40 a 来,中国人均生态足迹在波动中不断增加,具有明显的 3.5 a 和 8 a 两个波动周期;中国人均生物承载力在波动中不断减少,具有明显的 2.7 a 和 28 a 两个周期。(2)若一切照旧,即未来 50 a 中国人均生态足迹与生物承载力保持过去 40 a 的年均变化率不变,则人均生态足迹会持续上升,2050 年达到 $3.391 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$;人均生物承载力持续下降,2050 年降为 $0.490 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$;而人均生态赤字急剧拉大,2050 年为 $3.024 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$,可持续发展形势非常严峻。(3)若缓慢变化,即未来 20 a 中国人均生态足迹保持年均增长率 1.195%、人均生物承载力年均减少率 0.614% 不变,则 2025 年人均生态足迹为 $1.849 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、人均生物承载力为 $0.860 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、人均赤字 $0.989 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 。(4)若人均生态足迹快速减少,即 2025~2050 年中国人均生态足迹年均减少率为 0.996%、人均生物承载力年均减少率为 0.614% 不变,则 2050 年人均生态足迹为 $1.381 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、人均生物承载力 $0.739 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、人均生态赤字 $0.641 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$,但这需要中国经济发展和技术水平的极大提高、能源消费结构的多元化、居民消费意识和消费模式的快速转变、人民生活质量的极大改善。这样,中国的生态发展才有助于实现全球水平的生态可持续发展,在促进世界可持续发展的道路上起到积极的推动作用。

关键词:生态足迹;生物承载力;经验模态分解;动力学模型;非线性预测

文章编号:1000-0933(2007)12-5291-09 中图分类号:P46 文献标识码:A

Analysis and dynamic prediction of per capita ecological footprint and biocapacity in China based on empirical mode decomposition method

CHEN Cheng-Zhong^{1,2}, LIN Zhen-Shan^{1,*}

1 Geographical Science College, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Department of Environment and Tourism, Linyi Teachers College, Linyi 276005, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5291~5299.

Abstract: The fluctuant cycles of per capita ecological footprint and biocapacity in China from 1961 to 2001 are decomposed and picked-up based on empirical mode decomposition (EMD) method. Nonlinear dynamic prediction models are presented with the cycles. We proposed three prediction scenarios according to *Living Planet Report* 2006. The results

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:2007-03-25; **修订日期:**2007-09-24

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

致谢:感谢世界自然基金会中国分会赵云涛老师和庄士冠老师、环球足迹网络的 Audrey Peller 老师给予的帮助!

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

Received date: 2007-03-25; **Accepted date:** 2007-09-24

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

show that: 1) Over last 40 a, the obvious undulation cycles of per capita ecological footprint (EF) growth in China are 3.5 a and 8 a, and the periods of per capita biocapacity (BC) growth are 2.7 a and 28 a. 2) The business-as-usual scenario looks at the consequence that per capita EF would be $3.391 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, per capita BC would be $0.490 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, and per capita ecological deficit (ED) would be $3.024 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in China if their average annual change rates are constant. 3) The slow-shift scenario shows per capita EF in China would increase from $1.395 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2001 to $1.84 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2025 and per capita BC would fall from $0.9745 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2001 to $0.860 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2025 if their average annual change rates are corresponding 1.195% and 0.614%. Per capita ED in China would be $0.989 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2025. 4) The rapid-reduce scenario shows per capita EF, BC, and ED in China would fall from $1.795 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, $0.860 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, and $0.935 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2025 to $1.381 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, $0.739 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$, and $0.641 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ in 2050, respectively. But a hypothesis of this trend is the change of per capita EF and BC in China should keep the same trend of contemporaneous world. Therefore, China could denote sustainability at the global level.

Key Words: ecological footprint; biocapacity; EMD; dynamic model; nonlinear prediction

可持续发展既是一种忧患,又是一种目标。这种忧患和目标随不同时空域的社会经济发展状态和生态环境的可持续支持程度而不同,能否弱化忧患、实现目标、促进人类社会的有序演变,需要不断对自然资本做出客观评判以修正人们的活动实践^[1]。生态足迹指标作为一种衡量自然资本可持续利用的生物物理定量评价工具,吸引了众多学者进行了大量研究^[2~13],但基于长时间序列的生态足迹动态发展及数值预测研究较少。时间序列对于考察一个指标的问题、局限和优势,对于以直观的方式分析隐含、复杂的假设都是很有用处的^[14]。传统的时间序列谱分析方法多建立在傅立叶谱分析基础上,傅立叶谱分析可以在频域内获得非常高的分辨率,但在时域内毫无分辨率可言^[15];小波分析尽管在保留信号时域特征的同时具有一定的频域分辨率,但海森堡测不准原理限制了其时域和频域精度的提高,同时会产生很多虚假的谐波^[16,17];希尔伯特变换与小波变换相比,可以获得更精细的时频局部特征,却不适合宽波段信号^[15]。生态足迹的变化受人口、消费、土地、气候、科技、管理等众多社会、经济及自然因素影响,具有复杂的非线性特征,是非线性系统,在时间和空间上具多尺度特性,而且需要分析的时间序列也多是非线性、非平稳数据,此时各种经典的时间序列分析方法由于其本身的局限性,不能够真实地提取有关影响要素变化的自然变率,也不能有效揭示不同时间尺度变化的基本形态。

N. E. Huang 1998 年提出的希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)^[18],能够对非线性、非平稳信号逐级进行线性化、平稳化处理,并且是直观、直接、基于经验和自适应的。HHT 方法将信号作经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD),把不同周期的波动或趋势从原信号中逐级分离出来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,每一序列称为本征模态函数 (Intrinsic mode function, IMF),各 IMF 分量包含并突出了原信号中所含有的特征信息量,不同 IMF 分量是平稳信号,具有非线性特征,其显著的缓变波包特征意味着不同特征尺度波动的波幅随时间变化,具有时间上的局域化特征。对 IMF 分量进行希尔伯特变换,得到的希尔伯特谱和小波谱近似,但却提供了更加清晰详细的局部细节特征^[15]。测试结果表明,EMD 方法是目前提取数据序列趋势的最好方法之一,已成功应用于信号处理、图像处理、湍流、地震及大气科学等众多的非线性科学领域^[19,20]。本文使用 EMD 方法对 1961~2001 年中国人均生态足迹和生物承载力(数据来源于文献^[21,22])的变化规律进行分析,提取波动周期,建立具有周期性波动的非线性动力学预测模型,以世界自然基金会(WWF)《2006 地球生命力报告》^[23]提出的全球人均生态足迹变化的情景预测为参照,进行长时间序列的情景预测,分析中国未来可持续发展面临的挑战,并提出应对乃至消除生态超载的可能建议和措施。本研究对区域和全球可持续发展状态的预测、预警和相关政策制定具有参考和启示意义,也为生态足迹指标的预测性研究提供一个新的途径和方法。

1 EMD 方法介绍

EMD 方法将时间信号分解成一系列 IMF, 每个 IMF 分量具有如下特征:① 从全局特性看, 极值点数和过零点相等或至多相差一个;② 分别连接局部极大值和局部极小值所形成的两条包络线的均值在任一点处为零。

EMD 方法的分解过程是:找出时间序列 $x(t)$ 所有的极大值和极小值点, 分别用 3 次样条函数拟合成原始序列的上下包络线, 得到平均包络线 m_1 , 将原序列减去 m_1 可得到去掉低频的新序列 h_1 , 即:

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (1)$$

一般 h_1 不一定是一个平稳的数据系列, 需对它重复上述过程, 用 h_1 代替 $x(t)$, m_2 为 h_1 的平均包络线, 得到:

$$h_2 = h_1 - m_2 \quad (2)$$

多次重复上述过程, 使平均包络线趋近于零, 得到第一个 IMF 分量 c_1 , 代表原始序列中最高频的分量。从原始序列 $x(t)$ 中去掉 c_1 , 得到剩余部分为 r_1 :

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (3)$$

对 r_1 继续进行上述分解, 如此重复, 直到所得到的剩余部分为单一信号或其值小于预先给定的值, 分解结束。最终得到所有 IMF 及余量 r_n , r_n 代表原始序列的趋势:

$$r_1 = x(t) - c_1, \quad r_2 = r_1 - c_2, \dots, \quad r_n = r_{n-1} - c_n \quad (4)$$

因此, 原始时间序列 $x(t)$ 可表示为所有的 IMF 及趋势项:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (5)$$

对每一个 IMF 分量 $c_k(t)$ 进行 Hilbert 变换:

$$b_k(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_k(t')}{t - t'} dt' \quad (6)$$

P 为 Cauchy 主值, $c_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 可以构成一个复序列:

$$z_k(t) = A_k(t) \exp[i\phi_k(t)] \quad (7)$$

式中, $A_k(t) = \sqrt{c_k^2(t) + b_k^2(t)}$ 为瞬时振幅, $\phi_k(t) = \arctan[b_k(t)/c_k(t)]$ 为瞬时位相, 相应瞬时频率为 $\omega_k(t)$ 为 $d\phi_k(t)/dt$ 。

EMD 分解同小波变换一样, 存在边界处理问题。因为用三次样条函数构成上下包络线时, 数据序列的两端会出现发散现象, 并且这种发散不断逐渐向内“污染”, 使所得结果严重失真。层次越高、尺度越大, 边界效应越明显。本文采用特征波进行两端延拓方法处理边界效应^[25], 比较好地解决了边界对于 EMD 分解过程中的上冲和下冲现象。

2 1961 ~ 2001 年中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析

2.1 1961 ~ 2001 年中国人均生态足迹与生物承载力变化的基本态势

由图 1 可见, 近 40 a 来中国人均生态足迹总体上是在波动中不断增加, 而人均生物承载力在波动中不断减少。其中, 1961 ~ 1977 年的 12 a 为生态盈余期; 1978 年起, 由于实行改革开放政策, 中国开始进入人口和经济的高速增长期, 1978 ~ 2001 年为生态赤字期; 2001 年人均生态赤字达 $0.4213 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 。由图 1 可计算出, 人均生态足迹年均增长率为 1.78%, 人均生物承载力年均

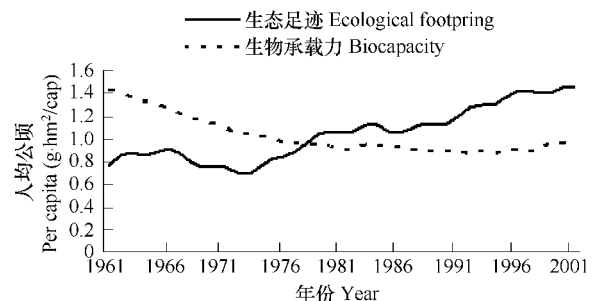


图 1 1961 ~ 2001 年中国人均生态足迹与生物承载力变化趋势^[21,22]

Fig. 1 Various trends of per capita EF and BC in China from 1961 to 2001^[21,22]

减少率为 1.53%。

2.2 1961~2001 年中国人均生态足迹与生物承载力波动的 EMD 分析

图 2、图 3 分别是对 1961~2001 年中国人均生态足迹与生物承载力系列数据进行 EMD 分解,提取的 IMF 分量及趋势量。由图 2 可看出:IMF₁分量表示一个 3.5 a 的周期性震荡,IMF₂表示 8 a 的周期性波动(表 1)。由图 3 可看出:IMF₁分量表示一个 2.7 a 的周期性震荡,IMF₂和 IMF₃分量分别表示 28 a、40 a 的周期性波动(表 2)。由于研究所覆盖的时间数据长度较短(只有 40 a),无法检验 40 a 波动周期存在的合理性,故将人均生物承载力的 IMF₃分量剔除。因此,本研究确定 1961~2001 年中国人均生物承载力存在 2.7a 和 28a 两个波动周期。

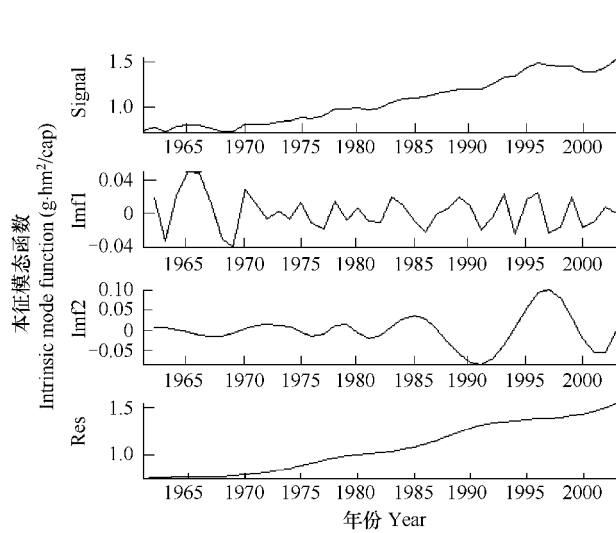


图 2 中国人均生态足迹变化的 IMF 分量及趋势量
Fig. 2 IMF and residual trend of per capita EF in China

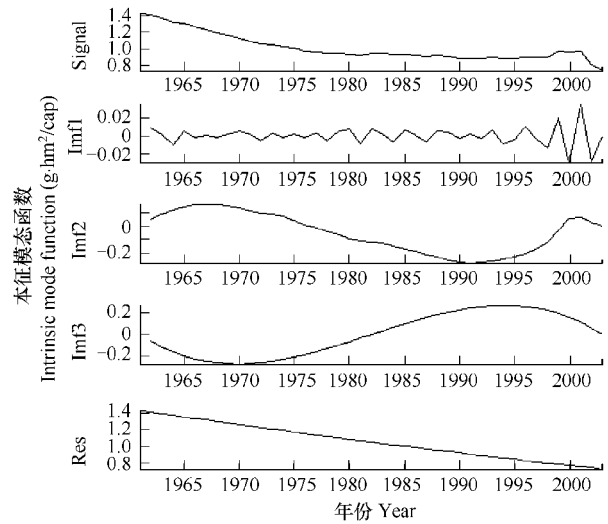


图 3 中国人均生物承载力变化的 IMF 分量及趋势量
Fig. 3 IMF and residual trend of per capita BC in China

表 1 中国人均生态足迹变化的 IMF 分量的周期、方差贡献率及排序

Table 1 Variance contribution by IMF₁₋₂ and its order

IMF _i	IMF ₁	IMF ₂	RES
周期 Periods (<i>T_i</i> , a)	3.5	8	∞
方差贡献率 Variance contribution (%)	0.6201	2.2878	97.092

表 2 中国人均生物承载力变化的 IMF 分量的周期、方差贡献率及排序

Table 2 Variance contribution by IMF₁₋₃ and its order

IMF _i	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	RES
周期 Periods (<i>T_i</i> , a)	2.7	28	40	∞
方差贡献率 Variance contribution (%)	0.1126	20.807	36.747	42.333

3 中国人均生态足迹和生物承载力的情景预测

3.1 模型建立

根据上述 EMD 分析,可以建立如下动力学预测模型:

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{i=1}^n r_i x \cos \frac{2\pi t}{T_i} \tag{8}$$

解之得:

$$x(t) = x_0 e^{rt + r_1 \frac{T_1}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{T_1}) + r_2 \frac{T_2}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{T_2}) + \dots + r_n \frac{T_n}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{T_n})} \tag{9}$$

式中: x 代表年人均生态足迹或生物承载力 ($\text{g} \cdot \text{hm}^2$), x_0 代表人均生态足迹或生物承载力的初值 ($\text{g} \cdot \text{hm}^2$), t 代表时间(a), r 代表人均生态足迹或生物承载力的年均变化率, T_i 代表周期。

分别将表 1、表 2 中的 T_i 代入式(9)可得:

$$EF(t) = EF_0 e^{rt + \frac{3.5}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{3.5})} + \frac{8}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{8}) \quad (10)$$

$$BC(t) = BC_0 e^{rt + \frac{2.7}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{2.7})} + \frac{28}{2\pi} \sin(\frac{2\pi t}{28}) \quad (11)$$

式(10)、(11)分别是带有周期性波动的中国人均生态足迹与生物承载力动力学预测模型。

3.2 情景预测及分析

3.2.1 一切照旧情景(Business-as-usual scenario)

假设未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力保持过去 40 a 的年均变化率 $r_{EF} = 1.78\%$ 、 $r_{BC} = -1.53\%$ 不变,以 2001 年人均生态足迹 $1.395 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、人均生物承载力 $0.974 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 作为初值,分别利用模型(10)和(11)预测未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力的变化趋势,表 3、图 4 所示。

表 3 $r_{EF} = 0.0178$ 、 $r_{BS} = -0.0153$ 时未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力预测值

Table 3 Prediction values of per capita EF and BC in China from 2001 to 2051 when $r_{EF} = 0.0178$ 、 $r_{BS} = -0.0153$ ($\text{g} \cdot \text{hm}^2/\text{cap}$)

年份 Year	生态足迹 Ecological footprint	生物承载力 Biocapacity	生态赤字 Ecological deficit	年份 Year	生态足迹 Ecological footprint	生物承载力 Biocapacity	生态赤字 Ecological deficit
2001	1.395	0.974	0.421	2030	2.277	0.677	1.599
2002	1.457	0.940	0.517	2035	2.589	0.544	2.045
2005	1.510	0.868	0.642	2040	2.770	0.513	2.257
2010	1.657	0.794	0.863	2045	3.040	0.509	2.531
2015	1.750	0.781	0.968	2050	3.391	0.490	2.901
2020	1.997	0.773	1.223	2051	3.509	0.485	3.024
2025	2.122	0.715	1.407				

由表 3、图 4 可以看出:未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力若保持过去 40 a 的变化趋势,则人均生态足迹会持续上升,2010 年将达到 $1.657 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2020 年达到 $1.997 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2030 年达到 $2.277 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2040 年达到 $2.770 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2050 年达到 $3.391 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$;人均生物承载力持续下降,2010 年将达到 $0.794 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2020 年降为 $0.773 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2030 年降到 $0.677 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2040 年为 $0.513 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2050 年为 $0.490 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$;而人均生态赤字急剧拉大,2010 年为 $0.863 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2020 年为 $1.223 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2030 年为 $1.599 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2040 年为 $2.257 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2050 年为 $3.024 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 。因此,若不采取有效措施降低人均生态足迹,一切照旧地发展下去,中国未来的可持续发展形势非常严峻。

3.2.2 缓慢变化情景(Slow-shift scenario)

《2006 地球生命力报告》^[23] 快速减少情景预测:若 2025 年、2050 年全球人均生态足迹分别为 $1.795 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、 $1.348 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$,人均生物承载力分别为 $1.538 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、 $1.461 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$,则 2050 年全球可以消除生态超载。据此,未来 50 a 全球人均生物承载力年均减少率为 0.614% (据《2006 地球生命力报告》表 3 计算得到)。从已有生态足迹研究成果看,一般较高的生态足迹意味着较高的经济发展水平,很多发达国家的人均生态足迹均较高^[1,7,23]。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,人们生活质量、生活水平逐步提

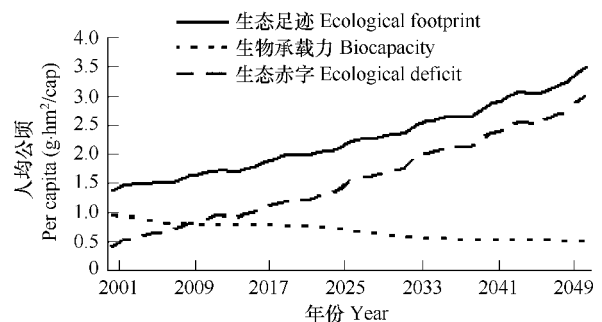


图 4 $r_{EF} = 0.0178$ 、 $r_{BC} = -0.0156$ 时未来 50 a 中国人均生态足迹和生物承载力预测值

Fig. 4 Prediction chart of per capita EF and BC in China from 2001 to 2051 when $r_{EF} = 0.0178$, and $r_{BC} = -0.0156$

高,未来 20 a 降低人均生态足迹是不可能的,只能通过改变消费模式、尽量多地使用可再生能源等措施降低人均生态足迹的增长率;尽管通过技术进步、提高管理水平等,可以增加全国总的生物承载力,但随着人口增长人均生物承载力仍会下降。为消除全球生态超载现象,若未来 20 a 中国人均生态足迹从 2001 年的 $1.395 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 增加到 2025 年全球人均水平 $1.795 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$,则年均增长率应为 1.195% ,即 $r_{EF} = 0.01195$;若人均生物承载力减少率为全球人均生物承载力减少率 0.614% ,即 $r_{BC} = -0.00614$ 。假如中国人均生态足迹保持年均增长率 $r_{EF} = 0.01195$ 、人均生物承载力保持年均减少率 $r_{BC} = -0.00614$ 不变,分别以 2001 年人均生态足迹 $1.395 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、人均生物承载力 $0.974 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 为初值,利用模型(10)和(11)作数值预测,表 4、图 5 所示。

表 4 $r_{EF} = 0.01195$ 、 $r_{BC} = -0.00614$ 时未来 20 a 中国人均生态足迹和生物承载力预测值

年份 Year	2001	2002	2005	2010	2015	2020	2025	2027
生态足迹 Ecological footprint	1.395	1.436	1.471	1.566	1.624	1.775	1.849	1.938
生物承载力 Biocapacity	0.974	0.960	0.930	0.897	0.892	0.888	0.860	0.842
生态赤字 Ecological deficit	0.421	0.476	0.541	0.669	0.733	0.887	0.989	1.096

由表 4、图 5 可看出:若未来 20 a 中国人均生态足迹保持年均增长率 1.195% 、人均生物承载力保持年均减少率 0.614% 不变,则人均生态足迹 2010 年将达到 $1.566 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2015 年将达到 $1.624 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2025 年达到 $1.849 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$;人均生物承载力 2010 年将达到 $0.897 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2015 年降为 $0.892 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2025 年降到 $0.860 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$;人均生态赤字 2010 年为 $0.669 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2015 年为 $0.733 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2025 年为 $0.989 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 。与一切照旧情景预测相比,2010、2015、2025 年的人均生态赤字分别缩小了 $0.194 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、 $0.236 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、 $0.418 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 。中国政府已经意识到中国的经济发展必须摆脱传统的高资源消耗、高环境污染的经济增长模式,也已经采取有力措施控制人口增长、提倡循环经济、倡导节约型社会,未来 20 a 有可能在保持经济稳定增长的同时降低生态赤字。因此,缓慢变化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。

3.2.3 快速减少情景(Rapid-reduce scenario)

20 a 后,伴随着中国经济发展和技术水平的极大提高,国民消费水平、消费意识和消费模式的迅速转变,假如 2025、2050 年中国人均生态足迹达到 WWF 在《2006 地球生命力报告》^[23] 快速减少情景中预测的全球平均水平,即 2025 年为 $1.795 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2050 年为 $1.348 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$,则年均减少率应为 0.996% ,即 $r_{EF} = -0.00996$;若人均生物承载力减少率仍为全球人均生物承载力减少率 0.614% ,即 $r_{BC} = -0.00614$ 。若中国人均生态足迹保持年均减少率 $r_{EF} = -0.00996$ 、人均生物承载力保持年均减少率 $r_{BC} = -0.00614$ 不变,分别以 2025 年人均生态足迹 $1.795 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、表 4 中 2025 年人均生物承载力 $0.860 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 为初值,利用模型(10)和(11)作数值预测,表 5、图 6 所示。

由表 5、图 6 可看出:若中国人均生态足迹在 2025 ~ 2050 年能够达到 WWF 快速减少情景预测的全球平均水平,即人均生态足迹和生物承载力分别保持年均减少率 0.996% 、 0.614% 不变,则人均生态足迹 2030 年将达到 $1.719 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2035 年达到 $1.611 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2040 年达到 $1.551 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2045 年达到 $1.479 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2050 年达到 $1.381 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$;人均生物承载力 2030 年降低为 $0.812 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2035 年降为 $0.771 \text{ g} \cdot \text{hm}^2$ 、2040 年降为 0.753

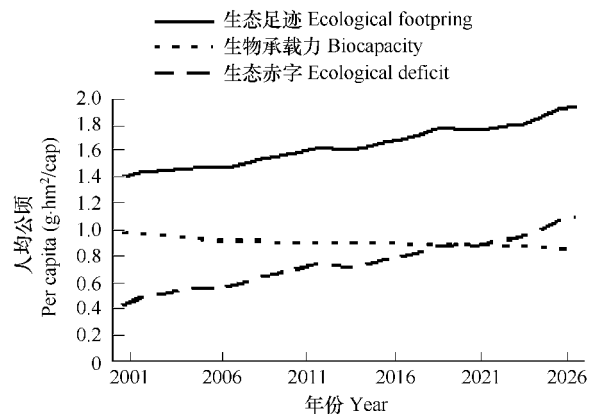


图 5 $r_{EF} = 0.01195$ 、 $r_{BC} = -0.00614$ 时未来 20 a 中国人均生态足迹和生物承载力预测值

Fig. 5 Prediction chart of per capita EF and BC in China from 2001 to 2027 when $r_{EF} = 0.01195$ and $r_{BC} = -0.00614$

$\text{g}\cdot\text{hm}^2$ 、2045 年达到 $0.750 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、2050 年达到 $0.739 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ；人均生态赤字 2030 年为 $0.907 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、2035 年为 $0.841 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、2040 年为 $0.798 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、2045 年为 $0.728 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、2050 年为 $0.641 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 。与一切照旧情景预测相比,2030、2035、2040、2045、2050 年的人均生态赤字分别缩小了 $0.692 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $1.204 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $1.459 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $1.803 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $2.260 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 。《2006 地球生命力报告》^[23] 公布的中国 2003 年人均生态赤字为 $0.4 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，与刘宇辉计算的中国 2001 年人均生态赤字几乎一致。与世界发达国家(如 2003 年人均生态赤字^[23]：美国 $4.8 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，比利时 $4.4 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，英国 $4.0 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，日本、挪威、瑞典和西班牙均为 $3.6 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，韩国 $3.5 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，德国 $2.8 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，芬兰 $2.6 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$) 相比，中国目前的生态赤字很小，但主要靠枯竭国内的生态资源储量弥补，通过国际贸易进口的生物承载力很少^[26]，而发达国家主要通过贸易弥补生态赤字，即“本国的生态足迹踩在别国的土地上”。因此，中国政府若在实现循环经济、提高资源利用效率、改善居民消费结构的基础上，也可以通过合理的贸易资源配置加大生物承载力进口，消除部分生态赤字。

表 5 $r_{EF} = -0.00996$ 、 $r_{BC} = -0.00614$ 时 2025 ~ 2050 年中国人均生态足迹和生物承载力预测值

Table 5 Prediction values of per capita EF and BC in China from 2025 to 2050 when $r_{EF} = -0.00996$, and $r_{BC} = -0.00614$ ($\text{g}\cdot\text{hm}^2/\text{cap}$)						
年份 Year	2025	2030	2035	2040	2045	2050
生态足迹 Ecological footprint	1.795	1.719	1.611	1.551	1.479	1.381
生物承载力 Biocapacity	0.860	0.812	0.771	0.753	0.750	0.739
生态赤字 Ecological deficit	0.935	0.907	0.841	0.798	0.728	0.641

4 结论与讨论

通过上述 EMD 分解、提取 1961 ~ 2001 年中国人均生态足迹与生物承载力变化的波动周期，建立具有周期性波动的非线性动力学预测模型，分一切照旧、缓慢变化、快速减少 3 种情景进行长时间序列的数值预测，得出以下结论：

(1) 40 a 来，中国人均生态足迹在波动中不断增加，具有明显的 3.5 a 和 8 a 两个波动周期；中国人均生物承载力在波动中不断减少，具有明显的 2.7 a 和 28 a 两个波动周期。

(2) 若一切照旧，即未来 50 a 中国人均生态足迹与生物承载力保持过去 40 a 的年均变化率不变，则 2050 年人均生态足迹、生物承载力、生态赤字将分别达到 $3.391 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $0.490 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $3.024 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，可持续发展形势非常严峻。

(3) 若缓慢变化，即未来 20 a 中国人均生态足迹保持年均增长率 1.195%、人均生物承载力年均减少率 0.614% 不变，则 2025 年人均生态足迹将达到 $1.849 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，人均生物承载力降为 $0.860 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、人均生态赤字为 $0.989 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 。这种程度的生态超载还有可能通过贸易引进生物承载力、通过技术进步、提高管理水平等增加生物承载力^[27]来缓解。

(4) 若 2025 ~ 2050 年中国人均生态足迹快速减少，达到 WWF 预测的全球同期人均水平，人均生物承载力同缓慢变化情景，则 2050 年人均生态足迹、生物承载力、生态赤字将分别为 $1.381 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $0.739 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ 、 $0.641 \text{ g}\cdot\text{hm}^2$ ，这样，中国的生态发展才有助于实现全球水平的生态可持续发展^[23]，在促进世界可持续发展的道路上起到积极的推动作用。

本文提出的非线性动力学预测模型及多情景预测，主要目的在于为生态足迹的预测性研究提供一种思路。它可以在实验室条件下模拟有关参数的值，对指导实践起到一定的辅助决策作用。只要提供合适的初

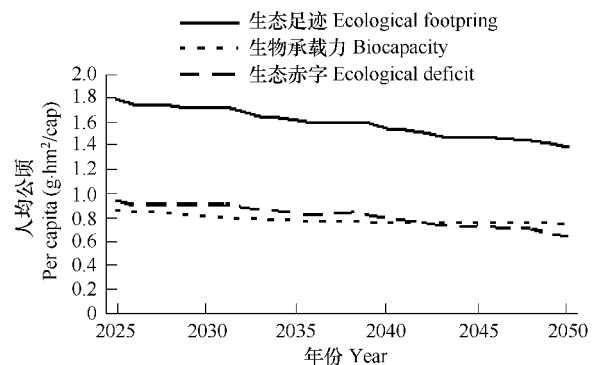


图 6 $r_{EF} = -0.00996$ 、 $r_{BC} = -0.00614$ 时 2025 ~ 2050 年中国人均生态足迹和生物承载力预测值

Fig. 6 Prediction chart of per capita EF and BC in from 2025 to 2050 when $r_{EF} = -0.00996$, and $r_{BC} = -0.00614$

值、 r 值及 T 值,就可以预测生态足迹和生物承载力的变化,为公众、政府及环境政策制定者提供一定的理论依据。当然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:如年均变化率保持不变,而现实中生态足迹的变化受各种因素影响,变化异常复杂;EMD 各 IMF 分量之间正交性较差,所提周期有虚假部分;模型比较粗略,只考虑了 EMD 分解图中的波动周期等。因此,今后的研究可从以下几方面完善模型:因为小波分解可以解决 EMD 各 IMF 分量正交性较差的问题^[28],可以结合小波分析提取共同周期,建立模型;将振幅、相位、方差贡献率等加入模型,提高预测精度;也可利用 SPSS 软件获取数据序列的趋势方程,再加入各 IMF 分量的波动部分,等等。

References:

- [1] Mao F, Bin G S, Xiao J S. Ecological footprint and appraising for regional sustainable development. *Areal Research and Development*, 2005, 24 (5):42—47.
- [2] Ferng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity. *Ecological Economics*, 2001, 37 (2):159—172.
- [3] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. Measuring sustainable development with the ecological footprint method—take Zhangye as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1484—1493.
- [4] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37(2):229—255.
- [5] 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.
- [6] Stöglhner G. Ecological footprint-A tool for assessing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*, 2003, (11):267—277.
- [7] Xu Z M, Cheng G D, Qiu G Y. ImPACTS identity of sustainability assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2):198—208.
- [8] 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(3):261—269.
- [9] Chen C Z, Lin Z S, Chen L L. A nonlinear dynamic analysis of ecological footprint and biocapacity. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3812—3816.
- [10] 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.
- [11] Li H, Zhang P D, He C Y, *et al.* Evaluating the effects of embodied energy in international trade on ecological footprint in China. *Ecological Economics*, 2007, 62(1):136—148.
- [12] Yue D X, Xu X F, Li Z Z, *et al.* Spatiotemporal analysis of ecological footprint and biological capacity of Gansu, China 1991—2015: Down from the environmental cliff. *Ecological Economics*, 2006, 58(2):393—406.
- [13] 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.
- [14] 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(1):25—45.
- [15] Lin Z S, Wang S G. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20 (1): 90—96.
- [16] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1992, (24):395—457.
- [17] Long S R, Lai R J, Huang N E, *et al.* Blocking and trapping of waves in an inhomogeneous flow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1993, 20:79—106.
- [18] Huang N E, Zheng S. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society London*, (454):903—995.
- [19] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, *et al.* Analysis of fluctuation of inundated area of flood disaster at multi-time scale based on empirical mode decomposition (EMD) method in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(4):220—224.
- [20] Liu H y, Lin Z S, Zhang M Y. Analysis of fluctuation of grain output in China and its causes at multi-time scale based on empirical mode decomposition method. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5):745—751.
- [21] 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.
- [22] Liu Y H. The Analysis of China's human-environment relationship fluctuations between 1961—2001: Study based on the EF model. *Economic Geography*, 2005, 25(2):219—222.
- [23] WWF, Zoological Society of London, Global Footprint Network. Living planet report 2006. http://www.panda.org/news_facts/publications/living

_planet_report/index. cfm.

- [24] Ivan M C, Richard G B. Empirical mode decomposition based time frequency attributes. Proc 69th SEG Meeting Houston, 1999, 73—91.
- [25] Huang D J, Zhao J P, Su J L. Practical implementation of the Hilbert-Huang Transform algorithm. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(1):1—11.
- [26] Liu J X, Gu X W, Li G J. Economic development and ecological footprint in China. Resource Science, 2005, 27(5):33—39.
- [27] China's footprint 1961—2002. <http://www.footprintnetwork.org>.
- [28] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, *et al.* On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. Acta Physica Sinica, 2005, 54(8):3947—3957.

参考文献:

- [1] 毛锋,宾国澍,肖劲松.生态足迹与区域可持续发展评价.地域研究与开发,2005,24(5):42~47.
- [3] 徐中民,程国栋,等.生态足迹方法:可持续定量研究的新方法——以张掖地区1995年为例.生态学报,2001,21(9):1484~1493.
- [7] 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.
- [9] 陈成忠,林振山,陈玲玲.生态足迹与生态承载力非线性动力学分析.生态学报,2006,26(11):3812~3816.
- [15] 林振山,汪曙光.近四百年北半球气温变化的分析:EMD方法的应用.热带气象学报,2004,20(1):90~96.
- [19] 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.中国农业气象,2005,26(4):220~224.
- [20] 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.自然资源学报,2005,20(5):745~751.
- [21] 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.
- [22] 刘宇辉.中国1961—2001年人地协调度演变分析.经济地理,2005,25(2):219~222.
- [25] 邓拥军,王伟,钱成春,等.EMD方法及Hilbert变换中边界问题的处理.科学通报,2001,46(3):257~263.
- [26] 刘建兴,顾晓薇,李广军,等.中国经济发展与生态足迹的关系研究.资源科学,2005,27(5):33~39.
- [28] 龚志强,邹明玮,高新全,等.基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究.物理学报,2005,54(8):3947~3957.