

基于 EMD 的平朔矿区生态足迹变化及动力学预测分析

薛建春

(内蒙古科技大学 经济管理学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:生态足迹是一种度量人类对自然利用程度的综合指标,它受到人口、土地、科技、消费等众多社会、经济和自然因素的影响,在时间和空间上具有多尺度特征。在计算平朔矿区 1989—2010 年人均 EF 的基础上,采用 EMD 和动力学预测方法,研究矿区人均 EF 的长时间序列演化规律,结果表明,矿区人均生态足迹存在一个 4.68 a 左右的准周期波动;从人均 EF 波动的趋势量分布来看,1989 年以来平朔矿区的人均生态足迹不断增长,且年平均增长率为 1.787 4%,但 2001 年以后的 10 a 间,由于矿区加强了土地复垦和生态重建工作,人均 EF 的年平均增长率下降为 0.046 7%;预测结果表明,虽然矿区人均 EF 依然呈上升趋势,但年均增长率减缓,模型预测 2020 年平朔矿区人均生态足迹为 2.566 hm²/cap;研究结果有助于了解矿区未来资源的利用情况和区域生态压力面临的问题,为有关部门制定和实施相应的可持续发展战略措施提供理论参考。

关键词:生态足迹;经验模态分解;平朔矿区

中图分类号:F062.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)06-0267-04

Analysis of Ecological Footprint Change and Dynamic Prediction in Pingshuo Mining Based on Empirical Mode Decomposition

XUE Jian-chun

(School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Ecological footprint is an integrated index of measuring the impact of human's consumption on eco-system. It is influenced by population, land technology consumer and many other social, economic and natural factors with multi-scale characteristics in time and space. The EF per capita from 1989 to 2010 was calculated used EMD and dynamic prediction to study the long time series evolution of EF per capita in mining area. The results showed that the EF per capita in mining area had the 4.68 years period. With respect to the trend quantity of fluctuate of EF per capita, the EF per capita continuous grew in Pingshuo mine since 1989. And the average annual growth rate was 1.787 5%. However, the average annual growth rate of EF per capita fell to 0.046 7% in the decade after 2001 because the land reclamation and ecological reconstruction were strengthened in mining area. The predicted results showed that the average annual growth rate slowed down although the EF per capita still rose. The model predicted that the EF per capita of Pingshuo mine will be 2.566 hm²/cap in 2020. The research results can contribute to understand the utilization of mine resources and the problem of regional ecological pressure and provide theoretical reference for building the sustainable development measures for relevant departments.

Key words: ecological footprint; empirical mode decomposition; Pingshuo mining

平朔矿区位于山西省北部,地处黄土高原东部生态脆弱区,座落在朔州市平鲁区和朔城区境内,西北沿长城与内蒙古自治区接壤,西南与本省忻州地区相邻,东连山阴县,北接右玉县。是我国首批国家煤炭规划矿区之一,矿区总面积 380 km²,矿区保有地质储量 112.21 亿 t,规划建设总规模为 9 350 万 t/a。

平朔矿区是全国性的大型煤矿区,其内矿产资源丰富、种类繁多;受矿业开采和城市建设的影 响,矿区内生态环境扰动剧烈,是一个对环境改变反应敏感、维持自身稳定可塑性较小的复合生态环境系统。

生态足迹(Ecological Footprint, EF)是一种可以衡量自然资本可持续利用的生物物理定量指标,它在

时间和空间上具有多尺度特性,受人口、土地、科技和消费等各种社会、经济和自然因素影响,若采用傅里叶分析或小波分析则不能够真实地提取出生态足迹变化的自然变率,也不能有效揭示生态足迹不同时间尺度变化的基本形态。希尔伯特—黄变化(Hilbert-Huang Transform, HHT)是对信号进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition),能将不同周期的波动或趋势从原始信号中逐级分离出来,进行希尔伯特变换后可以得到更加清晰详细的局部细节特征^[1]。

利用 EMD 法对 1989—2010 年平朔矿区的人均生态足迹变化规律进行分析,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,进行长时间序列的情景预测,分析矿区可持续发展面临的挑战,并提出应对或者消除生态超载的建议,以期对矿区生态平衡可持续发展状态预测和相关政策的制定提供参考,同时也为生态足迹的预测性研究提供一种新的方法。

1 EMD 方法简介

EMD 法是一种全新的、处理非平稳数据序列的方法,它可以在不需要设定基函数的情况下对一个信号按照其数据自身的时间尺度(频率)波动进行信号的逐级分离,产生不同特征尺度的数据序列,每个序列称为本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),IMF 分量里突出显示了包含在原始信号中的特征信息^[2]。每个 IMF 分量具备如下特征:① 从全局特性来看,极值点数和零点数据相等或者至多相差一个;② 分别连接其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^[3]。

经验模态分解法非常适合非平稳、非线性信号的分析,它是直接基于经验和自适应的。其分解步骤为:

(1) 找出原始非线性序列 $x(t)$ 的所有极值点,分别用三次样条函数拟合成原始序列的上下包络线,求得平均包络线 m_1 ;

(2) 计算去掉低频的新序列 h_1 ,即:

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

通常 h_1 仍然不是一个平稳的数据序列,需要对其重复上述计算过程,设 m_2 为 h_1 的平均包络线, h_2 是 h_1 去掉低频的新序列,则:

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

重复上述过程多次后,平均包络线趋近于零,得到第一个代表原始序列中最高频的 IMF 分量 c_1 ,原始序列 $x(t)$ 减去 c_1 ,得到剔除最高频分量后的序列 r_1 :

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

(3) 对 r_1 重复上述分解过程,直到剩余序列的值小于预先给定的值或者剩余项为单调信号,结束分

解过程提出所有的 IMF 分量和余量 r_n , r_n 代表原始序列的趋势。

$$r_1 = x(t) - c_1; r_2 = r_1 - c_2; \cdots; r_n = r_{n-1} - c_n$$

原始序列可以表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

经验模态分解过程每次都是将高频信号分离出来,剩下低频信号,因此得到的各个 IMF 分量分别是不同尺度(频率)的数据,最后剩余的是趋势分量 r_n 。由以上分解过程可见,EMD 方法可以有效地将信号中不同尺度(频率)的波动分解开来并提取出一个数据序列的趋势项。

(4) 对每一个分解后得到的 IMF 分量 $C_i(t)$ 进行 Hilbert 变换:

$$b_k(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_k(t')}{t-t'} dt' \quad (5)$$

p 是 cauchy 主值, $c_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 可以构成一个复序列:

$$z_k(t) = A_k(t) \exp[i\varphi_k(t)] \quad (6)$$

其中, $A_k(t) = \sqrt{c_k^2(t) + b_k^2(t)}$ 为瞬时振幅, $\varphi_k(t) = \arctan[b_k(t)/c_k(t)]$ 为瞬时相位,相应瞬时频率 $\omega_k(t)$ 为:

$$\omega_k(t) = d\varphi_k(t)/dt \quad (7)$$

EMD 方法在用三次样条函数构建原始序列的上下包络线时,原始信号数据序列的起点和终点会出现发散现象,也就是边界问题,可以采用特征波进行两端延拓的方法进行处理^[4]。

2 平朔矿区生态足迹波动多尺度分析

2.1 资料来源与相关参数说明

平朔矿区生物部分人均生态足迹计算的基础数据来源于 1989—2010 年《朔州市统计年鉴》,而矿区能源部分人均生态足迹计算的数据来源于矿区生产和销售的主要矿产资源数据,各类土地使用面积采用各年土地利用规划中的数据,具体计算过程省略,但说明如下:

(1) 这里计算的矿区生态足迹的账户主要包含六类生物生产性土地,分别是可耕地、林地、草地、建筑用地、水域和化石燃料用地。其中,生物资源生产(各类农产品、动物产皮、林产品和水果等)数据取自矿区内该类资源的产量数据,化石能源生产(煤炭、焦炭、焦炉、煤气、天然气、汽油、煤油、柴油、热力、电力等)数据取自该能源的消费数据。

(2) 采用可变产量因子^[5]。由于平朔矿区所处地理区域属于黄土丘陵地貌,且昼夜温差较大,光照

时间长等,使其各类生物生产性土地的平均生产力与全国同类土地的平均生产力存在差异,计算过程中若采用国家统一的产量因子将不能准确反映出平朔矿区的真实生态生产能力,所以在参考我国产量因子的基础上结合平朔矿区生物生产性土地的实际生产能力,按照不同土地类型的单位面积产量确定平朔矿区不同类型土地的产量因子:耕地 0.667,林地 0.292,草地 0.691,水域 0.496。

2.2 人均生态足迹及其变化的 EMD 分析

平朔矿区 1989—2010 年人均生态足迹变化曲线如图 1 所示,由图 1 可以看出,人均生态足迹总体上是在波动中不断上升的,从 1989 年的 1.481 91 hm²/cap 增加到 2010 年的 2.138 98 hm²/cap,增长了 1.44 倍,其增长原因主要有两个,一是人口的增加带动了各类土地需求量的增大,二是经济的快速发展和人们消费水平的提高导致人均生态足迹的增加。从构成比例来看,能源足迹、耕地足迹和建设足迹所占比重较大,但耕地足迹整体比例逐年减少,建设用地比例逐年增大。这主要是因为矿区的消费结构是以能源消费为主,再加上矿区城镇建设的加快,各类厂房以及居民的住宅、休闲娱乐场所增多导致了建设足迹的增大,客观上反映了矿区居民在社会经济活动中对自然生态资源需求的不断上升和对土地需求量的逐年增加。

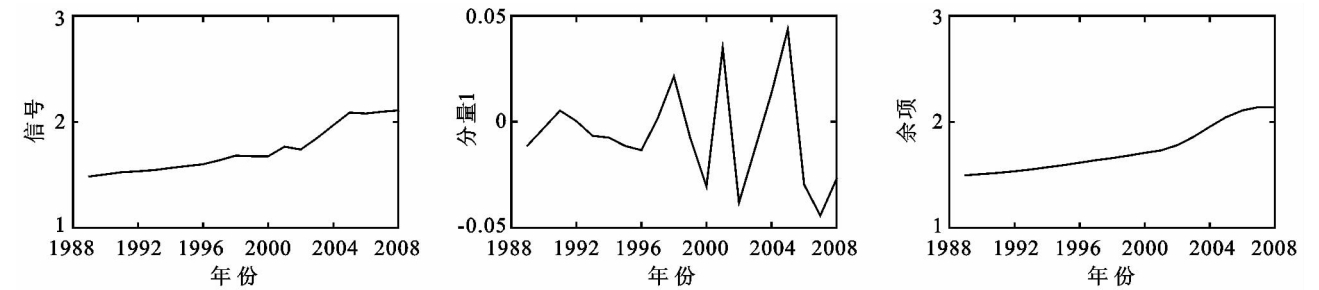


图 1 平朔矿区 1989—2010 年人均生态足迹

图 2 是对平朔矿区 1989—2010 年的人均生态足迹进行 EMD 分解后得到的分量图,从图 2 可以看出,将平朔矿区的人均生态足迹 EMD 分解后,提取出 1 个 IMF 分量和趋势分量,尽管一个 IMF 分量可能包含不同尺度变化的信息,但是同一时间段不同 IMF 分量不会包含同一个尺度的波动信号^[6]。所以按照“谷—谷”法划分,自 1989 年到 2010 年间,在 IMF₁ 尺度下可分为 4.68 个波动周期,即 IMF₁ 分量表示一个 4.68 a 的周期性震荡,方差贡献率为 1.358%,平均振幅 0.026 8;从趋势量来看,22 a 间人均生态足迹大致处于递增状态,且方差贡献率达 98.642%,平均振幅为 1.751。对 IMF₁ 分量进行希尔伯特变化,可以看出不同时间尺度下,不同历史时期的变化特征(表 1)。

图 2 1989—2010 年平朔矿区人均生态足迹变化的 IMF 分量及趋势量

表 1 各 IMF 分量及趋势量 Hilbert 变换后的统计值		
IMF _i	IMF1	RES
周期(T _i)/a	4.68	∞
方差贡献(k _i)/%	1.358	98.642
平均振幅	0.0268	1.751
初相位	1.081	1.214
中心频率	0.214	0
初始值	-0.0112	1.4931

根据计算,平朔矿区 22 a 中人均生态足迹的年平均增长率为 1.787 4%,可以在 EMD 分析的基础上建立如下动力学模型:

$$x_i = A_i \sin(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i) + \text{IMF}_i$$
$$\frac{dR}{dt} = rR_0, \text{积分得 } R(t) = R_0 e^{rt} \quad (8)$$
$$x(t) = R(t) + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i) + \text{IMF}_i]$$

也就是 $x(t) = R_0 e^{rt} + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\frac{2\pi t}{T_i} + \varphi_i) + \text{IMF}_i]$ (9)

式(9)就是建立的具有周期性波动的人均生态足迹普适动力学预测模型,式中: x ——人均生态足迹(hm²/cap); t ——时间(a); R_0 ——趋势量的初值(hm²); r ——人均生态足迹年均变化率; T_i ——周期(a); A_i ——平均振幅(hm²); φ_i ——初位相; IMF_i ——各 IMF 分量的初值(hm²)。

根据表 1 中的数据,将 $r=1.787\ 4\%$ 代入公式(9)中得到:

$$\text{EF}(t) = 1.4931e^{0.017874t} + 0.0268\sin(\frac{2\pi t}{4.68} + 1.081) - 0.0112 \quad (10)$$

式(10)就是具有周期性波动的平朔矿区人均生态足迹动力学模型。

2.3 模型检验及动力学预测分析

假设1989—2010年平朔矿区人均生态足迹的年均增长率保持1.7874%不变,利用模型(10)拟合1989—2010年平朔矿区的人均生态足迹(图3)。

平朔矿区1989—2010年人均生态足迹实际值与预测值的平均相对误差为-1.6544%,用平均误差修正矿区的人均生态足迹年均变化率 r ,得到修正以后的年均变化率为 $\bar{r}_{ef}=0.01173$,同时相应的人均生态足迹预测模型修改为:

$$EF(t)=1.4931e^{0.01137t}+0.0268\sin\left(\frac{2\pi t}{4.68}+1.081\right)-0.011 \quad (11)$$

利用(11)的模型预测平朔矿区1989—2020年的人均生态足迹,预测曲线见图4。从图4中可以看出,利用该模型进行人均生态足迹的预测是有效的。在1989—2010年间预测曲线更接近实际值,拟合度较好,因此自2011以后的10a中其预测效果也好于公式(10)。

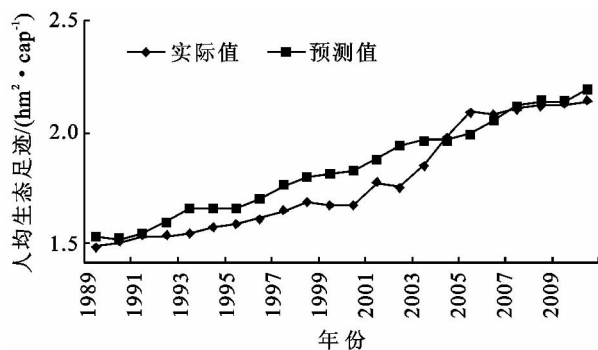


图3 1989—2010年平朔矿区人均生态足迹实际值与预测值对比

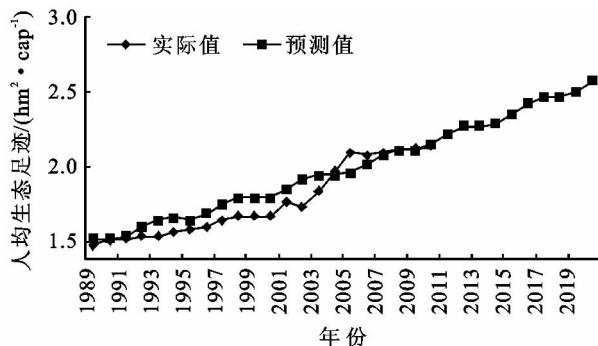


图4 模型修正后的1989—2020年平朔矿区人均生态足迹拟合曲线

整体上来看,2011年以后,矿区的人均生态足迹依然呈上升趋势,模型预测2020年人均生态足迹为2.56657 hm²/cap,超出2010年0.42759 hm²/cap,平均每年增长0.04276 hm²/cap,与前10a的0.046

724 hm²/cap相比略显缓慢,这主要是因为矿区提高各类土地资源的利用效益,通过优化产业结构,加快废弃土地的生态修复,降低了对环境的影响。

3 结论与讨论

通过对平朔矿区人均生态足迹波动的EMD分解,发现该区域的人均生态足迹主要存在一个4.68a左右的周期性波动,同时对该时间尺度分量和趋势分量进行希尔伯特变换后,发现自1989年以来矿区人均生态足迹不断增长,2010年矿区人均生态足迹为2.13898 hm²/cap,与1989年的1.48191 hm²/cap相比,增长了1.44倍;从构成比例来看,耕地所占比例逐年下降,建设用地逐年上升;建立周期性波动的矿区人均生态足迹非线性动力学预测模型,调整模型参数后预测未来10a矿区的人均生态足迹,发现未来10a该矿区的人均生态足迹依旧呈上升趋势,但上升率下降为0.04276 hm²/cap,这与近几年矿区开展生态修复和重建工作,减缓了耕地与草地的生态足迹比例下降速度密不可分。为了继续减缓矿区人均生态足迹的上升速度,矿区应该深化系统生态管理理念^[7],一方面加快矿区土地复垦与生态重建工作,另一方面构建生态产业链,发展循环经济,还要制定科学的计划与保障机制,注重土地利用结构在第三产业的调配,强调各类产业技术水平的提高,建立因地制宜的生态环境补偿机制等。

本文构建的非线性动力学预测模型,为生态足迹的预测研究提供了一种新思路,只要选择合适的初值、 r 值和 t 值,就可以在实验室条件下模拟相关参数的值,预测生态足迹的变化,为生态环境改善政策的制定提供理论依据。

参考文献:

- [1] 陈成忠,林振山,梁仁君.基于生态足迹方法的中国生态可持续性分析[J].自然资源学报,2008,23(2):230-236.
- [2] 王浩,王建华,秦大庸,等.现代水资源评价及水资源学学科体系研究[J].地球科学进展,2007,17(1):12-17.
- [3] 陈成忠,林振山.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[J].生态学报,2007,27(12):5291-5299.
- [4] 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.
- [5] 马祖琦,尹怀庭.陕西省粮食单产影响因子分析及粮食灾损评估[J].经济地理,2001,11,21(6):731-735.
- [6] 张学勤,陈成忠,林振山.中国生态足迹的多尺度变化及驱动因素分析[J].资源科学,2010,32(10):2005-2011.
- [7] 薛建春.基于生态足迹模型的矿区复合生态系统分析及动态预测[D].北京:中国地质大学,2010.