

中国能源足迹增长波动的驱动因子分析

陈成忠¹, 林振山^{2,*}

(1. 湖北师范学院地理科学系, 湖北 黄石 435002; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 基于生态足迹方法计算了中国 1953~2006 年的人均能源足迹, 利用经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 方法提取其增长的波动周期, 利用因子分析方法探讨了不同时间尺度下驱动中国人均能源足迹增长的主要因子。结果发现: (1) 53a 来, 中国人均能源足迹在波动中不断增长, 人均能源足迹年增长率存在准 4a、准 13a、准 17a 和准 27a 4 个主要波动周期; (2) 对与中国能源足迹波动高度相关的 37 个影响因子在 IMF₁、IMF₂、IMF₃ 3 个主要尺度下的因子分析发现, 人均 GDP 增长率、轻工业产值增长率、第二产业增长率、工业增长率、工业总产值增长率、社会消费品零售增长率、资本形成总额增长率、重工业产值增长率、第三产业增长率、建筑业增长率、交通运输仓储增长率等是 3 个尺度下共同的第 1 影响因子。据此, 建议中国的能源政策制定者更应关注稳定经济增长、优化产业结构、调整国内石油开采、提高交通运输效益等。

关键词: 能源足迹; 经验模态分解; 因子分析; 中国

文章编号: 1000-0933(2009)02-0758-10 中图分类号: Q148, X171.1, X24 文献标识码: A

Driving forces analysis of energy ecological footprint growth fluctuation in China

CHEN Cheng-Zhong¹, LIN Zhen-Shan^{2,*}

1 Department of Geographical Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0758 ~ 0767.

Abstract: The fluctuation periods of annual energy ecological footprint (EEF) growth rate in China are analyzed based on empirical mode decomposition (EMD) method. The main factors which influence the per capita EEF fluctuation in China are discussed with factor analysis method, too. The results show that: (1) China per capita EEF kept increasing with fluctuation in the past 53 years. The obvious undulation cycles of per capita EEF growth rate in China are 4a, 13a, 17a and 27a over last 53 years. (2) The common influenced factors which correlative coefficients of EEF are prominent are founded at their different timescales. The first common influenced factors are growth rate of per capita GDP, growth rate of light industry production value, growth rate of secondary industry production value, growth rate of industry product value, growth rate of gross industrial output value, growth rate of total retail sales of consumer goods, growth rate of gross capital formation, growth rate of heavy industry production value, growth rate of tertiary industry production value, growth rate of construction production value, growth rate of transport, storage, post and telecommunication services. The analysis findings from the common synthesized factors of 4a, 13a and 17a timescales of the thirty-seven factors suggest that China's energy policy-makers should attach more importance to stabilizing of economic growth, optimizing industrial structure, regulating domestic petroleum exploitation, and improving transportation efficiency, etc.

Key Words: energy ecological footprint (EEF); empirical mode decomposition (EMD); factor analysis; China

自然资源管理是可持续发展的核心, 有效的管理依赖于对自然资源的准确度量^[1]。生态足迹 (ecological

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40871083); 国家“211”二期工程重大资助项目

收稿日期: 2007-09-25; 修订日期: 2008-03-13

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

footprint, EF) 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^[2-12], 将人类对各种资源和能源的消费主要折算为 6 类生物生产性土地(指具有生态生产能力的土地或水体):化石能源地(fossil energy land)、可耕地(arable land)、林地(forest)、草场(pasture)、建筑用地(built-up areas)和海洋(sea)^[9]。研究表明,能源足迹(Energy ecological footprint, EEF)在生态足迹中占很大比重^[1,10,11],是影响生态足迹大小的最主要因素。如美国与德国都是发达国家,1999 年美国人均生态足迹(9.7 全球公顷,ghm²)是德国(4.7ghm²)的 2.06 倍,这主要是因为生活方式和能源消费不同的结果^[9,12]。WWF 等最新发布的《2006 地球生命力报告》^[13]指出,人类的能源足迹增长最快,2003 年超过 1961 年的 10 倍,几乎占到 6 类总生态足迹的一半(48%)。由于社会、经济、科技、生产、日常生活等众多因素的变化影响着人们的能源消费、决定着能源足迹的大小,揭示能源足迹的变化规律和影响因子,找出影响能源足迹增长的主要因子,为人类降低能源足迹、减少环境影响(生态足迹)提供可行的途径和方法很有必要。本文在计算中国 1953~2006 年人均能源足迹的基础上,利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法探讨 53a 来中国人均能源足迹的增长波动规律,利用因子分析方法分析影响中国人均能源足迹增长的主要因子,以期寻找减少能源足迹的有效途径,为中国的生态可持续发展决策提供借鉴,丰富并完善生态足迹指标的可持续发展度量体系。

1 1953~2006 年中国人均能源足迹增长的基本态势

采用目前普遍使用的碳汇法^[9,14-19]计算中国 1953~2006 年的人均能源足迹(图 1)^[20-23],即每消费单位化石能源所释放的二氧化碳所需要的林地吸收面积,水电不释放二氧化碳,其生态足迹计算是以建设水电站等设施所淹没的土地面积计算。不管化石能源产自哪里,只要在国内消费,二氧化碳都排放在国内,造成环境污染。因此,化石能源足迹以净消费量计算,需要进行进出口贸易调整。折算系数及转化标准^[14-17]如下:1t 原煤 = 0.7143t 标准煤,1t 原油 = 1.4286t 标准煤,1m³ 油天然气 = 1.33kg 标准煤,1kWh 电力 = 0.1229kg 标准煤,1kg 标准煤热能 = 7000kcal,1kcal = 4.1868 kJ,1MJ = 1 × 10⁶ J,1GJ = 1 × 10⁹ J。全球平均足迹为煤炭 55GJ/ghm²^①,石油 93GJ/ghm²,天然气 93GJ/ghm²,水电 1000GJ/ghm²。计算公式为:

$$EEF = \sum_{i=1}^4 \frac{c_i \times 7000 \times 4.1868}{m_i \times 10^6 \times N} \quad (1)$$

EEF 为人均能源足迹(ghm²),*i* = 1,2,3,4,分别表示能源消费项目原煤、原油、天然气和水电,*c_i* 为当年第 *i* 项能源消费量(kg 标准煤),*m_i* 为第 *i* 项能源消费的全球平均足迹(ghm²),*N* 为人口数量。

根据图 1 可计算出中国 1954~2006 年的人均能源足迹年变化率,图 2 所示。

由图 1、图 2 可以看出,近 53a 来中国人均能源足迹在波动中急剧上升。其中,1958 年的能源足迹增长率最大,为 82.1665%;1961 年的能源足迹减少率最大,为 33.1489%;其它年份的波动相对比较平缓;进入本世纪来,能源足迹的增长有加快趋势,如 2003 年增长率为 16.4217%,但近几年增长速率有所减缓,2006 年为 8.9951%。

2 中国人均能源足迹增长波动的多尺度分析

关于 EMD 方法简介请参阅陈成忠、林振山^[24],详细介绍可以参考文献^[25-29]。图 3 是对图 2 中国 1954~2006 年人均能源足迹年变化率数据进行 EMD 分解提取表征不同特征时间尺度的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)及趋势量。由图 3 可以看出,IMF₁分量表示准 4a 的周期性震荡,IMF₂表示准 13a 的周期

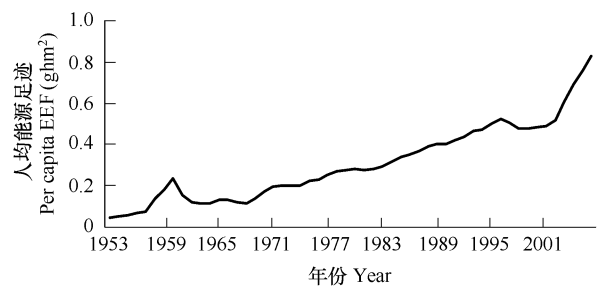


图 1 1953~2006 年中国人均能源足迹增长的基本态势
Fig. 1 The trend of per capita EEF in China from 1953 to 2006

① ghm² 意为全球公顷

性波动, IMF₃ 表示准 17a 的周期性波动, IMF₄ 表示准 27a 的周期性波动(表 1)。从各尺度方差贡献率来看, 中国能源足迹增长波动主要以 4a、13a、17a 为主; 从趋势上看, 中国能源足迹增长波动 1954 ~ 1985 年处于逐渐下降时期, 1986 年以后处于增长趋势; 整体上看, 1954 ~ 1975 年能源足迹增长的波动频繁、波幅较大, 1976 年以后, 波动比较平缓、波幅较小, 这主要与中国的社会、经济、科技、管理等因素有关。1953 年开始实施的第 1 个五年计划, 重点发展了高能源消耗的重工业, 1958 ~ 1960 年经济“大跃进”发展战略使能源大量消耗和浪费, 1961 ~ 1962 年中国经济出现负增长, 1978 年实行的改革开放使 1978 ~ 2000 年间的人均能源足迹

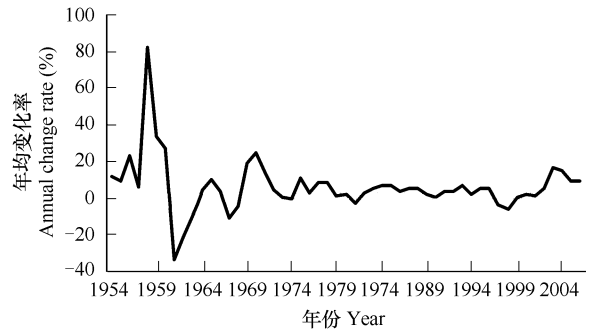


图 2 1954 ~ 2006 年中国人均能源足迹年变化率折线图
Fig. 2 Calculation of change ratio of EEF footprint in China from 1954 to 2006

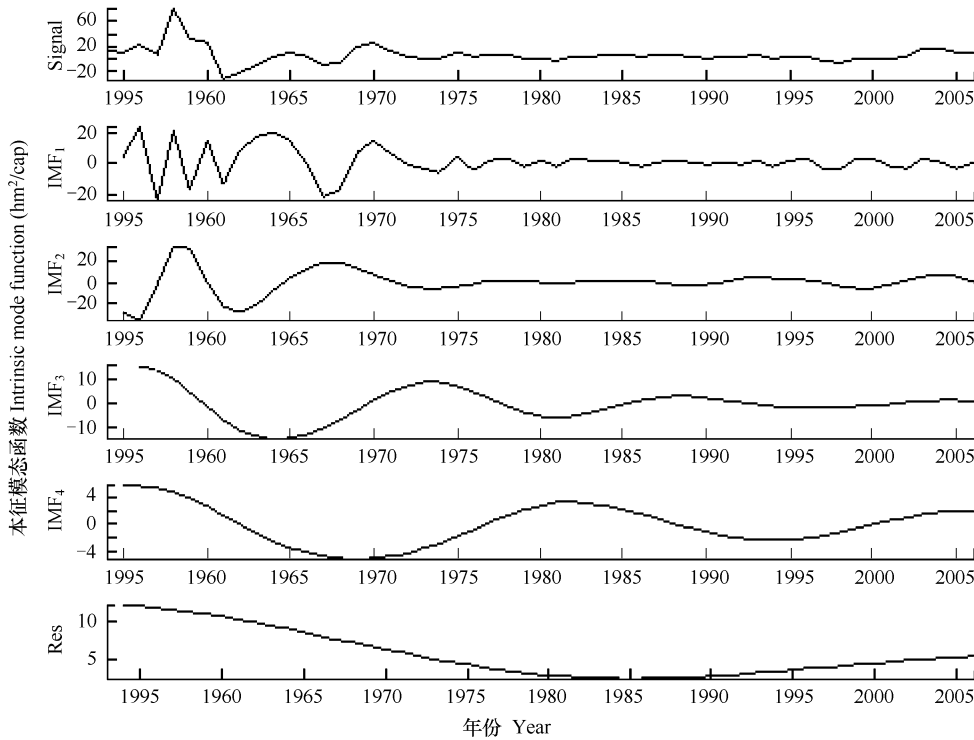


图 3 1954 ~ 2006 年中国人均能源足迹增长波动的 IMF 分量及趋势量
Fig. 3 IMF and residual trend R of change of per capita EEF

增长比较平稳。1997 ~ 1999 年中国经济在增长 8.11% 的同时, 能源足迹却下降了 10.75%, 主要因为市场需求疲软, 能源产品的需求减少, 一批污染大、高能耗的企业相继被关闭, 产业结构的优化, 技术进步等多种因素共同作用的结果。2000 年, 固定资产投资迅速增加, 重工业比重出现增大趋势, 钢铁、建材、电解铝等高能耗产业迅速扩张, 导致能源消费急剧增加, 甚至超过了经济增长速度。2003 ~ 2004 年中国能源足迹增长速度分别为 18.5%、15.0%, 同期经济增长速度分别为 8.3%、9.5%, 又表现出高能耗支撑国民经济发展的不良态势。

3 中国能源足迹增长波动的主要尺度因子分析

由于中国能源足迹增长波动主要以 IMF₁、IMF₂、IMF₃ 3 个尺度为主, 因此下面主要对这 3 个尺度的影响因素进行因子分析, 以期找出不同尺度下影响中国能源足迹增长波动的因素。

3.1 影响中国能源足迹增长波动因素的指标选取

首先选取与能源消费有关的经济增长、居民消费、产业结构、农业及农业产品、工业及工业产品、交通运输和邮电通信、对外贸易等近百个指标,采用 SPSS 分析软件分别做能源足迹与每一影响因子年变化率的相关分析,结果选取了 37 个高度相关因子,表 2 所示。

表 1 IMF 分量的周期、方差贡献率及排序

Table 1 Variance contribution by IMF₁₋₄ and its order

IMF _i	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	RES
周期 Periods (T _i , a)	4	13	17	27	∞
方差贡献率 Variance contribution (%)	31.86	46.01	16.26	2.84	3.03

表 2 中国人均能源足迹增长率与各因素增长率的相关系数一览表

Table 2 Correlative coefficients of change rates between per capita EEF and each of selected indices

因素 Factors	相关系数 Correlative coefficients	因素 Factors	相关系数 Correlative coefficients
经济增长 Economy growth		水泥产量 Cement output	0.644 **
人均 GDP Per capita GDP	0.385 **	木材产量 Timber output	0.495 **
资本形成总额 Gross capital formation	0.582 **	化肥产量 Chemical fertilizer output	0.382 **
社会消费品零售总额 Total retail sales of consumer goods	0.326 *	农药产量 Chemical pesticide output	0.379 **
产业结构 Industry structure		交通运输 Traffic and transport	
第一产业产值 Primary industry output value	-0.294 *	民用汽车拥有量 Number of civil vehicles owned	0.561 **
第二产业产值 Secondary industry output value	0.705 **	货运量 Freight traffic; Railways freight traffic	0.494 **
工业产值 Industry output value	0.709 **	铁路货运量 Railways freight traffic	0.859 **
建筑业产值 Construction output value	0.478 **	水运货运量 Waterways freight traffic	0.734 **
第三产业产值 Tertiary industry output value	0.300 *	航空货运量 Civil aviation freight traffic	0.685 **
交通邮电通信业 Transport, Storage, et al.	0.533 **	客运量 Passenger traffic	0.347 *
工业及工业产品 Industry and its production		公路客运量 Highways passenger traffic	0.404 **
工业总产值 Industry gross output value	0.675 **	航空客运量 Civil aviation passenger traffic	0.502 **
重工业产值 Heavy industry gross output value	0.819 **	货物周转量 Freight ton-kilometers	0.781 **
轻工业产值 Light industry gross output value	0.382 **	铁路货物周转量 Railways freight ton-kilometers	0.817 **
原煤产量 Coal output	0.932 **	公路货物周转量 Highways freight ton-kilometers	0.436 **
原油产量 Crude oil output	0.672 **	水运货物周转量 Waterways freight ton-kilometers	0.538 **
天然气产量 Natural gas output	0.416 **	航空货物周转量 Civil aviation freight ton-kilometers	0.525 **
发电量 Electricity	0.843 **	公路旅客周转量 Highways passenger-kilometers	0.520 **
生铁产量 Pig iron output	0.933 **	航空旅客周转量 Civil aviation passenger-kilometers	0.346 *
钢产量 Steel output	0.771 **		

* * 为通过 Pearson $\alpha = 0.01$ 双尾检验, * 为通过 Pearson $\alpha = 0.05$ 双尾检验

3.2 中国能源足迹增长波动的 IMF₁ 尺度因子分析

选取上述与中国能源足迹增长波动有关的 37 个因子进行 EMD 分解后所得各指标 IMF₁, 采用因子分析方法,并运用 Varimax 旋转,选取特征值大于 1 的因子,则各因子特征根及方差贡献率如表 3 所示。

表 3 IMF₁ 综合因子累积贡献率

Table 3 Cumulative variances of IMF₁ common factors

综合因子 Synthesized factors	特征根 Eigenvalues	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积贡献率 Cumulative variances (%)
1	9.608	25.967	25.967
2	8.633	23.333	49.300
3	3.709	10.023	59.324
4	2.944	7.956	67.279
5	2.469	6.672	73.951
6	1.909	5.159	79.110
7	1.659	4.485	83.595

由表 3 可以看出,共有 7 个综合因子特征值大于 1,累积贡献率为 83.595%。因此,可以通过这 7 个综合因子反映出 IMF₁ 尺度的波动情况。

由表 4 可看出,在 IMF₁ 尺度中下影响中国能源足迹增长波动的 7 个综合因子可以解释为表 5 所示。

表 4 各因素增长率 IMF₁ 尺度因子旋转后载荷矩阵
Table 4 Rotated component matrix of IMF₁ scale of all factors growth

因素 Factors	1	2	3	4	5	6	7
人均 GDP	0.939	-0.071	0.074	0.117	0.101	-0.020	0.154
轻工业产值	0.891	-0.011	0.065	0.130	0.100	-0.020	0.021
第二产业	0.867	0.353	0.153	0.228	0.123	-0.038	0.023
工业	0.861	0.395	0.111	0.149	0.142	-0.030	0.050
工业总产值	0.824	0.324	0.129	0.048	0.118	0.031	0.041
重工业产值	0.762	0.530	0.166	0.035	0.125	0.076	0.026
社会消费品零售	0.758	-0.151	0.205	0.160	0.144	0.298	0.040
资本形成总额	0.750	0.374	0.199	0.086	0.142	-0.269	-0.031
第三产业	0.747	-0.104	0.128	-0.017	-0.054	0.173	0.370
建筑业	0.651	0.100	0.229	0.550	-0.019	-0.058	-0.209
交通邮电通信业	0.645	0.254	0.169	-0.023	0.091	0.061	0.069
原油产量	-0.064	0.881	0.123	0.061	0.087	0.031	-0.015
铁路货运量	0.385	0.822	0.180	0.154	0.179	0.074	0.176
发电量	0.324	0.820	0.187	0.195	0.170	0.233	0.053
钢产量	0.382	0.744	0.122	0.302	0.160	0.068	0.258
铁路货物周转量	0.468	0.735	0.135	0.205	0.225	-0.014	0.215
生铁产量	0.447	0.729	0.242	0.060	0.154	0.076	0.216
天然气产量	-0.169	0.678	-0.040	-0.093	0.033	0.534	-0.041
第一产业	0.366	-0.673	-0.024	-0.044	0.205	-0.029	0.123
原煤产量	0.423	0.648	0.271	-0.040	0.136	0.096	0.138
货物周转量	0.458	0.637	0.207	0.168	0.298	0.006	0.421
化肥产量	0.053	0.617	-0.208	0.501	0.244	-0.182	-0.023
水泥产量	0.509	0.589	0.107	0.407	0.208	-0.244	-0.011
水运货运量	0.445	0.573	0.306	0.133	0.075	0.083	0.365
木材产量	0.311	0.572	0.058	0.283	0.251	-0.350	-0.102
航空客运量	0.131	0.108	0.875	0.228	0.099	0.056	0.195
航空旅客周转量	0.105	0.021	0.845	0.303	0.061	-0.125	0.264
航空货物周转量	0.319	0.266	0.742	-0.021	0.203	0.185	-0.209
航空货运量	0.408	0.365	0.661	-0.007	0.211	0.249	-0.207
民用汽车拥有量	0.363	0.207	0.446	-0.106	0.050	0.237	0.271
公路客运量	0.186	0.154	0.250	0.826	0.168	0.260	0.006
公路旅客周转量	0.334	0.199	0.308	0.694	0.150	0.377	0.107
农药产量	-0.023	0.462	0.041	0.526	0.016	-0.066	0.279
公路货物周转量	0.188	0.179	0.152	0.120	0.924	0.081	0.052
货运量	0.199	0.262	0.200	0.149	0.882	0.058	0.114
客运量	0.113	0.125	0.208	0.316	0.127	0.846	-0.000
水运货物周转量	0.229	0.436	0.253	0.096	0.200	-0.030	0.720

3.3 中国能源足迹增长波动的 IMF₂ 尺度因子分析

选取上述与中国能源足迹增长波动有关的 37 个因子进行 EMD 分解后所得各指标 IMF₂, 采用因子分析方法, 并运用 Varimax 旋转, 选取提取 6 个公因子, 各因子特征根及方差贡献率如表 6 所示。

表 5 各影响因素增长率 IMF₁ 尺度各综合因子解释Table 5 Explained of common factors of IMF₁ scale

综合因子 Synthesized factors	因子解释 Explanation of synthesized factors	主要因素 Annual change rates of main factors	方差贡献率 Variance contribution(%)
第 1 类综合因子	经济增长、产业结构及工业产值	人均 GDP、轻工业产值、第二产业产值、工业产值、工业总产值、重工业产值、社会消费品零售、资本形成总额、第三产业产值、建筑业产值、交通运输仓储等	25.967
第 2 类综合因子	工业产品产量、运输、第一产业产值	原油产量、铁路货运量、发电量、钢产量、铁路货物周转量、生铁产量、天然气产量、第一产业、原煤产量、货物周转量、化肥产量、水泥产量、水运货运量、木材产量	23.333
第 3 类综合因子	航空运输及民用汽车拥有量	航空客运量、航空旅客周转量、航空货物周转量、航空货运量、民用汽车拥有量	10.023
第 4 类综合因子	公路运输农药产量	公路客运量、公路旅客周转量、农药产量	7.956
第 5 类综合因子	货物运输	公路货物周转量、货运量率	6.672
第 6 类综合因子	客运量	客运量	5.159
第 7 类综合因子	水运货物周转量	水运货物周转量	4.485

表 6 各因素增长率 IMF₂ 综合因子累积贡献率Table 6 Cumulative variances of IMF₂ common factors

综合因子 Synthesized factors	特征根 Eigenvalues	方差贡献率 Variance contribution(%)	累积贡献率 Cumulative variances(%)
1	9.606	25.961	25.961
2	7.806	21.097	47.059
3	3.646	9.853	56.912
4	3.467	9.370	66.281
5	2.828	7.643	73.924
6	2.452	6.627	80.551

由表 6 可以看出, 6 个综合因子累积贡献率为 80.551%。因此, 可以通过这 6 个综合因子反映出 IMF₂ 尺度的波动情况。

由表 7 可看出, 在 IMF₂ 尺度下影响中国能源足迹增长波动的 6 个综合因子可以解释为表 8 所示。

表 7 各因素增长率 IMF₂ 尺度因子旋转后载荷矩阵Table 7 Rotated component matrix of IMF₂ scale of all factors growth

因素 Factors	1	2	3	4	5	6
人均 GDP	0.944	-0.059	0.067	0.111	0.071	0.106
轻工业产值	0.890	-0.024	0.010	0.053	0.103	0.102
第二产业	0.865	0.302	0.283	0.125	0.113	0.123
工业	0.858	0.360	0.241	0.083	0.062	0.144
工业总产值	0.819	0.332	0.110	0.068	0.073	0.129
资本形成总额	0.755	0.303	0.263	0.196	-0.139	0.143
重工业产值	0.753	0.535	0.147	0.063	0.108	0.137
第三产业	0.750	0.010	-0.138	0.213	0.133	-0.044
社会消费品零售	0.744	-0.085	-0.073	0.149	0.408	0.148
建筑业	0.651	-0.036	0.435	0.181	0.329	-0.036
交通运输仓储等	0.640	0.291	0.014	0.121	0.067	0.097
原油产量	-0.080	0.813	0.333	0.046	0.033	0.083
发电量	0.300	0.789	0.320	0.100	0.277	0.166
铁路货运量	0.371	0.785	0.348	0.175	0.103	0.175

续表

因素 Factors	1	2	3	4	5	6
天然气产量	-0.210	0.752	-0.043	-0.189	0.303	0.035
生铁产量	0.446	0.746	0.210	0.183	0.083	0.170
原煤产量	0.424	0.701	0.076	0.161	0.063	0.160
钢产量	0.372	0.678	0.453	0.174	0.163	0.150
铁路货物周转量	0.460	0.674	0.405	0.173	0.060	0.217
货物周转量	0.458	0.627	0.321	0.310	0.041	0.298
水运货运量	0.444	0.599	0.210	0.352	0.127	0.082
第一产业	0.386	-0.598	-0.250	0.026	-0.027	0.220
水运货物周转量	0.245	0.486	0.196	0.485	-0.068	0.206
航空货运量	0.397	0.461	-0.130	0.397	0.344	0.239
民用汽车拥有量	0.371	0.371	-0.228	0.356	0.194	0.091
化肥产量	0.040	0.367	0.769	-0.106	0.033	0.200
水泥产量	0.503	0.403	0.627	0.175	0.004	0.182
农药产量	-0.016	0.316	0.609	0.158	0.197	-0.005
木材产量	0.311	0.382	0.567	0.097	-0.144	0.228
航空旅客周转量	0.133	0.045	0.121	0.936	0.139	0.071
航空客运量率	0.133	40.05	0.121	0.936	0.139	0.071
航空货物周转量	0.310	0.357	-0.148	0.520	0.312	0.226
客运量	0.075	0.260	-0.125	0.061	0.860	0.125
公路旅客周转量	0.322	0.154	0.388	0.301	0.734	0.128
公路客运量	0.322	0.154	0.388	0.301	0.734	0.128
公路货物周转量	0.177	0.162	0.149	0.110	0.168	0.922
货运量	0.190	0.243	0.194	0.184	0.146	0.882

表 8 各影响因素增长率 IMF₂ 尺度各综合因子解释Table 8 Explained of common factors of IMF₂ scale

综合因子 Synthesized factors	因子解释 Explanation of synthesized factors	主要因素 Annual change rates of main factors	方差贡献率 Variance contribution (%)
第 1 类综合因子	经济增长、工业产值及产业结构	人均 GDP、轻工业产值、第二产业产值、工业产值、工业总产值、资本形成总额、重工业产值、第三产业产值、社会消费品零售、建筑业产值、交通运输仓储等	25.961
第 2 类综合因子	工业产品产量、货运量及第一产业产值	原油产量、铁路货运量、天然气产量、生铁产量、原煤产量、钢产量、铁路货物周转量、货物周转量、水运货运量、第一产业产值、水运货物周转量、航空货运量	21.097
第 3 类综合因子	农业及建筑材料	化肥产量增长率、农药产量增长率、水泥产量增长率、木材产量增长率	9.853
第 4 类综合因子	航空运输	航空旅客周转量、航空客运量、航空货物周转量	9.370
第 5 类综合因子	旅客运输	客运量、公路旅客周转量、公路客运量	7.643
第 6 类综合因子	货物运输	公路货物周转量、货运量	6.627

3.4 中国能源足迹增长波动的 IMF₃ 尺度因子分析

选取上述与中国能源足迹增长波动有关的 37 个因子进行 EMD 分解后所得各指标 IMF₃, 采用因子分析方法, 并运用 Varimax 旋转, 选取特征值大于 1 的因子, 则各因子特征根及方差贡献率如表 9 所示。

由表 9 可以看出, 共有 7 个综合因子特征值大于 1, 累积贡献率为 82.338%。因此, 可以通过这 7 个综合因子反映出 IMF₃ 尺度的波动情况。

表 9 各因素增长率 IMF₃ 综合因子累积贡献率Table 9 Cumulative variances of IMF₃ common factors

综合因子 Synthesized factors	特征根 Eigenvalues	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积贡献率 Cumulative variances (%)
1	9.738	26.318	26.318
2	8.598	23.238	49.555
3	3.329	8.996	58.552
4	2.706	7.314	65.866
5	2.436	6.583	72.449
6	2.265	6.122	78.570
7	1.394	3.767	82.338

表 10 各因素增长率 IMF₃ 尺度因子旋转后载荷矩阵Table 10 Rotated component matrix of IMF₃ scale of all factors

因素 Factors	1	2	3	4	5	6	7
人均 GD	0.941	-0.047	0.103	-0.008	0.102	0.075	0.167
轻工业产值	0.903	-0.009	0.044	-0.006	0.096	0.090	0.016
第二产业	0.872	0.371	0.153	-0.008	0.132	0.182	-0.013
工业	0.868	0.403	0.094	0.027	0.148	0.109	0.008
工业总产值	0.827	0.330	0.116	0.044	0.117	0.014	-0.015
社会消费品零售总额	0.772	-0.175	0.233	0.308	0.120	0.117	0.065
资本形成总额	0.764	0.386	0.072	-0.128	0.165	0.073	-0.010
重工业产值	0.763	0.539	0.156	0.090	0.129	-0.013	-0.060
第三产业产值	0.730	-0.080	0.185	0.106	-0.078	-0.032	0.490
建筑业产值	0.661	0.139	0.290	-0.106	-0.001	0.498	-0.214
交通运输仓储等	0.631	0.263	0.128	0.030	0.071	-0.030	0.208
原油产量	-0.056	0.878	0.073	0.106	0.087	0.057	-0.054
铁路货运量	0.396	0.824	0.164	0.106	0.168	0.139	0.163
发电量	0.328	0.804	0.189	0.264	0.144	0.200	0.062
生铁产量	0.464	0.756	0.266	0.065	0.172	-0.037	0.027
钢产量	0.387	0.753	0.149	0.087	0.148	0.289	0.255
铁路货物周转量	0.484	0.745	0.116	0.019	0.221	0.174	0.197
原煤产量	0.428	0.685	0.310	0.047	0.169	-0.153	-0.123
货物周转量	0.473	0.660	0.217	0.036	0.301	0.114	0.386
第一产业产值	0.362	-0.657	0.042	-0.117	0.202	-0.053	0.089
水泥产量	0.520	0.599	0.059	-0.170	0.207	0.420	0.084
化肥产量	0.068	0.597	-0.205	-0.117	0.221	0.570	0.063
水运货运量	0.528	0.571	0.273	0.238	0.078	0.039	0.268
木材产量	0.373	0.554	-0.085	-0.149	0.280	0.300	-0.138
航空客运量	0.165	0.137	0.904	0.001	0.119	0.136	0.110
航空旅客周转量	0.148	0.050	0.850	-0.139	0.086	0.225	0.232
民用汽车拥有量	0.366	0.267	0.550	0.148	0.100	-0.292	-0.082
航空货运量	0.425	0.351	0.533	0.255	0.199	-0.021	-0.166
公路旅客周转量	0.065	0.087	-0.007	0.776	0.116	0.090	-0.086
航空货物周转量	0.030	0.037	-0.180	0.773	0.021	-0.267	0.212
客运量	0.104	0.089	0.388	0.722	0.083	0.274	-0.034
天然气产量	-0.181	0.601	-0.034	0.641	-0.025	0.004	0.029
公路货物周转量	0.199	0.177	0.137	0.131	0.923	0.091	0.034
货运量	0.212	0.263	0.190	0.112	0.883	0.123	0.089
公路客运量	0.219	0.153	0.385	0.212	0.173	0.744	-0.079
农药产量	0.046	0.459	0.058	0.054	0.018	0.491	0.145
水运货物周转量	0.251	0.468	0.296	0.043	0.216	0.015	0.652

由表 10 可看出,在 IMF₃尺度下影响中国能源足迹增长波动的 7 个综合因子可以解释为表 11 所示。

表 11 各影响因素增长率 IMF₃尺度各综合因子解释
Table 11 Explained of common factors of IMF₃ scale

综合因子 Synthesized factors	因子解释 Explanation of synthesized factors	主要因素 Annual change rates of main factors	方差贡献率 Variance contribution (%)
第 1 类综合因子	经济增长、产业结构及工业产值	人均 GDP、轻工业产值、第二产业产值、工业产值、工业总产值、社会消费品零售、资本形成总额、重工业产值、第三产业产值、建筑业产值、交通运输仓储等	26.318
第 2 类综合因子	工业产品产量、运输、第一产业产值	原油产量、铁路货运量、发电量、生铁产量、钢产量、铁路货物周转量、原煤产量、货物周转量、第一产业产值、水泥产量、化肥产量、水运货运量、木材产量	23.238
第 3 类综合因子	航空运输民用汽车	航空客运量、航空旅客周转量、民用汽车拥有量率、航空货运量	8.996
第 4 类综合因子	运输及天然气产量	公路旅客周转量、航空货物周转量、客运量、天然气产量	7.314
第 5 类综合因子	货物运输	公路货物周转量、货运量	6.583
第 6 类综合因子	客运量	公路客运量、农药产量	6.122
第 7 类综合因子	水运货物周转量	水运货物周转量	3.767

4 结论

本文通过计算 1953~2006 年中国的人均能源足迹,利用 EMD 方法提取其增长变化的波动周期,并探讨了不同波动尺度下影响中国人均能源足迹增长的驱动因子,结果发现:

(1) 53a 来,中国人均能源足迹在波动中不断增长,近几年增长趋势加快。中国人均能源足迹年增长率存在准 4a、准 13a、准 17a 和准 27a 的 4 个主要波动周期。

(2) 对与中国能源足迹波动高度相关的 37 个影响因子在 IMF₁、IMF₂ 和 IMF₃ 3 个主要尺度下的因子分析发现,人均 GDP 增长率、轻工业产值增长率、第二产业增长率、工业增长率、工业总产值增长率、社会消费品零售增长率、资本形成总额增长率、重工业产值增长率、第三产业增长率、建筑业增长率、交通运输仓储增长率等是 3 个尺度下共同的第一影响因子。

(3) 政策建议:中国能源政策制定者更应关注稳定经济增长、优化产业结构、调整国内石油开采、提高交通运输效益等。此外,中国能源政策的近期目标还应关注重工业、铁路货运、客运量等,中期目标应关注第三产业、发电量、天然气、化肥产量等,长期目标应关注社会消费品零售、铁路货运、生铁产量、公路客运周转量、航空货运周转量等。

References:

- [1] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, *et al.* Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21(3):271-278.
- [2] Muñiz I, Galindo A. Urban form and the ecological footprint of commuting: the case of Barcelona. *Ecological Economics*, 2005, 55(4):499-514.
- [3] 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.
- [4] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, *et al.* New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2):149-160.
- [5] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts Based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3):231-246.
- [6] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37(2):229-255.
- [7] Gössling S, Hansson C B, Hrstmeier O, *et al.* Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability. *Ecological Economics*, 2002,

- 43(2-3):199—211.
- [8] Ferng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity. *Ecological Economics*, 2001, 37(2):159—172.
- [9] Wackernagel M, Rees W E. *Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [10] Sanderson E, Jaiteh M, Levy M, *et al.* The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10):891—904.
- [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] Liu M, Hu Y M, Li Y H, *et al.* Ecological footprint model and its research advance. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3):334—339.
- [13] WWF, Zoological Society of London, Global Footprint Network. Living planet report 2006. http://www.panda.org/news_facts/publications/living_planet_report/index.cfm
- [14] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. A resolution to the conception of ecological footprint. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(6):69—78.
- [15] Ferng J J. Toward a scenario an alysis frame work for energy footprints. *Ecological Economics*, 2002, 40(1):53—69.
- [16] Costanza R. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 2000, 32(3):341—345.
- [17] 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.
- [18] Stöglehner G. Ecological footprint — A tool for assessing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11:267—277.
- [19] Wackernagel M, Moran D, White S, *et al.* Ecological footprint accounts for advancing sustainability: measuring human demands on nature. In: Lawn P eds. *Sustainable Development Indicators in Ecological Economics*. USA: Edward Elgar Publishing, Inc., 2006. 247—267.
- [20] National Bureau of Statistics of China. *Comprehensive Statistical Data and materials on 50 years of new China*. Beijing: China Statistics Press, 2000.
- [21] National Bureau of Statistics of China, 2001—2006. *China's Statistical Yearbook (2001—2006)*. Beijing: China Statistics Press, 2001—2006.
- [22] National Bureau of Statistics of China, 2007. *Statistical communique of country economy and society development of China in 2006*. http://www.stats.gov.cn/tjgb/ndtjgb/qgndtjgb/t20070228_402387821.htm
- [23] <http://www.china.com.cn/chinese/zhuanti/2006gongbao/1137741.htm>
- [24] Chen C Z, Lin Z S. Analysis and dynamic prediction of per capita ecological footprint and biocapacity in China based on empirical mode decomposition method. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5291—5299.
- [25] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society Landon*, 1998, 454:899—955.
- [26] Huang N, Shen E Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, 31: 417—457.
- [27] Lin Z S, Wang S G. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20: 90—96.
- [28] 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: 745—751.
- [29] 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.

参考文献:

- [12] 刘森,胡远满,李月辉,等.生态足迹方法及研究进展. *生态学杂志*,2006,25(3):334~339.
- [14] 徐中民,程国栋,张志强.生态足迹方法的理论解析. *中国人口·资源与环境*,2006,16(6):69~78.
- [20] 国家统计局. *新中国五十年统计资料汇编*. 北京:中国统计出版社,2000.
- [21] 国家统计局. *中国统计年鉴系列*. 北京:中国统计出版社,2001~2006.
- [22] 国家统计局. 2006年中国国民经济和社会发展统计公报. http://www.stats.gov.cn/tjgb/ndtjgb/qgndtjgb/t20070228_402387821.htm
- [24] 陈成忠,林振山. 中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析及多情景预测. *生态学报*,2007,27(12):5291~5299.
- [27] 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.
- [28] 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.