

张乐勤, 司友斌, 荣慧芳, 等. 2012. 池州市 2000—2010 年能源足迹动态测度与驱动因子分析[J]. 环境科学学报, 32(5): 1270-1280  
Zhang L Q, Si Y B, Rong H F, et al. 2012. Dynamic calculation and driving forces analysis of energy ecological footprints in Chizhou area from 2000 to 2010[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(5): 1270-1280

# 池州市 2000—2010 年能源足迹动态测度与驱动因子分析

张乐勤<sup>1,\*</sup>, 司友斌<sup>2</sup>, 荣慧芳<sup>1</sup>, 许信旺<sup>1</sup>

1. 池州学院资源环境与旅游系, 池州 247000

2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036

收稿日期: 2011-07-11 修回日期: 2011-08-26 录用日期: 2011-08-30

**摘要:** 能源足迹测度分析是揭示能源消费对区域环境压力及可持续发展的重要方法. 基于能源足迹的碳吸收计量模型、能源足迹强度与生态压力分析方法, 利用统计年鉴中能源消费数据, 对 2000—2010 年池州能源足迹及生态压力与强度进行了动态测度, 运用灰色 GM(1,1) 预测模型, 对 2015 年、2020 年能源足迹进行了预测, 并借鉴 STIRPAT 模型对能源足迹驱动因子进行了分析. 结果表明: 池州人均能源足迹由 2000 年的 0.1173 ghm<sup>2</sup> (全球公顷, 下同) 上升至 2010 年的 0.8993 ghm<sup>2</sup>, 呈波动上升趋势. 2000—2003 年, 人均能源足迹的供给大于需求, EPIEF < 1, 2004 年开始人均能源足迹的需求已超过供给, 供需状态严重失衡, EPIEF > 1, 2010 年, EPIEF 比值达 2.4, 能源足迹为森林对能源足迹承载力的 2.41 倍. 煤炭足迹为能源足迹的主要贡献者, 平均贡献率达 90.21%. 能源足迹强度整体呈倒“U”型趋势. 人口规模、人均 GDP、第二产业在经济中所占比例、单位工业增加值能耗与能源足迹呈正相关关系, 边际弹性系数分别为 0.5698、0.590、1.468、0.144. 可为池州市政府动态了解能源消费对环境形成的压力, 准确把握可持续发展状况, 进而为制定相应的发展策略提供科学依据, 也可为微观尺度区域能源足迹研究提供借鉴.

**关键词:** 能源足迹; 能源足迹强度; 动态测度; 驱动因子; 池州

文章编号: 0253-2468(2012)05-1270-11 中图分类号: X171 文献标识码: A

## Dynamic calculation and driving forces analysis of energy ecological footprints in Chizhou area from 2000 to 2010

ZHANG Leqin<sup>1,\*</sup>, SI Youbin<sup>2</sup>, RONG Huifang<sup>1</sup>, XU Xinwang<sup>1</sup>

1. Resource Environment and Tourism Department, Chizhou College, Chizhou 247000

2. Resource Environment Department, Anhui Agricultural University, Hefei 230036

Received 11 July 2011; received in revised form 26 August 2011; accepted 30 August 2011

**Abstract:** Ecological footprint (EF) method is a new prevailing approach to evaluate the sustainability of regional development. The time series of ecological footprint (EF) from 2000 to 2010 was calculated by using the statistical data of resource and energy consumption in Chizhou. On this basis, this paper forecasted the EF in the year 2015 and 2020. The driving factors of ecological footprint were analyzed using STIRPAT model. The results showed that EF per capita increased from 0.1173 ghm<sup>2</sup> to 0.8993 ghm<sup>2</sup> within the past ten years. The ecological pressure intensity of energy footprint (EPIEF) tends to increase, which means pressure of energy consumption on natural ecological system is enhancing. Among the components of EF, the percentage of coal footprint has increased to 90.21%. The EF is positively correlated with population scale, GDP per capita, the secondary industrial proportion and industrial added value of unit energy consumption. Their corresponding coefficients of effect on EF are 0.5698, 0.590, 1.468 and 0.144, respectively. Energy footprint intensity trend exhibits a reverse U-shape pattern. This paper may help Chizhou government to accurately estimate sustainable development capability, and provide a scientific basis which would support the coordinated development between the environment and economy in other areas in similar scales.

**Keywords:** ecological footprint; energy footprint intensity; dynamic calculation; driving forces; Chizhou

**基金项目:** 安徽省教育厅重点研究课题 (No. 2010sk502zd); 国家自然科学基金 (No. 41071337)

**Supported by** the Key Scientific Research Project of Education Department in Anhui Province (No. 2010sk502zd) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41071337)

**作者简介:** 张乐勤 (1965—), 男, 副教授, E-mail: zhangleqing@sohu.com; \* 通讯作者 (责任作者)

**Biography:** ZHANG Leqin (1965—), male, associate professor, E-mail: zhangleqing@sohu.com; \* **Corresponding author**

## 1 引言( Introduction)

随着经济的快速增长和人口数量的增加,人类生存越来越依赖于巨额的能源消费(方恺等,2010),由此带来的能源短缺、气候变暖和大气污染等现象直接或间接危及着人类生存环境,成为制约国民经济可持续发展的“瓶颈”(李琦等,2010),如何测度能源消费规律变化及其环境效应、定量分析人文驱动力变化对能源消费影响的研究尤为重要(王立猛等,2008).能源足迹分析法通过将人类能源消费转换为生物生产性土地面积,能从时空角度揭示出人类对能源消耗水平及评估可持续发展状态,是定量研究能源消耗对区域可持续发展影响的重要方法.

能源足迹(Energy Ecological Footprint,EEF)是指能源消费产生的生态足迹.能源足迹研究源于生态足迹(Ecological Footprint,EF),国外对生态足迹研究始于20世纪70年代(方恺等,2010),生态足迹(Ecological Footprint,EF)概念最早由加拿大 William Rees(1992)教授于1992年提出,1996年他和他的学生 Wackernagel(1996)提出了具体的计算方法,其定义为:维持一定人口规模下的资源消费和废弃物吸纳所需的生物生产性土地面积,包括化石能源地、耕地、林地、草地、建筑地、水域6种类型.生态足迹通过计算维持现在的生活方式所需要的土地,能清楚表明社会活动对环境的影响(刘森等,2006),由于其新颖的视角倍受世界各国关注(方恺等,2010).

国外研究表明,能源足迹在生态足迹中占很大比重(Sanderson *et al.*,1999;Wackernagel *et al.*,1999;2004).国内张芳等(2006)、张颖(2006)、章鸣(2004)、胡小飞等(2006)学者研究也表明:仅能源足迹1项就可以导致任何一个具有一定工业经济规模的区域和城市出现生态需求大于生态承载力的情况.曹淑艳等(2007)、陈敏等(2005)、朱永杰等(2008)分别对中国1997年、2003年中国生态足迹研究表明,能源足迹在生态足迹中所占比例分别为45.10%、50.03%、52.00%;赵卫等(2007)在对吉林省2003年生态足迹研究中,能源足迹比例为46.17%;孟伟庆等(2008)在对天津市2006年生态足迹研究中,能源足迹所占比例为46.34%;胡贵平等(2010)在对广州市2002—2007年生态足迹研究中,能源足迹所占比例高达78.81%,上述研究结果表明,能源足迹在生态足迹中占很大比重,是影响

生态足迹大小的最主要因素(陈冬冬等,2006),因此,能源足迹研究可揭示人类经济活动对区域生态环境的载荷,从而可动态测度可持续发展健康状况.

文献检索表明:国内仅有李智等(2007)、朱永杰等(2008)、陈成忠等(2009)、李琦等(2010)、赵冠伟等(2011)、郭运功等(2010)对宏观或中观尺度的能源足迹作过探索,而对微观尺度(地级市)能源足迹研究少有学者涉足.池州市是国家首个生态经济示范区,国家园林城市,中国优秀旅游城市,也是“生态安徽”建设首批综合示范市,2000—2010年,池州市经济发展迅速,城市化、工业化水平不断提升,特别是2006年至今,经济增速异常迅猛,快速发展的经济需要消耗大量能源,由此给生态环境形成了巨大压力,严重制约和威胁着池州市可持续发展.基于此,本文采用模型研究、文献分析、比较研究等方法,对池州市2000—2010年能源足迹进行时间序列测度与分析,利用STIRPAT模型,借助SPSS17.0软件,采用二阶最小二乘法,建立人口、经济、产业结构等社会经济因素对能源足迹影响的计量模型,并运用灰色GM(1,1)模型对2015年、2020年能源足迹及生态压力进行预测,旨在揭示出池州能源足迹动态变化及对环境形成的压力,寻找影响能源足迹的驱动因子,可为池州市政府深度了解能源使用对环境产生的影响,为其制定发展方向与规划提供科学依据,也可为微观尺度能源足迹研究提供借鉴.

## 2 研究区域( Study areas)

池州市位于安徽省西南部,长江下游南岸,介于东经116°38′~118°05′,北纬29°33′~30°51′之间,总面积8272 km<sup>2</sup>.地貌类型以丘陵山地为主;气候属暖湿性亚热带季风气候,植被有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针叶林、竹林等,还有一些栽培的亚热带经济林木.2010年森林蓄积量为2570万m<sup>3</sup>,森林面积466.67万hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为57.85%.

2010年,池州市总人口为160.46万人,GDP总量为300.84亿元,第二产业所占比例为46.60%,固定资产投资为356.9亿元,能源消费354万t标准煤(池州“十一五”经济社会发展纪实,2011).

## 3 材料与方法( Materials and methods)

### 3.1 数据来源

本文选取2000—2010年池州市能源消费量计

算池州市人均能源足迹,以2000—2010年森林面积计算森林对能源足迹的人均承载力,以2000—2010年人口数、GDP总量、第二产业所占比例、单位工业增加值能耗量数据分析能源足迹驱动因子,上述数据均来源于《池州统计年鉴》(2001—2010)及“十一五”池州市经济社会发展纪实。

### 3.2 计算方法

#### 3.2.1 能源足迹测度方法

##### (1) 能源足迹计算方法

能源足迹来源于生态足迹,其计算可采用生态足迹计算模型。生态足迹计算模型运用生物物理单位测度一定区域对自然资源的需求和自然资源对人类生存、繁衍及经济活动提供的生态支持(李智等,2007),生态足迹理论基本前提假设是(Wackernagel *et al.*,2002):①人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其产生的废弃物数量;②这些资源和废弃物能折算成相应的生物生产面积;③各类生物生产性土地具有空间互斥性。

本文使用学术界普遍采用的碳汇法(陈成忠等,2009;赵冠伟等,2011)进行计算,即通过计算吸收能源产生CO<sub>2</sub>所需的林地面积来表征能源足迹,计算公式为(赵冠伟等,2011):

$$EEF = \sum_i \frac{F_i \times 7000 \times 4.1868}{A_i \times 10^6 \times P}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中,EEF为人均能源足迹(ghm<sup>2</sup>);*i*分别表示能源消费项目;*F<sub>i</sub>*为第*i*项能源消费量(kg标准煤);*A<sub>i</sub>*为第*i*项能源消费项目的全球平均足迹(ghm<sup>2</sup>),其中,煤及煤制品为55 GJ·ghm<sup>-2</sup>,石油及石油制品为73 GJ·ghm<sup>-2</sup>,天然气为93 GJ·ghm<sup>-2</sup>,电力为1000 GJ·ghm<sup>-2</sup>; *P*为人口数。

计算中能源折算系数和热能转化标准采用普遍值(陈成忠等,2009;赵冠伟等,2011):

1 t 原煤 = 0.7143 tce, 1 t 原油 = 1.4286 tce, 1 m<sup>3</sup> 天然气 = 1.33 kg 标准煤, 1 kWh = 0.1229 kg 标准煤, 1 kg 标准煤热能 = 7000 kcal, 1 kcal = 4.1868 kJ.

##### (2) 能源足迹人均承载力计算方法

能源足迹人均承载力可借鉴人均生态承载力计算方法,生态承载力是与生态足迹需求相对应的概念,指区域能够提供人类的生态生产性土地,计算公式为(刘某承等,2010):

$$bc = \sum_{j=1} a_j \times r_j \times y_j \quad (2)$$

式中, *bc* 为人均生态承载力(ghm<sup>2</sup>); *a<sub>j</sub>* 为 *j* 种类型土地实际人均面积(ghm<sup>2</sup>); *r<sub>j</sub>* 为均衡因子, *y<sub>j</sub>* 为产量因子。

均衡因子、产量因子是计算能源足迹承载力的关键因素。均衡因子量值,不同学者或研究机构结果不一,刘某承等(2009)从净初级生产力视角对中国生态足迹均衡因子作了测算,笔者认为,NPP是绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量,是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自氧呼吸后的剩余部分,它直接反映不同生态系统中植物群落在自然或人工环境条件下的真实生产能力,因此,利用不同土地类型的NPP来计算均衡因子具有理论上的合理性,本研究采用其研究结果,即林地均衡因子为1.41。我国学者对产量因子的引用包括可变单产法、不变单产法、混合法3种,陈敏等(2005)认为:林产品的单产多受自然因素影响,随年份变化较少,采用不变的世界平均单产对能源足迹承载力的计算结果影响不大,基于此,本文采用不变因子法,即Wackernagel *et al.*(1999)对中国生态足迹计算时对林地产量因子时值,即0.91。

##### (3) 能源足迹生态压力计算方法

能源足迹生态压力(Ecological Pressure Intensity of Energy Footprint, EPIEF)指人类资源消耗及废物排放与生态环境承载力的比值,它是评价区域生态安全性的指标,比值越大,说明人类活动对生态环境压力越大,生态安全性越差,反之,压力越小,生态安全程度高(龙爱华等,2006)。将生态压力引入能源足迹可表征能源消费对生态系统的影响程度,计算公式为:

$$EPIEF = EEF/bc \quad (3)$$

式中,EPIEF为能源足迹生态压力,EEF为人均能源足迹(ghm<sup>2</sup>); *bc* 为森林对能源足迹的人均承载力(ghm<sup>2</sup>)。

##### (4) 能源足迹产值计算方法

能源足迹产值(Value of Energy Footprint, VEF)为单位能源足迹产生的经济价值,VEF较高时,表明区域经济发展良好,单位土地面积产值较高,单位能源足迹创造的经济价值较高(李智等,2007),计算公式为:

$$VEF = D/EEF \quad (4)$$

式中,VEF为能源足迹产值(元·ghm<sup>-2</sup>); *D* 为人均GDP;EEF为人均能源足迹(ghm<sup>2</sup>)。

##### (5) 能源足迹强度计算方法

能源足迹强度 (Energy Footprint Intensity, EFI) 指每生产万元 GDP 所需的能源足迹,反映能源绩效指标,能源足迹强度越小,表明单位能源足迹创造的价值越大,反之说明能源足迹的效益越差(李智等,2007),计算公式为:

$$EFI = EEF/GDP \quad (5)$$

式中,EFI 为能源足迹强度 ( $\text{ghm}^2 \cdot \text{万元}^{-1}$ ).

### 3.2.2 能源足迹驱动因子分析模型

Dietz 等(1997)和 York 等(2003)在经典 IPAT 等式( $I = IPAT$ )基础上,提出了随机回归影响模型,即人口、富裕和技术的随机影响模型,简称为 STIRPAT 模型,表达式为(龙爱华等,2006):

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (6)$$

式中: $I$ 、 $P$ 、 $A$ 、 $T$  分别表示环境压力、人口数量、富裕度和技术, $a$  是模型的系数, $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别是人口数量、富裕度、技术等人文驱动力的指数, $e$  为模型误差,如果  $a = b = c = d = 1$ ,STRIPAT 模型就还原成 IPAT 等式. STRIPAT 模型是一个得到广泛应用、非常成熟的模型(姜磊等,2011).

借鉴 STIRPAT 多变量非线性模型,可构建能源足迹与其驱动因子关系的计量模型,表达式为(李琦等,2010):

$$Q = KP^{a1} D^{a2} I^{a3} T^{a4} \quad (7)$$

式中, $Q$  为人均能源足迹 ( $\text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ );  $K$  为常数;  $P$  为人口数(万人);  $D$  为经济发展水平,以人均 GDP 计量 ( $\text{千元} \cdot \text{人}^{-1}$ );  $I$  为产业结构状况,以第二产业所占比例计量;  $T$  为能源利用技术,以单位工业增加值能耗计量 ( $\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ ). 为了通过回归分析确定有关参数,对公式(7)两边取对数,得:

$$\ln Q = \ln K + a1 \ln P + a2 \ln D + a3 \ln I + a4 \ln T \quad (8)$$

式(8)中: $a1$ 、 $a2$ 、 $a3$ 、 $a4$  为弹性系数,表示当  $P$ 、 $D$ 、 $I$ 、 $T$  每变化 1% 时,分别引起  $Q$  的  $a1\%$ 、 $a2\%$ 、 $a3\%$ 、 $a4\%$  变化.

### 3.2.3 能源足迹灰色 GM(1,1) 模型

灰色预测是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法.通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度,即进行关联分析,并对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律,生成有较强规律性的数据序列,然后建立相应的微分方程模型,从而预测事物未来发展趋势的状况(刘思峰等,2008). GM(1,1) 建模为:设时间  $t$  序列 ( $t = 1, 2, 3 \dots n$ )  $x^{(0)}$

有  $n$  个观察值,  $x_{(t)}^{(0)} = \{x_1^0, x_2^0, x_3^0 \dots x_n^0\}$ , 通过累加生成新序列  $x_{(t)}^{(1)} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)} \dots x_n^{(1)}\}$ , 则 GM(1, 1) 预测模型微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (9)$$

预测模型为:

$$x_{(t+1)}^{(1)} = (x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (10)$$

式中, $a$ 、 $u$  是待确定的未知参数,可由  $\left(\frac{a}{u}\right) = (B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot X$  求得.

GM(1,1) 模型须通过均方差比  $C$  值和小误差概率  $P$  值来判断模型的预测精度,当  $P > 0.95$ ,  $C < 0.35$  时,预测精度好;  $P > 0.80$ ,  $C < 0.5$  时,预测精度合格;  $P > 0.70$ ,  $C < 0.65$  时,预测精度勉强合格;  $P < 0.70$ ,  $C > 0.65$  时,预测精度不合格(刘思峰等,2008).

## 4 结果与分析 (Results and discussion)

以《池州统计年鉴》(2001—2010)及“十一五”池州市经济社会发展纪实中相关数据为基础资料,利用公式(1),计算可得 2000—2010 年池州人均能源足迹(表 1). 利用公式(2),计算可得 2000—2010 年森林对能源足迹的人均承载力,由此可得人均能源足迹供需盈亏,利用公式(3),可计算能源足迹生态压力(表 2). 利用公式(4),可计算单位能源足迹产值,利用公式(5),可计算能源足迹强度(表 4).

### 3.1 能源足迹动态变化分析

由表 1 可知,2000—2010 年,池州人均能源足迹由 2000 年的  $0.1173 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$  上升至 2010 年的  $0.8993 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ , 年均增长  $66.67\%$ . 2000—2002 年,人均能源足迹绝对量较低,平均为  $0.1306 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ , 升幅比例较小,年平均增长  $14.75\%$ . 2003—2005 年,有较大提高,平均为  $0.4059 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ , 是 2000—2002 年平均值的 3.11 倍,为中幅上升期,平均年增长  $16.65\%$ . 2006 年—2010 年,平均为  $0.8385 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ , 是 2000—2002 年、2003—2005 年绝对量平均值的 6.42 和 2.07 倍,为急剧上升期,与赵冠伟等(2011)对中国 2007 年人均能源足迹 ( $0.619 \text{ghm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ) 研究结果横向比较,池州同期人均能源足迹明显偏高.

表 1 2000—2010 年池州市能源消费量及人均能源足迹

Table 1 The energy consumption and average energy ecological footprint in Chizhou(2000—2010)

能源种类	2000		2001		2002		2003		2004		2005	
	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>
原煤	427032	0.105751	347499	0.085643	578985	0.142390	1022917	0.251339	1469777	0.359997	1686902	0.410799
洗精煤	0	0	300	0.000093	574	0.000178	60276	0.018661	87645	0.027048	82371	0.025274
焦炭	450	0.000152	20128	0.006764	527	0.000176	27233	0.009010	10442	0.003478	9925	0.003287
汽油	420	0.000161	678	0.000259	16642	0.006352	15674	0.005977	343	0.000130	281	0.000106
煤油	6	0.000002	18	0.000006	17	0.000006	1	近似 0	17	0.000006	4	0.000002
柴油	2346	0.000893	818	0.000310	13986	0.005286	16483	0.006224	5331	0.002007	6533	0.002445
燃料油	6	0.000002	2319	0.000861	2344	0.000869	1753	0.000649	136	0.000050	0	0
液化石油气	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0.000011	6	0.000003
天然气/(万 m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
热力/(10 <sup>6</sup> kJ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
电力/(10 <sup>4</sup> kWh)	24237	0.010327	26774	0.011353	32913	0.013927	59254	0.025050	77965	0.032856	79375	0.033258
合计		0.117288		0.105289		0.169184		0.316910		0.425583		0.475174

能源种类	2006		2007		2008		2009		2010	
	消费量/t	人均足迹 /ghm <sup>2</sup>								
原煤	2807396	0.680226	2846838	0.685723	3392131	0.812391	3036337	0.722860	3171150	0.752226
洗精煤	113833	0.034752	113931	0.034577	76640	0.023126	68862	0.020656	136865	0.040906
焦炭	9634	0.003174	5771	0.001890	15437	0.005028	27632	0.008946	23100	0.007452
汽油	352	0.000132	245	0.000092	398	0.000148	451	0.000167	659	0.000243
煤油	6	0.000002	0	0	121	0.000045	119	0.000044	191	0.000070
柴油	7867	0.002930	4897	0.001813	9480	0.003489	9576	0.003504	12372	0.004510
燃料油	0	0	315	0.000114	601	0.000217	5	0.000002	8199	0.002930
液化石油气	9126	0.003998	2865	0.001248	201	0.000087	662	0.000285	703	0.000302
天然气/(万 m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	383	0.001004	486	0.001274
热力/(10 <sup>6</sup> kJ)	0	0	568151	0.000360	1172747	0.000738	3357936	0.002100	3583706	0.002233
电力/(10 <sup>4</sup> kWh)	108387	0.045185	126223	0.052311	160797	0.066258	180023	0.073740	213546	0.087155
合计		0.770399		0.778128		0.911527		0.833308		0.899301



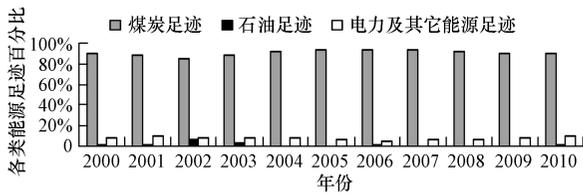


图2 池州市2000—2010年能源足迹构成百分比

Fig. 2 Percentage composition of average energy footprint in Chizhou (2000—2010)

### 3.4 能源足迹强度分析

由表4可知,池州能源足迹产值与能源足迹强度在不同时间序列变化特征差异明显,能源足迹产值曲线整体呈“U”型,而人均能源足迹强度曲线呈倒“U”型(图3).2000—2005年,单位能源足迹产值逐步下降,2000年为32305元·ghm<sup>-2</sup>,2005年下降为18349元·ghm<sup>-2</sup>,降幅为43.2%,而能源足迹强度不断增加,2000年为0.3102ghm<sup>2</sup>·万元<sup>-1</sup>,2005年上升为0.6741ghm<sup>2</sup>·万元<sup>-1</sup>,为2000年的2.17倍.分析其原因,同池州工业落后产能有关,2000年池州撤地建市,在国家宏观产能政策宽松及池州工业基础薄弱的背景下,政府放松了高能耗、高排放、低效益企业的准入门槛,小水泥、小煤窑、小钢铁等企业(多是民营企业)纷纷上马,这些企业设备落后,生产绩效差,消耗了大量资源、能源,导致了此阶段单位能源足迹产值逐步下降而能源足迹强度不断增加的境况.2006—2010年,单位能源足迹产值不断增加,2006年为12989元·ghm<sup>-2</sup>,2010年上升为23351元·ghm<sup>-2</sup>,为2006年的1.80倍,而能源

表4 2000—2010年池州市单位能源足迹产值、能源足迹强度

Table 4 The value of average energy footprint and energy footprint intensity in Chizhou (2000—2010)

年份	人均GDP/元	单位能源足迹产值/(元·ghm <sup>-2</sup> )	能源足迹强度/(ghm <sup>2</sup> ·万元 <sup>-1</sup> )
2000	3789	32305	0.310159
2001	4017	38152	0.262673
2002	4327	25575	0.390962
2003	4874	15379	0.650209
2004	7102	16687	0.715557
2005	8719	18349	0.674119
2006	10007	12989	0.930266
2007	11515	14798	0.785329
2008	14147	15520	0.752962
2009	17295	20754	0.542487
2010	21000	23351	0.479663

足迹强度逐步下降,2006年为0.9303ghm<sup>2</sup>·万元<sup>-1</sup>,2010年降为0.4797ghm<sup>2</sup>·万元<sup>-1</sup>,降幅达48.44%.之所以出现这种情况同池州经济结构的调整及推行节能减排政策有关,2000—2005年,池州经济以农业经济为主,工业基础薄弱,能源利用粗放,能源足迹强度呈上升趋势.2006—2010年,国家推行了节能减排政策,并将单位GDP能耗纳入政绩考核范畴,池州市政府积极响应国家号召,强力推进节能减排,淘汰了一大批小火电、小水泥、小煤窑等落后产能,积极发展循环经济,能源利用效率逐步提高,从而,使能源足迹强度呈下降趋势.

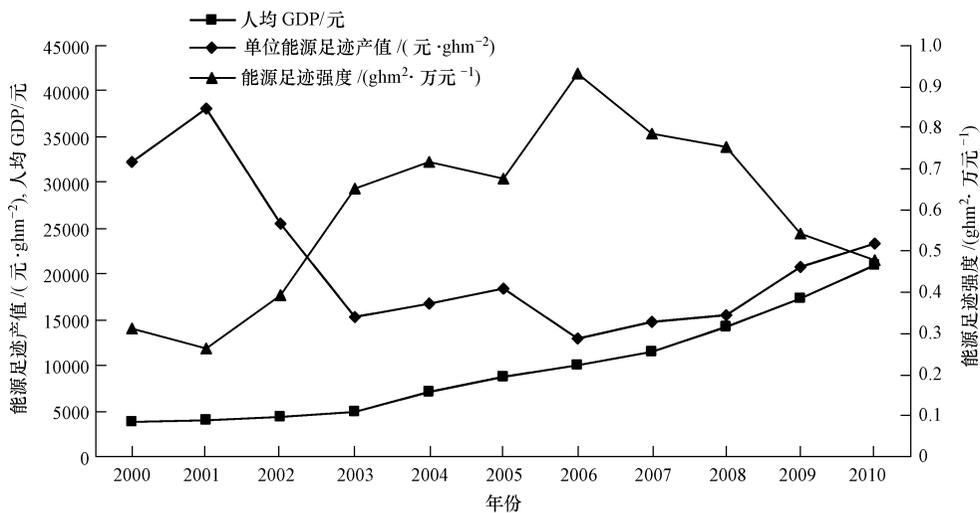


图3 池州2000—2010年VEF、EFI与人均GDP增长的关系

Fig. 3 The relationship of the VEF,EFI and the growth of GDP per person in Chizhou(2000—2010)

3.5 能源足迹驱动因子分析

运用 STIRPAT 多变量非线性模型,将表 4 中人均 GDP(D)、表 5 中第二产业在经济中所占比例(I)、单位工业增加值能耗(T)数据及池州统计年鉴系列中人口数(P)作为变量,将池州 2000—2010 年的人均能源足迹(Q)作因变量,应用 SPSS17.0,采用最小二乘法对模型进行回归拟合,可得:

$$Q = - 825.341P^{0.5698}D^{0.59}I^{1.468}T^{1.44} \quad (11)$$

回归结果显示: $R^2 = 0.988$

$F = 128.637$ ,  $p(\text{sig})$  值小于 0.01,表明模型拟合效果显著。由各因素的弹性系数分析其边际贡献,人口弹性系数为 0.5698,表明当人口增加 1% 时,人均能源足迹增加 0.5698%,说明人口规模是影响人

均能源足迹重要因子;人均 GDP 弹性系数为 0.59,表明人均 GDP 每增加 1% 将导致人均能源足迹增长 0.59%,说明富裕度也是影响能源足迹的重要因素;第二产业在经济中所占比例弹性系数为 1.468,表明第二产业在经济中所占比例每上升 1%,将导致人均能源足迹增加 1.468%,说明第二产业在经济结构中的比例对人均能源足迹影响显著,是影响人均能源足迹的最重要因子;单位工业增加值能耗弹性系数为 0.144,表明单位工业增加值能耗每降低 1%,将导致人均能源足迹下降 0.144%,说明能源利用技术也是重要的影响能源足迹因子,提高能源利用技术是降低能源足迹的重要途径。

表 5 2000—2010 年池州市第二产业所占比例及单位工业增加值能耗数据

Table 5 The second industrial proportion and industrial added value of unit energy consumption in Chizhou (2000—2010)

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
第二产业在三级产业中比例	32.32%	31.52%	32.27%	34.28%	34.63%	35.61%	36.5%	38.07%	39.16%	42.47%	46.60%
单位工业增加值能耗/(tce·万元 <sup>-1</sup> )	2.62	2.25	2.65	3.43	3.32	2.65	2.35	1.88	1.36	1.01	0.71

3.6 能源足迹趋势预测

以表 2 中人均能源足迹、能源足迹承载力及表 4 中能源足迹强度数据作为原始序列,假设能源足迹驱动因子边际弹性系数保持 2000—2010 年水平,即处于“惯性发展”情景下,将其输入灰色 GM(1,1)

预测系统,运行建模计算,可获得 a 值、u 值、模型方程及平均相对误差(表 6),运行预测对话框,输入预测时间序列 10,可对 2011—2020 年人均能源足迹、能源足迹承载力与能源足迹强度进行预测,结果见表 7。

表 6 预测方程及 a、u 值

Table 6 Prediction equation and value of a and u

	灰色 GM(1,1) 模型方程	预测方程	a 值	u 值	平均相对误差
人均能源足迹	$x_{(t+1)}^{(1)} = (x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}$	$x_{(t+1)}^{(1)} = 24.388572e^{0.032826t} - 23.618173$	-0.032826	0.775279	4.188889%
能源足迹承载力		$x_{(t+1)}^{(1)} = -341.819662e^{-0.001097t} + 342.19457$	0.001097	0.375521	0.122621%
能源足迹强度		$x_{(t+1)}^{(1)} = -5.119531e^{-0.173079t} + 6.049797$	0.173079	1.047091	4.935608%

表 7 池州市 2015、2020 年人均能源足迹、能源足迹承载力与能源足迹强度预测结果

Table 7 The predictive value of average energy footprint, Capacity per capita energy footprint and energy footprint intensity in Chizhou in 2015 and 2020

预测年	人均能源足迹 /(ghm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	后验差检验 (P、C 值)	能源足迹承载力 /(ghm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	后验差检验 (P、C 值)	能源足迹盈亏 /(ghm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	能源足迹 生态压力	能源足迹强度 /(ghm <sup>2</sup> ·万元 <sup>-1</sup> )	后验差检验 (P、C 值)
2015 年	1.058262	P=1, C=0,	0.371627	P=1, C=0,	-0.686635	2.85	0.203749	P=1, C=0,
2020 年	1.247018	预测精度好	0.369594	预测精度好	-0.877424	3.37	0.085755	预测精度好

由表 7 可知,池州市人均能源足迹 2015 年将增至 1.0583 ghm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>, 2020 年将达到 1.2470 ghm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>;人均生态赤字 2015 年将增至 0.6866

ghm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>, 2020 年将扩大至 0.8774 ghm<sup>2</sup>·人<sup>-1</sup>; 2015 年能源足迹生态压力指数将增至 2.85, 2020 年将达到 3.37,由此表明,池州市如按现阶段的“惯

性发展”,未来能源消费对生态环境的压力会进一步加大,可持续发展将面临更严峻挑战.经预测,2015年能源足迹强度将下降至 $0.2037 \text{ ghm}^2 \cdot \text{万元}^{-1}$ ,2020年下降为 $0.0858 \text{ ghm}^2 \cdot \text{万元}^{-1}$ ,说明依靠科技创新,池州市能源利用率尚有较大提升空间.

## 5 结论与建议(Conclusions and recommendations)

1)2000—2010年,池州人均能源足迹由2000年的 $0.1173 \text{ ghm}^2$ 上升至2010年的 $0.8993 \text{ ghm}^2$ ,呈波动上升趋势.2000—2002年,上升幅度小,人均能源足迹绝对量低,年平均增长 $14.75\%$ ,2003—2005年,为中幅上升期,人均能源足迹的绝对量较高,平均年增长 $16.65\%$ ,2006—2010年,为急剧上升期,人均能源足迹绝对量高,平均为 $0.8385 \text{ ghm}^2$ .在“惯性发展”情景下,预测池州2015年、2020年人均能源足迹分别为 $1.0583 \text{ ghm}^2$ 、 $1.2470 \text{ ghm}^2$ .

2)2000—2003年,池州人均能源足迹的供给大于需求,能源足迹略有盈余, $EPIEF < 1$ .2004—2010年,人均能源足迹的需求均超过供给,能源足迹为赤字状态, $EPIEF > 1$ ,且赤字幅度逐年扩大,2010年,人均能源足迹为人均承载力的2.41倍,赤字为 $0.5259 \text{ ghm}^2$ , $EPIEF$ 值为2.4.预测2015年、2020年人均能源足迹生态压力值将分别为2.85、3.37.由此表明,池州能源消费已对环境压力大,能源负荷远超过其生态安全度,如不注重科学发展,未来能源消费将会对自然生态系统构成更大压力,可持续发展将面临重大挑战.

3)2000—2010年,池州能源足迹强度呈倒“U”型趋势,2000—2005年,能源足迹强度为上升趋势,2006—2010年,能源足迹强度呈逐步下降趋势,节能减排取得明显实效.预测池州2015年、2020年能源足迹强度分别为 $0.2037 \text{ ghm}^2 \cdot \text{万元}^{-1}$ 、 $0.0858 \text{ ghm}^2 \cdot \text{万元}^{-1}$ ,能源利用率还存在较大提升空间.

4)煤炭足迹在能源足迹中占主导地位,为能源足迹的主要贡献者.降低煤炭使用,提高可再生能源比例,是保障池州经济社会可持续发展的必然要求.

5)能源足迹影响因子模型的实证分析表明,人口规模、经济发展水平、产业结构及能源利用技术均对能源足迹有较大影响,是池州能源足迹的主要驱动因子,其中人口规模的弹性系数为0.5698,人均GDP的弹性系数为0.59,第二产业在经济中所的弹性系数为1.468,单位工业增加值能耗的弹性系

数为0.144.

鉴于池州能源足迹已出现高赤字的现状,结合STIRPAT多变量非线性模型对能源足迹驱动因子分析结果,提出如下政策建议:控制人口增长,进一步强化计划生育国策,实现人口、能源、环境协调发展;提高经济增长质量,摒弃片面追求经济增长速度的不可持续发展模式,严格执行国家节能环保政策及法律制度,强力推进节能减排,将能源利用绩效指标纳入政府责任范围;明晰池州的生态、文化、旅游优势,理清发展思路,优化经济结构,大力发展以生态旅游为主的第三产业;调整能源消费结构,降低煤炭使用量,积极开发利用太阳能、生物质能源、沼气等清洁能源;积极淘汰落后产能,大力发展低耗能、高附加值的高技术产业,依靠科技创新,努力提高能源利用率;倡导低碳、节俭的可持续生活消费模式,实现社会生活的生态化;积极植树造林,提高森林覆盖率,营造全社会珍爱林木等生态资源的氛围.

致谢:本文在外审过程中,得到了两位审稿专家精心、细致、中恳的指导,在此谨表诚挚的谢意!

## 参考文献(References):

- 陈敏,张丽君,王如松,等. 2005. 1978—2003年中国生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 27(6):132-139
- Chen M, Zhang L J, Wang R S, et al. 2005. Dynamics of ecological footprint of China from 1978 to 2003[J]. Resources Science, 27(6):132-139(in Chinese)
- 曹淑艳,谢高地. 2007. 基于投入产出分析的中国生态足迹模型[J]. 生态学报,27(4):1499-1507
- Cao S Y, Xie G D. 2007. Applying input-output analysis for calculation of ecological footprint of China[J]. Acta Ecologica Sinica 27(4):1499-1507(in Chinese)
- 陈冬冬,高旺盛,陈源泉. 2006. 生态足迹分析方法研究进展[J]. 应用生态学报,17(10):1983-1988
- Chen D D, Gao W S, Chen Y Q. 2006. Research progress on ecological footprint analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 17(10):1983-1988(in Chinese)
- 陈成忠,林振山. 2009. 中国能源足迹增长波动的驱动因子分析[J]. 生态学报,29(2):758-767
- Chen C Z, Lin Z S. 2009. Driving forces analysis of energy ecological footprint growth fluctuation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 29(2):758-767(in Chinese)
- Dietz T, Rosa E A. 1997. effects of population and affluence on CO<sub>2</sub> emissions[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 94:175-179
- 方恺,董德明,沈万斌. 2010. 生态足迹理论在能源消费评价中的缺陷与改进探讨[J]. 自然资源学报,25(6):1013-1021
- Fang K, Dong D M, Shen W B. 2010. Discussion on shortcomings and

- improvement of ecological footprint theory in energy consumption assessment[J]. *Journal of Natural Resources*, 25(6):1013-1021 (in Chinese)
- 郭运功,汪冬冬,林逢春. 2010. 上海市能源利用碳排放足迹研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 20(2):105-108
- Guo Y G, Wang D D, Lin F C. 2010. Carbon footprint of energy use in Shanghai [J]. *China Population, Resources and Environment*, 20(2):105-108 (in Chinese)
- 胡贵平,龙志和,李敏,等. 2010. 广州市生态环境可持续发展能力分析——基于修正的生态足迹法[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, (2):96-99
- Hu G P, Long Z H, Li M, *et al.* 2010. Analysis of the sustainable development for guangzhou city based on the method of improved ecological footprint [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, (2):96-99 (in Chinese)
- 胡小飞,代力民,陈伏生,等. 2006. 基于生态足迹模型的延边林区可持续发展评价[J]. *生态学杂志*, 25(2):129-134
- Hu X F, Dai L M, Chen F S, *et al.* 2006. Assessment of sustainable development in Yanbian forest region based on ecological footprint model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(2):129-134 (in Chinese)
- 姜磊,季民河. 2011. 中国区域能源压力的空间差异分析——基于 STIRPA [J]. *财经科学*, (4):64-69
- Jiang L, Ji M H. 2011. Spatial difference analysis of regional energy pressures in China: Based on STIRPAT Model [J]. *Finance & Economics*, (4):64-69 (in Chinese)
- 刘森,胡远满,李月辉,等. 2006. 生态足迹方法及研究进展[J]. *生态学杂志*, 25(3):334-339
- Liu M, Hu Y M, Li Y H, *et al.* 2006. Ecological footprint model and its research advances [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(3):334-339 (in Chinese)
- 刘思峰,谢乃明,等. 2008. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社
- Liu S F, Xie N M, *et al.* 2008. The Theory and Application of Grey Systems [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 李智,鞠美庭,刘伟,等. 2007. 中国 1996~2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析[J]. *资源科学*, 29(6):54-60
- Li Z, Ju M T, Liu W, *et al.* 2007. Dynamic measurement of ecological footprint of energy resources and its economic efficiency in last ten years, China [J]. *Resources Science*, 29(6):54-60 (in Chinese)
- 李琦,孙根年,韩亚芬. 2010. 中国能源足迹的区域差异及影响因素分析[J]. *统计与决策*, (19):111-113
- Li Q, Sun G N, Han Y F. 2010. Regional Disparities in energy footprint in china and determining factors [J]. *Statistics and Decision*, (19):111-113 (in Chinese)
- 刘某承,王斌,李文华. 2010. 基于生态足迹模型的中国未来发展情景分析[J]. *资源科学*, 32(1):163-170
- Liu M C, Wang B, Li W H. 2010. Analysis and dynamic prediction of China's development based on the ecological footprint method [J]. *Resources Science*, 32(1):163-170 (in Chinese)
- 刘某承,李文华. 2009. 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*, 24(9):1550-1559
- Liu M C, Li W H. 2009. The calculation of China's equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production [J]. *Journal of Natural Resources*, 24(9):1550-1559 (in Chinese)
- 龙爱华,徐中民,王新华,等. 2006. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响[J]. *生态学报*, 26(10):3358-3365
- Long A H, Xu Z M, Wang X H, *et al.* 2006. Impacts of population, affluence and technology on water footprint in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(10):3358-3365 (in Chinese)
- 孟伟庆,马春,鞠美庭,等. 2008. 天津市近 20 年生态足迹的动态测度与分析[J]. *安全与环境学报*, 8(2):67-71
- Meng W Q, Ma C, Ju M T, *et al.* 2008. Dynamic calculation and analysis of eco-footprints of Tianjin City in the past two decades [J]. *Journal of Safety and Environment*, 8(2):67-71 (in Chinese)
- Rees W. 1992. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization*, 4(2):121-130
- Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, *et al.* 2002. The human footprint and the last of the wild [J]. *Bio Science*, 52(10):891-904
- 池州市统计局. 2011. 奋力追赶的池州——“十一五”全市经济社会发展纪实[M]. 池州:安徽省快马印务有限公司
- The Statistics Bureau of Chizhou. 2011. Aspiring and outstanding Chizhou——The social economy development for "The 11th Five" periods [M]. Chizhou: Anhui kuaima printing Limited company (in Chinese)
- 池州市统计局. 2001—2010. 池州统计年鉴系列[M]. 池州:安徽省快马印务有限公司
- The Statistics Bureau of Chizhou. 2001—2010. Chizhou Statistic Almanac [M]. Chizhou: Anhui kuaima printing Limited company (in Chinese)
- Wackernagel M, Rees W. 1996. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island, B. C.: Canada: New Society Publishers. 61-83
- Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* 1997. Ecological Footprints of Nations: How Much Nature Do They Use? How Much Nature Do They Have? [M]. Costa Rica: The Earth Council
- Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* 1999. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 29(3):375-390
- Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, *et al.* 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy [J]. *Proceedings of the national Academy of Sciences of the United States of America*, 99(14):9266-9271
- Wackernagel M, Monfreda C, Schulz C B, *et al.* 2004. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges [J]. *Land Use Policy*, 21(3):271-278
- 王立猛,何康林. 2008. 基于 STIRPAT 模型的环境压力空间差异分析[J]. *环境科学学报*, 28(5):1032-1037
- Wang L M, He K L. 2008. Analysis of spatial variations in environmental impact based on the STIRPAT model — A case study of energy consumption [J]. *Acta Scientiae circumstantiae*, 28(5):1032-1037 (in Chinese)
- York R, Rosa E A, Dietz T. 2003. STIRPAT, IPAT and ImPACT:

- analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 23: 351-365
- 张芳,徐伟锋,李光明,等.2006.上海市2003年生态足迹与生态承载力分析[J].*同济大学学报(自然科学版)*,34(1):80-84
- Zhang F, Xu W F, Li G M, *et al.* 2006. Analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of Shanghai in 2003[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 34(1):80-84(in Chinese)
- 张颖.2006.北京市生态足迹变化和对可持续发展的影响研究[J].*中国地质大学学报(社会科学版)*,6(4):47-55
- Zhang Y. 2006. Change of ecological footprint and its effect on sustainable development in Beijing, China [J]. *Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition)*, 6(4):47-55 (in Chinese)
- 赵卫,刘景双,孔凡娥.2007.区域生态足迹情景预测——以吉林省为例[J].*资源科学*,29(1):165-171
- Zhao W, Liu J S, Kong F E. 2007. Scenario prediction of regional ecological footprint: A case of Jilin Province [J]. *Resources Science*,29(1):165-171 (in Chinese)
- 章鸣,叶艳妹.2004.杭州生态足迹计算与分析[J].*中国土地科学*, 18(4):25-30
- Zhang M, Ye Y M. 2004. Ecological footprints of Hangzhou City [J]. *China Land Science*,18(4):25-30(in Chinese)
- 朱永杰,岳瑞锋.2008.中国林地提供化石能源用地的定量研究[J].*林业科学*, 44(9): 20-25
- Zhu Y J, Yue R F. 2008. Supply to fossil energy land from China's forest based on ecological footprint [J]. *Scientia Silvae Sinicae*,44(9): 20-25 (in Chinese)
- 赵冠伟,杨木壮,陈健飞.2011.1990—2007年中国能源足迹时空差异分析[J].*地理与地理信息科学*,27(2):65-69
- Zhao G W, Yang M Z, Chen J F. 2011. Analysis on the temporal and spatial difference of energy ecological footprint in China from 1990 to 2007 [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 27(2):65-69 (in Chinese)