生态赤字影响因素的定量分析及其动态预测研究

——以江苏省为例

肖思思[1]，余颖斐[1]，黄贤金[2]，陈 燕[1]

(1. 江苏大学 环境学院，江苏 镇江 212013；2. 南京大学 地理与海洋科学学院，江苏 南京 210093)

摘 要：以江苏省为例，选取表征社会经济发展的重要指标建立社会经济系统指标体系，在对江苏省1985—2009年生态赤字时间序列计算分析的基础上，综合运用STIRPAT模型、变量投影重要性指数(VIP)和偏最小二乘(PLS)方法构建了江苏省生态赤字动态预测模型，对江苏省“十二五”规划期间生态赤字的发展情况进行了动态预测。结果表明，“十二五”规划期间，江苏省总生态赤字将从2009年的1.156 1×10^8 hm^2上升至2015年的1.418 4×10^8 hm^2，呈整体上升趋势，人均生态赤字从2009年的1.496 7 hm^2上升至2015年的1.768 8 hm^2，高于全球平均水平(0.400 0 hm^2)，且江苏省不存在生态赤字EKC曲线的有关假说；根据VIP值得出“十二五”规划期间江苏省生态赤字持续增加的重要驱动因素，且按其影响的重要性排序依次为：二三产业产值占总产值比重＞农作物总播种面积＞人均GDP＞普通高等学校师生比＞卫生机构床位数＞货运周转量＞总人口数。最后就如何实现江苏省“十二五”规划目标提出相关政策建议。

关键词：生态赤字；动态预测；偏最小二乘(PLS)；VIP值

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)06-0279-07 **中图分类号**：F062.2

Influencing Factors of Ecological Deficit and Its Dynamic Prediction

—A Case Study of Jiangsu Province

XIAO Si-si[1], YU Ying-fei[1], HUANG Xian-jin[2], CHEN Yan[1]

(1. *School of the Environment, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu* 212013, *China*;
2. *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu* 210093, *China*)

Abstract: Taking Jiangsu Province as an example, an index system of social-economic system was established based on the analysis on the time series of ecological deficit(ED) from 1985 to 2009. An ED dynamic prediction model was then developed using the conjunction of STIRAPT model, VIP value and the partial least square regression(PLS) method. The results demonstrated that the ED of Jiangsu in the plan period of “the 12th five-year plan” could increase from 1.156 1×10^8 hm^2 in 2009 to 1.418 4×10^8 hm^2 in 2015. ED per capita could also increase from 1.496 7 hm^2 to 1.768 8 hm^2 in the same time period, significantly higher than the global level(0.400 0 hm^2). The classical environmental Kuznets curve(EKC) hypothesis could not explain well in the ED of Jiangsu Province. The VIP values showed that the many factors exerted strong influences, in an descending order of significance on ED as: ratios of primary and secondary industry in GDP＞total cultivated area＞GDP per capita＞student to teacher ratio in higher education＞bed number in health care units＞volume of goods transportation＞total population. Based on these analyses, recommendations including transforming economic growth pattern, increasing total cultivated area, controlling the volume of goods transportation, and restraining rapid population growth, were proposed to slow down the increment of ED and to achieve the long-term development goals in Jiangsu Province.

Keywords: ecological deficit(ED); dynamic prediction; partial least square(PLS); VIP value

收稿日期：2012-04-06 **修回日期**：2012-05-18

资助项目：国土资源部公益性行业科研专项经费项目“土地利用规划的碳排放效应与调控研究”(200811033)；江苏省环保科技基金项目(2009037)；江苏大学高级专业人才科研启动基金项目(08JDG042)；江苏大学学生科研立项(08A169)

作者简介：肖思思(1979—)，女(汉族)，安徽省明光市人，博士，讲师，主要从事自然资源与环境可持续发展方面的研究。E-mail: xiao780@163.com。

自里约“地球峰会”以来，可持续发展已成为世界各地的重要发展目标[1-2]。迄今为止，国内外学者已基于多尺度多视角提出了各种各样的模型、方法和指标用于区域可持续发展的定量评价研究。由Rees和Wackernagel[3]共同提出的生态赤字（或称生态盈余）指标，将衡量人口的生态足迹是否在人类可承载的生态范围之内作为研究可持续发展的一种方法已得到国内外学者的广泛应用和研究[4-5]。该方法从提出以来虽然备受质疑[6-7]，但由于其在估算人类活动对生态整体影响方面具有较强的可操作性[8-11]、以及测度区域可持续发展方面在方法上的可靠性，无疑已成为一种评价区域可持续发展的重要手段。然而，目前的相关研究多基于静态指标的分析方法，虽可直观测度历史与现状的生态可持续发展状态，却难以反映其未来的动态可持续性趋势[12]。动态预测可以通过对生态赤字未来趋势进行预测，从而弥补了其静态性的缺陷，成为生态赤字与可持续发展的一个重要研究方向。已有动态预测的相关研究主要从两个方面展开：一是采用传统的预测模型、根据生态赤字原始时间序列值，对其未来的发展趋势进行预测，比如灰色预测GM(1,1)模型[13]、时间序列预测模型[14-15]、动态趋势预测模型[16]等；二是构建生态赤字与其影响因素的定量关系模型，通过对影响因素的定量分析进行生态赤字预测。然而，给定区域的生态赤字必然是由其人口数量、富裕程度、技术水平及资源条件等多种社会经济因素共同驱动的一个综合结果，传统预测模型显然不足以反映生态赤字的多因子驱动特征，定量关系模型虽然在这一方面弥补了传统预测的不足，但同样在几个方面存在欠缺：一是模型中影响因素较少，不能全面反映社会经济各因子对其的影响；二是不能正确认识各影响因素对生态赤字影响的重要性程度，以至于在选取影响因素时误将不重要的因子也选入模型当中；三是模型无法解决各因子间的多重共线性问题，从而降低模型的预测精度。基于此，本研究以江苏省为例，进行江苏省生态赤字影响因素的定量分析及其动态预测研究。首先，选取表征社会经济发展的重要指标建立社会经济系统指标体系；其次，基于江苏省1985—2009年时间序列数据，对江苏省生态赤字的变化情况进行分析，明确江苏省可持续发展现状；再次，根据VIP值选取影响江苏省生态赤字的重要驱动因素，结合STIRPAT模型和偏最小二乘(PLS)方法，构建江苏省生态赤字的动态预测模型，并检验模型的有效性和准确性；最后，依据“十二五”规划目标，采用情景分析方法，对江苏省“十二五”期间生态赤字的发展趋势进行预测，并据此提出相应的政策建议，以期减缓江苏省生态赤字的上升及实现江苏省未来的可持续发展。

1 方法和数据

1.1 STIRPAT模型

原始STIRPAT模型如公式(1)所示：

$$I=aP^bA^cT^de \tag{1}$$

为了参数估计以及分析生态赤字驱动因子的需要，将公式(1)转换成公式(2)所示的非线性对数形式：

$$\ln ED=\ln a+b(\ln P)+[c_1(\ln A)+c_2(\ln^2 A)]+[d_1(\ln T)+d_2(\ln^2 T)]+\cdots+[n_1(\ln M)+n_2(\ln^2 M)]+\ln e \tag{2}$$

式中：a——模型的常数项；生态赤字(ED)——模型的因变量(y)；$b,c,d,\cdots,n$——各自变量(x)的指数；e——自变量因素的随机误差项，包括时间误差、区域误差及因素分解误差等。其中，自变量包括人口(P)、富裕度(A)、科技(T)以及其他相关驱动因子(M)等。同时，公式(2)中可增加富裕度的二次项形式用于验证江苏省生态赤字的Kuznets曲线假说。此外，研究采用变量投影重要性指数VIP(variable importance in projection)值判断驱动因素的重要性程度。

$$VIP_j=\sqrt{\frac{P}{R_d(I;t_1,\cdots,t_m)}\sum_{h=1}^{m}R_d(I;t_h)\times w_{hj}^{\ 2}} \quad (j=1,2,\cdots,p) \tag{3}$$

式中：p——自变量个数；m——提取的主成分对数；w_{hj}——w_h的第j个分量，用于来测量自变量x_j对构造主成分轴th的边际贡献；对任何$h=1,2,\cdots,m$都有$\sum_{j}^{k}w_{hj}^{\ 2}=w_h'w_h=1$；$R_d(x;t_1,t_2,\cdots,t_h)$和$R_d(y;t_1,t_2,\cdots,t_h)$分别表示轴$t_h$对$y$的解释能力、以及轴$t_1,t_2,\cdots,t_h$对$y$的累计解释能力。普遍认为，VIP值大于1表示该驱动因素及其重要，VIP值在0.8以下表示该驱动因素不重要，VIP值在0.8～1之间表示该驱动因素的重要性不确定[17-18]。VIP值大于1的驱动因素将被带入公式(2)用于生态赤字动态预测模型的构建。

1.2 PLS算法

PLS算法将预测模型分析的数据分析方法与非模型式的数据认识性分析方法有机地结合起来，能够在自变量存在严重相关性的条件下进行回归建模[18-19]。

具体步骤为：首先，将因变量Y及自变量X两组数据进行标准化，并分别记为F_0和E_0；其次，从F_0和E_0中提取出第一对PLS主成分t_1($t_1=E_0w_1$，$\|w_1\|=1$)和u_1($u_1=F_0c_1$，$\|c_1\|=1$)，使得他们之间满足目标式(4)和约束式(5)。第三，第一对PLS主成分被提取之后，实施因变量Y对t_1及自变量X对t_1的回归，然后采用公式(6)对回归精度进行检验。

$$\max_{w_1,c_1}(E_0w_1,F_0c_1) \tag{4}$$

$$s.t.\begin{cases} w_1'w_1=1 \\ c_1'c_1=1 \end{cases} \tag{5}$$

$$Q_t^2=1-\frac{\sum_{k=1}^{q}\mathrm{PRESS}_{tk}}{\sum_{k=1}^{q}\mathrm{SS}_{(t-1)}^{k}}=1-\frac{\mathrm{PRESS}_t}{\mathrm{SS}_{(t-1)}} \tag{6}$$

式中:Q_t^2——交叉有效性;PRESS_t——Y 的预测误差平方和;SS_{t-1}——Y 的误差平方和;t——提取主成分个数。当 $Q_t^2 \leqq 0.0975$,计算终止,此时变量 PRESS_t 取最小值,提取的成分个数 t 即为最佳成分数,模型达到满意的精度。研究以 SAS V8 为平台进行相关计算。

1.3　数据处理

1.3.1　*数据来源*　相关数据按其来源可分为两类:(1) 土地利用数据来自于江苏省国土厅;(2) 统计数据来自于中国统计出版社出版的《江苏省统计年鉴(1985—2009)》和《见证辉煌:江苏 60 年(1949—2009)》。

其中,1991—1994 年高等学校在校生数和高等学校专职教师数的数据、以及 1986—1988 年医疗卫生数据缺失,这些方面通过对现有数据的分析及向有关专家学者的咨询对缺失数据进行获取。

1.3.2　*指标体系*　根据生态足迹的人口消费性特征,结合宏观经济发展及经济产值因子,选取可能对生态足迹有密切影响的 9 类共 14 个因子,建立社会经济系统影响因素的指标体系。各影响因素变量及其具体内涵解释详见表 1。

表 1　研究区影响因素的指标体系

指标名称	指标涵义	指标变量	指标缩写
人口水平	反映研究区在一定时期内人口水平	历年国民年底总人口	P_{OP}
富裕度	反映研究区在一定时期内的经济发展水平	历年人均国民总收入	P_{GDP}
		历年人均国民总收入的二次项	P_{GDP2}
技术水平	反映研究区在一定时期内的经济结构优化水平	历年国民非服务业收入占比	G_{DPF}
现代化水平	反映研究区在一定时期内现代化建设水平	历年城市化率	U_{RBA}
固定投资	反映研究区在一定时期内的固定投资水平	全社会固定资产投资	T_Z
		全社会固定资产投资的二次项	T_{Z2}
农业资源	反映研究区在一定时期内的农业资源条件	历年农作物总播种面积	Z_{RNZ}
运输系统	反映研究区在一定时期内的运输系统水平	货运周转量	Y_{SHW}
		旅客周转量	Y_{SLV}
高等教育	反映研究区在一定时期内的高等教育水平	普通高等学校师生比	J_{YSS}
医疗卫生	反映研究区在一定时期内的医疗卫生水平	各类卫生机构数	W_{SJG}
		各类卫生机构床位数	W_{SCW}
		各类卫生机构医生数	W_{SYS}

注:指标体系设计按照统计年鉴本身分类进行,二级指标根据数据的完整性和统一性选取。

2　案例分析

2.1　生态足迹、生态承载力及生态赤字的动态分析

根据已有研究[11,20-21]进行生态足迹的相关计算。其中,均衡因子采用张恒义[22]等人的研究成果,耕地、草地、林地、化石燃料用地、建筑用地及水域的均衡因子分别为 2.82,0.11,0.35,0.35,2.82 和 0.17;产量因子采用中国平均值[21],耕地、草地、林地、建筑用地及水域的产量因子分别为 1.66,0.19,0.91,1.60 和 1.00。若生态足迹大于生态承载力,则存在生态赤字,表明研究区的发展不可持续;否则存在生态盈余,表明人类对生态环境的压力处于生态承载力范围之内,人类的社会经济发展处于可持续发展的范围之内[23]。

图 1 为 1985—2009 年间江苏省生态足迹、生态承载力及生态赤字的计算结果。分析结果显示,江苏省生态足迹从 1985 年的 6.30×10^7 hm^2 上升至 2009 年的 1.42×10^8 hm^2,增加了 2.23 倍;同期生态承载力从 2.80×10^7 hm^2 下降至 2.70×10^7 hm^2,生态赤字呈现出与生态足迹同方向的变化趋势、由 1985 年的 3.40×10^7 hm^2 增加至 2009 年的 1.16×10^8 hm^2,江苏省生态赤字持续增加。可见,江苏省人类的活动已超出区域生态可承载范围,区域的资源环境供给已不能够满足区域人类活动的需要,江苏省总体呈现出不可持续的发展态势。

2.2　驱动因素的选取

图 2 为研究区 14 个影响因素 VIP 值的计算结果。由图 2 可以看出,P_{OP},P_{GDP},P_{GDP2},G_{DPF},Z_{RNZ},

Y_{SHW}，J_{YSS}和 W_{SCW}的 VIP 值均大于 1，表明总人口、人均 GDP、人均 GDP 二次项、国民非服务业收入占比、农作物总播种面积、货运周转量、普通高等学校师生比及各类卫生机构床位数 8 个影响因素是生态赤字的重要驱动因素；T_Z 和 Y_{SLV}的 VIP 值小于 0.8，表明全社会固定资产投资、旅客周转量 2 个影响因素对生态赤字影响不重要，不是生态赤字的重要驱动因素；同时，U_{RBA}，T_{Z2}，W_{SJG}和 W_{SYS}的 VIP 值在 0.8～1 之间，表明城市化率、全社会固定资产投资二次项、卫生机构数及各类卫生机构医生数 4 个影响因素对 Y 的影响不确定或不是生态赤字的重要驱动因素[17-18]。各重要驱动因素按其对生态赤字影响的重要性排序依次为：国民非服务业收入占比＞农作物总播种面积＞人均 GDP＞普通高等学校师生比＞卫生机构床位数＞人均 GDP 二次项＞货运周转量＞总人口。

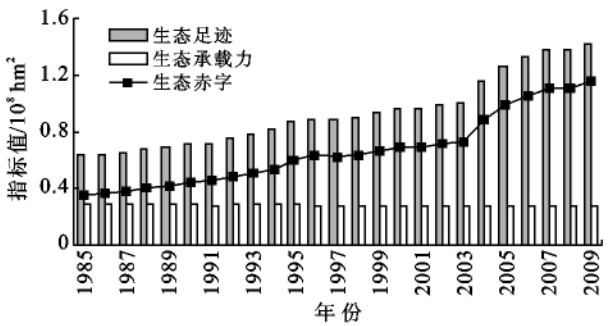


图 1 江苏省 1985－2009 年生态足迹、生态承载力及生态赤字

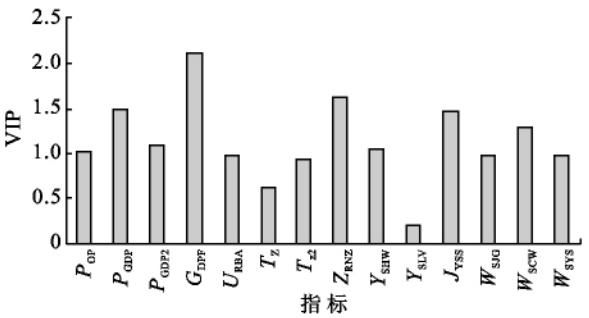


图 2 研究区各因素的 VIP 值

注：横坐标标识的意义详见表 1。

基于分析，总人口、人均 GDP 及其二次项、国民非服务业收入占比、农作物总播种面积、货运周转量、普通高等学校师生比及各类卫生机构床位数 8 个生态赤字的重要驱动因素及生态赤字指标将被带入公式(2)进行生态赤字动态预测模型的构建。模型中添加人均 GDP 对数形式的二次项，可用于验证生态赤字的 EKC 曲线假说。

2.3 生态赤字动态预测模型

基于前文分析，生态赤字动态预测模型如公式(7)所示：

$$\begin{aligned}\ln(ED)=&20.066\ 8+0.251\ 3\ln P_{OP}+0.059\ 3\ln P_{GDP}+\\&0.003\ 6\ln^2 P_{GDP}+0.118\ 8\ln G_{DPF}-\\&0.853\ 7\ln Z_{RNZ}+0.151\ 4\ln Y_{SHW}-\\&0.129\ 7\ln J_{YSS}+0.379\ 7\ln W_{SCW}\end{aligned}\quad(7)$$

($t=3$，$PRESS_t=0.114\ 9$，$Q_t^2=0.989\ 9$，$R^2=0.992\ 3$，$F=350.55$)

式中：ln(ED)——模型的因变量 Y；$\ln P_{OP}$，$\ln P_{GDP}$，$\ln^2 P_{GDP}$，$\ln G_{DPF}$，$\ln Z_{RNZ}$，$\ln Y_{SHW}$，$\ln J_{YSS}$和 $\ln W_{SCW}$——模型的自变量 X；R^2——相关系数；F——F 检验值。数据分析显示，当提取主成分数为 3($t=3$)时，$PRESS_t$为 0.114 9，Q_t^2 为 0.989 9，R^2 为 0.992 3，F 值为 350.55。此时，$\ln P_{OP}$，$\ln P_{GDP}$，$\ln G_{DPF}$，$\ln Z_{RNZ}$，$\ln Y_{SHW}$，$\ln J_{YSS}$和 $\ln W_{SCW}$的系数分别为 0.221 3，0.059 3，0.118 8，－0.853 7，0.151 4，－0.129 7 和 0.379 7，表示 P_{OP}，P_{GDP}，G_{DPF}，Z_{RNZ}，Y_{SHW}，J_{YSS}和 W_{SCW}各对数值 1%的变化将引起因变量 Y〔ln(ED)〕0.221 3%，0.059 3%，0.118 8%，－0.853 7%，0.151 4%，－0.129 7%和 0.3797%的变化。$\ln P_{OP}$，$\ln P_{GDP}$，$\ln G_{DPF}$，$\ln Y_{SHW}$和 $\ln W_{SCW}$系数为正，表明总人口、人均 GDP、国民非服务业收入占比、货运周转量及各类卫生机构床位数对生态赤字具有正向驱动作用，$\ln Z_{RNZ}$和 $\ln J_{YSS}$系数为负，表明农作物总播种面积及普通高等学校师生比对生态赤字具有负向驱动作用。与此同时，$\ln^2 P_{GDP}$系数为正(0.003 6)，表明江苏省生态赤字与人均 GDP 间不存在环境库兹涅茨曲线(EKC)假说，江苏省社会经济的发展仍将以资源环境的巨大消耗为代价。

2.4 模型的解释和有效性分析

本研究通过相关性检验(表 2)、第一主成分 t_1/u_1 散点图、留一法交叉有效性验证(表 3)、实际值与预测值拟合程度检验(图 4)进行生态赤字动态预测模型有效性与准确性的分析与诊断。

表 2 分析结果显示，多数自变量间的相关系数大于 0.9，自变量间存在严重的多重共线性问题，表明采用 PLS 方法比最小二乘法(OLS)进行生态赤字动态预测模型的构建更具合理性。

表 2 自变量多重相关性检验

项目	$\ln P_{GDP}$	$\ln G_{DPF}$	$\ln Z_{RNZ}$	$\ln Y_{SHW}$	$\ln J_{YSS}$	$\ln W_{SCW}$
$\ln P_{OP}$	0.974**	−0.961**	−0.945**	0.934**	−0.924**	0.850**
$\ln P_{GDP}$		−0.953**	−0.960**	0.965**	−0.954**	0.867**
$\ln G_{DPF}$			0.895**	−0.871**	0.909**	−0.0762**
$\ln Z_{RNZ}$				−0.955**	0.900**	−0.0879**
$\ln Y_{SHW}$					−0.887**	0.951**
$\ln J_{YSS}$						−0.790**

注：样本数 $n=25$；＊＊相关性 0.01 水平(双尾检验)；＊相关性 0.05水平(双尾检验)。

由第一主成分散点图分析可知,t_1 与 u_1 之间存在明显的线性相关,说明 X 和 Y 之间有显著的相关关系,同样验证了本研究采用 PLS 方法进行模型构建的合理性。图 3 表明,生态赤字动态预测模型的实际值与拟合值的可决系数 R^2 为 0.992 3,经过交叉有效性验证的 Q_t^2(cum)达到 0.989 9,说明实际值与拟合值之间具有较好的拟合程度,进一步验证了生态赤字动态预测模型的可靠性和稳定性。

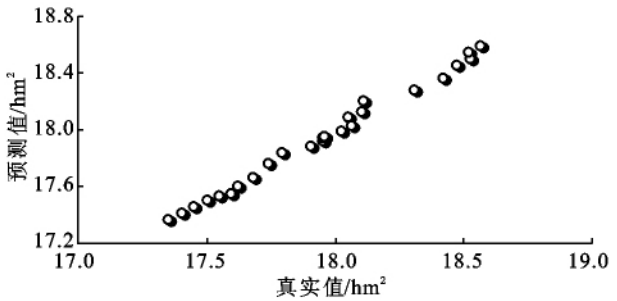


图 3　生态赤字实际值与预测值的拟合程度

表 3 分析结果表明,当提取 3 个主成分时($t=3$),模型有最小 $PRESS_t$ 值 0.1149,此时,存在最大 R^2(cum)值 0.993 4,Q_t^2(cum)值 0.989 9 和 F 检验值 350.55,表明预测模型的含扰动误差最小,有效性最大,模型预测回归精度最高,故提取 3 个主成分构建的生态赤字动态预测模型具有有效性。此时,$R_d(X;t_1,t_2,t_3)=99.10\%$,$R_d(Y;t_1,t_2,t_3)=99.23\%$,即提取 3 个主成分对自变量集合 X 的解释能力达到 99.10%,对因变量 Y 的解释能力达到 99.23%。

表 3　留一交叉法有效性验证

提取主成分数 t	$PRESS_t$	Q_t^2(cum)	R^2(cum)	F
1	0.130 0	0.980 1	0.989 8	280.79
2	0.117 7	0.985 6	0.991 8	312.78
3	0.114 9	0.989 9	0.993 4	350.55
4	0.117 8			

2.5　预测结果

根据生态赤字的动态预测模型(式 7)以及各指标的规划目标值,预测江苏省“十二五”规划期间生态赤字变化情况(图 4)。预测结果显示,江苏省生态赤字将从 2009 年的 $1.156\ 1\times10^8$ hm² 持续增加至 2015 年末的 $1.418\ 4\times10^8$ hm²,“十二五”规划期末江苏省人均生态赤字将达到 1.768 8 hm²,表明“十二五”期间江苏省的资源环境消耗将超过区域的资源环境承载能力,江苏省将面临日趋紧张的人地矛盾及日益恶化的生态环境,总体处于不可持续的发展态势。

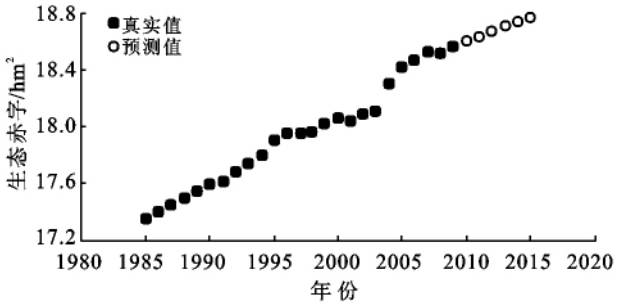


图 4　研究区 2010－2015 年生态赤字预测结果

3　讨 论

3.1　VIP 值与回归系数大小在影响因素分析中的比较

未标准化回归方程回归系数的大小不能反映自变量对因变量的影响大小[24]。因此,公式 7 中方程的回归系数仅能用于反映因变量是否对自变量有影响,以及是正向影响还是负向影响,而不能用于反映各自变量对因变量的相关影响程度。变量投影重要性指标(VIP),据公式 3 可知其值是无量纲的,因此,VIP 值能真实地反映各自变量解释因变量的重要性大小。故而 VIP 值较之未标准化回归方程的回归系数能更加准确地反映驱动因素对生态赤字变化的影响重要性大小。

3.2　生态赤字驱动因素分析

通过对 VIP 数值大小和公式(2)中回归系数正负号的分析,可以得出:(1) 国民非服务业占比是生态赤字最重要的驱动因素,这与前人的研究结果相一致[17]。目前,江苏省正面临工业结构优化和升级的重要时期,该区域国民非服务业占比已从 1985 年的 82.11%下降至 2009 年的 60.45%,因此将有助于江苏省生态赤字的降低;(2) 农作物总播种面积是生态赤字的次重要驱动因素。随着江苏省建设用地的不断扩张、以及农用地质量的不断下降,江苏省农作物播种面积已从 1985 年的 8.56×10^7 hm² 下降至 2009 年的 7.56×10^7 hm²,致使江苏省农用地可承载能力下降,间接地导致了区域生态赤字的增加;(3) 人均 GDP 是生态赤字的第 3 大重要驱动因素,且人均 GDP 增加将导致江苏省生态赤字的增加,表明江苏省社会经济的发展以消耗区域的资源环境为代价。人均 GDP 对数二次项系数为正,因此在生态赤字与人均 GDP 间不存在典型的 EKC 假说,江苏省生态赤字随其经济的快速发展而下降的拐点仍未到达,江苏省生态赤字仍将继续增加;(4) 普通高等学校师生比、卫生机构床位数分别是生态赤字的第 4、第 5 大驱动因素。这和之前贾俊松[25]关于普通高等学校师生比与卫生机构床位数非生态足迹的重要驱动因素的

研究结论不同。事实上，从表 2 相关性检验结果可以看出，普通高等学校师生比、卫生机构床位数是随人均 GDP 的增长而必然增长的社会发展水平指标，因而，随着人均 GDP 对生态赤字影响的产生，普通高等学校师生比、卫生机构床位数尽管并不能对生态赤字产生直接、实质性的影响，却也在数值上表现为生态赤字的重要驱动因素；(5) 货运周转量是生态赤字的第 6 大驱动因素，其原因可能是由于江苏省自然资源的出口大于其进口数量、运输所导致的能源消耗、污染物的产生与迁入等而引发的资源环境承载能力的下降，关于这一方面将在以后做进一步的研究。

3.3 生态赤字预测

根据江苏省“十二五”发展规划目标，“十二五”期间江苏省总人口将达到 8.02×10^7 人，人均 GDP 将达到 6.82×10^4 元，同期，国民非服务业收入所占比例、农作物总播种面积、货运周转量、普通高等学校师生比及卫生机构床位数指标将分别达到 56.04%，7.18×10^7 hm^2，5.52×10^{11} t·km，5.32%和 35.21 张/10^4 人。在此条件下，江苏省 2015 年生态赤字及其驱动因素的发展变化可以分 3 种情况进行分析：(1) 其他条件不变，生态赤字保持在 2009 年的水平，则江苏省 2015 年可承载的总人口数量为 3.55×10^7 人，仅为 2009 年人口水平的 46.01%；(2) 人口数量保持 2009 年水平，若要使人均生态赤字下降为全球平均水平 0.400 0 hm^2，江苏省 2015 年生态赤字 3.089×10^7 hm^2，则无论通过降低国民非服务业收入占比、还是增加普通高等学校师生比、或是增加农作物总播种面积均不可能实现；(3) 若人口和生态赤字均零增长，则 2015 年国民非服务业收入占比、农作物总播种面积和普通高等学校师生比将分别达到 10.85%，9.02×10^7 hm^2 和 23.94%，与 2009 年现状数据存在较大偏差。由此可见，江苏省在实现“十二五”规划发展目标的同时取得生态赤字的零增长或下降难度较大。

4 结论与建议

4.1 结 论

(1) 伴随生态足迹的增加和生态承载力的下降，生态赤字以年均 2.75%的速度递增，江苏省可持续发展的形式日趋严峻，且江苏省不存在生态赤字的 EKC 曲线假说。据 VIP 值显示，总人口、人均 GDP、国民非服务业收入所占比例、农作物总播种面积、货运周转量、普通高等学校师生比及各类卫生机构床位数是江苏省生态赤字的重要驱动因素，且各重要驱动因素按其影响的重要性排序依次为：国民非服务业收入所占比例＞农作物总播种面积＞人均 GDP＞普通高等学校师生比＞各类卫生机构床位数＞人均 GDP 二次项＞货运周转量＞总人口。

(2) 相关性检验，t_1/u_1 平面图、留一法交叉有效性验证，实际值与预测值拟合程度检验结果显示，综合运用 STIRPAT 模型，VIP 值及 PLS 方法构建动态预测模型进行生态赤字的动态预测研究可弥补以往动态预测研究的不足，分析方法更为可靠和准确。

(3) 依据江苏省“十二五”规划发展目标，对江苏省“十二五”期间生态赤字进行预测，结果显示，江苏省生态赤字将从 2009 年的 $1.156\ 1\times10^8$ hm^2 增加至 2015 年末的 $1.418\ 4\times10^8$ hm^2，同期，人均生态赤字从 1.496 7 hm^2 增加至 1.768 8 hm^2，表明江苏省在实现“十二五”规划发展目标的同时取得生态赤字的零增长甚至是下降的任务仍相当艰巨。

4.2 政策建议

(1) 就江苏省而言，“十二五”期间其最重要也是最主要的任务仍然是取得社会经济的快速发展，同时由于人均 GDP 对生态赤字的影响其重要性小于国民非服务业收入所占比例的影响，因此建议江苏省社会经济发展的重点是转变经济增长方式，即促进高污染高耗能产业型经济向无污染，低消耗，对生态环境危害较小的高新产业和环保产业过渡。

(2) 江苏省城市化进程的加剧在所难免。增加农用地播种面积，确保农用地的土壤质量是在建设用地扩张过程中减缓生态赤字增加的关键。因此建议政府必须采取相应的对策控制农用地向建设用地的转换、以及高质农用地向低质农用地的转化。

(3) 建议制定相应的策略控制货物运输过程中资源环境类要素的流出，污染物的流入以及能源的消耗与污染物的产生等，具体表现为制定物品的准出与准入制度，提升货运系统的科技水平，采取最节能减排及最清洁的运输工具等。

(4) 虽然在本研究中人口因素对生态赤字影响的重要性弱于其他影响因素，但人口因素始终是影响生态赤字变化的重要驱动因素。由于江苏省人口基数过大，因此短期内区域人口数量的增加仍将对区域生态环境产生负面影响。因此，建议决策当局在继续贯彻人口计划生育的同时，从控制流动人口数量的增加出发，切实解决人口数量增长所引发的生态赤字问题。

[参 考 文 献]

[1] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al. Calculating national and global ecological footprint time series:

Resolving conceptual challenges[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3):271-278.

[2] Jia Junsong, Deng Hongbing, Duan Jing, et al. Analysis of the major drivers of the ecological footprint using the STIRPAT model and the PLS method: A case study in He′nan Province, China [J]. Ecological Economics, 2009, 68(11):2818-2824.

[3] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island, Philadelphia, USA: New Society Publishers, 1996:66-150.

[4] Erb K H. Actual land demand of Austria 1926—2000: A variation on ecological footprint assessments[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3):247-259.

[5] Holmberg J, Lundqvist U, Robèrt K H, et al. The ecological footprint from a systems perspective of sustainability[J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 1999,6(1):17-33.

[6] Ayres R U. Commentary on the utility of the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 2000, 3(3):347-349.

[7] Van den Bergh J, Verbruggen H. Spatial sustainability, trade and indicators: An evaluation of the ecological footprint[J]. Ecological Economics, 1999, 29(1):61-72.

[8] Rosa E A, York R, Dietz T. Tracking the anthropogenic drivers of ecological impacts[J]. Ambio, 2004,33(8):509-512.

[9] Xu Zhongmin, Cheng Guodong, Qiu Guoyu. Impacts identity of sustainability assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2):198-208.

[10] Dietz T, Rosa E A, York R. Driving the human ecological footprint[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(1):13-18.

[11] Wang Mingquan, Liu Jingshuang, Wang Jinda, et al. Ecological footprint and major driving forces in West Jilin Province, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(5):434-441.

[12] 鲁凤,徐建华,王占永,等. 生态足迹影响因子定量分析及其动态预测比较研究:以新疆为例[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(6):70-74.

[13] 朱金亮,李玉平,蔡运龙. 基于灰色预测模型的河北省生态足迹动态分析与预测[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(2):24-28.

[14] 邹艳芬. 中国能源生态足迹的技术进步影响实证分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1280-1288.

[15] 陈成忠,林振山. 中国人均生态足迹和生物承载力构成的变动规律[J]. 地理研究,2009,28(1):129-142.

[16] 李健,张吉辉. 天津市水资源足迹趋势预测与动态调节[J]. 地域研究与开发,2011,30(5):131-134.

[17] 吴开亚,王玲杰. 生态足迹及其影响因子的偏最小二乘回归模型与应用[J]. 资源科学,2006, 28(6):182-188.

[18] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999:21-348.

[19] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006:279-308.

[20] Wackernagel M, Onisto L, Linares A C. Ecological footprint of nations: How much nature do they use? How much nature do they have? Commissioned by the Earth [C]// Council for the Rio^{+5} Forum. Canada Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997:10-21.

[21] 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.

[22] 张恒义,刘卫东,王世忠,等. "省公顷"生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算:以浙江省为例[J]. 自然资源学报,2009,24(1):82-92.

[23] 陈兴鹏,逯承鹏,杨静,等. 基于生态足迹模型的宁夏1986—2005年人地协调度演变分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):15-20.

[24] 罗璐琴,周敬宣,李湘梅. 生态足迹动态预测模型构建与分析:以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(3):440-445.

[25] 贾俊松. 河南生态足迹驱动因素的 Hi—PLS 分析及其发展对策[J]. 生态学报,2011,31(8):2188-2195.