

基于 ARIMA 模型的生态足迹模拟与预测

董晓晓^{1,2}, 李玉环¹, 王静², 陈瑜琦²

(1. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 中国土地勘测规划院 土地利用重点实验室, 北京 100035)

摘要: [目的] 将现代计量学上普遍应用的自回归移动平均模型 (autoregressive integrated moving average model, ARIMA) 引入生态足迹分析, 寻求动态预测结果。[方法] 以山东省济宁市微山县为案例, 对其 1995—2010 年的生态足迹和生态承载力进行估算, 预测该县 2010—2015 年的生态足迹和生态承载力变化趋势。[结果] 2011 与 2012 年真实数据检验结果显示, ARIMA 模拟模型的预测误差仅为 6.12% 和 4.89%。[结论] 基于 ARIMA 的生态足迹动态模拟模型具有较高的准确性和适用性。

关键词: 生态足迹; 生态承载力; ARIMA; 山东省微山县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0143-05

中图分类号: F127, X171

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.027

Simulation and Prediction of Ecological Footprint Based on ARIMA Model

DONG Xiaoxiao^{1,2}, LI Yuhuan¹, WANG Jing², CHEN Yuqi²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. China Land Surveying and Planning, Beijing 100035, China)

Abstract: [Objective] To apply the autoregressive integrated moving average model (ARIMA) that had been generally used in the modern metrology to ecological footprint analysis. [Methods] Taking Weishan County in Shandong Province as the study area, the per capita ecological footprint and the per capita ecological carrying capacity from 1995 to 2010 were computed firstly, then the trend of per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity from 2011 to 2012 were forecasted based on the computed results. [Results] Tested by the actual data in 2011 and 2012, the prediction error of ARIMA model was only 6.12% and 4.89%. [Conclusion] The ARIMA model had high accuracy and good applicability in the prediction of ecological footprint.

Keywords: ecological footprint; ecological capacity; ARIMA; Weishan County of Shandong Province

生态足迹法 (ecological footprint, EF) 是由加拿大生态经济学家 Willian 等^[1-2]提出的一种度量可持续发展程度的生物物理方法, 具有指标指示意义明确, 评估结果全球可比, 模型方法简便, 资料易获取, 可操作性强等优点, 已在世界各国得到了广泛应用。EF 代表了一定时间内, 一定的人类活动, 包括资源消耗、生产商品或提供服务所需的地球再生生物承载力的多少^[3]。然而, EF 本身是一个静态指标, 缺乏对研究对象动态变化的准确定量分析。目前, 已经有一些国外的学者开始了对 EF 的动态变化及发展趋势的研究。如 Haberl 等^[4]在 3 种不同假设的基础上计算了 1926—1995 年澳大利亚的生态足迹, 并介绍了在研究期间的变化状况, 但此研究中并没有对生态足迹未来的发展趋势进行讨论。Senbel 等^[5]研究了北美生态足迹的影响因素, 并假定几种情景, 预测了不同

情形下 21 世纪的生态赤字 (ecological deficit, ED)。但情景分析方法的缺点在于随机性强, 有很大的不确定性。中国一些学者也曾尝试进行该方面的研究, 如岳东雷等^[6]采用“变化率”和“剪刀差”的方法定量分析了甘肃省 1991—2004 年的生态足迹和生态承载力的变化, 并预测了其 2005—2015 年的发展趋势。但是, 这种方法会随着数据量的增加而不断增加误差, 并且不能在一些极端的情况下使用 (如时间序列样本数据的一些波浪状或阶梯状的变化)。因此, 采用何种方法来准确进行生态足迹的预测是目前亟需解决的一个问题。

ARIMA 模型全称为差分自回归移动平均模型 (autoregressive integrated moving average model, ARIMA), 是由博克思和詹金斯于 20 世纪 70 年代初提出的一种著名的时间序列预测方法, 所以又称为

收稿日期: 2013-11-18

修回日期: 2014-01-22

资助项目: 山东省自然科学基金项目“鲁中南流域地表碳库和碳截流遥感定量评估及土地利用优化模拟”(Y2008H03); 山东省科技攻关项目“耕地保护区地表有机碳通量遥感监测及其优化控制模拟”(2009GG10006006)

第一作者: 董晓晓 (1988—), 女 (汉族), 山东省昌邑县人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与规划。E-mail: 13716105196@163.com。

Box—Jenkins 模型、博克思—詹金斯法。这种方法广泛应用于计量学中,可以较准确地预测非平稳时间序列^[7]。生态足迹时间序列影响因素较多,并且因子间关系复杂,属于非平稳时间序列,用 ARIMA 进行预测可以达到比较高的准确率。为此,本文选择山东省济宁市微山县作为案例研究区,验证 ARIMA 模型对生态足迹进行预测与模拟的可行性。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

微山县位于山东省南部,南北长 120 km,东西宽 8~30 km,总面积 1 779.8 km²。全境东依邹滕丘陵,西临苏北平原,四面为陆,中间为微山、昭阳、独山、南阳四湖,统称南四湖,是中国北方最大淡水湖泊。全境东、北高,西、南低,东西相向倾斜,南北狭长,东南西北走向。2010 年末,全县总人口达 719 014 人,共计 193 388 户。主要属于暖温带半湿润季风气候。微山县年平均气温为 15.7℃,年降水量为 971 mm,年日照时数为 2 303 h。

1.2 资料来源

本文的基础数据主要来源于微山县国土局提供的 1995—2012 年《微山县统计年鉴》,同时根据该县年度更新数据进行实时修改更新,确保了研究结果的客观准确性。使用的分析软件为 Eviews 6.0。

1.3 研究方法

1.3.1 生态足迹法 生态足迹模型通过跟踪区域的能源和资源消费,将它们转化为提供这种物质流所必须的各种生物生产性土地类型的面积,并同区域能提供的生物生产性土地面积进行比较,来定量判断一个区域的发展是否处于生态承载能力的范围内^[8]。

生态足迹模型的计算基于两个前提:人类能够估计自身消费的大多数资源、能源及其所产生的废弃物数量;这些资源和废弃物流能折算成生产和吸纳这些资源和废弃物流的生物生产性面积。

生态足迹模型的计算主要是计算生态足迹和区域生态承载力。其计算公式为:

$$E_F = Ne_f = N \sum (a_{ii}) = N \sum E_{Q_i} (c_i / p_i) \quad (1)$$

式中: i ——消费的商品和投入的类型; p_i —— i 种消费商品的平均生产能力; c_i —— i 种商品的人均消费量; a_{ii} ——人均 i 种消费商品折算的生物生产总面积; N ——人口数; e_f ——人均生态足迹; E_{Q_i} ——等量化因子,即生产 i 种消费商品的土地类型的均衡因子; E_F ——总的生态足迹。

$$E_C = Ne_c = N / (\sum A_j E_{Q_j} Y_j) \quad (2)$$

式中: j ——土地类型; e_c ——人均生态足迹供给,即

人均生态承载力; A_j ——区域内第 i 种生物生产面积; E_{Q_i} ——等量化因子; Y_j ——不同类型生态生产性土地生产量调整系数,使用区域单位面积生物生产力与全球平均生物生产力比值表示; E_C ——生态足迹总供给。另外,在生态承载力计算时,还要扣除 12% 的生物多样性保护面积。

1.3.2 ARIMA 模型 所谓 ARIMA 模型,是指将非平稳时间序列转化为平稳时间序列,然后将因变量仅对它的滞后值以及随机误差项的现值和滞后值进行回归所建立的模型。ARIMA 模型根据原序列是否平稳以及回归中所含部分的不同,包括移动平均过程(MA)、自回归过程(AR)、自回归移动平均过程(ARMA)以及 ARIMA 过程。把时间序列视为随机过程,用一个数学模型来描述或模拟;一旦该模型可确定,就可用该时间序列的过去值和现值来预测未来值。该模型考察了时间序列的动态特征和持续特征,揭示了时间序列过去与现在、将来与现在的相互关系^[9]。ARIMA 模型的方程可以用不同形式表示,本文采用的是普遍使用的一个方程:

若 X_t 能通过 d 次差分后变成平稳序列 Y_t , 则:

$$Y_t = \Delta^d x_t = (1 - B)^d x_t \quad (3)$$

于是建立 ARIM(p, q) 模型:

$$Y_t = c + \varphi_1 y_{t-1} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-p} \quad (4)$$

经过 d 阶差分后的 ARIMA(p, d, q) 系本文采用的模型。式中: p ——自回归模型的阶数; q ——移动平均阶数, ε_t 为一个白噪声序列。通常,ARIMA 模型建模步骤有 4 个阶段:序列平稳性检验、模型初步识别、模型参数估计和模型诊断分析。

2 模型应用与结果分析

2.1 E_F 与 E_C 计算

计算生态足迹时的产量因子及均衡因子参考 William 等^[9]提出的数值。生物资源生产面积折算的具体计算采用联合国粮农组织(FAO)1993 年计算的有关生物资源的世界平均产量资料,将微山县的消费转化为提供这些消费所需要的生物生产面积。能源消费账户的计算采用世界上单位化石燃料生产土地面积的平均热量为标准,将当地能源所有消耗的热量折算成一定的化石燃料地面积^[10]。计算结果如表 1 所示。

2.2 基于 ARIMA 模型的模拟与预测

本文仅以 e_f 为例,来阐述 ARIMA 模型的模拟预测过程, e_c 以及各地类 e_f 的模拟过程和拟合方程均予以省略。

表 1 1995—2010 年微山县人均生态足迹统计 $\text{hm}^2/\text{人}$

年份	人均生态足迹	人均生态承载力	生态赤字
1995	1.373 2	0.441 6	0.931 6
1996	1.523 9	0.439 9	1.083 9
1997	1.615 8	0.438 2	1.177 6
1998	1.787 6	0.431 0	1.356 6
1999	1.893 2	0.426 7	1.466 5
2000	2.190 4	0.4320	1.758 4
2001	2.331 8	0.4284	1.903 4
2002	2.593 2	0.428 0	2.165 2
2003	2.708 7	0.429 8	2.278 9
2004	2.954 5	0.432 2	2.522 3
2005	3.097 4	0.435 8	2.661 6
2006	3.193 7	0.430 1	2.763 6
2007	3.441 6	0.427 1	3.014 5
2008	3.671 6	0.438 8	3.232 8
2009	3.623 1	0.439 6	3.183 5
2010	3.821 1	0.439 9	3.381 2

2.2.1 序列的平稳化处理 本文用 $\{e_f\}$ 代表原始的生态足迹序列, $\{e_{f1}\}$ 为一阶差分序列, $\{e_{f2}\}$ 为二阶差分序列。从 e_f 序列的线性趋势图(图 1)中可以直观地看出 e_f 是随着时间的增长而增加的,仅有一定的趋势性,不是平稳序列。这也可以采用 ADF 检验和 PP 检验来进行证明。检验结果如表 2 所示。

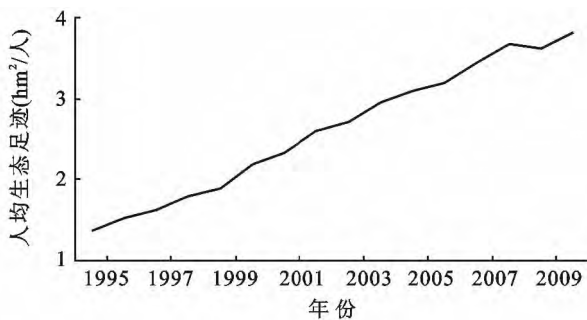


图 1 微山县人均生态足迹序列 $\{e_f\}$ 的线性趋势

表 2 微山县人均生态足迹序列的单位根检验结果

检验方法	检验值/%	e_f	e_{f1}	e_{f2}
ADF 检验	1	-4.728 3	-4.886 4	-2.792 1
	5	-3.759 7	-3.828 9	-1.977 7
	10	-3.324 9	-3.362 9	-1.602 0
	ADF 值	-2.745 4	-2.698 3	-3.540 6
PP 检验	1	-4.728 3	-4.800 0	-2.754 9
	5	-3.759 7	-3.791 1	-1.970 9
	10	-3.324 9	-3.342 2	-1.603 6
	PP 值	-2.739 7	-5.407 0	-12.99 5

如表 2 所示,在时间序列 $\{e_{f2}\}$ 中,ADF 和 PP 值分别为 -3.540 672 和 -12.995 56,均小于临界值 1%,5%和 10%,因此时间序列 $\{e_{f2}\}$ 在 99%的置信水平下通过 ADF 检验和 PP 检验,可以认定是平稳序列。

2.2.2 模型初步识别 在确定 $\{e_{f2}\}$ 序列是平稳时间序列后,通过该序列的自回归函数(ACF)和偏自回归函数(PACF)来确定 ARIMA(p, d, q)模型的阶数 p 和 q 。 $\{e_{f2}\}$ 序列的自回归(AC)值和偏自回归(PAC)值见表 3。从表 3 中可以看出, $\{e_{f2}\}$ AC 值和 PAC 值都是拖尾的,AC 函数在一次滞后呈现几何速度递减,PAC 函数是三次滞后几何递减,因为前文已经知道 $d=2$,因此,初步估计模型为 ARIMA(3, 2, 1)。

表 3 $\{e_{f2}\}$ 序列的 AC 和 PAC 值

序号	AC	PAC	Q-Stat	概率值
1	-0.627	-0.627	6.767 7	0.009
2	0.126	-0.439	7.066 2	0.029
3	-0.046	-0.423	7.110 1	0.068
4	0.189	-0.056	7.912 2	0.095
5	-0.267	-0.177	9.688 5	0.085
6	0.211	-0.043	10.939 0	0.090
7	-0.167	-0.185	11.831 0	0.106
8	0.204	0.028	13.387 0	0.099
9	-0.251	-0.123	16.210 0	0.063
10	0.180	-0.149	18.034 0	0.054
11	-0.123	-0.254	19.164 0	0.058
12	0.120	-0.260	20.766 0	0.054
13	-0.050	-0.041	21.327 0	0.067

2.2.3 模型参数估计 选用最佳准则函数定阶法,即 AIC 准则。该准则是在模型参数极大似然估计的基础上,对模型的阶数和相应参数同时给出一组最佳估计^[11]。AIC 准则是在给出不同模型的 AIC 计算公式基础上,选取使 AIC 达到最小的那一组阶数为理想阶数。经过 Eviews 6.0 反复推算,选出最优模型为 ARIMA(2,2,2)。模型的决定系数 $R^2=0.93$,修正后的 $R^2=0.90$,标准误差为 0.05。AIC 值为 -2.84,SC 值为 -2.63,因此初步确定 ARIMA(2,2,2)为 $\{e_{f2}\}$ 序列的最佳预测模型。

2.2.4 模型诊断分析 参数估计后,对模型进行检验,即对模型的残差序列进行白噪声检验。若残差序列不是白噪声序列,意味着残差序列还存在有用信息没被提取,需要进一步改进模型。

由表 4 可知,残差序列的自相关系数都落入随机

区间,自相关系数的绝对值大都小于 0.1,与 0 无明显差异。而且, P 值都大于 0.05,表明残差序列是纯随机的^[12]。模型残差不存在序列相关,并且各项统计量指标效果也很好,因此,模型拟合是成功的。图 2 中的曲线分别为残差、实际值和拟合值,其中实际值为原始数据经二阶差分之后的值。从图 2 中可以看出,模型的拟合值和实际值变动趋势一致,模型的残差值比较小,说明模型的拟合效果较好。把模型的所有参数输入到公式(4)中,得到序列 $\{e_{f2}\}$ 的公式:

$$Y_t = 0.008916 - 0.546133y_{t-1} - 0.134472y_{t-2} + \epsilon_t - 2.608158\epsilon_{t-1} - 0.363244\epsilon_{t-2} \quad (5)$$

为了方便,公式(5)中用 Y_t 代表 e_{f2} , 然后进行反推即可得到人均生态足迹 e_f 。

用同样的方式可以得到人均耕地生态足迹(e_{fp})、人均草地生态足迹(e_{fg})、人均林地生态足迹(e_{ff})、人均水域生态足迹(e_{fw})、人均建设用地生态

足迹(e_{fc})和人均化石能源生态足迹(e_{ffe})的模拟结果。

表 4 模型残差序列的 Q 检验

序号	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	-0.397	-0.397	2.4045	
2	-0.171	-0.390	2.8947	
3	0.113	-0.190	3.1316	
4	0.105	0.022	3.3612	
5	-0.188	-0.131	4.2088	0.040
6	0.095	-0.005	4.4613	0.107
7	-0.010	-0.058	4.4646	0.215
8	0.104	0.144	4.9151	0.296
9	-0.323	-0.278	10.7530	0.057
10	0.151	-0.165	12.6770	0.048
11	0.021	-0.202	12.7530	0.078

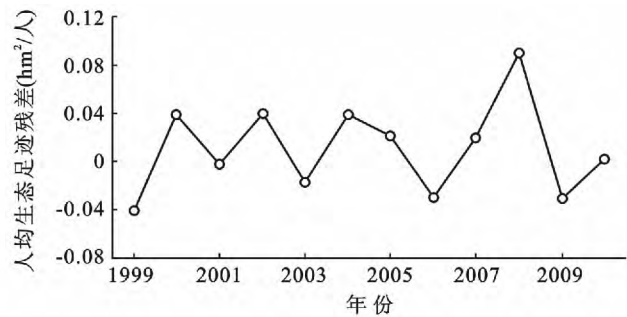
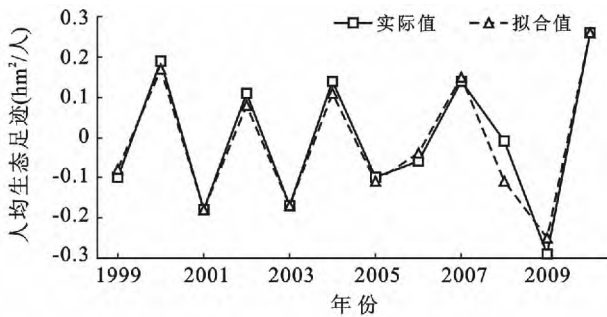


图 2 模型 ARIMA(2,2,2)拟合结果

模拟结果表明,16 a 来,微山县人均耕地生态足迹(e_{fp})从 1995 年的 0.3536 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 0.5069 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量增加了 0.1533 $\text{hm}^2/\text{人}$,年增长率为 2.43%;人均草地生态足迹(e_{fg})从 1995 年的 0.3102 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 0.4751 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量增加了 0.1649 $\text{hm}^2/\text{人}$,年均增长率为 2.88%;人均林地生态足迹(e_{ff})从 1995 年的 0.00012 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 0.00011 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量减少了 0.00011 $\text{hm}^2/\text{人}$,年降低率为 0.58%;人均建设用地生态足迹(e_{fc})从 1995 年的 0.0009 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 0.0029 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量增加了 0.002 $\text{hm}^2/\text{人}$,年增长率为 8.11%;人均水域生态足迹(e_{fw})从 1995 年的 0.5871 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 1.772926 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量增加了 1.1858 $\text{hm}^2/\text{人}$,年增长率为 7.64%;人均化石能源生态足迹(e_{fe})从 1995 年的 0.2637 $\text{hm}^2/\text{人}$ 到 2010 年的 0.6732 $\text{hm}^2/\text{人}$,总量增加;0.4095 $\text{hm}^2/\text{人}$,年增长率为 6.44%。显然,微山县生态足迹增长较快的主要是建设用地,化石能源用地和水域,这与微山县这几年经济的快速发展有关。

2.3 模型预测结果与分析

通过 ARIMA 模型对微山县未来生态足迹变化趋势进行预测,预测结果见图 3。

如图 3a 所示,1995—2015 年微山县人均生态足迹(e_f)呈上升趋势,预计到 2015 年会增加到 4.4685 $\text{hm}^2/\text{人}$,是 2010 年的 1.32 倍。这与微山县“十一五”期间经济快速发展,人民生活水平提高,消耗大量的能源资源,且预计“十二五”期间会继续加快增长是一致的。

从图 3b 中看出,1995—1999 年生态承载力在逐年减少,这主要是因为经济发展造成对自然资源的过度利用,大量耕地转化为建设用地。从 2007 年开始生态承载力呈现逐年上升的趋势,其原因可能是国家和政府加大了对生态环境的整治,土地复垦力度加大等措施。微山县的人均生态承载力(e_c)一直小于人均生态足迹(e_f),表现出明显的生态赤字,并且生态赤字逐年增大,这表明微山县的生态环境处于不可持续发展状态,预计到 2015 年生态赤字达到 4.02 $\text{hm}^2/\text{人}$ 。

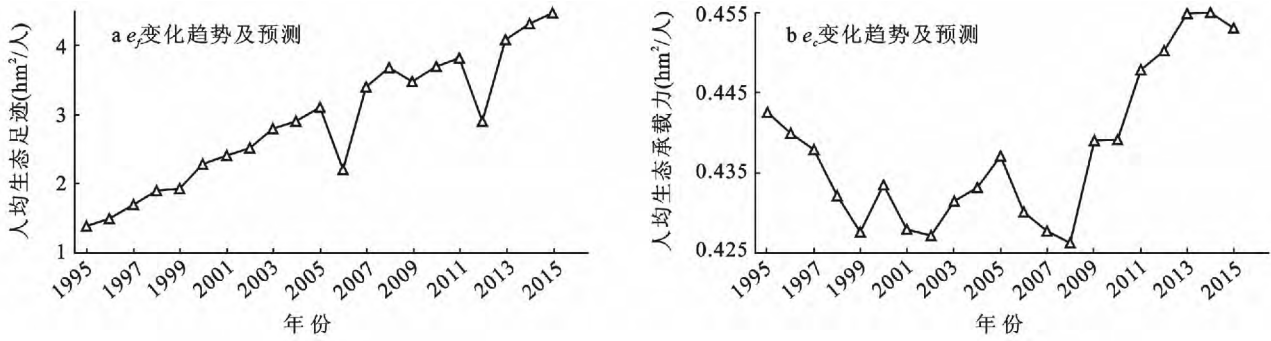


图 3 1995—2015 年微山县人均生态足迹和承载力预测结果

2.4 模型预测结果精度验证

为了验证本次预测结果的准确性,探讨 ARIMA 模型应用于生态足迹预测与模拟的可行性,我们利用微山县 2011 和 2012 年最新的统计数据,计算 2011 年与 2012 年微山县的生态足迹,求得实际值与预测值之间的相对误差,对预测结果进行验证。从表 5 中可以看出,微山县 2011 年的生态足迹为 3.76 hm²/人,小于我们的预测值;2012 年的实际值为 3.89 hm²/人,同样小于预测值,这可能是由于近几年微山县政府加大了环境保护力度,减少了一些能源的消耗。虽然实际值与预测值之间并不完全吻合,但发展趋势是完全一致的,并且实际值与预测值间的误差并不大,完全在合理误差范围以内。因此,利用 ARIMA 模型对生态足迹进行模拟与预测是可行的。

表 5 ARIMA 模型预测结果误差

年份	实际值(hm ² /人)	预测值(hm ² /人)	相对误差/%
2011	3.76	3.99	6.12
2012	3.89	4.08	4.89

3 结论

(1) 采用生态足迹模型对案例区(济宁市微山县)1995—2010 年人均生态足迹和生态承载力进行测算。结果显示,16 a 间微山县的人均生态足迹增长显著,人均生态承载力增长较为缓慢,造成生态赤字逐年扩大,表明该区生态环境已处于不可持续发展状态。通过实地考察,分析结果与实际情况相符,生态足迹模型较真实地反映了区域可持续发展状况。

(2) 以生态足迹模型计算结果为基础数据,采用 ARIMA 模型通过 Eviews 6.0 软件对微山县 1995—2010 年的各土地利用类型的生态足迹和总的人均生态足迹进行模拟和分析,并预测了未来 5 a 的变化趋势。最后根据最新获取的 2011 与 2012 年的统计数据计算 2011 年与 2012 年的人均生态足迹,与模型预测结果相比,误差分别为 6.12%与 4.89%,表明利用

ARIMA 模型进行生态足迹预测具有可行性。

(3) 与传统的单纯对于生态足迹进行静态计算相比,利用模型实现对未来趋势的预测更为重要。ARIMA 模型克服了传统回归分析因子间关系导致多重共线性的不足,在对时间序列过去值和现值分析的基础上,考察了未来值的变化,是一种精度很高的预测方法,尤其是在短期预测中精度更高。

(4) 本研究将具有动态分析的 ARIMA 模型引入生态足迹分析,弥补了传统静态分析模型的不足,但该模型中数据趋势外推法的假设是:任何其他因素已经影响了过去的 EF,并且在将来会持续影响。而实际上这些因子可能随着不同的时间和状况而发生变化。所以,该模拟模型不可避免地仍然具有一定的误差。

(5) 针对微山县目前的状况,应从以下两个方面进行改善。①减少生态足迹消耗。必须尽快改变微山县目前依靠煤炭资源发展的经济模式,减少对不可更新资源的消耗,重点发展知识密集型产业。同时注意控制人口规模,减少人口对环境的压力,引导和改变人们的生产消费方式,降低生态赤字。②提高生态承载力。加大土地整治工作,实施严格的耕地资源保护措施,优化土地配置和高效利用,提高资源利用效率。加强生态环境保护,提高生态承载力水平。

[参 考 文 献]

[1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992,4(2):121-130.

[2] Wackernagel M, Onisto L, Bello P. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. Ecological Economics, 1999,29(3):375-390.

[3] 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[J]. Ecological Economics, 2001,38(1):25-45.

(下转第 152 页)

- [2] 何永涛,李文华,李贵才,等.黄土高原地区森林植被生态需水研究[J].环境科学,2004,25(3):35-39.
- [3] 许炯心.黄土高原植被—降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义[J].生态学报,2005,25(6):1233-1239.
- [4] 张建兴,马孝义,赵文举,等.黄土高原地区水资源承载力动态变化分析:以山西、陕西、宁夏、甘肃 4 省为例[J].干旱区研究,2009,26(1):115-119.
- [5] 邵明安,郭忠升,夏永秋,等.黄土高原土壤水分植被承载力研究[M].北京:科学出版社,2010.
- [6] Campbell G S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems[M]. Elsevier, 1985.
- [7] Yanful E K, Mousavi S M. Estimating falling rate evaporation from finite soil columns[J]. Science of the Total Environment, 2003,313(1):141-152.
- [8] Han H, Felker P. Estimation of daily soil water evaporation using an artificial neural network[J]. Journal of Arid Environments, 1997,37(2):251-260.
- [9] Ma Ying, Feng Shaoyuan, Su Dongyuan, et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,71(S): 40-47.
- [10] Rao M D, Raghuvanshi N S, Singh R. Development of a physically based 1D-infiltration model for irrigated soils [J]. Agricultural water management, 2006, 85 (1):165-174.
- [11] Gencoglan C, Gencoglan S, Merdun H, et al. Determination of ponding time and number of on-off cycles for sprinkler irrigation applications[J]. Agricultural Water Management, 2005,72(1):47-58.
- [12] Lee D H, Abriola L M. Use of the Richards equation in land surface parameterizations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 1999, 104(D22):27519-27526.
- [13] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [14] Ng C W W, Menzies B. Advanced unsaturated soil mechanics and engineering[M]. CRC Press, 2007.
- [15] 王铁行,卢靖,岳彩坤.考虑温度和密度影响的非饱和黄土土—水特征曲线研究[J].岩土力学,2008,29(1): 1-5.
- [16] 卢靖.非饱和黄土水分迁移问题的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [17] 王铁行,刘自成,岳彩坤.浅层黄土温度场数值分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39 (4):463-467.
- [18] 王铁行,陈晶晶,李彦龙.非饱和黄土地表蒸发的试验研究[J].干旱区研究,2014,31(6):985-990.
- [19] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. John Wiley & Sons, 1993.

(上接第 147 页)

- [4] Senbel M, McDaniels T, Dowlatabadi H. The ecological footprint: A non-monetary metric of human consumption applied to North America[J]. Global Environmental Change, 2003,13(2):83-100.
- [5] Ediger V S, Akar S, Ugurlu B. Forecasting production of fossil fuel sources in Turkey using a comparative regression and ARIMA model[J]. Energy Policy, 2006, 34(18):3836-3846.
- [6] 岳东霞,李白珍,惠苍.甘肃省生态足迹和生态承载力发展趋势研究[J].西北植物学报,2004,24(3):454-463.
- [7] 徐中民,程国栋,张志强.生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法:以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J].生态学报,2001,21(9):1484-1493.
- [8] 郑少智,杨卫欣.基于 ARIMA 模型的我国国内生产总值的分析与预测[J].中国市场,2010(48):24-28.
- [9] 邱大雄.能源规划与系统分析[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [10] 潘省初.计量经济学[M].北京:中国人民大学出版社,2002.
- [11] 王燕.应用时间序列分析[M].北京:中国人民大学出版社,2005.
- [12] 池启水.中国石油消费量增长趋势分析:基于 ARIMA 模型的预测与分析[J].资源科学,2007,29(5):69-73.