

基于 STIRPAT 模型的池州市生态足迹驱动机制研究

张勇^{1,2}, 张乐勤³, 陈发奎⁴

(1. 中国矿业大学 环测学院, 江苏 徐州 221116; 2. 池州学院 政法管理系, 安徽 池州 247100;
3. 池州学院 资源环境与旅游系, 安徽 池州 247100; 4. 池州学院 经济贸易系, 安徽 池州 247100)

摘要: 生态足迹是近年来广泛运用于评价区域发展可持续性的重要方法。基于生态足迹计算模型, 对安徽省池州市 2001—2010 年生态足迹进行测算, 并选取了社会经济相关指标, 运用主成分回归方法, 基于 STIRPAT 模型, 构建了影响生态足迹增长的驱动力因子模型。研究结果表明, 池州市人均生态足迹均呈上升的趋势, 且生态足迹的需求远远大于生态承载力, 出现了生态赤字, 且有进一步扩大的态势, 表明池州市处于相对不可可持续发展的状态。驱动机制分析模型表明, 池州市工业经济发展对人均生态足迹增长具有强烈的驱动作用。近年来, 随着池州市工业化进程的加快以及“工业强市”战略的大力实施, 工业经济规模不断扩大, 都极大地推动了生态足迹的增长和生态赤字的扩大。

关键词: 生态足迹; 驱动机制; STIRPAT; 池州市; 生态文明

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0260-06

中图分类号: F062.2

Driving Mechanisms of Ecological Footprint Based on STIRPAT Model

—Taking Chizhou City of Anhui Province as an Example

ZHANG Yong^{1,2}, ZHANG Le-qin³, CHEN Fa-kui⁴

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Department of Politics and Law Management, Chizhou College, Chizhou, Anhui 247100, China; 3. Resource Environment and Tourism Department, Chizhou College, Chizhou 247000, China; 4. Economic and Trade Department, Chizhou College, Chizhou, Anhui 247100, China)

Abstract: Ecological footprint is a newly prevailing approach to evaluate the sustainability of regional development. The ecological footprint for Chizhou City, Anhui Province, from 2001 to 2010 was calculated using ecological footprint model and then some socio-economic indicators were selected and analyzed by principal component regression method. Based on the STIRPAT model, an ecological footprint driving factors model was further constructed. The trend of ecological footprint per capita moved upward and ecological footprint demand was far greater than ecological capacity. Ecological deficit appeared and expanded. This indicates that Chizhou City was in the status of relatively unsustainable development. Besides, the driving model reflects that the development of industrial economy was a strong driving force for ecological footprint. With the industrialization process speeded up and the strategy of "strong industrial city" energetically carried out, the scale of industrial economy expanding, the growth of ecological footprint and the expansion of ecological deficit have been strongly enhanced in Chizhou City.

Keywords: ecological footprint; driving mechanism; STIRPAT model; Chizhou City; ecological civilization

生态足迹分析(ecological footprint, EF)是定量评价区域可持续发展的有效工具,也是度量人类活动对生态系统的压力和影响的一条新途径,已经得到了广泛的关注。近年来,有些学者试图从生态足迹增长

与社会经济因素的相关性入手,对全国或一些典型区域生态足迹增长的驱动机制进行探讨,并提出科学合理的区域可持续发展对策,此方面的研究成果渐趋丰富^[1-4]。

收稿日期:2012-12-07

修回日期:2012-12-29

资助项目:教育部人文社科面上一般项目“承接产业转移背景与池铜一体化趋势下池州生态经济可持续发展研究”(13YJA790003);江苏省高校优势学科建设工程项目(SZBF2011-6-B35);安徽省教育厅重点研究项目“基于外部性理论条件下小流域生态补偿机制与实施途径研究”(2010sk502zd)

作者简介:张勇(1983—),男(汉族),安徽省全椒县人,讲师,博士研究生,主要从事资源经济研究工作。E-mail:happy5401260@126.com。

通信作者:张乐勤(1965—),男(汉族),安徽省宿松县人,硕士,教授,主要从事资源与环境经济学研究。E-mail:zhangleqing@sohu.com。

定量测度生态足迹与社会经济之间的关系,分析生态足迹变化的社会经济影响因素,探究生态足迹增长的社会经济驱动机制,可以更好地为区域未来可持续发展和实现党的十八大提出的建设生态文明目标提供明确的政策导向。但现实中很多影响生态足迹变化的社会经济因素是非平稳的,在未对区域生态足迹与社会经济相关因素进行时间序列平稳性进行检验的情况下,直接对其进行回归,容易产生伪回归问题^[5-6]。

鉴于此,本研究尝试将环境研究领域的 IPAT 等式的随机形式 STIRPAT 模型引入到人均生态足迹变化的社会经济驱动机制研究中^[7-8],先对驱动力因子与人均生态足迹的时间序列数据进行偏相关分析加以检验,再对驱动力因子进行主成分分析,进而基于 STIRPAT 模型构建人均生态足迹与社会经济驱动力因子的计量经济模型^[9-10],得到各社会经济驱动因子对人均生态足迹增长贡献率大小的弹性系数,依据弹性系数即可比较分析各驱动力因子对人均生态足迹增长贡献的程度^[11-12]。据此结合池州市人均生态足迹驱动因素及自然与社会实际条件,提出相关政策建议,为池州市建设生态文明和“美丽池州”乃至建设“美丽安徽”提供科学依据,也可为地级市尺度相关研究提供借鉴。

1 研究区概况

池州市位于安徽省西南部,长江下游南岸,东与铜陵市、芜湖市相依,北滨长江与安庆市隔江相望,南与黄山市毗邻。池州市地貌类型以丘陵山地为主,气候属暖湿性亚热带季风气候,植被类型有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针叶林、竹林等,市域内拥有较为丰富的森林、水、矿产、旅游资源,森林覆盖率达到 60%。池州市是国家级生态经济示范区,是皖南国际旅游文化示范区的重要组成部分,也是“生态安徽”建设试点市,先后获得过“中国优秀旅游城市”、“中国旅游竞争力百强城市”、“国家园林城市”等荣誉称号。池州市现辖青阳县、东至县、石台县、贵池区和九华山旅游风景区,国土面积为 8 272 km²,2010 年全市总人口为 161 万人,GDP 为 300 亿元。

2 数据与方法

2.1 数据来源与指标选取

本研究中生物资源与能源消费量数据来源于《池州统计年鉴》(2002—2011 年),由于大多数数据直接来源于居民人均消费量,故贸易调整不做考虑。影响生

态足迹的社会经济因素数据来源于《池州统计年鉴》(2002—2011 年)和《安徽省统计年鉴(2002—2011 年)》。

关于影响生态足迹的社会经济因素指标的选取,本文借鉴国内多位学者对驱动因子的选取方法,结合池州市社会经济发展状况,从若干社会经济因素中筛选出以下 8 个因素作为生态足迹的驱动力因子加以分析研究,分别为总人口、地区经济发展水平人均 GDP、城镇化率、城乡居民家庭恩格尔系数、人均消费性支出、工业总产值、第二产业比重、单位地区生产总值能耗。在用多元统计分析方法对数据进行分析时,需要利用统计分析软件 DPS 7.05 将原始数据先进行标准化处理,以消除量纲影响,使数据具有可比性。

2.2 研究方法

2.2.1 生态足迹模型(EF 模型) 生态足迹是指在一定的经济规模条件下,维持特定人口的资源消费和废弃物消纳所必需的生物生产土地面积,包括化石能源地、耕地、林地、草地、建筑地、水域 6 种类型^[13-14]。生态足迹的计算基于以下两个基本事实:(1) 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;(2) 这些资源和废弃物流能折算成生产和消纳这些资源和废弃物流的生态生产性土地面积。由 Wackernagel 等创立的综合法计算生态足迹,是目前应用范围较广的一种方法^[15-16]。本文采用此方法计算人均生态足迹(EF)、人均生态承载力(EC)和生态盈余(或赤字)(ED 或 ER),计算公式分别为:

$$EF = \sum_{j=1}^6 (r_j \times \sum_i \frac{c_i}{gp_i}) = \sum_{j=1}^6 (r_j \times \sum_i \frac{c_i}{lp_i} \times YF_i) \quad (1)$$

$$EC = \sum_{j=1}^6 r_j \times (\sum_i \frac{ny_i}{gp_i}) = \sum_{j=1}^6 r_j \times (\sum_i \frac{ny_i}{lp_i} \times YF_i) \quad (2)$$

$$ED(ER) = EF - EC \quad (3)$$

$$EPI = EF/EC \quad (4)$$

式中:EF——人均生态足迹;EC——人均生态承载力;ED(ER)——人均生态赤字或人均生态盈余;EPI——生态压力指数; j ——生物生产土地的类型,包括耕地、林地、草地、水域、能源用地、建筑用地 6 类; r_j —— j 类土地利用的均衡因子; i ——消费项目类型; c_i —— i 商品的人均消费量; gp_i, lp_i ——第 i 种消费项目单位面积的全产和区域平均产量; YF_i ——产量因子; ny_i ——第 i 消费项目的区域总产量。

计算时,均衡因子 r_j 和产量因子 YF_i 取值参考张乐勤等^[11]采用 NPP 计算得到的结果, r_j 取值如下:耕地和建筑用地均为 1.15,林地为 0.87,牧草地

为 0.48, 水域为 0.38, 化石燃料用地为 0.87。YF_i 取值如下: 耕地和建筑用地均为 1.66, 林地为 0.91, 牧草地为 0.19, 水域为 1, 化石燃料用地为 0。

2.2.2 STIRPAT 模型 美国生态学家埃里奇 (Ehrlich) 和康默纳 (Comner) 于 20 世纪 70 年代提出了关于经济增长与资源环境关系的 IPAT 模型: 即 $I=PA^bT^d$ 。Rose 等在 IPAT 的基础之上, 通过对人口、财富和技术的回归, 进行环境压力的随机估计, 提出了环境压力随机模型, 简称 STIRPAT 模型^[17-19], 表达式为:

$$I = aP^bA^cT^de \quad (5)$$

式中: I, P, A, T ——环境压力、人口数量、富裕度和技术; a ——该模型的系数; b, c, d ——人口数量、富裕度、技术 3 项人文驱动力指数; e ——模型的误差。STIRPAT 模型是定量分析人文因素对环境压力影响的一种有效的方法, 目前已被广泛应用于生态足迹、能源足迹和 CO₂ 排放研究中。本研究借鉴 STIRPAT 模型, 构建出生态足迹变化与其驱动力因子关系模型^[12, 20-21], 其模型的表达式为:

$$Y = KP^{a_1}G^{a_2}U^{a_3}F^{a_4}E^{a_5}I^{a_6}A^{a_7}H^{a_8}\epsilon \quad (6)$$

为了通过回归分析确定参数, 对式(6)两边取对数, 得到:

$$\ln Y = \ln K + a_1 \ln P + a_2 \ln G + a_3 \ln U + a_4 \ln F + a_5 \ln E + a_6 \ln I + a_7 \ln A + a_8 \ln H + \epsilon \quad (7)$$

式中: Y ——人均生态足迹; K ——常数; P ——总人口数; G ——经济发展水平, 以人均 GDP 表征; U 为城镇化水平, 以城镇化率表征; F ——城乡居民家庭恩格尔系数; E ——人均消费性支出; I ——工业总产值; A ——第二产业比重; H ——单位地区生产总值能耗; ϵ ——随机模型项; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ ——模型的弹性系数, 表示当 P, G, U, F, E, I, A 和 H 每变化 1% 时, 分别引起 Y 的 $a_1\%, a_2\%, a_3\%, a_4\%, a_5\%, a_6\%, a_7\%, a_8\%$ 变化。

2.2.3 多元统计分析方法

(1) 驱动因子偏相关分析。采用统计分析软件 SPSS 17.0 中的偏相关分析法对上述驱动力因子与人均生态足迹的时间序列数据进行偏相关分析(分析某个变量与人均生态足迹相关性时, 将其他变量作为控制变量), 可得到各个驱动因子与人均生态足迹的相关系数, 并经过显著性经验后可以判断是否可以作为生态足迹的驱动力因子。

(2) 驱动力因子弹性系数确定。首先, 通过 SPSS 17.0 软件中的主成分分析法, 对原始自变量进行分析与筛选, 提取出对原始变量解释性最强的综合变量, 即构建出综合变量与自变量之间线性关系模

型; 其次, 将综合变量与因变量进行普通最小二乘回归, 可得因变量与综合变量的线性关系式; 最后将综合变量与自变量间的线性关系式代入因变量与综合变量的线性关系式中, 可得因变量与自变量间关系式。

3 结果与分析

3.1 生态足迹计算结果

以池州统计年鉴(2002—2011 年)中相关数据为基础资料, 利用式(1)—(3)可计算出池州市人均生态足迹、人均生态承载力、生态赤字(或盈余)及生态压力指数(表 1)。

表 1 池州市 2001—2010 生态足迹时间序列 hm²/人

年份	人均生态足迹	人均生态承载力	生态赤字	生态压力指数
2001	1.246	0.401	-0.845	3.104
2002	1.309	0.399	-0.910	3.281
2003	1.443	0.398	-1.045	3.623
2004	1.576	0.400	-1.176	3.940
2005	1.637	0.413	-1.224	3.964
2006	1.890	0.415	-1.475	4.551
2007	1.965	0.414	-1.551	4.743
2008	2.152	0.412	-1.740	5.219
2009	2.127	0.424	-1.703	5.015
2010	2.248	0.422	-1.827	5.332

从表 1 可以看出, 2001—2010 年池州市人均生态足迹变化较快。从 2001 年的 1.246 hm²/人增加到 2010 年的 2.248 hm²/人, 共增加了 1.002 hm²/人, 且生态足迹变化呈递增趋势。生态足迹一直处于赤字状态, 由 2001 年的 -0.845 hm²/人上升到 2010 年的 -1.827 hm²/人, 且生态赤字呈逐年扩大态势; 生态压力指数由 2001 年的 3.104 增加到 2010 年的 5.332, 增加了 1.72 倍, 也呈现出逐年递增的趋势。上述结果表明, 近年来随着池州市社会经济的快速发展, 工业化、城镇化进程的加速推进, 池州市的生产消费活动负荷已超过其生态安全度, 生态供需矛盾尖锐, 社会经济发展的生态安全风险性和不稳定性在增加, 生态负荷压力较大, 生态已处于不安全状态。

3.2 驱动力因子偏相关分析

以人口数 P , 人均 GDP G , 城镇化率 U , 城乡居民家庭恩格尔系数 F , 人均消费性支出 E , 工业总产值 I , 第二产业比重 A , 单位地区生产总值能耗 H 作为解释变量, 以 Y 作为因变量, 运用 SPSS 17.0 统计软件进行偏相关分析。分析结果显示 8 个驱动力因

子与人均生态足迹相关系数均在 0.84 以上,且显著性检验在 0.01 水平上显著相关,故所选的 8 个驱动力因子均为生态足迹的驱动力影响因子。

3.3 驱动力因子主成分分析

将前述 8 个驱动力指标和人均生态足迹原始时间序列数据取对数。为了消除驱动力因子间量纲关

系,使数据具有可比性,将取对数后的数据输入 DPS 7.05 统计分析软件先进行标准化处理,以消除量纲影响,使数据具有可比性。将标准化后的数据以 TY,TP,TG,TU,TF,TE,TI,TA,TH 表示,然后将 TP,TG,TU,TF,TE,TI,TA,TH 输入 SPSS 17.0 软件进行主成分分析,结果如表 2—4 所示。

表 2 驱动因子主成分分析解释总方差

%

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的	累积	合计	方差的	累积
1	7.723	96.531	96.531	7.723	96.531	96.531
2	0.183	2.286	98.817	0.183	2.286	98.817
3	0.046	0.581	99.398			
4	0.033	0.414	99.812			
5	0.013	0.157	99.968			
6	0.002	0.027	99.995			
7	0.000	0.004	99.999			
8	0.000	0.001	100.000			

表 3 驱动因子主成分得分系数成分矩阵

自变量	主成分	
	1	2
TP	0.129	0.102
TG	0.128	0.110
TU	0.121	0.090
TF	-0.126	-0.120
TE	0.129	0.100
TI	-0.129	0.105
TA	-0.127	0.096
TH	-0.129	0.150

表 4 驱动因子回归模型系数

项目	非标准化系数 B	标准误差	标准系数	t 检验	sig.
常量	-0.601	0.226	—	2.663	0.000
F ₁	7.782	0.308	0.550	1.599	0.001
F ₂	4.890	0.437	0.362	2.001	0.000

由表 2 可知,对自变量 TP, TG, TU, TF, TE, TI, TA, TH 进行分析与筛选后,可以提取 2 个主成分(即综合变量),以 X₁, X₂ 表示,两个综合变量可以解释因变量的 98.817%,且 t 检验的 sig(单侧)值小于 0.01,说明拟合程度非常好。从旋转成分矩阵可以看出,主成分因子 X₁ 与 TP, TG, TU, TE 即总人口,人均 GDP,城镇化率,人均消费性支出 4 项指标呈高度正相关,而与 TF 即城乡居民家庭恩格尔系数呈高度负相关,因此该主成分因子主要是经济发展水平、人们生活消费水平及消费支出结构的综合反映,包含了原始变量的信息;主成分因子 X₂ 则主要与

TI, TA, TH 即工业总产值、第二产业比重、单位地区生产总值能耗有较强的正相关性,说明上述 3 个指标反映的是产业和工业结构及能耗水平。通过表 3 主成分得分系数成分矩阵可得到综合变量 X₁, X₂ 与因变量的关系如下:

$$X_1 = 0.129TP + 0.128TG + 0.121TU - 0.126TF + 0.129TE - 0.129TI - 0.127TA - 0.129TH \quad (8)$$

$$X_2 = 0.102TP + 0.110TG - 0.090TU - 0.120TF + 0.100TE + 0.105TI + 0.096TA + 0.150TH \quad (9)$$

以因变量 TY 为被解释变量, X₁, X₂ 为解释变量,通过 SPSS 17.0 软件中的最小二乘法(OLS)进行回归,得到模型 R² 为 0.890,估计的标准误差为 0.010, t 检验的 sig 值为 0.000,小于 0.01,说明模型拟合非常好。

根据表 4 中的模型系数,可得到综合变量 X₁, X₂ 与 TY 的关系式为:

$$TY = 7.782X_1 + 4.890X_2 - 0.601 \quad (10)$$

将式(8),(9)代入(10)中,可得:

$$TY = 1.502TP + 1.533TG + 1.382TU - 1.590TF + 1.493TE + 1.578TI + 1.632TA + 1.724TH \quad (11)$$

由式(11)可得人均生态足迹的驱动力因子的计量经济模型:

$$Y = KP^{1.502} G^{1.533} U^{1.382} F^{-1.590} E^{1.493} I^{1.578} A^{1.632} H^{1.724} \epsilon \quad (12)$$

由式(12)可知,影响人均生态足迹变化的总人

口,人均 GDP,城镇化率,城乡居民家庭恩格尔系数,人均消费性支出,工业总产值,第二产业比重,单位地区生产总值能耗的驱动因子的弹性系数分别为 1.502,1.533,1.382,-1.590,1.493,1.578,1.632,1.724。表示当人口数每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.502%;当人均 GDP 每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.533%;当城镇化率每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.382%;当城乡居民家庭恩格尔系数每增加 1%时,人均生态足迹将减少 1.590%;当人均消费性支出每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.493%;当工业总产值每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.578%;当第二产业比重每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.632%;当单位地区生产总值能耗每增加 1%时,人均生态足迹将增加 1.724%。以上定量分析的结果表明,城乡居民家庭恩格尔系数与人均生态足迹增长的关系呈负相关关系,而其他 7 个影响因素均为正相关,其影响程度按照大小顺序为:单位地区生产总值能耗>第二产业比重>工业总产值>人均 GDP>总人口>人均消费性支出>城镇化率,其中,单位地区生产总值能耗、第二产业比重、工业总产值是人均生态足迹增长的主要驱动因子,总人口、人均 GDP 是人均生态足迹增长的重要驱动因子,而城镇化率和人均消费性支出对人均生态足迹增长的贡献较小。由此可知,单位地区生产总值能耗、第二产业比重、工业总产值、总人口及人均 GDP 的逐年增加,城镇化率和人均消费性支出水平的逐步提升是池州市 2001—2010 年人均生态足迹不断增加、生态供需矛盾日益尖锐、生态安全压力不断加大的原因。

4 结论

通过对安徽省池州市 2001—2010 年的生态足迹进行测算,分别计算出人均生态足迹、人均生态承载力和生态赤字。计算结果显示人均生态足迹均表现出上升的趋势,且生态足迹的需求远远大于生态承载力,出现了生态赤字。同时依据 STIRPAT 模型,采用主成分因子分析法,对生态足迹增长的社会经济驱动机制进行了定量测度,得出以下结论:2001—2010 年,池州市人均生态足迹不断增长同人口、经济发展水平、单位地区生产总值能耗水平、第二产业对经济贡献值、工业总产值、城镇化水平和人均消费性支出水平存在较大关联,其中,单位地区生产总值能耗、第二产业比重、工业总产值是人均生态足迹增长的主要因素。究其原因,主要是近年来随着池州市工业化进程的加快,“工业强市”战略地大力实施,工业经济发展水平不断提高,工业经济规模不断扩大,这些都极

大地推动了池州市人均生态足迹的递增趋势,导致了生态安全压力不断加大。

鉴于上述结论,结合池州市作为国家级生态经济示范区和“生态安徽”建设试点市的实际情况,为了促进“生态池州”和“生态安徽”建设,提出如下政策建议。

(1) 要进一步确立“生态立市”发展理念,结合资源禀赋优势,对现有产业结构进行适度调整,控制过度扩张的工业经济规模,充分利用池州市丰富的农业、旅游资源优势,积极发展第三产业,增加三产占 GDP 比重。

(2) 要积极倡导“低碳”经济发展模式,淘汰高能耗、低效益的落后产业,大力发展科技含量高、低碳环保、高效益的新兴科技产业,严格执行国家节能环保政策及环境保护基本法律制度,防范“三高一低”风险企业及低水平重复建设项目进入池州,实现由资源推动型向科技创新型转变。

(3) 要严格执行新一轮的土地利用总体规划,保证耕地、林地、水域、牧草地等具有生态功能和价值的土地面积不减少、质量不降低,提高区域土地生态承载力水平和生态安全指数。

(4) 要积极倡导低碳、绿色、环保、节俭理念,建立资源节约型、能源高效型、消费生态型、生产环保型的社会生产和消费模式,强化节约能源资源意识,实现社会生产生活的“低碳化”、“绿色化”、“生态化”,同时要进一步调整能源结构,大力开发清洁能源,如太阳能、水能、风能等,提高资源和能源的利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] 梅艳,何蓓蓓,刘友兆.江苏省生态足迹与经济增长关系的计量分析[J].自然资源学报,2009,24(3):476-482.
- [2] 张勃,刘秀丽.基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测:以甘肃省为例[J].生态学报,2011,31(20):6251-6260.
- [3] 张志强,徐中明,程国栋,等.中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J].地理学报,2001,56(5):599-600.
- [4] 刘建兴,顾晓微,李广军,等.中国经济发展与生态足迹的关系研究[J].资源科学,2005,27(5):33-40.
- [5] 鲁凤,徐建华,胡秀芳,等.生态足迹与经济增长的定量关系及其社会经济驱动机制:以新疆为例[J].地理与地理信息科学,2012,28(5):70-74.
- [6] 鲁凤,徐建华,王占永,等.生态足迹影响因子的定量分析及其动态预测的比较研究:以新疆为例[J].地理与地理信息科学,2010,26(6):70-74.
- [7] Chertow M R. The IPAT equation and its variants: Changing views of technology and environmental impact

- [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4):13-30.
- [8] York R, Rosa E A, Dietz T. A rift in modernity Assessing the anthropogenic sources of global climate change with the STIRPAT model[J]. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 2003,23(10):31-51.
- [9] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and IMPACT: Analytic tools for environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2008,46(3):305-315.
- [10] Roberts T D. Applying the STIRPAT model in a post-Fordist landscape: Can a traditional econometric model work at the local level? [J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2):731-739.
- [11] 张乐勤,陈素平,荣慧芳,等.安徽省池州市 2001—2010 年可持续发展动态测度与分析[J]. *地理研究*, 2012,31(3):439-449.
- [12] 张乐勤,陈素平,王文琴,等.基于 STIRPAT 模型的安徽省池州市建设用地扩展驱动因子测度[J]. *地理科学进展*, 2012,31(9):1235-1242.
- [13] 陈敏,王如松,张丽君,等.1978—2003 年中国生态足迹动态分析[J]. *资源科学*, 2005,27(6):132-139.
- [14] 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.
- [15] 包正君,赵和生.基于生态足迹模型的城市适度人口规模研究:以南京为例[J]. *华中科技大学学报:城市科学版*, 2009,26(2):84-89.
- [16] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments [J]. *Land Use Policy*, 2004,21(3):231-246.
- [17] 李强谊,马晓钰,汪平臻.基于扩展 STIRPAT 模型的新疆生态环境影响因素分析[J]. *中国经贸导刊*, 2012(9):13-14.
- [18] 宋晓晖,张裕芬,汪艺梅,等.基于 IPAT 扩展模型分析人口因素对碳排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2012,25(1):109-115.
- [19] 卢娜,曲福田,冯淑怡,等.基于 STIRPAT 模型的能源消费碳足迹变化及影响因素:以江苏省苏锡常地区为例[J]. *自然资源学报*, 2011,26(5):814-824.
- [20] 李春华,李宁,石岳.基于 STIRPAT 模型的长沙市耕地面积变化驱动因素分析[J]. *中国农学通报*, 2010,26(3):258-263.
- [21] 丁唯佳,吴先华,孙宁,等.基于 STIRPAT 模型的我国制造业碳排放影响因素研究[J]. *数理统计与管理*, 2012,31(3):499-506.

(上接第 175 页)

- [12] 党秀丽,张玉龙,黄毅.保水剂在农业上的应用与研究进展[J]. *土壤通报*, 2006,37(2):352-355.
- [13] Agassi M I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981,45(5):848-851.
- [14] 王慧勇,程东娟,张宏,等.保水剂混施厚度对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. *节水灌溉*, 2011,36(7):43-46.
- [15] 白文波,宋吉清,李茂松,等.保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2009,25(2):18-23.
- [16] 牟金明,姜亦梅,王明辉,等.玉米根茬还田对玉米根系垂直分布的影响[J]. *吉林农业科学*, 1999,24(2):25-27.
- [17] 宋海星,王学立.玉米根系活力及吸收面积的空间分布变化[J]. *西北农业学报*, 2005,14(1):137-141.
- [18] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社, 2009:170-172.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2005:22-24.
- [20] 白文波,李茂松,赵虹瑞,等.保水剂对土壤积水入渗特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2010,43(24):5055-5062.
- [21] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.PAM 对一维垂直入渗特征量影响的实验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2006,48(3):75-77.