

基于函数型数据的长江经济带生态建设动态综合评价

张宝学,陈庆美,王丙参,李路云

(首都经济贸易大学 统计学院,北京 10070)

摘要:从生态建设的经济、社会、生态环境3个方面选取16个代表性指标,基于多指标面板数据,运用熵权法与函数型分析相结合方法对长江经济带2006—2017年的生态建设进行动态评价,深入分析各地区生态建设的变化趋势,探讨函数型综合评价在生态建设中的应用价值。得出结论:长江经济带地区在2006—2017年期间生态建设上升趋势明显;生态环境水平:东部地区呈U型分布,中西部地区呈上升趋势;生态保护和压力:东中西不断上升,且变化趋势相似;经济和社会因素对生态建设影响最大,其次为环境污染和环境治理;生态建设的发展状况与经济建设有一定的趋同特征,且具有明显的聚集现象;对于近两年生态建设发展状况,11个地区上升变化趋势相似。总体而言,函数型综合评价模型对长江经济带的动态生态建设情况分析有效且合理。

关键词:长江经济带;生态建设;函数型综合评价;熵权法

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2020)6—0131—10

长江物种富饶,生态繁杂,货物运输量居全球内河第一,且长江流域及沿线省市构成的经济发展圈在国家发展中具有重要的生态地位。经济社会的发展会带来了一系列的副作用,这其中首要问题便是生态环境的破坏。《长江经济带高质量发展指数报告》显示,其经济实力不断增强,但城镇化发展太快造成了一系列生态问题。此外,生态系统的复杂性和特殊性导致的生态破坏难以挽救,例如,长江流域多种生物的功能性灭绝等。若不及时施以行动,终将影响经济的发展、威胁到人类的生存,党中央多次强调发展中要加强生态保护,人与自然的和谐发展,《长江经济带发展规划纲要》提出“生态优先,绿色发展”概念。故在东中西部协同发展的背景下,对横跨三大区域的长江经济带进行综合评价可以从定量的角度认清现实,找出地区差异,从而为下一步的政策制定提供建议,且对于各地区生态建设更具有示范带动和借鉴意义。目前,国内外很多专家和学者对长江生态环境评价及预测做出了一系列研究。靳强和郑庆昌^[1]利用复合系统协同度模型度量长江经济带生态创新,得出生态环境在2005—2016年有序地经历了上升—下降—上升的历程;许辉云^[2]采用余弦夹角值权重法与TOPSIS法客观评价法对长江经济带生态承载力进行了评价,得出省级区别小,整体呈中低水平;袁一仁等^[3]采用动态因子分析法研究了长江经济带生态建设的空间布局和演变过程。

综合评价方法的最终目的是将被评价对象的多个指标的信息加以综合得到综合数值,然后利用综合数值从整体上评价被评价对象。运用综合评价方法的大多数文献仅仅是通过对时间序列数据或横截面数据分析获得对被评价对象的价值程度或定量的整体性判断依据。例如,国家环保局^[4]、黄辉玲和吴次方^[5]均采用层次分析评价法对生态环境进行了评价,但该方法局限在主观判断对决策结果的影响很大;曹慧等^[6]、刘康兰和袁浩^[7]均采用模糊综合评价对生态环境进行了评价,此外还有一些文献采用人工神经网络^[8-9]、灰色综合评价^[10-11]、指数评价方法^[12-13]和主成分分析^[14-15]等。随着信息技术的持续发展,获取和存储数据的能力不断提高,人们不断获得具有时间-对象-指标等具有函数性特征的三维度数据。利用传统的综合评价方法对该数据进行分析时,假设条件较为严格,但真实数据很难达到假设要求,且易忽略数据的函数型特征,难以深入分析其动态问题、动态评价现象价值程度和价值变化的能力。函数型数据及分析理论首次被加拿大统计学家Ramsay^[16]提出,其相对于传统数据来说能够提供更全面信息。将多个评价指标进行函数化对被评价对象的发展规律进行深层次探究,能更巧妙地揭露数据的内在结构。赵煜和秦增举^[17]探讨了函数型数据分析在生态系统中的应用展望,并没有做出实际分析。

收稿日期:2020—02—21

基金项目:国家自然科学基金“函数型数据的检验问题”资助(11671268)

作者简介:张宝学(1968—),男,吉林长春人,首都经济贸易大学统计学院院长,教授,博士研究生导师,研究方向:函数型数据分析;陈庆美(1996—),女,江西宜春人,首都经济贸易大学统计学院硕士研究生;王丙参(1983—),男,河南南阳人,首都经济贸易大学统计学院博士研究生;李路云(1994—),女,山东济宁人,首都经济贸易大学统计学院硕士研究生。

确定指标权重在综合评价过程中尤为重要。对于时间-对象-指标具有函数性特征的三维度数据,指标权重可能会随着时间的改变而改变,即具有“时序性”。本文利用熵值法确定各个指标在各个年度的权重大小,再利用线性插值对权重进行函数化,即引入“时间”来表示每个指标各个阶段数据的重要程度^[18]而不是简单地将各个时刻看得一样重要。最后将获得的权函数和指标函数进行组合,得到评价函数。

一、研究方法

(一) 指标规范化方法

无论是进行函数型数据分析还是熵值法求取权重,第一步都应该是对指标进行无量纲化处理。进行无量纲化处理时,对正向指标及负向指标分别采用公式(1)及公式(2)所示方法进行处理。

正向指标:

$$x_{ij}^*(t) = [x_{ij}(t) - x_j^{\min}] / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) + 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

负向指标:

$$x_{ij}^*(t) = [x_j^{\max} - x_{ij}(t)] / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) + 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中: i 表示地区; j 表示指标; t 表示时间; x_j^{\max} 、 x_j^{\min} 分别表示第 j 个指标所有时刻的最大值与最小值。

(二) 熵值法

熵值法是利用各指标各年观测值的信息大小确定各指标各年的权重。熵值法的步骤如下。

(1) 计算第 t 年第 i 个样本第 j 个指标的比重: $p_{ij}(t) = x_{ij}^*(t) / \sum_i x_{ij}^*(t)$,其中 $x_{ij}^*(t)$ 表示第 t 年第 i 个样本第 j 个指标的数据。

(2) 计算第 t 年第 j 个指标的信息熵: $E_j(t) = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij}(t) \ln p_{ij}(t)$,其中 m 表示每年指标的总个数。

(3) 计算第 t 年第 j 个指标的权重: $w_j(t) = [1 - E_j(t)] / \sum_{j=1}^m [1 - E_j(t)]$, $j = 1, 2, 3, \dots, m$

(4) 对每年的指标权重进行归一化,使得每年的指标权重之和为1: $w'_j(t) = w_j(t) / \sum_{j=1}^m w_j(t)$ 。

在对各指标所有年份的权重进行函数化时,采用线性插值法生成每个指标的权函数。

(三) 函数型数据分析——指标函数

函数型数据分析首先将离散数据函数化,模型为

$$y_{ij} = x_{ij}^*(t) + \varepsilon_{ij}(t) \quad (3)$$

其中: $\varepsilon_{ij}(t)$ 为误差项,满足经典回归假设,即独立同分布、均值为0、方差为 σ^2 。

为了从离散数据中提取出函数特征,本文采用B样条基函数^[19-20]对离散数据平滑化,针对所研究的问题,假设 $\{\phi_k\}$ 为一组B样条基函数,则存在唯一一组系数向量 $c_{ij} = (c_1^j, c_2^j, \dots, c_k^j) \in L^2$ 与之——对应,第 j 个指标第 i 个样本的拟合值为

$$y_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{K_j} c_k^j \phi_k(t) \quad (4)$$

这里的 L^2 是二次可积函数空间, L^2 是与之对应的序列空间, $\{x_{ij}(t)\} (i = 1, 2, \dots, n)$,是有限时间区间上的观测。假设全部指标的基函数相同,但是具有不同的基个数 K_j 。通过基函数展开求估计近似系数,即

$$\sum_{i=1}^I \left[x_{ij}(t) - \sum_{k=1}^{K_j} c_k^j \phi_k(t) \right]^2 = (\mathbf{x}_{ij} - \Phi \mathbf{c}_{ij})^T (\mathbf{x}_{ij} - \Phi \mathbf{c}_{ij}) = \|\mathbf{x}_{ij} - \Phi \mathbf{c}_{ij}\|_R^2 \quad (5)$$

其中: $\mathbf{c}_{ij}^T = (c_1^j, \dots, c_k^j)$; $\Phi = \{\phi_k(t)\}_{k=1}^{K_j}$ 。采用最小二乘的方法,即使式(3)最小化,再对 c_{ij} 求导为0,得到:

$$\mathbf{c}_{ij} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{x}_{ij} \quad (6)$$

故第 i 个样本的 j 个指标拟合曲线估计值为 $y_{ij}(t) = \Phi \mathbf{c}_{ij} = \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{x}_{ij}$ 。

对离散数据函数化不仅要使离散数据较好拟合,还要回避过度拟合(当过度表示时,得到的拟合曲线波动不大,对之后的导数分析造成影响),因此根据均方误差最小原则来评价拟合曲线估计值 y_{ij} ,即

$$MSE_x(y_{ij}) = \text{var}(y_{ij}) + [E(y_{ij}) - x_{ij}]^2 \quad (5)$$

过度拟合令偏差尽可能的小,但同时会增大方差,最终使均方误差偏大,妨碍进一步分析函数拟合曲线,因此,本文在此基础上增加粗糙惩罚度 $\lambda \int [D^q x_{ij}(t)]^2 dt$ 来限制过度拟合的现象。系数 c_k^y 根据最小化惩罚残差平方和求取,即

$$\text{pen}_{\min} = \sum_{i=1}^n \left[x_{ij}(t) - \sum_{k=1}^{K_i} c_k^y \varphi_k(t) \right]^2 + \lambda \int [D^q x_{ij}(t)]^2 dt = \left\{ \left\| x_{ij} - \Phi c_{ij} \right\|_{R'}^2 + \lambda c_{ij}^T \left[\int D^q \Phi(t) D^q \Phi^T(t) dt \right] c_{ij} \right\}_{\min} \quad (6)$$

其中:第二项为惩罚项, q 为导数的阶数,通常取2即可满足要求; λ 是平滑参数。

采用最小二乘的方法,对 c_{ij} 求导为0,得出

$$c_{ij} = \left(\Phi^T \Phi + \lambda \int D^q \Phi(t) D^q \Phi^T(t) dt \right)^{-1} \Phi^T x_{ij} \quad (7)$$

λ 的取值是一个参数向量,本文根据留一交叉验证法来计算,即

$$GCV(\lambda) = \left[\frac{n}{n - df(\lambda)} \right] \left[\frac{SSE}{n - df(\lambda)} \right] \quad (8)$$

其中:拟合误差平方和为 $SSE = \int \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]^2 dt$; df 为自由度; λ 是平衡拟合精度和函数自身波动间的参数。

基函数个数和 λ 的选择关乎到离散数据的拟合和之后的导数分析,因此依据 $SSE = \int \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]^2 dt$ 最小和 GCV 最小原则来选择。

(四)多指标函数型数据综合评价

设有 n 个被评价的对象: s_1, s_2, \dots, s_n , 有 m 个评价指标: $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m$, 且在时间区间 $T = [t_{2006}, t_{2017}]$, 计算得到的函数型数据: $\tilde{x}_{i1}(t), \tilde{x}_{i2}(t), \dots, \tilde{x}_{im}(t)$, 它们为时间 t 的函数。当对数据进行评价时,可形成表1。

通过熵值法求得的权重进行线性插值函数化后得出的权函数类型,见表2。

本文评价函数形式为

$$p_i(t) = W_1(t)\tilde{x}_{i1}(t) + W_2(t)\tilde{x}_{i2}(t) + \dots + W_m(t)\tilde{x}_{im}(t), t \in T, i = 1, 2, \dots, n。$$

其中: $p_i(t)$ 表示第 i 个对象在 T 时间的评价函数。

综上,本文函数型综合评价步骤如下:

- (1) 指标规范化处理,“整体规范化,分时标准化”。
- (2) 熵值法确定各年度各指标权重, $w'_j(t)$ 。
- (3) 线性插值法拟合权重函数, $W_j(t)$ 。
- (4) 指标数据函数化, $\tilde{x}_{i1}(t), \tilde{x}_{i2}(t), \dots, \tilde{x}_{im}(t)$ 。
- (5) 生成综合评价函数 $p_i(t)$ 。

表1 多指标函数型数据表

对象指标	\tilde{X}_1	\tilde{X}_2	...	\tilde{X}_m
s_1	$\tilde{x}_{11}(t)$	$\tilde{x}_{12}(t)$...	$\tilde{x}_{1m}(t)$
s_2	$\tilde{x}_{21}(t)$	$\tilde{x}_{22}(t)$...	$\tilde{x}_{2m}(t)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
s_n	$\tilde{x}_{n1}(t)$	$\tilde{x}_{n2}(t)$...	$\tilde{x}_{nm}(t)$

表2 权函数表

对象指标	\tilde{X}_1	\tilde{X}_2	...	\tilde{X}_m
权函数	$W_1(t)$	$W_2(t)$...	$W_m(t)$

二、长江经济带生态建设动态评价

(一)构建长江经济带生态建设指标体系

本文选取长江经济带2006—2017年的生态建设进行动态综合评价。本文通过参考中国生态环境部2008年公布的《生态县、生态市、生态省建设指标(修订版)》以及其他相关文献,从经济、社会、生态环境3个方面选取16个指标(表3)。数据来源是《中国统计年鉴》、各省市统计年鉴和环境状况统计公报、《中国环境统计年鉴》。

表 3 指标体系表

指标类型	指标名称		指标单位	符号	指标方向
经济因素	GDP		亿元	X_1	正
	城镇居民人均可支配收入		元	X_2	正
	农民年人均纯收入		元	X_3	正
社会因素	城市化水平		%	X_4	正
	恩格尔系数		%	X_5	负
生态环境	生态环境水平	森林覆盖率	%	X_6	正
		建成区绿化覆盖率	%	X_7	正
		自然保护区覆盖率	%	X_8	正
	生态保护	环境污染治理投资占GDP的比重	%	X_9	正
		工业固体废物综合利用率	%	X_{10}	正
		城镇生活污水处理率	%	X_{11}	正
		生活垃圾无害化处理率	%	X_{12}	正
	生态压力	废水COD排放强度	%	X_{13}	负
		工业废水排放量	%	X_{14}	负
		废气SO ₂ 排放强度	万吨	X_{15}	负
		工业固体废弃物排放量	万吨	X_{16}	负

(二)计算长江经济带指标权重

通过熵值法,得出每个指标的在2006—2017年的权重大小,运用线性插值法,得出权函数在2006—2017的平均积分见表4。

表 4 权函数平均积分表

指标类型	指标	2006—2017年 (权函数积分)		2006—2010年		2010—2014年		2014—2017年	
经济因素	X_1	0.081	0.237	0.084	0.25	0.080	0.234	0.079	0.222
	X_2	0.078		0.083		0.077		0.071	
	X_3	0.078		0.083		0.077		0.072	
社会因素	X_4	0.07	0.136	0.071	0.131	0.069	0.136	0.069	0.124
	X_5	0.066		0.073		0.067		0.055	
生态环境水平	X_6	0.06	0.189	0.060	0.184	0.059	0.187	0.062	0.198
	X_7	0.055		0.056		0.053		0.056	
	X_8	0.074		0.068		0.075		0.080	
生态保护	X_9	0.075	0.23	0.075	0.239	0.072	0.22	0.079	0.234
	X_{10}	0.059		0.056		0.059		0.065	
	X_{11}	0.048		0.055		0.044		0.046	
	X_{12}	0.048		0.053		0.045		0.044	
生态压力	X_{13}	0.058	0.208	0.045	0.182	0.07	0.223	0.060	0.222
	X_{14}	0.051		0.049		0.051		0.053	
	X_{15}	0.042		0.041		0.041		0.044	
	X_{16}	0.057		0.047		0.061		0.065	

由表4可知,权重较大的为 $X_1>X_3>X_2>X_4$;而权重较小的为 $X_{14}>X_{15}$,表明经济社会指标在生态建设中影响较大,其次是环境治理和环境污染指标。从各指标类型权函数来看,经济、社会、生态环境、生态保护和生态压力的权重在2006—2017年相对稳定,但经济因素权重呈略下降,生态环境水平和生态压力呈略上升趋势。从各指标权函数来看, X_8 等生态环境指标权重, X_{10} 等生态保护指标权重和 X_{13} 、 X_{14} 、 X_{16} 等环境污染指标权重呈明显上升趋势,经济社会权重下降趋势明显。

(三)函数型数据分析-生成指标函数

在进行函数型数据分析前,首先需要将离散数据函数化。16个指标在2006—2017年的数据均不具有周期性,如图1所示(以6个指标为例),故选择4阶样条基函数对离散数据函数化,综合各种因素假定基函数个数为9。

λ 用来平衡拟合函数对离散数据的拟合精度和函数本身波动之间的参数, λ 的取值大小对于离散数据平滑化至关重要:较大的 λ 会使非线性拟合函数对函数的光滑性要求高,对拟合精度要求少;较小的 λ 则相反,从而导致拟合曲线产生较大的波动性。因此,在选择16个指标的最佳惩罚参数 λ 时(既能保证拟合精度,又能保证不过度拟合),依据GCV最小原则来选取。其中,GCV的曲线如图2所示。

由图2显然可见,16个指标的GCV值都是随着 $\log_{10}\lambda$ 的增加而呈现先减少后增加的趋势,都会有一个最

低值。因此依次选择 16 个指标中最小 GCV 值所对应的 λ 值,其结果见表 5。

依据所选择的最佳基函数和最佳惩罚参数 λ ,利用普通最小二乘法,对原始离散数据进行拟合平滑化处理。为了保证惩罚参数 λ 合理性,绘制 11 个省市的 6 个代表性指标的普通最小二乘和带惩罚项拟合曲线图,以工业固体废弃物为例,如图 3 所示。

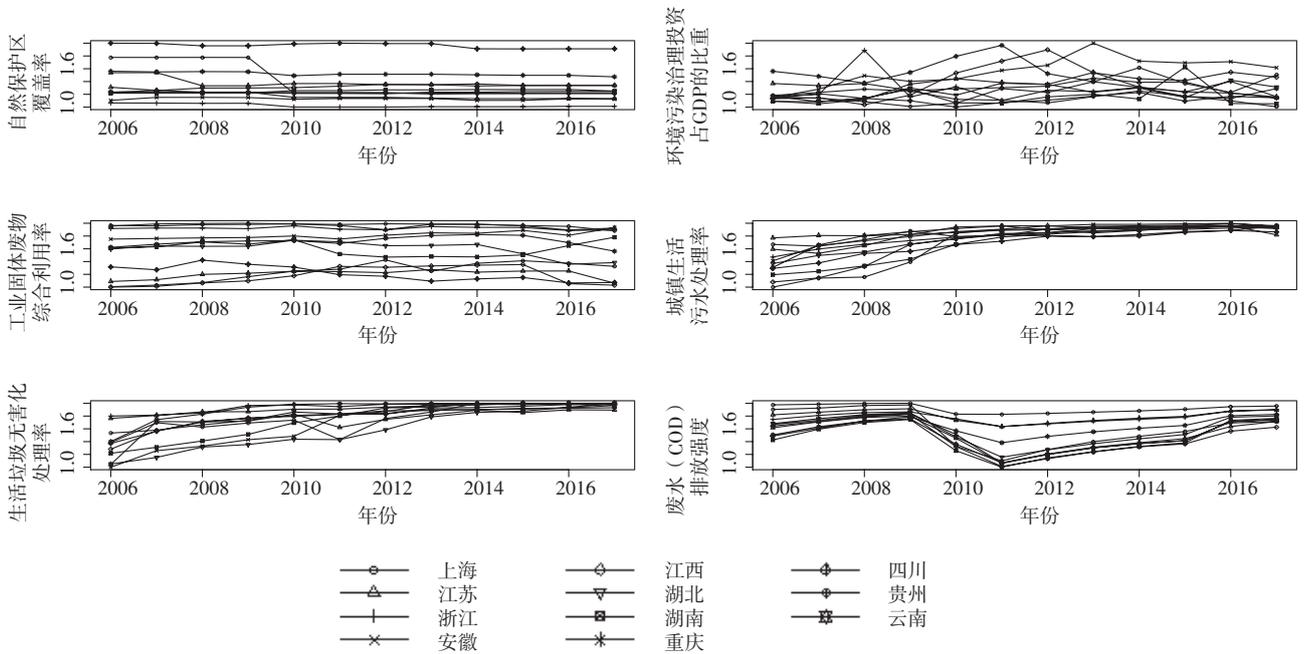


图 1 指标描述图

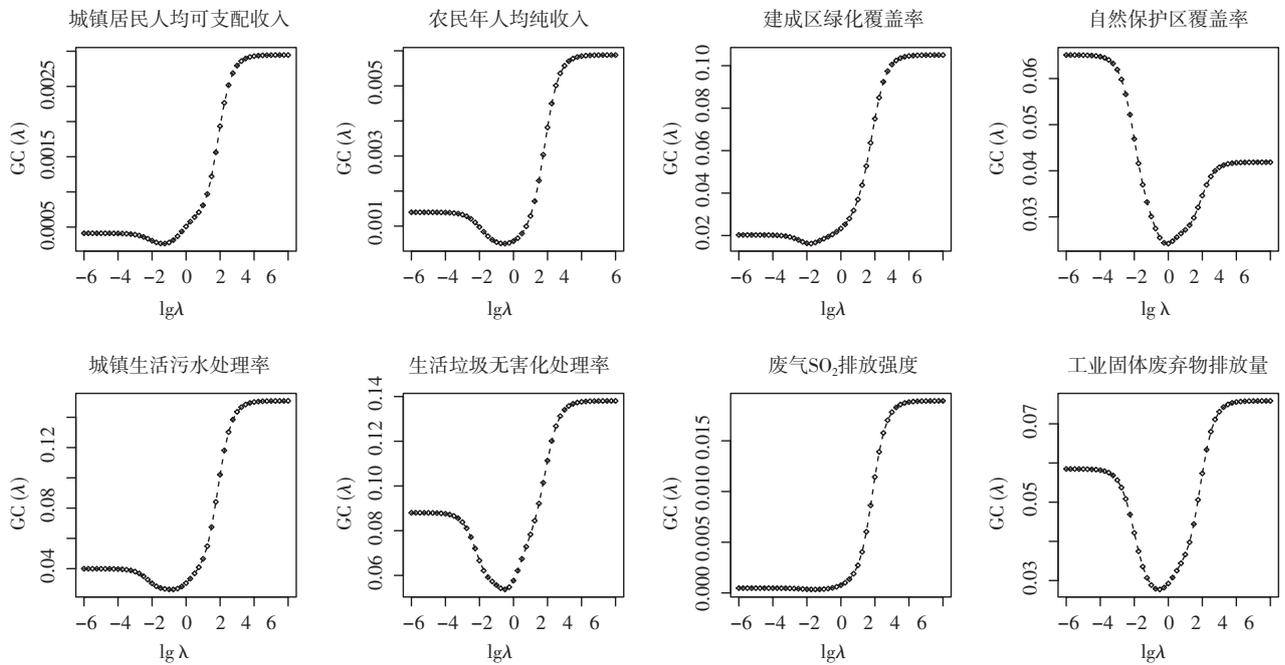


图 2 指标 GCV 曲线

表 5 16 个指标最佳基函数个数和 λ

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
λ	0.1778	0.0562	0.3162	1.7783	0.1	0.0178	1	1	1	0.1778	0.3162	0.1778	0.0178	0.0316	0.3162	0.3162

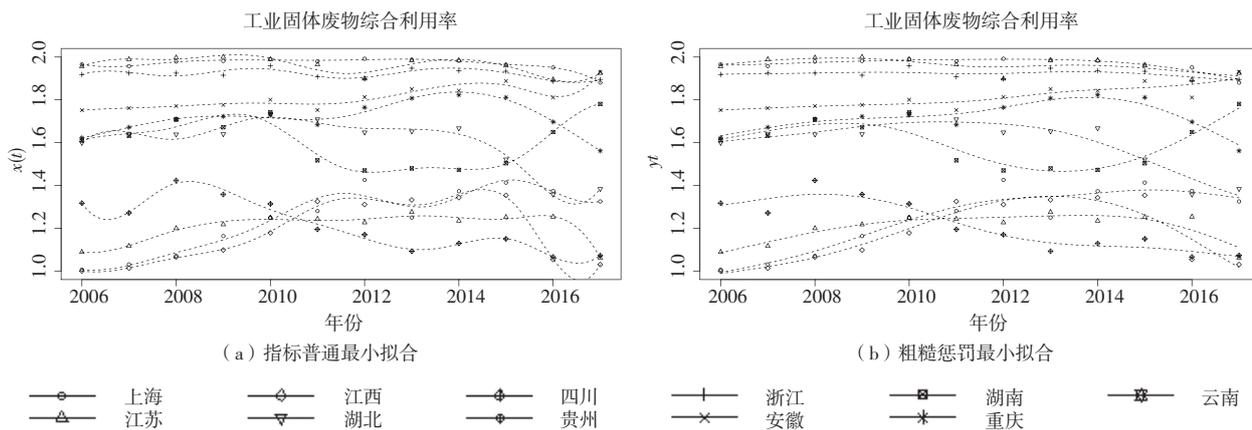


图 3 普通与粗糙惩罚最小拟合函数对比图

增加惩罚后的拟合函数相较于未增加惩罚的拟合函数而言,不仅能够很好地拟合原始离散数据,也能够保证拟合函数的平滑性,极大减少了曲线的过度波动或者局部震动现象(图 3),从而说明所选择的最佳惩罚参数 λ 是合理的。

(四) 评价函数分析

依据以上函数画出各地区的生态环境、保护、压力评价函数,具体如图 4 所示。

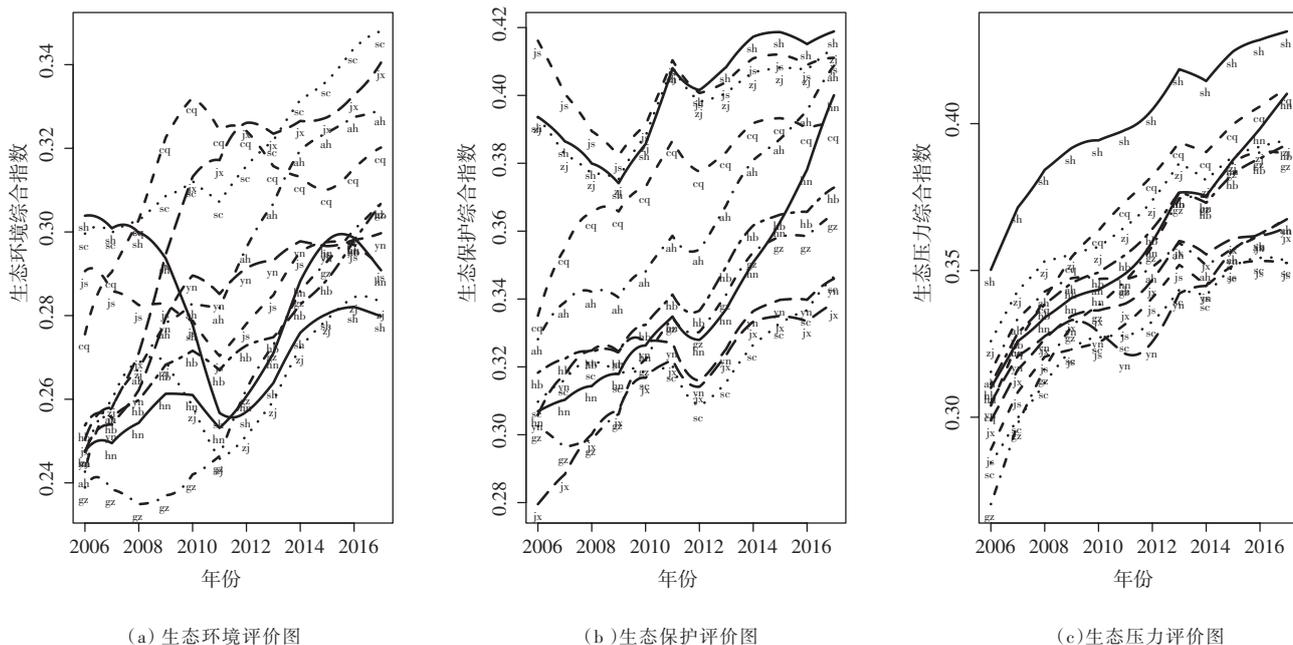


图 4 11 个省市的生态环境、保护和压力评价函数图(根据省份名称缩写进行区分)

根据图 4 和表 6, 总体而言, 生态环境、生态保护和生态压力呈现上升的趋势, 说明这 3 个方面都在逐渐变好。对于生态环境, 从横向上来看, 东部地区呈 U 型分布, 均在 2011 年达到最低, 中西部地区呈上升趋势; 从纵向来看, 最好的为四川、重庆、江西, 最差的为贵州、浙江、湖南。

对于生态保护, 从横向上看, 东中西均不断上升, 变化趋势相似, 且均在 2011—2012 年突然下降; 从纵向来看, 最好的为江苏、上海、浙江, 最差的为江西、四川、云南。

对于生态压力, 从横向上看, 11 个省市均不断上升, 说明对污染物的排放控制较好; 从纵向来看, 最好的为上海, 一直处于领先地位, 最差的为四川、江苏、云南。

根据 $p_i = \frac{1}{T} \int_T p_i(t) dt$, 算出 2006—2010 年、2010—2014 年、2014—2017 年和 2010—2017 年的平均生态环境、保护、压力综合指数, 见表 6。

表6 11个省市生态环境、保护和压力综合指数表

地区	2006—2017年			2006—2010年			2010—2014年			2014—2017年		
	环境	保护	压力									
上海	0.280	0.400	0.402	0.297	0.383	0.380	0.263	0.405	0.406	0.280	0.418	0.426
江苏	0.286	0.402	0.334	0.284	0.394	0.315	0.280	0.404	0.340	0.296	0.411	0.351
浙江	0.265	0.396	0.369	0.263	0.382	0.348	0.255	0.401	0.374	0.281	0.409	0.390
安徽	0.294	0.362	0.349	0.267	0.341	0.339	0.297	0.361	0.352	0.325	0.393	0.360
江西	0.308	0.317	0.343	0.277	0.299	0.324	0.322	0.321	0.348	0.331	0.335	0.361
湖北	0.275	0.343	0.360	0.262	0.325	0.336	0.273	0.343	0.364	0.294	0.366	0.385
湖南	0.270	0.338	0.359	0.255	0.316	0.332	0.265	0.334	0.361	0.296	0.372	0.393
重庆	0.314	0.377	0.372	0.305	0.361	0.339	0.322	0.382	0.382	0.314	0.392	0.402
四川	0.319	0.322	0.330	0.304	0.318	0.310	0.317	0.316	0.334	0.340	0.336	0.351
贵州	0.263	0.331	0.350	0.238	0.304	0.313	0.262	0.336	0.359	0.297	0.359	0.387
云南	0.284	0.328	0.336	0.266	0.322	0.325	0.291	0.325	0.331	0.298	0.340	0.359

生态建设综合评价函数图如图5所示,根据 $p_i = \frac{1}{T} \int_T p_i(t) dt$, 算出2006—2010年、2010—2014年、2014—2017年和2010—2017年的平均生态建设综合指数,见表7。

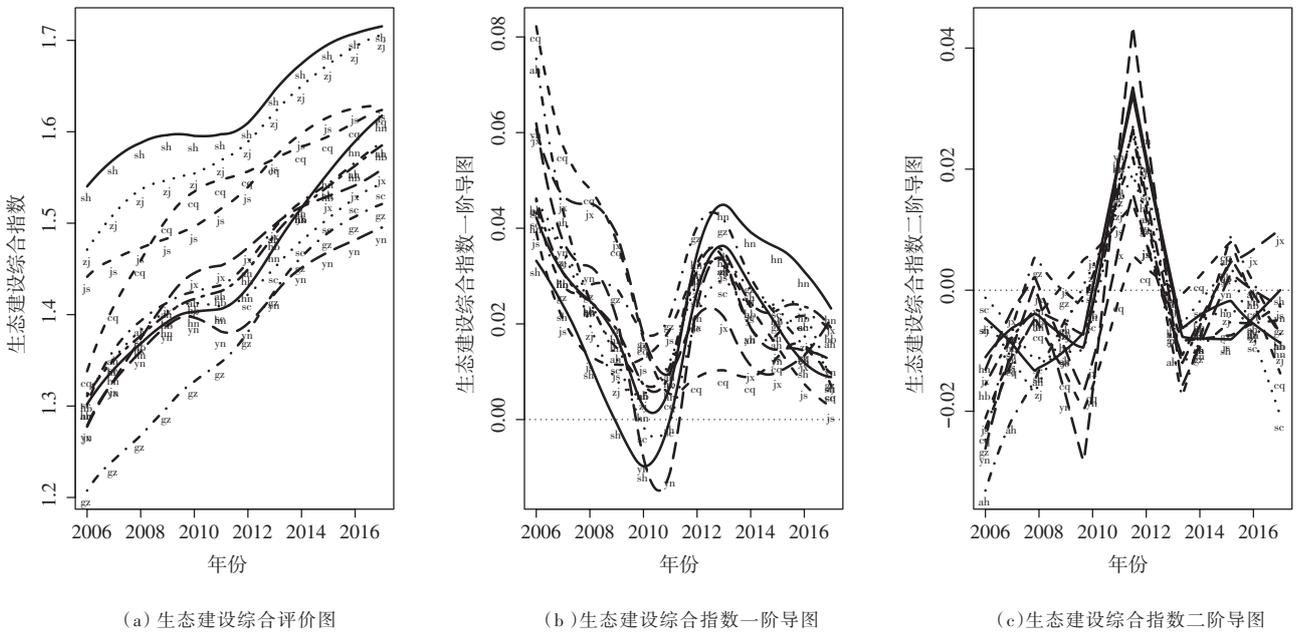


图5 11个省市的综合评价函数图

横向来看,11个省市的生态建设呈现上升的趋势,且速度和加速度变化趋势相似。其中变化速度在2006—2011年期间不断减少,在2011—2013年不断上升,之后再下降。变化加速度呈现近似对称分布,均在2012年加速度达到最大。纵向来看,大致分为3个层次,与地理分布近似趋同。

为更加清楚地描述11个省市的生态建设情况,绘制出每个省份相平面图,如图6所示。由于相平面图的横坐标表示速度(一阶导),当曲线在右边边,表示生态建设综合指数递增,反之递减;纵坐标表示加速度(二阶导),当曲线在上半部分,表示生态建设

综合指数拥有的能量为正值,反之缺乏能量。相平面图反映了变化速度和加速度之间的联系,其中是越靠近横纵0值线的交点,生态建设综合指数变化的速度和加速度越小,曲线波动的摆幅和长久性就会越弱。

表7 平均生态建设综合指数

地区	2006—2017年	2006—2010年	2010—2014年	2014—2017年
上海	1.628	1.581	1.621	1.700
浙江	1.594	1.528	1.595	1.682
江苏	1.538	1.471	1.543	1.619
重庆	1.533	1.454	1.559	1.603
安徽	1.460	1.384	1.465	1.555
江西	1.455	1.371	1.477	1.536
湖北	1.453	1.374	1.457	1.552
湖南	1.449	1.364	1.442	1.571
四川	1.435	1.377	1.432	1.515
云南	1.406	1.355	1.404	1.475
贵州	1.374	1.270	1.387	1.497

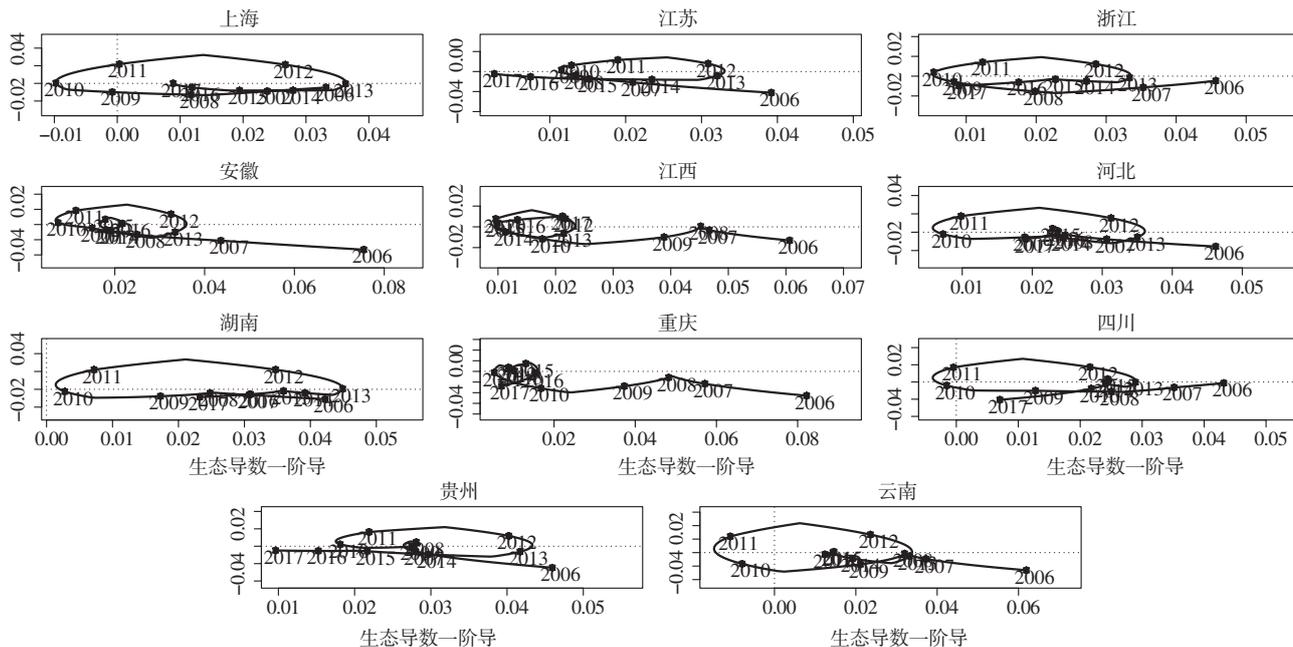


图 6 11个省市的相平面图

如图 6 所示,总体而言,11个省市除了上海、四川和云南有部分落在左平面外,其余均落在右平面,表明长江经济带生态建设整体逐渐变好。上海的相平面图由一个大圆圈组成,图形中的大圈大部分均在右平面上,说明整体呈现上升的趋势;又由于大圈落在上平面的面积远远大于下平面,说明生态建设拥有的能量为正值。2011—2017年,生态建设综合指数一直在上升,2013—2017年都落在右下部分,说明上升的速度持续减缓,2017年的下降的速度接近 0,预测 2018 年生态建设会略微上升,2011—2013 年则相反。2006—2010 年基本落在下平面上,说明生态建设综合指数缺乏能量。江苏在 2007—2015 年形成一个小椭圆圈,基本都落在右平面上,关于横 0 线对称,说明生态建设综合指数在上升,但上升的加速度呈现倒 U 型分布,速度呈倒斜 Z 型分布。2015—2017 年落在右下平面上,说明在上升,其上升的速度不断减缓,其中 2017 年速度最慢,加速度接近 0。浙江在 2009—2017 年形成了一个圈,基本均在右上平面,说明 2009—2017 年生态建设不断在存储能量上升,在 2009 年前均落在下平面,说明 2006—2009 年上升的速度不断减少。

安徽在 2008—2017 年形成一个大圈带小圈,该圈中圈关于横 0 线近似对称,说明 2008—2014 年生态建设综合指数增加的速度呈现下降-上升-下降的趋势,加速度倒 U 分布;2014—2017 年变化是 2008—2014 年期间变化缩小比例的情况,但都快接近横 0 线,说明在这期间变化速度较为稳定。江西与重庆的变化情况类似,在 2006—2008 年上升的速度不断降低,加速度在 2008 年达到 0;在 2008—2010 年以加速度不断增加的情况下上升速度逐渐减缓;在 2010—2017 年形成一个小圆,小圆接近横 0 线,变化速度稳定。湖南在 2010—2013 年生态建设综合指数一直在增速上升,在其余时间,上升速度平稳。

四川在 2010—2011 年生态建设综合指数在左平面,但覆盖的面积较小,说明下降的范围较小,2011—2013 年上升的速度不断增加,2013 年达到最大;但 2013—2017 年生态建设综合指数上升速度不断减小,2017 年达到最小。贵州在 2011—2013 年与四川类似,但速度大于四川,2013—2017 年以稳定的加速度在不断地降低上升的速度,到 2017 年速度达到最低。云南与四川类似,在 2010—2011 年生态建设指数不断缓慢平滑地下降,但在 2011—2013 年,生态建设综合指数持续上升,2013—2017 年上升速度缓慢减小。加速度在 2017 年达到 0,预测 2018 年上升的速度有所增加。

四、结论与创新

(一) 长江经济带 2006—2017 年数据分析结论

本文通过理论和实证相结合的方法,对生态建设和研究方法进行探讨,在实证分析中,构建了评价生态建设的指标体系,对长江经济带生态建设情况用函数型数据综合评价进行了动态定量的分析,说明 11 个省市在 2006—2017 年的生态建设情况,结果如下。

影响因素方面:经济和社会因素对生态建设影响最大,其次为环境污染和环境治理。

生态环境、保护和压力方面：11个省市的生态环境、生态保护和生态压力逐渐变好。从横向来看，生态环境：东部地区呈U型分布，均在2011年达到最低，中西部地区呈上升趋势。生态保护和压力：东中西地区的呈现上升趋势且趋势近似相似。从纵向来看，上海、浙江和江苏等东部地区在生态保护和压力方面做得较好，四川、贵州和云南等西部地区较差，需要加强。

地区分布方面：①在2006—2017年期间，平均生态建设从好到差依次为上海、浙江、江苏（第一层次）、重庆、安徽、江西、湖北、湖南（第二层次）、四川、云南、贵州（第三层次）；②生态建设的发展状况与经济建设有一定的趋同特征，且具有明显的聚集现象；③长江经济带地区整体在近两年上升速度处于下降的状态，且2017年上升速度近似相等；④11个省市在2006—2017年的生态建设排名较为稳定，没有大的波动，其中，重庆排名在2009—2013年一直在上升，超过了江苏，湖南在2014—2017年直接冲到了第五。

（二）创新点

在以往研究生态建设的评价问题时，采用的数据大部分均为单年份的截面数据，采用的方法也均为传统的评价方法。其中有若干的文献也采用了多年份的截面数据，但也是先分年份进行评价，再进行加权平均，并没有得出一个连续的评价函数。赵毅和秦增举^[17]在2015年探讨了函数型数据在生态经济建设的应用展望，并没有做出实际分析。

生态建设是一个动态的过程，对截面数据进行评价无法体现动态过程，具有片面性。生态环境本身就是当地居民的消费过程，它随着时间变化较大，在不同时刻，各地区的生态环境差距很大，如果利用截面数据进行评价，难以确定评价时刻，但利用动态评价就可解决这个问题，很合理。本文将函数型数据分析应用到生态建设的评价问题中，不仅得出了16个省份的评价函数，还根据评价函数进行求导（一阶导、二阶导），画出相平面图，进而分析了16个省份在2006—2017年的生态建设的变化趋势即变好（变差）速度和加速度，也分析了近几年生态建设的情况。可知，函数型分析生态建设变化趋势更合理，更能准确刻画当前各地区生态建设状况，可为相应决策者提供更合理的定量分析依据。

参考文献

- [1] 靳强, 郑庆昌. 长江经济带生态创新协同度及其影响因素分析[J]. 科技管理研究, 2018(18): 261-266.
- [2] 许辉云. 长江经济带省域生态环境承载力评价及障碍因素研究[J]. 曲阜师范大学学报, 2018, 44(3): 103-108.
- [3] 袁一仁, 罗青青, 李悦. 长江经济带生态文明发展水平测度及空间演化特征分析[J]. 统计观察, 2018, 20(26): 98-101.
- [4] 国家环保局. 环境影响评价技术导则 总纲[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [5] 黄辉玲, 吴次方. 基于可拓学的生态城市建设评价——以哈尔滨为例[J]. 地理科学, 2009, 29(5): 651-657.
- [6] 曹慧, 胡锋, 李辉信. 南京市城市生态系统可持续发展评价研究[J]. 生态学报, 2002(5): 169-174.
- [7] 刘康兰, 袁浩. 模糊综合评判在环境质量评价中的应用[J]. 环境工程, 2000, 18(1): 55-57.
- [8] 孙晓鸣, 柏益尧, 左玉辉. 生态城市评价中的RBF神经网络模型——以厦门为例[J]. 环境保护科学, 2005, 31(5): 43-48.
- [9] 汤丽妮, 张礼清, 王卓. 人工神经网络在生态环境质量评价中的应用[J]. 四川环境, 2003, 22(3): 69-72.
- [10] 张文红, 陈森发. 农业生态环境灰色综合评价及其支持系统[J]. 系统工程理论与实践, 2003(11): 119-124.
- [11] 孔海燕, 赵颖, 陈珂, 等. 改进的灰色关联度分析在环境质量评价中的运用[J]. 环境与发展, 2018(1): 109-120.
- [12] 厉彦玲, 朱宝林, 王亮, 等. 基于综合指数法的生态环境质量综合评价系统的设计与应用[J]. 测绘科学, 2005, 30(1): 89-112.
- [13] 贾玉霞. 环境质量综合指数评价方法的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(增刊): 10-11.
- [14] 冯利华. 环境质量的主成分分析[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(8): 32-35.
- [15] 孙利荣. 基于函数数据的综合评价方法研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
- [16] RAMSAY J O. When the data are functions[J]. Psychometrika, 1982, 47(4): 379-396.
- [17] 赵煜, 秦增举. 函数型数据分析及其在生态经济系统中的应用展望[J]. 甘肃科技, 2015(16): 66-68.
- [18] 郭亚军, 姚远. 一种动态综合评价及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2007(10): 154-158.
- [19] 李红广. 基于B样条基粗糙惩罚的某些约束函数型数据光滑方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [20] RAMSAY J O, HOOKER G. Function data analysis with R and Matlab[M]. New York: Springer, 2009.

Dynamic Comprehensive Evaluation of Ecological Construction of the Yangtze River Economic Belt Based on Functional Data

Zhang Baoxue, Chen Qingmei, Wang Bingcan, Li Luyun

(School of Statistics, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: This paper selects 16 representative indicators from the economic, social, and ecological environment of ecological construction. Based on multi-indicator panel data, the method of combining entropy weight method and functional analysis is applied to the Yangtze River. The ecological construction of the economic belt from 2006 to 2017 is dynamically evaluated, and the trend of ecological construction in each region is analyzed in depth. From this, the application value of functional comprehensive evaluation in ecological construction is explored. It is concluded that the ecological construction of the Yangtze River Economic Belt has a rising trend during 2006-2017. Ecological environment level: the eastern region is U-shaped, and the central and western regions are on the rise. Ecological protection and pressure: the eastern, central, and western regions are constantly rising and changing. The trends are similar, economic and social factors have the greatest impact on ecological construction, followed by environmental pollution and environmental governance. The development status of ecological construction and economic construction have certain characteristics of convergence, and there are obvious aggregation phenomena, for the development status of ecological construction in the past two years, 11 regions have similar upward trends. In general, the functional comprehensive evaluation model is effective and reasonable for analyzing the dynamic ecological construction of the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: Yangtze river economic belt; ecological construction; functional comprehensive evaluation; entropy weight method

(上接第 130 页)

- [21] 申晨, 李胜兰, 黄亮雄. 异质性环境规制对中国工业绿色转型的影响机理研究——基于中介效应的实证分析[J]. 南开经济研究, 2018(5): 95-114.
- [22] DRISCOLL J C, KRAAY A C. Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data[J]. *Review of Economics and Statistics*, 1998(80): 549-560.
- [23] 王林辉, 董直庆. 资本体现式技术进步、技术合意结构和我国生产率增长来源[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, 29(5): 3-18.
- [24] HANSEN B E. Threshold effects in non-dynamic panels, estimation, testing and inference[J]. *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.

Heterogeneous Environmental Regulation, Clean Technology Structure and Improvement of Regional Industrial Environmental Efficiency

Wei Wei

(Jiaxing University, Jiaxing 314000, Zhejiang, China)

Abstract: This paper constructs and deduces the mechanism between heterogeneous environmental regulation, clean technology structure and industrial environmental efficiency, measures the clean, non clean technology efficiency and industrial environmental efficiency in China and other provinces, and empirically tests the direct effect, intermediary effect and threshold effect of different types of environmental regulation on industrial environmental efficiency through clean technology structure. It is found that the efficiency of clean, non clean technology and industrial environment has been on the rise in each region, and the eastern region is higher than the central and western regions. Punitive environmental regulation and incentive environmental regulation have a significant positive impact on the direct effect of industrial environmental efficiency, the former is significantly greater than the latter, but the former is gradually weakened, and the latter is gradually strengthened. Both of them have partial mediating effect of sustainable two periods. Punishment type and reward type environmental regulations have double and triple threshold effects respectively. Most provinces' environmental regulations have broken through the u-threshold lower limit, which has a positive effect on industrial environmental efficiency.

Keywords: heterogeneous environmental regulation; clean technology; environmental efficiency; technical structure