

中国生态文明建设效率空间均衡性及格局演变特征

王耕^{1,2}, 李素娟¹, 马奇飞¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

摘要: 研究中国生态文明建设效率的空间分布状态及格局演变特征, 有利于厘清生态文明建设效率的空间差异机理, 对于缩小区域差异及其驱动因素的探索具有重要的指导意义和参考价值。因此, 基于“自然—经济—社会”(Nature-Economy-Society, N-E-S)复合生态系统理论和生态文明建设内涵目标构建生态文明建设效率的投入产出指标体系, 并运用考虑非期望产出的SBM模型对中国2003-2015年的生态文明建设效率进行了测算, 在此基础上, 综合运用核密度估计、Theil指数、重心—标准差椭圆等方法, 对中国生态文明建设效率的空间均衡性及其空间分布格局进行了探究。结果表明: ① 中国生态文明建设效率存在明显的空间非均衡性, 在研究期内(2003-2015年)空间非均衡性表现为先逐渐缩小后又逐渐扩大的动态演变特征; 由三大区域的Theil指数均值可知, 西部地区空间非均衡程度最大(0.1174), 东部次之(0.0365), 中部最小(0.0223)。② 从重心移动轨迹来看, 中国生态文明建设效率的重心位于河南境内, 历经了先向东南再向东北移动的过程, 重心移动的方向表明位于该方向上的地区生态文明建设效率有所提升。③ 从标准差椭圆来看, 中国生态文明建设效率空间分布呈现出偏东北—偏西南格局, 并且这种格局有向正北—正南方向转变的趋势。

关键词: 生态文明建设效率; 空间均衡性; 格局演变; SBM模型; 核密度估计; 重心—标准差椭圆
DOI: 10.11821/dlxb201811011

1 引言

生态文明建设是关系人民福祉, 关乎民族未来的中国特色社会主义事业的重要内容^[1]。因此, 对中国生态文明建设状态与效率的研究, 不仅有利于正确地评估中国生态文明建设的现状, 而且对于此后中国生态文明建设的提升及“两个百年”目标的实现能够提供决策方向和理论支撑。

生态文明建设的研究从评价尺度上来看, 主要有国家^[2]、省域^[3]、城市^[4]3个层面; 从研究内容上来看, 生态文明内涵、评价指标体系的构建及状态评估研究居多^[1, 5-9], 少数学者进行生态文明建设效率的评价研究^[10-11]; 在评价方法上, 一般多采用层次分析法、综合指数法、指标权重法等。上述研究虽然从不同角度反映了生态文明建设的情况, 但也存在以下不足: ① 多数学者主张以经济效益或环境效益作为评价的主要指标, 忽略了生态文明建设是一个复合的过程, 其核心在于自然—经济—社会复合生态系统各组分的和谐进步, 发展高效的生产方式和节约的生活方式, 提高人民的生活福祉^[12]; ② 有些学者虽然考虑到了生态文明建设的核心所在, 对自然、经济、社会各个子系统进行了评价, 但

收稿日期: 2017-10-13; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 教育部共建人文社会科学重点研究基地项目(15JJD790039) [Foundation: Ministry of Education Jointly Established the Key Research Base of Humanities and Social Sciences, No.15JJD790039]

作者简介: 王耕(1973-), 女, 沈阳人, 工学博士, 教授, 研究方向为区域资源与环境、生态安全评价。

E-mail: wangeng@lnnu.edu.cn

还是将其孤立起来考虑,并未理解生态文明建设是自然、经济、社会3方面的协调发展,而非单个系统的建设;③虽然宓泽锋等^[9]运用耦合协调度模型对自然—经济—社会3方面的协调度进行了评价,但是只能反映生态文明建设中表面的协调性,并不能反应生态文明建设系统中自然—经济—社会三者之间的内部生产协调关系。基于效率视角进行生态文明建设的研究,将自然—经济—社会3个子系统纳入到生态文明建设效率的投入产出体系中,通过效率的计算不仅将自然—经济—社会3个子系统联系起来,而且还能反映三者之间的内部生产协调关系。胡彪等^[10]、李巍等^[11]虽然从不同的评价指标对中国生态文明建设效率进行了测算分析,但未对生态文明建设效率的空间演化特征进行研究,研究其空间均衡性及格局演变特征,对于明确空间差异机理及其驱动因素具有重要的理论指导意义。

鉴于此,本文基于“自然—经济—社会”(Nature-Economy-Society, N-E-S)复合生态系统理论和生态文明建设内涵目标构建生态文明建设效率的投入产出指标体系,运用核密度估计法以及GINI系数等指标研究中国生态文明建设的空间均衡性及时间演化趋势,在明确生态文明建设效率空间均衡性演变的基础上,借助标准差椭圆、重心坐标等方法,探寻2003-2015年中国生态文明建设效率的空间格局演化轨迹,对于厘清生态文明建设效率的空间差异机理及空间格局演化特征,为实现缩小生态文明建设效率的区域差异及其驱动因素的研究具有重要参考价值。

2 模型方法及指标数据

2.1 考虑非期望产出的SBM模型

Tone^[13]提出的非径向、非角度的考虑非期望产出的SBM模型,与传统DEA模型相比,该模型将非期望产出问题考虑在内,超越了径向和线性分段形式理论的限制,有效解决了投入产出的松弛性问题,使生态文明建设效率测度值更加准确。具体模型公式见参考文献^[14]。

2.2 核密度估计法

核密度估计^[15-17]是估计未知密度函数的非参数方法之一,具有函数形势不受限制、以数据本身作为分析对象,避免了因设定的不合理导致的误差、以及相对于直方图而言估计结果的连续性更好等优点。核密度的估计式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为根据生态文明建设效率在 n 个地区的值 X_1, X_2, \dots, X_n 估计得到的概率密度函数; k 为核函数,常用的核函数形式有三角核函数、Epanechnikov核函数、Guassian核函数等,选取较为常用的Guassian核函数; h 为带宽,其取值影响着核密度分布的平滑度,本文遵循积分均方误差最小的基本思想进行带宽的选择。

2.3 GINI系数、Theil指数及对数离差均值

GINI系数^[18]是由意大利经济学家Corrado-Gini于1912年以洛伦兹曲线为基础提出的。它和Theil指数、对数离差均值均是反应地区收入差距的指标,值越大则说明地区之间的收入差距越大,地区收入分配的空间均衡性越差。因此,本文借鉴这3个指标以反应中国生态文明建设效率的空间非均衡程度及其变化,其计算公式请参考相关文献^[19]。

2.4 标准差椭圆

标准差椭圆着重于揭示地理要素空间分布的全局特征,属于空间格局统计分析方

法^[20-21]。该方法主要以重心、转角 θ 、 x 轴标准差及 y 轴标准差等参数定量的描述地理要素的空间分布特征。计算公式为：

$$\text{重心坐标: } X = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}; \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i x_i^* \cos \theta - \omega_i y_i^* \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i x_i^* \sin \theta - \omega_i y_i^* \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_i^{*2} - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 y_i^{*2} \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_i^{*2} - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 y_i^{*2} \right)^2 - 4 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_i^* y_i^{*2}}}{2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_i^* y_i^*} \quad (4)$$

式中： (X, Y) 为生态文明建设效率的重心坐标； (x_i, y_i) 为研究区域的空间坐标； (x_i^*, y_i^*) 为各点距离区域重心的相对坐标； ω_i 表示权重，在本文当中 ω_i 为各地区生态文明建设效率值； σ_x 、 σ_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的标准差；上述计算均可在 ArcGIS 10.2 中实现。

2.5 指标选取与数据来源

基于“N-E-S”复合生态系统理论和生态文明建设的内涵目标构建生态文明建设效率投入产出指标体系，将“N-E-S”复合生态系统理论中的自然子系统分为自然资源和自然环境，以此将自然资源消耗、劳动力投入、资本投入作为投入指标，将经济效益、社会效益作为期望产出，经济社会发展所带来的自然环境污染作为非期望产出。鉴于数据的可获得性，本文的研究地区不包括西藏、中国台湾、香港和澳门。所需数据均来源于相关各年《中国统计年鉴》、各地区统计年鉴、《中国环境年鉴》《中国水资源公报》《中国能源统计年鉴》《中国国土统计年鉴》。具体指标构成如表1所示。

表1 生态文明建设效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of ecological civilization construction efficiency

指标类别	指标名称	指标说明
投入指标	自然资源消耗	能源消耗、水资源消耗、土地消耗
	劳动力投入	第一、二、三产业劳动力就业总数
	资本投入	资本存量
产出指标	期望产出	经济效益 地区GDP
		社会效益 根据生态文明内涵及建设目标构建社会效益指标
	非期望产出	自然环境污染 工业固体废物排放量，SO ₂ 、烟(粉)尘排放量，废水排放总量，COD排放量

相关指标处理说明：① 资本存量：本文采用的是以1997年为基期的资本存量，并运用永续盘存法，以10.96%的折旧率进行计算，计算过程参考单豪杰^[22]的算法。② 社会效益指数：生态文明是以人与自然、人与人、人与社会和谐共生、良性循环、全面发展、持续繁荣为宗旨的社会形态^[23]；改善人居环境是生态文明建设的目标之一，提高人民的生活福祉是生态文明建设的核心之一。因此，本文根据生态文明内涵及建设目标构建基于人民生活福祉的社会指标体系，从人居环境和生活质量界定社会效益指标，采用熵值法计算社会效益指数，具体指标如表2所示。③ 自然环境污染指数：环境污染指数的计

算同样采用熵值法,且各指标均为成本型指标。

3 生态文明建设效率的空间均衡性测度及分析

3.1 生态文明建设效率的空间分布特征

根据SBM模型测出的生态文明建设效率结果,绘制中国30个省(市、自治区)2003-2015年各地区生态文明建设效率均值(图1)。

(1) 从中国30个地区生态文明建设效率情况可以看出,天津、上海、山东、广东这4个地区的生态文

表2 社会效益评价指标体系

Tab. 2 Index system of social benefit

目标层	一级指标	二级指标	指标类型
社会效益指数	人居环境	城市人口密度	成本型
		人均公园绿地面积	效益型
		人均城市道路面积	效益型
		清扫保洁面积	效益型
		环保投资	效益型
	生活质量	人均GDP	效益型
		城镇恩格尔系数	成本型
		农村恩格尔系数	成本型
		人均教育文化娱乐支出费用	效益型
		万人本专科以上学历人数	效益型
		万人医生数	效益型
		医院床位数	效益型

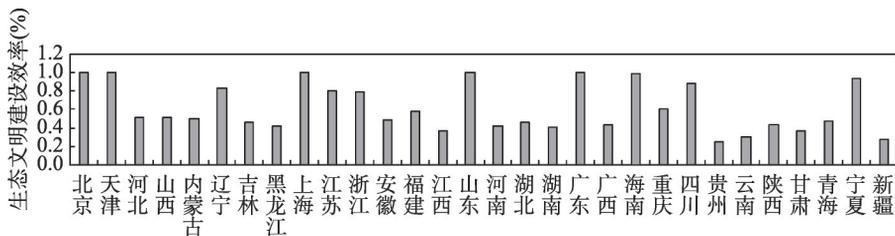


图1 中国30个地区的生态文明建设效率情况

Fig. 1 The situation of eco-civilization construction efficiency in 30 provincial-level regions of China

明建设效率值为1,说明这些地区相对于其他地区而言达到了生态文明建设的投入产出最优水平,在生态文明建设过程中有效地兼顾了自然—经济—社会的协调发展。

(2) 全国生态文明建设效率的平均水平为0.618,说明中国生态文明建设效率整体不高,处于中等水平,还有较大的发展潜力与空间。北京、天津等11个地区生态文明建设效率值处于全国平均水平之上,其余地区均在全国平均效率水平以下。处于全国水平以上的11个地区基本都分布在中国东部地区,说明中国生态文明建设效率存在区域差异,空间分布不均衡。

(3) 从图1可以看出,中国各地区生态文明建设效率值高低不平,且取值范围在0.25~1之间,说明中国生态文明建设效率存在明显的空间非均衡性,且取值差异较大。

3.2 生态文明建设效率空间非均衡性动态分析

为考察中国生态文明建设效率的空间非均衡状态,本文采用核密度估计法将各地区的生态文明建设效率值输入Eviews 8.0软件,计算2003年、2006年、2009年、2012年、2015年生态文明建设效率核密度分布,并绘制核密度分布图(图2)。

(1) 按时间变化趋势来看。生态文明建设效率在2003年存在明显的“双峰”分布,第一波峰对应的效率值为0.41,第二波峰对应的效率值为0.98,说明2003年生态文明建设效率存在明显的两极分化,且处于低效率区的地区数量较多;2006年,2009年和2012年均呈明显的“双峰”分布,且第一波峰对应的效率值分别为0.44、0.45、0.46,第二波峰对应的效率值均为1,说明2003-2012年以来中国生态文明建设效率有逐渐提高的趋

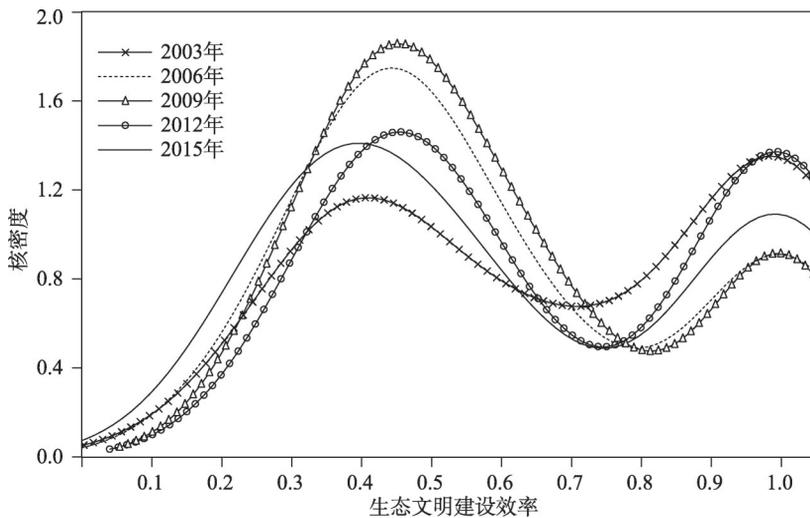


图2 中国生态文明建设效率核密度分布图

Fig. 2 Kernel density distribution map of ecological civilization construction efficiency in China

势，但提升幅度较小。到了2015年，第一波峰和第二波峰的峰值分别为0.39，0.99，相对于2012年生态文明建设效率有明显降低的趋势，且第一波峰高度变矮，宽度变宽，表明中国部分省市的生态文明建设效率水平有所降低，且省市间生态文明建设效率水平不一，地区非均衡性较大。

(2) 从整体变化来看：① 从形状上看，2003年、2006年、2009年、2012年、2015年均呈现明显的双峰态势，说明各省市生态文明建设效率两级分化程度高，高值区与低值区分异明显，表明中国生态文明建设效率存在明显的空间非均衡性。② 从位置上看，2003年、2006年、2009年、2012这4个年份的密度曲线逐渐向右偏移，虽然偏移程度较小，但在一定程度上说明了中国生态文明建设效率有逐渐改善的现象。③ 从峰度看，2003-2015年核密度图达到第一、二波峰最高峰时所对应的生态文明建设效率分别在0.39~0.46之间和0.98~1之间，峰值变化幅度在0.07以内，说明研究期内处于低效和高效区的省市效率值变化不大。2003-2012年生态文明建设效率出现了由宽峰向尖峰发展的变化趋势，并且左端面积逐年减少，表明大部分省市生态文明建设效率趋向提升，地区生态文明建设效率分布的空间非均衡性逐渐降低；2012-2015年出现了尖峰向宽峰的变化趋势，说明这期间生态文明建设效率的空间非均衡性逐渐扩大。

3.3 生态文明建设效率空间非均衡程度测度及分析

Theil指数、GINI系数和对数离差均值分别对上层、中层、底层收入水平的变化较为敏感，并且值越大，地区差异越大，空间非均衡程度也越大。因此本文将引入中国生态文明建设效率空间非均衡状况的研究中，以期对中国生态文明建设效率水平位于上游、中游、下游的地区差异进行更加精确的分析。

3.3.1 省际空间非均衡程度测算及分析 根据GINI系数、Theil指数及对数离差均值的计算公式分别计算出2003-2015年30个省市间反映生态文明建设效率空间非均衡程度的GINI系数、Theil指数和对数离差均值(LI)，将计算结果绘制出相关折线图以直观表述各指标的变化趋势(图3、图4)。

(1) 从三项指标的变化情况来看(图3)，2003-2015年GINI系数、Theil指数和对数离差均值(LI)表现出大致相似的变动趋势，且呈现出较为明显的阶段性特征。GINI系

数在2003-2015年间呈先下降后上升的态势,说明生态文明建设效率水平处于中流的省市地区差异先缩小后逐年扩大。2003-2011年Theil指数和对数离差均值(LI)虽有波动但呈下降趋势,说明2003-2011年间生态文明建设效率水平处于两端的省市地区差异在逐渐缩小;2011年之后Theil指数和对数离差均值逐年增大,说明2011-2015年间生态文明建设效率水平处于两端的省市地区差异在逐年扩大。

(2)从增长率情况来看(图4),除了2004年和2012年,GINI系数、Theil指数和对数离差均值(LI)均表现为同增同减,说明虽然增长(或下降)幅度不同,但中国生态文明建设效率水平处于中游和两端的地区差异有相同的变化趋势,即空间非均衡程度表现为同时扩大或缩小的趋势。2003-2015年GINI系数、Theil指数和对数离差均值(LI)增长幅度最大值分别是16.68%、27.64%、21.64%,且均出现于2013年,说明2013年生态文明建设效率水平处于两端的省市变动较大,而处于中游的省市变动较小;此后,3项指标的值一直在增大,说明地区差异逐渐增大,空间非均衡程度逐年扩大。

(3)从整体上来看,GINI系数、Theil指数和对数离差均值(LI)这3个指标中GINI系数值较大,说明中国生态文明建设效率水平处于中流的地区空间非均衡程度较大,而处于两端的地区差异较小。3项指标中GINI系数的变动幅度较大,而Theil指数和对数离差均值(LI)变动幅度相当且相对较小,一定程度上说明了中国生态文明建设效率水平处于中流的省市在2003-2015年间变动略微较大,而生态文明建设效率水平处于两端的省市变动相对较小。

3.3.2 区域空间非均衡程度测算及分解 根据Theil指数的分解公式,计算得到中国东、中、西三大区域2003-2015年生态文明建设效率的Theil指数及分解指标值(表3),并对相关指标的变化趋势绘制了折线图(图5、图6)。

从全国及东、中、西三大区域Theil指数变化趋势来看(图5),全国和东部地区在2003-2015年间Theil指数的变动幅度较小,说明全国和东部地区各省市生态文明建设效率水平在研究期间内并未发生太大变化;东部地区2003-2012年间Theil指数处于整体下降的趋势,2012-2015年间Theil指数开始回升,说明研究期间东部地区生态文明建设效率的空间非均衡程度先缩小后拉大。西部和中部地区在研究期间变动幅度较大,尤其是中部地区;2005-2011年和2013-2014年间Theil指数变动较小且Theil指数值在0.01左右,说明在这两个期间内中部地区生态文明建设效率的空间非均衡程度缩小,地区差异较小。2003-2015年间全国、东部、中部、西部地区的Theil指数均值分别为0.0909、0.0365、0.0223、0.1174,从三大区域的均值可以看出,西部地区空间非均衡程度最大,东部次之,中部最小,并且全国生态文明建设效率的空间非均衡程度高于东部和中部,低于西部地区;其中中部和西部地区的生态文明建设效率的空间非均衡程度均在2003年

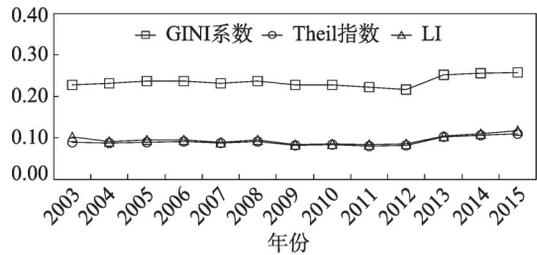


图3 GINI系数、Theil指数、LI变化趋势图
Fig. 3 Trend chart of GINI coefficient, Theil index and logarithmic deviation mean

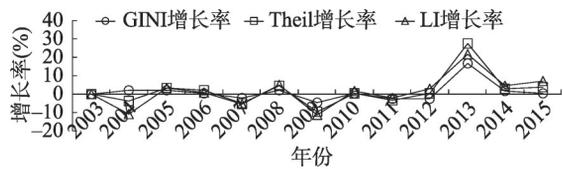


图4 GINI系数、Theil指数、LI增长率的变化趋势图
Fig. 4 The growth rate trend of GINI coefficient, Theil index and logarithmic deviation mean

表3 中国生态文明建设效率的地区 Theil 指数及其分解结果

Tab. 3 The Theil index and its decomposition results of ecological civilization construction efficiency in China

年份	全国	东部	中部	西部	组内	组间	贡献率(%)	
							组内	组间
2003	0.0902	0.0388	0.0874	0.1362	0.0787	0.0115	87.25	12.75
2004	0.0869	0.0398	0.0266	0.0957	0.0443	0.0757	36.92	63.08
2005	0.0900	0.0354	0.0126	0.1124	0.0426	0.0831	33.89	66.11
2006	0.0919	0.0408	0.0091	0.1344	0.0504	0.0923	35.31	64.69
2007	0.0873	0.0378	0.0095	0.1274	0.0481	0.0843	36.33	63.67
2008	0.0912	0.0373	0.0092	0.1331	0.0489	0.0803	37.85	62.15
2009	0.0823	0.0358	0.0058	0.0953	0.0378	0.0910	29.35	70.65
2010	0.0827	0.0319	0.0052	0.1160	0.0433	0.0605	41.71	58.29
2011	0.0800	0.0274	0.0038	0.1136	0.0416	0.0245	62.92	37.07
2012	0.0806	0.0272	0.0429	0.1192	0.0543	0.0219	71.26	28.74
2013	0.1028	0.0415	0.0054	0.1050	0.0417	0.0893	31.83	68.17
2014	0.1057	0.0427	0.0085	0.1170	0.0451	0.0852	34.61	65.39
2015	0.1098	0.0390	0.0639	0.1211	0.0566	0.0481	54.06	45.94
均值	0.0909	0.0365	0.0233	0.1174	0.0487	0.0652	45.62	54.36

达到最大, Theil 指数分别为 0.0874、0.1362, 全国和东部地区生态文明建设效率空间非均衡程度则在 2015 年和 2014 年达到最大, Theil 指数分别为 0.1098、0.0427。

从 Theil 指数分解结果来看(图 6), 东中西三大区域组间生态文明建设效率空间分布的 Theil 指数变化幅度较大, 2003-2004 年、2012-2013 年这期间表现为急剧上升, 2009-2011 年和 2013-2015 年间 Theil 指数表现为急剧下降; 2004-2009 年这段期间虽然变动幅度不大, 基本比较稳定, 但 Theil 指数却居高不下, 说明这段期间生态文明建设效率的组间非均衡程度较大。三大区域组内 Theil 指数的变化表现为 2003-2004 年急剧下降, 此后 2004-2015 年虽然变动幅度较小但却在较小波动中逐渐上升, 说明这段期间组内生态文明建设效率的空间非均衡程度逐渐拉大。研究期内, 组内和组间 Theil 指数的平均值分别为 0.0487、0.0652, 组内差异和组间差异的平均贡献率分别为 45.64%、54.36%, 对比组内组间的平均值及平均贡献率来看, 在三大区域划分设定下, 组间差异是影响中国生态文明建设效率空间非均衡程度的主要因素。

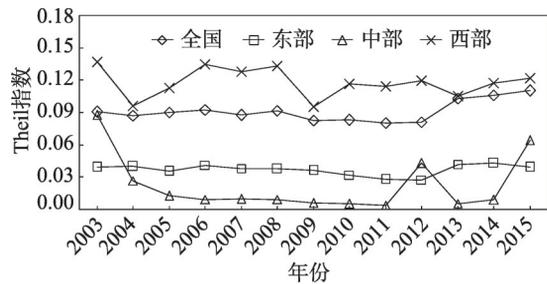


图5 全国及东、中、西部 Theil 指数变化趋势图
Fig. 5 Trend of Theil index in China and its eastern, central and western regions

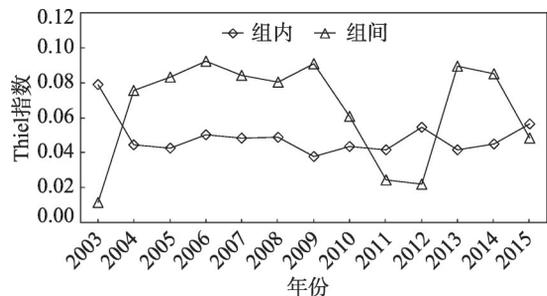


图6 组内及组间 Theil 指数变化趋势图
Fig. 6 Trend of Theil index of interclass and interblock

4 中国生态文明建设效率的空间格局演变特征

在明确中国生态文明建设效率的空间非均衡状态及区域非均衡程度后, 为进一步了解中国生态文明建设效率的空间格局演变特征, 本文运用重心—标准差椭圆对其空间格局特征进行分析。依托 ArcGIS 10.2 平台计算中国生态文明建设效率的空间分布重心 (表4) 及标准差椭圆相关属性 (表5), 并选取 2003 年、2007 年、2011 年、2015 年 4 个特征时点绘制中国生态文明建设效率的空间格局分布趋势图 (图7)。

表4 中国生态文明建设效率重心移动方向和距离

年份	重心坐标	方向	移动距离 (km)	东西方向 距离(km)	南北方向 距离(km)	速度 (km/a)	东西方向 速度(km/a)	南北方向 速度(km/a)
2003	112.57°E, 34.48°N							
2007	113.02°E, 33.56°N	东偏南 64.08°	113.60	49.66	102.18	28.40	12.41	25.54
2011	113.23°E, 33.55°N	东偏南 3.50°	23.68	23.64	1.45	5.92	5.91	0.36
2015	113.45°E, 33.81°N	东偏北 49.55°	38.25	24.82	29.11	9.56	6.20	7.28

表5 中国生态文明建设效率空间分布的标准差椭圆参数

年份	2003	2007	2011	2015
转角 θ (°)	28.86	21.46	22.49	15.38
沿x轴标准差(km)	964.65	913.16	898.18	854.78
沿y轴标准差(km)	1154.22	1138.50	1130.07	1133.26

4.1 生态文明建设效率空间重心移动轨迹

从重心的分布范围来看, 中国生态文明建设效率重心均分布在河南境内, 说明在东西方向上位于中国东部地区的生态文明建设效率平均要高于西部地区。从重心移动轨迹及方向来看 (图7), 2003 年生态文明建设效率重心在河南省洛阳市境内, 2003-2007 年

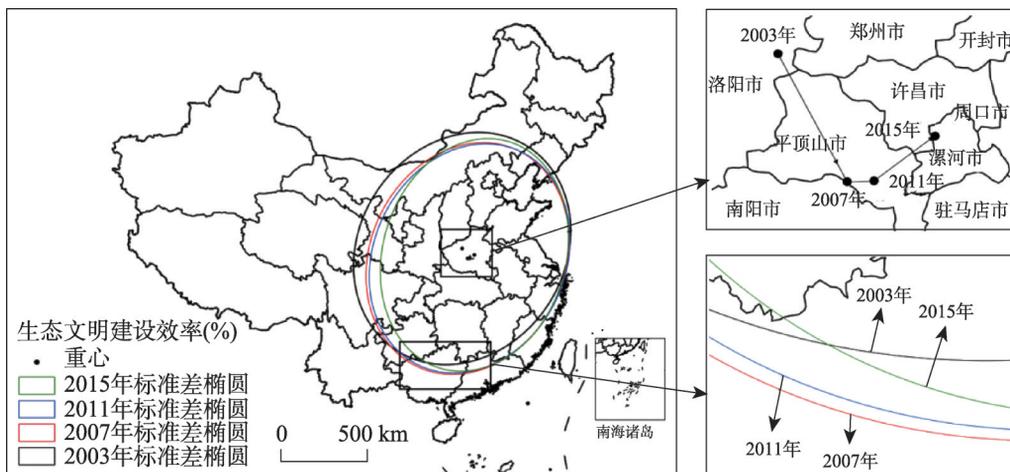


图7 中国生态文明建设效率空间分布格局演化趋势

Fig. 7 The changes of evolution trends of spatial distribution pattern of ecological civilization construction efficiency in China

重心逐渐向东南方向偏移, 偏移方向为东偏南 64.08° , 重心由洛阳市迁移到南阳市的方城县境内; 2007-2011年重心由方城县迁移至平顶山市的叶县, 偏移方向为东偏南 3.5° ; 因此, 2003-2011年重心总体呈现向东南方向移动的趋势, 说明在此期间中国东南地区的生态文明建设效率有较大提升, 致使重心向东南方向移动。2011-2015年重心逐渐向东北方向偏移, 偏移量为东偏北 49.55° , 重心由叶县迁移至漯河市的临颖县, 说明在此期间北方地区较南方地区的生态文明建设效率有较大提升, 致使重心向东北方向偏移。总体来看, 中国生态文明建设效率重心先偏东南再偏东北, 在研究期间重心在东西方向上总体呈现向东偏移, 在南北方向上呈现先向南偏移再向北偏移的趋势。

从重心移动距离及速度来看(表4), 在整个研究时段中, 2003-2007年间重心移动的距离和速度最大, 分别是113.6 km、28.40 km/a; 2007-2011年重心在东西方向和南北方向移动的速度有所降低, 重心东进的速度(5.91 km/a)与重心整体移动速度(5.92 km/a)几乎相同, 说明在此期间重心主要向东移动, 移动距离为23.64 km; 2011-2015年间重心移动的距离和速度有所提升, 主要归结于南北方向上北进速度和距离的大幅提升, 而东西方向上移动的距离和速度虽然也有所提升, 但提升的幅度较小。总体来看, 重心移动速度呈现“加快—缓慢降低—缓慢升高”的态势, 即2003-2007年速度最大, 2007-2011年速度有所降低, 2011-2015年速度有小幅提升。研究前期(2003-2007年), 经济发展较好的东南沿海地区开始注重环境保护和人民福祉, 致使生态文明建设效率得到快速提升, 而随着“西部大开发”和“中原崛起”战略的实施, 由于中西部地区为追求经济的快速发展, 而忽视了环境污染, 导致污染物排放过多, 其中中部地区的二氧化硫排放量由2003年的74.08万t增加到2007年的90.28万t, 西部地区2007年的废水排放总量在2003年的基础上增加了14.68%; 此外, 中西部地区能源利用效率较低, 能源消耗逐年增加, 尤其是内蒙古地区能源消耗总量由2003年的5777.85万t标准煤增加到2007年12777.17万t标准煤, 这些问题导致该区域的环境效益和社会效益的下降, 致使生态文明建设效率降低, 从而导致生态文明建设效率的重心快速向东南方向移动。研究中期(2007-2011年), 由于遭受全球经济危机的影响, 中国2008年GDP增长9.6%, 增速较上年大降4.6个百分点, 为2003年以来新低, 2009年GDP增速继续下滑到9.2%, 这段期间中国经济增速总体减慢, 从而使中国生态文明建设效率增速减缓, 致使重心向东南方向移动的速度大幅降低; 研究后期(2011-2015年), 党的“十八大”提出: 大力推进生态文明建设, 并将北京、天津、河北、内蒙古、山西、辽宁、吉林等地加入了生态文明示范区建设的名单, 致使这些地区生态文明建设效率得到快速提升, 从而使生态文明建设效率快速向东北方向移动。

4.2 生态文明建设效率空间格局演变的标准差椭圆分析

2003-2015年生态文明建设效率标准差椭圆主要位于中国东中部的大部分地区, 椭圆向东偏移且覆盖范围逐渐缩小(图7)。2003年、2007年、2011年、2015年平均形状指数分别为0.84、0.80、0.79、0.75, 形状指数逐年减小, 椭圆形状逐渐偏离正圆, 说明中国生态文明建设效率逐渐趋于分散。从转角 θ 来看(表5), 转角呈现“缩小—略增大—再缩小”的过程, 2003-2007年转角变化了 7.4° , 这说明生态文明建设效率空间分布格局由偏东北—偏西南向向正北—正南向偏转了 7.4° ; 2003-2011年转角虽有略微增大, 但是幅度很小, 可以视为其空间分布格局基本保持稳定态势; 2011-2015年转角向正北—正南向偏转了 7.11° 。总体来看, 中国生态文明建设效率空间分布呈现偏东北—偏西南格局, 并有向偏北—偏南格局不断偏移的趋势。从主轴长度上来看, 前3个特征时点的主轴不断

地延伸,主半轴由2003年的1154.22 km延长至2011年的1130.07 km,说明生态文明建设效率在偏东北—偏西南向的空间分布有所极化,2011-2015年主半轴由1130.07 km增加到了1133.26 km,虽然增幅不大,但却表明了生态文明建设效率空间分布在主轴方向上有分散的趋势;从辅轴的变化来看,2003-2015年辅半轴由964.65 km不断缩短至854.78 km,表明生态文明建设效率在偏东南—偏西北向不断趋于极化。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 2003-2015年中国生态文明建设效率均呈明显的“双峰”分布,且出现了宽峰—尖峰—宽峰的发展变化趋势,说明中国生态文明建设效率呈现明显两极分化,且空间分布不均衡,高效区和低效区分异明显,空间非均衡状态表现为空间非均衡性先逐渐降低后又逐渐扩大的动态演变特征。

(2) 研究期内(2003-2015年),GINI系数、Theil指数和对数离差均值这3个指标中GINI系数值较大,说明中国生态文明建设效率水平处于中游的地区差异较大;从三大区域的Theil指数均值来看,西部地区空间非均衡程度最大,东部次之,中部最小,Theil指数分解结果表明,组间差异是影响中国生态文明建设效率空间非均衡程度的主要影响因素。

(3) 2003-2015年生态文明建设效率重心分布在河南境内,移动轨迹为“洛阳市—南阳市(方城县)—平顶山市(叶县)—漯河市(临颖县)”,重心呈现先偏东南再偏东北的变化格局,重心移动速度呈现“加快—缓慢降低—缓慢升高”的态势。

(4) 从标准差椭圆来看,中国生态文明建设效率空间分布格局不断的趋于分散,转角呈现“缩小—略增大—再缩小”的过程,表明中国生态文明建设效率空间分布格局呈偏东北—偏西南向,并有向正北—正南向不断偏移的趋势;从主辅轴长度变化来看,生态文明建设效率在主轴方向的空间分布呈先极化后分散的过程,而在辅轴方向上则不断的趋于极化。

5.2 讨论

本文尝试运用“N-E-S”复合生态系统理论及生态文明建设的内涵目标构建指标体系,以期全面反应中国生态文明建设的情况,并借助于地理学方法对中国生态文明建设效率的空间均衡性及空间格局演变特征及规律进行了研究,但仍有以下不足需要进一步的探索:①生态文明建设效率的指标体系需进一步补充与完善,虽然本文从自然—经济—社会三方面构建了指标体系,但仍存不足,由于生态文明建设不只是自然、经济、社会的建设,也是政治与文化的建设,因此需进一步补充与完善。②本文未对中国生态文明建设效率的空间差异及影响因素进行探讨与研究,这是本文欠缺的地方,也是后续要研究和解决的问题。

参考文献(References)

- [1] Gu Shuzhong, Hu Yongjun, Zhou Hong. Scientific connotation and basic path of ecological civilization construction. *Resources Science*, 2013, 35(1): 2-13. [谷树忠, 胡咏君, 周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径. *资源科学*, 2013, 35(1): 2-13.]
- [2] Bai Yang, Huang Yuchi, Wang Min, et al. The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6295-6304. [白杨, 黄宇驰, 王敏, 等. 我国生态文明建设及其评估体系研究进展. *生态学报*, 2011, 31(20): 6295-6304.]
- [3] Bi Guohua, Yang Qingyuan, Liu Su. Coupling and coordinated development of ecological civilization construction and

- urbanization in China. *Economic Geography*, 2017, 37(1): 50-58. [毕国华, 杨庆媛, 刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展. *经济地理*, 2017, 37(1): 50-58.]
- [4] Zhang Jingqi, Sun Ping, Xu Jian. Review of urban ecological civilization construction in China. *Economic Geography*, 2014, 34(8): 137-185. [张景奇, 孙萍, 徐建. 我国城市生态文明建设研究述评. *经济地理*, 2014, 34(8): 137-185.]
- [5] He Tianxiang, Liao Jie, Wei Xiao. Construction of comprehensive evaluation index system of urban ecological civilization. *Economic Geography*, 2011, 31(11): 1897-1900. [何天祥, 廖杰, 魏晓. 城市生态文明综合评价指标体系的构建. *经济地理*, 2011, 31(11): 1897-1900.]
- [6] Liu Moucheng, Su Ning, Lun Fei, et al. An integrated indicator on regional ecological civilization construction. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 97-104. [刘某承, 苏宁, 伦飞, 等. 区域生态文明建设水平综合评估指标. *生态学报*, 2014, 34(1): 97-104.]
- [7] Zhang Huan, Cheng Jinhua, Feng Yin, et al. An evaluation index system for ecological civilization construction in mega cities and its research Applications: the case of Wuhan City. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 547-556. [张欢, 成金华, 冯银, 等. 特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用: 以武汉市为例. *生态学报*, 2015, 35(2): 547-556.]
- [8] Li Xi, Hu Hao, Li Mingsheng, et al. Comprehensive evaluation of Chinese ecological civilization and environment of the coordinated development of economy and society. *Resources Science*, 2015, 37 (7): 1444-1454. [李茜, 胡昊, 李名升, 等. 中国生态文明综合评价及环境、经济与社会协调发展研究. *资源科学*, 2015, 37(7): 1444-1454.]
- [9] Mi Zefeng, Zeng Gang, Shang Yongmin, et al. The evolution of evaluation method of the construction of ecological civilization and the spatial pattern of provincial in China. *Economic Geography*, 2016, 36(4): 15-21. [宓泽锋, 曾刚, 尚勇敏, 等. 中国省域生态文明建设评价方法及空间格局演变. *经济地理*, 2016, 36(4): 15-21.]
- [10] Hu Biao, Wang Feng, Li Jianyi, et al. Empirical Study on efficiency evaluation of urban ecological civilization construction based on non expected output of SBM: A case study of Tianjin City. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(4): 13-18. [胡彪, 王锋, 李健毅, 等. 基于非期望产出的SBM的城市生态文明建设效率评价实证研究: 以天津市为例. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 13-18.]
- [11] Li Wei, Xi Yongqin. Research on provincial ecological civilization construction evaluation under the efficiency perspective. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7354-7363. [李巍, 郗永勤. 效率视角下的省域生态文明建设评价研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7354-7363.]
- [12] Li G J. Vigorously promotes ecological civilization construction. *Environmental Protection*, 2011(14): 14-19.
- [13] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach. *GRIPS Research Report Series*, 2003-2005.
- [14] Ren Yufei, Fang Cuanglin, Lin Xueqin. Ecological efficiency evaluation of four Urban agglomerations in eastern coastal areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2047-2063. [任宇飞, 方创琳, 蒯雪芹. 中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价. *地理学报*, 2017, 72(11): 2047-2063.]
- [15] Kumar S, R Russell. Technological changes, technological catch up, and capital deepening: Relative contributions to growth and convergence. *The American Economic Review*, 2002, 92(3): 527-548.
- [16] Jiao Limin, Li Zehui, Xu Gang, et al. Distribution characteristics and models of urban agglomeration factors in Wuhan. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1432-1443. [焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式. *地理学报*, 2017, 72(8): 1432-1443.]
- [17] Gao Chao, Jin Fengjun. Spatial pattern evolution and industrial characteristics of economic and technological development zones in coastal areas. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 202-213. [高超, 金凤君. 沿海地区经济技术开发区空间格局演化及产业特征. *地理学报*, 2015, 70(2): 202-213.]
- [18] Li Xiaojian, Xu Jiawei, Hai Beibei. Evolution analysis of county settlement pattern: An empirical study based on 1929-2013 years in Henan, Gongyi. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1870-1883. [李小建, 许家伟, 海贝贝. 县域聚落分布格局演变分析: 基于1929-2013年河南巩义的经验研究. *地理学报*, 2015, 70(12): 1870-1883.]
- [19] He Wenqiang. An empirical analysis of regional differences in Chinese energy efficiency [D]. Jiangxi: Finance and Economics University in Jiangxi, 2011. [何文强. 中国能源效率区域差异的实证分析[D]. 江西: 江西财经大学, 2011.]
- [20] He Sanwei, Wang Weiwu, Zeng Chen, et al. Spatio-temporal pattern of economic development and the forecast in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(11): 1622-1628. [贺三维, 王伟武, 曾晨, 等. 中国区域发展时空格局变化分析及其预测. *地理科学*, 2016, 36(11): 1622-1628.]
- [21] Zhao Yuan, Yang Zuying, Hao Lisha, et al. Chinese oil resources flow source: Spatial pattern characteristics of sink system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(4): 455-466. [赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源—汇系统空间格局特征. *地理学报*, 2012, 67(4): 455-466.]
- [22] Shan Haojie. Reestimating the capital stock of China: 1952 to 2006. *The Journal of Quantitative & Technical*

Economics, 2008(10): 17-31. [单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952~2006年. 数量经济技术经济研究, 2008(10): 17-31.]

[23] Bao Shuangye. The current study on Chinese ecological civilization under social transition [D]. Shanghai: Huadong Normal University, 2012. [包双叶. 当前中国社会转型条件下的生态文明研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.]

Spatial equilibrium and pattern evolution of ecological civilization construction efficiency in China

WANG Geng^{1,2}, LI Sujuan¹, MA Qifei¹

(1. Liaoning Normal University College of Urban and Environmental Science, Dalian 116029, Liaoning, China;

2. Liaoning Normal University Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: To study the spatial distribution and its evolving patterns of ecological civilization construction efficiency in China is of great help to clarify the spatial difference mechanism of ecological civilization construction efficiency, and of an important guiding significance and reference value for narrowing down regional differences and probing into the driving factors. Ecological civilization construction is a complex process, and its core lies in the coordinated development of each component of the compound natural- economic- society (N- E- S) ecosystem. Therefore, based on the compound N- E- S (nature- economy- society) ecosystem theory and the perspectives on the ecological civilization construction efficiency connotation, this paper establishes an input-output indicators system for ecological civilization construction efficiency and applies the undesirable output SBM model to calculate China's ecological civilization construction efficiency between 2003 and 2015. Further, we use the kernel density estimation, Gini coefficient, Theil index, logarithmic deviation and gravity standard ellipse to explore the spacial evolving characteristics and distribution patterns of ecological civilization construction efficiency connotation in China. The results show that: (1) There is obvious spatial disequilibrium in the efficiency of ecological civilization construction in China. During the study period (2003-2015), the spatial disequilibrium decreases gradually and then increases gradually. According to the mean Theil indexes in the three regions of China, the western region has the biggest spatial disequilibrium degree (0.1174), followed by the eastern (0.0365) and central China (0.0223). (2) Judged by the moving track of gravity center, the gravity center of China's ecological civilization construction efficiency, located in Henan province, has moved to the southeast and then to the northeast. The moving direction of gravity center shows the increase of ecological civilization construction efficiency in space. (3) Judged by the gravity standard ellipse, the spatial distribution of China's ecological civilization construction efficiency shows a pattern inclined northeast to southwest, and has the trend of a shift to right north and south.

Keywords: ecological civilization construction efficiency; spatial equilibrium; pattern evolution; SBM model; kernel density estimation; center of gravity standard deviation ellipse