

长江经济带城市生态效率时空格局及驱动因子探测

李嘉琪¹, 黄凤莲², 刘挺³, 陈昱霏⁴, 万大娟¹

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 湖南省环境保护科学研究院, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南省怀化市生态环境局, 湖南 怀化 418000; 4. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 研究区域生态效率的时空格局, 并探讨其形成机制, 对于引导城市生态文明建设和实现区域可持续发展具有重要意义。利用 DEA 模型和空间自相关, 系统研究了 2006~2016 年长江经济带 108 个城市生态效率的时空格局特征和演化规律, 并利用地理探测器模型对其驱动因子进行探测。研究表明: ① 2006~2016 年长江经济带城市生态效率一直处于较高水平, 呈波动递增趋势, 上、中、下游 3 个地区的城市生态效率差距在逐年缩小。② 空间格局上, 长江经济带的城市生态效率类型差异显著, 由“东高西低”格局向“多中心”格局转变。③ 从空间集聚变化看, 长江经济带的生态效率空间相关性很小, 集聚特征不明显。④ 生态效率受多种因子共同作用, 不同年份的主导因素存在显著差异, 各因子上、中、下游地区表现出明显的地域性和差异性。

关键词: 城市生态效率; DEA 模型; 空间自相关; 地理探测器; 长江经济带

中图分类号: F205

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.01

十九大报告中指出, 要加快生态文明体制改革, 建设美丽中国。在加快生态文明建设, 推进新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展的背景下, 要协调好经济发展、资源节约和环境保护之间的关系^[1], 需要用最小的资源投入和环境污染产出最大的经济效益, 这与生态效率的核心思想不谋而合^[2]。研究生态效率不但可以为经济增长和生态环境问题提供评判路径, 也能为测度区域可持续发展水平提供新思路。

国际学术界很早就开始了对生态效率概念的研究。1990 年德国学者 Schaltegger 和 Sturn 首次提出生态效率的定义, 用经济增长与环境影响的比值来衡量^[3]; 1992 年世界可持续发展理事会正式提出生态效率的概念, 将生态效率定义为一种商业概念^[4]; 1998 年经济合作与发展组织扩大了生态效率概念适用范围^[5]。近年来, 国内学术界也对生态效率进行了积极探索, 最早进行研究的是诸大建和邱寿丰, 把生态效率作为测度可持续发展的指标^[6], 并根据我国的实际情况, 构建了度量循环经济发展的生态效率指标^[7]。目

前, 国内关于生态效率的研究主要集中在两方面: 从研究方法来看, 杨斌^[8]、李胜兰^[9]和刘巍^[10]采用 DEA 模型对生态效率进行了测度; 王恩旭^[11]、成金华^[1]采用超效率 DEA 模型计算生态效率; 此外, 也有学者利用因子分析法^[12]、网络 DEA 模型^[13]、三阶段 DEA 模型^[14]来测度生态效率。从研究尺度来看, 陈武新^[15]、陈傲^[16]从全国尺度对生态效率进行了测度; 张雪梅^[17]从区域尺度对西部地区的生态效率进行动态分析; 马勇^[18]从城市群尺度研究了长江中游城市群产业生态效率; 黄和平^[19]从省域尺度测度江西省的生态效率; 姚玉玲^[20]则从县域尺度对生态效率进行空间分析。综合来看, 国内有关生态效率的研究成果较多, 研究方法多样, 研究尺度多维。但是, 针对长江经济带城市生态效率的系统研究相对较少, 大多数研究侧重区域生态效率的测度和时空格局的分析, 未能进一步对生态效率的影响因素和驱动机制进行研究。目前, 有关生态效率驱动机制的研究中, 有学者利用线性回归模型对生态效率的影响因素进行研究^[15-16], 没有考虑

收稿日期: 2019-10-21

作者简介: 李嘉琪, 女, 硕士研究生, 研究方向为城市与区域规划。E-mail: 773996834@qq.com

通讯作者: 万大娟, 女, 教授, 博士, 研究方向为生态环境评价与规划。E-mail: dajuanwan@163.com

到空间因素对生态效率的影响。也有学者运用空间计量模型对其进行研究,考虑了空间因素对生态效率的影响^[21-23],但没有从深层次解决空间分层的异质性问题。地理探测器作为空间数据探测的一种方法,无线性假设,既可以提取出显著的影响因素,检验单变量的空间分异性,又可对各影响因素进行定量评价,探测变量间的关系^[24],常被用来分析各种现象的驱动力和影响因子,应用领域广泛,尺度多样,可以弥补现有研究的不足^[25]。

本文以长江经济带为研究对象,选取2006~2016年108个地级市的面板数据,首先运用DEA模型对长江经济带城市生态效率进行测算,然后运用空间自相关分析了生态效率的时空格局特征及演化规律,最后利用地理探测器对其驱动因子进行探测,进而探讨其形成机制,以期对长江经济带城市生态文明建设和区域可持续发展提供理论支撑和实践指导。

1 方法与数据

1.1 研究区域概况

长江经济带横跨我国东中西三大区域,形成了长三角、长江中游和成渝三大国家级城市群,以及皖江城市带、黔中城市群、滇中城市群等区域性城市群。本文研究区域为长江经济带的108个地级及以上城市,其中上游地区包括贵州、云南、四川和重庆在内的31个城市,中游地区包括湖南、湖北和江西在内的36个城市,下游地区包括安徽、浙江、江苏和上海在内的41个城市。

1.2 研究方法

1.2.1 DEA模型

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是一种评价效率的系统分析方法,通过分析投入与产出的比例,计算出各指标最优的投入产出权重,从而确定一条生产前沿线^[26],如公式(1)所示。该模型在避免主观因素、简化算法、减少误差等方面有着不可低估的优越性,其线性规划方程如下^[27]:

$$\begin{cases} \min [\theta - \varepsilon (\sum_{j=1}^m s^- + \sum_{j=1}^m s^+)] = V_d(\varepsilon) \\ s. t. \\ \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_0 \\ s^+ \geq 0, s^- \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为决策单元DMU基于数据包络线的相对效率

指数, ε 为非阿基米德无穷小量, s^- 为 m 项输入指标的剩余变量, s^+ 为 s 项输出指标的剩余变量, n 为DMU的数量, λ_j 为模型最优解。

1.2.2 空间自相关

空间自相关是检验某一要素的属性值是否显著地与其相邻空间点上的属性值相关联的重要指标,分为全局空间自相关和局域空间自相关两种^[28]。全局空间自相关主要研究属性值的全局空间特征,即用来判定某种现象在空间上是否存在空间相关性,通常使用Moran's I 作为空间自相关指标,如公式(2)所示:

$$I = \frac{n \times [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \times (x_i - \bar{x}) \times (x_j - \bar{x})]}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, n 为长江经济带的城市数量, x_i, x_j 分别表示 i 城市和 j 城市的生态效率, $\bar{x}$ 为平均值, W_{ij} 为长江经济带城市 i 与城市 j 的空间连接矩阵。

局部空间自相关主要用来分析每个区域单元的空间自相关特征,可度量每个区域与周边地区间的局部空间关联程度,弥补了全局自相关忽略空间过程不稳定性的问题,如公式(3)所示:

$$I_i = Z_i \sum_{j \neq i}^n W_{ij} Z_j \quad (3)$$

式中, I_i 是用来描述区域单元与周边区域之间的局部空间关联程度; Z_i, Z_j 分别为 i 区域和 j 区域的城市生态效率标准化形式; W_{ij} 为空间权重矩阵。

1.2.3 地理探测器

地理要素的分布具有空间分异性,探测其内部驱动因子对研究生态效率的空间分布规律有重要意义。地理探测器是探测空间分异性的一种工具,目前经常作为探测空间分异性及背后驱动力的一组统计学方法^[29]。本文探测长江经济带城市生态效率主要采用因子探测,探测各影响因子 X 多大程度上解释了生态效率 Y 的空间分异,用 q 值度量,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l n_h \sigma_h^2}{n \sigma^2} \quad (4)$$

式中, q 表示影响因子对生态效率的解释力; $h=1, 2, \dots, l$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; n_h 和 n 分别为次级区域的个数和整个区域的个数; σ_h^2 和 σ^2 是次级区域和整个区域的方差。 q 取值范围为 $[0, 1]$,数值越大表明分类因素对生态效率的解释力越强。

1.3 数据来源与指标选取

1.3.1 数据来源

由于数据获取的局限性及地市合并前后的不统一性,本文选取长江经济带上的 108 个地级市进行研究,时间跨度为 2006 ~ 2016 年。相关数据来源于 2007 ~ 2017 年《中国城市统计年鉴》、2007 ~ 2017 年《中国区域经济统计年鉴》和中国各省市统计公报,选取的截面数据为 2006 2011 年和 2016 年。

1.3.2 生态效率指标

本文在指标选取时借鉴德国环境经济账户中设计的生态效率指标^[7],将成本性指标作为投入指标,收益性指标作为产出指标^[8],按照指标可获性、真实性和科学性的原则,选取投入指标和产出指标,如表 1 所示。

表 1 生态效率评价指标体系

Tab. 1 Ecological efficiency evaluation index system

指标层次	具体指标	指标说明
投入指标	社会用水总量(万 t)	反映资源消耗
	社会用电量(万 kW·h)	
	城市燃气用量(万 m ³)	
	建设用地面积(km ²)	
	年末从业人员(万人)	反映环境污染
	工业废水排放量(万 t)	
	工业二氧化硫排放量(t)	
产出指标	工业烟尘排放量(t)	反映经济价值
	地区生产总值(万元)	

1.3.3 驱动因子指标

城市生态效率受到多种因素的综合影响,本文在分析现有文献的基础上^[15-16 21-23],从经济发展水平、城市化因素、产业结构、科技水平、环保意识和对外开放程度 6 个方面选取指标来研究城市生态效率的驱动机制(图 1)。

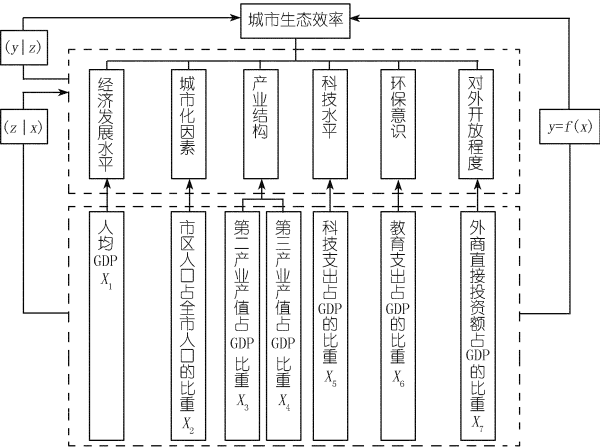


图 1 生态效率驱动因子及其代理变量

Fig. 1 Eco-efficiency driving factors and proxy variables

2 结果与分析

2.1 长江经济带城市生态效率的时间演变

利用 DEA 模型计算得到 2006 ~ 2016 年长江经济带 108 个地级市的生态效率(图 2)。整体来看,2006 ~ 2016 年长江经济带城市生态效率处于较高水平,且呈波动上升趋势。效率值在 0.725 ~ 0.851 之间变化,累计提升率为 17.4%。说明长江经济带的城市发展基础较好,在此期间经济稳步增长,同时注重生态环境的保护。长江经济带城市生态效率在上、中、下游三个地区之间呈梯度分布,2013 年之前下游地区的生态效率高于中游地区和上游地区,但 2013 年之后中游地区和上游地区的生态效率有赶超下游地区的趋势。近年来,通过长江中游城市群和成渝城市群的建设,长江经济带中游和上游地区的城市发展迅速,生态效率迅速提升。上游地区的生态效率波动幅度较大,呈现倒“几”字型变化,在 2015 年前一直低于平均效率,2010 ~ 2013 年出现“U”型变化,在 2010 年达到高值 0.789 后急剧下降而后上升,与下游地区的生态效率差距不断缩小;中游地区生态效率逐年递增,变化平稳,在 2006 ~ 2011 年,中游地区的生态效率一直低于长江经济带生态效率的平均水平且在三个地区中效率最差,但 2014 ~ 2016 年中游地区的生态效率在整个地区中处于领先地位;下游地区的生态效率先升后降,2006 ~ 2014 年高于中游地区,2015 ~ 2016 年低于整体平均值和上、中游地区,上、中、下游三个地区的城市生态效率差距在逐年缩小。

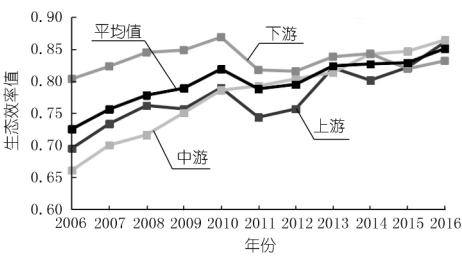


图 2 2006 ~ 2016 年长江经济带城市生态效率变化趋势

Fig. 2 Trend of urban ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2016

2.2 长江经济带城市生态效率的空间分布

选取 2006、2011 和 2016 年的截面数据,利用 Arc-GIS 10.2 软件对长江经济带城市生态效率进行空间可视化分析(图 3)。根据 DEA 模型的运算结果,将城市生态效率分为 4 种类型:效率值在 0 ~ 0.4 为低效率,0.4 ~ 0.7 为中等效率,0.7 ~ 1 为高效率,1 为最优效率。从空间格局来看,长江经济带的城市生态效率分布特征变化大,由“东高西低”格局向“多中心”格局转变。2006 年,达到最优效率和高效率的城市主要分布

在下游的长三角城市群、中游的江西和湖南部分地区,达到中等效率的城市主要分布在长江中游城市群,达

到低效率的城市零散分布在上游四川和中游湖北部分

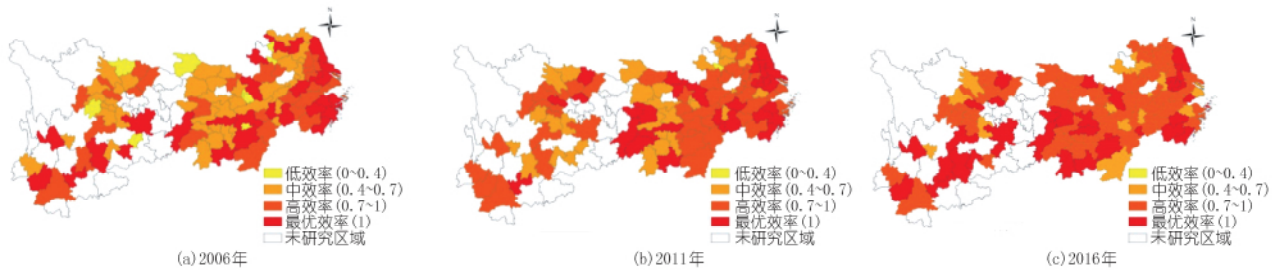


图3 2006 2011 和 2016 年长江经济带城市生态效率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of urban ecological efficiency of the Yangtze River Economic Belt in 2006, 2011 and 2016

地区;2011 年,最优效率和高效率城市主要分布在中下游的城市群,中等效率城市主要分布在上游的四川以及中游的湖南、湖北和安徽等地区,低效率城市分布在安徽淮南;2016 年,最优效率城市分布出现“多中心”的特征,上、中、下游出现多个“最优效率中心”,高效率城市分布集中连片,中等效率城市呈点状分布,无低效率城市分布。整体来看,中游地区投入产出效率在三个区中变化最大,下游地区变化最小,达到最优效率和高效率的地区范围在不断扩大,达到中等效率的城市范围大幅缩小,低效率的空间分布由“点状”分布到“零”分布,说明生态效率质量在逐年提高,有较大的提升潜力。

2.3 长江经济带城市生态效率的空间集聚

2006 2011 和 2016 年长江经济带城市生态效率的 Moran's I 值分别为 0.070 1、0.133 5 和 0.103 2,均较小,说明集聚特征不明显,生态效率的空间分异性较强。从长江经济带城市生态效率的 LISA 集聚图(图 4)可以得出,长江经济带城市生态效率的空间相关性很小,H-H 集聚地区主要分布在下游长三角地区,其他集聚类型分布零散,以上游和中游为主。H-H 集聚地区、H-L 集聚地区和 L-H 集聚地区的比例呈下降趋势,到 2016 年无 H-L 集聚地区分布,L-L 集聚地区的比例呈增加趋势。集聚不显著区域的的城市数量最多,由 2006 年的 93 个(86.43%)增加到 2016 年的 100 个(92.6%)。

2.4 城市生态效率时空分异的驱动因子探测

2.4.1 驱动因子的时间差异

本文从经济发展水平、城市化、产业结构、科技水平、环保意识和对外开放程度 6 个方面选取 7 项指标来探测长江经济带城市效率的驱动因子。首先对原始数据进行离散化处理,采用分类算法 K-means 对这 3 个年份的探测因子值进行聚类分析,然后利用地理探测器软件对这 3 个年份的聚类数据进行计算,得到 3 个各驱动因子的 q 值,用雷达图表示(图 5)。

从图 5 可以得出,2006 年,经济发展水平(0.2126)、城市化(0.1318)、第二产业占 GDP 的比重(0.1000) q 值较大,第三产业占 GDP 比重(0.0379)的 q 值最小,说明 2006 年经济发展水平是一个显著的决定性因素,产业结构中第三产业的影响最弱;2011 年,经济发展水平(0.0899)的 q 值最大,第二产业占 GDP 的比重(0.0847)的 q 值较大,说明经济发展水平和产业结构是影响长江经济带生态效率的主要驱动因子,对外开放(0.0227)的 q 值最小,说明对外开放程度对生态效率的影响最小;2016 年,城市化(0.1388)、第三产业占 GDP 的比重(0.1606)和环保意识(0.1298) q 值较大,经济发展水平(0.0406)的 q 值最小,说明 2016 年长江经济带生态效率受产业结构、城市化因素和环保意识的影响较大,经济发展水平影响最小。

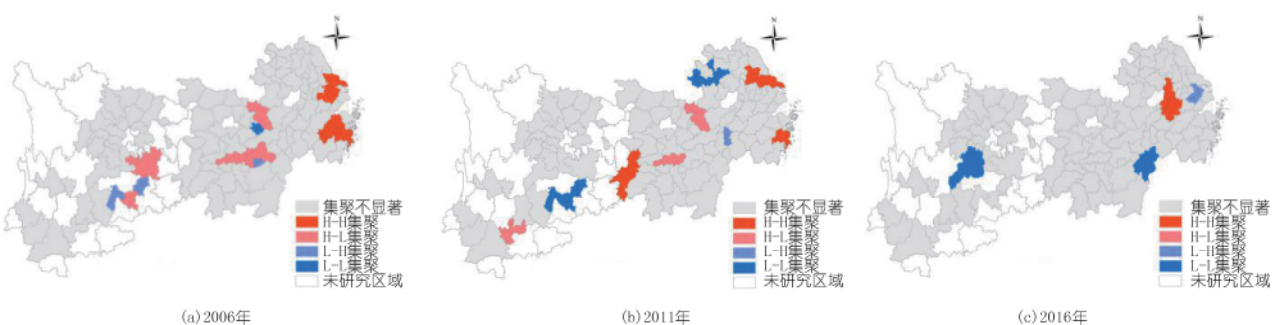


图4 2006 2011 年和 2016 年长江经济带城市生态效率 LISA 集聚

Fig. 4 LISA cluster map of urban ecological efficiency in the Yangtze River Economic Belt in 2006, 2011 and 2016

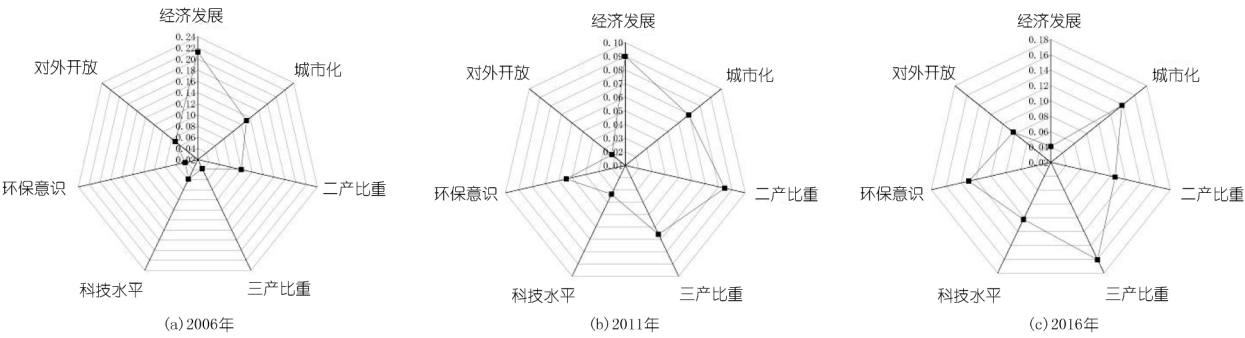


图 5 2006 2011 2016 年长江经济带生态效率驱动因子雷达

Fig. 5 Radar map of the eco - efficiency driving factors of the Yangtze River Economic Belt in 2006 , 2011 and 2016

从探测结果来看,生态效率的驱动因子变化较大。经济发展水平由 2006 年的最显著驱动因子变化为 2016 年的最不显著驱动因子,影响在逐年减弱,说明经济发展对生态效率的影响非直线型增长,经济发展到一定水平后对生态效率的影响会减弱;产业结构因素影响由第二产业占 GDP 的比重为主向第三产业占 GDP 的比重为主转变,体现了产业升级对生态效率的影响,在发展过程中,第三产业对生态效率的影响会超过第二产业,并对生态效率的提高有促进作用;环保意识对生态效率的影响是间接的,通过普及公众的受教育程度,可以提高公众的环保意识。另外,环保意识对生态效率的影响在 2016 年才开始起作用,说明与近几年环保政策的颁布和环保知识的普及有关;科技水平和对外开放程度对生态效率的影响一直不显著,上游和中游地区在科技方面的投入力度不大,科学技术不够成熟,对经济生产和环境治理的影响小,导致现阶段技术进步对长江经济带整体生态效率没有显著影响。

2.4.2 驱动因子的空间差异

为了便于比较和分析各探测因子在长江经济带不同区域的差异,以 2016 年为例,分上、中、下游 3 个区域,利用地理探测器分析方法,分别计算 2016 年分区的 q 值(表 2)。

从分区来看,主导上游地区城市生态效率的核心要素不显著,相比之下,经济发展水平(0.177)和产业结构中第二产业占 GDP 的比重(0.099 9)较大,对外开放程度(0.059 6)最低。上游地区在成渝城市群、滇中城市群和黔中城市群的发展带动下,经济发展水平有所提高,产业发展以第二产业为主,但由于地理位置的限制,与中游地区和下游地区的发展差距较大,其他因子的影响作用并不明显;主导中游地区生态效率的核心要素为城市化因素(0.422 6)和第二产业占 GDP 的比值(0.442 4),影响作用显著,对外开放程度(0.116 2)影响最小。中游地区作为长江经济带承东启西的关键区域,发展作用不容小觑,近些年合肥、长

沙、武汉、南昌 4 个省会城市的经济实力不断增强,长江中游城市群和江淮城市群充分带动了中游地区的发展,吸引各类资源进入,城镇体系不断完善,城市化因素对城市生态效率的影响较显著。主导下游地区的核心因素是城市化因素(0.305 9)、第三产业占 GDP 的比重(0.521 1)、科技水平(0.304 2)、环保意识(0.360 9),其中产业结构中第三产业占 GDP 的比重影响最大,对外开放程度(0.139 2)影响作用最弱。原因是长江经济带下游地区由上海、江苏、浙江 2 省 1 市组成,经济实力雄厚,长江三角洲城市群在全国城市群发展中占据重要地位,其经济发展对长江经济带起着引领作用。

表 2 2016 年长江经济带分区域城市生态效率因子探测结果

Tab. 2 Results of urban eco - efficiency factor detection in subregions of the Yangtze River Economic Belt in 2016

区域	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
整体	0.0406	0.1388	0.1061	0.1606	0.1024	0.1298	0.0828
上游	0.1767	0.0600	0.0999	0.0796	0.0765	0.0615	0.0596
中游	0.2765	0.4226	0.4424	0.1476	0.1819	0.2437	0.1162
下游	0.2701	0.3059	0.198	0.5211	0.3042	0.3609	0.1392

注: X_1 为经济发展水平, X_2 为城市化因素, X_3 为第二产业占 GDP 的比重, X_4 为第三产业占 GDP 的比重, X_5 科技水平, X_6 为环保意识, X_7 为对外开放程度。

3 结论

(1) 时间上,2006 ~ 2016 年长江经济带城市生态效率一直处于较高水平,区间为 0.725 ~ 0.851,且呈波动递增趋势,累计提升率为 17.4%,增加趋势缓慢,上、中、下游三个地区的城市生态效率差距在逐年缩小。

(2) 空间上,长江经济带的城市生态效率分布特征变化大,效率类型差异显著,由“东高西低”格局向“多中心”格局转变。最优效率和高效率的地区范围在不断扩大,中等效率城市范围大幅缩小。

(3) 从集聚变化看,长江经济带城市生态效率的

Moran's I 值较小,生态效率空间相关性小,集聚不显著区域的地市比例高达 92.6%,集聚特征不明显。

(4) 从驱动因子来看,生态效率受多种因子共同作用,不同年份的主导因素存在显著差异。各因子在不同地区对生态效率的影响表现出特定的一致性和差异性,其中城市化因素和对外开放程度在各区域影响较一致,其他因素影响表现出明显的地域性和差异性。

参考文献:

- [1] 成金华,孙琼,郭明晶,等.中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(1):49-57.
- [2] 杨文举.基于 DEA 的生态效率测度:以中国各省的工业为例[J].科学经济社会,2009,27(3):56-60.
- [3] Filho W L. The New Sustainability Advantage: Seven Business Case Benefits of a Triple Bottom Line[J]. International Journal of Sustainability in Higher Education, 2002, 14(4): 22-24.
- [4] WBCSD. Eco-efficient Leadership for Improved Economic and Environmental Performance[M]. Geneva: WBCSD, 1996: 3-16.
- [5] OECD. Eco-efficiency[M]. Paris: OECD, 1998.
- [6] 诸大建,邱寿丰.生态效率是循环经济的合适测度[J].中国人口·资源与环境,2006,16(5):1-6.
- [7] 邱寿丰,诸大建.我国生态效率指标设计及其应用[J].科学管理研究,2007,25(1):20-24.
- [8] 杨斌.2000-2006 年中国区域生态效率研究:基于 DEA 方法的实证分析[J].经济地理,2009,29(7):1197-1202.
- [9] 李胜兰,初善冰,申晨.地方政府竞争、环境规制与区域生态效率[J].世界经济,2014(4):88-110.
- [10] 刘巍,田金平,李星,等.基于 DEA 的中国综合类生态工业园生态效率评价方法研究[J].中国人口·资源与环境,2012(11):93-97.
- [11] 王恩旭,武春友.基于超效率 DEA 模型的中国省际生态效率时空差异研究[J].管理学报,2011,8(3):443.
- [12] 王波,方春洪.基于因子分析的区域经济生态效率研究:以 2007 年省际间面板数据为例[J].环境科学与管理,2010,35(2):158-162.
- [13] 张健,杨佳伟,崔海洋.基于网络 DEA 模型的我国区域生态效率评价研究[J].软科学,2016,30(8):15-19.
- [14] 郭思亮,宋廷山,刁艳华.蓝色经济区生态效率的统计测度[J].统计与决策,2016(12):91-94.
- [15] 陈武新,吕秀娟.中国区域生态效率差异的实证分析[J].统计与决策,2009(7):107-108.
- [16] 陈傲.中国区域生态效率评价及影响因素实证分析:以 2000-2006 年省际数据为例[J].中国管理科学,2008(11):566-570.
- [17] 张雪梅.西部地区生态效率测度及动态分析:基于 2000-2010 年省际数据[J].经济理论与经济管理,2013(2):78-85.
- [18] 马勇,刘军.长江中游城市群产业生态化效率研究[J].经济地理,2015,35(6):124-129.
- [19] 黄和平.基于生态效率的江西省循环经济发展模式[J].生态学报,2015,35(9):2894-2901.
- [20] 姚玉玲,贾科利,王金凤,等.基于 DEA 模型的县域生态效率空间分析:以宁夏回族自治区为例[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2012,25(3):324-328.
- [21] 卢燕群,袁鹏.中国省域工业生态效率及影响因素的空间计量分析[J].资源科学,2017,39(7):1326-1337.
- [22] 李佳佳,罗能生.城市规模对生态效率的影响及区域差异分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):129-136.
- [23] 罗能生,李佳佳,罗富政.中国城镇化进程与区域生态效率关系的实证研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(11):53-60.
- [24] 李颖,冯玉,彭飞,等.基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J].经济地理,2017,37(12):180-189.
- [25] 刘彦随,杨忍.中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J].地理学报,2012,67(8):1011-1020.
- [26] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision-making units[J]. European Journal of Operational Research, 1979, 3(4): 339-0.
- [27] 游达明,黄曦子.长江经济带省际工业生态技术创新效率评价[J].经济地理,2016,36(9):128-134.
- [28] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005-2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

(编辑:黄文晋)

引用本文:李嘉琪,黄凤莲,刘挺,等.长江经济带城市生态效率时空格局及驱动因子探测[J].人民长江,2020,51(5):1-6.

(下转第 16 页)

- [15] LI Y, GONG J H, LIU H, et al. Real-time flood simulations using CA model driven by dynamic observation data [J]. International Journal of Geographic Information Sciences, 2015, 29(4): 523–535.
- [16] DOOGUE J. On backwater effects in linear diffusion flood routing [J]. Hydrological Sciences, 1983, 283(3): 391–402.
- [17] ZHANG S S. “CA-based Modeling of Spatio-temporal Process Simulation” [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(2): 175–178.
- [18] 陈闻晨. 泾河流域 DEM 流域信息提取 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 111–114.

(编辑: 赵秋云)

引用本文: 刘恒. 基于元胞自动机和大伙房模型的洪水演进研究 [J]. 人民长江, 2020, 51(5): 7–16.

Flood routing simulation based on cellular automata and Dahuofang hydrological model

LIU Heng

(Research Institute Limited Liability Company of Water Resources and Hydropower, Shenyang 110003, China)

Abstract: To simulate the flood routing quickly and accurately, we constructed a flood routing model by combining the principle of cellular automata and two-dimensional Saint-Venant equation in this paper. The flood routing model could realize the partial water exchange between cells and the global transformation of the flood simulation process in the whole basin. The Dahuofang runoff-yield model with grid element was constructed on the basis of DEM, and it could provide runoff generation input for each cell. In this model, direct runoff, surface soil flow and neighborhood cell inflow were all water depth increment, which fully considered the impact of rainfall on flood routing simulation in the flood plain. In this paper, the physical model results of different design frequency floods in Shenyang section of Hunhe River were selected to verify the simulated results. The results show the water depth simulation had high accuracy and the flow velocity simulation can meet basic requirements. Also, the simulation result of submergence scope had the same change trend as the physical model results, indicating that the model was reasonable and effective. Therefore, this paper can provide a new method for flood routing simulation, and provide reference for flood routing simulation in other similar areas.

Key words: flood routing; cellular automata; two-dimensional Saint-Venant equation; Dahuofang Hydrological Model; Shenyang section of Hunhe River

(上接第6页)

Temporal and spatial patterns and driving factors of urban ecological efficiency in Yangtze River Economic Belt

LI Jiaqi¹, HUANG Fenglian², LIU Ting³, CHEN Yufei⁴, WAN Dajuan¹

(1. College of Resource and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha 410004, China; 3. Ecological Environmental Bureau of Huaihua City, Hunan Province, Huaihua 418000, China; 4. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, China)

Abstract: Studying the temporal and spatial pattern of regional ecological efficiency and exploring its formation mechanism is of great significance for guiding urban ecological civilization construction and achieving regional sustainable development. Based on the DEA model and spatial autocorrelation theory, this study systematically investigated the spatial and temporal pattern characteristics and evolution law of 108 cities in the Yangtze River Economic Belt from 2006 to 2016. Then the geographical detector model was used to detect its driving factors and its formation mechanism. The research results showed that the economic efficiency of the Yangtze River Economic Belt was at a relatively high level and increased in a fluctuated from 2006 to 2016. The urban ecological efficiency gap in the upper, middle and lower reaches decreased year by year. For the spatial pattern, the types of urban eco-efficiency in the Yangtze River Economic Belt were significantly different, and transformed from the “east high and west low” pattern to the “multi-center” pattern. From the perspective of spatial agglomeration, the spatial correlation of the eco-efficiency of the Yangtze River Economic Belt was low and the agglomeration characteristic was not obvious. Ecological efficiency was affected by many factors. Dominant factors were different in different years and showed obvious regional and differential characteristics in the upper, middle and lower reaches.

Key words: urban ecological efficiency; DEA model; spatial autocorrelation; geographical detector; Yangtze River Economic Belt