

# 中国区域生态效率的时空演变及空间互动特征

沈伟腾<sup>1</sup>, 胡求光<sup>1,2</sup>, 李加林<sup>1,2,3,4</sup>, 陈琦<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学商学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学东海研究院, 宁波 315211; 3. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 4. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211)

**摘要:** 现有研究主要关注生态效率的测算, 对生态效率的空间互动特征缺乏相应地分析。采用考虑非期望产出的SBM模型对中国30个省级行政区2005—2015年生态效率进行测度, 并在此基础上利用空间自回归模型考察中国区域生态效率的空间互动特征。结果表明: (1) 中国高生态效率区主要分布在沿海发达省份, 而低效率区则主要分布在欠发达省份。(2) 在全国层面, 基于经济权重矩阵得到的空间自回归系数为正且显著, 表明区域生态效率存在正向的空间互动效应。(3) 分样本估计中, 发达和欠发达地区样本的空间自回归系数均大于全样本估计得到的空间自回归系数, 故发达和欠发达地区内部的空间互动效应强于发达和欠发达地区之间的空间互动效应, 呈现出“群分效应”。

**关键词:** 区域生态效率; 空间互动; 群分效应; 空间自回归模型

在生态经济中, 生态效率作为可持续发展评价工具得到广泛运用<sup>[1]</sup>。Sturm等<sup>[2]</sup>于1989年首次提出生态效率这一名词, 认为环境管理的目标就是在提高公司价值的同时减少对环境的破坏, 从而提高生态效率。而生态效率首次作为学术概念的提出则是在1990年<sup>[3]</sup>。OECD将生态效率定义为运用生态环境资源满足人类需求的效率<sup>[4]</sup>。具体而言, 生态效率可以被理解为一种以更少资源消耗和更小环境代价生产更多产品和服务的能力<sup>[1,5]</sup>。通常而言, 在保持经济产出不变(增加)的情况下, 生产行为对环境的负面影响减少(不变)时, 则表示生态效率得到提高<sup>[3]</sup>。尽管不同学者对生态效率的界定存在一定差异, 但都强调生态效率兼顾了经济产出和生态效益, 在环境负外部性降低的同时实现经济产出的增加<sup>[6]</sup>。综合前人研究并结合分析的需要, 本文将区域生态效率界定为一种能够表征地区可持续发展能力的指标, 区域生态效率的提高意味着地区可持续发展能力的提高, 微观上则表现为地区内企业或家庭清洁生产能力的提高。

生态效率被广泛运用于国家<sup>[7,8]</sup>、产业<sup>[9,10]</sup>、地区<sup>[1]</sup>、企业<sup>[11,12]</sup>可持续发展的评价。就现有文献而言, 有关生态效率的研究较少考虑空间个体之间的互动关系。然而, 不同空间个体并非相互独立, 而是相互影响<sup>[13]</sup>。诸多学者的实证研究表明, 环境污染和经济增长在空间上存在明显的互动关系<sup>[14-16]</sup>。Zhao等<sup>[15]</sup>利用中国地级市层面的数据验证了地区间经济增长存在相互促进的关系。Hao等<sup>[17]</sup>利用中国地级市层面PM<sub>2.5</sub>和空气污染指数数据的研究表明空气污染存在空间上的相互关系, 某一地区空气质量恶化会导致其相邻地区空

收稿日期: 2019-12-14; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874092, 41976209); 国家社会科学基金项目(19AZD004)

作者简介: 沈伟腾(1991-), 男, 浙江嘉兴人, 博士研究生, 研究方向为生态经济、海洋生态等。

E-mail: swtlzq@163.com

通讯作者: 胡求光(1968-), 女, 浙江东阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态经济、海洋经济。

E-mail: huqiuguang@nbu.edu.cn

气质量下降。空间互动关系的存在使得地区间在众多指标上具有明显的趋同性。在经济增长水平上,空间互动使得中国经济增长呈现出收敛趋势<sup>[18]</sup>,覃成林等<sup>[19]</sup>基于长江三角洲地区数据的实证研究表明,俱乐部收敛的特征在长三角地区的发展过程中得到了集中体现。地区间的相互关系与地区背后的政府行为密不可分,地区间相互的竞争或者合作<sup>[20]</sup>,使得经济政策和环境政策存在溢出效应,在地区间呈现出一种空间互动关系。生态效率是一项考虑了经济和环境产出的综合指标,受到地方决策的影响,由于地方决策中存在的空间互动性,生态效率在不同地区间也可能存在互动关系,因此,忽略空间互动效应使得有关生态效率的分析结果出现偏误。

根据对现有文献的梳理,目前的研究还存在两方面不足:第一,现有关于生态效率的研究虽涉及生态效率空间关系的分析,但大多基于描述性统计方法,缺乏严谨的空间计量分析。少数采用空间计量模型进行研究的文献也主要关注某一变量对生态效率的空间溢出效应,对生态效率本身的空间互动效应研究不足。第二,鉴于中国各地区在经济发展程度上存在显著差异的事实,诸多文献探讨了不同区域经济收敛状况并得出有价值的结论,但并未揭示生态效率所具有的空间分布模式。为此,本文基于非期望产出SBM模型得到中国省级层面的生态效率测算值,并在此基础上采用空间自回归模型考察生态效率的空间互动关系并揭示其空间分布模式,以期为中国经济和环境的区域协调发展提供经验依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文以中国省级行政区为研究对象,西藏、台湾、香港、澳门因关键数据缺失而被剔除,故实际采用的是30个省、市、自治区的数据。所选样本横跨东、中、西部,三个地区在经济发展水平、环境状况等方面均存在显著差异,能较好地反映中国的整体情况。2015年30个地区人均GDP约为54000元,但地区间经济发展水平存在较为明显的不平衡现象,甘肃人均GDP在所有地区中排名最低,约为26165元,而排名第一的天津人均GDP约为107960元,是甘肃人均GDP的四倍。就污染排放而言,2015年山东、广东和河北分别是二氧化硫、废水排放以及烟(粉)尘排放总量最大的省份,三种污染排放量分别约为153万t、910755万t以及158万t,而废水排放量最小的省份为青海,排放量为23655万t,二氧化硫和烟(粉)尘排放量最小的省份为海南,排放量分别为3.23万t和2.04万t,污染排放的地区差异也较为明显。经济快速发展引起的环境污染问题不断彰显,环境污染程度基本呈现出与经济发展的一致性,经济和环境状况的地区差异也可以大致反映各地可持续发展程度的非平衡性,但需要得到科学研究结果的支撑。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 考虑非期望产出的SBM模型

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)在生态效率测算中得到了广泛运用。但基于传统DEA模型(如BBC、CCR)得到的效率存在两方面缺陷:第一,通过同步缩小或扩大产出指标进行非效率调整,但难以针对引起无效率的指标进行调整,会导致效率测算结果出现偏差<sup>[21]</sup>;第二,生产结果不仅包含经济产出,还包括各种污染排放,而传统DEA模型仅考虑经济产出,未包含任何环境负外部性,这不符合实际。为解

决传统DEA模型的第一个缺陷，Tone<sup>[22]</sup>于2001年提出了SBM模型（Slack-Based Measure, SBM），但仍无法考虑环境负外部性。于是，在SBM模型的基础上，Tone<sup>[23]</sup>于2003年进一步构建了同时包含期望产出和非期望产出的SBM模型，有效地解决了传统DEA模型具有的第二个缺陷。假定 $m$ 种投入、 $u1$ 种期望产出和 $u2$ 种非期望产出分别采用矩阵 $X$ 、 $Y$ 和 $B$ 表示，具体而言， $X=[x_{ij}]=[x_i, \dots, x_n] \in R^{m \times k}$ ， $Y=[y_{ij}]=[y_i, \dots, y_n] \in R^{u1 \times k}$ ， $B=[b_{ij}]=[b_i, \dots, b_n] \in R^{u2 \times k}$ 。将 $\lambda$ 定义为强度向量且非负，则生产可能性集以及包含非期望产出的SBM模型为<sup>[23]</sup>：

$$P(x) = \{(x, y, b) | x \geq X\lambda, y \leq Y\lambda, b \geq B\lambda, \lambda \geq 0\}$$

$$\beta_j^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{ij}^-}{x_{ij}}}{1 + \frac{1}{u1 + u2} \left( \sum_{r=1}^{u1} \frac{s_{rj}^y}{y_{rj}} + \sum_{r=1}^{u2} \frac{s_{rj}^b}{b_{rj}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_j = X\lambda + s_j^-, y_j = Y\lambda - s_j^y, b_j = B\lambda + s_j^b$$

$$s_j^- \geq 0, s_j^y \geq 0, s_j^b \geq 0, \lambda \geq 0$$

式中：投入和非期望产出冗值分别由向量 $s_j^-$ 和 $s_j^b$ 表示；向量 $s_j^y$ 表明期望产出未达到最大的状态；下标 $j$ 表示第 $j$ 个DMU。当 $\beta^* < 1$ 时，DMU处于无效率状态，通过对投入或产出进一步优化可以达到有效状态。而当 $\beta^* = 1$ 时，DMU处于相对有效状态，此时， $s_j^- = s_j^y = s_j^b = 0$ 。

### 1.2.2 空间计量模型

为验证地区间生态效率的空间互动关系，本文采用近年来发展较为迅速的空间计量方法，构建空间自回归模型（SAR），具体模型设定如下：

$$Eco_{it} = \alpha + \rho WEco_{jt} + \beta_a X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中： $Eco_{it}$ 为 $i$ 地区第 $t$ 年的生态效率； $Eco_{jt}$ 为除 $i$ 地区以外的 $j$ 地区第 $t$ 年的生态效率； $W$ 为空间权重矩阵； $\rho$ 为空间滞后变量的系数，反映地区间生态效率的互动强度； $X$ 为控制变量； $\alpha$ 为常数项； $\beta_a$ 为控制变量 $X$ 的系数； $\varepsilon_{it}$ 为随机扰动项。

## 1.3 指标体系构建与数据来源

### 1.3.1 生态效率测算指标

生态效率的测算需要运用投入和产出指标，投入指标衡量产生一定的经济价值所投入的要素，在非期望产出SBM模型的框架下，产出指标中，除通常所关注的经济产出外，还包括非期望产出这类人们不希望得到的产出，如环境污染。现有研究主要围绕资本、土地、劳动力的基本框架选择投入要素，部分研究在基本框架的基础上加入能源消费以及水资源消费指标。如陈晓红等<sup>[24]</sup>将就业人口数、建成区面积、用电总量、固定资产投资、供水总量以及环境污染指标作为投入要素，盖美等<sup>[25]</sup>则以建设用地面积、能源消费总量、固定资产投资总额、供水总量、年末从业人员数量以及环境污染指标作为投入要素。但将环境污染指标作为投入指标存在的问题，因为不同于劳动力、土地、资源等要素，环境污染并非是一种投入，而是伴随着人类活动而产生的一种副产品，只是这种产出并不是人们所希望得到的。在非期望产出SBM模型中，环境污染指标能够作

为非期望产出归入到产出要素当中,更符合现实。因而,本文参考现有文献的做法,以资本、劳动力、土地、能源以及水资源投入的框架来确定生态效率测算的投入指标,不包括环境污染。对于资本投入,李宾<sup>[26]</sup>通过对不同投资流量指标进行对比发现,采取固定资本形成总额进行衡量最佳。因此,本文采用固定资本形成总额衡量资本投入。对于土地、劳动力、能源以及水资源,借鉴Ren等<sup>[27]</sup>、马勇等<sup>[6]</sup>、盖美等<sup>[25]</sup>的研究,分别采用建设用地、年末就业人数、能源消费量以及水资源利用量衡量。在《中国能源统计年鉴中》,能源消耗量是通过将所有生产生活中所使用的能源(如煤炭、焦炭、石油等)转化为标准煤并进行加总得到,故能源消耗量能够综合反映生产生活中对能源的消耗。非期望产出主要指污染排放,为确保指标具有涵盖性,现有研究主要按照污染物的固体、液体、气体的形态进行选取,分别以烟尘排放量、废水和二氧化硫衡量<sup>[24,25]</sup>,但废水排放无法准确反映水污染状况,故本文借鉴王耕<sup>[28]</sup>和Ren等<sup>[27]</sup>的研究,在选取烟尘、废水以及二氧化硫排放量的基础上,进一步加入化学需氧量衡量水污染状况。期望产出主要指经济产出,表现为商品和服务的经济价值,本文借鉴大多数文献的做法<sup>[24,25,29]</sup>,以实际地区生产总值衡量期望产出,具体的指标情况见表1。

表1 生态效率测算所采用的指标

Table 1 The indicators used to measure eco-efficiency

类别	指标	单位
投入	固定资本形成总额	亿元
	年底就业人数	万人
	建设用地供应	hm <sup>2</sup>
	能源消费量	万t标准煤
	水资源利用	亿m <sup>3</sup>
非期望产出	废水排放总量	万t
	化学需氧量	万t
	SO <sub>2</sub> 排放量(粉)	万t
	烟尘排放量	万t
期望产出	实际地区生产总值	亿元

### 1.3.2 空间计量模型中变量的选取

本文采用空间自回归模型考察区域生态效率的空间互动特征,以生态效率作为被解释变量,解释变量为生态效率的空间滞后项。此外,借鉴Zhou等<sup>[1]</sup>、Ren等<sup>[27]</sup>、Managi等<sup>[30]</sup>、Bai等<sup>[31]</sup>、李在军等<sup>[32]</sup>的研究,选取的控制变量包括:(1)第三产业占比。产业结构的变化可能会影响生态效率,某一地区第三产业比例越高可能会带来越少的污染,从而提高生态效率。(2)经济发展水平及其二次项。用于检验经济发展水平与生态效率之间的倒U型关系。不同的经济发展水平代表不同的生产和生活方式,经济发展水平的提高使得人们更加关注环境质量,从而注重对环境的保护,有利于地区生态效率的提高,但这一变化的产生可能存在一个阈值,在阈值之下,经济发展水平提高可能并不会提高生态效率,只有当处于阈值之上时,随着经济发展水平的提高,生态效率才会有所改善。(3)贸易开放程度。贸易开放有可能导致污染产业的跨国转移,而在本文考察期内,中国环境规制相对较弱,有可能导致污染的转入,从而降低地区生态效率。(4)城镇化水平。城镇化水平的提高意味着人口不断向城镇集中,从而有利于对生活污染排放的集中处理,同时,城镇化的快速推进也带动了服务业发展,相对于工业而言,服务业带来更少的污染,因此,城镇化推进有利于提高生态效率。(5)能源使用强度。能源使用强度的提高意味着对能源消耗的增多,从而产生更多污染,降低生态效率。(6)政府



的环境管制。一般而言，随着政府管制的不断加强，污染排放成本会不断提高，综合考虑成本收益，污染排放者会通过提高清洁生产能力降低污染排放水平。(7) 公众对环境的关注度。企业行为受到舆论影响，当公众较为关注环境状况时，企业考虑到自身形象会采取措施降低污染排放。(8) 公民受教育水平。教育水平提高能够使得人们理解环境污染对自身健康带来的威胁，因而更可能采取保护环境行动。各变量的计算方法见表2。

表2 变量定义

Table 2 Variable definitions

变量	计算方法	单位
第三产业占比	第三产业产值/地区生产总值	%
人均GDP	实际GDP/总人口数	元/人
贸易开放程度	进出口总额/地区生产总值	%
城镇化水平	年末城镇人口/总人口数	%
能源使用强度	能源消费总量/实际工业增加值	标准煤/万元
政府对环境的管制	排污费缴纳总额/缴纳企业个数	万元/个
公众对环境的关注	因环境污染来信总数/总人口	封/万人
公民受教育水平	大专及以上学历人数占比	%

### 1.3.3 数据来源

本文以中国省级层面的数据作为研究样本，时间跨度为2005—2015年。生态效率测算中的投入和产出数据来源于《中国统计年鉴》、各省、市、自治区统计年鉴、《中国国土资源年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》。

在空间计量模型中，人均GDP、第三产业占比、进出口数据、城镇化水平、工业增加值数据来源于《中国统计年鉴》；能源消费总量数据来自《中国能源统计年鉴》。排污费缴纳总额、排污费缴纳单位数、因环境污染来信总数数据来自《中国环境统计年鉴》。

## 2 结果分析

### 2.1 区域生态效率的时间演变及集聚特征

#### 2.1.1 生态效率的时间演变特征

采用MaxDea软件对中国省级层面2005—2015年的生态效率进行测算（表3）。从生态效率总体均值的变化情况来看，生态效率由2005年的0.707下降到2015年的0.606，总体呈现下降态势。从横向对比来看，大多数生态效率较高的省市均位于发达地区组，而多数生态效率较低的地区则分布在欠发达组，表现出与经济发展程度相对应的分异性。平均而言，发达地区生态效率（0.767）比欠发达地区生态效率（0.444）高0.323。这一差距产生的原因主要在于发达地区拥有更高的经济效率，这使得同样产出下投入的资源少于欠发达地区，同时，发达地区在技术方面也较为领先，单位产出造成的污染也相对较低。

从变化趋势来看（图1），2005—2008年是生态效率下降速度最快的时期，而2008年以后下降速度趋缓。2008年金融危机爆发是一个转折点，在危机之前，在廉价的资源和要素供给下，中国对外贸易发展迅速，其后果是资源利用效率的低下和环境污染，而在危机之后，国际环境不断恶化，依靠要素和资源投入驱动的粗放型出口增长模式难以为

表3 2005—2015年中国区域生态效率测算结果

Table 3 The regional eco-efficiency in China from 2005 to 2015

地区/年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
天津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河北	1.000	1.000	0.556	0.480	0.499	0.500	0.442	0.427	0.407	0.409	0.421	0.558
福建	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.474	1.000	0.952
内蒙古	1.000	1.000	1.000	0.349	1.000	0.412	0.410	1.000	0.353	0.363	0.375	0.660
辽宁	0.500	0.427	0.397	0.402	0.485	0.507	0.421	0.440	0.478	0.446	0.458	0.451
吉林	0.474	0.391	0.384	0.363	0.375	0.355	0.356	0.393	0.391	0.367	0.377	0.384
黑龙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.381	0.358	0.358	0.396	0.401	0.718
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
江苏	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
浙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
山东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
湖北	0.592	0.515	0.400	0.377	0.406	0.364	0.326	0.321	0.344	0.354	0.371	0.397
广东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
重庆	0.386	0.376	0.383	0.386	0.361	0.374	0.371	0.415	0.417	0.411	0.440	0.393
发达地区均值	0.863	0.847	0.808	0.757	0.808	0.767	0.714	0.757	0.717	0.681	0.723	0.767
江西	0.434	0.419	0.368	0.394	0.340	0.342	0.307	0.327	0.306	0.324	0.319	0.353
河南	1.000	0.540	0.470	0.446	0.460	0.450	0.439	0.400	0.425	0.444	0.437	0.501
湖南	0.433	0.468	0.368	0.336	0.358	0.301	0.274	0.267	0.279	0.283	0.301	0.333
山西	0.489	0.449	0.364	0.381	0.335	0.315	0.286	0.300	0.291	0.301	0.316	0.348
广西	0.380	0.350	0.287	0.297	0.272	0.248	0.240	0.240	0.249	0.254	0.262	0.280
海南	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
安徽	0.505	0.428	0.362	0.340	0.352	0.337	0.298	0.286	0.281	0.283	0.290	0.342
四川	0.445	0.433	0.342	0.337	0.362	0.347	0.336	0.348	0.371	0.363	0.362	0.368
贵州	0.438	0.393	0.329	0.361	0.313	0.291	0.286	0.273	0.262	0.260	0.257	0.315
云南	0.446	0.388	0.335	0.345	0.295	0.276	0.241	0.258	0.235	0.218	0.231	0.297
陕西	0.440	0.427	0.390	0.373	0.361	0.346	0.356	0.327	0.322	0.326	0.350	0.365
甘肃	0.389	0.406	0.435	0.380	0.329	0.358	0.299	0.329	0.287	0.289	0.287	0.344
青海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
宁夏	0.508	0.480	0.423	0.477	0.468	0.460	0.474	0.585	1.000	0.534	0.573	0.544
新疆	0.360	0.322	0.314	0.347	0.337	0.290	0.276	0.228	0.202	0.203	0.199	0.280
欠发达地区均值	0.551	0.500	0.452	0.454	0.439	0.424	0.407	0.411	0.434	0.405	0.412	0.444
总体均值	0.707	0.674	0.630	0.606	0.624	0.596	0.561	0.584	0.575	0.543	0.568	0.606

继，中国经济逐步过渡到“新常态”，更加注重对资源和要素的有效利用，外部和内部环境的共同变化使得2008年后生态效率并未延续2008年前快速下降的趋势。但经济增长方式转变并不能快速实现，而需要一段过渡期，在过渡期内，生态效率仍可能出现下降，但下降速度会逐步放缓。为比较发达和欠发达地区生态效率的差异性，以实际人均GDP

中位数为分界线，高于分界线的定义为发达地区，低于分界线的定义为欠发达地区<sup>①</sup>。根据表3，发达地区生态效率均值由2005年的0.863下降到2015年的0.767，欠发达地区生态效率均值由2005年的0.551下降到2015年的0.444，两类地区生态效率均出现了明显的下滑，阶段性特征与总体生态效率均值基本相同。

### 2.1.2 生态效率的集聚状况

图2给出了2005年、2010年及2015年中国生态效率的空间分布状况，图中四个等级是基于自然间断点

分级法(Jenks)得到，生态效率由高到低依次划分为第一梯队、第二梯队、第三梯队以及第四梯队。通过观察图2a可以发现，2005年，生态效率第一梯队的成员包括青海、黑龙江、河北等14个地区，第二梯队的成员包括湖北、吉林和辽宁，第三梯队的成员包括甘肃、陕西、云南等10个地区，剩余的省份则处于第四梯队。到2010年，山西、河北以及河南掉出第一梯队，第一梯队的数量下降为11个地区，第二梯队成员变化较大，湖北和吉林掉出第二梯队，而原本属于第一梯队的河北和河南进入第二梯队，同时，宁夏从第三梯队进入第二梯队，第二梯队成员数量增加到4个，第三梯队数量相较于2005年有所减少，减少为9个，而第四梯队成员新增云南、湖南和山西，数量增加为6个。到2015年，黑龙江被排除在第一梯队外，第一梯队成员数量进一步下降为10个。第二梯队新增重庆市，总数增加为5个，第三梯队数量则进一步下降为8个，第四梯队数量增加到7个。总体而言，从2005—2015年，第二和第四梯队成员数量有所增加，第一梯队和第三梯队成员数量不断下降。

通过观察图2中生态效率的空间演变可以发现，中国生态效率空间分布存在一个明显的特征，即生态效率的分布与经济发展水平密切相关，且这一特征随着时间的推移而不断得到强化，似乎呈现出一种基于经济发展水平的“群分效应”<sup>②</sup>。群分效应直接来源于人们偏好的差异，有着广泛的现实基础<sup>[13]</sup>，而在地区发展中无一不充斥着人的因素，因而，在地区政策中会表现出一定的倾向性，如发达地区往往可能会更多地与那些在经济发展水平与自身相似的地区进行交流，在信息技术、交通基础设施、人力资本等领域的交流合作促使创新的不断迸发，形成良性互动，推动生态效率的迅速提高。而欠发达

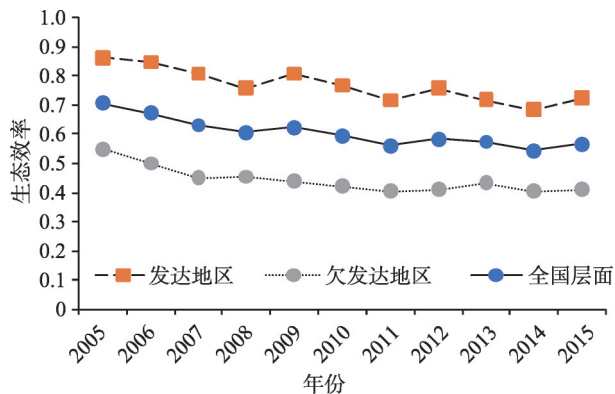
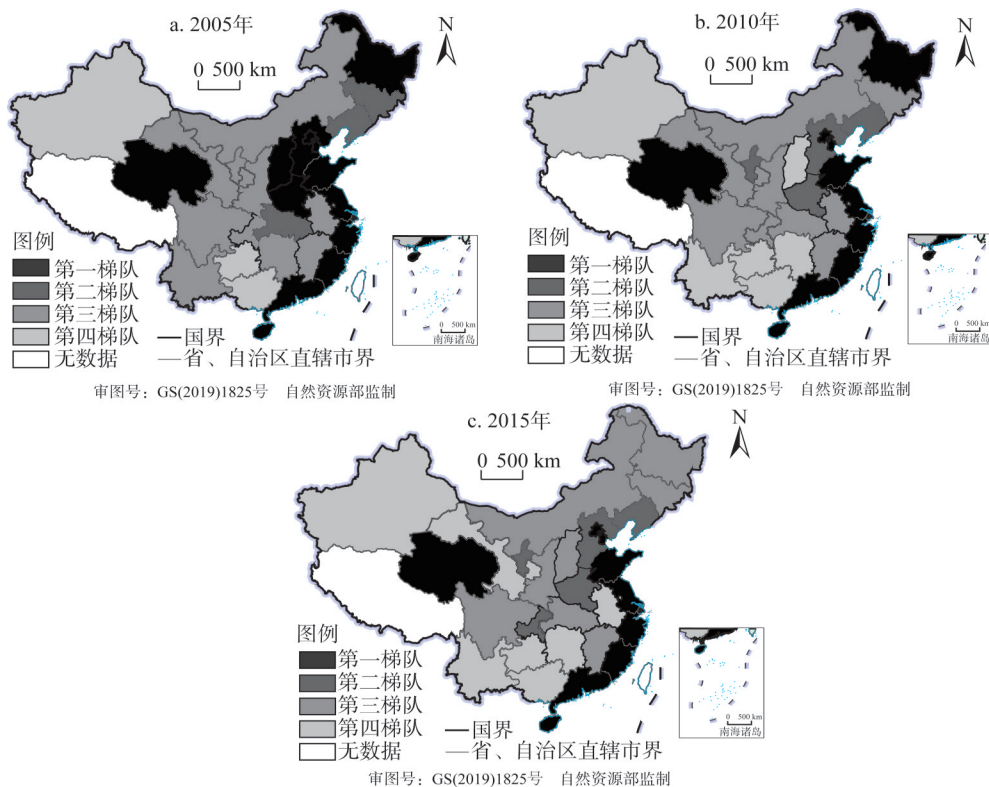


图1 2005—2015年中国区域生态效率变化情况

Fig. 1 The variation of regional eco-efficiency in China from 2005 to 2015

① 为保证结果的稳健性，本文采取了另外一种划分标准，将人均实际GDP排名前10名的地区定义为发达地区，排名后10名的地区定义为欠发达地区，该标准下的结果基本保持不变，故仍以人均实际GDP中位数作为划分节点。发达地区为北京、天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、浙江、福建、山东、湖北、广东、重庆，其余地区为欠发达地区。

② 本文提到的群分效应对应于英文文献中的“sorting effect”，指的是在理性选择下，同类型或相似的人聚集在一起，非同类型的人之间处于相互隔离的状态<sup>[13]</sup>。类推到本文的研究，“群分效应”是指高效率单位集聚在经济发达地区，而低效率单位则集聚在欠发达经济地区。进一步推广，群分效应的含义是，在经济发达地区或经济欠发达地区内部，生态效率有着较强的正向空间相关性，经济发达地区与欠发达地区间生态效率的正向空间相关性则较弱。



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图2 中国区域生态效率分布及其演变状况

Fig. 2 The distribution and evolution of regional eco-efficiency in China

地区经济发展基础薄弱，要参与到发达地区的互动当中往往需要以付出更多地资源为代价，不利于可持续发展。在下文中，对于中国生态效率呈现出的基于经济发展水平的“群分效应”，将采用标准的空间计量模型做进一步分析。

## 2.2 生态效率空间互动关系的检验

### 2.2.1 基于全样本的空间互动关系检验

在空间计量模型估计前需要确定具体的模型形式，本文借鉴 LeSage 等<sup>[33]</sup>及 Elhorst<sup>[34]</sup>的检验策略，采用 Wald 检验以及 LR 检验在 SDM 模型、SAR 模型以及 SEM 模型间进行选择，结果支持 SAR 模型。在确定 SAR 模型后，进一步进行 Hausman 检验以及 LR 检验，结果显示，本文的 SAR 模型适合加入时间固定和省份固定效应，SAR 模型的估计结果见表 4<sup>③</sup>。根据表 4，空间滞后项系数仅在采用经济空间权重矩阵时的估计结果为正且通过显著性检验，表明相对于地理距离和相邻空间权重矩阵而言，经济空间矩阵更能衡量中国所有地区之间的关系，如图 2 中，江苏虽然与上海、安徽相邻，但江苏和上海在生态效率值上的相似度更高，同属于生态效率第一梯队，浙江与江西的地理距离远低于浙江与北京的地理距离，但浙江与江西生态效率值差异却远高于浙江与北京。采用经济

③ 采用 SAR 模型进行估计前，利用全局莫兰指数对生态效率进行了空间相关性检验，结果显示，大多数年份的莫兰指数大于 0 且通过统计显著性检验，说明中国区域生态效率存在正向空间相关性，采用普通面板数据模型进行估计会导致估计结果有偏。



表4 基于全国数据的估计结果

Table 4 The estimation results based on national data

变量	(1)	(2)	(4)	(3)
	OLS	经济权重	地理权重	相邻权重
空间滞后项系数	—	0.2216***	0.0747	0.0973
	—	(0.0851)	(0.1580)	(0.0719)
政府对环境的规制	-0.0072***	-0.0075***	-0.0073***	-0.0071***
	(0.0025)	(0.0024)	(0.0024)	(0.0024)
公众对环境的关注	0.0089	0.0094*	0.0089	0.0085
	(0.0056)	(0.0054)	(0.0055)	(0.0055)
人均GDP	-0.1350***	-0.1164***	-0.1286***	-0.1218***
	(0.0357)	(0.0353)	(0.0377)	(0.0363)
人均GDP平方项	0.0014	0.0012	0.0014	0.0015
	(0.0020)	(0.0019)	(0.0019)	(0.0019)
贸易开放程度	-0.1258*	-0.1191*	-0.1266*	-0.1216*
	(0.0682)	(0.0661)	(0.0671)	(0.0669)
城镇化率	0.0004	0.0005	0.0003	-0.0004
	(0.0039)	(0.0038)	(0.0039)	(0.0039)
第三产业占比	0.0018	0.0012	0.0018	0.0017
	(0.0024)	(0.0023)	(0.0024)	(0.0024)
能源使用强度	-0.0331***	-0.0307**	-0.0335***	-0.0347***
	(0.0127)	(0.0124)	(0.0126)	(0.0126)
公民受教育水平	0.0022	0.0027	0.0023	0.0024
	(0.0025)	(0.0024)	(0.0025)	(0.0024)
R <sup>2</sup>	0.2326	0.2318	0.2327	0.2361
观测值	330	300	300	300

注：\*\*\*、\*\*和\*分别为在1%、5%和10%的显著性水平上显著，括号内为标准误，下同；“—”表示此项为空。

空间权重矩阵得到的空间滞后项系数为0.2216，表明不同地区的生态效率会相互影响，当某一地区生态效率提高时，其经济相邻地区的生态效率也会得到提高。

空间互动关系的存在可以从空间外溢的视角进行说明，空间外溢可以理解为由于地区在空间上的开放型，某一地区资本和知识的进步对其他地区产生一定的外部性，覃成林等<sup>[19]</sup>认为空间外溢包括直接效应和间接效应，直接效应包括地区间的学习、分享等，这类外溢不会产生额外的成本，而间接效应是指在空间外溢过程中可能产生新的影响生态效率的因素，如地区之间的竞争。在经济增长相关的文献当中，间接效应可以被理解为一种积极影响，地方官员的晋升激励使得竞争有利于地方经济增长，但对于生态效率而言，在粗放型的增长模式之下，负向的间接外溢则是硬币的另一面，地区之间经济增长的过度竞争往往以牺牲环境为代价。结合表4中(2)的估计结果以及空间外溢的直接效应和间接效应，中国区域生态效率的空间外溢主要由直接效应所主导，地区通过学习和分享促进生态效率的提高。由于估计结果表明采用经济空间权重矩阵更为合适，故下文对控制变量结果的说明将采用经济空间权重矩阵得到的估计结果。

就控制变量而言，人均GDP对生态效率的影响显著为负。在本文所考察的时间范围

内,中国经济发展水平的提高带来的可能是更多的资源消耗和环境污染,从而导致生态效率降低。城镇化率、第三产业占比和公民受教育水平三个变量对生态效率的影响在统计上不显著,就经济显著性而言,其影响也比较小,基本可以忽略。政府环境规制对生态效率的影响为负且通过显著性检验,政府环境规制强度的提高会降低生态效率。政府环境规制会增加企业的服从成本,同时,也可能导致隐性经济规模的扩大,从而扩大污染<sup>[35]</sup>,但由于系数相对较小,其负面影响并不大。公众对环境的关注有利于生态效率的提高,随着公众关注度的提高,企业会更加关注其行为对自身形象的影响,从而减少环境破坏行为。贸易开放度提高对生态效率产生不利影响,“污染天堂”假说认为,由于全球或地区间环境规制强度的梯度差异,贸易开放会导致污染产业的转移,从而引起被转入区环境质量的下降<sup>[36,37]</sup>,生态效率降低。部分文献表明,在中国对外贸易开放的过程中,已经成为众多发达国家污染的倾销地<sup>[38,39]</sup>。能源使用强度的提高会降低生态效率,与预期相一致,能源使用强度的提高意味着单位GDP产出需要更多的能源消耗。

### 2.2.2 基于分样本的“群分效应”检验

根据图2所给出的可视化证据,发达和欠发达地区内部的生态效率拥有较高的相似性,当横跨两个地区进行比较时则显示出较大的差异性,给出了“群分效应”存在的初步证据。为进一步验证“群分效应”的存在,将全国分为发达地区和欠发达地区两个样本,分别检验两个地区内部生态效率的空间互动效应,若根据两个分样本估计得到的空间滞后项系数均大于全样本估计得到的空间滞后项系数,则表明生态效率的“群分效应”存在。运用发达地区和欠发达地区样本估计得到的结果见表5。表5中(5)和(6)均是采用经济距离空间权重矩阵得到的估计结果,两类地区的空间滞后项系数分别为0.4354和0.6159,且均通过了1%的统计显著性检验,远高于表4中的空间滞后项系数0.2216,即发达地区和欠发达地区之间的生态效率互动程度远低于两类地区内部的生态效率互动程度,表明经济发展水平相似地区内部确实表现出更强的生态效率互动效应。该现象产生的原因可能来自于两个方面:第一,个体的偏向性。地区层面所展现出来的诸多现象往往是个体行为的集合,背后均是鲜活的个体,而个体往往带有个人偏好,导致地区层面的交流中也会表现出明显的偏向性,如发达地区更愿意与发达地区进行交流,如政策制定、人才流动等。第二,制度的相似性。不同经济发展程度的地区差异往往不只是在经济发展水平层面,在人力资本、产权保护程度以及政府办事效率等方面均存在一定差异,这一差异构成了发达或欠发达内部较强空间互动的基础,如人力资本往

表5 分样本估计结果

Table 5 The estimation results based on the subsample

变量	经济权重		地理权重		相邻权重	
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	发达地区	欠发达地区	发达地区	欠发达地区	发达地区	欠发达地区
空间滞后项系数	0.4354*** (0.0905)	0.6159*** (0.0630)	0.6036*** (0.0924)	0.7072*** (0.0658)	0.3127*** (0.0673)	0.4988*** (0.0686)
控制变量	有	有	有	有	有	有
R <sup>2</sup>	0.1357	0.3179	0.1154	0.3507	0.1622	0.2586
观测值	150	150	150	150	150	150

注:受篇幅所限,未包括控制变量估计结果。

往更倾向于在经济发达地区间流动，因为这些地区有着更完备的市场制度、产权保护程度，能够更好地发挥人力资本的优势。而欠发达地区在制度环境方面与发达地区存在一定的差距，这在一定程度上会阻碍与发达地区的经济合作，但欠发达地区可以通过抱团来谋求集聚效应，推动发展。

由于经济空间权重矩阵描述的是地区间的经济差距，因此，采用该权重描述的分样本内部的经济差距必然小于全国层面的经济差距，从而导致基于分样本估计得到的空间滞后项系数会大于全样本估计得到的空间滞后项系数，在此情况下得到的结论可能有误。鉴于此，采用地理和相邻空间权重矩阵重新进行估计，见表5中列(7)~(10)，虽然空间滞后项系数发生了变化，但分样本估计得到的空间滞后项系数均显著大于全样本估计得到的空间滞后项系数，表明主要结论是稳健的。值得注意的是，在全样本估计中，基于地理权重和相邻权重得到的空间滞后项系数几乎为0且未通过显著性检验，而分样本估计下，采用两类权重得到的空间滞后项系数较大且极为显著，这进一步提供了“群分效应”存在的证据。

### 3 结论

中国经济高质量发展需要立足于生态环境的可持续发展，而对经济和生态环境进行综合评价并在此基础上探讨生态效率的空间互动模式是推动地区可持续协调发展的必要条件。本文采用考虑非期望产出的SBM模型对中国30个省级行政区的生态效率进行测度，并在此基础上考察地区生态效率在空间上的互动关系。主要得到以下三点结论：

第一，总体而言，中国区域生态效率有所降低，但呈现阶段性特征。全国层面、发达地区以及欠发达地区的生态效率均值分别从2005年的0.707、0.863和0.551，下降到2015年的0.568、0.723和0.412，总体呈下降态势，但下降速度最快的时期主要在2008年之前，2008年之后下降缓慢。此外，基于经济发展水平的生态效率空间分布模式随时间推移不断得到强化。大部分经济发达省市始终处于生态效率第一梯队，而大部分经济欠发达省份则始终徘徊在第三和第四梯队。

第二，在全样本估计中，以经济距离描述地区间关系时，空间滞后项系数为0.2216且通过1%的统计显著性检验，表明地区生态效率存在显著的空间互动效应，某一地区的生态效率提高会带动其经济发展水平相近地区生态效率的提高。

第三，采用发达地区样本和欠发达地区样本估计得到的空间滞后项系数分别为0.4354和0.6159，且均通过了1%的统计显著性检验，因此，发达地区和欠发达地区生态效率均具有正向的空间互动效应。此外，分样本估计得到的空间滞后项系数均大于全样本估计得到的空间滞后项系数0.2216，表明发达和欠发达地区内部的生态效率空间互动均强于两类地区间的空间互动，进而表明中国生态效率的“群分效应”真实存在。即使在采用相邻和地理权重矩阵的情况下，该结论也依然稳健。

大量文献证实，中国地区间存在严重的市场分割现象，这种市场分割主要来自于行政壁垒。而本文的研究表明，地区分割不仅存在于经济层面，而且也存在于环境层面，但不同的是，生态效率的地区分割主要基于经济发展水平，而非行政壁垒。限于数据和方法的局限性，本文未进一步探讨生态效率地区分割背后的机制。此外，由于不同省份间在经济、文化等各方面存在显著差异，本文得到的生态效率“群分效应”可能并不只

是来自经济发展水平上的差异,若能测算地级市层面的生态效率,则可以考察同一个省份内部的差异,因而能够排除更多干扰性因素的影响。

### 参考文献(References):

- [1] ZHOU C, SHI C, WANG S, et al. Estimation of eco-efficiency and its influencing factors in Guangdong province based on Super-SBM and panel regression models. *Ecological Indicators*, 2018, 86(3): 67-80.
- [2] STURM A, SCHALTEGGER S. Ecologically induced decision instruments of the management. WWZ: Discussion Paper Nr. 8914, Basel: WWZ, 1989.
- [3] KICHERER A, SCHALTEGGER S, TSCHOCHOHEI H, et al. Eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(7): 537.
- [4] MICKWITZ P, MELANEN M, ROSENSTRÖM U, et al. Regional eco-efficiency indicator: A participatory approach. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(18): 1603-1611.
- [5] KHAREL G P, CHARMONDUSIT K. Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(13): 1379-1387.
- [6] 马勇, 童昀, 任洁. 多源遥感数据支持下的县域尺度生态效率测算及稳健性检验: 以长江中游城市群为例. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1196-1208. [MA Y, TONG Y, REN J. Calculation and robustness test of county-scale ecological efficiency based on multi-source remote sensing data: Taking the urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River as an example. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1196-1208.]
- [7] GÓMEZ-CALVET R, GÓMEZ-CALVET A R, CONESA D, et al. On the dynamics of eco-efficiency performance in the European Union. *Computers and Operations Research*, 2016, 66(2): 336-350.
- [8] ROBAINA-ALVES M, MOUTINHO V, MACEDO P. A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103(9): 562-573.
- [9] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 1945-1961. [WANG Z F, LIU Q F. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yangtze River Economic Belt and its interactive response with tourism economy. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1945-1961.]
- [10] SHAO L, YU X, FENG C. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network data envelopment analysis. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247(10): 551-560.
- [11] LIU X, CHU J, YIN P, et al. DEA cross-efficiency evaluation considering undesirable output and ranking priority: A case study of eco-efficiency analysis of coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142(1): 877-885.
- [12] PEREZ U M, OUDE A L, WALL A. Eco-efficiency among dairy farmers: The importance of socio-economic characteristics and farmer attitudes. *Environmental and Resource Economics*, 2016, 64(4): 559-574.
- [13] 陆铭, 张爽. “人以群分”: 非市场互动和群分效应的文献评论. *经济学季刊*, 2007, 7(3): 991-1020. [LU M, ZHANG S. Non-market interaction and sorting: A literature review. *China Economic Quarterly*, 2007, 7(3): 991-1020.]
- [14] SUN L, WANG Q, ZHOU P, et al. Effects of carbon emission transfer on economic spillover and carbon emission reduction in China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(1): 1432-1442.
- [15] ZHAO D, SING T F. Air pollution, economic spillovers, and urban growth in China. *The Annals of Regional Science*, 2017, 58(2): 321-340.
- [16] 韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗? 对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析. *数量经济技术经济研究*, 2017, 34(3): 40-58. [HAN F, XIE R. Does the agglomeration of producer services reduce carbon emissions?. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2017, 34(3): 40-58.]
- [17] HAO Y, LIU Y. The influential factors of urban PM<sub>2.5</sub> concentrations in China: A spatial econometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(1): 1443-1453.
- [18] 陈丰龙, 王美昌, 徐康宁. 中国区域经济协调发展的演变特征: 空间收敛的视角. *财贸经济*, 2018, 39(7): 128-143. [CHEN F L, WANG M C, XU K N. The evolution trend of China's coordinated regional development: A spatial convergence analysis. *Finance & Trade Economics*, 2018, 39(7): 128-143.]
- [19] 覃成林, 刘迎霞, 李超. 空间外溢与区域经济增长趋同: 基于长江三角洲的案例分析. *中国社会科学*, 2012, (5): 76-94. [QIN C L, LIU Y X, LI C. Spatial spillover and the convergence of regional economic growth: A case study of the



- Yangtze River Delta. *Social Sciences in China*, 2012, 33(5): 76-94.]
- [20] 邓慧慧, 赵家羚. 地方政府经济决策中的“同群效应”. *中国工业经济*, 2018, 39(4): 59-78. [DENG H H, ZHAO J L. Peer effects in economic decision-making of China's local governments. *China Industrial Economics*, 2018, 39(4): 59-78.]
- [21] 王德起, 庞晓庆. 京津冀城市群绿色土地利用效率研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(4): 68-76. [WANG D Q, PANG X Q. Research on green land-use efficiency of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 68-76.]
- [22] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [23] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A Slacks-based Measure (SBM) approach. *GRIPS Research Report Series*, 2003.
- [24] 陈晓红, 周宏浩. 城市精明发展与生态效率的协同测度及交互响应: 以中国276个地级以上城市为例. *地理研究*, 2019, 38(11): 2653-2665. [CHEN X H, ZHOU H H. Dynamic coordinated relationships and interactive effects between urban smart development and ecological efficiency: A case study of 276 cities at prefecture level and above in China. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2653-2665.]
- [25] 盖美, 聂晨. 环渤海地区生态效率评价及空间演化规律. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 104-115. [GAI M, NIE C. Ecological efficiency evaluation and spatial evolution in Bohai Rim Region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 104-115.]
- [26] 李宾. 我国资本存量估算的比较分析. *数量经济技术经济研究*, 2011, 28(12): 21-36. [LI B. Comparative analysis of estimates on capital stock of China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2011, 28(12): 21-36.]
- [27] REN S, LI X, YUAN B, et al. The effects of three types of environmental regulation on eco-efficiency: A cross-region analysis in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 173(2): 245-255.
- [28] 王耕, 李素娟, 马奇飞. 人类福祉视角下中国生态效率时空演化研究. *地理科学*, 2018, 38(10): 1597-1605. [WANG G, LI S J, MA Q F. Spatial-temporal evolution of Chinese eco-efficiency from the perspective of human well-being. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1597-1605.]
- [29] YANG L, ZHANG X. Assessing regional eco-efficiency from the perspective of resource, environmental and economic performance in China: A bootstrapping approach in global data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 173(2): 100-111.
- [30] MANAGI S, HIBIKI A, TSURUMI T. Does trade openness improve environmental quality?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2009, 58(3): 346-363.
- [31] BAI Y, DENG X, JIANG S, et al. Exploring the relationship between urbanization and urban eco-efficiency: Evidence from prefecture-level cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195(9): 1487-1496.
- [32] 李在军, 胡美娟, 周年兴. 中国地级市工业生态效率空间格局及影响因素. *经济地理*, 2018, 38(12): 126-134. [LI Z J, HU M J, ZHOU N X. The spatial pattern and influencing factors of industrial eco-efficiency in Chinese prefecture-level cities. *Economic Geography*, 2018, 38(12): 126-134.]
- [33] LESAGE J, PACE R K. *Introduction to Spatial Econometrics*. Chapman and Hall/CRC. New York: Boca Raton, 2009.
- [34] ELHORST J P. Applied spatial econometrics: Raising the bar. *Spatial Economic Analysis*, 2010, 5(1): 9-28.
- [35] 余长林, 高宏建. 环境管制对中国环境污染的影响: 基于隐性经济的视角. *中国工业经济*, 2015, 33(7): 21-35. [YU C L, GAO H J. The effect of environmental regulation on environmental pollution in China: Based on the hidden economy perspective. *China Industrial Economics*, 2015, 33(7): 21-35.]
- [36] TANG J P. Pollution havens and the trade in toxic chemicals: Evidence from U.S. trade flows. *Ecological Economics*, 2015, 112(4): 150-160.
- [37] LE T, CHANG Y, PARK D. Trade openness and environmental quality: International evidence. *Energy Policy*, 2016, 92(5): 45-55.
- [38] 赵忠秀, 王苒, 闫云凤. 贸易隐含碳与污染天堂假说: 环境库兹涅茨曲线成因的再解释. *国际贸易问题*, 2013, 39(7): 93-101. [ZHAO Z X, WANG R, YAN Y F. Embodied carbon emission and pollution heaven hypothesis: Re-explaining environmental Kuznets Curve. *Journal of International Trade*, 2013, 39(7): 93-101.]
- [39] SUN C, ZHANG F, XU M. Investigation of pollution haven hypothesis for China: An ARDL approach with breakpoint unit root tests. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161(9): 153-164.

## Spatio-temporal evolution and spatial interaction of regional eco-efficiency in China

SHEN Wei-teng<sup>1</sup>, HU Qiu-guang<sup>1,2</sup>, LI Jia-lin<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Qi<sup>1,2</sup>

(1. School of Business, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. East China Sea Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Department of Geography & Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 4. Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** Eco-efficiency is an important indicator for measuring sustainable development. Clarifying the spatial distribution of eco-efficiency and its evolution is of vital importance to achieving coordinated regional development of China's economy and environment. However, previous research has failed to consider the spatial interaction distribution of eco-efficiency. The SBM model considering undesired output was used to measure the eco-efficiency of 30 provinces (municipalities and autonomous regions) in China from 2005 to 2015, and the spatial econometric model was used to investigate the spatial interaction pattern of eco-efficiency in China. The results show that: (1) From the perspective of the whole country or by region, China's eco-efficiency has generally shown a downward trend. (2) From the perspective of the evolution of the spatial distribution of eco-efficiency, the characteristics of high eco-efficiency distributed in developed provinces have been continuously strengthened, and low eco-efficiency areas are mainly distributed in developing provinces. Beijing, Tianjin, Shandong, Jiangsu, Shanghai, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Hainan, Qinghai have always been in the first echelon of eco-efficiency, while Xinjiang, Guangxi and Hunan have always been in the fourth echelon. From 2005 to 2015, the members of each echelon changed, but the distribution characteristics based on the level of economic development remained basically unchanged. (3) At the national level, the estimation results based on the economic weight matrix show that there is a positive spatial interaction effect of eco-efficiency among regions. The improvement of eco-efficiency in a certain region will have a positive spillover effect on its economic neighbors. Extensive learning sharing and competition among different regions may explain the positive eco-efficiency interactions among regions. (4) The sub-sample test shows that the eco-efficiency of developed and developing regions shows a positive spatial interaction effect, and the spatial interaction effect is greater than the spatial interaction effect between the two types of regions, indicating that the distribution in China's eco-efficiency is based on the level of economic development, thus showing the "sorting" based on the level of economic development. This conclusion is still robust even with the geographic distance and adjacent weight matrix.

**Keywords:** regional eco-efficiency; spatial interaction; sorting; spatial autoregressive model