

中国省域生态效率时空格局变化及优化策略研究

涂涛, 朱庆莹, 梅昀, 陈银蓉

(华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070)

摘要:为了深入研究不同区域生态效率的优化路径,采用 Malmquist-超效率 SBM 模型测度了 2005—2016 年中国省域生态效率和 Malmquist 指数及其构成,并结合要素投入产出松弛率分析探讨了效率低效成因,再运用空间自相关方法揭示了区域生态效率空间关联格局的时空动态特征,最后提出了相应的区域生态效率改进策略。结果表明:(1) 区域生态效率整体呈现“东部>中部>西部”的梯度分布格局;随时间推移,除北京、上海、湖南和重庆外,绝大多数省(市)生态效率整体呈下降趋势。(2) 从 Malmquist 指数分解情况看,技术效率变化和技术进步变化对区域生态效率整体提升作用不明显。但四川、云南、青海、新疆 4 个西部区域省市的技术效率变化对生态效率具有明显的正向效应;且北京、贵州的技术效率进步和技术进步均对生态效率有正向效应。(3) 从投入产出要素冗余度看,生态效率低下是由于劳动力、能源、土地和水资源投入冗余以及非期望产出过量,其情况在西部最为严重,中部次之,东部最小。(4) 区域生态效率呈现明显的空间正相关性,其空间关联格局随时间推移整体较为稳定,但存在局部变化。各省市投入产出要素存在不同方面和程度的改进空间,可以从加强管理与科技创新、优化投入产出结构、分区协同治理等方面出发,优化区域生态效率。

关键词:区域生态效率; Malmquist-超效率 SBM 模型; 投入产出松弛率; 空间自相关; 优化策略

中图分类号: X821

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)02-0380-09

Spatio-temporal Pattern Changes and Optimal Strategies of Provincial Ecological Efficiency in China

TU Tao, ZHU Qingying, MEI Yun, CHEN Yinrong

(College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the optimization of regional ecological efficiency, the Malmquist-super-efficiency SBM model was used to measure Chinese provincial ecological efficiency from 2005 to 2016. Then, the composition of the regional ecological efficiency and causes of inefficiency were measured by Malmquist index and the factor of input-output relaxation rate respectively. In addition, the spatio-temporal dynamic characteristics of regional ecological efficiency were explored by the Spatial Autocorrelation Methods. Finally, the corresponding regional ecological efficiency optimal strategies were put forward based on aforementioned analysis. The results showed that: (1) the regional ecological efficiency of all studied areas presented a gradient distribution pattern of ‘East> Central> West’; and expect Beijing, Shanghai, Hunan and Chongqing, the ecological efficiency of most provinces and cities had shown a downward trend over years. (2) results of the decomposition of Malmquist index indicated that changes in technical efficiency and technological progress had little effects on regional ecological efficiency at most of provinces and cities, but changes in technical efficiency of four provinces in the western region had a positive effect on ecological efficiency, they are Sichuan, Yunnan, Qinghai and Xinjiang, at meanwhile, the changes in technological progress and technological efficiency both had a positive effect on ecological efficiency in Beijing and Guizhou. (3) the low ecological efficiency were ascribed to the contrasting redundancy rate of each factors including labor, energy, land and water resources, and excessive undesired output, and it is most serious in West, followed by Central and

收稿日期: 2021-02-13

修回日期: 2021-03-09

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划资助项目“生计资本视角下农地流行为决策机理、绩效评估与改进研究”(20YJAZH015)

第一作者: 涂涛(1997—), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为土地经济与管理、土地利用规划。E-mail: 15072380441@163.com

通信作者: 梅昀(1964—), 男, 江西湖口人, 教授, 主要从事土地经济与管理、土地生态与土地利用规划研究。E-mail: meiyun@mail.hzau.edu.cn

East. (4) the regional ecological efficiency presented an obvious spatial positive correlation, and its spatial correlation pattern was relatively stable over time, but there were some noticeable changes at local scale. There were different aspects and degrees of improvement of input-output factors in different provinces and cities, and the regional ecological efficiency could be promoted by strengthening management and technological innovation, optimizing the input-output structure, and coordinated regional governance.

Keywords: regional ecological efficiency; malmquist-super efficiency SBM model; input-output relaxation rate; spatial autocorrelation; optimal strategies

近年来资源环境和经济发展之间的矛盾日益凸显,区域可持续发展面临巨大挑战,且生态文明建设已上升为国家战略。为此,探讨区域可持续发展模式和生态文明建设路径成为了当前学者们研究的热点^[1-2]。生态效率概念由德国学者 Schaltegger 首次提出。在此基础上,世界可持续发展工商委员会(WBCSD)进一步将生态效率定义为:生态效率是指提供能满足人类需要和提高生活质量的有价格竞争优势的产品和服务,同时使整个生命周期的生态影响和资源强度逐渐降低到和地球的估计承载力相一致的水平,达到环境与社会协调发展的目标^[3]。从概念上看,生态效率代表着经济增长与环境压力的关系,代表着经济效率与环境效益的统一。经过经合组织(OECD)对生态效率应用的拓展延伸,生态效率的概念从企业^[4]、行业^[3,5]延伸到区域层次^[6]。区域生态效率作为表征循环经济及区域可持续发展能力的研究视角已被学界广泛认可^[1,7],并已成为各领域学者们关注的焦点。

目前,学者们已在区域生态效率评价、影响因素、动态演变、区域差异等方面展开了系列研究。付丽娜等^[1]基于超效率 DEA 模型对长株潭地区城市的生态效率进行了评价;蔡洁等^[8]在测算了山东省各地市生态效率的基础上,结合 STIRPAT 模型分析发现产业结构、资金投入和能源效率是影响区域生态效率的重要因素;成金华等^[9]运用空间自相关分析揭示了省域尺度下区域生态效率的空间演变规律;屈小娥^[10]通过实证分析发现了区域生态效率存在明显差异,由东部、中部到西部梯度递减,主要是东部地区产业体系先进,技术和管理成熟,中西部地区则较为落后。已有研究虽然对区域生态效率的相关理论与实践进行了详细探讨,但依然存在以下不足之处:第一,缺乏从投入产出视角对要素的配置效率,即投入产出松弛率进行分析;第二,区域生态效率存在着空间溢出效应,对区域生态效率空间关联格局及其动态演变特征关注仍然不多。然而,明晰区域生态效率的投入产出要素冗余率及空间格局演化特征,进而提出区域生态效率的具体优化策略,对于促进中国生态文明建设、

合理转变经济增长模式以及实现区域可持续发展具有重要意义。基于以上分析,本文采用 Malmquist-超效率 SBM 模型测度 2005—2016 年中国省域生态效率和 Malmquist 指数及其构成,并结合要素投入产出松弛率分析探讨效率低效成因,再运用空间自相关方法揭示区域生态效率空间关联格局的时空动态特征,最后提出相应的区域生态效率改进策略。

1 研究方法 & 数据来源

1.1 Malmquist-超效率 SBM 模型

本文主要采用 Malmquist-超效率 SBM 模型,即包含非期望产出的超效率 SBM 和 Malmquist 指数模型相结合的运算模型。

(1) 超效率的 SBM 模型。数据包络分析法(DEA)已被广泛运用于区域生态效率的测度,原因在于它能够很好地克服比值法和指标体系计算法所带来各种缺陷,而超效率 SBM 模型具有超效率 DEA 和 SBM 模型共同的优势^[11-12]。超效率 SBM 模型将期望产出和非期望产出同时当作产出指标,考虑 n 个决策单元(DMU),每个决策单元包括 m 个投入指标、 q_1 个期望产出指标和 q_2 个非期望产出指标。参考相关研究^[13-14],本文从资本、劳动、土地、能源和水资源方面选取的投入要素有固定资本存量、地区就业人数、建成区面积、能源消耗量和水资源供给量;选取的期望产出指标为地区 GDP,非期望产出为工业废水排放量、工业废气排放量、工业固体废弃物排放量、SO₂ 排放量和烟(粉)尘排放量,具体指标说明见表 1。本文测度区域生态效率的超效率 SBM 模型考虑了松弛变量的影响,具体公式为:

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_r^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^- / b_{tk} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik}$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \geq y_{rk}$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n b_{tj} \lambda_j + s_t^- \leq b_{tk}$$

$$1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^b / b_{tk} \right) > 0$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0; i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q_1$$

$$t = 1, 2, \dots, q_2; j = 1, 2, \dots, n (j \neq k)$$

式中: ρ 为区域生态效率; x_{ik} , y_{rk} , b_{tk} 分别为第 k 个省(市)的第 i 个投入要素、第 r 个期望产出和第 t 个非期望产出; s_i^-, s_r^+, s_t^b 分别为投入要素、期望产出和非期望产出的松弛变量; λ_j 为约束条件。

表 1 区域生态效率测算指标体系

目标层	准则层	指标层
生态效率评价 指标	投入指标	资本投入 固定资本存量(亿元)
		劳动力投入 地区就业人数(万人)
		能源投入 能源消耗量(万 t 标准煤)
		水资源投入 供水量(亿 m ³)
		土地资源投入 建成区面积(km ²)
	产出指标	期望产出 地区 GDP(亿元)
		工业废水排放量(万 t)
		工业废气排放量(亿 m ³)
		非期望产出 工业固体废弃物排放量(万 t)
		SO ₂ 排放量(万 t) 烟尘排放量(万 t)

(2) Malmquist 指数。Malmquist 指数最早由 Malmquist 在 1953 年提出,是一种动态评价效率的方法,随后由 Fare, Grosskop 等学者应用于生产的分析上。它将变化原因分解为技术效率变化(EC)与技术进步变化(TC),其中技术进步变化是指生产前沿面的移动;技术效率变化是生产技术的利用效率,是生产前沿面和实际产出量之间的距离变化^[15]。用 x 表示投入, y 表示产出, $Z(x, y)$ 为二者相应的函数映射, Malmquist 指数公式如下:

$$M = \sqrt{\frac{Z^t(x^{t+1}, y^{t+1})Z^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Z^t(x^t, y^t)Z^{t+1}(x^t, y^t)}}$$

$$= \frac{Z^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Z^t(x^t, y^t)} \sqrt{\frac{Z^t(x^t, y^t)Z^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{Z^{t+1}(x^t, y^t)Z^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}}$$

$$= EC \times TC \quad (2)$$

Malmquist 生产指数即 TPF, 表示某一决策单元在 t 至 $t+1$ 期生产率的变化程度。若 $TPF > 1$, 表示生产率呈上升趋势, 反之, 表示呈衰退趋势。式中的

$\sqrt{\frac{Z^t(x^t, y^t)Z^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{Z^{t+1}(x^t, y^t)Z^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}}$ 表示技术进步变化(TC), 即生产前沿面的移动对生产率的贡献程度, $\frac{Z^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Z^t(x^t, y^t)}$ 表示技术效率变化(EC), 即在第 t 期和 $t+1$ 期中技术效率变化对生产率的贡献程度。

1.2 空间自相关分析

空间自相关分析是一系列空间数据分析方法和

技术的集合^[16], 已经广泛运用于生态系统服务^[17]、耕地多功能等^[18]空间相关性的研究。本文在区域生态效率评价的基础上, 采用此方法探索区域生态效率空间关联程度与空间集聚特征并分析其随时间的变化规律。采用 Global Moran's I 指数探索区域生态效率的整体状况。采用 Local Moran's I 指数探索局部区域生态效率的聚集特征, 其中, “HH”类型区为区域生态效率高值空间关联区, 表示区域生态效率较高的省域被生态效率水平较高的邻近省域包围; “LL”类型区为区域生态效率低值空间关联区, 表示区域生态效率较低省域被生态效率较低的邻近省域包围; “HL”类型区为区域生态效率高—低值空间关联区, 表示区域生态效率较高的省域被生态效率较低的邻近省域包围; “LH”类型区为区域生态效率低—高值空间关联区, 表示区域生态效率较低的省域被生态效率较高的邻近省域包围; 另外, HH 和 LL 为正的空间自相关, LH 和 HL 为负的空间自相关, Global Moran's I 指数和 Local Moran's I 指数计算公式如下:

$$GMI = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$$LMI_i = \frac{n (X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \quad (4)$$

式中: GMI 和 LMI_i 分别为 Global Moran's I 指数和 Local Moran's I 指数; X_i, X_j 分别为第 i 和 j 个省份(直辖市、自治区)的区域生态效率得分; \bar{X} 为区域生态效率的平均值; n 为研究省份(直辖市、自治区)个数; W_{ij} 为权重矩阵, 鉴于本文的目的是描述空间对象的互邻关系, 选取 rook 一阶权值矩阵, 当区域 i, j 相邻时, $W_{ij} = 1$; 当区域 i, j 不相邻时, $W_{ij} = 0$, 其中海南省当成与广东省相邻进行处理。通常采用 Z 检验法对 Moran's I 值进行统计检验。

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (5)$$

式中: $Z(I), E(I)$ 分别为 Moran's I 的 Z 法检验值和数学期望, 如果 $Z(I)$ 大于正态分布函数在 0.05 水平下的临界值 1.96, 说明地区之间存在显著的空间相关性。

1.3 数据来源

地区 GDP 和地区就业人员数量来源于《中国统计年鉴》, 能源消费量来源于《中国能源统计年鉴》, 供水量来源于《中国统计年鉴》和《中国水资源公报》, 建成区面积来源于《中国国土资源统计年鉴》, 非期望产出指标工业废水、工业废气、工业固体废弃物、SO₂ 排放量和烟尘排放量来源于《中国环境统计年鉴》, 还有

部分数据来源各省统计年鉴。其中固定资本存量参照单豪杰^[19]的计算方法并将展期更新到 2016 年,所有 GDP 数据都以各自省份 GDP 指数以 2005 年为基期进行平减,消除价格因素的影响,个别缺失数据采用移动平均和趋势外推的方法进行数据重建。西藏、港、澳、台由于数据不完整,本文未进行分析。

2 结果与分析

2.1 区域生态效率评价

评价单元数量符合 maxDEA Ultra 7.0 软件对于决策单元数量不少于投入和产出指标数量的乘积,同时不少于投入和产出指标数量的 3 倍的操作要求。各省市 2005—2016 年的区域生态效率测算结果见表 2。

由表 2 可知,区域层面上,东部、中部和西部区域生态效率的平均值分别在 0.625~0.924,0.385~0.710,0.262~0.543,整体表现为东部>中部>西部,这与现有文献关于“东部最高,中部次之,西部最差”的研究结论相符^[10,20]。这说明相比较于中部和西部,东部所走的“低消耗、低污染、高效益、高产出”的绿色集约型的增长方式对区域生态效率具有显著的促进作用。全国层面区域生态效率整体呈现先增后减趋势,在 2005—2008 年年均增长幅度为 2.4%,2008—2016 年年均下降幅度为 8.3%;中部和东部则一直处于下降趋势,年均下降幅度分别为 4%,7%;西部整个趋势线呈现“M”型变化特征,2009 年和 2013 年的区域生态效率值分别为两个波峰值,2012 年的区域生态效率为波谷值,其中,2005—2008 年和 2012—2013 年年均增长幅度分别为 15.3%,4.0%,2008—2012 年、2013—2016 年年均下降幅度分别为 10.5%,0.5%。除西部地区外,整体上讲,区域生态效率是下降的,这主要是前期较低的经济水平和发展水平和生态环境资源浪费所引起的环境污染的滞后和累积效应所导致的。西部地区的波动变化与产业结构转变和国家战略等密切相关。

省级层面上,除北京、上海、湖南和重庆外,绝大多数省市生态效率整体呈下降趋势。按生态效率值分为绝对高效 $[1.000, +\infty)$ 、高效 $[0.800, 1.000)$ 、中高效 $[0.600, 0.800)$ 、中低效 $[0.400, 0.600)$ 和低效 $[0.000, 0.400)$ 5 类。从表 2 可以看出,均值处于绝对高效的地区有北京、上海、海南、湖南和浙江,处于高效地区的只有福建省,处于中高效的地区有广东、黑龙江、山西、天津、重庆、山东和四川,处于中低效的地区有贵州、安徽、江苏、辽宁、河北、云南、新疆和河南,处于低效的地区有湖北、陕西、青海、吉林、江西、广西、内蒙古、宁夏和甘肃。可见,以北京、上海、海南、

浙江、福建、广东和天津为代表的省份区域生态效率一直处于全国的前 10 名。相关的特征解释是:当前这些省份或地区大都完成了以工业为主导的产业体系向以现代服务业为主导的产业体系转型,产业结构得到优化升级,而新型产业所带来的各种能耗大幅度下降,节能减排效果突出,技术创新所带来的经济增长、环境改善效应明显。由此可知,转变经济发展方式,促进产业结构优化升级对生态效率的提高非常关键。中部地区的湖南和山西分别排在第 4 位和第 9 位,其余地区大都处于中等偏下水平,湖南作为“两型社会”的试验省份,资源消耗和生态环境破坏较少,山西由于持续加大对污染治理的投入,减少了相关污染物的排放,生态效率相对较高。西部经济欠发达的宁夏、广西、内蒙和甘肃等地区的区域生态效率排名靠后,这主要是因为西部地区经济发展较为落后,在追求以经济增长为主要目的背景下,目前仍以“高投入、高消耗”型的粗放式经济增长方式为主,粗放式的增长方式和低水平的生产技术对这些地区的生态效率产生了极大的负面效应。

2.2 Malmquist 指数分析

基于区域生态效率的测算结果,本文采用 Malmquist 指数(MI)计算变化率,并将其分解成技术效率变化(EC)和技术进步变化(TC)。

参考表 2 各省市年均区域生态效率 Malmquist 指数及其分解结果。区域层面上,东部、中部和西部(除西藏)地区的 MI 指数分别为 0.919,0.877,0.923,全都小于 1,各自保持着年均 8.1%,12.3%,7.7% 的下降幅度。从指标分解情况来看,除西部地区的技术效率变化(EC)指数大于 1(1.013)外,其余地区的技术效率变化(EC)指数和技术进步变化(TC)指数都小于 1。表明西部地区技术效率提升是改变区域生态效率的主要原因,而技术进步未体现出正向作用。东部和中部地区的区域生态效率提升则受技术效率变化(EC)指数和技术进步变化(TC)指数双重制约,但各地区区域生态效率变化及成因有所差异,就全国和中部地区而言,区域生态效率受技术进步制约较强,东部地区则几乎受到技术效率和技术进步的同等约束,整体说明全国、东部和中部在提高技术效率、推动技术进步以促进生态效率提高方面还有很大的改进空间,需要进一步完善区域管理水平,加强科技投入和创新。省级层面上,除北京、贵州和青海 MI 指数值大于 1 外,其余省份都小于 1。MI 指数值排在前 5 位的省份分别是贵州、青海、北京、上海和浙江,排在后 5 位的是辽宁、山西、黑龙江、四川和重庆。从指标分解情况来看,贵州、青海、四川、新疆、云南和北

京的技术效率变化(EC)指数值大于1,说明这些地区在区域生态效率管理的水平和制度设计上较为先进,技术效率的提高对区域生态效率提升更为显著;仅贵州和北京的技术进步变化(TC)指数大于1,表明这两个省份的

科技投入和技术创新较为充足,技术进步对区域生态效率的增强具有显著正向效应。整体说明各省市应进一步改善区域生态环境管理水平,继续加大环境保护方面的科研投入,进而促进区域生态效率的改善。

表 2 2005—2016 年中国省域生态效率评价值及 Malmquist 指数分解

地区	生态效率评价值												生态效率 均值	排序	Malmquist 指数(MI)	技术效率 变化(EC)	技术进步 变化(TC)
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016					
北京	1.125	1.137	1.143	1.141	1.140	1.138	1.147	1.145	1.147	1.146	1.150	1.154	1.143	1	1.004	1.002	1.001
天津	1.040	1.042	1.032	1.030	1.012	1.004	0.483	0.458	0.432	0.418	0.359	0.334	0.720	10	0.913	0.918	0.996
河北省	0.509	0.490	0.502	0.520	0.485	0.455	0.449	0.408	0.390	0.358	0.321	0.294	0.432	18	0.912	0.952	0.957
山西省	1.013	1.001	1.007	1.016	1.018	1.013	1.007	0.423	0.360	0.315	0.296	0.280	0.729	9	0.772	0.911	0.851
内蒙古	0.332	0.308	0.296	0.303	0.302	0.272	0.266	0.245	0.222	0.212	0.193	0.174	0.260	28	0.935	0.944	0.991
辽宁省	0.559	0.508	0.521	0.539	0.521	0.475	0.409	0.386	0.353	0.337	0.334	0.267	0.434	17	0.782	0.937	0.838
吉林省	0.514	0.441	0.463	0.375	0.332	0.298	0.288	0.277	0.271	0.256	0.243	0.234	0.333	25	0.912	0.933	0.978
黑龙江省	1.027	1.017	1.023	1.015	1.004	1.001	1.000	0.477	0.434	0.412	0.351	0.300	0.755	8	0.760	0.910	0.838
上海	1.061	1.064	1.074	1.066	1.066	1.058	1.056	1.054	1.058	1.062	1.056	1.062	1.061	2	1.000	1.000	1.000
江苏省	0.610	0.567	0.563	0.575	0.550	0.509	0.496	0.435	0.414	0.410	0.380	0.354	0.489	16	0.930	0.952	0.976
浙江省	1.024	1.028	1.029	1.032	1.028	1.034	1.033	1.034	1.032	1.026	1.025	1.022	1.029	5	0.994	1.000	0.994
安徽省	0.684	0.542	0.561	0.538	0.489	0.484	0.500	0.503	0.499	0.486	0.431	0.412	0.511	15	0.803	0.957	0.836
福建省	1.042	1.039	1.036	1.028	1.021	1.016	1.005	1.001	0.770	0.736	0.660	0.619	0.914	6	0.870	0.956	0.907
江西省	0.415	0.396	0.389	0.385	0.357	0.325	0.323	0.304	0.286	0.276	0.255	0.239	0.329	26	0.943	0.951	0.991
山东省	1.024	1.022	1.016	1.014	1.008	0.571	0.514	0.462	0.418	0.384	0.360	0.343	0.678	12	0.888	0.915	0.974
河南省	0.576	0.525	0.530	0.533	0.453	0.396	0.362	0.318	0.313	0.307	0.286	0.275	0.406	21	0.907	0.937	0.969
湖北省	0.432	0.423	0.457	0.460	0.451	0.403	0.367	0.341	0.323	0.316	0.307	0.303	0.382	22	0.935	0.970	0.965
湖南省	1.021	1.029	1.032	1.037	1.035	1.031	1.030	1.031	1.035	1.039	1.038	1.037	1.033	4	0.985	1.001	0.984
广东省	1.035	1.042	1.038	1.030	1.013	1.001	0.732	0.672	0.594	0.501	0.412	0.407	0.790	7	0.832	0.923	0.896
广西	0.381	0.414	0.418	0.420	0.361	0.333	0.241	0.284	0.272	0.268	0.256	0.246	0.324	27	0.924	0.968	0.957
海南省	1.137	1.081	1.073	1.068	1.068	1.065	1.053	1.044	1.031	1.025	1.020	1.018	1.057	3	0.985	0.990	0.994
重庆	0.499	0.497	0.458	0.499	1.007	1.004	1.008	1.009	1.001	0.561	0.541	0.514	0.717	11	0.747	1.045	0.738
四川省	0.493	0.532	0.585	1.003	1.000	0.762	0.530	0.553	0.570	0.555	0.475	0.437	0.624	13	0.752	1.016	0.764
贵州省	0.344	0.384	1.003	1.006	0.442	0.461	0.385	0.374	1.024	0.315	0.304	0.277	0.527	14	1.125	1.177	1.012
云南省	0.426	0.481	0.514	1.005	0.465	0.412	0.364	0.338	0.301	0.294	0.274	0.253	0.427	19	0.896	1.003	0.919
陕西省	0.425	0.437	0.463	0.452	0.422	0.376	0.356	0.335	0.316	0.310	0.279	0.262	0.369	23	0.931	0.958	0.973
甘肃省	0.273	0.276	0.281	0.275	0.248	0.240	0.234	0.220	0.207	0.202	0.179	0.168	0.234	29	0.946	0.958	0.988
青海省	0.302	0.302	0.320	0.331	1.053	0.325	0.313	0.302	0.236	0.247	0.216	0.184	0.344	24	1.073	1.097	0.982
宁夏	0.202	0.202	0.226	0.233	0.229	0.222	0.218	0.206	0.195	0.185	0.164	0.149	0.203	30	0.946	0.974	0.972
新疆	0.419	0.471	1.012	0.450	0.377	0.407	0.375	0.347	0.311	0.285	0.249	0.221	0.410	20	0.882	1.005	0.912
全国	0.665	0.657	0.702	0.713	0.698	0.636	0.585	0.533	0.527	0.475	0.447	0.428	0.589		0.909	0.975	0.938
东部	0.924	0.911	0.912	0.913	0.901	0.848	0.762	0.736	0.694	0.673	0.643	0.625	0.795		0.919	0.959	0.958
中部	0.710	0.672	0.683	0.670	0.642	0.619	0.610	0.459	0.440	0.426	0.401	0.385	0.560		0.877	0.946	0.927
西部	0.373	0.391	0.507	0.543	0.537	0.437	0.390	0.383	0.423	0.312	0.284	0.262	0.404		0.923	1.013	0.928

注:以上生态效率测算数据不包含未分析的西藏、港、澳、台等地区。

由表 3 中 2005—2016 年 3 类指标(MI, EC, TC)的动态变化可知,全国各年份的区域生态效率经历了“增加—减少—增加—减少”的波动式变化过程;且历年的区域生态效率都呈下降态势。从指标分解来看,技术效率变化在 2006—2008 年对区域生态效率的改善起到促进作用,且在 2006 年间,技术变化增长率高达 10.9%;技术进步变化在 2009—2010 年两年间连续推动了区域生态效率的提高,但幅度较小,整体上,

技术效率变化和技术进步变化对区域生态效率的提升作用不明显。

2.3 投入产出松弛率分析

为了针对性地提出改善全国各省市区域生态效率的政策建议,本文从投入产出松弛率的视角,分析区域生态效率可改善的方向。根据超效率 SBM 模型,当区域生态效率 <1 时,松弛量 s_i^- , s_r^+ , s_i^b 的大小可以表明区域生态效率损失的原因^[21]。

表 3 各年份平均 Malmquist 指数及其分解

年份	Malmquist 指数(MI)	技术效率变化(EC)	技术进步变化(TC)
2005	0.888	0.992	0.896
2006	0.962	1.109	0.888
2007	0.994	1.037	0.976
2008	0.923	1.032	0.906
2009	0.924	0.920	1.005
2010	0.921	0.921	1.002
2011	0.842	0.928	0.909
2012	0.912	0.998	0.912
2013	0.864	0.928	0.930
2014	0.860	0.926	0.927
2015	0.912	0.938	0.972
2016	0.909	0.975	0.938

观察表 4 发现,区域层面上,从全国看,除资本、土地投入冗余率和期望产出不足率不显著(冗余率小于 0.2)外,其余投入要素冗余率和非期望产出过量情况较为严重;对东部地区而言,资本、劳动力、能源和土地投入的产出率以及期望产出不足率不显著,水资源投入冗余度和非期望产出过量现象较为严重;中部地区各要素的投入产出率情况与全国层面类似;西部地区除资本冗余度和期望产出不足率不显著之外,其余投入要素和非期望产出过量情况同样较为严重。整体反映出全国层面和中部地区资本和土地投入得到充分地利用,但在经济发展的同时,各种非期望产出过剩,对生态环境产生了很大的负面影响;西部地区除资本要素利用较为充分外,其余投入产出要素存在严重的过量投入和非期望要素的过量产出;相比中西部地区,东部地区的资本、劳动力、能源和土地都得到较为充分的利用,但在非期望产出方面同样存在过量现象。从各省市的具体情况来讲,存在着不同方面、不同程度的区域生态效率改进空间。资本投入冗余度较高的地区主要有内蒙古、甘肃、青海、宁夏等地区;对劳动力投入而言,甘肃、江西、河南、青海、广西、陕西等地冗余度较高;对于能源投入而言,宁夏、内蒙古、青海、甘肃、新疆等地区冗余度较高;对土地投入而言,宁夏、安徽、广西、甘肃、重庆等地区冗余度较高;对水资源投入而言,宁夏、甘肃、新疆、江西、广西等地冗余度较高;对期望产出(GDP)而言,虽然北京、上海、海南等地的区域生态效率相对较高,排名前三位,但期望产出离最优值仍有一定差距,尤其是北京;对非期望产出而言,宁夏、江西、江苏、广西、甘肃、吉林等地区工业废水排放量过高,宁夏、内蒙古、甘肃、河北、广西、青海、辽宁等地区工业废气排放量过高,内蒙古、江西、河北、甘肃、宁夏、辽宁等地区工业

固体废弃物排放量过高,SO₂排放量较高的有宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、广西、新疆等地区,烟尘排放量较高的地区有内蒙古、宁夏、吉林、甘肃、陕西、广西等地区。综上,地区投入要素冗余和非期望产出过量是造成中西部地区生态效率偏低的主要原因。相对而言,中西部地区经济发展程度较低,技术水平相对落后,产业体系中大都是高消耗、高污染、高排放的企业,同时,政府环境治理能力相对较低,因而,造成各种要素投入和各类非期望产出过高。东部地区的经济发展水平较高,技术创新能力较强,对区域生态环境的治理能力和重视程度也较高,因此,整体的区域生态效率要优于中西部地区,而进一步提升期望产出水平是增强东部地区生态效率的努力方向。

2.4 区域生态效率空间关联格局动态分析

区域生态效率的全局自相关结果显示,除个别年份外,均在 5% 的显著性水平下通过检验,其中 2005 年、2008 年、2012 年、2016 年的 Moran'*I* 指数分别为 0.256 7,0.146,0.193,0.205,表明区域生态效率在空间上分布具有较强的空间正相关性,为明晰具体的区域生态效率空间关联格局,通过 ArcGIS 绘制出显著性 $p < 0.05$ 水平下的空间自相关 LISA 集聚图(图 1)。

2005 年,HH 类型区有北京和天津,HL 类型区仅有山西,LH 类型区有江苏和江西,LL 类型区有新疆、甘肃、内蒙、四川、宁夏和陕西;2008 年,HH 类型区有上海,相比 2005 年,HL 型区增加了黑龙江,LH 类型区增加了广西,LL 类型区减少了四川;2012 年,HH 类型区有北京和上海,HL 类型区只有黑龙江,相比 2008 年,LH 类型区减少了广西,LL 类型区减少了宁夏和陕西;2016 年,HH 类型区有上海和福建,相比 2012 年,LH 和 HH 类型区无变化,未出 HL 类型区。可见,区域生态效率的空间关联格局与空间分布格局结果总体一致,即 HH 类型区分布于区域生态效率高的东南沿海省份,LL 类型区主要分布于区域生态效率低的“胡焕庸线”以左的西北部省份。这是因为东部沿海省市经济发展水平高、产业布局及结构合理、区位优势优越、环保理念先进,区域生态效率形成较强的辐射与扩散效应。西北部省份经济发展水平低,传统的经济发展模式造成了区域生态环境严重污染与破坏,使得区域生态效率一直处于 LL 状态。个别中部、东部及东北部省份由于自身及相邻省域区域生态环境原因表现为 LL 或 HL 集聚。整体而言,随时间推移,全国省域的区域生态效率空间关联格局整体较为稳定,各类型区局部有所变化。变化的主要原因与各省市实施的环境政策、产业结构改变及技术创新等息息相关。

表 4 各省市年均投入产出松弛率

地区	冗余率					不足率					
	资本	劳动力	能源	土地	水资源	期望产出	工业废水产出	工业废气产出	工业固体产出	SO ₂ 产出	烟尘产出
北京	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.749	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
天津	0.144	0.175	0.290	0.087	0.129	0.078	-0.386	-0.387	-0.362	-0.398	-0.336
河北省	0.052	0.531	0.583	0.007	0.404	0.000	-0.377	-0.768	-0.912	-0.721	-0.845
山西省	0.010	0.238	0.323	0.068	0.240	0.038	-0.271	-0.380	-0.407	-0.390	-0.399
内蒙古	0.440	0.548	0.728	0.280	0.803	0.000	-0.592	-0.843	-0.942	-0.910	-0.942
辽宁省	0.019	0.314	0.537	0.294	0.439	0.000	-0.410	-0.708	-0.871	-0.725	-0.844
吉林省	0.207	0.541	0.530	0.284	0.759	0.000	-0.727	-0.640	-0.833	-0.744	-0.905
黑龙江省	0.000	0.149	0.202	0.212	0.327	0.043	-0.043	-0.147	-0.328	-0.275	-0.363
上海	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.347	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
江苏省	0.161	0.471	0.203	0.000	0.660	0.000	-0.741	-0.425	-0.565	-0.467	-0.553
浙江省	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.169	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
安徽省	0.000	0.461	0.190	0.441	0.253	0.000	-0.207	-0.504	-0.734	-0.537	-0.664
福建省	0.000	0.060	0.045	0.038	0.108	0.091	-0.074	-0.078	-0.153	-0.021	-0.118
江西省	0.230	0.749	0.331	0.145	0.841	0.000	-0.800	-0.597	-0.921	-0.796	-0.842
山东省	0.012	0.305	0.302	0.016	0.251	0.041	-0.378	-0.413	-0.489	-0.457	-0.428
河南省	0.125	0.682	0.469	0.029	0.548	0.000	-0.538	-0.604	-0.794	-0.764	-0.841
湖北省	0.048	0.614	0.515	0.118	0.750	0.000	-0.554	-0.606	-0.791	-0.689	-0.761
湖南省	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
广东省	0.002	0.146	0.114	0.064	0.259	0.076	-0.334	-0.218	-0.183	-0.280	-0.211
广西	0.068	0.671	0.404	0.404	0.816	0.000	-0.738	-0.723	-0.741	-0.821	-0.859
海南省	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.318	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
重庆市	0.000	0.245	0.242	0.335	0.064	0.014	-0.097	-0.188	-0.206	-0.425	-0.370
四川省	0.000	0.391	0.324	0.240	0.144	0.002	-0.001	-0.223	-0.561	-0.498	-0.466
贵州省	0.015	0.504	0.503	0.146	0.389	0.016	-0.160	-0.527	-0.692	-0.702	-0.676
云南省	0.088	0.649	0.500	0.054	0.617	0.003	-0.382	-0.593	-0.833	-0.709	-0.742
陕西省	0.087	0.652	0.493	0.092	0.678	0.000	-0.642	-0.616	-0.866	-0.863	-0.868
甘肃省	0.252	0.785	0.678	0.402	0.899	0.000	-0.737	-0.794	-0.909	-0.915	-0.897
青海省	0.233	0.671	0.686	0.154	0.687	0.025	-0.602	-0.710	-0.856	-0.753	-0.852
宁夏	0.232	0.634	0.798	0.626	0.937	0.000	-0.873	-0.882	-0.894	-0.939	-0.938
新疆	0.041	0.368	0.613	0.148	0.847	0.006	-0.294	-0.609	-0.751	-0.775	-0.836
全国平均	0.082	0.385	0.353	0.156	0.428	0.074	-0.365	-0.439	-0.553	-0.519	-0.552
东部平均	0.036	0.182	0.189	0.046	0.204	0.170	-0.245	-0.272	-0.321	-0.279	-0.303
中部平均	0.078	0.429	0.320	0.162	0.465	0.034	-0.392	-0.435	-0.601	-0.524	-0.597
西部平均	0.132	0.556	0.543	0.262	0.626	0.006	-0.465	-0.610	-0.750	-0.755	-0.768

注:以上生态效率测算数据不包含未分析的西藏、港、澳、台等地区。

3 结论与政策建议

3.1 结论

(1) 我国区域生态效率水平呈现出明显的空间异质性,整体呈现“东部>中部>西部”的梯度分布格局,“俱乐部收敛”现象明显。全国层面区域生态效率呈“先增后减”态势;中部和东部地区整体呈直线下降态势,西部地区则呈现“先增—后减—再增—再减”的“M”型波动态势。从各省份的历年生态效率均值看,随时间推移,除北京、上海、湖南和重庆外,绝大多数省市生态效率整体呈下降趋势。处于绝对高效水平的有北京、上海等 5 个地区;处于高效水平的只有福建省;处于中高效水平的有广东、黑龙江等 7 个地区;处于中低效水平的有贵州、安徽等 8 个地区;其余地区处于低效水平。

(2) 从 Malmquist 指数及其分解结果可得,研究

期内技术效率变化与技术进步变化对区域生态效率推动作用不明显。从区域层面看,仅西部地区的技术效率变化(EC)指数大于 1,说明西部地区通过加强地区管理水平以及完善地区管理制度等措施对区域生态效率具有正向效应;其他地区生态效率受到效率改进和效率进步的双重抑制作用。从各省市的具体情况看,仅北京、贵州和青海 3 个地区的 MI 指数大于 1;仅贵州、青海、四川、新疆、云南和北京的技术效率变化(EC)指数大于 1 和北京、贵州的技术进步变化(TC)指数大于 1;整体表明各地区效率改进与技术进步对区域生态效率的提升作用不明显。从历年 MI,EC 和 TC 的动态变化可知,研究期内,区域生态效率的波动幅度较小但一直处于下降态势;2006—2008 年期间,技术效率变化对区域生态效率具有明显的正向效应,尤其是在 2006 年;2009—2010 年期间,技术进步变化虽促进了区域生态效率的提高,但效应不明显。

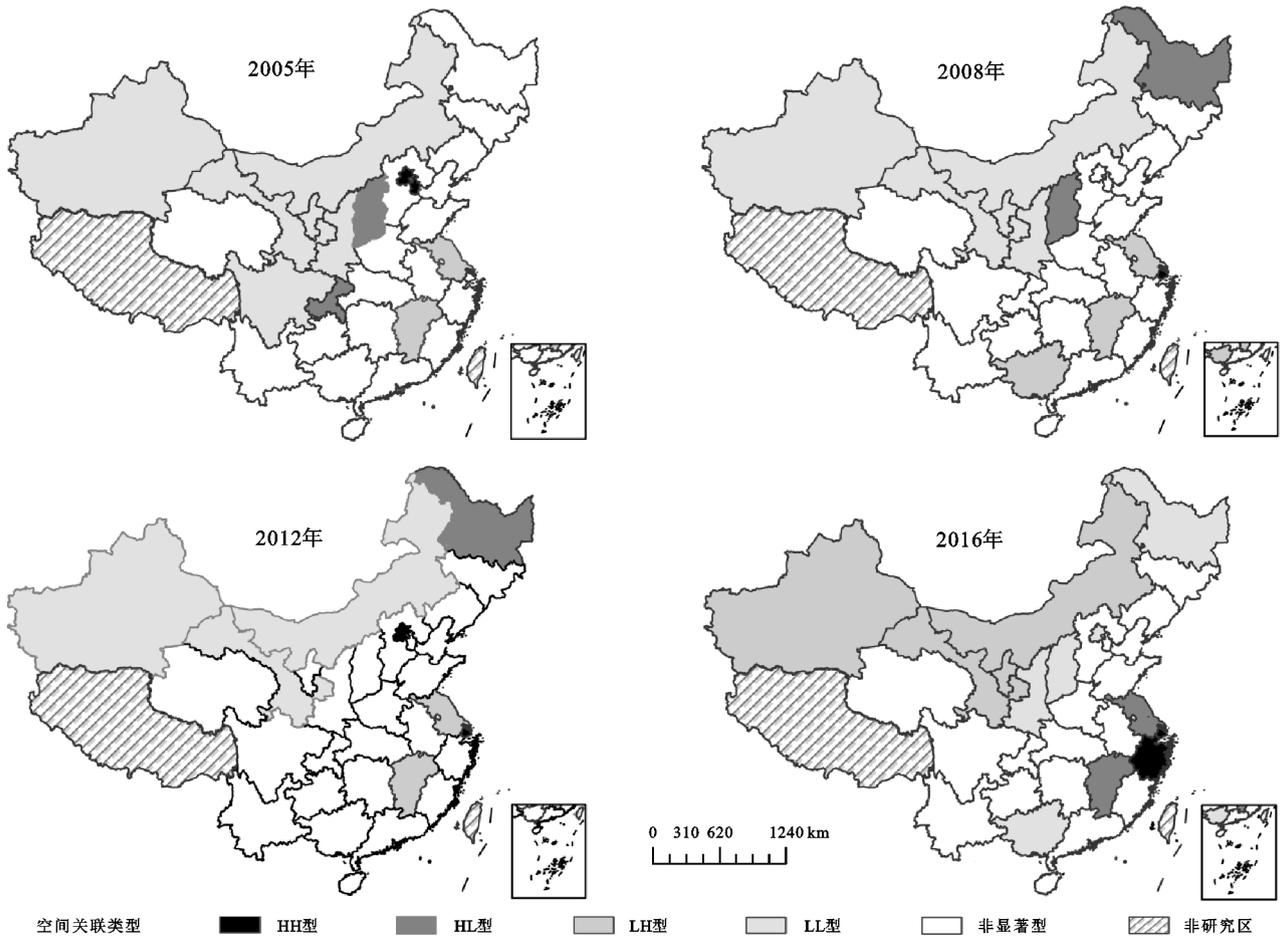


图 1 2005—2016 年区域生态效率 LISA 集聚图

(3) 从投入产出要素冗余度的视角看,要素投入冗余、非期望产出过量 and 期望产出不足是造成区域生态效率低下的主要原因。区域层面上,从全国看,劳动力、能源、水资源冗余度情况严重,非期望产出过量;东部地区水资源冗余和非期望产出过量,但情况相比中部和西部地区较轻,且相比中西部而言,东部地区期望产出相对不足;中部地区劳动力、能源和水资源投入冗余度较严重,非期望产出过量情况也较为严峻;相比东中部地区,西部地区的劳动力、能源、土地和水资源投入冗余以及非期望产出过量情况都是最严重的。而各省市在要素投入冗余、非期望产出过量 and 期望产出不足方面各有侧重,具体表现为:资本投入冗余度较高的有内蒙、甘肃等地;劳动力投入冗余度较高的有甘肃、江西、河南等地;能源投入冗余度较高的有宁夏、内蒙古、青海等地;土地投入冗余度较高的有宁夏、安徽、广西等地;水资源投入冗余度较高的有宁夏、甘肃、新疆等地;北京、上海等地期望产出(GDP)相对不足;对非期望产出而言,宁夏、江西、江苏等地工业废水排放量过高,宁夏、内蒙古、甘肃等地工业废气排放量较高,内蒙古、江西、河北等地工业固体废弃物排放量较高,宁夏、甘肃、内蒙古等地 SO_2 排

放量较高,内蒙古、宁夏、吉林等地烟尘排放量较高。

(4) 从空间视角看,全局自相关结果表明,区域生态效率呈现明显的空间正相关性;局部空间自相关结果表明,区域生态效率呈现明显的空间集聚特征,其中 HH, LH 和 HL 散乱分布于各地区,而 HH 型聚集性最强,以“组团”形式出现,HH 型主要分布于北京、上海、浙江等几个东部省份,HL 型主要分布于黑龙江与山西, LH 主要分布于江苏、江西和广西, LL 型则主要分布于“胡焕庸线”以西的西北部地区;区域生态效率的空间关联格局随时间推移整体较为稳定,但存在局部变化。

3.2 政策建议

(1) 加强环境管理、推动科技创新。通过 Malmquist 指数及其分解结果发现,整体上,区域生态效率下降受技术效率与技术进步的双重影响。首先,各地区环保部门人员应积极参加各种环保技能培训,提升区域生态环境管理能力;及时评估相关环境政策绩效,完善生态环境内部管理制度,提升管理效率,尤其对中部地区及山东、黑龙江和广东等省市而言。其次,应进一步加大各地区的环境科技投入力度,拓展环境科技投入经费来源,提高各地区企业和事业单位等研发投入积

极性,推动技术创新,优化和升级产业结构,尤其对中部和西部地区及重庆和四川等省市而言。

(2) 优化投入产出结构。合理配置投入要素并提升利用效率,提高期望产出水平,减少非期望产出是优化区域生态效率的有效途径。具体措施如下:投入方面,针对中部和西部地区的劳动力、能源、土地和水资源投入过度的情况,要进一步加强土地集约利用、提高劳动生产率、水资源利用效率和能源使用效率,合理减少各种冗余要素的投入。期望产出方面,东部地区期望产出还有改进的空间,应进一步通过科技创新、优化经济结构等措施来提升地区经济发展水平。非期望产出方面,全国层面整体存在着较为严重的非期望产出过量现象,要进一步优化产业结构、合理布局,发展循环经济;在环境方面设置环境准入门槛,淘汰“高投入、低产出、高污染”的企业;大力提升污染物处理技术水平和加大污染物处理设施投入,减少污染物排放,改善区域生态环境。

(3) 进行分区协同治理。正相关(HH,LL)和负相关(HL,LH)分别是空间扩散与空间极化效应的一种体现。应在空间自相关结果的基础上,将 HH 类型区划分为区域生态效率“优势区”,LL 类型区应化为区域生态效率“全面改良区”,HL 和 LH 类型区易在空间极化效应的影响下分别转化为 LL 与 HH 类型区,应化为区域生态效率“适度保护区”与“重点改良区”。在分区的基础上,依赖空间扩散和空间极化效应,积极发挥区域生态环境的协同和联动治理机制,即东部沿海的高区域生态效率区通过环境管理、环境政策、环境技术与科技创新等的空间溢出和辐射效应带动西北部的低区域生态效率区;而低区域生态效率区应该发挥自身的主观能动性,借鉴区域生态效率高的省市经济发展和生态环境管理经验,并结合自身区域资源禀赋条件,寻找区域生态环境与经济成长的平衡点,从而优化生态效率。

参考文献:

[1] 付丽娜,陈晓红,冷智花.基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究:以长株潭“3+5”城市群为例[J].中国人口·资源与环境,2013,23(4):169-175.

[2] 潘兴侠,何宜庆,胡晓峰.区域生态效率评价及其空间计量分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(5):640-647.

[3] Ribarova I, Stanchev P, Dimova G, et al. A first iteration of an eco-efficiency assessment of Sofia's urban water system[J]. Procedia Engineering, 2014,70:1411-1420.

[4] Ning Y, Liu Z, Ning Z, et al. Measuring eco-efficiency of state-owned forestry enterprises in Northeast China [J]. Forests, 2018,9(8):455-468.

[5] Wang D, Wan K, Yang J. Measurement and evolution

of eco-efficiency of coal industry ecosystem in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,209:803-818.

[6] Jia W, Wu L, Xiao P. Research on regional differences and dynamic evolution of China's eco-efficiency [J]. International Journal of Business Continuity and Risk Management, 2019,9(1):54-69.

[7] 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.

[8] 蔡洁,夏显力,李世平.新型城镇化视角下的区域生态效率研究:以山东省 17 地市面板数据为例[J].资源科学,2015,37(11):2271-2278.

[9] 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):47-54.

[10] 屈小娥.中国生态效率的区域差异及影响因素:基于时空差异视角的实证分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2673-2683.

[11] Neto J Q F, Walther G, Bloemhof J, et al. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(3):670-682.

[12] Van Caneghem J, Block C, Cramm P, et al. Improving eco-efficiency in the steel industry: the Arcelor-Mittal Gent case[J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(8):807-814.

[13] 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.

[14] 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,2014,37(4):88-110.

[15] Färe R, Grosskopf S, Lindgren B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980—1989: A non-parametric Malmquist approach[J]. Journal of Productivity Analysis, 1992,3(1):85-101.

[16] 张燕,徐建华,曾刚,等.中国区域发展潜力与资源环境承载力的空间关系分析[J].资源科学,2009,31(8):1328-1334.

[17] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 2014,125:89-104.

[18] 朱庆莹,胡伟艳,赵志尚.耕地多功能权衡与协同时空格局的动态分析:以湖北省为例[J].经济地理,2018,38(7):143-153.

[19] 单豪杰.中国资本存量 K 的再估算:1952—2006 年[J].数量经济技术经济研究,2008,25(10):17-31.

[20] 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.

[21] 王春豪,袁菊.西部地区现代流通业效率测度及空间差异分析:基于非径向超效率三阶段 DEA 模型[J].工业技术经济,2019,38(12):102-110.