

中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价

任宇飞^{1,2}, 方创琳^{1,2}, 蔺雪芹³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100045;
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 东部沿海地区城市群是国家经济发展的战略核心区和国家新型城镇化的主体区之一, 其经济—生态可持续发展问题是近年来地理研究领域的前沿主题。首先对城市群生态效率进行定义并将其作为城市群可持续发展测度指标; 随后运用传统DEA模型及非期望产出SBM模型, 对东部沿海地区四大城市群在2005年、2011年、2014年三个时间截面中的经济效率、生态效率进行比较评价并分析了城市群生态效率时空演变特征; 最后通过松弛度分析, 为改善沿海地区四大城市群生态效率提供了对应建议。结果表明: ① 山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群经济综合效率呈先下降后上升的V字型演变格局, 而京津冀城市群经济综合效率始终呈下降趋势, 2011年前其受纯技术效率影响较大, 2011年后受规模效率影响较大; ② 京津冀城市群受污染影响带来的效率损失最大, 山东半岛城市群相对较小, 总体而言, 四大城市群生态效率在2005-2011年为下行期, 2011-2014为修复期; ③ 沿海四大城市群内城市生态效率时空格局具有不同的演化特征, 核心城市周边以及沿海沿江地区城市生态效率相对较优, 内陆城市则较低; ④ 京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群核心城市资源消耗强度高、经济效益产出高、生态效率高, 从整体来看, 城市群内多数城市呈污染物排放量下降趋势, 污染物治理效果较为明显, 环境影响问题有所改善; ⑤ 影响东部四大城市群经济生态效率的原因不同, 本文从城市群角度进行了差异性分析, 并提出了合理化建议。

关键词: 生态效率; DEA; SBM; 时空分异格局; 松弛度分析; 东部沿海地区四大城市群
DOI: 10.11821/dlxb201711010

1 引言

城市群作为国家新型工业化与新型城镇化发展到较高阶段的必然产物, 是国家参与全球竞争与国际分工的全新地域单元, 也是“一带一路”建设的主战场, 城市群的发展对于国家新型城镇化和经济社会发展中有着举足轻重的主宰与主导地位^[1]。1978年至今, 中国实行了“T”字型 and “π”字型发展战略, 在沿海沿江经济发展主轴上培育起了三大经济核心区, 其中沿海城市群继因其优越的区位优势继而发育成为中国对外开放程度和经济发展水平最高的典型城市群^[2-4]。尽管沿海城市群的社会经济发展取得了举世瞩目的成就, 但同时面临着日益加剧的生态环境威胁。例如, 在中国长期推进粗放型经济发展模式的背景和环境下, 沿海城市群地区目前仍然存在高耗能、高污染、高风险且产

收稿日期: 2016-08-06; 修订日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590840, 41590842); 国家自然科学基金项目(41371177) [Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No.41590840, No.41590842; National Natural Science Foundation of China, No.41371177]

作者简介: 任宇飞(1990-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 研究方向为城市群可持续发展。E-mail: renyuf@126.com

通讯作者: 方创琳(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 研究员, 中国地理学会会员(S110001715M), 主要研究方向为城市地理、城市群发展与城镇化的资源环境效应等。E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

2047-2063 页

出低、效益低的“三高两低”工业发展模式,导致经济发展对生态环境系统胁迫压力进一步加大,使其成为一系列生态环境问题的高度集中且激化的高度敏感地区和重灾区。因此,在党和国家多项重要文件连续提出将生态文明理念全面融入城市发展以及提高城市群高效、绿色发展能力的背景下,量化沿海城市群资源要素利用效率、协调其经济发展与生态环境间关系,既是服务于党和国家重大战略需求,对推动其他城市群地区经济社会与资源环境协调高效发展也具有重要的指导和借鉴作用。

生态效率“eco-efficiency”由英文单词ecology(生态学)、economy(经济学)和efficiency(效率、效能)合成而来,集中体现了经济发展与资源环境利用关系,经过20多年的发展生态效率评价已经成为综合分析城市可持续发展的重要工具^[5-7]。生态效率一词最早由Schaltegger和Burritt提出,此后国际相关机构从不同角度定义了生态效率:从满足人类发展需求为基本点,世界可持续发展工商理事会(WBCSD)定义生态效率指在满足人类需求和生活质量的基础上,通过将生命周期中对环境的影响降低到地球可承载的范围内,从而提供具有价格竞争力的商品与服务^[8];从降低自然资源投入为基本点,如欧洲环境署(EEA)定义生态效率指以最少的自然界投入创造更多福利^[9],联合国亚洲及太平洋经济社会委员会(ESCAP)定义生态效率为提升基础的社会生产力和降低资源消耗变化的重要基本元素,生态效率的测度将会更好的提升绿色发展^[10];从减少环境破坏为基本点,如联合国贸易和发展会议(UNCTAD)定义生态效率指增加(至少不降低)股东价值的同时,减少对环境的破坏^[11]。尽管生态效率缺乏统一的学术界定,但其内涵都具有共同性,均指通过高效率配置资本及自然资源投入,使经济发展对环境影响最小化,经济效益最大化,从而提高人类生活品质,最终实现经济可持续发展。

针对生态效率评价问题,学术界做了大量富有成效的研究工作。国内外相关文章主要围绕生态效率评价指标选择、核算方法与评价模型、生态效率的时序变化规律与空间分异、分行业生态效率评价等,以区域中观尺度层面和微观企业(行业)层面研究为主^[12-14]。其中,研究领域与空间尺度的不同,生态效率对应的具有多样的核算指标。其核算主要从经济价值与环境影响三个层面出发,在国外,WBCSD提出了微观的企业(行业)层面的经济效益核算方法,即把产品或服务的生产总量、销售总量或净销售额视为经济价值^[8]。Kuosmanen等则从区域尺度出发,认为国民生产总值(GNP)可以反映区域的富有程度以及社会创造的价值^[12]。Seppälä建议了三种经济指标以反映区域商品和服务的价值,即国内生产总值、工业增加值和基本商品输出价格^[13]。对于环境核算层面,UNCTAD报告列出了以排放量为基础的5个环境指标,即不可再生能源消耗、水资源消耗、温室气体排放、危害臭氧层气体的排放、固体和液体废弃物。在国内,学者多从省际(区域)尺度建立评价指标体系:经济价值核算主要以地区GDP、人均GDP、研究目标行业产值为主。环境核算层面,主要由资本存量、土地、水、能源消耗量、劳动力、废水、废固、废气等指标构成(表1)。对于研究复杂的城市经济生态耦合系统,生态效率评价结果应客观反映经济、资源、环境等城市子系统的协调发展程度,通常采用对数据进行加权处理的方式将多维度的复杂性指标集成为单一数值,因模型法可以有效避免权重赋值的主观性,成为了生态效率研究的主要手段^[20]。目前得到广泛应用的模型主要有DEA模型^[16]、UMM模型^[21]、LCI模型^[22]、VSM^[23]模型等。其中,对于不同类型决策单元的多指标投入和多指标产出效率计算,DEA模型因具有所需指标少、最大程度保证了原始信息完整性以及对于具有共同特性的决策单元进行综合评价时不需要对变量做函数假设等优点^[25],成为了目前学术界使用较多的相对效率计算模型。

目前国内外运用DEA模型进行生态效率的评价研究集中在:①国家层面^[26-28]。如

表1 中国生态效率研究对象、方法及指标总结

Tab. 1 Summary of eco-efficiency research object, methods and indicators

研究对象	模型方法	经济价值核算	资源投入核算	环境影响核算	参考文献
长株潭“5+3”城市群	DEA模型	地区GDP	能源消耗总量、电力消耗总量、用水总量、建设用地面积、就业人数	废水排放量、化学需氧量、二氧化硫排放量、烟尘排放量、工业粉尘排放量、工业固体废弃物排放量	[14]
中国省际生态效率	超效率DEA模型	地区GDP	万元GDP能耗、建设用地面积、用水总量、就业人数	废水排放量、化学需氧量、二氧化硫排放量、烟尘排放量、工业粉尘排放量	[15]
中国省际能源生态效率	DEA模型	人均GDP	能源消费总量、劳动力投入、固定资产投资额、技术市场成交额	二氧化碳排放量、工业二氧化硫排放量、工业烟尘排放量、工业废水排放量、工业废气排放量、工业固体废弃物排放量	[16]
苏州高新区、苏州工业园区、无锡新区工业园区生态效率	指标体系结合TOPSIS法	人均GDP、GDP总量、固定资产投资额、单位面积产值	单位产值能耗、单位产值水耗	单位产值废水排放、单位产值废气排放、单位产值固废排放、单位产值COD排放、单位产值二氧化硫排放	[17]
松花江流域(吉林省段)产业生态系统生态效率	指标体系法	工业生产总值	能源消费量	工业二氧化硫、工业烟尘、工业粉尘、工业废水中化学需氧量	[18]
中国省际生态效率	指标体系法	地区GDP		废水排放总量、废气排放总量、固体废气物排放总量、地区总能耗、地区生产总耗电	[19]

Rashidi等^[26]利用能源消费等指标，采用DEA模型测度了经济合作与发展组织（OECD）国家的生态效率，跟踪各国能源消费量，得出产生高额非期望产出的国家难以控制生态效率，且节约最优数量能源的潜力很小。

② 区域层面^[29-30]。如Goto等^[29]利用能源消费量等作为指标，运用DEA方法评价了日本工业区运行与生态效率，证实了日本制造业中存在的波特假说，此外还得出温室气体的排放量是DEA无效率的主要因素，可通过提高技术创新资金投入的方法减少温室气体和二氧化碳的排放。

③ 城市层面^[31]。如Lee等利用SBM-DEA模型，将废气作为非期望产出的方法对世界大型港口城市的生态效率进行了测度，并且引入社会和机会成本，分析了远洋船舶产生的废气对生态效率的影响。国内学者对生态效率的研究主要集中在全国^[32-35]、省级^[36-38]层面。其中周五七等^[35]利用SBM模型测算了中国1998-2010年各省工业技术效率，并分析了工业技术效率的地区差异及影响因素；杨宇等^[38]通过DEA-ESDA模型对1990年、2000年、2010年中国各省能源生态效率进行分析，得出了提高能源利用效率的空间配置应注意纯技术效率在空间上的协调。

综上所述可以发现，以往学者研究多以省际（区域）尺度为研究对象，但以该尺度数据作为指标无法清晰的体现出地区发展内质的不均匀性；生态效率与经济效率对比差异性研究较少，未能清晰揭示污染物排放对效率带来的损失；对由不同规模、不同职能的城市所组成的城市群生态效率研究较少，并且以城市群为研究对象，研究区域内城市数据为基本单元的生态效率研究以及城市群间差异性研究略显不足；注重结果数值分析，忽略从资源投入、经济效益、环境影响角度出发研究生态效率格局变化的机理原因。因此，本文首先对城市群生态效率进行定义，接着采取传统DEA模型和考虑非期望产出的SBM模型以及熵技术支持下的TOPSIS模型对2005年、2011年、2014年中国东部沿海地区四大城市群经济效率、生态效率进行差异性测度，还分析了其时空格局变化以及资源投入、经济效益、环境影响与生态效率的叠加影响机理，最后提出东部沿海地区四大城市群生态效率改善对策。

2 研究方法数据来源

2.1 城市群生态效率概念

效率在《辞海》中是指“机械、电器等工作时，有用功在总功中所占的百分比”，目前广泛引申为工作的成果与所消耗能量之比，即投入与产出之比率。生态效率则可以理解为一个经济—生态系统以一定的资源要素投入为前提，通过生产等经济活动环节，将投入要素一方面转化为经济效益，另一方面转化为对环境的负向影响的综合能力。根据以上，可进一步将生态效率定义为经济—生态系统经济生产活动所获取的价值量与该过程中对环境造成的负面影响的和与该系统实际利用资源要素投入的比率，反映了在一定资源和科学技术等条件限制下，经济—生态系统的资源配置效率。根据不同的空间尺度可进一步将生态效率划分为企业生态效率、行业生态效率、区域生态效率、城市生态效率等。从生态效率的本质来看，其包含三个部分，即资源投入、经济效益以及环境影响。其中，资源要素投入为必备的基础条件，具体可以包括用于满足生产消费型产品和服务的自然投入、人力投入、资本投入、能源投入、科技投入等。经济效益则包括产品和服务所转化出的经济价值，包括GDP、工业生产总值等。环境影响通常定义为经济发展过程中产生的废弃物，废弃物实质在于资源投入与产品产出的物质能量差额，通常以废水、废气、固体废弃物排放量进行表征。因此，城市群生态效率指城市群地域范围内不同职能、不同规模的城市构成的生态经济综合系统在经济生产活动所获取的价值量与该过程中对环境造成的负面影响的和与该系统实际利用资源要素投入的比率，该过程可描述为城市群以一定的资源（劳动、资本、能源等）投入和生态环境为代价（环境污染、生态破坏等），实现资源消耗、环境污染最小化和经济产出最优化的综合能力。提升城市群生态效率，就要求城市群社会经济子系统和生态环境子系统优化协调发展，在降低资源消耗、环境污染和生态压力的同时提升经济社会效益。

影响城市群生态效率的因素根植于构成系统的各个因素的相互关联与相互反馈过程之中，各个因素在不同层次上和层次间的相互作用形成了生态效率关键因素的层次结构（图1）。先从城市群内城市因素看，共存在6个相互作用关系，即 $EE-D_0$ 、 $EE-E_0$ 、 $EE-R_0$ 、 D_0-E_0 、 E_0-R_0 、 R_0-D_0 ，每一种层面又有两种联系，例如 D_0 与 E_0 之间既存在 D_0 对 E_0 的胁迫效应，还存在着 E_0 对 D_0 的约束限制， EE 与 D_0 之间存在着 D_0 对 EE 的改善和 EE 对 D_0 的优化，总共有12种联系。在所有联系中，生态效率处于中心位置，对于资源、经济、环境因素可直接产生作用。资源—经济—环境发展的正向相互作用呈现出“胁迫—提取—支撑”，其反向相互作用表现为“约束—消耗—还原”过程。从城市群层面的 D_1 、 E_1 、 R_1 因素来看，它们之间不仅存在着6种相互作用模式，而且每一个因素与其内部城市的每一个因素也存在着相互作用层面及其对偶联系。例如，城市群内城市经济要素 D_0 要消耗城市群层面资源 R_1 ，并受城市群环境 E_1 的影响，同样城市群层面的经济 D_1 也要对内部城市的资源 R_0 和环境 E_0 因素产生重大影响。可见，两个层面不同因素的相互作用及其之间的对偶联系是影响城市群生态效率的主要因素。

2.2 城市群经济效率测度的规模报酬不变(CRS)、规模报酬可变(VRS)模型

数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)是利用包络线代替微观经济学中的生产函数，通过数学规划来判断评价单元(DMU)是否位于生产可能集的“前沿面”上^[39]。假设要评价 N 个城市群的经济效率问题，并提出评价指标体系为 L 种投入指标， M 种产出指标。设 x_{nl} ($x_{nl} > 0$) 代表第 n 个城市群的第 l 种资源的投入量， y_{nm} ($y_{nm} > 0$) 代表第 n 个城市群的第 m 种产出量。对于第 $(n=1, 2, \dots, N)$ 个城市群， θ ($0 < \theta \leq 1$) 代表投

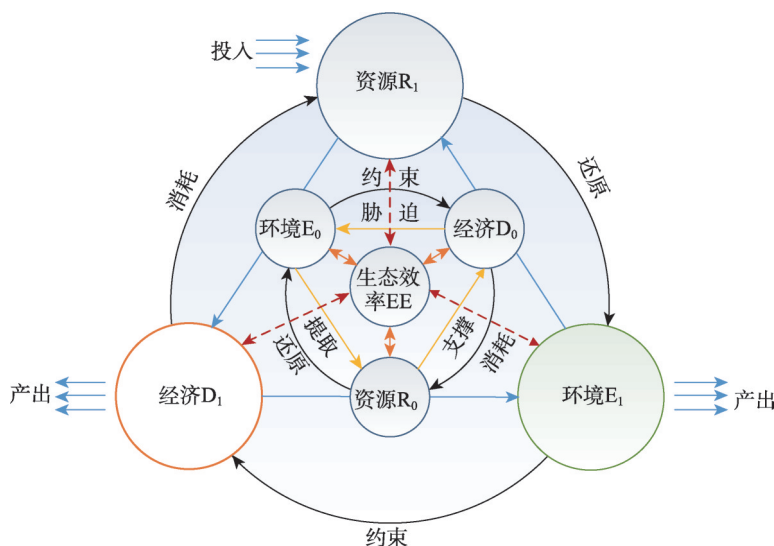


图1 城市群生态效率概念框架图

Fig. 1 Conceptual framework of the eco-efficiency in urban agglomeration

入资源要素产出综合技术效率指数； λ_n ($\lambda_n \geq 0$) 为权重变量，用来测定城市群规模收益； ε 为非阿基米德无穷小量； s^- ($s^- \geq 0$) 为松弛度，反映城市群为到达 DEA 有效值需减少的投入量； s^+ ($s^+ \geq 0$) 为剩余变量，表示城市群达到 DEA 有效值需增加的产出量。则城市群经济效率测度的 DEA 模型为：

$$\begin{cases} \min(\theta - \varepsilon(\sum_{l=1}^L s^- + \sum_{m=1}^M s^+)) \\ s.t. \sum_{n=1}^N x_{nl} \lambda_n + s^- = \theta x_l^n \quad l=1, 2, \dots, L \\ \sum_{n=1}^N y_{nm} \lambda_n - s^+ = y_m^n \quad m=1, 2, \dots, M \\ \lambda_n \geq 0 \quad n=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

上述 (1) 式即基于规模报酬不变 (Constant Returns to Scale) 的 DEA 模型，简称 CRS 模型。当 θ_n 趋向 1 时，表明第 n 个城市群经济综合效率接近有效，反之越低。

将 $\sum_{n=1}^N \lambda_n = 1$ 作为约束条件引入 (1) 式，可将上式转变为规模报酬可变 (Variable Returns to Scale) 的 DEA 模型，简称 VRS 模型。用 VRS 模型可得到第 n 个城市群的经济综合效率，即 θ_n ；城市群的纯技术效率 (Technical Efficiency)，即 θ_{TE} ；规模效率效率 (Scale Efficiency)，即 θ_{SE} ；通过此模型可将综合效率定为纯技术效率与规模效率的乘积，即 $\theta_n = \theta_{TE} \times \theta_{SE}$ 。同样，对于 θ_{TE} 或 θ_{SE} 的值越接近 1，说明城市群的纯技术效率、规模效率越接近有效，反之越低。当 θ_{TE} 或 θ_{SE} 的值等于 1 时，则该城市群的纯技术效率或规模效率达到 DEA 最优前沿面。

2.3 城市群生态效率测度的含有非期望产出 SBM 模型

SBM 模型由 Tone 2001 年提出和发展，属于非径向和非角度的 DEA 模型。SBM 模型通过将松弛变量放入目标函数中，弥补了传统 DEA 模型大多属于径向和角度度量、缺乏对投入产出松弛问题的考虑的欠缺，能更有效评价非期望产出下的效率问题。模型表

达为:

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{S_n^x}{x_{kn}^x}}{1 + \frac{1}{M+I} \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{S_m^y}{y_{km}^y} + \sum_{i=1}^I \frac{S_i^b}{b_{ki}^b} \right\}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t + S_n^y = x_{kn}^t, n=1, \dots, N \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t - S_m^y = y_{km}^t, m=1, \dots, M \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t + S_i^b = b_{ki}^t, i=1, \dots, N \\ & z_k^t \geq 0, S_n^x \geq 0, S_m^y \geq 0, S_i^b \geq 0, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ 代表效率值; N 、 M 、 I 分别代表投入、期望产出与非期望产出的个数; n 、 m 、 i 分别代表投入、期望产出与非期望产出的指标类型; x 、 y 、 b 表示松弛变量类型; S_n^x 、 S_m^y 、 S_i^b 代表投入、期望产出与非期望产出的松弛向量; x_{kn}^t 、 y_{km}^t 、 b_{ki}^t 代表第 k 个决策单元在 t 时期的投入产出值; z_k^t 代表决策单元的权重。目标函数 ρ 关于 S_n^x 、 S_m^y 、 S_i^b 严格单调递减, $0 < \rho \leq 1$; 当 $\rho = 1$ 时, 决策单元效率值位于DEA最优前沿面; 当 $\rho < 1$ 时, 决策单元存在效率损失。

SBM模型在运算过程中将松弛变量直接放入目标函数中, 不仅有效解决了投入产出松弛型问题, 而且还解决了非期望产出效率评价问题^[40]。

2.4 熵技术支持下的TOPSIS模型

TOPSIS模型又称“逼近理想排序法”, 是距离综合评价法之一。模型优点在于可操作性和客观性, 对样本需求不大且结果合理。本文依据生态环境定义将指标分为三类, 即资源投入、经济效益、环境影响。采用熵技术支持下的TOPSIS模型进行综合集成。熵技术支持下的TOPSIS模型是利用熵权法对传统TOPSIS评价法中权重确定方法进行了改善, 其主要计算步骤如下:

① 构建评价指标体系矩阵(X)。假设被评价对象有 m 个, 每个评价对象的评价指标有 n 个, 构建判断矩阵:

$$X = (x_{ij})_{m \times n}, \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: i 为被评价对象; j 为评价指标。

② 采用极值法对指标矩阵标准化:

$$R = (r_{ij})_{m \times n}, \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: R 为标准化后的评价指标体系矩阵; r_{ij} 为第 i 个被评价对象在第 j 个评价指标上的标准值; m 为评价对象总数; n 为评价指标总数。

③ 计算信息熵:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

式中: e_j 为熵值; $p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$; $k = \frac{1}{\ln m}$; P_{ij} 为矩阵 R 的第 i 个被评价对象的第 j 项评价指标下的指标值比重。

④ 定义指标 j 的权重：

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

式中： w_j 为指标 j 的权重； e_j 为指标 j 的熵值。

⑤ 计算规范化后的加权矩阵（ Z ）：

$$Z = (z_{ij})_{m \times n}, z_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中： z_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个被评价指标规范化后的值。

⑥ 确定最优解 z_j^+ 和最劣解 z_j^- ：

$$\begin{cases} z_i^+ = \max_j (z_{ij}) & (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ z_i^- = \min_j (z_{ij}) & (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

⑦ 计算各方案与最优解（ o_j^+ ）和最劣解（ o_j^- ）的欧式距离：

$$\begin{aligned} sep_i^+ &= \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (z_{ij} - z_i^+)^2} \\ sep_i^- &= \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (z_{ij} - z_i^-)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

⑧ 计算综合评价指数（ C_i ）：

$$C_i = \frac{sep_i^-}{sep_i^+ + sep_i^-} \quad (11)$$

式中： C_i 值越大表征评价对象越优。

2.5 指标选取及数据来源

2.5.1 指标选取 根据DEA方法指标选取的一般性规则，即（投入指标数+产出指标数） $\leq 1/3$ 决策单元个数^[4]。结合城市群生态效率以及城市社会经济活动特征，城市群生态效率评价指标主要由资本要素、自然要素，人力要素构成。此外，通过对以往相关文献指标选取的梳理，发现作为城市发展必备条件的能源消耗，以及反映东部城市产业发展特点的第三产业增加值常被忽略。为此，本文构建城市生态指标体系。其中，投入指标分为资本投入要素、人力投入要素、自然投入要素、能源投入要素共4个一级指标，城市群内城市全社会固定资产投资总值、实际利用外资值、建成区面积、用水总量、从业人员总数、消耗标准煤数量共6个二级指标。产出指标分为效益产出、污染产出共2个一级指标，城市群内城市国民生产总值（GDP）、工业总产值、政府财政收入、第三产业增加值、废水排放量、废气排放量、烟尘排放量共7个二级指标（表2）。

2.5.2 研究对象与数据来源 本文根据方创琳对中国城市群已有的研究成果^[2]，选取中国东部地区京津冀城市群、山东半岛城市群、长江三角洲城市群、珠江三角洲城市群为研究对象，共选取42个城市（不包括澳门、香港、台湾地区）作为各城市群的代表性城市。因受到数据可得性限制，本文的时间序列为2005年、2011年、2014年三个时间截面。研究数据来源于《中国城市统计年鉴（2006）》、《中国城市统计年鉴（2012）》、《中国城市统计年鉴（2015）》和相关年份北京市、天津市、上海市、河北省、山东省、江苏省、浙江省、广东省统计年鉴以及各城市国民经济和社会发展统计公报。本文用到的软件为MaxDea 6.7、Deap 2.1、ArcGIS 10.2。

表2 城市群生态效率测度指标体系
Tab. 2 The evaluation indicators of eco-efficiency of urban agglomeration

指标类型	一级指标	二级指标
投入指标	资本要素投入	全社会固定资产投资总值、实际利用外资值
	自然要素投入	城市建成区面积、用水总量
	人力投入	从业人员总数
	能源投入	能源消耗量
产出指标	效益产出(期望产出)	GDP、工业总产值、地方财政收入、第三产业增加值
	污染产出(非期望产出)	废水排放、废气排放、烟尘排放总量

3 结果分析与讨论

3.1 东部沿海地区四大城市群经济效率分析

3.1.1 经济综合效率分析 经济综合效率体现了将资源投入转化为经济效益的能力，通过计算发现：2005年、2011年、2014年经济综合效率平均值分别为0.940、0.905、0.938，即达到DEA最优前沿面的94%、90.5%和93.8%，总体呈现出先下降后提升的V型演变格局，并且四大城市群经济综合效率在研究时间截面中具有显著的变化差异。其中，京津冀城市群总体呈下降趋势，其经济综合效率由2005年的0.934下降到2014年的0.887，下降幅度为4.96%，城市群资源配置合理性与经济效益转化能力相对较低。山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群经济综合效率虽然在2011年出现下降，但在2014年经济综合效率得到提升，特别是长三角城市群提升幅度较大，由2011年的0.898提升到2014年的0.970，提升幅度为8%（图2a）。从城市群内城市经济综合效率来看，京津冀城市群“双核”带动发展态势明显，北京市、天津市经济综合效率相对突出，河北省内多数城市在2011、2014年呈DEA较低水平，凸显出城市群内城市间经济综合效率差异较大的特征；山东半岛城市群内城市经济综合效率总体处于较优水平，但低位城市经济综合效率远低于其他城市，木桶效应明显；长三角城市群内城市经济综合效率在2011年后得到快速提升，普遍达到DEA最优前沿面的90%以上，整体呈高位运行趋势；虽然珠三角城市群内超过50%的城市在三个时间截面中都处于DEA最优前沿面，但是由于部分城市经济综合效率较低，也表现出明显的木桶效应（图3a）。

3.1.2 经济纯技术效率分析 经济纯技术效率体现了投入资源要素的合理化配置、利用水平。尽管四大城市群在2005-2011年间经济纯技术效率有一定下降，但在2011-2014年期间经济纯技术效率得到明显提升，总体呈V型演变格局（图2b）。其中，2005-2011年下降幅度较大的城市群为京津冀城市群与珠三角城市群，幅度分别为4.6%与4.9%，2011-2014年上升幅度最大的城市群为长三角城市群，幅度为6.4%。表明长三角城市群具有较高的经济纯技术效率改善能力，在城市群中处于相对领先地位。从城市群城市来看，四大城市群中核心城市与区域核心城市多数始终达到最优前沿面的90%以上，且在三个时间截面中变化幅度相对较小，具有较强的稳定性。在三个时间截面中经济纯技术效率始终未达到DEA最优前沿面的城市主要是以第二产业为主的中小型企业，如秦皇岛市、湖州市、日照市等（图3b）。

3.1.3 经济规模效率分析 经济规模效率体现了城市群经济的规模集聚水平。中国四大城市群经济规模效率演变模式存在较大差异（图2c），仅有珠江三角洲城市群在研究时段中始终呈上升趋势，其经济规模效率由2005年的0.963上升为2014年的0.970。山东半岛城市群与长三角城市群在2005-2011年间呈小幅度下降趋势，2011年后均表现出上升趋势。

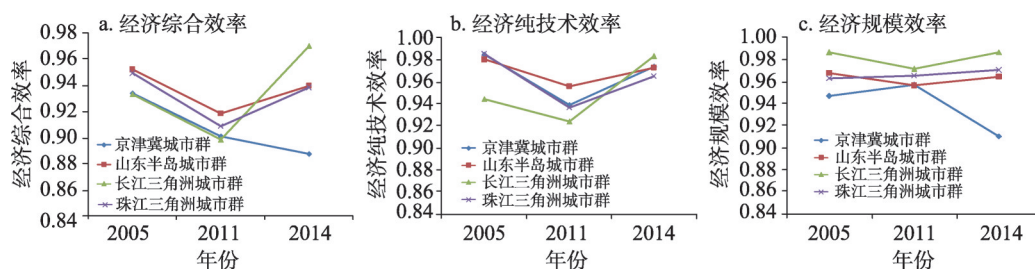


图2 中国东部沿海地区四大城市群经济效率评价结果

Fig. 2 Economic efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

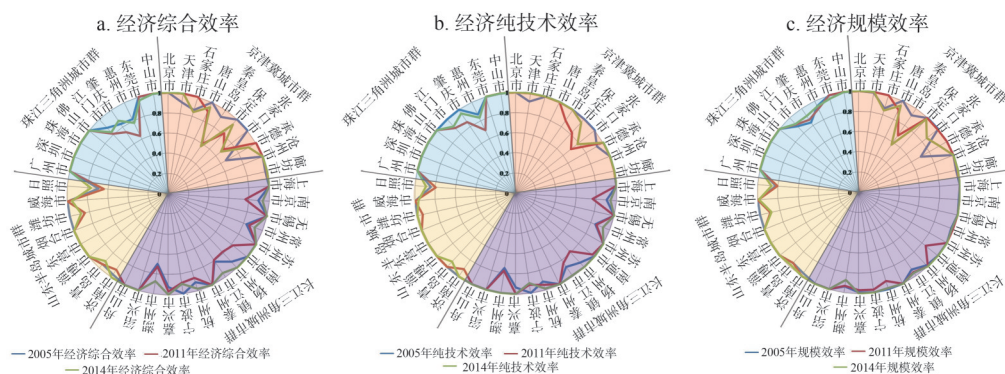


图3 中国东部沿海地区四大城市群内城市经济效率变化示意图

Fig. 3 Radar charts of economic efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

京津冀城市群则呈倒“V”型演变格局，经济规模效率在2005-2011年间呈上升趋势，随后呈下降趋势，由2011年的0.957下降到2014年的0.911，下降幅度为4.9%。从纵向城市角度而言，多数城市在2005-2014年间经济规模效率得到有效提高并具有保持高位运行的趋势，但是以第二产业为主的秦皇岛市、日照市、潍坊市经济规模效率仍然偏低（图3c）。

3.2 考虑环境污染后的东部四大城市群生态效率及时空特征分析

基于非期望产出的SBM模型能够避免不考虑环境因素进行效率评价时存在评价结果失真的问题以及传统DEA模型角度选择和径向选择的缺陷。考虑到环境污染影响时（图4），2005年、2011年、2014年东部四大城市群生态效率平均值分别为0.897、0.847、0.892，即达到DEA最优前沿面的89.7%、84.7%和89.2%。与传统DEA模型测算的经济综合效率相比，东部四大城市群生态效率平均值分别下降4.4%、5.8%、4.6%，说明环境污染会带来一定程度的效率损失。如图3所示，从起始年份来看，京津冀城市群生态效率相对较低，受环境影响导致的效率损失最大，山东半岛城市群生态效率相对较高，生态效率受到的环境影响最小。2005-2011年期间，山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群生态效率均有所下降。其中，珠三角城市群下降幅度最大，为0.073。尽管京津冀城市群生态效率则略微上升，由0.852上升到0.856，但生态效率值仍保持较低水平。此期间是中国城镇化高速推进时期，东部大中小城市规模不断扩大，资源开发力度不断增强，同时环境污染、生态服务功能负担不断加重，致使城市群生态效率整体处于相对低值状态。2011-2014年期间，山东半岛城市群、长三角城市群生态效率呈回升趋势，分别由0.888、0.816提升至0.918、0.931，长三角城市群生态效率改善效果最为显著。京津冀城市群与珠三角城市群生态效率基本保持稳定，珠三角城市群生态效率快速下降趋势

得到有效缓解。此阶段城市群生态效率的改善一方面得益于经济刺激计划带来的效益滞后性提高；另一方面得益于地方积极推行产业升级转型计划，淘汰一批高污染的落后产能产业，使得沿海四大城市群生态效率稳中有升。总体来看，沿海四大城市群生态效率在 2005-2011 年为下行期，2011-2014 为修复期，其中山东半岛城市群、珠三角城市群属于相对高效地区。

通过分析图 5 可知，沿海四大城市群内城市生态效率时空演化格局具有不同的演化特征。京津冀城市群生态效率空间格局由 2005 年的中间高、南北低逐渐演变为沿承德—沧州为轴线的“I”字型高值区分布，低值区则主要位于京津冀城市群的东、西方向城市；山东半岛城市群内城市生态效率分布格局总体保持稳定，高值区位于北部、东部沿海一带，低值区则位于中部、南部；长三角城市群生态效率格局总体属于由东部沿海高值区向西方向逐步降低格局，尤其是与安徽交界地区形成明显的低谷区；珠三角城市群生态效率大致呈现由珠江口沿海和沿江一带城市为核心的高值区向东、西、北三个方向降低格局，内陆城市生态

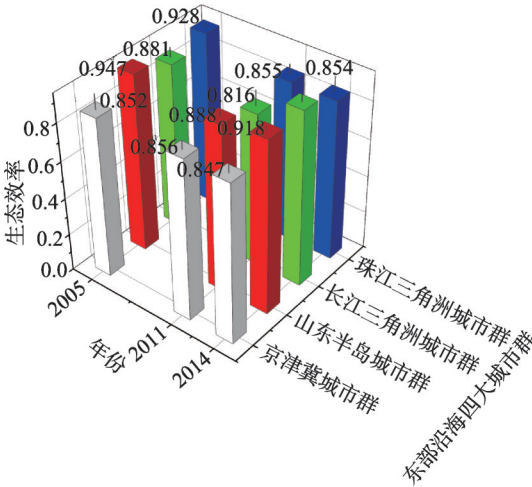


图 4 中国东部沿海地区四大城市群生态效率 DEA-SBM 模型评价结果

Fig. 4 Evaluation results of eco-efficiency based on DEA-SBM for four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

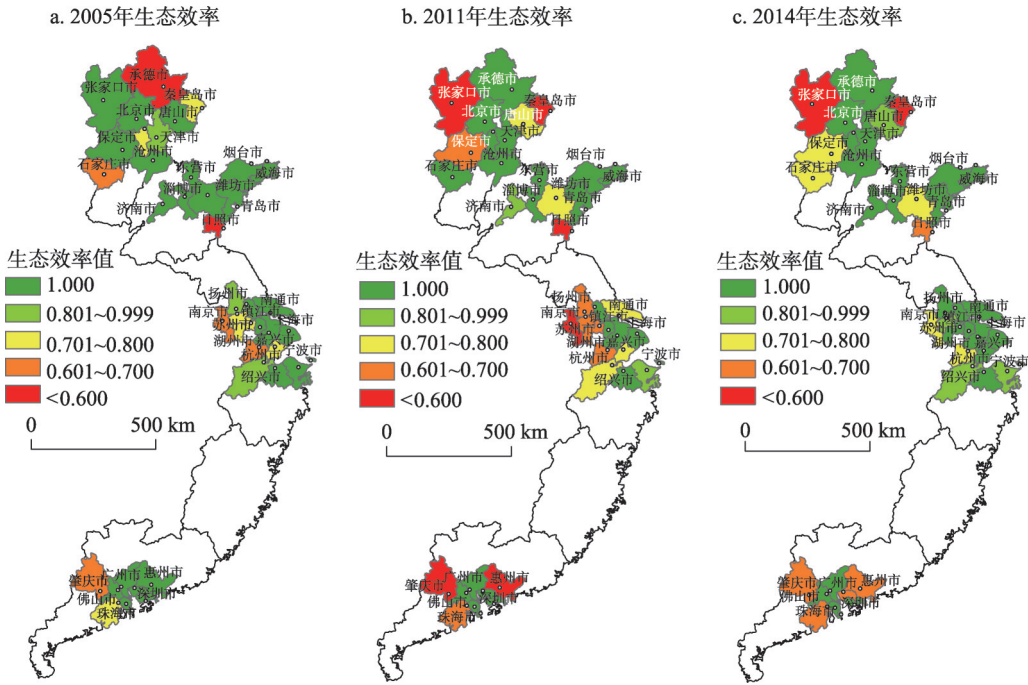


图 5 基于 Undesirable-SBM 的中国东部四大城市群内城市生态效率时空格局

Fig. 5 Spatio-temporal pattern of eco-environment efficiency based on SBM of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

效率值始终较低。

为了展现出各城市群生态效率的时间变化差异,本文引入变异系数、基尼系数。变异系数与基尼系数值的变化可以反映出生态效率在时间上的变化和趋势。变异系数为:

$$CV = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - u)^2 / n / u} \quad (12)$$

式中: y_i 为城市群内各城市生态效率; u 为每年平均数; n 为地区数。由变异系数结果可知,数值越来越大则表示差异越来越大,否则反之。2005-2014年,京津冀城市群(0.204~0.228)、山东半岛城市群(0.160~0.170)、珠三角城市群(0.155~0.204)变异系数不断增加,其内部城市间生态效率差异逐步增大。仅长三角城市群变异系数(0.161~0.116)不断减少,呈现出相对合理的生态效率差异减小趋势。

基尼系数为:

$$G = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |y_j - y_i| / n(n-1) \right] / 2u \quad (13)$$

式中: y_i 、 y_j 分别代表城市群内城市生态效率值; n 为城市群内城市个数; u 表示当年城市群生态效率均值。通过计算2005-2014年四大城市群的基尼系数,也证明了京津冀城市群(0.102~0.114)、山东半岛城市群(0.049~0.069)、珠三角城市群(0.061~0.098)呈不断增大,仅长三角城市群(0.082~0.053)呈减小的趋势。

3.3 生态效率与综合要素投入、经济效益、环境影响叠加关系分析

随着中国城镇化和工业化的不断发展,资源形势日益严峻,中国部分地区依然实行“高投入、低效益、高污染”的发展模式,资源的不合理利用造成了经济亚健康问题,影响了可持续发展。综合分析资源投入、经济效益、污染排放与生态效率间关系是研究生态效率高低成因的重要方法。本文首先采用熵技术支持下的TOPSIS模型将城市群生态效率测度指标综合集成为资源投入、经济效益和环境污染指标3个指标,随后将城市群内各个城市集成指标与其生态效率进行对应(图6),最后采用K-均值聚类方法将3个综合指标分为高、中、低3类(图7)。分析得出在2005-2014年间:

(1) “高投入、高效益”型城市分布格局基本保持不变,其污染物排放水平逐步向“低污染”转变,生态效率始终处于DEA最优前沿面(简称DEA有效率)。这类城市往往是四大城市群中社会经济发展水平较高的核心地区,其将资源投入转化为经济效率的能力远超其他城市,通过积累的财力着力进行环境治理与企业技术改造且效果明显。这类城市主要为北京市、上海市、苏州市、广州市、深圳市。

(2) “中投入、中效益”型城市通常是区域核心城市,其污染物排放水平同样呈下降趋势,这类城市消耗中等水平资源,产出中等经济效益的同时,更加重视减少污染物的排放,但由于要素配置的不合理导致部分城市生态效率未达到DEA最优前沿面,如南京市、杭州市、无锡市。此类型城市还会通过提高资源投入的方式增加经济效益,利用提高的经济效益改善生产技术水平,降低污染物排放,优化投入要素配置后转为“高投入、高效率、低污染”型城市,生态效率得到有效提升,从而达到DEA最优前沿面,如天津市。

(3) “低投入、低效益、低污染”型城市数量较多,始终占城市总数的50%,特点是通过较低的资源消耗而产出较低的经济效益,污染物排放也很低,这类城市的生态效率多数达到DEA最优前沿面。随着经济水平的发展,部分城市向“中投入、中效益、中污染”型城市转变,尽管通过增加资源消耗与提升产能的方式提高了经济效益,但是由于污染物排放量的增加,其生态效率反而出现下降,如济南市。

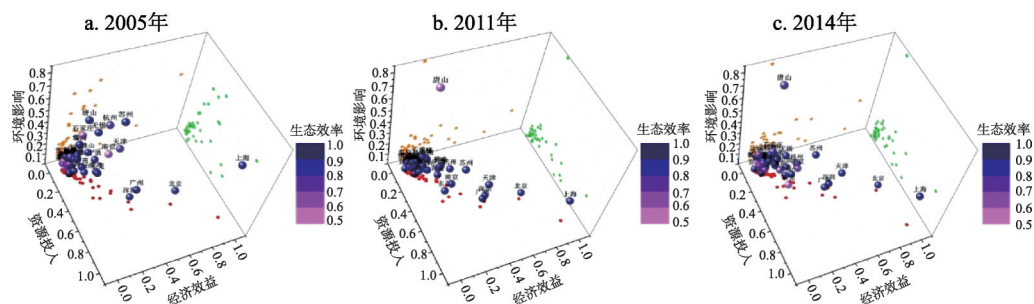


图6 中国东部沿海地区四大城市群内城市资源投入、经济效益、环境影响综合评价结果

Fig. 6 Comprehensive evaluation of resources, economic benefits and environment impact of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

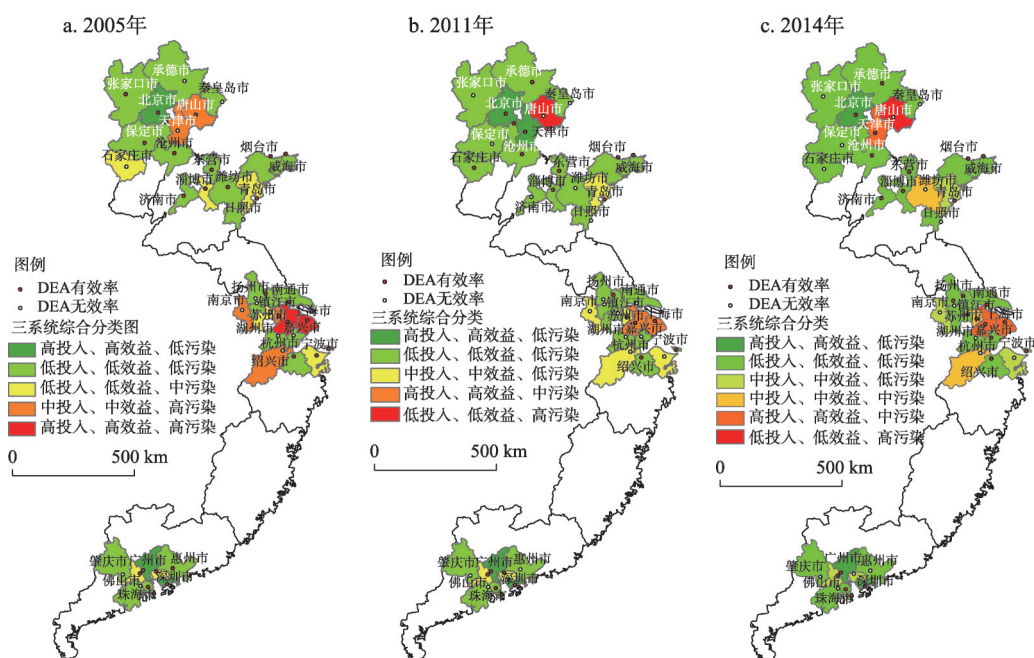


图7 中国东部沿海地区四大城市群资源投入、经济效益、环境影响分类格局变化

Fig. 7 Classification of resources, economic benefits and environment impact of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

3.4 生态效率无效率影响因素分析及优化途径

由SBM模型原理可知,如果DMU有效值 $\rho < 1$,则松弛变量 S^- 、 S^g 、 S^b 的大小即可反映出中国东部四大城市群内城市生态效率值无效率的原因,松弛度的变化从一定程度上反映了能源投入配置的改善潜力,通过对2014年四大城市群投入要素松弛变量 S^- 、 S^g 、 S^b 的平均值分析(表3)可发现:

(1)京津冀城市群能源消耗与从业人员数改善潜力相对较高,一方面说明京津冀城市群中黑色金属冶炼及延压加工业、石油加工业、有色金属业等高耗能行业产值比重仍然较高,另一方面说明京津冀城市群存在人力资源利用效率低的问题。京津冀城市群拥有多个国家创新基地,应以此为支撑,加大生产创新力度,将新材料、新工艺等高新技术和先进方法用于传统工业生产,以此提升生产效率、降低能源消耗、实现清洁生产。

表3 中国东部沿海地区四大城市群生态效率改善潜力

Tab. 3 Optimization of eco-environment efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

城市群	改善潜力($\delta_y/\%$)					
	资本存量	外资利用额	从业人员数	建城区面积	能源消耗	用水总量
京津冀	10.74	17.72	26.17	12.75	15.03	9.29
山东半岛	4.23	17.64	12.22	3.93	9.93	1.28
长三角	5.43	13.60	8.49	4.84	5.58	3.70
珠三角	2.85	26.47	22.55	18.98	4.144	12.74

还需以可持续发展为导向，推动冀中南地区工业循环经济发展，利用现代电子信息技术，实现生产过程自动化、控制智能化，加强对资源能源消耗的监控，降低重工业发展带来的环境问题。

(2) 山东半岛城市群外资利用额改善潜力相对较高，说明该城市群外商直接投资配置效率较低，大量的外资投入并没有带来相应的经济效益。其主要原因来自于山东半岛城市群吸引的外资主要集中于第二产业，尤其是劳动密集型、低附加值的一般性加工制造业，这一定程度上制约了城市群经济结构的升级与转型。因此，山东半岛城市群首先应积极引导外商直接投资产业方向，将投资重点放在资本技术密集型的先进制造业、高新技术产业以及现代服务业，增强外资创造的经济效益。其次，在积极吸引外资的基础上应重视吸收和融合外来先进技术，推动产业由传统资源密集型转向技术密集型的转变，加快建成中国先进制造业和战略性新兴产业基地。最后，应加快发展海洋经济产业，重点推动海洋清洁能源、现代海洋服务业、海洋科教创新等新兴项目发展，降低经济发展带来的生态环境风险从而提高生态效率。

(3) 长江三角洲城市群生态效率各要素改善潜力相对较低，仅有外资利用额相对较高。外资投入主要影响产业规模，以往学者认为扩大产业规模对生态效率有正向促进作用，但长三角城市群部分城市第二产业所占比重仍然较高，第二产业中多数行业属于高耗能、高污染行业，产业的发展规模与资源、能源消耗成正比，产业规模越大意味着对资源的需求量越大，经济要素的投入越多，随之带来的污染排放物也随之增加，这个过程由于行业间工艺流程、技术水准、生产方式的不同，对资源要素使用的效率有显著差异。所以，应合理利用资金，控制产业规模，将外资投入重点引导在改进生产技术方面，提高清洁生产能力，降低能源消耗和污染物排放。

(4) 珠三角城市群从业人员总数与建城区面积改善潜力较高。说明珠三角城市群还有相当数量的劳动密集型的行业，这些行业设备技术落后，单纯以依靠大量廉价劳动力为主的机械式生产方式为主。珠三角城市群应依靠自身优势，如拥有很多高新技术、电子信息和通讯等产业，并且自主研发能力强，应以科技引导企业，提升劳动力综合素质，合理运用人力，提高效率并增加产品附加价值。建城区面积改善潜力高说明土地资源存在浪费情况，在当今工业化与城镇化飞速发展的时期应重视土地的集约利用，在日后通过完善土地市场和运行机制的方式下，提高土地的集约利用度，并且土地规划中引入先进方法、新理念，实现生态友好型土地利用模式。

此外，东部沿海地区四大城市群外资利用改善潜力均较高，说明外商直接投资配置比例失衡，由于中国在吸收外资中一直强调生产型投资，致使外商投资主要集中在工业等行业，在全球经济下行以及国内产能过剩的背景下难以产出较大经济效益，应在未来积极提升外资在金融、保险、商业、外贸等其他发达国家吸引外资最多行业的投入比例，并且在引资过程中避免“重数量轻质量、重引进轻管理”的做法，进一步优化外资投入配置效率。

4 结论

(1) 采用传统DEA模型对东部沿海地区四大城市群经济综合效率进行测度。发现山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群经济综合效率呈现2005-2011年间下降、2011-2014年上升的V字型演变格局。其中, 长三角城市群经济综合效率在2011年后得到快速提升, 内部城市经济综合效率普遍达到DEA最优前沿面的90%以上, 而京津冀城市群经济综合效率始终呈下降趋势, 其资源投入配置、经济效率转化水平相对较低。从整体来看, 东部沿海地区四大城市群经济综合效率呈优化趋势。

(2) 采用非期望产出SBM模型测算了以东部沿海地区四大城市群为研究对象、内部城市指标为数据的城市群生态效率, 研究发现: ① 传统DEA模型测度的城市群经济效率值不同程度的高于非期望产出SBM模型测度的生态效率值, 环境影响将带来不同程度的生态效率损失, 其中京津冀城市群受环境影响导致的效率损失最大; ② 京津冀城市群、山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群地区生态效率均呈先下降后上升的趋势, 2011-2014年期间, 长三角城市群生态效率由0.816提升至0.931, 生态效率改善效果最为显著; ③ 沿海四大城市群内城市生态效率时空演化格局具有不同的演化特征, 总体来看, 核心城市周边以及沿海沿江地区城市生态效率相对较优, 内陆城市则较低; ④ 除长三角城市群外, 其余城市群变异系数及基尼系数呈增长态势状态, 城市群内城市间生态效率差异逐渐增大。

(3) 采用熵技术支持下的TOPSIS模型以及K-均值聚类模型, 通过将综合指标进行分类组合, 建立生态效率与资源投入、经济效益、环境影响的叠加关系, 以东部四大城市群42个城市为例进行实证研究, 发现东部四大城市群中, 京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群核心城市资源消耗强度高、经济效益产出大、生态效率较高。从整体来看, 城市群内多数城市呈污染物排放量下降趋势, 污染物治理效果较为明显, 环境影响问题有所改善。

(4) 通过分析非期望产出SBM模型的松弛度, 发现影响东部沿海地区四大城市群生态效率的原因各不相同。本文从城市群尺度出发进行了差异性分析, 并提出了合理化建议。

参考文献(References)

- [1] Fang Chuanglin, Mao Qizhi, Ni Pengfei. Discussion on the scientific selection and development of China's urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 515-527. [方创琳, 毛其智, 倪鹏飞. 中国城市群科学选择与分级发展的争鸣及探索. *地理学报*, 2015, 70(4): 515-527.]
- [2] Fang Chuanglin, Song Jitao, Zhang Qiang, et al. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 827-840. [方创琳, 宋吉涛, 张蔷, 等. 中国城市群结构体系的组成与空间分异格局. *地理学报*, 2005, 60(5): 827-840.]
- [3] Fang Chuanglin. Important research progress and development directions of China's urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144. [方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向. *地理学报*, 2014, 69(8): 1130-1144.]
- [4] Fang Chuanglin, Guan Xingliang. Comprehensive measurement and spatial distinction of input-output efficiency of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(8): 1011-1022. [方创琳, 关兴良. 中国城市群投入产出效率的综合测度与空间分异. *地理学报*, 2011, 66(8): 1011-1022.]
- [5] Lu Bin, Yang Jianxin. Review of methodology and application of eco-efficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3898-3906. [吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. *生态学报*, 2006, 26(11): 3898-3906.]
- [6] Schaltegger S, Synnestvedt T. The link between 'green' and economic success: Environmental management as the crucial trigger between environmental and economic performance. *Journal of Environmental Management*, 2002, 65(4):

- 339-346.
- [7] Huppes G, Ishikawa M. A framework for quantified eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 25-41.
- [8] WBCSD. *Eco-efficient Leadership for Improved Economic and Environmental Performance*. Geneva: WBCSD, 2001.
- [9] European Environmental Agency. Making sustainability accountable: Eco- efficiency, resource productivity and innovation. <http://glossary.eea.eu.int/>.
- [10] Division E D. *Eco-efficiency indicators: Measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment*//eSocialSciences, 2010.
- [11] Integrating environmental and financial performance at the enterprise level: A methodology for standardizing eco-efficiency indicators. United Nations, 2000.
- [12] Kuosmanen. Measurement and analysis of eco-efficiency: An economist's perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 15-18.
- [13] Seppälä J, Melanen, Mäenpää, et al. How can the eco-efficiency of a region be measured and monitored? *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(9): 117-130.
- [14] Fu Lina, Chen Xiaohong, Leng Zhihua. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: Case study of Chang-Zhu-Tan "3+5" urban agglomeration. *China Population, Resources & Environment*, 2013, 23(4): 169-175. [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. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(4): 169-175.]
- [15] Cheng Jinhua, Sun Qiong, Guo Mingjing, et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China. *China Population, Resources & Environment*, 2014, 24(1): 47-54. [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. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 47-54.]
- [16] Guan Wei, Xu Shuting. Study on spatial pattern and spatial effect of energy eco-efficiency in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(6): 980-992. [关伟, 许淑婷. 中国能源生态效率的空间格局与空间效应. *地理学报*, 2015, 70(6): 980-992.]
- [17] Wu Xiaoqing, Wang Yuan, Liu Ning, et al. Evaluation of circular economy development in industrial park based on eco-efficiency theory and TOPSIS approach. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2203-2208. [吴小庆, 王远, 刘宁, 等. 基于生态效率理论和TOPSIS法的工业园区循环经济发展评价. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2203-2208.]
- [18] Guo Fuyou, Tong Lianjun, Wei Qiang, et al. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of industrial system eco-efficiency in the Songhua River Basin of Jilin province. *Geographical Research*, 2016, 35(8): 1483-1494. [郭付友, 佟连军, 魏强, 等. 松花江流域(吉林省段)产业系统生态效率时空分异特征与影响因素. *地理研究*, 2016, 35(8): 1483-1494.]
- [19] Chen Ao. Empirical analysis of the evaluation of regional ecology efficiency and influential factors in China: Evidences from provincial data during 2000-2006. *Chinese Journal of Management Science*, 2008(Suppl.1): 566-570. [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. *中国管理科学*, 2008(增刊1): 566-570.]
- [20] Zhang B, Bi J, Fan Z Y, et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 2008, 68(1/2): 306-316.
- [21] Liu Y, Wang W, Li X Q, et al. Eco- efficiency of urban material metabolism: A case study in Xiamen, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2010, 17(17): 142-148.
- [22] Frischknecht R. LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(7): 666-671.
- [23] Plehn J, Sproedt A, Gontarz A, et al. From strategic goals to focused eco-efficiency improvement in production: Bridging the gap using Environmental Value Stream Mapping//Global Conference for Sustainable Manufacturing, 2012: 251-264.
- [24] Wu Desheng. A member of theories and approaches research on data envelopment analysis [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. [吴德胜. 数据包络分析若干理论和方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.]
- [25] Rashidi K, Shabani A, Farzipoor Saen R. Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: A case study in the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) countries. *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [26] Camarero M, Castillo J, Picazo-Tadeo A J, et al. Eco-efficiency and convergence in OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 55(1): 87-106.
- [27] Shabani A, Torabipour S M R, Farzipoor Saen R, et al. Distinctive data envelopment analysis model for evaluating

- global environment performance. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(15): 4385-4404.
- [28] Goto M, Otsuka A, Sueyoshi T. DEA (Data Envelopment Analysis) assessment of operational and environmental efficiencies on Japanese regional industries. *Energy*, 2014, 66(4): 535-549.
- [29] Bozoğlu M, Ceyhan V. Energy conversion efficiency of trout and sea bass production in the Black Sea, Turkey. *Energy*, 2009, 34(2): 199-204.
- [30] Lee T, Yeo G, Thai V V. Environmental efficiency analysis of port cities: Slacks-based measure data envelopment analysis approach. *Transport Policy*, 2014, 33(4): 82-88.
- [31] Zhang Zilong, Xue Bing, Chen Xingpeng, et al. Convergence in spatial difference of industrial environment efficiency in China. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(2): 30-38. [张子龙, 薛冰, 陈兴鹏, 等. 中国工业环境效率及其空间差异的收敛性. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(2): 30-38.]
- [32] Zhou Wuqi, Nie Ming. China's provincial industrial technology efficiency based on energy conservation and emissions reduction. *China Population, Resources and Environment*, 2013(1): 25-32. [周五七, 聂鸣. 基于节能减排的中国省级工业技术效率研究. *中国人口·资源与环境*, 2013(1): 25-32.]
- [33] Liu Ruijie, Zhang Zhihui. Assessment on economic-environmental efficiency of China's industry based on WTP-DEA method. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(2): 125-129. [刘睿劫, 张智慧. 基于 WTP-DEA 方法的中国工业经济—环境效率评价. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(2): 125-129.]
- [34] Yang Jun, Shao Hanhua, Hu Jun. Empirical study on evaluation and determinants of environment efficiency of China. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(2): 49-55. [杨俊, 邵汉华, 胡军. 中国环境效率评价及其影响因素实证研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(2): 49-55.]
- [35] Gai Mei, Lian Dong, Tian Chengshi, et al. The research for Liaoning environmental efficiency spatial-temporal differentiation. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2345-2357. [盖美, 连冬, 田成诗, 等. 辽宁省环境效率及其时空分异. *地理研究*, 2014, 33(12): 2345-2357.]
- [36] Bai Yongping, Zhang Xiaozhou, Hao Yongpei, et al. Research on regional environmental performance and its influential factors based on SBM-Malmquist-Tobit Model. *Areal Research and Development*, 2013, 32(2): 90-95. [白永平, 张晓州, 郝永佩, 等. 基于 SBM-Malmquist-Tobit 模型的沿黄九省(区)环境效率差异及影响因素分析. *地域研究与开发*, 2013, 32(2): 90-95.]
- [37] Pan Jinghu, Yin Jun. Evaluation of coordinative development efficiency of urban and rural areas and analysis of its spatial difference in Gansu based on DEA-ESDA. *Economic Geography*, 2011, 31(9): 1439-1444. [潘竞虎, 尹君. 基于 DEA-ESDA 的甘肃省城乡统筹发展效率评价及其空间差异分析. *经济地理*, 2011, 31(9): 1439-1444.]
- [38] Yang Yu, Liu Yi. Study on China's energy efficiency and its spatial-temporal variation from 1990 to 2010 based on DEA-ESDA. *Journal of Natural Resources*, 2014(11): 1815-1825. [杨宇, 刘毅. 基于 DEA-ESDA 的中国省际能源效率及其时空分异研究. *自然资源学报*, 2014(11): 1815-1825.]
- [39] Charnes A, Cooper W W, Golany B, et al. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. *Journal of Econometrics*, 1985, 30(1/2): 91-107.
- [40] Wu Qi, Wu Chunyou. Research on evaluation model of energy efficiency based on DEA. *Journal of Management Sciences*, 2009(1): 103-112. [吴琦, 武春友. 基于 DEA 的能源效率评价模型研究. *管理科学*, 2009(1): 103-112.]
- [41] Zhang Junrong, Guo Yaohuang. The relationship between the number of factors and DEA efficiency. *Systems Engineering: Theory Methodology Applications*, 2004(6): 520-523. [张俊容, 郭耀煌. 评价指标与 DEA 有效的关系. *系统工程理论方法应用*, 2004(6): 520-523.]

Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China

REN Yufei^{1,2}, FANG Chuanglin^{1,2}, LIN Xueqin²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Nowadays, the urban agglomerations in the eastern coastal area of China have been the strategic core regions of national economic development and part of the main regions of the

new-type urbanization. However, they suffer a series of eco-environment problems, such as increased consumption of resources, energy and materials. Thus, over the past few years, the eco-environment problem of urban agglomerations has become the forefront subject in the field of geographical research. The paper is unfolded with the definition of the eco-efficiency of urban agglomeration, which is taken as the measurement index of sustainability of urban agglomerations. Subsequently, with the aid of the traditional DEA model and undesirable output model of SBM, the paper carries out a comparative evaluation of the economic efficiency and ecological efficiency of the four major urban agglomerations in eastern China in the three periods of 2005, 2011 and 2014, and analyzes the spatio-temporal characteristics of evolution of urban agglomerations. In conclusion, with an analysis of laxity, the paper proposes corresponding suggestions for the improvement of eco-efficiency of the four major urban agglomerations in coastal China. As is suggested in the results, first and foremost, the overall economic efficiency of urban agglomerations located in Shandong Peninsula, Yangtze River Delta and Pearl River Delta displays a V-shaped pattern of "first decrease and then increase". In contrast, the overall economic efficiency of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration declines from the beginning to the end. Before 2011, a significant impact of pure technical efficiency is displayed, and after 2011, it is greatly affected by scale efficiency. Secondly, the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration suffers from a considerable loss of efficiency due to the impact of pollution. In contrast, there is a less severe loss in the efficiency of Shandong Peninsula urban agglomeration. On the whole, the eco-environment efficiency of the four major urban agglomerations was at a descending stage from 2005 to 2011, and at a revival stage from 2011 to 2014. In addition, the spatio-temporal pattern of urban eco-efficiency in the four major urban agglomerations in the coastal areas is possessed with different evolution characteristics. The peri-urban areas of core cities and riverside and seaside areas have a better urban eco-efficiency, and the inland cities have an inferior urban eco-efficiency. Apart from that, it is found that the core cities of the Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta urban agglomerations have a high resource consumption, economic benefit output and high eco-efficiency. Overall, most cities in the urban agglomerations demonstrate a declining tendency of pollution emissions, together with marked reduction of pollutants and mitigation of environmental problems. Last but not least, the economic eco-efficiency of the four major urban agglomerations is influenced by different factors. The paper conducts a differential analysis from the perspective of urban agglomeration, and proposed the concrete suggestions.

Keywords: eco-efficiency; data envelopment analysis; undesirable SBM; spatio-temporal pattern; slacks analysis; four urban agglomerations of eastern China