

基于非期望产出和门槛回归模型的 环渤海地区生态效率

韩增林, 吴爱玲, 彭 飞, 孙嘉泽, 夏 康

(辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 利用基于非期望产出的SBM模型测算2005-2015年环渤海地区44个城市的生态效率, 刻画其时空演化特征, 并运用面板门槛回归模型分析其影响因素。研究表明: ①未考虑非期望产出的环渤海地区生态效率值总体被高估, 说明经济活动的非期望产出确实降低了实际经济价值, 考虑非期望产出具有科学性、合理性。②2005-2010年, 生态效率类型整体呈现“进化”特征; 2010-2015年, 整体呈现暂时性“退化”特征; 可能与经济发展方式转变和驱动力转换有关。③各地区生态效率各类型数量和分布特征存在省际差异性和非均衡性, 相同生态效率水平类型地区空间集聚特征显著。④科技水平、城市规模、对外开放、环境规制对地区生态效率均表现出双门槛特征, 产业结构等对地区生态效率产生重要影响; 提高科技吸收再创新能力、联防治污能力和人口素质, 强化对外开放的“技术效应”, 将增强各门槛变量对环渤海地区生态效率的促进作用; 同时优化产业结构、加强信息化建设亦是提高该地区生态效率的重要举措。

关键词: 生态效率; 非期望产出; 面板门槛; 环渤海地区

1 引言

在经济发展进入“新常态”和推进生态文明建设背景下, 各地区迫切要求转变经济发展模式, 突破资源环境对地区发展的瓶颈制约。2015年10月国家发改委发布的《环渤海地区合作发展纲要》明确指出, 加强生态环境治理和保护以更加生态、有效、负责任的方式推动环渤海地区可持续发展。“三省两市”作为环渤海地区的核心区域, 2015年该区域国内生产总值占全国的23.8%, 科技水平、对外开放、人力资本等均具有较强优势, 逐渐成为中国经济增长和转型升级的新引擎; 同时资源环境约束日益趋紧, 高强度的人类活动造成了渤海海洋环境愈

加恶化, 海洋生态不容乐观, 2015年其工业污染治理投资总额约占GDP的0.125%。减小环境污染对经济发展的代价对区域发展和海洋保护具有重要意义。

生态效率为破解资源环境与地区发展矛盾提供了一种新的研究思路, 由于兼顾了经济发展和资源环境, 成为综合评价地区经济活动影响的重要方法和学术界研究的前沿热点议题。德国学者Schaltegger等(1990)首次提出生态效率并用来分析考虑环境影响下的经济产出问题, 由此各学者和组织机构先后开展生态效率研究, 呈现出理论到实证的趋势, 主要包括以下几方面: 生态效率概念及评价方面, 已有研究主要从生态效率内涵出发考察研

收稿日期: 2017-06-15; 修订日期: 2017-11-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601114); 教育部人文社会科学青年基金项目(16YJC790080); 辽宁省社会科学基金项目(L17CJL001); 辽宁省教育厅项目(JZ201783606) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41601114; Humanities and Social Science Youth Foundation of Ministry of Education, No.16YJC790080; Social Science Fund of Liaoning Province, No.L17CJL001; Fund of Education Department of Liaoning Province, No. JZ201783606]。

作者简介: 韩增林(1956-), 男, 山东商河人, 博士, 教授, 博导, 主要从事区域发展规划、交通运输地理及海洋经济地理等研究, E-mail: hzl@lnnu.edu.cn。

引用格式: 韩增林, 吴爱玲, 彭飞, 等. 2018. 基于非期望产出和门槛回归模型的环渤海地区生态效率[J]. 地理科学进展, 37(2): 255-265. [Han Z L, Wu A L, Peng F, et al. 2018. Eco-efficiency in the Bohai Rim area based on undesirable outputs and threshold regression model[J]. Progress in Geography, 37(2): 255-265.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.008

究对象的生态效率(Rees, 1992; Organization for Economic Cooperation and Development, 1998; Gössling 等, 2005; 吴小庆等, 2009)。研究区域和应用领域方面,已有成果在国家发展、区域差异等宏观尺度逐步拓展到产业规划、政府管理等微观尺度(Cha et al, 2008; Martin Willison et al, 2009; 成金华等, 2014; 陈玲等, 2015; 史丹等, 2016)。研究方法及其影响因素方面,多数成果采用指标体系法、传统DEA方法和单一线性回归法(付丽娜等, 2013; 刘晶茹等, 2014; 万庆等, 2015; 张小龙等, 2015)。对于环渤海地区,已有文献从城市环境、土地利用、城乡发展、海洋经济等方面开展了研究(王国刚等, 2013; 刘彦随等, 2015; 党晓云等, 2016; 孙才志等, 2016),但关于环渤海地区生态文明建设的文献十分有限。

通过对文献梳理可知,从生态效率视角分析微观市级单元尺度下的环渤海地可持续区发展的文献尚不多见,同时环渤海地区突出的环境污染问题没有得到足够重视,限制了其研究价值;指标体系法有待进一步完善,传统DEA方法缺乏对非期望产出的考虑,未能对其进行科学处理;单一线性回归方法不能反映出影响因素与生态效率之间的结构性、非单一的线性关系。综上所述,基于非期望产出的SBM模型和面板门槛回归模型,利用2003-2014年环渤海地区面板数据,以环渤海地区生态经济为研究对象,对其生态效率的时空演化特征及其影响因素进行深入分析,以期对环渤海地区生态文明建设和地区可持续发展提供借鉴。

2 区域概况和数据来源

2.1 区域概况

本文以环渤海地区北京市、天津市、河北省、辽宁省、山东省44个城市作为研究对象。2015年,该地区国内生产总值约占全国的23.8%,行政区面积和人口分别占全国的5.4%和18.46%,人口城镇化率达到68%,远高于全国平均水平;但资源能源消耗巨大,环境污染问题严峻,电力消耗总和占全国比重超过21%,水资源消耗比重约为19%,灰霾污染天数高达100天,直排入渤海污染物占全国入海污染物总量的47.7%。高投入、高产出和高污染现象同存是环渤海地区发展的重要特征。

2.2 研究方法

数据包络分析方法(DEA)又称非参数分析方

法,凭借其客观性和科学性,在相对效率评价中应用的有效性已被多数学者证明。传统径向、角度DEA模型(如CCR、BCC)处理非期望产出时,对无效率程度的测量只包含了所有投入(产出)等比例缩减(增加)的情况,松弛改进的部分在效率值的测量中并未得到体现,不能对非期望产出进行科学处理,将会导致测量结果有偏差。鉴于此,Tone(2001)提出了非径向的考虑松弛变量的DEA模型:SBM模型(Slack Based Measure)。SBM模型凭借其非径向、非角度的特点避免了径向和角度对测量结果的影响,在解决无效率决策单元DMU、投入产出的松弛性和包含非期望产出问题上具有突出优势,故使用基于非期望产出的SBM模型测度包含非期望产出的生态效率。模型的一般表达式如下:

$$\rho^* = \frac{1 - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{s_k^-}{x_{k0}}}{1 + \frac{1}{I+J} \left(\sum_{i=1}^I \frac{s_i^d}{y_{i0}^d} + \sum_{i=1}^J \frac{s_i^u}{y_{i0}^u} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} x_{k0} = \sum_{m=1}^M \lambda_m x_{km} + s_k^-, k=1, 2, \dots, K \\ y_{i0}^d = \sum_{m=1}^M \lambda_m y_{im}^d - s_i^d, i=1, 2, \dots, I \\ y_{i0}^u = \sum_{m=1}^M \lambda_m y_{im}^u + s_i^u, i=1, 2, \dots, J \\ 1 = \sum_{m=1}^M \lambda_m \\ \lambda_m \geq 0, s_k^- \geq 0, s_i^d \geq 0, s_i^u \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ^* 即要测算的环渤海地区生态效率值,其取值范围为0~1; K, I, J 分别代表投入、期望产出和非期望产出变量个数; s_k^-, s_i^d, s_i^u 分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛量; $x_{k0}, y_{i0}^d, y_{i0}^u$ 分别为投入、期望产出和非期望产出量; λ_m 为权重系数。当 $\rho^*=1$ 时,表示DMU完全有效,此时 s_k^-, s_i^d, s_i^u 均为0;当 $\rho^*<1$ 时,表明DMU发生效率损失,进而通过优化 $x_{k0}, y_{i0}^d, y_{i0}^u$ 改善生态效率。若令 $\sum_{i=1}^J \frac{s_i^u}{y_{i0}^u} = 0$,则上式变为不考虑非期望产出的SBM模型。

2.3 生态效率概念及指标体系

生态效率是指以更少的资源消耗、环境影响获得更大的产品或服务的价值,最早由Fussler(1995)引入中国,目前对区域生态效率的投入产出指标形成了较为一致的看法。借鉴经济学中将劳动和资本作为基本投入要素的做法,并将资本投入要素进一步分解为实物资本和货币资本。参照以往研究,

同时在模型的投入产出指标个数的限制条件和数据可得性基础上,构建环渤海地区生态效率评价体系(表1)。

选取地区年末单位从业人员作为劳动要素投入(付丽娜等, 2013),实物资源消耗以供水总量、地区总能耗、城市建设用地面积来衡量(李佳佳等, 2016);由于固定资产投资对产出的影响既基于当期值,又与以往投资形成的资本存量有关,故采用固定资本存量衡量货币资本要素投入。运用永续盘存法对资本存量进行估算: $K_{it}=K_{it-1}(1-\sigma)+I_{it}$,其中 K_{it} 表示第*i*个地区第*t*年的资本存量; σ 表示固定资产折旧率(6%); I_{it} 表示第*i*个地区第*t*年的资本形成总额(以2004年为基期)。

产出指标选取广泛使用、具有代表性的地区生产总值来反映经济体提供的产品或服务的价值,同时为消除价格因素影响,使用GDP平减指数对其进行数值平减。环境污染作为经济活动过程的非期望产出降低了实际经济价值(王晶等, 2012),将其纳入产出指标相较于纳入投入指标更具有合理性。选取城市废水排放量、工业二氧化硫排放量、烟粉尘排放量和城市垃圾清运量来衡量非期望产出(狄乾斌等, 2017)。全文数据来源为2005-2015年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国环境年鉴》和各市统计公报和统计局网站。

测算前对指标进行无量纲化处理,对实物资本投入、非期望产出加权重和。由于无量纲化数据存在0,但DEA模型要求输出值不能为0,故采用如下规范化方法进行处理:

表1 环渤海地区生态效率评价体系
Tab.1 Index system of eco-efficiency evaluation
in the Bohai Rim area

指标	类型	具体指标
投入指标	劳动投入	单位从业人员人数/万人
	实物资本投入	供水总量/10 ⁴ t
		地区总能耗/10 ⁴ t标准煤
		城市建设用地面积/km ²
产出指标	货币资本投入	固定资本存量/万元
	期望产出	地区生产总值/万元
	非期望产出	城市废水排放量/10 ⁴ m ³
		工业二氧化硫排放量/t
		工业烟粉尘排放量/t 城市垃圾清运量/10 ⁴ t

$$V^* = \frac{V_k - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}(5 - 1) + 1 \quad (2)$$

式中: V^* 为规范化处理数据, $1 \leq V^* \leq 5$; V_k 为第*k*个城市的投入产出数值; V_{\min} 、 V_{\max} 分别为环渤海44个城市投入产出指标的最小、最大值。

3 环渤海地区生态效率测算结果和时空演化特征

3.1 生态效率测算结果

根据2005-2015年环渤海地区生态效率测算结果(表2),选取研究期内首末和中间年份,即2005、2010、2015年的数据,参考已有研究成果(马占新, 2010),将环渤海地区生态效率 ρ 划分为以下4个等级: $\rho^*=1$ 为效率最高; $0.8 \leq \rho^* < 1.0$ 为效率良好; $0.6 \leq \rho^* < 0.8$ 为效率中等; $\rho^* < 0.6$ 为效率较低。利用ArcGIS 10.0软件绘制环渤海地区生态效率时空分布图(图1)。

由表2可知,未考虑非期望产出的环渤海地区生态效率值总体被高估,说明经济活动的非期望产出确实降低了实际经济价值,考虑非期望产出测算的生态效率可更客观地反映环境污染下的真实生态效率水平,故本文采用考虑非期望产出下的生态效率值。

3.2 生态效率时空演化特征

总体来看(图1):①环渤海地区生态效率空间分布存在省际差异性和非均衡性,相同生态效率类型地区分布具有显著集聚性。②生态效率最高地区主要分布于首都、省会城市以及沿海城市。③2005、2010、2015年生态效率最高城市比重逐渐增加后下降,良好城市比重逐渐下降,中等城市比重逐渐增加,较低城市比重先持平后增加。

分地区来看(图1):①辽宁省2005年生态效率最高地区主要呈现散点状分布,生态效率良好地区沿沈阳东西两侧纵向轴线分布,生态效率中等地区分布于沈阳—大连中部沿线;2010年生态效率最高城市有所增加,并呈现以沈阳为中心向西南、东南放射线状分布特征,生态效率中等地区减少;2015年生态效率最高和中等地区数量减少,较低和良好地区数量增加。②京津冀地区2005年生态效率最高地区呈现环天津市分布特征,良好地区分布于河北省北部;2010年生态效率最高地区分布于河北省东北部及京津周围,良好地区主要分布于北京及其以西地区,各类型地区数量与2005年大致持平;

表2 考虑和不考虑非期望产出的环渤海各市级单位生态效率值

Tab.2 Eco-efficiency value of each city in the Bohai Rim area with and without considering undesirable outputs

2005							2010							2015						
地区	考虑非		未考虑		考虑非		未考虑		考虑非		未考虑		考虑非		未考虑		考虑非		未考虑	
	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*	期望 ρ^*	非期望 ρ^*
北京	1.000	1.000	0.946	0.936	0.919	0.904														
天津	0.596	0.693	0.532	0.602	0.365	0.418														
石家庄	0.674	0.782	0.706	0.761	0.484	0.554														
唐山	0.798	0.960	0.753	0.859	0.523	0.656														
秦皇岛	0.965	0.953	1.000	0.961	0.756	0.756														
邯郸	0.818	0.935	0.867	0.931	0.638	0.720														
邢台	0.769	0.852	0.785	0.827	0.604	0.652														
保定	1.000	1.000	0.942	0.915	0.710	0.719														
张家口	0.859	0.944	0.894	0.933	0.747	0.764														
承德	0.940	0.965	1.000	1.000	0.753	0.791														
沧州	1.000	1.000	1.000	1.000	0.769	0.801														
廊坊	1.000	1.000	1.000	1.000	0.794	0.800														
衡水	0.821	0.878	0.881	0.880	0.754	0.734														
河北省	0.877	0.933	0.893	0.915	0.685	0.722														
沈阳	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000														
大连	0.887	0.899	1.000	0.865	0.600	0.647														
鞍山	0.721	0.791	0.803	0.824	0.576	0.627														
抚顺	0.821	0.868	1.000	1.000	0.707	0.718														
本溪	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.886														
丹东	1.000	1.000	1.000	0.966	0.876	0.895														
锦州	0.838	0.889	0.930	0.955	0.829	0.870														
营口	1.000	1.000	0.915	0.946	0.724	0.729														
阜新	0.925	0.968	1.000	1.000	0.816	0.880														
辽阳	0.964	0.958	1.000	1.000	0.824	0.838														
盘锦	1.000	0.920	1.000	0.923	0.767	0.767														
铁岭	0.924	0.974	0.963	0.969	0.829	0.845														
朝阳	1.000	1.000	1.000	1.000	0.776	0.839														
葫芦岛	0.919	0.952	1.000	1.000	0.835	0.861														
辽宁省	0.928	0.944	0.972	0.960	0.797	0.814														
济南	0.747	0.785	0.756	0.751	0.522	0.576														
青岛	0.768	0.815	0.805	0.807	0.876	0.623														
淄博	1.000	1.000	1.000	1.000	0.604	0.664														
枣庄	0.806	0.868	0.868	0.887	0.707	0.716														
东营	0.882	0.931	0.919	0.900	0.730	0.706														
烟台	0.817	0.848	0.804	0.798	0.556	0.589														
潍坊	0.789	0.846	0.814	0.866	0.571	0.616														
济宁	0.798	0.870	0.783	0.829	0.603	0.631														
泰安	0.862	0.897	0.887	0.894	0.682	0.682														
威海	0.925	0.922	1.000	1.000	1.000	0.716														
日照	0.953	0.967	0.945	0.919	0.692	0.723														
莱芜	0.944	0.972	1.000	1.000	1.000	1.000														
临沂	0.838	0.866	0.882	0.882	0.585	0.652														
德州	0.804	0.898	0.816	0.863	0.660	0.665														
聊城	0.869	0.908	0.865	0.880	0.685	0.706														
滨州	0.818	0.899	0.875	0.887	0.680	0.726														
菏泽	0.922	0.929	0.860	0.908	0.703	0.732														
山东省	0.855	0.895	0.875	0.887	0.698	0.690														

注：①各年份对应的第一列数值代表考虑非期望产出的生态效率值，第二列数值代表未考虑非期望产出的生态效率值；②限于篇幅，本文选取2005、2010、2015年数值；③各省及环渤海生态效率值是指其生态效率均值。

2015年生态效率较低、中等地区数量增加,最高、良好地区数量减少。③山东省生态效率最高地区主要分布于济南周围城市和胶东半岛。生态效率良好及以下类型地区数量及分布变化较大,但生态效率相同类型的地区集聚性特征依然显著;2010年良好地区数量增加,而2015年生态效率较低地区增加,并呈现平行于黄海岸线的分布特征。

出现上述分布特征可能的原因是:2005-2010年环渤海地区经济发展快速,但生态环境问题未能得到有效重视,GDP导向型发展是这一时期的显著特征,故此期间环渤海地区生态效率整体呈现上升趋势,生态效率类型向好的方向演进;2010-2015年,经济发展进入“新常态”时期和“三期叠加”阶段,前期依靠资源要素驱动、粗放型带动式的经济发展模式积累的弊病及生态环境问题由此凸显,表

现为经济增长速度降低、经济发展动力转换、产业结构调整、环境治理力度加大,致使这一时期各地区生态效率值趋于下降。

4 环渤海地区生态效率影响因素

4.1 面板门槛回归计量模型和变量选取

(1) 建立门槛回归模型。由于经济基础、技术水平等方面的差异,环渤海地区各城市生态效率类型存在着“进化”—暂时性“退化”的时序演化特征以及省级差异性、非均衡性和集聚性的空间分布特征。城市生态效率影响因素与城市生态效率存在着非单一的线性关系,表现为一定的门槛特征,即某一影响因素跨过“门槛”后对城市生态效率的影响不同。本文根据Hansen(1999)提出的门槛回归模

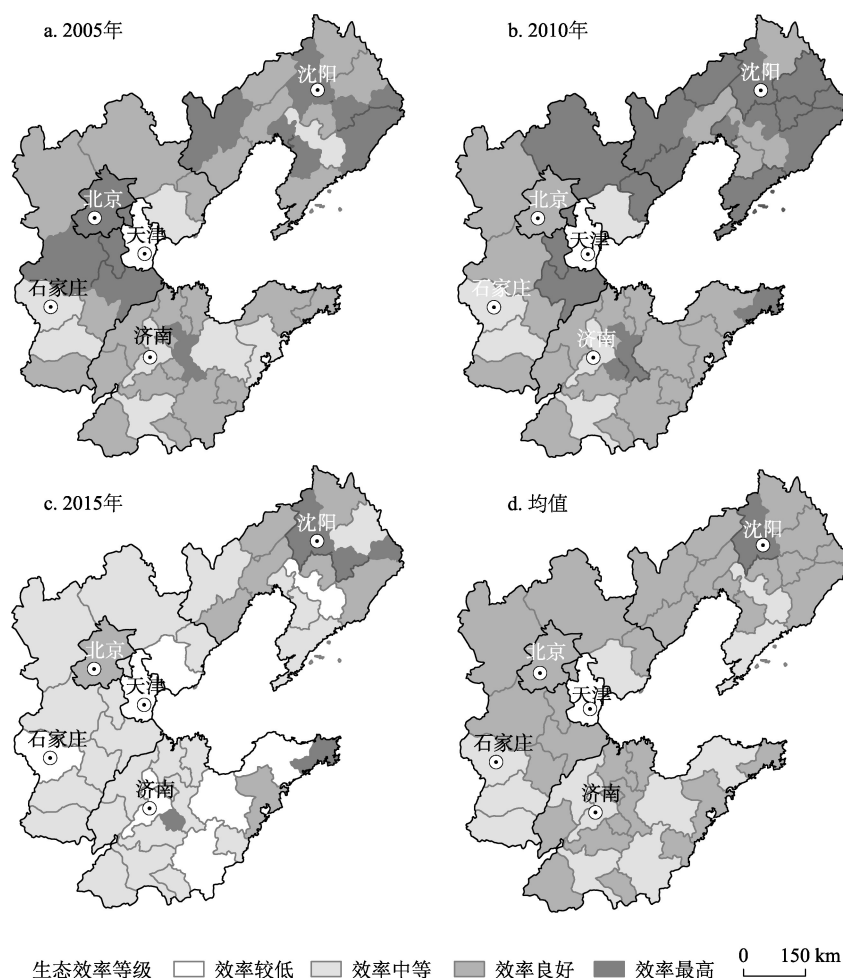


图1 环渤海地区生态效率时空分布

Fig.1 Spatial and temporal distribution of eco-efficiency in the Bohai Rim area

型,对影响环渤海地区城市生态效率的影响因素进行探讨。单一门槛回归模型如下:

$$Y_{it} = \alpha X_{it} + \beta_1 T_{it} \times I(T_{it} \leq \delta_1) + \beta_2 T_{it} \times I(T_{it} > \delta_1) + C + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: i 表示城市个体; t 表示时间; Y_{it} 是被解释变量; T_{it} 是门槛变量; X_{it} 是一组除 T_{it} 外对被解释变量产生显著影响的变量; δ 表示门槛变量, δ_1 为特定的门槛值; α 是 X_{it} 对被解释变量的影响系数; β_1 、 β_2 分别表示门槛变量 T_{it} 在 $T_{it} \leq \delta_1$ 、 $T_{it} > \delta_1$ 时对被解释变量 Y_{it} 的影响系数; C 为常数项; ε_{it} 为随机扰动项; $I(\cdot)$ 是一个定性函数。在模型(3)中,需要最小化 δ 的残差平方和 $S(\delta)$ 求得 δ 的估计值,进而估计出其他参数,然后进行检验:第一,门槛效果的检验,即检验门槛的存在性和门槛个数。原假设为 $H_0: \beta_1 = \beta_2$ (不存在明显门槛特征),备择假设为 $H_1: \beta_1 \neq \beta_2$,采用残差的 F 统计量和 σ^2 统计量检验。第二,门槛值的检验,原假设为门槛估计值等于真实值,采用极大似然统计量 $LR(\delta)$ 检验。设定双门槛(δ_1 和 δ_2)回归模型为(李平等, 2011):

$$Y_{it} = \alpha X_{it} + \beta_1 T_{it} \times I(T_{it} \leq \delta_1) + \beta_2 T_{it} \times I(\delta_1 < T_{it} \leq \delta_2) + \beta_3 T_{it} \times I(T_{it} > \delta_2) + C + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

(2) 生态效率影响变量。地区生态效率影响因素复杂,对地区生态效率的影响存在差异。上述分析在一定程度上揭示了环渤海地区生态效率与其经济发展水平、治污能力有关。为进一步考察生态效率影响因素的具体作用,从经济、社会、生态3个维度选取生态效率可能的影响因素(表3),以地区生态效率值 E_{it} 作为被解释变量,科技水平、城市规模、对外开放、环境规制作为门槛变量,经济规模、产业结构、信息化作为控制变量。经济规模、产业结构分别以人均GDP、第二产业占比来表示;借鉴已有研究成果,选取互联网用户数量(狄乾斌等, 2017)、港澳台外商企业工业产值之和占工业总产值比重分别表示信息化、对外开放水平(付丽娜等, 2013; 万庆等, 2015; 郭付友等, 2016);万人大学生人数反映地区高等教育水平;科学技术财政支出反映财政

对于科学事业的支撑力度,用于衡量地区科技水平(王一帆, 2016);对于城市规模的衡量,多数学者采用城市人口规模作为替代变量,以城市年末总人口来衡量(柯善咨等, 2014; 高健, 2016);当前国内污染治理主要以强制型为主,故选取污水处理率、二氧化硫去除率、生活垃圾无害化处理率来衡量环境规制(任胜钢等, 2016)。

基于模型(3)、(4)实际双门槛模型设定为:(限于篇幅,单门槛和三门槛模型这里不再阐述)。

$$E_{it}=\lambda_1X_{it}+\kappa_1TECH\times I(TECH\leq\delta_1)+\kappa_2TECH\times I(\delta_1<TECH\leq\delta_2)+\kappa_3TECH\times I(TECH>\delta_2)+C_1+\varepsilon_{it1} \quad (5)$$

$$E_{it}=\lambda_2X_{it}+\varphi_1SCAL\times I(SCAL\leq\tau_1)+\varphi_2SCAL\times I(\tau_1<SCAL\leq\tau_2)+\varphi_3SCAL\times I(SCAL>\tau_2)+C_2+\varepsilon_{it2} \quad (6)$$

$$E_{it}=\lambda_3X_{it}+\omega_1INEX\times I(INEX\leq\eta_1)+\omega_2INEX\times I(\eta_1<INEX\leq\eta_2)+\omega_3INEX\times I(INEX>\eta_2)+C_3+\varepsilon_{it3} \quad (7)$$

$$E_{it}=\lambda_4X_{it}+\mu_1ECRE\times I(ECRE\leq\nu_1)+\mu_2ECRE\times I(\nu_1<ECRE\leq\nu_2)+\mu_3ECRE\times I(ECRE>\nu_2)+C_4+\varepsilon_{it4} \quad (8)$$

式中: X_{it} 为一组包含经济发展($PGDP$)、产业结构($STHD$)、信息化($INFO$)的控制变量组。 λ_n 、 κ_m 、 φ_m 、 ω_m 、 μ_m 分别为控制变量组;门槛变量即科技水平、城市规模、对外开放、环境规制的影响系数, δ_k 、 τ_k 、 η_k 、 ν_k 分别为各门槛变量的双门槛值; C_n 、 ε_{itn} 分别为回归方程的常数项和随机扰动项; $n=1, 2, 3, 4$; $m=1, 2, 3$; $k=1, 2$ 。

回归前对影响因素各指标运用式(2)进行无量纲化处理,对科技水平、环境规制分层加权求和。

4.2 门槛回归模型实证分析

4.2.1 模型回归结果

采用 Hausman 检验得到卡方统计量值为

表3 环渤海地区生态效率影响因素

Tab.3 Influencing factors of eco-efficiency in the Bohai Rim area			
影响因素	解释变量	具体指标	代码
经济	经济规模	人均GDP/(元/人)	$PGDP$
	产业结构	第二产业比重/%	$STHD$
社会	科技水平	每万人大学生人数/人	$TECH$
		科学技术财政支出/万元	
	城市规模	年末总人口/万人	$SCAL$
	信息化	互联网用户数量/户	$INFO$
生态	对外开放	港澳台与外商企业工业产值之和占工业总产值比重/%	$INEX$
	环境规制	污水处理率/%	$ECRE$
		二氧化硫去除率/%	
		生活垃圾无害化处理率/%	

18.71,对应的 P 值为0.0165,说明显著拒绝原假设,应该采用固定效应模型。在固定效应模型的基础上,依次对以上各个因素运用门槛回归模型(5)-(8)进行检验和估计。

(1) 门槛效果和估计值检验。首先进行门槛个数检验,结果见表4。由表4可知,科技水平($TECH$)、城市规模($SCAL$)、对外开放($INEX$)、环境规制($ECRE$)分别通过5%、1%、1%和1%水平下的单门槛效果显著性检验,全部通过1%水平下的双门槛效果显著性检验,但均没有通过三重门槛效果显著性检验,说明均存在2个门槛。

其次进行门槛估计值检验。各个门槛变量的估计值和对应的95%置信区间见表5和图2。

(2) 模型参数估计结果如表6所示,具体分析见4.2.2小节。

4.2.2 实证分析

(1) 科技水平对地区生态效率的影响呈现显著

表4 门槛效果检验

Tab.4 Test on threshold effects				
指标	科技水平 $TECH$	城市规模 $SCAL$	对外开放 $INEX$	环境规制 $ECRE$
单一门槛检验	3.935** [0.032]	9.869*** [0.000]	10.040*** [0.000]	8.108*** [0.004]
双重门槛检验	20.575*** [0.000]	51.852*** [0.000]	11.207*** [0.000]	5.658*** [0.004]
三重门槛检验	0.000 [0.224]	0.000 [0.452]	0.000 [0.174]	0.000 [0.420]
样本最小值	7.97/452	124.38	1.08%	6.99%/1.42%/9.40%
样本最大值	1185.76/ 2877956	1339.30	66.73%	100%/99.3%8/ 100%
样本均值	179.65/ 98835	528.44	15.68%	80.22%/51.42%/ 89.89%

注:①方括号上方的数为门槛检验对应的 F 统计量;②***、**、*分别表示达到1%、5%和10%的显著性水平;③方括号内数字为采用Bootstrap方法反复抽样得到的 P 值,Bootstrap次数为500次。

表5 门槛值估计

Tab.5 Estimation of threshold values				
门槛变量	门槛估计值	95%置信区间	门槛估计值	95%置信区间
科技水平 ($TECH$)	1.069	[1.055, 2.193]	1.517	[1.069, 1.590]
城市规模 ($SCAL$)	2.511 (583.2)	[1.388, 4.181]	3.138 (773.7)	[1.198, 3.683]
对外开放 ($INEX$)	1.553 (10.16)	[1.463, 3.403]	2.823 (30.99)	[1.550, 3.115]
环境规制 ($ECRE$)	3.129	[2.565, 3.963]	3.825	[2.609, 4.078]

注:圆括号里的数字代表对数形式的门槛估计值。

正向双门槛特征。当科技水平低于1.069时,其对地区生态效率的弹性系数仅为0.149,当跨过这一门槛后系数为0.134;而当科技水平高于1.517时,其对地区生态效率的弹性系数下降至0.097。该结果与预期相符,证实了科技水平对生态效率的正向作用且该正向作用大小与科技水平的门槛值有关。说明当科技水平跨过门槛水平前后,其对地区生态效率的正向促进作用程度存在差异。

通过观察样本,张家口、衡水、铁岭、盘锦、营口、朝阳、葫芦岛、枣庄、临沂、菏泽未跨过科技水平的第一门槛,而处于科技水平第一、第二门槛之间

的城市数量明显增加,说明科技水平对地区发展的重要作用日益受到重视。

仅北京、天津、石家庄、秦皇岛、廊坊、沈阳、大连、济南、青岛、烟台、威海跨过科技水平的第二门槛。这些城市主要为省会(直辖)城市、沿海强市或者发展潜力大的城市,科技水平高于第二门槛,地区高等教育水平和科技后备力量高于其他地区,科学事业财政支持力度相对更大,但科技水平对生态效率的影响程度却有所下降,这可能是由于科技水平对地区发展是一个长期作用过程,需要学习、吸收再创新,且科技成果转化存在一定的时滞性。

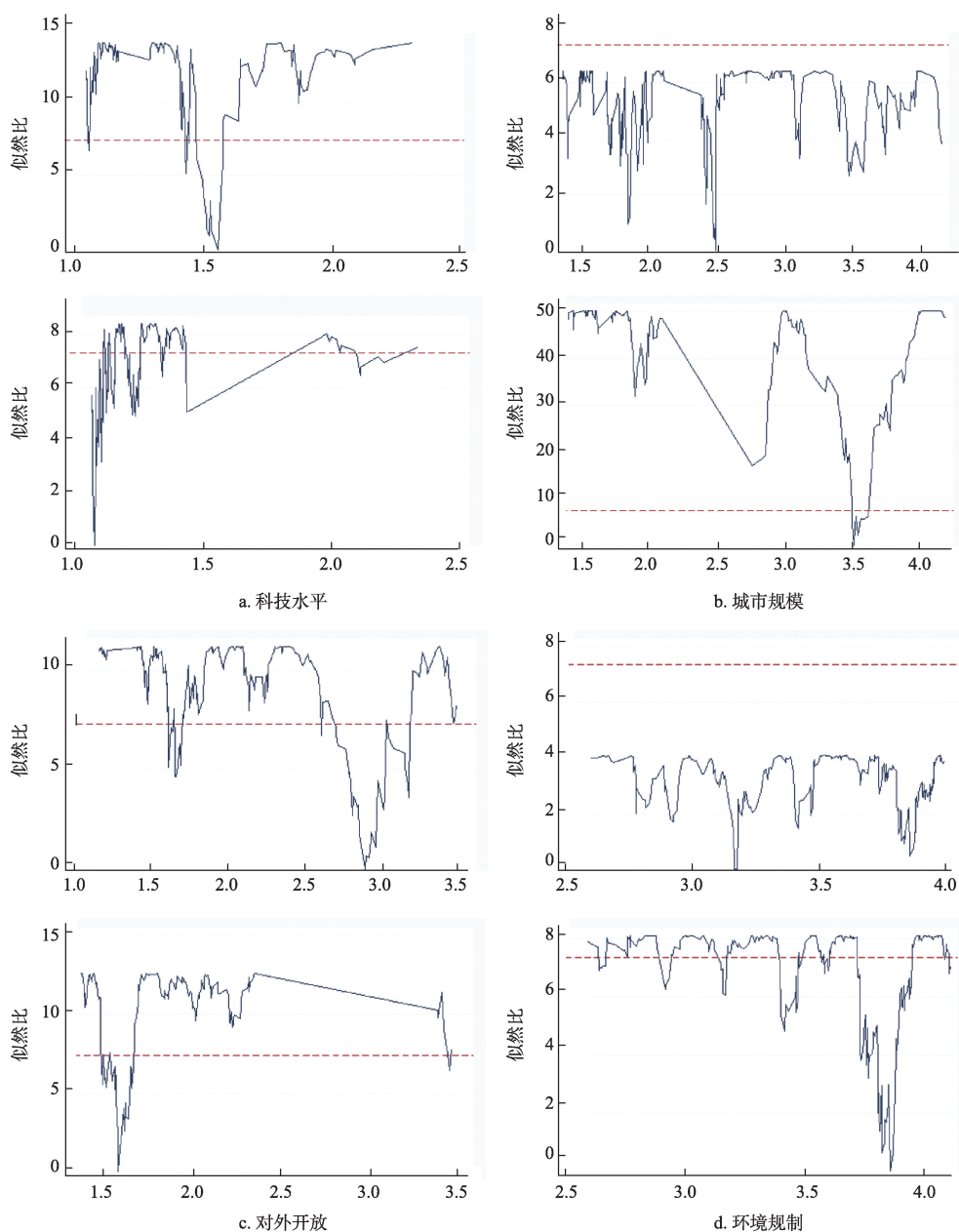


图2 科技水平、城市规模、环境规制双门槛图

Fig.2 Distribution of double threshold value of technology level, city scale and environmental regulation

表6 模型参数估计结果
Tab.6 Estimation results of model parameters

变量	系数	变量	系数	变量	系数	变量	系数
<i>PGDP</i>	0.007 (0.013)	<i>PGDP</i>	0.007 (0.014)	<i>PGDP</i>	0.001 (0.012)	<i>PGDP</i>	0.012 (0.013)
<i>STHD</i>	0.051*** (0.013)	<i>STHD</i>	0.060*** (0.015)	<i>STHD</i>	0.054*** (0.013)	<i>STHD</i>	0.046*** (0.013)
<i>INEX</i>	0.010 (0.009)	<i>INEX</i>	0.009 (0.009)	<i>TECH</i>	0.089*** (0.023)	<i>INEX</i>	0.010 (0.009)
<i>SCAL</i>	-0.305*** (0.009)	<i>TECH</i>	0.091*** (0.023)	<i>SCAL</i>	-0.273*** (0.008)	<i>TECH</i>	0.073*** (0.023)
<i>INFO</i>	0.003 (0.020)	<i>INFO</i>	0.006 (0.021)	<i>INFO</i>	0.007 (0.020)	<i>SCAL</i>	-0.307*** (0.008)
<i>ECRE</i>	0.004 (0.011)	<i>ECRE</i>	0.005 (0.011)	<i>ECRE</i>	0.002 (0.011)	<i>INFO</i>	0.004 (0.020)
$E \cdot I(TECH \leq \delta_1)$	0.149*** (0.047)	$E \cdot I(SCAL \leq \tau_1)$	1.982*** (0.034)	$E \cdot I(INEX \leq \eta_1)$	0.131*** (0.028)	$E \cdot I(ECRE \leq v_1)$	0.050** (0.021)
$E \cdot I(\delta_1 < ENER \leq \delta_2)$	0.134*** (0.039)	$E \cdot I(\tau_1 < SCAL \leq \tau_2)$	-0.335*** (0.012)	$E \cdot I(\eta_1 < INEX \leq \eta_2)$	0.073*** (0.016)	$E \cdot I(v_1 < ECRE \leq v_2)$	0.034** (0.016)
$E \cdot I(ENER > \delta_2)$	0.097*** (0.027)	$E \cdot I(SCAL > \tau_2)$	-0.334*** (0.009)	$E \cdot I(INEX > \eta_2)$	0.031*** (0.011)	$E \cdot I(ECRE > v_2)$	0.023 (0.015)
<i>C</i>	1.181*** (0.0852)	<i>C</i>	0.974*** (0.073)	<i>C</i>	1.056*** (0.078)	<i>C</i>	1.155*** (0.079)
<i>R</i> ²	0.829	<i>R</i> ²	0.984	<i>R</i> ²	0.812	<i>R</i> ²	0.826

注:①括号内为各系数对应的标准差;②***、**分别表示在1%、5%显著性水平上显著。

(2) 城市规模对地区生态效率的影响存在显著双门槛特征,且影响方向、程度与门槛值有关。当地区年末总人口低于583.2万时,城市规模对地区生态效率的弹性系数为1.982;但跨过这一门槛后系数变为-0.335,当地区年末总人口高于773.7万时,城市规模对地区生态效率的弹性系数为-0.334。说明城市规模对地区生态效率的影响与其门槛水平有关,且当城市规模跨过门槛水平后,对地区生态效率的影响方向、程度发生改变。

究其原因:①当城市规模未跨过第一门槛时,由于环渤海地区的人口规模基数大,人口规模集聚效应已经充分显现;②跨过第一门槛后,人口红利效应趋于饱和,并呈现出略有减少现象,同时辽宁省除沈阳和大连,其他城市都存在着不同程度的人口外流现象,这对地区生态效率产生不利影响,导致城市规模对生态效率的影响由正转负;③跨过第二门槛后,人口效应更多的表现为人口素质的进步和技术带动作用,降低了城市规模对生态效率的负向作用。通过比较样本发现,辽宁省除沈阳、大连、鞍山外的其他城市,以及秦皇岛、东营、威海、日照、聊城、莱芜均未跨过城市规模对生态效率的第一门槛值,这些城市除辽宁省所属城市外,行政区域面积较省内其他城市小,人口规模效应有待进一步发

挥;北京、天津,石家庄、唐山、邯郸、邢台、沧州,沈阳、大连,济南、青岛、烟台、潍坊、济南、临沂、聊城、菏泽通过了城市规模对生态效率的第二门槛值。

(3) 对外开放水平对地区生态效率的影响具有显著正向双门槛特征。当对外开放水平低于10.16%时,其对地区生态效率的弹性系数为0.131,当对外开放水平跨过这一门槛后,系数变为0.073;当对外开放水平跨过第二门槛值30.99%时,其对地区生态效率的弹性系数降为0.031,表明当对外开放水平在门槛水平前后,其对地区生态效率的影响程度不同,且对地区生态效率的正向影响有所下降。

究其原因可能是:一方面对外开放水平代表地区外向型经济发展水平和利用外商企业发展经济的能力,外商企业起到促进就业、调整结构、拓展市场、繁荣经济等作用,能提高地区产出价值,故对外开放水平对地区生态效率呈现显著正向影响特征;另一方面,外商企业对地区发展不仅具有“技术效应”,同时存在“污染转移效应”,即外商企业不仅提升了地区技术创新水平,同时高污染、高耗能型外商企业加剧了地区资源能源耗费和生态环境的恶化。同时,对外开放水平亦是衡量地区对外依赖程度的重要指标,对外水平越高说明地区发展对外商企业的依赖性越强,政府在制定政策时更容易降低

其准入门槛,环境规制趋于松弛。故对外开放水平对地区生态效率的影响程度在跨过门槛值后有所下降。

(4) 环境规制对地区生态效率的影响具有显著正向双门槛特征。当环境规制水平低于3.129时,其对地区生态效率的弹性系数为0.050,跨过这一门槛后系数为0.034;当环境规制水平高于3.825时,其对地区生态效率的弹性系数降为0.023,且显著性不明显。说明当环境规制跨过门槛水平后,其对地区生态效率的正向促进作用逐渐减弱,且跨过第二门槛后,其对地区生态效率正向影响的可能性有所下降。

呈现该结果的原因为:一是当环境规制水平低于第一个门槛值时,出现在考察前期,此时治理成本和治理难度相比较考察期后期小,治理效果较明显;当环境规制水平跨过第一门槛后,各地区开始重视污染治理以减少经济发展代价,地方政府从GDP导向发展理念转向环境经济协调导向发展理念,环境规制强度增加且环境治理成本提高,故环境规制对生态效率的弹性系数有所减少,环渤海地区各市的环境规制水平处于两个门槛之间的最多,集中体现了这一点;二是当环境规制水平跨过第二门槛后,环境规制对生态效率的弹性系数有所下降且显著性降低。由于污水处理率、二氧化硫去除率、生活垃圾无害化处理率是被动式、监管式的治污手段的体现,而城市的可持续发展更多依靠技术创新的驱动和产业高级化带动,以及污染的跨区域性和政府环境规制之间的非独立性(李胜兰等,2014),导致治污结果低于预期。

(5) 由表6可知,人均GDP正向影响地区生态效率。说明人均GDP的提升使得人们对于生活质量的要求提高,环保意识增强,有利于提升地区生态效率;产业结构优化对于地区生态效率具有正向影响。通常这是因为产业结构通过“结构效应”倒逼城市提升技术水平,提高资源配置效率、减少污染物排放,从而实现提高生态效率的目的;信息化对地区生态效率呈现正向影响,但总体影响较弱。信息化是地区发展的重要新兴要素和有力引擎,但环渤海地区信息化发展不平衡、有效溢出不足,配套基础设施建设及体制机制的完善尚需时日。

5 结论及讨论

(1) 本文采用基于非期望产出的SBM模型测度

2005-2015年环渤海地区44个城市的生态效率,结果表明未考虑非期望产出的生态效率总体被高估,考虑非期望产出的生态效率更能反映出环渤海地区的真实情况。

(2) 通过分析环渤海地区生态效率的时间序列演化特征可得出:①环渤海地区生态效率空间分布存在省际差异性和非均衡性,相同生态效率类型地区分布具有显著集聚性;②生态效率最高型地区主要集中于政治功能型城市以及沿海城市,且其比重先增加后下降;生态效率良好型城市比重先增加后减少,中等类型城市比重后期有所上升,而较低型城市比重后期略有增加;③各地区生态效率各类型数量和分布特征随时间变化而变化。2005-2010年,生态效率类型整体呈现“进化”特征;2010-2015年,整体呈现暂时性“退化”,可能与经济发展方式转变和驱动力转换有关。

(3) 选取科技水平等影响因素,通过运用面板门槛回归模型实证分析环渤海地区生态效率的影响因素可知,科技水平、城市规模、对外开放、环境规制对环渤海地区生态效率的影响均表现出双门槛特征,即在跨过门槛前后对地区生态效率产生的影响不同,证实了环渤海地区生态效率的影响因素与生态效率之间存在非单一的线性关系;产业结构等控制变量也对地区生态效率产生重要影响。

综上所述,为提高环渤海地区生态效率,推进地区生态文明建设和可持续发展,提出以下几点建议:①加强科学技术财政支出对科技研发的支持力度,营造良好科技研发环境,完善人才引进制度,加强科技吸收再创新能力建设,提高科技成果转化率;②环境污染仍是制约其生态效率提升的瓶颈,故在今后发展中需兼顾环渤海地区生态效率的“效率”与“公平”,在治理污染过程中引导社会多方参与,联防联控,重点调动企业主体的治理意愿和能力;③提高人口素质和外商企业准入门槛,充分发挥外商企业在促进技术创新、产业升级中的重要牵动作用,同时加快信息基础设施建设,提升信息要素在促进地区发展、治理生态环境中的重要作用。

此外,环渤海地区生态效率呈现出显著的集聚性,故考虑空间因素的环渤海地区生态效率有待今后作进一步研究。

参考文献(References)

陈玲. 2015. 地方政府生态效率绩效评价研究[D]. 长沙: 湖南大学. [Chen L. 2015. Research on the local government

- ecological efficiency performance evaluation[D]. Changsha, China: Hunan University.]
- 成金华, 孙琼, 郭明晶, 等. 2014. 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, 24(1): 47-54. [Cheng J H, Sun Q, Guo M J, et al. 2014. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China[J]. China Population, Resources and Environment, 24(1): 47-54.]
- 党云晓, 余建辉, 张文忠, 等. 2016. 环渤海地区城市居住环境满意度评价及影响因素分析[J]. 地理科学进展, 35(2): 184-194. [Dang Y X, Yu J H, Zhang W Z, et al. 2016. Satisfaction evaluation of living environment and influencing factors in the Bohai Rim area[J]. Progress in Geography, 35(2): 184-194.]
- 狄乾斌, 孟雪. 2017. 基于非期望产出的城市发展效率时空差异探讨: 以中国东部沿海地区城市为例[J]. 地理科学, 37(6): 807-816. [Di Q B, Meng X. 2017. Spatial and temporal disparities of urban development efficiency of coastal cities in China based on undesirable outputs[J]. Scientia Geographica Sinica, 37(6): 807-816.]
- 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 2013. 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, 23(4): 169-175. [Fu L N, Chen X H, Leng Z H. 2013. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: Case study of Chang-Zhu-Tan "3+5" Urban Agglomeration[J]. China Population, Resources and Environment, 23(4): 169-175.]
- 高健. 2016. 中国城市规模、效率与经济增长研究[D]. 济南: 山东大学. [Gao J. 2016. Research on city scale, efficiency and economic growth in China[D]. Ji'nan, China: Shandong University.]
- 郭付友, 佟连军, 魏强, 等. 2016. 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[J]. 地理研究, 35(8): 1483-1494. [Guo F Y, Tong L J, Wei Q, et al. 2016. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of industrial system eco-efficiency in the Songhua River Basin of Jilin Province[J]. Geographical Research, 35(8): 1483-1494.]
- 柯善咨, 赵曜. 2014. 产业结构、城市规模与中国城市生产率[J]. 经济研究, 49(4): 76-88, 115. [Ke S Z, Zhao Y. 2014. Industrial structure, city size and urban productivity in China[J]. Economic Research Journal, 49(4): 76-88, 115.]
- 李佳佳, 罗能生. 2016. 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, 26(2): 129-136. [Li J J, Luo N S. 2016. Effect of urban scale on eco-efficiency and the regional difference analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 26(2): 129-136.]
- 李平, 许家云. 2011. 国际智力回流的技术扩散效应研究: 基于中国地区差异及门槛回归的实证分析[J]. 经济学(季刊), 10(3): 935-964. [Li P, Xu J Y. 2011. On the diffusion effect of intellectual returnees: An analysis based on regional differences and threshold characters in China[J]. China Economic Quarterly, 10(3): 935-964.]
- 李胜兰, 初善冰, 申晨. 2014. 地方政府竞争、环境规制与区域生态效率[J]. 世界经济, (4): 88-110. [Li S L, Chu S B, Shen C. 2014. Difang zhengfu jingzheng, huanjing guizhi yu quyu shengtai xiaolv[J]. The Journal of World Economy, (4): 88-110.]
- 刘晶茹, 吕彬, 张娜, 等. 2014. 生态产业园的复合生态效率及评价指标体系[J]. 生态学报, 34(1): 136-141. [Liu J R, Lv B, Zhang N, et al. 2014. Definition and evaluation indicators of ecological industrial park's complex eco-efficiency[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(1): 136-141.]
- 刘彦随, 杨忍. 2015. 中国环渤海地区城乡发展转型格局测度[J]. 地理学报, 70(2): 248-256. [Liu Y S, Yang R. 2015. The spatial pattern measure of urban-rural development transformation in the Bohai Rim region in China[J]. Acta Geographica Sinica, 70(2): 248-256.]
- 马占新. 2010. 数据包络分析模型与方法[M]. 北京: 科学出版社. [Ma Z X. 2010. Shuju baoluo fenxi moxing yu fangfa[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 任胜钢, 蒋婷婷, 李晓磊, 等. 2016. 中国环境规制类型对区域生态效率影响的差异化机制研究[J]. 经济管理, 38(1): 157-165. [Ren S G, Jiang T T, Li X L, et al. 2016. The differentiation mechanism study on the effect of types of environmental regulation to the regional eco-efficiency in China[J]. Business Management Journal, 38(1): 157-165.]
- 史丹, 王俊杰. 2016. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, (5): 5-21. [Shi D, Wang J J. 2016. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint[J]. China Industrial Economy, (5): 5-21.]
- 孙才志, 覃雄合, 李博, 等. 2016. 基于WSBM模型的环渤海地区海洋经济脆弱性研究[J]. 地理科学, 36(5): 705-714. [Sun C Z, Qin X H, Li B, et al. 2016. Assessment of marine economy vulnerability of coastal cities in Bohai Sea Ring area based on WSBM model[J]. Scientia Geographica Sinica, 36(5): 705-714.]
- 万庆, 吴传清, 曾菊新. 2015. 中国城市群城市化效率及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 25(2): 66-74. [Wan Q, Wu C Q, Zeng J X. 2015. Study on the urbanization efficiency and determinants of China's urban agglomerations[J]. China Population Resources and Environment, 25(2): 66-74.]
- 王国刚, 刘彦随, 方方. 2013. 环渤海地区土地利用效益综合测度及空间分异[J]. 地理科学进展, 32(4): 649-656. [Wang G G, Liu Y S, Fang F. 2013. Comprehensive evaluation and spatial distinction of land use efficiency around Bohai Rim in China[J]. Progress in Geography, 32(4): 649-656.]
- 王晶, 孔凡斌. 2012. 区域产业生态化效率评价研究: 以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 经济地理, 32(12): 101-107. [Wang J, Kong F B. 2012. Efficiency evaluation of region-

- al industrial ecology: A case study of Poyang Lake Eco-economic zone[J]. *Economic Geography*, 32(12): 101-107.]
- 王一帆. 2016. 东北三省循环经济效率评价及其影响因素分析[D]. 长春: 吉林大学. [Wang Y F. 2016. The analysis of the circular economy efficiency and its influencing factors in northeast China[D]. Changchun, China: Jilin University.]
- 吴小庆, 徐阳春, 陆根法. 2009. 农业生态效率评价: 以盆栽水稻实验为例[J]. *生态学报*, 29(5): 2481-2488. [Wu X Q, Xu Y C, Lu G F. 2009. The evaluation of agricultural eco-efficiency: A case of rice pot-experiment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(5): 2481-2488.]
- 张小龙. 2015. 基于生态效率的循环经济评价指标体系: 山西省实证研究[D]. 太原: 太原理工大学. [Zhang X L. 2015. Researches on the evaluation indicator system of circular economy in Shanxi Province based on eco-efficiency: Empirical research in Shanxi Province[D]. Taiyuan, China: Taiyuan University of Technology.]
- Cha K, Lim S, Hur T. 2008. Eco-efficiency approach for global warming in the context of Kyoto mechanism[J]. *Ecological Economics*, 67(2): 274-280.
- Fussler C. 1995. 工业生态效率的发展[J]. *产业与环境*, 17(4): 71-74. [Fussler C. 1995. The development of industrial eco-efficiency[J]. *Industry and Environment*, 17(4): 71-74.]
- Gössling S, Peeters P, Ceron J-P, et al. 2005. The eco-efficiency of tourism[J]. *Ecological Economics*, 54(4): 417-434.
- Hansen B E. 1999. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of Econometrics*, 93(2): 345-368.
- Martin Willison J H, Côté R P. 2009. Counting biodiversity waste in industrial eco-efficiency: Fisheries case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 17(3): 348-353.
- Organization for Economic Cooperation and Development. 1998. Eco-efficiency[R]. Paris, France: OECD: 7-11.
- Rees W E. 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 4(2): 121-130.
- Schaltegger S, Sturm A. 1990. Ökologische rationalität ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten management instrumenten[J]. *Die Untemehmung*, (4): 273-290.
- Tone K. 2001. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 130(3): 498-509.

Eco-efficiency in the Bohai Rim area based on undesirable outputs and threshold regression model

HAN Zenglin, WU Ailing, PENG Fei, SUN Jiaze, XIA Kang

(Marin Economy and Sustainable Development Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Using the slack based measure (SBM) model of undesirable outputs, we measured the eco-efficiency of 44 cities in the Bohai Rim area from 2005 to 2015, depicted the spatiotemporal change characteristics, and analyzed the influencing factors with panel threshold regression model for stimulating ecological civilization construction and sustainable development. The results are as follows: (1) Eco-efficiency value is generally overestimated without considering undesirable outputs, indicating that undesirable outputs in the process of economy activities reduced true economy value fairly and considering undesirable outputs is reasonable; (2) From 2005 to 2010, the eco-efficiency types generally improved, but they deteriorated from 2010 to 2015, possibly relating to the transform of economic development mode and driving forces; (3) There exists interprovincial differentiation and imbalance in the number and spatial distribution of eco-efficiency types and a clear spatial aggregation character in regions of same eco-efficiency type; (4) Double threshold character appears in the relation of technology level, city scale, openness to the outside world, and environmental regulation for eco-efficiency. Industrial structure has a vital impact on regional eco-efficiency. Improving the capabilities of technology uptake and re-innovation, joint pollution control, and the quality of population, strengthening the "technical effect" heightening positive influences of threshold variables on ecological efficiency in the Bohai Rim area, and optimizing industrial structure and information system construction are also important methods for improving ecological efficiency.

Key words: eco-efficiency; undesirable output; panel threshold; Bohai Rim area