doi:10.13866/j.azr.2019.02.29

基于超效率 DEA 模型的干旱区工业生态效率研究
——以新疆为例①

周旭东[1,2]， 吕光辉[1]
(1. 新疆大学干旱生态环境研究所,新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆生态与农村环境保护中心,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要:生态效率是循环经济与可持续发展的有效测度,研究新疆区域工业生态效率,对于促进经济与生态环境协调发展,实现生态文明建设目标具有重要的现实意义。本文以 2001—2015 年新疆工业面板数据为样本,运用超效率 DEA 模型对 14 个地级市(州、地区)工业生态效率及其变化特征进行测评,并选取工业生态效率影响因素进行 Tobit 回归分析。结果表明:① 新疆工业生态效率总体水平不高,但发展趋势良好,自 2001—2015 年呈波动式上升趋势,环比增长 109.8%;从"十五"期间的 0.75 非有效状态到"十一五"期间的 1.0 开始稳定保持在有效生产前沿面以上,一直到"十二五"期间的 1.08,工业生态效率一直保持稳步增长状态;② 新疆各地区间工业生态效率存在不平衡性,最高值为 8.97,最低值为 0.59,相差 15.2 倍;③ 工业生态效率与经济发展水平、科技创新、工业结构、环境规划呈正相关关系,与对外开放度、产业集聚度呈负相关关系。

关键词:工业生态效率; 超效率 DEA 模型; Tobit 回归; 新疆

新疆地处中国西部边陲,亚欧大陆腹地,远离海洋,沙漠面积占全国沙漠面积近 60%,是中国干旱区的主体,也是世界干旱中心之一,生态环境脆弱。同时新疆又是我国资源大省,煤炭石油天然气等矿产资源丰富,新疆的工业以资源开发型为主,主要依赖高投入、高消耗和高污染排放的传统开发模式,资源过度消耗、环境污染和生态失衡等问题日益加剧,成为进一步制约新疆可持续发展的瓶颈。因此,如何对区域经济发展的生态水平和效率进行科学计量至关重要,也是各级决策者们关注的热点。

1990 年 Schaltegger 和 Sturm 首次提出了生态效率的概念,即增加的价值与增加的环境影响的比值[1]。1992 年,世界可持续发展工商委员会(WBCSD)对生态效率的概念做了界定:"生态效率通过提供能满足人类需要和提高生活质量的有竞争力的商品与服务,同时使整个生命周期的生态影响和资源强度逐渐降低到与生态承载力一致的水平[2]。随后生态效率成为衡量可持续发展的重要分析工具。目前,生态效率研究主要应用于企业、行业、区域 3 个层次[3-9],核算方法主要有 3 种:单一比值法[10-12]、指标体系法[13-14]和模型法[15-16]。

工业生态效率被定义为:某一区域工业企业生产产品的总量与资源消耗和环境影响的比值[17]。最初应用于企业层面,随着研究不断深入,逐渐向微观和宏观方面发展,国外侧重于微观方面如工业产品的研究,Huppes 等[18]对荷兰石油和天然气产品进行了生态效率评价,Hahn 等[19]对德国大型企业的二氧化碳生态效率进行了研究,我国对城市、区域等大尺度工业生态效率研究较广泛,高峰等[17]、卢燕群等[20]、汪东等[21]对全国 30 个省的工业生态效率进行了测算和评价,还有学者分别对北京[22]、山东[23]、四川[24]、湖南[25]等地工业生态效率进行了研究。工业生态效率较为成熟的研究方法主要有传统的数据包络分析法(DEA)[17,21]、DEA-SBM 模型法[26]、超效率 DEA 模型法[27]。

对新疆工业生态效率方面的研究资料较少,且不全面,贾卫平[28]以新疆天业为研究对象,对新疆氯碱化工产业生态效率评价研究体系进行了扩展和完善。本文主要以 2001—2015 年 3 个五年计划期间新疆工业面板数据为样本,采用超效率 DEA 模型、CCR 模型、Tobit 模型对新疆 14 个地州市工业生

① 收稿日期:2018-09-27; 修订日期:2018-10-20
基金项目:国家自然科学基金项目(31560131)
作者简介:周旭东(1974-),男,高级工程师,在读博士,研究方向为生态与环保. E-mail:510279120@qq.com

态效率的时空分布特征和影响因素进行了研究，旨在为新疆实现资源开发和生态环境保护可持续提供依据，为新疆尽快实现十八大提出的大力推进生态文明建设的目标，建设资源节约型和环境友好型社会提供技术支撑。

1 研究方法与数据说明

1.1 研究方法

1.1.1 超效率 DEA 模型 Chames、Cooper、Rhode[29] 于 1978 年提出旨在评价“多投入多产出”模式下决策单元间相对有效性的 DEA-CCR 模型，该模型是以相对效率概念为基础，根据多指标投入和多指标产出对于相同类型决策单元进行相对有效性或效益评级的一种系统性分析方法，在评价多投入多产出的复杂系统上具有一定优势。Andersen 等[30] 于 1993 年提出了一种 CCR 模型的改进模型——超效率 DEA 模型，它克服了 CCR 模型无法对多个决策单元做出进一步的评价和比较的缺陷，使有效决策单元能够进行比较、排序。

超效率 DEA 模型的数学形式如下：

$$
\begin{aligned}
&\text{Min } \theta \\
&s.t.\ \begin{cases}
\sum_{i=1, j\neq 1}^{n} X_j\lambda_j + s^- = \theta X_0 \\
\sum_{i=1, j\neq 1}^{n} X_j\lambda_j - s^+ = Y_0 \\
\lambda_j \geqslant 0, J = 1,2,\cdots k-1,k \\
s^- \geqslant 0,\ s^+ \geqslant 0
\end{cases}
\end{aligned}
$$

式中：θ 表示决策单元的效率值；X 和 Y 分别表示输入变量和输出变量；λ 表示有效决策单元 DMU 中的组合比例，用来判别 DMU 的规模收益情况：$\sum\lambda < 1$、$\sum\lambda = 1$ 和 $\sum\lambda > 1$ 分别表示规模效益递增、规模效益不变和规模效益递减；S^- 和 S^+ 分别表示为松驰变量和剩余变量。当 $\theta < 1$ 时，表明决策单元没有达到最优效率；当 $\theta > 1$ 时，说明决策单元达到最优效率。

1.1.2 Tobit 模型 通过 DEA 模型得到的生态效率，除了受所选投入产出指标影响，还受到其他因素的影响，为了测度 DEA 评估出的生态效率的影响因素以及其影响程度，Coellit[31] 于 1998 年在 DEA 分析的基础上衍生出了一种两步法（Two-stage Method）。该方法第一步采用 DEA 分析评估出决策单位的效率值，第二步以上一步中得出的效率值作为因变量，以影响因素等作为自变量建立回归模型。并由自变量的系数判断影响因素对环境效率的影响方向与影响强度 。

Tobit 模型如下：

$$
y_i = \begin{cases} y_i^* = x_i\beta + \varepsilon_i, & y_i^* \geqslant 0 \\ 0, & y_i^* \leqslant 0 \end{cases}
$$

式中：x_i 为自变量；y_i 为观察到的因变量；y_i^* 为潜变量；β 为相关系数；ε_i 为独立变量，且干扰项 $\varepsilon_i \sim N(0,\sigma^2)$。

1.2 评价指标选取及数据来源

生态效率的基本思想是在最大化价值的同时，最小化资源消耗和环境污染，意味着以最少的资源投入和最小的环境代价获得最大的经济价值。通常在实际运用中，将收益性指标作为产出指标，将成本指标作为投入指标体系来处理。

本文在选取地区工业生态效率评价指标时，从资源要素、环境要素、经济要素 3 方面考虑[9,20,27]，选择了能源、电力、水资源 3 类资源消耗指标，以及废气、废水、固废 3 类环境污染物排放作为投入指标，将经济价值作为产出指标，构建了工业生态效率评价指标体系（表 1）。其中投入产出指标数据来源于相关各年的《新疆维吾尔自治区统计年鉴》《新疆环境统计年鉴》以及各地州市统计年鉴。

表 1 工业生态效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of industrial eco-efficiency

指标	类别	具体指标	内容
投入指标	资源消耗	能源消耗	工业能源消费总量（10^4 t 标煤）
		电力消耗	工业用电消耗总量（10^8 kw·h）
		水资源消耗	工业用水总量（10^8 m^3）
	环境污染	废气排放	工业废气（10^8 m^3）
			工业二氧化硫（t）
			工业氮氧化物（t）
		废水排放	工业废水排放量（10^4 t）
			工业氨氮（t）
			工业化学需氧量（t）
		固废排放	一般工业固体废物（10^4 t）
产出指标		经济发展总量	工业生产总值（10^8 元）

2 实证结果分析

运用 DEAP 2.1 软件和 DEA-SOLVER PRO 软件，从时间和空间两方面对新疆 14 个地州市

表 2　2001—2015 年新疆工业生态效率值

Tab. 2　Industrial eco-efficiency values in Xinjiang from 2001 to 2015

模型	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
超效率 DEA 模型	0.73	0.61	0.64	0.82	0.96	0.96	0.88	1.28
CCR 模型	0.73	0.61	0.64	0.82	0.96	0.96	0.88	1.00
模型	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	平均值
超效率 DEA 模型	0.87	1.04	1.13	1.00	1.02	1.12	1.14	0.95
CCR 模型	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90

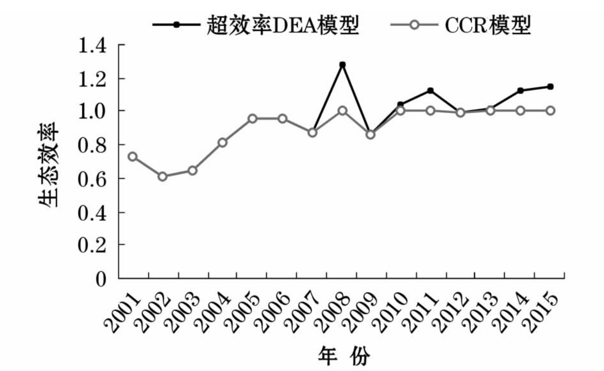


图 1　2001—2015 年新疆工业生态效率变动趋势

Fig. 1　The change trend of industrial eco-efficiency in xinjiang from 2001 to 2015

2001—2015 年工业生态效率进行分析,探讨其时空变动规律。

2.1　时间分布

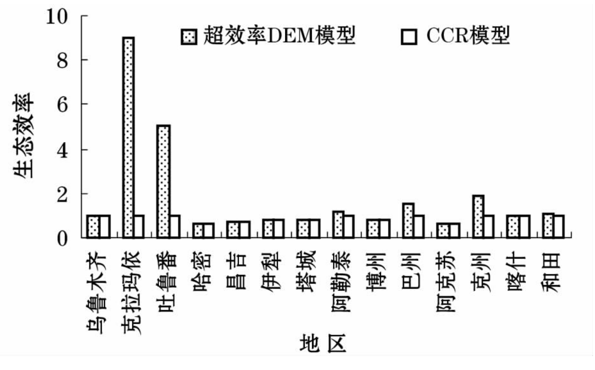
应用超效率 DEA 模型和传统的 DEA-CCR 模型测度 2001—2015 年连续 15 a 的新疆工业生态效率值,结果见表 2 和图 1。

(1) 通过超效率 DEA 模型和 CCR 模型比较分析可以得出,两种模型计算出的工业生态效率值在达到有效前沿面之前,即工业生态效率值小于 1.00 之前,测算值都是一样的,只是到了 1.00 以后,CCR 模型就成了定性分析,所有大于 1.00 的工业生态效率值都用 1.00 表示,显示已到有效生态前沿面,出现无法进一步排名和定量分析的缺陷,而超效率 DEA 模型很好地解决了这个问题,使得工业生态效率值在大于 1.00 以后仍然可以继续精确计量,便于排名和差距分析。从图 1 可以看出两条折线的区别,CCR 模型从 2010—2015 年呈一条直线状,而超效率 DEA 模型则明确地显示出几个峰值和差距。

(2) 由超效率 DEA 模型测算结果可知,自 2001—2015 年,工业生态效率总体平均值为 0.95,未达有效生产前沿面,但发展趋势良好,呈逐年波动上升趋势;由 0.61 增长至 1.28,环比增长率为 109.8%,其中经历了 2008 年、2011 年、2015 年峰值,城市工业生态效率值分别为 1.28、1.13 和 1.14。分析工业生态效率在 3 个五年计划中的变化趋势,发现该值从“十五”期间的 0.75 到“十一五”期间的 1.00、再到“十二五”期间的 1.08,一直处于稳步上升状态,尤其从 2010 年“十一五”末开始,生态效率一直稳定在 1.00 以上,保持在有效生产前沿面。说明新疆工业生态效率总体水平不高,但呈良好发展趋势,自 2001 年开始,通过一系列节能减排措施,通过 3 个五年计划逐步实现了经济增长和资源节约、环境保护的协调发展。

2.2　空间分布

2001—2015 年新疆 14 个地州市工业生态效率均值见图 2。与 CCR 模型相比,超效率 DEA 模型计算和测定工业生态效率值更加精准,有利于地区间排名和差距分析,以下均按照超效率 DEA 模型测定结果进行分析。



注:博州是博尔塔拉蒙古自治州简称,巴州是巴音郭楞蒙古自治州简称,克州是克孜勒苏柯尔克孜自治州简称。

图 2　新疆 14 个地州市工业生态效率

Fig. 2　Industrial eco-efficiencies in 14 prefectures, autonomous prefectures and cities in Xinjiang

2.2.1　测定结果　比较 14 个地州市工业生态效率值,最高为 8.97,最低为 0.59,两者相差 15.2 倍,平均值为 1.86,说明地区间工业生态效率存在不平衡

性。参考相关研究[27,32]，将 DMU 的生态效率值强度分为 3 类：一是工业生态效率大于等于 1，为生态前沿面有效地区。这类地区从高到低依次为克拉玛依市、吐鲁番市、克孜勒苏柯尔克孜自治州、巴音郭楞蒙古自治州、阿勒泰地区、和田地区，占 42.8%，这 6 个地区工业投入产出已达最优水平；二是工业生态效率在 0.9 和 1 之间，为边缘非效率地区。这类地区有乌鲁木齐市、喀什地区，占 14.3%，这些地区资源配置没有达到最优，有进一步提升的空间；三是工业生态效率小于 0.9，为明显非效率地区，这类地区有博尔塔拉蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、昌吉州、哈密市、阿克苏地区，占 42.8%。这类地区资源投入与产出失衡，需加强调整和治理。

2.2.2　地区间差距原因

（1）生态前沿有效地区：从工业生态效率高的地区分析，最高的是克拉玛依市，综合技术效率值为 8.97，其次为吐鲁番市，为 5.07，远远高于其他地区，剩下 4 个地区都在 1.0 ~ 2.0 之间。克拉玛依市是全国闻名的石油城，一、二、三产业结构比例为：0.82∶70.83∶28.35，之所以工业生态效率遥遥领先其他地区，主要原因是工业技术成熟、能耗低、污染物排放少，真正做到了节能减排，是新疆先进工业城市的代表。而工业生态效率值排名第二的吐鲁番市，2015 年工业产值 2.1×10^{10} 元，在新疆各地州市中位于中游水平，农业人口占 70% 以上，是个典型的农业地区。但近几年工业发展势头迅猛，其工业生态效率高的主要原因是节水措施实施成效显著，污水排放量仅为 0.38 $t\cdot(10^4$ 元$)^{-1}$工业 GDP，全疆最低。因其气候极度干旱，自古以来就是个极度缺水的地区，所以从政府到民众，自上而下都有极强的节水意识。还有克孜勒苏柯尔克孜自治州、和田地区、阿勒泰地区都是典型的农牧业区，只有少数的农副产品加工业，工业生产总值都不高，其中和田和克孜勒苏柯尔克孜自治州工业产值全疆倒数第一和第二，究其工业生态效率高的主要原因在于工业产业结构合理、能耗低、污染物排放量低。

（2）边缘非效率地区：工业生态效率接近 1.00 的地区有乌鲁木齐市和喀什地区。乌鲁木齐市作为新疆的首府，GDP 全疆排名第一，2015 年达 2.06×10^{11} 元，其工业生态效率均值为 0.99，“十二五”以来工业生态效率一直在持续提高，在节能减排上还有待进一步提高。喀什地区作为全疆农业和人口大区，近几年工业生态效率也在持续提高，但在节能、节水上还有很大提升空间。

（3）明显非效率地区：工业生态效率低于 0.9 的地区中，最低的是阿克苏地区、其次是昌吉州、哈密市、伊犁州，这些地区在节能、节水、减排上存在明显不足。

总体来说，工业发达的城市或地区，如克拉玛依市、乌鲁木齐市、昌吉州，需要在清洁生产和节能减排上进一步完善和提高；以农牧业为主的城市或地区，如克孜勒苏柯尔克孜自治州、阿勒泰地区、伊犁州、和田等地，需加大科技研发投入，强化节能增效力度。新疆是极度干旱缺水地区，节约水资源、加强水资源综合利用是提高工业生态效率的关键，无论工业化城市或地区，还是农牧经济占比较重的城市或地区，都要将节水放在第一位。

3　工业生态效率外部影响因素分析

本文参照相关研究[20,27]及新疆的实际，选取 6 项指标进行实证分析：① 经济发展水平（*PGDP*），用人均工业 GDP 衡量；② 对外开放度（*FIr*）：用外商投资比例衡量；③ 环境规划（*EIr*）：用环保治理投资占工业生产总值比例衡量；④ 科技创新（*RDr*）：用大中型企业研发投资占工业生产总值比例衡量；⑤ 工业结构（*HIr*）：用重工业比例衡量；⑥ 产业集聚（*IGr*）：用工业 GDP 占全国比重衡量。以上述 6 项指标作为自变量，以工业生态效率值为因变量，运用 Stata 软件进行了 Tobit 分析，建立如下回归方程：

$$ER=\alpha+\beta_1(PGDP)+\ln\beta_2(FIr)+\beta_3(EIr)+\ln\beta_4(RDr)+\ln\beta_5(HIr)+\beta_6(IGr)+\mu$$

式中：*ER* 表示工业生态效率，α 为常数项，β_i 为待估参数，μ 为随机误差，回归结果见表 3。

由表 3 可知，人均 GDP、研发支出比例、重工业比重、环保治理投资比例与工业生态效率呈正相关关系，其中前三者呈显著正相关；说明经济发展水平、科技创新、重工业比重对工业生态效率有明显促进作用，而环保治理投资比例也起到促进作用，但不明显，需要指出的是重工业比重对工业生态效率的促进作用明显，显然是经济效应大于污染物排放效应的结果，这与克拉玛依工业城的发展模式是一致的，说明只要处理好了经济发展和环境保护的关系，就可以协调发展。而外商投资比例、工业 GDP 占全

表 3　工业生态效率影响因素的 Tobit 回归分析一览表

Tab. 3　Tobit regression analysis on the factors affecting industrial eco-efficiency

解释变量	系数	标准差	Z 统计量	显著性水平
常数项	-3.408 6	0.182 6	-18.670	* * *
人均 GDP (*PGDP*)	0.005 6	0.002 6	2.110	*
外商投资比例(*FIr*)	-0.229 3	0.045 3	-5.058	* * *
环保治理投资比例(*EIr*)	0.932 4	1.635 6	0.570	
研发支出比例(*RDr*)	0.225 7	0.089 5	2.522	*
重工业比重(*HIr*)	2.137 8	0.333 1	6.419	* * *
工业 GDP 占全国比重(*IGr*)	-0.631 3	0.440 8	-1.432	

注:* * *、* *、* 分别表示 0.001、0.01、0.05 显著性水平。

国比重与工业生态效率呈负相关关系,其中外商投资比例与工业生态效率呈显著负相关,说明若引进落后外资企业或对环境影响不利的外资,对外开放对环境的影响是消极的,不利于工业生态效率的提高,这与贾军[33]的研究结果一致。

4　结束语

超效率 DEA 模型和 CCR 模型比较分析表明,超效率 DEA 模型计算和测定生态效率值更加精确,在大于 1.00 达到有效生产前沿面后,仍可以继续精确计量,有利于地区间排名和差距的定量化分析。

时间序列变化趋势显示,2001—2015 年,新疆工业生态效率整体呈波动式上升趋势;从“十五”的无效状态到“十一五”末稳定保持在有效生产前沿面以上,生态效率一直处于稳步上升状态,尤其是“十二五”期间,工业生产进入全新发展模式,实现了工业生产的稳定协调可持续发展,这主要得益于环境保护政策的落实和节能减排措施的实施。

空间差异性分析显示,新疆各地区间工业生态效率存在不平衡性,可分为两类:一类是工业发达的城市或地区,另一类是农牧业生产和加工为主的城市或地区。要使生态效率有明显的提升,前者需要对清洁生产和节能(节水)减排不断完善,后者则需要加大科技研发和推广力度,提高节能(节水)增效水平。

各种影响因素中,经济发展水平、科技创新、工业结构、环境规划与工业生态效率呈正相关关系,是促进因素,而对外开放度、产业集聚度与工业生态效率呈负相关关系,是抑制因素。因此,要提高工业生态效率,需进一步提高经济发展水平;加大企业技术研发和推广力度;加强环境规划和环境保护管理;择优引进外商投资。

总之,新疆是极度干旱缺水地区,节约水资源、提高水资源综合利用效率是提高工业生态效率的关键。

参考文献(References):

〔1〕 Schaltegger S, Sturm A. Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von kologieorientierten management instrumenten〔J〕. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273 - 290.

〔2〕 Verfaillie H A, Bidwell, Robin. Measuring Eco-efficiency: A guide to Reporting Company Performance〔M〕. Conches-Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2000.

〔3〕 戴铁军,陆钟武. 钢铁企业生态效率分析〔J〕. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(12): 1 168 - 1 173.〔Dai Tiejun, Lu Zhongwu. Analysis of the ecological efficiency of iron and steel enterprises〔J〕. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2005, 26(12): 1 168 - 1 173.〕

〔4〕 张炳,毕军,黄和平,等. 基于 DEA 的企业生态效率评价:以杭州湾精细化工园区企业为例〔J〕. 系统工程理论与实践, 2008, 4(4): 159 - 166.〔Zhang Bing, Bi Jun, Huang heping, et al. DEA-based corporate eco-efficiency analysis: Case study of chemical firms in Hangzhou gulf fine chemical industrial park〔J〕. Systens Engineering-Theory Practice, 2008, 4(4): 159 - 166.〕

〔5〕 杨红娟,张成浩. 企业生态效率的时空演变及其影响因素研究〔J〕. 昆明理工大学学报(社会科学版), 2017, 17(5): 55 - 62.〔Yang Hongjuan, Zhang Chenghao. Research on the spatio-temporal evolution of ecological efficiency and its influencing factors〔J〕. Journal of Kunming University of Science and Technology (Social Science Edition), 2017, 17(5): 55 - 62.〕

〔6〕 毛建素,曾润,杜艳春,等. 中国工业行业的生态效率〔J〕. 环境科学, 2010, 31(11): 2 788 - 2 794.〔Mao Jiansu, Zeng Run, Du Yanchun, et al. Eco-efficiency of industry sectors for China〔J〕. Environmental Science, 2010, 31(11): 2 788 - 2 794.〕

〔7〕 程翠云,任景明,王如松. 我国农业生态效率的时空差异〔J〕. 生态学报, 2014, 34(1): 142 - 148.〔Cheng Cuiyun, Ren Jingming, Wang Rusong. Spatio-temporal distribution of agricultural eco-efficiency in China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 142 - 148.〕

〔8〕 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000—2006 年省际数据为例〔J〕. 中国管理科学, 2008, 16(增刊 1): 566 - 570.〔Chen Ao. Empirical analysis of the evaluation of regional ecology efficiency and influential factors in China: Evidences from provincial data 2000 - 2006〔J〕. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(Suppl. 1): 566 - 570.〕

〔9〕 杨斌. 2000—2006 年中国区域生态效率研究——基于 DEA 方法的实证分析〔J〕. 经济地理, 2009, 29(7): 1 197 – 1 202. 〔Yang Bin. Research on regional eco-efficiency of China from 2000 to 2006: An empirical analysis based on DEA〔J〕. Economic Geography, 2009, 29(7): 1 197 – 1 202.〕

〔10〕 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 基于生态效率的城市可持续性评价及应用研究〔J〕. 环境科学, 2010, 31(4): 1 108 – 1 113. 〔Wang Wei, Lin Jianyi, Cui Shenghui, et al. Urban sustainability assessment based on eco-efficiency and its application〔J〕. Environmental Science, 2010, 31(4): 1 108 – 1 113.〕

〔11〕 Figge F, Hahn T. Sustainable value added-measuring corporate contributions to sustainability beyond eco-efficiency〔J〕. Ecological Economics, 2004, 48(2): 173 – 187.

〔12〕 Vogtländer J G, Bijma A, Han C B. Communicating the eco-efficiency of products and services by means of the eco-costs/value model〔J〕. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(1): 57 – 67.

〔13〕 Dahlström K, Ekins P. Eco-efficiency trends in the UK steel and Aluminum industries〔J〕. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 171 – 188.

〔14〕 Michelsen O, Fet A M, Dahlsrud A. Eco-efficiency in extended supply chains: A case study of furniture production〔J〕. Journal of Environmental Management, 2006, 79(3): 290 – 297.

〔15〕 Dyckhoff H, Allen K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA)〔J〕. European Journal of Operational Research, 2001, 132(2): 312 – 325.

〔16〕 黄晶, 马蓓蓓, 薛东前. 基于 SE-DEA 模型的西安市土地利用效率及优化对策〔J〕. 干旱区研究, 2015, 32(3): 630 – 636. 〔Huang Jing, Ma Beibei, Xue Dongqian. Research on land use efficiency and optimal strategies in Xi'an based on SE-DEA model〔J〕. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 630 – 636.〕

〔17〕 高峰, 王金德, 郭政. 我国区域工业生态效率评价及 DEA 分析〔J〕. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 318 – 321. 〔Gao Feng, Wang Jinde, Guo Zheng. Determination of evaluation indicators of China's regional industrial eco-efficiency and DEA analysis〔J〕. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(3): 318 – 321.〕

〔18〕 Huppes G, Davidson M D, Kuyper J, et al. Eco-efficient environmental policy in oil and gas production in the Netherlands〔J〕. Ecological Economics, 2007, 61(1): 43 – 51.

〔19〕 Hahn T, Figge F, Liesen A, et al. Opportunity cost based analysis of corporate eco-efficiency: A methodology and its application to the CO_2-efficiency of German companies〔J〕. Journal of Environmental Management, 2010, 91(10): 1 997 – 2 007.

〔20〕 卢燕群, 袁鹏. 中国省域工业生态效率及影响因素的空间计量分析〔J〕. 资源科学, 2017, 39(7): 1 326 – 1 337. 〔Lu Yanqun, Yuan Peng. Measurement and spatial econometrics analysis of provincial industrial ecological efficiency in China〔J〕. Resource Science, 2017, 39(7): 1 326 – 1 337.〕

〔21〕 汪东, 朱坦. 基于数据包络分析理论的中国区域工业生态效率研究〔J〕. 生态经济, 2011(4): 24 – 28. 〔Wang Dong, Zhu Tan. Study on regional industrial eco-efficiency in China based on DEA theory〔J〕. Ecological Economy, 2011(4): 24 – 28.〕

〔22〕 王震, 石磊, 刘晶茹, 等. 区域工业生态效率的测算方法及应用〔J〕. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 121 – 126. 〔Wang Zhen, Shi Lei, Liu Jingru, et al. Methodology and application of eco-efficiency analysis on regional industry〔J〕. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(6): 121 – 126.〕

〔23〕 吕明元, 安媛媛. 基于环境约束的工业生态效率实证分析——以山东省为例〔J〕. 山东财经大学学报, 2014(4): 43 – 49. 〔Lü Mingyuan, An Yuanyuan. An empirical study of industrial eco-efficiency based on environment constraints: A case study of Shandong Province〔J〕. Journal of Shandong University of Finance, 2014(4): 43 – 49.〕

〔24〕 刘源月, 辛勤, 马玉洁, 等. 2012 年四川省工业生态效率分析〔J〕. 成都大学学报(社会科学版), 2014(4): 27 – 31. 〔Liu Yuanyue, Xin Qin, Ma Yujie, et al. Analysis of industrial eco-efficiency in Sichuan Province in 2012〔J〕. Journal of Chengdu University (Social Science Edition), 2014(4): 27 – 31.〕

〔25〕 张卫枚, 方勤敏, 刘婷. 城市工业生态效率评价——以湖南省为例〔J〕. 城市问题, 2015(3): 62 – 66. 〔Zhang Weimei, Fang Qinmin, Liu Ting. Evaluation of urban industrial ecological efficiency: A case study of Hunan Province〔J〕. Urban Issues, 2015(3): 62 – 66.〕

〔26〕 刘巍, 田金平, 李星, 等. 基于 DEA 的中国综合类生态工业园生态效率评价方法研究〔J〕. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(5): 93 – 97. 〔Liu Wei, Tian Jinping, Li Xing, et al. Eco-efficiency assessment of eco-industrial parks in China with data envelopment analysis〔J〕. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(5): 93 – 97.〕

〔27〕 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. 〔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〔J〕. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(4): 169 – 175.〕

〔28〕 贾卫平. 循环经济模式下的新疆氯碱化工产业生态效率评价研究〔D〕. 石河子: 石河子大学, 2016. 〔Jia Weiping. Evaluation of Ecological Efficiency of Chlor-alkali Chemical Industry in Xinjiang under the Circular Economy Model〔D〕. Shihezi: Shihezi University, 2016.〕

〔29〕 Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units〔J〕. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429 – 444.

〔30〕 Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis〔J〕. Management Science, 1993, 39(10): 1 261 – 1 264.

〔31〕 Coelli T. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models〔J〕. Operations Research Letters, 1998, 23(3 – 5): 143 – 149.

〔32〕林锦彬,刘飞翔,郑金贵.我国山区县农业生态效率评价与改善研究——以福建大田县为研究区域〔J〕.科技管理研究,2015,35(23):59-63.〔Lin Jinbin,Liu Feixiang,Zheng Jingui. Evaluation and improvement on ecological efficiency of mountainous county in China:A case of Datian County in Fujian〔J〕. Science and Technology Management Research,2015,35(23):59-63.〕

〔33〕贾军.基于东道国环境技术创新的 FDI 绿色溢出效应研究——制度环境的调节效应〔J〕.软科学,2015,29(3):28-32.〔Jia Jun. Research on FDI green technology spillovers based on environmental technological innovation of Host Country from the prospect of moderating effects of institutional environment〔J〕. Soft Science,2015,29(3):28-32.〕

Industrial Eco-Efficiency in Arid Region Based on Super-Efficiency DEA Model: A Case Study in Xinjiang

ZHOU Xu-dong[1,2], LYU Guang-hui[1]

(1. *Institute of Drought and Ecological Environment Research, Xinjiang University, Urumqi* 830000, *Xinjiang, China*;
2. *Xinjiang Center for Ecological and Rural Environmental Protection, Urumqi* 830063, *Xinjiang, China*)

Abstract: Eco-efficiency is an effective measurement of sustainable development. Studies on the industrial ecological efficiency of Xinjiang, an ecological fragile arid region in China, are of important practical significance to promote the coordinated development of industry and ecological environment and achieve the goal of ecological civilization construction. In this study, the industrial panel data of Xinjiang from 2001 to 2015 were taken as the samples, the super efficiency DEA model was used to evaluate the ecological efficiency and its changes in 14 prefectures, autonomous prefectures and cities in Xinjiang Uygur Autonomous Region, and the Tobit regression model was used to analyze the factors affecting the industrial ecological efficiency. The results showed that: ① The overall level of industrial ecological efficiency in Xinjiang was not high, but the development trend was good. The industrial ecological efficiency was increased in a fluctuation way, and its comparative growth was 109.8%. It was increased from 0.75 during the Tenth Five-year Plan period to 1.0 during the Eleventh Five-year Plan period and further to 1.08 during the Twelfth Five-year Plan period; ② The industrial eco-efficiency in Xinjiang was imbalance, the highest and lowest values were 8.97 and 0.59, respectively, and their difference was 15.2 times; ③ The industrial eco-efficiency was positively correlated with the industrial development level, scientific and technological innovation, industrial structure and environmental planning, but negatively correlated with opening to the outside world and industrial agglomeration.

Key words: industrial eco-efficiency; super efficiency DEA model; Tobit regression; Xinjiang